

分岐部を有する超高速鉄道トンネルの
微気圧波の特性とその低減対策に関する研究

2021年3月

水野 孝則

論文要旨

本研究は、超電導リニアによる中央新幹線の環境課題の一つである、トンネルの微気圧波の低減手法を論ずるものである。

超高速鉄道の微気圧波問題のうち、高速鉄道では中央新幹線で初めて設置されるトンネル内の分岐部のような断面積変化区間を列車が超高速で通過することにより新たに発生する圧縮波による微気圧波への影響およびその低減対策について検討する。列車が高速でトンネルに突入する際に形成される圧縮波がトンネル内を伝播しトンネル坑口から放射される微気圧波の低減については、先の別の研究によってトンネル坑口への多孔板を適用した緩衝工の設置が提案され解決済みである。しかし、トンネル内に分岐部を有する超高速鉄道の微気圧波およびその低減対策については解明されていない点が多く、しかも分岐部のような断面積変化部では、確立された既存技術である多孔板による対策が空間的制約により適用できない、という問題があった。

また、多孔板を適用した対策により解決済みとなっていたトンネル内を伝播する圧縮波が本坑から枝坑へ分岐して枝坑坑口から放射される微気圧波の低減については、将来のトンネル内の換気風量の増大に伴う坑口付近での風切り音の低減との両立が課題であった。このため、風路の断面拡大とともに枝坑内の設備の活用により微気圧波と風切り音の両方の低減対策として制御可能な方法を確立する必要があった。

「第1章 序論」では、本研究の背景を示すとともに本研究で対象とする超高速鉄道による中央新幹線の計画概要を紹介したうえで現状の微気圧波問題について整理した。既存の対策として用いられている多孔板による微気圧波問題の解決状況および残された課題と照らし合わせて関係する既往の研究を整理したうえで、本研究の目的を以下の2点とした。

- I. 列車が分岐部のようなトンネル内の断面積変化区間を通過する際に新たに形成される圧縮波の伝播に伴いトンネル坑口から放射される微気圧波について、新たな原理に基づく低減手法を確立する。
- II. トンネル内を伝播し枝坑を通過する圧縮波による微気圧波の低減と枝坑風路坑口での風切り音対策とが両立可能な対策を確立する。

「第2章 分岐部を有する超高速鉄道トンネルの微気圧波に関する現状調査と課題抽出」では、まずI. の課題に対して分岐部を有するトンネルにおける超高速列車通過に伴い発生する圧力変動について明らかにした。山梨実験線においてトンネル内に枝坑が設置される区間を超高速列車が通過する際の圧力波の形成に関して調査して現状把握を行った。この結果、超高速列車が断面積変化部を通過する場合は断面変化率の増大とともに発生する圧力波が増大すること、および横坑を通過する際には列車前方に正圧の圧縮波が発生し、横坑内には負圧の膨張波が生成して反射することを確認した。また、山梨実験線のトンネル内には分岐装置がないことから数値解析によって坑口における微気圧波レベルのシミュレーション予測を行った。この結果、超高速列車の分岐部通過に伴い分岐部で新たに生成された圧縮波がトンネル本坑を長距離伝播して緩衝工のない

トンネル坑口で放出される際には、微気圧波が基準値の4倍程度となり問題となる可能性があることを把握した。

この分岐部の微気圧波低減対策を検討するうえで既存の手法による解決を試みた。トンネル内の分岐区間の断面積変化を物理的に緩やかにすることにより圧力の上昇を緩やかにする「すりつけ対策」と、本線と枝線間の壁に多孔板を設けてその開口から圧縮波を抜いて圧力上昇を緩和する「連通対策」について、3次元数値流体解析（CFD）により微気圧波の低減効果を検討している。いずれも微気圧波低減対策として有効であることを確認した。しかし、両対策ともに施工やコストの面から非現実的であるため既存の手法に基づいた解決は困難であり、新しい原理に基づいた微気圧波低減対策の考案・提案が不可欠となった。

またⅡ.の課題に対しては、東京～大阪間の全区間開業時にトンネル内部の蓄熱排除のために必要な換気風量を増大する計画をもとに枝坑坑口からの風切り音を予測したところ、現状の山梨実験線の風路断面では将来の風速の増加により地上部での風切り音が大きくなり騒音基準値を超過する可能性があることを把握した。これに対して風速の低減を目的に風路断面を拡大する場合の影響について模型実験により検討したところ、風路の拡大は坑口での微気圧波の増大につながる可能性があることが判明し、風切り音の低減とトレードオフの関係となる微気圧波の低減との両立を図る必要があることを把握した。

「第3章 トンネル分岐部通過時に発生する微気圧波の低減手法の検討」では、第2章においてⅠ.の課題の解決には新たな原理に基づく対策が必要であることが判明したことから文献調査を行い、他の位相の異なる圧力波と時間差を利用して重ね合わせる手法が参考になると考えた。第2章で調査した分岐部で発生する圧縮波の形状から圧力勾配を低減するために必要な重畳波は正のパルス波に続いて負のパルス波が続く波形であり、山梨実験線の横坑において観測されたような圧縮波と膨張波から成る圧力波に近い波形であることが分かった。この知見をもとに、超高速列車が分岐部を超高速で通過する際に発生する圧力波の圧力勾配を低減する手法として、列車の通過に伴い時間差をもって発生する正圧と負圧のパルスを合成した重畳波を生成することが可能な、本線と並行した有限長の小径のトンネルを複数の小径の横坑で連絡する「並行トンネル」を提案した。3次元数値流体解析（CFD）や圧縮波・膨張波を基本的な関数で近似することによる簡易的な計算により重畳効果を確認し、重畳が効果を発揮できる並行トンネルの各構成要素である坑の長さ、断面積、設置間隔などの各諸元を決定した。この諸元に基づく並行トンネルを分岐部に設置する状況を模擬した模型実験によって、分岐断面における圧縮波の圧力勾配が3割程度低減できることを確認した。また3次元数値流体解析（CFD）でも同様の低減効果を確認することができた。さらに、分岐部に並行トンネルを設置したことによる圧縮波の圧力勾配の低減が坑口での微気圧波放射の低減にどのように影響するかを検討するため長距離伝播解析を実施した。この解析によって、分岐部への並行トンネルの設置によりトンネル坑口の微気圧波が大幅に低減して坑口の緩衝工の長さに依らず放射される微気圧波レベルを基準値（坑口中心から20m地点で50Pa以下）以内とすることが可能である、という結果を得た。

「第4章 営業線における並行トンネルの適用性の評価」では、第3章で述べた検討をもとに、

中央新幹線の営業線に向けた分岐部を有するトンネルの微気圧波低減対策の案として、営業線の山岳トンネルの分岐区間に設置する並行トンネルの諸元を提案し、施工面でも実現が可能であることを示した。また、提案した諸元の並行トンネルについて効果が発揮される速度領域を明らかにしたうえで、感度分析により将来の列車の速度向上に対しては並行トンネルの設計の修正（連絡坑の位置の調整）で対応可能であることを示した。さらに他の状況として、掘削する地山の地質が軟質であるため連絡坑の本数を減らさざるを得ない場合やトンネル内壁面の表面粗度、断面形状、曲率が変化した場合にそれらの変動が並行トンネルの微気圧波低減効果へ及ぼす影響について感度分析を行い、並行トンネルは諸条件の変化のもとでも有効に機能して実用的であることを確認した。

「第5章 トンネル枝坑における付帯設備を考慮した微気圧波低減対策」では、Ⅱ.の課題の解決を目的として微気圧波が放出される枝坑坑口における風切り音の騒音対策を満足に実施できる多孔板対策工の風路の諸元について検討を行い、騒音対策とトレードオフの関係である微気圧波対策とが両立可能な方策を提案した。風切り音の低減を目的とした風路拡大による微気圧波への影響を模型実験および音響解析により検討したところ、多孔板対策工内部の風路拡大により背後吸音層のエリアが縮小するため圧力波の圧力勾配の低減効果が低下することによって微気圧波が2倍弱程度に増大する予測結果となった。これに対して、枝坑内の換気ファンやサイレンサのような付帯設備も考慮に入れた微気圧波の低減効果について評価を行ったところ、枝坑での風切り音低減を目的に多孔板対策工の風路を拡大した場合でもこれらの付帯設備の効果により微気圧波を基準値内に抑制できることを確認した。

また、長距離伝播解析を行った結果、多孔板対策工、風路の断面拡大、換気口による整流、および枝坑内の換気ファンやサイレンサといった付帯設備を活用した仕様による微気圧波の大きさは、中央新幹線での標準長さ150mの多孔板緩衝工が設置されるトンネル入口から枝坑までの距離にかかわらず微気圧波の基準値の3割程度に抑えられることを把握した。これにより枝坑内の多孔板対策工内の風路を拡大しても換気口の整流、枝坑内の付帯設備を考慮すれば枝坑坑口で放射される微気圧は伝播距離に依らず基準値を大きく下回ることが確認でき、風切り音対策および微気圧波対策の両立が可能な方策として提案した。

「第6章 結論」では、本研究で得られた結論を述べている。

中央新幹線の微気圧波問題として解決すべき課題であった超高速列車が分岐部を通過する際に新たに発生する圧縮波の伝播に伴う微気圧波の低減（Ⅰ.の課題）については新しい原理に基づく「並行トンネル」の提案によって解決に至った。また、残された課題であった枝坑を通過する圧縮波による微気圧波対策と風切り音対策の両立（Ⅱ.の課題）については多孔板対策工内の風路を断面拡大する一方で枝坑内の設備などの効果を考慮することにより解決に至った。

本研究により、超高速鉄道の微気圧波問題である列車のトンネル突入による微気圧波および列車の分岐部通過に伴う圧縮波による微気圧波の両方の問題がクリアとなった。本研究は、先の別

の研究による多孔板により対策が提案されて解決済みとなっていた微気圧波問題と合わせ中央新幹線のトンネル微気圧波低減対策の集大成である。

本研究によって中央新幹線での問題が解決されたことにとどまらず、既往の理論や研究の適用範囲がさらに拡張されて今後の類似の問題への応用が可能になることを期待している。

目次

第1章 序論	
1.1 研究の背景	1
1.2 超電導リニアによる中央新幹線計画	4
1.2.1 超電導リニアによる中央新幹線計画の目的	4
1.2.2 超電導リニアによる中央新幹線計画の経緯	6
1.3 中央新幹線の微気圧波問題	9
1.3.1 中央新幹線の沿線の環境保全に関わる課題	9
1.3.2 微気圧波の現象	10
1.3.3 中央新幹線の微気圧波に関する課題	12
1.4 分岐部を有するトンネルの微気圧波対策に関する既往の研究	14
1.4.1 列車のトンネル突入により発生し伝播する圧力波が本坑から分岐した枝坑を通過する場合の微気圧波への影響に関する既往の研究	14
1.4.2 列車の分岐部通過や断面積変化部通過により発生する圧力波に関する既往の研究	16
1.5 本研究の目的	18
1.6 本研究の構成	19
第2章 分岐部を有する超高速鉄道トンネルの微気圧波に関する現状調査と課題抽出	
2.1 はじめに	25
2.2 現状調査と課題抽出のための設備・手法	26
2.2.1 山梨実験線の設備と多孔板緩衝工	26
2.2.2 本研究で使用する試験・解析手法	32
2.3 列車の分岐部通過や断面積変化部通過により発生する圧力波に関する現状調査と課題抽出	36
2.3.1 山梨実験線の設備による現状調査	36
2.3.2 トンネル分岐部通過時に発生する圧縮波とその影響の把握	41
2.3.3 既存の手法に基づく方策による低減効果の検討・評価	49
2.3.4 課題の整理	53
2.4 枝坑坑口から放射される微気圧波に関する現状調査と課題抽出	54
2.4.1 枝坑坑口における騒音低減問題との両立	54
2.4.2 枝坑坑口における騒音予測評価	56
2.4.3 課題の整理	62
2.5 まとめ	65

第3章	トンネル分岐部通過時に発生する微気圧波の低減手法の検討	
3.1	はじめに	69
3.2	並行トンネルによる微気圧波低減対策	72
3.2.1	並行トンネルの基本的な考え方	72
3.2.2	列車横坑通過時の圧力波と簡易モデルによる波形のモデル化	74
3.2.3	並行トンネルの概要	79
3.2.4	並行トンネルの諸元の決定	82
3.2.5	並行トンネル列車通過時に発生する圧力波の検証	84
3.3	並行トンネルによる圧縮波波面低減効果の検証	91
3.4	長距離伝播解析による本坑坑口での微気圧波低減効果の確認	94
3.5	まとめ	96
第4章	営業線における並行トンネルの適用性の評価	
4.1	はじめに	99
4.2	営業線における並行トンネルの提案	100
4.3	並行トンネルの建設方法・手順	101
4.4	営業線での諸元を考慮した並行トンネルの感度分析	104
4.4.1	列車速度の影響	104
4.4.2	並行トンネルの諸元に関する影響	109
4.5	まとめ	113
第5章	トンネル枝坑における付帯設備を考慮した微気圧波低減対策	
5.1	はじめに	117
5.2	風切り音低減の検討	120
5.3	枝坑の断面拡大に対する従来型多孔板対策工の効果の検証	122
5.3.1	営業線の多孔板対策工	122
5.3.2	模型実験	123
5.3.3	音響解析による微気圧波の検討	133
5.3.4	模型実験と音響解析の結果のまとめ	140
5.4	枝坑内付帯設備の微気圧波の低減効果	141
5.4.1	模型実験で考慮した枝坑の付帯設備	141
5.4.2	模型実験結果	143
5.5	提案する営業線仕様における微気圧波低減効果の確認	144
5.5.1	模型実験による圧力勾配と微気圧波の関係の把握	144
5.5.2	枝坑位置と圧力勾配の関係の把握	146
5.5.3	枝坑位置と微気圧波の関係把握による微気圧波低減効果の評価	147
5.6	まとめ	149

第6章	結論	151
補遺	本論文の解析の詳細	
補-1	圧縮波の形成・伝播, 放射される微気圧波の算出に関する解析手順	155
補-2	解析の詳細	156
補-2.1	3次元 CFD 解析	156
補-2.2	1次元波動伝播解析 (長距離伝播解析)	157
補-2.3	圧力波と微気圧波の関係	160
謝辞		163

第1章 序論

1.1 研究の背景

最高営業速度時速 500km の超電導磁気浮上式鉄道（以下「超電導リニア」という。）による中央新幹線計画は既に建設段階であり，実現時には日本の大動脈輸送を開業後 50 年余にわたり担い続ける東海道新幹線のバイパス機能や，3 大都市圏（首都圏，中京圏，近畿圏）の一体化によるメガリージョンの形成が期待されている。

2014 年に国土交通大臣より工事実施計画の認可を受けた品川・名古屋間 286km の路線（図-1.1.1）のうち 247km（約 86%）をトンネル構造が占める。このうち山梨県・静岡県・長野県にまたがる南アルプストンネルのように延長約 25km に及ぶ長大なトンネルも計画されている（図-1.1.2）。

一般的に高速鉄道の列車がトンネルに突入すると，トンネル内に圧縮波が形成され，トンネル内を伝播して最終的には反対側の坑口から微気圧波が放射される^{1,2)}。微気圧波は 1970 年代に山陽新幹線のトンネルの坑口付近の沿線の環境問題として顕在化した。既往の研究によると，微気圧波の大きさはトンネル内の圧縮波の圧力勾配（圧力の時間部分）に比例²⁾するとされており，特に超電導リニアのような超高速鉄道では，列車が突入するトンネル坑口からの距離によっては，従来の高速鉄道よりも圧縮波の圧力勾配が大きくなる場合があることが分かっている^{3,4)}。このため中央新幹線計画にあっては，列車の超高速化とトンネルの長大化による影響を十分に考慮して微気圧波対策を検討する必要がある。

高速鉄道の微気圧波対策としてよく知られる方策には，トンネルの入口に緩衝工と呼ばれる構造物を設置して，列車がトンネルに突入することによって生じる圧力波の初期圧力勾配を緩和する手法があり，実際にトンネル坑口付近において広く用いられている^{5,6,7,8)}。超高速鉄道である中央新幹線においては，既往の研究⁴⁾により，図-1.1.3 に示すような壁面に多孔板を有する緩衝工（以下「多孔板緩衝工」という。）を設置して，列車がトンネルに突入する際の初期圧力勾配を小さくするとともに，反対側坑口を圧縮波が通過する際に多孔板から徐々に気流を放出することによって，微気圧波を十分に低減する対策が確立されている。

一方，中央新幹線のトンネル内部は必ずしも断面が一様ではなく，途中に，本坑から分岐して旅客の避難や換気を目的に設置される非常口と呼ばれる枝坑⁹⁾（図-1.1.4）や，高速鉄道としては中央新幹線で初めてとなる，保守を実施する基地へ分岐するための分岐装置が設置される箇所（図-1.1.5）などが計画されるトンネルもある。

前者については，トンネル内での枝坑の位置によっては列車のトンネル突入時に発生し伝播してくる圧力波の圧力勾配が強くなり，微気圧波の大きさは圧縮波の圧縮勾配に比例するため，本線から分岐し，枝坑を通過して枝坑の坑口から放射される微気圧波の周辺環境への影響が懸念される。

後者については，トンネル内に分岐装置自体や分岐の可動や装置の保守のための大きな空間が必要であるため，その区間前後の大きな断面積変化に起因する別の圧縮波の発生，伝播，坑口での放射による微気圧波の影響が懸念される。

そこで本研究では、このような背景のもとに、超電導リニアによる中央新幹線のような超高速鉄道の列車がトンネルに突入する際に形成される圧力波が枝坑を通過して枝坑の坑口から放射される微気圧波の影響や、トンネル内に分岐装置を設置する箇所のような分岐部が存在する場合に分岐部で新たに発生する圧力波による微気圧波の影響について、問題点を整理したうえで現象を理解し、微気圧波の低減対策を提案する。これにより中央新幹線の営業線における微気圧波の低減対策を確立することを目的とする。

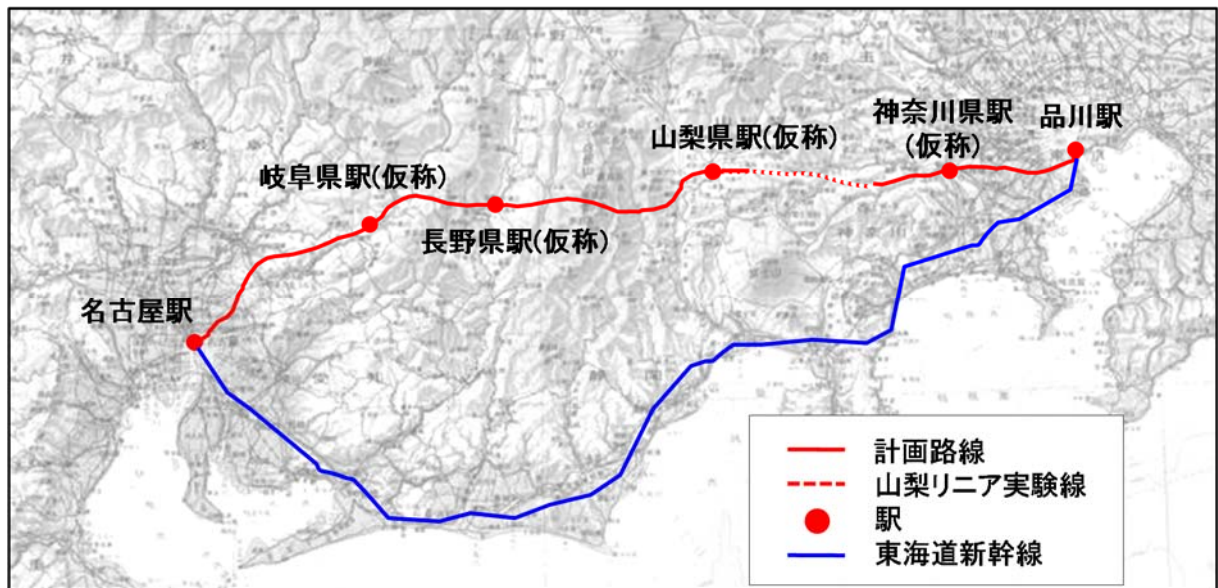


図-1.1.1 中央新幹線品川～名古屋間の路線図

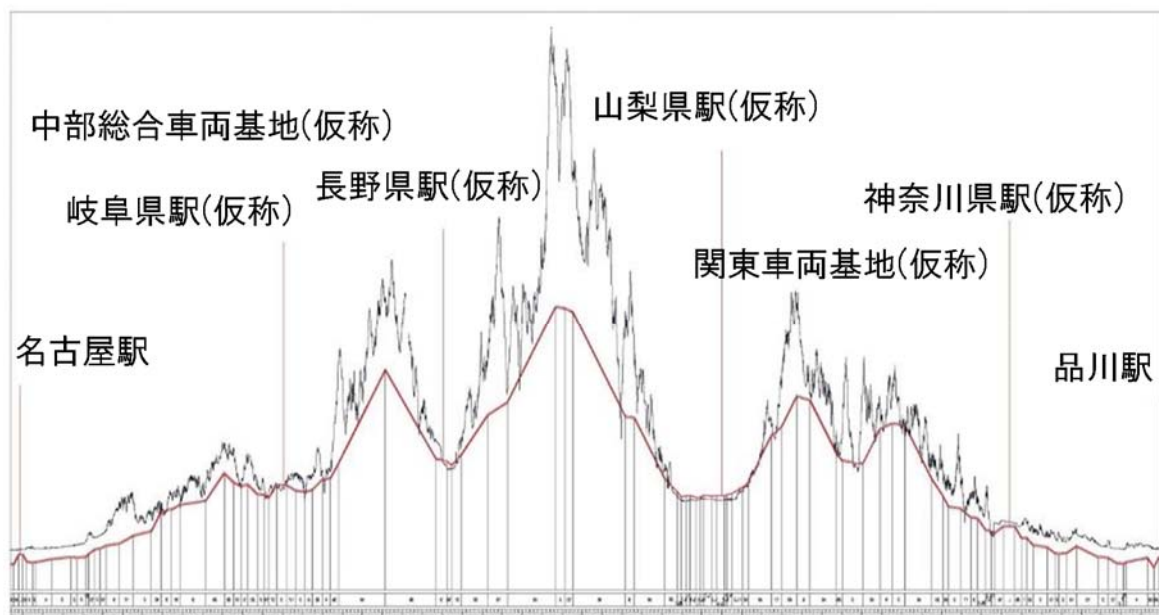


図-1.1.2 中央新幹線品川～名古屋間の縦断線形（縦軸の縮尺は横軸の 50 倍）



図-1.1.3 トンネル坑口に設置されている多孔板緩衝工（山梨リニア実験線）

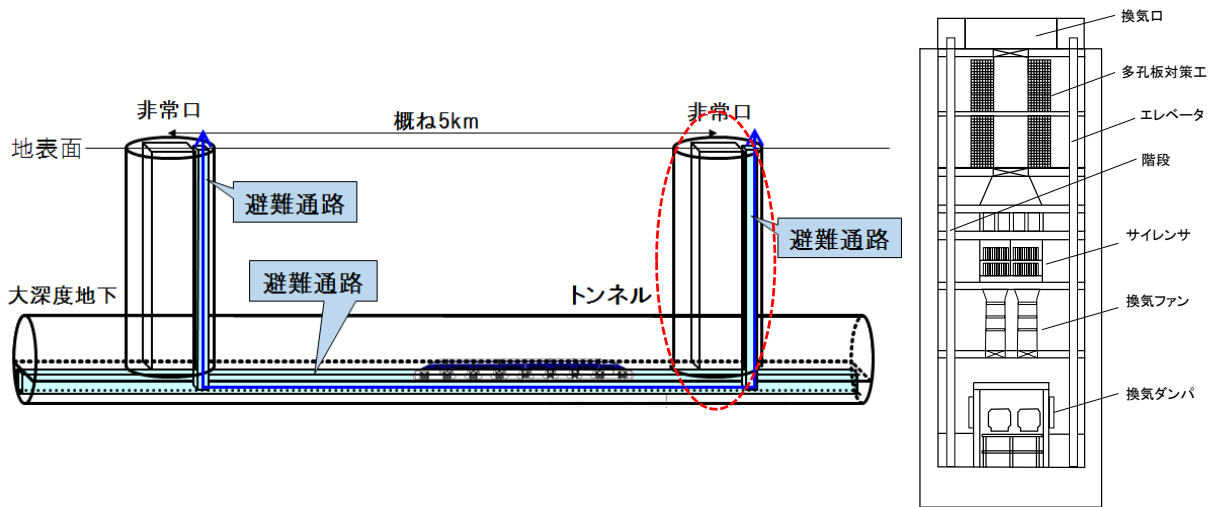


図-1.1.4 非常口と呼ばれる枝坑（立坑：右図は左図の点線（赤）で囲った部分の詳細）

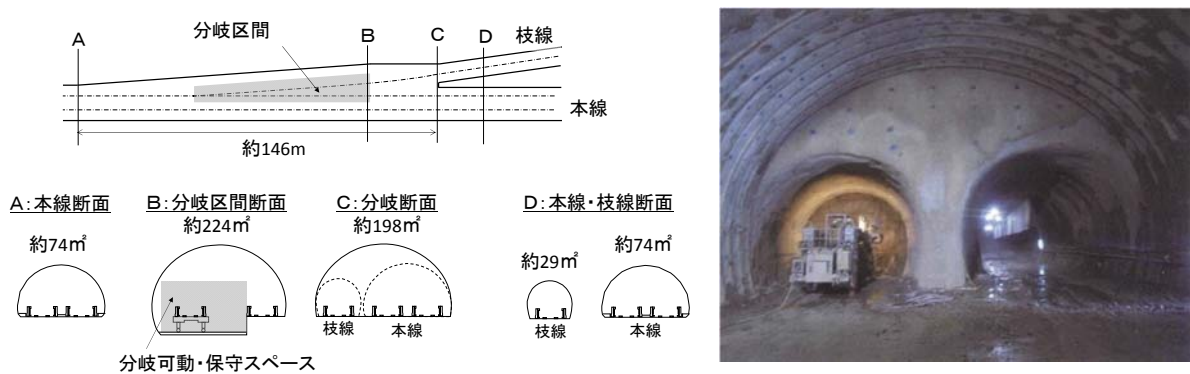


図-1.1.5 トンネル内の分岐装置の設置箇所の概要
（右の写真：左の図のC断面から右側を望む（建設中の状況））

1.2 超電導リニアによる中央新幹線計画

1.2.1 超電導リニアによる中央新幹線計画の目的

(1) 東海道新幹線の二重化の必要性

東海道新幹線は、1964年の開業から50年余が経過しており、予防保全としての鋼橋の部材の取替や補強、鉄筋コンクリート橋りょうの中性化対策、トンネルの覆工裏の空隙充填やひび割れへの樹脂注入など、経年による疲労・劣化対策を中心とした大規模改修を行ってきている。しかしながら、日本の大動脈輸送を安定的に維持するためには、将来的には東海道新幹線において取替工事が必要となると考えられ、その実施の際に発生する運転休止や徐行運転のリスクを低減あるいは回避できるようにバイパス機能を確保する必要がある。

さらに、東海道新幹線のルートの一部は、中央防災会議で示されている南海トラフ巨大地震の想定震源域および激震地域に位置している（図-1.2.1）ため、東海道新幹線ではこれまで積極的に脱線防止ガードなどによる地震対策を実施しているものの、抜本的に災害リスクに備えるためにはバイパスを確保することが重要である。

すなわち東海道新幹線が抱えるこの2つの課題を抜本的に解決するためには、中央新幹線の実現によりわが国の三大都市圏を結ぶ大動脈輸送を二重化することが不可欠である。

(2) 超電導リニアの必要性と特性

前の東京オリンピックの開催年である1964年に開業した当時、東海道新幹線は時速210kmで運転されたが、国鉄時代は速度向上がほとんど実施されず、運賃値上げと相まって対航空の競争力が低下し続けた。一方で、国鉄分割民営化により誕生した東海旅客鉄道株式会社（以下「JR東海」という。）は、1992年に一部列車を最高時速270km化し、2003年に全列車最高速度270km化を達成した。さらに2015年には最高営業速度を時速285kmに引き上げ、競争力強化に取り組んだ。

しかしながら、より一層の大幅な速度向上は、東海道新幹線の線形は他の新幹線と比較して曲線区間の割合が大きく、直線区間での速度向上による時間短縮効果は小さいうえに、線形改良の困難性と沿線環境の課題から期待しがたい。これは、東海道新幹線の沿線は高度に市街化しており、大幅な線路改良が困難であるとともに、更なる速度向上に伴って発生する走行時の騒音や振動について従来の沿線環境対策を超える抜本的な施策が必要となるためである。

これらの理由により、長期的には東京・名古屋・大阪間という日本の大動脈輸送を担ってきた東海道新幹線の発展的代替輸送機関、すなわち超電導リニアによる中央新幹線の実現が不可欠と考えられた。

中央新幹線に超電導リニアを採用して、東京・名古屋・大阪の三大都市圏を直線的に結ぶことで、都市間の時間短縮効果が最大限に発揮され、便益が大きなものとなる。すなわち、時速500kmの超高速鉄道により三大都市圏間は約1時間での移動が可能となり、わが国の1/2超の人口（6,648万人（2020年現在））と、全国の約2/3の国内総生産（GDP）を持つ巨大な都市圏（メガリージョン）が形成される（図-1.2.2）。これにより、日本の経済および社会活動が活発になるだけでなく、移動時間の大幅な短縮によりライフスタイルの変革（transformation）に寄与するものと期待されている。

超電導リニアは、同じ速度域で運行される航空機と比べて、東京・大阪間を移動する一人当たりのCO₂排出量がおよそ1/3と環境に優しい交通機関である。また、超電導リニアは非接触で浮上走行するため、時速500kmの高速でも安定的な走行が可能であり、在来型新幹線と比較して高い加減速性能や優れた登坂能力を有している。さらに、車両は強固なコンクリート製のガイドウェイに両側を囲まれ、また浮上走行時には路面と10cmの離隔が保持されるため、地震時にも安全で安定した走行が可能であるという特性を有している。

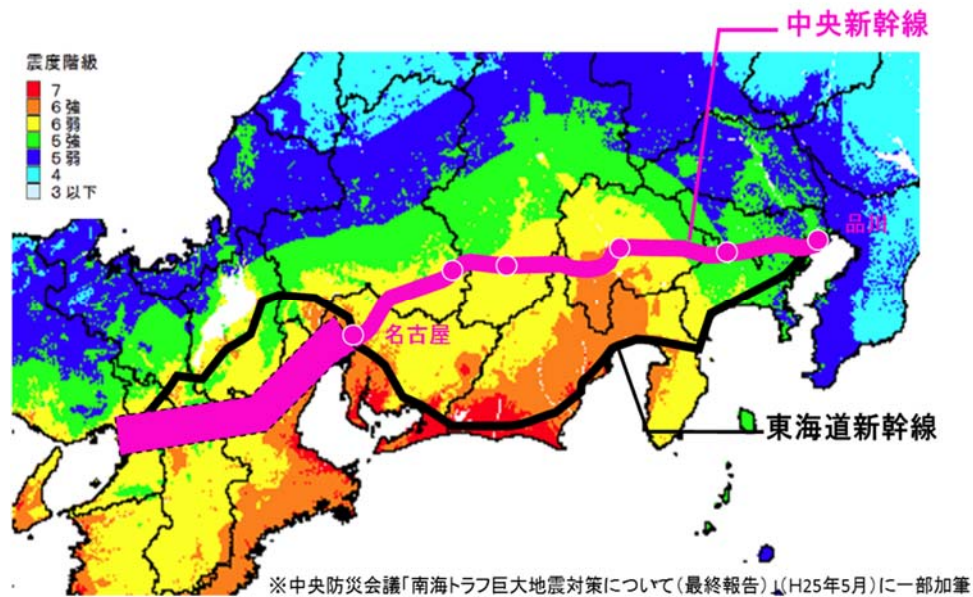


図-1.2.1 南海トラフ巨大地震の想定震源域と震度の最大値の分布図

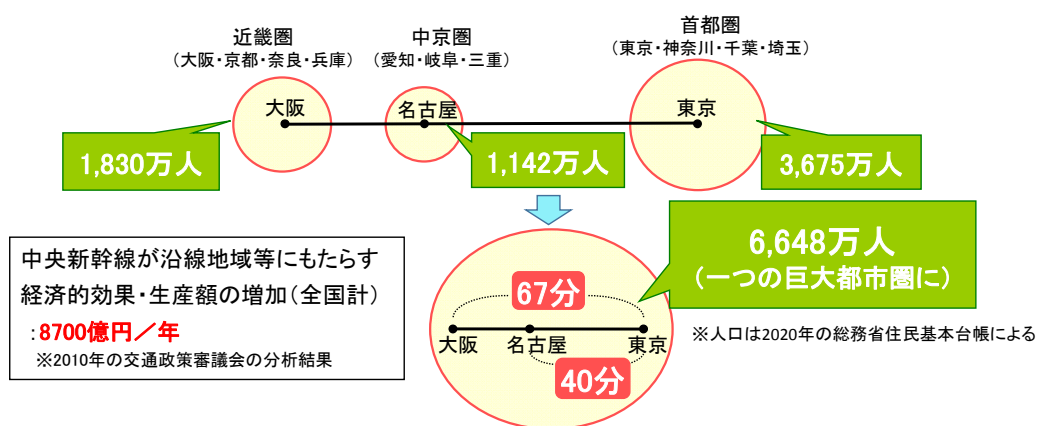


図-1.2.2 中央新幹線による巨大な都市圏（メガリージョン）の形成

1.2.2 超電導リニアによる中央新幹線計画の経緯

(1) 概要

全国新幹線鉄道整備法（1970年5月18日法律第71号、図-1.2.3に同法に基づく中央新幹線の手続きの流れを示す）に基づく中央新幹線については、運輸省告示「建設を開始すべき新幹線鉄道の路線を定める基本計画」において、1973年11月15日に東京都を起点、大阪市を終点とし、甲府市附近、名古屋市附近、奈良市附近を主要な経過地とする路線として位置付けられた。2011年5月26日国土交通大臣は走行方式を超電導リニア、最高設計速度を時速505km、建設に要する費用の概算額（車両費を含む。）を90,300億円とし、主要な経過地に赤石山脈（南アルプス）を追加した整備計画を決定している。その後、3年2ヶ月に亘る環境影響評価を経て^{10,11)}、2014年10月に国土交通大臣から工事実施計画の認可を受けて、着工した。

(2) 国鉄分割民営化から現在までの経緯

以下、1987年4月の国鉄民営分割から現在までの経緯をまとめる。

国鉄分割民営化では中央新幹線の建設主体及び営業主体は明確にされておらず、整備計画決定の前段階の手続きである5項目の調査のうちの地形・地質等調査について、甲府市附近から名古屋市附近の間のみ1974年7月に運輸大臣から日本国有鉄道に調査が指示されていたが、1987年11月以降は日本鉄道建設公団（現在の（財）鉄道建設・運輸施設整備支援機構、以下「鉄道・運輸機構」という。）によって実施された。

国鉄分割民営化において東京・名古屋・大阪を結ぶ日本の大動脈である東海道新幹線の維持・発展を使命として設立されたJR東海は、発足3ヶ月後の1987年7月に東海道新幹線とともに超電導リニアによる東海道新幹線バイパスを一元経営することを目的として、リニア対策本部を設置した。

1990年2月に運輸大臣はJR東海と日本鉄道建設公団に対して、東京都から大阪市まで全区間に亘る地形・地質等調査を指示し、超電導リニアの本格的実験線である山梨リニア実験線（以下「山梨実験線」という。）は、JR東海が将来中央新幹線に転用できる土木構造物の工事費を負担して同年11月に着工された。

1997年4月に山梨実験線先行区間18.4kmで超電導リニアの走行試験が開始され、2005年3月に国土交通省超電導磁気浮上式鉄道実用技術評価委員会（以下「実用技術評価委員会」という。）の「実用化の基盤技術が確立した」との評価¹²⁾を踏まえて、JR東海は2007年12月に中央新幹線の名古屋までの建設について「自己負担を前提に手続等を進める」旨を表明した。

2008年10月にJR東海と鉄道・運輸機構は、東京都から大阪市まで全区間の地形・地質等調査を国土交通大臣に報告し、同年12月両者に対して残る4項目の調査が指示され、2009年12月に4項目の調査報告が大臣に提出された。

2010年2月に国土交通大臣は、交通政策審議会に対して中央新幹線の営業主体及び建設主体の指名並びに整備計画の決定について諮問した。交通政策審議会陸上交通分科会鉄道部会に中央新幹線小委員会が設置され、家田仁東京大学教授（当時）が委員長となって、20回に及ぶ委員会での審議が精力的に行われた。

2010年4月にJR東海は、中央新幹線小委員会のヒアリングに先立って、名古屋までと同じ

く、自己負担により大阪市まで全区間の建設完遂が可能であることを表明した。

2011年3月11日に未曾有の東日本大震災が発生した。同年5月12日に中央新幹線小委員会は国土交通大臣に答申を提出したが、同答申は「この戦後最大の国難とも言える未曾有の大災害は、小委員会としても、我が国の自然災害リスクの大きさとそれに備える防災対策の重要性を痛感させられたと同時に、旅客や物資輸送の代替路線の重要性も改めて認識される出来事であった。」、「三大都市圏を直結する中央新幹線の整備は、被災地の復興に直接的に寄与するものではないが、災害に強い国土の形成及び我が国の中長期的な経済復興に貢献することが可能な事業である。小委員会として、被災地の復興を心から願うとともに、中央新幹線の整備についても、東日本大震災の教訓を踏まえながら着実に進められ、我が国の経済社会全体の復興の一助となることを切に望む。」¹³⁾と結ばれている。

答申が提出された2011年5月の月内に国土交通大臣は、東京都・大阪市間の建設主体および営業主体としてJR東海を指名し、整備計画を決定して、JR東海に建設を指示した。JR東海は、3年2ヶ月に及ぶ環境影響評価を行い、2014年8月に最終的な「中央新幹線（東京都・名古屋市間）環境影響評価書」^{10,11)}を国土交通大臣に送付・公告するとともに、土木構造物を中心とする「品川・名古屋間工事实施計画（その1）」の認可申請を行った。同年10月に国土交通大臣は工事实施計画（その1）を認可し、JR東海は中央新幹線の建設に着手した。

さらに2017年9月に電気設備を中心とする工事实施計画（その2）の認可申請を行い、2018年3月認可を受けた。また、2018年3月に鉄道で初となる首都圏・中京圏における大深度地下使用の認可申請を行い、同年10月17日に認可を受けた。

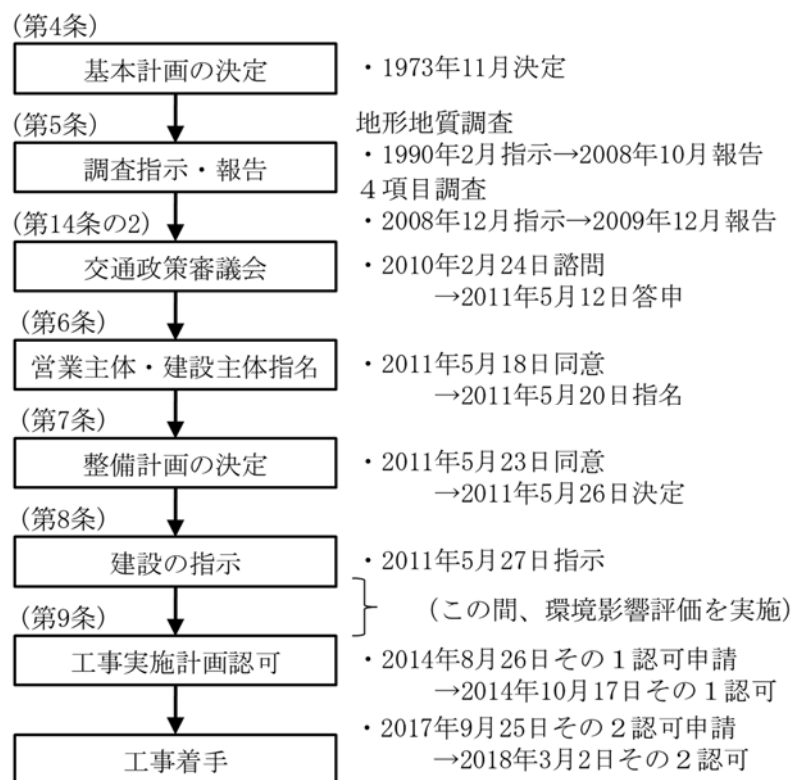


図-1.2.3 全国新幹線鉄道整備法に基づく中央新幹線の手続きの流れ

一方、超電導リニア技術開発については、2013年8月に山梨実験線を先行区間18.4kmから当初計画の42.8kmに延伸し、実験線の路線延長は中央新幹線品川・名古屋間286kmの1/7となった。また、2017年2月に実用技術評価委員会から「営業線に必要となる技術開発は完了」との評価¹⁴⁾を受けた。2020年8月に改良型試験車(図-1.2.4に示す)を投入するなど、山梨実験線では技術のブラッシュアップと営業運転に向けたコストダウンに取り組んでいる。山梨実験線の設備については2.2.1節に後述している。



図-1.2.4 L0系改良型試験車

(3) 現在の中央新幹線工事の進捗状況

工期が長期に亘り難易度が高い南アルプスのトンネルや、品川駅、名古屋駅の両ターミナルを始め、シールドマシンの発進地点となる都市部非常口や山岳トンネルなど、2020年12月末現在で全体の延長の8割を超える区間で工事契約を締結し工事を進めている。図-1.2.5にターミナル駅の工事、山岳トンネルの本坑工事、都市部の非常口と呼ばれる枝坑(立坑、図-1.1.4参照)の工事の写真を示す。



図-1.2.5 工事の写真(左:名古屋駅における工事桁の架設,中央:南アルプストンネルにおける本線トンネルの掘削,右:都市部の立坑の底部から非常口を見上げた状況)

1.3 中央新幹線の微気圧波問題

1.3.1 中央新幹線の沿線の環境保全に関わる課題

中央新幹線を始めとする鉄道建設にあたっては、沿線の環境保全について、環境影響評価法に基づき適切に予測および評価を行って必要に応じた適切な対策を講ずることがプロジェクトの推進のために不可欠である。

超電導リニアによる中央新幹線のような高速鉄道では、特に環境への配慮事項として騒音、振動、微気圧波による沿線への影響が挙げられる。このうち超高速走行に伴う騒音は防音防災フード(図-1.3.1)の設置により従来型新幹線の騒音基準のうちの住宅地域(I類型)の基準値も満足している^{15,16)}。地盤振動についても、超電導リニアの特徴である土木構造物への荷重分散(図-1.3.2)により、特段の対策を必要せずとも従来型新幹線の振動対策についての環境省勧告に準拠した基準値を満足するものと予測され、山梨実験線での測定や解析モデルによって十分に小さな値であることが確認されている^{14,17)}。

本論文では、高速列車がトンネル内の急激に断面積が変化する箇所を通過する時に形成される圧縮波が、トンネルを伝播し坑口で放射される際に衝撃音や建具の振動を生じさせる微気圧波問題を取り扱うものである。



図-1.3.1 防音防災フードの例(山梨実験線)

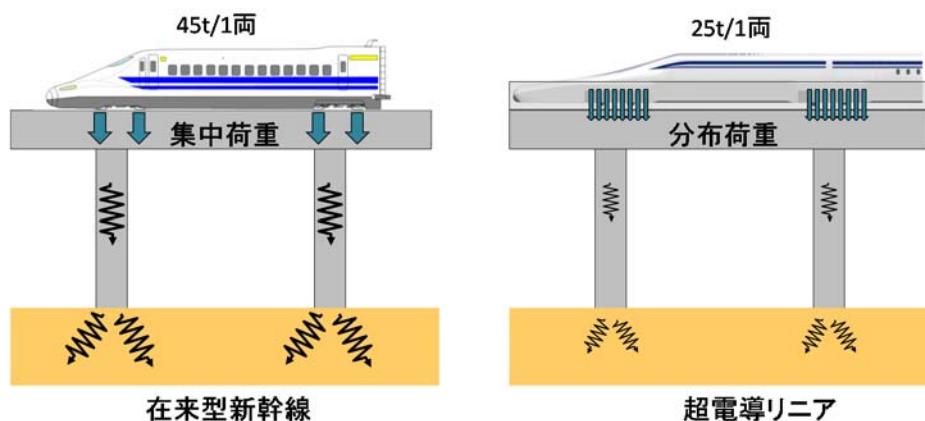


図-1.3.2 在来新幹線(左)と超電導リニア(右)の地盤振動のイメージ

1.3.2 微気圧波の現象

一般的な高速鉄道の微気圧波^{1,2)}の現象について述べる。列車が高速でトンネルに突入すると入口側坑口で圧縮波が生じ、その圧縮波はトンネル内を音速で伝播する。そしてその圧縮波は反対側坑口に到達すると、ほとんどは坑口で反射し膨張波となってトンネル内へ戻っていくが、圧縮波の一部が坑口からパルス状の圧力波となって放射され、発破音（衝撃音）が生じたり坑口付近の家屋の建具（戸や窓）に振動を発生させたりすることがある。列車が高速でトンネルに突入する際における微気圧波の現象は、(1)列車のトンネル突入による圧縮波の形成、(2)トンネル内の圧縮波の伝播、(3)反対側坑口における微気圧波の放射の3つの現象に分けて考えることができる（図-1.3.3）²⁾。

トンネル内の空気は列車突入によって圧縮され、圧力が上昇して圧縮波が形成される。この過程では圧縮波は列車先頭部形状、トンネル坑口形状、列車トンネル断面積比の影響を受けるため、生じる圧縮波の波形もこれらに依存する。その中でも圧縮波の最大圧力上昇量は概ね列車突入速度の2乗に比例することがわかっている。また、圧力上昇過程の時間的スケールは列車先頭長さを列車突入速度で割った時間幅で支配される。その結果、微気圧波の支配的パラメーターである圧縮波の圧力勾配最大値は、列車のトンネル突入速度の3乗に比例する²⁾。

列車のトンネル突入によって生じた圧縮波は振幅が大気圧の数%程度であり、トンネル内をほぼ音速で伝播する。トンネルが短い場合、圧縮波は伝播による影響を受けずに反対側坑口まで到達する。一方、トンネルが長くなると圧縮波は波の非線形効果、軌道構造（従来の鉄道の場合、バラスト軌道あるいはスラブ軌道）、トンネル内の構造の影響を受け、波形が変化して反対側坑口に到達する。ここで非線形効果とは、圧縮波が有限振幅波であることにより伝播速度が局所的に異なり、それによって伝播とともに波形が変化してゆく現象である。圧縮波の場合、圧力上昇によって速度が増加するため、伝播とともに波面が切り立ってゆくことになる（図-1.3.4）。これらのことから中央新幹線では列車が超高速化であることとトンネルが長大であることによる微気圧波への影響について対処する必要がある。

一方、軌道構造は圧縮波と軌道面との摩擦によって伝播とともに圧縮波が減衰してゆく方向に作用する。伝播時の圧縮波波形の変化は主に波形の切り立ちと圧縮波の減衰の大小関係によって決まってくる。従来の鉄道の場合、スラブ軌道トンネルでは圧縮波の圧力勾配は切り立ち、バラスト軌道トンネルでは圧縮波の圧力勾配は減衰する傾向にある^{2,18,19,20)}。

反対側坑口から放射される微気圧波の大きさは、低周波数で遠方場近似が成り立つ場合（反対側坑口に到達する圧縮波の圧力勾配が大きく切り立っていない場合で、かつ計測点がトンネル坑口に近くない場合）には、圧縮波の圧力勾配にほぼ比例し、反対側坑口（放射される坑口）からの距離に反比例する¹⁾。

なお、微気圧波の基準としては、微気圧波に関する環境基準あるいは指針は未だ定められていない。従来型新幹線では、「トンネル坑口緩衝工の設置基準（案）」²¹⁾においての目安値として「民家近傍で微気圧波のピーク値が 20Pa 以上」、または「坑口中心から 20m地点で原則 50Pa 以上」の場合にトンネル入口側坑口に緩衝工を設置することとされている。整備新幹線ではこの目安値をもとに微気圧波についての環境影響評価をしており^{22,23)}、超高速鉄道における微気圧波についてもこの目安値をもとに実用技術評価委員会において「民家近傍で微気圧波のピーク値が 20Pa

以下」，または「坑口中心から 20m地点で原則 50Pa 以下」との基準値（案）が設定されている¹⁴⁾。前者は建具の振動を抑えるレベルであり，後者は坑口から発破音が発生しないレベルを示している。本論文では後者の基準値（案）である「坑口中心から 20m地点で 50Pa 以下」になるように微気圧波の低減を図るものとする。

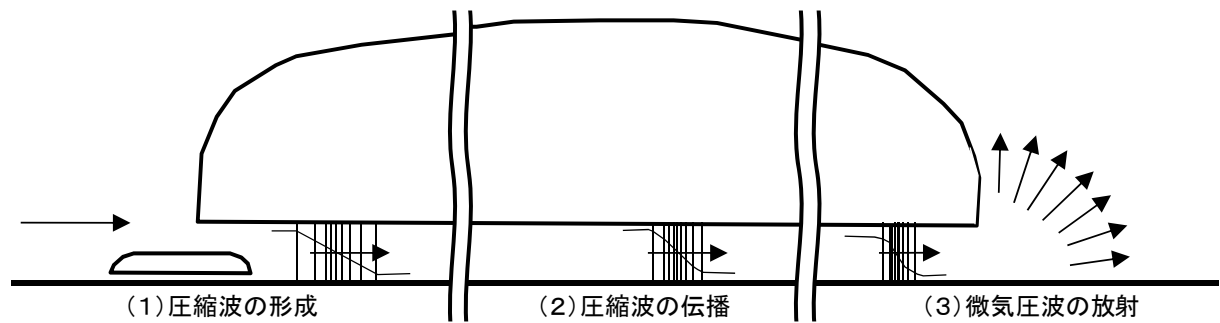


図-1.3.3 微気圧波の現象

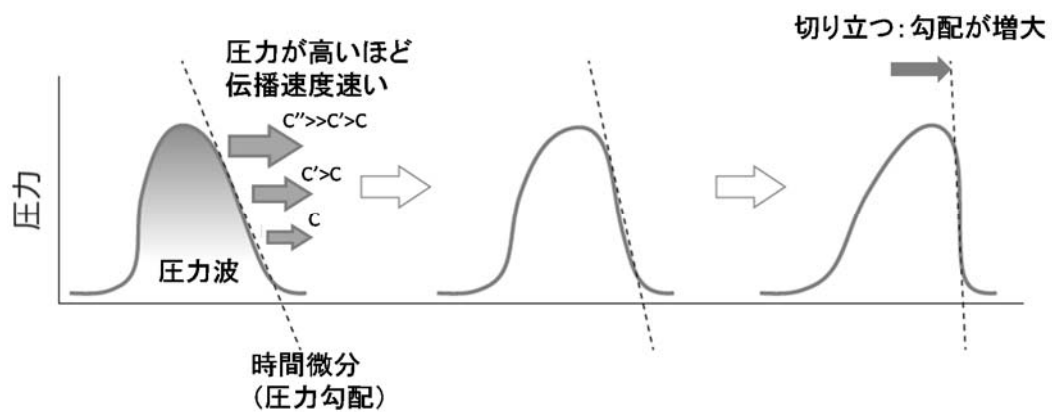


図-1.3.4 非線形効果による波の切り立ちのイメージ

1.3.3 中央新幹線の微気圧波に関する課題

中央新幹線のような超高速鉄道における微気圧波現象に対する低減方策に関しては、高速列車の突入時の圧縮波の形成、およびトンネル本坑における伝播、トンネル本坑の反対側の坑口における放射について本田がトンネルの両坑口への多孔板対策工の設置を提案し解決済みとなっている^{3,4)}。一方、中央新幹線のトンネルには、旅客の避難やトンネル内の換気を目的として設置される枝坑や、分岐器の設置により本線とトンネル外の基地へ至る枝線を分岐させる箇所などが存在するため、中央新幹線のトンネル内部は必ずしも断面が一様な状態が続くわけではない。列車がトンネルに突入する際に形成される圧力波が本線から分岐し枝坑を通過し坑口で放射される微気圧波の影響や、断面積変化を有する区間を列車が超高速で通過することによる新たな圧力波の発生による微気圧波の影響についても検討を行い、必要に応じて低減対策を施すことが重要である。

