

博士論文

独立空隙型人工軽量骨材を用いたコンクリートの
ワーカビリティに関する研究

Research on Workability of Concrete using Artificial Light-weight
Aggregate with Isolated Voids

2021年 3月

国立大学法人 横浜国立大学大学院
都市イノベーション学府

柳井 修司

Shuji YANAI

独立空隙型人工軽量骨材を用いたコンクリートのワーカビリティに関する研究

論文要旨

コンクリートには、まだ固まらない状態では、打込み・締固めに必要なワーカビリティが求められ、硬化した後には、設計で想定した強度・剛性および耐久性が求められる。このほかに、考慮すべき重要な性質として「重量」がある。コンクリート構造物は、鋼構造物に比べて重量が大きく、水圧・土圧などの外力や地震時の滑動・転倒に対する抵抗性、遮蔽性などで高い性能を発揮する。その一方で、重量に対する強度、すなわち比強度が小さいために、自重および地震時の慣性力が大きくなり、その結果として下部構造を増大する必要があること、基礎地盤の補強を増大する必要があること、部材の架設・設置の際の設備や支保工を強固とする必要があること、などのデメリットも多い。これらのデメリットを解決する方法の一つとして、コンクリート部材の軽量化が挙げられ、例えば、橋梁では、上部工の軽量化によって、下部工を縮小するなど、設計・施工の合理化が図られ、建設コストの削減にも寄与できる。さらに、既設構造物の部分的な補修・補強においても使用するコンクリートの軽量化により、設計上、施工上の課題を解決することもできる。

コンクリート部材の軽量化の手法としては、コンクリートの強度・剛性を増大させて部材を薄く、小さくする方法と、コンクリート自身を軽量化させる方法とがある。コンクリート自身を軽量化させる方法には、密度の小さい人工軽量骨材を利用する方法（軽量骨材コンクリート）と発泡剤でコンクリートを多孔質化させる方法（軽量気泡コンクリート：ALC）とがある。本研究では、前者の軽量骨材コンクリートに着目し、これまで先人が構築してきた技術をレビューした。そして、軽量骨材コンクリートの長年の課題である「凍結融解抵抗性を確保するために軽量骨材を低含水状態で練り混ぜ、圧送すると、骨材の加圧吸水によってコンクリートの流動性が損なわれ、配管の閉塞が生じる」という現象の解決に取り組んだ。具体的には、新たに開発された低吸水性を有する独立空隙型人工軽量骨材を、気中乾燥状態で施工に供するための配合選定技術と施工技術の構築である。圧送実験によって、骨材の加圧吸水と圧送性の関係を把握し、室内実験において、骨材の吸水と圧送に伴う流動性の低下を抑制する手法を研究した。そして、増粘剤ウェランガムを添加したうえで、単位水量、単位粗骨材量を適切に設定し、圧送前のスランプフローを500mm程度以上とすることで円滑な圧送と凍結融解抵抗性を両立できることを見出した。また、この流動性を高めた軽量骨材コンクリートについて様々な試験施工を行って、圧送、打込み・締固め、仕上げ作業における留意点を抽出し、新幹線高架橋など実構造物の構築に展開・活用した。

なお、普通骨材コンクリートでは、粗骨材とモルタルの密度差は、 $0.3\sim 0.4\text{g}/\text{cm}^3$ 程度であり、粗骨材の方がモルタルよりも重い。一方、軽量骨材コンクリートでは、粗骨材の方がモルタルよりも軽く、その密度差が $1.0\text{g}/\text{cm}^3$ を超えることもある。コンクリートの材料分

離は、構成材料の密度差によって生じるが、軽量骨材コンクリートの場合には、特にバイブレータによる高周波の振動締め固めによって材料分離、すなわち骨材の浮上りが顕著となり、硬化体としての均質性が著しく損なわれるリスクがある。凍結融解抵抗性と圧送性を改善した上記の軽量骨材コンクリートの実施工においても、打込みの間隔を小さくして流動距離を制限し、骨材の浮上り状況を目視確認しながら締め固め、仕上げ時には、打込み上面に浮き上がった軽量骨材をジッタバックで押し込むといった特別な配慮と入念な施工が必要であった。

そこで、さらに軽量コンクリートのワーカビリティを改善することを目指した。バイブレータの振動による軽量骨材の浮上りをなくし、部材を構築するコンクリートの均一性を高めることを目的に、振動締め固め作業を行わなくとも自重で充填する「自己充填コンクリート」に着目し、その実現を試みた。研究を開始した1999年頃は、「ハイパフォーマンスコンクリート」に代表される締め固めを不要とする自己充填コンクリートが、世の中に広まりつつある時代であった。使用される骨材は普通骨材であり、前述のとおり、モルタルとの密度差が比較的小さいものであった。これに対し、本研究は、モルタルとの密度差が 1.2g/cm^3 を超えるような、浮上りが生じやすい軽量骨材を対象とし、そのような条件であっても、骨材の浮上りを抑制し、高い流動性と材料分離抵抗性を兼ね備えた軽量自己充填コンクリートを実現しようとする先駆的なものであった。密度の異なる様々な独立空隙型人工軽量骨材を用いたコンクリートについて、新たに考案した試験方法で流動性や材料分離抵抗性を評価し、独自の配合設計手法を見出した。具体的には、使用する軽量粗骨材とモルタルの密度差に応じて、目標とする V_{75} 漏斗流下時間や500mmフロー到達時間を設定し、それを満足するように水粉体容積比をコントロールする手法である。これにより、密度差が大きくても軽量骨材の浮上りが生じず、型枠の隅々まで均質に充填する締め固め不要自己充填軽量骨材コンクリートを実現した。また、この手法を用いて配合設計したコンクリートを種々の既設構造物の補強に活用し、構造物の自重の増加を抑制することで下部工を含む基礎構造の補強を最小限にして、補強工事を完了させた。

人工軽量骨材を用いたコンクリートのワーカビリティに関する知見を取りまとめた本研究の成果は、新設構造物はもとより、補修・補強工事や大規模更新・大規模修繕工事に展開・活用できると考える。

目次

第1章 序論

1. 1	研究の背景と目的	1
1. 2	本論文の位置付け	5
1. 3	本論文の構成	6

第2章 人工軽量骨材コンクリートの発展の経緯と技術の現状

2. 1	はじめに	9
2. 2	国内における軽量骨材コンクリートの変遷	10
2. 3	軽量骨材コンクリートの性質	12
2. 3. 1	フレッシュコンクリート	12
2. 3. 2	硬化コンクリート	16
2. 3. 3	耐久性	20
2. 4	軽量骨材コンクリート有効に活用するために必要な技術	25

第3章 独立空隙型人工軽量骨材を用いたコンクリートの基本特性

3. 1	独立空隙型人工軽量骨材の品質	29
3. 2	独立空隙型人工軽量骨材を用いたコンクリートの性状	31
3. 2. 1	フレッシュコンクリート	31
3. 2. 2	硬化コンクリート	32
3. 3	まとめと本研究の方針	38

第4章 適切なワーカビリティを有する独立空隙型軽量骨材コンクリートの提案

4. 1	適切な圧送性の確保の必要性	39
4. 1. 1	圧送性を阻害する要因	39
4. 1. 2	事前圧送実験による課題の確認	40
4. 1. 3	骨材の加圧吸水の抑制に関する検討	48
4. 1. 4	圧送実験による加圧吸水抑制手法の検証	51
4. 1. 5	増粘剤ウェランガムと高性能 AE 減水剤の一液化	58
4. 1. 6	圧送性を確保する手法の提案	63
4. 2	適切な打込み・締固め・仕上げ方法	64
4. 2. 1	打込み・締固め・仕上げに際してのポイント	64

4. 2. 2	施工性確認実験① 橋梁上部工を模擬した部分供試体	64
4. 2. 3	施工性確認実験② 橋梁上部工1室箱桁セグメント	75
4. 2. 4	施工性確認実験③ 小規模橋台	83
4. 2. 5	打込み・締固め・仕上げのポイント	88
4. 3	まとめ	89

第5章 独立空隙型人工軽量骨材を用いた自己充填性を有する高流動コンクリートの提案

5. 1	自己充填性を有する軽量骨材コンクリートの必要性	91
5. 2	締固め不要を実現するための実験的検討	93
5. 2. 1	実験概要	93
5. 2. 2	実験結果および考察	97
5. 3	締固めを不要とする配合設計手法の提案	108
5. 4	まとめ	111

第6章 実構造物への適用

6. 1	独立空隙型人工軽量骨材コンクリートの現場適用	115
6. 1. 1	プレキャスト製品（ダム仮排水路閉塞工プレキャスト型枠）	115
6. 1. 2	鉄道高架橋（東北新幹線）	126
6. 2	締固めを不要とする人工軽量骨材コンクリートの現場適用	140
6. 2. 1	鋼ローゼ橋の耐震補強（アーチリブ充填）	140
6. 2. 2	鋼コンクリートサンドイッチ合成床版（試験施工）	150
6. 2. 3	支柱杭耐震補強（鋼殻補強コンクリート地盤改良工法）	155
6. 2. 4	その他特殊用途での軽量骨材コンクリートの利活用	163
6. 3	まとめ	172

第7章 結論

7. 1	本研究の成果	175
7. 2	今後の展望	179

謝 辞	181
-----	-----

付 録

本研究に関する主な発表論文，本研究に関するその他の発表論文，その他の執筆論文

第1章 序論

1. 1 研究の背景と目的

人工軽量骨材コンクリート（以下、軽量骨材コンクリート）は、その特性を熟知した技術者が適切な構造設計を行い、適切な配合を選定し、適切な施工を行うことで、所要の品質を有する硬化体となり、コンクリート構造物を構成する部材として活用される。その部材は、普通骨材コンクリートと同等の断面の場合に、軽量となることから、構造物全体の自重（死荷重）が低減され、地震時の慣性力や基礎地盤への負荷を小さくすることができる。そのため、構造物の高層化、長大化、大断面化に対応しやすく、より合理的な設計を可能にする材料である。さらには、部材の軽量化に伴う輸送や架設・設置の効率化、建設機械の小型化を可能とし、工程短縮も含めたトータルの建設コストの縮減にも寄与できる。

我が国での土木分野における軽量骨材コンクリートの使用は1950年代から始まり、1960年代には設計基準強度 40N/mm^2 の高強度軽量骨材コンクリートが適用されてきた¹⁾。しかしながら、軽量骨材は吸水率が大きく、圧送する際には、骨材出荷時のプレソーキングやコンクリートの練混ぜ前のプレウェットが必要となることや、凍結融解抵抗性に劣っていたことなどから、土木分野におけるその後の需要は低迷してきた。建築分野においても、高所への圧送性や価格競争力が課題となって、1972年をピークに出荷量の増加は見られない。しかしながら、その一方で、冒頭で示した軽量骨材コンクリートの「軽量性」の利点をうまく利活用することは、依然として求められ、高層建築物等の新設工事以外にも、昨今では、補修・補強工事や大規模修繕・大規模更新工事において、手当てが必要な部材のみを改修し、構造物全体の自重の増加を最小限に抑えることを可能にするために、なくてはならない材料として、改めて期待が寄せられていることも事実である。

軽量骨材コンクリートには、普通骨材コンクリートに対して、いくつかの課題が指摘されている。

①まず、フレッシュコンクリートの特性として、ポンプを用いた圧送におけるワーカビリティの確保が挙げられる。軽量骨材の内部には、多くの空隙が存在し、その空隙が水で満たされていない状態で圧送された場合には、骨材の加圧吸水に伴うコンクリートの流動性の低下が生じ、打込み時に安定したワーカビリティの確保が困難となる。この課題は、骨材のプレソーキングとプレウェットによって十分に吸水した骨材をコンクリートの練混ぜに供することで解決される。

②次に、硬化後の力学的特性として、骨材自身の強度が小さく 50N/mm^2 を超えるような高い圧縮強度には不向きであること、同一の圧縮強度の普通骨材コンクリートに対して、せん断強度や引張強度、ヤング係数が小さいことが挙げられる。ただし、この課題は、適切な鋼材配置はもとより、プレストレスを有効に活用したり、断面形状を工夫したりして補えば克服することが可能であり、「軽量性」を活かした構造とすることで、むしろ合理的で経済的な設計・施工が可能となる。

③耐久性については、中性化や塩害に対する抵抗性は、普通骨材コンクリートに比べて、大きな差異はない。ただし、普通骨材コンクリートよりも凍結融解抵抗性が劣ることが挙げられる。寒冷地での使用に際しては、特殊な配慮が必要となるが、エントレインドエアを適切に混入した上で、骨材の含水率が低い状態で練混ぜに供したり、後述する吸水率が小さい骨材を活用したり

することで、改善がなされる。

④体積変化については、乾燥収縮ひずみが小さくなるものの、クリープひずみがやや大きくなることが挙げられる。ただし、これらを適切に設計に反映させることで、問題なく構造物の設計・施工が可能となっている。

これらの課題と対策は、既に先人の研究者・技術者により解決がなされ、その知見が、土木学会「コンクリート標準示方書」¹⁾や日本建築学会「鉄筋コンクリート標準示方書・JASS 5」²⁾に反映され、各種指針とともに活用されて各種構造物の築造に役立てられている。

1980年代に入り、それまでの軽量骨材における課題を改善すべく、新しい軽量骨材の開発が始まり、1993年に製品として初めて出荷されたのが真珠岩を主原料とする「独立空隙型人工軽量骨材³⁾」である。この骨材は、それまでの軽量骨材の特徴であった連続した空隙構造を、材料の調合と製法の工夫により、骨材内部を微細で独立した空隙構造としたものである。これにより、骨材自身の高強度化と骨材の低吸水性化を実現し、軽量骨材コンクリートの50N/mm²を超えるような高強度領域での活用、凍結融解抵抗性が求められる寒冷地での活用といった、人工軽量骨材コンクリートの利活用の場を広げる技術として期待された。

本研究は、人工軽量骨材コンクリートの適切な利活用を促進するために実施したものである。大きくは、以下に示す(1)(2)の二つの内容を柱とし、(3)として研究で得られた知見を実構造物に適用し、研究成果を実証するとともに現場の課題解決に貢献した。

(1) 適切なワーカビリティを有する独立空隙型人工軽量骨材コンクリートに関する研究

独立空隙型人工軽量骨材を用いたコンクリートの基礎的な特性は、骨材製造会社の研究により明らかにされてきた。特に、凍結融解抵抗性に関しては、骨材のプレソーキングやプレウェットティングを行わないことで、飛躍的な改善効果が得られることが確認され、骨材を絶対乾燥状態あるいは気中乾燥状態で練り混ぜ、コンクリートを製造することがポイントとなった。こうして製造された独立空隙型人工軽量骨材コンクリートで実構造物を構築するためには、圧送性を含む適切なワーカビリティを付与する手法を確立しておく必要があった。

近年のコンクリート工事においては、コンクリートの場内運搬は、コンクリートポンプによる圧送が不可欠となっており、ブームを用いた圧送や配管を用いた圧送など、施工条件によって様々な圧送形態が採用される。一般に、コンクリートの圧送では、スランブが小さいもの、単位水量が小さいもの、水セメント比が小さいものほど、コンクリートポンプのピストン前面圧が大きくなり、配管の管内圧力が増大する。また、配管の水平換算距離が長いもの、圧送速度が速いものほど、ピストン前面圧、管内圧力が増大する。管内圧力は、コンクリートの性状に影響を及ぼし、管内でのブリーディングや粗骨材のロッキング現象のほか、軽量骨材コンクリートでは、骨材内部への加圧吸水が生じ、圧送中から圧送後に流動性が低下することが知られている。一般的な軽量骨材は、骨材内部に連通した空隙が存在するため、圧送中にその空隙にコンクリート中の自由水が入り込み、コンクリートの流動性の低下が生じることが知られている。そのため、軽量骨材のプレソーキングに加え、十分なプレウェットティングを行うことで対処している。一方、プレソーキングやプレウェットティングによる骨材中の水は、コンクリートの凍結融解抵抗性の低下を引き起こす要因となる⁴⁾。本研究で取り扱った「独立空隙型人工軽量骨材」を用いたコンクリートの最大の特徴は、骨材のプレソーキングやプレウェットティングを行わず、骨材内部に水を極力存在させない状態（以下、気中乾燥状態＝気乾状態）で練り混ぜ、施工に供することで、コンクリートの凍結融解抵抗性を確保しようとするところにある。

内部に水を含まない気乾状態の独立空隙型人工軽量骨材を用いたコンクリートの圧送性については未知な部分が多く、実構造物の適用に際しては、適切な圧送性を確保するための手法を確立しておく必要があった。本研究では、気乾状態の独立空隙型人工軽量骨材を用いたコンクリートの圧送負荷や、圧送中の骨材の吸水について検討を行い、圧送に適した配合の提案を行った。検討に際しては、まず、事前圧送実験を行って課題や骨材の加圧吸水現象を明らかにした。次に、骨材の加圧吸水抑制に関する検討を室内実験で実施し、圧送性を確保するための手法として、コンクリートの流動性を高めた上で増粘剤ウェランガムを添加することを考案・提案した。さらに、その手法を検証するための圧送実験を実施した。

また、提案した手法を反映させたコンクリートを対象に、様々な実規模部材の施工実験を行い、圧送はもとより、打込み、締固め、仕上げの観点から施工上の留意点を整理した。

(2) 自己充填性を有する独立空隙型人工軽量骨材コンクリートに関する研究

圧送性を高めた軽量骨材コンクリートは流動性が高く、軽微な振動締固めによって良好な充填性が得られる。これは、上記(1)で実現した手法であるが、バイブレータによる振動締固めによって、打込み上面に密度の小さい軽量骨材が浮き上がりやすく、特に型枠内での横移動距離が大きくなるとその現象が認められ、仕上げの際に、浮き上がった軽量骨材を内部に押し込む必要性も示された。骨材の浮上がりは、部材内の不均一性を生じさせることになる。そこで、この不均一性を解消し、より均一な硬化体を形成するためには、振動締固めに頼ることなく、密実に充填できる性質を付与することが必要となると考えた。人工軽量骨材を用いた自己充填性を有する高流動コンクリートの実現である。

自己充填性を有する高流動コンクリートは、そもそも、作業従事者・技能者の技量や施工の良否に拠らず耐久性の高いコンクリート構造物を構築することを目的として、研究開発がなされ、実用化されてきた⁵⁾。現在では、材料や配合の選定技術、施工技術が蓄積・進化され、広く一般的に使われるようになってきている。ただし、これまでの自己充填性を有する高流動コンクリートに使用される粗骨材は普通骨材であり、骨材とモルタルとの密度差は $0.3\sim 0.5\text{g/cm}^3$ 程度である。これに対し、本研究では、モルタルとの密度差が 1.2g/cm^3 を超えるような軽量骨材を対象とし、そのような条件であっても、骨材の浮上りを抑制し、高い流動性と材料分離抵抗性を兼ね備えた軽量自己充填コンクリートの実現を目指した。

我が国においては、自己充填性を有する高流動コンクリートの製造・供給体制における価格構造が障壁となって、その年間シェアは、全てのレディーミクストコンクリートの1%にも満たない。その用途は、高密度配筋部や閉塞空間等、締固めが困難な部位に限定されている。しかし、「自己充填性」は、構造条件や施工条件によっては必要不可欠な性質であり、締固めを必要とする通常のコンクリートでは実現しえない複雑な構造を実現し、狭小な断面、狭隘な施工条件においても、所要の性能を満たす部材・構造物の構築を可能にする。この「自己充填性」に加え、「軽量性」をコンクリートに付与することができれば、従来にない新しい構造や、狭小な部位を狭隘な条件で施工することを余儀なくされる補修・補強工事、更新工事において、自重の増加を抑制しつつ、合理的かつ均質にコンクリートの打込みを行うことができる。適切な凍結融解抵抗性が付与できれば、その活用の方はさらに広がる。

軽量骨材コンクリートに高流動性や自己充填性を付与に関する研究については、過去に数例の報告^{6),7)}がなされているものの、配合設計時の指標や流動性、充填性、材料分離抵抗性の目安となる指標は提案されていなかった。本研究では、密度の異なる数種類の軽量粗骨材を用い、水粉体容積比⁵⁾、モルタルの単位容積質量、軽量粗骨材の種類および単位量に着目して流動性、材料分離抵抗性、自己充填性を評価する各種試験を行い、使用材料や配合条件がフレッシュコン

クリートの性状に及ぼす影響について検討した。そして、これらの検討結果をもとに、密度が小さい軽量骨材を用いても、良好な材料分離抵抗性と高い流動性を有する自己充填コンクリートの配合設計手法を提案した。

(3) 研究結果を反映させた軽量骨材コンクリートの実構造物への適用

上記(1)、(2)の研究結果を実構造物に適用して、研究成果の実証を行うとともに、コンクリートの軽量化という現場の課題を解決した。そして、それらの適用結果を今後のコンクリート工事の参考となる知見として残すことを目的に、施工記録としてとりまとめた。具体的には、①独立空隙型人工軽量骨材を用いたコンクリートによるダム仮排水路プレキャスト埋設型枠、②独立空隙型人工軽量骨材を用いたコンクリートのポンプ施工により構築した新幹線高架橋、③自己充填性を有する軽量骨材コンクリートを補強用コンクリートとして適用した鋼ロゼアーチ橋、④道路床版の軽量化を目指した鋼コンクリートフルサンドイッチ床版、⑤モノレール高架橋基礎の耐震補強、⑥鉄道高架橋基礎の耐震補強のほか、⑦歩道橋公共デッキに用いた超高強度コンクリートの自己収縮低減対策である。

1. 2 本論文の位置付け

本論文でとりまとめる研究内容は、1998年から2002年にかけて集中的に取り組んだものである。ただし、2021年現在、本研究で取り扱った「独立空隙型人工軽量骨材」は、骨材製造会社の事業の見直しがあり、製造がなされていない。それでも今なぜ、軽量骨材コンクリートの研究をまとめるのか。それは、軽量骨材コンクリートの最大の特長である「軽量性」に期待されるものが、当時以上に、そして今後は今以上に大きくなっていくと考えたからである。

例えば、新設される構造物において、建築分野では、東京首都圏をはじめ大阪、名古屋、札幌などの都心部の再開発事業が活発になっており、高さ200mあるいは300mを超える超高層ビルの建築計画が数多く進められている。超高層ビルの上部では、部材の軽量化が必要不可欠であり、軽量骨材コンクリートの活用が必須である。また、土木構造物においても、橋梁上部工以外にも、日本国土を取り囲む海洋を有効に活用する浮体式構造物（浮き栈橋、浮体道路、防災基地、風力発電施設等）の計画が盛んに行われるようになっており、「軽さ」を求められる構造物への軽量骨材コンクリートの活用が、当然のように見込まれる。

また、高度経済成長期に建設されてきたインフラ構造物が、経年の物性変化により、徐々に機能が低下してきており、機能の維持あるいは回復が強く望まれるようになっている。特に、阪神淡路大震災をはじめとする幾多の自然災害の教訓や道路交通状況が想定以上の重交通となっている状況等から、設計で考慮する作用・外力の見直しや設計の考え方、それに基づく構造細目の見直しがなされ、機能は低下していても、今現在期待される性能を満たすことができない、いわゆる既存不適合な構造物が散見されるようになっている。それらの構造物は、今も供用が続けられているものがほとんどであり、現状の性能を正しく評価し、適切な処置（補強、改修）を行うことで、今後も十分に供用を続けることができる。補強や改修は、構造物に付与すべき性能に応じて、掛ける費用を最小限に抑える必要がある。そのためには、部分的な補強・改修が行われることになるが、補強・改修部分の重量の増加を抑制することができれば、他の部位の補強を最小限に収めることができる。補強・改修に使用される構造材料として、軽量骨材コンクリートが注目されるのは、至極当然の流れであり、そして、その部分の施工を行うためには、圧送性や自己充填性をはじめとする軽量骨材コンクリートのワーカビリティに関する知見が必要となる。

そこで、軽量骨材コンクリートのワーカビリティについて、これまでに取り組んできた研究内容を学位論文としてとりまとめ、軽量骨材コンクリートが、軽さを求められる新設構造物ならびに大規模修繕・更新分野に広く活用されることを期待した次第である。

1. 3 本論文の構成

本論文の構成は、以下のとおりである。

第1章 序 論

第2章 人工軽量骨材コンクリートの発展の経緯と技術の現状

第3章 独立空隙型の人工軽量骨材を用いたコンクリートの性質

第4章 適切なワーカビリティを有する独立空隙型軽量骨材コンクリートの提案

第5章 独立空隙型人工軽量骨材を用いた自己充填性を有する高流動コンクリートの提案

第6章 実構造物への適用

第7章 結 論

第1章では、本論文の研究の背景と研究目的について記すとともに、本論文の構成と研究内容の概要を記す。

第2章では、人工軽量骨材コンクリートの発展の経緯と技術の現状を概観する。

第3章では、従来の人工軽量骨材とは異なる製法で生産された独立空隙型軽量骨材とこれを用いたコンクリートの基礎的な特性に触れ、本論文の主題である、これを用いたコンクリートのワーカビリティに関する研究の方向性を記す。

第4章では、適切なワーカビリティを有する独立空隙型軽量骨材コンクリートならびにその施工方法の提案を行う。ポンプ施工に適した流動性の設定、圧送によって生じる軽量骨材内部への圧力吸水の抑制と材料分離抵抗性付与のための増粘剤の活用、これらの配合設計手法を反映した軽量骨材コンクリートの打込み、締固め、仕上げ方法について、室内ならびに実施工レベルでの実験的検討を行った結果を記し、これに基づいた提案を行う。

第5章では、第4章で課題として残った振動締固め伴う軽量骨材の浮上がりとそれに伴う不均一性を解消する技術として、振動締固めを行うことなく密実な充填性が得られる自己充填軽量骨材コンクリートに関する配合設計手法の提案を行う。軽量骨材の浮上りを評価する試験方法を考案し、密度の異なる軽量骨材を用いた種々のコンクリートの流動性と材料分離抵抗性を評価し、モルタルと粗骨材の密度差を考慮しつつ、コンクリートの粘性を調整する手法を提案する。

第6章では、4章、5章で得られた知見を反映し、実構造物の施工に適用した結果についてとりまとめる。独立空隙型軽量骨材コンクリートについて、プレキャスト埋設型枠ならびに鉄道高架橋に適用した事例を記す。また、自己充填性を有する軽量骨材コンクリートを既設構造物の補修・補強工事に適用した事例を記す。「軽量」という特長を有効に活用した構造を実現するための材料選定、配合設計、施工方法に、研究成果を反映させる。

第7章では、本研究で得られた結論を整理するとともに、新設構造物の建設や既設構造物の補修・補強における多様なニーズに対して、研究成果を反映させた軽量骨材コンクリートの活用や課題、将来の展望について述べる。

【参考文献】

- 1) 土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕〔施工編〕，2018.3
- 2) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事，2018.7
- 3) 土木学会：人工軽量骨材コンクリート設計施工マニュアル，コンクリートライブラリー第56号，1985.1
- 4) 日本建築学会：高強度人工軽量骨材を用いた建築物の設計と施工，1992.12
- 5) 岡村，前川宏一，小澤一雅：ハイパフォーマンスコンクリート，技報堂出版，1993.9
- 6) 河井徹，岡田武二：流動化した高強度軽量コンクリートの材料分離に関する一実験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.9，No.1，pp.235～240，1987.6
- 7) 河井徹，大野浩，小澤一雅，伊木崇：締固め不要・高強度軽量コンクリートの開発と適用，セメント・コンクリート，No.552，pp.32～43，1993.2.

第2章 人工軽量骨材コンクリートの発展の経緯と技術の現状

2. 1 はじめに

人工軽量骨材コンクリートは、我が国では、1960年代から用いられ、橋梁、海洋構造物、高層建物など、多くの構造物に使用されてきている。土木構造物の場合、1960年代に首都高速道路公団や日本国有鉄道を主として設計基準強度 40N/mm^2 の高強度軽量コンクリートが使用され¹⁾、その後、1977年のコンクリートバージC-BOAT500²⁾、1984年の北極海石油掘削プラットフォーム³⁾の構築に設計基準強度 45N/mm^2 の高強度人工軽量骨材コンクリートがそれぞれ適用されるまでに発展した。建築分野では、1980年代に入り、軽量骨材コンクリートの高強度化やさらなる軽量化が取り組まれ、日本建築学会「高強度人工軽量骨材コンクリートを用いた建築物の設計と施工」と題する調査研究をもとに、東京都庁や横浜ランドマークタワー、最近では、阿部野ハルカスといった超高層建築に活用されている。しかしながら、1990年代からは、北欧を中心に 60N/mm^2 クラスの高強度軽量コンクリートを用いた橋梁や浮体式プラットフォームが数多く建設され始め⁴⁾、今現在も様々な構造物に適用されている海外の状況⁵⁾とは対照的に、特に、土木構造物における軽量骨材コンクリートの国内需要は低迷しているのが実態である。

一方、高度経済成長期に築造されたインフラ構造物の中には、経年に伴う機能・性能が低下してしまったもの、あるいは、設計基準の変化に伴って既存不適格となったものが増えてきており、それらの構造物は、維持管理のフェーズから修繕・更新のフェーズへと徐々に移行しつつある。さらに、高速道路を始めとする主要なインフラが、大規模修繕・大規模更新を必要とされる時代に入り、すでにその事業が始まっている。そのような事業においては、既存の部位を有効に活用することが求められ、部材の自重を増加させることなく、性能を回復あるいはアップグレードすることが理想とされ、軽量骨材コンクリートの活用が有効となる。例えば、人工軽量骨材を使用した高強度軽量プレキャストPC床版⁶⁾が開発され、従来のRC床版に比べて25%、一般のプレキャストPC床版に比べて約20%の自重軽減が可能となっており、設計荷重変更への対応や幅員拡張による床版の死荷重の増加を抑え、既設の主桁や下部工への応力負担が軽減される。この特長を活かして、実際の工事での活用が始まっている。また、最近では、同じ目的で、超軽量高流動コンクリートを用いたサンドイッチ型複合床版の研究開発も進められている^{7)、8)}。このほかにも、下水処理場のリニューアル工事での軽量骨材コンクリートの活用に向けた取り組み^{9)、10)}もなされ、リニューアル市場のニーズに応えるべく、軽量骨材コンクリートの新たな活用が始まりつつある。さらには、新設される構造物においても、膨張材を混和した軽量骨材コンクリートで高耐久な道路床版を構築する試みとして、2015年に首都高速道路横浜北線新横浜付近の上部工（パイロット工事）への適用がなされ、その後さらなる検討が進められている^{11)、12)}。

このように、低迷していた軽量骨材コンクリートの需要に、新たな変化が生まれてはじめていく。現在の建設現場では、補修・補強、更新工事に限らず、新設の工事においても、構造条件や施工条件が複雑多岐にわたっている。コンクリートの施工に関しても、ポンプによる圧送や狭隘な環境の中での打込み・締固め作業を強いられることもあり、さらには、薄肉かつ高密度配筋といった複雑な部位を構築しなければならないことも多い。軽量骨材コンクリートにおいても違うことなく、種々の条件に応じたワーカビリティを有する軽量骨材コンクリートの配合設計技術、施工技術が求められることになる。

これらのことを踏まえ、本章では、軽量骨材コンクリート技術の現状と課題をとりまとめる。

2. 2 国内における軽量骨材コンクリートの変遷

我が国における構造用軽量骨材の変遷は、笠井ら¹³⁾によってとりまとめられている。我が国の軽量骨材コンクリートの研究は、1940年後半から1950年代は、天然軽量骨材を使用したコンクリートに関するものが中心であった。1955年に天然軽量骨材を対象とした製品規格として、JIS A 5002「構造用軽量骨材」が制定された。1960年代に入り、膨張頁岩系の人工軽量骨材が米国から技術導入され、1964年に国内で初めて製品としての販売が始まった。これに合わせ、建設省から住宅局指導課発令第180号「人工軽量骨材を使用する軽量コンクリートの構造設計基準」が制定され、日本建築学会 RC 基準では人工軽量骨材コンクリートの許容応力度の考え方が、JASS 5では施工標準が示された。土木分野においても、1964年の首都高速道路三宅坂の床版や国鉄高円寺駅のプラットフォームへの適用を皮切りに、研究と実績が積み重ねられた。そして、1966年に人工軽量骨材協会（ALA）が設立された。このように、1960年代は人工軽量骨材を軽量コンクリートに使用できる基盤づくりがなされた時代であった。

1970年代になると、1971年にJIS A 5002が改正され、人工軽量骨材が追加された。1973年には、住指発第769号「人工軽量骨材を用いる軽量コンクリートの使用基準」が制定された。また、1978年に建築学会が「軽量コンクリートの調査施工指針（案）」を制定し、人工軽量骨材およびこれを用いたコンクリートの品質基準が確立された。1970年代は人工軽量骨材の使用が本格化され、我が国の高度経済成長とともに、人工軽量骨材コンクリートが最も脚光を浴びた時代であった。

1980年代に入ると、1985年に建設省建築研究所において、人工軽量骨材を用いたコンクリートの圧縮強度36~50N/mm²クラスの物性試験や1986年に実施された24~27N/mm²クラスの構造部材実験により、高強度軽量コンクリートの基礎データが蓄積された。また、1985年には、土木学会からコンクリートライブラリー第56号「人工軽量骨材コンクリート設計施工マニュアル」が刊行され、広く活用できる土壌が整った。1980年代は、人工軽量骨材の新たな用途拡大に向けられた時代であった。

1990年代になると、高強度軽量コンクリートの構造実験が進められ、研究成果をまとめたものとして、1992年に日本建築学会から「高強度人工軽量骨材を用いた建築物の設計と施工」が出版された。1996年には日本建築学会 JASS 5の改定により、軽量1種コンクリートの設計基準強度の最大値が36N/mm²まで引き上げられた。一方、新しい軽量骨材の開発がなされ、膨張頁岩、耐火石、真珠岩、さらには、石炭灰を主原料とする各種軽量骨材が商品化された。1990年代は、新しい軽量骨材が誕生し、これを活用するための研究開発がなされた時代であった。

2000年代に入ると、2000年に、日本コンクリート工学協会（現、日本コンクリート工学会）主催の「軽量コンクリートの性能多様化と利用の拡大」に関するシンポジウムが開催され、軽量骨材コンクリートの活用と発展に多くの期待が寄せられた。ただし、図-2.2.1に示すように、2001年以降は、コンクリートの需要低迷とともに軽量骨材コンクリートの需要も低迷しているのが実態である¹⁴⁾。

しかしながら、近年、建築分野では、都心部を中心とした再開発事業が数多く計画され、250mを超える超高層ビルの建築計画が活発に行われている。また、土木分野においては、大規模更新・大規模修繕事業が本格化してきており、軽量骨材コンクリートの需要は、今後、高まっていくものと期待される。

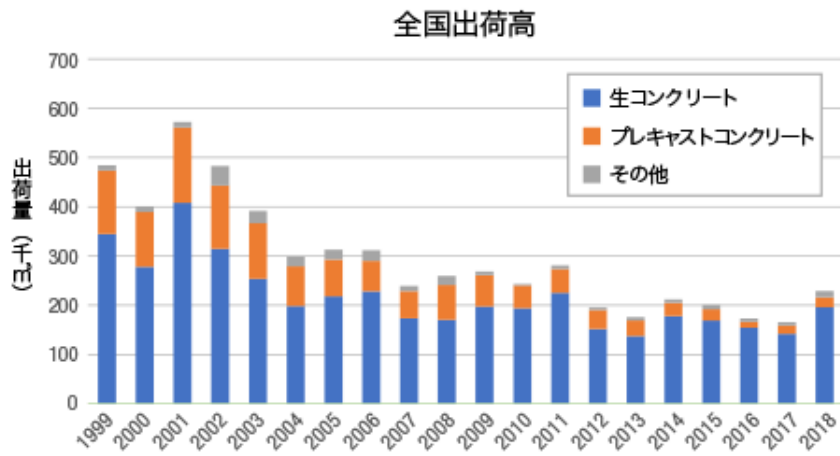


図-2.2.1 軽量骨材コンクリートの全国出荷量の推移¹⁴⁾

2. 3 軽量骨材コンクリートの性質

軽量骨材コンクリートの基本的な性質については、土木学会「コンクリート標準示方書」や日本建築学会「鉄筋コンクリート標準示方書・JASS 5」に記載され、土木学会コンクリートライブラリー第56号「人工軽量骨材コンクリート設計施工マニュアル（1985年）」や日本建築学会「高強度人工軽量骨材を用いた建築物の設計と施工（1992年）」といった指針類にも基礎データが掲載されている。また、人工軽量骨材（ALA）の技術資料には、最新の情報が集約されている。本章では、軽量骨材コンクリートのフレッシュコンクリートの性質、強度性状、変形性状、耐久性について、改めてレビューする。

2. 3. 1 フレッシュコンクリート

（1）流動性

フレッシュコンクリートの性質は、コンクリートの配合および骨材の含水状態によって大きく異なる。一般的な軽量骨材は吸水率が大きく、絶乾あるいは気乾状態で使用すると骨材の吸水によってコンクリートの流動性の低下が生じ、時間経過や圧送を含む運搬によって、打込み時に安定したワーカビリティ・ワーカビリティを得ることが困難となる。このため、骨材内部の空隙を予め水で十分に満たした状態で、コンクリートの練混ぜに供する。友澤ら¹⁵⁾は、水セメント比35%、45%の流動化コンクリートを対象として、軽量骨材コンクリート1種および2種ならびに普通骨材コンクリートのスランプの経時変化を測定している。プレソーキングした軽量骨材を用いることで、普通骨材コンクリートとほぼ同等のスランプの変化となることが示されている。また、榊田ら¹⁶⁾も高性能 AE 減水剤を用いた水セメント比30~45%の配合で、プレソーキングした軽量粗骨材を用いたコンクリートと、普通骨材コンクリートのスランプの経時変化を測定し、両者で差がないことを示している。骨材内部の空隙を水で満たしておけば、普通骨材コンクリートと同様のワーカビリティ・ワーカビリティが得られる。

（2）圧送性

軽量骨材コンクリートを圧送する場合、圧力によって骨材内部への吸水が生じるという課題があり、注意が必要である。これについては、多くの研究がなされ、軽量骨材の吸水率を予め高くしておけばその影響が少なく、高性能 AE 減水剤や流動化剤の使用によって、圧送前の流動性を高めておくことで、一般的な圧送条件であれば、問題なく圧送性を確保できる。軽量骨材の製造会社は、製造段階で強制吸水させた（プレソーキング）状態で骨材を出荷し、生コンクリート工場は、その吸水状態を保持するために骨材への散水や浸水を行って（プレウェットティング）、骨材内部の空隙を予め水で満たしておくことが重要となる。圧送前後のスランプの測定結果の例¹⁷⁾を図-2.3.1に示すが、プレソーキングとプレウェットティングを行い、圧送前のスランプを15cm程度以上とすることで、圧送後のワーカビリティ・ワーカビリティを確保できることが示されている。また、圧送計画は、図-2.3.2に示す管内圧力損失¹⁷⁾を用いることで、立案することができる。

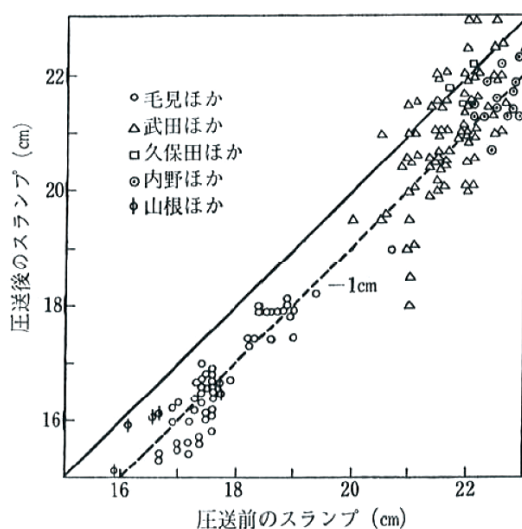


図-2.3.1 圧送前後のスランプの調査例¹⁷⁾

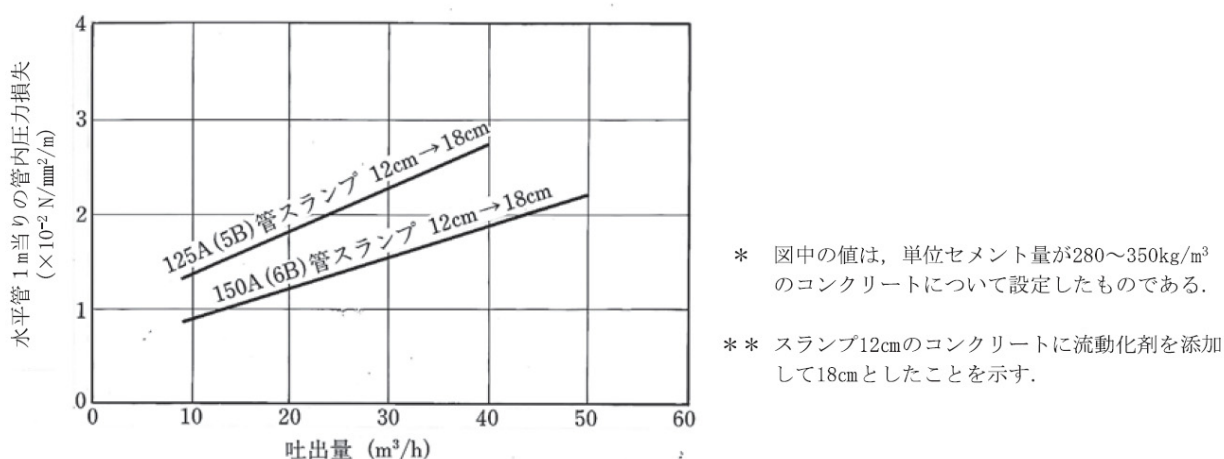


図-2.3.2 軽量骨材コンクリートの管内圧力損失¹⁷⁾

(3) 打込み・締固め・仕上げ

普通骨材コンクリート同様に、コンクリートを横流しすると骨材が分離して、豆板の原因になりやすい。特に、流動先端部において軽量骨材の浮き上がりが顕著となるため、打込み位置を細やかに移動して水平に打ち上げる必要がある。

締固めについても、普通骨材コンクリートと同様に、バイブレータを用いて材料が分離しない範囲で入念に行う。軽量骨材コンクリートの場合には、振動伝達範囲が小さく、挿入間隔を小さくする必要がある。また、バイブレータを過度に使用すると軽量粗骨材がモルタルと分離して打込み上面に過剰に浮き上がることがあるので、注意が必要である。

仕上げについても、普通骨材コンクリートと同様、打込み・締固めが完了したら、木ごてまたは定規で均す。コンクリート表面に浮き出た軽量粗骨材は、ブリーディングが収束し、ブリーディング水を除去した後に、ジッターバッグ（鉄網のついている突き道具：図-2.3.3）¹⁸⁾を用いたタンピングや木ごて押さえによって、モルタル内部に押さえ込むようにし、平滑に仕上げる。その後、コンクリートの硬化の時期を判断して金ごてやフィニッシャで仕上げる。

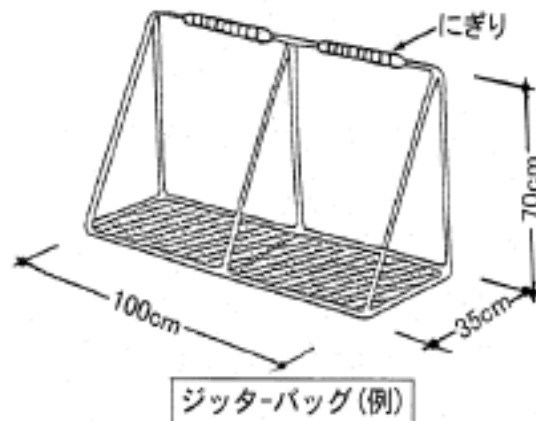


図-2.3.3 ジッターバッグ¹⁸⁾

(4) 高流動性・自己充填性

本研究を実施した1999年頃までに、軽量骨材コンクリートにスランプフローが600mmを超えるような高い流動性を付与するための取り組みは、主に建築分野を中心になされていた。例えば、山本ら¹⁹⁾は、高性能AE減水剤を適切に選定することで、経時変化の少ないスランプフロータイプの軽量骨材コンクリートが得られることを示している。また、小山らは²⁰⁾、高炉スラグ微粉末や分離低減剤を混和して、V漏斗試験や鉄筋通過試験を行ってフレッシュ性状を評価し、流動性・充填性に優れた軽量骨材コンクリートの実現性を示している。ただし、これらの研究では、軽量骨材コンクリートの流動性を高めることに主眼がおかれ、骨材の浮上がりで代表される材料分離に関する定量評価には言及がなされていない。一方、国内土木分野においては、河井ら²¹⁾の研究により、高流動性を有する軽量骨材コンクリートの基礎研究が行われ、1992年には、ゴルフ場内の歩道橋として建設された3径間PC連続斜張橋の中央径間主桁に設計基準強度40N/mm²の締固め不要・高強度軽量コンクリートが適用されている²²⁾。その基礎研究では、流動性を高めた軽量骨材コンクリートを打ち込んだ際の、高さ方向や水平流動方向の骨材分布を評価し、材料分離に言及がなされ、スランプフローが65cmを超えると材料分離が顕著になることが示されている。また、実施工においては、練混ぜから運搬における骨材の吸水量と高性能減水剤の厳密な管理を行いながら、バケットによるコンクリートの運搬が採用された。このような取り組みがなされたものの、流動性を高めた自己充填性を有する軽量骨材コンクリートの材料分離を抑制するための考え方や配合設計指標の提案を示すには至らず、また、その後の実構造物への展開も進んでいない状況であった。これらを改善すべく1999年頃に取り組んだのが、本研究の第5章である。なお、第5章の人工軽量骨材を用いた自己充填性を有する高流動コンクリートに関する研究を取りまとめた論文²³⁾は、当時、世界でも先駆的であり、Journal of Advanced Concrete Technology State-of-the-art 「Lightweight Aggregate Self-Compacting Concrete」²⁴⁾に、最初の論文として以下のように紹介されている。

Yanai et al. (1999) first studied the influence of the type and proportions of lightweight aggregates – LWA (namely, artificial perlite of various densities and coal ash), and of the water-to-powder volume ratio on the self-compactness, strength characteristics and durability (resistance in freeze-thaw cycles) of LWASCC. The results of the study showed that concrete could be endowed with excellent flowability,

self-compactness and segregation resistance by adjusting the unit quantity of LWA and water-to-powder volume ratio according to the properties of LWA. It was observed that the use of high-density LWAs resulted in the increase of both the mixtures' flowing and filling abilities and their compressive strengths. This was attributed to the minimization of the density difference between aggregates and paste.

その後、現在に至るまでに、軽量骨材コンクリートの自己充填性付与に関する研究が進められ、国内では、2000年には、小林²⁵⁾により、流動性や自己充填性は良好であっても、骨材の浮上が生じている場合があり、配合設計時の注意が提起され、2008年には、谷口ら²⁶⁾により、粗骨材に軽量骨材を用いた粉体系ならびに増粘剤系の高流動コンクリートの実現性を示す研究報告がなされた。また、2010年には、水越ら²⁷⁾によって、水セメント比を30%程度まで低減した上で鋼繊維を混入し、高強度化とひび割れに対する抵抗性を付与した高流動軽量コンクリートの実験的研究も行われている。また、海外でも同様に様々な自己充填性を有する軽量骨材コンクリートに関する研究開発がなされている^{28) ~30)}。

2. 3. 2 硬化コンクリート

軽量骨材コンクリートの力学的特性については、人工軽量骨材（ALA）協会が発行している技術資料³¹⁾に詳しくまとめられている。ここでは、本研究の主な対象となる圧縮強度が40N/mm²以上の軽量骨材コンクリートについて述べる。

(1) 圧縮強度

図-2.3.4に水セメント比と圧縮強度の関係の例を示す³²⁾。軽量骨材コンクリートの圧縮強度は、同じ水セメント比の普通骨材コンクリートに比べてやや小さく、その傾向は骨材の単位量が多いほど、また、単位容積質量が小さいほど顕著になる。軽量骨材コンクリートの圧縮強度は、普通骨材コンクリートと同様に、水セメント比が小さくなるほど増大するが、水セメント比が40%程度以下になると、水セメント比の低下に対する圧縮強度の増加の割合が普通骨材コンクリートに比べて小さくなることが知られている。

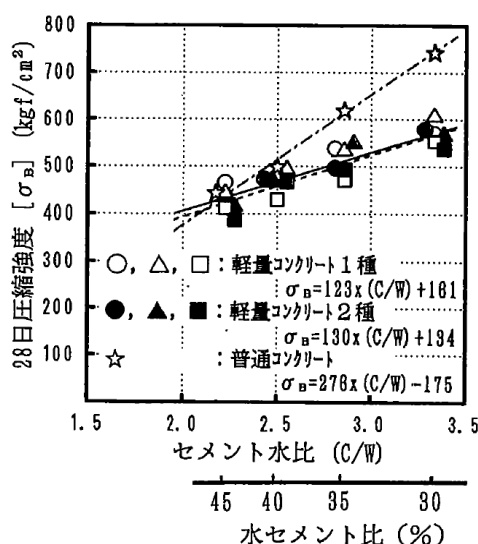


図-2.3.4 水セメント比と圧縮強度の関係³²⁾

(2) 引張強度および曲げ強度

図-2.3.5に圧縮強度と割裂引張強度の関係の例³²⁾を示す。割裂引張強度の圧縮強度に対する比率は普通骨材コンクリート、軽量骨材コンクリートとも圧縮強度の1/10～1/15の範囲にあり、高強度になるほど小さくなる傾向を示す。

なお、土木学会「人工軽量骨材コンクリート設計施工マニュアル」（1985.6）では、引張強度の圧縮強度に対する比率のおよその範囲として、普通骨材コンクリートで1/9～1/13、軽量骨材コンクリートで1/9～1/15と記されている。

図-2.3.6に圧縮強度と曲げ強度の関係の例³²⁾を示す。軽量骨材コンクリートの曲げ強度の圧縮強度に対する比率はほぼ1/7～1/10程度の範囲にあり、普通骨材コンクリートの1/6～1/9に比べて若干小さい値を示す。また、その比率は、割裂引張強度と同様に、高強度になるほど小さくなる傾向を示す。

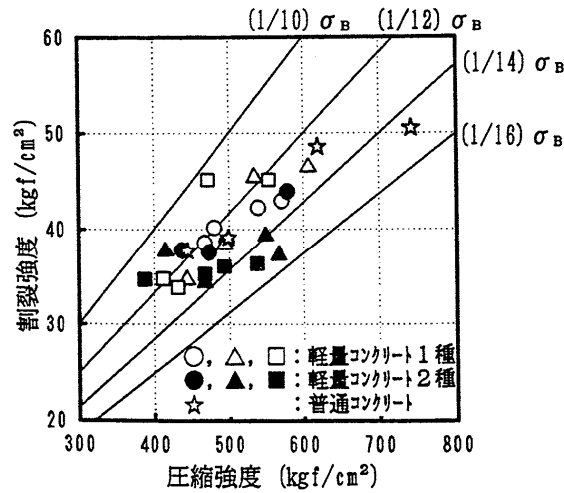


図-2.3.5 圧縮強度と割裂引張強度の関係³²⁾

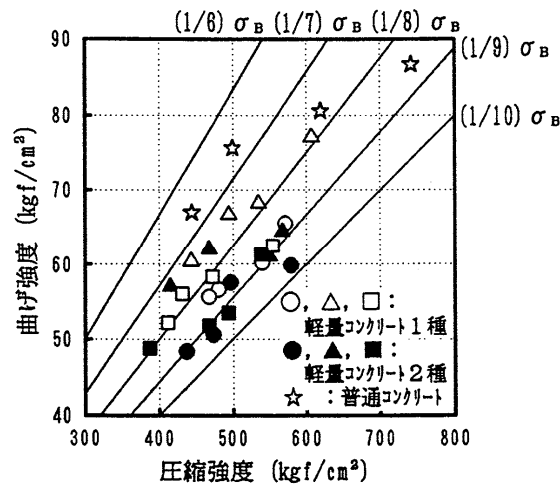


図-2.3.6 圧縮強度と曲げ強度の関係³²⁾

(3) ヤング係数およびポアソン比

軽量骨材コンクリートのヤング係数は使用する骨材の組合せ，コンクリートの単位容積質量，圧縮強度に影響を受けるが，図-2.3.7に示すとおり³²⁾，日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説—許容応力度設計法」³³⁾に示された式で概ね求めることができる。軽量骨材コンクリート1種のヤング係数は，同一圧縮強度において，普通骨材コンクリートの30~40%小さい値となっている。

軽量骨材コンクリートのポアソン比は，0.20~0.21程度であり，普通骨材コンクリートと同程度である。

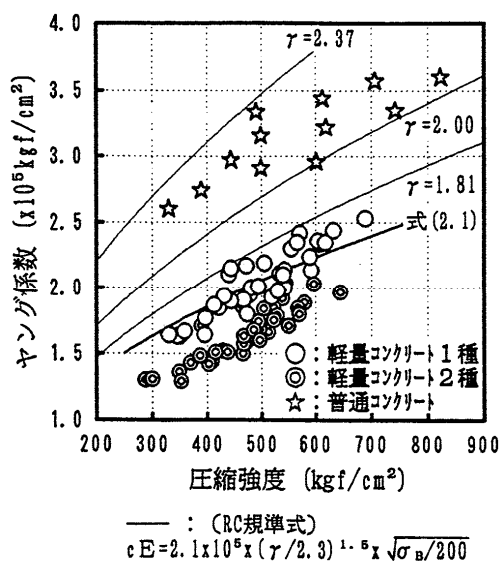


図-2.3.7 圧縮強度とヤング係数の関係³²⁾

(4) 乾燥収縮およびクリープ

図-2.3.8に軽量骨材コンクリートの乾燥収縮の測定結果の例³⁴⁾を示す。軽量骨材コンクリートの最終的な乾燥収縮ひずみは普通骨材コンクリートに比べて若干小さいことが報告されている。

軽量骨材コンクリートのクリープひずみは、使用する骨材の種類、コンクリートの配合、荷重条件および環境条件等によって大幅に異なり、一般には普通骨材コンクリートと同等かやや大きい。しかし、弾性ひずみが大きいので軽量骨材コンクリートのクリープ係数は普通骨材コンクリートより小さい値の1.0~2.0を採用してよいとされている³⁴⁾。図-2.3.9に圧縮強度の1/3の応力を載荷した圧縮クリープ試験の結果の例³⁴⁾を示す。

全ひずみから収縮ひずみを差し引いたクリープひずみを比較すると、密閉状態でのクリープひずみは普通骨材コンクリートに比べて軽量骨材コンクリートの方が若干小さい。しかしながら、自然乾燥状態では軽量骨材コンクリート1種は普通骨材コンクリートよりも大きくコンクリートの種類によって相違がみられる。

クリープひずみを載荷時の弾性ひずみで除したクリープ係数を比較すると密閉状態では普通骨材コンクリートに比べて軽量骨材コンクリートの方が小さい。また、自然乾燥状態では、軽量骨材コンクリート1種と普通骨材コンクリートとは大差はない。クリープひずみを載荷時の応力で除した単位クリープひずみを比較すると密閉状態ではコンクリートの種類による差はない。乾燥状態では、軽量骨材コンクリート1種は普通骨材コンクリートよりも若干大きい値を示す。また、この例では、軽量骨材コンクリートはクリープひずみ、クリープ係数、単位クリープひずみ、いずれにおいても、水セメント比が小さいものほどそれらの値は小さくなる傾向を示している。

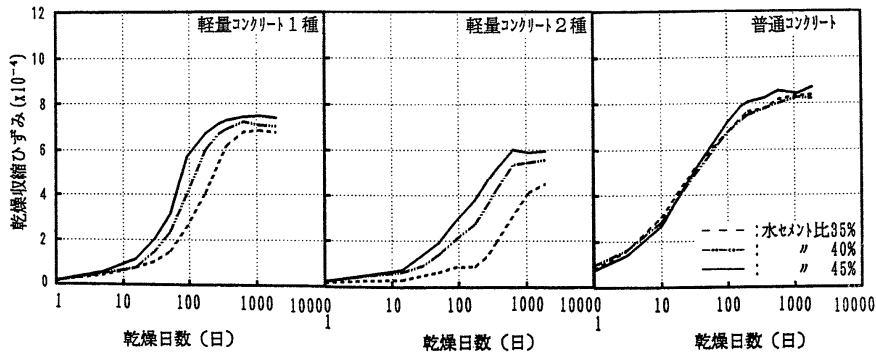
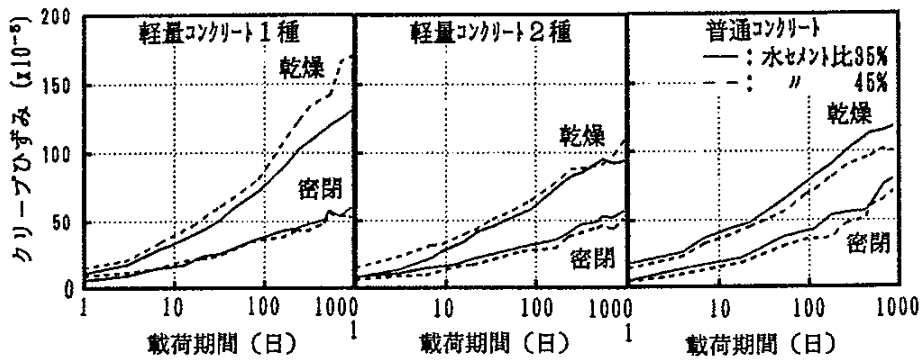
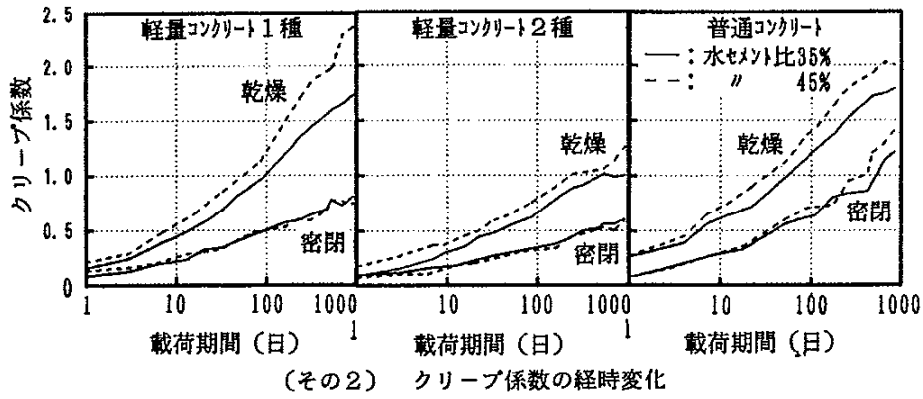


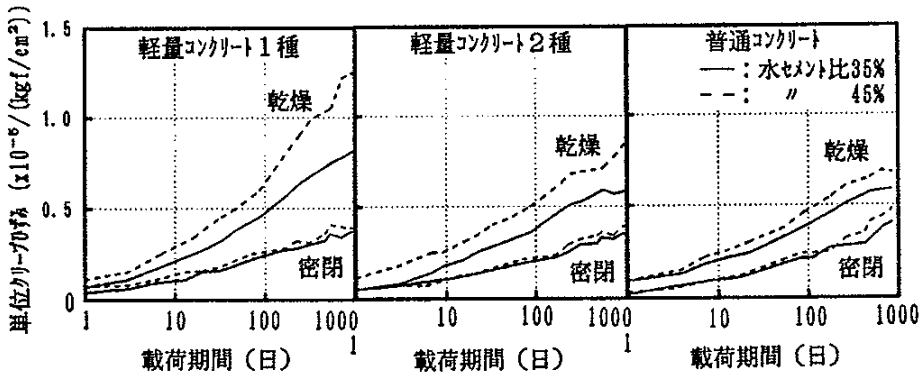
図-2.3.8 乾燥収縮試験の結果の例³⁴⁾



(その1) クリープひずみの経時変化



(その2) クリープ係数の経時変化



(その3) 単位クリープひずみの経時変化

図-2.3.9 クリープ試験の結果の例³⁴⁾

2. 3. 3 耐久性

(1) 中性化

図-2.3.10 に促進中性化試験（温度 30°C，湿度 60%，炭酸ガス濃度 5%）の結果の一例²⁷⁾を示す。水セメント比が 40%以下の軽量骨材コンクリートの中性化深さは、促進期間 4ヶ月までは普通骨材コンクリートよりも小さく、4ヶ月～8ヶ月においては普通骨材コンクリートと同等であることが報告されている。水セメント比が 40%以下では、中性化に及ぼす軽量骨材の影響は小さい。

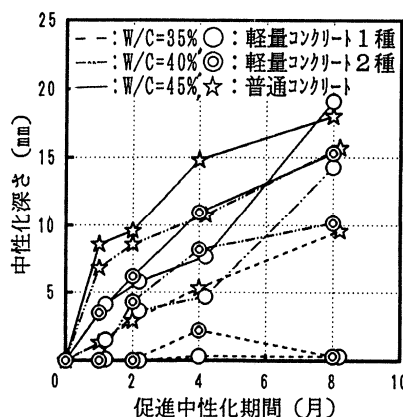


図-2.3.10 促進中性化試験の結果の例³⁴⁾

(2) 凍結融解抵抗性

一般に軽量骨材コンクリートの凍結融解抵抗性は、普通骨材コンクリートに比べて低い。しかしながら、吸水率の小さい骨材を使用する、コンクリートの空気量を普通骨材の場合より大きくする、コンクリート中の全水量を小さくする、人工軽量骨材を絶乾状態で使用する、コンクリート製造時に分割混練方法（軽量骨材表面にセメントペースト皮膜を作った上で、残りの材料を投入し、コンクリートを練混ぜる方法）を採用する、等によって、軽量骨材コンクリートの凍結融解抵抗性を改善できることが報告されている。一例として、軽量骨材の含水率とシリカフューム混入率を変化させた場合の高強度軽量コンクリートの凍結融解試験の結果を図-2.3.11 および図-2.3.12 に示す³⁵⁾。骨材含水率を小さくし、結合材にシリカフュームを 10%混入することで凍結融解抵抗性が大幅に改善されることが示されている。

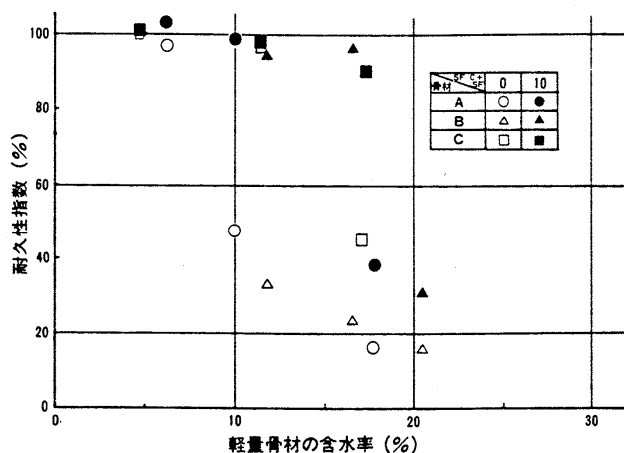


図-2.3.11 軽量骨材の含水率と耐久性指数³⁵⁾

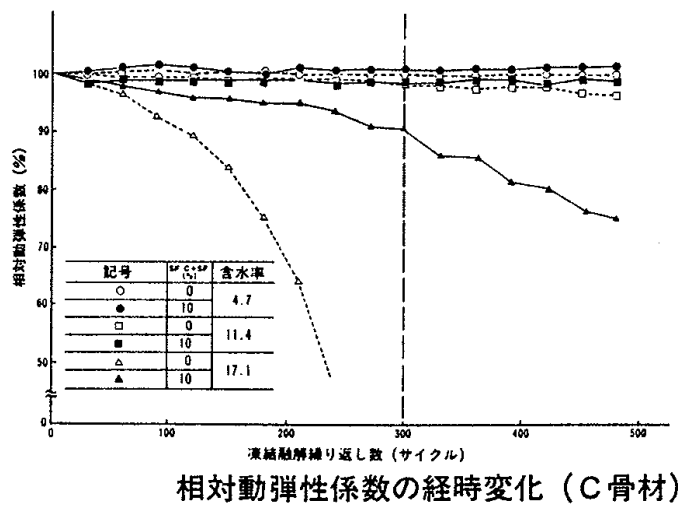
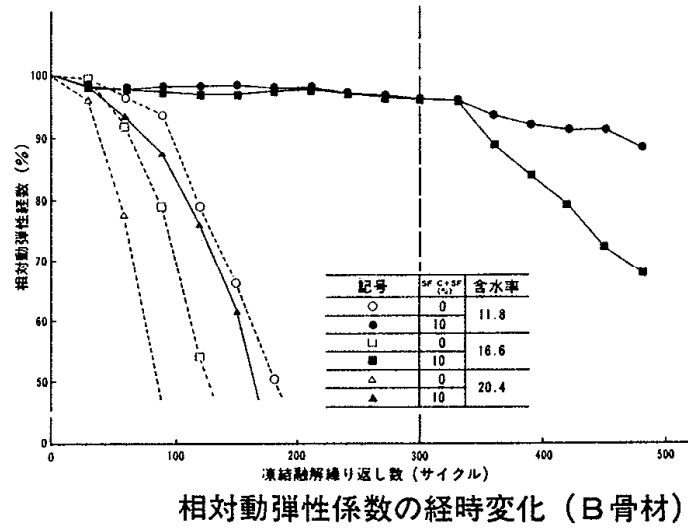
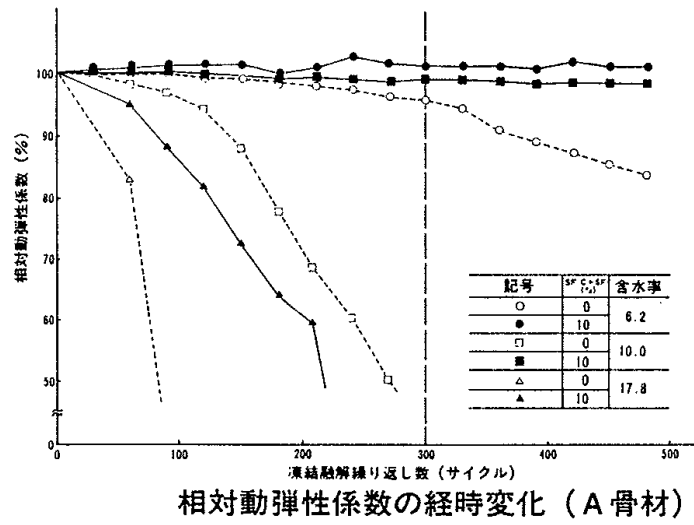


図-2.3.12 相対動弾性係数の経時変化³⁵⁾

(3) 塩化物イオンに対する浸透抵抗性

軽量骨材コンクリートの塩化物イオンの浸透抵抗性は、西ら³⁶⁾や杉山ら³⁷⁾によって、同一水セメント比であれば、普通骨材コンクリートとほとんど差がなく、むしろ軽量骨材コンクリートの方が高いことが示唆されている。図-2.3.13は、設計基準強度 24N/mm^2 を想定したコンクリートの塩化物イオン浸透深さの比較である¹⁾。同一圧縮強度を得るために必要な水セメント比が異なるものの、軽量骨材コンクリートは、普通骨材コンクリートに比べて塩化物イオンの浸透に対する抵抗性が高い結果となっている。また、土木学会「人工軽量骨材コンクリート設計施工マニュアル」でも、実施工された栈橋ケーソンと同時に沈設した軽量骨材コンクリートの塊の分析では、スプラッシュゾーンでコンクリート表面に近い部分では、軽量骨材コンクリートの塩分量は普通骨材コンクリートよりも多くなっているが、深部になるほど塩分量が少なくなり、コンクリート表面から5cm以上深い部分については、逆に普通骨材コンクリートよりも塩分量が少なくなっていたことが示されている。軽量骨材中の浸透圧の関係で塩分が吸着される、あるいは、骨材の保水がよいことからコンクリートを湿潤状態に保って塩分浸透を抑制する効果があると推察されている。

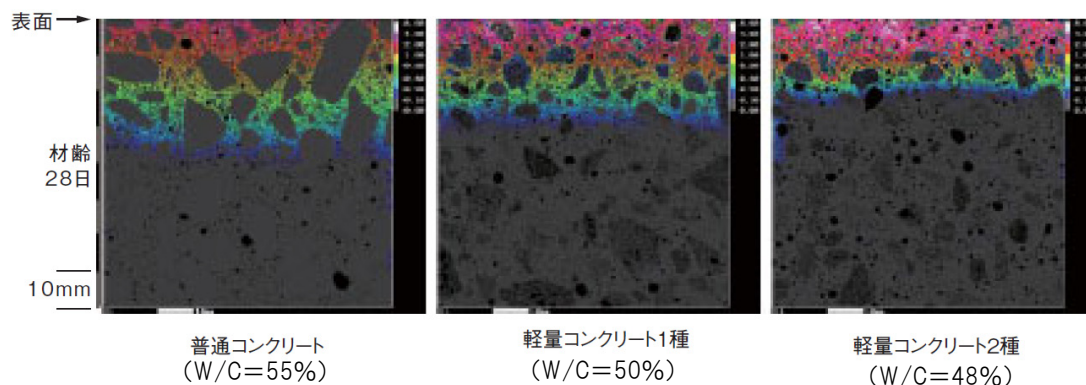


図-2.3.13 EPMA分析による塩化物イオンの浸透深さの比較¹⁾

(4) アルカリ骨材反応

コンクリートに用いる骨材のアルカリシリカ反応性試験は、JISでは、化学法(JIS A 1145-2001)およびモルタルバー法(JIS A 1146-2001)が規定されている。ただし、両試験法の規準では適切に判定できない種類の骨材があること、また、人工軽量骨材に関しては、両試験法の解説中に化学法及びモルタルバー法が適用できないと記述されている。そのため、軽量骨材のアルカリシリカ反応性の有無は、過去の使用実績あるいはコンクリートバー法によって確認しなければならない。

図-2.3.14にコンクリートバー法の試験結果を示す。コンクリートバー法には、①コンクリート内部にアルカリ(NaOH, NaCl等)を添加し、アルカリ骨材反応を促進させる方法(JCI法, カナダ法等)、②外部よりアルカリを供給させ、アルカリ骨材反応を促進させる方法(ASTM法, デンマーク法等)がある。図に示した試験法は、外部よりアルカリ(NaCl)が常に供給される非常に厳しい養生条件下の試験であるデンマーク法により評価した結果である。この試験は、供試体を脱型後 50°C 、飽和NaCl溶液中に浸漬させる方法で、比較として示した反応性粗骨材(富山県産川砂利, JIS化学法で「無害でない」と判定)の膨張量が著しい結果であるのに対し、軽量骨材コンクリートではほとんど膨張を示しておらず、「無害」の判定領域にあることがわかる。このことより、人工軽量骨材のアルカリ骨材反応性は問題ないものであると判断されている^{1), 38)}。

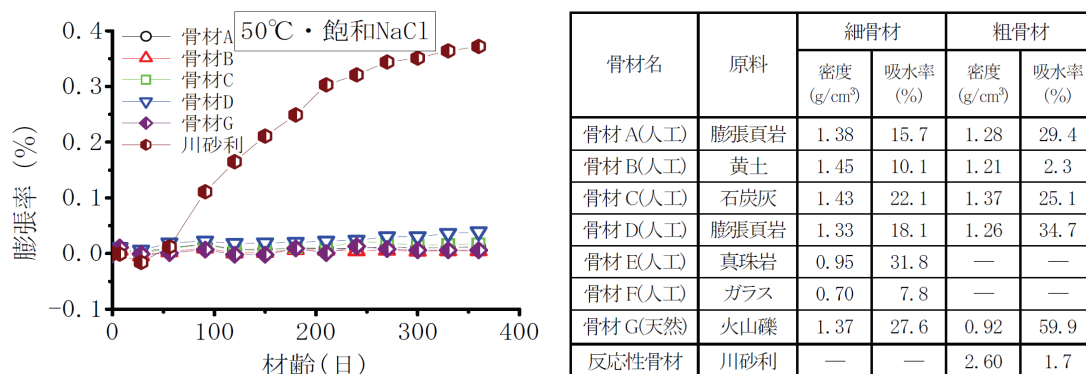


図-2.3.14 コンクリートバー法（デンマーク法）の測定結果（W/C=43%）³⁸⁾

(4) 疲労特性

軽量骨材コンクリートの圧縮疲労特性は、普通骨材コンクリートと大差ないという結果^{39), 40)}と普通骨材コンクリートよりも10~25%下回るという結果^{41), 42)}が報告されているが必ずしもその比較については明確でない。普通骨材コンクリートに比べて圧縮疲労強度が低下する報告の一例を表-2.3.1に示す⁴³⁾。これらの報告では、軽量骨材コンクリートの200万回疲労強度は静的载荷の50~80%、普通骨材コンクリートに対する比率は0.7~0.9程度であり、普通骨材コンクリートに対して若干劣ることが示されている。