(1) 圧縮波の枝坑通過による微気圧波問題

列車がトンネルに突入した際に形成されトンネル内を伝播してきた圧縮波は、枝坑設置部で本坑と枝坑に分岐し本坑坑口および枝坑坑口から微気圧波として放出される（図-1.3.5）。トンネル内の枝坑の位置によっては伝播してくる圧縮波の圧力勾配が先述の非線形効果により切立つことにより強くなり、微気圧波の大きさは圧縮波の圧力勾配に比例するため、本線から分岐し枝坑を通過して枝坑から放射される微気圧波の周辺環境への影響が懸念される。この問題に対しては後述のとおり微気圧波の低減対策として、多孔板で仕切られた吸音領域である多孔板対策工（2.2.1節および5.1節で後述）を枝坑の途中に設けることにより圧力を外部に放出させ圧力上昇度を緩和する方法が高橋ら²⁴⁾に提案されており、山梨実験線の枝坑で効果が確認されている。

しかし後述するとおり、中央新幹線の枝坑は微気圧波の放射のみならずトンネル内の換気のための風路にもなっており、中央新幹線の営業線の開業時においては将来の東京・大阪間全区間開業を見越したトンネルの換気風量の増大によって枝坑を通過する風速が大きくなるため、枝坑の坑口での風切り音が懸念される。風切り音の低減対策が現行の微気圧波の低減効果に影響を与える可能性もあることから、微気圧波の低減効果と風切り音の低減効果を両立可能な対策の検討が必要となる。

(2) 分岐部で新たに発生する圧縮波による微気圧波問題

圧縮波はトンネル突入時だけでなく列車がトンネル内の断面積変化部を通過する際にも形成される²⁰⁾。これらの断面積変化部を通過する際には新たな圧縮波が形成され、この圧縮波がトンネル内を伝播しトンネル坑口から微気圧波が放射されるとともに、枝坑坑口からも放出される（図-1.3.6）。高速列車がトンネルに突入することにより形成される圧縮波は、斜坑や横坑などの枝坑設置部を通過するのに伴い波面が緩やかになり微気圧波を低減する効果があり²⁾、高速鉄道などで枝坑を利用した微気圧波低減対策の適用事例がある^{25,26,27,28)}。一方、高速列車がトンネル内の分岐部を高速通過することによりトンネル本坑内および枝坑内に形成される新たな圧力波が伝播しトンネル坑口で放射することに伴い新たな問題が引き起こされる可能性がある。

この問題に対しては、分岐部の空間的制約から前述の多孔板緩衝工や多孔板対策工を設置して多孔板の効果により圧力上昇度を緩和することが不可能であるため、別の対策の検討が必要であ

る。

なお、トンネル内の枝坑のうち非常口のような立坑と本線との接続部（断面積変化部）を列車が高速で通過する際に新たな圧縮波が発生し、枝坑坑口からの微気圧波が懸念される点については、2.4.2節で後述するとおり、このような接続部に設置される換気ダンパを列車接近時に一時的に閉鎖することで接続部の断面積変化を避ける対策が取られているため、微気圧波の問題は発生しない。

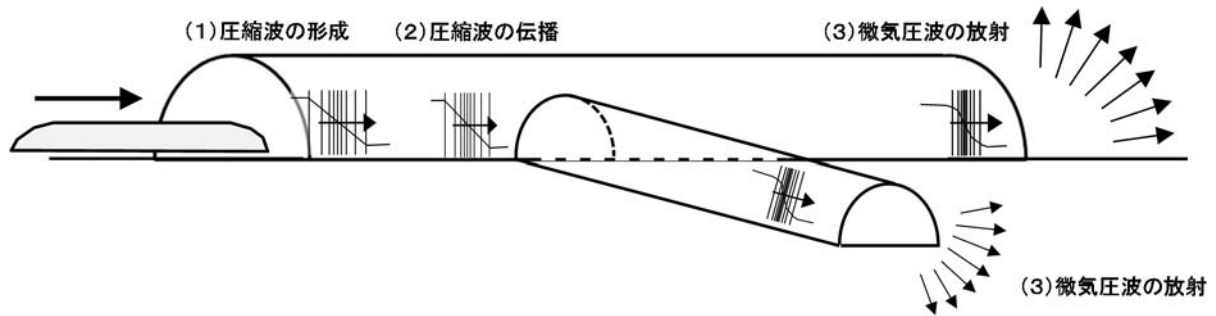


図-1.3.5 列車のトンネル突入による圧縮波の形成・伝播，微気圧波の放射

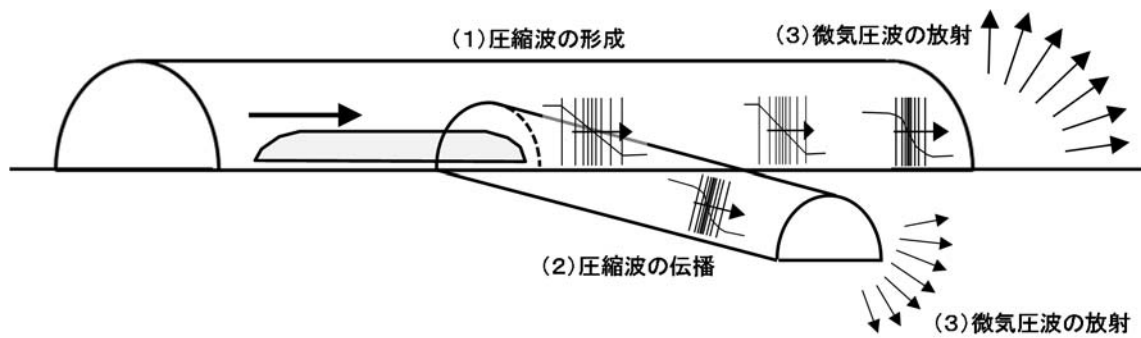


図-1.3.6 列車のトンネル内断面積変化部通過時の圧縮波の形成・伝播，微気圧波の放射

1.4 分岐部を有するトンネルの微気圧波対策に関する既往の研究

先述のように微気圧波の大きさはトンネル反対側坑口に到達した圧縮波の圧力勾配にほぼ比例する。このため、列車のトンネル突入時に形成された圧縮波が反対側坑口に到達するまでの間に圧縮波の圧力勾配を小さくすることが微気圧波の低減対策の基本的な考え方となる^{29,30)}。在来型新幹線では、緩衝工をトンネルの入口側の坑口へ設置し、突入時の圧縮波の圧力勾配を低減する対策がよく知られている^{5,6,7,8)}。また中央新幹線では、トンネル入口側のみならず微気圧波が放射されるトンネル出口側の坑口への多孔板緩衝工の設置が提案されており、その微気圧波低減効果も示されている³⁾。これらの報告の多くでは、トンネル入口、出口での対策（それぞれ発生源対策、放射対策）に主眼が置かれ、圧縮波が通過する経路（伝播経路）を論ずるものも一部にはあるものの^{25,31,32)}、総じてトンネル内に枝坑に分岐する区間を有するかどうかやそれらの存在がトンネル坑口で放射される微気圧波にどう影響するかについては通常あまり着目されてこなかった。本節では前節の図-1.3.5、および図-1.3.6に示される2つのケースを対象とする既往の研究について述べる。

1.4.1 列車のトンネル突入により発生し伝播する圧力波が本坑から分岐した枝坑を通過する場合の微気圧波への影響に関する既往の研究

トンネルの枝坑と微気圧波を関連付ける既往の研究としては、列車のトンネル突入により形成され伝播する圧力波が本坑から分岐し枝坑内を通過する現象を論じるものは少なく、トンネル内の枝坑の存在により本坑を伝播する圧力波が坑口に至るまでにどのように減衰しどのように微気圧波低減対策として寄与するか、という切り口のものが多い。

前田ら^{25,26)}は数値解析、および現地調査（山陽新幹線竹原トンネルの斜坑に設置されている扉を移設することによって斜坑の長さを変えた場合に圧縮波を減衰させる微気圧波低減対策にどのような影響が生じるのかの調査）を行い、斜坑長さの変更は入口側坑口の緩衝工による低減対策の補助的手段として有効であることを明らかにしている。また、斜坑の奥行きはトンネル中心から少なくとも50m以上必要で、圧縮波が非線形性効果によって切り立ってくる手前に設置しその圧力勾配を小さく抑えることが微気圧波低減には効果的であるとしている。この結果を踏まえて、上越新幹線の榛名トンネルおよび中山トンネルでは微気圧波低減対策として斜坑を利用する方法を採用しており²⁷⁾、山本ら²⁸⁾は現地試験により微気圧波が小さくなることを確認しこの方法の有効性を示している。また、中山トンネル（14,857m）では、斜坑がすべて起点側（南側）にあることから、上り列車がトンネル突入することで生じた圧縮波が斜坑のない区間を伝わるうちに波面が切り立ってしまい、それをトンネル内空気圧音（発破音）として下り（反対線）列車運転手が異音感知するという現象を引き起こしているとの報告もある³³⁾。このことから小澤ら³³⁾は、微気圧波低減対策として斜坑を利用する場合には、トンネル内の空気圧音（発破音）対策の観点からも斜坑の位置がトンネルの片方の坑口に集中しないように計画する必要がある、と提言している。

福田ら²⁰⁾は、スラブ軌道トンネル枝坑設置部を通過する圧縮波の変形について現地測定と数値解析により調べている。現地測定により、圧縮波が枝坑設置部を通過するときに圧縮波の圧力勾配が小さくなること、また圧力勾配が大きいほど枝坑による圧力勾配の低減効果が大きくなることを把握するとともに、数値解析でもよく確認できており、トンネル延長が3km程度、列車速度

が時速270km程度の範囲において解析手法の有効性を示している。

次に、実際に本坑から分岐した圧力波が枝坑を通過し坑口から放射される微気圧波への影響に関する既存の研究では、枝坑の断面積を変えることにより微気圧波の低減を図ろうとするアプローチが見られる。

宮地ら³⁴⁾は、枝坑から放出される微気圧波については、列車のトンネル突入により形成・伝播する圧力波による場合、あるいは列車のトンネル内断面積変化部通過時に形成・伝播する圧力波による場合のどちらでも、枝坑断面積を小さくすることにより低減できることを示している。しかし、都市圏の地下トンネルでは避難・換気のために必要な断面積を確保することが必要となるので、微気圧波対策のために極端に小さくすることはできない。

そこで斉藤ら³⁵⁾は、換気性能等を損なわないように枝坑断面積を大きく減らすことなく枝坑先端部で効果的に微気圧波を低減できる方法として、枝坑内部に枝坑の坑口から仕切り壁を設けて坑口から一定の距離まで断面を2分割し、2分割した断面のうち一方の枝坑の坑口を閉鎖する構造を提案している。この手法の興味深い点は、設備の改修を必要とするものの、圧縮波の閉鎖部による反射波とこれとは位相の異なる開口端による反射波を重畳することにより開口部での圧縮波の圧力勾配を低減し、開口部から外へ放射される微気圧波を低減しようとする点であり、音響学的検討により低減効果を予測し、模型実験により開口率にほぼ等しい微気圧波低減効果が得られることを確認している。

同じく斉藤ら^{35,36,37,38)}は、先述した枝坑への仕切り壁と同じ原理の微気圧波低減対策デバイスを応用し、本坑出口側の坑口での微気圧波対策として内壁付き反対側緩衝工（緩衝工の内部を線路方向に長い壁で分割し、分割した一方の坑口を閉塞したもの）を提案している。これにより列車が突入する時に発生するトンネル内圧縮波に対し、前述と同じ原理による微気圧波低減効果を音響学的検討により確認し、さらに模型実験により裏付けている。

福田ら³⁹⁾は、枝坑による減衰の効果を音響学的手法により再現した数値解析を行い、現地計測結果と比較することで圧縮波の予測精度の向上を図っている。

また1.3.3節で触れたとおり高橋ら²⁴⁾は、中央新幹線の超高速列車のトンネル突入で発生する圧力波が本線から分岐した枝坑を通過し枝坑坑口から放射される微気圧波の低減対策として、多孔板で仕切られた吸音領域である多孔板対策工（2.2.1節および5.1節で後述）を枝坑の途中に設ける方法を提案した。模型試験によるパラメータスタディを行うことで微気圧波低減に与える効果を調査するとともに、山梨実験線の枝坑に多孔板対策工を設置し、現地計測によりその効果を実証している。一方、中央新幹線の枝坑は微気圧波放射のみならずトンネル内の換気のための風路にもなっており気流に伴う風切り音による周辺への騒音の影響にも配慮が必要である。中央新幹線の都市部トンネルの枝坑は立坑の形態であるが、高速道路の長大地下トンネルの換気を目的とした立坑は騒音低減のほか自動車の排気ガスに含まれる浮遊粒子状物質（SPM）や窒素酸化物（NO_x）の拡散防止⁴⁰⁾を図るものであり、微気圧波の低減はそもそも設計の対象ではないため、微気圧波と騒音の両者の低減対策として参考になる既往の研究はない。

1.4.2 列車の分岐部通過や断面積変化部通過により発生する圧力波に関する既往の研究

前節の研究のように斜坑や横坑などの枝坑は、圧縮波がトンネル内を通過することでその波面が緩やかになり微気圧波を低減する効果があるものの、その一方で列車がトンネル内の枝坑設置部を高速通過するとトンネル本坑内および枝坑内に新たな圧力波が形成され、この枝坑通過時の圧力波がトンネル坑口に到達すると微気圧波を放射し、新たな問題を引き起こす可能性がある。同じくトンネルにおける断面積変化箇所である分岐部を通過することによる新たな圧縮波の発生に伴う微気圧波問題については、トンネル内に列車が高速で通過する分岐部が設置されるのは中央新幹線が初めてであるため、分岐部に起因する微気圧波に関する過去の研究はない。

トンネル内部の断面積変化による圧縮波やそれに伴う微気圧波に着目した既存の研究について述べる。

福田ら²⁰⁾は、トンネル突入に伴う圧縮波の伝播の過程でトンネル内の枝坑が圧力勾配を低減させることを調査した先述の検討に続き、列車が枝坑設置部を高速通過した際に発生する圧力波(枝坑通過波)の現象を枝坑の奥行きが長い場合について模型試験および数値解析により調べている。この検討で、トンネル本坑内に形成される枝坑通過波の大きさはトンネル枝坑の本坑に対する断面積比及び列車速度の2乗に比例すること、トンネル坑口から外部へ放出される枝坑通過放射波の大きさは圧力波の変形が無視できる短いトンネルにおいては列車速度の3乗にほぼ比例すること、複線トンネルにおいては列車が枝坑遠隔側を通過する場合より枝坑近接側を通過する場合の方が枝坑通過波が大きくなりトンネル出口から形成される枝坑通過放射波が大きくなること、を明らかにしている。枝坑における微気圧波低減効果を維持しつつ、枝坑分岐部通過時の新たな圧力波を低減する方法を検討し、図-1.4.1に示すようなトンネル本坑内の圧力が枝坑内の圧力よりも高いときのみ開く構造となっている逆止弁をトンネル本坑と枝坑の分岐部に設置することを提案している。

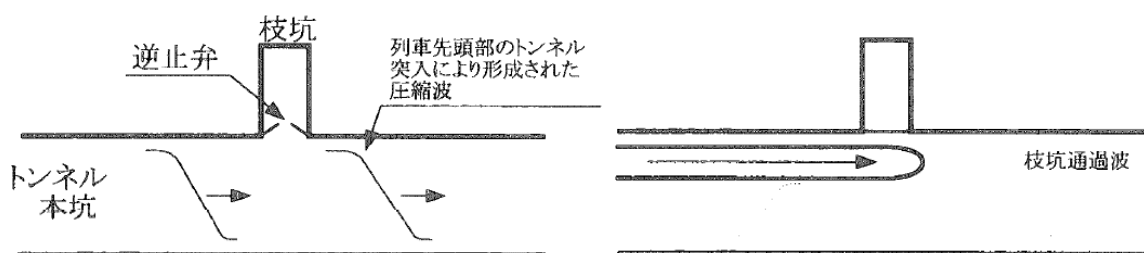


図-1.4.1 トンネル本坑と枝坑の分岐部に設置する逆止弁²⁰⁾

(左：圧縮波が枝坑設置部を通過するとき(逆止弁：開)、

右：列車が枝坑設置部を通過するとき(逆止弁：閉))

また、最近建設された新幹線のトンネルでは、微気圧波低減効果を持たせながら枝坑通過時の圧力波を小さくするために、トンネル本坑と枝坑の分岐部を図-1.4.2に示すようなオリフィス状の開口部とし分岐部の断面積を小さくするという対策を行っている⁴⁾。しかし、オリフィスのようなものを坑口に設置すると断面積が縮小され、それに応じて坑口における流速が大きくなるため

放出断面積の減少率に比例するほどには微気圧波は小さくならないものと推測されている^{35, 38)}。

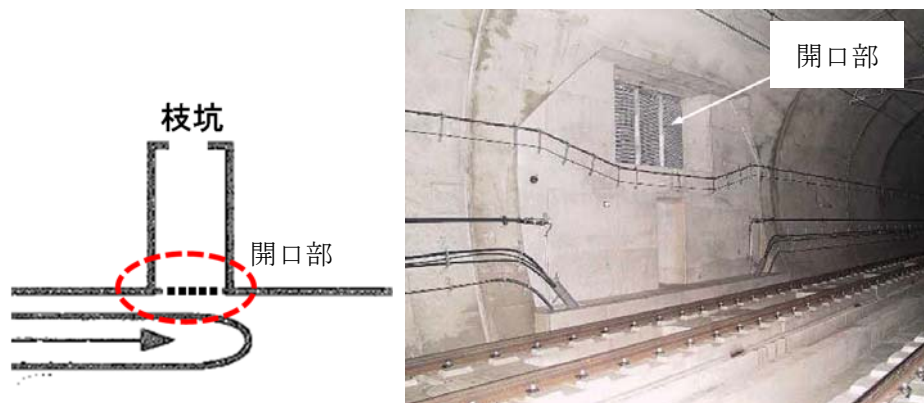


図-1.4.2 オリフィス状の開口部⁴¹⁾ として本坑・枝坑の分岐部

齊藤ら³⁵⁾は、列車がトンネル本坑と枝坑の分岐部を通過する際に発生する圧力波による微気圧対策については、枝坑坑口では緩衝工の効果がないため枝坑微気圧波を低減させるにはトンネル入口緩衝工以外の対策を検討する必要がある、この場合も前述した枝坑内部に設けた仕切り壁によって一方の坑口を閉鎖する構造を提案している（詳細は第3章で述べる）。

トンネル内の圧力変動の予測については、山本⁴²⁾によって1次元非定常圧縮性流れの数値シミュレーションが初めて行われ、現車試験の結果とよく一致することが確かめられている。この数値シミュレーションは後に複線トンネル内におけるすれ違い⁴³⁾や地下駅などの断面積変化部、立坑などの分岐⁴⁴⁾が取り扱えるように機能拡張されている。その後齊藤ら⁴⁵⁾は、音波近似を用いない手法による1次元非定常圧縮性流れの数値シミュレーション手法を開発し、大深度地下鉄道を想定した地下駅など断面積変化部を有するトンネルに対する計算により、模型実験との比較による精度検証を行っている。

このようにトンネル内部の断面積変化による圧縮波およびそれに伴う微気圧波に注目した報告はいくつか存在するが、その低減対策の基本思想は列車が枝坑を通過する際に可能な限り断面積変化を抑えるというアプローチによるものであり、中央新幹線のトンネル内の分岐部による微気圧波の低減対策としては空間的な制約から設置が困難な装置であるものや効果が疑問視されるものであり、効果的な解決策を示す既往の研究はない。

1.5 本研究の目的



高速鉄道においては中央新幹線で初めて設置されるトンネル内の分岐部で新たに発生する圧力波やそれに伴う微気圧波の低減対策については解明されていない。しかもこれらの箇所では、空間的制約から本田ら⁴⁾により提案された多孔板緩衝工や、高橋ら²⁴⁾により提案された多孔板対策工を微気圧波低減対策として設置できない。このため、分岐部を有するトンネルにおける高速列車通過に伴い発生する圧力変動について現状把握を行い、明らかにする。既存の手法の延長で対処が困難な場合は全く別のアプローチにより、現場の空間制約も考慮に入れた実現可能な微気圧波低減対策を提案する。そして提案した対策手法について、営業線における将来の速度向上などの起こり得る様々な環境変化への適用可能性を確認する。これを第一の課題とする。

また、列車がトンネルに突入する際に発生する圧縮波が本坑から枝坑へ分岐し枝坑を通過して坑口から放射される微気圧波問題については、高橋ら²⁴⁾により提案された多孔板対策工により解決済みであるが、将来の東京・大阪間全区間開業を見越したトンネル内の換気風量増大に伴う風速増加による坑口での風切り音に対する低減対策と両立可能な追加の方策が必要である。これを第二の課題とする。

これらの課題への取組みにより、中央新幹線の微気圧波問題である列車のトンネル突入による微気圧波問題、列車の分岐部通過により発生する圧縮波による微気圧波問題の両方を明確に解決し、中央新幹線の開業に向けて微気圧波対策を確立することを目的とする。以上を表にまとめると以下の表-1.5.1に示すとおりとなる。

なお、車両形状の改良（列車先頭部形状の延伸、車両断面の小型化）により、列車のトンネルへの突入時の圧縮波の圧力勾配を低減し、これにより微気圧波を低減できる可能性があると考えられる^{46,47,48)}が、車両側の対策の検討は本論文の対象外とする。

表-1.5.1 中央新幹線の微気圧波問題と本研究の位置づけ

トンネル坑口（入口出口）	トンネル内の分岐部	枝坑
【具体的な問題】 トンネル突入時に形成される圧縮波の本坑の伝播・トンネル坑口での微気圧波問題	【具体的な問題】 トンネル内の分岐部で発生した圧縮波による坑口での微気圧波問題	【具体的な問題】 トンネル突入時に形成される圧縮波が枝坑へ分岐し枝坑を通過した場合の微気圧波問題
【解決策】 トンネル坑口（入口出口）への <u>多孔板緩衝工</u> の設置により <u>解決</u>	【未解決】 空間的な制約により多孔板が <u>適用不可</u> であり、新たなアプローチで解明が必要 <div style="text-align: center;">  第一の課題 </div>	【解決策と残された課題】 枝坑内への <u>多孔板対策工</u> の設置により <u>解決</u> 但し風切り音対策と微気圧波の低減対策と両立可能な追加の対策が必要 <div style="text-align: center;">  第二の課題 </div>
課題解決により中央新幹線で想定される全ての状況に対する微気圧波の低減対策を確立する。		

1.6 本研究の構成

本研究は（図-1.6.1）に示すとおり全6章から構成されている。以下に各章の概要を記す。

「第1章 序論」では、本研究の背景を示すとともに、本研究で対象とする超高速鉄道による中央新幹線の計画概要および微気圧波問題に係る現状を紹介している。また、本研究で関係する既往の研究を整理したうえで、現状では未解決あるいは解決が困難である問題を特定することにより本研究の対象およびその目的を明確にし、本節で本論文の構成を示す。

「第2章 分岐部を有する超高速鉄道トンネルの微気圧波に関する現状調査と課題抽出」では、山梨実験線における超高速列車のトンネル枝坑設置区間通過による圧力波の形成に関する現地測定結果や、坑口における微気圧波や騒音レベルの数値解析によるシミュレーション予測結果をもとに、坑口から放射される微気圧波の低減の必要性を課題として提示する。また、その課題について現状のアプローチで解決を図った場合の問題点を洗い出し、解決のための新たな原理の導入の必要性を示す。

「第3章 トンネル分岐部通過時に発生する微気圧波の低減手法の検討」では、第一の課題に対して、トンネル分岐部を超高速列車が通過する際にトンネルの断面積変化により発生する圧縮波の伝播により坑口で放出される微気圧波の低減を目的とし、分岐部で発生する圧縮波の圧力勾配を低減させるため、既存のアプローチとは全く異なる、新しい原理に基づいた方策を提案する。第2章で把握するトンネル内の横坑を列車が通過する際に発生する圧縮波と膨張波の性質に着目し、これらをうまく利用して、列車が分岐部を通過する際に発生する圧縮波と重畳することにより圧力勾配を低減する「並行トンネル」を提案する。この新しい原理について簡易的なモデルや数値解析によって圧力勾配の低減の実現性を把握するとともに、圧縮波への効果的な重畳を図ることのできる「並行トンネル」の各構成要素の長さや断面積などの諸元について検討し、模型試験や数値解析によりその微気圧波低減効果を確認する。

「第4章 営業線における並行トンネルの適用性の評価」では、第3章で述べた検討をもとに、中央新幹線の営業線の分岐部に設置する「並行トンネル」の実用案を提示する。「並行トンネル」を設置するにあたっての建設面での妥当性を示すとともに、列車の速度向上や周辺の地盤条件、並行トンネル内の壁面の表面粗度、断面形状、曲率の違いなどの変動が圧力勾配低減効果へ及ぼす影響について感度分析を行い、微気圧波対策としての実用的見地からの有効性を示す。

「第5章 トンネル枝坑における付帯設備を考慮した微気圧波低減対策」では、第二の課題に対して、枝坑坑口において微気圧波低減だけでなく、将来の中央新幹線の全区間開業時に必要な換気流量が枝坑に流れる場合の風切り音の騒音低減も満足できるような風路についての検討を行い、騒音低減とトレードオフの関係にある微気圧波低減の両立が実現可能な対策を提案する。山梨実験線の立坑で微気圧波低減を目的として設置されている多孔板対策工のみならず、枝坑内の換気ファンやサイレンサのような付帯設備の効果も考慮に入れた微気圧波低減効果について評価を行い、対策を提案する。

「第6章 結論」では、本研究で得られた結論を述べる。

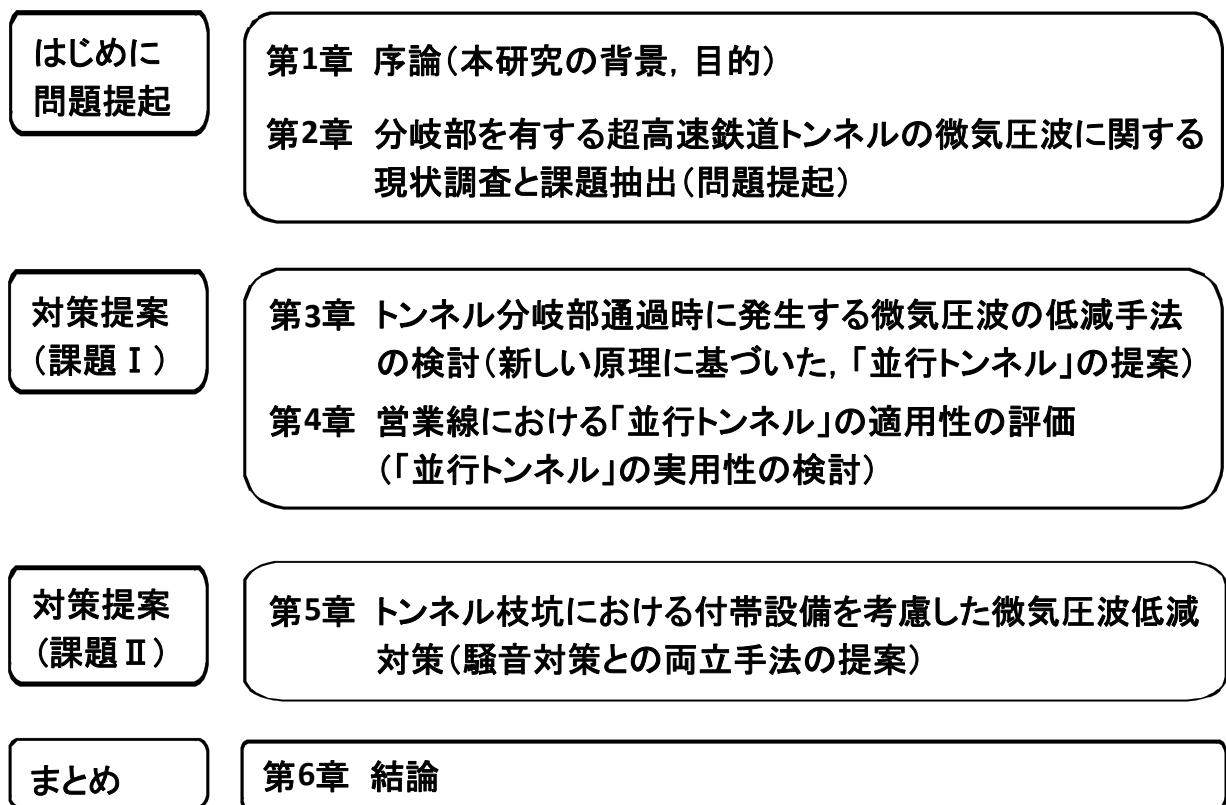


図-1.6.1 本研究の構成

参考文献

- 1) 山本彬也：トンネル出口からの微気圧波，日本物理学会春の分科会予稿集，p. 137, 1977.
- 2) 小澤智：トンネル出口微気圧波の研究，鉄道技術研究報告，No.1121, 1979.
- 3) 本田敦，高橋和也，野澤剛二郎，土肥哲也，小川隆申，飯田雅宣，藤野陽三：超高速鉄道のトンネル内圧縮波伝播性状と出口側緩衝工による微気圧波低減効果，土木学会論文集 A1, Vol. 71, No. 1, pp. 128-138, 2015.
- 4) 本田敦，高橋和也，野澤剛二郎，土肥哲也，小川隆申，飯田雅宣，藤野陽三：超高速鉄道トンネルにおける微気圧波の評価および緩衝工の提案，土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)，Vol. 71, No. 3, pp. 327-340, 2015.
- 5) 小澤智，塚本京市，前田達夫：トンネル微気圧波低減対策に関する模型試験，鉄道技術研究報告，No. 990, 1976.
- 6) 小澤智，内田俊孝，前田達夫：入口緩衝工による備後トンネル微気圧波の低減，鉄道技術研究報告，No. 1054, 1977.
- 7) 前田達夫，木下真夫：側面に開口部のある入口緩衝工による備後トンネル微気圧波の低減，鉄道技術研究所速報，No.78-1021, p. 19, 1978.
- 8) 前田達夫：列車の空気力学的特性およびトンネル内微気圧波低減対策法に関する研究，鉄道総研報告，特別 20 号, 1998.
- 9) 岩田眞：中央新幹線（東京都・名古屋市間）の建設計画，土木施工，Vol. 59, No. 10, 2018.
- 10) 中央新幹線（東京都・名古屋市間）環境影響評価書，東海旅客鉄道株式会社，2014.
- 11) 中央新幹線（東京都・名古屋市間）環境影響評価書 資料編，東海旅客鉄道株式会社，2014.
- 12) 超電導磁気浮上式鉄道実用技術評価，超電導磁気浮上式鉄道実用技術評価委員会，2005.
- 13) 国土交通省交通政策審議会答申，中央新幹線の営業主体及び建設主体の指名並びに整備計画の決定について，2011.
- 14) 超電導磁気浮上式鉄道実用技術評価，超電導磁気浮上式鉄道実用技術評価委員会，2017.
- 15) 超電導磁気浮上式鉄道実用技術評価，超電導磁気浮上式鉄道実用技術評価委員会，2009.
- 16) 永長隆昭，荻田倫之，大森洋志，野澤剛二郎，土肥哲也，長倉清，藤野陽三：超高速鉄道の騒音対策設備に係る構造物音の低減及び騒音予測手法の開発，土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)，Vol. 74, No. 1, pp. 89-108, 2018.
- 17) 宇野護，永長隆昭，藤野陽三，芦谷公稔，森川和彦：超高速鉄道走行時の構造物及び地盤の振動に関する実測と予測，土木学会論文集 A1, Vol. 68, No. 1, pp. 151-166, 2012.
- 18) 福田傑，小澤智，飯田雅宣，鷹崎徹，若林雄介：長大スラブ軌道トンネル内を伝播する圧縮波の変形，日本機械学会論文集 (B 編)，Vol. 71, No. 709, pp. 2248-2255, 2005.
- 19) 福田傑，飯田雅宣，鷹崎徹，佐久間豊，菊地勝浩，村田香，若林雄介，小澤智：長大スラブ軌道トンネルにおける圧縮波の伝播，鉄道総研報告，Vol. 18, No. 11, pp. 25-30, 2004.
- 20) 福田傑，飯田雅宣，村田香：トンネル内枝坑による微気圧波の低減と枝坑通過波の形成，鉄道総研報告，Vol. 14, No. 9, pp. 17-24, 2000.
- 21) 山岳トンネル設計施工標準・同解説，鉄道建設・運輸施設整備支援機構，2008.
- 22) 北海道新幹線（新青森・札幌間）環境影響評価書，日本鉄道建設公団，2002.

- 23) 九州新幹線（武雄温泉・長崎間）環境影響評価書，日本鉄道建設公団，2002.
- 24) 高橋和也，本田敦，野澤剛二郎，土肥哲也，小川隆申：超高速鉄道トンネルにおける入口側円形型緩衝工の微気圧波低減効果，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol. 71, No. 2, pp. 167-172, 2015.
- 25) 前田達夫，木下真夫：斜坑扉移設ならびに吸音材によるトンネル微気圧波低減試験，鉄道技術研究所速報，No. A-80-118, 1980.
- 26) 前田達夫：斜坑・器材坑によるトンネル微気圧波の低減，鉄道技術研究報告，No.1167, 1981.
- 27) 上越新幹線工事誌（大宮・新潟間），日本鉄道建設公団，1984.
- 28) 山本彬也，小澤智，前田達夫，木下真夫，種本勝二：トンネル内の枝坑を利用した微気圧波低減対策の効果－上越新幹線榛名，中山トンネルの場合－，鉄道技術研究報告，No.1250, 1983.
- 29) トンネル微気圧波の基礎と測定技術及び低減対策法 講座テキスト，鉄道総合技術研究所：平成6年度鉄道総研教育講座，1994.
- 30) 前田達夫：トンネル微気圧波対策，日本鉄道施設協会誌，pp. 613-615, 2007.
- 31) 前田達夫，松村豪，種本勝二，梶山博司，飯田雅宣：速度向上時のトンネル微気圧波低減対策，鉄道総研報告，Vol.4, No.1, pp. 44-51, 1990.
- 32) 小澤智，前田達夫，松村豪，内田一男：トンネル内の圧力波に及ぼすバラストの影響－第1報 実態の把握と1次元モデルによる基礎方程式の定式化－，鉄道総研報告，Vol.5, No.12, pp. 9-15, 1991.
- 33) 小澤智，前田達夫，種本勝二，木下真夫：トンネル内圧縮波の前面に付随する空気圧音－上越新幹線中山トンネルの場合－，鉄道技術研究所速報，No. A-84-3, 1984.
- 34) 宮地徳蔵，福田傑，高見創：立坑を有するトンネルの坑口から放射される圧力波，日本機械学会流体工学部門講演会論文集，No. 05-32, p. 175, 2005.
- 35) 齊藤実俊，宮地徳蔵，飯田雅宣：トンネル枝坑坑口からの微気圧波の低減方法，鉄道総研報告，Vol. 24, No. 1, pp. 41-44, 2010.
- 36) 齊藤実俊，宮地徳蔵，飯田雅宣：フード状構造物による列車退出側坑口でのトンネル微気圧波低減対策，鉄道総研報告，Vol. 27, No. 1, pp. 17-22, 2013.
- 37) 齊藤実俊，宮地徳蔵，飯田雅宣：内壁付きフードによる列車退出側坑口でのトンネル微気圧波低減対策，日本機械学会論文集（B編），Vol. 79, No. 801, pp. 749-753, 2013.
- 38) 齊藤実俊，宮地徳蔵，飯田雅宣：内壁付き出口フードによる放射段階での微気圧波低減対策，日本機械学会論文集（B編），Vol. 79, No. 806, pp. 2109-2119, 2013.
- 39) 福田傑，飯田雅宣，前田達夫，小澤智，前野一夫，本間弘樹：高速鉄道のスラブ軌道トンネル内を伝ばする圧縮波の解析（第2報，トンネル内の器材坑の効果），日本機械学会論文集（B編），Vol. 65, No. 630, pp. 598-604, 1999.
- 40) 道路環境影響評価の技術手法 2007 改訂版第2巻，財団法人道路環境研究所，丸善，2007.
- 41) 福田傑，宮地徳蔵，飯田雅宣：微気圧波を小さくする地上設備，RRR, pp. 10-13, 2009.
- 42) 山本彬也：新幹線トンネルの圧力変動・空気抵抗・トンネル換気，鉄道技術研究報告，No.871, 1973.
- 43) 飯田雅宣，前田達夫：トンネル内圧力変動シミュレーション，鉄道総研報告，Vol. 4, No. 7,

pp. 54-62, 1990.

- 44) 梶山博司, 飯田雅宣, 前田達夫 : 大深度地下鉄道の空気振動シミュレーション, 鉄道総研報告, Vol. 7, No. 7, pp. 51-58, 1993.
- 45) 斉藤実俊, 飯田雅宣, 梶山博司 : 大深度地下トンネル内圧力変動シミュレーションの開発と検証, 鉄道総研報告, Vol. 20, No. 1, pp. 29-34, 2006.
- 46) 小川隆申, 藤井孝藏 : 微気圧波軽減のための理論的列車先頭形状設計法, 日本機械学会論文集, Vol. 62, No. 599, pp. 2679-2686, 1996.
- 47) 飯田雅宣, 松村豪, 福田傑, 中谷浩二, 前田達夫 : トンネル微気圧波低減のための列車先頭部形状の最適化, 日本機械学会論文集 (B編), Vol. 62, No. 596, pp. 1428-1435, 1996.
- 48) 飯田雅宣 : トンネル突入時の圧縮波形成に関する数値シミュレーション, 鉄道総研報告, Vol. 8, No. 6, pp. 25-30, 1994.

第 2 章 分岐部を有する超高速鉄道トンネルの微気圧波 に関する現状調査と課題抽出

2.1 はじめに

前章で述べたとおり，中央新幹線のトンネルには枝坑や分岐部，さらには機器を設置するための小坑である横坑などが存在するためトンネルの断面は必ずしも一様ではなく，高速列車がトンネル内のこれらの断面積変化部を高速通過することによりトンネル本坑内および枝坑内に形成される新たな圧力波の実態および影響を把握する必要がある．本章ではこの現象に関する現状調査と課題抽出を行う．

まず山梨実験線におけるトンネル内での断面積変化部を実際に超高速列車が通過した際の圧力波について計測を実施する．具体的な計測の実施箇所は，トンネル内に電気設備や機器を配備することを目的として設置された横坑やトンネル建設時に利用した横坑のほか，実質的に断面積変化に近い状況を模擬した条件として，2 つの隣り合うトンネル同士を連絡する半円径のコンクリート製フードの天井に開口を設けた箇所（以下「中間緩衝工」という．）であり，高速列車通過に伴う圧力変化の測定を行う．なお，分岐部通過時に発生する圧縮波については，山梨実験線内にはトンネル内に分岐器が設置されている箇所が存在しないため，既存の模型実験や数値解析手法を用いて，分岐部を超高速列車が通過する状況を模擬し圧縮波の把握を行う．さらにこの圧縮波がトンネル内を長距離伝播し，トンネル坑口で放射される微気圧波について予測を行い，課題を抽出する．

抽出された課題に対する解決策として，微気圧波の増大原因となるトンネル内の断面積変化を直接的に解消するアプローチや，既存の微気圧波対策で適用され効果を発揮している多孔板を用いた圧力上昇の緩和に基づくアプローチが適用できないか検討を行う．これらのアプローチに基づく対策により，断面積変化部を高速列車が通過する際に形成される圧縮波の圧力勾配が低減される効果を把握するとともに課題の抽出を行う．

また，列車のトンネル突入に伴い発生した圧縮波が本線から分岐し枝坑を通過して，枝坑坑口から微気圧波として放射される場合の微気圧波の低減対策については，前章で述べたとおり騒音対策との両立が不可欠である．現状把握として山梨実験線の 5m×5m 断面の枝坑風路に，中央新幹線の枝坑において蓄熱緩和のために想定されている換気風量を通過させた場合の騒音を風洞試験により予測する．また，その騒音に対し，換気口などの現行で入手可能な標準的な対策デバイスを坑口に適用した場合の騒音の予測評価を数値解析により実施する．騒音低減のためには，風路内の風速を低減することが効果的であると考えられ，この方策が枝坑の微気圧波問題の解決策となり得るかも可能性がある．このため，風速低減を実現しうる枝坑内の風路拡大による騒音対策と，現状山梨実験線の枝坑内で微気圧波対策として使用されている多孔板対策工の両立について課題を抽出する．

2.2 現状調査と課題抽出のための設備・手法

2.2.1 山梨実験線の設備と多孔板対策工

(1) 山梨実験線の設備

本章で取り扱う、実際の超高速列車の通過に伴う圧力変動や微気圧波の計測、検討は JR 東海が山梨県内に保有する山梨実験線の設備を使用することにより実施してきた。本節では、山梨実験線の概要、および本論文に関連のある設備について述べる。

1987 年国鉄分割民営化により発足した JR 東海は、日本の大動脈である東海道新幹線を発展的代替輸送機関により二重化すべく中央新幹線に超電導リニアを適用すべく技術開発に取り組んだ。しかし、当時の実験線であった宮崎実験線は延長が 7km と短く全区間単線でトンネルがないなど設備面での物理的制約があることから、実用化のためには各種試験条件を備えた本格的な実験線の建設が必要であった。1988 年運輸省が「超電導磁気浮上式鉄道検討委員会」を設置し実用化に向けた技術開発の在り方を審議し 1997 年に新実験線として山梨県に現全線延長 42.8km のうち中央部 18.4km の先行区間が完成した。その後、さらなる長期耐久性の検証、一層のコスト低減、営業線適用に向けた設備仕様を検討するための最新の技術開発を目的にさらに深度化した検討を実施するため、2013 年に設備仕様を実用レベルの仕様に変更して 42.8km の全線にわたる設備が完成した。現在この山梨実験線において、高速での走行試験を実施するとともに、技術のブラッシュアップ及び営業線の建設、運営、保守のコストダウンの検討が行われている。

現在の山梨実験線の平面図を図-2.2.1 に示す。図中の線形において細長い長方形で囲われた区間がトンネル区間であり、その内部には、本研究が対象としている換気・避難用の枝坑や、機器を設置するための小坑である横坑（別の文献ではその使用目的を指して「器材坑」と呼ばれることもある）、トンネル建設時に利用した横坑などがいくつか存在する（図-2.2.2）。山梨実験線の最長のトンネル（図-2.2.1 の中央やや左に位置するトンネルであり、大月市内の 2 箇所¹⁾の非トンネル区間をフードで接続した区間を含む）は 23.4km に及び、超高速列車がトンネルに突入する際の圧縮波の形成、その伝播などの検討を目的とした数々の計測が実施され、トンネル入口、出口の多孔板緩衝工²⁾の開発、仕様決定に用いられた¹⁾。なお、山梨実験線において、本線から分岐するための分岐器は明かり区間にのみ存在し（図-2.2.3）、トンネル内には存在しない。

また、換気、避難を目的とした枝坑設備について、その枝坑が地上部に至る部分、および枝坑の立面図をそれぞれ図-2.2.4、図-2.2.5（左）に示す。山梨実験線のこの枝坑の大きさは直径約 20m（営業線の場合、直径約 30m）であり、この断面の大きさの制約も考慮し内部に設置される換気目的の風路の断面は 5m×5m と設計された。図-2.2.5（左）の立面図には、過去にこの風路に関する微気圧波対策が検討された際に、トンネルの枝坑には微気圧波低減対策としてトンネル坑口に設置するフード型の多孔板緩衝工²⁾を設置することはできないため最適解として提案された多孔板対策工³⁾（機能については次節（2.2.1(2)節）にて後述）が風路の途中に設置されている状況をその平面図とともに示している。実際の多孔板対策工の設置状況の写真を図-2.2.5（右）に示す。多孔板対策工の内部の風路の断面は正方形で、多孔板（図-2.2.6 に示す直径数 mm 程度の孔を有する金属の板）を介してその風路を中空の吸音層が取り囲む構造である。高橋らの検討³⁾によれば枝坑の風路が吸音層に接する面積が多いほど微気圧波低減効果が大きいとされるため営業線の枝坑では風路の外周を 4 面とも多孔板とし、各面を吸音層で取り囲む構造として計画している。

しかし山梨実験線の立坑の直径は約 20m で営業線の立坑の直径である約 30m と比較して小さいため、図-2.2.5 (左) の平面図に示すとおり、多孔板対策工の内部の風路は 4 面のうちの 3 面が多孔板を介し吸音層に囲まれる構造になっている。



図-2.2.1 山梨実験線 (平面図)



図-2.2.2 山梨実験線のトンネル内の横坑



図-2.2.3 山梨実験線の明かり区間の分岐器



図-2.2.4 換気・避難を目的とする枝坑坑口が地上に至る部分

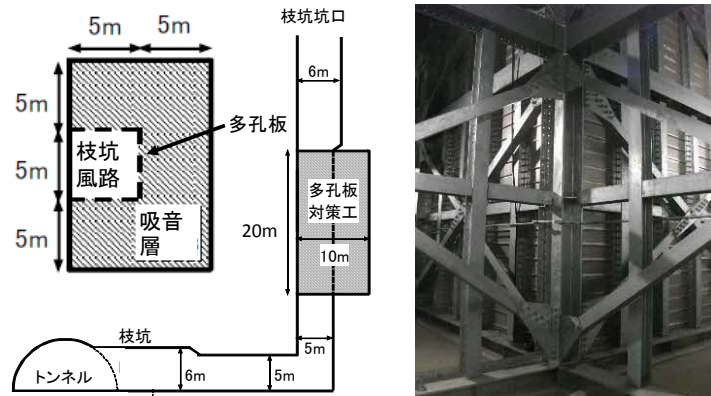


図-2.2.5 (左) 枝坑の立面図および多孔板対策工の平面図,
(右) 多孔板対策工 (吸音層から枝坑風路を見る)



図-2.2.6 多孔板 (開口率 4.5%)

(2) 多孔板対策工

多孔板対策工は前節の図-2.2.5 に示すように多孔板と吸音層により構成される閉空間構造になっている。多孔板対策工は多孔板孔部の空気を質量，吸音層をバネとして構成される音響共鳴機構が基本原理であり，多孔板は共鳴により振動する空気の孔部壁面での粘性減衰による摩擦減衰および孔部の圧力損失による減衰の 2 種類の減衰により吸音性能を発揮する⁴⁾。微気圧波は 10 数 Hz 以下の低周波数成分が主成分となるため，その領域で吸音率が高くなるように多孔板対策工を設計する必要がある。

多孔板対策工の基本原理によると，共鳴周波数と外圧の周波数とが一致したとき共鳴により孔部の空気の振動が激しくなり孔部壁面摩擦による減衰が大きくなる結果，吸音効果が高くなる。また波の周波数と波長の関係から共鳴周波数は吸音層厚さと相反する関係にあるので，本研究で取り扱う微気圧波のような低周波に対しては多孔板の背後の吸音層を大きくする必要がある。実際に数百～1,000Hz 程度の騒音低減を目的として市販されている高速道路の吸音パネルではその周波数領域で吸音効果が大きくなるように空気吸音層厚さが数十 mm 程度であるのに対し，多孔板の仕様が同様であれば，微気圧波のような 10 数 Hz 以下の低周波数成分が主成分の場合では吸音層厚さは数～10m 程度となる。

実際に多孔板対策工の吸音率は以下の計算式によって算出することが可能である⁴⁾ため，実際の多孔板対策工の仕様の諸元である板厚，孔径，開口率，吸音層の深さもそれに応じて決定される。平面波入射を仮定した場合の垂直入射吸音率は，1 次元波動理論に基づく 1 次元音響管の伝達行列を用いて計算できる⁴⁾。これによって得られる対策工の各面による吸音率を足し合わせ多孔板対策工の吸音率とする。

図-2.2.7 に多孔板と吸音層で構成される 1 次元音響管モデルを示す。多孔板あるいは吸音層の前後における圧力 (P_i , P_{i-1}) と流速 (粒子速度, u_i , u_{i-1}) の関係はそれぞれの伝達行列 M_{i-1} を用いて以下のようなになる。

$$\begin{bmatrix} P_i \\ u_i \end{bmatrix} = M_{i-1} \begin{bmatrix} P_{i-1} \\ u_{i-1} \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

なお空気層である吸音層の場合の伝達行列は以下のように表せる。

$$\begin{bmatrix} P_i \\ u_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos kL & j\rho c \sin kL \\ j(\rho c)^{-1} \sin kL & \cos kL \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{i-1} \\ u_{i-1} \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

ここに k は波長定数， L は吸音層厚さである。多孔板については吸音率の音圧依存性を考慮した Melling による多孔部の吸音解析式⁵⁾がよい精度を示す^{4),6)}ため伝達行列式として使用して以下のようなになる。

$$\begin{bmatrix} P_i \\ u_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \Gamma \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{i-1} \\ u_{i-1} \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

$$Re[\Gamma] = \frac{2(t+d)}{d} \sqrt{2\rho\mu\omega} \left(\frac{D}{d}\right)^2 + \frac{8}{3\pi} \zeta_0 \left(\frac{D}{d}\right)^4 \frac{\rho}{2} |u_i| \quad (2-4)$$

$$Im[\Gamma] = \omega\rho \left\{ t \left(1 + \frac{2}{d} \sqrt{\frac{2\mu}{\omega\rho}} \right) + \frac{8}{3\pi} d \right\} \left(\frac{D}{d}\right)^2 \quad (2-5)$$

ここに t は板厚, d は多孔板孔径, D は一つの孔に対する主管路徑, ω は角周波数, μ は空気の粘性係数, ζ_0 は多孔板孔部での圧力損失係数である. 式(2-4)に示す Γ の実部が多孔板の減衰を表し, 第一項は孔部を細管とした場合の管壁面と空気との間の粘性による減衰を表す. また第二項は孔部を空気が通過する際の慣性抵抗による減衰を表す. 多孔板前後の圧力については圧力差の形で表すと以下になる.

$$P_i - P_{i-1} = \Gamma \cdot u_{i-1} \quad (2-6)$$

また式(2-4)を式(2-6)に代入すると, 第一項と第二項はそれぞれ粒子速度に比例する項と粒子速度の 2 乗に比例する項になる. この 1 次元モデルで表現された多孔板と吸音層による吸音率 $\alpha(f)$ は, 上記の手続きによって求められる吸音構造前面の比音響インピーダンス $z_1 = P_1/u_1$ の実部と虚部を用いて以下のようになる.

$$\alpha(f) = \frac{4\rho c \operatorname{Re}[z_1]}{(\operatorname{Re}[z_1] + \rho c)^2 + \operatorname{Im}[z_1]^2} \quad (2-7)$$

したがって長方形断面をもつ風路を内包する多孔板対策工の吸音率 $\alpha_r(f)$ は, 各面において垂直入射を前提としていることから各面での吸音率は独立したものとみなし, 各面 (m) の多孔板と吸音層 (吸音層深さは図-2.2.7 に示す $L = x_m$) による吸音率 $\alpha_m(f)$ を用いて最終的に以下のように表すことができる. なお図-2.2.5 (左) に示す山梨実験線の枝坑風路の左側の面のように多孔板および吸音層がない面については吸音性能がないため $\alpha_m(f) = 0$ として取り扱う.

$$\alpha_r(f) = \sum_{m=1}^4 \alpha_m(f) \quad (2-8)$$

実際に低周波数領域において多孔対策工の吸音層厚さが吸音率に与える影響を確認した. 多孔板の開口率は先述の高橋らの検討³⁾と同様に 4.5%とし, 長方形断面をもつ風路の全 4 面が多孔板を介して同じ深さの吸音層に囲まれる場合を想定した. 吸音層深さについては図-2.2.5 に示す山梨実験線の多孔板対策工の吸音層深さとして設定している 5m, その半分の深さである 2.5m と 2 倍の深さである 10m の吸音層とした.