図-2.3.15 に土木学会の限界状態設計法における疲労限界状態の照査の基本となる普通骨材コンクリートの圧縮疲労に対するS-N関係⁴⁴⁾を示す。また、図-2.3.16に軽量骨材コンクリートに関して多くの研究者によって行われた圧縮疲労試験結果⁴⁴⁾を示す。図-2.3.16中の式は、実験結果の大部分を安全側に包含するものである。

また、軽量骨材コンクリートを用いた部材の曲げ疲労特性は、普通骨材コンクリートと同程度であるといわれている³⁴⁾。最近では、軽量骨材コンクリートに膨張材を混和した道路橋RC床版の疲労特性に関する研究も行われ、図-2.3.17に示されるように、普通骨材コンクリートよりも優れた耐疲労性を付与できることも確認されている¹¹⁾。

表-2.3.1 圧縮疲労試験の結果（土木学会指針）⁴³⁾

	成岡らの研究			西林らの研究
	偏心率 e=0	偏心率 e=2.5	偏心率 e=0	
軽量骨材コンクリート	59.8	77.4	50.4	
普通コンクリート	65.3	83.5	68.3	
軽量 / 普通	0.92	0.93	0.74	

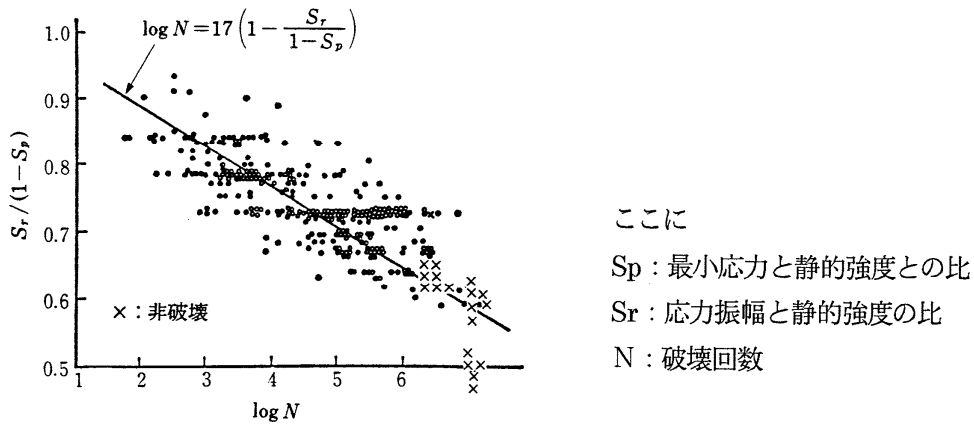


図-2.3.15 土木学会におけるS-N線図⁴⁴⁾
 (普通骨材使用)

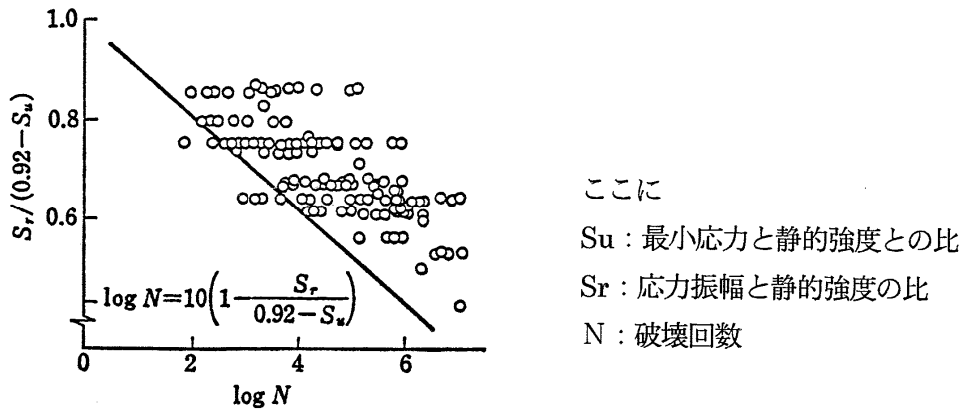


図-2.3.16 軽量骨材コンクリートのS-N線図⁴⁴⁾

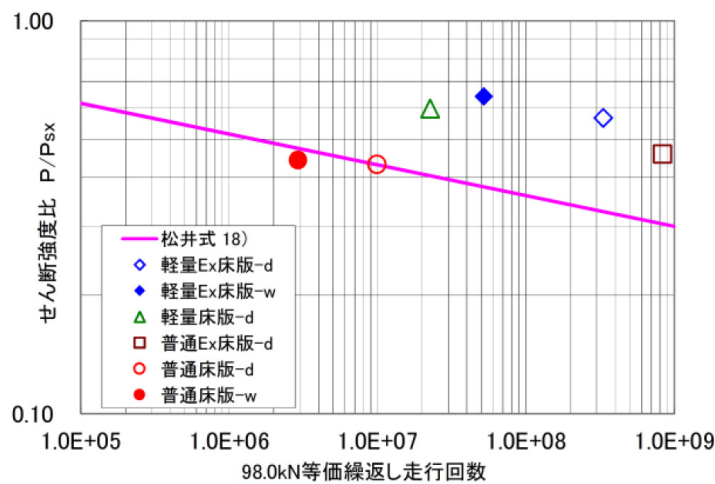


図-2.3.17 輪荷重走行試験結果 (S-N 線図)¹¹⁾

2. 4 軽量骨材コンクリートを有効に活用するために必要な技術

軽量骨材コンクリートは、「普通骨材コンクリートに比べて収縮やクリープ係数が小さいこと、骨材が工場製品であり品質の安定化が図れること、アルカリ骨材反応に対する懸念がないこと、長期使用性についての実績が積み重ねられてきていること、等の有意点がある。」との提言がなされている⁴⁵⁾。また、建築分野における高強度軽量コンクリートの実績に加え、土木構造物における耐久性に関する知見も 1960 年代後半から適用されてきた橋梁等の経年調査によって明らかになってきている⁴⁶⁾。

施工の経済性・合理化を追求していく上で、軽量骨材コンクリートは、今後も有用な構造材料であり続けることは間違いない。以下に、本章のレビューをもとに、軽量骨材コンクリートを有効に活用していくにあたって、実現すべき主な項目を列挙する。

- ① 軽量骨材のさらなる高強度化，軽量化，低吸水性の実現
- ② 圧送性，自己充填性など優れたワーカビリティを有するコンクリートの配合設計，施工技術の確立
- ③ 長期耐久性，特に凍結融解抵抗性を確保するための技術の確立
- ④ 疲労に対する詳細検討
- ⑤ コンクリートの品質管理・品質保証システムの確立

本研究では，上記のうち，①，②，③について言及していく。

①，③について

絶乾状態あるいは気乾状態の軽量骨材を用いたコンクリートは，現状でも凍結融解抵抗性の確保が可能となっている。ただし，この場合，スランプの経時変化が大きく，流動性が損なわれて打込み位置でのワーカビリティの確保が困難となる。コンクリートポンプを用いて圧送する場合には，その課題解決が一層困難となる。

一方，プレソーキングとプレウェットングを行って高含水状態にした軽量骨材を用いれば，経過時間や圧送に伴う流動性の変化は小さく，打込み位置でのワーカビリティの確保が容易となる。ただし，凍結融解抵抗性が著しく低下し，耐凍害性に劣るコンクリートとなる。寒冷地での適用を図るうえでは，課題が残る。

すなわち，打込み位置でのワーカビリティと凍結融解抵抗性の両者を同時に確保させるための技術が望まれる。その一つとして，絶乾状態あるいは気乾状態で用いても吸水が生じにくく，コンクリートのワーカビリティに影響を及ぼすことなく，かつ凍結融解抵抗性を低下させない『高性能な』人工軽量骨材が望まれる。そして，その骨材を用いたコンクリートを，実施工に供するための配合選定や施工方法に関する提案を行うことが必要となる。

②について

軽量骨材の浮上がりを抑制しながらの締め固め作業には，熟練した技能を要するが，技能・技量に依存することなく材料分離を防止することを第一の目的とし，複雑な施工条件，構造条件においても型枠内の隅々にまで充填し，硬化後の品質を均質に確保できる「自己充填性」を付与するための検討も必要となる。

【参考文献】

- 1) 人工軽量骨材 (ALA) 協会：技術情報・土木編
- 2) 小林理市, 松元和彦, 田中良弘, 松岡康訓, 野口憲一：コンクリートバージ C-BOAT500 の建造, コンクリート工学, Vol.16, No.11, pp.20～26, 1978.11
- 3) 大野義郎, 鈴木智朗, 丹波元和, 井畔瑞人：北極海向け移動式石油掘削人工島の建設ーコンクリート構造部に関してー, 土木学会論文集第 354 号, V-2, pp.43～52, 1985.2
- 4) 人工軽量骨材 (ALA) 協会：人工軽量骨材コンクリート技術資料 No.12, 世界の軽量コンクリート技術の現状, 1997.3
- 5) Structural lightweight aggregate concrete WORKSHOP PROCEEDINGS FROM A NORDIC WORKSHOP, No.15, Trondheim – Norway, 2019.2
- 6) 例えば, 堂前満, 中村定明, 澤大輔, 立松博, 小野辺良一：道路橋 RC 床版取換用 高強度軽量プレキャスト PC 床版, セメント・コンクリート, No.702, pp.52～59, 2005.8
- 7) 宇津本彰夫, 為石昌宏, 永井久徳, 福田尚弘, 吉田涼平, 金本和憲：取替用サンドイッチ型複合床版に充填する超軽量高流動コンクリートの圧縮疲労試験, 土木学会全国大会第 75 回年次学術講演会, V-450, 2020.9
- 8) 福田尚弘, 為石昌宏, 永井久徳, 宇津本彰夫：取替用サンドイッチ型複合床版に充填する超軽量高流動コンクリートのブリーディングおよび収縮特性, 土木学会全国大会第 75 回年次学術講演会, V-451, 2020.9
- 9) 宮田佳和, 大津信彦, 橋本紳一郎, 西泊雄太, 森脇孝文, 根本浩史：軽量骨材コンクリート 2 種の圧送に適した配合選定と締固め方法の検討 (その 1), 土木学会全国大会第 75 回年次学術講演会, V-417, 2020.
- 10) 西泊雄太, 大津信彦, 橋本紳一郎, 宮田佳和, 森脇孝文, 根本浩史：軽量骨材コンクリート 2 種の圧送に適した配合選定と締固め方法の検討 (その 2), 土木学会全国大会第 75 回年次学術講演会, V-418, 2020.9
- 11) 磯部龍太郎, 津野和宏, 岩城一郎, 岸利治, 中澤治郎：膨張材と軽量骨材を併用した道路橋 RC 床版の耐疲労性に関する研究, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol.71, No.2, pp.191～202, 2015.
- 12) 岸利治ら：生産性向上とライフサイクルコストの削減に資する膨張材併用軽量床版の研究開発, 令和元年度道路に関する新技術の活用, 技術研究開発終了報告書, 2019.11
- 13) 笠井浩, 松井勇：国内におけるコンクリート用人工軽量骨材の変遷と最近の動向, 日本大学公演データ No.41, 4-030, http://www.cit.nihon-u.ac.jp/kouendata/No.41/4_kenchiku/4-030.pdf
- 14) 人工軽量骨材 (ALA) 協会 HP <http://www.keiryokotsuzai.com/>
- 15) 友澤史紀, 舩田佳寛, 安田正雪：高強度軽量コンクリートの基礎的物性, 昭和 61 年度日本建築学会大会学術講演梗概集 A 北海道, pp.721～726, 1986.8
- 16) 舩田佳寛, 高羽登, 安田正雪, 山下時夫：Fc360kgf/cm² 級の高強度軽量コンクリートの基礎物性, 1992 年度日本建築学会大会学術講演梗概集 A 北陸, pp.367～368, 1992.8
- 17) コンクリートのポンプ施工指針【2012 年版】:土木学会, コンクリートライブラリー135, 2012.6
- 18) 人工軽量骨材 (ALA) 協会：技術情報・建築編
- 19) 山本祐基子, 柿崎正義, 枝広英俊, 藤井和俊：高性能軽量コンクリートの研究開発, コンクリート工学年次論文報告集 Vol.17, No.1, pp.215～220, 1995.
- 20) 小山明男, 菊池雅史, 山川勉, 早川和良：高強度・高流動性軽量コンクリートの諸性状に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文報告集 Vol.16, No.1, pp.159～164, 1994.

- 21) 河井徹, 岡田武二: 流動化した高強度軽量コンクリートの材料分離に関する一実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.9, No.1, pp.235~240, 1987.6.
- 22) 河井徹, 大野浩, 小沢一雅, 伊木崇: 締固め不要・高強度軽量コンクリートの開発と適用, セメント・コンクリート, No.552, pp.32~43, 1993.2.
- 23) Yanai,S., Sakata,N., Nobuta,Y., Okamoto, T., : Study on mix proportion for self compacting high performance lightweight aggregate concrete, 2nd International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete, Kristiansand, Norwegian Concrete Association, pp.705-716, 2000.6
- 24) Catherine Papanicolaou, Michael I. Kaffetzakis : Lightweight Aggregate Self-Compacting Concrete, State-of-the-Art & Pumice Application, Journal of Advanced Concrete Technology 9(1), pp.15-29, 2011.2
- 25) 小林孝一: 人工軽量骨材を用いた高流動コンクリートのフレッシュ時の性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.22, No.2, pp.913~918, 2000.6
- 26) 谷口秀明, 三上浩, 浅井洋, 樋口正典, 藤田学: 人工軽量骨材コンクリートの品質向上に関する研究－基礎物性および自己充てん性－, 三井住友建設技術研究所報告第6号, pp.83~90, 2008.
- 27) 水越睦視, 梅本忠彦, 下村匠: 軽量骨材コンクリートの高性能化に関する研究, コンクリート工学論文集, Vol.21, No.2, pp.57~67, 2010.
- 28) Mechtcherine,V., Haist,M., Hewener,A., Müller,H.S. : Self-compacting lightweight concrete - A new high-performance building material, 2nd International Symposium on Self-Compacting Concrete, pp.23-25, 2001.10
- 29) Wu,Z., Zhang,Y., Zheng,J., Ding,Y. : An experimental study on the workability of self-compacting lightweight concrete, Construction and Building Materials, 23, pp.2087-2092, 2009.
- 30) Michael Kaffetzakis, Catherine Papanicolaou : Lightweight Aggregate Self-Compacting Concrete (LWASCC) semi-automated mix design methodology, Construction and Building Materials, Vol.123, pp.254, 2016.
- 31) 人工軽量骨材 (ALA) 協会: 技術資料 No.5 高強度人工軽量骨材コンクリートの基礎的性質について, 1988.5
- 32) 友澤史紀, 舛田佳寛, 安田正雪: 高強度軽量コンクリートの基礎的物性, 昭和 62 年度日本建築学会大会学術講演梗概集 A 近畿, pp.41~42, 1987.10
- 33) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説－許容応力度設計法, 1999.
- 34) 日本建築学会: 高強度人工軽量骨材コンクリートを用いた建築物の設計と施工, 1992.12
- 35) 田沢雄二郎, 信田佳延, 石井明俊: シリカフェームを用いた高強度軽量コンクリートの耐凍結融解性, 第7回コンクリート工学年次講演会論文集, pp.213~216, 1985.
- 36) 西春哉ほか: コンクリートの海水に対する水密性, セメント技術年報, Vol.34, pp.303~306, 1980.
- 37) 杉山隆文ほか: Chloride Permeability of Lightweight Aggregate Concrete, 土木学会第49回年次学術講演会概要集, 第5部, pp.438~439, 1980.
- 38) 杉山彰徳, 鳥居和之, 酒井賢太, 石川雄康: 人工軽量骨材のアルカリシリカ反応性と ASR 判定試験法の提案, 土木学会論文集 E, Vol.63, No.1, pp.79~91, 2007.2
- 39) 村田二郎, 菅原操, 宮崎昭二: 高強度軽量骨材コンクリート, 山海堂, 昭和 42 年
- 40) 高橋克男, 野口功, 小池晋: 軽量コンクリートの設計上の問題点, プレストレストコンクリート, 第6巻第3号, 1964.6

- 41) 若林武忠, 川崎道夫, 成岡昌夫: 軽量コンクリート合成桁の実験的研究, 土木学会誌第 51 巻第 9 号, 昭和 41 年 9 月
- 42) 千葉静男, 西林新蔵, 小林峰夫: 軽量 PC 桁曲げ耐力に関する 2, 3 の実験, 昭和 43 年度土木学会関西支部年次学術講演会概要
- 43) 土木学会: 人工軽量骨材コンクリート設計施工マニュアル, コンクリートライブラリー第 56 号, 1985.
- 44) 土木学会: コンクリート構造の限界状態設計法指針 (案), コンクリートライブラリー第 52 号, pp.27, 1983.
- 45) S.Ikeda: Development of Lightweight Aggregate Concrete in Japan, International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete, Sandefrojd, Norway, pp.42-51, 1995.6
- 46) 例えば, 関口幹夫, 今里光夫: 29 年間供用した軽量床版の追跡調査, 軽量コンクリートの性能の多様化と利用の拡大に関するシンポジウム論文集, 日本コンクリート工学協会, 2000.8

第3章 独立空隙型人工軽量骨材を用いたコンクリートの基本特性

3. 1 独立空隙型人工軽量骨材の品質

膨張頁岩を主原料とした従来の人工軽量骨材に比べて、吸水率が非常に小さくかつ高強度な人工軽量骨材（写真－3.1.1，以下，独立空隙型人工軽量骨材と記す）が開発され，この骨材を用いた軽量骨材コンクリートの研究が盛んに行われ¹⁾，第2章で示した課題（圧送性と凍結融解抵抗性の両立）を解決できる軽量骨材として多くの期待が寄せられた。

本章では，この高性能軽量骨材の製造方法，品質およびこれを用いたコンクリートのフレッシュ時の特性，硬化後の主な特性について記述する。



写真－3.1.1 独立空隙型人工軽量骨材

従来型の人工軽量骨材は，膨張頁岩を主原料とし，原料の粉碎，分級，焼成，旧令，熱間吸水，分級の工程を経て製造される。焼成の過程において，膨張頁岩の表層部は，高温にさらされて次第に軟化して粘稠なガラス相になる。この後，1,000～1,200°C付近で分解ガス（O₂，CO₂など）が発生し，このガスが封じ込められることにより，多孔質構造が形成される。その後，冷却機で300～350°C程度にまで温度を下げて粒度調整した後，十分に吸水させる（プレソーキング）。

一方，独立空隙型人工軽量骨材は，図－3.1.1 に示す粉碎混合，造粒，乾燥および焼成からなる4つの工程を経て製造される。粉碎混合ならびに造粒の各工程では，主原料となる真珠岩を微粉碎しながら可塑材，発泡材などの添加材を所定割合加えて混合し，この混合微粉原料を回転造粒機により高密度造粒する。高密度造粒物は，乾燥工程を経て焼成されるが，焼成の初期において焼結することでさらに緻密化し，その後の焼成工程で発泡が生じて軽量化される。この製造方法により内部に独立した微細な閉気孔が形成され，低吸水性の骨材が得られる。このような造粒型骨材は，粉末を成形して焼成するセラミックスと同様な製造であり，急激に冷却すると温度応力が生じて微細なクラックが発生し，強度低下が生じる。このため，焼成後は，従来型の人工軽量骨材のような急冷は行わず，骨材の品質に悪影響を与えないように徐冷される。焼成された骨材は，ふるい分け機によって粒度調整され，プレソーキングを行うことなく出荷される。

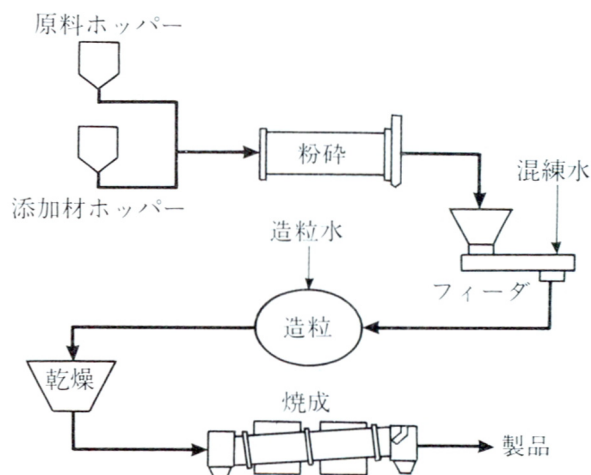


図-3.1.1 独立空隙型人工軽量骨材の製造工程¹⁾

人工軽量骨材は、製造方法によって造粒型と非造粒型の2種類に大別される。人工軽量骨材の開発当初は非造粒型が大半を占めており、膨張頁岩を破砕して焼成するタイプの骨材が主流であった。表-3.1.1 に従来型の非造粒型人工軽量骨材と独立空隙型人工軽量骨材の物性の一例を示す。従来型の軽量骨材の絶乾密度は、粗骨材で 1.25g/cm^3 、細骨材で 1.68g/cm^3 と通常の天然骨材 2.6g/cm^3 程度に比べてかなり軽い。ただし、骨材内部には連通した空隙が存在するため吸水率が非常に高く、水に接すると表面の毛細管を通じて内部に水が浸透する。このような軽量骨材を絶乾あるいは気乾状態でコンクリートとして練り混ぜた場合、コンクリート中の水が骨材内部に吸水され、経過時間に伴うスランプの低下やポンプを用いた圧送によるスランプの低下が大きく、かつその低下量が不安定となり、打込み位置でのワーカビリティを低下させる。そればかりでなく、配管の閉塞などのトラブルの原因にもなり、施工性の低下とともに、構造物の品質低下を招いていた。一方、このような事象を防止するべく、プレソーキングやプレウェットイングを施した骨材の含水率は、粗骨材で20%以上、細骨材で10%以上と非常に大きく、含水率の小さい通常の骨材に比べてコンクリートの凍結融解抵抗性を低下させていた。これに対し、独立空隙型軽量骨材は、前述のとおり焼成過程で一度焼結して脱気し、その後発泡させるため、内部は微細で独立した気孔が均質に分散している。独立空隙型人工軽量骨材の絶乾密度は、粗骨材で $0.8\sim 1.2\text{g/cm}^3$ 、細骨材で $0.9\sim 1.1\text{g/cm}^3$ と従来型のものよりも軽く、また、24時間吸水率および飽和吸水率も非常に小さくなっている。この低吸水率化により、プレソーキングやプレウェットイングを行わずに使用でき、コンクリートの軽量性を保ちながら、凍結融解抵抗性を確保できる。

表-3.1.1 軽量骨材の物性値の例（従来型と独立空隙型の比較）

	非造粒型人工軽量骨材		独立空隙型人工軽量骨材	
	粗骨材	細骨材	粗骨材	細骨材
絶乾密度 (g/cm^3)	1.25	1.68	0.8~1.2	0.9~1.1
24時間吸水率 (%)	9.7	9.8	5.0以下	8.0以下
出荷時吸水率 (%) ※1	28	16	-	-
飽和吸水率 (%) ※2	-	-	10.0以下	10.0以下

※1：プレソーキングさせた場合の吸水率

※2：2時間煮沸後2時間徐冷放置後の吸水率

3. 2 独立空隙型人工軽量骨材を用いたコンクリートの性状

3. 2. 1 フレッシュコンクリート

独立空隙型軽量骨材を用いたコンクリートの高強度性および高耐久性を発現するためには、高強度化されたマトリクスとの組合せが必須となる。このため、水結合材比を30~40%、結合材量を400~500kg/m³とすることが多く、混和剤には高性能 AE 減水剤を使用する。独立空隙型軽量骨材は、膨張頁岩系非造粒型軽量骨材よりも密度が小さいため、通常のコングリート配合のまま流動性を高めたり、過剰な振動締固めを行ったりすると骨材が浮き上がり、材料分離が生じやすい。しかしながら、低水結合材比とすることでモルタルの粘性を高めることで、骨材分離が抑制されて均質なコンクリートを製造できる。図-3.2.1は、独立空隙型軽量骨材（図中では高性能軽量骨材）および膨張頁岩系非造粒型軽量骨材（図中では従来型軽量骨材）を用いたコンクリートについて、各骨材をそれぞれ絶乾状態ならびに事前吸水して使用したときのスランプの経時変化を示したものである²⁾。従来型軽量骨材を用いたコンクリートは、事前吸水を行わなければ、経過時間とともにスランプが急激に低下している。これに対し、独立空隙型軽量骨材を用いたコンクリートは、事前吸水の有無にかかわらず、つまり、事前吸水を行わなくても、スランプの低下が緩やかであり、事前吸水した従来型軽量骨材を用いた場合と同等のスランプ保持が示されている。すなわち、独立空隙型軽量骨材は、プレソーキングやプレウェットティングを行わなくても、製造から打込み・締固めまで、コンクリートのワーカビリティを確保できる可能性が示された。

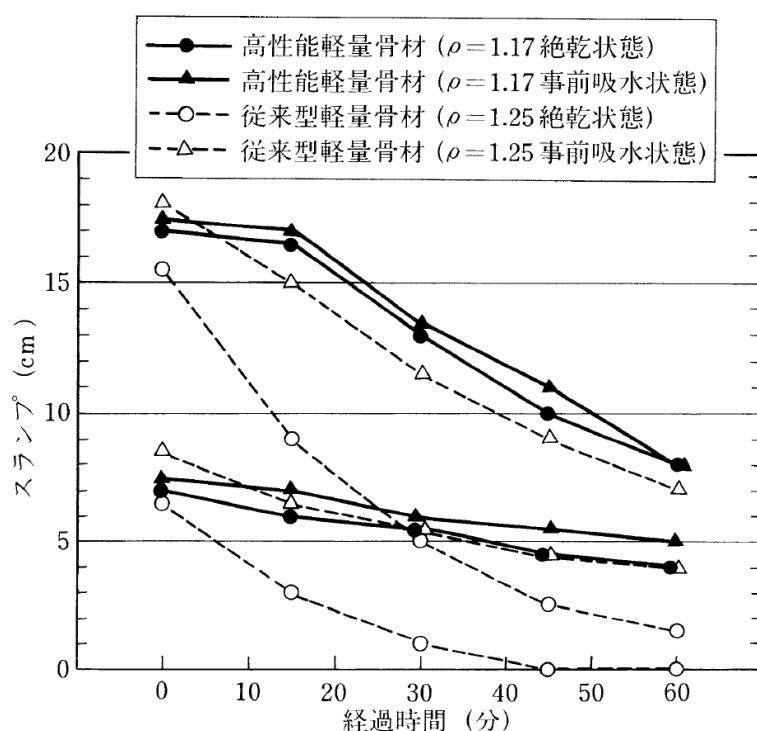


図-3.2.1 軽量骨材コンクリートの経過時間に伴うスランプの変化²⁾

3. 2. 2 硬化コンクリート

(1) 力学的特性

表-3.2.1 は、室内試験レベルで取得した軽量骨材コンクリートの物性値の例である¹⁾。また、表-3.2.2 には、独立空隙型軽量粗骨材を使用したコンクリートについて、後述の研究で取得した物性値の一例を示した。

これらによれば、普通骨材コンクリートの圧縮強度に対する引張強度の比率は 1/10~1/13 程度であるのに対し、独立空隙型軽量骨材を用いたコンクリートは 1/13~1/18 と小さい値となっている。曲げ強度についても、普通骨材コンクリートが圧縮強度の 1/5~1/8 であるのに対し、独立空隙型軽量骨材を用いたコンクリートは、1/8~1/9 であり、やはり小さい値になっている。圧縮強度が 40N/mm²程度以上の領域では、軽量骨材コンクリートの引張強度は圧縮強度を増大させても頭打ちの状態になることは第2章で示したとおりであるが、独立空隙型軽量骨材を使用した場合でもその傾向は同様となっている。普通骨材コンクリートでは、引張破壊がモルタル自体ならびにモルタルと粗骨材の界面に発生するひび割れから生じるのに対し、軽量骨材の場合は粗骨材自体にもひび割れが発生し、モルタルのひび割れが骨材を貫通するため、脆性的な破壊に至ることになる。この点は、構造設計に十分に反映しなければならない。

表-3.2.1 軽量骨材コンクリートの各種強度試験の結果の例¹⁾

コンクリートの種類	高性能軽量コンクリート		従来の軽量 コンクリート	普通 コンクリート
	軽量2種	軽量1種		
骨材の種類	高性能軽量骨材 ($\rho=0.8$)	高性能軽量骨材 ($\rho=1.2$)	従来の軽量骨材 ($\rho=1.6$)	砕石 ($\rho=2.6$)
単位容積質量 (t/m ³)	1.2	1.75	1.75	2.3
圧縮強度 (N/mm ²)	35	60	-	-
引張強度 (N/mm ²)	2.0(1/18)	3.3(1/18)	(1/10~1/15)	(1/10~1/13)
曲げ強度 (N/mm ²)	4.0(1/9)	6.8(1/9)	(1/6~1/10)	(1/5~1/8)
せん断強度 (N/mm ²)	5.3(1/11)	8.0(1/7.5)	(1/6~1/8)	(1/4~1/6)
ヤング係数 (kN/mm ²)	13	22	19* ¹	30* ¹

() : 圧縮強度に対する比率

* 1 : 圧縮強度が高性能軽量コンクリートの軽量2種と同程度 (35 N/mm²) の場合

表-3.2.2 独立空隙型軽量骨材を使用したコンクリートの強度特性

	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	単位容積質量 (kg/m ³)
実験値	54.4	4.23	7.20	21.9	1,816
圧縮強度に対する比率	1.00 (1/1)	0.078 (1/13)	0.132 (1/8)	-	-

水セメント比38%, 単位粗骨材量320kg/m³

独立空隙型軽量骨材を用いたコンクリートのヤング係数は、同程度の圧縮強度を有する普通骨材コンクリートに比較して小さい。これは、従来の軽量骨材コンクリートと同じであり、圧縮強度および単位容積質量と密接な関係がある。表-3.2.1 に示すように、絶乾密度 1.2g/cm³の独立空隙型人工軽量骨材を粗骨材に用いた圧縮強度 60N/mm²のコンクリートのヤング係数は、22kN/mm²程度であるが、2017年制定土木学会コンクリート標準示方書〔設計編：本編〕に示さ

れる圧縮強度 60N/mm^2 の普通骨材コンクリートのヤング係数 35kN/mm^2 の60%程度となっている。

(2) 体積変化 (自己収縮と乾燥収縮)

独立空隙型軽量骨材の含水状態と自己収縮, 乾燥収縮の測定結果の例を図-3.2.2 および図-3.2.3 に示す³⁾。ここで図中の煮沸吸水とは, 煮沸水中で強制的に吸水させた時の含水率である (独立空隙型軽量粗骨材では 10vol.%程度)。これらの図より, 軽量骨材の含水率が増えるほど, 最終的な自己収縮量は低減し, 乾燥収縮量は増大することが分かる。これは, 程度の差はあれど, 従来型の軽量骨材の収縮特性と同じであり, 骨材内部に水があれば, マトリクスへの供給によって自己収縮が抑制され, 乾燥収縮では, 最終的な収縮ひずみがわずかに大きくなる。なお, 絶乾状態と 24 時間吸水させた状態とでは, 収縮挙動の差が小さく, 骨材を一般的な条件で使用する場合には, 含水率の影響はほとんどないといえる。

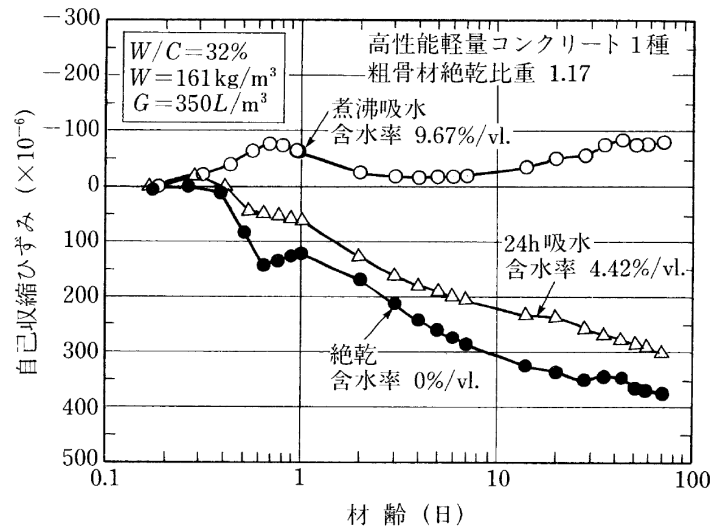


図-3.2.2 独立空隙型軽量粗骨材の含水状態と自己収縮ひずみの関係³⁾

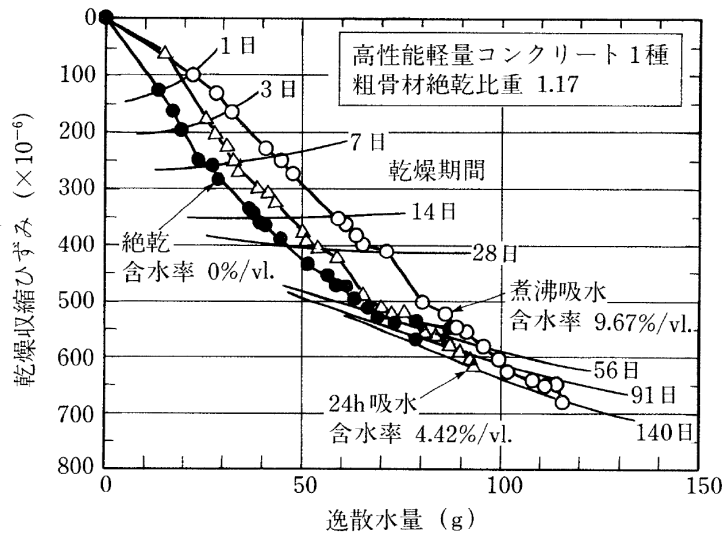


図-3.2.3 独立空隙型軽量粗骨材の含水状態と乾燥収縮ひずみの関係³⁾

(3) 耐久性（凍結融解抵抗性）

独立空隙型軽量粗骨材を用いた水セメント比 40%のコンクリートの凍結融解試験 (ASTM C 666 A 法「急速水中凍結融解試験方法」に準拠)の結果の例を図-3.2.4に示す^{1), 4)}。軽量骨材の含水状態は絶乾状態, 24時間吸水, 煮沸吸水の3水準とし, 空気量は, 5.5±1.5%に調整されている⁴⁾。これによると独立空隙型軽量骨材を使用したコンクリートの耐凍害性は骨材の含水率の影響を受け, 練り混ぜ時の含水率が大きいと相対動弾性係数が早期に低下することが示されている。これは, 従来型の人工軽量骨を使用したコンクリートと同じ傾向であるが, 大きく異なるのは, 独立空隙型軽量骨材は, 通常の圧力下では含水率が小さく, 24時間吸水率あるいはそれ以下の含水率で使用されることである。このような場合, コンクリートの水セメント比および空気量を適正な値とすることにより, 実際の寒冷環境よりも厳しいといわれる促進試験による評価法によっても十分な耐凍害性を示すことが分かる。

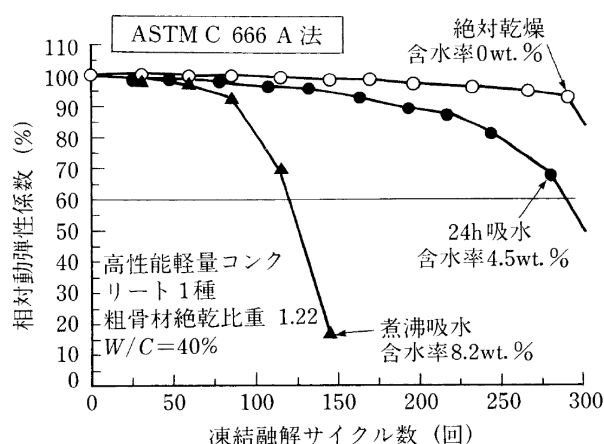


図-3.2.4 独立空隙型軽量骨材を用いたコンクリートの凍結融解試験^{1), 4)}

表-3.2.3および表-3.2.4には, 本研究において, 独立空隙型軽量粗骨材を用いたコンクリートについて, JIS A 1148 に準拠して実施した凍結融解試験 (水中凍結融解試験方法 A 法) の結果を記す。詳細は, 第4章および第6章で記すが, 単位粗骨材量を 320 kg/m³程度, 水セメント比を 40%以下, 空気量を 5%程度以上確保することで, 耐久性指数は 80%以上となり, また, 写真-3.2.1 に示すように表面のスケーリングも非常に小さい結果が得られることを確認している。また, 表-3.2.3 に示すように, ポンプによる圧送を行った後でも, 軽量骨材の含水率が小さく, このような状態を保つことで, 凍結融解抵抗性を確保できることを確認している。

表-3.2.3 施工性確認実験におけるコンクリートの試験結果 (後述: 表-4.2.5)

	出荷時	現場到着時	ポンプ筒先	ポンプ筒先
練上りからの経過時間(分)	4	52	68	127
スランプフロー(mm)	558	518	574	478
空気量(%)	7.3	7.0	6.2	—
単位容積質量(kg/m ³)	1,783	1,700	1,783	—
コンクリート温度(°C)	27.0	27.0	28.0	—
外気温(°C)	30.0	28.0	28.0	—
軽量骨材含水率(%)	1.06	1.14	1.71	—
28日圧縮強度	43.1	44.1	44.2	—
耐久性指数	—	81.0	88.5	—

表-3.2.4 鉄道高架橋への適用に際して実施したコンクリートの室内試験結果
(後述：表-6.1.11)

No.	コンクリート温度 (°C)	スラブ厚 (mm)	空気量 (%)	単位容積質量 (kg/m ³)	圧縮強度(N/mm ²)		凍結融解抵抗性	
					7日	28日	耐久性指数	質量変化率(%)
35	23.5	520	5.6	1,832	48.4	55.9	86.9	0.28
38	23.0	551	6.6	1,816	42.7	48.5	87.2	0.47
40	23.0	519	7.0	1,810	40.1	48.7	83.7	0.56
38-0	21.0	535	5.9	1,812	41.4	48.4	—	—
38-0.35	21.9	517	6.9	1,827	46.5	51.6	—	—
38-0.5	22.1	518	6.0	1,824	45.8	50.5	—	—

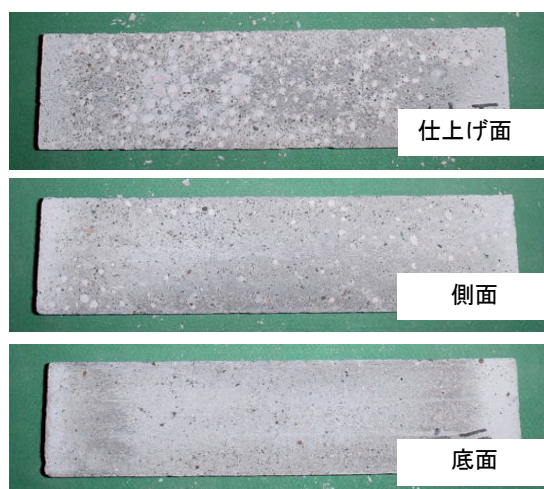


写真-3.2.1 凍結融解試験 300 サイクル後の供試体の状況 (表-3.2.4 中の No. 38 配合)
(後述：写真-6.1.7)

(4) アルカリ骨材反応

本論文第2章でも示した通り、我が国の人工軽量骨材を用いたコンクリートは、アルカリ骨材反応性は問題ないとされている⁵⁾。一方で、人工軽量骨材コンクリートで構築された実構造物においてアルカリシリカ反応 (ASR) による劣化の疑いのある事例が報告されており⁶⁾、アルカリ骨材反応によるコンクリートの劣化を防止するためには、人工軽量骨材の反応性を正しく評価しておく必要がある。化学法 (JIS A 1145) やモルタルバー法 (JIS A 1146) では ASR 反応性を適切に判定できない人工軽量骨材については、岩石・鉱物学的検討に加え、コンクリートバー法による膨張量の測定が提案されている⁷⁾。

そこで、まず、真珠岩を主原料とする独立空隙型人工軽量骨材を用いたコンクリートについて、コンクリートバー法による膨張量の測定を実施した。測定に供したコンクリートの配合を表-3.2.5に示す。セメントは早強ポルトランドセメントを、細骨材は ASR 化学法で「無害」と判定された陸砂および砕砂を用い、粗骨材に絶乾密度 1.23g/cm³、24 時間吸水率 1.91%の独立空隙型人工軽量粗骨材を用いた。単位セメント量 435kg/m³、水セメント比 38%の高強度軽量骨材コンクリートである。膨張量の測定は、JCI AAR-3「コンクリートバー法によるアルカリシリカ反応性試験方法」に基づき、材齢 6 カ月まで 40°Cで湿気を保った養生室の中で 1 カ月おきに実施した。2001 年当時の規定で、水酸化ナトリウムを Na₂O_{eq} で 2.4kg/m³ 添加したものと添加しないものの長さ変化の測定結果から膨張量を算出した (当時の判定基準：6 か月の膨張率 0.100%)。

膨張量の測定結果を図-3.2.5に示す。6 カ月の膨張量は 0.001%以下 (判定基準の 1/100) で

あり、水酸化ナトリウムを添加した場合でも、有意な膨張は示さなかった。また、写真-3.2.2に示すように、ひび割れの発生や外観上のゲルの生成は見られなかった。

表-3.2.5 試験に供したコンクリートの配合

スラブ厚 (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	Gvol (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					高性能 AE減水剤 (P×%)	増粘剤 ウレタン (W×%)
					水	早強 セメント	陸砂	砕砂	軽量 粗骨材		
55±5	6.0	38.0	320	49.7	165	435	490	338	394	1.00	0.05
					165	139	190	126	320		

下段は単位容積 (kg/m³)

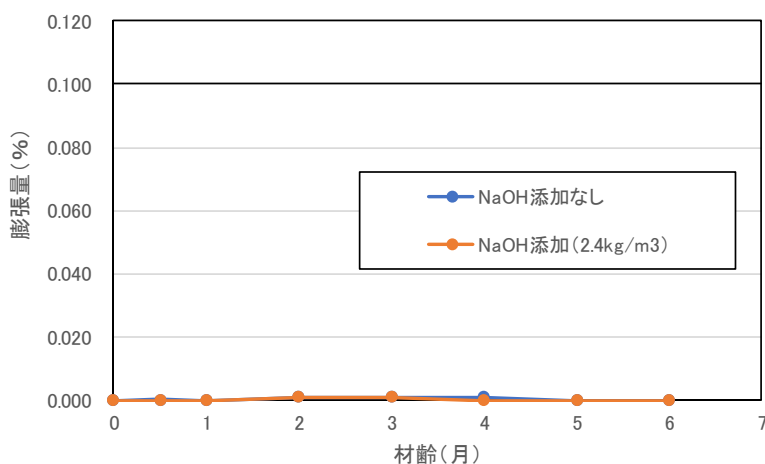


図-3.2.5 コンクリートバー法による膨張率の測定結果

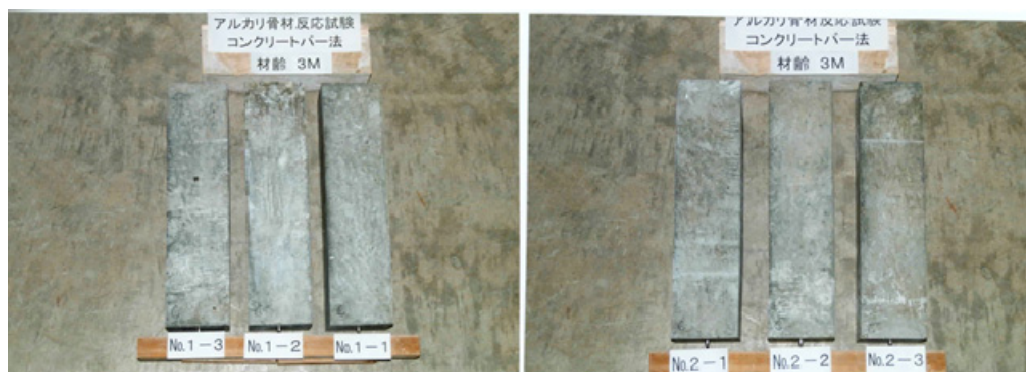


写真-3.2.2 供試体の外観 (3カ月)

次に、表-3.2.5 に示すコンクリートで構築した実構造物（鉄道高架橋）から採取したコア供試体（φ55mm，写真-3.2.3）について、残存膨張率を測定した。コア供試体は、打設後約2年経過した時点で採取し、すぐに残存膨張率の測定に供した。膨張率の測定は、JCI-DD2「アルカリ骨材反応を生じたコンクリート構造物のコア採取による膨張率の測定方法」に準じて実施した。長さ変化率（残存膨張率）の測定結果を図-3.2.6に示す。6カ月経過後の残存膨張率は、No.1巨視体で0.019%，No.2供試体で0.017%であり、ともに有害な膨張を示さなかった（20℃における解放膨張率はともに0.02%以下）。

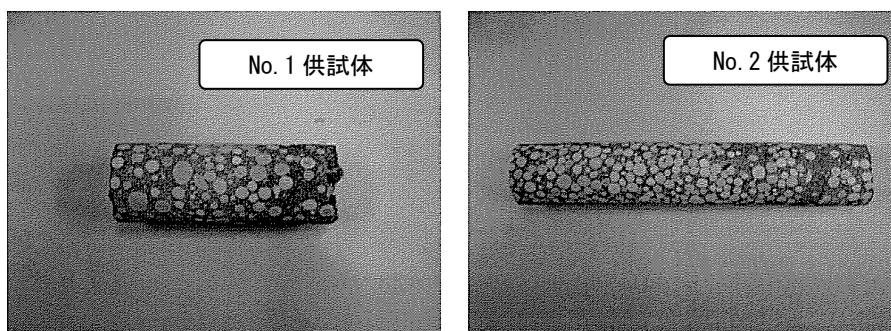


写真-3.2.3 実構造物から採取したコア供試体

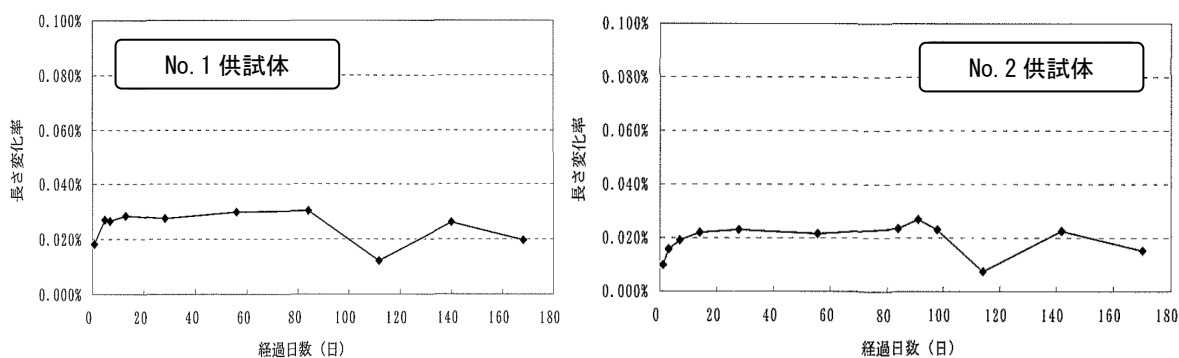


図-3.2.6 長さ変化率（残存膨張率）の測定結果（温度 40°C，相対湿度 95%以上）

高温で焼成された人工軽量骨材の中には、アルカリシリカ反応を持つ鉱物（ガラス相，クリストバライト，トリジマイト）が含有される場合がある。ただし，その場合であっても，アルカリシリカ反応によるゲルの生成量自体が比較的少なく，また，軽量骨材が多量の気孔を有することにより，ゲルが生成してもその膨張圧が緩和され，有害な膨張が生じないことが報告されている⁶⁾。独立空隙型人工軽量骨材についても，気孔が独立しているものの，内部に多量の気孔を有することに変わりはなく，既往の報告⁶⁾と同様の現象が起きているものと思われる。コンクリートバー法による試験結果，実構造物から採取したコア供試体の残存膨張率の測定結果からも，独立空隙型人工軽量粗骨材を用いた軽量骨材コンクリートは，ASR 化学法で「無害」と判定される細骨材を用いれば，アルカリ骨材反応による劣化は生じにくいといえる。

3. 3 まとめと本研究の方針

独立空隙型軽量骨材を用いたコンクリートの特性について、骨材製造会社が取得した知見に加えて、独自に実施した施工実験において採取した圧送前後の試料を対象に実施した凍結融解抵抗性試験の結果を概説した。また、アルカリ骨材反応性について、コンクリートバー法による試験および実構造物から採取した供試体の残存膨張率の測定を実施した。

独立空隙型人工軽量骨材は、従来の軽量骨材コンクリートの施工性、力学的特性、耐久性をさらに進歩させる材料として、大きな期待が寄せられる。ただし、このコンクリートを実構造物へ適用し、その特長と性能を発揮させるためには、施工に関する実験データが少なく、未解明な部分も多いのが実態であった。

そこで、本研究において、第4章でワーカビリティに関する提案を、第5章で自己充填性付与に関する提案を行い、第6章でこれらを導入した実構造物の構築により、施工性と耐久性を両立させる軽量骨材コンクリート技術の研究成果の実証を行った。

【参考文献】

- 1) 岡本享久, 早野博幸, 柴田辰正; 超軽量コンクリート, コンクリート工学, Vol.36, No.1, pp.48-52, 1998.1
- 2) 大森淑孝・熊沢憲一・友竹博一: プレウェティングの有無が軽量コンクリートのフレッシュ性状に及ぼす影響, セメント・コンクリート論文集 No.48, pp.148~151, 1994
- 3) 河野克哉, 岡本享久, 柴田辰正, 石川雄康: 超軽量骨材を用いたコンクリートの自己収縮ならびに乾燥収縮, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.43~48, 1998.6
- 4) 森寛晃, 岡本享久, 柴田辰正, 石川雄康: 超軽量骨材を用いたコンクリートの耐凍害性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.61~66, 1998.6
- 5) 人工軽量骨材 (ALA) 協会 技術情報・土木編
- 6) 松田芳範, 津吉毅, 石橋忠良: 軽量骨材コンクリートを用いた実構造物の調査報告, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第4巻, pp.183~188, 2004.10
- 7) 杉山彰徳, 鳥居和之, 酒井賢太, 石川雄康: 人工軽量骨材のアルカリシリカ反応性と ASR 判定試験法の提案, 土木学会論文集 E, Vol.63, No.1, pp.79~91, 2007.2

第4章 適切なワーカビリティを有する独立空隙型軽量骨材 コンクリートの提案

4. 1 適切な圧送性の確保の必要性

4. 1. 1 圧送性を阻害する要因

近年のコンクリート工事では、コンクリートの場内運搬は、コンクリートポンプによる圧送が不可欠となっており、ブームを用いた圧送や配管を用いた圧送など、施工条件によって様々な圧送形態が採用される。一般に、コンクリートの圧送では、スランブが小さいもの、単位水量が小さいもの、水セメント比が小さいものほど、コンクリートポンプのピストン前面圧が大きくなり、配管の管内圧力が増大する。また、配管の水平換算距離が長いもの、圧送速度が速いものほど、ピストン前面圧、管内圧力が増大する。管内圧力は、コンクリートの性状に影響を及ぼし、管内でのブリーディングや粗骨材のロッキング現象のほかに、骨材内部への加圧吸水が生じることが知られている。特に、軽量骨材を用いる場合には、吸水率が大きく、骨材内部に連通した空隙が存在するため、圧送中にその空隙にコンクリートの自由水が入り込み、コンクリートの流動性の低下が生じることが知られている。そのため、軽量骨材コンクリートを圧送する場合には、骨材のプレソーキングに加え、十分なプレウェットティンが行われる。

一方、プレソーキングやプレウェットティンによる骨材中の水は、コンクリートの凍結融解抵抗性の低下を引き起こす要因となること¹⁾から、凍結融解作用を受ける寒冷地においても耐久性が求められる土木構造物にはほとんど使用されていないのが現状である。このような状況下で、第3章で示した「独立空隙型人工軽量骨材」が開発され²⁾、骨材自身の高強度化と低吸水率化が図られ、凍結融解抵抗性に優れた人工軽量骨材コンクリートの実用化が期待された。独立空隙型人工軽量骨材を用いたコンクリートの最大の特徴は、骨材のプレソーキングやプレウェットティンを行わず、骨材内部に水を極力存在させない気中乾燥状態（気乾状態）で練り混ぜ、施工に供することでコンクリートの凍結融解抵抗性を確保しようとするところにある。

内部に水を含まない気乾状態の独立空隙型人工軽量骨材を用いたコンクリートの圧送性については未知な部分が多く、実構造物への適用に際しては、適切な圧送性を確保するための手法を確立しておく必要があった。本節では、気乾状態の独立空隙型人工軽量骨材を用いたコンクリートの圧送負荷や、圧送中の骨材の吸水についての検討を行い、圧送に適した配合の提案を行った。検討に際しては、まず、事前圧送実験を行って課題や骨材の加圧吸水現象を明らかにした。次に、骨材の加圧吸水抑制に関する検討を室内実験で実施し、圧送性を確保するための手法を考案した。さらに、その手法を検証するための圧送実験を実施した。

4. 1. 2 事前圧送実験による課題の確認

気乾状態の独立空隙型人工軽量骨材を使用したコンクリートの圧送性について、基本的な知見を得るべく、事前圧送実験を実施した。事前圧送実験に先立ち、室内実験において、圧送を想定したフレッシュコンクリートの加圧試験を行い、骨材内部への吸水や吸水に伴う流動性の低下に関する基本的なデータを取得した。次に、配管延長 122.8m の圧送実験を行って、実際の圧送で生じる現象を確認した³⁾。

(1) 室内実験

1) 使用材料およびコンクリート配合

使用材料を表-4.1.1 に示す。粗骨材は流紋岩系真珠岩を造粒・焼成した独立空隙型人工軽量骨材であり、24 時間吸水率が 2.9%のものである。高性能 AE 減水剤にはポリカルボン酸系のものを用い、時間経過に伴う性状変化を小さくすることを目的に、遅延形のものを用いた。表-4.1.2 に検討の対象としたコンクリートの配合を示す。コンクリートは、粗骨材のみに軽量骨材を用い、圧縮強度 40N/mm²、単位容積質量 1,800kg/m³ 程度の高強度軽量骨材コンクリートとした。配合や流動性の違いが加圧後の性状に及ぼす影響を検討するためにスランプ 21cm およびスランプフロー 550mm の2種類のコンクリートについて実験を実施した。

表-4.1.1 使用材料

使用材料	記号	銘柄	摘要
セメント	C	普通ポルトランドセメント	密度:3.15g/cm ³ , 比表面積:3,400cm ² /g
細骨材	S	粗砂:朝日村産山砂	表乾密度:2.58g/cm ³ , 吸水率:1.71%
		細砂:中条町産山砂	表乾密度:2.57g/cm ³ , 吸水率:1.64%
		混合比 粗:細=70:30	粗粒率:2.64
粗骨材	G	人工軽量粗骨材 (独立空隙型人工軽量骨材)	絶乾密度:1.10g/cm ³ , 24h吸水率:2.90% 実積率:66.4%, 最大骨材寸法:15mm
混和剤	SP	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系(遅延形)

表-4.1.2 コンクリート配合

NO.	流動性 の目標値	空気量 (%)	W/C (%)	Gvol (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					
						W	C	S粗	S細	G	SP
1	スランプ 21±1.5cm	5.0	40.0	350	48.0	155	388	582	247	385	3.88
2	スランプフロー 550±50mm	6.0	40.0	310	50.5	175	438	571	243	341	5.26

W/C:水セメント比, Gvol:単位粗骨材容積, s/a:細骨材率, G:絶乾状態で表示

2) 実験方法

コンクリートの練混ぜにはパン型強制練りミキサ (容量 60ℓ, 回転数 60r.p.m) を用い、全材料投入後 120 秒間練り混ぜた。練混ぜ量は 1 バッチ 30ℓ とし、2 バッチを練混ぜてから試験に供した。なお、軽量骨材は絶乾状態のものを用いた。

試験では、表-4.1.2 に示す No.1 配合および No.2 配合の練り上がったコンクリートを傾動式ミキサに投入して、2r.p.m.で攪拌しながら、フレッシュ性状の経時変化を確認するとともに、練上がり 120 分後のコンクリートについては、非排水加圧試験を行って、加圧後のコンクリートのスランプおよび軽量骨材の含水率を測定した。非排水加圧試験は、粗骨材最大寸法 40mm コンクリート用の加圧ブリーディング試験装置 (φ200mm×h250mm) を用い、非排水状態として加圧力 3.5N/mm²、繰返し回数 10 回の加圧を行った。その際の加圧に要する時間は 20 分であった。また、

圧送によるコンクリートの流動性低下の主な原因を、コンクリート中の水が軽量骨材に吸水されることであると仮定し、単位水量だけを減少させた配合のコンクリートについてスランプおよびスランプフローを測定した。これは練混ぜ時に水量を変化させたものであり、練混ぜ後に軽量骨材の吸水によるものとは機構が異なるが、水量の変化がコンクリートの流動性に及ぼす影響を把握するために実施したものである。No.1 配合については、単位水量 155kg/m^3 (標準配合)、 152.5kg/m^3 、 150kg/m^3 および 145kg/m^3 の4ケースについて試験を行った。また、No.2 配合については、単位水量 175kg/m^3 (標準配合)、 170kg/m^3 、 165kg/m^3 、 160kg/m^3 および 155kg/m^3 の5ケースについて試験を行った。

3) 実験結果および考察

No.1 配合および No.2 配合のコンクリートのスランプあるいはスランプフローの経時変化を図-4.1.1に示す。図に示すようにそれぞれ目標とする流動性を120分間保持することを確認した。練上がり120分後に、非排水加圧試験を行った結果、図-4.1.2に示すように、No.1 配合では同じ時間の加圧を行わないコンクリートのスランプが 15.5cm であったのに対し、加圧を行ったもののスランプは 0cm であった。また、No.2 配合では加圧を行わないコンクリートのスランプが 24.5cm (スランプフロー 480mm) であったのに対し、加圧を行ったもののスランプは 18cm であった。軽量骨材の加圧前の含水率は No.1 配合で 1.05% 、No.2 配合で 1.19% であったのに対し、加圧後の含水率は No.1 配合で 4.74% 、No.2 配合で 4.70% とともに 3.5% 程度増加している結果となった。本試験では軽量骨材を絶乾状態で使用したが、コンクリートの流動性の経時変化は2ケースともに僅かであり、また、練上がり120分後の骨材の含水率が 1% 程度であることから、圧力が作用しない状態では、コンクリート中の軽量骨材はほとんど吸水しないことが示された。しかしながら、コンクリートに 3.5N/mm^2 の圧力が加わると、独立空隙型人工軽量骨材といえど、軽量骨材の吸水が生じる結果となった。この吸水によって、図-4.1.2に示すコンクリートの流動性の低下につながったものと考えられる。

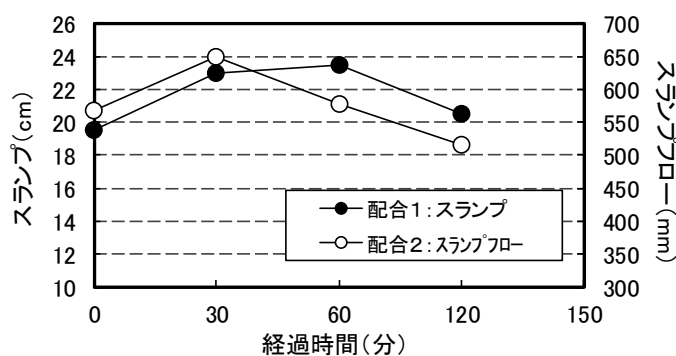


図-4.1.1 スランプ (フロー) の経時変化

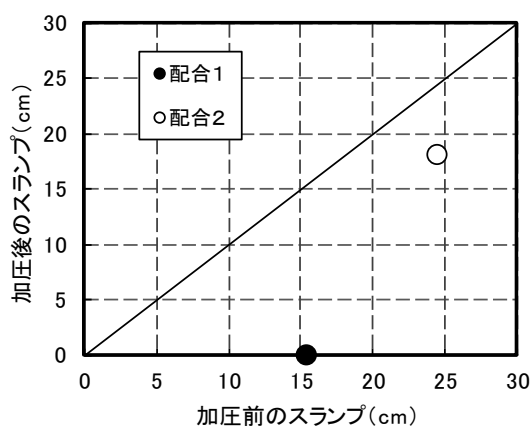


図-4.1.2 加圧前後のスランプの比較

そこで、単位水量だけ異なるコンクリートの流動性の変化について検討した。図-4.1.3 および図-4.1.4に単位水量とスランプあるいはスランプフローの関係を示す。図に示すように、No.1配合では水量が10kg(含水率に換算した場合2.8%に相当)減少することによってスランプが20cmから5cmに低下した。これに対し、No.2配合では同様に流動性が低下するものの、水量20kg(含水率に換算した場合6.3%に相当)減少してもスランプが22cmであり、十分なワーカビリティを有するコンクリートであった。このように、初期に高い流動性を有するコンクリート、ここでは、単位水量が大きく、単位粗骨材量が小さい配合では、圧送後の軽量骨材の吸水が生じてもコンクリートの流動性の低下を抑制できることが示された。

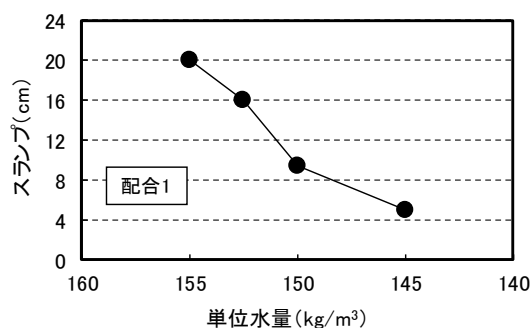


図-4.1.3 単位水量とスランプの関係 (配合1)

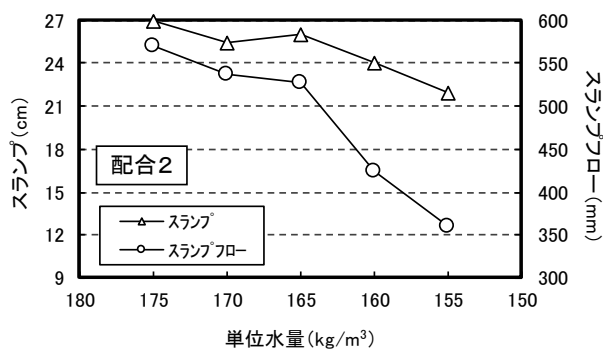


図-4.1.4 単位水量とスランプ (フロー) の関係 (配合2)

(2) 事前圧送実験

1) 実験方法

コンクリートの製造は、市中のレディーミクストコンクリート工場の水平二軸式強制練りミキサ（容量2.5m³、回転数60r.p.m）を用いて行い、全材料投入後60秒間練り混ぜた。使用材料およびコンクリートの配合は、前出表-4.1.1および表-4.1.2に示すものである。軽量骨材は絶乾状態のものを用いた。各ケースともに1バッチの練混ぜ量は1.5m³とし、3バッチ4.5m³を練り混ぜ、練り上がったコンクリートをアジテータ車（10t車）に投入した。そして、そのコンクリートについて表-4.1.3に示すフレッシュ性状試験を行い、所定の性状を満足していることを確認後、実験現場まで約120分かけて運搬した。アジテータ車が実験現場に到着後、直ちにNo.2配合から圧送を開始し、続いてNo.1配合について同様の手順で圧送を行った。使用したポンプは表-4.1.4に示す油圧ピストン式のものであり、高压仕様の設定で圧送を行った。輸送管は5B管とし、配管は、図-4.1.5に示す総延長122.8mおよび44.8mの2ケースとした。

圧送に際しては、圧送前および圧送後のコンクリートについて、表-4.1.3に示す試験を適宜行った。ここで、軽量骨材の含水率は、採取したコンクリートを5mmふるいの上で洗い、残った粗骨材を炉乾燥にかけて絶乾状態とすることで測定した。

表-4.1.3 フレッシュコンクリートの試験項目

試験項目	目標値	摘要
スランプ	21±1.5cm	JIS A 1101
スランプフロー	550±50mm	JSCE-F503-1990
空気量	4~7%	JIS A 1128
単位容積質量	—	JIS A 1116
コンクリート温度	—	温度計により測定
軽量骨材含水率	—	洗い試験後、乾燥して測定

表-4.1.4 コンクリートポンプの仕様

ストローク長	1650mm	
シリンダ数	2	
ホッパ容量	0.50m ³	
シリンダ径	φ205mm	
	標準圧仕様	高压仕様
理論吐出量	10~100m ³ /h	10~60m ³ /h
最大理論吐出圧力	4.90N/mm ²	8.05N/mm ²
水平輸送距離	530m	820m
垂直輸送距離	125m	220m

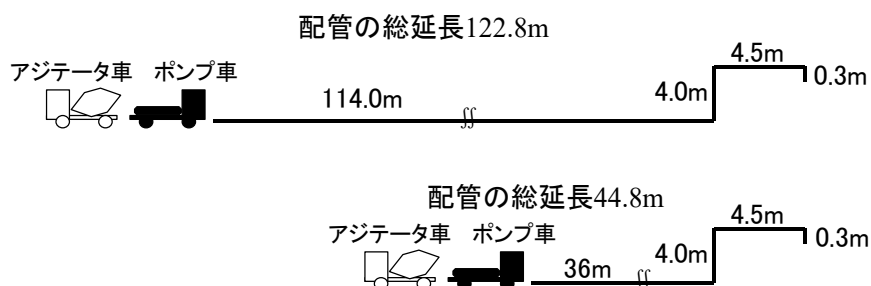


図-4.1.5 配管形状

2) 実験結果および考察

図-4.1.6 に圧送実験におけるスランプあるいはスランプフローの経時変化を示す。図に示すように、No.2 配合のスランプフローは練上がり直後 535mm に対し、練上がりから 118 分後の現場到着時 578mm、139 分後の圧送実験終了時 573mm であった。また、No.1 配合のスランプは練上がり直後 21.5cm に対し、練上がりから 127 分後の現場到着時 21.5cm、168 分後の第 1 回目の圧送性実験終了時 20.5cm、221 分後の第 2 回目の圧送性実験終了時 18.5cm であった。このように流動性の経時変化が小さかった理由としては、遅延形の高性能 AE 減水剤を用いたことに加え、コンクリート温度が 10°C 前後（外気温も 10°C 前後）と低かったことが考えられる。また、室内実験結果同様に、練上がり後のコンクリートは、アジテータ車による運搬・攪拌時には軽量骨材への吸水がほとんど生じなかったためと考えられる。なお、空気量は 7% 程度でほぼ一定であった。

図-4.1.7 にピストン前面圧の経時変化を示す。スランプフロー 550mm の No.2 配合では、圧送後ピストン前面圧が漸増し、その後 3N/mm² で一定となり、4.5m³ のコンクリートを閉塞することなく配管距離 122.8m を順調に圧送した。続いて、スランプ 21cm の No.1 配合を圧送したが、圧送開始後 7 分でピストン前面圧が 7N/mm² 以上となり、閉塞状態となった。そこで配管を切断し、コンクリートの状態を観察したところ、コンクリートはピストン近傍で最も硬くなっており、ピストンから離れるにしたがって流動性が大きくなっていることが観察された。そこで、配管距離を 44.8m と短くして、再度 No.1 配合について圧送性実験を行った。この場合においても圧送開始から約 3 分でピストン前面圧が 7N/mm² 以上となり、閉塞状態となった。

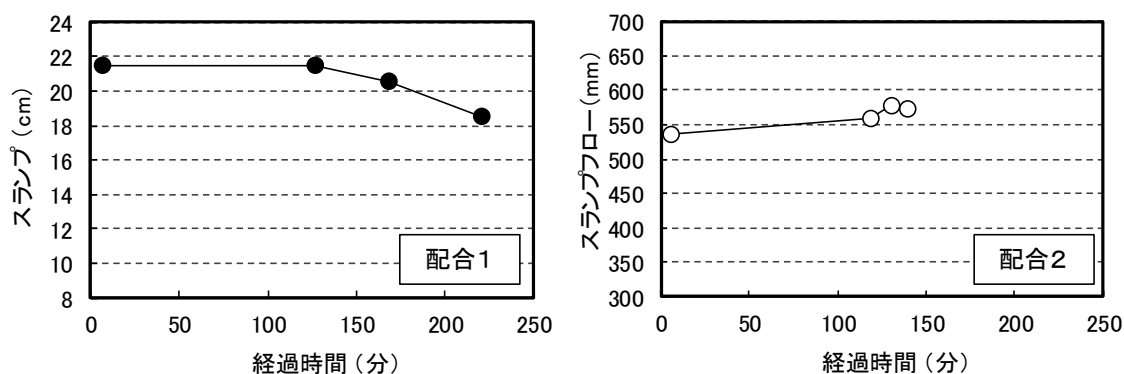


図-4.1.6 スランプ（フロー）の経時変化

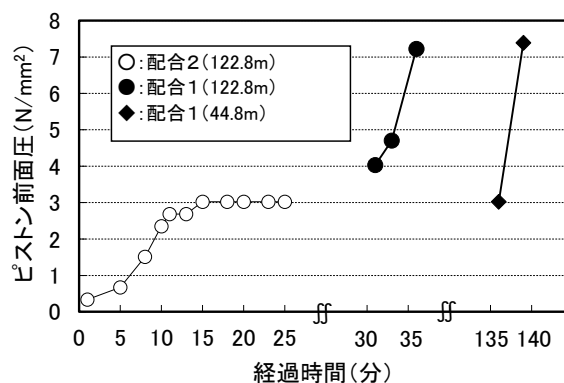


図-4.1.7 ピストン前面圧の経時変化

図-4.1.8に No.2 配合の圧送前と圧送後のスランプフローの関係を示す。No.1 配合は閉塞したため配管距離 122.8m でのデータがなく、配管距離 44.8m では閉塞直前に採取したもので圧送前 18.5cm に対し、圧送後 14.0cm であった。図-4.1.8 から No.2 配合のスランプフローは、圧送前に 573~578mm のものが圧送後 433~467mm と、100mm 程度低下しているものの、圧送後のコンクリートはスランプ 22cm 程度であり、十分に施工可能なコンクリートであった。従来の人工軽量骨材（吸水率 27.0%程度）を用い、その骨材をプレウェッティングしたコンクリートの圧送実験の結果では、圧送前のスランプフロー468mm に対し、圧送後は 384mm に低下している⁴⁾。これらのことから、圧送前のスランプフローを 550mm 程度とすることによって、独立空隙型の人工軽量骨材を用いた場合には、その骨材が絶乾状態であっても圧送が可能であることが示された。

図-4.1.9に No.2 配合の圧送前後の軽量骨材の含水率を示す。圧送前の含水率は約 2%でほぼ一定であったのに対し、圧送後の含水率は圧送時間が長くなるほど大きくなる傾向を示した。図-4.1.10にピストン前面圧と圧送後の軽量骨材の含水率の関係を示す。同図において、No.1 配合のピストン前面圧 7.22N/mm²の含水率はピストン近傍で採取したコンクリートの軽量骨材についてのものである。図に示すように、ピストン前面圧と圧送後の軽量骨材の含水率は比例関係にあり、ピストン前面圧が大きくなるほど軽量骨材の含水率が大きくなることが分かった。