それぞれの吸音層深さに対して多孔板対策工の吸音率を算出した結果を図-2.2.8 に示す. 10Hz 以下の低周波数領域においては吸音層深さが深くなるにつれ高い吸音率を示し, このオーダーの吸音層厚さであれば良好な吸音効果が確保されると考えられる. なお吸音層深さが 10m の場合に 17Hz 付近で吸音率が低下している理由については, 先述の吸音層のマトリクス (式(2-2)) により説明が可能である. 粒子速度は波長 λ に対して $\lambda/4$ の位置で最大となり $\lambda/2$ の位置で最小となる. したがって吸音層深さが $\lambda/2$ に一致する波長と音速 (約 340m/s) から求められる周波数 (吸音層深さ $L = 10\text{m}$ の場合約 17Hz) において流速分布が最小になり吸音率が低下する.

この吸音率の算出結果をもとに山梨実験線の枝坑内の多孔板対策工は, 吸音効率を可能な限り確保しつつも空間的制約および周囲の特定の周波数で著しく吸音率の低下を避ける観点から, 図-2.2.5 (左) の平面図に示すように風路の 3 面が多孔板を介し深さ 5m の吸音層に囲まれる構造としている. これにより坑口における微気圧波の大きさが計算上で約 55%, 実測で約 75%低減することが示されている³⁾. なお営業線で使用が計画されている多孔板対策工の諸元については第 5 章 (5.3.1 節) で述べる.

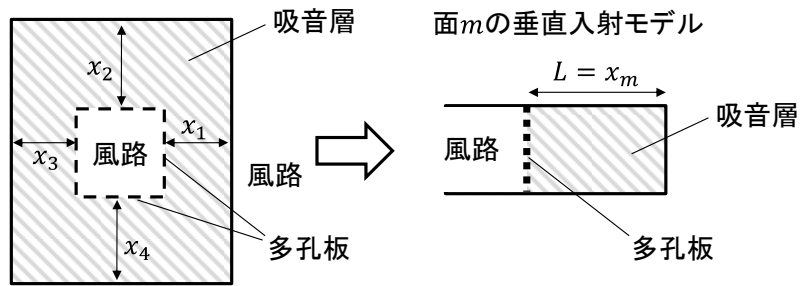


図-2.2.7 多孔板対策工の吸音率の一次元計算モデル

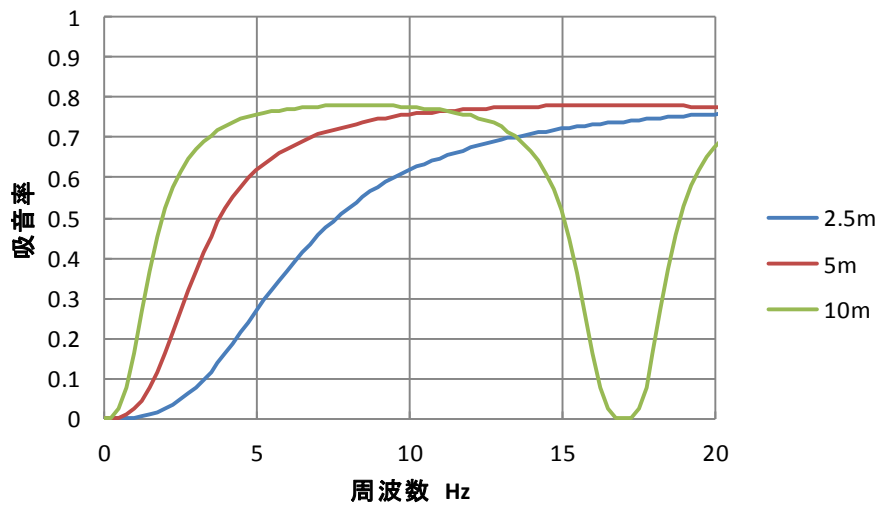


図-2.2.8 多孔板対策工の吸音層深さごとの周波数に対する吸音率（計算結果）

2.2.2 本研究で使用する試験・解析手法

本節の現状把握および課題の抽出，整理を実施する過程で使用する実験方法や解析手法について述べる．なお，本実験手法や解析手法は，本節の現状把握や課題抽出だけでなく，後の各章で提案する微気圧波低減手法の考案過程，および効果の確認の際にも使用している．なお，これらの実験方法や解析手法は既に別の報告などで確立され，効果が検証されたものであるため，ここでは簡潔に内容を記載する．

(1) 模型実験による試験方法

本論文の検討では，提案された手法の効果の確認を行う際に，先述の山梨実験線の設備を大きく改修し超高速列車をトンネルや分岐部などに通過させることが不可能あるいは非常に困難なため，縮尺模型を用いた模型実験を行っている．模型実験では，超高速列車がトンネル分岐部を通過する際に圧縮波が発生する現象や，超高速列車がトンネルに突入する際にトンネル内に形成される圧縮波が多孔板対策工を設けた枝坑を通して微気圧波として放射される過程について，田中ら⁷⁾が開発した超高速列車用トンネル微気圧波模型実験装置によって再現している．

実験装置の構造及び全景を図-2.2.9に示す．また，模型の概要を図-2.2.10，その外観を図-2.2.11にそれぞれの試験の用途（第2章，第3章で検討する分岐部の検討，第5章で検討する枝坑の検討）別に示す．模型実験の縮尺は実スケールの1/33である．列車の模型は図-2.2.12に示すとおり軸対称の筒状の樹脂で再現しているが，分岐部や枝坑は3次元模型としている．タンク内に蓄えられた高圧空気がシリンダバルブにより瞬間的に開放されシリンダ内に装着した車両を高速で発射させることで列車の高速走行を模擬する．

この過程は流体の圧縮性によって支配される現象であるため，列車速度のマッハ数を一致させれば模型実験でも実物と同等の現象を再現できる．ただし，模型実験で計測される圧力変動の時間スケールは幾何縮尺だけ縮小されるため，実験結果の時間軸を実スケールに引き伸ばして換算する⁷⁾．一方，マッハ数を一致させると，粘性の影響に関するレイノルズ数は実物と一致させられなくなる．しかし，この流れ場において粘性が影響するのは開口部での流れのはく離や多孔板を通過する際の圧力損失で，そのレイノルズ数依存性は低いため，模型実験のレイノルズ数が一致しないことによる影響は軽微である．

なお，本実験装置における列車の突入速度が時速500kmの領域でのトンネル内圧力波波動及び微気圧波を精度よく予測出来ることは田中ら⁷⁾によって，確認されている．

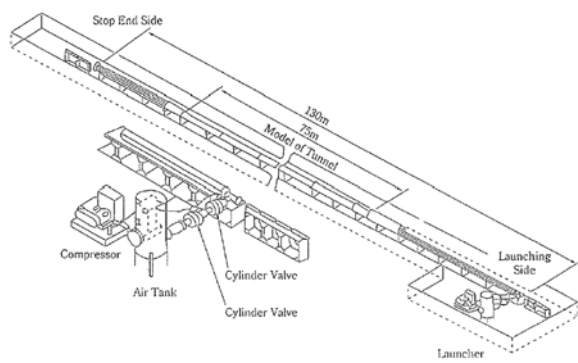


図-2.2.9 実験装置の構造⁷⁾ (左) およびその全景 (右)

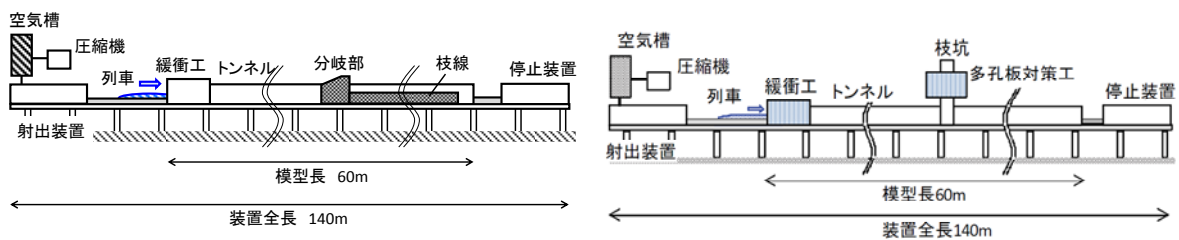


図-2.2.10 模型実験の概要 (左：分岐部の検討の模型，右：枝坑の検討の模型)

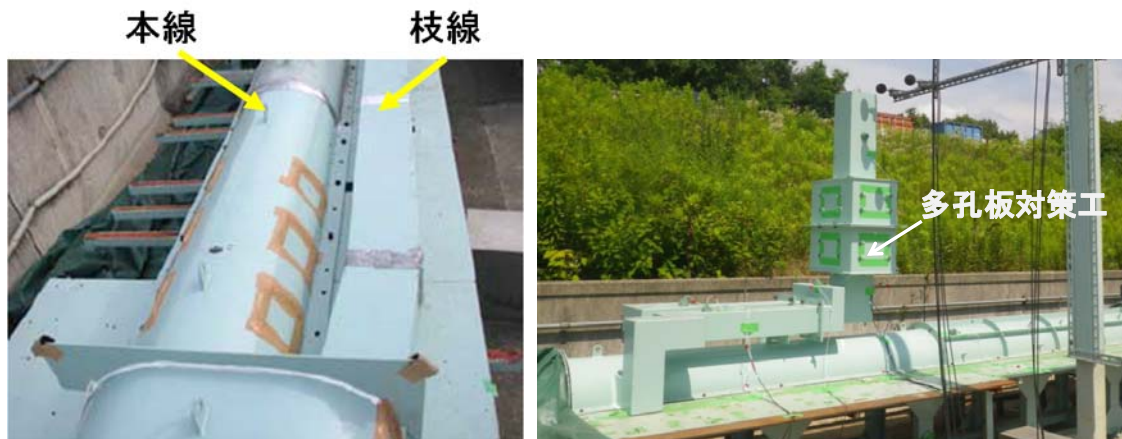


図-2.2.11 模型実験状況 (左：模型の分岐部拡大，右：枝坑の検討の模型)



図-2.2.12 列車模型

(2) 圧縮波の形成・伝播，放射される微気圧波の算出に係る解析手法

本研究では，各課題に対して提案する微気圧波低減対策を施す前，並びに対策を施した後のトンネル坑口での微気圧波を評価するため，トンネル内における圧力波の発生だけでなく坑口までの圧力波の伝播，さらには坑口での微気圧波の放射までを一連で検討しなければならない。また，中央新幹線の長大トンネルが対象となる場合のようにトンネル内での圧力波の伝播が長距離となる場合，その性状を前項で記述した模型実験で再現するのは現実的ではなく，解析手法によりシミュレーションを行う。

第1章で述べたとおり既往⁸⁾の研究から，列車が高速で突入したときのトンネル内圧縮波は有限振動波の非線形効果により波面が切り立ち，圧力勾配が増大するとされている。この圧縮波の最大圧力上昇量は概ね列車速度の2乗に比例することが分かっており，超高速鉄道においてはその伝播過程を適切に予測・評価することは微気圧波の検討において非常に重要となる。本田ら²⁾は，列車突入から圧縮波の伝播，放射までの各過程を独立した解析として行い，それらを組み合わせることにより微気圧波を評価する方法を提案している。

本研究ではこの方法を参考にして，表-2.2.1および図-2.2.13に示すような手順で，列車が分岐区間を通過した際に形成される圧縮波を3次元CFD解析により求め，これを初期波形としたトンネル内の1次元波動伝播解析を行い伝播後の圧縮波の圧力勾配を算出し，文献²⁾に記された放射直前のトンネル内圧力勾配と微気圧波の比例関係を利用し，分岐区間からの伝播距離に応じたトンネル坑口（放射箇所）における微気圧波を予測する。

3次元CFD解析は，列車のトンネル突入に伴う圧縮波の発生を再現したOgawa and Fujiiの方法⁹⁾に準じて，列車がトンネル内の分岐部を高速で通過する際に形成される圧縮波を算定した。本手法の精度の検証については，本田ら²⁾が山梨実験線において7両編成列車（全長175m）が明かり区間から時速500kmでトンネル緩衝工に突入したケースを模擬し，トンネル内に発生した圧縮波の圧力変動とその圧力勾配の解析結果が現地計測結果とよく一致していることを確認している。さらに，本田ら²⁾の検討では，本手法を圧縮波のトンネル坑口の放射の算定にも適用しており，放射直前の圧縮波の圧力勾配と坑口で発生する微気圧波を解析により算定し，現地計測結果との整合性を確認している。そしてそれらの結果をもとに，より簡易的な微気圧波の予測のため様々なトンネル緩衝工の長さや多孔板の開口率ごとに圧力勾配と微気圧波の線形関係性を整理している。

1次元波動伝播解析は，超高速鉄道の列車がトンネルに突入した時の圧縮波が長大トンネル内を伝播する性状を再現するための，トンネル壁面での乱流遷移状態に着目した一次元伝播解析である。その妥当性については，本田ら⁸⁾により，山梨実験線のトンネル内の断面積変化による影響が少ない区間において，列車がトンネルに突入したときの圧縮波がトンネル内の4km程度の距離を伝播したことに伴う最大圧力，最大圧力勾配の変化を本解析により再現できることが検証されている。また，長距離伝播の確認として，トンネル内を圧縮波が45km伝播したときの最大圧力勾配の変化に関する解析結果は現地計測結果と比較すると少し大きなものとなっており，これは山梨実験線の現地計測では横坑や断面変化区間により減衰が大きくなっている影響によるものであり，解析結果により微気圧波の安全側の評価が可能，と考察している。

なお，これらの解析の詳細は，本論文の補遺：「本論文の解析の詳細」に記載している。

表-2.2.1 分岐区間で発生した圧力波のトンネル坑口での微気圧波予測手順

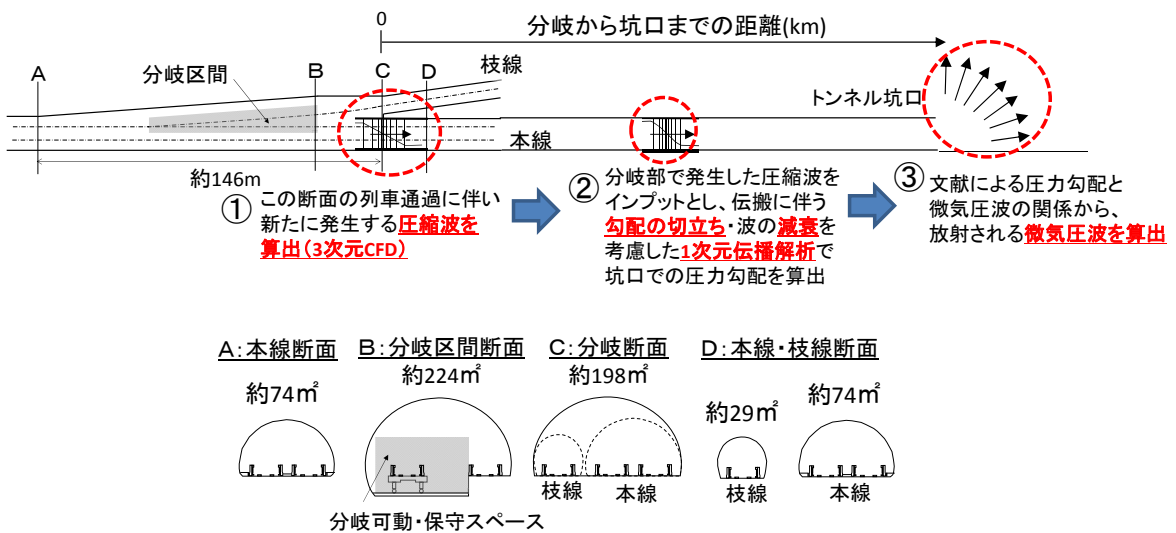
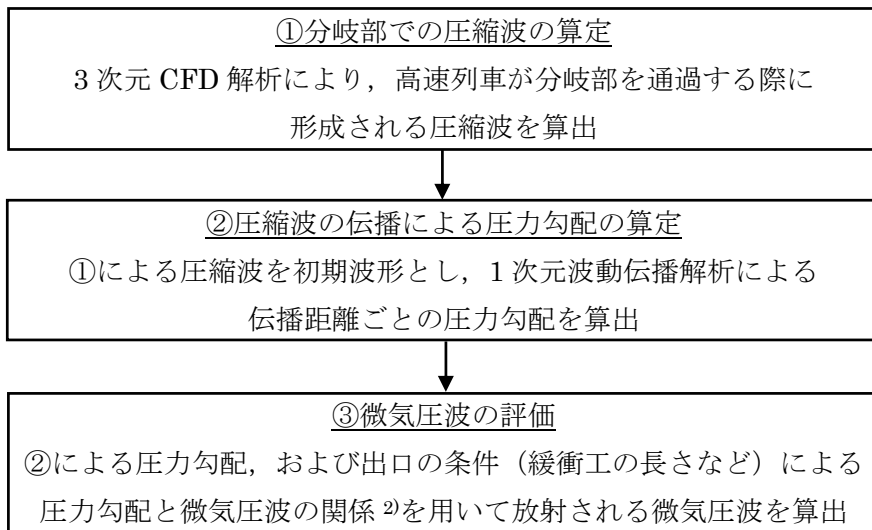


図-2.2.13 分岐区間を列車が通過した場合の圧縮波の形成，伝播，放射される微気圧波の算出手順

2.3 列車の分岐部通過や断面積変化部通過により発生する圧力波に関する現状調査と課題抽出

2.3.1 山梨実験線の設備による現状調査

(1) 横坑通過により発生する圧力波

トンネル内の断面積変化部として、山梨実験線において、トンネル内の機器を設置するための小坑である横坑（前述の「器材坑」）を選定し、その横坑側を高速列車（7両編成、全長約170m）が通過した際に形成される通過波の圧力変動の計測を行った。横坑の配置および大きさ（断面積は等しいが奥行きが異なる2種類）、トンネル内の圧力変動の計測点を図-2.3.1に示す。トンネル内の圧力変動は列車と反対側のトンネル壁面に絶対圧計（東京測器, APW20KPAS003）を設置して計測した。列車が時速500kmでこれらの横坑を通過した際に列車進行方向に生成された通過波の圧力変動とその時間微分値（圧力勾配）の結果について、横坑の奥行きが7.4m、15mの場合をそれぞれ図-2.3.2、図-2.3.3に示す。なお、列車が横坑を通過する時刻を0sとし、圧力変動値は大気圧、圧力勾配は計測値の最大値（奥行き15m）で正規化している。

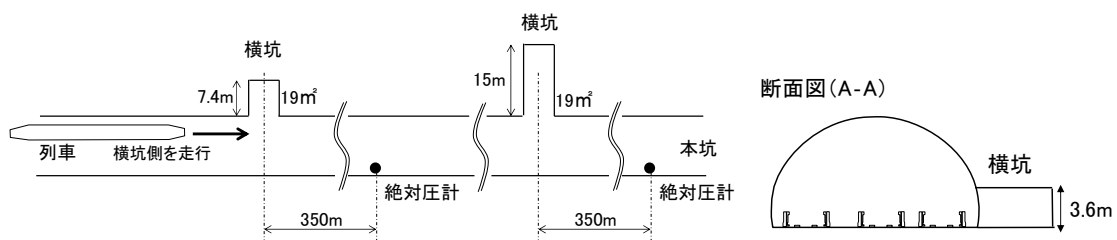


図-2.3.1 山梨実験線の横坑での計測概要

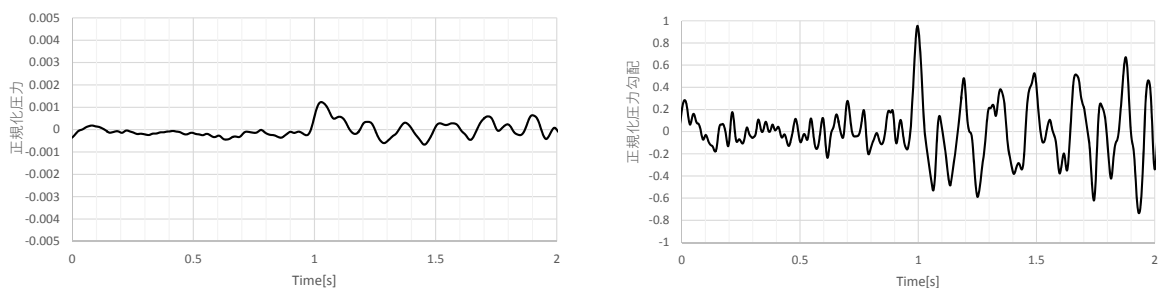


図-2.3.2 山梨実験線の横坑（奥行き7.4m）での計測結果（左：圧力変動，右：圧力勾配）

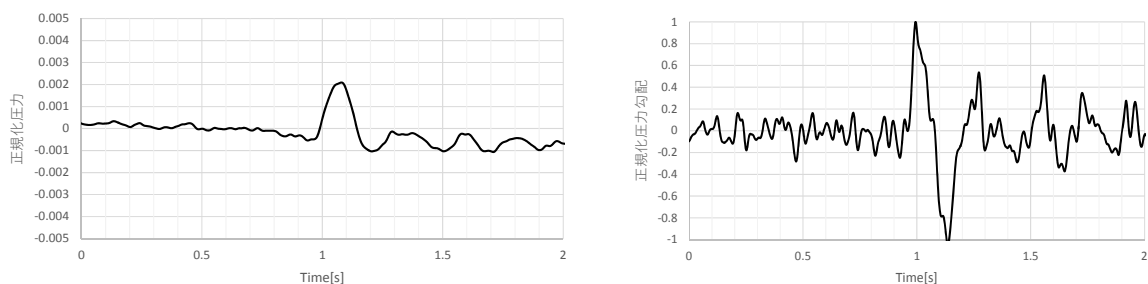


図-2.3.3 山梨実験線の横坑（奥行き15m）での計測結果（左：圧力変動，右：圧力勾配）

福田ら¹⁰⁾は、トンネル内を走行する列車が横坑設置部を高速で通過すると、トンネル本坑内および横坑内に圧力波が形成され、横坑内に誘起された圧力波は横坑終端で反射して本坑内に戻ってくることを模型実験および理論解析で確認している。実験線の横坑における計測においても、図-2.3.2の左側に示す圧力変動のグラフから、列車が奥行き7.4mの横坑の前を通過した際に生成された圧縮波は列車前方に伝播し、列車が横坑を0秒に通過した後、列車より先に350m離れた計測点に音速で到達して、1秒過ぎに大気圧の0.001程度の大きさの正圧の圧縮波として観測している。また、列車が横坑を通過した際に横坑内へは負圧の膨張波が生成し、横坑端部で反射して戻ってきた膨張波を正圧の圧縮波の約0.04秒(≒7.4m×2/(音速約340m/s))後に観測し、その後正圧の圧縮波と負圧の膨張波を繰り返し観測している。

図-2.3.3の左側に示す圧力変動のグラフから、列車が奥行き15mの横坑の前を通過した際に生成された圧縮波は同じく列車前方に伝播し、列車が横坑を0秒に通過した後、1秒過ぎに大気圧の0.002程度(奥行き7.4mの横坑の約2倍)の大きさの正圧の圧縮波として観測している。また、列車が横坑を通過した際に同じく横坑内へは負圧の膨張波が生成し、横坑端部で反射して戻ってきた膨張波を正圧の圧縮波の約0.09秒(≒15m×2/(音速約340m/s))後に観測し、その後正圧の圧縮波と負圧の膨張波を繰り返し観測している。

トンネル本坑内に形成される圧縮波の大きさはトンネル枝坑・本坑の断面積比および列車速度の2乗に比例する¹⁰⁾ため、両横坑の断面積が等しいため列車通過に伴い発生する圧力変動の大きさは奥行きには依存せず同程度になるはずであるが、奥行き7.4mの横坑で観測される圧力波の大きさは奥行き15mの横坑で観測される圧力波の半分程度となっている。これは、奥行き7.4mの横坑で発生した正圧の圧縮波がピークを迎える前に、負圧の膨張波が横坑端部で反射して戻ってきて重なるため、見かけ上小さくなるためであると考えられ、奥行き15mの横坑の場合は、発生した負圧の膨張波が反射して戻るまでに時間がかかるため、正圧の圧縮波と負圧の膨張波が分離されて観測されていると考えられる。

また、列車通過に伴い発生する正圧の圧縮の圧力勾配については、図-2.3.2、図-2.3.3(右側)に示すとおり、いずれの場合もほぼ等しくなっている。両横坑の断面積が等しいため列車通過に伴い発生する圧力変動は奥行きには依存せず、横坑内に発生した負圧の膨張波が横坑端部で反射して戻ってくるまでの波形が同じためである。

(2) 横坑通過により本坑、横坑内に発生する圧力波

次に、山梨実験線の建設時に使用した横坑(奥行600m, 端部閉鎖)を高速列車が通過した際に本坑および横坑内に形成される圧力波を計測した。横坑の配置および圧力変動の計測点を図-2.3.4に示す。列車(山梨実験線の先行区間(2.2.1(1)参照)時代の1両の長さ約20mの車両で3両編成のため全長約70m)が時速400kmで横坑を本図の左側から右側に向かって通過した際に本坑および枝坑内に形成される圧力変動の結果を図-2.3.5に示す。圧力値は大気圧で正規化している。本坑の計測点(横坑接続部から列車後方へ50m)では、列車通過時の標準的な波形を観測しており、2.2秒付近から列車先頭部通過により0.005程度圧力が上昇した後0.03程度圧力が低下し、3両編成の場合4つの台車が搭載されているためその台車位置で4つの鋭い波形が観測されている。本坑の計測点(横坑接続部から列車前方へ50m)では、3秒付近で列車が通過するより前に

横坑を列車が通過した際に発生した圧縮波（直達波）が到達しており，その大きさは 0.005 程度である．その約 0.3 秒後に本坑の計測点（横坑接続部から列車後方へ 50m）と同様に，先頭部列車通過による圧力変動で圧力が 0.01 程度まで上昇した後 0.03 程度圧力が低下し，台車位置で 4 つの鋭い波形が観測されている．横坑内の計測点は本坑から 55m 離れているが，3 秒付近で負の圧力波（膨張波）が観測されている．その波形は本坑の列車通過時に観測された圧力波形とほぼ同じであり，その圧力降下量の大きさは 0.02 程度であって，本坑で観測された列車先頭部通過時の圧力降下量（0.03 程度）よりは小さく，横坑通過時に発生した直達波よりは大きい値である．

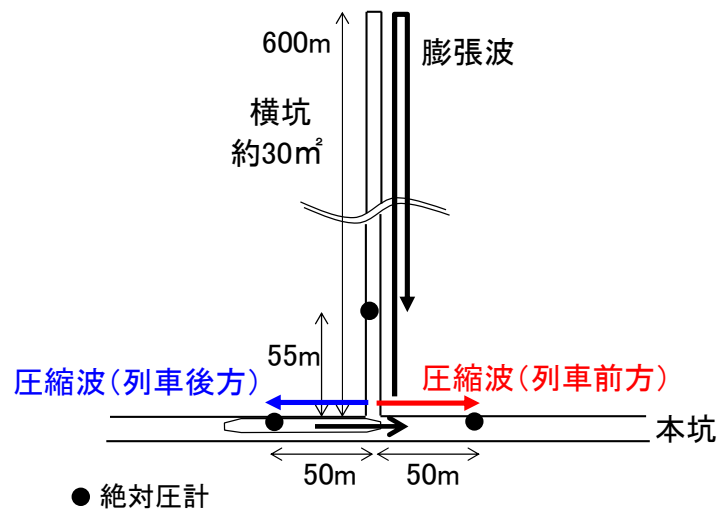


図-2.3.4 山梨実験線の横坑（奥行 600m）での計測概要

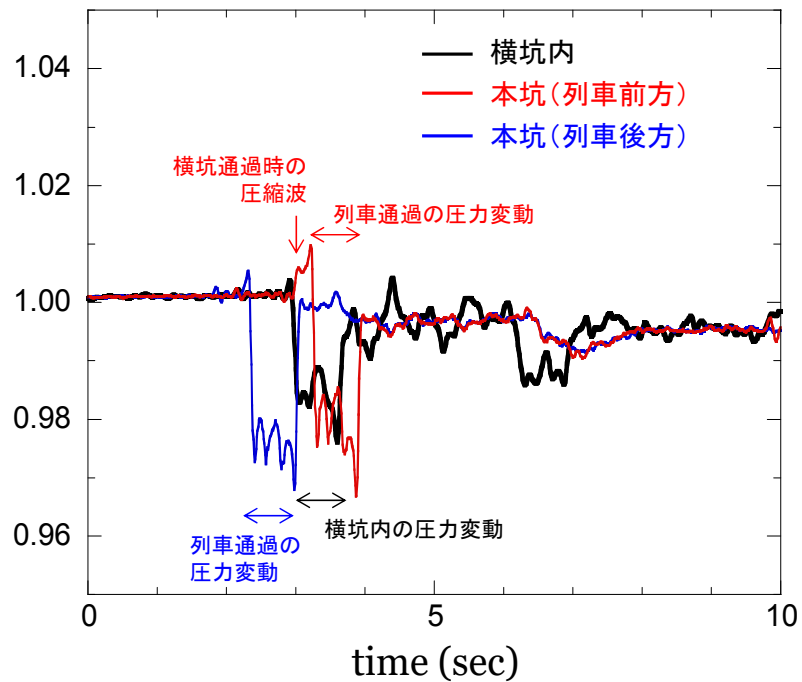


図-2.3.5 山梨実験線の本坑および横坑（奥行 600m）での圧力変動の計測結果

(3) 天井に開口を設けた中間緩衝工により発生する圧力波

実質的な断面縮小条件として、すなわち列車が突入するトンネル側よりも列車走行空間内の圧力が低下した状態からトンネルへの突入を模擬したものとして、実験線の長さ 60m の中間緩衝工の天井に開口を設け、列車（4 両編成、全長約 100m）がトンネルに突入する際の圧力波を計測した。図-2.3.6 に圧力変動の計測点を含む平面図、および開口イメージを示す。図-2.3.6 に示す 4 パターンの開口量を中間緩衝工に設けたケースについて、中間緩衝工の端から 200m 離れたトンネル内に絶対圧計（SSK DP8H-01S）を設置して計測を行った。列車が中間緩衝工から時速 500km で図-2.3.6（上）の右側のトンネルに突入した際の圧力変動の計測結果を図-2.3.7 に示す。なお、中間緩衝工の中心（トンネルからの距離が 30m の地点）（図-2.3.6（上）の※で示す地点）を列車が通過する時刻を 0 秒とし、計測した圧力は大気圧で正規化をしている。

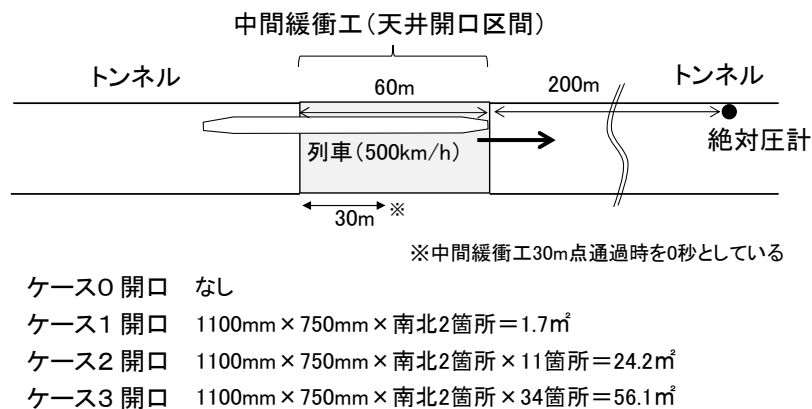


図-2.3.6 山梨実験線の中間緩衝工における計測点と平面図（上）および開口状況（下）

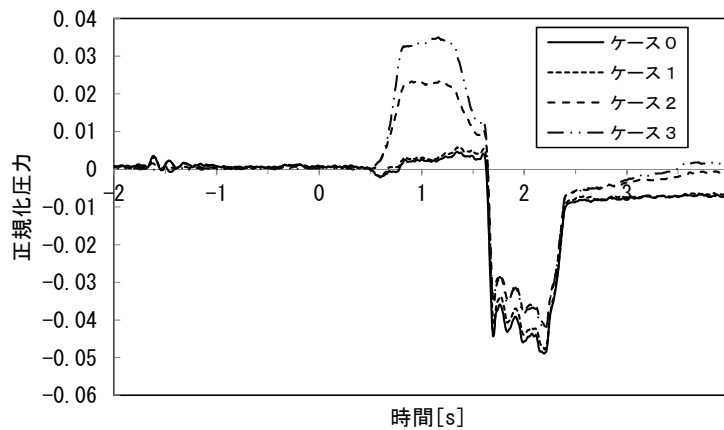


図-2.3.7 中間緩衝工のフード天井開口により発生する圧力波（500km/h 通過，4 両編成）

図-2.3.7 に示すとおり，列車が中間緩衝工からトンネルに突入すると断面縮小により列車前方の圧力が上昇し，その結果 0.5 秒過ぎから 1.3 秒付近にかけて圧縮波が発生している．なお，1.6 秒過ぎの圧力の急激な低下は列車通過に伴う圧力降下である．

開口がないケース 0 においても圧縮波が発生しているが，これは中間緩衝工とトンネル断面の接続部の断面積が若干異なることに起因している．最も開口量が少ないケース 1（開口総面積 1.7 m²）では開口のないケース 0 と比較してもほとんど差異はないが，フード開口量が大きくなるほど発生する圧縮波は大きくなり，もっとも開口量が大きいケース 3（開口総面積 56.1m²）では大気圧比 3.5%程度の圧縮波が発生している．

本計測はフード天井に開口を設けた中間緩衝工での模擬的な断面縮小での計測結果ではあるものの，断面積変化部では圧縮波が発生し，その大きさは断面積変化量が大きいほど大きくなる可能性が示唆された．計測結果をプロットすると図-2.3.8 に示す通り今回の条件下では開口面積と圧力上昇は概ね比例関係にあることがわかる．そのため，トンネル内で断面積変化が大きい分岐部を列車が通過する際に発生する圧縮波は大きくなるものと予測されるので，その影響について注意が必要である．

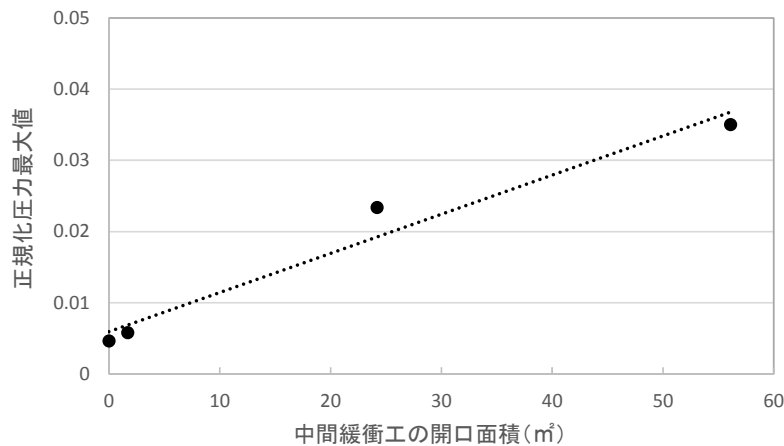


図-2.3.8 中間緩衝工のフード天井の開口量とトンネル突入時に発生する圧力波の関係

2.3.2 トンネル分岐部通過時に発生する圧縮波とその影響の把握

前節では、超高速列車が断面積変化部を通過する際に圧縮波が発生し、その大きさは断面積変化量が大きいほど大きくなることを把握した。ここでは断面積変化部として、本線から枝線に分岐するための分岐器が設置される区間で発生する圧縮波とその影響の把握を行う。

(1) トンネル分岐部の概要および列車通過時の現象

中央新幹線における典型的なトンネル分岐部の平面図と軌道方向各位置における断面図を図-2.3.9に示す。分岐部では一部の列車が本線から枝線に分岐したり、枝線から本線へ合流したりする。図-2.3.9の断面Aは本線であるトンネル本坑の断面である。断面Bの分岐区間断面では、大規模な軌道分岐装置とその可動・保守のための空間が軌道下に必要となり、断面Aから断面Bに至るまで断面積が徐々に増加して、断面Bで断面積が最大となる。断面Cは本線と枝線のトンネルが実際に分岐し始める地点で、分岐断面と呼ぶ。その後は断面Dのように本線と枝線でそれぞれ独立したトンネルとなる。したがって、分岐部でのトンネル断面積は断面Aから断面Bまで緩やかに3倍程度まで拡大し、断面Bから分岐断面（断面C）にかけて若干減少した後、分岐断面（断面C）から本線断面（断面Dの本線側）へは断面積が一気に62%も減少することになる。

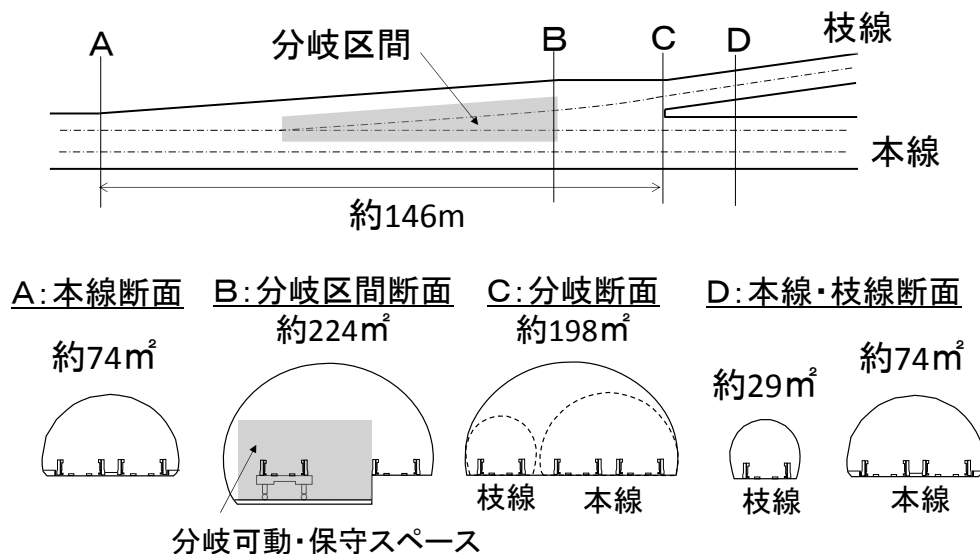


図-2.3.9 山岳トンネル分岐部の基本形状

この分岐部を列車が直進して本線を通過する際に生じる現象について述べる。図-2.3.10(I)に示すように列車が分岐部を左から右、つまり軌道が分岐する方向に通過する場合を「分岐方向」、逆に図-2.3.10(II)のように合流する方向に通過する場合を「合流方向」と呼ぶことにする。いずれの場合も列車が分岐断面を通過すると圧力波が生じ、列車の進行方向と同じ方向だけでなく、逆方向にも伝播する。本論文では分岐部で発生する圧力波の進行方向について、前者を「順方向」、後者を「逆方向」と呼ぶ。

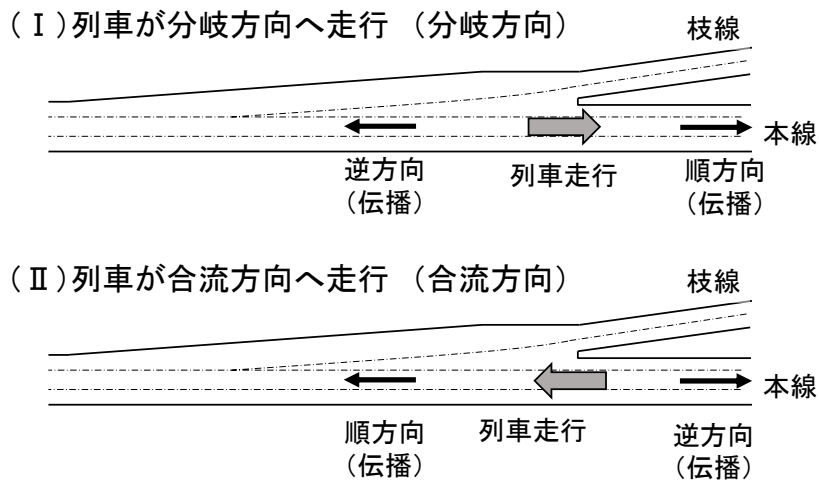


図-2.3.10 列車の進行方向および発生する圧力波の伝播方向

(2) 模型実験結果

分岐部を列車が通過する際に発生する圧縮波を 2.2.2(1)節で示した模型実験にて再現する。分岐部形状と測定点位置を図-2.3.11 に、その外観を図-2.3.12 に示す。模型製作上の制約から分岐部の実験模型は図-2.3.9 に示した実際の分岐部形状と異なり、枝線は本線と平行な方向に分岐し、分岐装置のための空間は分岐部上部に設けている。しかし、列車分岐部通過時に発生する圧縮波は断面積変化が支配的であり、枝線の分岐方向や空間の断面内での位置は結果に大きく影響しない。

圧縮波は図-2.3.11 中に示す点 X1, X2 に設置する圧力計 (KULITE, XT-190) で計測する。計測のサンプリング周波数は 12.8kHz とし、圧力勾配は圧力データ 7 点を使った最小二乗法によって算出した。なお、図-2.3.11 に示す断面 A~C は図-2.3.9 中に示すものと同一である。

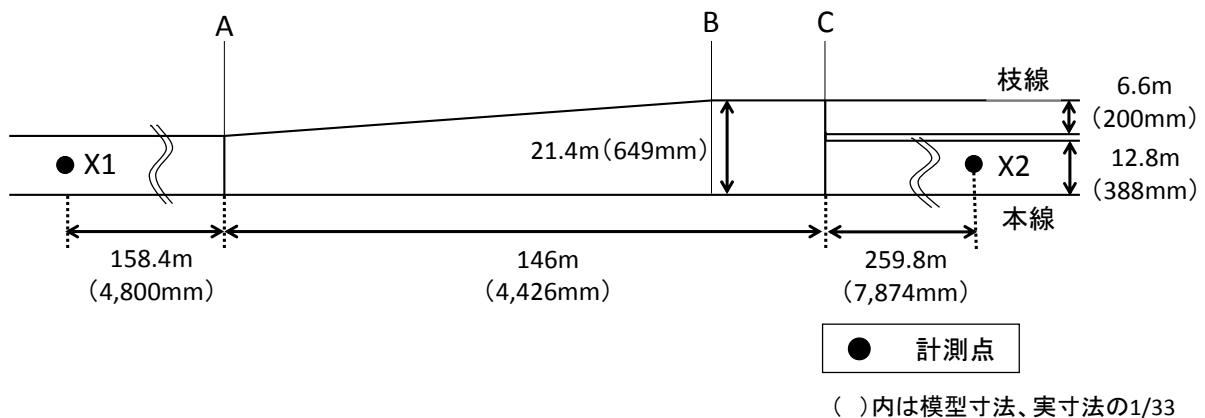


図-2.3.11 模型実験における分岐部形状と測定点位置 (図中 X1, X2)



図-2.3.12 分岐部の模型外観（左図）およびその拡大図（右図）

時速 500km で列車が分岐方向に走行した場合の測定点 X1 および測定点 X2 における圧力変動を図-2.3.13 に、合流方向に走行した場合の圧力変動を図-2.3.14 に示す。列車先頭部が分岐断面を通過する時刻を 0 秒とし、圧力値は大気圧で正規化し、時間軸は実スケールに合わせるため実験結果の時間軸を 33 倍に引き伸ばして示している。また、計測された圧力波における圧力勾配の最大値を表-2.3.1 にまとめる。

まず、列車が分岐方向に走行する場合の、順方向の測定点 X2 の圧力波について考える（図-2.3.13 右側）。列車が分岐方向に走行し列車が分岐区間に進入すると、断面が徐々に拡大するため膨張波が生じ、その結果、0.2 秒から 0.6 秒にかけて負圧となり、その振幅は最大で大気圧の 1%程度近くとなる。その後、列車が分岐断面を通過すると断面の急収縮により圧力が上昇する。測定点 X2 は分岐部より約 260m 離れているのでこれを音速で除した約 0.76 秒付近の圧力上昇が分岐部通過時の影響である。圧力は最大で大気圧の約 2%程度まで上昇した後、1.2 秒あたりから降下に転ずるが、これは列車後端が分岐断面を通過することによって生じる膨張波の影響である。

列車が分岐方向に走行する場合の、逆方向に伝播する測定点 X1 の圧力波について考える（図-2.3.13 左側）。測定点 X1 は分岐部より約 304m 離れているため 0.89 秒付近に見られる圧力変動が分岐部通過時の影響である。測定点 X2 には測定点 X1 へ伝播する圧縮波と位相が反転した膨張波が伝播していることが分かる。また、この膨張波は途中で分岐断面を伝播するために断面拡大の影響を受けて圧力が低下し、その圧力降下量は大気圧の約 1%であり測定点 X2 での圧力上昇量の約 2%と比べて小さくなっている。また、圧力波波面も同様に断面拡大の影響でなだらかになっていることが分かる。

次に、合流方向走行時について検討する。まず、合流方向に走行する場合の順方向の測定点 X1 について考える（図-2.3.14 左側）。測定点 X1 の位置は分岐走行時と同様のため、分岐部通過時の圧力変動は 0.89 秒付近に見られる。拡大された断面に突入するため測定点 X1 では膨張波が確認され、その圧力降下量は大気圧の 0.5%程度である。分岐方向走行時と同様に断面拡大の影響を受けて圧力波波面は緩やかになりその絶対値も小さくなっている。また、逆方向に伝播する測定点 X2 での結果（図-2.3.14 右側）を見てみると、分岐方向走行時と同様に分岐部通過の影響が見られる 0.76 秒付近から圧力が上昇し大気圧の 1%程度まで上昇している。

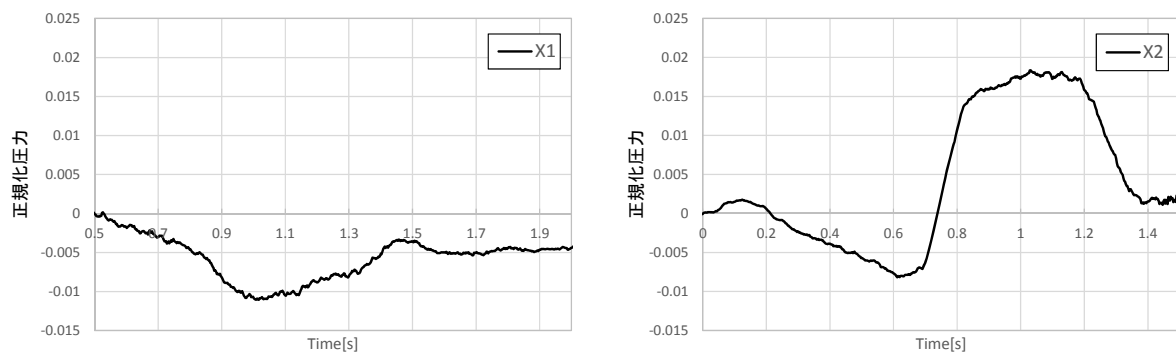


図-2.3.13 列車が分岐方向に通過した際に観測された圧力時間変化（左：X1，右：X2）

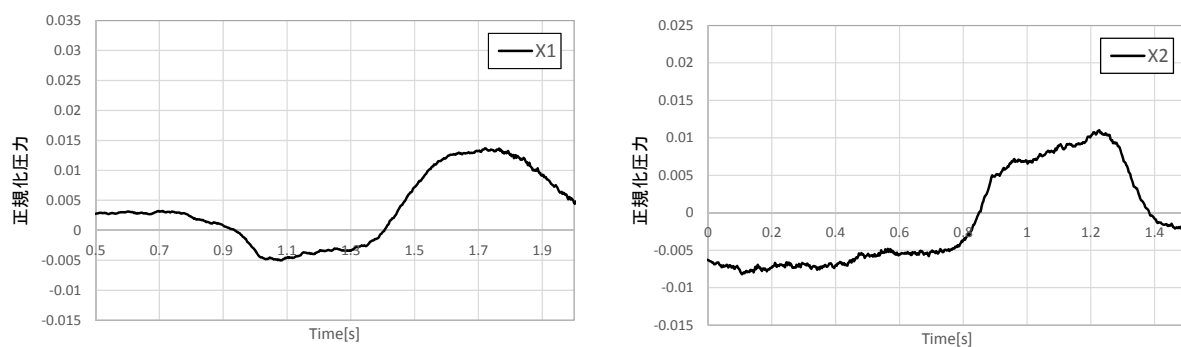


図-2.3.14 列車が合流方向に通過した際に観測された圧力時間変化（左：X1，右：X2）

表-2.3.1 圧力勾配最大値の比較

	測定点	
	X1	X2
列車走行：分岐方向	0.53	1.00（規準）
列車走行：合流方向	0.51	0.77

以上のとおり，分岐方向走行時には本線・枝線分岐位置である分岐断面 C を通過の際に 6 割もの断面積縮小によって順方向（X2）で最も大きな圧力勾配が計測された．また，逆方向（X1）にも圧力波は生じるが順方向とは異なり分岐断面から分岐区間へ向かって伝播することで断面拡大の影響を受け波面がなだらかになり，その圧力勾配は順方向（X2）の半分程度となることが分かった．一方，合流方向へ走行する時には，分岐断面 C で断面積が拡大するため順方向（X1）には膨張波が，逆方向（X2）には膨張波と位相が反転した圧縮波が伝播するものの，圧力勾配の最大値はそれぞれ分岐方向走行時の順方向への伝播（X2）と比べて 0.51，0.77 であった．