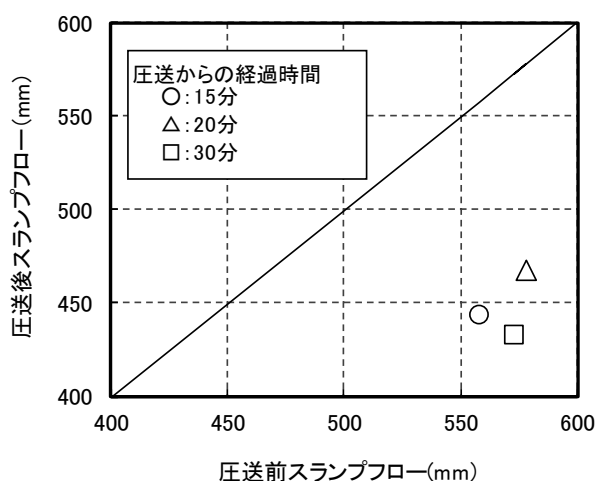


図-4.1.8 圧送前後のスランプフローの関係

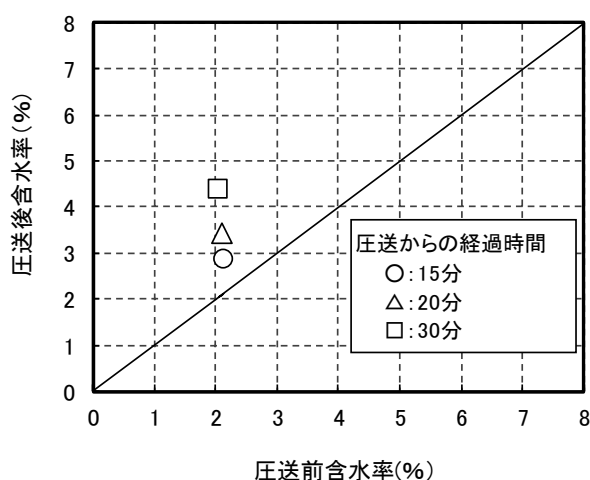


図-4.1.9 圧送前後の骨材含水率の関係

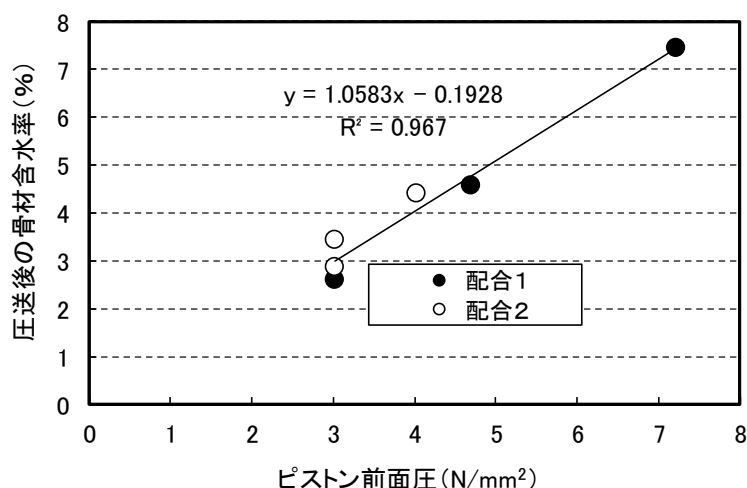


図-4.1.10 ピストン前面圧と圧送後の骨材含水率の関係

図-4.1.11 に閉塞状態となった No.1 配合のポンプ根元からの距離と軽量骨材の含水率の関係を示す。図に示すようにピストン近傍で含水率が7%以上となり、ポンプから75m離れたところでは、含水率は4.58%であった。コンクリートの流動性は、目視ではあるがピストン近傍では硬化したコンクリートのようによく、ポンプから離れるにしたがって流動性が大きくなる傾向にあった。以上のことから、今回実験を行った独立空隙型人工軽量骨材を用いたコンクリートの配管の閉塞は、管内圧力が最も大きくなるピストン近傍で軽量骨材への吸水が大きく生じてコンクリートの流動性が低下することによって起こったと考えられる。その機構は、コンクリートのスランプが21cm程度の場合、軽量骨材への吸水によってスランプが大幅に低下し、その結果さらにピストン前面圧が増加、それによって骨材への吸水がさらに増大するという悪循環となって、最終的に閉塞状態になるものと考えられる。これに対し、コンクリートのスランプフローが550mm程度の場合、軽量骨材に吸水が生じてコンクリートの流動性の低下は小さく、その結果ピストン前面圧も上がらず安定した圧送が可能になったものと考えられる。

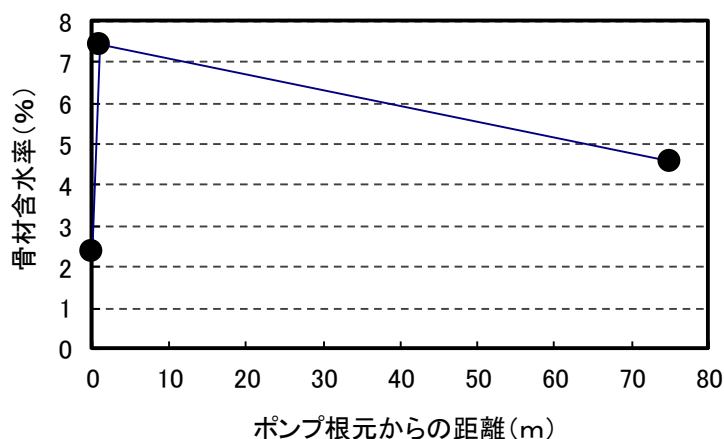


図-4.1.11 ポンプからの距離と骨材含水率の関係

図-4.1.12に圧送前後のコンクリートの圧縮強度試験結果を示す。図に示すように、No.1 配合では圧送前後の圧縮強度は、圧送後の方がわずかに大きいものの、ほぼ同じであった。これはNo.1 配合では圧送開始後数分で閉塞したため、採取した筒先におけるコンクリートの粗骨材の吸水率は2.59%であり圧送後の粗骨材の吸水率の増加が小さかったことによるものと考えられる。これに対し、No.2 配合では明らかに圧送後の強度の方が大きくなった。従来の人工軽量骨材を用いた既往の研究⁵⁾では、圧送前後の圧縮強度を比較すると若干圧送前の方が大きくなっている。しかし、今回の実験では、独立空隙型の人工軽量骨材を絶乾状態で使用したため、圧送によってモルタル中の水分が骨材に吸水され、その結果モルタルの強度が増大したものと考えられる。実際に、No.2 配合において圧送後の粗骨材の吸水率は4.58%であり、圧送前に比べて2%以上大きくなっていた。

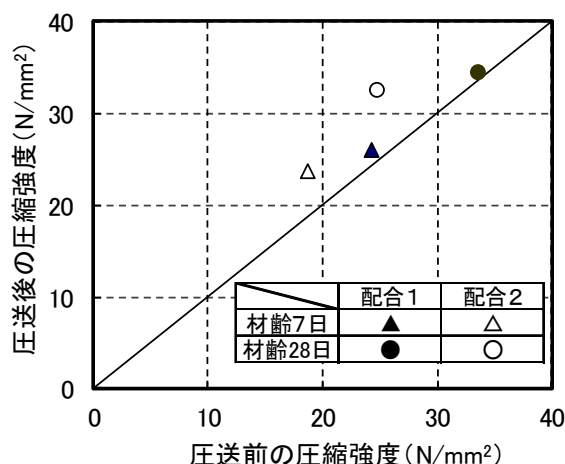


図-4.1.12 圧送前後の圧縮強度の関係

(3) まとめ

独立空隙型の人工軽量骨材を用いたコンクリートの圧送性について、室内実験および圧送実験を行った結果、以下のことが明らかとなった。

- ・ 軽量骨材を絶乾状態で使用した場合でも、圧力が作用しない状態ではコンクリート中の骨材はほとんど吸水せず、コンクリートの流動性の経時変化に影響を及ぼさない。
- ・ 圧送前のコンクリートのスランプフローを55cm程度とすることによって、軽量骨材が絶乾状態であっても十分に圧送が可能である。
- ・ 圧送性を確保するためには、単位水量を確保し、粗骨材の絶対容積を大きくしないこと、圧送負荷（管内圧力）を下げ、骨材への吸水を抑制することがポイントである。つまり、配合の工夫により、圧送前の流動性を高めておくことが有効である。
- ・ 軽量骨材を絶乾状態で使用した場合、圧送後のコンクリートの圧縮強度は、圧送前よりも大きくなる。

4. 1. 3 骨材の加圧吸水の抑制に関する検討

前節の事前圧送実験において、安定した圧送性を確保するためには、軽量骨材の加圧吸水を抑制する必要性が示された。本節では、その一手法として、併用系高流動コンクリートに用いられる特殊増粘剤ウェランガム⁶⁾をコンクリートに添加する方法について検討した⁷⁾。ウェランガムに期待した効果としては、①フレッシュコンクリート中の水の粘性が増大することで、骨材に吸水が生じにくくなること、②同一の流動性を得るための高性能 AE 減水剤の量が増加することで、経過時間に伴う流動性の低下が小さくなること、であり、これらの効果が有効に機能すれば、安定した圧送性を付与できると考えた。これに加え、③同一の流動性における材料分離抵抗性が向上し、打込み、締固めの難易度が下がること、④温度や練混ぜ水量の変化に対して、流動性の変化が鈍化し、フレッシュコンクリートの性状が安定することも期待した。

(1) 実験概要

1) 使用材料およびコンクリートの配合

使用材料を表-4.1.5 に示す。使用した粗骨材G1 は、独立空隙型人工軽量粗骨材であり、24時間吸水率が1.06%のものである。混和剤には、ポリカルボン酸エーテル系の高性能 AE 減水剤を使用した。

表-4.1.6 に検討の対象としたコンクリートの配合を示す。圧縮強度 40N/mm²、単位容積質量 1,800kg/m³ の高強度軽量骨材コンクリートを想定して、配合および流動性の違いが、加圧後のフレッシュコンクリートの性状に及ぼす影響を検討するために、スランプ 21cm およびスランプフロー550mm の2種類のコンクリートについて試験を実施した。また、各々のコンクリートにウェランガムを添加した場合と添加しない場合について検討を行い、ウェランガムの添加が、加圧後のフレッシュコンクリートの性状に及ぼす影響について評価した。配合記号の数字は水セメント比、SF はスランプフロー、SL はスランプ、V はウェランガム添加を意味する。

表-4.1.5 使用材料

使用材料	記号	摘要	
セメント	C	早強ポルトランドセメント	密度:3.13g/cm ³ , 比表面積:4,570cm ² /g
細骨材	S1	粗砂:岩舟郡荒川産川砂	表乾密度:2.58g/cm ³ , 吸水率:1.42%
	S2	細砂:太郎代産山砂	表乾密度:2.58g/cm ³ , 吸水率:1.85%
		混合比 粗砂:細砂=65:35	粗粒率:2.60
粗骨材 (室内試験)	G1	真珠岩系独立空隙型人工軽量粗骨材	絶乾密度:1.20g/cm ³ , 24h吸水率:1.06%, 実積率:60.1%, 最大寸法:15mm
混和剤	SP	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸エーテル系(標準形)
	VIS	特殊増粘剤	ウェランガム

表-4.1.6 コンクリートの配合

配合	流動性の目標値	空気量 (%)	W/C (%)	Gvol (kg/m ³)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						
						W	C	S1	S2	G	SP	VIS
40SFV	スランプフロー 550±50mm	6.0 ± 1.5	40.0	310	51.1	170	425	543	293	372	6.80	0.085
40SF	スランプフロー 550±50mm		40.0	310	51.1	170	425	543	293	372	3.83	0
40SLV	スランプ 21±1.5cm		40.0	340	47.9	160	400	523	282	408	5.20	0.065
40SL	スランプ 21±1.5cm		40.0	340	47.9	160	400	523	282	408	3.60	0

W/C:水セメント比, Gvol:単位粗骨材容積, s/a:細骨材率
G:絶乾状態で表示

2) 実験方法

練混ぜにはパン型強制練りミキサ（容量 60ℓ）を使用し、練混ぜ量は 50ℓ とした。練混ぜは、全材料投入後 120 秒間攪拌し、ミキサ内で 5 分間静置した後、さらに 30 秒間攪拌して排出した。コンクリートの基本性状を確認するために、練上り直後のスランプ、スランプフロー、空気量および単位容積質量を測定した。また、コンクリートポンプによる圧送を想定して、加圧に対するフレッシュコンクリートの性状変化を把握するために、非排水状態とした加圧ブリーディング試験容器（φ200×h250mm）を用いてフレッシュコンクリートの加圧試験を実施した。本節での加圧条件は、加圧力を 3.5N/mm²、加圧時間を 1 分間とし、二つの容器に試料を詰め、加圧した試料および加圧しない試料について同時刻にスランプ、スランプフローおよび軽量骨材の含水率を測定した。

(2) 実験結果

練上り直後のフレッシュコンクリートの試験結果を表-4.1.7 に示す。いずれの配合も目標品質をほぼ満足するものであった。加圧前後の流動性の比較を図-4.1.13 に、加圧前後の骨材含水率の比較を図-4.1.14 に示す。図-4.1.13 より、いずれの配合も加圧によって流動性の低下が認められたが、ウェランガムを添加した場合には、流動性の低下が軽減されていた。また、図-4.1.14 に示すように、3.5N/mm²の非排水加圧試験によって、軽量骨材の含水率は、いずれの配合においても、24 時間吸水率 1.06%を上回る結果となった。ただし、ウェランガムを添加した場合には加圧前の骨材含水率が小さくなっており、絶乾状態で使用した軽量骨材の練混ぜ中の吸水が抑制されていた。さらに、加圧前後における骨材含水率の変化も小さくなっていった。これらのことから、水溶性の増粘剤ウェランガムの添加によってフレッシュコンクリート中の水の粘性が増大し、骨材内部への吸水が抑制され、その結果、加圧に対する流動性の低下を軽減できると考えられた。ただし、表-4.1.8 に示すように、含水率の変化から推定される加圧後の単位水量は、ウェランガム添加の有無で 1kg/m³程度しか差が生じておらず、吸水の影響以外にも流動性の保持を改善するための要因があることが想像される。ウェランガムを添加した場合には、同等の流動性を得るための高性能 AE 減水剤の添加量が増加する。また、後述の図-4.1.28 にも示すように、単位水量の変化に対して、コンクリートの流動性の変化を低減させる効果もある。これらのことが、軽量骨材内部への吸水による水量変化に対して、コンクリートの流動性の変化を生じにくくさせているものと考えられた。

なお、目標スランプ 21cm のコンクリートは加圧によってワーカビリティが極端に損なわれており、特にウェランガムを添加しない場合にはスランプが 21cm から 3cm まで低下した。この現象は、前節の事前圧送実験における現象を再現するものであり、単位水量が小さい上、粗骨材量が大きいために、加圧による骨材内部への吸水の影響が顕著に現れたことによるものと考えられた。

表-4.1.7 フレッシュコンクリートの試験結果

配合	コンクリート 温度 (°C)	スランプ ^o (cm)	スランプフロー		空気 量 (%)	単位容積 質量 (kg/m ³)
			(mm)			
				平均		
40SFV	20.3	26.0	519 × 514	517	7.0	1819
40SF	20.2	24.5	472 × 470	471	4.7	1839
40SLV	20.2	24.0	416 × 415	416	6.2	1784
40SL	20.6	22.0	385 × 364	375	4.5	1834

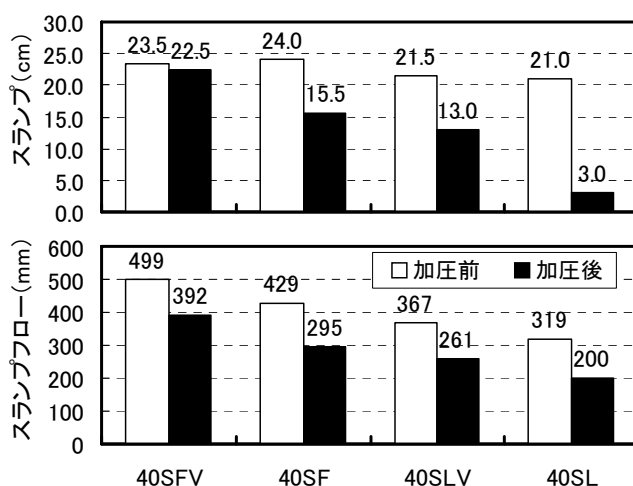


図-4.1.13 加圧前後の流動性の比較

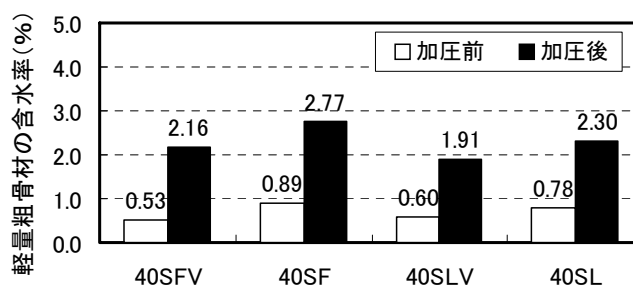


図-4.1.14 軽量骨材の含水率

表-4.1.8 軽量骨材の含水率の上昇から推定される加圧後のコンクリートの単位水量

配合	加圧前含水率 (%)	加圧後含水率 (%)	増加した含水率 (%)	単位粗骨材量 (絶乾重量) (kg)	単位水量の減少量 (kg/m ³)	加圧後の推定単位水量 (kg/m ³)
40SFV	0.53	2.16	1.63	372	6.06	164
40SF	0.89	2.77	1.88	372	6.99	163
40SLV	0.60	1.91	1.31	408	5.34	155
40SL	0.78	2.30	1.52	408	6.20	154

これらのことから、独立空隙型人工軽量骨材を気乾状態で用いるコンクリートの圧送性を確保する手法として、圧送前の流動性を高めた上で、増粘剤ウェランガムを添加しておくことが有効であることが示された。

4. 1. 4 圧送実験による吸水抑制手法の検証

独立空隙型人工軽量骨材を気乾状態で用いるコンクリートの圧送性を確保する手法として、圧送前の流動性を高めた上で増粘剤ウェランガムを添加する手法の有効性を検証するために、新たに圧送実験を実施した⁷⁾。

(1) 検証実験概要

1) 使用材料およびコンクリートの配合

使用材料を表-4.1.9に示す。使用した粗骨材Gpは独立空隙型人工軽量粗骨材であり、24時間吸水率が2.8%のものである。軽量骨材は、4.1.3の室内実験で使用したもの(G1:24時間吸水率1.06%)とは製造ロットが異なり、24時間吸水率がやや大きい値となっている。

圧送実験に供したコンクリートの配合を表-4.1.10に示す。実験では、室内実験で検討した40SFV、40SF、40SLVに加え、水セメント比を38%まで小さくした38SFV(W/C=38%, Gvol=330ℓ/m³)についても検討の対象とした。なお、事前圧送実験の結果を踏まえ、4.1.3で検討した40SL(スランプ21cm, ウェランガムなし)については、検討から除外した。

表-4.1.9 使用材料(圧送実験:検証)

使用材料	記号	摘要	
セメント	C	早強ポルトランドセメント	密度:3.13g/cm ³ , 比表面積:4,570cm ² /g
細骨材	S1	粗砂:岩舟郡荒川産川砂	表乾密度:2.58g/cm ³ , 吸水率:1.42%
	S2	細砂:太郎代産山砂	表乾密度:2.58g/cm ³ , 吸水率:1.85%
		混合比 粗砂:細砂=65:35	粗粒率:2.60
粗骨材 (圧送実験)	Gp	真珠岩系独立空隙型 高性能人工軽量粗骨材	絶乾密度:1.24g/cm ³ , 24h吸水率:2.80%, 実積率:61.5%, 最大寸法:15mm
混和剤	SP	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸エーテル系(標準形)
	VIS	特殊増粘剤	ウェランガム

表-4.1.10 コンクリートの配合(圧送実験:検証)

配合	流動性の 目標値	空気量 (%)	W/C (%)	Gvol (ℓ)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						
						W	C	S1	S2	G	SP	VIS
40SFV	スランプ 550±50mm	6.0 ± 1.5	40.0	310	51.1	170	425	543	293	384	6.80	0.085
40SF	スランプ 550±50mm		40.0	310	51.1	170	425	543	293	384	3.83	0
40SLV	スランプ 21±1.5cm		40.0	340	47.9	160	400	523	282	422	5.20	0.065
38SFV	スランプ 550±50mm		38.0	330	48.1	165	435	513	276	409	6.96	0.087

W/C:水セメント比, Gvol:単位粗骨材容積, s/a:細骨材率
G:絶乾状態で表示

2) 実験方法

圧送実験は図-4.1.15に示す配管条件(配管総延長109m, 5B管)で行った。使用したコンクリートポンプは表-4.1.11に示す仕様を有する油圧ピストン式のものであり、標準圧仕様の設定で圧送を行った。コンクリートの製造は市中のレディーミクストコンクリート工場の水平二軸式強制練りミキサ(容量3.0m³)を使用して行い、1バッチの練混ぜ量を2.5m³として2バッチ分5m³を1台のアジテータ車に積載した。練混ぜ時間は全材料投入後120秒間とした。練混ぜに

供した独立空隙型人工軽量粗骨材（Gp）は、気乾状態のものとした。圧送実験では、コンクリートの設定吐出量を $25\text{m}^3/\text{h}$ として配合 40SLV, 38SFV, 40SFV, 40SF の順序で各 5m^3 ずつ圧送した。また、先送りモルタルおよび配合切替えの目印となる中間モルタルとして、配合 40SFV から粗骨材を除いたモルタルを 0.5m^3 ずつ圧送した。試験項目および測定項目は表-4.1.12 に示すとおりであり、圧送によるコンクリートの性状変化を評価した。また、配合の相違がポンプ圧送性に及ぼす影響を評価するために配管上に設置した圧力変換器（P1～P4、図-4.1.15 参照）で管内圧力を連続的に計測するとともに、ポンプ主油圧および実吐出量を測定した。

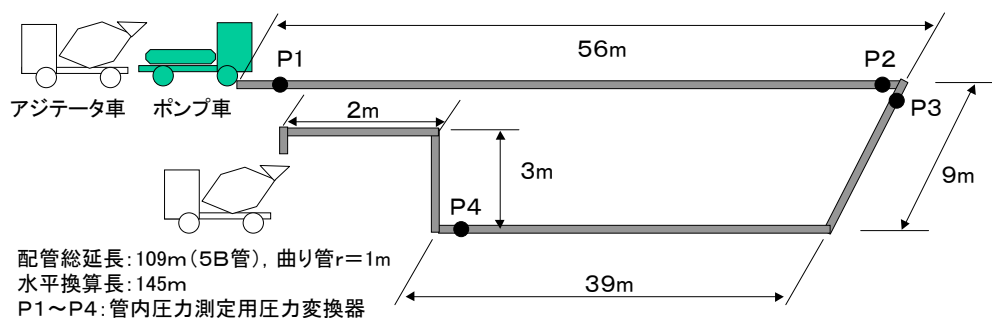


図-4.1.15 ポンプ圧送試験の配管状況

表-4.1.11 コンクリートポンプの仕様

ストローク長	1600mm	
シリンダ数	2	
ホッパ容量	0.35m^3	
輸送シリンダ径	$\phi 210\text{mm}$	
	標準圧仕様	高圧仕様
理論吐出量	$15\sim 110\text{m}^3/\text{h}$	$15\sim 68\text{m}^3/\text{h}$
最大理論吐出圧力	$4.90\text{N}/\text{mm}^2$	$7.85\text{N}/\text{mm}^2$
水平輸送距離	—	1050m
垂直輸送距離	—	200m

表-4.1.12 試験および測定項目

項目	出荷時	現着時	圧送前	圧送後(筒先)
スランプ(フロー)	○	○	○	○
空気量	○	○	○	○
単位容積質量	○	○	○	○
コンクリート温度	○	○	○	○
粗骨材含水率	—	—	○	○
圧縮強度	—	—	○(7,28日)	○(7,28日)
ポンプ主油圧	—	—	圧送中に連続して計測	
管内圧力	—	—	圧送中に連続して計測	
実吐出量	—	—	荷卸しに要した時間をポンプ稼働時間で除して算出	

(2) 検証実験結果

圧送実験に先立って、配合 40SFV および 40SLV について実機による練混ぜ試験（以下、実機試験）を行った。実機試験におけるコンクリートの流動性の経時変化を図-4.1.16 に示す。なお、試験値はアジテータ車から採取した試料によるものである。図に示すように、両配合とも練上りから 60 分経過しても流動性はほとんど変化しなかった。これは、冬季の試験（外気温 9.0°C、コンクリート温度 12.0~13.0°C 程度）であったこと、ウェランガムの添加によって経時に伴う性状変化が軽減⁶⁾されたことによるものと判断された。軽量粗骨材の含水率は図-4.1.17 に示すように、練上りから 60 分経過してもほとんど増加しておらず、練混ぜ時を除いて、圧力が作用しない状態では独立空隙型の軽量骨材がモルタル中の水をほとんど吸水しないことが示された。

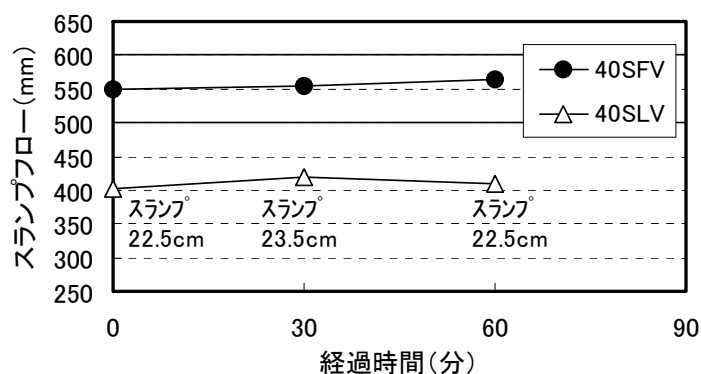


図-4.1.16 スランプフローの経時変化

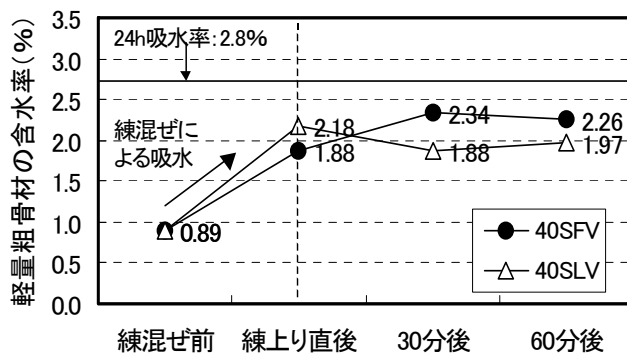


図-4.1.17 軽量粗骨材の含水率の変化

次に圧送実験における測定結果について記す。図-4.1.18 にポンプ主油圧から換算したピストン前面圧の時刻歴を示す。目標スランプ 21cm の 40SLV については、4 m³ 程度圧送した頃（圧送開始から 9 分後）からピストン前面圧がポンプの最大理論吐出圧力 (4.9N/mm²) の 8 割を超え、ポンプが正常に作動しなくなった。そこで 4.4m³ 圧送した時点でこれ以上の圧送は困難と判断し、圧送を終了した。ただし、ほぼ同一の条件で実施した前述の「4.1.2 事前圧送実験」では、目標スランプ 21cm のコンクリートは圧送開始直後から閉塞状態になったのに対し、40SLV は多少なりとも圧送性が改善されていた。その理由としては、事前圧送実験の配合 1 よりも単位水量を 5 kg/m³ 増加させ、単位粗骨材容積を 10 l/m³ 減じたこと、およびウェランガムを添加したことによるものと推察された。目標スランプフロー 550mm とした配合については、ピストン前面圧が

ほぼ一定値を示し、円滑な圧送が可能であった。図-4.1.19に圧送が定常状態となった時の管内圧力と圧力損失の測定結果を示す。P1～P4間の単位長さ当たりの圧力損失は40SFV<38SFV<40SF<40SLVの順に小さく、目標スランプ21cmの40SLVは目標スランプフロー550mmの他の配合に比べて圧力損失が大きい結果を示した。また、40SFVと40SFを比較すると、40SFVの圧力損失が1割程度小さい結果となった。これは、図-4.1.20に示すように、40SFVの方が40SFよりもスランプフローが大きかったこと、およびウェランガムを添加することで圧送中の流動性の変化が抑制されていたことによるものと推察された。なお、ほぼ同一の圧送条件における従来の軽量骨材を用いたコンクリートの圧力損失は、単位セメント量350～400kg/m³、スランプ18cmのもので0.02N/mm²/m程度である⁸⁾。この値と比較すると、圧力損失が最も小さい40SFVであっても1.3倍程度大きい値を示した。これは、水セメント比が小さく、かつ単位セメント量が多いためであると考えられた。なお、曲がり管での圧力損失(P2～P3)はほとんど認められなかった。これは、軽量骨材が球形であり、曲がり部において骨材が干渉しにくく、干渉が生じてもすぐに解消されるためであると推察された。

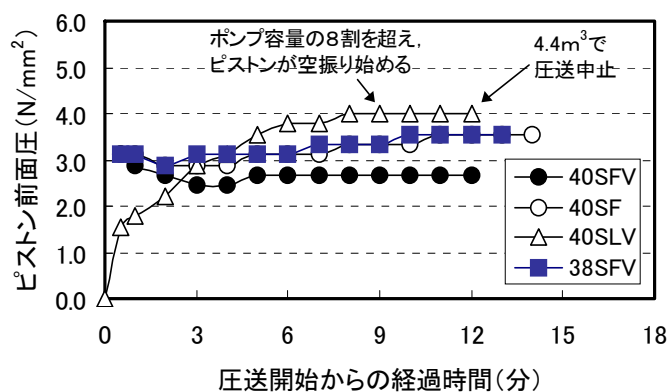


図-4.1.18 ピストン前面圧の時刻歴

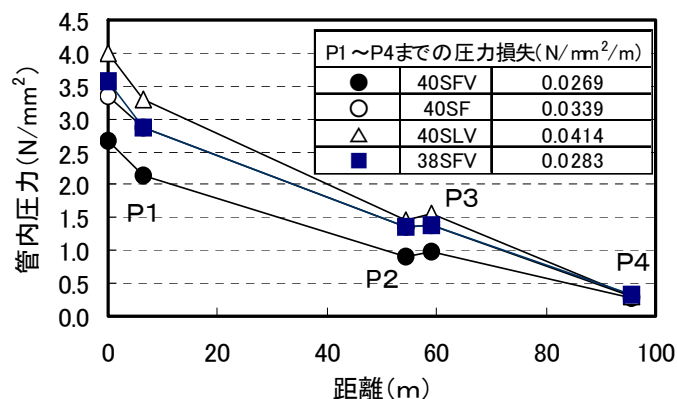


図-4.1.19 管内圧力と管内圧力損失量

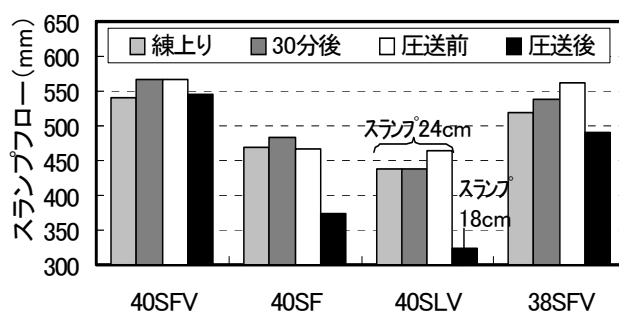


図-4.1.20 試験における流動性の変化

図-4.1.21 に実吐出量の測定結果を示す。配合 40SLV は圧送を中止する 4.4m³ までの結果であるが、実吐出量が他の配合に比べて明らかに小さい値であった。40SFV と 40SF の実吐出量を比較すると、ウェランガムを添加した 40SFV の方が大きく、ウェランガムを添加することで圧送効率（機械効率 η_m ）が向上するものと考えられた。水セメント比を 38% まで小さくした 38SFV は、40SFV と比べて圧送効率がわずかに低下する程度であった。

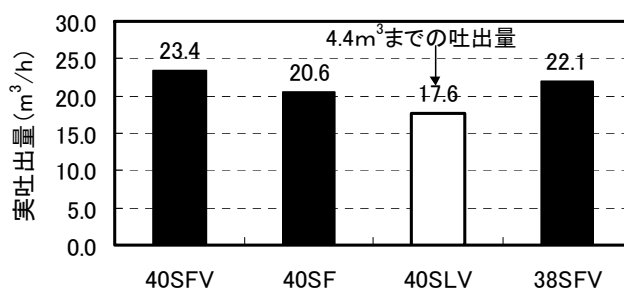


図-4.1.21 実吐出量の比較

圧送実験におけるコンクリートの流動性の変化は、図-4.1.20 に示すとおりであり、実機試験と同様、いずれの配合も練上りから圧送前までの流動性の変化はわずかであった。圧送に伴う流動性の低下は、40SFV < 38SFV < 40SF < 40SLV の順に小さくなる結果を示した。40SFV と 40SF を比較すると、圧送前のスランプフローが若干異なるものの、ウェランガムを添加した 40SFV はスランプフローの低下が 23mm と小さかったのに対し、ウェランガムを添加しない 40SF は 93mm の低下を示し、室内試験と同様、ウェランガムを添加することで流動性の低下が抑制されていた。また、骨材含水率についても、図-4.1.22 に示すようにウェランガムを添加した 40SFV は含水率の増加が小さく、骨材内部への吸水が抑制されていた。40SLV は、圧送を終了した際のスランプが 18cm であり、6 cm スランプロスが生じていた。水セメント比 38% の 38SFV のスランプフローの低下は 73mm であった。このように、ウェランガムを添加した場合でも、配合によって流動性の低下が異なる理由としては、単位水量や粗骨材量の相違、ならびに圧送中に受ける管内圧力の大きさが影響しているといえる。

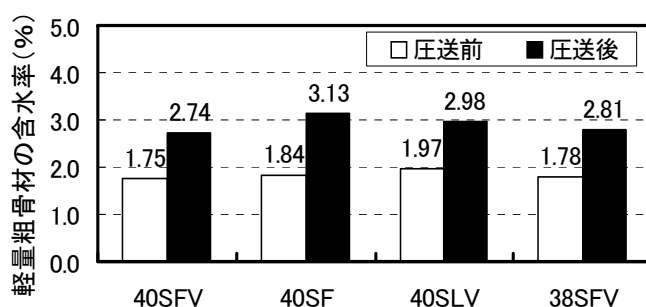


図-4.1.22 圧送前後の軽量骨材含水率の変化

空気量および単位容積質量の変化は図-4.1.23, 4.1.24 に示すとおりであり、練上り時および30分後の試験値は、他の試験時のものよりも空気量が大きく、単位容積質量が小さくなる傾向を示した。これは、練上り時および30分後のものは、荷卸しの際にアジテータ車による高速攪拌を行ったため、巻き込みによるエントラップトエアが混入されたことによるものと考えられた。また、圧送によって空気量が減少し、単位容積質量が増加する傾向を示した。単位容積質量の増加については、空気量が減少したことと圧送負荷を受けてモルタル中の自由水が骨材中へ吸水されたことが主な原因であると考えられた。

材齢28日の圧縮強度は図-4.1.25 に示すように、水セメント比40%のもので55N/mm²、水セメント比38%のもので60N/mm²であり、圧送前後の圧縮強度の変化は小さいものであった。

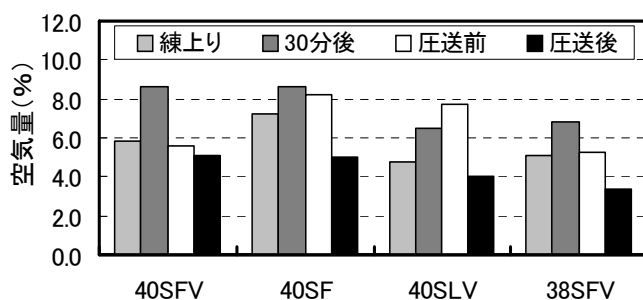


図-4.1.23 空気量の変化

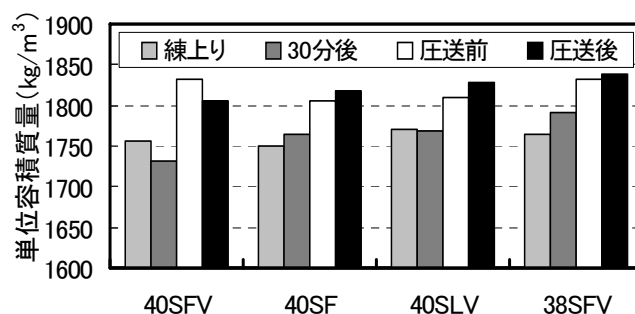


図-4.1.24 単位容積質量の変化

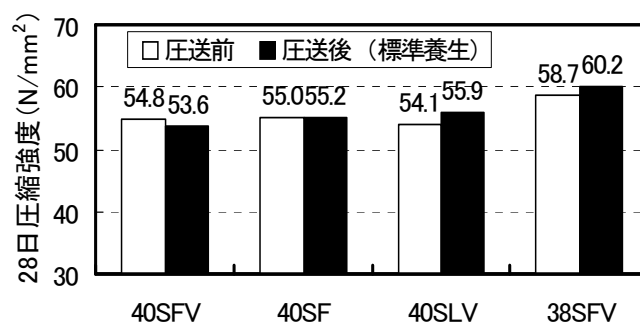


図-4.1.25 圧送前後の圧縮強度の比較

(3) まとめ

独立空隙型人工軽量骨材を気乾状態で練り混ぜたコンクリートを円滑に圧送するための手法として、増粘剤ウェランガムを添加する方法について検討し、その検証を行うための圧送実験を実施した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- ・ウェランガムを添加することで、ポンプ圧による軽量粗骨材の吸水を抑制することが可能であり、安定した圧送が可能となる。また、圧送後のコンクリートの流動性の低下を軽減できる。
- ・コンクリートの流動性をスランプフロー500mm以上とすることが有効である。

4. 1. 5 増粘剤ウェランガムと高性能 AE 減水剤の一液化

増粘剤ウェランガムをコンクリートに添加する場合、通常は、水溶性の袋に詰めたウェランガムをミキサ内に投入する作業を伴う。この作業を簡略化するため、ウェランガムをポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤に予め添加し、一液化した状態で高性能 AE 減水剤とともに計量してミキサ内に投入する方法を考案し、その実現を試みた。一般に、増粘剤を高性能 AE 減水剤に溶解すると溶液の粘度が高くなりすぎ、計量できない状態となる。しかし、増粘剤ウェランガムは高性能 AE 減水剤とある比率で混合すると、ウェランガムが膨潤状態となり、高性能 AE 減水剤中で浮遊するという性質を持つ。この性質を利用してウェランガムと高性能 AE 減水剤の一液化を図った⁹⁾。

(1) 膨潤状態となる混合比率の確認

1) 使用材料

増粘剤にはウェランガムを、高性能 AE 減水剤にポリカルボン酸系のものをそれぞれ用いた。

2) 実験方法

液状の高性能 AE 減水剤にイオン交換水を添加することによって任意の濃度に希釈した。その希釈された高性能 AE 減水剤に対して 0.5 重量%に相当するウェランガム粉体を投入し、ウェランガムが希釈液中で均一に分散するようにプロペラ攪拌機にて 15 分間攪拌した。次に、その分散液の粘度を BM 型粘度計にて測定した。なお、60r.p.m.での粘度とし、粘度測定試料はすべて 25 ± 1°C に調整した。ここで、ウェランガムの添加率 0.5 重量%は、希釈しない高性能 AE 減水剤をコンクリート 1 m³ 当たり 10ℓ 添加すると想定すると、ウェランガムの添加量がコンクリート 1 m³ 当たり 50g に相当する。

試験要因としては、高性能 AE 減水剤の濃度（以後、SP 剤濃度と記す）とし、0, 10, 50, 70, 85, 90, 95, 99 および 100% の 9 水準とした。ここで、0% はイオン交換水のみを意味し、100% は高性能 AE 減水剤のみを意味する。

3) 実験結果および考察

SP 剤濃度と水溶液の粘度の関係を図-4.1.26 に示す。図に示すように、イオン交換水 (SP 剤濃度 0%) では粘度が 1,100 mPa·s と大きく、また、SP 剤濃度が 10% では 1,210 mPa·s とさらに粘度が大きくなった。ウェランガムを含む水溶性高分子類は一般に、溶媒系に電解質を含まないイオン交換水のような液体を用いた場合、高分子の分子的広がりが良好となり、本来の粘度を発現する。これに高性能 AE 減水剤のような電解質の濃度が増すと分子間に弱い絡みが生じて、粘度が電解質を含まない場合に比べて高くなることもある。さらに SP 剤濃度が 50~99% では、SP 剤濃度が大きくなるに従い粘度は小さくなるものの、水溶液を静置しても沈殿物は認められなかった。これに対し、SP 剤濃度が 100% では、水溶液の粘度が 50 mPa·s とさらに小さくなり、底に沈殿物が認められた。

これらのことは、さらに電解質の濃度が上昇すると徐々に粘度が低下し、最終的にはその溶媒系では均一に分散できなくなり、不溶化すなわち分離または沈降することを示している。この粘度上昇する濃度と分離・沈降する濃度の中間的な濃度では、ウェランガム分子は完全に分散しているのでもなく、完全に不溶化しているのでもない膨潤状態、すなわち個々の分子が均一に分散し、粉体の状態に比べてその密度は限りなく溶媒の密度に近くなっており、ある有限の期間内では安定状態となると考えられる。今回の試験では、SP 剤濃度 90~99% で、粘度が 150 mPa·s 程度であり、この範囲で、より低粘度でウェランガム分子のほとんどが膨潤状態になるものと考えられる。ここで、粘度 150 mPa·s は一液化した溶液を十分に計量できる粘度である。

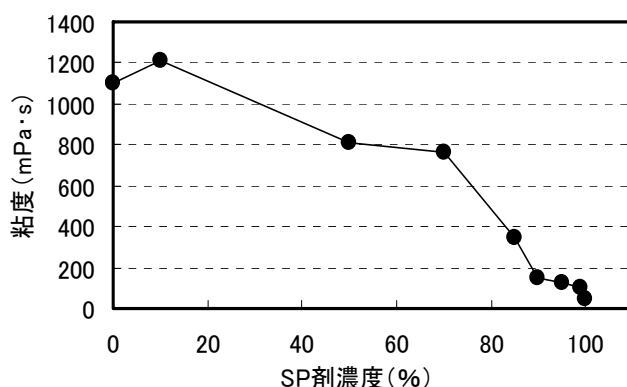


図-4.1.26 SP 剤濃度と粘度の関係

(2) 長期安定性の確認

1) 実験方法

SP 剤濃度 90, 95 および 99% の 3 水準について、増粘剤ウェランガムと高性能 AE 減水剤の混合溶液を作り、作製後直ぐ、2 週間、1 カ月 (4 週)、3 カ月 (13 週) および 6 カ月 (26 週) 後に、それぞれ溶液の粘度を測定するとともに目視により分離の有無を観察することによって、混合溶液の長期安定性を評価した。

2) 実験結果および考察

混合溶液作製後の経過時間と溶液の粘度の関係を図-4.1.27 に示す。図に示すとおり、SP 剤濃度が 99% のものは、2 週間後に粘度が低下し、沈降物が確認された。これに対し、SP 剤濃度が 90% および 95% のものは、溶液作製後から 6 カ月後まで、粘度は 130~150 mPa·s とほぼ一定であり、また、沈殿物も認められなかった。このことから、SP 剤濃度が 90%~95% の場合、溶液混合後、少なくとも 6 カ月は膨潤状態にあり、安定した状態に保たれることが示された。

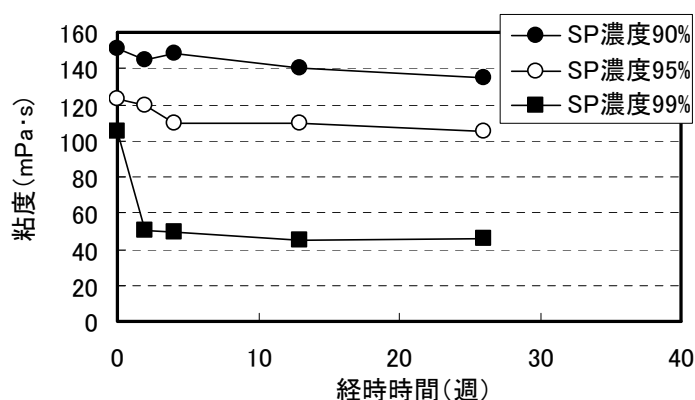


図-4.1.27 粘度の経時変化

(3) 高流動コンクリートに使用した場合の効果の確認

1) 使用材料およびコンクリートの配合

使用材料を表-4.1.13 に示す。ここでは、混和剤の性能を評価することを主目的とし、粗骨材には人工軽量骨材ではなく、硬質砂岩砕石を使用した。コンクリートの基本配合を表-4.1.14 に示す。実験に供した配合は、各ケースとも混和剤の種類および使用量以外は同じとして、増粘剤

なし、ウェランガムを一液化した混和剤を添加（ウェラン一液）、ウェランガムと高性能 AE 減水剤を個別に添加（ウェラン別添）の3ケースの高流動コンクリートについて試験を行った。

表-4.1.13 使用材料

使用材料	記号	摘要	
セメント	C	普通ポルトランドセメント	密度 3.16g/cm^3 , 比表面積 $3.320\text{cm}^2/\text{g}$
混和材	LP	石灰石微粉末	密度 2.73g/cm^3 , 比表面積 $3.500\text{cm}^2/\text{g}$
細骨材	S	新潟産山砂	表乾密度 2.62g/cm^3 , 吸水率1.55%, 粗粒率2.68
粗骨材	G	八王子産硬質砂岩碎石	表乾密度 2.65g/cm^3 , 吸水率0.67%, 粗粒率6.70, 最大寸法20mm
混和剤	SP	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系
	VIS	増粘剤	ウェランガム

表-4.1.14 コンクリートの基本配合

ケース	W/C (%)	Gvol (l/m^3)	Vs/Vm (%)	Vw/Vp (%)	Air (%)	単体量(kg/m^3)					SP (P×%)	VIS (W×%)
						W	C	LP	S	G		
増粘剤なし											1.1	-
ウェラン一液	55.0	320	42.0	85.3	4.5	170	310	275	696	848	1.9	(0.050)*
ウェラン別添											1.7	0.050

Gvol: 単位粗骨材容積, Vw/Vp: 細骨材容積比, Vw/Vp: 水粉体容積比, P: 粉体重量(C+LP)

*:()内の数字はSP剤に添加されている%を示す

2) 実験方法

フレッシュコンクリートの性状を安定させる効果を判断する方法として、細骨材の表面水率の設定誤差を想定し、基本配合に対して、単体量を -7 , ± 0 および $+7\text{kg/m}^3$ の3水準に変化させたコンクリートについてそれぞれ試験を行った。これは細骨材の表面水率で $\pm 1\%$ に相当するものである。高性能 AE 減水剤の添加量は、スランプフローが 650mm 程度となるように定めた。コンクリートの練混ぜは、水平二軸式強制練りミキサ（容量 100l , 60r.p.m ）を用いて行った。練混ぜ方法としては、まずモルタルを 90 秒練り混ぜ、続いて粗骨材を投入後 90 秒練り混ぜ、コンクリートをミキサ内で 5 分静置後、 30 秒間練り混ぜて練上がりとした。1回の練混ぜ量は 50l とした。練上がり直後に、スランプフロー試験、 V_{75} 漏斗試験、空気量試験およびボックス充填性試験（ランク2）¹⁰⁾を行った。

3) 実験結果および考察

スランプフロー試験結果を図-4.1.28に示す。単体量の $\pm 7\text{kg/m}^3$ の変化に対し、スランプフローの変化は、増粘剤なしで 150mm であったのに対し、ウェランガムを一液化した高性能 AE 減水剤を用いたケース（ウェラン一液）で 20mm 、ウェランガムを高性能 AE 減水剤と別添加したケース（ウェラン別添）で 27mm であった。このことから、ウェランガムを一液化した混和剤を用いた場合でも、別添した場合と同等の流動性安定効果が得られることが示された。

V_{75} 漏斗試験の結果を図-4.1.29に示す。 V_{75} 漏斗流下時間は、すべてのケースで水量が増えるほど速くなる傾向を示したが、ウェランガムを添加したものは、一液化、別添にかかわらずその変化は小さい結果となった。空気量は、単体量の $-7\sim+7\text{kg/m}^3$ の変化に対し、増粘剤なしで $7.5\sim 2.4\%$ 、ウェラン一液で $5.3\sim 4.0\%$ 、ウェラン別添で $5.7\sim 4.4\%$ であった。

ボックス充填性試験の結果を図-4.1.30に示す。ボックス充填高さは、増粘剤を用いない粉体系では単体量が $\pm 7\text{kg/m}^3$ に変化することで、十分な充填性を示すとされる高さ 300mm ⁹⁾以下

となったのに対し、ウェランー液およびウェラン別添は、単位水量が増減しても十分な充填高さが得られた。ウェランー液については、ウェラン別添のものと同様に、単位水量±7 kgの範囲で、充填性はほとんど変化しなかった。

以上の結果から、ウェランガムをポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤に一液化して高流動コンクリートに用いても、単位水量の変化に対してフレッシュコンクリートの性状を安定させる効果⁶⁾を発揮することが示された。

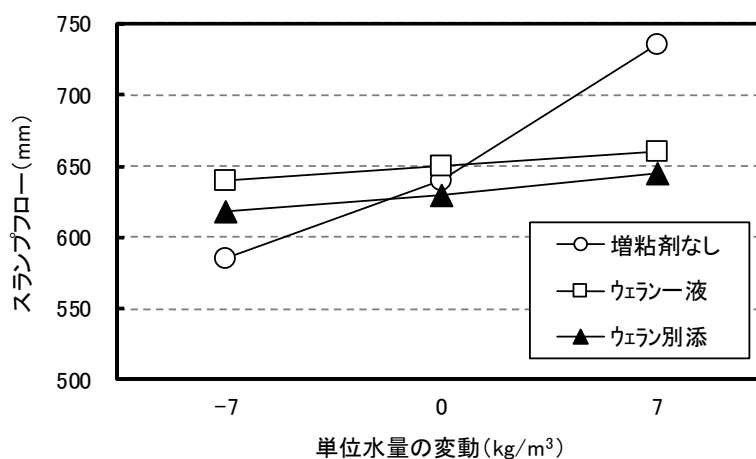


図-4.1.28 スランプフローの変化

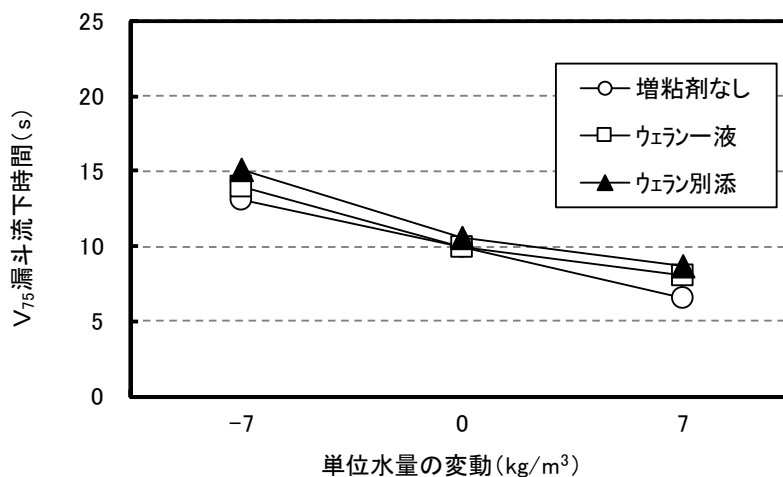


図-4.1.29 V₇₅ 漏斗流下時間の変化

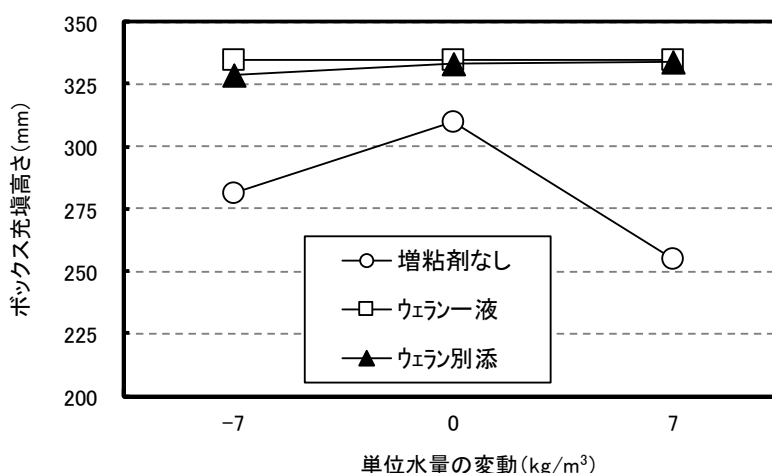


図-4.1.30 ボックス充填高さの変化

(4) 一液化に関するまとめ

増粘剤ウエランガムと高性能 AE 減水剤の一液化を試みた。その結果、以下のことが明らかとなった。

- ・今回使用したポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤では、高性能 AE 減水剤をイオン交換水で 90~99%の濃度に希釈し、その溶液にウエランガムを 0.5 重量%混合することで、ウエランガムが理想的な膨潤状態となり、一液化した溶液の粘度も 150 mPa・s 程度と比較的低くなる。
- ・高性能 AE 減水剤の濃度が 90~95%の場合、混合後少なくとも 6 ヶ月間は、膨潤状態にあり、分離を生じない。
- ・ウエランガムと高性能 AE 減水剤を一液化した混和剤を添加して製造される高流動コンクリートの性状は、ウエランガムと高性能 AE 減水剤を別々に添加した場合とほぼ同等である。

ウエランガムと高性能 AE 減水剤を一液化し、これを混和剤として使用することで、コンクリート製造時のウエランガムの投入作業を省力化でき、合理的な製造を行うことができる。

4. 1. 6 適切な圧送性を確保する手法の提案

独立空隙型人工軽量骨材を気乾状態で使用したコンクリートの適切な圧送性を確保する手法について、室内実験ならびに圧送実験を実施して評価検討した。本検討を通じて得られた知見をまとめると以下のようなになる。

- (1) 増粘剤ウェランガムを添加することで、圧送中の軽量粗骨材の吸水を抑制することが可能であり、安定した圧送性が得られる。また、圧送後のコンクリートの流動性の低下を軽減できる。
- (2) コンクリートの流動性をスランプフロー500mm以上とすることで、配管長100m程度の圧送が容易となる。
- (3) 非排水加压ブリーディング試験により、ポンプ圧送後のコンクリートの流動性をある程度評価できる。

独立空隙型の人工軽量骨材を使用したコンクリートの圧送性確保の手段として、以下を提案する。

【配合設計】

- ① 単位水量を $165\sim 170\text{kg/m}^3$ 、単位粗骨材量を $310\sim 340\text{l/m}^3$ とする。
- ② 流動性保持性能の高い高性能 AE 減水剤を使用する。
- ③ 圧送前のスランプフローを 500mm 以上とする（目標スランプフロー550mm）。
- ④ その上で、増粘剤ウェランガムを単位水量に対して 0.5% 添加する。

【圧送計画、圧送作業】

- ① 吐出圧力をできるだけ小さくする圧送計画を立てる。具体的には、吐出圧力を $3\sim 4\text{N/mm}^2$ 程度以下となるように配管計画、吐出量の計画を立てる。
- ② ピストン前面圧をモニタリングしながら圧送する。前面圧が上昇を続ける傾向が認められたら、圧送を中断し、圧送速度を見直す。これは、普通骨材コンクリートの圧送と同じである。

4. 2 適切な打込み・締固め方法

4. 2. 1 打込み・締固め・仕上げに際してのポイント

気乾状態の独立空隙型人工軽量骨材を用いたコンクリートの打込み・締固めは、打込み位置、すなわち圧送した後のコンクリートの性状を十分に理解した上で、実施しなければならない。特に、圧送性を確保する目的で流動性を高めた軽量骨材コンクリートは、モルタルよりも密度の小さい軽量粗骨材の浮上がり（材料分離）¹¹⁾や、勾配を有する部材の打込み上面の仕上げにおいて、十分な配慮が必要となる。そこで、実構造物を想定したいくつかの大型部材を対象に、それぞれの部材におけるコンクリートのワーカビリティの確認を行った。

4. 2. 2 施工性確認実験① 橋梁上部工の部分供試体（ブームを用いた圧送）

独立空隙型人工軽量骨材を用いたコンクリートを橋梁上部工に適用することを想定し、コンクリートポンプのブームを用いた圧送による施工性確認実験を実施した¹²⁾。

(1) 対象部材

部分供試体の形状を図-4.2.1に示す。PC箱桁橋におけるワーカビリティを確認するため、ウェブから下床版を模擬した部材（供試体①）、4%の勾配を有する上床版（供試体②）、流動に対する分離抵抗性を評価する部材（供試体③）、薄肉壁高の高欄を模擬した部材（供試体④）に、ブームを用いた圧送によりコンクリートを打ち込み、締固めを行い、打込み上面のこて仕上げを行った。各部分供試体における施工上の着眼点を表-4.2.1に示す。

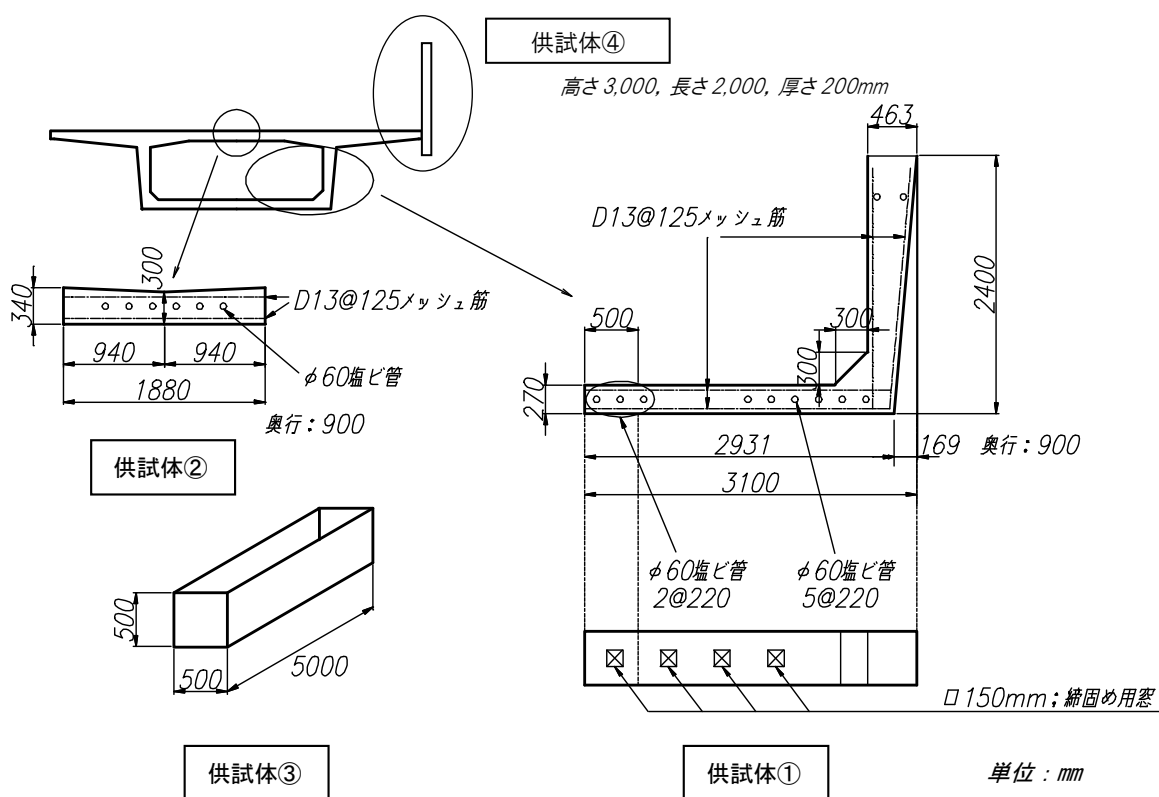


図-4.2.1 試験施工で製作した部分供試体

表-4.2.1 部分供試体の施工における着目点

部分供試体	想定する実部材	施工における着目点
①	箱桁断面のウェブ~下床版	圧送性, 締固め方法, 充填性
②	勾配を有する上床版	4%勾配の仕上げ方法
③	5m流動	流動に伴う材料分離抵抗性
④	薄肉壁高の高欄	充填性, 鉛直方向の材料分離抵抗性

(2) コンクリートの仕様

コンクリートの仕様を表-4.2.2に, 使用材料を表-4.2.3に, 配合を表-4.2.4に示す。コンクリートの設計基準強度は $40\text{N}/\text{mm}^2$ を想定し, 単位容積質量は $1,850\text{kg}/\text{m}^3$ 以下を目標とした。スランプフローの管理値は, 圧送性を考慮して $550\pm 50\text{mm}$ とした。独立空隙型人工軽量粗骨材は, 気乾状態で使用し, 圧送に伴う骨材中への吸水を抑制する目的で特殊増粘剤ウェランガムを添加し, 高性能 AE 減水剤と一液化した状態で使用した (4.1.5参照)。セメントには, PC 上部工のサイクル工程を考慮し, 早強ポルトランドセメントを使用した。

表-4.2.2 コンクリートの仕様

項目	規格	備考
コンクリート種類	軽量骨材コンクリート I 種	粗骨材のみに軽量骨材を使用
設計基準強度	$40\text{N}/\text{mm}^2$	強度の保証は材齢28日
配合強度	$48\text{N}/\text{mm}^2$	変動係数10%, 割増し係数1.2
単位容積質量	$1,850\text{kg}/\text{m}^3$ 以下	設計条件より決定
スランプフロー	$550\pm 50\text{mm}$	圧送性を考慮
空気量	$6\pm 1.5\%$	凍結融解抵抗性を考慮
セメント種類	早強ポルトランドセメント	プレストレスの導入などの施工工程を考慮
粗骨材	構造用人工軽量粗骨材	JISA 5002 区分MIに準拠

表-4.2.3 使用材料

使用材料	記号	摘要	
セメント	C	早強ポルトランドセメント	密度: $3.14\text{g}/\text{cm}^3$, 比表面積: $4,520\text{cm}^2/\text{g}$
細骨材	S1	盛岡市都南産陸砂	表乾密度: $2.58\text{g}/\text{cm}^3$, 吸水率:2.87%
	S2	松尾村産砕砂 S1:S2=50:50	表乾密度: $2.68\text{g}/\text{cm}^3$, 吸水率:2.84% 粗粒率:2.71
粗骨材	G	独立空隙型人工軽量骨材	絶乾密度: $1.19\text{g}/\text{cm}^3$, 24h吸水率:2.80%, 実積率:60.0%, 最大寸法:15mm
混和剤	SP	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系標準形
	VIS	特殊増粘剤	ウェランガム

表-4.2.4 コンクリートの配合

スランプフロー (mm)	空気量 (%)	W/C (%)	Gvol (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					SP (kg)	VIS (kg)
					W	C	S1	S2	G		
550	6.0	38.0	320	49.7	165	435	490	338	381	4.35	0.083

W/C:水セメント比, Gvol:単位粗骨材容積, s/a:細骨材率, G:絶乾重量を表示
 コンクリートの理論単位容積質量:1,809kg/m³

(3) 施工方法

実機ミキサによるコンクリートの製造, アジテータ車による運搬, コンクリートポンプのブームを用いた圧送, 打込み, 振動締固め, こて仕上げといった実施工を模擬したコンクリートの施工をそれぞれの部分供試体に対して行った。

コンクリートの練混ぜは, 水平二軸式強制練りミキサで行い, 練混ぜ時間は, モルタルを先行して30秒, 粗骨材を投入してさらに90秒(計120秒)とした。製造したコンクリートは約25km離れた施工現場まで約50分かけて運搬し, 部分供試体に打ち込んで, コンクリートのワーカビリティを確認した。コンクリートの打込みには, 理論最大吐出圧力7.0N/mm²の油圧ピストン式ポンプのブーム(22.1m)を用いた。なお, ブーム先端には, 4インチフレキシブルホース(7m)を取り付けた。コンクリートの品質管理試験は, 出荷時, 現場到着時, ポンプ筒先の試料について実施した。

(4) 施工結果

1) コンクリートの性状

コンクリートの試験結果を表-4.2.5に示す。経過時間や運搬に伴うコンクリートの性状変化は小さく, 出荷時, 現場到着時および圧送後の筒先において, ほぼ同等の性状であった。また, 外気温が30℃程度の厳しい条件下ではあったが, コンクリートの流動性は, 出荷から2時間程度経過し, かつ圧送後の筒先でのスランプフローが478mmであり, 良好な流動性を有していた。

なお, 軽量骨材の含水率は, 図-4.2.2に示すとおり, 出荷から現場到着まではほとんど増加しなかったが, 圧送によって増加する結果となった。この傾向は, 4.1の圧送性の検討と同様であったが, 今回の検討においては, 圧送に伴う含水率の増加は0.57%であり, 先述したこれまでの検討に比べても小さい値であった。圧送負荷が小さかったことに加え, ウェランガムの添加が吸水率の増加を抑制したものと判断された。

表-4.2.5 コンクリートの試験結果

	出荷時	現場到着時	ポンプ筒先	ポンプ筒先
練上りからの経過時間(分)	4	52	68	127
スランプフロー(mm)	558	518	574	478
空気量(%)	7.3	7.0	6.2	—
単位容積質量(kg/m ³)	1,783	1,700	1,783	—
コンクリート温度(℃)	27.0	27.0	28.0	—
外気温(℃)	30.0	28.0	28.0	—
軽量骨材含水率(%)	1.06	1.14	1.71	—
28日圧縮強度	43.1	44.1	44.2	—
耐久性指数	—	81.0	88.5	—

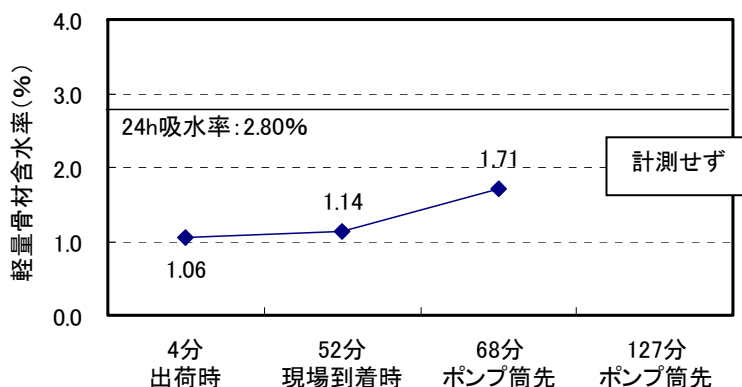


図-4.2.2 軽量骨材の含水率の変化

2) 部分供試体におけるワーカビリティ

ポンプの実稼働時間から算出した実吐出量は $21.5\text{m}^3/\text{h}$ であったが、計測したポンプ主油圧から換算したピストン前面圧（換算比 0.354）の最大値は、ポンプの理論吐出圧力の3割程度に相当する $2.4\text{N}/\text{mm}^2$ であり、過大な負荷は生じなかった。また、前述のとおり、圧送によるコンクリートの性状変化も小さかったことから、円滑なポンプ施工が可能であった。

<部分供試体①>

部分供試体①は、2体作製した。1体目は、予め、下床版の天端面に押さえ型枠を設置しておき、ウェブからコンクリートを打ち込んだ。押さえ型枠上面に締め固め用の開口部（ $150\times 150\text{mm}$ ）を50cm間隔で設け、 $\phi 40\text{mm}$ の内部振動機で締め固めた。ただし、打込み位置（ウェブ）から約3m離れた締め固め位置では、コンクリートの横流れと過度な締め固めが原因と思われる軽量骨材の浮上がり確認された（写真-4.2.1）。その後、開口部に蓋をして、ウェブにコンクリート打ち込んだ。ウェブ1層の打上がり高さは50cmとし、奥行き90cmの中央部に $\phi 40\text{mm}$ の内部振動機を挿入して締め固めた。締め固め時間は、軽量骨材の浮上がりが確認しながら設定したが、その時間は約5秒であった。



写真-4.2.1 開口部におけるコンクリートの状態（軽量骨材の浮上がり）

2体目は、まず、下床版のコンクリートを、筒先を移動しながら打ち込んだ。コンクリートの横移動を抑制しながら、φ40mmの内部振動機を50cm間隔で挿入し、締め固めた。この時、1箇所での締め固め時間は5秒程度とした。なお、部分的に10秒程度の締め固めを実施した際には、骨材の浮上りが認められた。下床版の締め固めが完了したところで押さえ型枠を設置し、引き続きウェブの打込み・締め固めを1体目と同様に行った。

脱枠後の外観を写真-4.2.2に示す。いずれの供試体も型枠の隅々までコンクリートが充填されており、鋼材を模擬した塩ビ管廻りへの充填も良好であった。ただし、押さえ型枠を設置した下床版の上面においては、押さえ型枠によって軽量骨材の表面への滞留は抑制されていたが、わずかに生じたブリーディングが押さえ型枠の下面に残留したことに加え、こてによる押さえが実施できなかったことにより、良好な仕上がり面とはならなかった。

箱桁断面を有する橋梁上部工で、下床版とウェブを連続して打ち込む場合、特に押さえ型枠を予め設置してウェブからコンクリートを打ち込む場合には、コンクリートを横移動させることになる。特に、今回のように軽量骨材とモルタルの密度差が大きい（モルタル 2.10g/cm^3 に対して軽量骨材 1.19g/cm^3 ）場合には、コンクリートの横移動と内部振動機による振動締め固めによって、軽量骨材の浮上りが顕著となる場合があることが分かった。また、押さえ型枠は、打込み上面の仕上げが困難となり、仕上がり面の品質が低下することが示された。ウェブ～下床版の連続した打込みでは、まずは、下床版のコンクリートを、筒先をこまめに移動して横移動させないように打ち込んだ上で、骨材の浮上りが無いことを確認しながら締め固め、その後ウェブの打込み・締め固めに移行するのがよく、締め固め時間の目安は5秒程度が適切であった。



写真-4.2.2 部分供試体①の出来形

<部分供試体②>

橋面の排水勾配（4%）を模擬した部分供試体②では、筒先を移動しながらコンクリートを打ち込み、φ28mmの細径パイプレータで締め固めた。締め固め位置を50cm間隔とし、1箇所の締め固め時間を5秒程度とした（写真-4.2.3）。締め固めが完了した段階では、打ち込み上面の勾配を4%で仕上げることはできなかったが、締め固め完了後、約1時間が経過した時点で、木ごてによって表面を掻き上げ、勾配に則した粗均しを行った。その際、表面部にわずかに浮き上がった軽量骨材をモルタルに包まれるようにコンクリート内部に押し込んだ。その後、約30分経過した時点で、木ごて・金ごてによる押さえを行った。押さえによってペースト分を浮上させるとともに、写真-4.2.4に示すようにパラフィン系エマルジョンの仕上げ補助剤を散布することで、こての滑りが滑らかになり、仕上げの作業性が向上することがわかった。なお、パラフィン系エマルジョンは、コンクリート硬化初期の水分蒸発を防ぐ効果（初期養生剤としての機能）も有しており、プラスチック収縮ひび割れや乾燥収縮ひび割れの低減にも有効であった。



写真-4.2.3 部分供試体②の打ち込み・締め固めの状況



写真-4.2.4 部分供試体②の上面の仕上げ状況

硬化後の仕上げ面の状況を写真-4.2.5に示す。仕上げ面には、骨材の浮上りは見られず、滑らかな表面が形成されていた。また、勾配4%も確保されていた。スランプフローを500mm程度まで流動性を高めた軽量骨材コンクリートであっても、骨材の浮上り抑制しながら打ち込み・締め固めを行い、タイミングよく均しと押さえを行うことで、4%程度の勾配の仕上げが十分に可能であった。



写真-4.2.5 部分供試体②の仕上げ面

<部分供試体③>

部分供試体③では、まず、軽量骨材コンクリートを、振動締固めを行うことなく、5m流動させた。写真-4.2.6に示すように、型枠の一方からコンクリートを打ち込んだところ、流動先端部まで軽量骨材の浮上がりはほとんど生じなかった。また、振動締固めを行わない状態での流動勾配は5%程度であった。続いて、内部振動機による締固めを行った。目視観察ではあるが、 $\phi 40\text{mm}$ のバイブレータにより締固めを行ったところ、振動の有効半径は50cm程度であった。また、 $\phi 28\text{mm}$ の細径のバイブレータによる締固めも実施したが、有効半径はさほど変わらない状況であった。型枠内に鉄筋などの障害物がない場合には、流動に伴う軽量骨材の浮上がりは小さく、材料分離の少ない部材を構築できることが分かった。コンクリートを横移動させないことを前提とし、骨材の浮上りに留意しながら振動締固めを行う必要がある。これは、一般的な普通骨材コンクリートと同じである。軽量骨材コンクリートの場合には、骨材が打込み上面に浮き上がり、普通骨材コンクリートの場合には、骨材が下面に沈降していく。軽量骨材コンクリートの場合には、その様子が目視によって確認できることから、これを正しく管理することが可能である。



写真-4.2.6 部分供試体③における流動状況

<部分供試体④>

部分供試体④は、高さ 3.0m、壁厚 0.2m の薄肉断面であり、かつ、鉄筋を高密度に配置したものである（平均鉄筋量：386kg/m³）。部分供試体④は 3 体準備し、1 体目は、高さ 1.5m、奥行 2.0 m の中央部の位置に開口部を設け、そこにホース筒先を挿入してコンクリートを打ち込んだ。コンクリートの自由落下高さは最大 1.5m となる。打上がり高さが 1.5m 付近まで到達するまで、壁上部から φ28mm の細径内部振動機と外部振動機（型枠バイブレータ）を併用して連続的に締め固めた。その後、打込み用の開口部を閉じ、筒先を壁上部（天端）に移動して打ち込み、同様の締固めを行った。薄肉で高密度配筋であっても、かぶり部や鉄筋周りにコンクリートが廻り込む状況が確認されたが、連続的に実施した振動締固めが一部で過剰となったことが原因と思われる軽量骨材の浮上がりが見られた。

2 体目は、打込み・締固めとも壁の上部から実施した。壁厚が 0.2m と薄く、先端ホースを挿入できないことから、コンクリートの自由落下高さは最大 3.0m となった。打込みは、奥行き方向の中央部で行い、コンクリートの水平移動距離は最大 1.0m とした。また、1 層の打上がり高さを 50cm とし、各層ごとに締固めを行った。ブームを用いた圧送による打込みにおいて、コンクリートが鉄筋や型枠に衝突しながら流下していったが、骨材とモルタルが一体となって流下していく様子が確認された。スランプフローが 500mm 程度であっても、水セメント比が 38% と小さく、かつウェランガムを添加したことによってモルタルの粘性が高まっていること、また、軽量骨材の最大寸法が 15mm と小さく、かつ球形であるために鉄筋間をスムーズに通過することから、3.0 m 程度の落下に対して、十分な材料分離抵抗性が付与されているものと判断された。締固めは、φ28mm の細径内部振動機で行ったが、目視観察では、骨材の浮上がりは見られず、均質に締め固められていた。

3 体目は、2 体目と同様に、壁上部（天端）から打込みを行ったが、奥行き方向の端部から打ち込み、コンクリートの水平移動距離を最大 2.0m とした。筒先は移動させず、一層の打上がり高さを 50cm とし、各層の打込み上面が水平になるまで外部振動機のみで締め固めた。ただし、奥行き 2 m 部分の端部（上面の流動先端部）で軽量骨材の浮上がりが見られた。

脱枠後の状況を写真-4.2.7 に示す。いずれの供試体とも外観は良好であり、未充填部や締固め不足は認められなかった。ただし、一部において、打込み・締固めの際に軽量骨材の浮上がりが見られたため、コアを採取して、骨材の分布状況を確認することとした。コアの採取位置を図-4.2.3 に、コア表面の軽量骨材の分布を表-4.2.6 に示す。以下に、コアの分析結果と考察を示す。



写真-4.2.7 部分供試体④の出来形

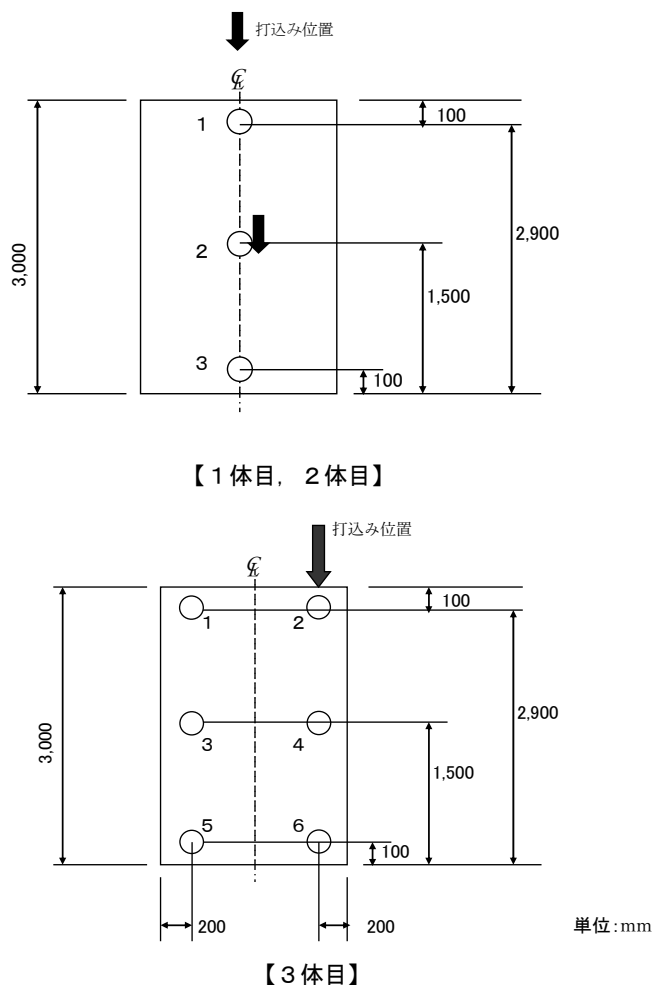


図-4.2.3 コアの採取位置

1体目

いずれの高さにおいてもコンクリートが密実に充填されていた。ただし、コアの表面写真や軽量粗骨材の分布測定結果から分かるように、下側のコア（1-3）には軽量骨材が少なく、均質なコンクリートといえる状況ではなかった。これは、打設窓からの打込みにより、打込み位置が制限されてしまったこと、それに伴って、コンクリートを隅々まで充填させるために、振動締めが過度になってしまったことが影響しているためである。

2体目

いずれの高さにおいてもコンクリートが密実に充填されていた。また、写真や軽量粗骨材の分布測定結果からも分かるように、軽量骨材がほぼ均一に分布しており、均質なコンクリートとなっていた。

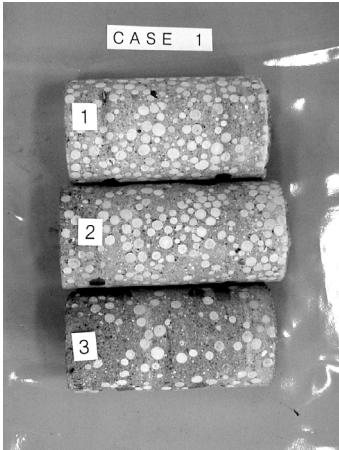
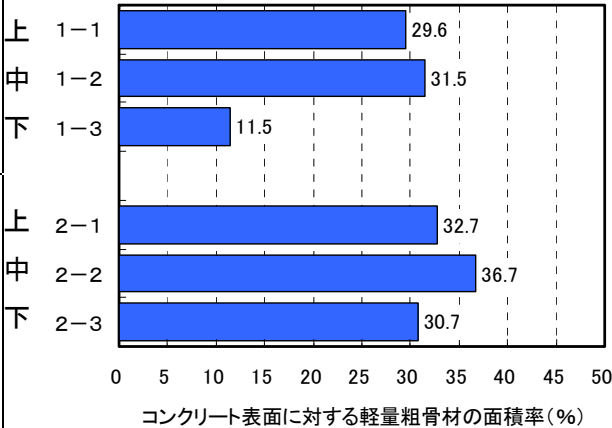

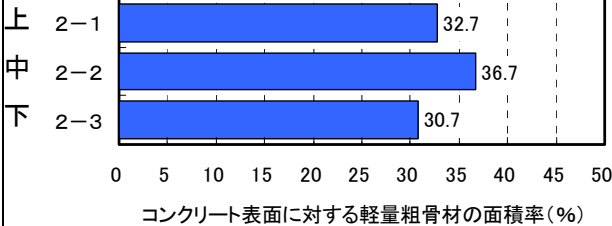
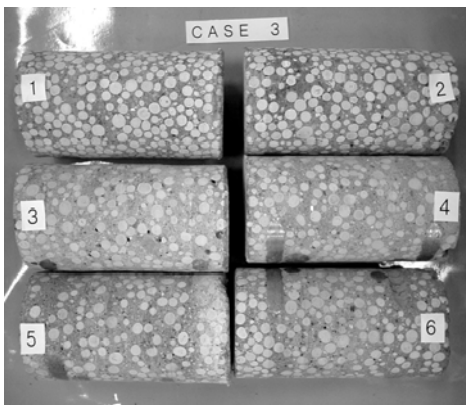
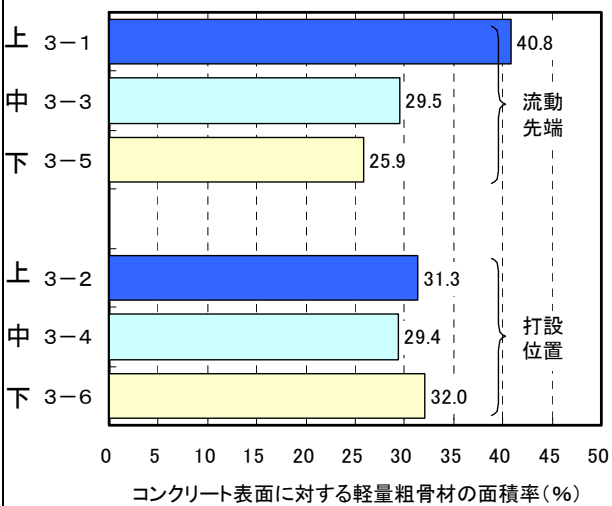
3体目

内部振動機を用いず、外部振動機のみによる締めを行った。また、打込み口も移動させなかった。軽量粗骨材の面積率の測定結果によれば、打込み位置では上下鉛直方向の軽量骨材がほぼ均一に分布しているのに対し、流動先端部では、上面ほど軽量骨材が多く分布している。これは、コンクリートが鉄筋間を通過しながら横移動していくうちに、軽量骨材が徐々に分離して上方へ浮き上がったことを示している。したがって、均質な躯体を構築するためには、コンクリートの流動距離を制限することが大切であり、実際の施工においても、筒先をこまめに移動することが

重要であることが改めて示された。

部分供試体④では、軽量骨材コンクリートの材料分離の度合いは、打込み時の自由落下高さよりも横移動や振動締固めの影響（振動機の稼働時間など）を受けやすいことが分かった。3 mの自由落下に対する分離抵抗性が確保された理由は、水セメント比が小さく、増粘剤ウェランガムを添加していることに加え、軽量であるがゆえに落下・衝突のエネルギーが小さいことにも起因していると思われる。コンクリートの自由落下高さの最大値は 3.0mとなったが、ホースを挿入できないような薄肉の壁高欄では、高欄上面からコンクリートを打ち込み、流動距離を制御しながら、適切に振動締固めを行うことで均質な躯体を構築することができた。また、打設窓の設置や閉塞などの煩雑な作業を行う必要がないので、より円滑な施工が行えると判断された。

表-4.2.6 コア表面の骨材の分布状況

	コアの表面写真 (φ100mm)	軽量粗骨材の分布測定結果 (コンクリート表面に対する骨材の面積率)												
1体目 (最大落下高さ1.5m)		 <table border="1"> <tr><td>上 1-1</td><td>29.6</td></tr> <tr><td>中 1-2</td><td>31.5</td></tr> <tr><td>下 1-3</td><td>11.5</td></tr> </table> <p>コンクリート表面に対する軽量粗骨材の面積率(%)</p>	上 1-1	29.6	中 1-2	31.5	下 1-3	11.5						
上 1-1	29.6													
中 1-2	31.5													
下 1-3	11.5													
2体目 (落下高さ3m)		 <table border="1"> <tr><td>上 2-1</td><td>32.7</td></tr> <tr><td>中 2-2</td><td>36.7</td></tr> <tr><td>下 2-3</td><td>30.7</td></tr> </table> <p>コンクリート表面に対する軽量粗骨材の面積率(%)</p>	上 2-1	32.7	中 2-2	36.7	下 2-3	30.7						
上 2-1	32.7													
中 2-2	36.7													
下 2-3	30.7													
3体目 (落下高さ3m)		 <table border="1"> <tr><td>上 3-1</td><td>40.8</td></tr> <tr><td>中 3-3</td><td>29.5</td></tr> <tr><td>下 3-5</td><td>25.9</td></tr> <tr><td>上 3-2</td><td>31.3</td></tr> <tr><td>中 3-4</td><td>29.4</td></tr> <tr><td>下 3-6</td><td>32.0</td></tr> </table> <p>コンクリート表面に対する軽量粗骨材の面積率(%)</p> <p>流動先端 (3-1, 3-3, 3-5) 打設位置 (3-2, 3-4, 3-6)</p>	上 3-1	40.8	中 3-3	29.5	下 3-5	25.9	上 3-2	31.3	中 3-4	29.4	下 3-6	32.0
上 3-1	40.8													
中 3-3	29.5													
下 3-5	25.9													
上 3-2	31.3													
中 3-4	29.4													
下 3-6	32.0													

4. 2. 3 施工性確認実験② 橋梁上部工1室箱桁セグメント（ブームを用いた圧送）

独立空隙型人工軽量骨材を使用したコンクリートの橋梁上部工（マッチキャスト方式のプレキャストセグメント工法）への適用性を検討するために、幅 10.6m、桁高 2.0m、セグメント長 1.5mの実規模セグメントの施工性確認実験を行った¹³⁾。

(1) 対象部材

施工性確認実験に供した橋梁上部工プレキャストセグメントの形状を図-4.2.4に示す。本セグメントは、支間長 45mの内外ケーブル併用式PC箱桁橋の支間中央部を想定したものである。使用するコンクリートの設計基準強度を 40N/mm²、単位容積質量を 1,800kg/m³として、断面および鋼材の配置を決定した。セグメントの幅は 10.6m、桁高は 2.0m、セグメント長は 1.5mである。橋軸方向には内ケーブルとして、PC鋼棒（SBPR930/1180 φ32mm）用アンカークロケットタイプの定着体（A）、PC鋼より線（12S12.7B）用リブキャストアンカー定着体（B）および内径φ70mmのスパイラルシースを配置した。また、セグメント片側には外ケーブルの偏向部を模した偏向ブロックと隔壁を設けた。床版横締め用としてはプレグラウトタイプのPC鋼線（1S28.6）を橋軸方向中央部（C）に1本配置した。また、セグメント接合面のウェブおよび上下床版にはせん断キーも設置した。これらの仕様は、高速道路橋の実橋をほぼ忠実に再現したものとなっている。

(2) コンクリートの仕様

施工に供したコンクリートの仕様を表-4.2.7に、使用材料を表-4.2.8に、配合を表-4.2.9にそれぞれ示す。コンクリートの設計基準強度は 40N/mm²（材齢 28 日）とし、単位容積質量は 1,800kg/m³とした。セメントには、早強ポルトランドセメントを用いた。

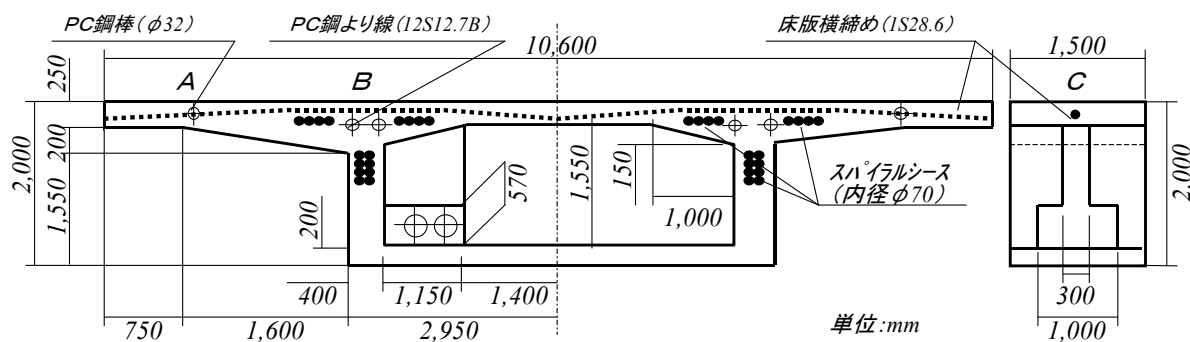


図-4.2.4 プレキャストセグメントの形状

表-4.2.7 コンクリートの仕様

項目	規格	備考
コンクリート種類	軽量骨材コンクリートI種	粗骨材のみに軽量骨材を使用
設計基準強度	40N/mm ²	強度の保証は材齢28日
配合強度	50N/mm ²	目標強度としてせ設定
単位容積質量	1,800kg/m ³	設計条件より決定
スランプフロー	550±50mm	圧送性を考慮
空気量	6±1.5%	凍結融解抵抗性を考慮
セメント種類	早強ポルトランドセメント	プレストレスの導入などの施工工程を考慮
粗骨材	構造用人工軽量粗骨材	JISA 5002 区分MIに準拠

表-4.2.8 使用材料

使用材料	記号	摘要	
セメント	C	早強ポルトランドセメント	密度:3.13g/cm ³ , 比表面積:4,570cm ² /g
細骨材	S1	粗砂:岩舟郡荒川産川砂	表乾密度:2.58g/cm ³ , 吸水率:1.42%
	S2	細砂:太郎代産山砂 混合比 粗砂:細砂=65:35	表乾密度:2.58g/cm ³ , 吸水率:1.85% 粗粒率:2.60
粗骨材	G	独立空隙型人工軽量骨材	絶乾密度:1.24g/cm ³ , 24h吸水率:2.80%, 実積率:61.5%, 最大寸法:15mm
混和剤	SP	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸エーテル系標準形
	VIS	特殊増粘剤	ウエランガム

表-4.2.9 コンクリートの配合

スランプフロー (mm)	空気量 (%)	W/C (%)	Gvol (kg/m ³)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					SP (kg)	VIS (kg)
					W	C	S1	S2	G		
550	6.0	38.0	330	48.1	165	435	513	276	409	6.96	0.087

W/C:水セメント比, Gvol:単位粗骨材容積, s/a:細骨材率, G:絶乾重量を表示
 コンクリートの理論単位容積質量:1,798kg/m³

(3) 施工方法

コンクリートの製造は、市中のレディーミクストコンクリート工場の水平二軸式強制練りミキサ(容量3.0m³)を使用して行い、1バッチの練混ぜ量を2.5m³、練混ぜ時間を全材料投入後120秒間とした。アジテータ車1台当りのコンクリート積載量は、2バッチ分5m³とした。なお、軽量粗骨材は気乾状態(含水率1.88%)で練混ぜに供した。練り上がったコンクリートは表-4.2.10に示す試験項目を実施して、所定のフレッシュ性状を満足していることを確認した後、施工現場まで約30分かけて運搬した。コンクリートの設計打込み量は9.3m³であったが、品質管理試験や各種供試体用の試料採取を考慮して、計3台(15m³)のアジテータ車で運搬した。アジテータ車が施工現場に到着後、スランプフロー、空気量、単位容積質量について品質管理試験を行うとともに各種強度試験用の試料を採取した。コンクリートの打込みは、表-4.2.11に示す仕様を有する油圧ピストン式コンクリートポンプを用いて行い、26.5mのブーム先端に取り付けた7mのフレキシブルホース(125A)を介して打ち込んだ。なお、ポンプに作用する負荷を測定するためにポンプ主油圧についても測定した。

表-4.2.10 コンクリートの試験項目

項目	工場出荷時	現場到着時	ポンプ筒先	備考
スランプフロー	○	○	○	全車
空気量	○	○	○	全車
単位容積質量	○	○	○	全車
圧縮強度	—	○	○	全車
ヤング係数	—	○	○	2台目のみ
割裂引張強度	—	○	○	2台目のみ
曲げ強度	—	○	○	2台目のみ
せん断強度	—	○	○	2台目のみ

表-4.2.11 コンクリートポンプの仕様

ストローク長	1600mm	
シリンダ数	2	
ホッパ容量	0.35m ³	
輸送シリンダ径	φ 210mm	
	標準圧仕様	高圧仕様
理論吐出量	15~110m ³ /h	15~68m ³ /h
最大理論吐出圧力	4.90N/mm ²	7.85N/mm ²
ブーム長	26.5m	
	3段360度全旋回油圧屈折式	
先端ホース径	125A	
先端フレキシブルホース	125A, 7.0m	

(4) 施工結果

1) コンクリートの性状

図-4.2.5に施工性確認実験に供したコンクリートのフレッシュ性状試験の結果を示す。出荷時および現場到着時のフレッシュコンクリートの性状は、目標品質を全て満足するものであった。また、コンクリートの製造-場外運搬-圧送に伴うフレッシュコンクリートの性状変化は小さいものであった。スランブフローについては、3台目を除いて圧送によって低下する傾向を示した。コンクリート中の軽量骨材を取り出して骨材含水率を測定したところ、図-4.2.6に示すように、筒先での含水率が増加しており、ここに至るまでの検討と同様、軽量骨材が圧送による管内圧力（後述：最大 2.67N/mm²程度）を受けてコンクリート中の自由水を吸水したために、スランブフローが低下したものと考えられた。空気量については、コンクリートの運搬により1%程度低下し、圧送により1%程度増加する傾向を示した。

硬化コンクリートの試験結果を表-4.2.12に示す。材齢28日の圧縮強度は、現場到着時のもので52.4N/mm²、筒先から採取したもので59.2N/mm²であり、設計基準強度を十分に満足していた。なお、ポンプ圧送によって圧縮強度が増加する傾向を示したが、これは先述のとおり、骨材中への圧力吸水が影響しているものと考えられた。また、材齢28日における割裂引張強度、曲げ強度、せん断強度の圧縮強度に対する比率は、それぞれ1/15、1/9、1/9程度であり、高強度領域であるにもかかわらず、従来の軽量骨材コンクリートと同等の比率⁸⁾であった。

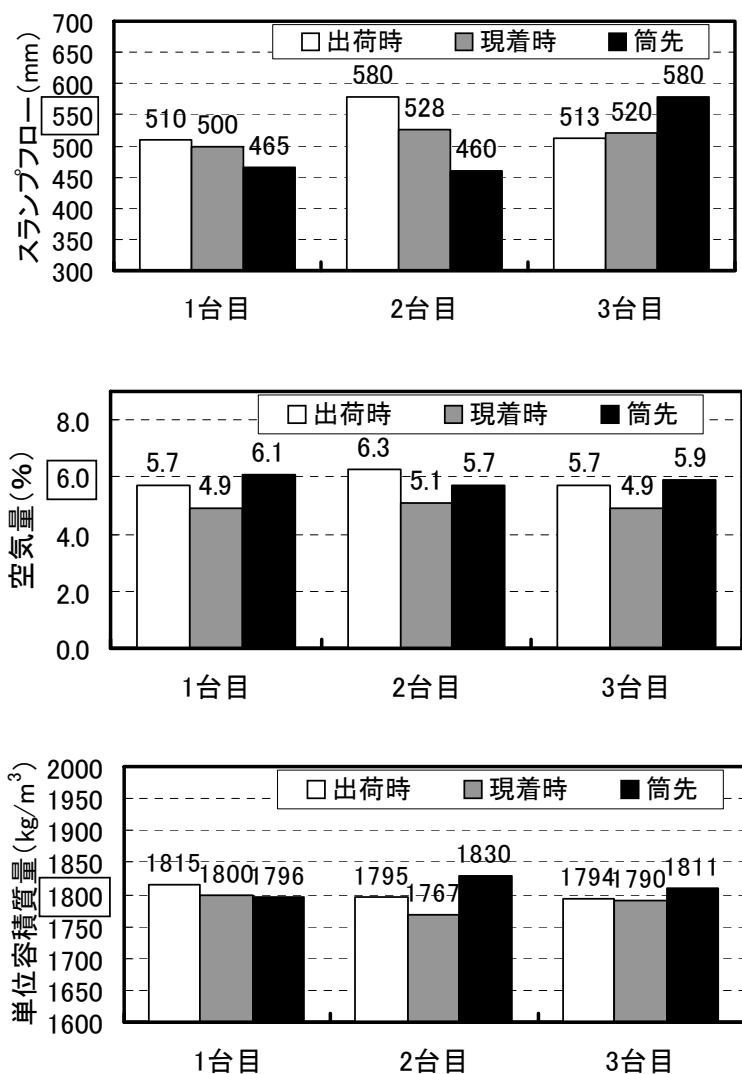


図-4.2.5 フレッシュコンクリートの試験結果

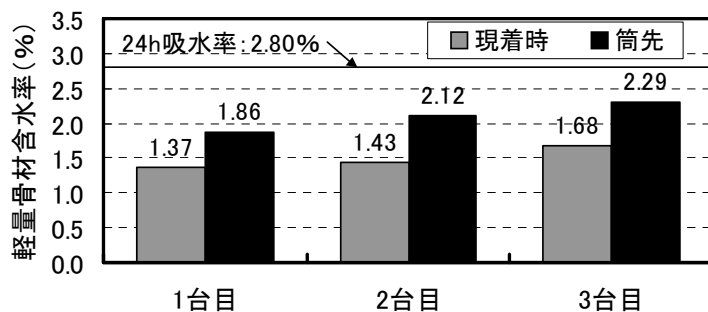


図-4.2.6 軽量骨材含水率の測定結果

表-4.2.12 硬化コンクリートの試験結果

	材齢7日		材齢28日	
	現着時	筒先	現着時	筒先
圧縮強度(N/mm ²)	38.0	42.0	52.4	59.2
ヤング係数(×10 ⁴ N/mm ²)	2.42	2.37	2.45	2.45
割裂引張強度(N/mm ²)	3.11	3.42	3.59	3.87
曲げ強度(N/mm ²)	5.62	5.99	6.11	6.49
せん断強度(N/mm ²)	5.42	5.77	6.82	6.94

養生条件:20°C水中(標準養生)

2) 1室箱桁セグメントにおけるワーカビリティ

コンクリートの打込みは図-4.2.7および表-4.2.13に示す①~⑩の順序で行った。下床版からウェブにかけての打込み順序は、4.2.2の実験結果を反映させた。振動締固めは、φ40mmの棒状の内部振動機を用いて行い、軽量骨材の浮上りや偏向ブロックや隔壁といった複雑な部位へのコンクリートの廻込みに十分な注意を払って行った。表-4.2.13に打込みに要した時間を示す。まず、最初に打込みを行った下床版については、内部振動機1本を用いて、コンクリートの締固め特性と軽量粗骨材の浮上がり状況を観察した。写真-4.2.8に下床版の打込み・締固め状況を示す。写真に示すように、打込みによって骨材が分離することなく、軽量骨材の浮上がりを確認しながら振動締固めを行うことで、材料分離を生じさせることなく、施工することができた。そこで、それ以降の打込みでは内部振動機の本数を2本として、より実施工に近い状態で打込み・締固め作業を行うこととした。筒先を連続的に移動させながらコンクリートを打ち込み、骨材の浮上がり状況を確認しながら締め固めて下床版の上面を決め、押さえ型枠を設置した。その後、ウェブからコンクリートを投入して隅角部・偏向部に打ち込み、入念に締固めを行い、ウェブへの打込みを行った。ウェブについては、1層の打上がり高さが大きく、軽量粗骨材の浮上りが顕著になることが懸念されたが、4.2.2の実験と同様、骨材の浮上がりはほとんど確認されなかった。これは、施工に供した軽量骨材コンクリートがウェランガムを添加した水セメント比38%の高強度コンクリートであり、十分な材料分離抵抗性が付与されていたことに加え、打込みに際して、同等の流動性を有する普通骨材コンクリートよりも、ポンプ筒先をこまめに移動させたり、バイブレータ挿入位置をこまめに切り替えたりするなどの配慮を行ったためである。

コンクリートの打上がり面が上床版ハンチ部に達した際に、不等沈下の抑制を目的に休止時間を設けた。ただし、コンクリートの沈下が確認されず、ブリーディングも皆無であったため、休止時間は約10分とし、上床版への打込みを行って打込み作業を終了した。ポンプに作用した負荷(ピストン前面圧)が最大となったのは、上床版の打込み時であり、その時の吐出量は22.5m³/h、ピストン前面圧は2.67N/mm²であった。打込み作業に要した時間(段取り替えを含む)は70分であった。

上床版の打込み・締固めを終了した後、仕上げ作業を行った。上床版のコンクリートの仕上げ状況を写真-4.2.9に示す。打込み上面の仕上げでは、荒均しの段階で、振動機付きのジッターバッグ¹⁴⁾を用いて、コンクリート表面にわずかに浮き上がった軽量骨材がモルタルに包まれるようにコンクリート内部に押し込んだ。この作業は、のちに実施することで仕上げを行う際に必要なペースト分を上昇させることにも有効に機能した。荒均しの後、シートで覆った状態で約2時間静置した後、木ごて、金ごてによる押さえを行って仕上げた。

コンクリートの養生は、養生マットへの散水を行うとともに、シートで覆って初期乾燥を防止した。また、打込み時の外気温が5℃前後であったこと、風速が強かったことから、足場および支保工を利用してセグメント全体をシートで覆った。さらに、打込み当日の夜間にはジェットヒーターによる保温養生を行い、シート内の温度を9～12℃に保った。

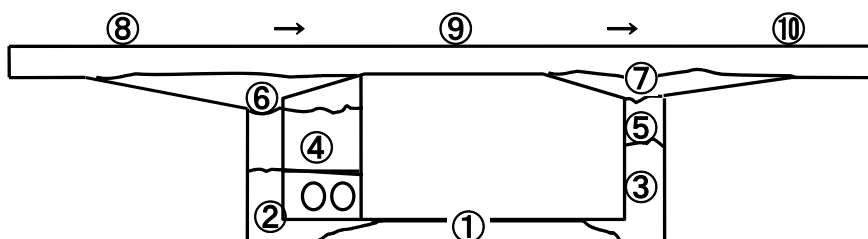


図-4.2.7 コンクリートの打込み順序

表-4.2.13 打込みに要した時間

部位	打込みに要した時間	下端からの高さ	パイプレータ本数
① 下床版	8分	20cm	1本
② 隅角部, ウェブ下部	5分	60cm	2本
③ 隅角部, ウェブ下部	3分	105cm	同上
④ ウェブ	6分	140cm	同上
⑤ ウェブ	3分	150cm	同上
⑥ ハンチ部	2分	175cm	同上
⑦ ハンチ部	2分	175cm	同上
⑧			
⑨ 上床版	12分	200cm	同上
⑩			



写真-4.2.8 下床版の打込み・締固め状況



写真-4.2.9 上床版の仕上げ状況（ジッターバッグ¹⁴⁾による荒ならし・押さえ）

3) 出来形

型枠の脱型は、2日後（打設終了から約42時間後）に行い、コンクリートの圧縮強度（標準養生）が $20\text{N}/\text{mm}^2$ 以上となったことを確認してから行った。セグメントの出来形を写真-4.2.10～4.2.12に示す。写真に示すように、外ケーブル偏向ブロック・ウェブ・隔壁の取合い部、シース管やせん断キーが複雑に配置された部位であっても、コンクリートの未充填部は全く認められず、コンクリートが密実に充填されていた。また、初期乾燥収縮ひび割れ、沈みひび割れ、セメントの水和熱に伴う温度ひび割れも生じておらず、初期欠陥のない良好な出来形であった。



写真-4.2.10 セグメントの出来形

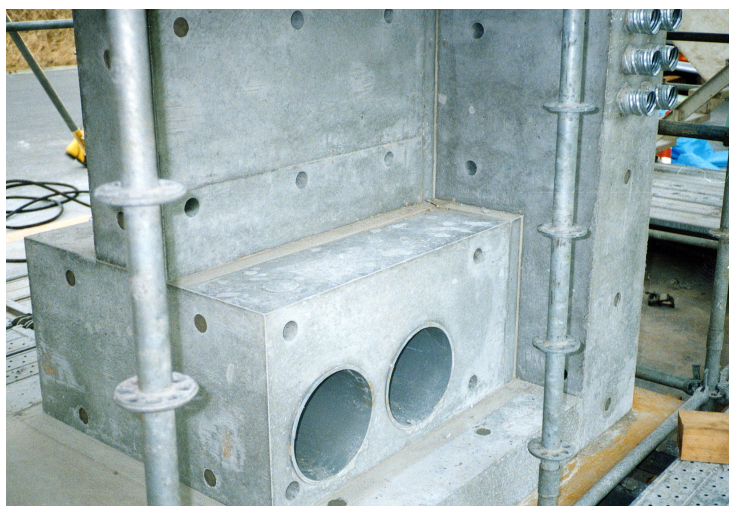


写真-4.2.11 偏向部付近の出来形

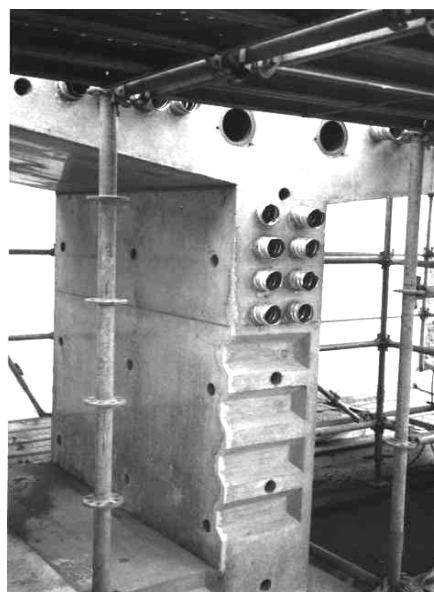


写真-4.2.12 ウェブ付近の出来形

4. 2. 4 施工性確認実験③ 小規模橋台（配管総延長 109mの配管圧送）

独立空隙型人工軽量骨材を使用したコンクリートを配管総延長 100m程度圧送して、部材を構築する際の施工性を確認するために、小規模の橋台への打込み・締固めを行った¹⁵⁾。

(1) 対象部材

模擬橋台の形状を図-4.2.8に示す。模擬橋台は、幅員5mの道路橋の下部構造を想定したものであり、厚さ1.0mのフーチング、高さ1.5mの桁受と高さ2.0mのパラペットで構成される。橋台は、A1、A2の2体を構築した。

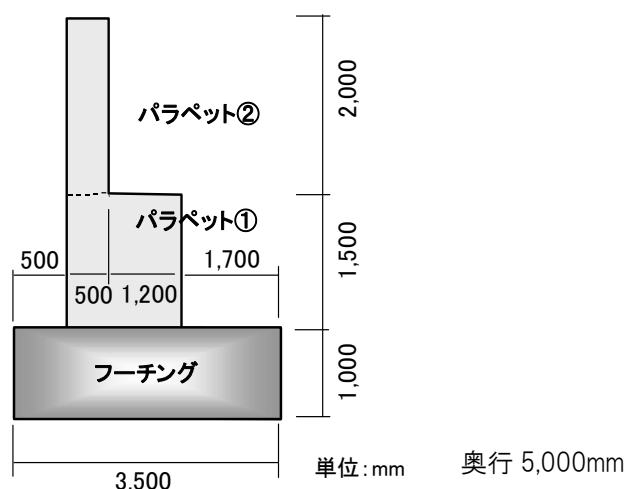


図-4.2.8 模擬橋台の形状（A1）

(2) コンクリートの仕様

施工に供したコンクリートの使用を表-4.2.14に、使用材料を表-4.2.15に、配合を表-4.2.16にそれぞれ示す。著しい凍結融解作用を受ける寒冷地での適用を想定して、空気量の目標管理値は $7\pm 1.5\%$ とし、水セメント比を33%とした。単位容積質量は $1,850\text{kg}/\text{m}^3$ とした。

表-4.2.14 コンクリートの仕様

項目	規格	備考
コンクリート種類	軽量骨材コンクリートI種	粗骨材のみに軽量骨材を使用
設計基準強度	$50\text{N}/\text{mm}^2$	強度の保証は材齢28日
配合強度	$60\text{N}/\text{mm}^2$	目標強度として設定
単位容積質量	$1,850\text{kg}/\text{m}^3$	設計条件より決定
スランプフロー	$550\pm 50\text{mm}$	圧送性を考慮
空気量	$7\pm 1.5\%$	凍結融解抵抗性を考慮
セメント種類	早強ポルトランドセメント	冬期の施工における脱型時期を考慮
粗骨材	構造用人工軽量粗骨材	JISA 5002 区分MIに準拠

表-4.2.15 使用材料

使用材料	記号	摘要	
セメント	C	早強ポルトランドセメント	密度:3.14g/cm ³ , 比表面積:4.470cm ² /g
細骨材	S1 S2	幌延産川砂 由仁産陸砂 S1:S2=50:50	表乾密度:2.64g/cm ³ , 吸水率:1.28% 表乾密度:2.61g/cm ³ , 吸水率:2.67% 粗粒率:2.71
粗骨材	G	独立空隙型人工軽量骨材	絶乾密度:1.19g/cm ³ , 24h吸水率:1.00%, 実積率:61.0%, 最大寸法:15mm
混和剤	SP	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系標準形
	VIS	増粘剤	ウエランガム

表-4.2.16 コンクリートの配合

スランプフロー (mm)	空気量 (%)	W/C (%)	Gvol (kg/m ³)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					SP (kg)	VIS (kg)
					W	C	S1	S2	G		
550	7.0	33.0	300	51.3	160	485	417	412	357	5.82	0.08

W/C:水セメント比, Gvol:単位粗骨材容積, s/a:細骨材率, G:絶乾重量を表示
 コンクリートの理論単位容積質量:1,831kg/m³

(3) 施工方法

A1橋台のフーチングの施工においては、図-4.2.9に示す配管条件で圧送を行った。配管総延長は108.8m、水平換算距離は134.0mであり、打込みには、最大理論吐出圧力7N/mm²のピストン式ポンプを用いた。パラペットの施工においては、26.5mの3段ブームを用いて圧送した。

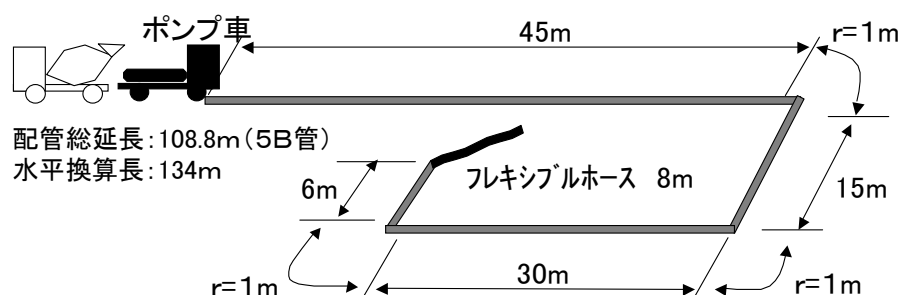


図-4.2.9 フーチング打込みの際の配管形状

(4) 施工結果

1) コンクリートの性状

受入れ時のフレッシュコンクリートの品質管理試験は、総量70m³(配管内コンクリート等のロスを含む)に対して12回実施した。そのうち6回の品質管理試験において、圧縮強度試験用の供

試体を採取した。コンクリートの品質管理試験の結果を表-4.2.17に示す。いずれの試験値も目標値を満足する値を示した。また、フレッシュコンクリート、硬化コンクリートとも品質変動が非常に小さく、設計基準強度 50N/mm² 程度に相当する水セメント比 33%の高強度軽量骨材コンクリートを安定して製造・供給することが可能であった。7±1.5%を目標管理値とした空気量についても、安定して管理することができた。

表-4.2.17 コンクリートの品質管理試験結果（受入れ時：圧送前）

	スランプフロー (mm)	空気量 (%)	単位容積質量 (kg/m ³)	28日圧縮強度 (N/mm ²)
最大値	595	8.4	1846	68.0
最小値	523	5.6	1750	59.3
平均値	567	6.6	1800	65.0
標準偏差	24.5	1.0	27	3.2
変動係数(%)	4.3	15.2	1.5	4.9

外気温：13.5～19.0℃、コンクリート温度：19.0～23.0℃

図-4.2.14にA1フーチング施工時における圧送前後のスランプフローおよび材齢28日の圧縮強度の比較を示す。測定は、異なる2台のアジテータ車に対して実施した。配管を用いた圧送によって、軽量骨材の加圧吸水が生じ、コンクリートの流動性が低下することが予想されたが、今回の施工性確認実験では、圧送による流動性の低下は認められず、圧送後のコンクリートは良好な流動性を有していた。これは、使用した軽量骨材の24時間吸水率が1.00%と非常に小さかったこと、低水セメント比(33%)であるために、モルタルからの加圧脱水が生じにくかったこと、単位粗骨材容積を300kg/m³に減じたことによるものと考えられた。軽量骨材の含水率の増加が0.6%にとどまっていたことがその裏付けである。前節までに示してきた一連の圧送実験や施工性確認実験に比べても、含水率の増加は小さいものであった。

空気量および単位容積質量については、圧送による有意な変化は認められなかった。

材齢28日の圧縮強度は、圧送によりわずかに低下する傾向を示したが、圧送が圧縮強度に及ぼす影響は小さいものであった。

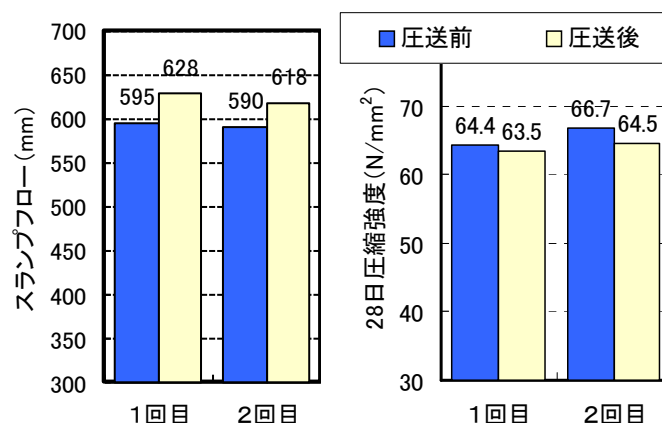


図-4.2.10 圧送前後の性状比較（A1橋台フーチング）

2) 橋台におけるワーカビリティ

A1橋台のフーチング施工時には、ピストン前面圧、吐出量を連続的に測定して圧送性を評価した。実吐出量とピストン前面圧の関係を図-4.2.15に示す。圧送における設定吐出量は20～25m³/h程度としたが、吐出量が20m³/h程度であれば、ピストン前面圧が4N/mm²程度であり、水セメント比33%の高強度軽量骨材コンクリートであっても円滑な圧送を行うことができた。また、吐出量を30m³/hまで意図的に増加させたところ、前面圧が6N/mm²程度まで上昇したが、配管の閉塞は生じることはなかった。また、圧送後の流動性が損なわれる様子も認められなかった。水平換算長が134mの配管で、吐出量が20～30m³/h程度の圧送速度であれば、良好な圧送性を確保できることが示された。なお、実吐出量とピストン前面圧は図-4.2.11に示すように、ほぼ線形の関係にあり、両者には高い相関が認められた。

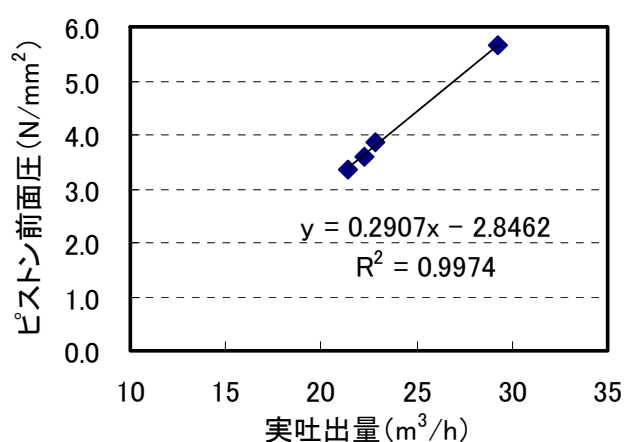


図-4.2.11 実吐出量とピストン前面圧の関係

フーチングの施工状況を写真-4.2.13に示す。打込み区画が広い部位へ流動性の高い軽量骨材コンクリートを打ち込む際には、振動締固めに伴う軽量骨材の浮上りが懸念された。そこで、コンクリートの横移動距離が1m程度となるように筒先を移動して打ち込み、内部振動機を用いた締固めにおいて、軽量骨材の浮上がりを確認しながら、締固め間隔を約50cm、1箇所の締固め時間を約5秒間として締固めた。その結果、型枠の隅々までコンクリートが密実に充填され、また、軽量骨材の浮上りもほとんど認められなかった。これは、打込み・締固めの方法が適切であったことに加えて、施工したコンクリートが低水セメント比であり、さらに増粘剤ウェランガムの添加によって十分な材料分離抵抗性を有していたことによる。出来形も良好であり、施工に供した圧縮強度60N/mm²程度の高強度軽量骨材コンクリートが良好なワーカビリティを有し、それに適した打込み・締固めがなされたといえる。



写真-4.2.13 A1フーチングの施工状況

4. 2. 5 打込み・締固め・仕上げのポイント

独立空隙型人工軽量骨材を使用したコンクリートの打込み・締固め・仕上げの方法について、実規模部材を対象に施工性確認実験を実施して評価検討した。本検討を通じて得られた知見をまとめると以下ようになる。

- (1) 圧送性を確保するために流動性を高めたコンクリートは、横移動や締固めに対して軽量粗骨材が浮き上がる材料分離のリスクがある。
- (2) 軽量粗骨材の浮上がりは、自由落下高さの影響よりも、過度な横移動や振動締固めの影響の方が大きい。自由落下に対する分離抵抗性が保たれるのは、水セメント比が小さく、増粘剤ウレランガムを添加しているためである。また、軽量であるがゆえに落下・衝突に伴うエネルギーが小さいことも影響している。
- (3) 圧送性を付与した、独立空隙型人工軽量骨材コンクリートは、流動性が高く、骨材の形状が球形に近いため、鉄筋間でのロッキングが生じにくく、また、ロッキングしても解消されやすく、短い締固め時間で良好な充填性が得られる。
- (4) 打込みに際しては、横移動が生じないように筒先を連続的に動かす必要がある。これは、普通骨材コンクリートと同じである。
- (5) 締固めに際しては、骨材の浮上がりの状況を観察しながら、入念に締め固める。その目安としては、 $\phi 28\sim 40\text{mm}$ の細径の内部振動機を用い、締固め位置の間隔を 50cm 程度、1 箇所締固め時間 5 秒程度である。
- (6) 仕上げに際しては、打込み上面にわずかに浮き上がってくる骨材を荒均しの段階で、押し込んでおく必要がある。その際、ジッターバッグを使用するのが効果的である。
- (7) 最終の仕上げの段階では、こてでしっかり押さえる。その際、仕上げ補助剤を用いるのが有効である。
- (8) 4%程度の勾配であれば、こて仕上げが可能である。

これらのことに留意すれば、普通骨材コンクリートと同等の出来形が得られる。

4. 3 まとめ

本章では、気乾状態の独立空隙型人工軽量骨材を用いたコンクリートのワーカビリティーについて、実施工に近い条件で、圧送、打込み・締固め、仕上げといった一連の工程で検討を行った。

以下に、適切なワーカビリティーを有する独立空隙型軽量骨材コンクリートの配合設計ならびに施工のポイントについて提案する。

【配合設計のポイント】

- ・凍結融解抵抗性を確保するために、独立空隙型人工軽量骨材を絶乾あるいは気乾状態で使用する。
- ・練上がり時の目標空気量を 6.0～7.0%とする。
- ・水セメント比を 40%以下とする。
- ・単位水量を 160～170kg/m³程度、単位粗骨材容積を 300～330ℓ/m³程度とする。
- ・流動性保持性能の高い高性能 AE 減水剤を使用する。
- ・増粘剤ウェランガムを添加する。
- ・圧送前のスランプフローを 500mm 以上とする。

【施工のポイント】

- ・ピストン前面圧を可能な限り小さくして圧送する。具体的には、3～4N/mm²程度以下となるように圧送計画を立案する。
- ・ピストン前面圧をモニタリングしながら圧送する。前面圧が上昇を続ける傾向が認められたら、圧送を中断し、圧送速度を見直す。これは、通常のコンクリートと同じである。
- ・打込みに際しては、流動に伴う材料分離（骨材の浮上がり）を抑制するために、筒先を可能な限りこまめに移動して、コンクリートを横移動させない。
- ・振動締固めの時間は 5 秒程度とする。過度の締固めは、鉛直方向の材料分離（骨材の浮上がり）を引き起こすため、打込み上面の様子（骨材の浮上がり）を注視しながら適切に締固めめる。
- ・仕上げ作業において、骨材の浮上がりが見られたら、荒均しの段階でジッターバッグを用いて骨材をコンクリート内部に押し込む。ペーストを打込み上面に浮上させ、木ごて、金ごてでしっかりと押さえる。

軽量骨材コンクリートの締固めにおいては、通常の普通骨材コンクリートの締固めにおける「骨材が沈む」現象とは、真逆の「骨材が浮き上がる」現象が起きるということを、念頭において作業を行う必要がある。骨材の浮上がりは、硬化体としての不均一性を示すものであり、また、打込み上面が仕上がり面になる場合には、表面の強度や耐久性を低下させる要因にもなる。ただし、打込み上面の様子は、目視で確認できることから、締固めを適切に管理することができる。これらを念頭に置いた配合設計と施工の実践・管理により、均質な躯体を構築することができる。

【参考文献】

- 1) 橋大介, 大野義郎, 黒木一実, 岡田武二: 高強度軽量コンクリートの耐凍結融解性に関する研究, 第6回コンクリート工学年次講演会論文集, pp.237~240, 1984
- 2) 岡本享久, 早野博幸, 柴田辰正: 超軽量コンクリート, コンクリート工学, Vol.36, No.1, pp.48~52, 1998.1
- 3) 坂田昇, 柳井修司, 石川雄康, 棚木隆: 高性能軽量コンクリートのポンプ圧送性に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.21, No.2, pp.355~360, 1999.6
- 4) 和美広喜, 柿崎正義, 袖原治美: 人工軽量コンクリートのポンプ圧送性に関する実験研究, 第1回コンクリート工学年次講演会論文集, pp.237~240, 1979
- 5) 和美広喜, 田村直久, 小森浩之, 笠井浩: 高強度軽量コンクリートのポンプ圧送性に関する実験研究, コンクリート工学年次講演会論文集, Vol.10-2, pp.225~230, 1988
- 6) 坂田昇, 丸山久一, 南昌義: 増粘剤ウェランガムがフレッシュコンクリートの自己充填性に及ぼす影響, 土木学会論文集, No.538/V-31, pp.57~68, 1996.5
- 7) 柳井修司, 坂田昇, 信田佳延, 石川雄康: 高性能軽量コンクリートの配合がポンプ圧送性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集 Vol.22, No.2, pp.1405~1410, 2000.6
- 8) 土木学会: 人工軽量骨材コンクリート設計施工マニュアル, コンクリートライブラリー第56号, 1985.5
- 9) 坂田昇, 柳井修司, MONTYH, 吉崎政人: 併用系高流動コンクリートの新しい増粘剤に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.997-1002, 2001.06
- 10) 高流動コンクリート施工指針, 土木学会コンクリートライブラリー第93号, 1998.7 (当時参照)
- 11) 加賀谷誠, 徳田弘, 磯崎真一, 庄谷征美: 振動締固めによる軽量コンクリートの材料分離に関する2, 3の実験的考察, セメント技術年報, No.38, pp.246-249, 1984.12
- 12) 在田浩之, 大郷貴之, 大久保秀樹, 柳井修司: 独立空隙型人工軽量骨材を使用したコンクリートによるPC連続箱桁橋の施工, コンクリート工学年次論文集 Vol.23, No.2, pp.997~1002, 2001.6
- 13) 南浩郎, 柳井修司, 坂田昇, 児玉明彦: 高性能軽量コンクリートを用いたPC橋梁用プレキャストセグメントの試験施工, コンクリート工学年次論文集 Vol.22, No.2, pp.1411~1416, 2000.6
- 14) 人工軽量骨材(ALA)協会 技術情報・建築編
- 15) 柳井修司, 坂田昇, 三田村浩, 池田憲二: 高強度軽量コンクリートの橋梁への適用性, コンクリート工学年次論文集 Vol.23, No.2, pp.1093~1098, 2001.6

第5章 独立空隙型人工軽量骨材を用いた自己充填性を有する

高流動コンクリートの提案

5. 1 自己充填性を有する軽量骨材コンクリートの必要性

第4章で記した独立空隙型人工軽量骨材を用いたコンクリートのワーカビリティに関する研究の一環で実施した実規模部材を対象にした施工性確認実験において、圧送性を確保した軽量骨材コンクリートは流動性が高く、軽微な振動締固めによって良好な充填性が得られること示された。その一方で、コンクリートの横移動とバイブレータによる振動締固めによって軽量骨材が浮き上がる現象がみられた。その場合には、打込み上面の均しの際にジッターバッグ等の器具で軽量骨材を押し込むといった特殊な作業が有効であったが、その有用性ととともに、この作業の必要性も同時に示された。軽量骨材の浮上がりは、部材内の不均一性を生じさせることになる。また、打込み上面が構造物の仕上がり面として供用され、外力や外気に曝される場合には、仕上がり面の強度や耐久性の低下を招くことにもなりかねない。型枠内の隅々まで充填し、かつ、密実でより均質なコンクリート部材を構築するためには、骨材の浮上がりをいかに抑制するか、が新たな課題として見えてきた。軽量骨材の浮上がりに伴う不均一性を解消し、より均一な硬化体を形成するためには、振動締固めに頼ることなく、密実に充填できる性質を付与することが必要となると考えた。人工軽量骨材を用いた自己充填性を有する高流動コンクリートの実現である。

自己充填性を有する高流動コンクリートは、そもそも、作業従事者・技能者の技量や施工の良否に抛らず耐久性の高いコンクリート構造物を構築することを目的として研究開発がなされ、実用化されてきた¹⁾。ただし、これまでの自己充填性を有する高流動コンクリートに使用される粗骨材は普通骨材であり、骨材とモルタルとの密度差は $0.3\sim 0.5\text{g/cm}^3$ 程度で、かつ骨材の方がモルタルよりも密度が大きい。これに対し、モルタルよりも密度の小さい軽量骨材を使用した高流動コンクリートに関する検討は、いくつかの事例はあるものの^{2), 3)}、配合設計手法の確立までには至っていなかった。モルタルとの密度差が 1.2g/cm^3 を超えるような難しい条件であっても、骨材の浮上がりを抑制し、高い流動性と材料分離抵抗性を兼ね備えた軽量自己充填コンクリートの実現と配合設計手法の提案を目指した。

近年建設市場においては、設計・施工の合理化の観点から構造物を形成する部材の断面を小さくして自重を低減すること、運搬や架設の省人・省力化を図るために部材を軽量化することが求められている。鉄筋やその他の補強鋼材が断面内に高密度に配置されることが多く、コンクリートを密実、確実に充填させるために自己充填性を有する高流動コンクリートが使用される。また、コンクリート工事に従事する技能者の高齢化や人員不足を解消する手段としても自己充填性を有する高流動コンクリートに期待が寄せられている。自己充填性を有する高流動コンクリートに「軽量」という性質を付加することができれば、建設コストの低減や施工の省力化はもちろん、鋼・コンクリート複合構造をはじめとする新しい構造の創出にもつながる。こういった観点からも、自己充填性を有する軽量骨材コンクリートの実現は、極めて重要な意味を持つ。

我が国におけるインフラの整備は、新設から維持管理・リニューアルの時代に移行している。高度経済成長期に築造された既存の構造物を有効活用し、補修・補強によって延命化する事業が増えてきており、これに応じる技術開発や施策の導入が望まれている。鉄筋コンクリート構造物のコンクリートの打替えや増厚に際しては、狹隘で小さな断面に新たにコンクリートを打ち込む

ことになり、しかも、杭や支持地盤といった下部構造への負荷や地震時の慣性力を小さくする必要がある。また、鋼構造物においては、鋼をコンクリートで覆ったり、鋼部材内部にコンクリートを充填したりする複合構造化が求められることが増えている。いずれの場合も、補修・補強箇所の部材重量の増加が下部構造を含めた構造物全体の補強に繋がってしまい、工事費を著しく増大させる。コンクリートを活用した補修・補強工事においては、「適切な強度・剛性」とともに、「軽さ」と「充填のしやすさ」を兼ね備えたコンクリートを製造・施工する技術が求められる。

このような状況を踏まえ、粗骨材に独立空隙型の人工軽量骨材を使用したコンクリートに自己充填性を付与することを目的として、水粉体容積比、モルタルの単位容積質量、軽量粗骨材の種類および単位量に着目して流動性、材料分離抵抗性、自己充填性を評価する各種試験を行い、使用材料や配合条件がフレッシュコンクリートの性状に及ぼす影響について検討した。そして、検討結果をもとに、自己充填性を有する軽量骨材コンクリートの配合設計手法の提案を試みた^{4), 5)}。

5. 2 締固め不要を実現するための実験的検討

5. 2. 1 実験概要

(1) 使用材料

使用材料を表-5.2.1に示す。粗骨材には、絶乾密度および原材料の異なる5種類の軽量粗骨材を用いた。これらは、流紋岩系鉱物（真珠岩）あるいは石炭灰を造粒して焼成した独立空隙型人工軽量粗骨材^{6), 7)}であり、従来の軽量粗骨材よりも吸水率が極めて小さくなっている。混和材としてのフライアッシュおよびシリカフェームは結合材（粉体）の軽量化を図るとともに材料分離抵抗性の向上を目的として使用した。高性能 AE 減水剤にはβ-ナフタレンスルホン酸塩系のものを使用し、特殊増粘剤としてウェランガム⁸⁾を使用した。コンクリートの空気量は、天然樹脂酸塩を主成分とする AE 剤で調整した。

表-5.2.1 使用材料

使用材料	記号	摘要	
セメント	C	普通ポルトランドセメント	密度3.16g/cm ³ , 比表面積3,350cm ² /g
細骨材	S	新潟産山砂	表乾密度2.60g/cm ³ , 吸水率1.69%, 粗粒率2.30
人工軽量粗骨材	G	G09 独立空隙型人工軽量骨材(真珠岩系)	Gmax15mm, 絶乾密度0.94g/cm ³ , 24h吸水率7.77%
		G10 独立空隙型人工軽量骨材(真珠岩系)	Gmax15mm, 絶乾密度1.06g/cm ³ , 24h吸水率2.90%
		G11 独立空隙型人工軽量骨材(真珠岩系)	Gmax15mm, 絶乾密度1.15g/cm ³ , 24h吸水率4.45%
		G13 独立空隙型人工軽量骨材(真珠岩系)	Gmax15mm, 絶乾密度1.27g/cm ³ , 24h吸水率2.07%
		G18 石炭灰焼成人工軽量粗骨材	Gmax20mm, 絶乾密度1.78g/cm ³ , 24h吸水率2.04%
混和材	FA	フライアッシュ	密度2.20g/cm ³ , 比表面積3,830cm ² /g, 強熱減量2.2%
	SF	シリカフェーム	密度2.20g/cm ³ , 比表面積約200,000cm ² /g
混和剤	SP	高性能AE減水剤	β-ナフタレンスルホン酸塩系
特殊増粘剤	VIS	ウェランガム	—

(2) 試験方法および測定項目

実施した測定項目および試験方法を表-5.2.2に示す。鉛直方向材料分離評価試験とは、図-5.2.1に示すようにφ150×300mmの円柱型枠を2段重ねにしてコンクリートを打ち込み、5分静置した後、上層A室、下層B室の各々から採取したコンクリートを5mmふるい上で水洗いして軽量粗骨材を取り出し、各室の粗骨材絶乾重量の比から、材料分離を評価しようとするものである⁹⁾。ここでは、B室の軽量粗骨材絶乾重量に対するA室の軽量粗骨材絶乾重量の比を鉛直分離指数と称することとした(鉛直分離指数1.00は骨材が鉛直方向に均一に分布していることを示す)。

900mm流動性評価試験^{4), 5)}とは、図-5.2.2に示すアクリル製型枠に5秒間に約1ℓの割合でコンクリートを投入して、その流動勾配や装置内への充填状況を評価しようとするものである。コンクリートの打込み完了後、5分静置した後、300mmごとに仕切り板を挿入して、前述の鉛直方向分離評価試験と同様に粗骨材を取り出し、各室の粗骨材絶乾重量の比から、材料分離を評価することとした。ここでは、I室の軽量粗骨材絶乾重量に対するIII室の軽量粗骨材絶乾重量の比を水平分離指数と称することとした。また、図-5.2.3に示すようにコンクリート天端面と型枠に囲まれた全面積(斜線部)をAa、材料分離が生じて粗骨材が浮き上がり、モルタルと粗骨材が一体とならなかった部分の面積をAsとして、その面積比(As/Aa×100%)をモルタル未充填率と称することとした。流動勾配は、両端部の天端高さの差を流動距離で除して算出した((H1-H2)/L)。

3m流動性評価試験⁵⁾とは、図-5.2.4に示すアクリル製型枠内にコンクリートを投入し、流

動距離を3mとした場合のコンクリートの充填性、材料分離抵抗性を評価しようとするものである。

コンクリートの練混ぜは、水平二軸式強制練りミキサ（容量100ℓ、回転数60r.p.m）を用いて行い、練混ぜ量は60ℓとした。また、練混ぜ時間は、全材料投入後120秒間とした。軽量粗骨材は水槽内に24時間浸漬し、プレプレウェッティングしたものを使用した。

表-5.2.2 測定項目および試験項目

項目	摘要
スランプフロー	JSCE F503 1990
500mmフロー到達時間	JSCE規準(案)
V ₇₅ 漏斗流下時間	JSCE規準(案)
空気量, 単位容積質量	JIS A 1128, JIS A 1116
コンクリート温度	温度計にて計測
鉛直方向材料分離評価試験	本文参照
900mm流動性評価試験	本文参照
水平方向材料分離評価試験	本文参照
3m流動性評価試験	本文参照
圧縮強度試験	JIS A 1108
ヤング係数試験	ASTM C 469-65

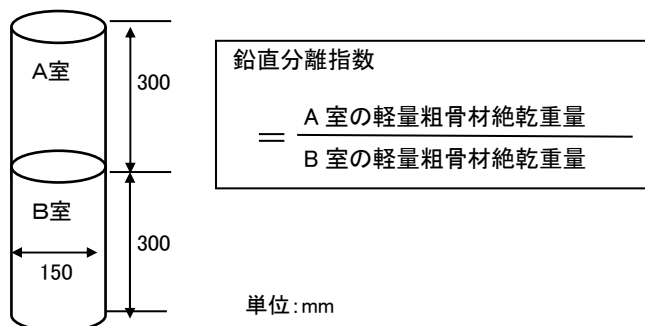


図-5.2.1 鉛直方向材料分離評価試験

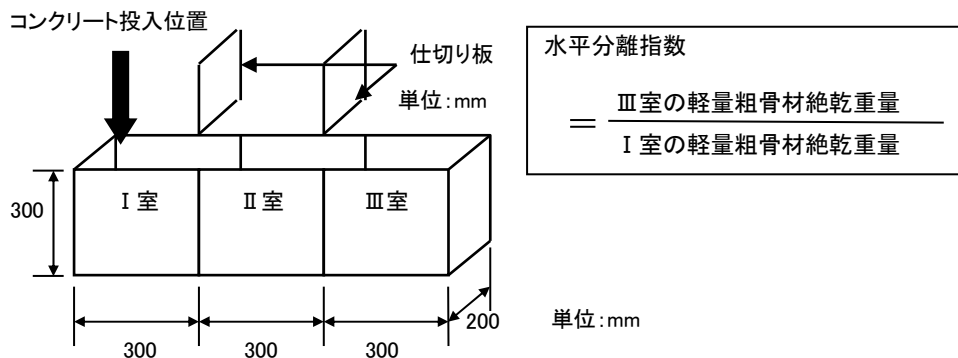


図-5.2.2 900mm 流動性評価試験

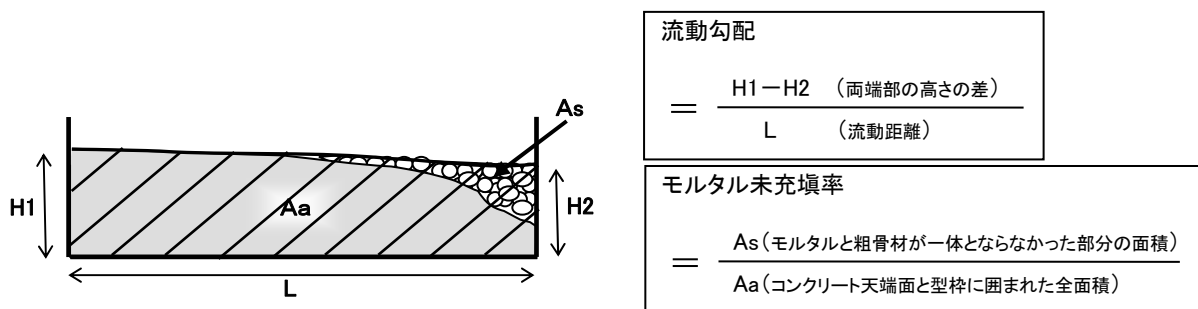


図-5.2.3 流動勾配とモルタル未充填率

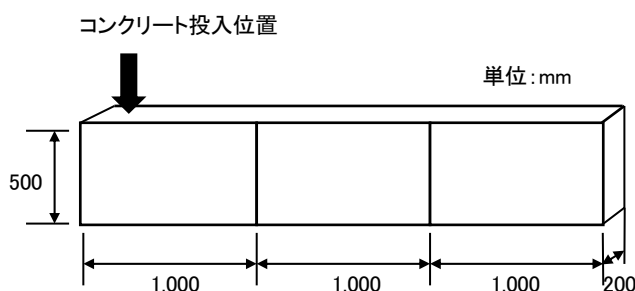


図-5.2.4 3m流動性試験

(3) 検討要因

本研究では以下に示す5つの要因に着目して試験を行い、それぞれの要因がコンクリートの性状に及ぼす影響について検討を行った。試験に供したすべてのコンクリートの配合を表-5.2.3に示す。

1) モルタルと粗骨材の密度差

セメントの一部をフライアッシュで置換する、あるいは空気量を調整することによってモルタルの単位容積質量を変化させ、モルタルの単位容積質量と軽量粗骨材の絶乾密度の差（以下、密度差と示す）が材料分離抵抗性に及ぼす影響を検討した。使用した粗骨材はG13（絶乾密度 1.27g/cm^3 ）であり、単位粗骨材量（粗骨材絶対容積：以下、Gvolと記す）は 400l/m^3 、細骨材容積比¹⁾（空気を覗くモルタルの容積に対する細骨材の容積比：以下、Vs/Vmと記す）は40%、水粉体容積比¹⁾（粉体に対する水の容積比：以下、Vw/Vpと記す）は90%とした。配合I-1～4については、フライアッシュ置換率を対セメント容積比で0～75%としてペーストの密度を変化させた。また、配合I-5は、AE剤の添加率を調整して目標空気量を10%とすることで、モルタルの単位容積質量を変化させた。

2) 単位粗骨材量

単位粗骨材量Gvolが流動性、材料分離抵抗性、自己充填性などのフレッシュコンクリートの性状に及ぼす影響を検討するために、Gvolを $270\sim 400\text{l/m}^3$ に変化させて試験を行った。使用した粗骨材はG09（絶乾密度 0.94g/cm^3 ）であり、Vs/Vmを40%、Vw/Vpを90%、フライアッシュ置換率を対セメント容積比50%とした。

3) 水粉体容積比

ペーストの粘性の相違がフレッシュコンクリートの性状に及ぼす影響を検討するために、水粉

体容積比 V_w/V_p を 70~100% の範囲で 4 水準変化させて試験を行った。使用した粗骨材は G09 (絶乾密度 0.94g/cm^3) であり, G_{vol} は 300l/m^3 , V_s/V_m は 40%, フライアッシュ置換率は対セメント容積比で 50% とした。また, シリカフュームの混入がフレッシュコンクリートの性状に及ぼす影響を検討するために, 粉体容積の 10% に相当するシリカフュームを混入した配合についても, V_w/V_p を 65~90% の範囲で 4 水準変化させて試験を実施した。

4) 軽量粗骨材の種類

原料および密度の異なる 5 種類の軽量粗骨材 (G09, G10, G11, G13, G18) を用いて, V_w/V_p を 80, 90, 100% に変化させて, 骨材の種類の違いがフレッシュコンクリートの性状に及ぼす影響を検討した。 G_{vol} は 300l/m^3 , V_s/V_m は 40%, フライアッシュ置換率は対セメント容積比で 50% とした。

5) 流動距離および打込み速度の影響

1) ~ 4) において試験に供した配合のうち, 代表的な 2 種類の配合を用いて, 3 m 流動性評価試験を実施した。まず, 打込み速度を 900mm 流動性評価試験と同じ 1 l/5 秒として流動距離の影響を検討した。次に, 打込み速度を 4 l/5 秒とした場合について試験を実施して打込み速度の影響を検討した。試験に供したコンクリートの配合は, III-4 (粗骨材: G09, G_{vol} : 300l/m^3 , V_w/V_p : 100%) および IV-1C (粗骨材: G13, G_{vol} : 300l/m^3 , V_w/V_p : 80%) である。

表-5.2.3 コンクリートの配合

No.	粗骨材	G_{vol} (l/m^3)	V_s/V_m (%)	V_w/V_p (%)	W/C (%)	W/B (%)	置換率(%)		Air (%)	単位量 (kg/m^3)						SP ($\text{P}\times\%$)	VIS ($\text{W}\times\%$)	単位容積質量 (kg/m^3)	
							FA	SF		W	C	FA	SF	S	G			モルタル	コンクリート
I-1	G13	400	40	90	29.6	29.6	0	0	4.5	158	533	0	0	577	508	1.80	0.05	2113	1788
I-2					38.1	30.9	25			158	415	96	0	577		1.70		2077	1766
I-3					57.0	33.6	50			158	277	193	0	577		1.60		2008	1725
I-4					113.7	36.9	75			158	139	289	0	577		1.30		1938	1683
I-5					113.7	36.8	75			142	125	261	0	520		1.30		1747	1568
II-1	G09	400	40	90	57.0	33.6	50	0	4.5	158	277	193	0	577	376	1.85	0.05	2008	1609
II-2		350			57.0	33.6				172	302	210	0	629	329	1.60		2020	1667
II-3		300			57.0	33.5				186	327	228	0	681	282	1.60		2031	1725
II-4		270			57.0	33.6				195	342	238	0	712	254	1.60		2037	1760
III-1	G09	300	40	70	44.4	26.0	50	0	4.5	162	365	257	0	681	282	3.80	0.05	2093	1768
III-2				80	50.9	30.0				175	344	240	0	681		2.00		2057	1743
III-3				90	56.9	33.5				186	327	228	0	681		1.60		2031	1725
III-4				100	63.5	37.5				197	310	216	0	681		1.50		2006	1707
III-5				65	45.9	24.8				155	338	236	52	681		3.60		2089	1768
III-6	G09	300	40	70	49.2	26.6	45	10	4.5	162	329	229	51	681	282	2.70	0.05	2074	1743
III-7				80	56.5	30.5				175	310	216	48	681		2.50		2043	1725
III-8				90	63.1	34.1				186	295	205	46	681		2.20		2019	1707
IV-1A				80	50.9	30.0				175	344	240	0	681		2.40		2057	1767
IV-2A	G10	300	40	90	56.9	33.5	50	0	4.5	186	327	228	0	681	318	2.20	0.05	2031	1749
IV-3A				100	63.5	37.5				197	310	216	0	681		1.50		2006	1731
IV-1B				80	50.9	30.0				175	344	240	0	681		2.40		2057	1800
IV-2B	G11	300	40	90	56.9	33.5	50	0	4.5	186	327	228	0	681	345	2.10	0.05	2031	1782
IV-3B				100	63.5	37.5				197	310	216	0	681		1.50		2006	1764
IV-1C	G13	300	40	80	50.9	30.0	50	0	4.5	175	344	240	0	681	381	2.60	0.05	2057	1829
IV-2C				90	56.9	33.5				186	327	228	0	681		1.80		2031	1811
IV-3C				100	63.5	37.5				197	310	216	0	681		1.60		2006	1793
IV-1D	G18	300	40	80	50.9	30.0	50	0	4.5	175	344	240	0	681	543	2.10	0.05	2057	1985
IV-2D				90	56.9	33.5				186	327	228	0	681		1.75		2031	1967
IV-3D				100	63.5	37.5				197	310	216	0	681		1.60		2006	1949

W/C: 水セメント比

V_s/V_m : 細骨材容積比 (空気を除くモルタル容積に対する細骨材の容積比)

V_w/V_p : 水粉体容積比 (粉体に対する水の容積比, V_p はセメント, フライアッシュ, シリカフュームの容積の和)

W/B: 水結合材比 (B はセメント, フライアッシュ, シリカフュームの重量の和)