これより本研究では，微気圧波が最も懸念される分岐方向走行時の順方向の圧縮波のみを検討対象とすることとする．

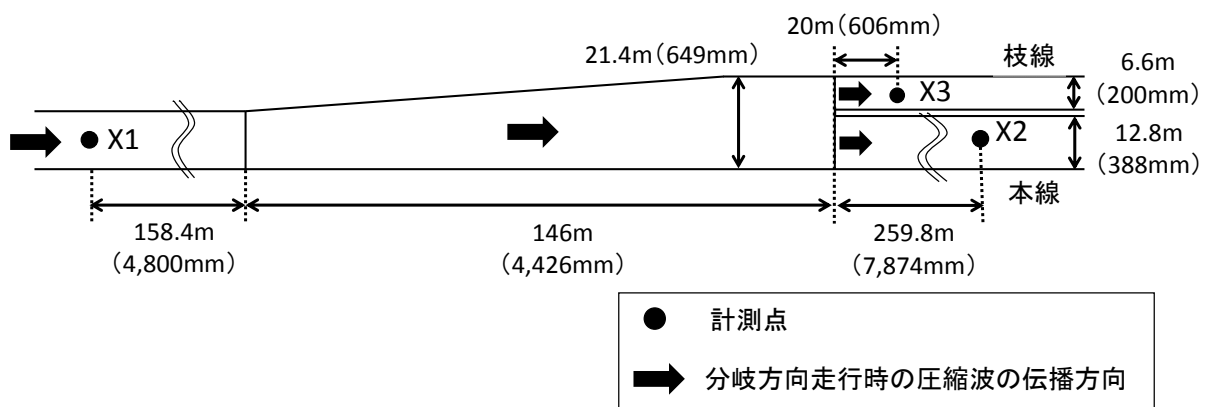
(3) トンネル突入波で形成される圧縮波による枝線での微気圧波

列車がトンネルに突入した際に形成されて、トンネルを伝播してきた圧縮波は枝坑設置部で本坑と枝坑に分岐し、本坑坑口および枝坑坑口で微気圧波として放射される。福田ら¹⁰⁾は、枝坑設置部を圧縮波が通過するときに本坑の圧力勾配が小さくなることを現地測定で確認し、数値解析でもその低減効果をよく模擬している。

トンネルを伝播してきた圧縮波が分岐部で本坑、枝坑へ分岐した際の圧力勾配の変化について調査した。模型の概略図と模型実験における測定点の位置を図-2.3.15に示す。列車は左側のトンネル坑口から突入する。

各測定点における圧力勾配の値を測定点 X1 における圧力勾配で正規化した結果を表-2.3.2に示す。模型実験の結果から分岐部前の本線断面における測定点 X1 に比べ、分岐後の本線断面の測定点 X2、枝線断面の測定点 X3 では圧力勾配の最大値は約 2 割低減しており、トンネルを伝播してきた圧縮波は分岐部を通過することで本坑、枝坑ともに圧力勾配が低減していることがわかる。このため、トンネル突入により伝播してくる圧縮波による微気圧波に対しては、本坑坑口および枝坑坑口に通常の多孔板緩衝工を設置することで対応が可能である。

したがって本論文では、トンネル内の分岐区間に関する微気圧波対策については、トンネル突入波で形成される圧縮波の影響には注目せず、超高速列車が分岐区間を通過するのに伴い発生する圧縮波の影響およびその低減を取り扱う。



()内は模型寸法、実寸法の1/33

図-2.3.15 模型の概略および模型実験における計測点

表-2.3.2 模型実験結果 (測定点 X1 の圧力勾配で正規化)

測定点	圧力勾配
X1	1.00 (規準)
X2	0.77
X3	0.79

(4) 長距離伝播解析によるトンネル分岐区間通過時に発生した圧縮波の微気圧波への影響の現状把握

次に、超高速列車がトンネル分岐区間を通過した際に発生する圧縮波がトンネル内を長距離伝播し、トンネル坑口から微気圧波として放射される影響について検討を行う。長距離伝播の影響を把握するために、実物設備や模型実験を用いることは困難であるため、圧縮波のトンネル伝播性状の把握は1次元波動伝播解析にて行った。また、本検討では1次元波動伝播解析のインプットとなる、分岐区間の通過で発生する圧縮波の算定も3次元CFD解析にて実施し、2.2.2(2)節の表2.2.1に示す手順により、分岐部通過時に発生しトンネル坑口で放射される微気圧波を予測した。

まず、分岐部で発生する圧縮波について検討を行った。本検討では上述した通り1次元波動伝播解析のインプットとなる圧縮波は3次元CFD解析にて求めている。解析の詳細は2.2.2(2)節に示すとおりであり図-2.3.16に計算格子を示す。計算領域はトンネル内の本線・枝線の領域、列車まわりの領域に分割し総格子点数は 108×10^6 点であり、分岐形状やトンネル形状などは実スケールで再現している。格子の大きさは列車表面やガイドウェイ表面の垂直方向は変化のない箇所は30cm程度、変化のある箇所は変化の度合いに応じて3cm～6cm程度としており、分岐部の壁面などの断面積変化部は30cm程度、変化のない壁面は1m程度としている。解析上の時間刻みはこの時間幅を変えながら解の収束を確認して 1.15×10^{-4} 秒と設定している。列車は現在山梨実験線で走行する3両編成の車両（全長約80m）とし、時速500kmで分岐区間を通過する。本線の複線の線路のうち図-2.3.16に示すように枝線に近い側の線路を走行させる。

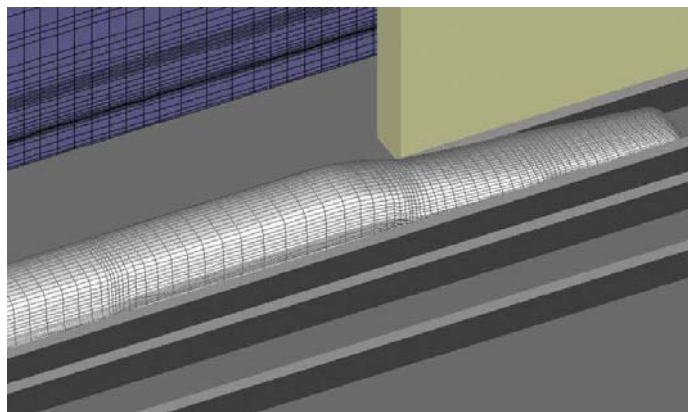


図-2.3.16 分岐区間と列車まわりの計算格子

列車の分岐部の通過により発生する圧縮波の圧力勾配についてこの解析で得られた結果および2.3.2(2)節で模型実験により得られた結果との比較を図-2.3.17に、圧縮波の圧力勾配の最大値の比較を表-2.3.3に示す。なお、模型実験と同様に列車先頭部が分岐断面を通過する時刻を0秒とし、比較は微気圧波が最も懸念される分岐方向走行時の順方向の圧縮波（図-2.3.11の測定点X2）で行っている。また、圧力値は大気圧で正規化している。

2.3.2(2)節で述べているとおり、0.76秒付近に見られる圧力変動が分岐部通過時の影響であるが、この付近の圧縮波波面は図-2.3.17および表-2.3.3に示すとおり3次元CFD解析と模型実験

の結果で大きな差異がなく、3次元 CFD 解析においても分岐部通過時の圧縮波を再現できていると考えられる。

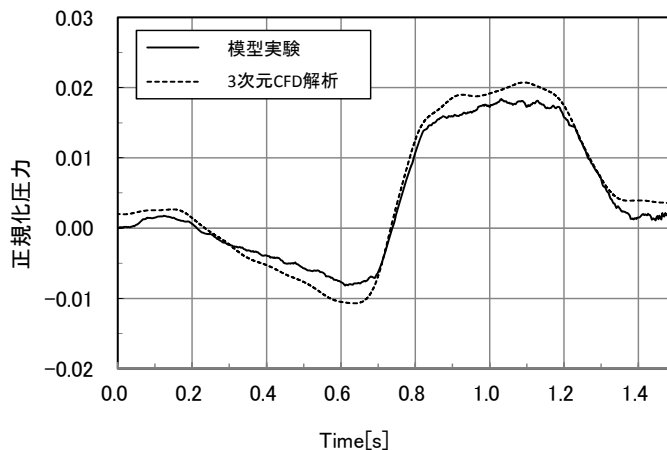


図-2.3.17 模型実験と3次元 CFD 解析の比較（分岐方向へ走行，順方向伝播 [測定点 X2]）

表-2.3.3 圧力勾配最大値の比較（分岐方向へ走行，順方向伝播 [測定点 X2]）

	模型実験	3次元 CFD 解析
圧力勾配最大値	1.00 (規準)	1.08

次にトンネル坑口に多孔板緩衝工がない想定の場合に，分岐部からトンネル出口までの距離に応じた微気圧波の数値解析結果を図-2.3.18に示す。なお，この数値解析の入力値は上述している3次元数値解析の結果である。微気圧波の値を基準値である20m地点の50Paで除して正規化している。圧縮波はトンネル内を伝播するにつれ，第1章で示したとおりその圧力勾配が有限振幅波の非線形効果によって増大すると同時に摩擦損失によって減衰もするため，分岐部からトンネルの坑口までの距離によっては非線形効果が摩擦損失の影響を上回り微気圧波が増大していくことになる。図-2.3.18で示された微気圧波のうち，分岐区間から約6kmまでの距離の場合がそれにあたり，それ以降は摩擦損失の影響で微気圧波が低下していく。なお，グラフが滑らかでない理由は，分岐部手前の分岐スペースの膨らみによる断面積変化などの要因により分岐区間で新たに発生する圧力波の時刻歴波形が複数の圧力勾配を持っており，各々が伝播に伴い異なるタイミングで発達（波面の切り立ち）する一方で，壁面摩擦により減衰するためである。この予測結果から，トンネル坑口に多孔板緩衝工のない場合はその坑口が分岐区間からいずれの距離にあっても算出された微気圧波は基準値を上回っており，中央新幹線の分岐区間で発生する圧力波が伝播し微気圧波として放射された場合の影響は大きいものと懸念される。特に分岐区間から約6km離れた箇所にトンネル坑口がある場合，そこでの微気圧波は基準値の約4倍と予測される。

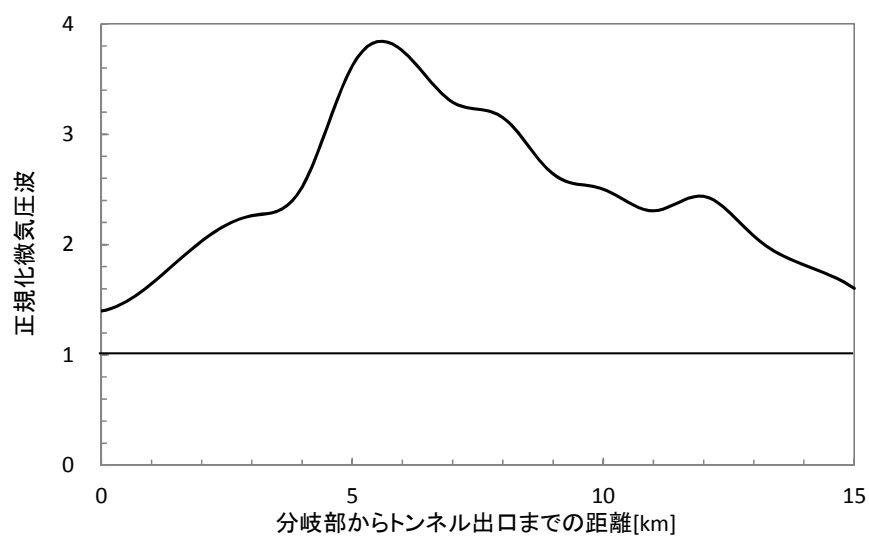


図-2.3.18 トンネル坑口（緩衝工なし）での微気圧波（長距離伝播解析結果）

以上のとおり，本節（2.3.2 節）においては，超高速列車がトンネル内の分岐部を通過する際に発生する圧縮波とその影響の把握を実施した．その結果，分岐部で新たに発生した圧縮波がトンネル内を伝播し，坑口から微気圧波として放射された場合，その影響は大きなものであり，この微気圧波に対する低減対策を講じる必要があることが判明した．

2.3.3 既存の手法に基づく方策による低減効果の検討・評価

断面積変化の大きい分岐区間で発生する圧縮波による微気圧波の低減対策について既存の手法に基づく対応が可能なものとして、急激な断面積変化を小さくするため分岐側の本線断面を大きくしてすりつける方法や、トンネル入口、出口に設置する多孔板緩衝工のように本線と枝線の間の壁に開口を設けてその開口から圧力を緩やかに抜くことで圧力上昇量を抑える方法などが考えられる。以下、分岐区間にこれらの方法を実施した場合における微気圧波低減効果を検討する。

(1) すりつけ対策

分岐側の本線断面を大きくして、分岐部前後での本線断面積変化を小さくすることにより、列車が分岐部を通過する際に発生する圧力波の波面を緩やかにする「すりつけ対策」について、3次元 CFD 解析を用いて検討した。3次元 CFD 解析の概要については、2.2.2(2)節のとおりである。分岐部の基本形状とすりつけ対策を実施した場合の形状を図-2.3.19 に示す。すりつけ対策のすりつけ長さは 50m と 100m の 2 ケースとしており、基本形状とすりつけ対策の断面積の変化量を図-2.3.20 に示す。

図-2.3.20 に示すとおり、基本形状では分岐前の断面積が 200m^2 から分岐後の断面積の約 74m^2 に急激に断面が変化しているが、すりつけ対策では 50m または 100m の延長で 3 段階の断面積で緩やかに断面積を変化させている。断面積比（縮小前/縮小後、括弧内は逆数）は、基本形状では 198m^2 から 74m^2 への断面変化なので 2.70 (0.37) であるのに対し、すりつけ対策ではすりつけ区間の 50m または 100m の間で約 198m^2 から 160m^2 , 100m^2 , 74m^2 と段階的にすりつけることにより、断面積比は 1.25 (0.80), 1.60 (0.63), 1.35 (0.7) と緩やかに変化している。

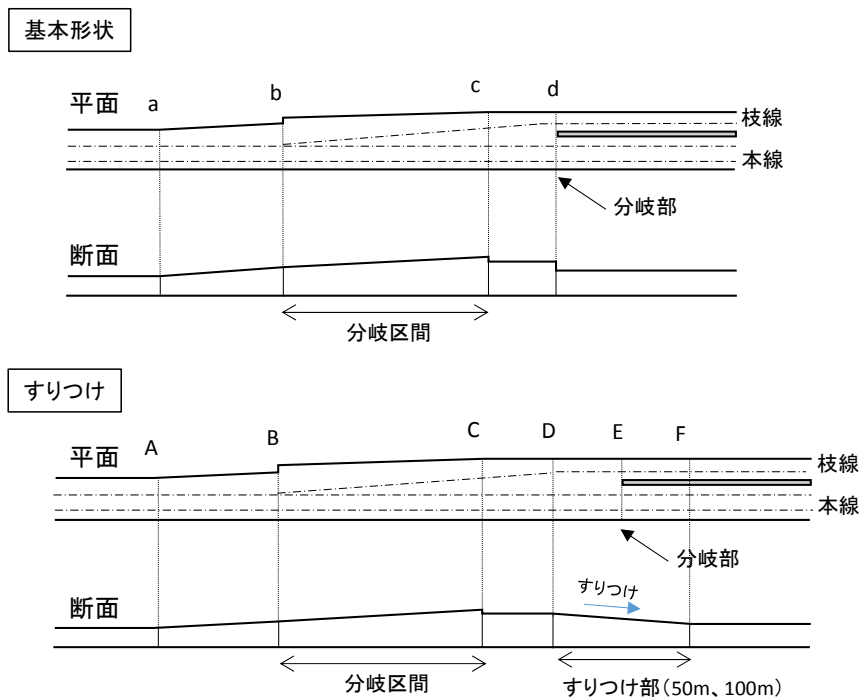


図-2.3.19 分岐部の基本形状とすりつけ対策の形状

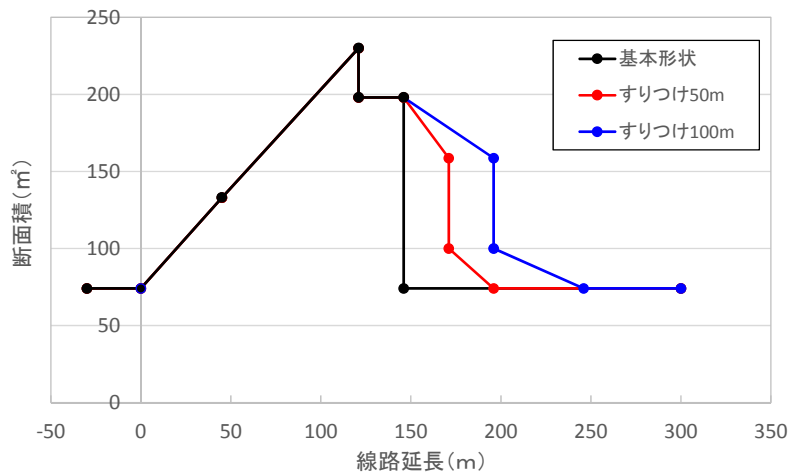


図-2.3.20 基本形状とすりつけ対策で設定した断面積変化

数値解析で得られた圧力波形および圧力勾配波形を図-2.3.21に示す。解析結果は、圧力勾配が最大となる分岐方向走行時において順方向へ伝播する圧縮波について示す。なお、圧力は大気圧で、圧力勾配は基本形状における最大値で正規化している。圧力の計測点は分岐部から分岐方向へ367m進んだ点とし、時間は列車先頭部が分岐部を通過する時刻を0秒として記載している。

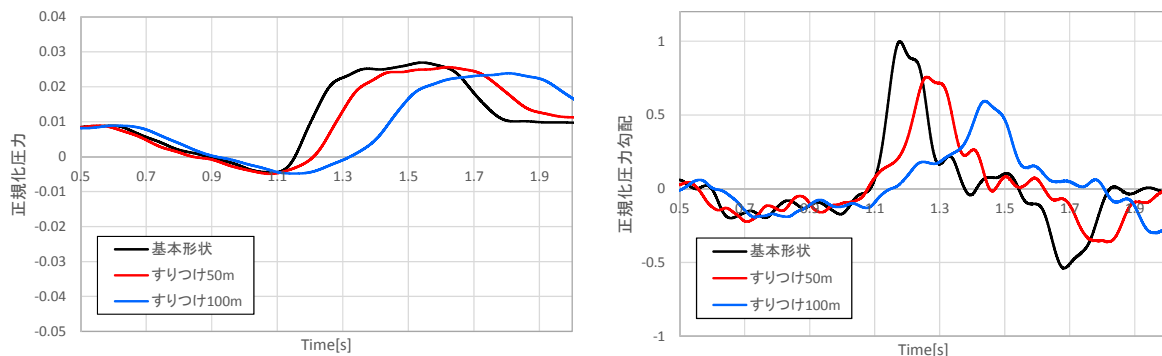


図-2.3.21 すりつけ対策の数値解析結果（左：圧力波形，右：圧力勾配波形）

まず、基本形状の圧力波形（図中黒線）を見ると、列車が断面拡大部を通過することで膨張波が発生し0.6秒付近から圧力降下が始まり、その後断面積が198m²から74m²に急収縮する分岐断面を通過する1.1秒付近で圧力が上昇し圧力勾配が最大となる。一方、すりつけ対策を行うことで発生する圧力波波面が緩やかになり圧力勾配が小さくなっている。すりつけ延長50m（図中赤線）の場合の圧力勾配最大値は基本形状の76%程度に低減し、100m（図中青線）の場合は60%に低減しており、すりつけ延長が長い方が圧力勾配の低減効果が高い。断面積変化量は同じであるにも関わらずすりつけ延長が長い方の低減効果が高い理由は、すりつけ延長が長くなったことにより各断面変化部で生じる圧縮波が重畳するのを避けられると考えられるからである。

(2) 連通対策

列車が分岐部を通過する際に発生する圧縮波を、本線と枝線間の壁に開口を設けてその開口から圧縮波を緩やかに抜くことで圧力波波面を緩やかにする「連通対策」を検討した。並行トンネルと同様、3次元CFD解析を用いて検討したが、3次元CFD解析の概要については2.2.2(2)節に示す。基本形状と連通対策の形状を図-2.3.22に示す。連通対策は本線と枝線間の壁に延長472m、高さ0.6mの開口を設け、さらにそこに多孔板（開口率20%と5%の2ケース）を設置する場合を想定した。3次元CFD解析において多孔板の一つ一つの孔を数値的に再現するのは困難であるため、高さ0.6mに設定した開口部に同等の圧力損失係数を持つ多孔質として再現する。すなわち多孔板前後の圧力差から圧力損失係数を用いて多孔板を通過する流速を計算し、これを境界条件として解析を行う。多孔板の圧力損失係数は本田ら²⁾が模型実験により計算しており、本解析でもその圧力損失係数を用いて解析を行った。

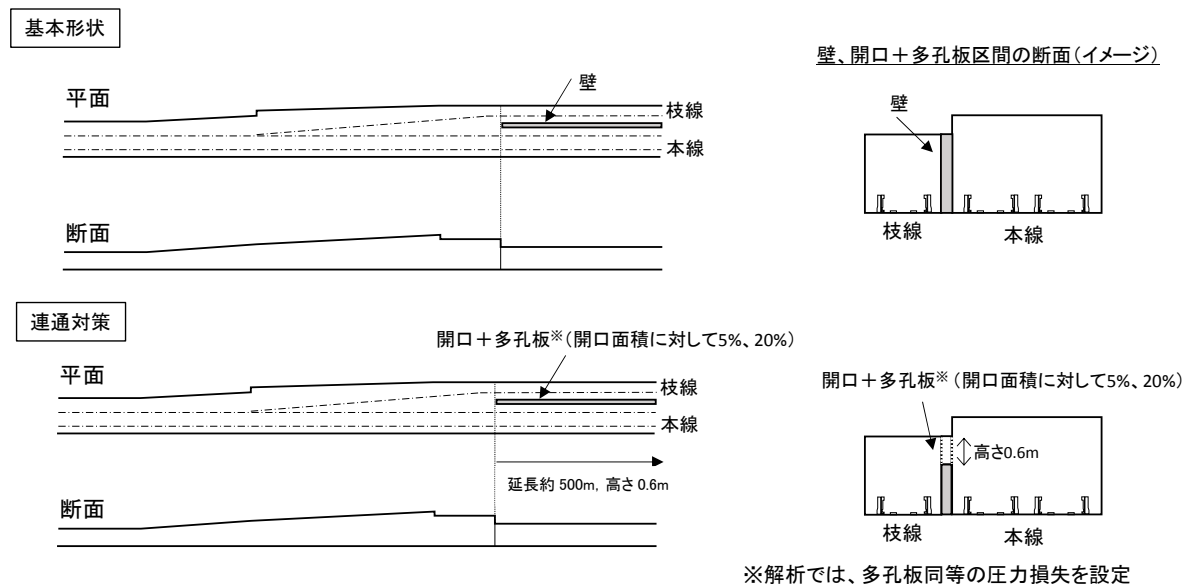


図-2.3.22 分岐部の基本形状と連通対策の形状

数値解析で得られた圧力波形および圧力勾配波形を図-2.3.23に示す。すりつけ対策と同様、圧力は大気圧で、圧力勾配は基本形状における最大値で正規化している。圧力の計測点はすりつけ対策の検討と同様に分岐部から分岐方向へ367m進んだ点とし、時間は列車先頭部が分岐部を通過する時刻を0秒として記載している。

この図に示すとおり、連通対策を実施することで、発生する圧縮波の圧力は基本形状に対して開口率5%の場合は74%、開口率20%の場合は56%に低減した。また、発生する圧縮波の圧力勾配についても、開口率5%の場合は67%、開口率20%の場合は49%に低減する結果となり、連通の開口率が大きい20%の方が開口率5%よりも低減効果が大きかった。これは本線と枝線の連通開口率が大きくなることで分岐部通過時に発生する圧縮波が枝線側に抜ける量が大きくなり、本線側に伝播する圧縮波が小さくなったためと考えられる。また、副次的な効果として、分岐部通過時に枝線側に発生する膨張波が本線側の圧縮波を打ち消す効果やトンネル突入における圧力上

昇は車体の断面積とトンネル断面積比に依存¹¹⁾するため、連通することで分岐後の本線断面が枝線と繋がり見かけの本線断面が大きくなり圧力上昇が抑制される効果も考えられる。

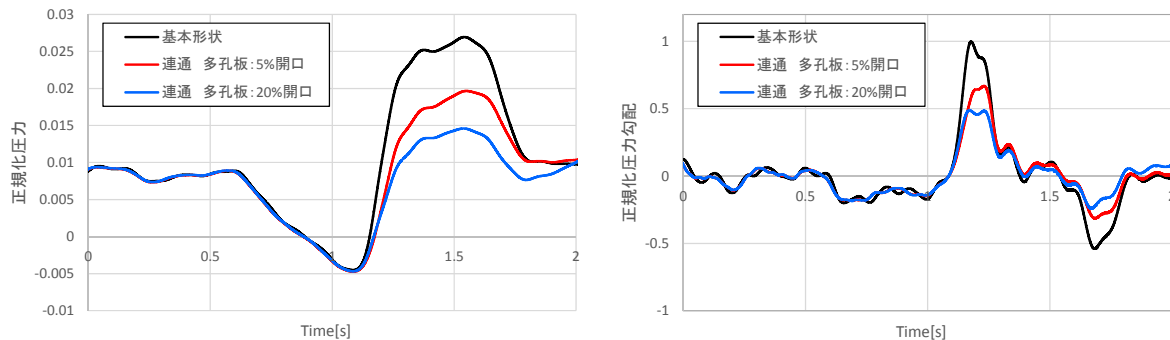


図-2.3.23 連通対策の数値解析結果（左：圧力波形，右：圧力勾配波形）

(3) 既存の手法に基づく方策（すりつけ対策，連通対策）の検討結果のまとめ

既存の手法に基づく方策による分岐部通過時に発生する圧縮波の圧力勾配の低減効果の検討として、前述の(1)すりつけ対策，(2)連通対策について数値解析で得られた圧力勾配最大値（列車：分岐方向，計測点：分岐部から分岐方向へ367m）を表-2.3.4にまとめて示す。この表に示すとおり、分岐部の微気圧波対策としては、すりつけ対策，連通対策はいずれも低減効果がみられる結果であった。

表-2.3.4 各対策における圧力勾配の比較

ケース		圧力勾配
基本形状		1.00（規準）
すりつけ対策	すりつけ延長 50m	0.76
	すりつけ延長 100m	0.60
連通対策	多孔板：5%開口	0.67
	多孔板：20%開口	0.49

ただし、すりつけ対策は図-2.3.19に示すように、断面積変化量を小さくするために分岐側の本線断面を必要面積よりも大きくすることから掘削土量が多くなるとともに、すりつけ形状に合わせた型枠を別途用意する必要があり、トンネル建設のコストが割高になる。

また、連通対策については、今回の数値解析では、枝線を本線と並行して沿う形とし本線と枝線の間延長約500mの開口および多孔板を設ける想定とした。しかし、実際の中央新幹線の山岳トンネル内の枝線はトンネル外の基地に向かって水平的にも高低的にも本線と離れていくため、今回の解析のように本線と枝線とを並行させ長い区間において開口や多孔板によって連通させることは困難である。

2.3.4 課題の整理

本節では、超高速列車が分岐部を通過する時に発生する圧縮波がトンネル内を長距離伝播し坑口から微気圧波として放射される際、トンネル坑口に緩衝工が設置されない場合はトンネル坑口の位置によっては基準値の約4倍もの微気圧波が発生する可能性があることが数値解析による予測により判明した。

これに対し、既存の手法に基づく方策による解決を試み、分岐付近のトンネルの断面積変化を緩やかにすることにより圧縮勾配を低減させようとする「すりつけ対策」、本線と枝線間の壁に多孔板を設けその開口から圧縮波を抜いて圧力上昇を緩和する「連通対策」の効果について検討した。その結果、両対策ともに分岐区間で発生する圧縮波の圧力勾配（微気圧波に比例）を低減できることを確認したものの、建設コストや構造成立性の面で困難であり、実現性に大きな問題があることも判明した。

トンネル分岐部通過により発生する圧縮波の伝播に伴う微気圧波の低減の対策については、トンネル坑口に緩衝工などの設備を設けるのが困難であることから分岐区間における発生源対策が重要である。しかし、本節の検討から、既存の手法に基づいた発生源対策による本問題の解決は困難であり、従来の考え方（断面変化の緩和、多孔板を用いた圧力上昇の緩和）とはまったく異なるアプローチによる新しい原理に基づいた微気圧波低減対策の考案が不可欠であることが判明した。

2.4 枝坑坑口から放射される微気圧波に関する現状調査と課題抽出

2.4.1 枝坑坑口における騒音低減問題との両立

第1章で述べたとおり、中央新幹線のトンネルにはトンネル掘削に用いるとともに旅客の避難やトンネル内の換気を目的とした枝坑（使用目的から通常「非常口」と呼ばれる）が数多く設置される計画となっている。都市部の非常口は直径約30mで約5km間隔に配置する計画である。内部は単なる筒状の風路ではなく、多孔板対策工のほか、強制換気設備（換気ファン）や消音設備（サイレンサ）、坑口の換気騒音を抑制するための換気口設備などを設置し、また旅客の避難のための階段・エレベータなども設置する計画である¹²⁾。

このように中央新幹線において枝坑はトンネル換気のための風路にもなっており、道路トンネルのように排気ガスの周辺環境への影響を考慮する必要はないものの、微気圧波放射だけではなく換気ファンから発生する騒音や気流に伴う風切り音による周辺への環境影響に配慮する必要がある。換気口からの騒音は換気ファンが支配的ではあるものの、流路の風速が大きくなると一般的には風速の6乗に比例して気流の通過による風切り音が急激に増大する。また流路の風速が大きくなると圧力損失についても風速の2乗に比例して大きくなるが、風切り音を下げするために消音設備（サイレンサ）を設置した場合は枝坑風路全体の圧力損失がさらに増えるため換気ファンの設備規模がますます大きくなり、建設コストや稼働時におけるランニングコストにも影響する可能性がある。

一般的な建築設備における送排風機の吹出し口では気流の速度が大きくなると騒音も大きくなるため、吹出し口の形状によって異なるが表-2.4.1のような値を用いるとよいとされている¹³⁾。ダクト系に送風した場合はダクト直管部、曲管部、分岐部、断面変化部、流量制御装置、ベーン、吹出し部、吸込み口消音器などで気流およびダクト壁の振動による騒音が発生する。

表-2.4.1 騒音から許容される吹出し速度¹³⁾

場所	許容吹出し風速 (m/s)
放送局	1.5～2.5
住宅・アパート・教会劇場・ホテル・高級事務所	2.5～3.75
個人事務所	4.0
一般事務所	5.0～6.25
映画館	5.0
商店（1階）	10.0
商店（2階）	7.0

中央新幹線の品川～名古屋開業時に枝坑の風路に設置する換気設備の換気風量は、トンネル内の蓄熱緩和や火災時の排煙を目的として換気ファン1台分の換気仕様を300m³/s（本線の風速約2m/s×本線断面積74m²×2方向を実現）で計画¹⁴⁾されている。この換気風量を図-2.2.5に示す山梨実験線の5m×5m断面の風路（断面積25m²）に通過させると換気口への流入風速は平均12m/sとなる。さらに将来の列車本数増大に伴う対応として2台の換気ファンを稼働させて600m³/s（本線の風速約4m/s×本線断面積74m²×2方向を実現）の換気風量を山梨実験線の風路と同じ5m×5m

断面の風路（断面積 25m^2 ）に通過させたとなると換気口への流入風速は平均 24m/s となり，この場合の騒音は相当大きなものになる可能性があるとして予測される．中央新幹線における枝坑の坑口においては吹出し部，吸込み口に相当する換気口を一定の高さに立ち上げ，枝坑流路の風速を低減して大気へ拡散することとしているが，換気口の高さにも景観やコスト等の面で限度があり流路から換気口への流入風速が大きい場合は，換気口の構造が複雑となり，建設や保守の面で現実的でなくなる懸念がある．

2.4.2 枝坑坑口における騒音予測評価

(1) 現状の風路断面での騒音予測評価

前述の山梨実験線の5m×5m断面の風路（断面積25m²）に中央新幹線で将来列車本数を増大させた際の想定換気風量を通過させる場合の騒音評価を風洞試験により実施した。中央新幹線の換気口にはダクトや整流板のほか換気ファンを進入物や飛来物から保護するための防鳥金網を設置するが、このうち最も外側に設置され騒音源の一つとなる防鳥金網を対象にした風洞試験を行い、金網を通過する気流の流速と発生する風切り音の関係について把握した。次にその風切り音を枝坑坑口に音源として設置した状況を模擬した音響解析を行い、風路内の風速が地上での騒音にもたらす影響を評価することとした。

風洞試験の状況および試験で使用した金網の詳細を図-2.4.1に示す。金網の試験体の大きさは風洞試験装置の出口の大きさに合わせて400mm×400mmとした。将来営業線において換気ファンを2台稼働させた場合に想定される風量600 m³/sを5m×5m断面の枝坑（断面積25m²）に通過させた場合の平均風速は24m/sとなるため、風洞試験で設定した風速はこの24m/sを基準に速度を50%、30%と小さくした12m/s、7.2m/sを含む3ケースとした。図-2.4.2に示す風洞出口から水平方向に45度で1m離れた風洞試験装置の出口の中心高さと同じ高さ（床面から1.5m）の計測点において、精密騒音計NL-32（RION）を用いて金網から発生する気流音を計測した。

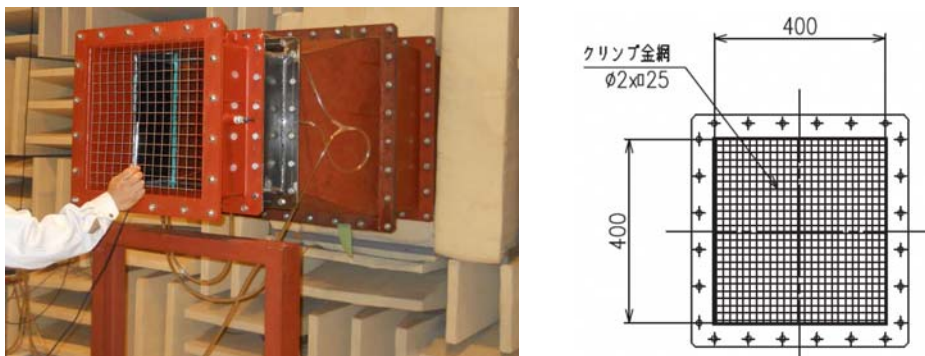


図-2.4.1 風洞試験の状況および使用した金網

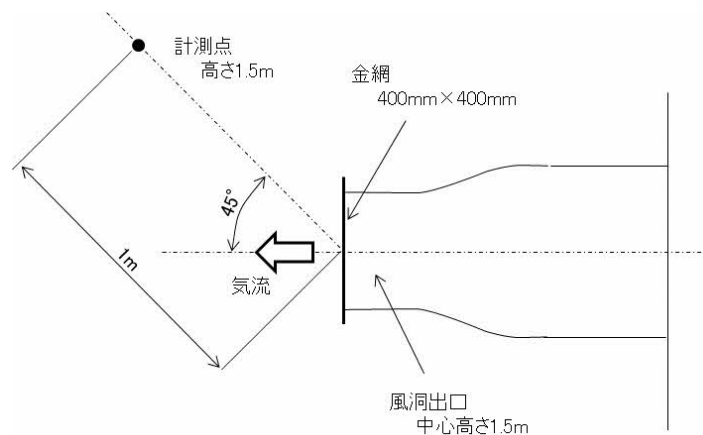


図-2.4.2 風洞試験の計測点

風洞試験の結果について A 特性で補正した騒音レベルの周波数と騒音レベルの関係を図-2.4.3 に、風速と騒音レベルの関係を図-2.4.4 に示す。図-2.4.3 から気流の風速が遅くなるにつれて低い周波数から高い周波数まで一様に騒音レベルが小さくなっていることがわかる。また、図-2.4.4 から騒音レベルは風速の 6 乗則に比例して大きくなっていることが分かる。

表-2.4.2 に風速を低減させた場合の周波数別の騒音低減量を示す。風速を 24m/s から 12m/s に低減したケースではオールパス値の騒音低減量は 19.1dB と風速の 6 乗則で計算した騒音低減量 18.1dB と近い値を示すものの周波数ごとに見るとばらつきがある。風速を 12m/s から 7.2m/s に低減したケースについてもオールパス値の騒音低減量は 15.2dB と風速の 6 乗則で計算した騒音低減量 13.3dB と近い値を示すものの周波数ごとに見るとばらつきがある。なお、63Hz の低減量が小さいのは風速 12m/s ですでに風切り音が小さくなっているためである。

風切り音については気流の流れから純粋に音が発生する空力音と気流によって部材が振動して発生する振動音とに大別され、前者は部材の形状のみに依存し後者は形状以外にも剛性や減衰等の部材振動に関わる特性にも依存して部材と接合する部位との衝突等により発生する二次的な音が風切り音として認識されることもある¹⁵⁾。金網の風洞試験において、オールパス値は 6 乗則に近い結果であるが周波数ごとに見るとばらつきがあることから、気流の流れから純粋に音が発生する空力音だけでなく実際には気流によって部材が振動して発生する振動音も影響している可能性がある。

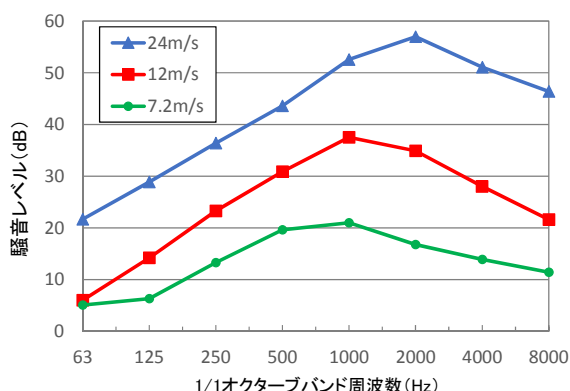


図-2.4.3 周波数と騒音レベルの関係

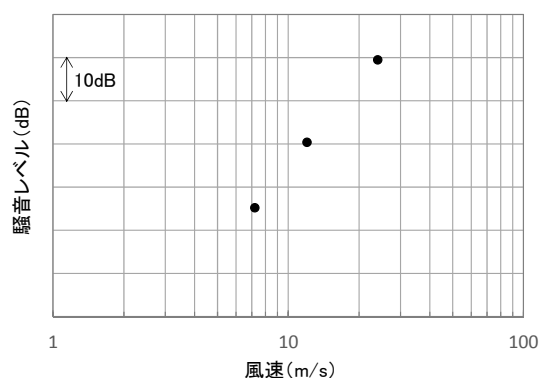


図-2.4.4 風速と騒音レベルの関係

表-2.4.2 風洞試験による騒音低減量 (dB)

風速	1/1 オクターブバンド中心周波数								AP
	63Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz	
24m/s →12m/s	15.7	14.7	13.1	12.7	15.1	22.1	23.1	24.8	19.1
12m/s →7.2m/s	0.9	7.9	10.0	11.3	16.5	18.1	14.1	10.2	15.2

次に、風洞試験における金網の風切り音の計測値をもとに、換気口出口に金網があると想定して地上の騒音予測を行った。金網の音響パワーレベルは式(2-9)に示す自由音場における点音源との関係式を用いて求めた。

$$PWL_{\text{exit}} = SPL + 10\log(4\pi r^2) \approx SPL + 20\log(r) + 11 \quad (2-9)$$

ここに、

- PWL_{exit} : 金網の音響パワーレベル (dB)
- SPL : 風洞試験の計測点での音圧レベル (dB)
- r : 風洞出口からの計測点までの距離(m)

換気口出口は面音源であるがここでは面音源を分割し点音源の集まりとして扱った。点音源による予測地点での音圧レベルは換気口出口から予測地点までの距離減衰、地面による反射等を考慮して評価した。なお、地表の反射は地表面効果による減衰を無視し鏡像を考慮して評価した。また換気口での回折減衰を考慮し、その回折減衰量は各点音源について半無限障壁での回折に伴う経路差と波長との比による指標と減衰値の関係を実験結果から回帰した前川チャート¹⁶⁾を用いた。点音源について直達音と地面反射音のパワーレベルと音圧レベルの関係をそれぞれ式(2-10)、式(2-11)に、その模式図を図-2.4.5に示す。各点音源による直達波と地面反射音の合成音圧レベルを式(2-12)により算出し、それらを面音源による音圧レベルに合成し式(2-13)により予測地点(受音点)での音圧レベルを求めた。なお、本検討では換気口出口の面音源を5つの点音源に分割した。

$$LR_{a,i} = (PWL_{\text{exit},i}/N - 11 - 20\log_{10}(r_{a,i}) + \Delta L_{d,i}) \quad (2-10)$$

$$LR_{b,i} = (PWL_{\text{exit},i}/N - 11 - 20\log_{10}(r_{b,i}) + \Delta L_{d,i}) \quad (2-11)$$

$$LR_i = 10\log_{10} \left\{ 10^{\frac{LR_{a,i}}{10}} + 10^{\frac{LR_{b,i}}{10}} \right\} \quad (2-12)$$

$$\overline{LR} = 10\log_{10} \left(10^{\sum_{i=1}^N LR_i} \right) \quad (2-13)$$

ここに、

- $LR_{a,i}$: 点音源 i からの直達音の音圧レベル (dB)
- $LR_{b,i}$: 点音源 i からの地面反射音の音圧レベル (dB)
- $PWL_{\text{exit},i}$: 点音源 i のパワーレベル (dB)
- N : 分割数 (本検討の場合、 $N=5$)
- $r_{a,i}$: 点音源 i から予測地点までの直達距離 (m)
- $r_{b,i}$: 鏡像を考慮した場合の点音源 i からから予測地点までの距離 (m)
- $\Delta L_{d,i}$: 点音源 i の場合の回折による減衰値 (負値) (dB)
- LR_i : 点音源 i からの直達音と地面反射音の合成音圧レベル (dB)
- \overline{LR} : 予測地点 (受音点) の音圧レベル (dB)

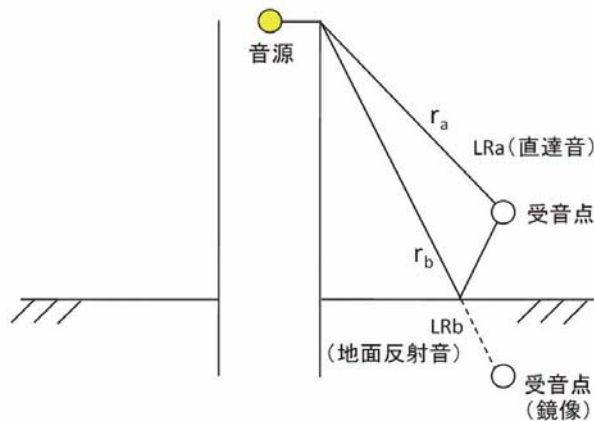


図-2.4.5 点音源から受信点までの直達音と地面反射音の経路の模式図

予測における換気口の高さは 8m、断面積は 100m² と仮定し、地上 1.2m 高さ、換気口中心から 20m 離れた位置の騒音を予測した。騒音予測の結果（オールパス値）を図-2.4.6 に示す。この結果から騒音レベルは風速の増加に伴って大きくなっており、風速 24m/s の場合には騒音規制法の特定施設において指定され得る最も厳しい騒音基準値である 40dB を超過する可能性があることが分かった。一方、金網を通過する風速が小さくなれば地上の騒音レベルも低減することも分かった。

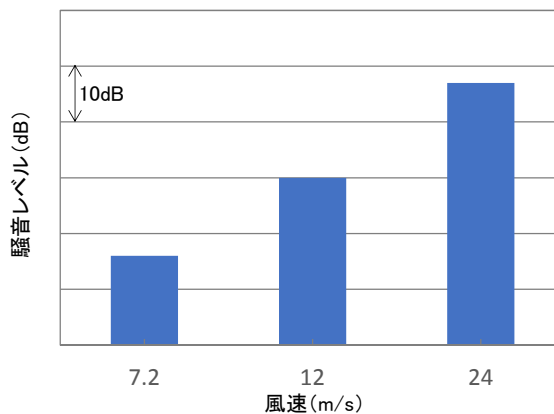


図-2.4.6 換気口（金網）で発生した気流音による地上での騒音予測結果

騒音による周辺環境への影響をできる限り低減するため枝坑出口に地上数十メートル高さの換気塔を設置することも考えられるが景観やコスト等の面で現実的ではない。また換気口の構造の簡略化、圧力損失の低減による換気設備の設備規模縮小、建設コストや将来の稼働時におけるランニングコスト低減も重要な課題である。以上の結果から、枝坑流路の拡大により風速低減を図ることを枝坑坑口における騒音対策の基本方策として考える。この場合、流路の拡大による微気圧波への影響、すなわち微気圧波対策と騒音対策との両立の検討が不可欠となる。

なお、列車が枝坑を通過する際に発生する圧縮波に伴い枝坑坑口から放射される微気圧波の問題に対しては、解決策として福田ら¹⁰⁾が逆止弁を本坑と枝坑の分岐部へ設置する方法を提案して

おり、前者（列車のトンネル突入）による微気圧波と後者（列車の枝坑通過）による微気圧波の両方を低減する効果を模型実験で確認している。本坑と枝坑の接続部には図-2.4.7 に示すように列車が枝坑を通過する際の圧力変動から換気ファンを保護するため換気ダンパを設置する計画であり、列車通過時に換気ダンパを閉塞することで枝坑の風路への接続を断って、トンネル内での断面積変化をなくすことにより、列車通過時における圧縮波の発生および坑口での微気圧波の放射を防止することができる。

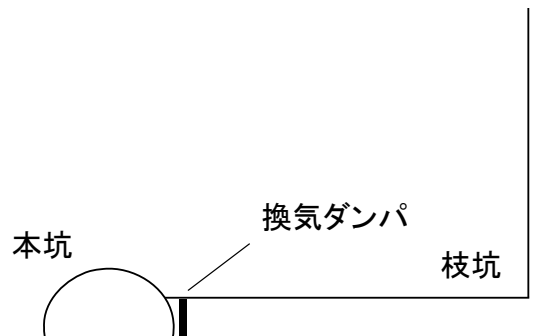


図-2.4.7 本坑と枝坑の接続部に設置する換気ダンパの設置位置

(2) 標準的なデバイス（換気口）による騒音低減の予測評価

中央新幹線の品川～名古屋開業時の枝坑での換気風量は換気ファン1台で毎秒300m³として計画されている。品川～大阪開業時の換気風量は未定であるが換気ファン2台で毎秒600m³と想定すると、高橋ら³⁾が提案している従来型断面の枝坑内の風速は24m/sとなる。一般に風切り音は速度の6乗に比例し、また枝坑出口は地表付近となるため、給排気の風速が大きい場合には出口周辺での風切り音が懸念される。

その対策として枝坑出口に地上数十メートルの高さの換気塔を設置することも考えられるが景観やコストの面で現実的ではない。そこで図-2.4.8に示すように枝坑出口に設置される換気口で風路の断面を拡大し風速を低減させて風切り音を抑制する。ただし、単に断面を拡大するだけでは局所的に流れが加速する場合もあるため、換気口からの排気時の流れを3次元数値流体解析によって再現し風切り音が問題にならない風速まで低減可能か評価する。

まず、図-2.4.8に示す標準的な換気口を従来型断面の枝坑出口に設置した場合について述べる。換気口内部は断面が14m×14mであり、雨水侵入防止用の天井板（10m×10m）が枝坑出口上部に設置してある。また換気口上部の開口部分は天井板と同じ寸法に狭めてある。排気の換気風量は最大の毎秒600m³とし枝坑から換気口を通過して外部へ流出する流れ場を数値的に解析した。支配方程式は3次元定常非圧縮性Navier Stokes方程式で、乱流モデルには標準k-εモデルを使用しCFDソフトウェアSTAR-CCM+を用いてシミュレーションを行った。

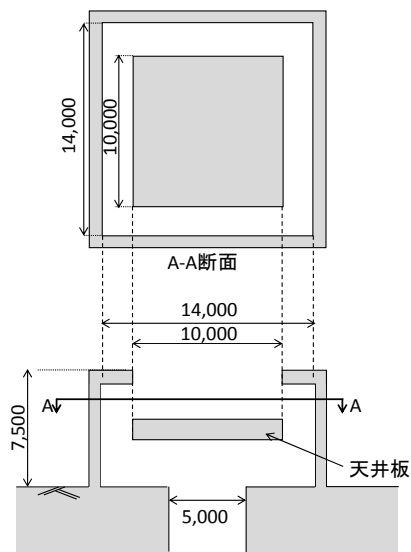
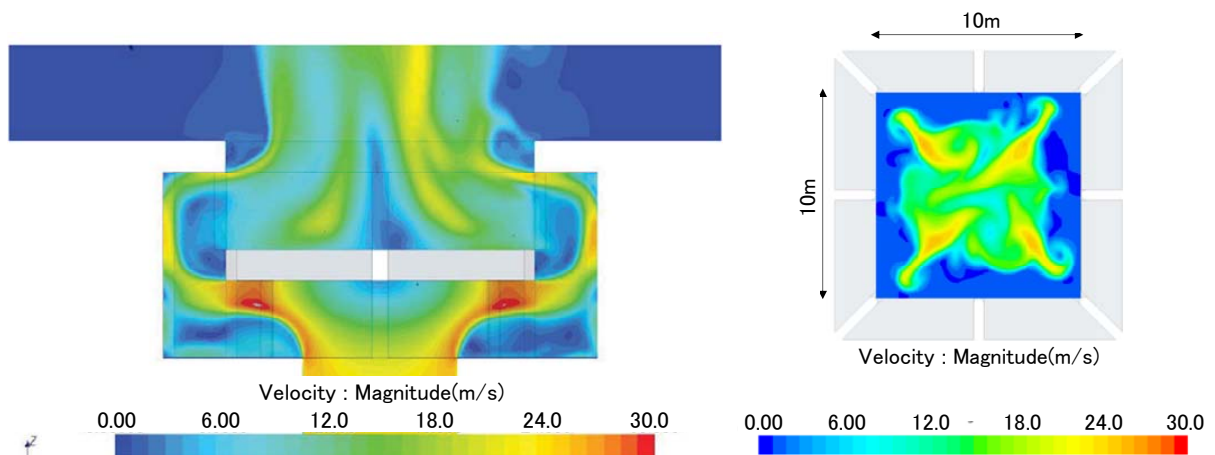


図-2.4.8 標準的な換気口形状（風切り音低減対策なし）

換気口内の流れの様子を見るため図-2.4.9に換気口の鉛直断面内風速分布を示す。枝坑から14m×14m断面の換気口に進入した流れは天井板に衝突後に天井板に沿って加速して端部で大きくはく離しており、はく離直前の風速は最も速いところで30m/sを超えている。天井板から流れがはく離することで風速の不均一が生じ、換気口壁面に沿った10m/sを超える速い流れの領域とはく離流背後に10m/sを大きく下回る領域が形成されており、この換気口内の流れの不均一性はそのまま出口まで影響している。その後流れは換気口壁面に沿って天井板背後に回り込み出口から外部に流出する。図-2.4.10に換気口出口上部1mにおける水平断面内の鉛直方向風速分布を示す。これを見ると換気口の周辺部の風速は小さく2m/s以下となっているが、中央付近の風速は10m/s以上、最も風速の大きい領域では24m/sを超えており、換気口で風切り音が顕在化する可能性が高い。



(左) 図-2.4.9 標準的な換気口の中央鉛直断面内における風速分布

(右) 図-2.4.10 標準的な換気口出口上部1mにおける鉛直方向風速
(風切り音低減対策なし)