5. 2. 2 実験結果および考察

(1) モルタルと粗骨材の密度差の影響

1) フレッシュコンクリート

フレッシュコンクリートの試験結果を図-5.2.5に示す。配合I-1～4は、スランプフローが620～665mmの範囲であり、ほぼ同じ流動性となるように高性能AE減水剤の添加率を調整した。同一スランプフローが得られる高性能AE減水剤の添加率は、フライアッシュの置換率が高くなるにしたがって少なくなる傾向にあった。配合I-4と高性能AE減水剤の添加率を等しくして目標空気量を10%とした配合I-5は、スランプフローが515mmであった。500mmフロー到達時間、 V_{75} 漏斗流下時間については、フライアッシュの置換率が高くなるにしたがって小さくなった。これは、スランプフローをほぼ等しくした場合には、フライアッシュ置換率の増加にともなって球状の粉体割合が増加し、その結果、フレッシュコンクリート中の自由水が増えてペーストの粘性が小さくなるものと考えられた。

図-5.2.6に鉛直方向材料分離評価試験の結果を示す。今回の試験条件では、フライアッシュの置換率を高めること、空気量を増加させることにより、モルタルと粗骨材の密度差が小さくなる。図に示すように、密度差を小さくすることで鉛直分離指数が1.00に近づき、粗骨材の浮上りの抑制が可能であることが確認された。また、前述の通り、フライアッシュの置換率を高めることでペーストの粘性が低下する傾向にあったが、ペーストの粘性が低下しても密度差を小さくすることで材料分離を抑制できることが示された。この密度差が、流動性を高めた軽量骨材コンクリートの材料分離抵抗性に大きな影響を与えることが分かる。

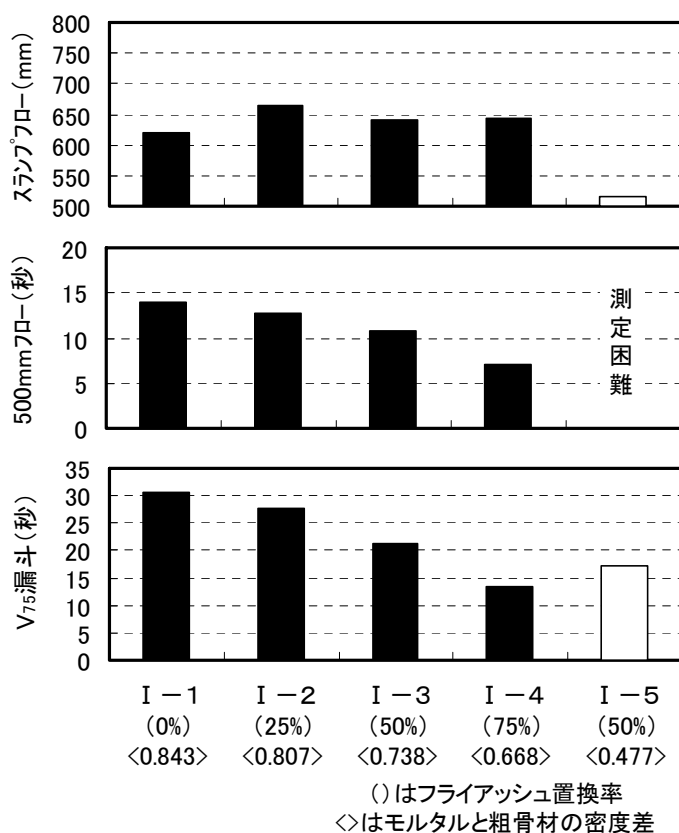


図-5.2.5 フレッシュコンクリートの試験結果

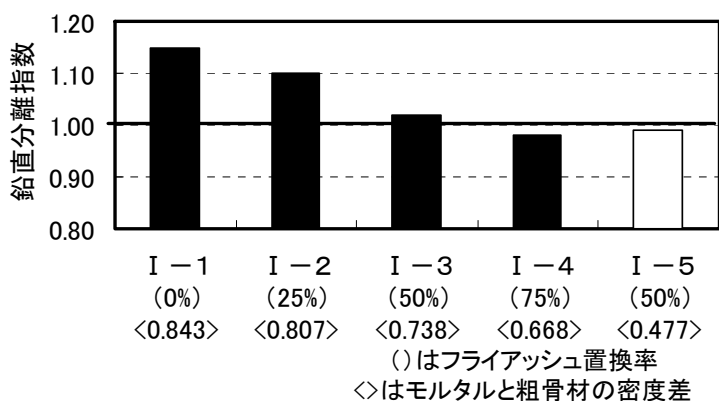


図-5.2.6 鉛直方向材料分離評価試験の結果

2) 硬化コンクリート

図-5.2.7に材齢28日の圧縮強度試験の結果を示す。フライアッシュを混入しない配合I-1は57.6N/mm²の高強度が得られた。また、フライアッシュ置換率の増大にともなって圧縮強度が低下する傾向にあったが、置換率50%でも35N/mm²以上の強度が得られた。

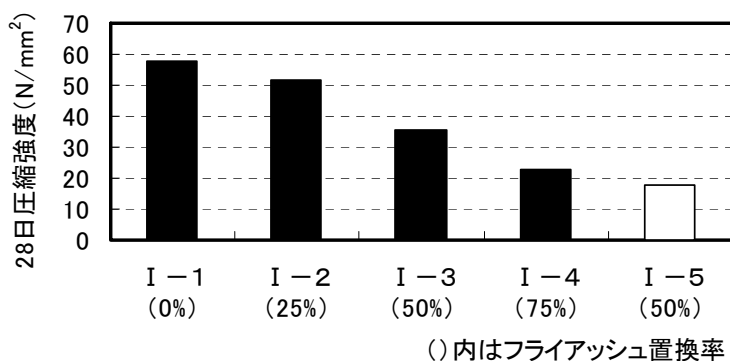


図-5.2.7 圧縮強度試験の結果

(2) 単位粗骨材量の影響

1) フレッシュコンクリート

フレッシュコンクリートの試験結果を図-5.2.8に示す。スランプフローは640~713mmの範囲であり、ほぼ同等の流動性となるように高性能AE減水剤の添加率を調整した。500mmフロー到達時間、V₇₅漏斗流下時間についてはGvolの増加にともなって増大する傾向にあり、普通骨材を用いた場合と同様¹⁰⁾、コンクリートの変形のしやすさが損なわれる結果となった。

図-5.2.9に900mm流動性評価試験におけるGvolと流動勾配、モルタル未充填率、水平分離指数の関係を示す。図に示すように、Gvolが400ℓ/m³になると流動勾配が極端に大きくなり、モルタル未充填率についても同じように増加する傾向にあった。写真-5.2.1にGvol=300ℓ/m³の流動性評価試験の結果を、写真-5.2.2にGvol=400ℓ/m³の流動性評価試験の結果を示す。普通骨材を用いた通常の高流動コンクリートでは、本試験装置のように障害物が存在しない型枠内では、粗骨材同士が接触してもモルタルあるいはペーストが骨材の上方を覆うように流動して未

充填部が生じない。これに対して、軽量骨材を使用した高流動コンクリートでは、写真-5.2.2に示すように流動先端部で粗骨材同士あるいは粗骨材と型枠が接触して流動勾配が大きくなることが確認された。なお、水平分離指数については、 $G_{vol}=270\sim 400\text{l/m}^3$ の範囲では、流動方向の粗骨材の分布はほぼ同じであったが、図-5.2.9 のモルタル未充填率や写真-5.2.1, 5.2.2に示されるように G_{vol} が大きくなるにしたがって、流動先端部で粗骨材同士あるいは粗骨材と型枠の接触が顕著となり、粗骨材が浮き上がって分離する現象が確認された。つまり、本試験におけるモルタル未充填率は、流動先端部における上下方向の分離、すなわち軽量粗骨材の浮上がりを表しているといえる。

コンクリートの軽量化を図る上では、密度の小さい軽量骨材をより多く用いることが有効であるが、軽量骨材を用いた高流動コンクリートでは、流動によって分離することなく密実に充填するためには、単位粗骨材量 G_{vol} を 350l/m^3 を上限とし、 300l/m^3 程度とするのが適当である。なお、 G_{vol} を 400l/m^3 とした際に、流動勾配やモルタル未充填率が大きくなった理由として、粗骨材の接触の他に、同一スランプフローを得るために、高性能 AE 減水剤の添加率を大きくしてペーストの粘性が小さくなったことも原因の一つである。単位粗骨材量 G_{vol} とともにペーストの粘性の調整が重要であることが示された。

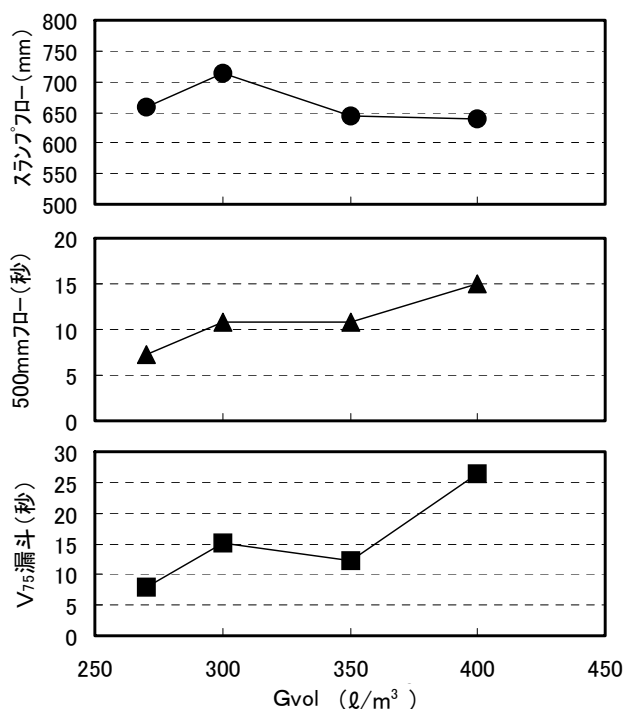


図-5.2.8 フレッシュコンクリートの試験結果

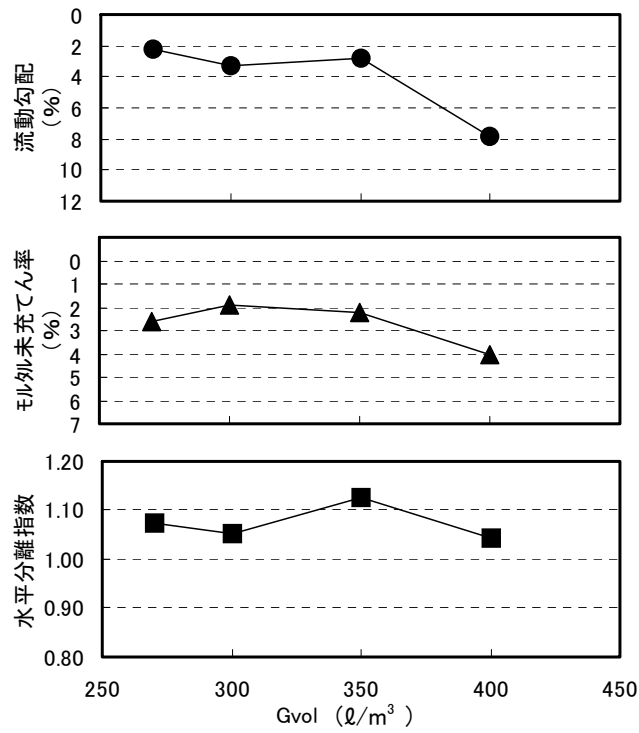


図-5.2.9 900mm 流動性評価試験の結果

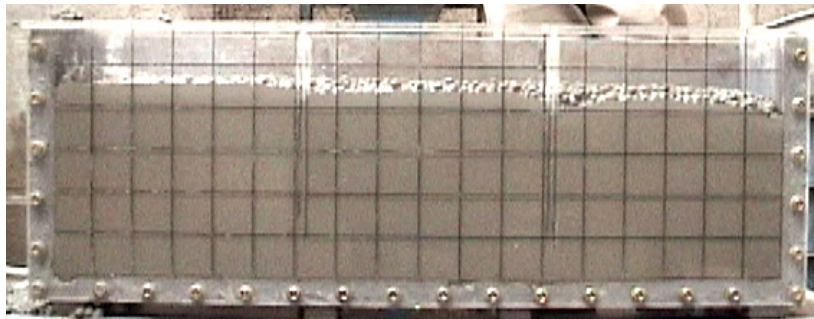


写真-5.2.1 900mm 流動性評価試験の結果 (配合Ⅱ-3 : Gvol=300l/m³)

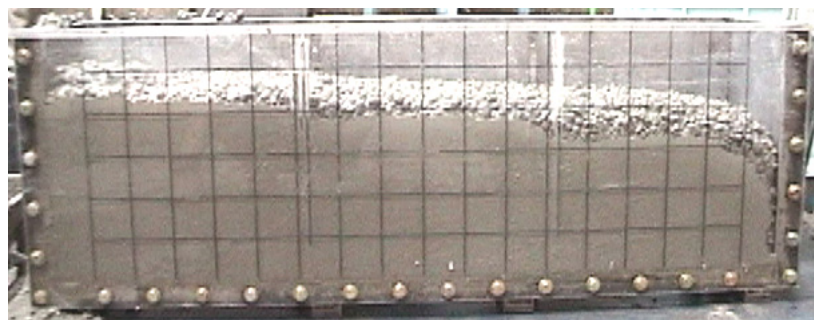


写真-5.2.2 900mm 流動性評価試験の結果 (配合Ⅱ-1 : Gvol=400l/m³)

2) 硬化コンクリート

図-5.2.10 に材齢 28 日の圧縮強度とヤング係数の関係を示す。圧縮強度は、Gvol によらず、ほぼ一定であり、45N/mm²程度の強度を示した。これは、使用した軽量粗骨材 G09 がモルタルの強度に対して十分な強度を有していることを示している。ヤング係数については、1.8~2.0×10⁴ N/mm² の範囲であり、Gvol が少ないほど、すなわち単位容積質量が大きいものほど大きくなる傾向を示し、日本建築学会の規準式¹¹⁾で示される範囲にあった。

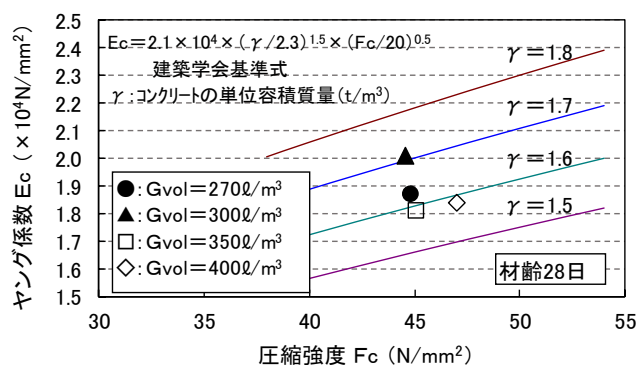


図-5.2.10 圧縮強度とヤング係数の関係

(3) 水粉体容積比の影響

1) フレッシュコンクリート

フレッシュコンクリートの試験結果を図-5.2.11 に示す。スランプフローは 645~775mm の範囲であった。500mm フロー到達時間および V₇₅ 漏斗流下時間については、シリカフュームを混入した場合の方が無混入の場合に比べて小さい値となる傾向にあった。これは、シリカフュームのいわゆるベアリング作用¹²⁾により、同一 Vw/Vp でも変形性が高くなったためである。また、Vw/Vp の低下にともなって 500mm フロー到達時間や V₇₅ 漏斗流下時間が大きくなる傾向にあり、ペーストの粘性が増大した。

図-5.2.12 に 900mm 流動性評価試験における Vw/Vp と流動勾配、モルタル未充填率、水平分離指数の関係を示す。シリカフュームを混入しない場合には、Vw/Vp=100%で流動勾配が 7.8%と大きくなったほかは 0.3~1.1%の範囲であり、比較的良好なセルフベアリング性を示した。モルタル未充填率は、図-5.2.12 および写真-5.2.3 に示すように、Vw/Vp=80%以下で 0%であったのに対し、それ以上では Vw/Vp の増加にともなって大きくなった。シリカフュームを混入した場合には無混入の場合に比べて、同一 Vw/Vp でも流動勾配やモルタル未充填率が大きくなった。また、モルタル未充填率が 0%となるのは Vw/Vp=65%であった。これは、前述のように、シリカフュームを混入した場合には、同一 Vw/Vp、同一スランプフローであっても、変形しやすく、材料分離抵抗性が小さくなるためであり、より高い材料分離抵抗性、自己充填性を得るためには、Vw/Vp を無混入の場合よりも小さくする必要があることを示している。水平分離指数は、いずれの配合も 1.00~1.10 の範囲であり、水平方向の粗骨材の分離はほとんど認められなかった。しかしながら、モルタル未充填率に示されるように、Vw/Vp が大きくなると上下方向の分離が顕著になり、Vw/Vp によっては水平方向の分離がなくとも流動先端部の上下方向の分離が生じる場合があることが明らかとなった。

これらのことから、Vw/Vp を小さくすることでペーストに適度な粘性を付与し、粗骨材の分離(浮上がり)を抑制することで自己充填性が得られることが示された。Vw/Vp は、普通骨材を用

いた場合と同様¹⁾、軽量骨材を用いた場合においても材料分離抵抗性および自己充填性の重要な要因であることが確認された。

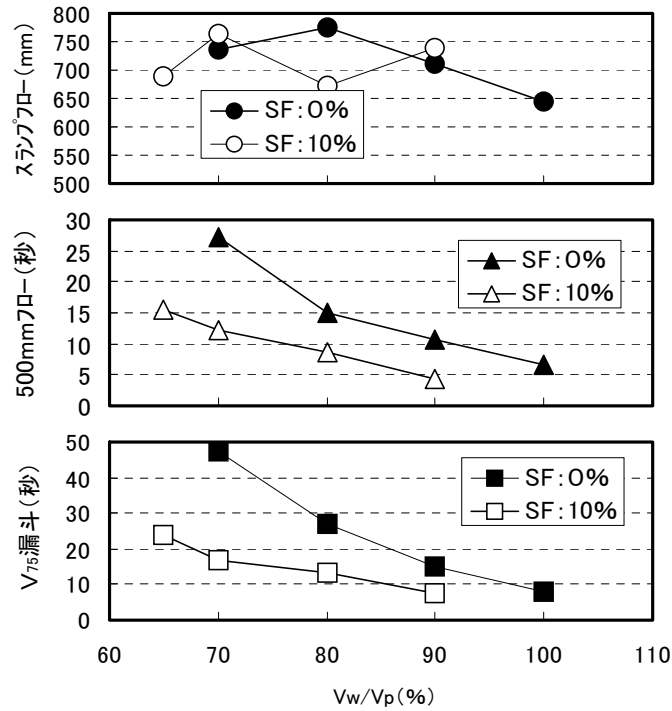


図-5.2.11 フレッシュコンクリートの試験結果

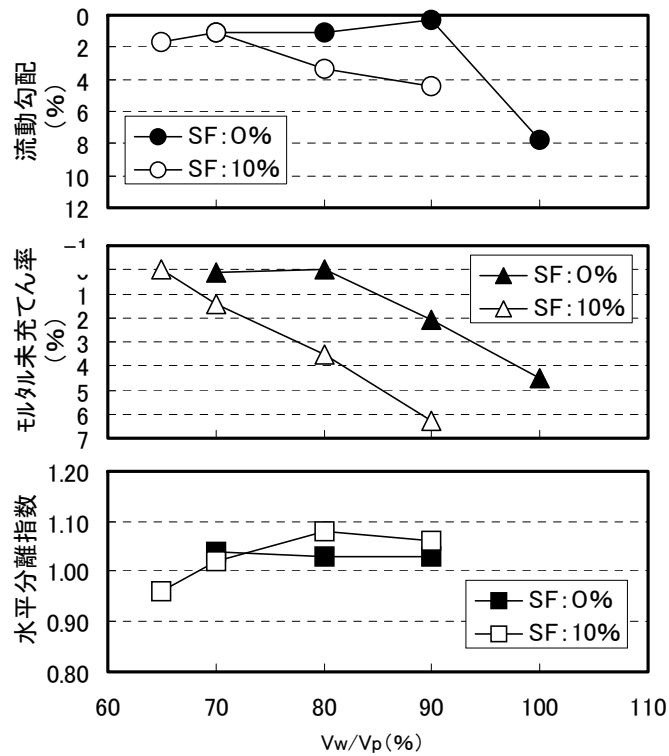
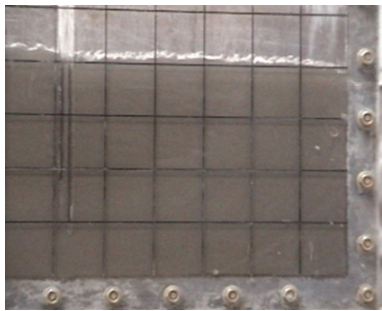
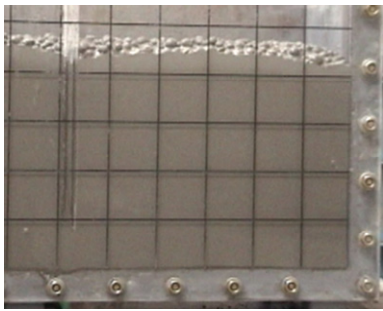



図-5.2.12 900mm 流動性評価試験の結果

Ⅲ-2	Ⅲ-3	Ⅲ-4
Vw/Vp=80%	Vw/Vp=90%	Vw/Vp=100%
		
モルタル未充填率:0%	モルタル未充填率:2.1%	モルタル未充填率:4.5%

G09 骨材(絶乾密度 0.94g/cm³), Gvol=300ℓ/m³, Vs/Vm=40%

写真-5.2.3 900mm 流動試験におけるⅢ室の状態

2) 硬化コンクリート

図-5.2.13 に材齢 28 日の圧縮強度とヤング係数の関係を示す。今回の配合条件では、Vw/Vp の低下。すなわち W/B の低下にともなって圧縮強度が増加した。また、シリカフュームを混入した場合には、同一 Vw/Vp で圧縮強度が 2 割程度増大する傾向を示し、Vw/Vp=65% では、60N/mm² を超える高強度が得られた。なお、実験で得られたヤング係数は、圧縮強度 40~60N/mm² の範囲では、概ね日本建築学会の規準式¹⁰⁾で示される範囲であった。

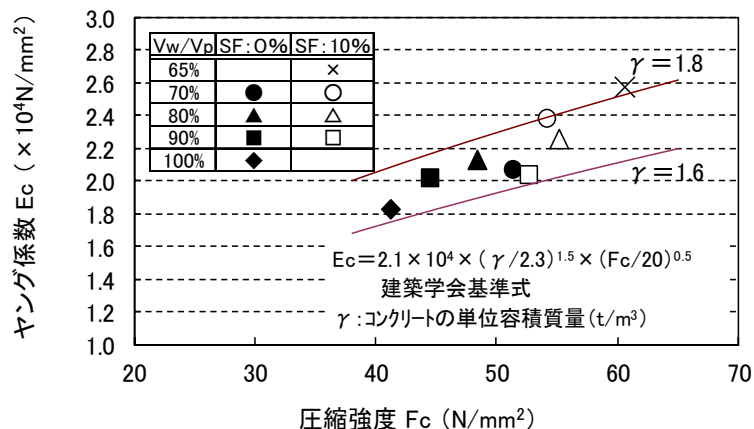


図-5.2.13 圧縮強度とヤング係数の関係

(4) 軽量粗骨材の種類の影響

1) フレッシュコンクリート

フレッシュコンクリートの試験結果を図-5.2.14 に示す。スランプフローは 645~775mm の範囲であった。500mm フロー到達時間および V₇₅ 漏斗流下時間は、いずれの軽量粗骨材を用いた場合でも Vw/Vp が大きくなるほど小さくなる傾向にあった。また、今回の試験では、粗骨材の種類や絶乾密度が 500mm フロー到達時間や V₇₅ 漏斗流下時間に及ぼす影響は、明瞭には認められな

った。

図-5.2.15に900mm流動性試験における骨材絶乾密度と流動勾配、モルタル未充填率、水平分離指数の関係を示す。Vw/Vp=80%では、いずれの軽量粗骨材を使用した場合でも、流動勾配が1.5%以下、モルタル未充填率が0.5%以下であり、良好な材料分離抵抗性、自己充填性を示した。Vw/Vp=90%では、いずれの場合も流動勾配が2%程度であったが、Vw/Vp=80%に比べて、流動勾配が大きくなる傾向にあった。また、粗骨材絶乾密度が1.15g/cm³よりも小さくなるとモルタル未充填率が極端に大きくなり、流動に対する材料分離抵抗性を確保することができなかった。Vw/Vp=100%では、流動勾配、モルタル未充填率とも全体的に大きくなり、骨材密度が小さくなるにつれてほぼ直線的に増大した。これは、Vw/Vpを大きくするとペーストの粘性が低下して材料分離抵抗性が小さくなり、また、粗骨材の密度が小さいほどモルタルとの密度差が大きくなって材料分離が生じやすくなるためである。水平分離指数については、いずれの配合も1.0~1.1の範囲であったが、モルタル未充填率の大きいものほど流動先端部における鉛直方向の分離、すなわち軽量骨材の浮上がりは顕著になる傾向にあった。

これらのことから、軽量粗骨材の種類（密度）によって、流動に対して適切な材料分離抵抗性が得られるVw/Vpが異なり、骨材の密度が小さくなればなるほど、Vw/Vpを小さくする必要があることが示された。

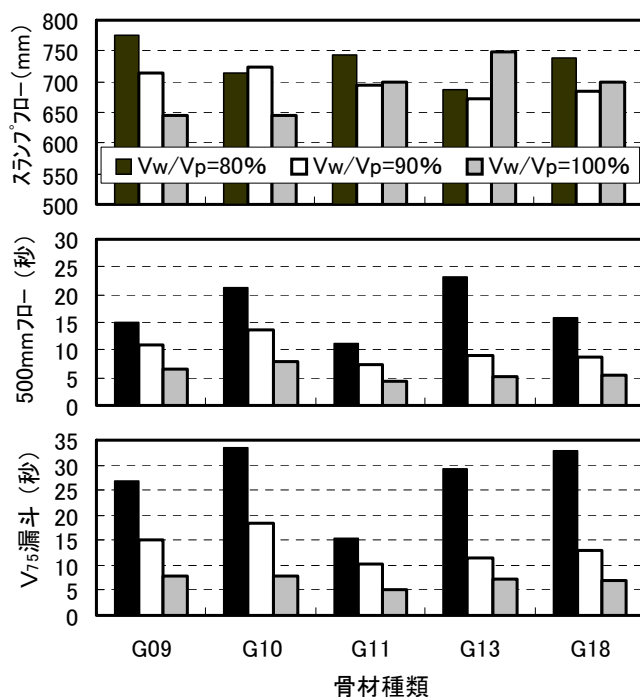


図-5.2.14 フレッシュコンクリートの試験結果

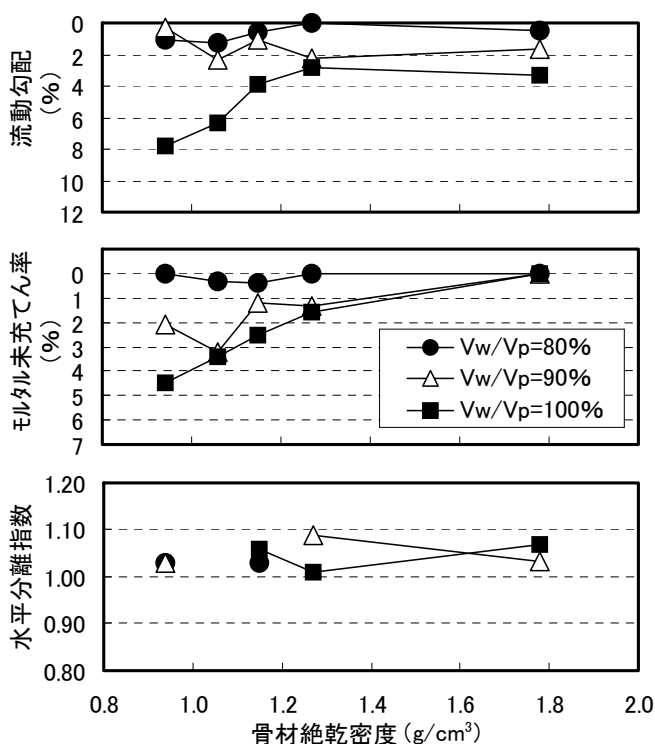


図-5.2.15 900mm 流動性評価試験の結果

2) 硬化コンクリート

図-5.2.16 に材齢 28 日の圧縮強度とヤング係数の関係を示す。図に示すように、粗骨材の絶乾密度が大きいものほど、また、 V_w/V_p が小さくなるほど圧縮強度、ヤング係数とも大きくなる傾向にあった。また、圧縮強度とヤング係数はほぼ線形の関係を示したが、骨材原料の相違（真珠岩系と石炭灰系）によって、その関係式は異なり、同一強度で比較すると石炭灰焼成骨材（G18）は、真珠岩系骨材よりも 4 割程度大きいヤング係数が得られた。これは、石炭灰焼成骨材を用いた場合には、コンクリートの単位容積質量が大きくなること、骨材自身のヤング係数が大きいことによるものである。

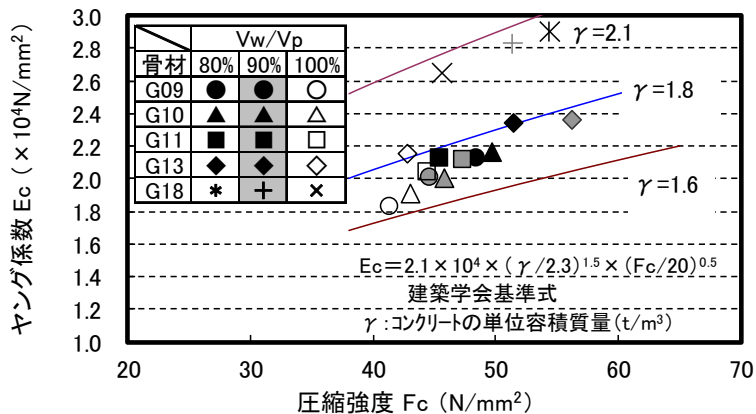


図-5.2.16 圧縮強度とヤング係数の関係

(5) 流動距離および打込み速度の影響

(4)において、自己充填性、材料分離抵抗性が不十分であった配合Ⅲ-4（粗骨材：G09， V_w/V_p ：100%）および良好な充填性を示した配合Ⅳ-1C（粗骨材：G13， V_w/V_p ：80%）を用いて3m流動性評価試験を行った。図-5.2.17にフレッシュコンクリートの試験結果を、図-5.2.18に流動性評価試験における流動勾配，モルタル未充填率の測定結果を示す。試験ごとに練混ぜを行った結果を示したものであるが、各配合のスランプフロー， V_{75} 漏斗流下時間，500mmフロー到達時間の試験結果のばらつきは小さく、ほぼ一定の値を示した。

1) 流動距離の影響

G09を用いた配合では、図-5.2.18に示すように、流動距離を3mとした場合には、900mm流動の場合と比べて流動勾配が小さくなり、モルタル未充填率が大きくなった。流動勾配が小さくなった理由としては、天端全面に粗骨材の浮上りがみられたが、流動距離2m付近までは勾配が生じていなかったこと、流動先端部のみに粗骨材同士あるいは粗骨材と型枠の接触が顕著となって勾配が生じていたことが考えられる。また、モルタル未充填率は6.2%であり、流動先端ではモルタルの回り込みがほとんどみられなかった。一方、G13を用いた配合では、900mm流動に比べて3m流動では、流動勾配，モルタル未充填率とも大きくなる結果となった。流動勾配が大きくなった原因としては、500mmフロー到達時間や V_{75} 漏斗流下時間に示されるように、ペーストの粘性が高く、型枠との摩擦抵抗が卓越したため、打込み位置から全体的に勾配が生じたことによるものと考えられた。モルタル未充填率は2.1%であったが、モルタルと粗骨材が一体となって流動しており、流動先端部で骨材の浮上りが僅かに生じる程度であった。

いずれの配合も、打込み速度1ℓ/5秒の条件では、流動距離が長くなると材料分離が生じやすくなる傾向が認められた。しかしながら、900mm流動性評価試験においてモルタル未充填率が0%を示すような配合Ⅳ-1Cであれば、流動距離が3mとなってもモルタル未充填率を2%程度に抑制できることが確認された。

2) 打込み速度の影響

打込み速度を約4倍にして3m流動性評価試験を行った結果、図-5.2.18に示すようにいずれの配合とも流動勾配，モルタル未充填率が小さくなる傾向を示したが、G09を用いた配合は、打込み速度の影響は僅かであり、流動勾配やモルタル未充填率はさほど変化しなかった。これに対して、G13を用いた配合では、流動勾配が大幅に改善されるとともに、モルタル未充填率も0.4%まで低下した。これは、打込み速度を速くすることでコンクリートの変形速度が型枠との摩擦抵抗を上回ったことによるものと考えられた。

また、本試験結果では試験に供した2配合とも900mm流動性評価試験におけるモルタル未充填率が打込み速度を4ℓ/5秒とした3m流動性評価試験におけるモルタル未充填率とほぼ一致していること、実施工においてはさらに速い速度で打込みが行われることを考慮すると、軽量骨材を用いた高流動コンクリートの自己充填性，材料分離抵抗性を900mm流動性評価試験によってある程度まで評価できる可能性が示された。

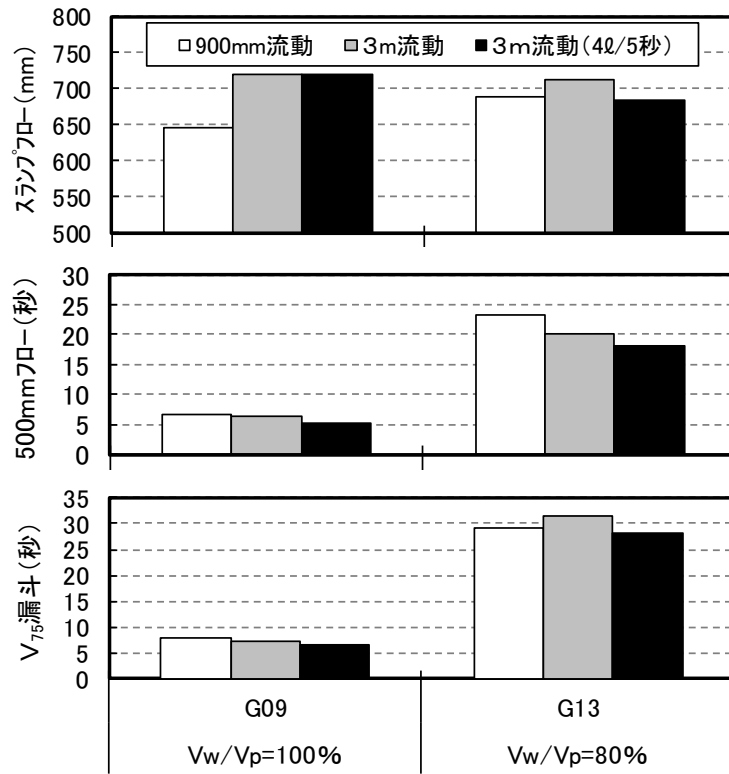


図-5.2.17 フレッシュコンクリートの試験結果

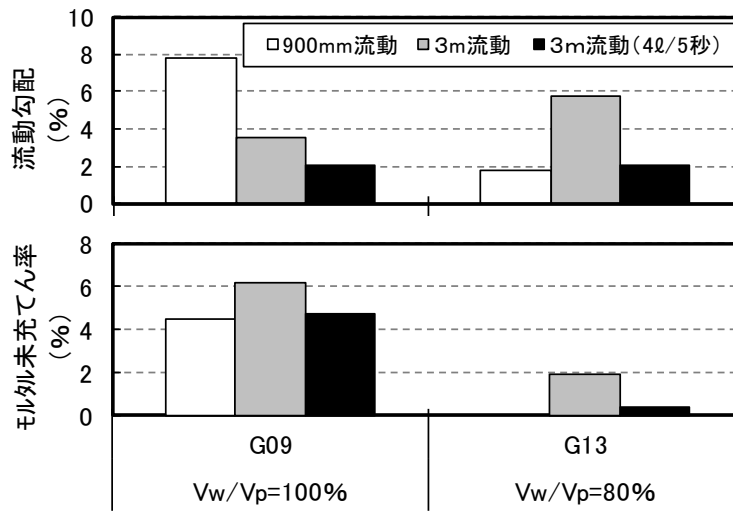


図-5.2.18 流動性評価試験の結果

5. 3 締固めを不要とする配合設計手法の提案

5. 2の実験結果をもとにフレッシュコンクリートの試験結果が充填性に及ぼす影響について考察した。

普通骨材を使用した高流動コンクリートでは、 V_{75} 漏斗流下試験では、スランプフロー600mm 以上の場合には粗骨材同士の接触が卓越して、流下時間が大きくなる傾向にある¹³⁾。軽量粗骨材を使用した本検討においては、 $G_{vol}=400\text{l/m}^3$ とした場合でも、 V_{75} 漏斗の閉塞は生じなかった。これは、軽量粗骨材の最大寸法が15mm程度と小さく、粗骨材同士が接触しにくいこと、粗骨材同士が接触しても骨材粒形が球形に近いためロッキングによる閉塞が生じにくいことによるものと考えられた。この条件のもと、今回の試験では、図-5.3.1に示すように500mmフロー到達時間と V_{75} 漏斗流下時間に高い相関があり、500mmフロー到達時間が大きくなるにしたがって、 V_{75} 漏斗流下時間も大きくなった。軽量骨材を使用した高流動コンクリートでは、 V_{75} 漏斗流下時間は、骨材同士の接触よりもモルタルと漏斗の摩擦抵抗に支配され、モルタルの粘性を評価する指標となり得ることが分かる。

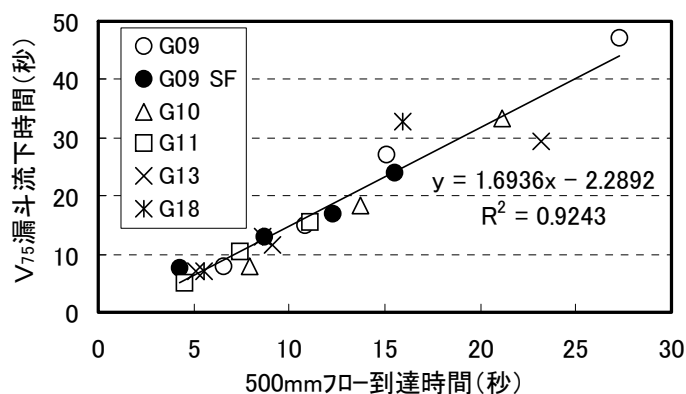


図-5.3.1 500mm フロー到達時間と V_{75} 漏斗流下時間の関係

次に、 V_{75} 漏斗流下時間と900mm流動性評価試験における流動勾配、モルタル未充填率の関係を図-5.3.2に示す。 $G_{vol}=300\text{l/m}^3$ の条件では、いずれの骨材を使用した場合でも、 V_{75} 漏斗流下時間が大きくなればなるほど、流動勾配およびモルタル未充填率が小さくなり、自己充填性および材料分離抵抗性が向上する結果となった。また、骨材密度が大きいものほど V_{75} 漏斗流下時間が小さい領域で、流動勾配およびモルタル未充填率が小さくなる傾向にあった。軽量骨材を用いた高流動コンクリートの材料分離抵抗性、自己充填性は、モルタルの粘性に大きく支配されていることが分かる。

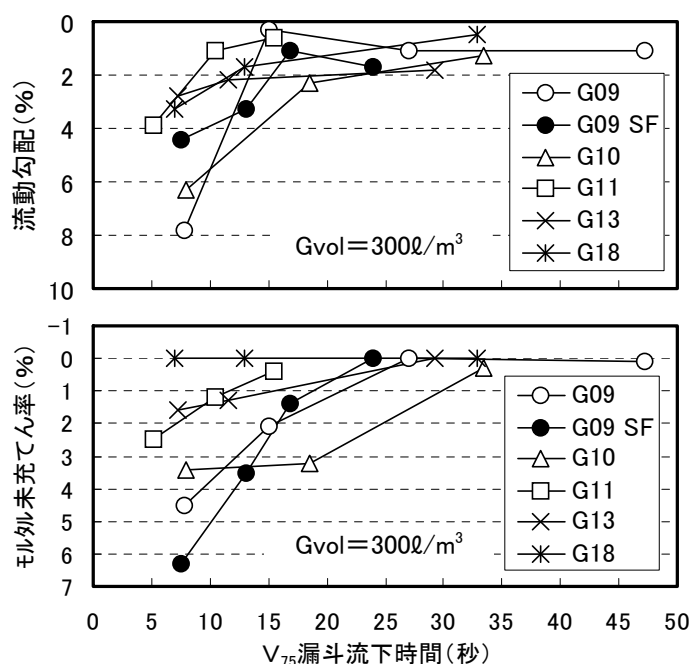


図-5.3.2 V₇₅ 漏斗流下時間と流動勾配・モルタル未充填率の関係

図-5.3.3に密度差—V₇₅ 漏斗流下時間—モルタル未充填率の関係を示す。また、図-5.3.4に密度差—500mm フロー到達時間—モルタル未充填率の関係を示す。図中のプロットのうち、塗りつぶしの点は、モルタル未充填率が0.5%未満、つまり、良好な充填性と材料分離抵抗性を示したケースの実験結果である。図-5.3.3に示すように、モルタル未充填率が良好な結果となったものは、図中に外挿した線よりも大きなV₇₅ 漏斗流下時間を示した配合であった。これによれば、モルタルと軽量粗骨材の密度差が大きくなればなるほど、V₇₅ 漏斗流下時間を大きくしなければ、未充填部が生じてしまうことが分かる。500mm フロー到達時間についても、図-5.3.4に示すように、V₇₅ 漏斗流下時間に比べて感度は劣るものの、同様のことが伺える。

これらのことから、モルタルと軽量骨材の密度差を考慮して、V₇₅ 漏斗流下時間および500mm フロー到達時間が図中にプロットしたラインよりも大きくなるようにその目標値を設定し、これを満たすように水粉体容積比 V_w/V_p を調整することで、高い自己充填性と材料分離抵抗性を有する軽量骨材コンクリートの配合を選定することができる。

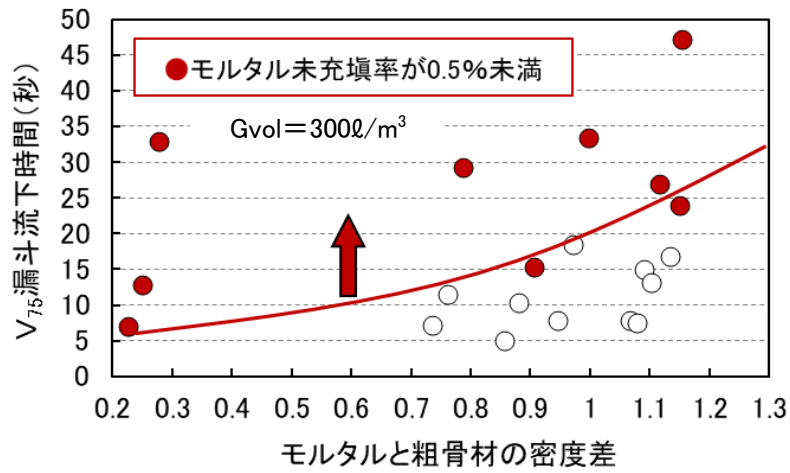


図-5.3.3 密度差-V₇₅漏斗流下時間-モルタル未充填率の関係

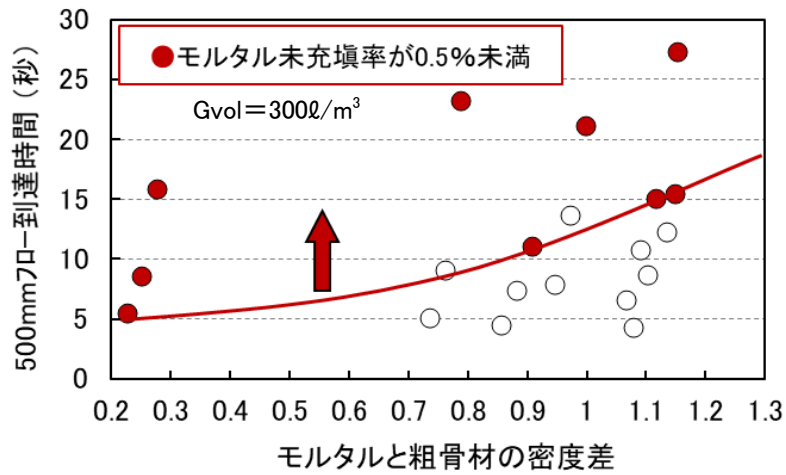


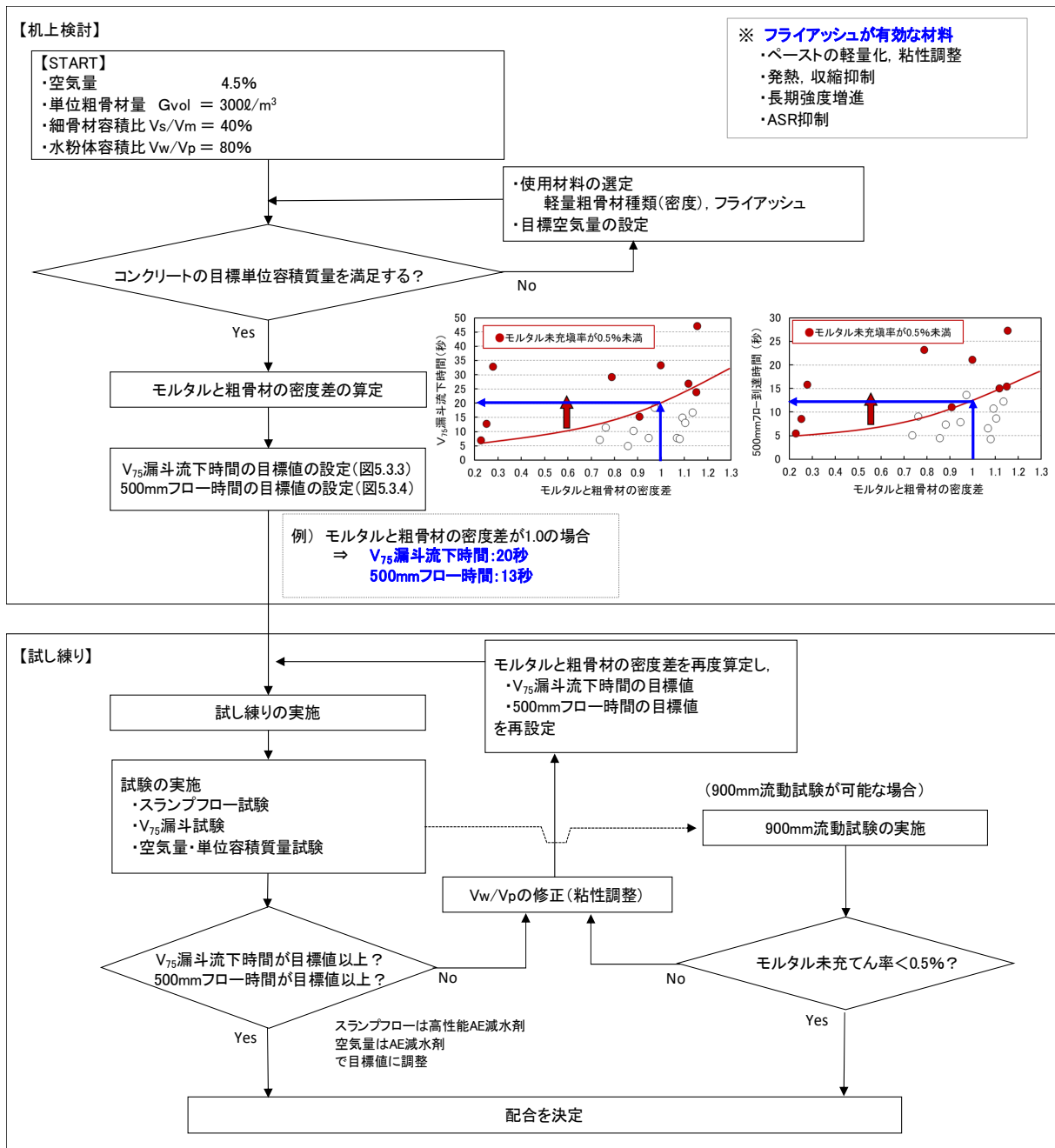
図-5.3.4 密度差-500mm フロー到達時間-モルタル未充填率の関係

5. 4 まとめ

独立空隙型の人工軽量骨材を用いたコンクリートに自己充填性を付与することを目的として、モルタルと粗骨材の密度差、水粉体容積比、軽量粗骨材の種類および単位量に着目して試験を行い、配合条件がフレッシュ性状に及ぼす影響を検討した。本検討で得られた知見をまとめると以下ようになる。

- (1) ペーストの粘性が小さい場合でも、モルタルと軽量粗骨材の密度差を小さくすることで材料分離（軽量骨材の浮上がり）を抑制できる。逆に、密度が小さい軽量骨材を用いる場合でも、本実験の範囲である 1.2 までの密度差であれば、ペーストの粘性を適切に設定することで材料分離を抑制できる。ペーストの粘性は、水粉体容積比で調整できる。
- (2) 軽量骨材を用いた高流動コンクリートは、配合が適切でないと、水平流動した先端部で鉛直方向の材料分離（軽量骨材の浮上がり）が顕著となる。
- (3) 単位粗骨材量は、 3500 l/m^3 を上限とし、 3000 l/m^3 程度が適当である。
- (4) 900mm 流動性試験により、軽量骨材を用いた高流動コンクリートの自己充填性、材料分離抵抗性の評価が可能である。ただし、900mm 流動性試験は、簡易とはいえ、特殊な試験である。この試験で得られる評価は、一般的な高流動コンクリートの試験で測定する V_{75} 漏斗流下時間と 500mm フロー到達時間に関連付けることができる。
- (5) V_{75} 漏斗流下時間と 500mm フロー到達時間の目標値は、モルタルと軽量粗骨材の密度差を考慮して決定する。本章で示した図中（図-5.3.3, 5.3.4）にプロットしたラインよりも V_{75} 漏斗流下時間と 500mm フロー到達時間が大きく目標値を設定し、これを満たすように水粉体容積比 V_w/V_p を調整する。こうすることで、高い自己充填性と材料分離抵抗性を有する軽量骨材コンクリートの配合を選定することができる。
- (6) モルタルと粗骨材の密度差の調整や水粉体容積比 V_w/V_p の調整には、フライアッシュを用いるのが有効である。セメントの内割で容積置換することで、材料分離抵抗性の改善に加え、水和熱や収縮の抑制を図ることができ、長期強度の増進やアルカリシリカ反応の抑制も期待できる。

本研究で得られた知見を反映させた人工軽量骨材を用いた自己充填性を有するコンクリートの配合選定フローを図-5.4.1 に示し、配合選定手法として提案する。



※単位粗骨材量 G_{vol} に関しては、 $300\text{l}/\text{m}^3$ を基本とするが、 $350\text{l}/\text{m}^3$ を上限に適宜調整してよい。

図-5.4.1 人工軽量骨材を用いた自己充填コンクリートの配合選定フロー(基本案)

【参考文献】

- 1) 岡村甫, 前川宏一, 小澤一雅: ハイパフォーマンスコンクリート, 技報堂出版, 1993.9
- 2) 河井徹, 岡田武二: 流動化した高強度軽量コンクリートの材料分離に関する一実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.9, No.1, pp.235~240, 1987.6.
- 3) 河井徹, 大野浩, 小沢一雅, 伊木崇: 締固め不要・高強度軽量コンクリートの開発と適用, セメント・コンクリート, No.552, pp.32~43, 1993.2.
- 4) 柳井修司, 坂田昇, 渡辺賢三, 信田佳延: 高性能軽量コンクリートの自己充填性付与に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.337~342, 1999.6
- 5) 柳井修司, 坂田昇, 信田佳延, 岡本享久: 高性能軽量・高流動コンクリートに関する研究, 土木学会論文集, No.648/V-47, pp.23~32, 2000.5
- 6) 岡本享久, 早野博幸, 柴田辰正: 超軽量コンクリート, コンクリート工学, Vol.36, No.1, pp.48~52, 1998.1
- 7) 曾根徳明: 石炭灰を主原料とした高強度人工骨材, コンクリート工学, Vol.36, NO.12, pp.3~10, 1998.12
- 8) 坂田昇, 丸山久一, 南昌義: 増粘剤ウェランガムがフレッシュコンクリートの自己充填性に及ぼす影響, 土木学会論文集, No.538/V-31, pp.57~68, 1996.5
- 9) 坂田昇, 丸山久一, 稲葉美穂子, 皆口正一: 高流動コンクリートの材料分離の簡易評価方法について, 土木学会高流動コンクリートシンポジウム論文報告集, pp.157~162, 1996.3
- 10) 万木正弘, 坂田昇, 坂井吾郎, 六本木信久: 高流動コンクリートの配合設計に関する研究, 鹿島技術研究所年報, Vol.42, pp.23~28, 1994.10
- 11) 高強度人工軽量骨材コンクリートを用いた建築物の設計と施工, 日本建築学会, 1992.12
- 12) 吉野公, 西林新蔵, 井上正一, 佐々木孝, 久米生泰: 高流動コンクリートの流動性に及ぼすシリカフェーム添加の影響, 土木学会コンクリート技術シリーズ4, 「シリカフェームを用いたコンクリート」に関するシンポジウム講演論文報告集, pp.15~20, 1993.11
- 13) 小沢一雅, 坂田昇, 岡村甫: ロートを用いた締固め不要コンクリートの充填性評価, 土木学会論文集, No.490/V-23, pp.157~162, 1996.3

第6章 実構造物への適用

6. 1 独立空隙型人工軽量骨材コンクリートの現場適用

ここまでの研究結果を踏まえ、独立空隙型人工軽量骨材コンクリートを実構造物へ適用して、成果の検証を行うとともに、施工のポイントの確認を行った。

6. 1. 1 プレキャスト製品（ダム仮排水路閉塞工プレキャスト型枠）

（1）はじめに

近年の建設工事では、構造物の品質を確保しながら急速施工を行っていくことが大命題となっており、工期の短縮化を図るために様々な手法・工法が検討されている。特に、最近のコンクリート工事においては、部材の一部をプレキャスト化して工場製作し、それを施工現場へ運搬後、所定の場所に据え付けるといったプレキャスト工法が盛んに採用されるようになってきた。このプレキャスト工法は、製作と設置が別の場所で平行して行われるため、現場作業の省力化・合理化が可能となるばかりでなく、安全性の確保や工期の短縮を図ることができる。また、工場で作られた部材は、場所打ちのものに比べてより確実な管理が行われるため、部材の品質の向上を図ることができる。さらに、プレキャスト部材に軽量骨材コンクリートを適用して部材を軽量化した場合には、出荷－運搬－荷卸し－架設といった一連の工程において一部材の寸法を大きくすることができる、あるいは各工程で使用する建設機械を小規模化することができるなど、施工サイクル数の削減や作業工程の簡略化が可能となり、大幅な工期短縮や工費の削減が期待できる。

新潟県奥三面ダム建設工事では、現場施工の省力化と大幅な工期短縮を目的に、独立空隙型軽量骨材を用いた軽量骨材コンクリートで製作したプレキャスト埋設型枠をダム仮排水路閉塞工の型枠として適用した¹⁾。

（2）施工概要

1) 構造物の概要

ダム工事においては、流れていた川を仮排水路トンネルに転流させ、本体工事を進めていくのが一般的である。このため、ダム本体の工事を完了し試験湛水を実施するためには、仮排水路トンネルから元の川に流れを切り替えた（二次転流）後に仮排水路トンネル²⁾とダムの止水軸（カーテングラウチングライン）が交差する付近を閉塞する作業（閉塞工）が必要となる。この閉塞部分は、ダムにより貯留される水と直接接するため最も水圧が作用する部分である。したがって、より確実な閉塞作業が必要となる。また、周辺岩盤からの漏水を防止するための止水作業（グラウチング）も確実に行う必要がある。閉塞工の施工期間は二次転流を容易に行うため、川の流れが少なくかつ洪水の発生する可能性が低い非洪水期間に限定される。しかしながら、万一の出水による水没の危険性を最小限にするためには、閉塞工に要する工期を一日でも短縮することが工事の安全対策上、非常に重要となる。通常行われている在来工法では、工事現場でバラ型枠を組み立てて施工を行うが、型枠工事に時間を要しているのが現状である。

本工事における閉塞部分の構造は、図-6.1.1に示すように基礎処理前に施工する一次コンクリート、一次コンクリートの冷却後、通廊部分から周辺岩盤にファン状に施工する基礎処理（コンソリデーショングラウチング、カーテングラウチング）と基礎処理後に施工する二次コンクリー

トに分れている。プレキャスト型枠は、この一次コンクリートを施工し、基礎処理のための通廊を形成するために使用するものである。なお、プレキャスト型枠の適用については、ダム本体の通廊に用いた事例³⁾はあるが、閉塞工に用いたのはこの工事が初めてである。

閉塞工の全体工程は、図-6.1.2 に示すように着手から3ヶ月ほどを要する。プレキャスト型枠の形状は図-6.1.3 に示すような馬蹄形であり、内空はグラウチングで行うボーリング作業においてロッドの継足しが可能な最低限の寸法とした。また、プレキャスト型枠の形状を単純化するとともに重量をより軽減するために、アーチカルバートの底版部分を省略してH型鋼をストラットとして取付けることで一次コンクリートの打込み圧力に対応させる設計とした。

プレキャスト型枠1ピース当たりの重量は、トンネル内で使用可能な吊込み用のクレーン能力から決定される。本工事で使用するクレーンの能力は4.9tであり、施工性を考慮してトンネル軸方向の型枠長さを1mの定尺とした。普通骨材コンクリートで製作したプレキャスト型枠を用いる場合には、図-6.1.3 に示す一体型の型枠形状とすると1ピース当たりの重量が5tを超えてしまうため、図-6.1.4 に示すような中央で二分割した構造にならざるを得ない。しかしながらこの場合には、トンネル内で2つのブロックを接合させる必要が生じるとともに、トンネル内作業で使用できるクレーンが1台に限られているため、クレーンにより左右いずれかのブロックを所定の位置に設置し、残るブロックを設置するまでの間、先行設置したブロックを仮受しておかなければならない。これに対して、プレキャスト型枠に単位容積質量 1.750kg/m^3 の軽量骨材コンクリートを適用した場合には、1ピース当りの重量が図-6.1.3 に示す一体型の形状としても1ピースの重量が3.3tとなり、クレーンによる運搬・据付けが容易になることに加えて、トンネル内での型枠接合作業が省略できることになる。そこで、プレキャスト型枠に単位容積質量 1.750kg/m^3 の軽量骨材コンクリートを使用することとした。

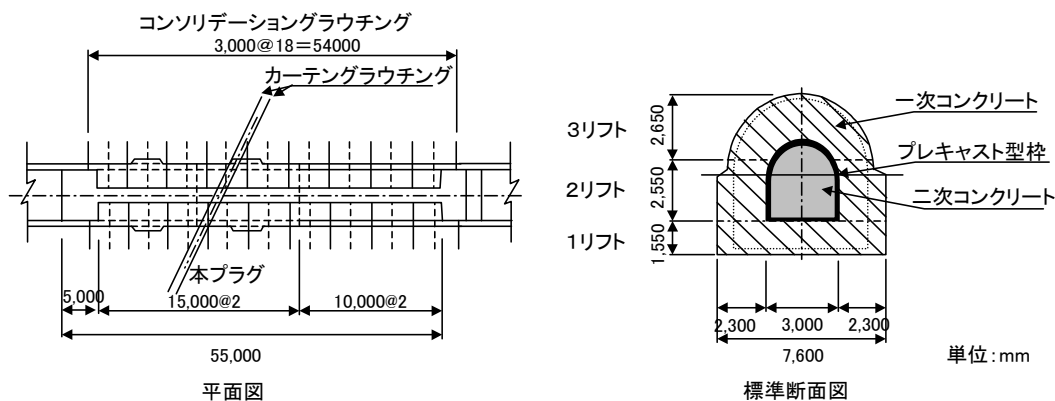


図-6.1.1 閉塞部分構造図

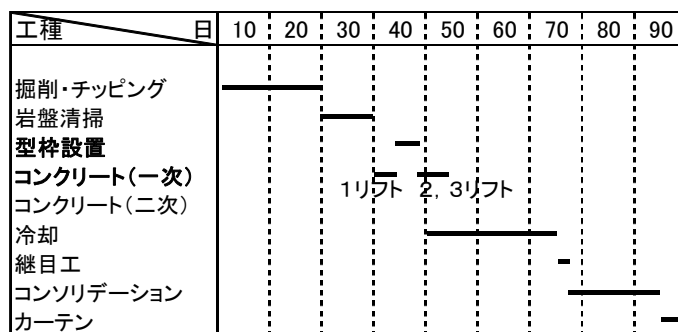


図-6.1.2 閉塞工の工程

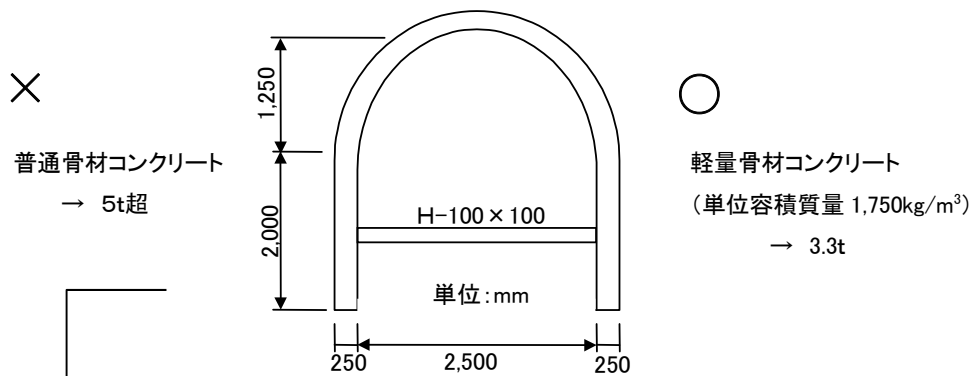


図-6.1.3 プレキャスト型枠構造図

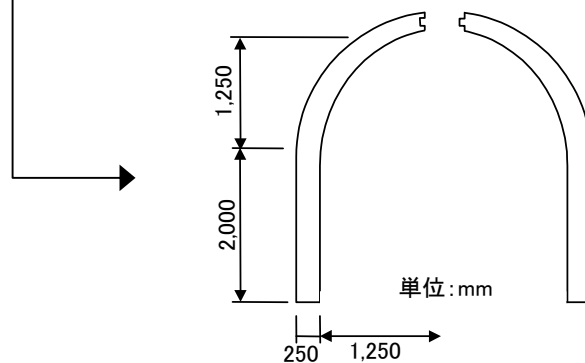


図-6.1.4 プレキャスト型枠構造図 (分割型)

2) コンクリートの配合検討

軽量骨材コンクリートの示方配合を選定するために室内配合試験を実施した。コンクリートの仕様を表-6.1.1に、使用材料を表-6.1.2示す。プレキャスト型枠1ピースの重量を3.3 t以内にするためにコンクリートの目標単位容積質量を $1,750\text{kg/m}^3$ とした。粗骨材には、絶乾密度 0.85g/cm^3 、24時間吸水率4.08%の独立空隙型人工軽量粗骨材を用いた。また、単位水量を極力減ずることを目的としてポリカルボン酸系の高性能AE減水剤を使用した。

試験に供した配合を表-6.1.3に示す。コンクリートの設計基準強度は材齢28日で 21N/mm^2 であるが、振動締固め作業による軽量骨材の分離やコンクリートの耐久性を考慮して、水セメント比を30%、35%、40%の3水準変化させて試験を実施した。また、軽量骨材については、コンクリートの耐久性を考慮して、プレウェットティングを行わない気乾状態で練混ぜに供した。

表-6.1.1 コンクリートの仕様

項目	規格
コンクリートの種類	軽量骨材コンクリート I 種
設計基準強度	21N/mm^2
単位容積質量	$1,750\text{kg/m}^3$
スランプ	$12 \pm 2.5\text{cm}$
空気量	$5.0 \pm 1.5\%$
セメント種類	普通ポルトランドセメント
粗骨材	人工軽量粗骨材

表-6.1.2 使用材料

使用材料	記号	摘要	
セメント	C	普通ポルトランドセメント	密度:3.15g/cm ³ , 比表面積:3.240cm ² /g
細骨材	S1	新潟県三面川産川砂	表乾密度:2.58g/cm ³ , 吸水率:1.67% 粗粒率:2.63
粗骨材	G	独立空隙型人工軽量粗骨材	絶乾密度:0.85g/cm ³ , 24h吸水率:4.08% 実積率:61.0%, 最大寸法:15mm
混和剤	SP	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸エーテル系標準形

表-6.1.3 コンクリートの配合

配合 No.	目標スラブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	Gvol (kg/m ³)	単体量 (kg/m ³)				SP (C×%)
						W	C	S	G	
A	12±2.5	5.0±1.5	40.0	48.0	402	155	388	837	342	0.65
B			35.0		392		443	815	333	0.65
C			30.0		378		517	785	321	0.80

W/C:水セメント比, Gvol:単位粗骨材容積, s/a:細骨材率, G:絶乾重量を表示

室内試験におけるフレッシュコンクリートの試験結果を表-6.1.4に示す。高性能 AE 減水剤および空気量調整剤の使用量を調整することで、目標とするフレッシュコンクリートの性状を得ることが可能であった。いずれの配合もフレッシュコンクリートの性状は良好であり、目視による材料分離は認められず、プレキャスト型枠に用いるコンクリートとして良好なワーカビリティを有していた。また、いずれの配合もブリーディング率は0%であった。

圧縮強度試験の結果を図-6.1.5に示す。いずれの配合も材齢7日で設計基準強度21N/mm²を上回り、材齢28日強度には40N/mm²~50N/mm²の圧縮強度が得られた。今回の試験では、水セメント比の小さな配合について検討したが、前述のようにいずれの配合も材料分離が認められなかったため、その中で単位容積質量の理論値が最も小さい配合A（水セメント比40%）を選定した。

表-6.1.4 フレッシュコンクリートの試験結果

配合 No.	W/C (%)	コンクリート温度 (°C)	スラブ (cm)	空気量 (%)	単位容積質量 (kg/m ³)	ブリーディング率 (%)
A	40.0	21.0	13.50	5.9	1706	0
B	35.0	21.0	13.50	5.1	1745	0
C	30.0	21.5	11.00	5.8	1764	0

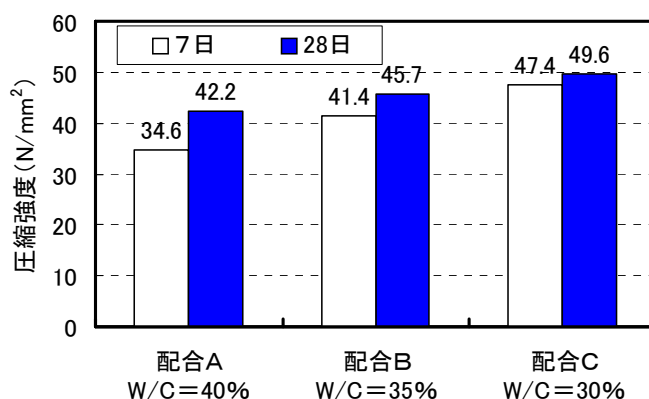


図-6.1.5 圧縮強度試験の結果

次に、選定した配合Aを用いて、振動締固め作業がコンクリートの材料分離に及ぼす影響を把握することを目的として、実際のプレキャスト型枠の製作を模擬した実験を行った。製作実験においては、振動締固めによって、コンクリート天端面に軽量骨材が僅かに浮き上がる現象が確認されたが、製作されたセグメントの切断面には、写真-6.1.1 に示すように軽量粗骨材が均一に分散していた。このことから、振動締固めによる軽量骨材の浮上りは、打込み面の表面部のみで生じる現象であり、適切な配合を用いて適切な振動締固めを行うことで、品質の均一性を確保できることが示された。



写真-6.1.1 模擬試験体の断面

3) プレキャスト型枠の製造

プレキャスト型枠の製造工程を図-6.1.6 に示す。軽量骨材コンクリートの製造は市中のレディミクストコンクリート工場で行った。プレキャスト型枠（合計 51 ピース）の製作は 1 ピース

／日のため、毎回 2.1m^3 の軽量骨材コンクリートを製造・出荷した。軽量骨材の搬入においては、今回使用した軽量骨材の形状が真球形状であるのに加えて、レディーミクストコンクリート工場の骨材運搬用ベルトコンベアの角度が $18^\circ 50'$ と急であったことから、ベルトコンベアによる運搬ができなかった。そこで、軽量骨材を 0.5m^3 のフレコンに梱包して納入し、これをバッチャープラントに設置したチェーンブロックにて荷揚げして容量 20m^3 の貯蔵ビンに収納した。コンクリートの練混ぜは水平二軸式強制練りミキサを用いて行い、モルタルを先行して 60 秒間練り混ぜた後、軽量骨材を投入してさらに 30 秒間練り混ぜて排出した。この際、練混ぜ後のミキサ内に軽量骨材が僅かに残留する状況が確認されたため、練混ぜ後直ちにミキサ内部を洗浄して、他現場へ出荷されるコンクリートに軽量骨材が混入しないように配慮した。なお、室内試験と同様、軽量骨材は気乾状態で練混ぜに供した。練り上がったコンクリートは、直ちに品質管理試験を行って、所定のフレッシュコンクリートの性状を満足することを確認した後、アジテータ車に積載して約 10km 離れたプレキャスト製品工場まで運搬した。

製品工場では、コンクリート到着時にフレッシュコンクリートの性状を確認し、容量 1m^3 のバケツを用いて大型振動台（振動数 475Hz 遠心力 22.6kN 6 台）上に設置した型枠内に打ち込んだ。コンクリートの締固めはこの振動台によって行い、打込みとほぼ同時に締固めを開始した。

コンクリートの表面仕上げに際しては、先に実施した製作実験の結果から、振動締固めによって打込み面の軽量骨材が僅かに浮上り、仕上げに労力を要することが推測されたこと、コンクリートの表面仕上げを迅速に行なって製造速度の向上を図る必要があること等を考慮して、仕上げ面の表面 2cm に普通骨材コンクリートを打ち込むこととした。なお、今回使用した軽量骨材コンクリートは表-6.1.4 に示すようにブリーディング率が 0% であることから、上部に打ち込まれる普通骨材コンクリートとの一体性は、仕上げ面の押さえ作業によって十分に確保できていた。なお、コンクリートの打込みに要した時間は約 4 分間であった。

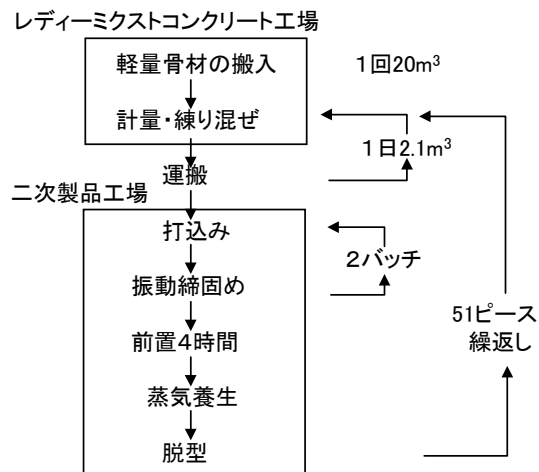


図-6.1.6 プレキャスト型枠の製造フロー

コンクリートの養生は、図-6.1.7 に示すような温度履歴を与えて蒸気養生を行った。養生温度の管理は、4 時間の前置き養生を行った後、 $15^\circ\text{C}/\text{h}$ の速度で昇温させ、 45°C になったところで 2 時間保持させた。その後、急激な温度低下によるコンクリートの初期欠陥の発生を防止するため、3～4 時間かけて徐冷した。今回の製造工場では、コンクリート製品（普通ポルトランド

セメント使用)は65°Cで蒸気養生しているが、軽量骨材コンクリートの方が単位セメント量が大きく、水和による発熱が大きいと推定されたこと、事前検討で蒸気養生温度が45°C、65°Cで脱型時の圧縮強度に大きな変化が認められなかったことから養生温度を45°Cとした。なお、脱型時の圧縮強度は15N/mm²としたが、養生条件を同じくした円柱供試体(φ100×200mm)により、打込み後24時間で脱型時強度を十分に満足することを確認した。

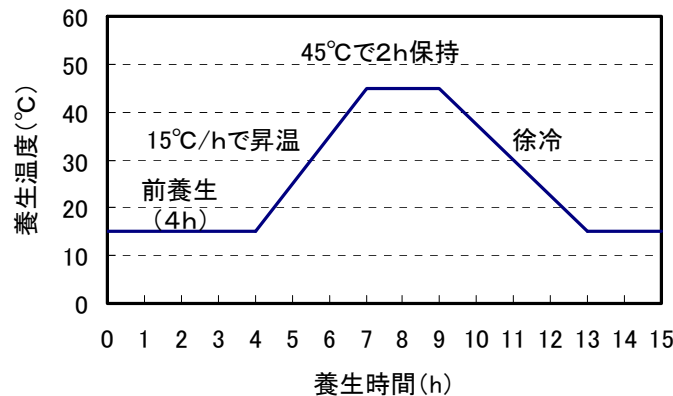


図-6.1.7 養生温度履歴の一例

(3) 施工結果

1) プレキャスト型枠の製作管理

プレキャスト型枠製作時に実施した圧縮強度の品質管理試験の結果を表-6.1.5に、その管理図を図-6.1.8に示す。圧縮強度の管理は、供試体(φ100×h200mm)をプレキャスト型枠と同じ条件で養生した材齢14日強度と標準養生28日強度で実施した。なお、比較のため、同じレディーミクストコンクリート工場で製造した呼び強度21N/mm²、スランプ12cmの普通骨材コンクリートの同期間における圧縮強度の統計を表-6.1.5に合わせて示した。

表-6.1.5に示すように、全工程における蒸気養生の圧縮強度の変動係数は12.9%であり、標準養生の場合よりも強度の変動が大きい結果となった。これは、各回の養生条件に若干の違いが生じたことに起因するものと考えられた。標準養生供試体については、普通骨材コンクリートよりも圧縮強度の変動が大きい結果となった。これは、表-6.1.6に示すように、軽量骨材の製造ロットによる骨材の品質に若干の変動があったこと、軽量骨材コンクリートの1日当たりの出荷量が2.1m³と少量であったために細骨材の表面水率の設定誤差の影響が顕著となったことによるものと考えられた。しかしながら、全ての品質管理試験において、圧縮強度が設計基準強度以上であったこと、標準養生における圧縮強度の変動係数が10%以下であったことから、実用上問題とならない程度のばらつきであった。

表-6.1.5 圧縮強度の品質管理試験結果

	養生方法	平均値 (N/mm ²)	標準偏差 (%)	変動係数 (%)
軽量骨材コンクリート	14日蒸気	31.5	4.07	12.9
	28日標準	34.6	3.03	8.70
普通骨材コンクリート	28日標準	30.5	1.76	5.80

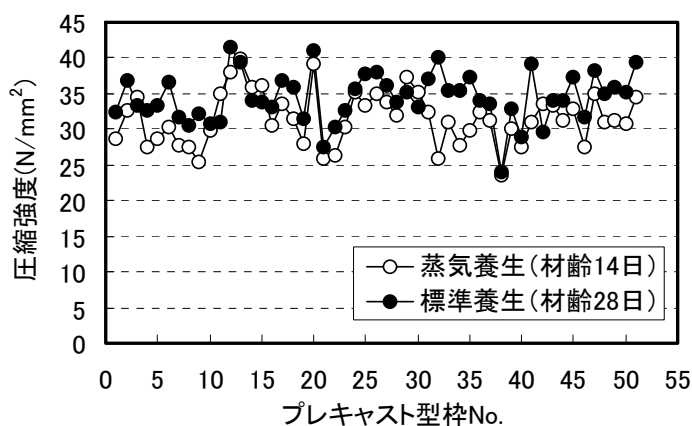


図-6.1.8 圧縮強度の管理図

表-6.1.6 軽量骨材の品質とコンクリートの圧縮強度

骨材製造ロット		1	2	3	4	5
軽量粗骨材	絶乾密度(kg/ℓ)	0.85	0.87	0.87	0.85	0.88
	表乾密度(kg/ℓ)	0.88	0.91	0.91	0.88	0.92
	24h吸水率(%)	3.00	4.60	4.60	3.20	4.10
	単位容積質量(kg/ℓ)	0.53	0.53	0.53	0.53	0.54
	実積率(%)	62.4	61.4	61.4	62.8	61.0
	圧壊強度(N)	890	1020	880	950	830
コンクリート	平均圧縮強度(N/mm ²)	34.0	34.2	35.0	34.5	37.4
	変動係数(%)	11.4	11.5	7.5	11.1	7.8

2) 運搬・据付け・閉塞工

プレキャスト型枠の設置作業のフローを図-6.1.9に示す。製品工場で作成したプレキャスト型枠は、約35km離れた建設現場まで運搬した。運搬には、10t積みトレーラーを使用した。1ピース当りの重量が3.3tのため1台当り3個ずつ積載して運搬することが可能であった。据付けは、第1リフト(底板部)のコンクリートを打ち込んだ後、トンネル内に設置した4.9t吊りクローラクレーンを使用して実施した。据付けにおいては、一体型の型枠にすることで型枠の接合作業が省略できたため、一日当り10ピースのプレキャスト型枠を容易に設置することができ、全51ピースを5日間という短期間で据え付けることができた。現場に搬入した状態のプレキャスト型枠を写真-6.1.2に、トンネル内の据付け完了状況を写真-6.1.3に示す。

型枠据付け後、第2・第3リフトのコンクリートを打ち込んだが、打ち込まれたコンクリートの自重や側圧による型枠の変形は全く認められず、十分な耐荷能力を有していた。なお、第3リフトについてはトンネル頂版部であり、振動締固めが困難であったため、自己充填性を有する高流動コンクリートを適用した。閉塞コンクリート(二次コンクリート)についても、高流動コンクリートを打込み、閉塞作業を無事終了した。

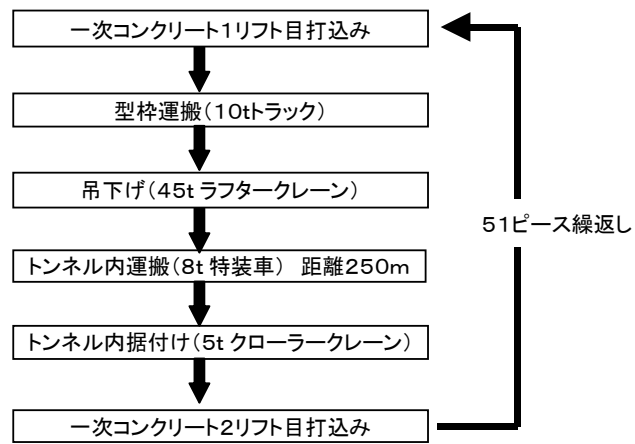


図-6.1.9 プレキャスト型枠の設置フロー



写真-6.1.2 プレキャスト型枠



写真-6.1.3 プレキャスト型枠設置後の状況

(4) 軽量骨材コンクリートの適用効果

今回適用した軽量骨材コンクリートで製作したプレキャスト型枠を用いた場合の経済性を評価するために、普通骨材コンクリートで製造したプレキャスト型枠を用いた場合の工事費と比較評価した。材料費、運搬費および据付け工事費に項目分けをして算出した工事費の比較を図-6.1.10に示す。ここでは、普通骨材コンクリートを使用した場合の総工事費を100としてそれぞれの工費を示した。軽量骨材コンクリートを適用した今回の工事では、骨材の単価が上昇してしまうため、材料費が普通骨材コンクリートの約3倍となった。しかしながら、総工事費では、プレキャスト型枠の運搬および据付けに関わる費用を大幅に削減することが可能であり、総工事費では2.6%の増加にとどまる程度であった。

施工に要した工期の比較を図-6.1.11に示す。軽量骨材コンクリートで製作したプレキャスト型枠の据付けに要した期間は全51ピースで5日間であり、普通骨材コンクリートを使用した場合の1/3の工期であった。これは、前述の通り、軽量骨材コンクリートの適用により型枠の軽量化が図れたため、全断面の型枠を一括で据え付けることができ、接合作業が省略できたことが大きな要因である。このことから、軽量骨材コンクリートの適用は工期短縮に非常に有効であったといえる。また、この工期短縮を工事費に換算した場合には、結果として総工事費の削減が達成されたことになり、今回の工事における軽量骨材コンクリートで製作したプレキャスト型枠の適用は、施工の省力化、工期短縮、工事費削減といった目的を達成できた。

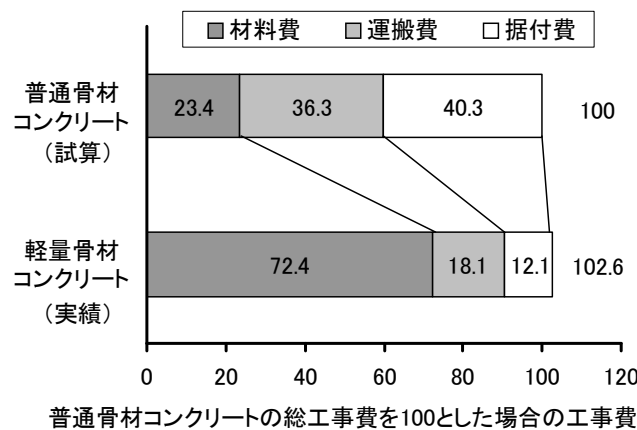


図-6.1.10 工費の比較

		日数(日)																								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
普通 (試算)	一次コンクリート打込み	1リフト																		2リフト		3リフト				
	型枠設置 (3m/day)				1リフト																					
軽量 (実績)	一次コンクリート打込み	1リフト								2リフト			3リフト													
	型枠設置 (10m/day)				1リフト																					

図-6.1.11 プレキャストセグメント型枠の設置工程の比較

(5) まとめ

今回、ダム工事における堤外仮排水路の閉塞工事において、プレキャスト型枠を利用し、さらにその型枠に軽量骨材コンクリートを適用して工期短縮、工事費削減、施工の合理化および閉塞工事の安全性向上を図った。その結果、当初の目的を十分に達成することができた。

6. 1. 2 鉄道高架橋（東北新幹線）

（1）はじめに

東北新幹線「沼宮内 Bi (Bridge intersection : 線路橋)」の上部工には、部材の軽量化によるコスト削減効果を目的として、設計基準強度 40N/mm^2 、単位容積質量 $1,800\text{kg/m}^3$ の軽量骨材コンクリートが全面的に採用された。本橋の建設は、独立空隙型人工軽量骨材コンクリートによる初の大規模工事であった⁴⁾。

（2）構造物の概要

沼宮内 Bi は、盛岡以北の東北新幹線延伸の一部となる 11 径間 PC 連続箱桁橋である（写真-6.1.4）。橋梁側面図および主桁断面図を図-6.1.12、図-6.1.13 に示す。PC 上部工は、独立空隙型人工軽量粗骨材を用いた軽量骨材コンクリートの適用と外ケーブル方式による部材厚の縮小により、桁重量を約 22% 軽減した⁵⁾。これにより、コンクリートの材料単価は増加するものの、橋脚および基礎構造の簡素化、建設機械の小型化を実現し、約 10% のコスト削減を可能とした。なお、コンクリートは粗骨材のみに軽量骨材を用いたものであるが、設計に際しては、土木学会コンクリート標準示方書に記される骨材全部を軽量骨材とした場合の設計用値を反映させた⁶⁾。

主桁の架設は、380m 全長にわたって押出し工法を採用し、1 ブロック長 35m、サイクル工程約 20 日とする急速施工を行った。さらに、図-6.1.12 に示す跨道区間主桁および跨道区間・跨線区間の壁高欄（壁高 3.0m、壁厚 0.2m）は、コンクリート片の剥落による万が一の事故を防止するために、短繊維で補強した。



写真-6.1.4 沼宮内 Bi の全景

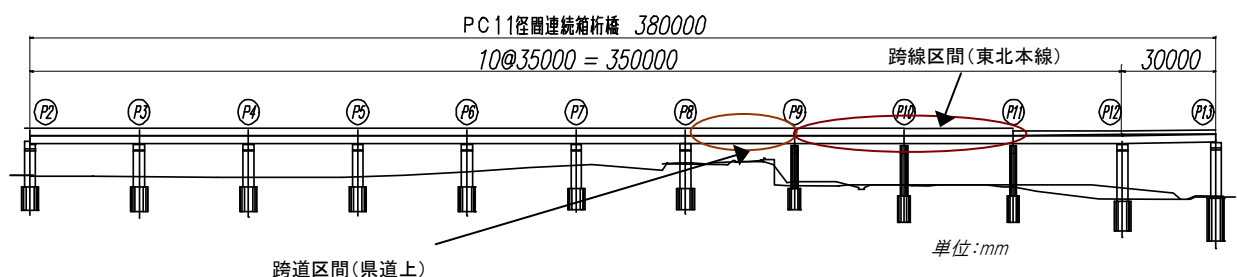


図-6.1.12 橋梁側面図

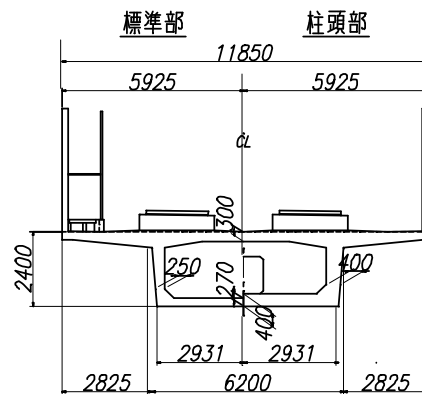


図-6.1.13 主桁断面図

(3) 事前検討

人工軽量骨材コンクリートの実橋への適用に際しては、表-6.1.7 に示す項目について試験を実施し、その性能を確認した。

コンクリートの仕様を表-6.1.8 示す。第4章で得られた知見を反映させてスランプフローの目標値を $550 \pm 50 \text{ mm}$ とした。また、空気量の目標値は、凍結融解抵抗性を考慮して $6 \pm 1.5\%$ とした。使用材料を表-6.1.9 に示す。粗骨材には、独立空隙型人工軽量粗骨材を絶乾状態で使用した。特殊増粘剤ウェランガムは、フレッシュコンクリートの品質変動や材料分離の抑制および圧送性の向上を目的として使用した。その際、プラントでの計量、投入を合理的に行うため、ウェランガムは高性能 AE 減水剤に混和した状態で使用した(第4章参照)。補強繊維として用いたポリプロピレン繊維は、表面に親水処理を施してコンクリート中への分散性能を向上させるとともに、波形の形状としてセメントペーストとの付着強さを高めたものである⁷⁾(写真-6.1.5)。

コンクリートの配合は、水セメント比(以下、W/C と記す)や繊維混入率に着目した試験練りを実施してフレッシュ性状、強度特性、凍結融解抵抗性、剥落抵抗性を確認した上で決定した。試験に供したコンクリートの配合を表-6.1.10 に、コンクリートの試験結果を表-6.1.11 にそれぞれ示す。

表-6.1.7 検討項目一覧

試験内容		検討項目	備考
主桁	室内試験	フレッシュ性状	スランプフロー, 空気量, 単位容積質量
		強度特性	圧縮強度, 引張強度, ヤング係数, 打継強度
		凍結融解抵抗性	凍結融解抵抗性試験
		PC定着部の耐荷性能	ディビダーク・ストランド工法
施工性試験	打込み特性	施工性, ポンプ圧送性, 圧送前後のコンクリートの性状	
壁高欄	室内試験	フレッシュ性状	スランプフロー, 空気量, 単位容積質量
		剥落抵抗性	静的破碎材を利用した剥落実験
	施工性試験	打込み特性	施工性, ポンプ圧送性

表-6.1.8 コンクリートの仕様

項目	規格	備考
コンクリート種類	軽量骨材コンクリートI種	粗骨材のみに軽量骨材を使用
設計基準強度	40N/mm ²	強度の保証は材齢28日
配合強度	48N/mm ²	変動係数10%, 割増し係数1.2
単位容積質量	1,850kg/m ³ 以下	設計条件より決定
スランプフロー	550±50mm	ポンプ圧送性を考慮
空気量	6±1.5%	凍結融解抵抗性を考慮
セメント種類	早強ポルトランドセメント	プレストレス導入など施工工程を考慮
粗骨材	構造用人工軽量粗骨材	JISA 5002 区分Mに準拠

表-6.1.9 使用材料

使用材料	記号	摘要	
セメント	C	早強ポルトランドセメント	密度:3.14g/cm ³ , 比表面積:4.520cm ² /g
細骨材	S1	盛岡市都南産陸砂	表乾密度:2.58g/cm ³ , 吸水率:2.87%
	S2	松尾村産砕砂 S1:S2=60:40	表乾密度:2.68g/cm ³ , 吸水率:2.84% 粗粒率:2.71
粗骨材	G	独立空隙型人工軽量骨材 主原料:真珠岩	絶乾密度:1.19g/cm ³ , 24h吸水率:1.80%, 実積率:60.0%, 最大寸法:15mm
混和剤	SP	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系標準形
	VIS	特殊増粘剤	ウェランガム
補強繊維	PPF	波形ポリプロピレン繊維	密度:0.92g/cm ³ , 繊維長30mm, 繊維径6,400d



写真-6.1.5 波形ポリプロピレン繊維

表-6.1.10 コンクリートの配合

No.	W/C (%)	Air (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					SP (C×%)	VIS (W×%)	PPF (vol.%)	理論単位容積質量 (kg/m ³)
				W	C	S1	S2	G				
35	35	6.0	48.6	165	472	472	327	381	1.2	0.05	—	1,817
38	38		49.7	165	435	490	338	381	1.1		—	1,809
40	40		50.2	165	413	501	346	381	1.0		—	1,806
38-0	38	6.0	49.7	165	435	490	338	394	1.1	0.05	—	1,822
38-0.35											0.35	
38-0.5											0.50	

表-6.1.11 コンクリートの試験結果

No.	コンクリート温度 (°C)	スランプフロー (mm)	空気量 (%)	単位容積質量 (kg/m ³)	圧縮強度(N/mm ²)		凍結融解抵抗性	
					7日	28日	耐久性指数	質量変化率(%)
35	23.5	520	5.6	1,832	48.4	55.9	86.9	0.28
38	23.0	551	6.6	1,816	42.7	48.5	87.2	0.47
40	23.0	519	7.0	1,810	40.1	48.7	83.7	0.56
38-0	21.0	535	5.9	1,812	41.4	48.4	—	—
38-0.35	21.9	517	6.9	1,827	46.5	51.6	—	—
38-0.5	22.1	518	6.0	1,824	45.8	50.5	—	—

1) フレッシュコンクリートの性状

W/C=38%のフレッシュコンクリートの性状を写真-6.1.6に示す。単位水量、単位粗骨材量、混和剤使用量を適切に設定することで、良好な流動性と材料分離抵抗性を有する軽量骨材コンクリートの配合選定が可能であった。また、表-6.1.12に示すように、水セメント比の変化に対しては高性能 AE 減水剤の使用量の微調整によって、ほぼ同等のフレッシュ性状が得られること、繊維混入率が 0.5vol.%までの範囲であれば、流動性に及ぼす影響が非常に小さいことを確認した。



写真-6.1.6 コンクリートの性状

2) 強度特性

コンクリートの圧縮強度は、表-6.1.11に示すように、いずれの W/C においても材齢 7 日で設計基準強度 (40N/mm²) を、材齢 28 日で配合強度 (48N/mm²) を超える結果が得られた。W/C=40%で目標とする圧縮強度が得られたが、W/C=38%の 28 日圧縮強度が W/C=40%と同等であったことから、W/C=38%の配合 No.38 を選定した。別途実施した配合 No.38 の試験では、図-6.1.14 および表-6.1.12 に示すように、各種強度が設計に用いた値⁶⁾を満足すること確認した。

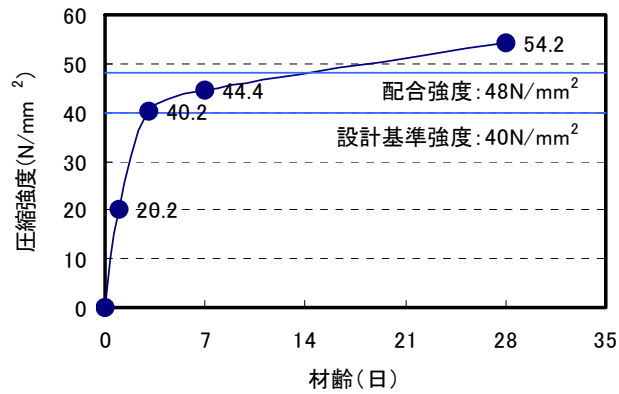


図-6.1.14 圧縮強度試験の結果

表-6.1.12 その他の強度特性 (配合 No. 38)

	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
実験値	54.4	4.23	7.20	21.9
設計用値	40.0	1.89	3.43	19.0

3) 凍結融解抵抗性

本橋が建設される地域は、凍結融解作用を繰り返し受ける厳しい環境条件にあり、コンクリートには高い耐凍害性が要求された。そこで、コンクリートの凍結融解抵抗性試験（水中凍結水中融解：ASTM C 666 A 法）を実施して、その性能を確認した。300 サイクル終了時の相対動弾性係数（耐久性指数）は、表-6.1.11 に示すように、試験に供した全ての配合で 80 以上となった。写真-6.1.7 に示すように骨材のポップアウトやモルタルのスケーリングも非常に少なく、十分な耐凍害性が得られることを確認した。

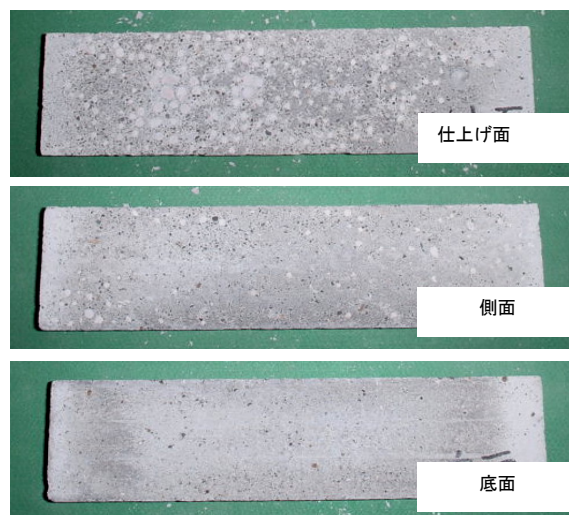


写真-6.1.7 凍結融解試験後の供試体の状況 (No. 38)

4) 打継部の強度

本工事では、大型型枠の組立・脱型に要する工期の短縮、1ブロック(35m)のコンクリートの打設量、後述するコンクリートの施工性、品質確保等を考慮して、下床版ハンチ部の上部100mmの位置に水平打継目を設ける計画であった。このため、水平打継目の処理方法を選定するために、打継目を有する供試体の一面せん断強度、純引張強度試験を実施した⁸⁾。検討ケースを表-6.1.13に、試験方法を図-6.1.15に示す。試験には配合No.38のコンクリートを用いたが、比較用として軽量粗骨材を砂岩砕石(砕石2005, 表乾密度2.65g/cm³)に置き換えた配合についても試験を実施し、普通骨材コンクリートとの相対比較を行った。

水平打継目の試験結果を図-6.1.16に示す。軽量骨材コンクリートのせん断強度や一軸引張強度の圧縮強度に対する比率は、普通骨材コンクリートとほぼ同等の結果を示し、打継処理を行わないケース2では、一軸引張強度が大幅に低下すること、レイトンス強化剤⁹⁾によるケース4では、せん断強度が大幅に低下する結果を示した。これに対して、遅延剤とハイウォッシャーによる打継処理を行ったケース3では、せん断強度、一軸引張強度とも打継目のないケース1に対して、7割以上の強度を示し、検討範囲内で最も良好な性能を示した。実際の施工では、この結果を反映させて、遅延剤とハイウォッシャーによる打継処理を実施することとした。なお、ブロック間の鉛直打継目の処理は、エアキャップ¹⁰⁾による凹凸とチップング処理を併用して、打継強度を確保することとした。

表-6.1.13 検討ケース(打継処理)

ケース	打継処理方法	備考
1	打継目なし	一体もの
2	打継処理なし	—
3	遅延剤+ハイウォッシャー	遅延剤:グルコン酸ナトリウム
4	レイトンス強化剤	レイトンス強化剤:アクリルポリマー系

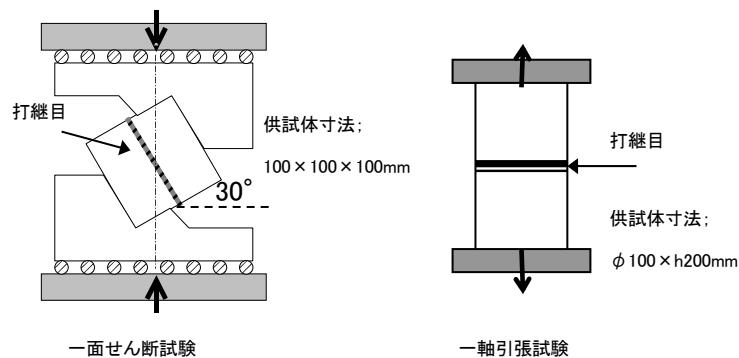


図-6.1.15 打継強度試験方法

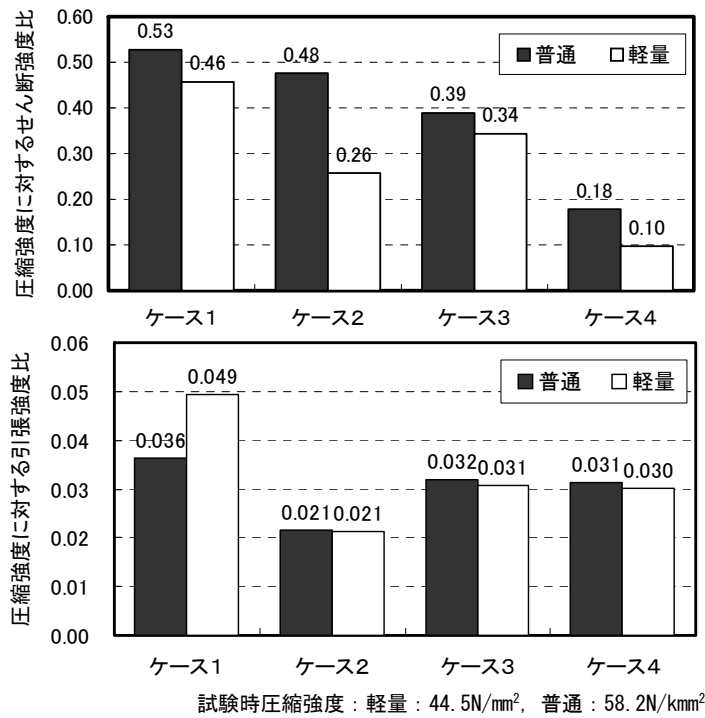


図-6.1.16 打継強度の試験結果

5) 剥落抵抗性

軽量骨材コンクリートをポリプロピレン短繊維で補強した場合の剥落に対する抵抗性を確認するために、繊維混入率を変化させた配合 No.38-0~38-0.5 を剥落抵抗性試験¹¹⁾に供した。図-6.1.17 に剥落抵抗性試験供試体の概要を示す。試験では、鉄筋腐食に起因するコンクリート片の剥落を模擬するために、供試体の鉄筋位置に静的破砕材を注入して膨張圧を加え、経時的なひび割れの進展とかぶり部の剥落状況を観察した。

剥落抵抗性試験の結果を写真-6.1.8 に示す。繊維を混入しない場合には、試験開始から14時間後にかぶり部が全て剥落したのに対して、繊維を混入した場合には、48時間経過してもかぶり部の剥落は生じなかった。なお、繊維混入率を0.35vol.%とすることで十分な剥落抵抗性が得られると判断し、跨道区間主桁および跨線・跨道区間の壁高欄に配合No.38-0.35を適用することとした。

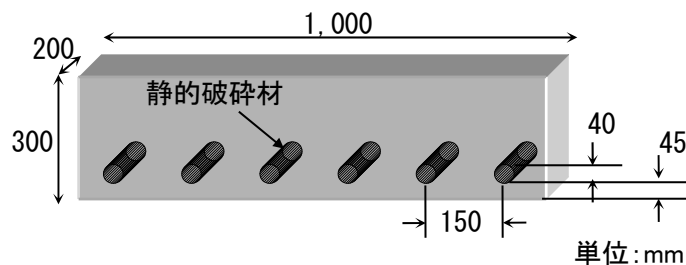


図-6.1.17 剥落抵抗性試験供試体



写真-6.1.8 剥落抵抗性試験の結果

6) PC定着体

PC定着部は、支圧強度が支配的となる部位であるが、軽量骨材コンクリートの支圧強度は、高強度領域では普通骨材コンクリートよりも小さくなることが報告されている¹²⁾。そこで、PC定着体の耐荷性能ならびに適切な補強方法を検討するために、PC定着部をモデル化した供試体を作製して載荷試験を実施した¹³⁾。

試験は、緊張材 12S12.7 のディビダーク・ストランド工法について実施した。検討ケースは、表-6.1.14 に示すものとし、コンクリートの種類と補強鋼材量を変化させた。供試体の形状および標準配筋図 (N1-40, L1-40) を図-6.1.18 に示す。載荷は 5,000kN アムスラーを用いて行い、PC鋼材は通さずに載荷治具を介して定着部に圧縮力を直接加えた。載荷は2段階で実施し、第1段階では、コンクリートの圧縮強度が 30N/mm^2 に達した時点で $0.9P_y$ (P_y : 規格降伏荷重) 相当の荷重を、第2段階では、コンクリートの圧縮強度がほぼ 40N/mm^2 に達した時点で $1.2P_u$ (P_u : 規格引張荷重) 相当の荷重をそれぞれ載荷¹⁴⁾した。表-6.1.15 に載荷段階および各段階における要求性能を示す。

各載荷段階におけるコンクリートの強度試験結果を表-6.1.16 に、荷重～定着部めり込み量の関係を図-6.1.19 に示す。L-40 は、 $1.0P_u$ をわずかに超えた時点で最大荷重に達し、 $1.2P_u$ までの載荷が困難となった。また、最大荷重は N-40 の約 8 割であり、最大ひび割れ幅が 0.1mm を超

える前にスパイラル筋の降伏が認められた。これに対し、補強鋼材を増加した L-40S および L-40SR は、N-40 と同等以上の耐荷性能を示した。これらのことから、軽量骨材コンクリートを使用した場合でも、補強鋼材を増加することで従来と同じ寸法で十分な耐荷性能を有する定着体を構築できることが分かった。なお、L-40S と L-40SR は、最大荷重が同程度であったことから、実施工においては、スパイラル筋の補強量のみ増加させることとした。

表-6.1.14 定着部載荷試験の検討ケース

ケース	骨材	スパイラル筋	用心筋
N-40	普通	D13 45mmピッチ(7.5段)	D13 55mmピッチ(7段)
L-40S	軽量	D19 40mmピッチ(9.5段)	D16 45mmピッチ(8段)
L-40SR			

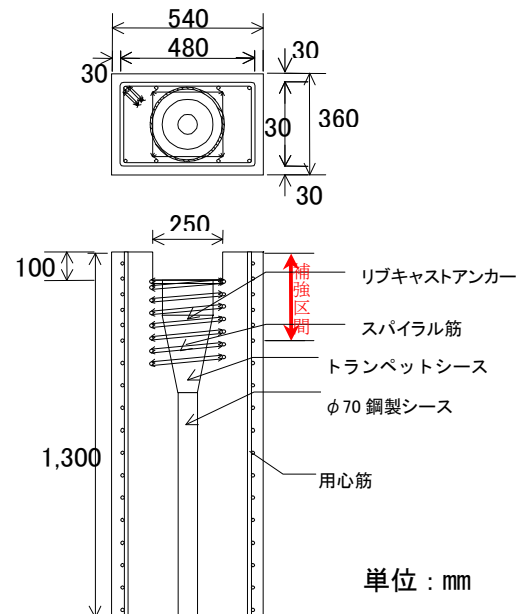


図-6.1.18 試験体の形状および標準配筋図

表-6.1.15 載荷段階と要求性能

	コンクリートの 圧縮強度	載荷荷重	目標性能 ¹⁴⁾
第1段階	30N/mm ² 程度	0.9Py:1,872kN (使用限界状態)	最大ひび割れ幅 0.1mm以下
第2段階	40N/mm ² 程度	1.2Pu:2,196kN (終局限界状態)	1.0Puで定着部が 破壊しないこと

表-6.1.16 各載荷段階におけるコンクリートの強度試験結果

		N-40	L-40	L-40S, L-40SR
圧縮強度 (N/mm ²)	第1段階	31.5	32.4 (1.03)	26.0 (0.83)
	第2段階	39.5	37.8 (0.96)	39.2 (0.99)
引張強度 (N/mm ²)	第1段階	2.73	2.12 (0.77)	2.60 (0.95)
	第2段階	3.38	2.39 (0.71)	3.32 (0.98)
ヤング係数 (kN/mm ²)	第1段階	28.4	19.2 (0.67)	17.7 (0.62)
	第2段階	29.3	20.6 (0.70)	21.0 (0.72)

()内は、N-40の値を1としたとき比率

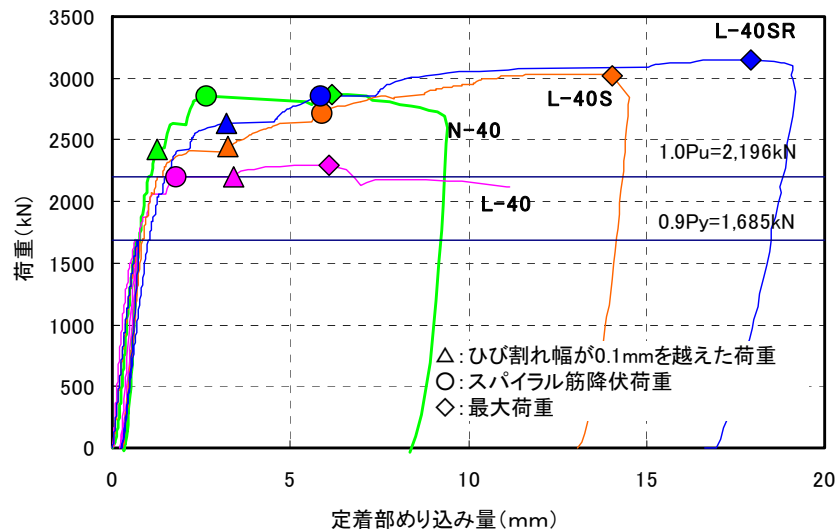


図-6.1.19 荷重～めり込み量の関係

7) 打込みおよび締固め, 仕上げ

本論文の 4.2.2 施工性確認実験①で詳述した通りである。

(4) 施工結果

1) コンクリートの品質管理

コンクリートの品質管理試験の結果を表-6.1.17 に示す。品質管理試験は 60m³ に 1 回の頻度で実施した。試験値は、表に示すように、全て管理値を満足するものであり、骨材の表面水率、含水率の管理を十分に行ったこと、-3℃~24℃まで変化した外気温に対して、冬期には練混ぜ水に温水を使用して、コンクリート温度を 11~19℃に管理したこと等により、性状の安定したコンクリートを製造・出荷することができた。材齢 28 日の圧縮強度については変動係数が 7.1% であり、やや大きい値となった。これは、軽量骨材の品質変動が普通骨材に比べてやや大きいことによると考えられた。しかしながら、想定していた圧縮強度の変動係数 (10%) に対して十分に小さい値であった。

表-6.1.17 品質管理試験の結果（繊維補強コンクリートを含む）

	外気温 (°C)	コンクリート温度 (°C)	スランフフロー (mm)	空気量 (%)	単位容積質量 (kg/m ³)	28日圧縮強度 (N/mm ²)	軽量骨材	
							絶乾密度 (g/cm ³)	24h吸水率 (%)
平均	11.7	18.3	553	6.5	1,823	49.0	1.17	1.53
最大	26.0	26.0	600	7.5	1,854	57.2	1.27	2.60
最小	-3.0	11.0	502	5.1	1,776	43.0	1.13	1.00
標準偏差	-	-	27	0.6	18	2.8	0.04	0.46
変動係数(%)	-	-	4.9	8.8	1.0	5.8	3.2	29.9
管理値	-	5以上	550±50	6±1.5	1,809±50	40以上	1.2±0.1	3.0以下

軽量コンクリート総打設量: 4,800m³ (繊維補強コンクリートを含む), 施工期間: 2000年9月～2001年7月

2) 主桁の打込み・締め

コンクリートの施工に際しては、コンクリートの製造・出荷量が 30m³/h 程度であること、段取替えを含めたポンプ1台当たりの平均打込み速度が 15m³/h 程度となることを考慮して施工計画を立てた。コンクリートの打込み方法を図-6.1.20に示す。試験施工の結果を反映させて、下床版～ハンチ部のコンクリート(約90m³)を1回の打設で打ち込み、遅延剤の散布とハイウォッシャーによる打継ぎ処理(前述)および養生を行った後、ウェブ～上床版のコンクリート(約210m³)を打ち込んだ。特に、ウェブ～上床版の施工では、1回の打込み量が多いことから、打重ね面がコールドジョイントになることが懸念された。そこで、図に示すように3台のポンプを用いて各々の区画を担当することで段取替えに要する時間の短縮を図った。各部位のコンクリートの打込みに要する時間は表-6.1.18のようになり、打重ね時間の間隔を2時間程度に制限することができた。

コンクリートの施工状況を写真-6.1.9, 6.1.10に示す。コンクリートの打込みには試験施工と同じピストン式コンクリートポンプを用い、ブームを利用して製作台(地上約25m)までコンクリートを押し上げ、製作台内で圧送管に接続し、圧送管先端にフレキシブルホースを取り付けて圧送した。圧送管の水平換算距離¹⁵⁾は、最大で約180mであったが、写真-6.1.11に示すように、筒先のコンクリートは良好なワーカビリティを有しており、かつ過大な圧送負荷も生じることなく、円滑なポンプ施工を行うことができた。

コンクリートの締めは、各配管系統に内部振動機3機(φ32mm:1機, φ50mm:2機)を配置して行った。この際、過度の振動締めに伴う軽量骨材の浮上りを抑制するために、内部振動機の挿入間隔を約50cm、挿入時間を約5秒として、材料分離の状況および充填状況を確認しながら密実に締め固めた。また、ポンプ筒先をこまめに移動する、鉄筋のあきに櫛板を挿入するなどして、コンクリートの横移動距離が長くないように留意した。ウェブについては、主桁内部から外部振動機も併用して締め固めた。また、表面仕上げ作業では、仕上げ面に軽量骨材の浮上りがみられた場合には、ジッターバッグを¹⁶⁾用いて軽量骨材を内部に押し込み、木ごてによる押さえを行って、その1～2時間後に金ごて仕上げ(2回押さえ)を行った。

これら4.2で提案した方法を施工に反映し、十分な施工管理を行うことで、トラブルなく円滑な施工を行うことができた。また、主桁の出来形も良好なものであった。なお、跨道区間の主桁に適用した繊維補強軽量骨材コンクリートについても同様の施工結果が得られた。

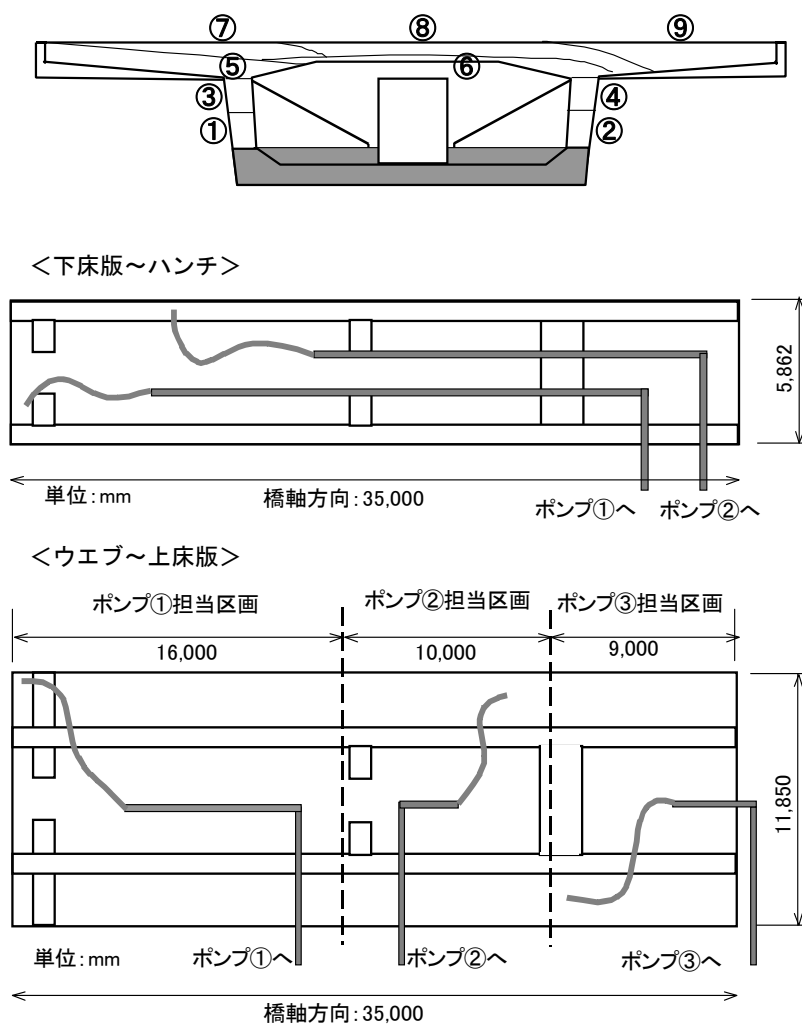


図-6.1.20 主桁の打込み方法

表-6.1.18 打込み・締固めに要した時間

打設部位 (順序)	コンクリート数量 (m ³)	打設時間 (分)
下床版・ハンチ	90	270'
ウェブ ・ 上 床 版	①	13
	②	13
	③	13
	④	13
	⑤	33
	⑥	32
	⑦	32
	⑧	32
	⑨	33
計(①～⑨)	214	428'

注) 打設時間は段取り替えを含む

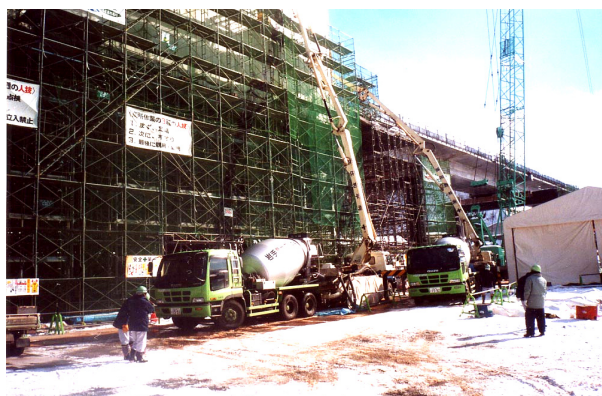


写真-6.1.9 コンクリートの圧送状況



写真-6.1.10 製作台内でのコンクリートの打込み状況



写真-6.1.11 筒先コンクリートの性状

3) 壁高欄の打込み・締固め

壁高欄の型枠には写真-6.1.12 に示す移動式型枠(長さ 9.0m)を用いて、型枠の設置、解体などの施工の省力化を図った。コンクリートの打込みは、4.2.2で記した施工性確認実験①で提案した施工方法を反映させて、壁高欄最上部からコンクリートを打ち込み、細径の内部振動機を使用して、密実に締め固めた。その結果、未充填部は一切生じず、良好な出来形が得られた。また、跨道区間、跨線区間に適用した繊維補強軽量骨材コンクリートについても同様であった。



写真-6.1.12 壁高欄の移動式型枠

(5) まとめ

本橋の建設は、独立空隙型人工軽量骨材を使用したコンクリートによる初めての大規模工事であったが、第4章で得られた知見を反映した施工を計画に基づき、施工管理を十分に行ったことで、ほぼ順調に施工を終了することができた。また、目標であった約10%の建設コスト縮減を達成できた。

6. 2 締固めを不要とする人工軽量骨材コンクリートの現場適用

第5章で検討した人工軽量骨材を用いた自己充填性を有する高流動コンクリートを実構造物へ適用し、配合設計手法の検証とともに、施工のポイントの確認を行った。

6. 2. 1 鋼ローゼ橋の耐震補強（アーチリブ充填）

(1) はじめに

一般国道8号に架橋されている上輪橋はアーチ支間120mの上路式鋼ローゼ橋であるが、近年の交通量の増大や車輛の人型化による影響および強風による横揺れや海からの飛来塩分による部材の腐食により、応力的に過酷な状況に置かれていた。このため、図-6.2.1に示す補強を行って耐荷力や耐震性の向上が図られた。このうち、アーチリブの局部座屈を防止するとともに鋼・コンクリート合成による剛性および変形性能の向上を期待して、アーチリブにコンクリートを充填することとした。その際、剛性を増加させるためにはアーチリブ内にコンクリートを隙間なく充填する必要があり、その一方で地震時慣性力の低減を図るという要求から、コンクリートに軽量性を付与することが求められた。そこで、軽量骨材を用いた自己充填性を有する高流動コンクリートが適用された。この補強工法は、2001年当時、例のない新しい補強方法であり、事前に実験を行って、この工事に適したコンクリートの充填性や施工性の確認を行った¹⁷⁾。

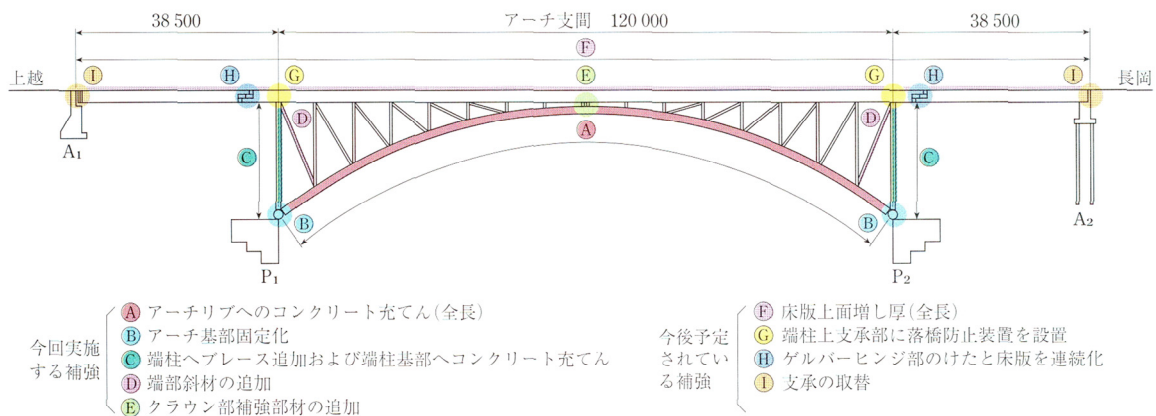


図-6.2.1 上輪橋の補強概要

(2) 施工実験

1) コンクリートの配合

コンクリートの仕様を表-6.2.1に示す。単位容積質量を $1,800\text{kg/m}^3$ 以下とするために、その目標値を $1,750\text{kg/m}^3$ とし、これを実現するために、細骨材、粗骨材とも人工軽量骨材を用いるとともに、目標空気量を6.0%に設定した。また、アーチリブ内での流動とリブ内のダイヤフラム周りへの充填性を考慮して自己充填性ランク2¹⁴⁾とし、スランプフローの目標値を650mmとした。

使用材料を表-6.2.2に示す。軽量骨材は、頁岩を主成分とする従来型の人工軽量骨材を用い、プレウエッティングして使用した。材料分離抵抗性を確保するペーストの粘性を調整するために、また、モルタルの単位容積質量と粗骨材の密度差を低減するために、混和材としてフライアッシュを用いた。これは、温度応力の低減も踏まえてのことである。さらに、材料分離抵抗性の向上とフレッシュ性状を安定させる目的でウェランガムを添加した。高性能AE減水剤は、ポリカル

ボン酸系のものを用いた。

コンクリートの配合は、第5章で得た知見を反映させて選定した。単位粗骨材量を 300l/m^3 、細骨材容積比 V_s/V_m を40%し、モルタルと粗骨材の密度差が $0.1\sim 0.2\text{g/cm}^3$ となることを想定して、500mm フロー到達時刻が5秒以上、 V_{75} 漏斗流下時間7秒以上となるように、水粉体容積比 V_w/V_p を調整した。試験練りによって選定したコンクリートの配合を表-6.2.3に、室内練混ぜ試験におけるフレッシュコンクリートの試験結果を表-6.2.4に示す。フレッシュコンクリートは、いずれの試験においても目標値を満足するものであり、高い流動性ととも、良好な材料分離抵抗性、自己充填性を有していた。

表-6.2.1 コンクリートの仕様

項目	規格
コンクリートの種類	軽量骨材コンクリートⅡ種
	自己充填性を有する 高流動コンクリート(ランク2)
設計基準強度	18N/mm ²
単位容積質量	1,750±50kg/m ³
スランプフロー	650±50mm
空気量	6.0±1.5%
セメント種類	普通ポルトランドセメント
細骨材	人工軽量細骨材
粗骨材	人工軽量粗骨材

表-6.2.2 使用材料

使用材料	記号	摘要	
セメント	C	普通ポルトランドセメント	密度:3.16g/cm ³ , 比表面積:3,240cm ² /g
混和材	FA	フライアッシュ	密度:2.27g/cm ³ , 比表面積:4,020cm ² /g
細骨材	S	非造粒型人工軽量骨材 主原料:膨張頁岩	絶乾密度:1.29g/cm ³ , 表乾密度:1.67g/cm ³ , 含水率:29.6%
粗骨材	G	非造粒型人工軽量骨材 主原料:膨張頁岩	絶乾密度:1.53g/cm ³ , 表乾密度:1.84g/cm ³ , 含水率:20.5%, 実積率64.0%, 最大寸法:15mm
混和剤	SP	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系標準形
	VIS	増粘剤	ウエランガム

表-6.2.3 コンクリートの配合

設計基準 強度 (N/mm ²)	スランプフロー (mm)	空気量 (%)	W/C (%)	V _w /V _p (%)	V _s /V _m (%)	単位量 (上段:kg/m ³ , 下段:l/m ³)					SP (P*×%)	VIS (W×%)	理論単位 容積質量 (kg/m ³)
						W	C	FA	S	G			
18	650±50	6±1.5	55.0	75.3	40.0	165	300	281	471	501	1.60	0.05	1718
						165	95	124	256	300			

W/C:水セメント比 V_w/V_p:水粉体容積比 V_s/V_m:細骨材容積比

*: P=C+FA

表-6.2.4 フレッシュコンクリートの試験結果

項目	試験結果
コンクリート温度	22.0°C
スランプフロー	650×610mm
500mmフロー到達時間	7.3秒
V75漏斗流下時間	13.0秒
空気量	5.7%
単位容積質量	1.724kg/m ³
U形充填性試験 (ランク2)	充填高さ: 350mm 充填時間: 16.2秒

なお、室内試験においては、アーチリブならびに内部のダイアフラムを模擬した透明アクリル型枠にコンクリートを流し込み（写真-6.2.1）、充填状況や骨材の分布状況を確認した。脱型後の供試体の切断面を写真-6.2.2に示す。コンクリートは、型枠の隅々に、また、ダイアフラムを模擬した板の周りに、密実に充填されていた。供試体の切断面の観察でも、粗骨材が一様に分布しており、優れた自己充填性と材料分離抵抗性を有することを確認した。

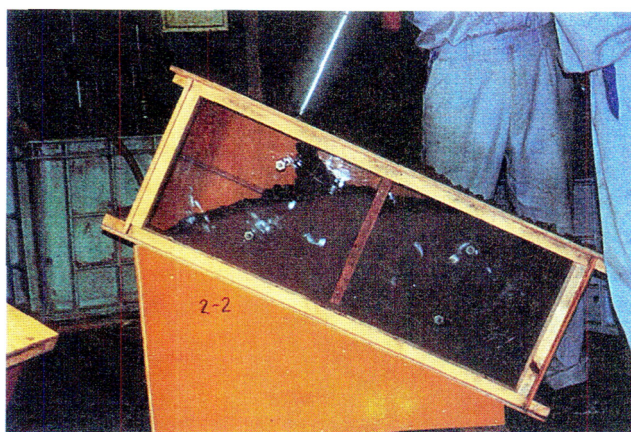


写真-6.2.1 アーチリブを想定した型枠内への充填実験

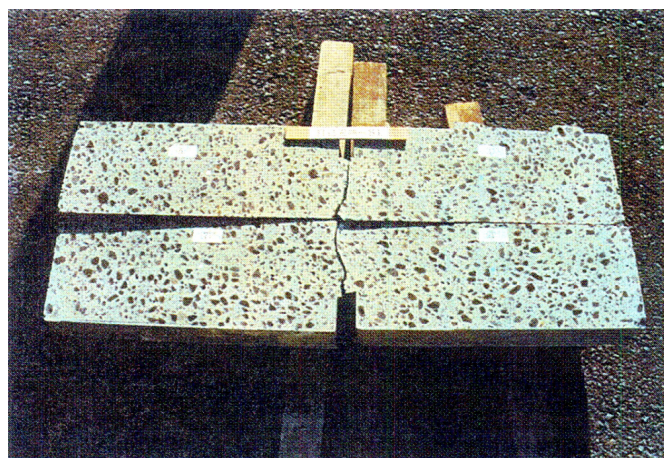


写真-6.2.2 供試体の切断面

2) 実規模部材充填実験

選定した軽量骨材を用いた自己充填性を有する高流動コンクリートを用いて実規模部材を対象とした充填実験を実施した。実験では、現地生コンクリート工場の製造、アジテータ車による場外運搬、下向きの圧送性という、施工の各段階でのコンクリートの流動性や材料分離抵抗性、アーチリブ内ダイヤフラム上縁のエア抜き孔の有効性などに着目し、実施工の検証を行った。実験フローを図-6.2.2に、実験状況を図-6.2.3に、型枠を写真-6.2.3に示す。

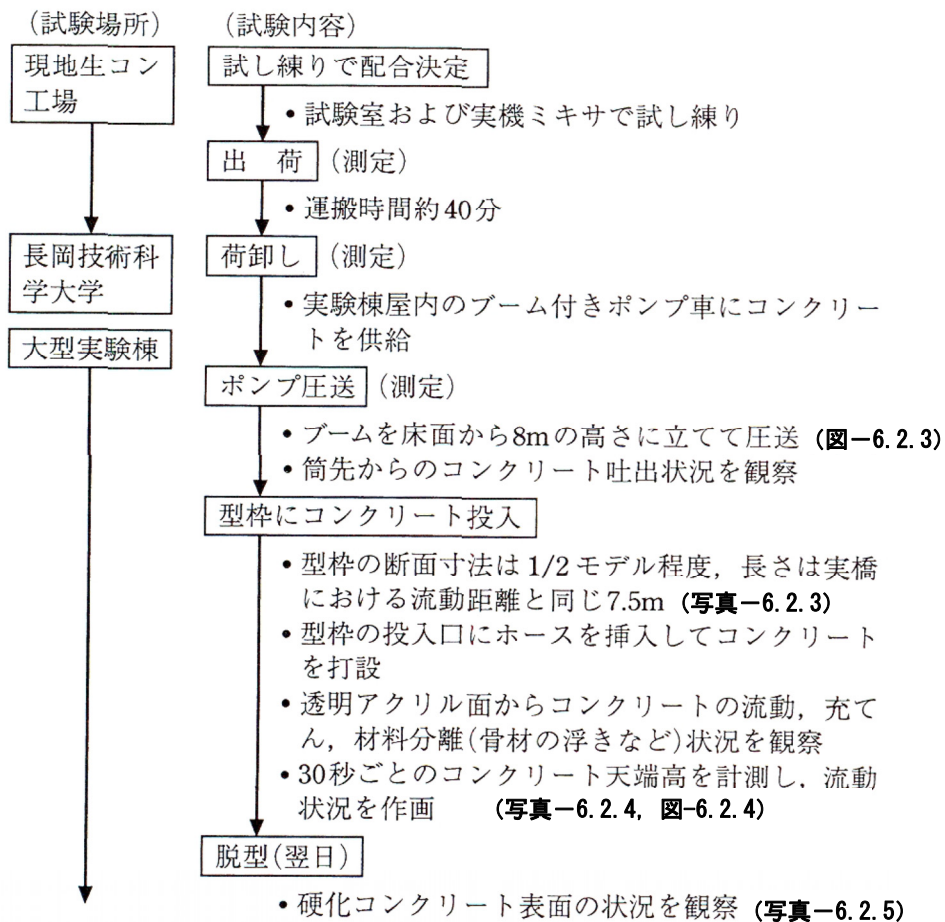


図-6.2.2 実験フロー

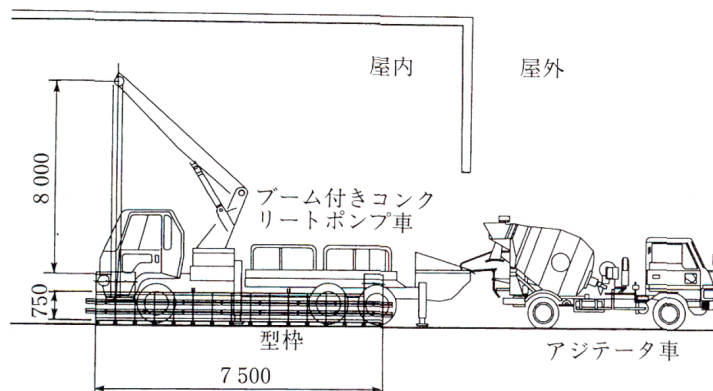


図-6.2.3 実験状況

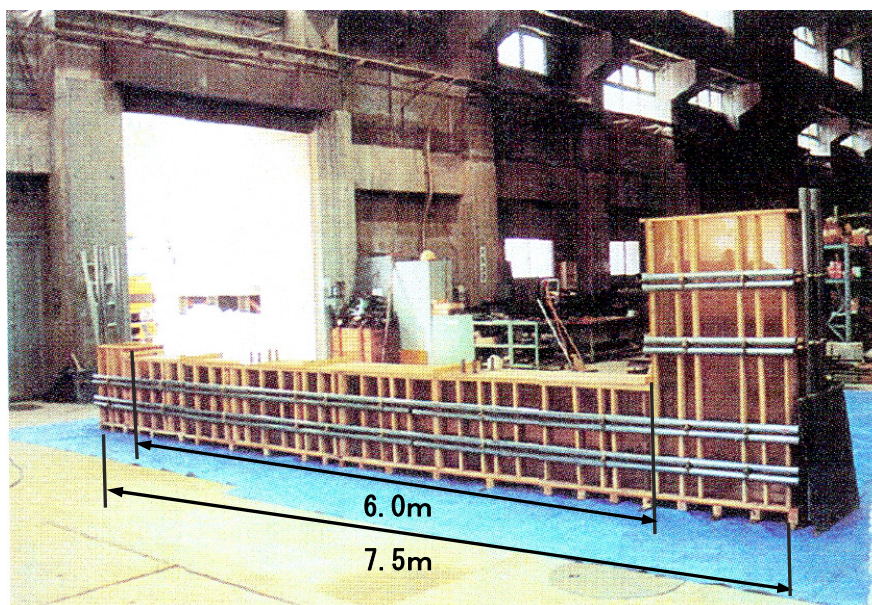


写真-6.2.3 実橋を模擬した部材

実験では、フレッシュコンクリートの性状確認を出荷時、荷卸し時、圧送後の各段階で行い、場外運搬と圧送による性状の変化を確認した。各段階のフレッシュ性状および圧縮強度の測定結果を表-6.2.5に示す。フレッシュコンクリートの性状は良好であり、現地生コンクリート工場で十分に製造可能であることが分かった。圧送後ではスランプフローが目標値をわずかに下回ったが、V₇₅漏斗流下時間やU形充填性試験における充填高さとも、目標値を満足したことから、型枠内での流動状況や脱型後の観察による充填状況が良好であったことから、施工上問題ないと判断された。また、ブームを用いた圧送（下向き、打下ろし）においても、コンクリートが筒先から分離することなく、また、配管内で閉塞することなく、円滑な圧送が可能であった。

充填実験の状況を写真-6.2.4に、型枠内の充填状況（流動勾配）を図-6.2.4に、脱型後の状況を写真-6.2.5に示す。軽量骨材を用いた自己充填性を有する高流動コンクリートは、型枠内をスムーズに流動して充填していく様子が確認された。また、流動先端部においても、軽量骨材の浮上がりは見られず、7.5mの流動距離を分離することなく充填した。ダイアフラム周りにおいても、エア抜き孔からコンクリートが排出され、脱型後の供試体でも空隙なく充填がなされている状況が観察された。

表-6.2.5 コンクリートの品質管理試験結果

	スランプフロー (mm)	500mm70- 到達時間 (秒)	単位容積質量 (kg/m ³)	空気量 (%)	コンクリート 温度 (°C)	V75漏斗 流下時間 (秒)	U形充填 高さ (mm)	圧縮強度 (材齢28日) (N/mm ²)
目標値	650±50	5以上	1,750±50	6.0±1.5	5~35°C	7以上	300以上	18以上
出荷時	635	6.1	1,730	5.2	9.5	11.8	—	—
荷卸し時	640	5.3	1,730	5.5	10.0	14.3	350	26.7
圧送後	580	5.6	1,740	4.7	9.0	14.0	340	29.8



写真-6.2.4 充填実験の状況

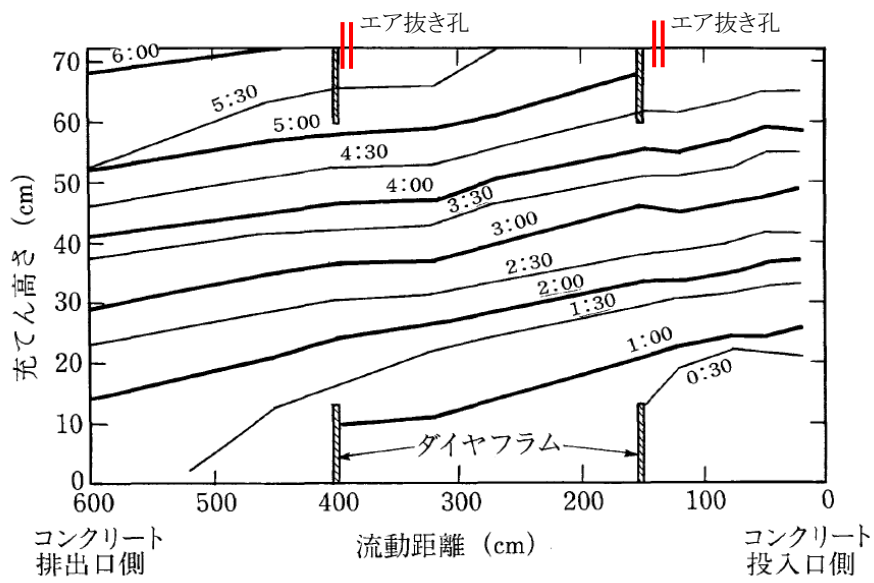
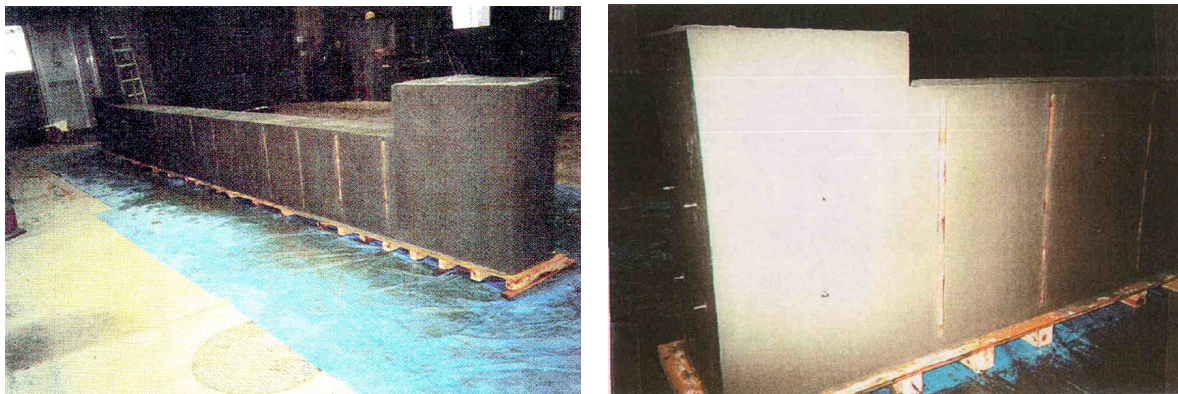


図-6.2.4 型枠内充填状況 (30秒ごとの流動勾配)



(a) 全景 (右側が打込み位置)

(b) 流動先端部の充填状況

写真-6.2.5 脱枠後の状況

(3) 実施工

1) 施工概要

実規模部材充填実験の結果を反映させるとともに、高流動コンクリートの側圧によるアーチリブの変形、現地生コン工場のコンクリート製造能力等を勘案して、コンクリートの施工計画を策定した。

コンクリートは、**図-6.2.5**および**図-6.2.6**に示すように、アーチ支点から両側それぞれ4パネル（部位①～⑥）は、橋下の道路を一時通行止めして作業帯を設けて、コンクリートポンプのブームを用いた上向き圧送により打ち込み、残りのアーチ中央部8パネル（部位⑦～⑩）については、橋面の片側1車線作業帯として占有し、片側通行規制を行いながら、コンクリートポンプのブームを用いた下向き圧送により打ち込んだ。打ち込みは、**図-6.2.6**に示すように、アーチ支点から中央部に向かって順次行った（①→⑩）。その際、打ち込んだコンクリートの自重がアーチリブに対して偏載しないよう、同じ順番の4カ所（上越側、長岡側、山側、海側）を1回の施工で打ち込んだ。コンクリートの側圧によるアーチリブ腹板の変形（はらみ）を防止するため、**図-6.2.7**に示す補強材をアーチリブ全長にわたって設置した。さらにアーチ支点から2パネルはパネル区間を2回（①+②、③+④）に分けて打ち込むことにより、1層の打上がり高さを抑えて側圧を軽減した。軽量骨材コンクリートは、この側圧の軽減にも一役を担った。

実施工程表を**表-6.2.6**に示す。

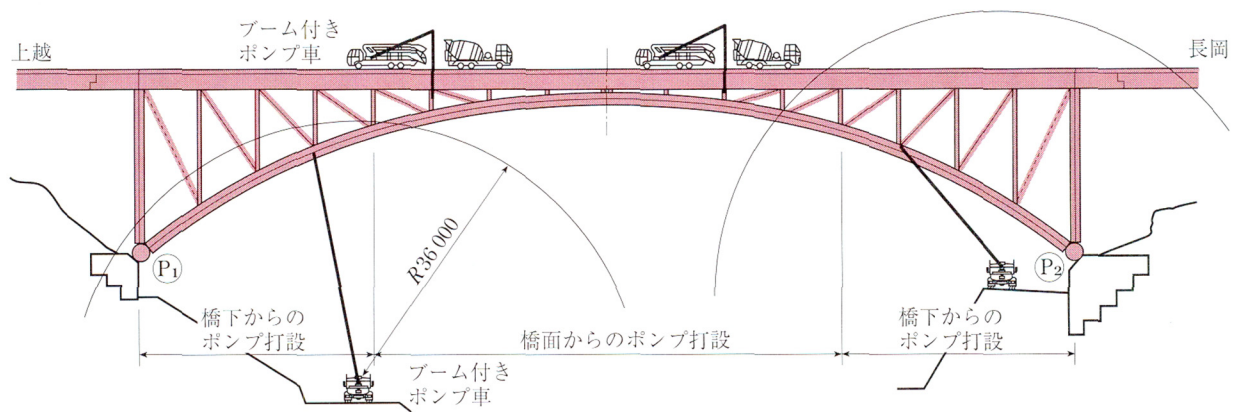


図-6.2.5 打込み計画

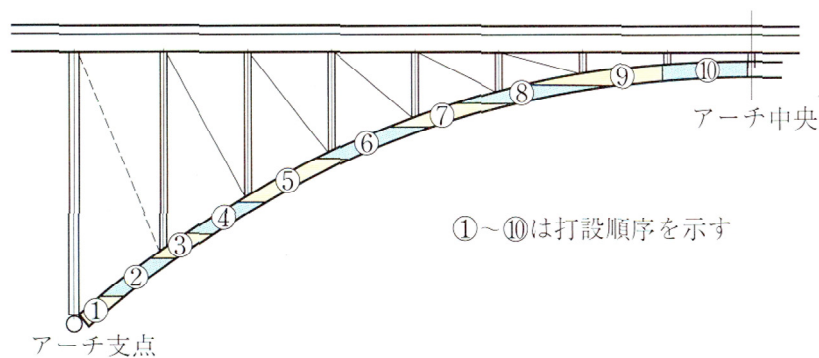


図-6.2.6 打込み順序

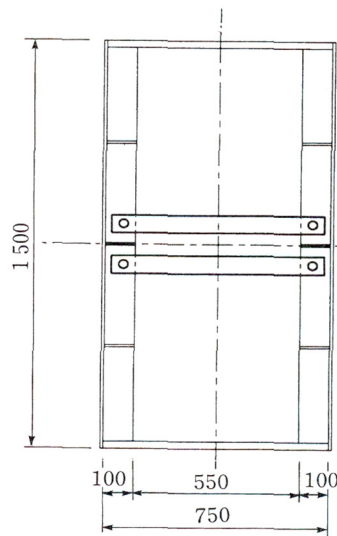


図-6.2.7 はらみ防止用の補強材

表-6.2.6 実施工程表

箇所	打設量 (m ³)	平成13年6月												
		8日	9日	10日	11日	12日	13日	14日	15日	16日	17日	18日	19日	20日
①	18.0	■												
②	23.6		■											
③	17.6				■									
④	22.4					■								
⑤	38.0						■							
⑥	36.4							■						
⑦	35.2										■			
⑧	34.4											■		
⑨⑩	75.2												■	
備考				休日			雨天			休日	休日			

2) コンクリートの打込み

①～⑧の区間は、アーチ下部にあたり、高低差があるため、ブーム先端に取り付けたフレキシブルホースを打設孔に挿入し、コンクリートを高い位置から低い位置に流動させる方法とした。打込み速度は10m³/h程度とし、コンクリートの充填状況の確認と打止めの判断を、エア抜き孔からのコンクリートの溢れと打音調査によって実施した。

⑨～⑩の区間は、高低差がなく水平に近くなるため、図-6.2.8に示すように、打込み用パイプ（打設パイプ）と充填確認用パイプ（圧力用パイプ）をアーチリブ各区間の側面に設置し、ブーム先端のドッキングホースを打設用パイプに接続して、コンクリートを圧入する方法とした。打込み速度は20m³/hとし、圧力用パイプ内にコンクリートが最低でも高さ500mmまで上昇させて圧力を保持した状態で、打込みを完了した。これは、時間とともにコンクリートが隅々まで行き渡り、アーチリブ内のコンクリート上面が下がって上面鋼板との間に空隙が生じることを回避するためである。

コンクリートの圧送状況を写真-6.2.6および写真-6.2.7に示す。圧送速度が小さいこともあ

り、過大な圧送負荷は生じず、また、閉塞も生じることなく、円滑な圧送が可能であった。アーチリブ内のコンクリートの充填性も良好であり、全てのエア抜き孔からの溢れ出しが確認された。また、打音検査からも未充填が疑われる箇所は一切発生しなかった。

コンクリートの受入れ時の品質管理試験は、スランプフロー、空気量、単位容積質量について午前・午後各1回、圧縮強度試験用供試体を午前1回の頻度で実施したが、全ての項目で目標値を満足し、性状が安定したコンクリートの製造・供給が可能であった。