2.4.3 課題の整理

(1) 枝坑の断面を拡大した場合の枝坑内の圧力値・坑口での微気圧波の把握

前節で、枝坑流路断面を拡大し風路内部の風速を低下させることにより枝坑坑口での騒音を低減することが可能であること、およびその場合には微気圧波問題との両立を図る必要があることを述べた。ここで流路拡大が微気圧波へ与える影響を簡易に把握するために多孔板対策工のない単なる筒状の流路を想定した簡易な検討を実施した。風速を半分にするには流路の断面積を2倍にする必要があるため、本坑に接続する枝坑の断面が5m×5m（以下「従来型断面」という。）の場合と断面積がその約2倍である断面が7m×7m（以下「拡大断面」という。）の場合を想定し、模型実験を実施して枝坑内の圧力値と枝坑坑口から放射される微気圧波を計測した。模型実験の概要については2.2.2(1)節のとおりであり、幾何縮尺は1/33で空気槽に蓄えられた圧縮空気によって射出装置内に設置した列車模型を実物と同じ速度で模型トンネルへ射出する試験を実施した。なお、ここで対象としている圧力波はトンネル入口で発生する圧縮波がトンネル内を伝播してきたものである。

模型の枝坑形状の概要と計測点の位置を本坑に直交する断面図として図-2.4.11に示す。A点は列車走行線側の本坑の点で分岐位置から実スケールで873m手前の地点である。B点は分岐後の枝坑内の点であり風路が上方に直角に曲がる直前の点である。B点の本坑からの離れは、枝坑断面が従来型断面の場合は実スケールで44m、拡大断面の場合は実スケールで42mである。なお、中央新幹線の営業線の本坑から枝坑が分岐する箇所における枝坑の接続断面は第5章に述べるとおり建設の制限上従来型断面と同じ断面積をもつ断面となっており（例えば図-5.3.2参照）、風路の断面を拡大断面に拡大する場合はこの接続断面からではなく枝坑の途中から断面の拡大を開始するという点が今回の検討と異なる。

模型実験により計測した圧力値を大気圧で正規化したうえで図-2.4.12に示す。トンネルを伝播する圧縮波が枝坑で分岐する前の計測点Aではどちらの断面でも同程度の圧力値になっている。また本線から分岐した枝坑内の計測点Bの圧力値については従来型断面、拡大断面の場合とも計測点Aよりも圧力値が小さくなり、断面積が大きい拡大断面の場合は従来型断面の場合と比較して圧力値が90%となった。対象としている微気圧波のような低周波数領域では波長が比較的長いため枝坑が本坑から直角に曲がる場合でも管路の内外の短い経路差によるエネルギーの減衰がほとんど無視できる¹⁷⁾ことから、分岐前後で総音響パワーレベルは保存され分岐後の本坑と枝坑の圧力はそれぞれのケースで同程度とみなすことができる。音響パワーレベルは圧力値の2乗と断面積の積に比例する¹⁷⁾ことから、分岐後の本坑と枝坑の断面積の合計（従来型断面では99m²、拡大断面では123m²）から算出すると、拡大断面における圧力値は従来型断面と比較して約9割（99/123の平方根）となり計測値と理論値とではほぼ一致することが確認できた。なお圧力勾配（圧力値の時間微分値）の最大値の比較では拡大断面の場合は従来型断面の場合と比較して91%であった。

一方、枝坑から25m離れた計測点Cにおいて計測された枝坑から放射される微気圧波の波形を大気圧で正規化して図-2.4.13に示す。拡大断面の微気圧波は従来型断面の2倍程度の大きさであった。一般的に微気圧波の大きさは以下の式(2-14)の関係^{18,19)}で示されるため、この微気圧波の増大は拡大断面と従来型断面との断面積および圧力勾配の最大値との積の比較（1.82倍）から

裏付けることができる。この検討の場合では拡大断面の風路内における圧力勾配は従来型断面の風路内における圧力勾配より少し小さい程度であったことから、微気圧波の大きさは風路の断面積が支配的に影響したものとなっている。したがって流路内の風速の低下を目的とした流路拡大は微気圧波を増大させる可能性があることがわかった。

$$P(t) \approx 2A_t / (\Omega \cdot r \cdot c) \cdot \partial p / \partial t \quad (2-14)$$

ここに、 $P(t)$ ：微気圧波、 A_t ：トンネル断面積、 Ω ：坑口の地形の影響を表す放射立体角、 r ：微気圧波の測点と坑口中心との距離、 c ：音速、 $\partial p / \partial t$ ：トンネル出口に到達した圧力波の圧力勾配の最大値である。

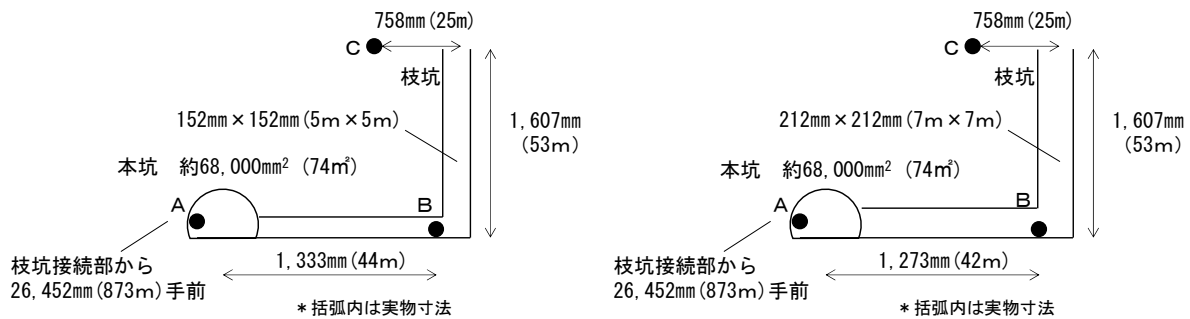


図-2.4.11 実験で使用した模型の概要（左：従来型断面，右：拡大断面）

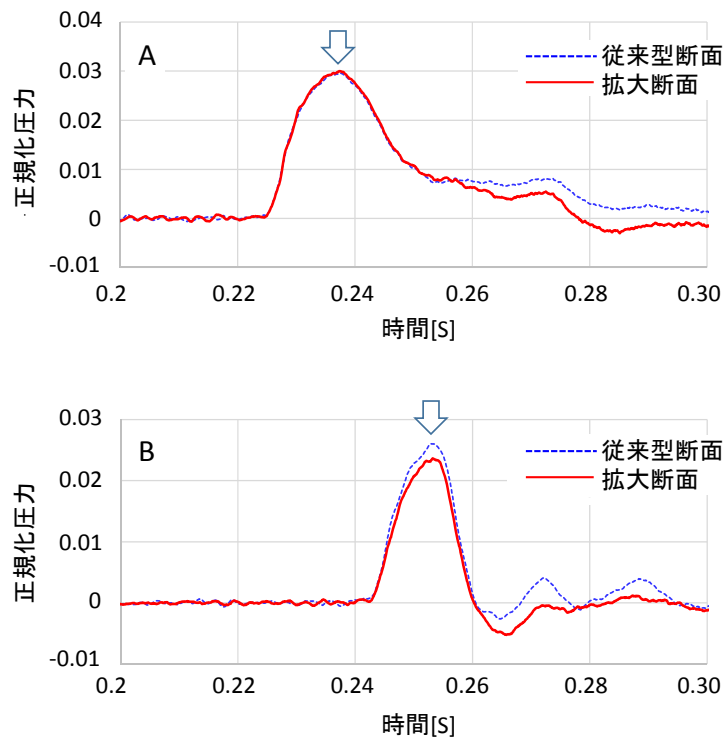


図-2.4.12 模型試験による圧力値（上：測定点 A，下：測定点 B）

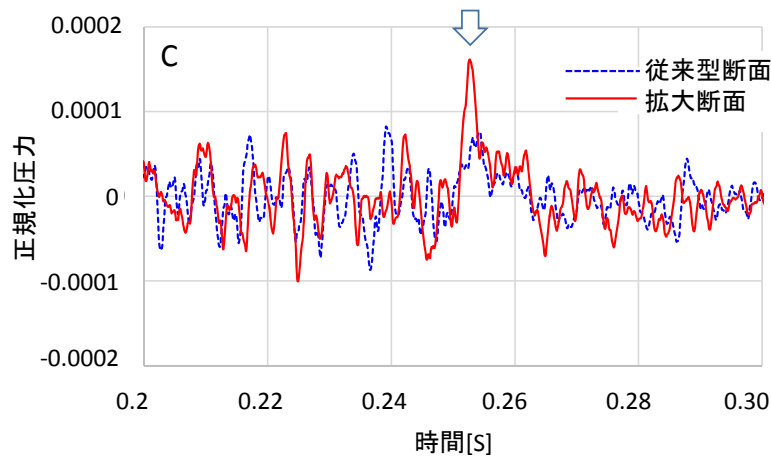


図-2.4.13 測定点 C における従来型断面と拡大断面の場合の微気圧波

(2) 枝坑の断面を拡大した場合の微気圧波の検討に関する課題の整理

前節では、枝坑内に微気圧波の低減を目的とした多孔板対策工がなくしかも枝坑が本坑との接続部から坑口まで一様な断面を有する場合に、伝播してきたトンネル突入波が枝坑に分岐して枝坑の坑口から放射される微気圧波について基礎検討を行った。この結果、坑口から放射される微気圧波は枝坑の風路の断面積の拡大に伴い増大することを確認した。

先述のとおり、中央新幹線の本坑から枝坑が分岐する箇所における枝坑の接続断面は空間と建設上の制約から従来型断面と同じ断面積の断面となっており、風路の断面を拡大断面に拡大する場合は枝坑の途中から断面の拡大を開始することになる。また枝坑内には微気圧波低減を目的とした多孔板対策工も設置される。このため枝坑の現状は前節の検討の前提と異なっていることから拡大された風路内の圧力勾配も異なることが予想される。

したがって中央新幹線の営業線の枝坑の坑口からの微気圧波を予測するには、営業線の風路の形状を前提としたうえで多孔板対策工の効果も加味しながら、枝坑の途中からの風路拡大による風路内の圧力勾配への影響をまず正確に評価する必要がある。この圧力勾配への影響に伴う坑口から放射される微気圧波が大きくなると予測される場合には、風切り音の低減と微気圧波の低減を両立できる追加の対策を追加で講じる必要がある。

2.5 まとめ

中央新幹線のトンネル内の断面積変化部を超高速列車が通過することによりトンネル本坑内および枝坑内に形成された新たな圧力波に起因する微気圧波問題の解決のため、本章では枝坑や横坑のような分岐部を有する超高速鉄道のトンネルの微気圧波に関する現状調査と課題抽出を行った。

まず、山梨実験線でのトンネル内での断面積変化部を実際に高速列車が通過した際の圧力波の状況について横坑や中間緩衝工の天井に開口を設けた箇所において計測を実施した。この結果、断面変化率が大きくなるにつれて大きな圧力波が発生することを確認し、横坑のような断面変化部を列車が通過した場合にトンネル本坑内に圧縮波と横坑内に膨張波が発生することを計測で確認した。また、山梨実験線にはトンネル内に分岐器が存在しないため、分岐器による断面変化部を列車が通過する際の圧縮波については既存の模型装置を利用して状況を模擬することにより把握を行った。次に、高速列車がトンネル分岐区間を通過した際に発生する圧縮波がトンネル内を長距離伝播してトンネル坑口から微気圧波として放射される影響について検討した。なお、実物設備や模型実験を用いることは困難であるため数値解析手法を用いて算出した。手順としては、まず1次元波動伝播解析のインプットとなる列車が分岐部を通過した際に形成される圧縮波を3次元CFD解析で算出し、次に別の既存の数値解析手法(1次元長距離伝播解析)によりトンネル本坑を長距離伝播して緩衝工のないトンネル坑口で放射された際に分岐区間と坑口の距離によっては放射される微気圧波は基準値の4倍程度の大きさになることを確認した。

しかし、トンネルの入口や出口で用いられている多孔板緩衝工はトンネル分岐部のような空間的制約のある箇所には設置できない。そこで急激な断面積変化を小さくして圧力上昇を緩やかにする「すりつけ対策」や、本線と枝線との壁に多孔板を設けて開口から圧力を緩やかに抜くことで圧力上昇を緩やかにする「連通対策」などを検討した。既存の数値解析手法によりこれらの対策は分岐部で発生する圧縮波の圧力勾配を低減する効果を発揮することは確認できたものの、実際の適用において大きな問題があることが判明した。具体的にはすりつけ対策はトンネル断面積を必要面積よりも大きくすることから掘削土量が多くなること、すりつけに合わせた型枠が必要なことからトンネル建設のコストが割高になる可能性があることが分かった。また、連通対策は本線と枝線との壁に延長約500mの開口を設けそこに多孔板を設置する構造であり圧力波の圧力勾配の低減効果を数値解析により確認できたが、実際の営業線の枝線はトンネル内で本線からトンネル外部の保守施設に向かって上下左右に空間的に離れていく線形となっているため、本坑と枝坑を前述の延長にわたって連結させるような構造は困難である。したがって、高速列車のトンネル分岐部通過に伴う圧縮波の発生による微気圧波問題への対策としては、発生源対策として別のメカニズムに基づいたまったく新たなアプローチによる施工面で現実的かつ経済的に有効な対策の検討を行うことが不可欠であることが判明した。

また、換気を担う枝坑では、微気圧波放射の影響だけでなくトンネル内の換気のため内部の風路を気流が通過することにより坑口で発生する風切り音の周辺への環境の影響にも配慮が必要である。本線から分岐した圧縮波が枝坑を通過して枝坑坑口から放射される微気圧波の低減対策としては、多孔板で仕切られた吸音領域である多孔板対策工を枝坑の途中に設ける方法が考案されて山梨実験線で適用されている。現行の山梨実験線の風路断面に中央新幹線の品川～名古屋開業

時の枝坑での予定換気風量を通過させた場合の騒音は相当大きなものと予測される。標準的な騒音対策のデバイスを適用した場合の騒音を数値解析にて予測評価し、山梨実験線の風路では流速が大きく騒音が増大する可能性があることを把握した。騒音の周辺環境への影響をできる限り低減するため枝坑出口に地上数十メートル高さの換気塔を設置することも考えられるが景観やコスト等も面で現実的ではなく、換気口の構造の簡略化、圧力損失の低減による換気設備の設備規模縮小、建設コストや将来の稼働時におけるランニングコスト低減も重要な課題であるため、枝坑流路の拡大により風速低減を図ると同時に微気圧波への影響（微気圧波対策と騒音対策との両立が果たされているか）を把握することが不可欠である。流路拡大に伴う微気圧波の影響の把握を目的とした簡易な検討として、多孔板対策工がなく一様な断面の筒を想定し模型実験を実施した結果から枝坑流路拡大により微気圧波が増大する可能性があることが判明した。このため、中央新幹線の営業線の枝坑形状および枝坑内に設置される多孔板対策工の効果をもとに風路拡大に伴う風路内の圧力勾配、および坑口での微気圧波のレベルを正確に予測し、状況に応じては風切り音低減と微気圧波低減の両立が可能な対策を追加で講じる必要がある。

参考文献

- 1) 本田敦:超高速鉄道トンネルの微気圧波の評価およびその低減対策の提案, 東京大学博士論文, 2015.
- 2) 本田敦, 高橋和也, 野澤剛二郎, 土肥哲也, 小川隆申, 飯田雅宣, 藤野陽三:超高速鉄道トンネルにおける微気圧波の評価および緩衝工の提案, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 71, No. 3, pp. 327-340, 2015.
- 3) 高橋和也, 本田敦, 山極伊知郎, 野澤剛二郎, 土肥哲也, 小川隆申:超高速鉄道におけるトンネル枝坑からの微気圧波の低減対策, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 72, No. 1, pp. 41-46, 2016.
- 4) 山極伊知郎, 田中俊光:超低周波数領域における多孔板構造吸音特性予測技術の研究, 日本機械学会第14回環境工学総合シンポジウム2004講演論文集, No. 14, pp. 66-69, 2004.
- 5) T. H. Melling, The acoustic impedance of perforates at medium and high sound pressure levels, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 29, pp. 1-65, 1973.
- 6) 宇津野秀夫, 坂谷亨, 山口善三:行列伝達法による多孔板吸音特性の実験的研究, 日本音響学会誌, No. 59-6, pp. 301-308, 2003.
- 7) 田中俊光, 山極伊知郎, 吉村登志男, 山崎幹男, 堀田学, 加藤覚:超高速列車用トンネル微気圧波模型実験装置の開発と音響性能, 日本騒音制御工学会研究発表会講演論文集, 1997.
- 8) 本田敦, 高橋和也, 野澤剛二郎, 土肥哲也, 小川隆申, 飯田雅宣, 藤野陽三:超高速鉄道トンネルのトンネル内圧縮波伝播性状と出口側緩衝工による微気圧波低減効果, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 71, No. 1, pp. 128-138, 2015.
- 9) T. Ogawa and K. Fujii : Numerical Investigation of Three-dimensional Compressible Flows Induced by a Train Moving into a Tunnel, *Computers and Fluids*, Vol. 26, No. 6, pp. 565-585, 1997.
- 10) 福田傑, 飯田雅宣, 村田香:トンネル内枝坑による微気圧波の低減と枝坑通過波の形成, 鉄道総研報告, Vol. 14, No. 9, pp. 17-24, 2000.
- 11) 原朝茂:列車とトンネルの空気力学, 鉄道技術研究報告, No. 1230, 1983.
- 12) 岩田眞:中央新幹線(東京都・名古屋市間)の建設計画, 土木施工, Vol. 59, No. 10, 2018.
- 13) 空調調和設備計画設計の実務の知識(改訂4版), 空調調和・衛生工学会, 2017.
- 14) 中央新幹線(東京都・名古屋市間)環境影響評価書, 東海旅客鉄道株式会社, 2014.
- 15) 鈴木雅靖:角柱から発生する渦音の風洞試験および数値解析, 日本風工学会誌, Vol. 39, No.1, 2014.
- 16) 前川和男:障壁の遮音設計に関する実験的研究, 日本音響学会誌, Vol. 18, pp. 187-196, 1962.
- 17) 前川純一, 森本政之, 坂上公博:建築・環境音響学, 共立出版, 1990.
- 18) 山本彬也:トンネル出口からの微気圧波, 日本物理学会春の分科会予稿集, p. 137, 1977.
- 19) 小澤智:トンネル内の圧力波の変形とトンネル出口微気圧波, ながれ, Vol. 14, pp. 191-197, 1995.

第3章 トンネル分岐部通過時に発生する微気圧波の低減手法の検討

3.1 はじめに

本章では、トンネル分岐部通過時に発生する圧縮波の圧力勾配を低減させる方法として、前章で検討を行ったすりつけ対策や連通対策のようなトンネル内の断面積変化を物理的に緩やかにし、あるいは多孔板を利用して圧力を抜き圧力上昇を緩やかにするような既存の手法とは異なった新たな原理に基づく微気圧波の低減手法の検討を行う。そこで、断面変化部で発生する圧力波とは異なる波との干渉を利用し圧縮波の圧力や圧力勾配を低減させる音響的なアプローチによる検討を行った。

音響分野における波の干渉を利用した低減手法としてよく知られているものとして、騒音に対して逆位相の音を出して元の音をキャンセルし消音を図るアクティブノイズコントロール（以下「ANC」という。）という技術がある。ANC技術は音源とは別のスピーカーを用いて人工的に消音用の音を放射し騒音と干渉させて低減または消去する技術¹⁾であり、ANC付ヘッドホン、空調ダクト用ANC、ANCを搭載した冷蔵庫、車のこもり音対策用ANCなどが商品化²⁾されている。ANCの利点として吸音材を使用する従来のパッシブな消音技術と比べて低周波音に対する大きい消音効果がある¹⁾。トンネル微気圧波は一般的に10Hz以下の低周波領域が主音源であるため³⁾、ANCを用いて分岐部で発生する圧縮波にその逆位相の圧力波を重ねれば圧力波を低減できることが期待される。ANCでは発生する圧縮波に対しこれを打ち消す圧力波を発生させる装置が別に必要であり、土肥⁴⁾によって建具のがたつき試験を想定した屋外用の低周波音発生装置が開発されている。この装置は図-3.1.1に示すように、約26m³の容積であり、1m×1mのアルミハニカム板を2枚の空気圧サーボアクチュエータを用いて互いに逆位相で振動させることで5～20Hzの低周波音を3m離れで110dBの強度で発生させることができる⁴⁾。

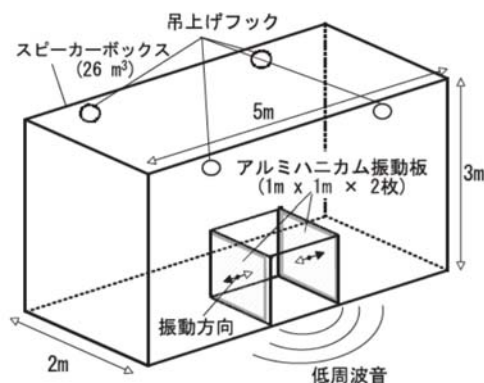


図-3.1.1 低周波音発生装置⁴⁾

しかし、前章の図-2.3.13右側に示すような分岐部通過時における大気圧の約2%相当の圧力値の上昇をこの装置と同じ制御方式で発生させるとすれば24m×24mのアルミハニカム板と約7,400m³の容積の装置が必要となってしまう、トンネル内にこのような非常に大型な装置を設置することは現実的ではない。また装置を稼働させるための動力が別途必要になる。

音響的に波の位相を反転させる方法としては開口端における反射の利用が挙げられる。斉藤ら⁵⁾は、トンネル枝坑の坑口からの微気圧波の低減を目的として、図-3.1.2に示すように枝坑内部に坑口から仕切り壁（内壁）を設けて2分割し片側を閉鎖板により閉鎖する方法を提案している。微気圧波は前章（第2章）の式(2-14)で示されるように断面積Aと圧力勾配 $\partial p/\partial t$ に比例するが、単に断面積Aを低減しただけでは流速が増加して $\partial p/\partial t$ が大きくなるため微気圧波の大きさはあまり変わらない。このため枝坑の坑口の片側を開放しつつもう片側を閉鎖することにより枝坑内の圧力上昇量を増加させずに平面波のまま圧縮波を分岐させる。これにより1回目に圧縮波が開口端を通過し開口端から放射される微気圧波は開口が風路全体に占める面積の割合にまで低減する。さらに圧縮波が開口端や閉鎖端あるいは分岐点で反射（図-3.1.2の R_o, R_c ）、透過（図-3.1.2の T_o, T_c ）を繰り返し、2回目、3回目、と開口端を通過する圧縮波は開口端や閉鎖端で反射して振幅がだんだん減少したうえに位相が逆転した数々の圧縮波との重ね合わせにより低減される。なお、 i ($i \geq 2$) 回目に開口端に到達する圧力波 $p_{o,i}$ および閉鎖端に到達する波 $p_{c,i}$ は以下の式(3-1)、式(3-2)に示され、 c は音速、 R_o, R_c は反射係数、 T_o, T_c は透過係数である。また $p_{o,1} = p_{c,1}$ は初回到開口端・閉鎖端に到達する圧力波である。特に3回目以降の開口端への到達圧縮波は大きく低減され、枝坑外に放射される微気圧波は大幅に小さくなる。このように位相が逆転した波の重ね合わせは微気圧波に有効であることが示されており本論文における微気圧波低減の検討に大変参考になるものである。しかし、分岐区間においては空間的制約上分割壁や閉鎖版のようなものは設置できず別の手法による必要がある。

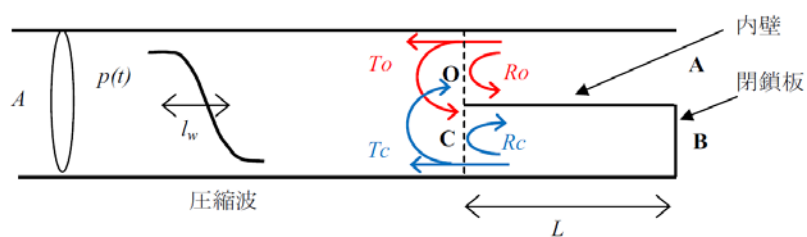


図-3.1.2 斉藤による内壁付き枝坑の概念図⁵⁾

$$p_{o,i}(t) = -R_o p_{o,i-1}(t - 2L/c) + T_c p_{c,i-1}(t - 2L/c) \quad (3-1)$$

$$p_{c,i}(t) = -T_o p_{o,i-1}(t - 2L/c) + R_c p_{c,i-1}(t - 2L/c) \quad (3-2)$$

一方、列車が本線と横坑のような枝坑接続部を高速で通過する際に本坑には圧縮波が発生し同時に圧縮波とは逆位相の膨張波が枝坑内に形成されることが分かっており⁶⁾、第2章に示す山梨実験線での現地測定においても確認されている、列車が枝坑接続部を通過する際に

発生する圧縮波と膨張波をうまく利用して列車が分岐部を通過する際に生じる圧縮波の圧力、や圧力勾配を低減することを検討する。枝坑接続部を通過する際に発生する圧縮波は枝坑断面積に依存するため枝坑の断面積を調整することにより適当な大きさの圧縮波や膨張波を発生させ、列車が分岐部を通過する際に発生する圧縮波にタイミングよく重畳させることができれば上述したような大型な装置、追加の設備や動力源を設置することなく対象とする圧縮波の圧力や圧力勾配を低減できる可能性がある。そこで本章では、分岐部通過によって発生する圧縮波に起因する微気圧波の発生源対策として、図-3.1.3に示すトンネル本坑と並行する有限長の小断面トンネルを設けてそれを小断面の連絡坑で連結する「並行トンネル」を提案する。列車の分岐部通過によって発生する圧縮波に、列車が並行トンネルと接続された各連絡坑を通過する際に発生する圧縮波および連絡坑と並行トンネルを迂回して時間差を持って本坑に到達する膨張波を重畳させて分岐部通過に伴い発生する圧縮波波面をなだらかにして微気圧波を低減させることを狙う。

本章ではまず、並行トンネルによる微気圧波低減対策の基本的な考えを述べ、並行トンネルの構造とその微気圧波低減対策の原理について説明する。次に、並行トンネルを列車が通過する際の圧力の流れを近似的なモデルと数値流体解析によって再現し並行トンネルの原理が実現されているか検討した結果を示す。その結果に基づき圧力勾配の低減が実現できる並行トンネルの構成要素の諸元（並行トンネルの位置、および各坑の長さや断面積など）を決定する。これらの諸元による並行トンネルを分岐部に設置した場合の圧力勾配の低減効果を模型実験・数値解析によって検証し、最後に長距離伝播解析を行い本坑坑口出口での微気圧波低減効果を確認する。

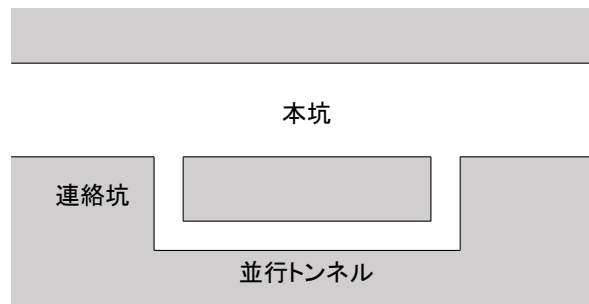


図-3.1.3 並行トンネルのイメージ

3.2 並行トンネルによる微気圧波低減対策

3.2.1 並行トンネルの基本的な考え方

前章（第2章）にて、超高速列車が分岐部を通過する際に発生する圧縮波の現状把握として行った模型実験（分岐方向へ走行，順方向へ伝播）の結果を図-3.2.1上段に再掲する．断面が徐々に拡大する分岐区間を列車が通過することで最初は負圧が見られ，その後断面が急縮小となる箇所を列車が通過することによりわずか0.1秒間ほどの間に圧力が急に上昇する．微気圧波に比例するこの圧縮波の波面の勾配を極力なだらかにすることが微気圧波低減対策を検討するうえで重要である．従来の多孔板による対策では主に列車のトンネル突入に伴う圧縮波の生成過程で圧力勾配の低減を実現したのに対し，本論文で提案する対策では新しい原理すなわち別途発生させる圧力波を分岐部通過時に発生する圧縮波に重畳させることでその波面をなだらかにする．したがって，どのような圧力波を重畳させその圧力波をどのように発生させるかが重要なポイントである．

図-3.2.1上段に示す圧縮波において0.7秒あたりから約0.82秒までの時間幅 $\Delta t_w=0.12$ 秒が波面に相当し，時間幅 Δt_w は列車先頭の断面が変化する部分（以下「列車先頭部」という．）の長さ L_t を列車速度 V で除した L_t/V で表される．列車先頭部の長さは15mであるため，列車速度が時速500kmの場合 $\Delta t_w=L_t/V\sim 0.12$ 秒となり模型実験の結果と合致する．時間幅 Δt_w の下で圧縮波の圧力勾配が最小になるのは波面が直線になる場合であるが，同図中に示すように時間幅を $\Delta t'_w$ にまで広げて直線的な波形にすれば圧力勾配の最大値をより低減させることが可能となる．特に分岐方向の圧縮波においては圧縮波前面に負圧部分があるのでこの部分に正圧を重畳させれば時間幅を伸張しやすい．ただし，断面が拡大している分岐区間は長いいため圧縮波前面の負圧の時間も長くこの全区間で正圧を重畳させるのは現実的でない．そこで本論文では，圧縮波波面から0.2秒程前の約0.53秒から約0.9秒過ぎまでが直線的波面（図-3.2.1上段図中の破線）となるよう正圧を重畳させることとする．元の圧縮波とこれを直線的波面とした場合のそれぞれの圧力時間微分波形を図-3.2.1中段に示す．新たな時間幅 $\Delta t'_w$ において時間微分値を一定にすることにより圧力勾配の最大値が約3割まで低減することになる．なお，図-3.2.1中段からわかるように直線的波面の時間幅始点の約0.53秒および終点の約0.9秒過ぎの各時間はこれ以前およびこれ以後の時間では圧力時間微分値がほぼ0と見なせ波面の形状変化とは関係の少ない時間帯と推察されることを理由に設定した．

図-3.2.1上段の直線的波面（破線）と圧縮波（実線）の差分を求めたのが図-3.2.1下段の波形でこれが圧縮波に重畳させる圧力波（以下「重畳波」という．）の波形となる．正圧のパルス波の後波長が3割程度で振幅も小さい負圧のパルス波が続く波形となっている．次に，この重畳波をトンネル内部でいかに発生させるかということを検討する．本研究では3.1節で述べたとおりトンネル内の横坑を列車が通過すると図-3.2.1下段の重畳波に似たような圧力波が生じることに着目した．まず超高速列車が横坑を通過する際の圧力波の現象を簡単な関数によりモデル化し，次にこのモデルを発展させた並行トンネルの原理について説明する．

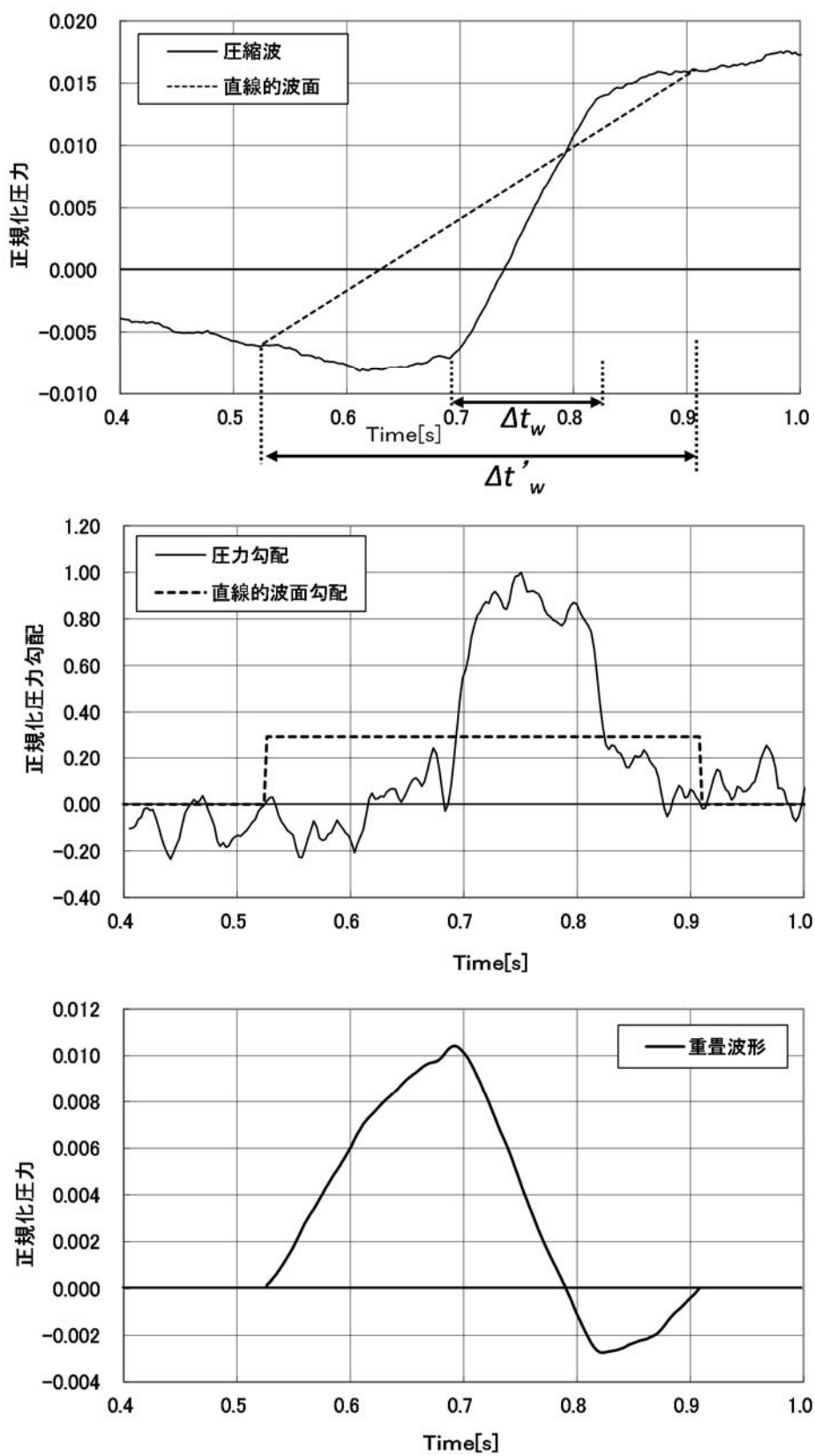


図-3.2.1 分岐区間を通過する際の圧縮波（上段）と時間微分値（中段），重畳波（下段）

3.2.2 列車横坑通過時の圧力波と簡易モデルによる波形のモデル化

列車が本坑よりも小さな断面積の横坑を通過すると図-3.2.2に示すように本坑内に圧縮波が発生し同時に横坑内に膨張波が形成される⁶⁾。圧縮波は本坑内を順方向・逆方向の両方向に伝播するが順方向に伝播する圧縮波を本論文では「直達波」(direct wave)と呼ぶ。一方、膨張波は横坑内を伝播し横坑末端と本坑接続部の間を重複反射する。このとき本坑接続部で膨張波の一部が本坑内に放射されて直達波を追うかたちで伝播する。この圧力波は横坑を迂回することから本論文では「迂回波」(bypass wave)と呼ぶ。

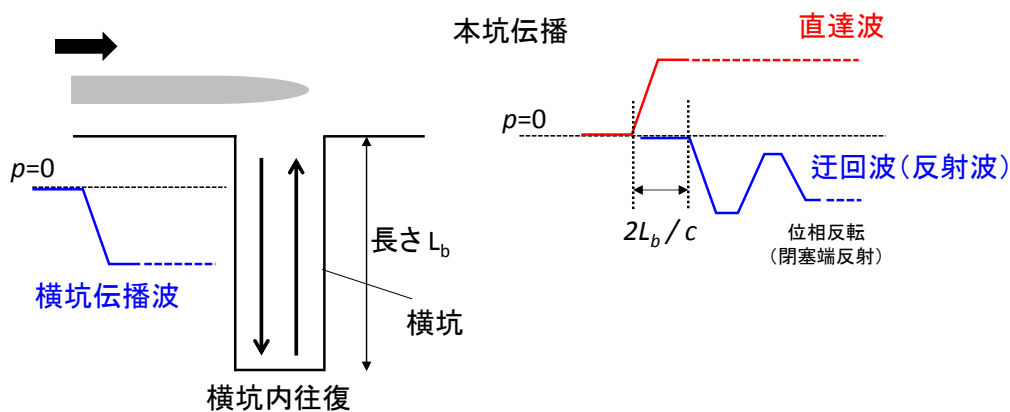


図-3.2.2 列車が横坑を通過する際に発生する直達波および迂回波

直達波は列車がトンネルに突入する際に発生する圧縮波と似た波形となる。迂回波は横坑内を往復するため直達波から $2L_b/c$ だけ遅れて伝播しその後も周期的に減衰しながら本坑内に放射される。その結果、列車の横坑通過によって本坑内に発生する圧力波は直達波と迂回波が重ね合わさった波となる。横坑を列車の先頭から最後尾が通過するまでの直達波は山梨実験線での計測結果より余弦関数を用いて近似的に式(3-3)で表されこれを図示すると図-3.2.3のようになる。近似した直達波と山梨実験線での横坑通過(時速500km)時の実測結果を比較したものを図-3.2.4に示す。本線内のトンネル壁面に絶対圧計(東京測器, APW20KPAS003)を横坑から350m離れた位置に設置して計測した。図-3.2.4に示すとおり、近似波形は実測結果の波面の切り立ちを精度よく再現できていると考えられる。なお、実測結果における0.4秒以降の圧力低下は迂回波の影響であり後述する。

$$\begin{cases} \frac{\Delta p_d}{2} \{1 - \cos(\pi\tau)\} & (0 \leq \tau = t/t_c < 1) \\ \Delta p_d & (0 \leq t - t_c \leq L_m/V) \\ \frac{\Delta p_d}{2} \{1 + \cos(\pi\tau)\} & (0 < \tau = (t - t_c - L_m/V)/t_c \leq 1) \end{cases} \quad (3-3)$$

ここで図-3.2.3に示すとおり Δp_d は直達波の振幅(Pa), t_c は直達波が切り立ち一定の圧力値となる時刻($t_c = \Delta t_w = L_t/V$)(s), L_t , L_m はそれぞれ列車先頭部長さ(m), 列車の先頭部以外の断面積が一樣な中間部の長さ(m), V は列車速度(m/s)である。

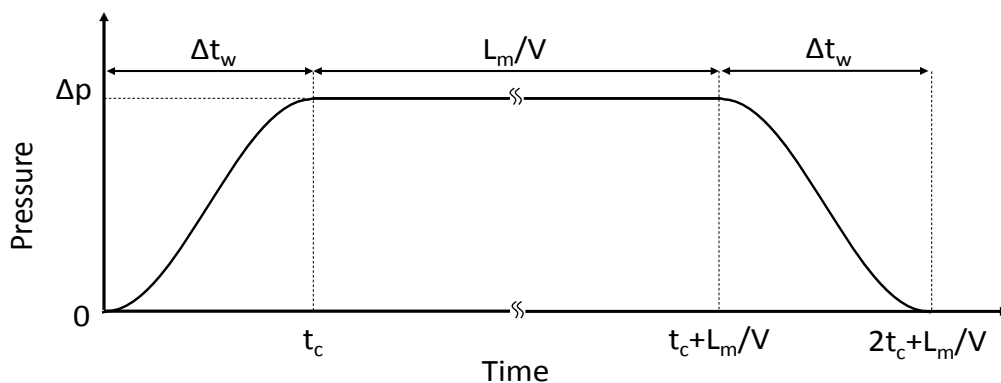


図-3.2.3 本坑内に発生する直達波の近似波形

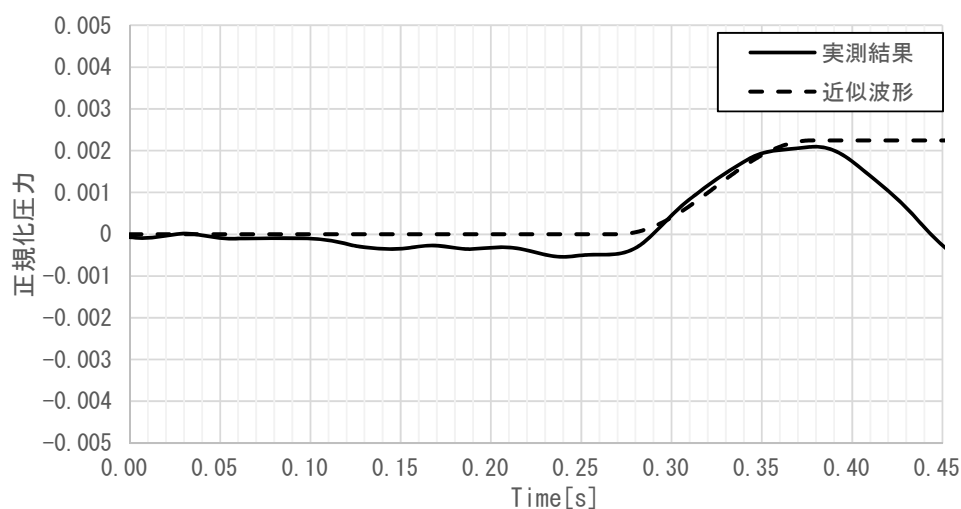


図-3.2.4 直達波の近似波形と横坑通過時の圧力測定結果（大気圧で正規化）

次に、迂回波の影響を考慮して付加する。ここでは簡単のため横坑内を1往復して本坑内に放射された迂回波のみの影響を考える。この迂回波は図-3.2.2にイメージを示したとおり、直達波とは逆位相をもつ圧力波として直達波を表す式(3-3)と同様に近似的に以下の式(3-4)で表される。

$$\begin{cases} 0 & \left(0 \leq \tau = t / \left(\frac{2L_b}{c}\right) < 1\right) \\ \frac{\Delta p_b}{2} \{-1 + \cos(\pi\tau)\} & \left(0 \leq \tau = \left(t - \frac{2L_b}{c}\right) / t_c \leq 2\right) \end{cases} \quad (3-4)$$

ここで Δp_b は迂回波の振幅 (Pa) である。また L_b は横坑長さである15mに開口端補正⁶⁾を考慮している。先ほどの近似した直達波にこの迂回波を合成した圧力波と山梨実験線での横坑通過（時速500km）時の実測結果を比較したものを図-3.2.5に示す。図-3.2.4と比較して図-3.2.5では0.38秒あたりから迂回波の影響で近似波形の圧力値は低下を始め、合成波の近似波形は実測結果の波形を再現できていると考えられる。以後この近似波形を使用したモデル（以下「簡易モデル」という。）により検討を行う。

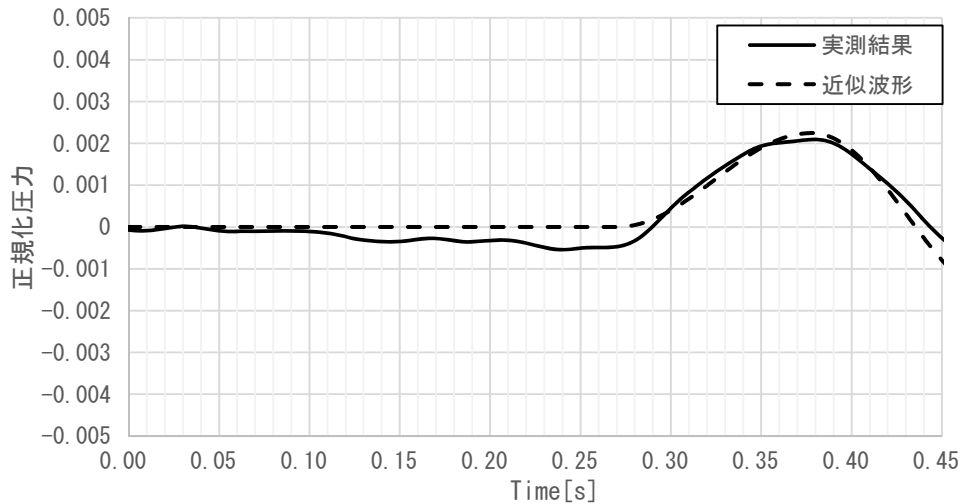


図-3.2.5 迂回波も考慮した圧力波と横坑通過時の圧力測定結果（大気圧で正規化）

なお、直達波の振幅 Δp_d については福田ら⁷⁾は式(3-5)に示すとおり列車・本坑断面積比 $R_t (= A_t/A_{tun})$ と横坑・本坑断面積比 $R_b (= A_b/A_{tun})$ で算出できるとしている。なお、列車先頭部前後における圧力の変化量 Δp_{tr} は式(3-6)に示すとおりである⁷⁾。

$$\Delta p_d = \Delta p_{tr} \frac{(1 - R_t)^2 4 + 8R_t - 2R_b - 5R_t R_b}{(2 - R_t) 4} \quad (3-5)$$

$$\Delta p_{tr} = \frac{1}{2} \rho_0 V^2 \frac{(2 - R_t) R_t}{(1 - R_t)^2} \quad (3-6)$$

ここで ρ_0 は空気密度（ 1.293 kg/m^3 ）， V は列車速度（ m/s ）を示す。式(3-5)および式(3-6)より枝坑通過波の大きさ Δp_d は R_t および R_b の高次のオーダーを無視すると式(3-7)のとおりとなる。

$$\Delta p_d = \frac{1}{2} \rho_0 V^2 R_t R_b \left(1 + 2R_t - \frac{R_b}{2} \right) \quad (3-7)$$

一方、迂回波の振幅 Δp_b については同じく福田ら⁷⁾により示されている、列車先頭部が枝坑の設置部を通過した直後の状態における連続の式、ベルヌーイの式、平面音波の関係式より ρ_0 、 V 、 R_t 、 R_b を用いて求める。

また、小澤ら⁸⁾は枝坑が設置されている部分を平面音波が通過するときの通過前の圧力波形 $\Delta p_1(t)$ と通過後の圧力波形 $\Delta p_2(t)$ の関係を式(3-8)のとおり示している。右辺第1項は枝坑通過後の圧力波、第2項は枝坑内に入射され枝坑端部で1回反射し本坑内へ伝播する圧力波であり、第3項は2回反射し本坑内へ伝播する圧力波である。このため式(3-8)に示す右辺第2

項と第3項の係数の比 $\frac{2-R_b}{2+R_b}$ は圧力波が枝坑内を一往復した後の圧力の減衰率を表し、本坑

断面積 ($A_{tun}=74\text{m}^2$) に対して横坑の断面積が ($A_b=20\text{m}^2$) であることをもとに減衰率を計算すると約0.76倍となる。

$$\begin{aligned} \Delta p_2(t) = & \frac{2}{2+R_b} \Delta p_1(t) + \frac{2}{(2+R_b)^2} \Delta p_1(t-2t_b) - \frac{2}{(2+R_b)^2} \frac{2-R_b}{2+R_b} \Delta p_1(t-4t_b) \\ & + \frac{2}{(2+R_b)^2} \left(\frac{2-R_b}{2+R_b}\right)^2 \Delta p_1(t-6t_b) - \dots \end{aligned} \quad (3-8)$$

ここで t_b は圧力波が枝坑と本坑の分岐部から枝坑端へ到達するまでの時間を示しており、 $t_b = L_b/c$ である。

式(3-3)、式(3-4)より求めた直達波、迂回波それぞれの波形を各々の圧力値の絶対値の最大値（すなわち Δp_d 、 Δp_b ）で正規化したものを図-3.2.6に示す。迂回波が横坑内を往復することによる時間遅れ $2L_b/c$ は先述した開口端補正を考慮して求めると0.105秒程度となる。直達波は圧力上昇した後に一定の圧力上昇量を保っているのに対し、迂回波は横坑内を一往復する度に位相が逆転しかつ先述の減衰率によって振幅が小さくなっていく。

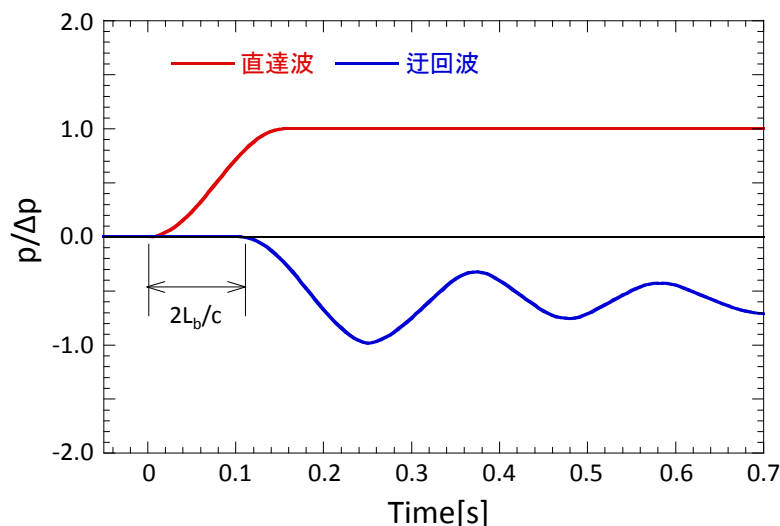


図-3.2.6 横坑通過時に発生する直達波・迂回波の近似波形（各々 Δp_d 、 Δp_b で正規化）

列車が分岐断面を通過する際に発生する圧力波に、横坑通過時に発生し音速で伝播する迂回波をうまく重畳させるためには横坑を分岐断面より手前側に設置する必要がある。しかしこの場合分岐区間の断面が拡大する部分に横坑が位置することになり、図-3.2.7（上）に示すように横坑からの圧力波は急収縮する分岐断面を通過する際に反射したり枝線側へ分岐し散逸してしまい効果が薄れる懸念がある。そこで、本線上で迂回波の減衰を抑えた伝播を実現するためさらに発展させ、横坑を分岐断面を挟んで2本設けそれらを本線に平行な有効の長さをもつ小坑で接続した図-3.2.7（下）のような迂回坑について考え、これを「並行トンネル」と呼ぶことにする。

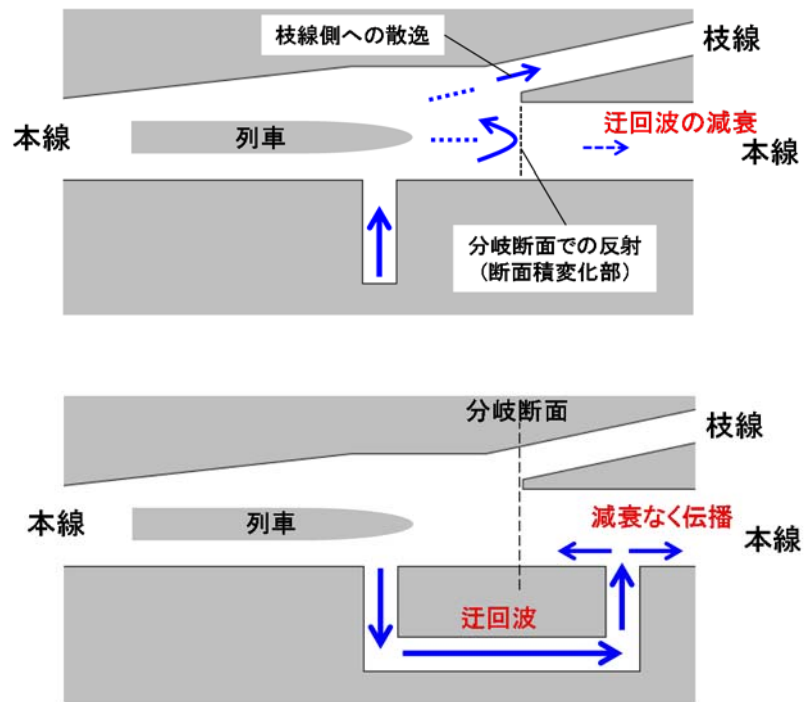


図-3.2.7 迂回波の減衰の観点からの改善策（上：横坑、下：並行トンネル）

3.2.3 並行トンネルの概要

並行トンネルの基本的な形状を図-3.2.8に示す。並行トンネルは本坑に並行な有限な長さを持つトンネルでありその両端において本坑と横坑（長さ L_c ）で接続される。本坑と並行トンネルを接続するという意味でこの横坑を「連絡坑」と呼ぶ。