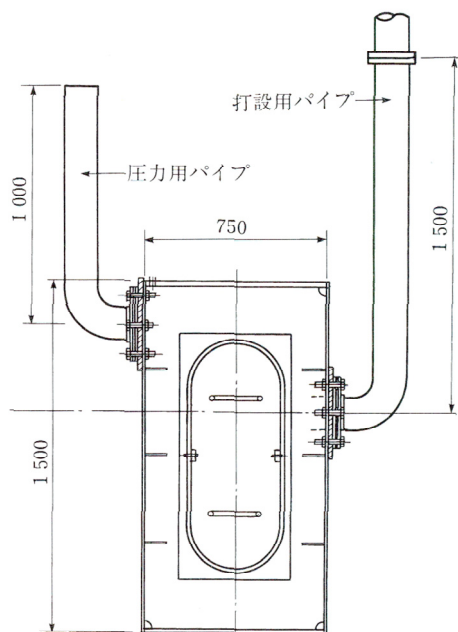


図-6.2.8 打込み用配管と圧力保持配管



写真-6.2.6 圧送状況①（橋下の道路からの圧送）



写真-6.2.7 圧送状況②（橋面からの圧送）

3) 打設中のアーチリブ変形管理

一般交通を供用しながらコンクリートの打込み作業を実施したため、打込み中の橋体の構造不安全状態を防止することが最重要課題であった。このため、先に述べたコンクリート打設順序および打設高の検討と側圧によるアーチリブのはらみ防止補強材設置のほかに、施工ステップごとの橋体部材の応力照査と打込み中のアーチリブ変状管理を行った。コンクリートの打込みに伴う荷重増加に伴うアーチリブの変形を、あらかじめ設定した変位管理値と計測値を照合しながら管理した。コンクリートの水和熱による影響が小さくなった打設完了日の2週間後に計測した結果、コンクリートの自重、剛性を考慮したアーチリブの変形は、ほぼ計算通り（アーチ中央部の-15.0mm に対し、実測値-15.9mm）であり、橋体に悪影響を及ぼすような残存応力を生じさせることなく補強工事を完了し、安全性を向上させることができた¹⁹⁾。

(4) まとめ

軽量骨材を用いた自己充填性を有する高流動コンクリートをアーチリブ内に充填するという新しい補強工法に取り組んだ。コンクリートの配合選定や充填実験を踏まえた施工計画や施工管理によって、円滑な工事を行うことができた。

6. 2. 2 鋼コンクリートサンドイッチ合成床版（試験施工）

（1）はじめに

鋼コンクリートサンドイッチ合成床版は、床版厚が薄くても、高い耐力、靱性および疲労耐久性を有する合理的な構造である。さらに、床版コンクリートに自己充填性を有する高流動コンクリートを用いることで、施工時の省力化と内部コンクリートの充填性の向上が図られ、施工コストの縮減と品質の向上が可能となっている²⁰⁾。この合成床版に軽量骨材を用いた自己充填性を有する高流動コンクリートを適用して、合成床版のさらなる軽量化を図ることを試みた。これにより、下部工や支承などの簡略化による建設コストのさらなる縮減が期待できる。ここでは、鋼コンクリート合成床版（桁長 25m、幅員 5 m、床版厚 162mm）に単位容積質量 1,900kg/m³ の高流動コンクリートを試験的に施工した²¹⁾。

（2）構造物の形状

試験施工を行った合成床版桁橋を図-6.2.9 および写真-6.2.8 に示す。桁橋は橋長 26m、幅員 5 m の単純桁橋であり、床版は鋼コンクリートサンドイッチ合成床版となっている。なお、床版厚 162mm（コンクリート厚さ 150mm）は、従来にない薄肉断面である。

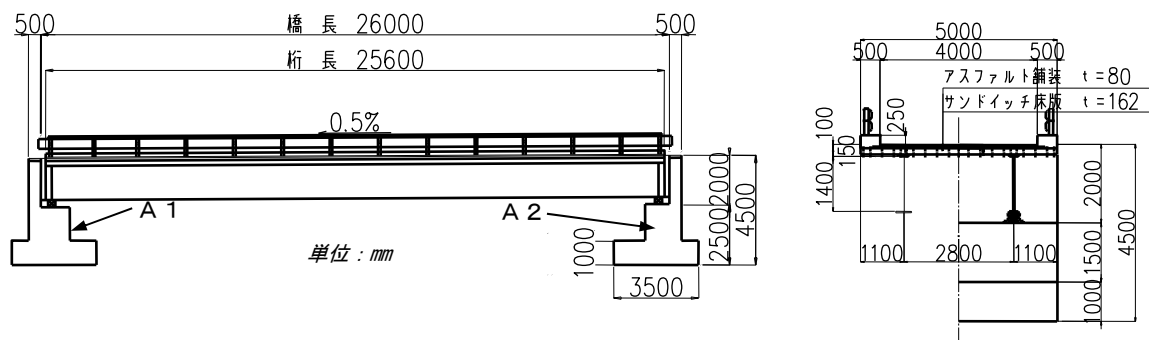


図-6.2.9 合成床版橋の形状



写真-6.2.8 合成床版橋

(3) コンクリートの配合

合成床版に適用したコンクリートの仕様を表-6.2.7に、使用材料を表-6.2.8に示す。設計基準強度 $30\text{N}/\text{mm}^2$ (材齢 28 日)、単位容積質量 $1,900\text{kg}/\text{m}^3$ の自己充填性を有する高流動コンクリートとし、一般的な普通骨材コンクリートを適用した合成床版よりも、さらなる軽量化を志向した。コンクリートの目標スランプフローは 700mm とした。これは、限られた打設孔からの圧入施工となることに加え、床版厚が極めて薄いことを考慮したためである。粗骨材には頁岩を主原料とする従来型の人工軽量骨材をプレウェットングして使用した。また、材料分離抵抗性を向上させるために、混和材としてフライアッシュを混和して、モルタルの軽量化と粘性の調整に活用した。さらに、フレッシュコンクリートの品質のばらつきや材料分離を抑制し、圧送性を向上させるために増粘剤ウェランガムを添加した。ウェランガムは高性能AE減水剤にプレミックスして使用し、混和剤として一液化したものをを用いた(第4章参照)。

コンクリートの配合は、第5章で得た知見を反映させて室内練混ぜ試験で決定し、実機による練混ぜ試験により最終確認した。単位粗骨材量を $300\text{l}/\text{m}^3$ 、細骨材容積比 V_s/V_m を 40% し、モルタルと粗骨材の密度差が $0.5\text{g}/\text{cm}^3$ となることを想定して、 500mm フロー到達時刻が7秒程度以上となるように、水粉体容積比 V_w/V_p を調整した。最終的に V_w/V_p を 65.0% (単位水量 $151\text{kg}/\text{m}^3$) とした配合を選定した。試験練りによって選定したコンクリートの配合を表-6.2.9に、室内試験および実機試験におけるコンクリートの試験結果を表-6.2.10に示す。いずれの試験においても目標値をほぼ満足し、高い流動性ととも、良好な材料分離抵抗性、自己充填性を有していた。

表-6.2.7 コンクリートの仕様

項目	規格
コンクリートの種類	軽量骨材コンクリート I 種
	自己充填性を有する 高流動コンクリート(ランク2)
設計基準強度	$30\text{N}/\text{mm}^2$
単位容積質量	$1,900 \pm 50\text{kg}/\text{m}^3$
スランプフロー	$700 \pm 50\text{mm}$
空気量	$6.0 \pm 1.5\%$
セメント種類	早強ポルトランドセメント
粗骨材	人工軽量粗骨材

表-6.2.8 使用材料

使用材料	記号	摘要	
セメント	C	早強ポルトランドセメント	密度: $3.14\text{g}/\text{cm}^3$, 比表面積: $4,470\text{cm}^2/\text{g}$
混和材	FA	フライアッシュ	密度: $2.26\text{g}/\text{cm}^3$, 比表面積: $4,920\text{cm}^2/\text{g}$ 強熱減量: 0.45%
細骨材	S1	幌延産川砂	表乾密度: $2.64\text{g}/\text{cm}^3$, 吸水率: 1.28%
	S2	由仁産陸砂 S1:S2=50:50	表乾密度: $2.61\text{g}/\text{cm}^3$, 吸水率: 2.67% 粗粒率: 2.71
粗骨材	Gb	非造粒型人工軽量骨材 主原料:膨張頁岩	絶乾密度: $1.26\text{g}/\text{cm}^3$, 表乾密度: $1.56\text{g}/\text{cm}^3$, 含水率: 23.8% , 実積率: 64.8% , 最大寸法: 15mm
混和剤	SP	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系 標準形
	VIS	増粘剤	ウェランガム (SPIに一液化して使用)

表-6.2.9 コンクリートの配合

設計基準強度 (N/mm ²)	スランプフロー (mm)	空気量 (%)	W/C (%)	Vw/Vp (%)	Vs/Vm (%)	単位量(上段:kg/m ³ , 下段:kg/m ³)						SP (P*×%)	VIS (W×%)	理論単位容積質量 (kg/m ³)
						W	C	FA	S1	S2	G			
30	700±50	6±1.5	41.3	65.0	40.0	151	366	259	338	334	485	0.90	0.05	1933
						151	117	117	128	128	300			

W/C:水セメント比 Vw/Vp:水粉体容積比 Vs/Vm:細骨材容積比

*:P=C+FA

表-6.2.10 コンクリートの試験結果

項目	室内試験	実機試験
スランプフロー	650×650mm	725×715mm
500mmフロー到達時間	5.3	6.8
空気量	5.3%	5.1%
単位容積質量	1,866kg/m ³	1,915kg/m ³
圧縮強度(材齢28日)	56.3N/mm ²	51.7N/mm ²

(4) 施工方法

コンクリートの製造は、市中のレディーミクストコンクリート工場で行い、約30分かけて施工現場まで運搬した。アジテータ車が施工現場に到着した後、フレッシュコンクリートの品質管理試験を行うとともに強度試験用の供試体を採取した。コンクリートの打込みは、油圧ピストン式コンクリートポンプ（理論吐出圧力 7.85N/mm²）を用いて行い、26.5mのブーム先端に取り付けた7mのフレキシブルホース（100A）を介して圧入した。圧入孔は、図-6.2.10に示すように床版内部のフランジで区切られたA～Fの6ブロック（1ブロック：8.4×2.5m）に、各2カ所を設けた。コンクリートの圧入はA-1から行い、吹出孔やエア抜き孔からコンクリートが排出され、A-2のコンクリート面が上昇したことを確認した後、筒先をA-2へ移動し、その後のA-2からの圧入により、上面全ての孔からコンクリートが吹き出したことを確認して、打込みを完了する計画とした。

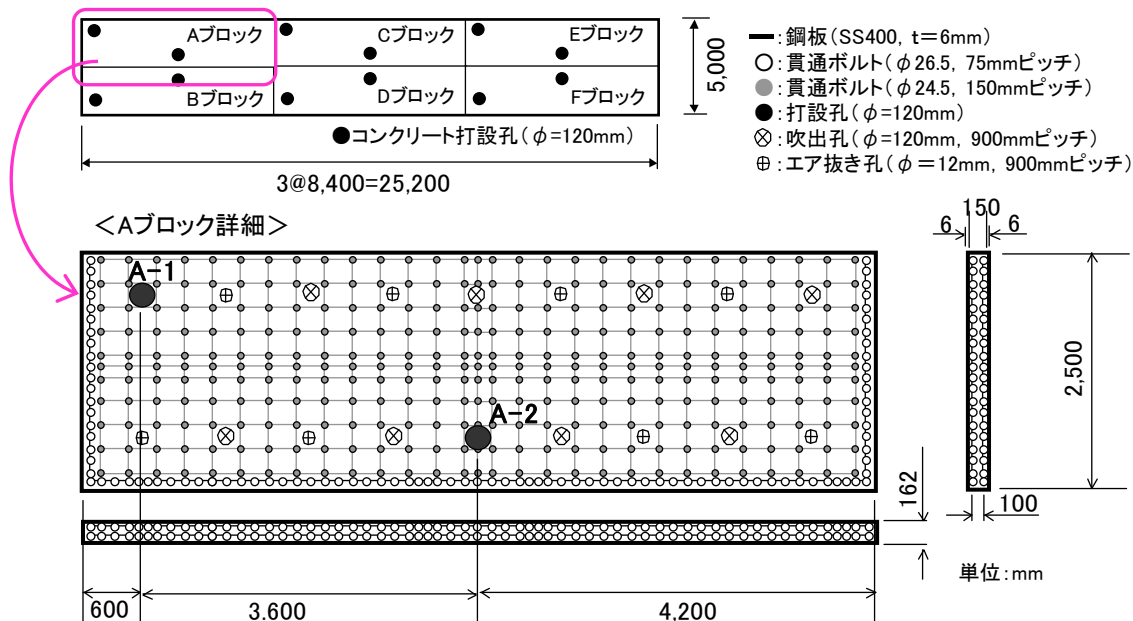


図-6.2.10 合成床版の圧入孔

(5) 施工結果

1) コンクリートの品質管理試験結果

コンクリートの受入れ時に実施した品質管理試験の結果を表-6.2.11に示す。コンクリートの性状は安定しており、受け入れた全てのアジテータ車において、スランプフロー、空気量、単位容積質量とも目標範囲内に管理することが可能であった。なお、500mmフロー到達時間については、目標（7秒）よりもやや小さい時間であったが、軽量粗骨材の浮上がりは見られず、優れた材料分離抵抗性を有していた。

表-6.2.11 品質管理試験結果

アジテータ車	スランプフロー (mm)	空気量 (%)	単位容積 質量 (kg/m ³)	500mmフロー 到達時間 (秒)	圧縮強度(N/mm ²) (標準養生)	
					7日	28日
1台目	730×680 (705)	6.4	1927	6.9	-	-
2台目	730×730 (730)	7.4	1880	6.3	48.1	57.7
3台目	750×710 (730)	5.4	1936	4.4	-	-
4台目	720×690 (705)	-	-	-	-	-
平均	718	6.4	1914	5.9	48.1	57.7
参 室内試験	650×650 (650)	5.3	1866	5.3	50.4	56.3
考 実機試験	725×715 (720)	5.1	1915	6.8	43.5	51.7

2) コンクリートの施工結果

コンクリートの打込み状況を写真-6.2.9に示す。施工計画に準じて、打込みを行った結果、設置した全ての吹出孔から材料分離が生じていない均質なコンクリートが溢れ出した。また、全てのエア抜き孔からモルタルの流出が確認され、良好な充填性が得られた。なお、1ブロック（3.2m³）の打込みに要したピストン稼働時間は平均15分であり、圧送速度は13m³/hであった。施工後、床版上面からの全面打音検査と、コア抜き調査を行って鋼板とコンクリートの一体性を検証した。その結果、未充填部が皆無であること、鋼板とコンクリートが完全に一体化していること、コア供試体の表面に粗骨材が均一に分布していることが確認され、施工に供したコンクリートが優れた自己充填性を有していたことが示された。



写真-6.2.9 合成床版への打込み状況

(6) まとめ

軽量骨材を用いた自己充填性を有する高流動コンクリートを鋼コンクリートサンドイッチ床版に試適用した。その結果、厚さ 162mm という薄肉の鋼コンクリートサンドイッチ合成床版に自己充填性を有する軽量骨材コンクリートを適用することが十分に可能であり、合成床版の更なる軽量化が図れることを明らかにした。

6. 2. 3 支柱杭耐震補強（鋼殻補強コンクリート地盤改良工法）

（1）はじめに

1995年に発生した兵庫県南部地震や2011年に発生した東北地方太平洋沖地震など、大規模地震の発生により、既設構造物およびその基礎に対する耐震補強の需要が高まっている。しかしながら、都市部の鉄道橋脚の杭基礎の補強では、敷地制限や空頭制限等の制約条件により耐震補強工法が限定される。東京モノレールの運河内橋脚基礎の耐震補強工事では、鋼殻補強コンクリート地盤改良工法が採用され、補強コンクリートに軽量骨材を用いた自己充填性を有する高流動コンクリートを適用した。鋼殻補強コンクリート地盤改良工法とは、杭基礎の杭頭部を鋼殻およびコンクリートで補強し、杭地中部を地盤改良することで、杭横抵抗を増大させ耐震性能を向上させるものである^{22), 23)}。

（2）構造物の形状

工事着手前の構造物の状況を写真-6.2.10に示す。対象構造物は、東京モノレール軌道直下の橋脚で、フーチング下面から4~5m下までが水中、地盤はN値0~1程度のヘドロおよびシルト層が17m程度あり、その下が礫層のという構成となっている。橋脚は礫層に貫入させた12本のPC杭による群杭基礎の上にフーチングが載った構造となっている。

耐震補強は、既設PC杭の周辺地盤を高圧噴射で改良し、海底部から上の部分を鋼殻で覆い、その鋼殻と既設部材（PC杭ならびにフーチング）の間に、コンクリートを充填するものである。補強構造を図-6.2.11に示す。



写真-6.2.10 工事着手前の構造物

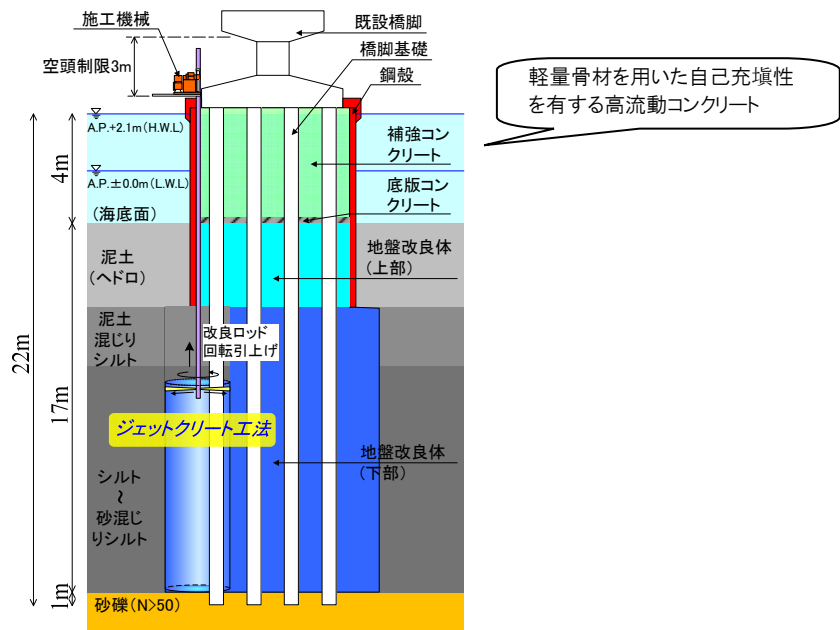


図-6.2.11 耐震補強の概要

(3) コンクリートの配合

既設杭が支持する死荷重の増加を抑え、また地震時慣性力の基礎への負荷を抑えるために、補強コンクリートの重量を極力軽くし、単位容積質量を $1,750\text{kg/m}^3$ 以下に設定とした。軽量化を図るために全ての骨材に人工軽量骨材を使用することとし、目標空気量を 8%とした。また、作業の制約の観点（長時間鋼殻内に入って打込み・締固め作業する際の安全性確保）から、パイプレータによる締固めを必要としない自己充填性を有する高流動コンクリートを採用することとした。コンクリートの仕様を表-6.2.12に示す。

表-6.2.12 コンクリートの仕様

項目	規格
コンクリートの種類	軽量骨材コンクリートⅡ種
	自己充填性を有する高流動コンクリート(ランク2)
設計基準強度	24N/mm^2
単位容積質量	$1,750\text{kg/m}^3$ 以下
スランプフロー	$650 \pm 50\text{mm}$
空気量	$8.0 \pm 1.5\%$
セメント種類	高炉セメントB種
細骨材	人工軽量細骨材
粗骨材	人工軽量粗骨材

コンクリートの使用材料を表-6.2.13に、試し練りで選定したコンクリートの配合を表-6.2.14に示す。海洋構造物であることから、セメントには高炉セメントB種を用い、細骨材、粗骨材とも頁岩を主原料とする従来型の人工軽量骨材をプレウェットティングして使用した。生コンクリート工場の制約があり、第5章ならびに本章の事例（前述）のようにフライアッシュを使用

することができず、増粘剤ウェランガムの使用量を増加し、強度ではなく、流動に対する材料分離抵抗性を確保する目的で単位セメント量（水セメント比）を決定した。また、第5章の検討内容を踏まえ、空気量を8%まで増加させることで、モルタルと粗骨材の密度差を0.1g/cm³以下（空気を含むモルタルの密度：1.69g/cm³、粗骨材の表乾密度：1.61g/cm³）とし、ペースト、細骨材、粗骨材の密度差が小さくなるようにした。単位水量は180kg/m³となったが、コンクリートは鋼殻内に打ち込まれ、硬化後、気中に曝されるのは、打込み上面のごく一部であることを踏まえつつ、流動性と材料分離抵抗性の観点から各単位量を決定した。室内試し練りにおけるコンクリートの試験結果を表-6.2.15に、スランブフロー試験におけるコンクリートの性状を写真-6.2.11に示す。フレッシュコンクリートの性状は良好であり、骨材の浮上がりや沈降は認められず、良好な流動性と分離抵抗性を有していた。

表-6.2.13 使用材料

使用材料	記号	摘要	
セメント	C	高炉セメントB種	密度:3.04g/cm ³ , 比表面積:3,790cm ² /g
細骨材	S	非造粒型人工軽量骨材 主原料:膨張頁岩	絶乾密度:1.65g/cm ³ 含水率:15.0%, 粗粒率:2.75
粗骨材	G	非造粒型人工軽量骨材 主原料:膨張頁岩	絶乾密度:1.26g/cm ³ 含水率:28.0%, 実積率64.3%, 最大寸法:15mm
混和剤	SP	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系標準形
	VIS	増粘剤	ウェランガム

表-6.2.14 軽量高流動コンクリートの配合

設計基準強度 (N/mm ²)	スランブフロー (mm)	空気量 (%)	W/C (%)	Vw/Vp (%)	Vs/Vm (%)	単位量 (上段:kg/m ³ , 下段:kg/m ³)				SP (C×%)	VIS (kg)	理論単位容積質量 (kg/m ³)
						W	C	S	G			
24	650±50	8±1.5	45.8	120.0	45.0	180	456	513	528	1.70	0.25	1,677
						180	150	270	320			

W/C:水セメント比 Vw/Vp:水粉体容積比 Vs/Vm:細骨材容積比

表-6.2.15 コンクリートの試験結果

項目	試験結果
コンクリート温度	23.0°C
スランブフロー	635×615mm
500mmフロー到達時間	5.3
空気量	7.5%
単位容積質量	1,617kg/m ³
圧縮強度(材齢27日)	50.4N/mm ²
硬化後の単位容積質量 (材齢27日, 水中養生)	1,669kg/m ³



写真-6.2.11 スランプフロー試験におけるコンクリートの性状

(4) コンクリートの施工方法

コンクリートの運搬経路を図-6.2.12に、運搬の流れを図-6.2.13に示す。構造物が運河に位置していることから施工するコンクリートは海上運搬となるが、コンクリートプラント船では搬入経路上の橋下を通過できないという状況であった。そこで現場から約2km離れたコンクリートプラントの岸壁にてコンクリートをバケットに受け、そのバケットをクレーン付台船で平台船に積み込み、台船にて海上運搬する計画とした。海上施工では、海上保安部の許可条件で施工時間が日の出から日没までとなるため、片付けを含めて17時まで完了させることを基本とした。台船には、生コンクリートの製造時間などを考慮して、1隻につき2m³のバケットを10個搭載して運搬する計画とした(20m³/隻)。台船1隻の往復のサイクルが2.5時間程度となるため、台船を2隻用意して折り返し海上輸送することにした。

コンクリートの製造から打込み完了までに要する時間が2時間程度となるため、バケット内に置かれたコンクリートの流動性の変化が懸案事項であった。



図-6.2.12 コンクリートの運搬経路

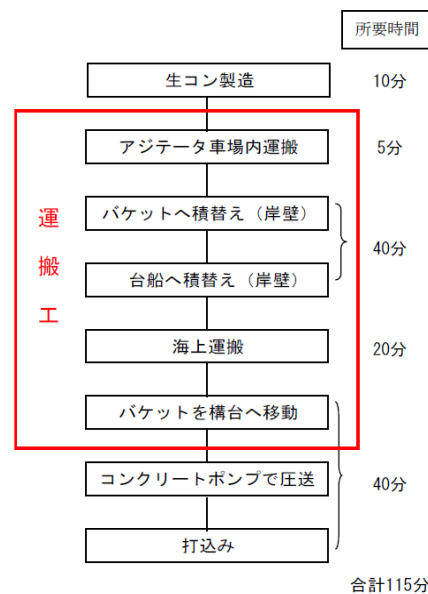


図-6.2.13 コンクリートの運搬の流れ

(5) 施工を想定したコンクリートの性状確認

実施工に先立ち、コンクリートの練混ぜ完了から 120 分後のフレッシュ性状（流動性、空気量）を確認するために、実機練混ぜ試験を実施した。試験では、写真-6.2.12 に示すようにアジテータ車から 2m³ バケツに荷卸しして静置し、30 分毎にバケツから排出したコンクリートのフレッシュ性状を確認した。また、運搬中に流動性が低下した場合に備え、パン型強制練りミキサ（写真-6.2.13）で再攪拌した場合についても試験を行った。



写真-6.2.12 アジテータ車からバケツへの荷卸し状況



写真-6.2.13 再攪拌に用いたミキサ

実機練混ぜ試験の結果を表-6.2.16 に、スランプフローの経時変化を図-6.2.14 に示す。これらに示すように、経過時間に伴うコンクリートの流動性の低下は小さく、再攪拌を行わない状態であっても練混ぜ完了から 120 分後において良好な流動性を有していた。なお、再攪拌を行った場合には、空気量の低下ならびにこれに伴う単位容積質量の増加が認められたことから、実施工では、攪拌設備は使用しない計画とした。

表-6.2.16 実機試験におけるフレッシュコンクリートの試験結果

条件	経過時間 (分)	スランプフロー (mm)		500mmフロー 到達時間 (秒)	フロー 停止時間 (秒)	空気量 (%)	単位容積 質量 (kg/m ³)	コンクリート 温度 (°C)	
			平均						
練上がり	5	600 × 570	585	6.2	35.2	8.4	1,596	18.0	
経時変化	攪拌なし	30	660 × 650	655	4.8	64.9	8.5	1,621	17.0
		60	640 × 640	640	7.9	50.6	8.5	1,623	17.0
		90	640 × 630	635	6.6	62.8	8.5	1,645	16.0
		120	620 × 620	620	7.9	59.0	8.0	1,648	16.0
	攪拌あり	30	635 × 625	630	10.5	56.8	4.3	1,706	17.0
		60	690 × 685	685	5.7	42.0	3.4	1,731	14.0
		90	670 × 650	660	6.2	57.8	4.5	1,717	15.0
		120	630 × 630	630	6.0	58.4	5.5	1,691	13.0

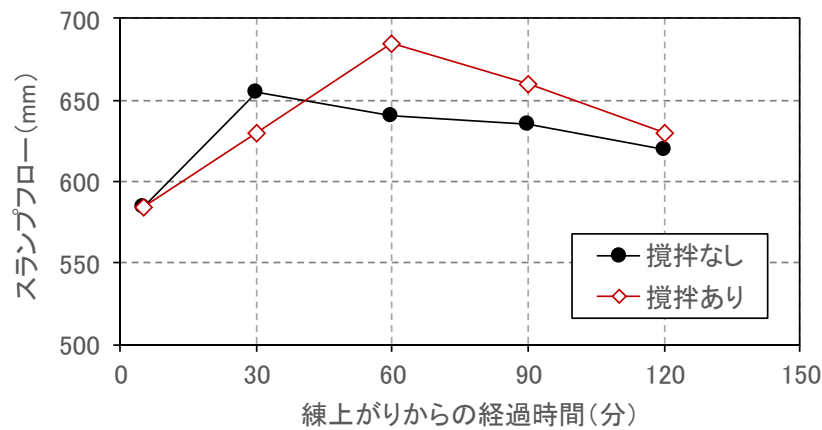


図-6.2.14 経過時間に伴うスランプフローの変化

(6) 施工結果

コンクリートの施工状況を写真-6.2.14に示す。生コンクリート工場の岸壁にて、アジテータ車からバケットにコンクリートを荷卸しし、岸壁に接岸したクレーン船にて、海上運搬用の平台船にバケットを積み込んだ(2m³バケット×10基)。バケット下部排出口は、コンクリートの漏出防止用にシートでくるみ、また、バケット上面は、海上運搬中の日射と風によるコンクリート表面の水分逸散防止用にシートで覆った。施工位置においては、ポンプ車上に設置した構台にバケットを移送した。

その後、バケットから採取したコンクリートについて品質管理試験を実施し、ピストン式コンクリートポンプのブームを介して、コンクリートを打ち込んだ。コンクリートの性状は良好であり、長時間運搬に伴う流動性の低下やバケット内部での軽量骨材の浮上がりも認められなかった。また、圧送後においても、材料分離が生じることなく、杭回りや鋼殻内の隅々まで充填していく様子が確認された。ポンプの実吐出量は40m³/h程度、流動勾配は5% (0.2m/4.0m)程度であった。

<p>岸壁での コンクリートの荷卸し (平台船への積み込み)</p>	<p>クレーン付台船 (90t吊級・スバッド付・13.5m×35.0m)</p> <p>生コン車</p> <p>岸壁</p> <p>平台船(運搬用) (7.5m×18.0m)</p>	
<p>海上運搬 (平台船の曳航)</p>		
<p>コンクリートポンプ への移送</p>		<p>漏出防止用ブルーシート</p> <p>列車見張員</p>
<p>ブームを用いた圧送 鋼殻内・既設杭廻り へのコンクリートの 充填状況</p>		

写真-6.2.14 コンクリートの施工状況

実施工におけるコンクリートの品質管理試験結果を表-6.2.17 に示す。試し練り，実機試験，実施工を通じて，良好な管理状態にあり，目標とした自己充填性，圧縮強度，単位容積質量 $1,750\text{kg/m}^3$ 以下を満足することができた。

工事完了後の状況を写真-6.2.15 に示す。

表-6.2.17 コンクリートの品質管理試験結果

項目	施工日:1/25	施工日:1/26
コンクリート温度	11.0°C	11.0°C
スラブフロー	670×670mm	625×605mm
空気量	7.5%	6.7%
単位容積質量	1,660 kg/m^3	1,640 kg/m^3
圧縮強度(材齢28日)	41.9 N/mm^2	43.0 N/mm^2



写真-6.2.15 工事完了後の状況

(7) まとめ

部材の軽量化と打込み・締固め作業の省力化を目的として，軽量骨材を用いた自己充填性を有する高流動コンクリートを運河内の橋脚の耐震補強工事に適用した。長時間運搬，水上施工といった特殊な条件下での適用となったが，材料・配合・施工方法を十分に検討し，それを実践することで良好な施工結果が得られた。

6. 2. 4 その他特殊用途での軽量骨材コンクリートの利活用

流動性を高めた軽量骨材コンクリートを、特殊な用途に用いた事例の概要を以下に示す。

(1) 水中不分離性コンクリートへの展開

1) 支柱杭耐震補強工事への適用(東京モノレール橋脚基礎の耐震補強) 2011年

6. 2. 3に記した耐震補強工事では、軽量骨材を用いた自己充填性を有する高流動コンクリートを、鋼殻と既設支持杭、フーチングの空間をドライアップした状態で打ち込んだ。このドライアップを実現するには、底版(耐圧版)を構築する必要があるが、この底版にも、自重を軽減する目的で軽量骨材コンクリートが適用された(図-6.2.15)。底版コンクリートは、水中で構築することになるが、ドライアップのための止水性能が求められ、水中での自己充填性、セルフレベリング性が求められることから、水中不分離性コンクリートが採用された²³⁾。

軽量骨材を用いた水中不分離性コンクリートの配合を表-6.2.18に示す。目標とした単位容積質量は、高流動コンクリートと同じく $1,750\text{kg/m}^3$ 以下であるが、空気量の設定は8.0%ではなく、3.5%とした。これは、水圧を受けつつ水中流動する際に、エントレインドエアのつぶれや脱泡²⁴⁾による単位容積質量の増加を回避するためである。ただし、空気量を小さく設定しても、水中不分離性混和剤の添加とセルフレベリング性を確保のための単位水量が増えるため、コンクリートの単位容積質量の目標値を満足できる。モルタルと粗骨材の密度差は 0.14g/cm^3 と小さく(モルタル: 1.75g/cm^3 , 粗骨材: 1.61g/cm^3)、また、水中不分離性混和剤の添加によって粘性が高まることから、目標スランプフロー 500mm という流動性に対して、良好な材料分離抵抗性、水中不分離性を有するコンクリートの製造が可能であった。

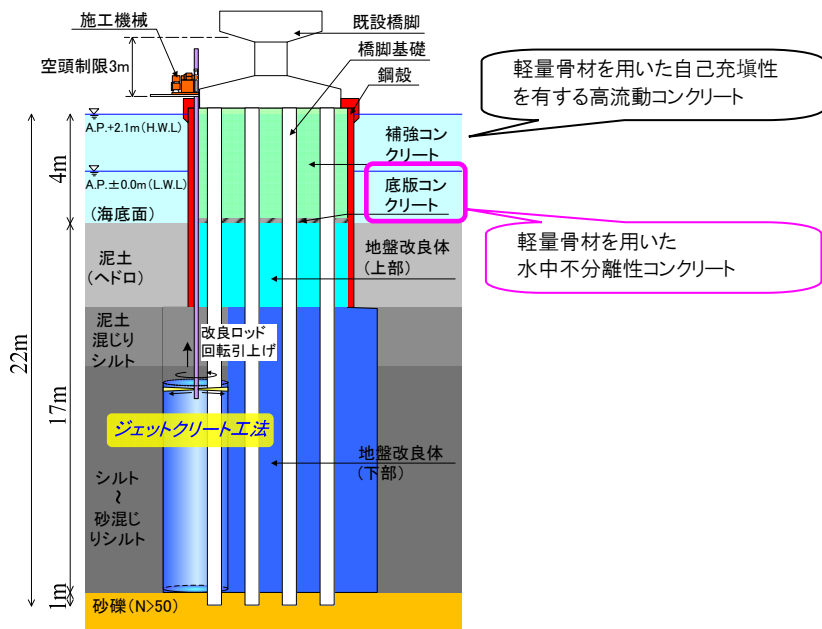


図-6.2.15 耐震補強の概要(再掲)

表-6.2.18 軽量骨材を用いた水中不分離性コンクリートの配合

設計基準強度 (N/mm ²)	スランプロー (mm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (上段:kg/m ³ , 下段:kg/m ³)					水中不分離性 混和剤 (kg)	理論単位 容積質量 (kg/m ³)
					水	高炉セメント B種	軽量 細骨材	軽量 粗骨材	流動化剤		
18	500±50	3.5	60.0	42.3	239	360	507	596	7.91	1.95	1,709
					239	118	266	370	7.0		

水中不分離性コンクリートの運搬から打込みについては、6.2.3に記した高流動コンクリートと全く同じ方法とした。図-6.2.16に示すように、長時間運搬に伴う流動性の変化は小さく、円滑な打込みが可能であった。

ドライアップを行った空間では、底版本体はもとより、既設杭周りや鋼殻との界面からの漏水は認められず、良好な止水性を確保することができた。これにより、次ステップの高流動コンクリートの施工を、水に接することなく品質を確保しながら、安全に実施することができた。

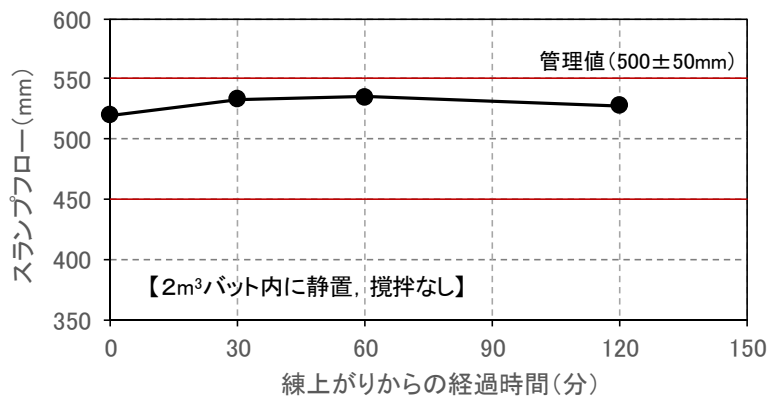


図-6.2.16 経過時間に伴う流動性の変化²³⁾を一部修正

2) 東武伊勢崎線荒川放水路橋梁（北千住～小菅間）の耐震補強工事 2015年

河川内の橋脚基礎をシートパイルと水中不分離性コンクリートで巻き立て、耐震性能を向上させる工事である。構造一般図を図-6.2.17に示す。この工事では、既設躯体とシートパイル間を隙間なく、密実にコンクリートで充填することが最も重要となる。施工の確実性を増すためには、シートパイルと既設躯体の空間をドライアップすることが有効であるが、シートパイルの水密性の確保や大掛かりな仮設支保工が必要となる。また、コンクリートの打込みに伴う重量増は、河床沈下を引き起こし、ネガティブフリクションによる既設躯体の沈下が生じるため、鉄道を供用しながらの補強工事においては、河床沈下に伴う躯体の沈下だけは絶対に回避しなければならなかった。そこで、単位容積質量 $1,750\text{kg/m}^3$ 以下の軽量性を有し、水中で自己充填性が得られる水中不分離性コンクリートを適用した。

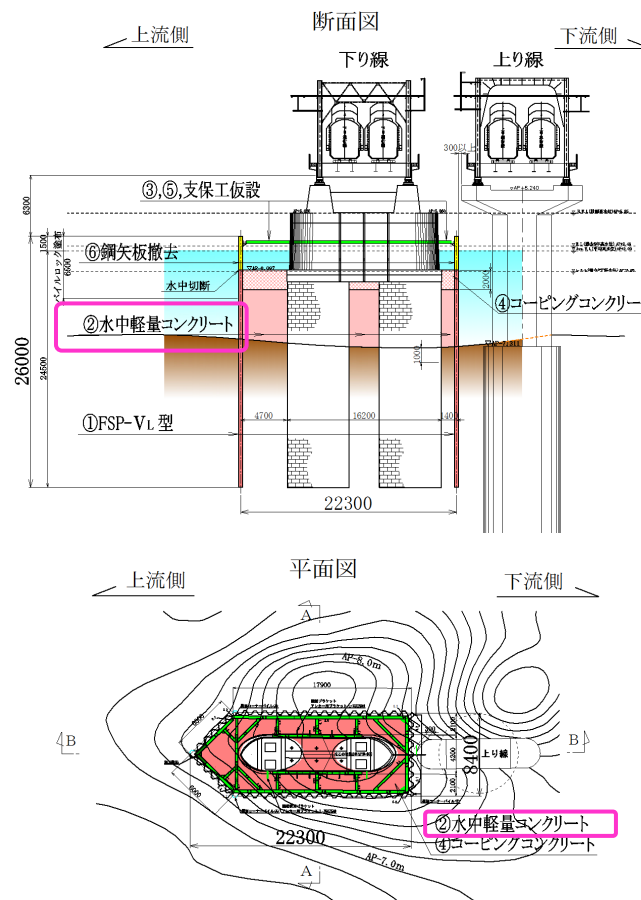


図-6.2.17 構造一般図

軽量骨材を用いた水中不分離性コンクリートの配合を表-6.2.19に示す。河川内かつ供用中の鉄道橋路下という条件に加え、施工面積が広いこと、さらには、コンクリートを河川敷から橋脚まで配管を用いて圧送する必要があったことから、スランプフローの目標値を 600mm とした。骨材は、細骨材、粗骨材とも頁岩を主原料とする従来型人工軽量骨材をプレウェットイングして使用した。

表-6.2.19 軽量骨材を用いた水中不分離性コンクリートの配合

設計基準強度 (N/mm ²)	スランプフロー (mm)	設計空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (上段:kg/m ³ , 下段:kg/m ³)					水中不分離性 混和剤 (kg)	理論単位 容積質量 (kg/m ³)
					水	普通ポルト ランドセメント	軽量 細骨材	軽量 粗骨材	流動化剤		
27	600±50	2.0	52.4	38.0	298	590	332	484	12.5	2.78	1,719
					298	187	184	300	11		

W/C:水セメント比 s/a:細骨材率

コンクリートの施工平面図を図-6.2.18に示す。コンクリートの打込みは、シートパイルへの側圧と河床に作用する重量変化を緩和するため、7回に分割して行った(125m³/回, 合計884m³)。P4橋脚の施工では、左岸側ヤードにポンプ車(理論吐出圧力10MPa)を配置し、既設橋の歩道に5インチの輸送管を設置し、配管先端部にフレキシブルホース取り付けて、台船上の4.9tクローラークレーンで先端ホースを移動させながら、水中不分離性コンクリートを打ち込む計画とした。P4橋脚への圧送は、水平換算距離で約240mの長距離圧送となるため、実施工に先立って、事前に圧送実験を実施して、管内圧力損失や圧送に伴うコンクリートの流動性の変化を把握した。圧送実験の状況を写真-6.2.16に、圧送実験で得られた水平管1m当たりの管内圧力損失を図-6.2.19に示す。管内圧力損失は、土木学会コンクリートのポンプ施工指針²⁵⁾に記載される普通骨材を用いた水中不分離性コンクリートに比べて小さく、むしろ、スランプ12~18cmの通常の軽量骨材コンクリートに近い結果となった。また、吐出量を増加させることで管内圧力損失は増大したが、その増大傾向も緩やかであった。さらには、圧送によるスランプフローの低下もほとんど認められなかった。これは、軽量骨材のプレウェッティングを徹底したことに加え、水中不分離性混和剤の添加によりペーストの粘性が高まり、骨材への加圧吸水が生じなかったこと、さらには、スランプフローの管理目標値を一般的な水中不分離性コンクリートよりも大きい600mmとしたことによるものと考えられた。なお、ベント管の圧力損失は水平管の1.3倍程度であった。

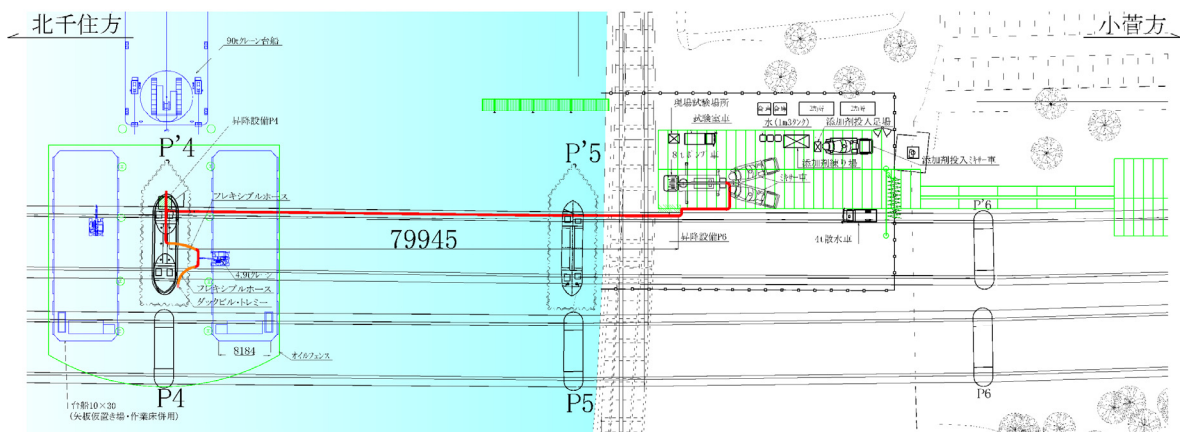


図-6.2.18 コンクリートの施工平面図



写真-6.2.16 圧送実験の状況

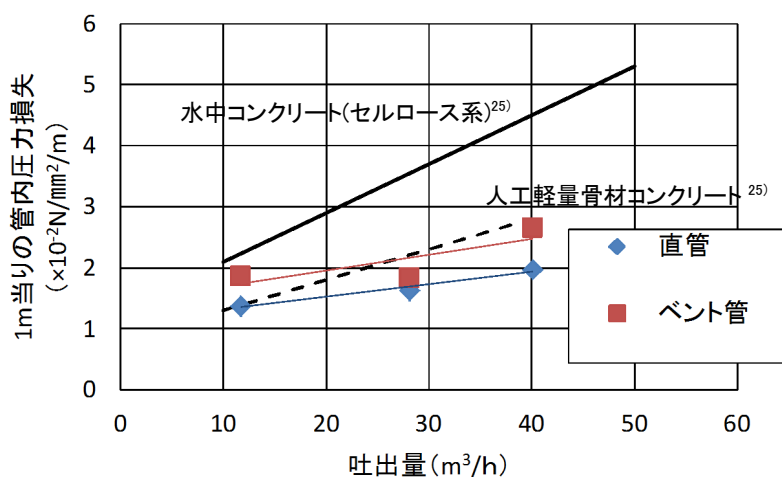


図-6.2.19 管内圧力損失の測定結果

P 4 橋脚の打込み状況を写真-6.2.17 に、ドライアップ後のコンクリート上面の状況を写真-6.2.18 に示す。水平換算距離 240m のコンクリートの圧送は円滑であり、水中における筒先の位置を管理して水中落下が生じないように打込みを行った。水中に打ち込まれたコンクリートは、橋脚基礎下側にほぼ同じ高さで廻り込んでおり、優れたセルフレベルリング性を示した。また、軽量骨材の浮上がりも生じておらず、分離抵抗性も確保されていた。ドライアップ完了後の漏水は非常に少なく、コーピングコンクリートを気中で施工した後、シートパイルの余長を切断・撤去し、補強を完了した。

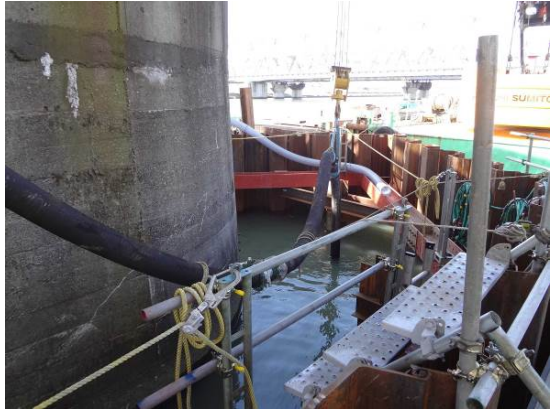


写真-6.2.17 コンクリートの打込み状況



写真-6.2.18 ドライアップ後のコンクリート上面の状況

(2) 低収縮型超高強度コンクリートへの展開（秋葉原公共デッキ）

コンクリートを高強度化するにしたがって増大する自己収縮は、ひび割れの発生を誘引し、構造性能や耐久性の低下の原因となる。自己収縮を抑制する手法として、①膨張材の使用、②収縮低減剤の使用、③吸水した人工軽量骨材を活用する方法が知られている。③については、図-6.2.20 に示すイメージ図²⁶⁾のように、コンクリート中に練り混ぜられた軽量骨材の内部の保有水がセメントの水和に伴う硬化体の自己乾燥を補償し、細孔空隙中の湿度低下を防止するセルフキュアリング効果に期待するものである。この効果を活用し、圧縮強度 150N/mm² レベルの超高強度コンクリートの自己収縮を低減し、秋葉原公共デッキ（歩道橋）に適用した²⁶⁾。

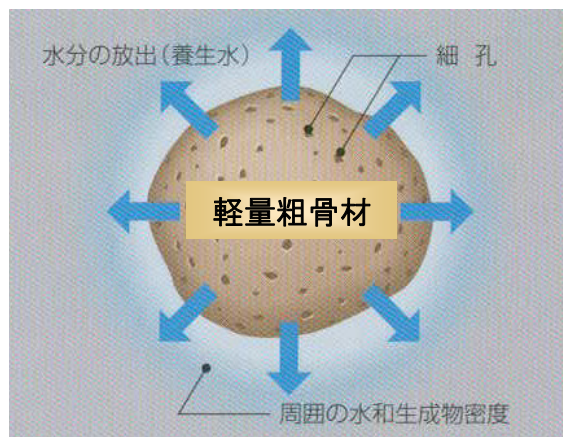


図-6.2.20 セルフキュアリングのイメージ²⁶⁾

軽量骨材を活用した収縮低減型超高強度コンクリートの配合を表-6.2.20 に示す。粗骨材として安山岩系の砕石を使用するが、その容積の20%を、比較的高い強度と高い吸水率を併せ持つ石炭灰人工軽量骨材²⁷⁾で置換し、単位セメント量の0.5重量%に相当する収縮低減剤を添加することで、低収縮性を実現した。図-6.2.21 に圧縮強度と自己収縮ひずみの測定結果を示す。W/C=17%の配合で収縮低減対策をとらない配合Bに対し、軽量粗骨材と収縮低減剤による収縮低減対策をとった（JL20R05）は、圧縮強度が若干低下するものの、150N/mm²程度の超高強度を確保しつつ、自己収縮ひずみを70%程度低減することができている²⁸⁾。なお、この自己収縮ひずみは、設計基準強度40N/mm²程度の一般的なコンクリートと同等のものである。

表-6.2.20 軽量骨材を用いた低収縮型超高強度コンクリートの配合

種類	スランブフロー (mm)	設計 空気量 (%)	W/C (%)	単位量（上段:kg/m ³ , 下段:t/m ³ ）					収縮 低減剤 (C×%)	高性能 減水剤 (C×%)
				水	シカフューム セメント	安山岩 砕砂	安山岩 砕石	軽量 細骨材		
自己充填型	650±50	1.5	17.0	155	912	618	639	105	0.50	1.5
				155	296	234	240	60		
締固め併用型	400±50	1.5	18.0	160	890	491	773	105	0.50	1.0
				160	289	186	290	60		

W/C: 水セメント比

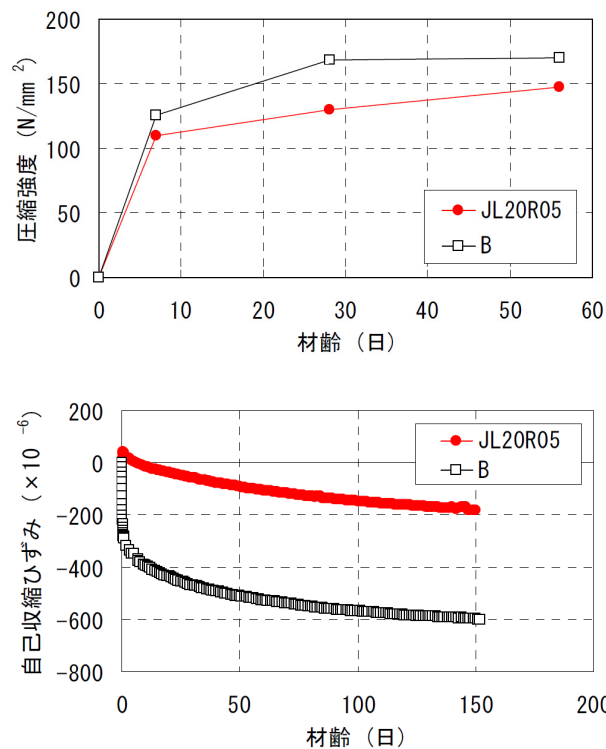


図-6.2.21 圧縮強度と自己収縮ひずみ（対策の有無による比較）

このコンクリート用いて構築したのが、秋葉原公共デッキ（歩道橋）²⁶⁾である。構造物の一般図を図-6.2.22に示す。本公共デッキ（歩道橋）は、一般道路を横断して、超高層ビルのフロアに接続するが、駅前広場の空間を創出するため、橋脚数が制限された。そのうえで、桁下の建築限界4.7mを確保する必要があり、最大支長33.2m、桁高1.2mのスレンダーな構造とする必要があった。そこで、主桁の剛性を確保しつつ、プレストレスを有効に活用するために、設計基準強度120N/mm²（実強度レベル150N/mm²）の収縮低減型超高強度コンクリートが適用された。

上部工主桁は、プレキャストウェブ、上床版、支点横桁部、偏向部およびストラット（鋼管）で構成される。このうち、ストラッド以外の部位には、収縮低減型超高強度コンクリートが適用されたが、各部位の構造条件、施工条件に応じて流動性（配合）を使い分けた（表-6.2.20）。製品工場で作成するプレキャストウェブと鋼材が密に配置される支点横桁部には、スランプフロー650mmの自己充填型を、仕上がり勾配が2～3%となる上床版部には、スランプフロー400mmの締め固め併用型のコンクリートを用いた。締め固め併用型の打込み状況を写真-6.2.19に示す。打込みは、バケットを用いて行い、内部振動機を用いて入念に締め固め、所定の床版厚になるように均した。その後、表面のこわばりや乾燥を防止し、こて仕上げを容易にするために初期養生効果も有するパラフィンエマルジョン系の仕上げ補助剤を散布し、金ごて仕上げを行った。W/Cが17%ということもあり、コンクリートの粘性が高く、締め固めに伴う軽量骨材の浮上がりは皆無であった。仕上げ完了後、養生マットを敷設して、給水養生を入念に行った。その結果、打込み上面や脱枠面にひび割れは確認されず、懸案であった自己収縮に起因するひび割れの発生を、材料ならびに施工の両面から対策により、防止することができた。

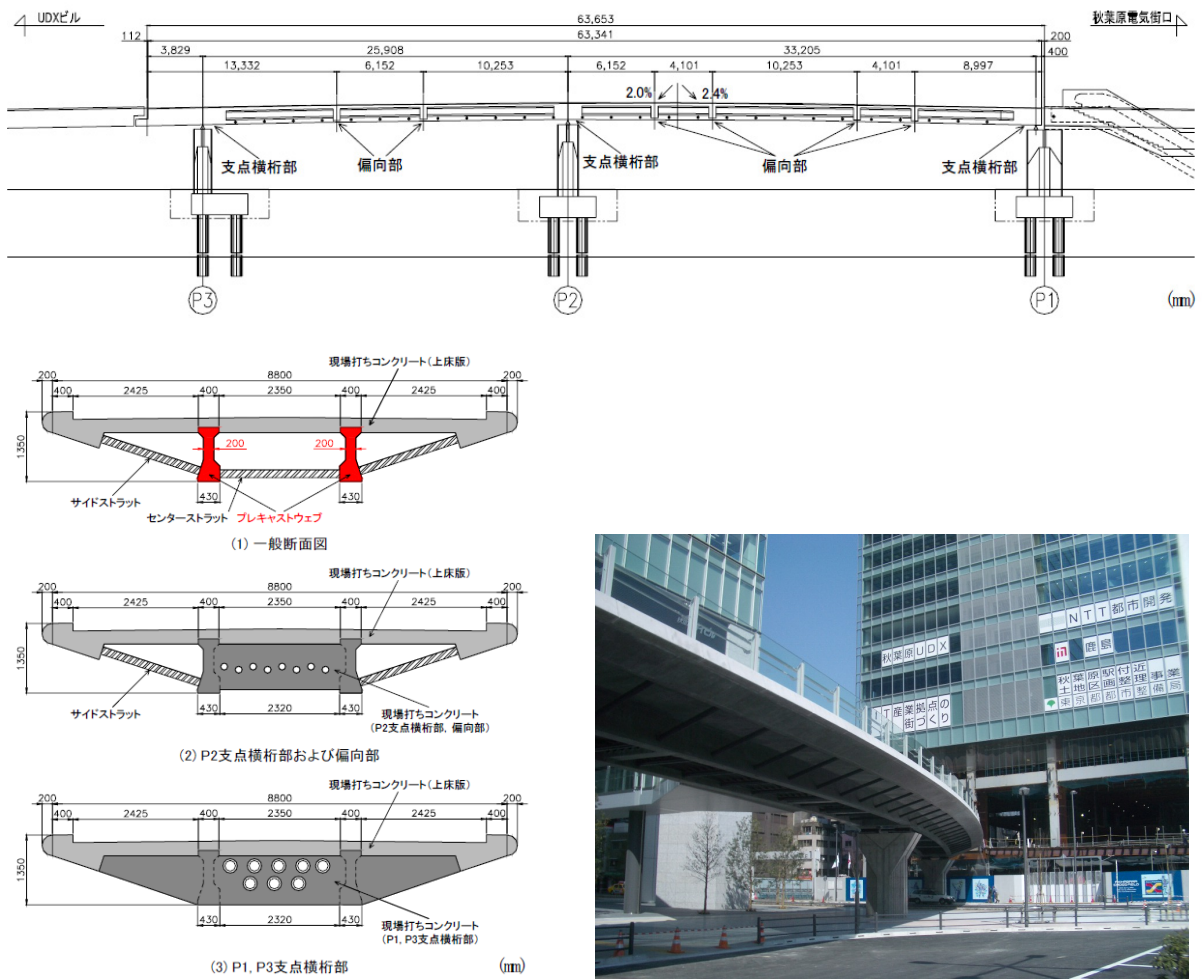


図-6.2.22 秋葉原公共デッキ（アキバブリッジ）



写真-6.2.19 上床版の打込み状況

6. 3 まとめ

本章では、第4章、第5章の研究成果を反映し、設計条件、構造条件、施工条件に応じたワーカビリティを有する軽量骨材コンクリートを実構造物へ適用した事例を記した。適用結果をまとめると、以下ようになる。

(1) ダム仮排水路閉塞工事でのプレキャスト埋設型枠への適用

独立空隙型の人工軽量粗骨材を用い、単位容積質量 $1,750\text{kg/m}^3$ 、スランプ 12cm のコンクリートでプレキャスト埋設型枠を作製した。部材の軽量化により、工期短縮、工事費削減、施工の合理化および閉塞工事の安全性向上を実現した。

(2) 新幹線高架橋 PC 上部工への適用

独立空隙型人工軽量骨材を用いた単位容積質量 $1,800\text{kg/m}^3$ のコンクリートを大規模工事に初めて適用した。第4章に示したワーカビリティに関する研究や種々の施工実験を通じて得られた知見を施工計画に反映し、施工管理を十分に行ったことで、順調に施工を終了することができた。材料費（コンクリート単価）は増大するもの、主桁重量が 22% 軽量化され、下部構造の簡素化、押出し架設などの建設機械の小型化が可能となり、約 10% のコスト削減を実現した。

(3) 鋼ローゼ橋アーチリブ補強工事への適用

軽量骨材を用いた自己充填性を有する高流動コンクリートをアーチリブ内に充填するという新しい補強工法に取り組んだ。第5章の研究成果を反映させ、単位容積質量 $1,750\text{kg/m}^3$ 、骨材全てに人工軽量骨材を使用した高流動コンクリートによって、アーチリブの合理的な補強を実現した。

(4) 鋼コンクリートサンドイッチ合成床版への適用

床版厚 162mm （上部鋼材厚 6mm + コンクリート厚 150mm + 下部鋼材厚 6mm ）という薄肉のフルサンドイッチ合成床版に、粗骨材に軽量骨材を用いた自己充填性を有する高流動コンクリートを試験的に適用した。第5章の研究成果を反映させ、モルタルの粗骨材の密度差を考慮して水粉体容積比を調整した単位容積質量 $1,900\text{kg/m}^3$ の高流動コンクリートは、優れた充填性を示し、薄肉で軽量の合成床版の実現性を示した。

(5) 水中基礎の支柱杭耐震補強工事への適用

軟弱地盤上に立つモノレール橋脚の支柱杭基礎の耐震補強工事に、単位容積質量 $1,750\text{kg/m}^3$ 以下の2種類の軽量骨材コンクリートを適用した。底版に水中不分離性コンクリートを打ち込み、ドライアップを行った上で、自己充填性を有する高流動コンクリートを打ち込んだ。コンクリートの海上運搬に約2時間を要する厳しい施工条件の中、密度差を考慮したコンクリートの配合設計と綿密な施工計画ならびにその管理により、品質を確保しながら耐震補強を行うことができた。

(6) 河川内の橋脚基礎の耐震補強工事への適用

軟弱地盤上に立つ鉄道橋脚の基礎を水中コンクリートで巻き立てる耐震補強工事に、単位容積質量 $1,750\text{kg/m}^3$ 以下の水中不分離性コンクリートを適用した。水平換算距離が 240m という圧送条件においても、圧送性を確保して円滑な施工を実現し、耐震補強を行うことができた。

(7) 超高強度コンクリートを用いた公共デッキへの適用

150N/mm² レベルの超高強度コンクリートの自己収縮を低減する手法として、粗骨材の一部に軽量骨材を用いるとともに収縮低減剤を併用する方法を検討し、公共デッキ（歩道橋）の主桁に適用した。配筋条件（鋼材量）や構造条件（橋面の勾配）に応じて、自己充填型（スランプフロー600mm）と締固め併用型（スランプフロー400mm）の配合を使い分け、合理的な施工を実現した。

これらの適用事例は、構造物に求められる性能、施工に求められる性能を、コンクリートの材料および配合設計でサポートした事例であり、本研究の第4章、第5章で示した人工軽量骨材コンクリートに関する研究ならびに提案をうまく活用することで、実構造物の構築を合理的に行うことができることが示された。

【参考文献】

- 1) 峰村修, 丸山久一, 坂田昇, 柳井修司: ダム仮排水路閉塞工のプレキャスト型枠への高性能軽量コンクリートの適用, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2, pp.1417~1422, 2000.6
- 2) (財)ダム技術センター編: 多目的ダムの建設, (財)全国建設研修センター, 第5巻, 施工編, pp.25~77, 1988.1
- 3) 鷹取正顕, 田中靖, 五十嵐昇, 竜澤宏昌: 通廊へのプレキャスト型枠の採用について, ダム技術, Vol.95, pp.46~56, 1994.8
- 4) 佐々木敏也, 谷口俊一, 依田佐知子, 柳井修司: 東北新幹線沼宮内橋への軽量コンクリートの適用, コンクリート工学, Vol.40, No.2, pp.47~55, 2002.2
- 5) 田附伸一, 小泉一人, 津吉毅, 渡辺真澄: 高性能軽量骨材コンクリートを用いた11径間連続PC橋の設計, プレストレストコンクリート技術協会第10回シンポジウム論文集, pp.743~746, 2000.10
- 6) 土木学会: コンクリート標準示方書〔平成8年制定〕設計編, 1996.3 (当時参照)
- 7) 平石剛紀, 坂田昇, 矢吹増男, 細田常正: ポリプロピレン短繊維補強コンクリートのフレッシュおよび硬化性状, コンクリート工学年次論文集 Vol.22, No.1, pp.283~288, 2000.6
- 8) 依田佐知子, 大久保秀樹, 柳井修司: 軽量骨材コンクリートの水平打継目強度特性に関する実験的研究, 土木学会東北支部技術研究発表会, V-30, pp.588~589, 2001.3
- 9) 前中敏伸, 門中章二, 森田浩, 伊藤篤司: 膜養生剤を用いた水平打継ぎ面処理方法に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2, pp.817~822, 2000.7
- 10) 山内丈樹, 入倉英明, 宇津木一弘, 福田一郎: 場所打ちPC橋の鉛直打継ぎ目処理方法に関する基本性能確認実験, 第55回土木学会年次学術講演会講演概要集, V-542, 2000.10
- 11) 平石剛紀, 坂田昇, 林大介, 山村正人: 剥落防止を目的とした有機系繊維補強コンクリートに関する研究, コンクリート工学年次論文集 Vol.23, No.1, pp.469~474, 2001.7
- 12) 奥島正一: 人工軽量骨材コンクリートの支圧強度に関する研究, セメントコンクリート, No.238, pp.564~568, 1966.12
- 13) 福田一郎, 宇津木一弘, 柳井修司, 坂田昇: 高性能軽量コンクリートを用いたPC定着部の耐荷性状, コンクリート工学年次論文集 Vol.23, No.3, pp.613~618, 2001.7
- 14) プレストレスト建設業協会: 定着工法の定着部に関するガイドライン (案)

- 15) 土木学会；コンクリートのポンプ施工指針 [平成 12 年版]，コンクリートライブラリー100号，2000.2 (当時参照)
- 16) 人工軽量骨材 (ALA) 協会：技術情報・建築編
- 17) 北原稔，榎木隆，柳井修司：鋼ローゼ橋アーチリブへの軽量高流動コンクリート充てん工法，コンクリート工学，Vol.40，No.2，pp.57～63，2002.2
- 18) 土木学会：高流動コンクリート施工指針，コンクリートライブラリー93，土木学会，1998.8 (当時参照)
- 19) 北原稔，太田貞次，宮沢智明，小原久：アーチリブへのコンクリート充填とアーチ基部固定化を実施した鋼ローゼ橋補強工事 (上輪橋)，宮地技法，No.17，pp.68～79，2001.12
- 20) 佐藤昌志，温泉重治：コスト縮減をした鋼合成サンドウイッチ床版の施工技術に関する開発，橋梁&都市 PROJECT，pp.22～30，1999.12
- 21) 柳井修司，坂田昇，三田村浩，池田憲二：高強度軽量コンクリートの橋梁への適用性，コンクリート工学年次論文集 Vol.23，No.2，pp.1093～1098，2001.6
- 22) 三瓶智，柏木一夫，小原隆志，芝田正則，藤崎勝利：杭基礎を対象とした鋼殻補強コンクリート地盤改良工法の設計・施工，地盤工学研究発表会講演集 (CD-ROM)，48th，No.823，2013.
- 23) 井上美佐男，梅田浩行，高麗幹大，芝田正則，朝倉良介，熊部淳，柳井修司，岸田哲哉，久保亮：人工軽量骨材を用いた水中不分離性コンクリートおよび高流動コンクリートの水上施工ー東京モノレール耐震補強工事ー，土木学会第 68 回年次学術講演会講演概要集，V-572，pp.1143～1144，2013.9
- 24) 岸田哲哉，高田和法，大野俊夫，田崎邦男：空気量が水中不分離性コンクリートの性状に与える影響，土木学会第 58 回年次学術講演会，V-537，pp.1073～1074，2003.9
- 25) 土木学会：コンクリートのポンプ施工指針 [2012 年版]，コンクリートライブラリー135号，2012.6
- 26) 岡本裕昭，一宮利通，盛田行彦：低収縮超高強度コンクリートを用いた秋葉原公共デッキの設計と施工，橋梁と基礎，39 (8)，pp. 2～4，10～17，2005.8
- 27) 笠井浩，和美廣喜，新井一彦，新垣和彦，藤木英一，田中公徳，石川寛範；石炭灰を用いたコンクリート用人工骨材の開発とコンクリート二次製品への適用，日本コンクリート工学協会，軽量コンクリートの性能の多様化と利用の拡大に関するシンポジウム論文集，pp.127～132，2000.8
- 28) 高田和法，柳井修司，渡部貴裕，一宮利通：超高強度コンクリートの自己収縮低減に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.1007～1012，2003.7

第7章 結論

7. 1 本研究の成果

本論文では、第2章で、我が国における軽量骨材コンクリートの歴史・発展と現状に触れ、軽量骨材コンクリートが抱える課題を改めて抽出した。実構造物への適用に際しては、圧送性と凍結融解抵抗性の両立が課題であること、近年の構造物の新設工事、既設構造物の補修・補強ならびに更新工事における構造条件、施工条件での活用を踏まえると適切なワーカビリティ、特に自己充填性の付与が望まれることを示した。第3章では、圧送性と凍結融解抵抗性を両立しうる軽量骨材として開発された独立空隙型人工軽量骨材を用いたコンクリートの基本特性に触れ、この骨材を実構造物へ適用する上で、確認すべき項目を抽出した。内部に独立空隙を有するこの骨材は、常圧下では吸水が生じにくく、それゆえ絶乾状態あるいは気乾状態で練混ぜに供することになる。これにより、凍結融解抵抗性の確保を実現できるが、圧送を行った際、すなわち管内圧力を受けた際の性状が未解明であり、また、従来の軽量骨材よりも軽いことから、打込み・締固め、仕上げといった一連の作業工程において、骨材の浮上がりや抑制するための留意点ならびに対策を明らかにしておく必要性を示した。さらに、骨材の浮上がりに対して、部材の均質性を確保する上でも、振動締固めを行わない自己充填性を有する高流動コンクリートの配合選定手法の必要性を示した。以下、第4章では、独立空隙型人工軽量骨材を用いたコンクリートについて圧送性をはじめとするワーカビリティ確保のための提案を、第5章では、自己充填性を付与するための配合設計手法の提案を、実験的研究で得られた知見とともにとりまとめた。そして、第6章で、これらの提案を実構造物の施工に反映させ、その検証を行った。以下に、第4章、第5章ならびに第6章で得られた結論を総括する。

「第4章 適切なワーカビリティを有する独立空隙型人工軽量骨材コンクリートの提案」では、独立空隙型人工軽量骨材を気乾状態で使用した、橋梁の上部工を対象として、水セメント比40%程度の軽量骨材コンクリートに適切な圧送性を付与することを目指した。室内実験ならびに圧送実験を実施して、安定した圧送が行える配合を提案した。また、打込み・締固め・仕上げの方法について、実規模部材を対象に試験施工を実施して、施工上の留意点を洗い出した。これらを通じて得られた知見をまとめると以下ようになる。

- (1) 増粘剤ウェランガムを添加することで、ポンプ圧による軽量粗骨材の吸水を抑制することが可能であり、圧送性および圧送後の流動性の低下を軽減できる。
- (2) 配管長100m程度の圧送を行う際には、コンクリートの流動性をスランプフロー500mm程度以上とすることが有効である。
- (3) 上記の対策を行うことで、気乾状態の独立空隙型人工軽量骨材を使用した水セメント比40%程度の高強度コンクリートの円滑な圧送を行うことができる。
- (4) 非排水加圧ブリーディング試験により、ポンプ圧送後のコンクリートの流動性をある程度評価できる。
- (5) 圧送性確保するために流動性を高めたコンクリートは、横移動やバイブレータによる振動締固めに対して軽量粗骨材が浮き上がる材料分離のリスクがある。
- (6) 軽量粗骨材の浮上がりは、自由落下高さの影響よりも、過度な横移動や振動締固めの影響の方が大きい。なお、高さ3m程度の自由落下に対する分離抵抗性が確保された理由として、水セメント比が小さく、増粘剤ウェランガムを添加したことが主たる理由であるが、軽量であ

るがゆえに落下・衝突に伴うエネルギーが小さいことも影響している。

- (7) 打込みに際しては、横移動が生じないように筒先を連続的に動かす。これは、普通骨材コンクリートも同じであるが、骨材の浮上りを防止する上で重要な作業である。
- (8) 適切な圧送性を付与した独立空隙型人工軽量骨材コンクリートは、流動性が高く、骨材の形状が球形に近いので、鉄筋間でのロッキングが生じにくく、また、ロッキングしても解消されやすく、短い締固め時間で良好な充填性が得られる。
- (9) 締固めに際しては、骨材の浮上りの状況を観察しながら締め固める必要がある。その目安としては、 $\phi 28\sim 40\text{mm}$ の細径の内部振動機を用い、締固め位置の間隔を 50cm 程度、1 箇所の締固め時間 5 秒程度とする。
- (10) 仕上げに際しては、打込み上面に浮き上がってくる骨材を荒均しの段階で、押し込んでおく必要がある。その際、ジッターバッグを使用するのが効果的である。
- (11) 最終の仕上げの段階では、こてでしっかり押さえる。その際、仕上げ補助剤を用いるのが有効である。
- (12) 仕上がり面が 4 %程度の勾配であれば、仕上げが可能である。

【配合設計のポイント】

- ・独立空隙型軽量骨材は、気乾状態で用いることになるため、施工中の吸水抑制がポイントとなる。
- ・そのため、水セメント比を 40%以下とし、増粘剤ウェランガムを添加する。
- ・凍結融解抵抗性を考慮する場合には、打込み時の目標空気量を 6.0~7.0%とする。
- ・単位水量を 160~170kg/m³程度、単位粗骨材容積を 300~330l/m³程度とする。
- ・流動性保持性能の高い高性能 AE 減水剤を使用する。
- ・圧送前のスランプフローを 500mm 程度以上とする。

【施工のポイント】

- ・ピストン前面圧を可能な限り小さくして圧送する。具体的には、3~4N/mm²程度以下となるように圧送計画を立案する。
- ・ピストン前面圧をモニタリングしながら圧送する。前面圧が上昇を続ける傾向が認められたら、圧送を中断し、圧送速度を見直す。これは、通常のコングリートと同じである。
- ・打込みに際しては、コンクリートの流動性が高く、横移動が生じやすいため、流動に伴う材料分離（骨材の浮上がり）が生じやすく、筒先を可能な限りこまめに移動する。
- ・過度の振動締固めは、鉛直方向の材料分離（骨材の浮上がり）を引き起こすため、打込み上面の様子（骨材の浮上がり）を注視しながら適切に締め固める。
- ・仕上げ作業において、骨材の浮上がりが見られたら、荒均しの段階でジッターバッグなどを用いて骨材をコンクリート中に押し込む。ペーストを表面に浮上させ、木ごて、金ごてでしっかりと押さえる。

普通骨材コンクリートの振動締固めにおける「骨材が沈む」現象とは、真逆の「骨材が浮き上がる」現象が起きるということを、念頭において施工する必要がある。特に、骨材の浮上がりは、目視で確認できることから、過度の振動締固めを行わないように、十分に配慮する。