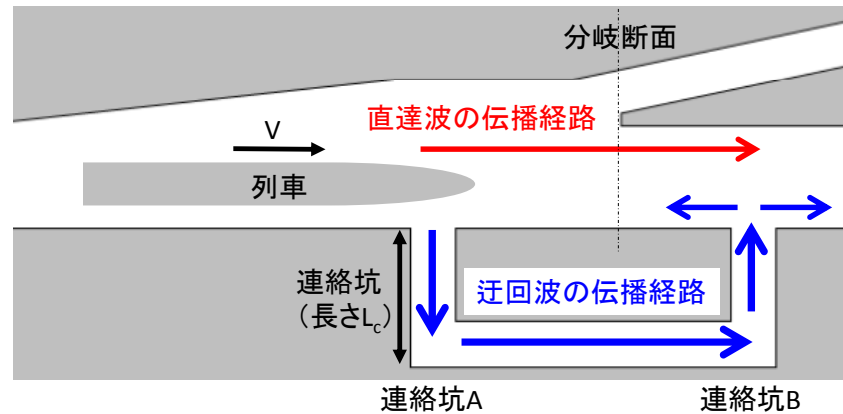


図-3.2.8 トンネル分岐部に設置した並行トンネルの概念図

基本的な並行トンネルは図-3.2.8に示すような一対の連絡坑からなり、列車から見て手前側を「連絡坑A」、奥側を「連絡坑B」と称することにする。各連絡坑の本数は状況に応じて増加させる場合があるがこれについては後述する。

連絡坑を列車が通過した際に生じる現象は基本的に前節の横坑通過時と同じであるが並行トンネルを経由する点が異なる。まず図-3.2.8のように連絡坑Aを列車が通過すると前節で説明した横坑の場合と同様に本坑には正圧の直達波が、連絡坑には負圧の迂回波が発生する。迂回波は連絡坑Aの末端に達すると並行トンネルを経由し連絡坑Bを通過して本坑に戻る。したがって連絡坑Aと連絡坑Bの間に分岐断面が位置するように設置すれば分岐断面での断面収縮の影響を受けずに連絡坑Bから圧力波を本坑へ放射させることができる。列車が連絡坑を通過する際には直達波・迂回波の波形や振幅は前節の横坑のみの場合と同等であり、並行トンネルを経由しても直達波に対する迂回波の時間遅れ Δt_d は横坑の場合と同様に $2L_c/c$ となる。

前節で述べたとおり直達波・迂回波の振幅は連絡坑の断面積に依存する。したがって、図-3.2.1で示した重畳波を所定の大きさにするには連絡坑の断面積を大きくしなければならない場合がある。しかし、あまり大きくし過ぎてしまうと建設コストが高くなるうえに列車が連絡坑を通過する際に生じる近傍圧力場の変動が大きくなり車体動揺など別の空力的問題を生じさせてしまう懸念があるので連絡坑を複数の連絡坑に分散させる。連絡坑同士が近接していればそれぞれの連絡坑から発生した直達波・迂回波が重ね合わせによって一つのパルス波となるため波形を保ったまま振幅を大きくすることが可能となる。

連絡坑を分散させた並行トンネルを分岐部に設置すると概念的に図-3.2.9に示すようになる。この例では連絡坑をそれぞれ3つに分散させている。並行トンネルの設計パラメータとしては連絡坑の長さ L_c と断面積 A_c 、分岐断面に対する連絡坑A1の設置位置 L_A 、連絡坑B3

の設置距離 L_B ，隣接する連絡坑の間隔 l がある．

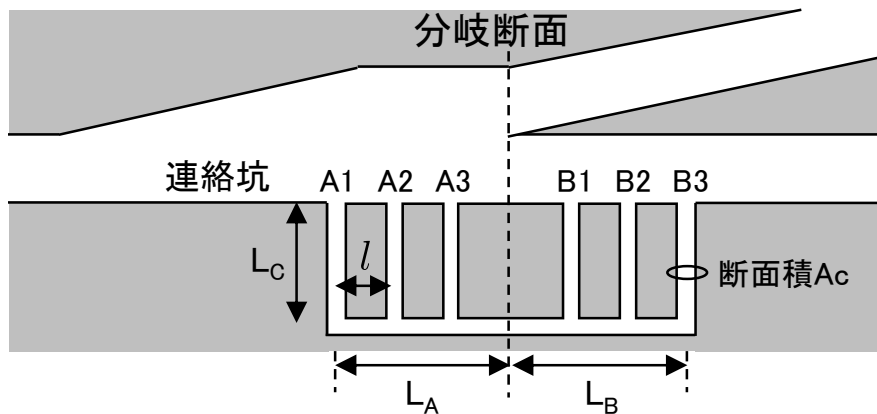


図-3.2.9 分岐部に設置した並行トンネルの概念図

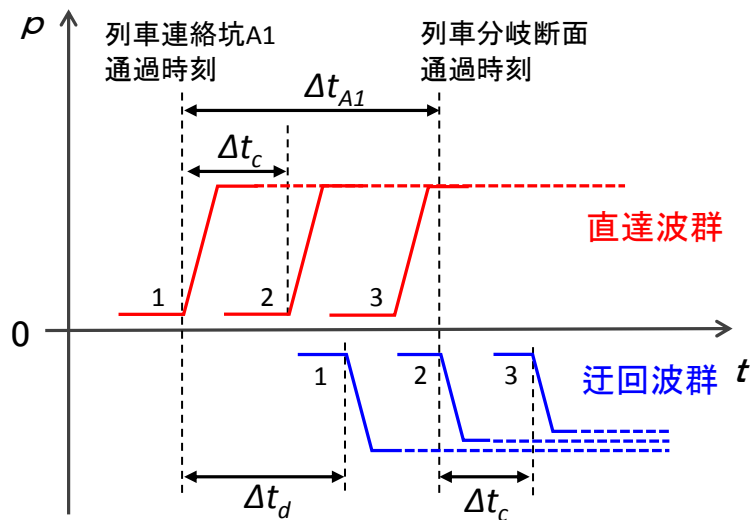


図-3.2.10 直達波・迂回波の時間間隔

図-3.2.9に示す並行トンネルからは図-3.2.10に示すような時間間隔で直達波・迂回波が発生する．列車が連絡坑A1を通過時に正圧の直達波1が発生し Δt_d の時間差で連絡坑B1から負圧の迂回波が発生する．列車が連絡坑B群を通過する際に発生する圧力波は圧縮波が形成された後に発生するため分岐部対策として寄与しないのでここでは考慮しない．直達波と迂回波の時間差 Δt_d は前述の通り $2L_C/c$ である．また，隣接する連絡坑からの直達波・迂回波の時間間隔 Δt_c は列車が連絡坑の間を移動する時間であり連絡坑間隔を l ，列車速度を V とすると式(3-9)で表される．

$$\Delta t_c = \frac{l}{V} - \frac{l}{c} = \{(c - V)/cV\}l \quad (3-9)$$

連絡坑を分散しても Δt_c が小さければ各連絡坑から放出される直達波・迂回波は重ね合わ

せにより一つのパルス波となりこれら一体化したパルス波の時間差も Δt_d となる。最初の直達波の圧力が上昇し始めるのは列車先端が最初の連絡坑A1に達した時刻であり圧縮波の圧力勾配が最大となるのは列車先頭中心部が分岐断面を通過する時刻である。この時間差 Δt_{A1} は式(3-10)で表される。

$$\Delta t_{A1} = \{(c - V)/cV\}L_A + (L_t/2)/V \quad (3-10)$$

次節で述べるように所定の重畳波が発生するようこれらの時間幅を決めることにより並行トンネルの諸元が求まることになる。

3.2.4 並行トンネルの諸元の決定

図-3.2.1 で示した重畳波を生じさせるような並行トンネルの諸元を決定する。まず、直達波の立ち上がりを重畳波の立ち上がり時刻と合わせる。図-3.2.1 に示す分岐部通過による圧縮波の場合、分岐断面通過時刻は圧力勾配が最大となる時刻だから図-3.2.1 中段より時刻約 0.74 秒であることがわかる。一方、重畳波が立ち上がり始める時刻は図-3.2.1 下段より約 0.54 秒となる。この差は $\Delta t_{A1}=0.20$ 秒であるので、式(3-10)より $L_A\sim 34\text{m}$ となるため、ここでは分岐断面から最初の連絡坑 A1 までの距離 $L_A=30\text{m}$ と設定する。

次に、直達波と迂回波の時間差 Δt_d は図-3.2.1 下段の重畳波の正のパルス波のピーク時刻 0.69 秒と負のピーク時刻 0.82 秒との時刻差 0.13 秒となる。よって、 $\Delta t_d = 2L_c/c\sim 0.13[\text{s}]$ より $L_c\sim 22\text{m}$ となるので連絡坑長さを $L_c=20\text{m}$ とする。

連絡坑間隔 l の値は明確な基準はないが、大きくし過ぎると各連絡坑からの直達波・迂回波の時間差が開きすぎるため重ね合わせによる振幅増幅の効果が得られにくくなる。ここでは図-3.2.6 に示した横坑における圧縮波波面の時間幅約 0.1 秒の半分である 0.05 秒を Δt_c とする。すると式(3-9)より $l\sim 12\text{m}$ となるので連絡坑間隔は $l=10\text{m}$ と設定する。

これらの諸元をもとに並行トンネルによって生成される圧力波を(2)節と同様に近似波形で再現することができる。なお、近似波形による簡易モデルにおいて並行トンネル内の迂回波の反射については、第 4 章の並行トンネルの効果の感度分析の節で後述するとおり連絡坑と並行トンネルの直角の接続部での圧力波の反射の影響は小さいと考えられるため考慮しない。ただし、連絡坑から本坑に戻る迂回波の一部が本坑との境界面で開口端反射し、反射した迂回波が並行トンネルを通過して他の連絡坑へ回り本坑に戻る影響は考慮に入れて、これらの迂回波を合成した計算を行った。その結果を図-3.2.11 に示す。連続した 3 つの連絡坑からの直達波・迂回波（図中の赤・青の破線）が重ね合わせによって一つのパルス状の圧力波（図中の赤・青の実線）となっていることがわかる。そして直達波・迂回波が重畳して最終的な重畳波（図中の黒線）が形成される。このうち図中の黄色の四角内の重畳波の圧力波形は図-3.2.1 下段の重畳波に近い形状や同程度のタイムスケールとなっている。なおこれより後の波形は列車が分岐部を通過した後の波形であるため検討から除外しても差し支えない。3 本に分散させた連絡坑による圧力波の振幅が単体の連絡坑の場合の約 2.3 倍になっていることが分かったので連絡坑の断面積を求めることが可能となる。図-3.2.1 下段に示すとおり重畳波に必要な振幅は大気圧の 1%程度であったので、式(3-7)にて連絡坑断面積を算出する。枝坑通過波の大きさ Δp_d は重複波に必要な振幅である大気圧の 1%程度であるが 3 本に分散させた連絡坑による圧力波の振幅は図-3.2.11 に示すとおり単体の連絡坑の場合の約 2.3 倍となるため、単体（1 本）の連絡坑に必要な圧力波の振幅は大気圧の 0.44%程度である。列車断面積は 8.9m^2 、本坑断面積は 74m^2 であることから式(3-7)より枝坑断面積 A_c を求めると $A_c\sim 19.3\text{m}^2$ となるため 20m^2 に設定する。なお、並行トンネルの断面積は施工を効率的に実施するため連絡坑の断面積と同じ 20m^2 とする。

また、図-3.2.11 に示す迂回波群（青破線）を見ると列車が 1 本目の連絡坑 A1 を通過したときに発生する迂回波が様々な経路で連絡坑を通過し最終的に合成した迂回波の波形（図中の青破線の A1）と比較して 2 本目（連絡坑 A2）、3 本目（連絡坑 A3）と後の連絡坑に

なるにつれてそれぞれ合成した迂回波の波形（図中の青破線の A2, A3）では波長が長くなっている。これは簡易モデルで考慮に入れた迂回波の開口端反射後の経路が影響しており、2 本目の連絡坑 A2 以降では迂回波が並行トンネルとの接続部で左右へ分岐するケースが増えることにより本坑へ戻るまでの時間差が大きい迂回波が増加するためと推察される。すなわち、連絡坑を 3 対（6 本）とした方が連絡坑が 1 対（2 本）の場合よりも迂回波の波長が長くなり負の圧力勾配が作用する時間を長くすることができる。したがって、連絡坑を 3 対（6 本）とすることで超高速列車が分岐断面を通過する際に発生する圧縮波の圧力勾配の低減に対して時間的な重畳のカバーがしやすく冗長性が高いと考えられる。

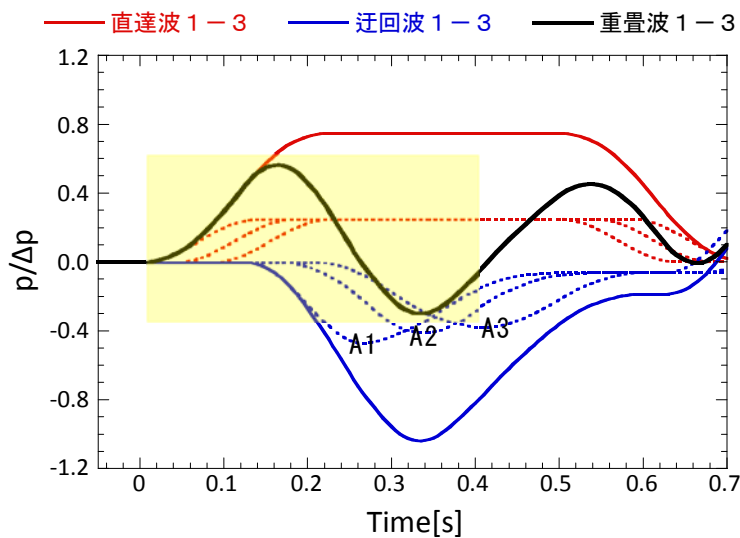


図-3.2.11 近似波形による直達波・迂回波およびそれらが重畳した波形

以上，求められた並行トンネルの諸元を表-3.2.1 にまとめる。

表-3.2.1 並行トンネルの諸元

各種諸元		値
L_A	連絡坑 A1 から分岐断面距離	30m
L_c	連絡坑長さ	20m
l	連絡坑間隔	10m
A_c	連絡坑断面積	20m ²

3.2.5 並行トンネル列車通過時に発生する圧力波の検証

並行トンネルを分岐部に設置した効果について調べる前に並行トンネルだけを設置した分岐区間がない本坑を想定し，前節で求めた諸元の並行トンネルを列車が通過した際に想定した図-3.2.1 下段に示す重畳波が生成されるかどうかを数値解析によって検証する。

(1) 数値流体解析の手法

支配方程式は 3 次元圧縮性粘性流体方程式でありこれを有限差分法で離散化して解く。流れ場は一般座標系によって離散化を行うが，並行トンネルに対して列車が相対的に移動する流れ場となるため移動する列車まわりと静止しているトンネル等に解析領域を分割して計算する領域分割法を用いる。これらの解析手法は Ogawa and Fujii らによる方法⁹⁾に準ずる。なお，解析の詳細は 2.2.2(2)節に記載の通りである。

図-3.2.12 に計算格子を示す。計算領域はトンネル領域，並行トンネル領域，列車まわりの領域に分割し総格子点数は 143×10^6 点である。格子の大きさおよび解析上の時間刻みは 2.3.2(4)節に示すものと同じである。並行トンネルの中心位置を原点とし，時速 500km で並行トンネルを通過する。列車は現在山梨実験線で走行する 3 両編成の車両（全長約 80m）とし，複線の線路のうち図-3.2.12 のように並行トンネルから遠い側の線路を走行させる。

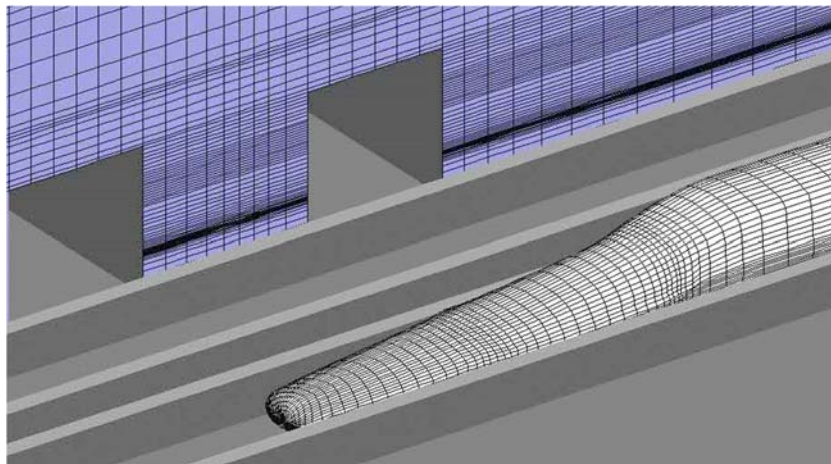


図-3.2.12 並行トンネルと列車まわりの計算格子

(2) 数値流体解析の結果

列車が並行トンネルを通過した際に発生する圧力波の発生源と伝播経路を考察するため，並行トンネルがない場合と並行トンネルがある場合の圧力コンターをそれぞれ列車の通過時間ごとに左右に並べ図-3.2.13(1)，(2)に示す。図-3.2.13 の圧力コンターの色は赤が高い圧力の領域を示し橙，黄，黄緑（圧力値 0），青，群青となるにつれて低い圧力の領域となる。並行トンネルは負圧の膨張波が通過する様子が分かりやすくなるように背景を黒色としている。列車先頭部が分岐断面を通過する時刻を 0 秒としており大気圧で正規化している。

列車は分岐方向（紙面上で左から右に向かう方向）に走行しており，列車走行に伴い列車先頭部は空気が圧縮されることで圧力が高くなり，列車先頭部の側方は空気の流れが速くな

ることで負圧の領域となっている。並行トンネルがある場合における、列車の先頭部が 2 本目の連絡坑を通過する(c)-0.11 秒のケースを見ると連絡坑と並行トンネル内に負圧が伝播していることが分かる。さらに列車が進み分岐断面を通過する(d)0 秒のケースでは負圧の絶対値が増大しており、列車が連絡坑を通過するごとに負圧が連絡坑を通じ並行トンネルを通過して 6 本目（図中の一番右）の連絡坑にまで到達していることが分かる。

列車が分岐部を通過した直後の(e)0.12 秒のケースでは、並行トンネルの有無にかかわらず列車先頭部の圧力が(d)0 秒のケースよりも急に大きくなっておりこれは分岐部通過時に新たに発生する圧縮波を表すものと考えられる。

ここで列車が断面変化部を通過した後の列車前方の圧力値とその時間的变化に注目する。例えば(f)0.23 秒のケースにおける並行トンネルなしの場合では並行トンネルありの場合に比べて圧力が高くなっている区間が長い。また、(g)0.35 秒のケースでも同様のことが言え並行トンネルありの場合は本線の右端の圧力が橙色を示し並行トンネルなしと比べると圧力が高くなりきっていない。いずれの場合も(h)0.46 秒のケースでは列車前方の圧力は赤色のコンターであり並行トンネルの有無にかかわらず同じレベルに高くなる。これから推測できることは列車が断面変化部を通過した後に列車前方のある地点に着目した場合の圧力上昇の過程、すなわちコンター色の変化の速さであり前章の式(2-14)という分岐前方のある地点における圧力勾配 $\partial p/\partial t$ は並行トンネルがない場合より並行トンネルがある場合の方が緩やかになっており、図-3.2.1 上段に実線で示した並行トンネルがない場合の圧力上昇に対して同図に破線で示した直線的波面に近づくので並行トンネルの設置で圧力上昇が緩くなっていることが再現されたものと考えられる。すなわち、並行トンネルの設置によって分岐前方の地点における圧縮波の圧力勾配が緩和されることがわかった。

なお、列車が分岐断面を通過した(e)0.12 秒のケース以降は並行トンネルの有無にかかわらず枝線側に大きな膨張波が伝播しているが、膨張波は伝播とともに圧力勾配がなだらかになっていく特性があるため枝線坑口での微気圧波は問題にならないと考えられる。

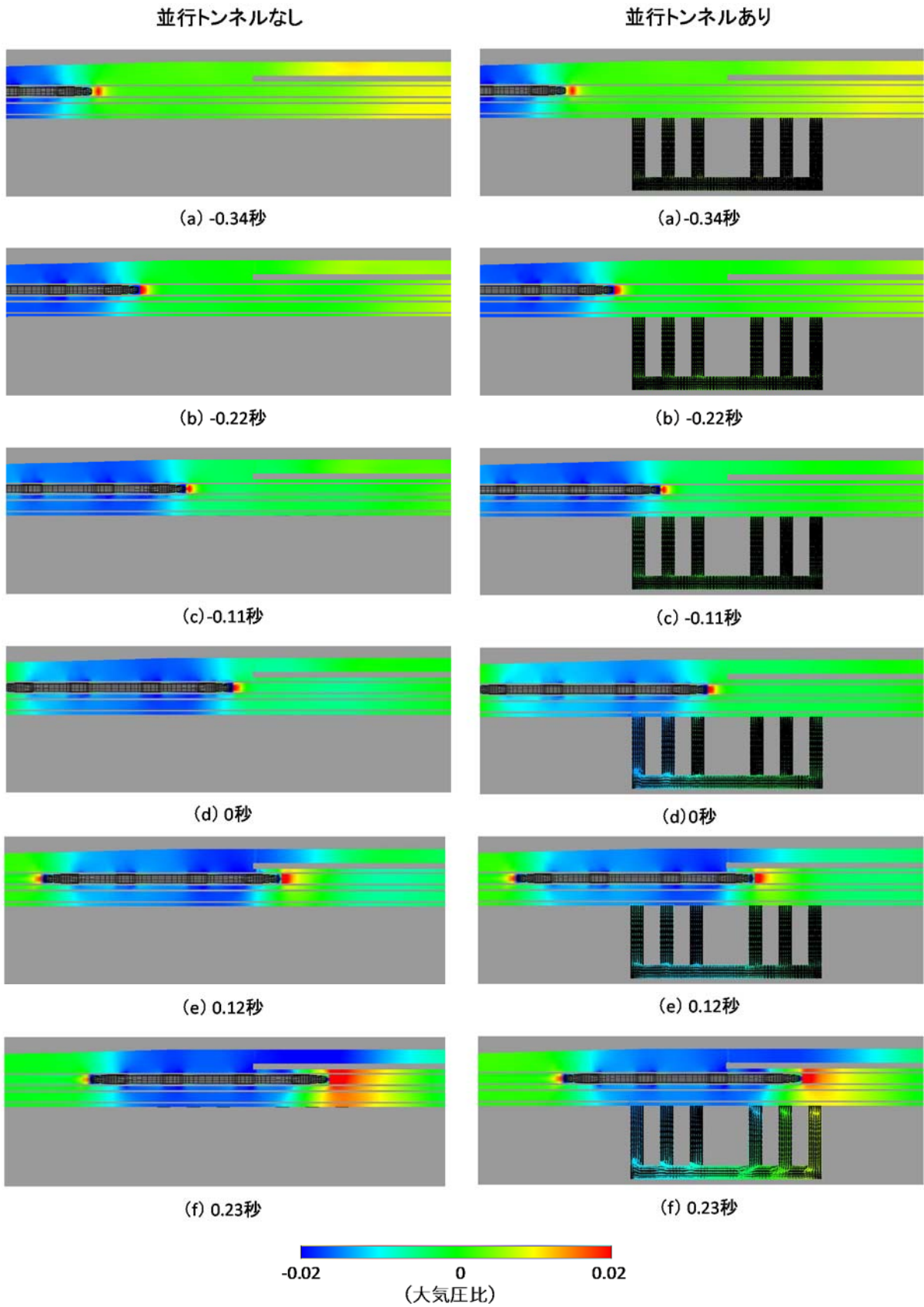


図-3.2.13(1) 並行トンネル通過前後の圧力コンター

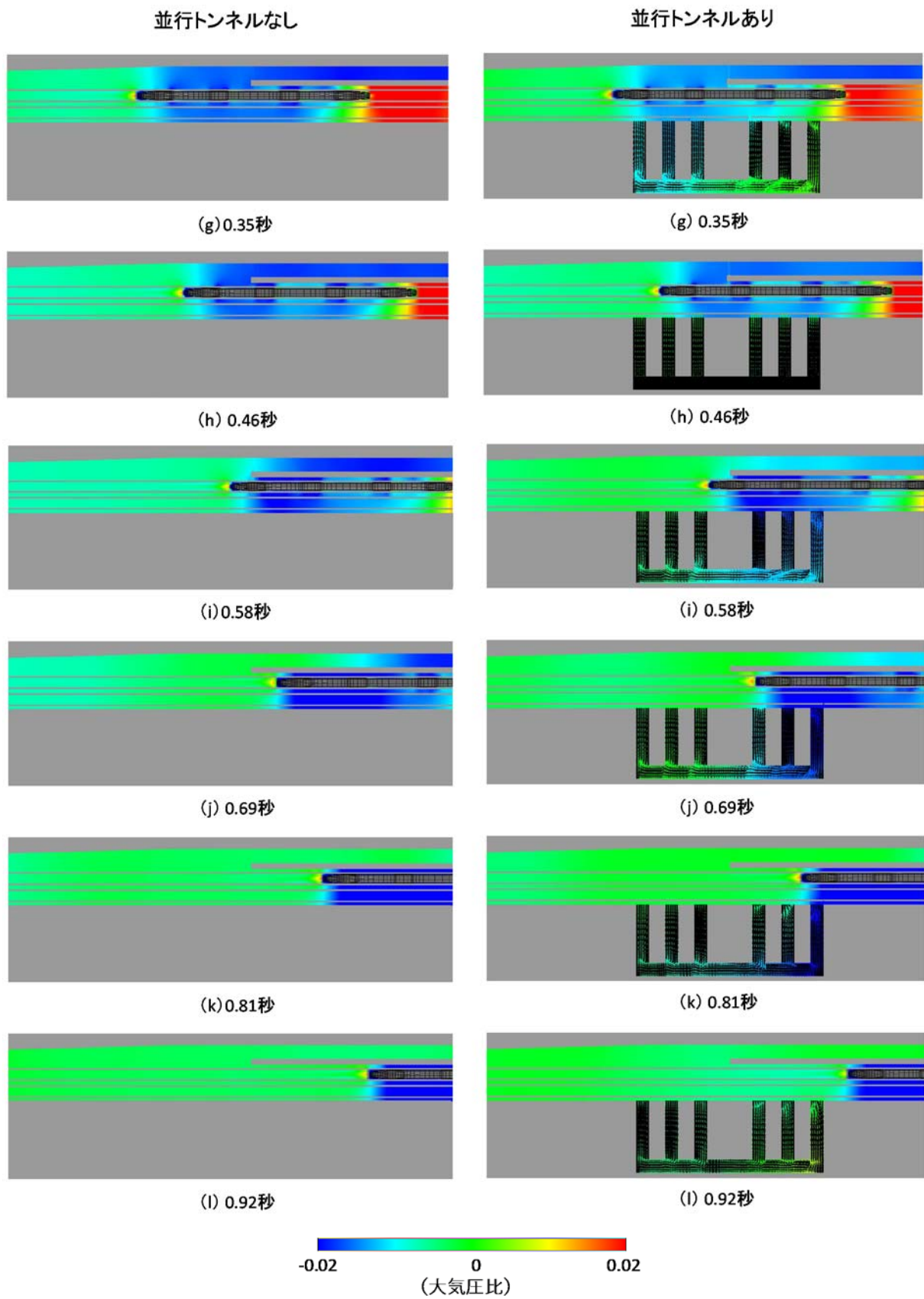


図-3.2.13(2) 並行トンネル通過前後の圧力コンター

次に、圧力の伝播性状を詳細に検討するため図-3.2.13 に示したコンターをトンネル本坑天頂部に沿って時空間平面上で示したものを図-3.2.14 に示す。なお、図-3.2.14 は横軸が本坑に沿った距離、縦軸が時間であり列車進行方向に伝播する圧力波は右斜め上方向に沿った圧力分布として表示している。

列車側部は流路が狭くなるため圧力が降下し低圧力領域が列車走行速度で移動する。また、列車まわりの流れによる圧力損失の分だけ列車後方は前方よりも圧力が低くなっている。図-3.2.14 に示すとおり並行トンネルの最も手前にある連絡坑 A1 を列車が通過する $t = -0.15$ 秒付近でトンネル本坑内に直達波が発生し進行方向と反対方向の両方にはほぼ音速で伝播する。並行トンネル手前側にある 3 連の連絡坑から放射される 3 つの直達波が重ね合わさって 1 つの正圧波となって伝播している様子が見られる。直達波の発生と同時に迂回波が連絡坑内を伝播し最初の直達波から連絡坑を 1 往復伝播する時間約 0.12 秒だけ遅れて列車進行方向に音速で伝播する負の圧力波が見られる。迂回波も直達波と同様に 3 つの連絡坑それぞれで発生した迂回波の重ね合わせで 1 つの負圧波として観察される。

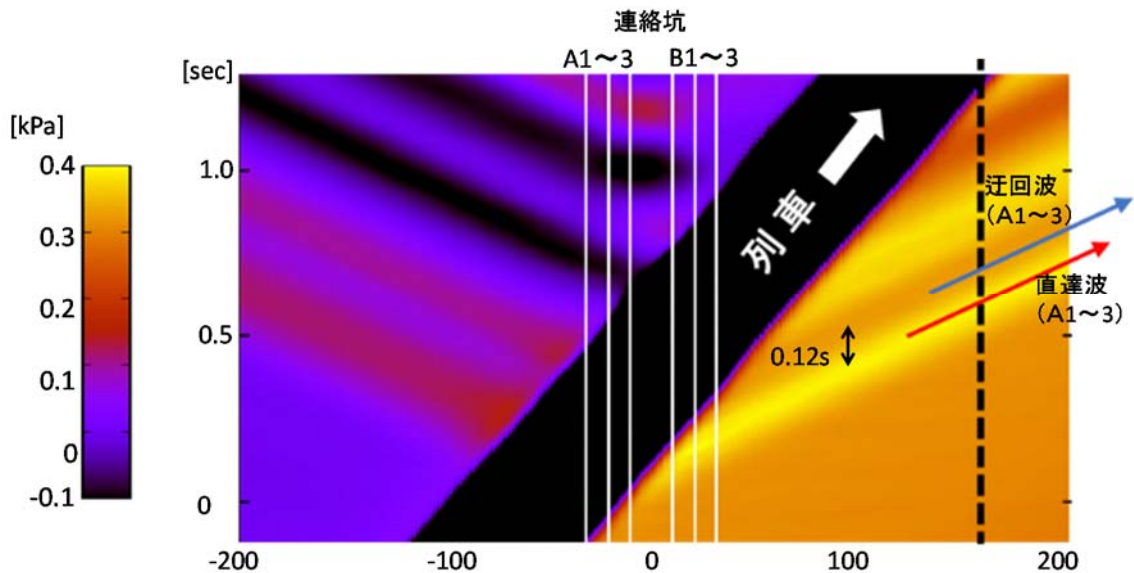


図-3.2.14 本坑天頂部圧力変動の時空間変動

上記の 3 次元流体解析によって得られた本坑内を列車進行方向に伝播する直達波・迂回波の波形を図-3.2.15 に示す。振幅は直達波に相当する最初の正圧のピーク値で正規化している。列車の近傍圧力場と重ならないよう並行トンネルの中心から列車進行方向に 350m 離れた地点での圧力時間履歴をプロットし連絡坑 A1 からの直達波の立ち上がり時刻を 0 秒としている。まず最初に列車先頭部が連絡坑 A1~A3 を通過した際に生じる直達波群による正圧のピークが 0.17 秒付近で観察される。その後、同じく連絡坑 A1~A3 から発生する迂回波群が $2L_c/c=0.12$ 秒遅れて到達するため 0.3 秒付近で負圧のピークとなる。正圧に続いて圧力が降下するこの圧力波形を重畳波として利用する。その後 0.3 秒付近から再び圧力が上昇するがこれは連絡坑 B1~B3 を列車が通過することによって生じた直達波群によるものである。これ以降の迂回波は分岐部の圧縮波波面が過ぎ去った時点で本線の圧力に重畳するので

圧力勾配の緩和には寄与しない。

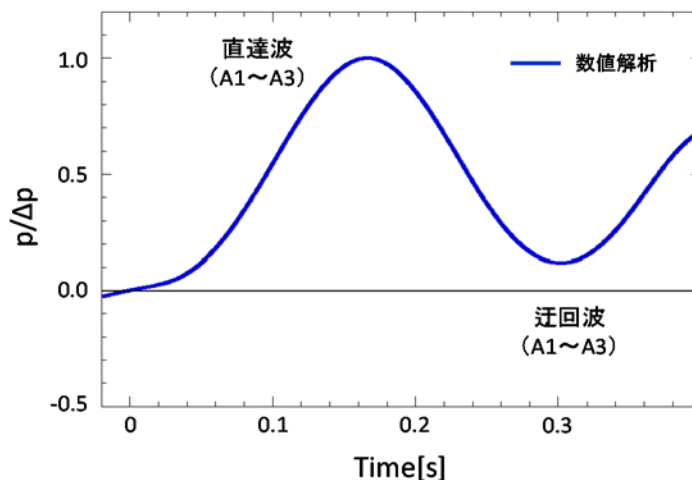


図-3.2.15 3次元数値解析による本坑内を伝播する圧力波形

図-3.2.15の重畳波は図-3.2.11に示した簡易モデルによる近似波形と異なり、0.3秒付近の圧力降下が小さく負圧になっていない。これは前方の連絡坑B1～B3を通過することで発生する直達波の正圧が重複しているためであると考えられる。なお、近似波形はこの直達波を考慮していなかったためこれを考慮に入れて重畳波の近似波形を再計算したものを図-3.2.16に示す。連絡坑B1～B3で発生した重畳波は直達波により0.36秒付近で正のピークとなりその後は迂回波が重なることで負の勾配となっている。これらが合成された重畳波は連絡坑A1～A3で発生した重畳波の直達波の影響により先述のとおり0.17秒付近で正のピークとなりその後は迂回波が重なることで負の勾配となるが、連絡坑B1～B3で発生した重畳波の直達波が重なることで0.3秒付近で負のピークとなつてその後は圧力が上昇する。

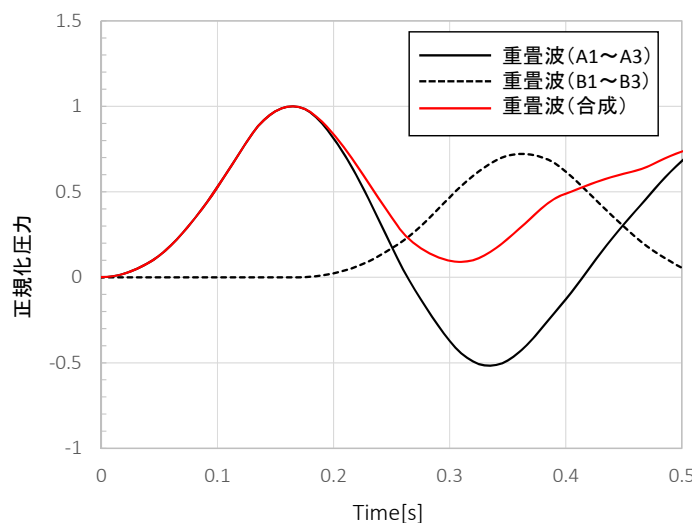


図-3.2.16 連絡坑B1～B3通過による直達波を考慮に入れた重畳波の近似波形

数値解析の結果（図-3.2.15）と連絡坑B1～B3通過による直達波を考慮に入れた簡易モデルによる結果（図-3.2.16）とを比較した波形が図-3.2.17である。両者は数値的にも一致しており負圧が生じない理由が連絡坑B1～B3の影響を考慮していないことであると確認できる。

以上のことから、想定した重畳波が並行トンネルによって生成されることが確認できたと言える。

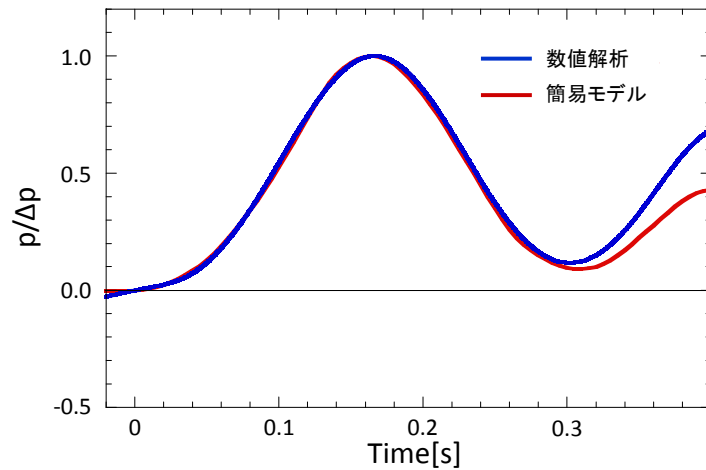


図-3.2.17 数値解析結果と連絡坑B1～B3通過による直達波を考慮した簡易モデルの結果の比較

3.3 並行トンネルによる圧縮波波面低減効果の検証

前節で諸元を決定した並行トンネルの模型を実際に分岐部に設置し列車が通過する際の流れ場を実験で再現して並行トンネルの効果を検証する。模型実験装置は2.2.2(1)節で説明したものと同一であり分岐部の模型に連絡坑を接続して並行トンネルを設置する。外観を図-3.3.1に示す。

並行トンネル設置時の分岐部を列車が通過した際に分岐順方向で観測された圧力変動を図-3.3.2に示す。比較のため同図には並行トンネルがない場合の結果も合わせてプロットした。まず図-3.3.2上段の圧力波形を見ると分岐区間で断面が拡大する部分の影響で圧力は減少して並行トンネルがない場合は0.6秒過ぎまで降下していることがわかる。一方、並行トンネルを設置すると0.5秒付近から圧力降下が緩和し0.6秒あたりから上昇に転ずる。その後の圧力上昇が圧縮波波面に相当するが、並行トンネルなしの場合は波面の時間幅が0.70秒から0.82秒まで $\Delta t_w=0.12$ 秒であったのに対して並行トンネル設置後の時間幅 $\Delta t'_w$ は0.7秒から0.9秒過ぎまでの0.2秒程度に拡大し圧力勾配が緩やかになっていることがわかる。

並行トンネル設置による圧力勾配の低減は図-3.3.2下段の圧力時間微分値を見ると定量的に把握できる。このグラフは並行トンネル設置前の圧力時間微分値の最大値で正規化しており、並行トンネル設置によって圧力勾配の最大値が約6割まで低減されていることがわかる。ただし、図-3.2.1中段に示したように設計上想定した約3割まで低減するには至らなかった。また、重畳波によって圧縮波波面が0.6秒から0.9秒の間で圧力時間微分値が一定になる想定であったが、図-3.3.2下段を見ると0.7秒以降は比較的一定になっているものの0.7秒より前では大きくは改善されていない。この原因は分岐区間に並行トンネルの連絡坑のA群が位置するためであると考えられる。前節では並行トンネルを通常の本坑に設置して直達波・迂回波を検討したが、実際には連絡坑A群は断面が拡大する分岐区間に設けられるため本坑断面積が広い分だけ連絡坑の開口の影響が相対的に小さくなって発生する直達波・迂回波も弱くなる可能性があると考えられる。

分岐部に設置された並行トンネルから放射された重畳波の波形を確認するため、図-3.3.2上段に示した並行トンネルあり・なしの圧力波形の差を図-3.3.3にプロットする。想定した重畳波である図-3.2.1下段の波形と比較すると両者は波形が似ていることに加えて0.7秒付近で直達波が到達し約0.12秒遅れて迂回波による圧力極小値が来るなど波のタイミングは数値的にも一致している。一方、振幅については前述のように分岐区間で断面の拡大する部分の影響があるため図-3.3.3に示す実際の重畳波では図-3.2.1下段の波形と比較して負圧のピーク値は設計上の想定より4割ほど強く正圧のピークは6割ほど弱くなっていることがわかる。

以上のことから、分岐区間での断面が拡大する区間の影響によって効果が弱められはするものの並行トンネルから放射される重畳波によって分岐部を通過する際の圧縮波の圧力勾配の最大値を6割程度まで低減することが可能であることがわかった。



図-3.3.1 並行トンネルを設置した分岐部の実験模型（外観図）

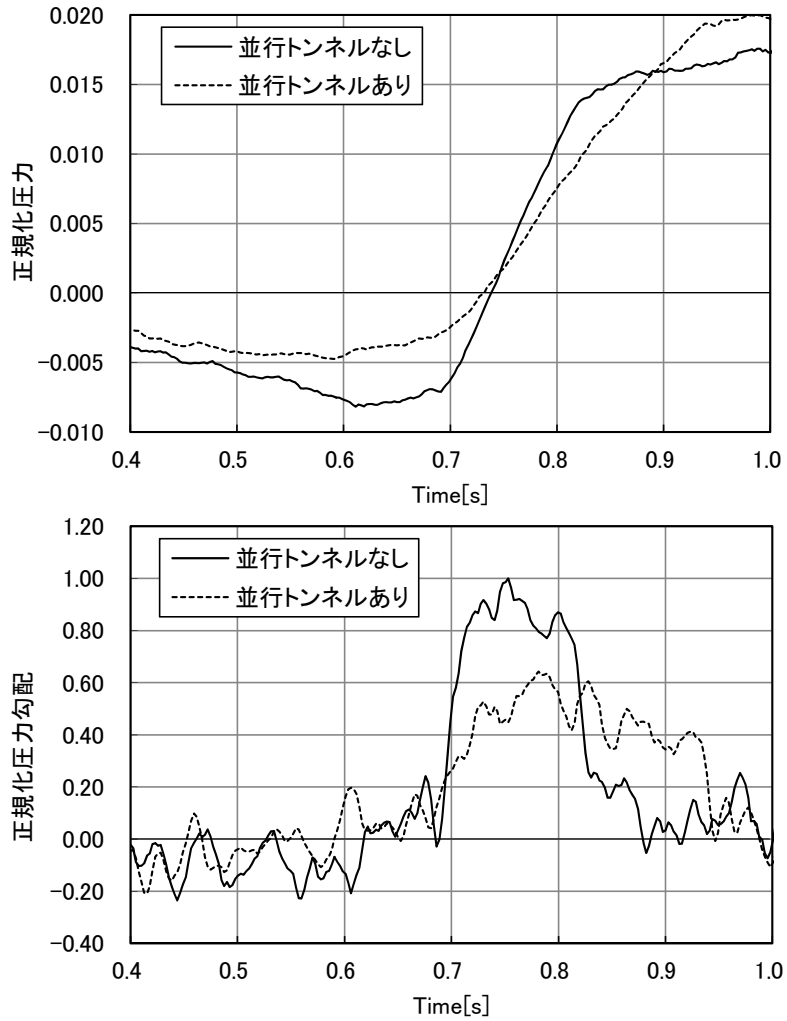


図-3.3.2 列車が分岐部を通過する際に観測される圧力波形（上段）
および圧力時間微分値（下段）

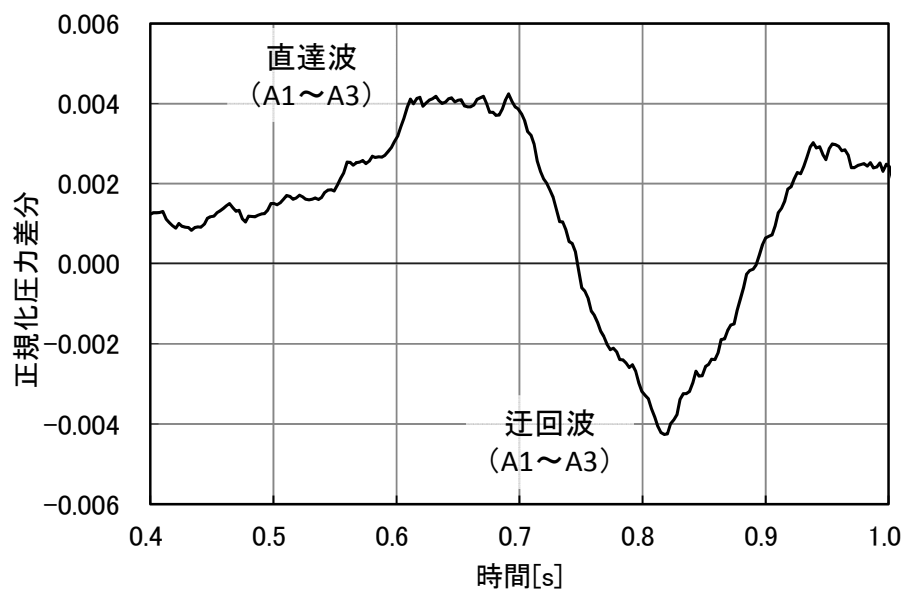


図-3.3.3 分岐区間を通過する際の圧力波形における並行トンネル有無の差

3.4 長距離伝播解析による本坑坑口での微気圧波低減効果の確認

本章で提案した並行トンネルによるトンネル坑口における微気圧波の低減効果を確認するために、列車が分岐区間を通過する際に発生する圧縮波をもとに並行トンネルを設置した場合と設置しない場合について一次元波動伝播解析を行って圧縮波が分岐区間から長距離伝播した場合のトンネル坑口（放射箇所）における微気圧波を予測する。列車が分岐区間を通過した際に発生する圧力波についてはそのまま長距離伝播解析のインプットデータとして用いやすいように 3次元 CFD 解析で求めた結果を模型試験結果との整合を確認したうえで用いている。3次元 CFD 解析および一次元波動伝播解析による予測方法の概要は 2.2.2(2)節に示したとおりである。なお、3次元 CFD 解析による並行トンネルありの場合の圧力波形（大気圧にて正規化）は図-3.4.1に示すとおりであり、圧力勾配の最大値は並行トンネルなしの場合（図-2.3.17）と比較して 70%に低減していることが確認でき、模型実験の場合の低減結果である 64%と概ね同程度の低減を確認できた。

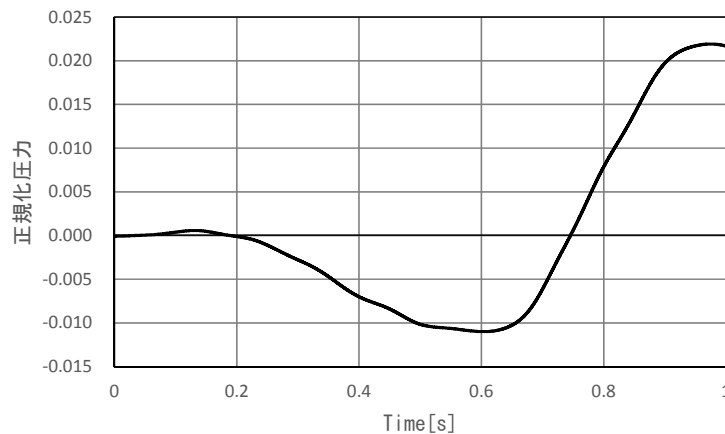
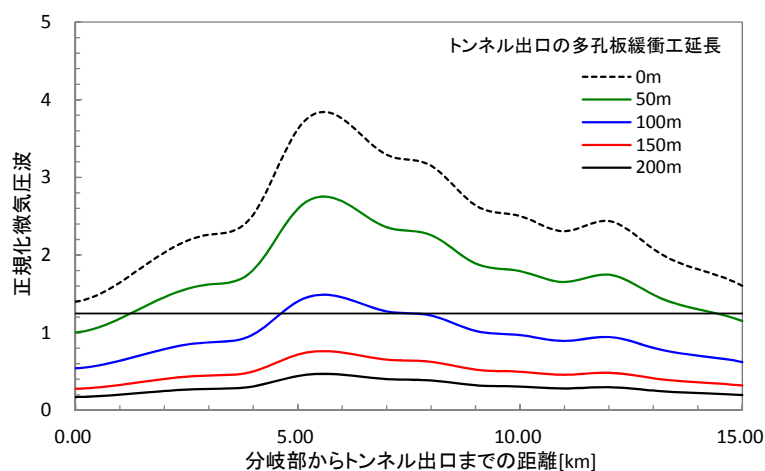


図-3.4.1 並行トンネルありの場合の圧力波形（3次元 CFD 解析）

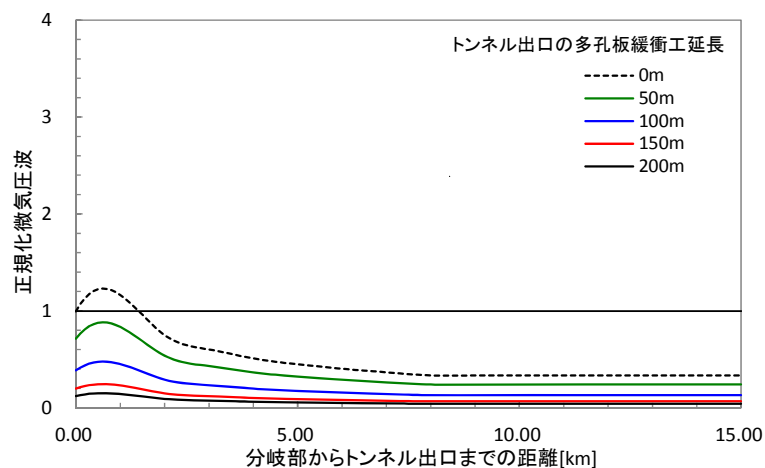
次に、図-3.4.1の圧力波形をインプットとして一次元波動伝播解析を実施した。第2章で述べたとおり、列車が高速で分岐区間を通過した際に発生する圧縮波が分岐区間から伝播するにしたがって圧縮波の非線形効果による切り立ちや減衰によって圧力勾配が変化するのを模擬している。分岐区間からトンネル出口までの距離をパラメーターとしてトンネル出口の多孔板緩衝工の延長がそれぞれ 0m, 50m, 100m, 150m, 200m の各ケースについて出口坑口における微気圧波を算出した結果を図-3.4.2に示す。なお、微気圧波は基準値である 20m 地点の 50Pa で除して正規化している。図-3.4.2(a)は分岐区間の微気圧波低減対策なし、すなわち並行トンネルを設置しない場合の結果を示しているが、多孔板緩衝工のどの延長の場合でもトンネル内の伝播につれて分岐部からトンネル出口までの距離が 6km 前後で微気圧波が最大となっている。また多孔板緩衝工の延長が長くなるほど微気圧波は小さくなっていることがわかる。多孔板緩衝工の延長が 100m 以下の場合では分岐部とトンネル出口との距離によっては微気圧波が基準値を超過する可能性があることがわかった。

図-3.4.2(b)は分岐区間に微気圧波低減対策（並行トンネル）を施した場合の微気圧波の結果を示している。分岐区間の微気圧波低減対策によって前述のとおりトンネル伝播開始時の

初期圧力勾配が3割程度抑えられることで伝播過程での微気圧波は対策がない場合に比べて大きく低減し、多孔板緩衝工の延長が0mのケース（すなわちトンネル出口に多孔板緩衝工を設置しなかった場合）を除いて分岐区間からトンネル出口までの距離にかかわらず基準値を下回っており本田¹⁰⁾がトンネル突入時に発生する圧縮波を対象として提案した標準的な150mの延長以上の多孔板緩衝工を設置すれば基準値を大きく下回ることが確認できた。また、分岐区間から微気圧波が最大値を迎える位置までの伝播距離も初期圧力勾配が抑えられたことにより1km前後と小さくなった。営業線において標準的な多孔板緩衝工の延長の確保がトンネル坑口付近の空間制約などにより困難な場合にも並行トンネルは効果を発揮すると期待される。



(a) 分岐区間の微気圧波対策なし（並行トンネルなし）の場合



(b) 分岐区間に微気圧波対策あり（並行トンネルあり）の場合

図-3.4.2 トンネル出口の多孔板緩衝工の延長の各ケース（0～200m）における分岐部からトンネル出口までの距離と微気圧波の関係（基準値で正規化）

3.5 まとめ

超高速列車がトンネル分岐部を通過する際に発生する圧縮波による微気圧波の低減対策として、本坑に並行して有限の長さをもつ小断面のトンネルおよびこれと本坑を連絡する小断面の連絡坑とから構成される「並行トンネル」を提案した。多孔板緩衝工が列車がトンネルに突入する際に生じる圧縮波波面を生成過程で緩和させる従来型の対策であったが、並行トンネルはトンネル内部に設置してこの箇所を超高速列車が通過する際に発生する正圧と負圧の圧力波を列車が分岐断面を通過する際に発生する圧縮波に重畳させて圧力勾配を緩和させるというまったく新たな原理に基づく対策である。

並行トンネルによる対策の確立にあたり、まず前章で模型実験によって基本的性状を調査した列車がトンネル分岐区間を通過する際に発生する圧縮波を分析し、分岐区間で断面が拡大する区間を通過する際の圧力降下の後に分岐断面通過することによって波面の幅が 0.1 秒程度の圧縮波が生成されることがわかった。この圧縮波の波面をより広い時間スケールにわたって直線的に緩やかにさせる重畳波について検討したところ、正のパルス波に続いて波長が相対的に短い負のパルス波が続く波形を重畳波とすればよいことがわかった。

並行トンネルを列車が通過する際に発生する重畳波については正圧の直達波に続いて負圧の迂回波が連絡坑を往復する時間だけ遅れて伝播するという特性を近似的にモデル化した。そして並行トンネルだけを設置した分岐区間がない本坑を列車が通過する際の流れ場の数値解析を行い、並行トンネルを通過する際に生じる重畳波の 3 次元数値解析結果と近似モデルによる波形がよく一致することを確認した。またその過程で、重畳波の振幅を増幅させるために並行トンネルと本坑を接続する連絡坑を分散配置させることが有効であることも明らかにした。さらにこれらの知見をもとに所定の重畳波を発生させるための並行トンネルの諸元（連絡坑長さ、連絡坑同士の間隔、連絡坑と並行トンネルの断面積、並行トンネル中心と分岐断面との相対位置）を算出した。

並行トンネルの効果を検証すべく算出した諸元を持つ並行トンネルをトンネル分岐区間に設置してこの箇所を超高速列車が通過する際の流れ場を模型実験および 3 次元数値解析で調べた。その結果微気圧波の大きさに相当する圧縮波の圧力勾配の最大値は並行トンネルの設置によって 6~7 割程度まで低減できることがわかった。また、並行トンネルを設置する前後の圧縮波の差分波形を求めたところ設計上想定した重畳波に近い波形が発生していることも明らかになった。ただし想定では圧縮波の圧力勾配の最大値を 3 割程度まで低減可能なはずであったが 6~7 割程度までの低減という結果になったのは並行トンネルの諸元の算出には分岐区間で断面が拡大する影響を考慮していないためであると考えられる。

以上のことから、列車が分岐部を通過することによって生じる微気圧波対策として「並行トンネル」が有効であることが明らかになった。

参考文献

- 1) 井上保雄：騒音は音で消せ，IHI 技報，Vol. 51, No. 1, 2011.
- 2) 西村正治：アクティブノイズコントロールの現状，計測と制御，Vol. 51, No. 12, 2012.
- 3) 小川隆申：列車トンネル突入時のトンネル内圧縮波形成過程に関する研究，東京大学博士論文，1995.
- 4) 土肥哲也：低周波音 低い音の知られざる世界，コロナ社，音響サイエンスシリーズ 16, 2017.
- 5) 斉藤実俊，宮地徳蔵，飯田雅宣：トンネル枝坑坑口からの微気圧波の低減方法，鉄道総研報告，Vol. 24, No. 1, pp. 41-44, 2010.
- 6) 福田傑，飯田雅宣，村田香：トンネル内枝坑による微気圧波の低減と枝坑通過波の形成，鉄道総研報告，Vol. 14, No. 9, pp. 17-24, 2000.
- 7) 福田傑，飯田雅宣，村田香：列車のトンネル内枝坑通過により発生する圧力波，日本機械学会流体工学部門講演会講演概要集，No. 9, pp. 9-10, 2000.
- 8) 小澤智：トンネル出口微気圧波の研究，鉄道技術研究報告，No. 1121, 1979.
- 9) T. Ogawa and K. Fujii : Numerical Investigation of Three-dimensional Compressible Flows Induced by a Train Moving into a Tunnel, Computers and Fluids, Vol. 26, No. 6, pp. 565-585, 1997.
- 10) 本田敦，高橋和也，野澤剛二郎，土肥哲也，小川隆申，飯田雅宣，藤野陽三：超高速鉄道トンネルにおける微気圧波の評価および緩衝工の提案，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol. 71, No. 3, pp. 327-340, 2015.

第4章 営業線における並行トンネルの適用性の評価

4.1 はじめに

中央新幹線のトンネル内の分岐部に係る微気圧波問題のうち、第3章ではトンネル内の巨大な分岐装置およびその転換・保守を実施するためのスペースが必要となる本坑から枝坑に分岐する断面積変化部を列車が超高速で通過する際に生成される圧力波がトンネル内を伝播してトンネルの坑口から微気圧波として放出される問題に着目した検討を行った。この問題に対して第3章では、列車が枝坑に分岐する区間を超高速で通過する際に発生する圧力波の低減対策として既存の多孔板のような技術では解決が困難であったため、新しい原理に基づく「並行トンネル」を提案し、その基本的な原理や現象を明らかにするとともに模型試験や数値解析によりその低減効果を確認した。また、並行トンネルの有効性を確認するため、分岐区間で発生した圧力波がトンネルを伝播してトンネル坑口から放出される場合の微気圧波の影響について長距離伝播解析により予測し、本対策による微気圧波の低減効果を確認した。

本章では、第3章における検討を踏まえ営業線の山岳トンネル内の分岐区間に設置する並行トンネルの諸元を提示し実現性を示すために並行トンネルの建設方法・手順を示す。提案する並行トンネルでは本坑と直角の角度をなす数本の連絡坑を互いに近接して掘削することになるので並行トンネルを掘削する地山の状態などの条件を加味した施工管理上の注意点も併せて示す。

さらに、並行トンネルの営業線における適用性を検討するため、様々な要因に対する感度分析を実施する。まず、第3章では対象とする超高速列車の速度を時速500kmとして検討を行ったが、列車の速度が変化した場合の並行トンネルの重畳効果について検討を行うとともに将来超高速鉄道の速度が向上した場合について圧縮波の圧力勾配の低減効果の確保を目的とした対応策の必要性について論じる。また、第3章では重畳波の振幅を確保するために並行トンネルを3対として検討したのでこの要因に関する感度分析を行う。このほかに並行トンネルの表面の粗度や形状についても調べ、圧力波の並行トンネル表面における反射や減衰による効果への影響を把握する。これらの検討により営業線の山岳トンネル内の分岐区間に設置する並行トンネルの適用可能性のみならず実用性についても確認する。

4.2 営業線における並行トンネルの提案

本節では、第3章での検討も踏まえて実際の建設工事を考慮した営業線で想定される並行トンネル対策の基本仕様を提案する。3.2.4節の検討に基づいて、列車が並行トンネルを通過する際に発生する圧力波を列車が分岐部を通過する際に発生する圧縮波のタイミングに合わせて重畳させて効率的に微気圧波を低減させるために必要な諸元として、図-4.2.1に示すとおり連絡坑の長さを20m、連絡坑を3対(6本)に分散しその間隔は10mとしている。連絡坑および並行トンネルの断面積については、直達波・迂回波がより効果的に機能するための振幅は連絡坑の断面積に依存するため連絡坑を3対(6本)に分散した場合に必要な振幅約20m²としている。

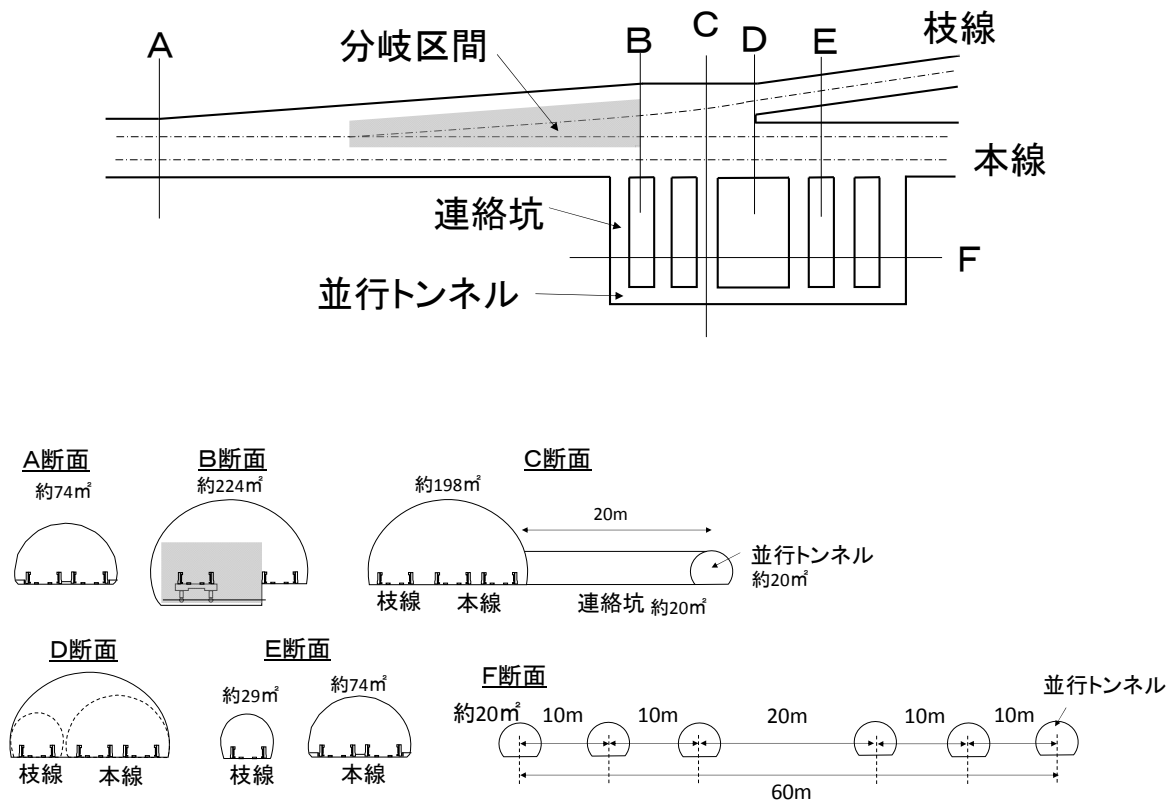


図-4.2.1 営業線で提案する並行トンネルの諸元

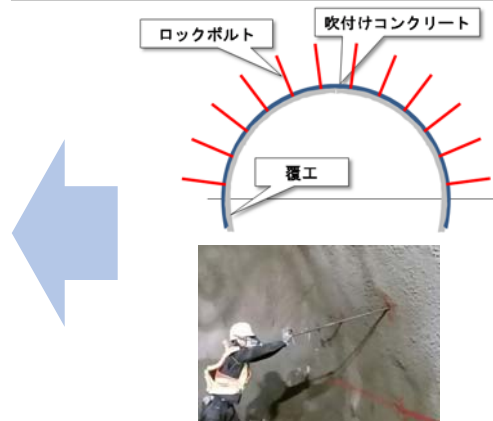
4.3 並行トンネルの建設方法・手順

山岳トンネル施工方法は New Austrian Tunneling Method (以下「NATM」という.) が一般的で山梨実験線の本坑や第 2 章の図-2.2.2 で示したような横坑の掘削においても実績があり、中央新幹線の山岳トンネルの掘削においても標準工法として採用されている。NATM の施工手順について図-4.3.1 のとおり文献のイラスト¹⁾と過去の山梨実験線および現在の中央新幹線での掘削作業の写真で示す。実際の工事では図-4.3.1 の I~IV のプロセスを順次繰り返してトンネルの掘削を進めていく。なお、連絡坑および並行トンネルの覆工は経済性を考慮して 1 次覆工 (吹付けコンクリート) のみを想定した。

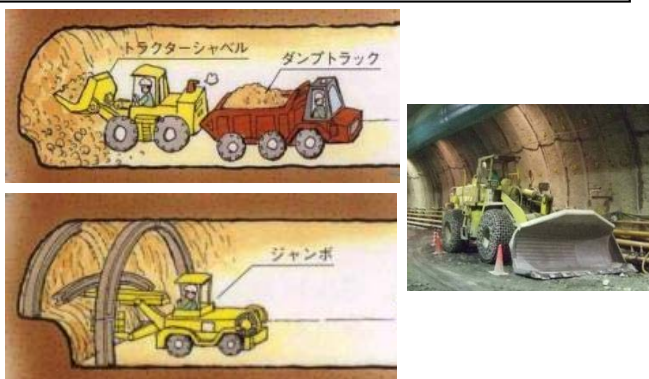
I. 重機にてトンネル切羽に爆薬を充填するための穿孔を行い爆薬により地山を発破



IV. 吹付けコンクリート硬化後に地山の強度を利用するためロックボルトを打設



II. 破碎した地山を坑外に運搬するとともに、必要に応じて崩落防止のための支保工を設置



III. 地山の補強を目的とした覆工としてコンクリートの吹付け (1 次覆工)



図-4.3.1 NATM による施工手順 (イラスト¹⁾ は一部修正・加筆)

並行トンネルの施工手順案を図-4.3.2 に示す。①から⑦に至る順番で掘削し、万が一掘削中に崩落等が発生した場合の避難動線を確保しておくため連絡坑は本線側から矢印の向きに掘削することを考えている。①の連絡坑を掘削した後に直角方向へ本線と並行に②の坑（並行トンネル）を掘削するので③～⑦の各連絡坑を施工する箇所の地質を事前に把握することができる。また、図-4.3.1 の I のプロセスで使用する切羽への爆薬装填やロックボルトのための穿孔を行うことが可能な重機であるドリルジャンボ（図-4.3.1 左上）の仕様を並行トンネルの大きさにあわせて選定する。

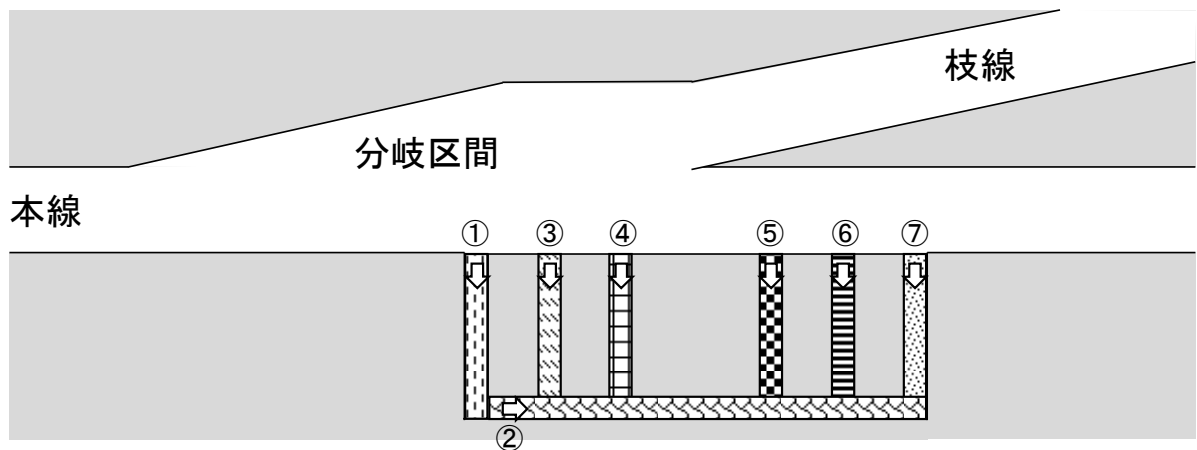


図-4.3.2 並行トンネルの施工手順

施工管理においては施工手順を考慮した有限要素法を用いた数値解析（Finite element method, 以下「FEM」という。）の結果と比較することを基本とする。例えばトンネルの内空変位が掘削幅（並行トンネルのスプリングライン（トンネル上半と下半を分ける線）の幅であり断面積が 20m^2 の場合は約 7m ）の 1.5% 程度になると以降は変位が急激に大きくなるとされる²⁾。また、地山は当初の地質予測と異なることもあり一般に不均一、不連続の性状を有している場合が多い。トンネルの崩落事故の多くは切羽付近で発生しているが前述した施工管理を行って切羽前方の地質の確認することで安全に施工することが可能である。

連絡坑の間隔や断面積の設定にあたっては掘削時の安全性等を考慮する必要がある。例えば土木学会のトンネル標準示方書³⁾では、隣接して複数のトンネルを施工する場合には掘削により相互のトンネルに有害な影響を与えてはならず、影響がほとんどなくなる離隔は地質によって変化するがトンネル中心間隔で掘削幅の 2 倍程度（硬質な地山の場合）～ 5 倍程度（軟質な地山の場合）とされている。

また、既設トンネル近接施工対策マニュアル⁴⁾においてはトンネルを併設する場合の近接度区分が示されている。同マニュアルは供用中の鉄道トンネルに近接して工事が計画・実施される場合に適用可能なものであるが、参考資料として利用できるものであるため適用して考察する。同マニュアルでは既設トンネルの側方から並行トンネルまでの離隔は並行トンネル外径の 1.0 倍～ 1.5 倍までの距離を制限範囲（要対策範囲）とすると定義されており、安定した硬岩・軟岩地山の場合にはこの範囲から 20% を減らすことができるとされている。なお、制限範囲に該当する場合に

においても1)現状調査、2)影響予測、3)対策工、4)安全監視、5)工事記録を行うことで安全に施工を進めることが可能である。

トンネルの完成断面形状についてはトンネルの安全性と経済性を考慮して定める必要があり^{5,6)}、所要の内空断面と地山条件などから合理的な形状を選定する必要がある²⁾。営業線で想定する連絡坑および並行トンネルの断面積は約 20 m²としているが、山梨実験線で同程度の大きさの横坑については上半部が単心円でスプリングラインより下の脚部を狭めた形の馬蹄形で施工した実績があり、営業線で想定する連絡坑および並行トンネルの断面形状についても同様に馬蹄形を想定している。断面積約 20 m²の連絡坑および並行トンネルを馬蹄形で施工する場合には図-2.2.2 に示す実験線の横坑では掘削坑の幅は 7m 程度であり並行トンネルも同程度の幅の掘削坑となる。今回提案する並行トンネルの連絡坑の離隔は 3m 程度のため掘削坑の幅 7m に対して約 0.4 倍の離隔となるので前述した既設トンネル近接施工対策マニュアルによると制限範囲に該当するため対策を講じる必要がある。まず地盤調査や近接施工諸元の検討などの 1)現状調査を行って設計に向けた条件整理を実施する。次に 2)影響予測として施工手順を考慮した FEM により地山の安定性や影響範囲・支保部材の応力、トンネル内空変位を確認する²⁾。地山の安定性については地山接近度 (R) とトンネル周囲に発生する塑性領域の深さ (dp) の指標がある。地山接近度 (R) は局所的な応力が破壊応力にどの程度近いかを表す指標である。地盤種別にもよるが硬岩の場合は三軸圧縮試験の結果が周辺地山の破壊接近度 0.2 を下回らない範囲であれば地山を弾性領域のまま保持することができるため、破壊接近度 0.2 が一つの目安とされている。塑性領域については数値解析から算出された壁面応力が地山の一軸圧縮強さに達すると塑性化が始まり塑性領域が掘削幅の 20%に達すると急激に変位が大きくなるとされている。そのため塑性領域が掘削幅の 20%以内であることが一つの目安となっている²⁾。支持部材の応力については鉄道構造物等設計標準³⁾に規定される材料特性に基づいて強度検討を行うこととされている。

2)影響予測の結果を踏まえて必要に応じて掘削方法の変更や上半と下半の分割施工、支保の変更などの 3)対策工を検討する。施工の段階においては 4)安全監視として内空変位測定の見測のみでなく 1)現状調査の結果との比較を行って 5)工事記録として近接工事諸元の記録をとりまとめる。

なお、文献^{7,8)}に近接する並行トンネルの施工事例が紹介されている。北山トンネル (岩手県) の例では用地幅の制約から離隔が 1m 程度の超近接トンネルを施工している。トンネルの外径は約 11m であり掘削坑の幅に対して離隔の割合が 1 割程度のため既設トンネル近接施工対策マニュアルによる制限範囲に該当している。同トンネルは地山も破砕性に富むものであり天端や切羽の崩壊を繰り返す状況であったが断面掘削方法の変更や支保構造を変更することで安全に施工を完遂している。

4.4 営業線での諸元を考慮した並行トンネルの感度分析

前節までに、列車が並行トンネルを通過する際に発生する圧力波を列車が分岐部を通過する際に発生する圧縮波とタイミングを合わせて重畳させて微気圧波を低減させるために必要な並行トンネルの各諸元を示すとともに、想定する並行トンネルの建設方法・手順および注意すべき点について示して山岳トンネルの分岐区間への並行トンネルの設置が実現可能であることを述べた。本節では、並行トンネルの連絡坑の本数や離隔，列車速度の変化，連絡坑・並行トンネルの表面粗度や断面形状，連絡坑・並行トンネルの接続部の形状が圧縮波の圧力勾配の低減に与える影響について感度分析を行って営業線での適用可能性について評価して提案した並行トンネルが実用的なものであるかについて確認を行う。

4.4.1 列車速度の影響

(1) 提案した並行トンネルの列車速度に対する有効性

4.2 節で提案した並行トンネルは超高速列車が分岐断面を時速 500 km で通過した際に発生する圧縮波の圧力勾配低減を対象としている。ここでは並行トンネルが圧縮波の圧力勾配を低減する効果を発揮するために適用可能な列車速度について検討を行う。検討にあたっては分岐部で発生した圧縮波に対して列車通過に伴い並行トンネルで発生する直達波および迂回波の負の圧力勾配の部分をうまく重畳できる時間関係となっているかという観点から分析を行う。

列車が時速 500km で分岐部を通過する際に発生する圧縮波は 3.2.1 節において模型実験で再現しておりその時間微分値（圧縮波波面）を図-4.4.1 に再掲する。なお、横軸の時間については後述する簡易モデルの計算結果に合わせて時刻をずらして示している。並行トンネルによる迂回波を重畳させて圧縮波の圧力勾配を低減させる時間幅は圧縮波波面がピーク値付近でほぼフラットな時間帯（図-4.4.1 中に破線で示す圧縮波波面の始点時刻 $t_a(500)$ (s) から終点時刻 $t_b(500)$ (s) までの時間幅）と設定するので列車先頭部の長さに相当する長さ L_t (m) との関係は以下の式(4-1) のようになる。

$$\frac{L_t}{500/3.6} = t_b(500) - t_a(500) \quad (4-1)$$

L_0 を図-4.4.2 に示す連絡坑 1 本目から分岐断面までの距離 (30m) とし列車速度 V (km/h) のときの圧縮波波面の始点の時刻を $t_a(V)$ (s)，終点の時刻を $t_b(V)$ (s) とすると，時速 500km のときの圧縮波波面の始点との時間差をもとに $t_a(V)$ ， $t_b(V)$ はそれぞれ以下の式 (4-2)，式 (4-3) で表される。

$$t_a(V) = t_a(500) - \frac{L_0}{500/3.6} + \frac{L_0}{V/3.6} \quad (4-2)$$

$$t_b(V) = t_a(V) + \frac{L_t}{V/3.6} = t_a(V) + [t_b(500) - t_a(500)] \frac{500}{V} \quad (4-3)$$

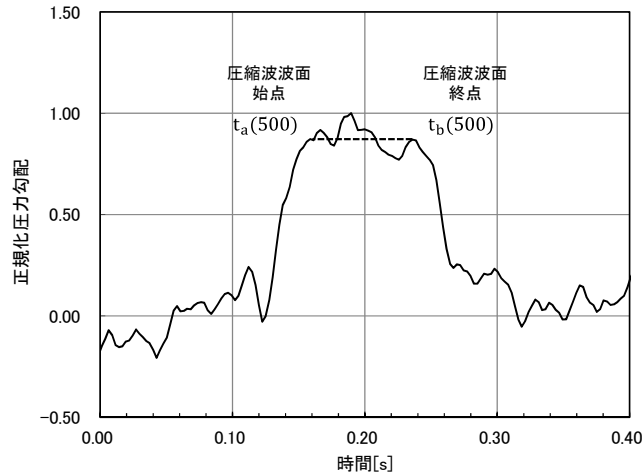


図-4.4.1 時速 500km の場合の模型試験による圧力勾配に設定した圧縮波波面の始終点

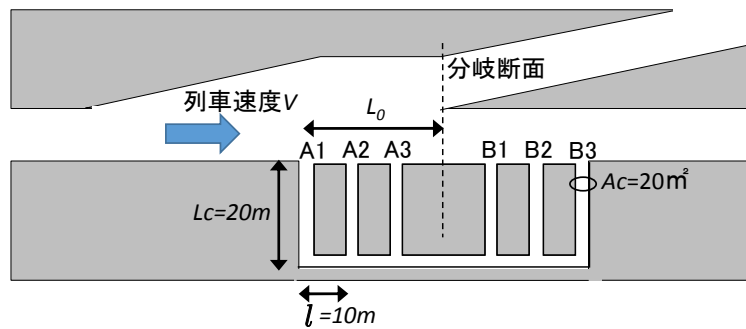


図-4.4.2 分岐区間の並行トンネルの平面図

列車が並行トンネルを時速 500km で通過する際に発生する重畳波は第 3 章で検討した簡易モデルによって図-4.4.3 に示すような波形が得られている。列車速度 V (km/h) のときに分岐部で発生する圧縮波の圧力勾配を低減させるために重畳させるべき重畳波（迂回波）の圧力勾配が負となる継続時間を $\Delta t(V)$ (s) とする。列車速度に応じた重畳波は列車速度 V を時速 10km 刻みで変化させて第 3 章と同様の方法により簡易モデルを用いて求めた。

列車速度を変化させた場合における分岐部を通過する際に発生する圧縮波波面の始点 $t_a(V)$ 、終点 $t_b(V)$ と重畳させるべき重畳波（迂回波）の圧力勾配が負となる継続時間 $\Delta t(V)$ を 1 つのグラフに示した結果を図-4.4.4 に示す。同図の縦軸は列車速度が時速 500km のときの重畳波のうちの迂回波の圧力勾配が負となる領域の到達時刻との時間差を表しており圧力波が遅れて到達する場合を正としている。同図は圧縮波波面の始点から終点までの時間帯が重畳波の圧力勾配が負となる継続時間 $\Delta t(V)$ の範囲に包含されていれば効率よく重畳効果が発揮されることを示している。列車速度が時速 360～520km 程度の範囲においては圧縮波波面の始点から終点までの時間帯が $\Delta t(V)$ の範囲に包含されるため圧力勾配の低減効果が期待できる。列車速度が時速 520km 程度より高くなると列車が分岐部を通過する際に発生する圧縮波よりも並行トンネルの重畳波（迂回波）が到達するのが遅れてくるため、圧縮波波面の前半部分に重畳波（迂回波）の圧力勾配が負となる領域が重ならなくなるため低減効果が徐々に低下すると考えられる。

なお、重畳波（迂回波）の圧力勾配が負となる領域の終点は図-4.4.4において時速 360 kmから速度が高くなるにつれて領域の始点との時間差が徐々に縮まっていくが時速 500km 程度を超えると反転して始点と終点との時間差が広がっていく。参考に図-4.4.5に列車が時速 450km, 500km, 550km, 600km で並行トンネルを通過した場合における圧力波形について連絡坑 A1～A3 で発生する重畳波（図中の赤線）、連絡坑 B1～B3 で発生する重畳波（図中の青線）、この2つの波の合成波（図中の黒線）を示す。縦軸に示す圧力値は各列車速度における連絡坑 A1～A3 で発生する重畳波（図中の赤線）の最初の正圧ピーク値で正規化している。なお、図-4.4.5 (b) は時速 500km の場合なので図-3.2.16 と同一である。分岐部で発生する圧縮波の圧力勾配を低減させるための重畳波の圧力勾配が負となる各速度ごとの継続時間 $\Delta t(450)$, $\Delta t(500)$, $\Delta t(550)$, $\Delta t(600)$ はそれぞれ 0.15 秒, 0.145 秒, 0.165 秒, 0.2 秒となっており、合成された重畳波（図中の黒線）の負の圧力勾配となる継続時間は時速 520km 程度を境に長くなっていく。これは図 4.4.5 中の各速度における A1～A3 で発生した重畳波（図中の赤線）および B1～B3 で発生した重畳波（図中の青線）のピークの位置関係による。

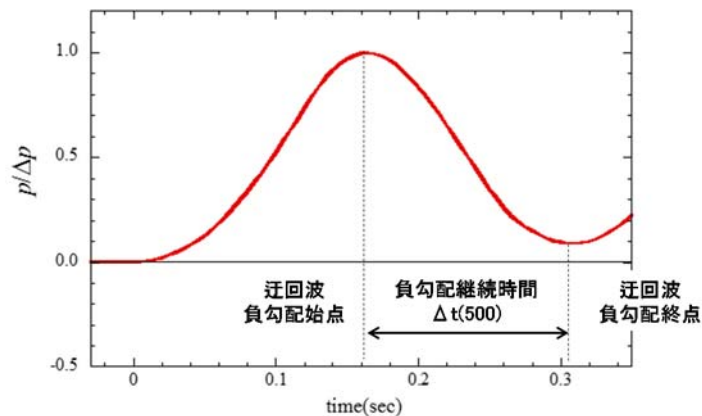


図-4.4.3 重畳波の圧力勾配が負となる領域（時速 500km）

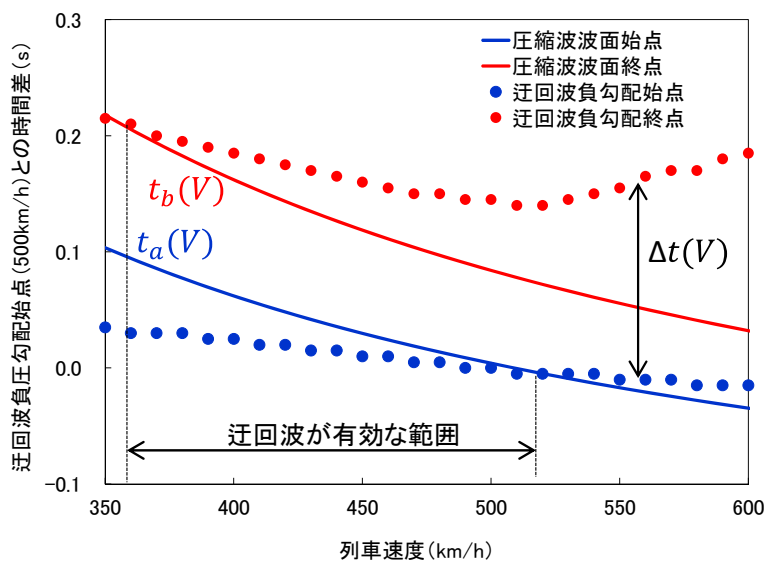
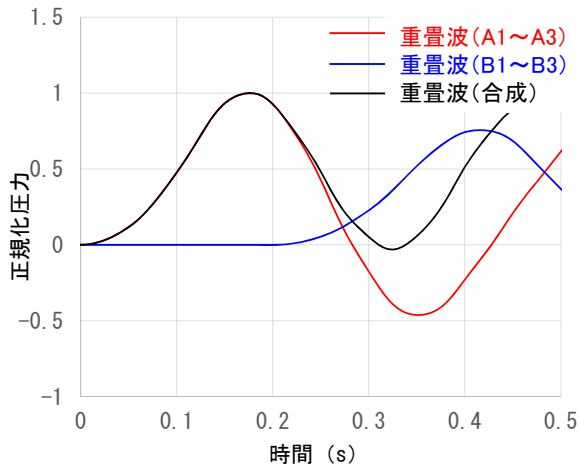
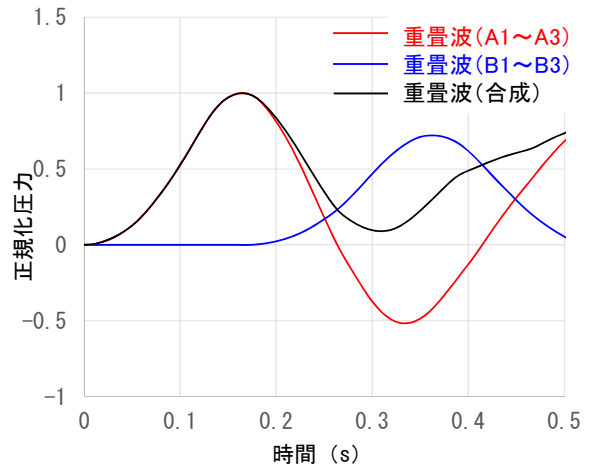


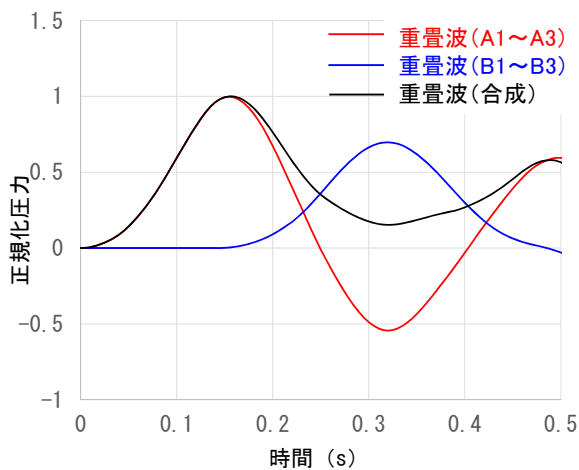
図-4.4.4 列車速度に応じた圧縮波波面・迂回波負勾配の時間差



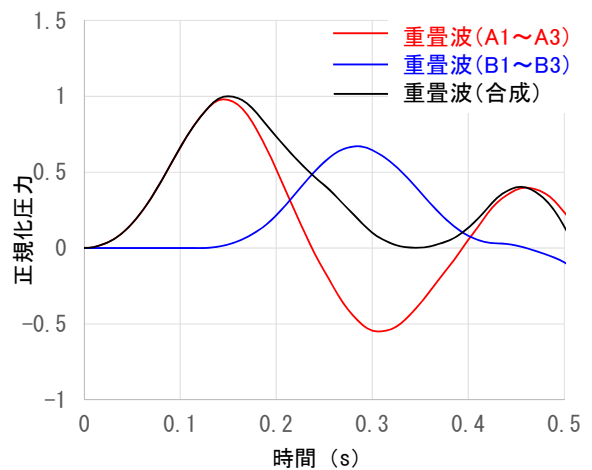
(a) 列車速度 450km/h



(b) 列車速度 500km/h



(c) 列車速度 550km/h



(d) 列車速度 600km/h

図-4.4.5 列車速度に応じた連絡坑 A1~A3 による重畳波，連絡坑 B1~B3 による重畳波，それらを合成した重畳波の波形

(2) 超高速域での並行トンネルの検討

前節の検討から，提案した並行トンネルは時速 520 km 程度以上の列車速度に対しては圧縮波の圧力勾配の低減効果が低下する可能性があることが分かった．このため時速 520km 程度以上での超高速域においても圧力勾配の低減効果の発揮が可能となりうる並行トンネルの諸元について検討を行う．

前述のとおり，4.2 節で提案した並行トンネルによっては図-4.4.4 に示すとおり時速 520km 程度以上では圧縮波の波面の領域は迂回波の勾配が負となる領域に完全には包含されない．対応策として図-4.4.4 において迂回波の負の勾配の領域を固定したまま圧縮波波面の領域を押し上げて時速 520km 程度以上の速度域で圧縮波波面の領域を迂回波の負勾配の領域に包含させることを考える．このためには並行トンネルの分岐からの相対位置を示す L_0 を長くすることによって列車が分岐部を通過する際に発生する圧縮波よりも並行トンネルの重畳波（迂回波）を少し速く到達させて $t_a(V)$ の曲線を全体的に底上げすればよいことになる．ただし L_0 を大きくすると式(4-2)に

よれば V が時速 500km より大きい領域では $t_a(V)$ の減少がより大きくなるため高速度域での包含に注意する必要がある。

そこで、 L_0 の長さをすでに提案した長さである 30m から 35m、40m と長くする場合について簡易モデルを用いて圧縮波の波面の領域と迂回波の負の勾配との領域の関係を算出した。それぞれの L_0 の長さに対する結果を図-4.4.6 に示す。 L_0 の長さを少し長くしたことにより圧縮波の波面の領域はこの図において思惑どおりに上にシフトした。すなわち圧縮波の波面勾配の始点から終点までの時間帯を重畳波の圧力勾配が負となる継続時間 $\Delta t(V)$ の範囲に包含できる列車速度が高い方向へシフトした。 L_0 を 35m とした場合は列車速度が時速 450km~600km 程度において圧縮波の波面の始点から終点までの時間帯が $\Delta t(V)$ の範囲に包含される結果が得られ、より高速度域においても並行トンネルによる重畳効果により効率的な圧力勾配の低減が図れることがわかった。 L_0 が 40m の場合は列車速度が時速 530km 程度以上の範囲でしか包含できずむしろ時速 500km においては重畳効果が低下する可能性が示唆される結果となった。このように 1 本目の連絡坑から分岐断面までの距離 L_0 の設計により圧力勾配の低減効果を期待できる列車速度域を調整でき、現計画（時速 500km）のみならず将来において速度を向上することになった場合でも対応が可能であることを確認できた。

なお、 L_0 を 35m とした場合は列車速度が時速 450~600km 程度の条件においては並行トンネルによる効果が期待できることが前述の結果により把握できたが、列車速度が時速 450km 程度以下の速度の場合は有効な領域から外れて効果が低減することになりうる。しかし微気圧波は列車速度の 3 乗に比例するため、第 3 章の伝播解析の結果で示された並行トンネルによる微気圧波低減効果の度合から判断して列車速度の低下に伴い並行トンネルの重畳効果が少し低減することの影響は問題にならないと考えられる。

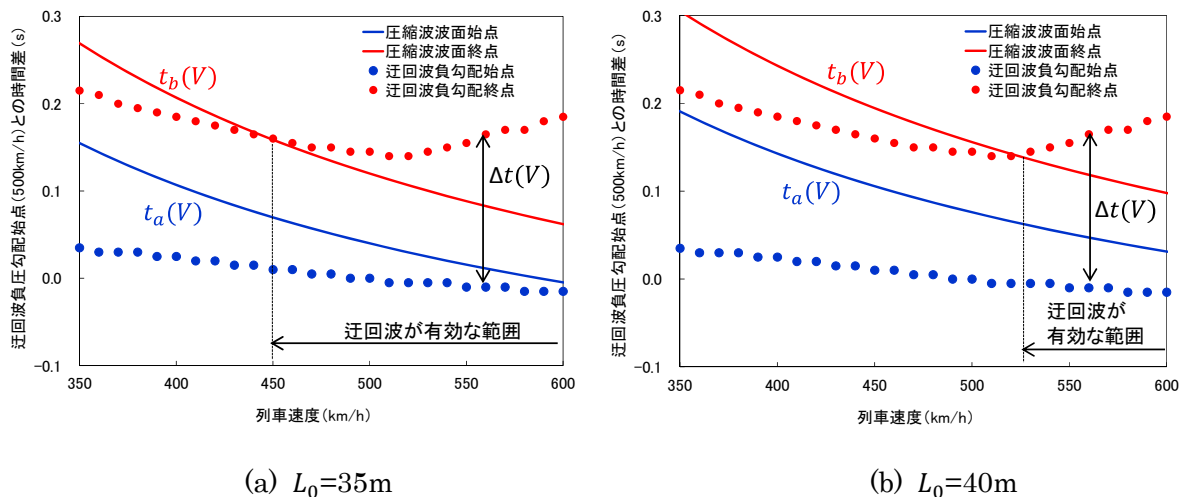


図-4.4.6 1 本目の連絡坑から分岐断面までの距離 (L_0) の変化による影響

4.4.2 並行トンネルの諸元に関する影響

(1) 連絡坑の本数の影響

4.2 節で示した並行トンネルの諸元は図-4.4.7 (左図) に示すとおり連絡坑を 3 対 (6 本) に分散し間隔は 10m としている。4.3 節で示したとおり連絡坑が隣接する連絡坑の掘削作業の影響を受ける範囲はトンネル中心間隔で掘削幅の 2 倍 (硬質な地山の場合) 程度～5 倍 (軟質な地山の場合) 程度が一つの目安とされるので設計時の FEM による影響予測や施工時の安全監視等で影響を確認しながら掘削していく計画であるものの地盤が軟質である場合には連絡坑の本数を減らしてトンネル中心離隔を広げなければならない場合もありうる。

そこで地盤が軟質である場合を想定して連絡坑を 1 対 (2 本) に減らし連絡坑の中心離隔を掘削幅の 5 倍程度に広げる場合を考える。断面積約 20m² の連絡坑を馬蹄形で施工する場合、山梨実験線の同種の横坑の掘削幅は 7m 程度であるため掘削幅の 5 倍を確保すると連絡坑の中心間隔は 35m 程度となるので図-4.4.7 (右図) に示すとおり 2 本の連絡坑の離隔を 40m として検討した。この場合に列車が並行トンネルを通過する際に生成される直達波・迂回波が重畳した近似波形を第 3 章で検討した簡易モデルを用いて計算する。連絡坑が 3 対 (6 本) と 1 対 (2 本) の場合の重畳波を比較した結果を図-4.4.8 に示すが図では分岐部で発生した圧縮波の圧力勾配を低減させるために重畳させるべき圧力勾配が負となる時間を連絡坑が 1 対 (2 本) では τ_1 、連絡坑が 3 対 (6 本) では τ_3 として表している。

連絡坑を複数の連絡坑に分散させて直達波と迂回波の重畳波の振幅を所定の大きさと確保するために 3 対の連絡坑による並行トンネルを提案しているが、連絡坑の本数の減少に伴って重畳波の振幅が小さくなりこれに伴い分岐部で発生する圧縮波の圧力勾配を低減させるために重畳させるべき圧力勾配の傾きも小さくなるので低減効果が小さくなったと考えられる。

これによる並行トンネルの効果を評価する。第 3 章において模型試験による並行トンネルの効果の把握を行った結果、3 対 (6 本) の連絡坑から構成される並行トンネルを分岐区間に設置することによって列車通過に伴い分岐断面で発生する圧縮波の圧力勾配が 64% に低減した。一方、簡易モデルの結果では連絡坑が 3 対 (6 本) の場合に得られる重畳波は連絡坑が 1 対 (2 本) の場合に得られる重畳波と比較して重畳波の振幅は約 2.3 倍、圧力勾配の傾きは約 2.0 倍となった。このことから連絡坑が 1 対 (2 本) の場合、分岐断面で発生する圧縮波の圧力勾配の低減は 3 対 (6 本) の場合と比較して半分程度になると想定され、圧縮波の圧力勾配は 80% 程度に低減されると考えられる。

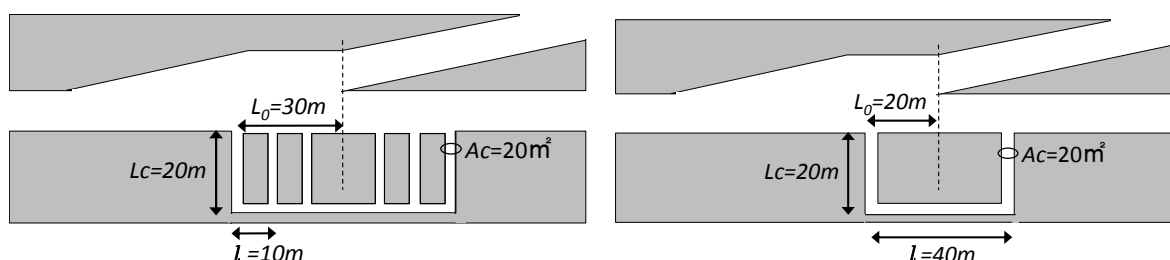


図-4.4.7 分岐部に設置した並行トンネル概念図 (左: 3 対, 右: 1 対)

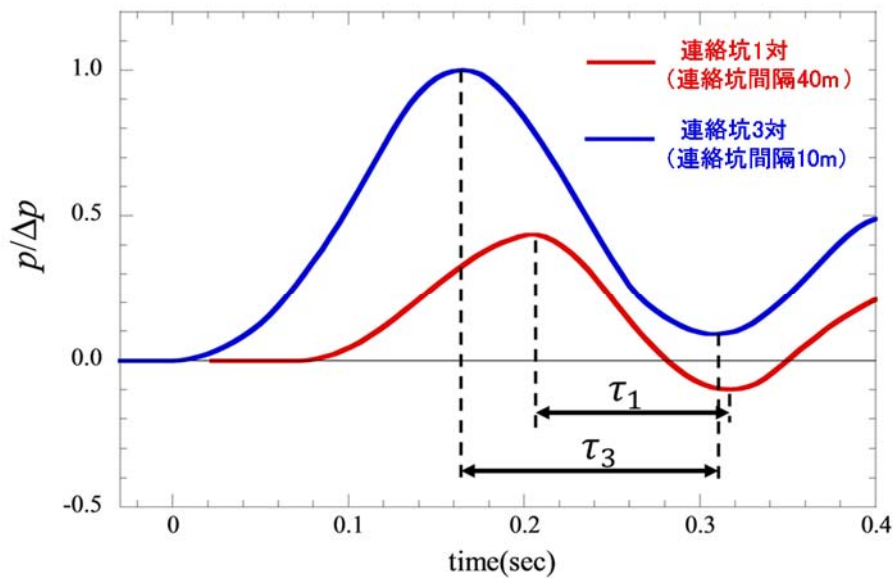


図-4.4.8 簡易モデルによる連絡坑の本数が異なる場合の重畳波

(2) 連絡坑・並行トンネルの表面粗度の影響

営業線の連絡坑および並行トンネルの施工は山岳トンネルの標準工法である NATM により施工し前述のとおり覆工は経済性を考慮して 1 次覆工のみ（吹付けコンクリート）を想定しているため、本線トンネルのように 2 次覆工を施工した平滑なトンネルと比較して凹凸が大きい。覆工表面の凹凸の存在が圧力波の減衰に影響を与えるなら並行トンネルによる微気圧波低減の効果の低下が懸念される。そこで連絡坑・並行トンネルの表面を 1 次覆工のみ（吹付けコンクリート）とした場合にこの凹凸が圧力波の減衰に与える影響について表面の仕上げ条件が同じである山梨実験線の枝坑（斜坑）の計測結果から評価する。なお、第 3 章の検討において 3 次元 CFD 解析では並行トンネルの表面は流速に対してすべりなしの境界条件としているため粗度による減衰の影響を考慮しておらず、模型実験でも表面が平滑な鋼製の模型を用いて実施しており粗度による減衰の影響は小さい。

トンネル突入時に発生した圧縮波が枝坑（斜坑）に分岐し枝坑（斜坑）内を伝播する圧力波を山梨実験線で計測した。枝坑（斜坑）の配置および圧力変動の計測点（本坑からの距離の異なる 7 箇所：Pt₁～Pt₇）を図-4.4.9 に示す。枝坑（斜坑）は 1 次覆工（吹付けコンクリート）のみで長さは約 1,400m、断面積は 28m² であり枝坑の端部は開放されている。圧力変動の計測結果を大気圧で正規化して図-4.4.10 に示す。枝坑（斜坑）の延長にわたって圧力波の圧力はほとんど変化せず距離に伴う減衰の影響は小さい結果となった。斜坑の端部での圧力波の反射の影響があることから減衰の影響が表れ始める伝播距離はこの測定結果からは一概には言えないものの並行トンネルにおいて迂回波が連絡坑、並行トンネルを進行する 100m 程度の距離においては表面粗度による減衰の影響は小さいと考えられる。

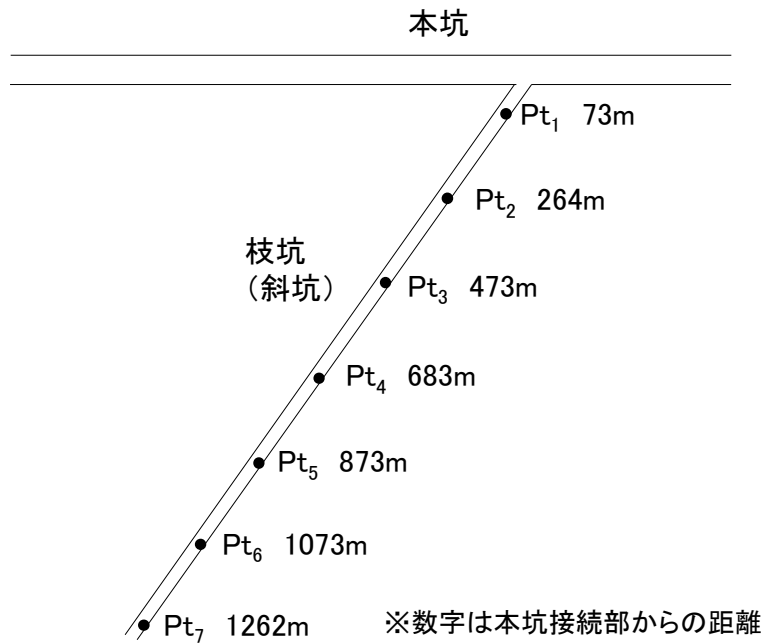


図-4.4.9 山梨実験線の枝坑（斜坑）での計測点

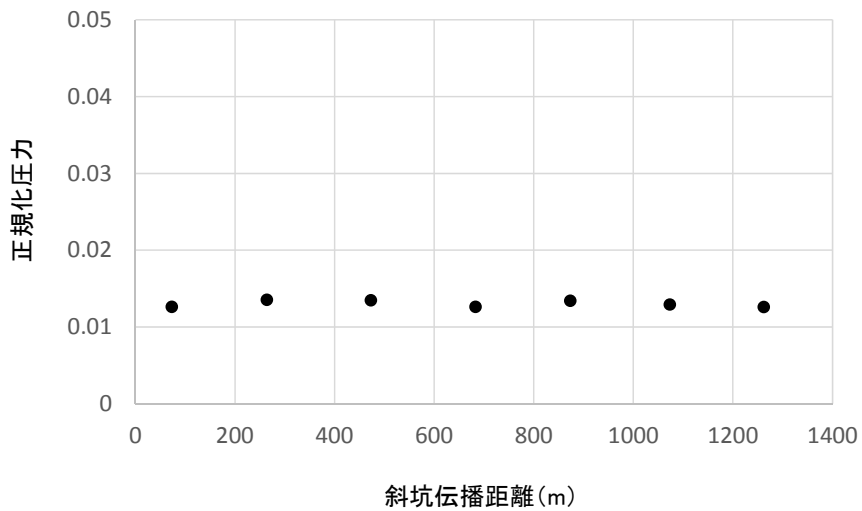


図-4.4.10 山梨実験線の枝坑（斜坑）での計測結果

(3) 連絡坑・並行トンネルの断面形状の影響

営業線における連絡坑・並行トンネルの断面形状については施工の面から 4.3 節で示したとおり馬蹄形を想定している。ただし、第 3 章の検討における数値解析および模型実験での連絡坑・並行トンネルは、実施工の際の馬蹄形断面と同じ断面積を持つものの形状については矩形として模擬しているため断面の形状の違いによる影響について評価する。