「第5章 独立空隙型人工軽量骨材を用いた自己充填性を有する高流動コンクリートの提案」では、第4章で示した独立空隙型人工軽量骨材を用いたコンクリートの施工において、バイブレータによる振動締固めによって骨材が浮き上がり、打込み上面の均しの際にジッターバッグ等の器具で骨材を押し込むといった特殊な作業の必要性が示されたことを受け、振動締固めを行わなくても、型枠内の隅々まで充填し、かつ、骨材の浮上りを抑制してコンクリートの均一性を高めるために、自己充填性を有する高流動コンクリートの実現を目指した。軽量骨材は、普通骨材に比べてモルタルとの密度差が大きく、流動性を高めた場合には、材料分離が生じやすくなる。流動性を高めた際に、この密度差をいかに克服し、材料分離抵抗性を保つか、配合設計のポイントであった。モルタルと粗骨材の密度差、水粉体容積比、軽量粗骨材の種類および単位量に着目した実験を行い、それらの配合条件が流動性と材料分離抵抗性に及ぼす影響を評価した。そして、その結果をもとに、軽量骨材の特性に応じた高流動コンクリートの配合設計手法を導き出した。これらの知見をまとめると以下ようになる。

- (1) 骨材の絶乾密度が 0.9g/cm^3 、モルタルとの密度差が 1.2g/cm^3 を超えるような場合であっても、ペーストの粘性を適切に調整することで、骨材の浮上りのない高流動コンクリートを製造できる。
- (2) 軽量骨材を用いた高流動コンクリートは水平流動方向よりも流動先端部の鉛直方向の材料分離が顕著となる。
- (3) 単位粗骨材量は 300l/m^3 程度が適当である。
- (4) 900mm 流動性試験により、軽量骨材を用いた高流動コンクリートの自己充填性、材料分離抵抗性の評価が可能である。
- (5) 普通骨材を用いた場合と同様、 V_{75} 漏斗流下時間と 500mm フロー到達時間には高い相関があり、両者は配合設計を行う際の自己充填性、材料分離抵抗性の指標となる。
- (6) 軽量骨材とモルタルとの密度差に応じて、良好な材料分離抵抗性が得られる V_{75} 漏斗流下時間と 500mm フローと到達時間が存在する。これらを満たすように、水粉体容積比を設定することで、適切な高流動コンクリートの配合を選定することができる。

これらを盛り込んだ自己充填性を有する軽量骨材コンクリートの配合選定フローを本論文中に図-5.4.1として示し、配合選定手法として提案した。

「第6章 実構造物への適用」では、設計条件、構造条件、施工条件に応じたワーカビリティを有する軽量骨材コンクリートを実構造物へ適用した事例をとりまとめた。第4章、第5章で記した本研究の成果を実証するとともに、「軽量性」と「ワーカビリティ」によって現場の課題解決に貢献した。実構造物への適用を通じて得られた知見をまとめると以下ようになる。

- (1) ダム仮排水路閉塞工事では、独立空隙型の人工軽量粗骨材を用いた単位容積質量 $1,750\text{kg/m}^3$ 、スランプ 12cm のコンクリートでプレキャスト埋設型枠を作製した。部材の軽量化により、工期短縮、工事費削減、施工の合理化および閉塞工事の安全性向上を実現した。
- (2) 新幹線高架橋 PC 上部工に、独立空隙型人工軽量骨材を用いた単位容積質量 $1,800\text{kg/m}^3$ のコンクリートを大規模工事に初めて適用した。第4章に示したワーカビリティに関する事前検討や種々の施工実験を通じて得られた知見を施工計画に反映し、施工管理を十分に行ったことで、順調に施工を終了することができた。材料費（コンクリート単価）は増大したものの、主桁重量が 22%軽量化され、下部構造の簡素化、押出し架設などの建設機械の小型化が可能となり、約 10%のコスト削減を実現した。

- (3)鋼ローゼ橋アーチリブ補強工事では、軽量骨材を用いた自己充填性を有する高流動コンクリートをアーチリブ内に充填するという新しい補強工法に取り組んだ。第5章の研究成果を反映させ、単位容積質量 $1,750\text{kg/m}^3$ 、骨材全てに人工軽量骨材を使用した高流動コンクリートによって、アーチリブの合理的な補強を実現した。
- (4)床版厚 162mm という薄肉の鋼コンクリートフルサンドイッチ合成床版に、粗骨材に軽量骨材を用いた自己充填性を有する高流動コンクリートを試験的に適用した。第5章の研究成果を反映させ、モルタルと粗骨材の密度差を考慮して水粉体容積比を調整した単位容積質量 $1,750\text{kg/m}^3$ の高流動コンクリートは、優れた充填性を示し、薄肉で軽量のサンドイッチ合成床版の実現性を示した。
- (5)軟弱地盤上に立つモノレール橋脚の支柱杭基礎の耐震補強工事には、単位容積質量 $1,750\text{kg/m}^3$ 以下の水中不分離性コンクリートと自己充填性を有する高流動コンクリートを適用した。海上運搬に約2時間を要する厳しい施工条件においても、軽量性と自己充填性を確保し、耐震補強工事を合理的に行うことができた。
- (6)河川内の軟弱地盤上に立つ鉄道橋脚の基礎を水中コンクリートで巻き立てる耐震補強工事に、単位容積質量 $1,750\text{kg/m}^3$ 以下の水中不分離性コンクリートを適用した。水平換算距離が 240m という圧送条件において、圧送性を確保しながら所定の品質を確保することができた。
- (7)圧縮強度 150N/mm^2 レベルの超高強度コンクリートの自己収縮を低減する手法として、粗骨材の一部に軽量骨材を用いるとともに収縮低減剤を併用する方法を検討し、公共デッキ（歩道橋）の主桁に適用した。配筋条件（鋼材量）や構造条件（橋面の勾配）に応じて、自己充填型（スランプフロー600mm）と締固め併用型（スランプフロー400mm）の配合を使い分け、合理的な施工を実現した。

これらの適用事例は、構造物に求められる性能、施工条件に適したワーカビリティを、コンクリートの材料および配合設計でサポートして実現した事例であり、人工軽量骨材をうまく活用することで、要求に応えられることを示すことができた。また、その施工に本研究成果を反映させることで、円滑に工事を完了させることができた。

7. 2 今後の展望

我が国において人工軽量骨材が商品化され、土木構造物に初めて使われるようになった昭和39年(1964年、首都高速三宅坂、国鉄高円寺駅、日本道路公団花輪跨道橋)から、56年が経過した。この間に様々な構造物の建設において、軽量骨材コンクリートの「軽量性」を利点として捉え、その利点を活用して、設計・施工における様々な課題解決がなされてきた。軽量骨材自身の研究開発や、それらを用いた軽量骨材コンクリートの材料特性や施工技術に関する研究も進み、設計・施工基準も整備され、普通骨材コンクリートと同じように、施工ができるようになった。軽量骨材を用いて構築された構造物は、すでに役割を終えたものもあれば、今なお、健全に供用されているものもあり、長期の耐久性に関する知見も蓄積されている。

本研究で、中心的に取り扱った独立空隙型人工軽量骨材は、1999年に製品化され、土木分野では、本研究の対象とした奥三面ダム、東北新幹線沼宮内Biのほか、北海道縦貫自動車道シラリカ川橋、仙台北部道路橋、山形新幹線稲舟川橋梁等に適用され、従来の軽量骨材よりも耐久性を改善しつつ、施工の合理化に寄与してきた。しかしながら、その後の需要の低迷により、2005年頃には、残念ながら製造が中止されている。さらには、2021年3月末をもって、関西エリアで広く活用されてきた人工軽量骨材(アサノライト)の製造・販売が中止される予定となっている。第2章で記した通り、2000年以降では、2001年をピークに軽量骨材コンクリートの出荷量の低迷しているのは事実である。一方で、建設現場における生産性向上を目的に、i-Constructionが掲げられ、その中では、プレキャスト埋設型枠やプレキャスト部材の利活用が推進され、プレキャスト製品が多く用いられるようになるであろうし、地震や疲労荷重など、設計当初には想定していなかった作用や過酷な供用環境における経年劣化に対して、既設構造物を補修あるいは補強する工事、道路床版の取替えをはじめとする大規模な更新工事も年々増えている。このような条件では、コンクリートの「軽量化」によって、設計施工の合理化が図れることが数多くあるものと思われる。現に、第2章で紹介したように、膨張材併用型軽量骨材コンクリート、下水処理場のリニューアル工事に向けた軽量骨材コンクリート、取替え用高強度プレキャストPC床版、超軽量高流動コンクリートを用いた取替え用サンドイッチ型複合床版、など市場を見据えた新たな研究開発や実工事に向けた取り組みが始まっている。低迷していた軽量骨材コンクリートの需要にも変化が生まれてきている。

コンクリート構造物の建設に際しては、構造物に求められる性能や供用環境、施工環境に応じた合理的な工法が適用されることは言うまでもない。コンクリートに「軽量性」が求められる際には、軽量骨材コンクリートが候補として挙げられ、構造物に求められる性能を満たすための材料、配合、施工に関する技術が備わっていなければならない。本研究の成果が、多くのシーンで活用されることを強く期待する。

謝 辞

本論文のとりまとめにあたり、様々な方々に熱心なご指導とご鞭撻、そして温かいご支援を頂戴いたしました。

横浜国立大学大学院都市イノベーション学府・研究院 教授・細田暁教授には、草稿論文の段階から内容に関する議論、論文の審査・とりまとめに至るまで、終始、熱心にご指導とご鞭撻を賜りました。ここに改めて感謝の意を表します。横浜国立大学大学院都市イノベーション学府・研究院 教授・山田均先生、前川宏一先生、准教授・藤山知加子先生、徳島大学大学院社会産業理工学研究部 教授・橋本親典先生には、論文審査にあたり、貴重なご助言とご示唆を賜りました。御高配に対し、深く感謝の意を申し上げます。

学位の取得に向けた本論文のとりまとめは、横浜国立大学 名誉教授・池田尚治先生、同大学院 元教授・椿龍哉先生に、学生時代から現在に至るまで長きにわたり、コンクリート工学のあり方について示唆に富んだご指導を頂いたことが端緒となっています。ここに厚く御礼申し上げます。

本論文は、著者が勤務先である鹿島建設（株）で取り組んでまいりました、軽量骨材コンクリート、高流動コンクリートに関する研究成果と実構造物への適用成果をとりまとめたものであります。本研究の遂行ならびに論文のとりまとめにあたりましては、土木管理本部土木技術部長・坂田昇博士には、社会人そして、研究者・技術者として駆け出しの頃から、温かいご理解を頂き、時には厳しくご指導を賜り、学位の取得に向けて強くご支援を頂戴いたしました。そして、信田佳延様（現土木学会）、技術研究所の主席研究員・坂井吾郎博士、土木材料グループ長・渡邊賢三博士には、終始背中を押して頂きました。ここに感謝の意を表します。

本研究にあたりましては、社内の大勢の方々にご協力を頂きました。軽量骨材コンクリートの基礎実験の推進に関しましては、平石剛紀様（現関東支店）、福田一郎様（現関東支店）にご協力を頂きました。また、実規模施工実験に際しては、伊東祐之様（現土木管理本部）、南浩郎様（土木設計本部）、大久保秀樹様（現関東支店）に多大なご協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

また、軽量骨材の基本特性や取扱い方法につきまして、太平洋セメント（株）・岡本享久博士（現立命館大学教授）、栩木隆様（現太平洋コンサルタント（株））、石川雄康博士（太平洋コンサルタント（株））、児玉明彦様（現江南一小野田水泥有限公司）に多くのご指導を頂きました。さらには、共同研究を進めさせて頂いた北海道開発局・池田憲二博士（現（株）構研エンジニアリング）、三田村浩博士（現（株）サンブリッジ）には、フィールドの提供や研究方針についてご指導を頂きました。ここに厚く御礼申し上げます。

新設構造物の適用に際しましては、新潟県・峰村修博士、東日本旅客鉄道（株）・在田博之様、大郷貴之様ほかの皆様にご理解とご指導を頂きました。また、既設橋梁の補強工事への技術展開に際しましては、宮地エンジニアリング（株）・北原稔様にご尽力を頂くとともに、長岡技術科学大学名誉教授・丸山久一先生に、貴重なご助言を頂戴いたしました。改めて、御礼申し上げます。

このほか、多くの方々のご好意ならびに関係各位のご指導とご鞭撻を賜りました。ここに甚大なる謝意を表する次第です。

最期に、著者の研究者・技術者としての信念とそれに基づく社会活動および本論文のとりまとめを支え、励ましてくれた妻美季と、父の不在がちであった家庭にあっても強くたくましく育った長男悠成、いつも明るい笑顔で和ませてくれた長女茉莉南、そして、人生において進むべき道を常に示してくれた亡き父昭一と、温かく見守ってくれた母佐代子に心から感謝いたします。

2020年 3月 吉日

柳 井 修 司

付 録

- ・ 本研究に関する主な発表論文
- ・ 本研究に関するその他の発表論文
- ・ その他の執筆論文

・本研究に関する主な発表論文（主な査読付き論文）

①高性能軽量コンクリートのポンプ圧送性に関する一考察

坂田昇, 柳井修司, 石川雄康, 榎木隆

コンクリート工学年次論文集, Vol.21, No.2, pp.355～360, 1999.6

【抄録】 従来の軽量骨材に比べて大幅に吸水率が小さい軽量骨材が開発され、軽量骨材コンクリートのポンプ圧送性改善および凍結融解抵抗性の向上が期待されている。本論文では、この軽量骨材を用いたコンクリートのポンプ圧送性について、室内試験および施工性実験によって検討した。その結果、その軽量骨材を絶乾状態で使用した場合でも、圧力が作用しない状態ではコンクリート中の軽量骨材はほとんど吸水せず、コンクリートの流動性の経時変化に影響を及ぼさないこと、圧送前のコンクリートのスランプフローを 50cm 程度とすることによって十分に圧送が可能であることなどが分かった。

②高性能軽量コンクリートの配合がポンプ圧送性に及ぼす影響

柳井修司, 坂田昇, 信田佳延, 石川雄康

コンクリート工学年次論文集 Vol.22, No.2, pp.1405～1410, 2000.6

【抄録】 流紋岩系真珠岩を原料とする独立空隙型の高性能軽量骨材を用いたコンクリートの配合がポンプ圧送性に及ぼす影響を検討するために流動性、水セメント比、特殊増粘剤ウェランガムの有無などの配合要因を変化させて室内試験およびポンプ圧送試験を行った。その結果、ウェランガムの添加により、加圧による骨材内部への吸水が抑制され、流動性の低下、圧力損失、吐出効率などのポンプ圧送性が改善されること、コンクリートのスランプフローを 550mm 程度とすることで円滑なポンプ圧送が可能であること、水セメント比 38% の高強度軽量コンクリートのポンプ圧送が可能であることが明らかとなった。

③高性能軽量コンクリートを用いたPC橋梁用プレキャストセグメントの試験施工

南浩郎, 柳井修司, 坂田昇, 児玉明彦

コンクリート工学年次論文集 Vol.22, No.2, pp.1411～1416, 2000.6

【抄録】 流紋岩系真珠岩を原料とする高性能軽量骨材を用いたコンクリートを橋梁上部工プレキャストセグメントに適用することを想定して、幅 10.6m、桁高 2.0m、セグメント長 1.5m の実規模セグメントの試験施工を行った。試験施工に供したコンクリートは、設計基準強度 40N/mm²、単位容積質量 1,800kg/m³ の高強度軽量コンクリートであり、コンクリートポンプ車のブームを用いて打ち込んだ。試験施工に供した軽量コンクリートは良好な性状を有しており、セグメントの出来形は良好であった。

④ダム仮排水路閉塞工のプレキャスト型枠への高性能軽量コンクリートの適用

峰村修，丸山久一，坂田昇，柳井修司

コンクリート工学年次論文集，Vol. 22，No. 2，pp. 1417-1422，2000. 6

【抄録】 ダム本体工事中に川を転流させていた仮排水路の閉塞工事は，ダム工事で重要な工種であるとともに非洪水期間の限られた工期の中で確実な施工が求められる。また，万一の出水による危険性を低減させるためにも工程を少しでも短縮することが求められる。そこで，架設・運搬・設置において，工程短縮に有利な人工軽量骨材コンクリートで製作した軽量プレキャスト型枠をこの閉塞工事に適用した。人工軽量骨材に従来のものよりも軽量の絶乾密度 0.9g/cm^3 の独立空隙型人工軽量骨材を用い，コンクリートの単位容積質量を $1,750\text{kg/m}^3$ とした。その結果，型枠工の更なる合理化が図れ，閉塞工の大幅な工程短縮を実現することができた。

⑤独立空隙型人工軽量骨材を使用したコンクリートによる PC 連続箱桁橋の施工

在田浩之，大郷貴之，大久保秀樹，柳井修司

コンクリート工学年次論文集 Vol.23，No.2，pp.997～1002，2001.6

【抄録】 東北新幹線盛岡～八戸間に建設された沼宮内 B i は，11 径間連続 PC 箱桁橋であり，その上部工に真珠岩を主原料とする独立空隙型人工軽量骨材を用いた軽量骨材コンクリート（設計基準強度 40N/mm^2 ，単位容積質量 $1,800\text{kg/m}^3$ ）が適用された。材料費（コンクリート単価）は増大するもの，主桁重量が 22% 軽量化され，下部構造の簡素化，押し出し架設に必要な建設機械の小型化などが可能となり，約 10% のコスト縮減が可能であった。本報では，沼宮内 B i 上部工工事における軽量コンクリートの特性，施工に至るまでの検討内容および施工結果について報告する。

⑥高強度軽量コンクリートの橋梁への適用性

柳井修司，坂田昇，三田村浩，池田憲二

コンクリート工学年次論文集 Vol.23，No.2，pp.1093～1098，2001.6

【抄録】 高強度軽量コンクリートを橋梁へ適用する技術を開発するために，実規模大の PC 橋梁プレキャストセグメントおよび鋼コンクリートサンドイッチ合成床版を有する単純桁橋を試験的に施工した。プレキャストセグメントおよび橋台には真珠岩を主原料とする独立空隙型人工軽量骨材を用いた設計基準強度 50N/mm^2 ，単位容積質量 $1,850\text{kg/m}^3$ の高強度軽量コンクリートを，合成床版には頁岩を主原料とする人工軽量骨材を用いた自己充填性を有する軽量コンクリートを適用した。その結果，これらの軽量コンクリートの施工性は良好であり，実構造物への適用が可能であることを明らかにした。

⑦高性能軽量・高流動コンクリートに関する研究

柳井修司, 坂田昇, 信田佳延, 岡本享久

土木学会論文集, No.648/V-47, pp.23~32, 2000.5

【抄録】 人工軽量骨材コンクリート I 種に自己充填性を付与することを目的として, 水粉体容積比, モルタルの単位容積質量, 軽量粗骨材の種類および単位量を要因として, 流動性試験, 充填性試験および材料分離抵抗性試験を行った。その結果, 人工軽量粗骨材を使用した高流動コンクリートは, 粗骨材の密度が小さいことから, 粗骨材の浮上りによる材料分離が生じやすいこと, 適正なモルタルの粘性 (水粉体容積比), モルタルの単位容積質量および単位粗骨材量を選定することで, 軽量粗骨材の特性に応じて, 高流動性, 自己充填性, 材料分離抵抗性を有する軽量骨材コンクリートの配合を選定できることが分かった。

⑧鋼ローゼ橋アーチリブへの軽量高流動コンクリート充てん工法

北原稔, 棚木隆, 柳井修司

コンクリート工学, Vol.40, No.2, pp.57~63, 2002.2

【抄録】 一般国道 8 号線に架橋されている上輪橋はアーチ支間 120m の上路式鋼ローゼ橋であるが, 交通量の増大や車両の大型化による影響および強風による横揺れや海塩粒子の飛来による部材の腐食により, 応力的に過酷な状況に置かれている。このため, 種々の補強を行って耐荷力や耐震性の向上が図られた。補強工の内, アーチリブの剛性を高めるために, リブ内部にコンクリートを充填する工法が採用されたが, 自重の増加を抑制しつつ, 確実な充填を行うために, 自己充填性を有する軽量高流動コンクリートを適用し, 良好な結果が得られた。

⑨Study on Mix Proportion for Self-Compacting High Performance Lightweight Aggregate Concrete

Shuji YANAI, Noboru SAKATA, Yoshinobu NOBUTA, Takahisa OKAMOTO

2nd International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete, Kristiansand, Norwegian Concrete Association, pp.705-716, 2000.6

【Abstract】 Use of smaller cross sections of structural members and reduction in dead loads in massive civil structures have become important topics in recent years. These members are often densely packed with steel reinforcing bars and the concrete is required to possess high strength, lightweight and self compactability. With the objectives of endowing lightweight aggregate concrete with self compactability and developing high performance lightweight concrete having high strength and excellent durability, various tests were carried out as part of this research to evaluate self compactability, strength characteristics and durability of concrete by varying the type of aggregate, unit quantity of coarse aggregate and water to powder volume ratio. The results of the tests showed that concrete could be endowed with excellent flowability, self compactability and resistance to material segregation by adjusting the unit quantity of lightweight aggregate and water to powder volume ratio according to the properties of lightweight aggregate. It was also verified experimentally that a high compressive strength of about 50N/mm² and excellent resistance to freezing and thawing could be obtained.

・本研究に関するその他の発表論文

- 1) 石川雄康, 児玉明彦, 坂田昇, 柳井修司: 高性能軽量骨材の吸水特性がコンクリートのポンプ圧送に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.349-354, 1999.06
- 2) 柳井修司, 坂田昇, 渡辺賢三, 信田佳延: 高性能軽量コンクリートの自己充填性付与に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.337-342, 1999.06
- 3) 峰村修, 丸山久一, 坂田昇, 柳井修司, 柏木亮二: 高流動コンクリートの長距離ポンプ圧送試験, 土木学会年次学術講演会講演概要集第5部, Vol.54th, pp.926-927, 1999.08
- 4) 坂田昇, 柳井修司, 平石剛紀, 信田佳延: 増粘剤混入型高性能 AE 減水剤を用いた高流動コンクリートの流動性, 土木学会年次学術講演会講演概要集第5部, Vol.54th, pp.890-891, 1999.08
- 5) 平石剛紀, 坂田昇, 柳井修司, 信田佳延, 石川雄康: 高性能軽量骨材コンクリートのポンプ圧送実験, 土木学会年次学術講演会講演概要集第5部, Vol.54th, pp.302-303, 1999.08
- 6) 柳井修司, 坂田昇, 信田佳延, 石川雄康, 岡本享久: 軽量骨材コンクリートのポンプ圧送性改善に関する実験的検討, 土木学会年次学術講演会講演概要集第5部, Vol.54th, pp.300-301, 1999.08
- 7) 石川雄康, 岡本享久, 坂田昇, 柳井修司: 高性能軽量コンクリートのポンプ圧送性に関する実験的検討, 土木学会年次学術講演会講演概要集第5部, Vol.54th, pp.298-299, 1999.08
- 8) 野上良浩, 柳井修司, 坂田昇, 岡本享久, 丸山公一: 軽量粗骨材を用いた高流動コンクリートの流動性評価試験, 土木学会年次学術講演会講演概要集第5部, Vol.54th, pp.294-295, 1999.08
- 9) 坂田昇, 柳井修司, 石川雄康, 榎木隆: 高性能軽量コンクリートのポンプ圧送性に関する一考察, 鹿島技術研究所年報, Vol.47, pp.31-32, 1999.09
- 10) 柳井修司, 坂田昇, 渡辺賢三, 信田佳延: 高性能軽量・高流動コンクリートの開発, 鹿島技術研究所年報, Vol.47, pp.25-30, 1999.09
- 11) 増川淳二, 須田久美子, 柳井修司, 大塚一雄: 高強度軽量コンクリートを用いた中空断面柱部材の変形性能, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.3, pp.229-234, 2000.06
- 12) 宇津木一弘, 南浩郎, 柳井修司, 坂田昇: 高性能軽量コンクリートを用いた PC 橋梁プレキャストセグメント緊張時の挙動, 土木学会年次学術講演会講演概要集第5部, Vol.55th, pp.1064-1065, 2000.08
- 13) 柳井修司, 坂田昇, 平石剛紀, 石川雄康, 小幡浩之: 増粘剤が軽量骨材コンクリートのポンプ圧送性に及ぼす影響, 土木学会年次学術講演会講演概要集第5部, Vol.55th, pp.846-847, 2000.08
- 14) 南浩郎, 柳井修司, 坂田昇, 平石剛紀, 榎木隆: 高性能軽量コンクリートによる PC 橋梁プレキャストセグメントの施工実験, 土木学会年次学術講演会講演概要集第5部, Vol.55th, pp.480-481, 2000.08
- 15) 小幡浩之, 森寛晃, 石川雄康, 柳井修司, 坂田昇: 軽量コンクリートの加圧および経時によるスランプロスに関する一考察, 土木学会年次学術講演会講演概要集第5部, Vol.55th, pp.174-175, 2000.08
- 16) 南浩郎, 坂田昇, 柳井修司, 児玉明彦: 独立空隙型軽量骨材を用いたコンクリートによる PC 橋梁プレキャストセグメントの試験施工, 日本コンクリート工学協会論文集, No.49, pp.165-170, 2000.08
- 17) 峰村修, 丸山久一, 坂田昇, 柳井修司: 独立空隙型軽量骨材を用いたコンクリートのダム仮排水路閉塞工プレキャスト型枠への適用, 日本コンクリート工学協会論文集, No.49, pp.133-140,

2000.08

- 18) 宇津木一弘, 南浩郎, 坂田昇, 柳井修司: 独立空隙型軽量骨材を用いたコンクリートを適用した PC 橋梁プレキャストセグメントの挙動, 日本コンクリート工学協会論文集, No.49, pp.113-118, 2000.08
- 19) 福田一郎, 宇津木一弘, 遠藤史, 柳井修司: 独立空隙型軽量骨材を用いたコンクリートの PC 定着体の載荷試験, 日本コンクリート工学協会論文集, No.49, pp.107-112, 2000.08
- 20) 増川淳二, 須田久美子, 坂田昇, 柳井修司, 大塚一雄: 独立空隙型軽量骨材を用いたコンクリートを適用した中空断面柱部材の変形性能, 日本コンクリート工学協会論文集, No.49, pp.79-84, 2000.08
- 21) 平石剛紀, 柳井修司, 坂田昇, 石川雄康: 独立空隙型軽量骨材を用いたコンクリートのポンプ圧送性, 日本コンクリート工学協会論文集, No.49, pp.71-78, 2000.08
- 22) 柳井修司, 坂田昇, 信田佳延, 岡本享久: 低吸水性型軽量骨材を用いたコンクリートの自己充てん性付与に関する研究, 日本コンクリート工学協会論文集, No.49, pp.63-70, 2000.08
- 23) 福田一郎, 宇津木一弘, 柳井修司, 坂田昇: 高性能軽量コンクリートを用いた PC 定着部の耐荷性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, pp.613-618, 2001.06
- 24) 坂田昇, 柳井修司, MONTYH, 吉崎政人: 併用系高流動コンクリートの新しい増粘剤に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.997-1002, 2001.06
- 25) 柳井修司, 坂田昇, 平石剛紀, 遠藤哲朗, 大久保秀樹, 在田浩之: 独立空隙型人工軽量骨材を使用したコンクリートによる 11 径間 PC 連続箱桁橋の施工沼宮内 Bi 新設工事, 鹿島技術研究所年報, Vol.49, pp.229-234, 2001.09
- 26) 三田村浩, 池田憲二, 柳井修司, 坂田昇: 軽量高流動コンクリートを用いた鋼コンクリートサンドイッチ床版の施工技術の開発, 土木学会年次学術講演会講演概要集第 5 部, Vol.56th, pp.986-987, 2001.09
- 27) 佐々木敏也, 谷口俊一, 在田浩之, 大久保秀樹, 柳井修司: 独立空隙型人工軽量骨材を用いたコンクリートによる 11 径間連続 PC 箱桁橋の施工東北新幹線沼宮内 Bi 工事, セメント・コンクリート, No.660, pp.22-30, 2002.02
- 28) 佐々木敏也, 谷口俊一, 依田佐知子, 柳井修司: 東北新幹線沼宮内橋への軽量コンクリートの適用, コンクリート工学, Vol.40, No.2, pp.47-55, 2002.02
- 29) 高田和法, 柳井修司, 渡部貴裕, 一宮利通: 超高強度コンクリートの自己収縮低減に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.1007-1012, 2003.07
- 30) 井上美佐男, 梅田浩行, 高麗幹大, 芝田正則, 朝倉良介, 熊部淳, 柳井修司, 岸田哲哉, 久保亮: 人工軽量骨材を用いた水中不分離性コンクリートおよび高流動コンクリートの水上施工—東京モノレール耐震補強工事—, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.68th, No.V-572, 2013.08
- 31) Yanai,S., Taniguchi,S., Koizumi,K., Okubo,H. : Application of High Performance Lightweight Aggregate Concrete for Construction of Pre-stressed Concrete Box girder Bridge, fib 2002 OSAKA, 2002.10

・その他の執筆論文（本研究以外のもの）

- 1) 山口隆裕, 滝沢晶, 柳井修司, 池田尚治: 準動的載荷実験及び振動台実験におけるひずみ速度の影響について, 土木学会年次学術講演会講演概要集第5部, Vol.48th, pp.564-565, 1993.09
- 2) 山口隆裕, 武村浩志, 柳井修司, 池田尚治: 鉄筋コンクリート柱の耐震性能とその動的挙動, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.2, pp.1265-1270, 1994.06
- 3) 柳井修司, 山口隆裕, 池田尚治: 鉄筋コンクリート2層ラーメンにおける地震応答の動的映像化実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.2, pp.481-486, 1995.06
- 4) 大野晋也, 柳井修司, 山口隆裕, 池田尚治: 鉄筋コンクリート2層ラーメンの地震応答に関する動的映像化の研究, 土木学会年次学術講演会講演概要集第5部, Vol.50th, pp.846-847, 1995.09
- 5) 柳井修司, 大野俊夫, 瀬戸謙一郎, SUDJONO.A.S: 高強度コンクリートの粗骨材の品質判定法に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.1, pp.255-260, 1996.06
- 6) 柳井修司, 宮崎信一, 大野俊夫, 村田俊彦: 高強度・高流動コンクリートを用いた地中連続壁の構造体強度, 土木学会年次学術講演会講演概要集第5部, Vol.51st, pp.728-729, 1996.09
- 7) 岡田浩司, 大友忠典, 柳井修司, 津田寿, 半田修弘: 補強工事に適した高流動コンクリートの開発と適用例, 土木学会年次学術講演会講演概要集第5部, Vol.51st, pp.708-709, 1996.09
- 8) 大友忠典, 大野俊夫, 瀬戸謙一郎, 柳井修司, 安永正道: 高強度・高流動コンクリートを適用した高性能地中連続壁, 鹿島技術研究所年報, Vol.44, pp.7-12, 1996.12
- 9) 大友忠典, 岡田浩司, 柳井修司: 補修・補強用コンクリートの開発, 鹿島技術研究所年報, Vol.44, pp.1-6, 1996.12
- 10) 瀬戸謙一郎, 川村佳則, 柳井修司, 安永正道: LNG地下式貯槽への適用を考慮した低発熱高強度コンクリートの検討, 土木学会年次学術講演会講演概要集第5部, Vol.52nd, pp.1092-1093, 1997.09
- 11) 柳井修司, 村中俊夫, 山下忠, 末藤信行: 低発熱型高流動コンクリートを用いた鋼殻ケーソンの施工, 土木学会年次学術講演会講演概要集第5部, Vol.52nd, pp.900-901, 1997.09
- 12) 柳井修司, 服部英樹, 森信幸, 溝淵利明: 超高橋脚の施工における高強度コンクリートのポンプ圧送性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.1033-1038, 1998.06
- 13) 坂田昇, 柳井修司, 渡辺賢三, 瀬戸謙一郎, 溝淵利明, 信田佳延: 高流動コンクリートの利用拡大に関する研究, 鹿島技術研究所年報, Vol.46, pp.221-226, 1998.09
- 14) 枝松良展, 柳井修司, 松本清治郎: 高流動コンクリートを用いたセグメントの製造方法, 土木学会年次学術講演会講演概要集第6部, Vol.53rd, pp.356-357, 1998.09
- 15) 阿部隆英, 峰村修, 大内斉, 坂田昇, 柳井修司: ダム放流管周りへの高流動コンクリートの施工実績奥三面ダム本体工事, 土木学会年次学術講演会講演概要集第6部, Vol.53rd, pp.14-15, 1998.09
- 16) 柳井修司, 坂田昇, 渡辺賢三, 岸田哲哉: 自己充填コンクリートの新しい充填性評価試験方法に関する一考察, コンクリートの品質評価試験方法に関するシンポジウム論文集, 日本コンクリート工学協会, pp.109-116, 1998.12
- 17) 溝淵利明, 柳井修司, 坂田昇, 藤田時男: 早期脱型を考慮した高強度・高流動コンクリートの諸物性に関する検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.1111-1116, 1999.06
- 18) 南沢邦伸, 青柳隆浩, 河又清, 野木裕輔, 柳井修司, 坂田昇: MMST工法における高流動コンクリートの施工高速川崎縦貫線 KJ125(C)換気洞道工事, 土木学会年次学術講演会講演概要集

第5部, Vol.54th, pp.924-925, 1999.08

- 19) 青柳隆浩, 今井正智, 柳井修司, 坂田昇: MMST 工法における鋼殻内部充填コンクリートの配合検討, 土木学会年次学術講演会講演概要集第5部, Vol.54th, pp.922-923, 1999.08
- 20) 山口修一, 土谷義勝, 青柳隆浩, 柳井修司: 高流動コンクリートによる MMST の外殻構築首都高速川崎縦貫線大師ジャンクション換気洞道, トンネルと地下, Vol.31, No.3, pp.195-202, 2000.03
- 21) 青柳隆浩, 土谷義勝, 坂田昇, 柳井修司: 高流動コンクリートを用いた MMST 中詰めコンクリートの施工, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2, pp.1309-1314, 2000.06
- 22) 橋本親典, 浦野真次, 大内雅博, 近松竜一, 村田光, 柳井修司: 新しいコンシステンシーの測定方法の開発, コンクリート技術シリーズ, No.37, pp.29-40, 2000.07
- 23) 吉野公, 加賀谷誠, 国府勝郎, 早川健司, 前田悦孝, 牧保峯, 三岩敬孝, 柳井修司, 庄司芳之: 従来のコンシステンシーの定義と評価方法のまとめとその限界, コンクリート技術シリーズ, No.37, pp.11-20, 2000.07
- 24) 阿部功, 井上禎治, 柳井修司, 戸栗智仁, 中川雅夫: 高炉スラグ粗骨材を用いたコンクリートの火力発電所土木設備への適用について(その5) LNG 地下タンク底版の施工実績, 土木学会年次学術講演会講演概要集第5部, Vol.55th, pp.866-867, 2000.08
- 25) 吉川正, 三井隆, 田中耕一, 柳井修司, 中川浩二: 矩形シールドトンネル覆工としてのオープンサンドイッチ構造の開発と実施工による有効性の検証, 土木学会論文集, No.690, pp.133-146, 2001.11
- 26) 山田信行, 岡本裕昭, 伊東祐之, 柳井修司: 日本海東北目動車道「阿賀のかけはし」の施工 PC 上部工コンクリートの技術的検討と施工実績, コンクリート工学, Vol.40, No.8, pp.34-39, 2002.08
- 27) 柳井修司, 馬久地延幸, 前原俊夫, 戸所裕昌: 併用系高流動コンクリートの配合がポンプ圧送性に及ぼす影響, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.57th, V-693, 2002.09
- 28) 岸田哲哉, 田崎邦男, 柳井修司, 大野俊夫: 水中不分離性コンクリートの水中流動特性に関する一考察, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.57th, V-373, 2002.09
- 29) 柳井修司, 山田菊雄, 榎木正喜, 山内明夫: 超低粘性型 PC グラウトの矢作川橋脚部への適用, プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, Vol.13th, pp.133-136, 2004.09
- 30) 上東泰, 柳井修司, 山本徹, 佐々木伸行: 超低粘性型 PC グラウト材の開発と実構造物への適用, コンクリート構造物の補修、補強、アップグレードシンポジウム論文報告集, 日本材料学会, 第4巻, 2004.10
- 31) 榎木正喜, 鄭慶玉, 今井昌文, 柳井修司: 矢作川橋柱頭部の温度応力解析, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.59th, V-577, 2004.09
- 32) 垂水祐二, 柳井修司, 山田菊雄, 遠藤史, 伊藤康輔, 辻村隆: 矢作川橋の特殊解析, 橋梁と基礎, Vol.39, No.3, pp.22-27, 2005.03
- 33) 上東泰, 宮本健次, 榎木正喜, 柳井修司, 今井昌文: 世界初 [波形鋼板ウェブ PC・鋼複合斜張橋] における高強度コンクリートの施工第二東名高速道路矢作川橋上部工, セメント・コンクリート, No.701, pp.25-37, 2005.07
- 34) 上東泰, 宮本健次, 佐々木伸行, 柳井修司, 今井昌文: 矢作川橋における超低粘性型 PC グラウトの施工, コンクリート構造物の補修、補強、アップグレードシンポジウム論文報告集, 日本材料学会, 第5巻, 2005.10
- 35) 渡邊芳春, 芦田公伸, 相澤一裕, 柳井修司: 200N/mm²級超高強度繊維補強コンクリートの耐

- 久性と微細組織, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1271-1276, 2006.07
- 36) 柳井修司, 松原功明, 相澤一裕, 芦田公伸: 超高強度繊維補強コンクリートの強度特性に及ぼす養生条件の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1259-1264, 2006.07
- 37) 柳井修司, 松原功明, 坂井吾郎, 大野俊夫, 日紫喜剛啓: 超高強度繊維補強コンクリートの耐久性, 鹿島技術研究所年報, Vol.54, pp.79-84, 2006.09
- 38) 松原功明, 大野俊夫, 坂井吾郎, 柳井修司: 超高強度繊維補強コンクリートの製造性に関する諸検討, 鹿島技術研究所年報, Vol.54, pp.65-72, 2006.09
- 39) 新井崇裕, 柳井修司, 滝本邦彦, 須田悦弘: 中口径 P&PC セグメント工法に適した PC グラウト充てん工法に関する実験的検討, プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, Vol.15th, pp.475-478, 2006.09
- 40) 松原功明, 大野俊夫, 柳井修司, 芦田公伸, 渡邊芳春: 超高強度繊維補強コンクリートの養生方法と細孔構造, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.61st, No.V-360, 2006.09
- 41) 柳井修司, 松本信也, 久保亮, 柴田敏紀, 和泉隆: ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤の水中不分離性コンクリートへの適用性, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.61st, V-199, 2006.09
- 42) 柳井修司, 坂井吾郎, 大野俊夫, 芦田公伸: 超高強度繊維補強コンクリートの大量製造性に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.2, pp.145-150, 2007.07
- 43) 松原功明, 大野俊夫, 一宮利通, 坂井吾郎, 柳井修司, 平陽兵, 本田智昭, 渡邊有寿, 石井精一, 芦田公伸, 山田真人: 超高強度繊維補強コンクリート「サクセム」を使用した PC 橋梁の施工, 鹿島技術研究所年報, Vol.55, pp.171-178, 2007.09
- 44) 渡邊有寿, 大野俊夫, 一宮利通, 坂井吾郎, 柳井修司, 松原功明: 超高強度繊維補強コンクリートの大量製造と大断面部材への適用に関する検討, 鹿島技術研究所年報, Vol.55, pp.57-64, 2007.09
- 45) 久保亮, 柳井修司, 中村隆一郎, 岸田哲哉: 水中不分離性コンクリートの長距離圧送と品質について—若洲橋下部工事(その1)—, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.62nd, V-362, 2007.09
- 46) 松原功明, 大野俊夫, 坂井吾郎, 柳井修司, 盛田行彦, 渡邊有寿, 芦田公伸, 相澤一裕, 山本賢司: エトリングait生成系超高強度繊維補強コンクリートの水和に伴う発熱と養生中に高温履歴を受けた硬化体の諸物性, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.62nd, V-209, 2007.09
- 47) 坂田昇, 柳井修司: 高流動コンクリートの現在と未来流動性を安定するウェランガム、その効果に期待信頼性の高い構造物をつくる NV コンクリート工法, 月刊コンクリートテクノ, Vol.27, No.2, pp.54-59, 2008.02
- 48) 小林且典, 深田敦宏, 大隈充浩, 柳井修司: 大規模・大深度 LNG 地下タンクのコンクリートの施工, コンクリート工学, Vol.46, No.3, pp.38-45, 2008.03
- 49) 柳井修司, 近松竜一, 石川雄康, 河野広隆: コンクリートポンプ工法における施工の計画と実状に関する調査, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp.253-258, 2008.07
- 50) 渡邊有寿, 柳井修司, 坂本真, 大野俊夫: 超高強度繊維補強コンクリートの強度発現性状に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.243-248, 2008.07
- 51) 山口匡, 吉田英信, 堤和大, 柳井修司: P&PC セグメント工法の PC グラウト施工—さいたま市南浦和 2 号幹線(雨水貯留管)—, トンネルと地下, Vol.39, No.7, pp.507-514, 2008.07
- 52) 山口匡, 齋藤啓文, 堤和大, 柳井修司: P&PC セグメント工法における高チクソ型 PC グラウトの現場充てん性確認実験と施工実績～南浦和 2 号幹線築造工事～, 土木学会年次学術講演会

- 講演概要集, Vol.63rd, VI-009, 2008.08
- 53) 渡邊有寿, 柳井修司, 盛田行彦, 坂井吾郎, 大野俊夫, 坂田昇: 高流動コンクリート (NVコンクリート) によるコンクリート構造物の品質向上, 鹿島技術研究所年報, Vol.57, pp.161-166, 2009.09
- 54) 長田光司, 柳井修司: 地域に根ざしたコンクリート技術/4.コンクリートの製造・施工技術と地域性高速道路橋における高強度コンクリートの製造・施工 (中部地方), コンクリート工学, Vol.48, No.1, pp.97-101, 2010.01
- 55) 柳井修司: コンクリート構造物の非破壊検査非破壊検査に望むものーコンクリート構造物をめぐってー, 非破壊検査, Vol.59, No.4, pp.160-165, 2010.04
- 56) 渡邊有寿, 葭葉雅弘, 野口孝俊, 南浩郎, 大野俊夫, 柳井修司: 羽田空港 D 滑走路 UFC 床版製作における AFt 系 UFC の製造・品質管理結果, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.65th, V-526, 2010.08
- 57) 渡邊有寿, 柳井修司, 渡邊賢三, 向原健, 一宮利通, 大野俊夫: 超高強度繊維補強コンクリート「サクセム」の耐久性と最近の適用事例, 鹿島技術研究所年報, Vol.58, pp.177-184, 2010.09
- 58) 渡邊有寿, 柿崎智, 中園直志, 森井啓之, 江頭正之, 柳井修司: 1,500m 級の超長距離圧送性に向けたコンクリートの実験的検討と施工実績, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.66th, V-115, 2011.08
- 59) 坂田昇, 横関康祐, 坂井吾郎, 柳井修司, 林大介, 芦澤良一, 橋本学, 関健吾: 暴露試験による各種材料の長期的な耐久性に関する研究, 鹿島技術研究所年報, Vol.59, pp.61-66, 2011.09
- 60) 温品達也, 坂田昇, 渡邊賢三, 柳井修司: 表層透気試験で得られたコンクリート表層品質の判定結果に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1282, 2012.06
- 61) 渡邊賢三, 坂田昇, 温品達也, 柳井修司: 目視調査に基づくコンクリートの表層品質評価手法と品質向上に資する取組み, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1218, 2012.06
- 62) 橋本親典, 新藤竹文, 浦野真次, 柳井修司, 橋本紳一郎: 「コンクリートのポンプ施工指針 [2012年版]」の概要ーポンプ施工指針の変遷と今回の改訂ポイントー, コンクリート工学, Vol.50, No.7, pp.577-584, 2012.07
- 63) 渡邊有寿, 渡邊賢三, 柳井修司, 石井明俊, 大野俊夫: 超長距離圧送を可能としたトンネル中詰用発泡モルタルの基本特性ーアワモル工法の開発ー, 鹿島技術研究所年報, Vol.60, pp.111-116, 2012.09
- 64) 坂田昇, 柳井修司, 坂井吾郎, 中谷行博: 暑中コンクリート/6.施工・養生時の暑中対策土木工事における施工・養生時の暑中対策, コンクリート工学, Vol.51, No.5, pp.453-458, 2013.05
- 65) 温品達也, 渡邊賢三, 坂田昇, 柳井修司: コンクリート表面の色むら発生に及ぼす要因に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1109, 2013.06
- 66) 渡邊賢三, 坂田昇, 温品達也, 柳井修司: コンクリートの色むらに及ぼす剥離剤の影響に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1108, 2013.06
- 67) 紙本泰樹, 中尾俊司, 手塚康成, 柳井修司, 森孝之: 頂設・底設プラグコンクリートの施工実績ー倉敷国家石油ガス備蓄基地ー, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.68th, VI-213, 2013.08
- 68) 神田耕治, 平田周作, 綱川浩文, 柳井修司: 深度 110m の地中連続壁コンクリートの下端部の状況ー倉敷国家石油ガス備蓄基地 (配管堅坑工事その 1)ー, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.68th, VI-206, 2013.08
- 69) 柳井修司, 渡邊賢三, 森孝之, 手塚康成, 秋田伸, 前島俊雄: 配管堅坑プラグコンクリートの施工実績ー倉敷国家石油ガス備蓄基地 (配管堅坑工事その 3)ー, 土木学会年次学術講演会

- 講演概要集, Vol.68th, VI-208, 2013.08
- 70) 岸田哲哉, 久保亮, 秋田伸, 手塚康成, 渡邊有寿, 渡邊賢三, 柳井修司, 金戸辰彦: プラグコンクリートに用いた低発熱・低収縮高流動コンクリートの諸特性—倉敷国家石油ガス備蓄基地(配管堅坑工事その4)—, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.68th, VI-209, 2013.08
- 71) 新井淳一, 仲亀裕昭, 秋田伸, 清水大介, 手塚康成, 森孝之, 柳井修司, 金戸辰彦: 配管堅坑プラグコンクリートの温度ひび割れ対策—倉敷国家石油ガス備蓄基地(配管堅坑工事その5)—, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.68th, VI-210, 2013.08
- 72) 井上智裕, 新井淳一, 秋田伸, 清水大介, 手塚康成, 柳井修司, 金戸辰彦: エポキシ樹脂被覆金属管を用いたエアクーリング—倉敷国家石油ガス備蓄基地(配管堅坑工事その6)—, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.68th, VI-211, 2013.08
- 73) 秋田伸, 手塚康成, 渡邊賢三, 柳井修司, 森孝之, 前島俊雄: LPG 受入管周囲の防水処理に関する検討と施工—倉敷国家石油ガス備蓄基地(配管堅坑工事その7)—, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.68th, VI-212, 2013.08
- 74) 松川剛, 鈴木康治, 温品達也, 渡邊賢三, 柳井修司, 杜若善彦: 橋梁下部工におけるパイプクーリング工法の諸検討, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.68th, VI-022, 2013.08
- 75) 武藤正広, 熊部淳, 柳井修司, 黒川篤, 曾我部直樹: 橋梁上部工工事における高強度コンクリートの圧送試験と施工実績, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.68th, V-564, 2013.08
- 76) 国枝稔, 菅航太郎, 篠塚政則, 鎌田修, 熊部淳, 渡邊有寿, 柳井修司: 超高強度ひずみ硬化型セメント系複合材料(UHP-SHCC)とコンクリート床版の付着特性に関する研究, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.68th, V-438, 2013.08
- 77) 市川英敏, 渡邊賢三, 温品達也, 柳井修司, 伊藤康輔, 大岡隆: エアパイプクーリングによるPC 上部工の温度ひび割れ抑制技術, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.68th, V-222, 2013.08
- 78) 温品達也, 渡邊賢三, 渡邊有寿, 柳井修司, 坂田昇: コンクリート構造物の表層品質に及ぼす養生と剥離剤の影響, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.68th, V-108, 2013.08
- 79) 岩島保, 波田匡司, 坂本真, 柳井修司: 新名神高速道路「川下川橋」の施工—部位に応じたコンクリートの検討とその施工実績—, コンクリート工学, Vol.51, No.8, pp.641-647, 2013.08
- 80) 温品達也, 渡邊賢三, 柳井修司, 坂井吾郎, 坂田昇: コンクリート構造物の品質向上のための表層品質評価手法の開発, 鹿島技術研究所年報, Vol.61, pp.97-104, 2013.09
- 81) 温品達也, 渡邊賢三, 柳井修司, 坂田昇, 細田暁: 目視調査に基づくコンクリートの表層品質評価技術, コンクリート構造物の補修,補強,アップグレード論文報告集, Vol.13, pp.459-466, 2013.11
- 82) 高岸哲哉, 手塚康成, 柳井修司, 新井淳一, 前島俊雄: 倉敷国家石油ガス備蓄基地におけるプラグコンクリートの施工, セメント・コンクリート, No.802, pp.24-31, 2013.12
- 83) 渡邊有寿, 一宮利通, 柳井修司, 田中秀夫, 林田宏二, 坂田健一郎: 銚子沖洋上風力発電実証研究における基礎コンクリートの施工, セメント・コンクリート, No.808, pp.39-46, 2014.06
- 84) 藤原英, 竹市篤史, 日野博之, 柳井修司: 砕石粉を用いた吹付けコンクリートの検討と実工事への適用, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.69th, V-609, 2014.08
- 85) 石橋靖亨, 渡邊有寿, 柳井修司: 高温環境下に適した水中不分離性混和剤に関する実験的検討, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.69th, V-392, 2014.08
- 86) 川崎文義, 林英輝, 蓮野武志, 別府教, 栖原健太郎, 渡邊有寿, 青山達彦, 柳井修司: 場所打ちによる超高強度繊維補強コンクリート製道路橋の施工, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.69th, V-253, 2014.08

- 87) 青山達彦, 柳井修司, 渡邊有寿, 石橋靖亨, 栖原健太郎: 超高強度繊維補強コンクリートの打重ね部の一体性確保に関する基礎的実験, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.69th, V-245, 2014.08
- 88) 渡邊有寿, 一宮利通, 柳井修司, 石橋靖亨, 青山達彦, 林英輝, 栖原健太郎: 超高強度繊維補強コンクリート「サクセム」の場所打ち施工への展開ー小滝川橋梁へ向けた検討と施工実績ー, 鹿島技術研究所年報, Vol.62, pp.89-96, 2014.09
- 89) 蓮野武志, 渡邊有寿, 柳井修司, 栖原健太郎: 場所打ちによる超高強度繊維補強コンクリート製道路橋の施工, プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, Vol.23rd, pp.391-394, 2014.10
- 90) 国枝稔, 柳井修司, 渡邊有寿, 青山達彦, 鎌田修, 林信也: 岐阜大学「大学西橋」の施工ー超高強度ひずみ硬化型モルタル (UHP-SHCC) を用いた高耐久床版の施工ー, セメント・コンクリート, No.816, pp.19-25, 2015.02
- 91) 国枝稔, 鎌田修, 柳井修司, 渡邊有寿, 青山達彦, 林信也: 超高強度ひずみ硬化型モルタル (UHP-SHCC) を基層に敷設したコンクリート床版補強工法, 舗装, Vol.50, No.3, pp.3-9, 2015.03
- 92) 青山達彦, 国枝稔, 柳井修司, 鎌田修: 超高強度ひずみ硬化型セメント系複合材料 (UHP-SHCC) を用いたコンクリート床版増厚工法に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1269, 2015.06
- 93) 坂井吾郎, 柳井修司, 橋本学: 温めるー冷やす回顧コンクリートのクーリング技術ーコンクリートを冷やすー, 土木技術, Vol.70, No.6, pp.51-56, 2015.06
- 94) 渡邊有寿, 柳井修司, 入内島克明, 栖原健太郎: 超高強度繊維補強コンクリート(UFC)を場所打ちで施工した PC 橋ー小滝川橋ー, コンクリート工学, Vol.53, No.7, pp.629-634, 2015.07
- 95) 和田信博, 石橋靖亨, 渡邊有寿, 柳井修司, 伊代田祥仁: 中流動コンクリートによる超長距離圧送を適用したシールドトンネル二次覆工の構築ー中央浅田幹線外 1 線管きょ築造工事 (第 1 工区) ー, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.70th, VI-717, 2015.08
- 96) 石橋靖亨, 柳井修司, 橋本学, 山本徹, 佐藤忠宏, 相馬良太: 設計基準強度 40N/mm^2 , スランプ 8cm のコンクリートの運搬方法に関する一実験, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.70th, VI-637, 2015.08
- 97) 岡本裕昭, 戸張正利, 石橋靖亨, 柳井修司: 扁平形状を有する先端ホースを用いたポンプ施工ー長部高架橋工事橋脚部への適用ー, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.70th, VI-271, 2015.08
- 98) 橋本学, 室野井敏之, 柳井修司, 田中俊行, 中島悠介, 串橋巧: 急結性を有する可塑性グラウトの温度条件の違いがフレッシュ性状に与える影響に関する検討, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.70th, V-536, 2015.08
- 99) 日比康生, 柳井修司: 福島原子力災害からの復興福島第一原発の廃炉・汚染水対策地中トレンチ閉塞における超高流動材料の開発と施工ー2~4 号機海水配管トレンチ閉塞工事ー, 土木施工, Vol.57, No.3, pp.166-169, 2016.02
- 100) 柳井修司, 日比康生, 西郡一雅, 佐藤圭太: 福島第一原子力発電所海水配管トレンチ内部閉塞工事に適用した充填材に関する検討, コンクリート工学, Vol.54, No.4, pp.362-370, 2016.04
- 101) 日比康生, 柳井修司, 西郡一雅, 相馬裕: 福島第一原子力発電所汚染水対策工事海水配管トレンチとスクリーンポンプ室の閉塞, コンクリート工学, Vol.54, No.6, pp.628-634, 2016.06
- 102) 村田和也, 戸張正利, 岡本裕昭, 柳井修司, 橋本学, 青山達彦: 冷温水の通水による新しい温度ひび割れ抑制工法の橋脚への適用, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.71st, VI-619, 2016.08

- 103) 相馬良太, 石橋靖亨, 山中大明, 橋本学, 柳井修司: コンクリートの運搬・打設方法に関する一考察, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.71st, VI-616, 2016.08
- 104) 森本修三, 白川豪人, 中山雅登, 鮫島康之, 小川雄一郎, 椿治彦, 柳井修司: 水中不分離性コンクリートの暑中対策, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.71st, VI-496, 2016.08
- 105) 庄子茂, 田中秀昭, 柳井修司, 堀内友雅, 相馬裕, 大村秀樹: 福島第一原子力発電所スクリーンポンプ室閉塞工事, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.71st, VI-358, 2016.08
- 106) 佐藤圭太, 相馬裕, 柳井修司, 庄子茂: 福島第一原子力発電所スクリーンポンプ室閉塞工事に適用した充填材の性状に石炭灰と練混ぜ水が及ぼす影響, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.71st, VI-357, 2016.08
- 107) 石橋靖亨, 柳井修司, 三宅隆裕, 佐用佳史, 廣野淳, 森平宏治, 橋本真一, 西郡一雅, 一色信正, 浜宜和: 福島第一原子力発電所海水配管トレンチ立坑閉塞における遮水性・水密性向上対策, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.71st, VI-356, 2016.08
- 108) 橋本真一, 西郡一雅, 五十嵐希由, 一色信正, 浜宜和, 柳井修司, 石橋靖亨, 深田敦宏, 岸田哲哉: 福島第一原子力発電所海水配管トレンチの立坑部に適用した水中不分離性コンクリート, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.71st, VI-355, 2016.08
- 109) 西郡一雅, 佐藤圭太, 高橋美昭, 味沢慎吾, 柳井修司, 石橋靖亨, 松本清治郎: 福島第一原子力発電所海水配管トレンチトンネル部に適用した長距離水中流動性を有するセメント系材料の性能確認実験, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.71st, VI-354, 2016.08
- 110) 柳井修司, 石橋靖亨, 松本清治郎, 大島貴充, 西郡一雅, 佐藤圭太, 木田洋: 福島第一原子力発電所海水配管トレンチトンネル部に適用した長距離水中流動性を有するセメント系材料の配合検討, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.71st, VI-353, 2016.08
- 111) 串橋巧, 河越達生, 橋本学, 室野井敏之, 柳井修司, 田中俊行, 中島悠介, 石橋靖亨: 水中不分離性を付与した急結性可塑性グラウトの水中下における積上がりの検討, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.71st, V-348, 2016.08
- 112) 青山達彦, 柳井修司, 渡邊有寿, 山中大明, 山本徹: 冷温水の通水による温度ひび割れ抑制工法, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.71st, V-278, 2016.08
- 113) 橋本学, 林大介, 柳井修司, 坂田昇: 異なる打込み方法が凍結融解抵抗性に与える影響に関する実験的検討, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.71st, V-270, 2016.08
- 114) 青山達彦, 柳井修司, 橋本学, 渡邊有寿: 温度ひび割れを抑制するコンクリートの温度制御技術ー「クール&ヒート工法」の開発と現場適用ー, 鹿島技術研究所年報, Vol.64, pp.78-83, 2016.11
- 115) 柳井修司, 大石智広, 佐藤圭太, 木田洋: 長距離水中流動充填材「Hilo」, 地盤工学会誌, Vol.64, No.11/12, pp.32-33, 2016.12
- 116) 大津仁史, 西郡一雅, 佐藤圭太, 日比康生, 柳井修司, 出口普: 長距離水中流動充填材の開発と現場適用福島第一原子力発電所地下構造物における汚染水対策の事例, セメント・コンクリート, No.840, pp.3-11, 2017.02
- 117) 青山達彦, 柳井修司, 山本徹, 戸張正利: 冷・温水を通水させる躯体の温度制御による温度ひび割れ抑制効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1217, 2017.06
- 118) 渡邊有寿, 柳井修司, 宮口克一, 藤原浩己: 超高強度繊維補強コンクリートの海洋環境暴露後の疲労特性に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1029, 2017.06
- 119) 佐野雄紀, 松本修治, 今井道男, 柳井修司, 曾我部直樹: 画像による打継面処理状態の簡易評価方法の改良, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.72nd, VI-864, 2017.08
- 120) 品田健太, 入倉英明, 仁藤由紀, 相馬良太, 柿本啓太郎, 渡邊有寿, 柳井修司, 大石一成:

- 再振動締固めによるコンクリート鉛直打継目の品質向上, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.72nd, VI-565, 2017.08
- 121) 牧田通, 北川寛和, 渡邊有寿, 青山達彦, 柳井修司, 一宮利通: 道路橋床版の打替え・補強に対する超高強度繊維補強コンクリートの適用性の評価, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.72nd, V-549, 2017.08
- 122) 高木智子, 渡邊有寿, 青山達彦, 柳井修司, 山野辺慎一, 曾我部直樹: 鋼繊維を用いた高強度繊維補強モルタルの吹付け工法への適用に関する実験的検討, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.72nd, V-498, 2017.08
- 123) 橋本学, 柳井修司, 石橋靖亨: 現場打ちコンクリートの省力化・高品質化を目指して高品質なコンクリート運搬・打設システムで現場の高低差を解消=新型バケットと扁平ホース=, 建設機械, Vol.53, No.8, pp.6-10, 2017.08
- 124) 橋本学, 柳井修司, 石橋靖亨, 盛田行彦: 「コンクリート運搬・打設システム」の開発, セメント・コンクリート, No.847, pp.36-41, 2017.09
- 125) 柳井修司, 渡邊有寿, 牧田通, 北川寛和: 超高強度繊維補強コンクリートの道路床版打替え工法への適用に関する研究, プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, Vol.26th, pp.469-474, 2017.10
- 126) 高木智子, 渡邊有寿, 柳井修司, 青山達彦, 坂井吾郎: 吹付け可能な超高強度繊維補強コンクリートに関する実験的研究, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.17, pp.425-428, 2017.10
- 127) 西郡一雅, 大津仁史, 日比康生, 柳井修司: 長距離水中流動充填材の開発によるトンネル内部の汚染水除去と閉塞—福島第一原子力発電所海水配管トンネル内部閉塞工事—, トンネルと地下, Vol.48, No.11, pp.881-890, 2017.11
- 128) 新井崇裕, 柳井修司, 「セグメントの新技术II」連載講座小委員会: セグメントの新技术 II(2) —RC・新素材セグメント(1)—, トンネルと地下, Vol.49, No.1, pp.63-71, 2018.01
- 129) 柳井修司: 鋼繊維を混和した超高強度繊維補強コンクリートによるコンクリート構造物の機能・耐久性向上, ふえらむ, Vol.23, No.5, pp.194-201, 2018.05
- 130) 小林聖, 柳井修司, 坂田昇, 細田暁: 圧力分布シートセンサを用いたコンクリートの充填管理に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1203, 2018.06
- 131) 木村有希, 沼本仁志, 水野浩尚, 柳井修司, 高木智子, 白木浩: 超高強度繊維補強コンクリート製パネルのダム減勢工ラインング材への適用 (浜田ダム再開発工事), 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.73rd, VI-1064, 2018.08
- 132) 大野俊夫, 岸田哲哉, 星野太, 柳井修司, 吉田祐麻, 石原泰幸: 硬練り水中不分離性コンクリートの圧送性について, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.73rd, V-421, 2018.08
- 133) 岸田哲哉, 久保亮, 大野俊夫, 柳井修司, 吉田祐麻, 白井健泰: 低強度水中不分離性モルタルの30m水中流動実験, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.73rd, V-420, 2018.08
- 134) 渡邊有寿, 高木智子, 柳井修司, 一宮利通, 牧田通, 北川寛和, 鎌田修, 横田慎也, 佐藤文洋: 道路橋床版の打替え・補強工法における UFC 界面の付着特性に関する検討, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.73rd, V-139, 2018.08
- 135) 高木智子, 小林聖, 渡邊有寿, 柳井修司, 白木浩: 超高強度繊維補強コンクリートの吹付け工法における硬化促進剤と繊維長の影響, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.73rd, V-105, 2018.08
- 136) 小林聖, 高木智子, 渡邊有寿, 曾我部直樹, 柳井修司, 山野辺慎一, 白木浩, 松本隆: 超高強度繊維補強コンクリートの左官工法への展開に関する実験的検討, 土木学会年次学術講演会

- 講演概要集, Vol.73rd, V-104, 2018.08
- 137) 柳井修司, 小林聖, 藤田祐作, 片村立太, 坂田昇, 細田暁: 圧力分布シートセンサを用いたコンクリートの充填および締固め管理に関する検討, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.73rd, V-045, 2018.08
- 138) 水野浩平, 松本修治, 倉田和英, 柳井修司, 坂井吾郎, 井上恵介: RI によるフレッシュコンクリートの締固め度合いの検知に関する検討, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.73rd, V-039, 2018.08
- 139) 今井道男, 中村真人, 松本修治, 有坂壮平, 露木健一郎, 松川剛一, 柳井修司, CHANINTHOMAmomsawaddirak: 画像によるコンクリート打継面の処理評価への AI 適用, 人工知能学会全国大会 (Web), Vol.33, No.4Q3-J-13-02, 2019
- 140) 松本修治, 橋本学, 柳井修司, 坂井吾郎: 生産性向上に資する安価な締固め不要コンクリートの実現に向けた一実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1186, 2019.06
- 141) 中村真人, 松本修治, 今井道男, 柳井修司, 有坂壮平: 機械学習によるコンクリート打継面の良否判定技術に関する基礎的検討, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.74th, VI-86, 2019.08
- 142) 松本修治, 柳井修司, 坂井吾郎, 倉田和英, 橋本学: 生産性向上に資する締固め不要コンクリートの実現に向けた一実験, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.74th, VI-55, 2019.08
- 143) 倉田和英, 松本修治, 柳井修司, 坂井吾郎, 橋本学, 平陽兵, 片村立太: 動画画像解析を活用したフレッシュコンクリートの性状判定手法の検討, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.74th, V-567, 2019.08
- 144) 高木英知, 芦澤良一, 柳井修司, 横関康祐, 塚本優: 表層の締固めが初期ひび割れの発生に及ぼす影響に関する一実験, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.74th, V-510, 2019.08
- 145) 前山篤史, 大石智広, 小林仁, 柳井修司, 高木英知, 長岡廉浩, 三上雄一, 阿部智彦, 大槻俊正, 鈴木憲一: 長距離水中流動充填材の圧送性に関する検討, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.74th, V-509, 2019.08
- 146) 渡邊有寿, 高木智子, 柳井修司, 牧田通, 北川寛和: 拘束を受けた UHPFRC のひび割れ抵抗性評価試験に関する基礎的検討, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.74th, V-499, 2019.08
- 147) 光山恵生, 渡邊有寿, 柳井修司, 小山一夫, 前山篤史: 埋設型枠工法における内部コンクリートの非破壊検査に関する実験的検討, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.74th, V-253, 2019.08
- 148) 倉田和英, 松本修治, 柳井修司, 片村立太, 露木健一郎: 動画画像分析を活用したフレッシュコンクリートの性状判定手法の検討, 日本コンクリート工学会論文集, Vol.JCI-C97, pp.273-276, 2019.09
- 149) 渡邊有寿, 柳井修司, 牧田通, 北川寛和: UHPFRC による道路床版打替え・補強工法に向けた実大施工実験, プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, Vol.28th, pp.619-622, 2019.10
- 150) 高木英知, 芦澤良一, 柳井修司, 横関康祐, 塚本優, 関春彦: 温度ひび割れを抑制する躯体コンクリートの温度制御技術—「クール&ヒート工法」の定量評価—, 鹿島技術研究所年報, Vol.67, pp.73-80, 2019.12
- 151) 浦野真次, 中田善久, 柳井修司, 橋本親典: コンクリート圧送における安全および技術の動向, コンクリート工学, Vol.58, No.3, pp.209-216, 2020.03
- 152) 松本修治, 倉田和英, 橋本学, 柳井修司: 動画画像分析を活用したコンクリートの全量受入れ

- 管理システム, 月刊コンクリートテクノ, Vol.39, No.4, pp.38-41, 2020.04
- 153) 高木英知, 芦澤良一, 柳井修司, 横関康祐: クーリングおよびヒーティングを用いた温度ひび割れ抑制技術に関する効果の定量評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.1181, 2020.07
- 154) 松本修治, 倉田和英, 柳井修司, 坂井吾郎: 生産性向上に資する締固め不要コンクリートの配合設計手法に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.1172, 2020.07
- 155) 倉田和英, 松本修治, 橋本学, 柳井修司: 動画像分析を活用したフレッシュコンクリートの性状判定手法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.1159, 2020.07
- 156) 松本修治, 柳井修司, 渡邊賢三: コンクリート工, コンクリート構造コンクリート工事を見える化するデータプラットフォーム「CONCRETE@i」を構成する各種要素技術, 建設機械施工, Vol.72, No.9, pp.59-64, 2020.09
- 157) 松本修治, 柳井修司, 大山寛夫: 生コンクリート受入れ時の施工性判定システムの開発, 電力土木, No.410, pp.96-98, 2020.11
- 158) Kenichiro SETO, Shuji YANAI, Toshio OHNO, Masamichi YASUNAGA: APPLICATION OF HIGH STRENGTH AND SELF-COMPACTING CONCRETE FOR CONTINUOUS DIAPHRAGM WALLS, First Engineering Foundation Conference on High Strength Concrete, pp.622-635, 1997.7
- 159) Kenichiro SETO, Koji OKADA, Shuji YANAI, Yoshinobu NOBUTA: Development and Application of Self-Compacting Concrete: International Conference on Engineering Materials, Ottawa, Canada, pp.413-429, 1997
- 160) S.Yanai, M.Ishikawa, K.Miura, T.Murata: Material Selection and Construction Practices for Controlling Thermal Cracking in Construction of Underground Diaphragm Wall, 6th CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, - Bangkok, Thailand, 1998.06
- 161) Toshiaki MIZOBUCHI, Shuji YANAI, Kazunori TAKADA, Noboru SAKATA, Yoshinobu NOBUTA: Field Application of Self-Compacting Concrete with Advantageous Performances, First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, pp.605-616, 1999.09
- 162) Noboru SAKATA, Shuji YANAI, Kosuke YOKOZEKI, Kyuichi MARUYAMA: Study on New Viscosity Agent for Combination Use Type of Self-Compacting Concrete, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.1, No.1, pp.37-41, 2003
- 163) Terada, N., Kamihigashi, Y., Tsujimura, T., Yanai, S., Ikeda, S.: Load-carrying Capacity of the Hybrid Stay-cable Anchor Structure - Experimental Investigations of Yahagigawa Bridge of the New Tomei Expressway, Proceedings of the 2nd International Congress - Naples, Italy, ID5-15, 2006.06
- 164) Shuji YANAI, Shinya MATSUMOTO, Toshio OHNO, Atsuhiko FUKADA: Actual Concrete Strength of Structural Members of Underground Continuous Diaphragm Walls, 5th International Conference on Concrete under Severe Conditions Environment and Loading - Tours, France, pp.1047-1052, 2007.06
- 165) Shuji YANAI, Katsuhiko NAKANO, Katsunori KOBAYASHI, Masaki TAKEI, Morihiro NUMAGUCHI, Atsuhiko FUKADA, Mitsuhiro OHKUMA, Toshio OHNO: High Strength and Self Compacting Concrete for Underground Continuous Diaphragm Wall of LNG Tank, 8th International Symposium on Utilization of High-Strength and High-Performance Concrete, S3-7-4, pp.1171-1176, 2008.10
- 166) Yuji WATANABE, Shuji YANAI, Noriaki MATSUBARA, Toshio OHNO: Experimental Study on the Applicability of Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete to Large Scale Members, 8th

- International Symposium on Utilization of High-Strength and High-Performance Concrete, S3-2-7, pp.715-720, 2008.10
- 167) Tetsuya KONO, Toshimichi ICHINOMIYA, Shuji YANAI, Kazumasa YANO, Toshinori FUKUSHITA, Tsutae NAKABO : DESIGN AND CONSTRUCTION OF AN AQUEDUCT BRIDGE USING LOW SHRINKAGE ULTRA HIGH STRENGTH FIBER REINFORCED CONCRETE, 9th International Symposium on HPC, 2011.08
- 168) Shuji YANAI, Yuji WATANABE, Toshimichi ICHINOMIYA, Kentaro SUHARA, Katsuaki IRIUCHIJIMA : Construction of KOTAKIGAWA Bridge using UFC-SUQCEM cast in site, International Symposium on Concrete and Structure for Next Generation IOS2016 Tokyo, pp.535-542, 2016.05
- 169) Tatsuhiko AOYAMA, Yuji WATANABE, Shuji YANAI, Minoru KUNIEDA : DEVELOPMENT OF WATERPROOFING OVERLAY SYSTEM FOR BRIDGE DECK USING ULTRA HIGH PERFORMANCE STRAIN-HARDENING CEMENTITIOUS COMPOSITES (UHP-SHCC), BEFIB2016-9th RILEM International Symposium on Fibre Reinforced Concrete, No.193, 2016.09
- 170) Shuji YANAI, Yasuki HIBI, Kazumasa NISHIKOURI, Keita SATO : Outline of “Special Filling Material Applied to Remediation Works of Contaminated Water Stagnating in Seawater Piping Trenches at Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant”, National Report of Japan on Structural Concrete 2018, pp.165-166, 2018
- 171) Yuji WATANABE, Tohru MAKITA, Hiromi FUJIWARA, Shuji YANAI : An Experimental Study on the Mechanical and Durability Properties of UHPFRC for cast-in-place method, International Interactive Symposium on Ultra-High Performance Concrete, Vol.2, No.1, 2019.01
- 172) Tohru MAKITA, Yuji WATANABE, Shuji YANAI, Hirokazu KITAGAWA : Full-Scale Construction Test for Improvement of RC Void Slab Bridges Using UHPFRC – Part 1: Experimental Test Plan, Fibre Reinforced Concrete: Improvements and Innovations, pp.1003-1011 , 2020.11
- 173) Yuji WATANABE, Shuji YANAI, Tohru MAKITA, Hirokazu KITAGAWA : Full-Scale Construction Test for Improvement of RC Void Slab Bridges Using UHPFRC – Part 2: Test Results, Fibre Reinforced Concrete: Improvements and Innovations, pp.1012-1021 , 2020.11
- 174) Tohru MAKITA, Yuji WATANABE, Shuji YANAI, Toshimichi ICHINOMIYA : UPGRADING OF EXISTING BRIDGE DECKS USING UHPFRC DENSIFIED BY ETTRINGITE FORMATION (AFT-UHPFRC): PRELIMINARY INVESTIGATION, Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete, pp.125-134, 2017.10