連絡坑・並行トンネルの断面の大きさを圧力波の波長と比較して評価する。連絡坑・並行トンネルの断面積が 20m^2 の場合に実施工で想定している馬蹄形の幅は山梨実験線では 7m 程度であり幅が高さより大きい。また、第 3 章で取り扱った数値解析および模型実験の連絡坑・並行トン

ネルは断面を正方形として模擬しているため幅および高さはともに 4.5m 程度である。一方、研究の対象としている圧力波の主成分は 10Hz 以下のため波長は 34m（音速約 340m/s/10Hz）より長くなる。以上のことから実施工、数値解析、模型実験のいずれにおいても断面の一辺の大きさは圧力波の半波長と比べて十分小さくしかも通過する圧力波は平面波であることから連絡坑・並行トンネルの断面形状の差による影響は小さいと考えられる。

(4) 並行トンネルの線形の形状の影響

提案した並行トンネルにおける連絡坑と並行トンネルは直角をなしている。これに対して 1 対の並行トンネルで図-4.4.11（右）に示すように連絡坑と並行トンネルが一つの曲がった線形となる場合の並行トンネルについて考える。この線形では連絡坑から直角に曲がる並行トンネルとの接続部での膨張波の反射を考慮しなくて済み振幅の高い膨張波を本坑に戻せるのではないかと期待される。しかし音波が伝播するダクト内の消音を目的に管路の形状の減衰への影響を示した既往の文献⁹⁾から、ダクト幅(m)と周波数(Hz)の積が数 100 を超えると管路が直角に曲がった場合に有意な減衰の影響が発生するとされている。今回の事例では管路の幅が 7m 程度で対象とする圧力波の主成分が 10Hz 以下程度のためダクトが直角に曲がっている場合でも減衰量は 1dB 未満と小さいとの知見を得た。また、前節で述べたとおり並行トンネルの各構成断面の一辺の長さが圧力波の半波長（前述のとおり波長は 34m 以上）と比べて小さく 1 次元の平面波になるため連絡坑・並行トンネルの接続部の形状が直角であることによる減衰の影響は小さいと考えられる。なお、この減衰には反射の影響を含んでいる。

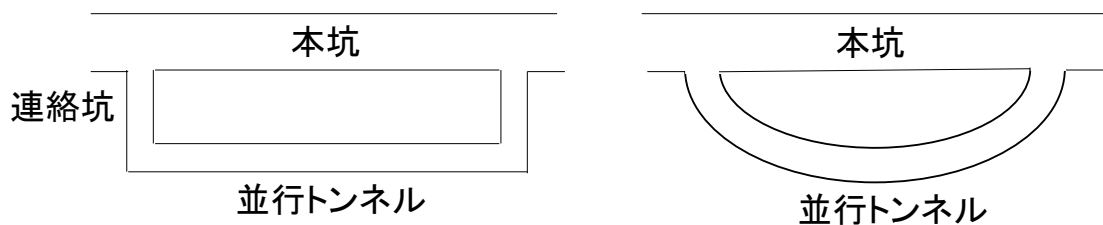


図-4.4.11 連絡坑が 1 対の場合の並行トンネルにおける線形の形状の違い
(左：提案型，右：曲線型)

4.5 まとめ

第3章において超高速列車が分岐部を通過する際に形成される微気圧波の低減を目的に提案した並行トンネルについて本章では中央新幹線の営業線の分岐区間に設置する基本仕様を提示した。また並行トンネルが様々な外的環境変化に対して適用性があり実用的なものであることを示すため各種の検討を実施した。

まずは施工の面からの実用性および実現可能性に関して実際の山岳部での並行トンネルの建設について山岳トンネルにおける標準的な工法である NATM による施工手順案を示した。並行トンネルの連絡坑の間隔や断面積等の諸元の決定にあたっては掘削中および掘削後の隣接する連絡坑への影響を考慮する必要があるが、地盤調査や近接施工での影響検討などの現状調査、設計における施工手順を考慮した FEM による地山の安定性や影響範囲・支保部材の応力、トンネル内空変位の確認、近接施工対策の検討、施工時の安全監視及び施工記録などを行うことで施工が可能であることを確認して設置に関する実現性を示した。

次に並行トンネルの以下に示す各種外的要因や環境の変化に対する実効性について列車の速度や周辺の地盤条件、並行トンネル内の壁面の表面粗度、断面形状、曲率の違いなどの変動による並行トンネルの微気圧波低減効果への影響の感度分析を実施した。

列車の速度の変化による並行トンネルの微気圧波低減効果への影響について検討を行い、4.2 節で提示した基本仕様に対して適用可能な列車速度を簡易モデルにて計算した。その結果列車速度が時速 360km~520km 程度の範囲においては並行トンネルによる重畳波の圧力勾配が負となる継続時間に列車が分岐部を通過する際に発生する圧縮波の波面の始点から終点までが包含されることになり圧縮波の圧力勾配の低減効果を期待できることを確認した。ただし、現状の仕様案では列車速度が時速 520km 程度より高くなると列車が分岐部を通過する際に発生する圧縮波よりも並行トンネルの重畳波が到達するのが遅れてくるため圧縮波波面の前半部分に重畳波の圧力勾配が負となる領域がかからなくなり、今回提案した並行トンネルの諸元のままでは速度の向上に伴い低減効果が徐々に低下すると考えられた。そこで時速 520km 程度以上での超高速域においても圧力勾配の低減効果を期待しうる並行トンネルの諸元について検討を行った。時速 520km 程度以上の速度域で迂回波の負勾配の領域に包含されるようにするためには列車が分岐部を通過する際に発生する圧縮波よりも並行トンネルの重畳波（迂回波）を少し速く到達させればよいので 1 本目の連絡坑から分岐断面までの距離を長くしたところ列車が分岐部を通過する際に発生する圧縮波の波面勾配の始点から終点までの時間帯が重畳波の圧力勾配が負となる継続時間にうまく包含された。1 本目の連絡坑から分岐断面までの距離を仕様案より 5m 長くして 35m とした場合には列車速度が時速 450km~600km 程度の範囲で効率的な圧縮波の圧力勾配の低減効果を期待できる。このように実際の並行トンネルの設計において適切に諸元を設定するによって将来において速度を向上することになったとしても対応が可能であることが確認できた。

次に並行トンネルの諸元に関する感度分析を実施した。まず連絡坑の本数についての分析を行った。実際に並行トンネルを設置する環境では軟質の地山の場合は土木学会トンネル標準示方書にしたがって連絡坑のトンネル中心間隔を掘削幅の 5 倍程度以上に広げる必要がある。このため連絡坑を 3 対（6 本）から 1 対（2 本）に減らして掘削幅の 5 倍程度のトンネル中心間隔を確保した場合について並行トンネルの効果を簡易モデルにより検討した。連絡坑本数の減少に伴って

重畳波の振幅が小さくなり分岐部で発生する圧縮波に重畳させるべき圧力勾配も小さくなった。また重畳波の波長については連絡坑 1 対 (2 本) の方が短くなり分岐部で発生する圧縮波に対してカバーできる時間が短くなった。ただし分岐部で発生する圧縮波の波面のほぼ全域に重畳することは可能であり圧縮波の圧力勾配を約 2 割低減できると考えられる。

次に連絡坑・並行トンネルの表面粗度の影響については、実験線走行試験での計測の結果から現在想定している連絡坑・並行トンネルの長さ (約 100m) 程度においては表面が 1 次覆工 (吹付けコンクリート) のみの場合でも粗度の影響は小さいと考えられる。

また連絡坑・並行トンネルの断面形状および線形の影響についてはいずれにおいても各トンネル断面の大きさが対象となる圧力波の半波長と比べて小さいため影響は小さいと考えられる。

以上のことから提案した並行トンネルは各種外的要因や環境の変化に対しても対応可能な適用性を有していることを確認した。

参考文献

- 1) 考え方がよくわかる設計実務 No.7 トンネルの設計, 大成建設土木本部土木設計部, インデックス出版, 2010.
- 2) 山岳トンネル設計施工標準・同解説, 鉄道運輸機構, 2008.
- 3) トンネル標準示方書 [共通編]・同解説 / [山岳工法編]・同解説, 土木学会, 2016.
- 4) 既設トンネル近接施工対策マニュアル, 財団法人鉄道総合技術研究所, 1995.
- 5) 鉄道構造物等設計標準・同解説 都市部山岳工法トンネル, 財団法人鉄道総合技術研究所, 2002.
- 6) 道路トンネル技術基準 (構造編)・同解説, 社団法人日本道路協会, 2003.
- 7) 横澤圭一郎, 安井成豊: 超近接トンネルの設計・施工検討, CMI 報告 建設の施工企画, 2008.
- 8) 真下英人, 日下敦, 河田皓介: 無導坑の超近接トンネルの掘削時挙動に関する研究, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学), Vol. 70, No. 3, pp. I.29-I.42, 2014.
- 9) 前川純一, 森本政之, 坂上公博: 建築・環境音響学, 共立出版, 1990.

第5章 トンネル枝坑における付帯設備を考慮した微気圧波低減対策

5.1 はじめに

本章では超高速鉄道である中央新幹線のトンネルの分岐部のうち図-5.1.1に示すようなトンネルの途中に設けられる旅客の避難やトンネル内の換気を目的とした非常口の枝坑（風路）の微気圧波対策について検討を行う。なお、この枝坑には図-5.1.2に示すように後述する多孔板対策工のほか強制換気設備（換気ファン）や消音設備（サイレンサ）、坑口の換気騒音を抑制するための換気口設備などを設置し、また非常口のそれ以外の部分には旅客の避難のための階段・エレベータなどを設置する計画である¹⁾。

中央新幹線のトンネル坑口では高速列車のトンネル突入時に生成する圧縮波の伝播、放射に伴う微気圧波対策として写真-5.1.1に示すような壁面に多孔板を有する半円状断面の多孔板緩衝工を設置しており、これによりトンネル坑口から放射される微気圧波を十分に低減することが可能となっている^{2,3)}。しかし、非常口の枝坑（風路）の微気圧波対策を検討する場合には第3章や第4章の分岐設備空間の検討の場合と同様に多孔板緩衝工のような大規模構造物を非常口内部という空間的制約の厳しい枝坑には適用できない。そのためこのような枝坑における微気圧波対策として2.2.1節で述べたとおり「多孔板対策工」が高橋ら⁴⁾により提案されている。この多孔板対策工は直径2mmの孔を有する多孔板で仕切られた正方形の断面の枝坑（風路）を中空の吸音層が取り囲む構造である。山梨実験線の枝坑に多孔板対策工を設置した実験により微気圧波の大きさが75%程度低減し、多孔板対策工により高い微気圧波の低減効果が発揮されることも同報告で示されている。山梨実験線の枝坑は営業線の枝坑と比較して断面が小さいため、山梨実験線の枝坑の風路は図-5.1.3の平面図に示すとおりその3面が多孔板を介して吸音層に囲まれる構造としている。これに対し営業線では多孔板の吸音層に曝される面積を最大限確保するために枝坑の風路の全面（4面）が多孔板を介し吸音層に囲まれた構造として計画されている。

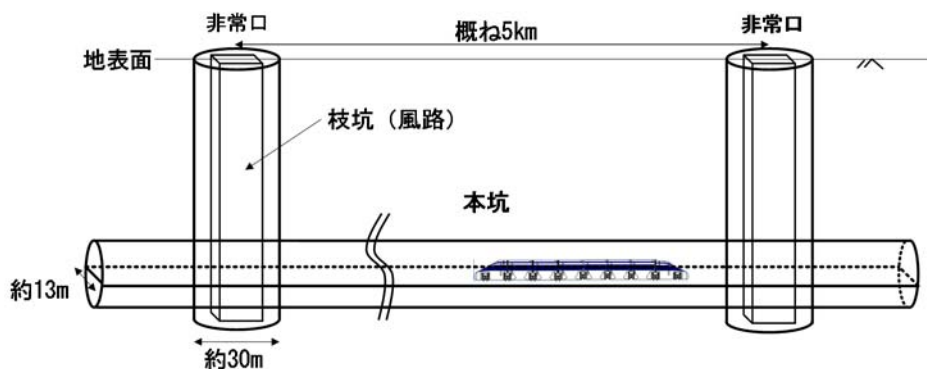


図-5.1.1 中央新幹線の都市部のトンネルの計画案概念図

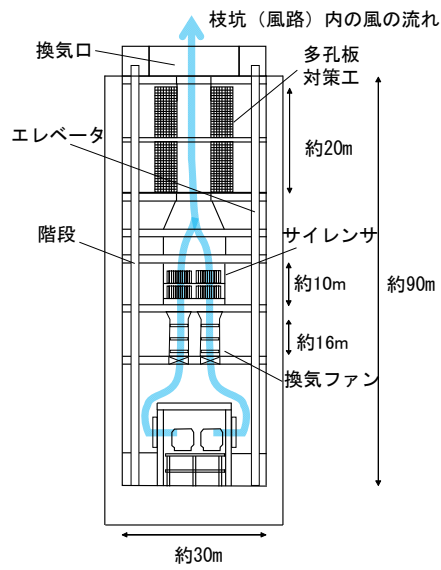


図-5.1.2 非常口（都市部）内の設備（概念図）



写真-5.1.1 多孔板緩衝工

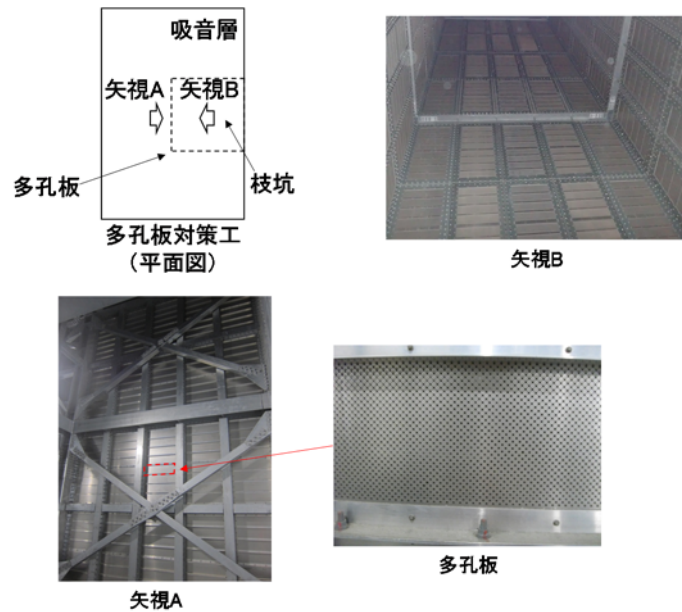


図-5.1.3 山梨実験線の多孔板対策工

一方、換気も担う枝坑では微気圧波だけでなく換気の気流による坑口での風切り音も考慮しなければならない。しかも枝坑坑口は地表面付近にあるため放射される風切り音が周辺に与える影響も大きい。東京～大阪の全区間開業時にトンネル内部の蓄熱排除のために必要な換気容量を従来の枝坑断面である5m×5mの風路に流す場合に2.4.2(2)節で示したとおり流速がかなり大きくなってしまうため、坑口での風切り音が顕著になる懸念がある。また、流速が大きくなると圧力損失も大きくなるため換気ファンの動力が増加するなど設備規模も大きくなり建設コストや稼働時のランニングコストにも影響する。

このように枝坑は非常口内部という空間的制約があるうえに微気圧波に加えて風切り音も低減させる必要があるため多孔板対策工だけでは十分な対策とは言えず、従来とは異なる観点での対策が必要となる。他方、中央新幹線の都市部のトンネルの非常口では換気ファンなどの付帯設備も設置されるためこれを微気圧波低減対策として活用できる可能性もある。

そこで本報告では以上のような枝坑に求められる要件を総合的に考慮して従来の多孔板対策工に加えて付帯設備も活用した枝坑の微気圧波低減対策方法を提案する。

まず営業線における多孔板対策工内の枝坑の風路断面を山梨実験線での従来の従来型断面(5m×5mの断面)から実断面積が約2倍の拡大断面(7m×7mの断面)に拡大することにより枝坑内の風速を約半分に低減させる。枝坑出口からの雨水の流入を防止するために屋根の役割を果たす2.4.2(2)節で示したような天井板が必要となるが天井板の影響により枝坑出口での風速は偏流となることが予測される。そのため2.4.2(2)節の検討と同様に坑口出口への換気口の設置によって整流化を図り、坑口出口での風速をさらに一様に低減させる検討を行った。2.4.2(2)節の検討で標準的な換気口を設置した場合には換気口の天井板の影響で出口から上へ1mの位置において風速の偏りが生じ、換気口に流入する平均風速(24m/s)よりも出口の風速が大きくなってしまう箇所が見られた。このため換気口内部で流れを効率的に整流化できる換気口の形状の見直しを行い、数値流体解析により換気口出口における風速を予測することで風切り音を所定のレベルまで低減できていることを確認する。一方、枝坑の断面拡大は微気圧波を強める可能性があるので微気圧波への影響について模型実験および数値解析によって検討を行う。次に枝坑内の付帯設備の微気圧波低減効果を実験により定量的に調べたうえで多孔板対策工と組み合わせることで枝坑から放射される微気圧波が最終的に基準値に収まるかについて検証する。以上により風切り音と微気圧波の両方を低減可能な枝坑の設計手法を確立する。

5.2 風切り音低減の検討

従来型断面の枝坑出口に標準的な換気口を設置した場合の騒音影響については2.4.2(2)節において3次元数値流体解析を用いて検討した結果、換気口上部の風速が最も大きい領域では24m/sを超えており換気口で風切り音が顕在化する可能性が高いことが明らかとなった。

そこで風切り音が所定レベル未満になるように枝坑の断面の拡大と換気口内の整流によって換気口出口の最大風速を低減化する。具体的にはまず枝坑を従来型断面から拡大断面に拡大して枝坑断面積を倍増させることで換気口に流入する平均風速を半減させる。また天井板を回り込む際の流れのはく離を防止するために図-5.2.1に示すように整流板を換気口内に配置する。整流板の設置間隔は保守作業時に人が通ることができる80cm程度とした。さらに換気口出口には一辺48cmの角筒状流路が格子状に並んだ構造をしているサイレンサを設置することによって換気口出口の風切り音だけでなくファンの回転によって発生する騒音も低減可能となる。サイレンサの細かく区切られた流路により換気口内の流れの不均一性をさらに抑制する整流効果も期待できる。

風切り音対策を施した換気口内の排気時の流れの解析を2.4.2(2)節の検討と同一条件のもとで行った。解析モデルでは整流板およびサイレンサの流路形状も実物のCADデータをもとにして忠実に再現している。サイレンサの流路幅は枝坑断面のスケールに比して非常に小さいがそこを通過する風速に基づくレイノルズ数は 10^5 と十分に大きいため流れ場は乱流として計算している。

換気口内の鉛直断面の風速分布を図-5.2.2に示す。整流板の曲率が大きい一部の箇所で流れのはく離して風速が18m/sを超えるところはあるが概ね風速は10m/sを下回っていることがわかる。また整流板内での風速の不均一性は依然として残るものの整流板同士の隙間に留まっている。しかもその後流れはサイレンサ内に流れ込んで細分化された流路が整流板として機能するため風路断面全体で風速がより均一化されている様子がわかる。

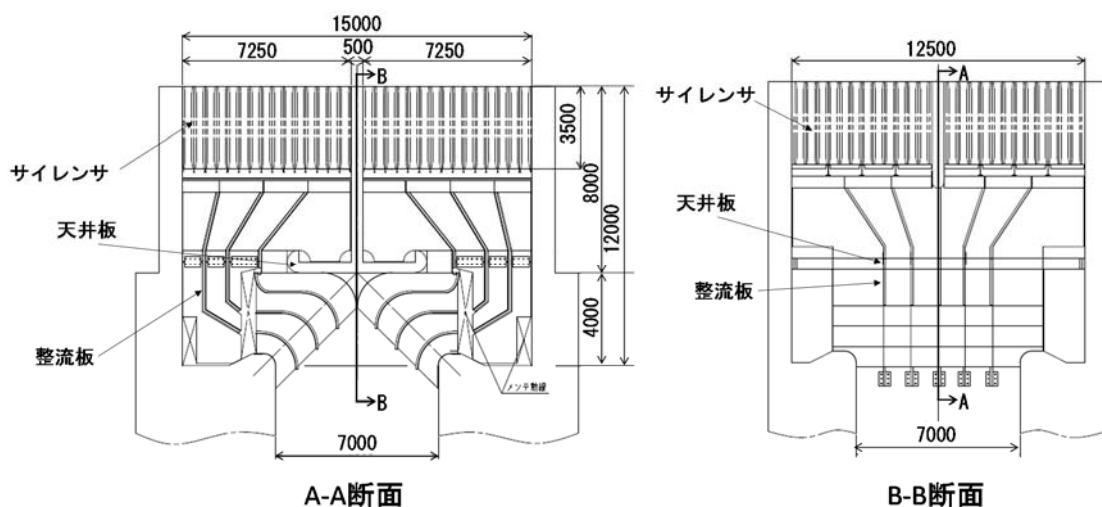


図-5.2.1 整流板とサイレンサを設置した換気口（風切り音低減対策あり）
（直交する2断面で表示）

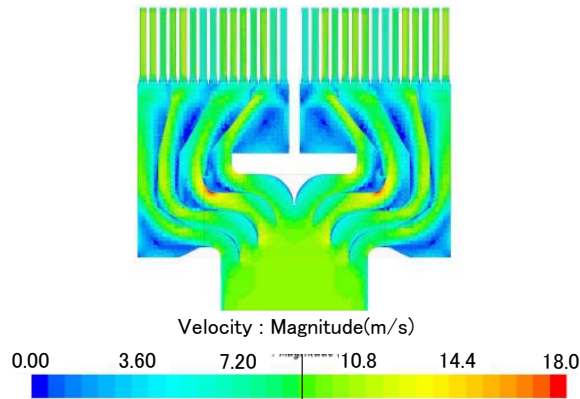


図-5.2.2 換気口中央（A-A断面）における風速分布（風切り音低減対策あり）

換気口出口から上へ1mの位置にある水平断面における鉛直方向の風速の分布を図-5.2.3に示す。風速の分布に格子状のわずかな強弱が見られるのはサイレンサの流路によるものである。

換気口上部の最大風速は風切り音対策前は24m/sであったがこの結果から9m/s以下にまで抑えられていることがわかる。風切り音は風速の6乗に比例するため風切り音による騒音は約25dB低減可能であると言える。なお、換気口における金網から発生する騒音レベルをもとに距離減衰を考慮した20m地点での騒音予測を行ったところ、騒音規制法の特定施設において指定される最も厳しい騒音基準値である40dBを超過する結果となったが金網を通過する風速を24m/sから12m/sへ低減することにより騒音レベルは30dB程度となる。

以上から枝坑の断面拡大による平均風速の低減および換気口における風速の均一化により坑口付近の風切り音が十分なレベルまでに低下するように風速を低減できることが確認できた。

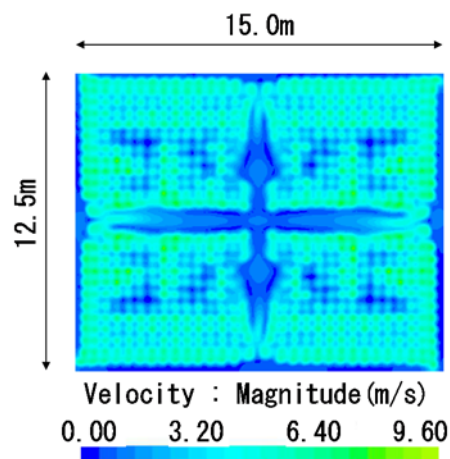


図-5.2.3 換気口出口上部1mにおける風速分布（風切り音低減対策あり）

5.3 枝坑の断面拡大に対する従来型多孔板対策工の効果の検証

枝坑の風切り音を低減できる見通しが得られたことから、次に微気圧波の低減対策について検討した結果を述べる。枝坑における微気圧波低減対策として高橋ら⁴⁾によって多孔板対策工が提案されているが、前節で述べたとおり風切り音対策のために断面を拡大した枝坑においても多孔板対策工が十分な効果を発揮するかどうかを検証する必要がある。そこで枝坑断面の拡大による多孔板対策工の効果および微気圧波への影響を模型実験および数値解析（音響解析）によって検討する。

5.3.1 営業線の多孔板対策工

営業線の非常口の内部には図-5.1.2に示すように階段やエレベーター等の設備や各フロアを支持するための柱を配置する空間的制約から、営業線の多孔板対策工は実スケールで12m×17mの断面として計画されている。風路断面は風切り音の低減を目的として7m×7mの拡大断面を想定している。山梨実験線の枝坑の風路は図-5.1.3の平面図に示すとおりその3面が多孔板を介して吸音層に囲まれる構造としているのに対し、営業線では多孔板の吸音層に曝される面積を最大限確保するために以下の図-5.3.1（左）の平面図に示すとおり枝坑の風路の全面（4面）が多孔板を介し吸音層に囲まれた構造として計画されている。

なお本構造の多孔板対策工では多孔板を介して風路の4面のうちの2面が深さ5mの吸音層、残りの2面が深さ2.5mの吸音層の吸音率で囲まれる。この多孔板対策工の周波数に対する吸音率性能について、2.2.1(2)節に示した手順をもとに吸音層深さ2.5m、5mの1次元モデルの多孔板対策工の吸音率を用いて算出した。本多孔板対策工の吸音率の算出結果を山梨実験線の枝坑内に設置されている多孔板対策工（図-5.1.3に示すとおり3面が深さ5mの吸音層に囲まれた構造）の吸音率の算出結果と比較して示すと図-5.3.1（右）のようになる。山梨実験線の枝坑の多孔板対策工と同様に、微気圧波のような低周波数領域での高い吸音率の発揮が期待できる。

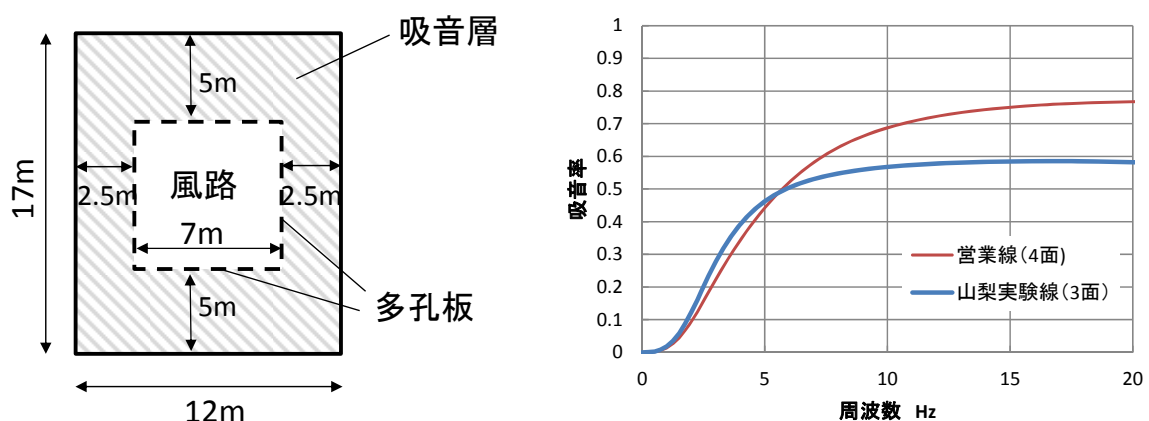


図-5.3.1 営業線の多孔板対策工の平面図（左）と周波数に対する吸音率（右）

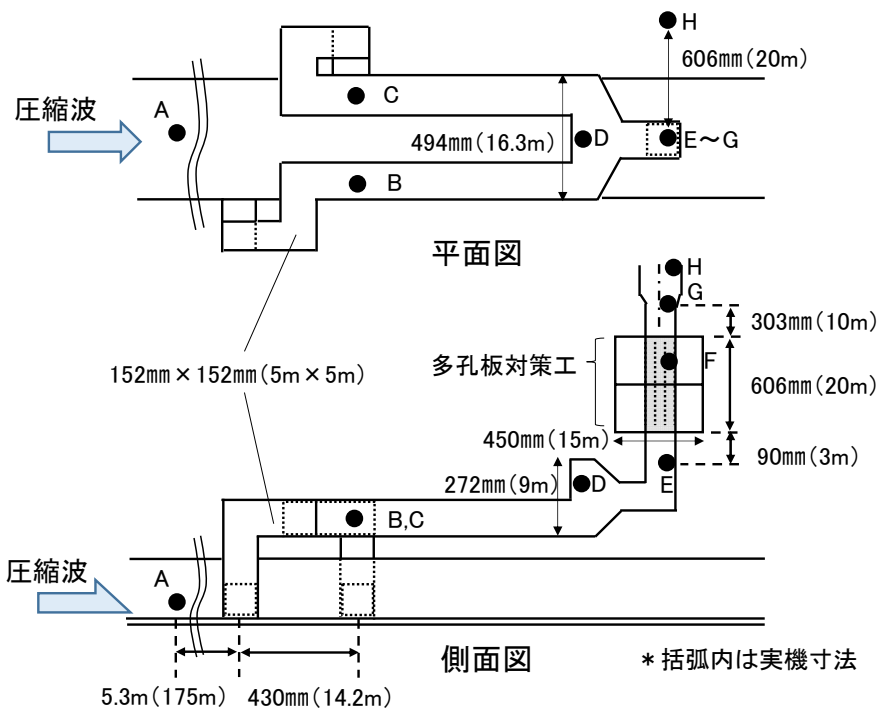
5.3.2 模型実験

(1) 実験概要

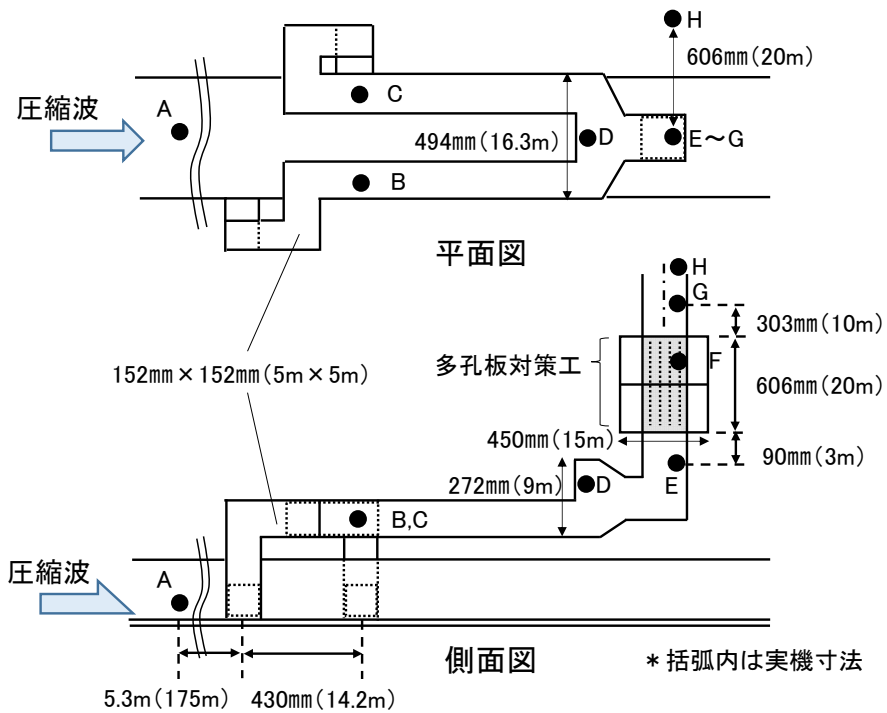
模型実験の概要は 2.2.2(1)節に示したとおりである。枝坑の模型形状と圧力の計測位置を図-5.3.2 に示す。枝坑は実験装置の制約上からトンネル側面から一旦水平に伸びてその後鉛直方向に立ち上がる形態となっている。このように枝坑が途中で曲がっていても圧縮波の波長が枝坑の断面寸法に対して十分に長いので後述のとおり影響が小さいことを確認している。

図-5.3.2 の側面図に示すように多孔板対策工は枝坑の鉛直部分に設置されて枝坑と吸音層の間は多孔板で仕切られている。なお、実物の多孔板に設けられた孔は直径 2mm 程度であるが模型実験で用意する多孔板には 2mm の孔を開けることができないため 5mm としている。Melling の式 6.7)において圧力損失の減衰は開口率に依存していることが示されているため、模型の孔径を 5mm とした場合でも開口率を合わせることで多孔板による減衰の評価が可能である。多孔板に設けられた孔は実物換算周波数で 10 数 Hz 以下の吸音率が高くなるように開口率を 4.5%としている。5.3.1 節で示した営業線の多孔板対策工の諸元をもとに、本実験における多孔板対策工の断面は図-5.3.3 に示すように 362mm×516mm（実スケールの 1/33）の長方形で中心に位置する枝坑風路は断面が正方形で全面（4面）が多孔板を挟んで中空の吸音層に取り囲まれるように設置されるものとしている。また、枝坑に沿う方向の多孔板対策工の長さは高橋ら⁴⁾と同じ 606mm（実スケール 20m）とした。枝坑に入射した圧縮波はこの多孔板対策工を通過して上部出口から周囲に放射される。

本実験では図-5.3.2 に示す A～H 点の計 8 計測点で圧力を同時に計測する。本坑内の枝坑に分岐する直前の A 点では枝坑に入射する前の圧縮波を計測して枝坑入射後の圧縮波を経路に沿って枝坑出口まで計測し、多孔板対策工に関しては通過前の E 点、途中の F 点、通過後の G 点で計測する。これらの計測結果を比較することにより枝坑の断面拡大や多孔板対策工の効果を調べることができる。枝坑坑口から放射される微気圧波は坑口中心から水平方向に 606mm（実スケール 20m）離れた H 点で計測する。A～G 点では圧力計（KULITE XT-190）を用いて H 点では精密騒音計（RION NL31）を用いた。計測データのサンプリング周波数は 12.8kHz とし圧力データ 7 点を用いた最小二乗法による一次近似直線を導出してその直線を時間微分したものを圧力勾配とする。



(a)従来型断面 (5m×5m 断面)



(b)拡大断面 (7m×7m 断面)

図-5.3.2 枝坑の模型形状および計測位置

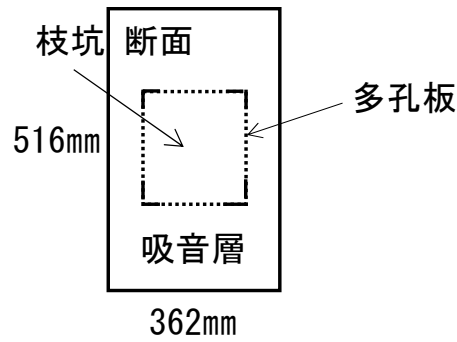


図-5.3.3 多孔対策工および枝坑の断面

模型実験では 5.1 節にて述べたように高橋ら⁴⁾が検討した従来型断面（図-5.1.3）と、風切り音対策を目的とした拡大断面（図-5.3.3）の 2 つの枝坑断面を用いることで枝坑断面の大きさが多孔板対策工の効果に与える影響を調べる。また拡大断面の場合には多孔板対策工の多孔板の幅を従来型断面と拡大断面のそれぞれの辺長に合わせた条件でも実験を行って影響を調べる。以上をまとめると実験条件は表-5.3.1 に示す 3 ケースとなる。

入射させる圧縮波は実際の状況下で最も微気圧波が強くなる状態を想定する。すなわち、実スケール 150m 長の緩衝工が設置されたトンネルに時速 500km で列車が突入してトンネルを伝播する過程で圧力勾配が最も切り立った時の圧縮波²⁾（以下「規準圧縮波」という。）が枝坑直前の A 点を通過するように条件設定する。

表-5.3.1 模型実験の実験条件

	ケース 1	ケース 2	ケース 3
枝坑断面	従来型断面	拡大断面	
枝坑の辺長 [mm]	152	212	
多孔板幅 [mm]	152	152	212

(2) 模型実験の結果

従来型断面のケース1における本坑内のA点，および多孔板通過前のE点，多孔板通過後のG点で計測された圧縮波の圧力勾配の波形を図-5.3.4に示す．圧力勾配は規準圧縮波の圧力勾配で正規化している．圧縮波は本坑内のA点から枝坑内E点へ至るまでに分岐や重畳により波面の回折や位相のずれによって圧力勾配の最大値（図中丸箇所）が減衰する．そしてE点から坑口手前のG点へ至るまでの間に多孔板対策工を通過することによってさらに減衰する．

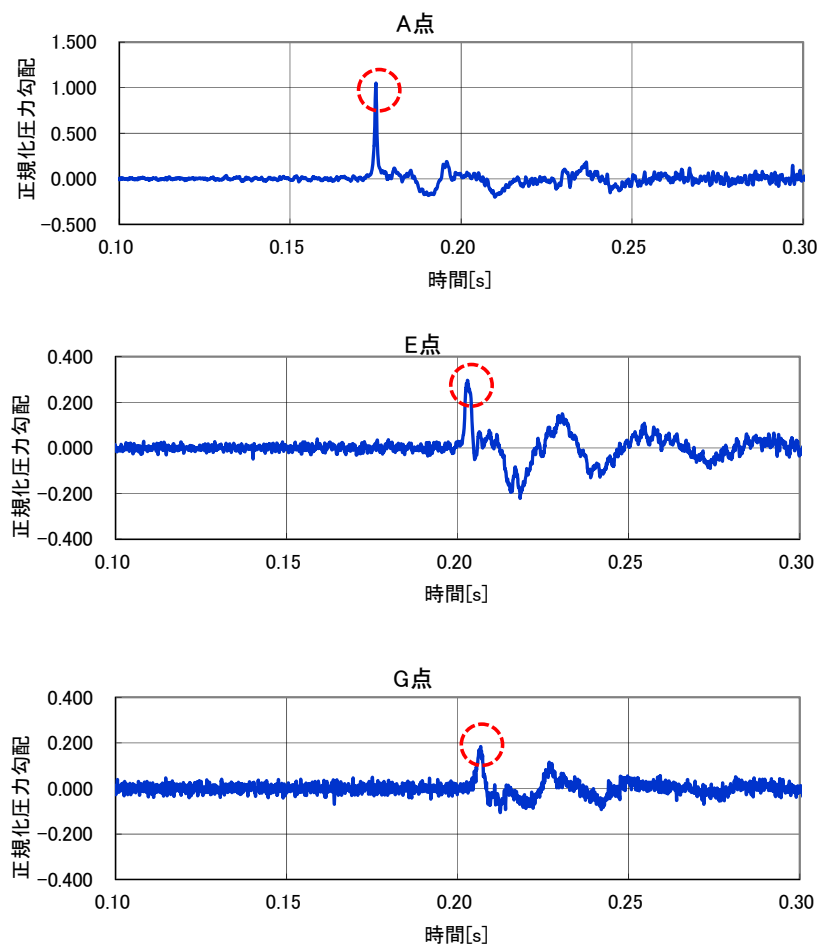


図-5.3.4 ケース1での圧力勾配の波形（規準圧縮波の圧力勾配で正規化）

表-5.3.1に示す各ケースの多孔板対策工の効果を定量的に見るため，多孔板対策工を通過する前と通過した後のE点とG点の圧力勾配の波形を図-5.3.5に示す．また各ケースでの多孔板通過前後の圧力勾配最大値の比率（ $\frac{\partial P}{\partial t}|_G / \frac{\partial P}{\partial t}|_E$ ）をまとめたものを表-5.3.2に示す．従来型断面のケース1では多孔板対策工の通過によって30%程度にまで圧力勾配が減衰するのに対して拡大断面のケース2および3では60%程度にしか減衰しない結果となった．これによ

り拡大断面では多孔板対策工による低減効果が従来型断面に比べてほぼ半減することがわかる。一方、ケース2と3の低減効果に有意な差が見られないことから今回の条件では多孔板の幅の影響は小さいと言える。

断面拡大によって多孔板の効果が小さくなる要因の一つは多孔板の面積に対する吸音層の容積が相対的に小さくなるほど低周波数帯の吸音率が小さくなるためであると考えられる。今回は多孔板対策工全体の断面積が一定であるため、枝坑断面の拡大により吸音層の容積が縮小するので多孔板の面積に対する吸音層の容積の割合が小さくなり吸音率が小さくなったと考えられる。他の要因としては、風路となる枝坑内を流れるエネルギー量は枝坑の断面積に比例し吸音される量は多孔板の周長に比例することから、同じエネルギー量に対して吸音される量は枝坑の断面積に対する多孔板の周長に比例する⁸⁾ので、枝坑の断面を拡大すると吸音量が小さくなるためと考えられる。

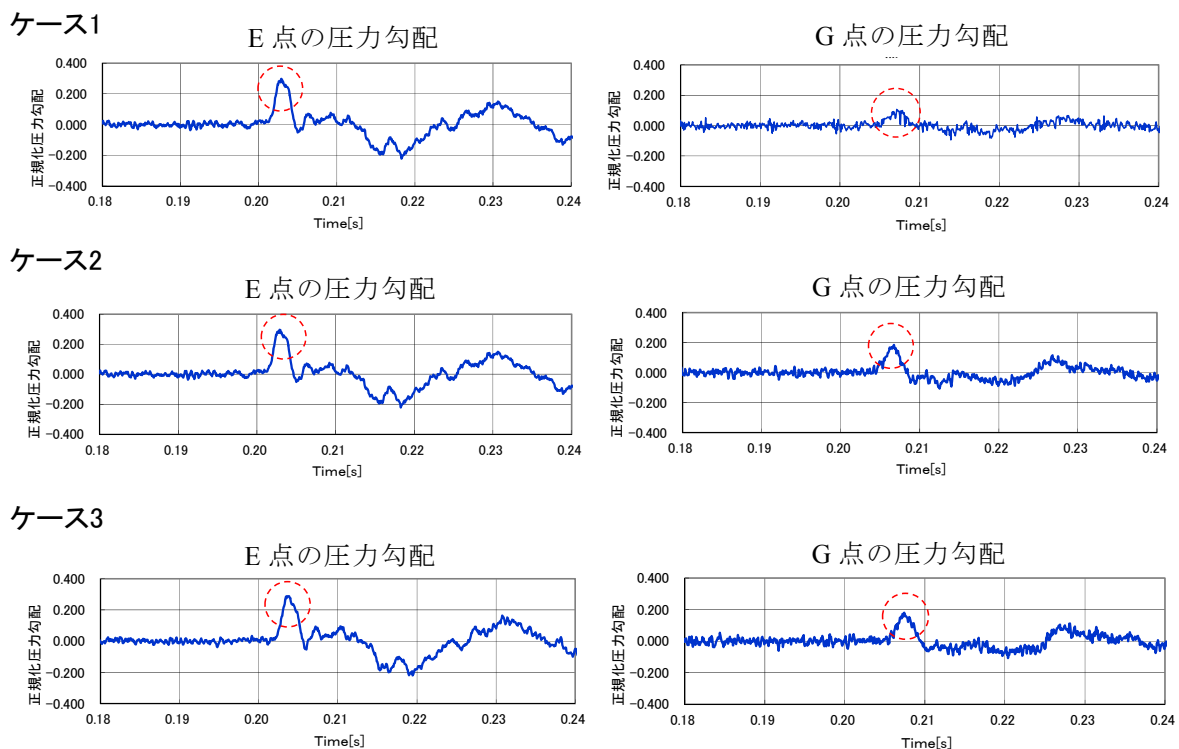


図-5.3.5 E点（多孔板通過前：左），G点（多孔板通過後：右）の圧力勾配
（規準圧縮波の圧力勾配で正規化）

表-5.3.2 各ケースにおける多孔板通過前後の圧力勾配最大値の比率 $(\frac{\partial P}{\partial t}|_G / \frac{\partial P}{\partial t}|_E)$

	ケース 1	ケース 2	ケース 3
枝坑断面 (辺長[mm])	従来型断面 (152)	拡大断面 (212)	
多孔板幅	152	152	212
比率	0.31	0.62	0.63

なお、多孔板対策工には通過する圧力波の圧力値が低くなると低周波数帯の吸音率が低減するという特性があつて^{6,7)}吸音率低減の要因になりうるため、枝坑の断面の拡大による圧力値の低下が原因ではないかと考えて断面の拡大に伴う圧力値の比較を行った。図-5.3.6に従来型断面のケース1と枝坑の断面を拡大したケース2、3の計測点B点から多孔板通過直前のE点、多孔板通過中のF点、通過後のG点について大気圧で正規化した圧力波形と規準圧縮波の圧力勾配で正規化した圧力勾配波形を示す。

多孔板対策工を通過する直前のE点の圧力値の比較から今回の実験においては枝坑の断面を拡大した場合でも枝坑内の圧力は多少小さい程度であり低周波数帯の吸音率の低減への影響は小さいと考えられる。今回の実験において枝坑の断面を拡大しても圧力が大きく変化しなかった理由について考察する。平面波であれば断面の拡大に伴い圧力が小さくなると想定されるが、今回の実験においては図-5.3.6(a)に示すとおりD点（合流部）やそれに近いE点の圧力値は断面積に応じて小さくなっていない。実験模型における本坑から多孔板対策工に至る部分の形状は図-5.3.2に示すとおり本坑と枝坑の接続部は2箇所としている。営業線において本坑と枝坑の接続部には第2章の図-2.4.7に示す位置に換気ダンパを設置する計画であるが、換気ダンパが設置される本坑から枝坑への接続箇所が1箇所のみ場合は換気ダンパおよび設置するための枝坑が構造上相当大きなものになってしまう。換気ダンパおよび枝坑の大きさを妥当なものとするため、換気ダンパが設置される本坑と枝坑の接続箇所を2箇所として本坑から枝坑に分岐した後に同じタイミングで合流部（図-5.3.6に示すD点）に到達して圧縮波の重畳により振幅が大きくなってしまふのを回避する目的で線路方向に経路差を設けている。この構造により枝坑の合流部はいびつな形状となっている。合流部の断面積（実スケールで16.3m×9m）と微気圧波の主成分となる10Hz以下の波長（34m（=音速約340m/s/10Hz）以上）との比較から、合流部の空間が微気圧波の半波長と比較して大きいために合流部の形状の影響を受けていると考えられる。さらに突入波が位相差を持って合流部に進入するために散乱や干渉の影響も受けており平面波となっていない。以上が、先述のD点（合流部）やE点（多孔板対策工の通過直前）の圧力値が断面を2倍に拡大しても半分程度には減少していないことの要因と考えられる。一方、F点（多孔板対策工の途中）やG点（通過後）では枝坑の断面が微気圧波の半波長と比べて小さいために一様な流れの平面波になっていると考えられる。多孔板対策工を通過する直前のE点の圧力は従来型断面より拡大断面の方が小さいが、多孔板対策工の途中あるいは通過後であるF点からG点に移るにつれて全体的な圧力は低下していくものの低下の度合は拡大断面の方が従来型断面と比較して小さくなっている。一方、圧力勾配はE点では従来型断面の方が大きいものの多孔板を通過中や通過後のF点やG点においては従来型断面の方が小さいことがわかる。これは前述した多孔板対策工を通過する圧力波の圧力値が低くなると低周波数帯の吸音率が低減するという特性^{6,7)}によるものであり、拡大断面の方が多孔板対策工の低減効果が小さい理由と考えられる。

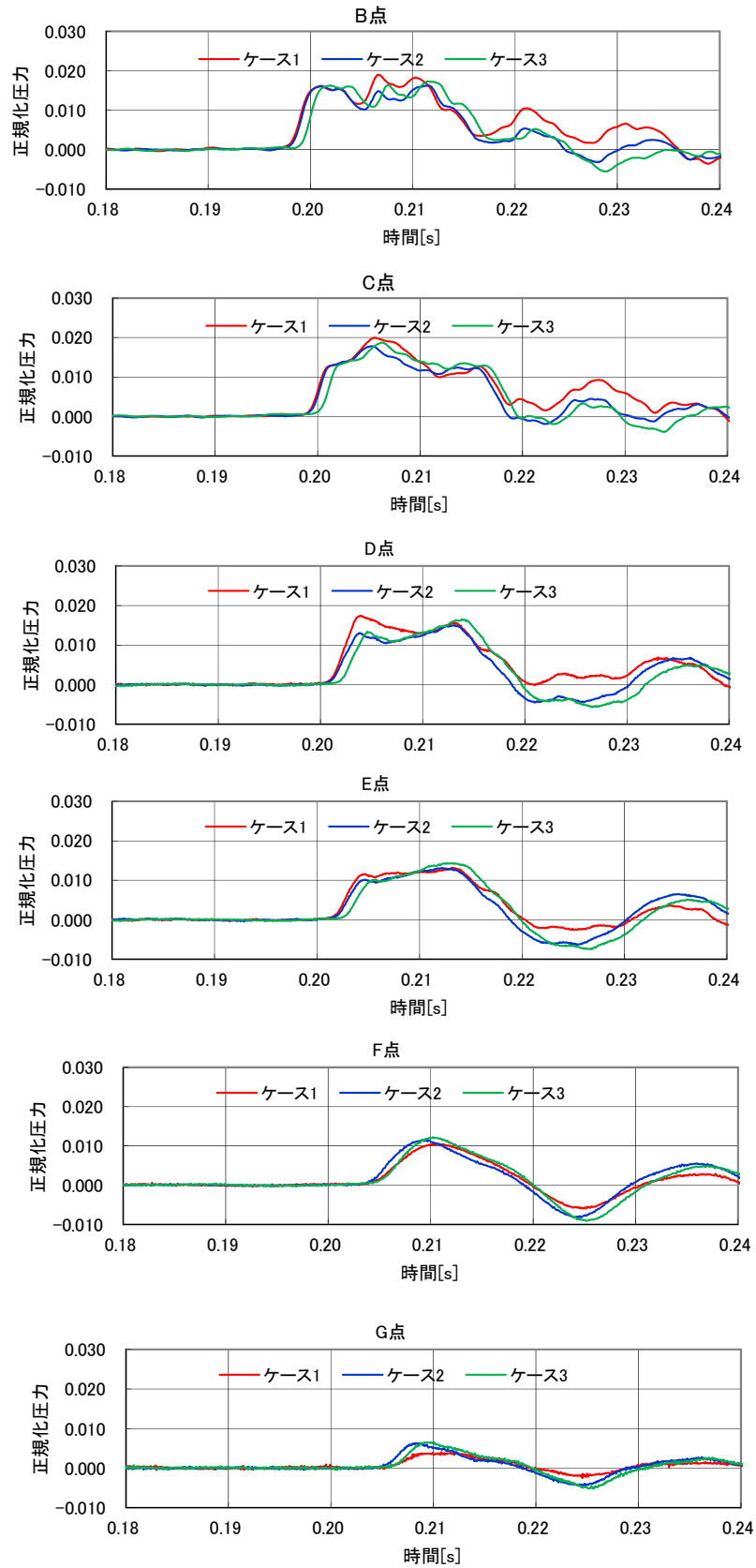


図-5.3.6(a) 各計測点 (B点からG点) における各ケースの圧力波形 (大気圧で正規化)

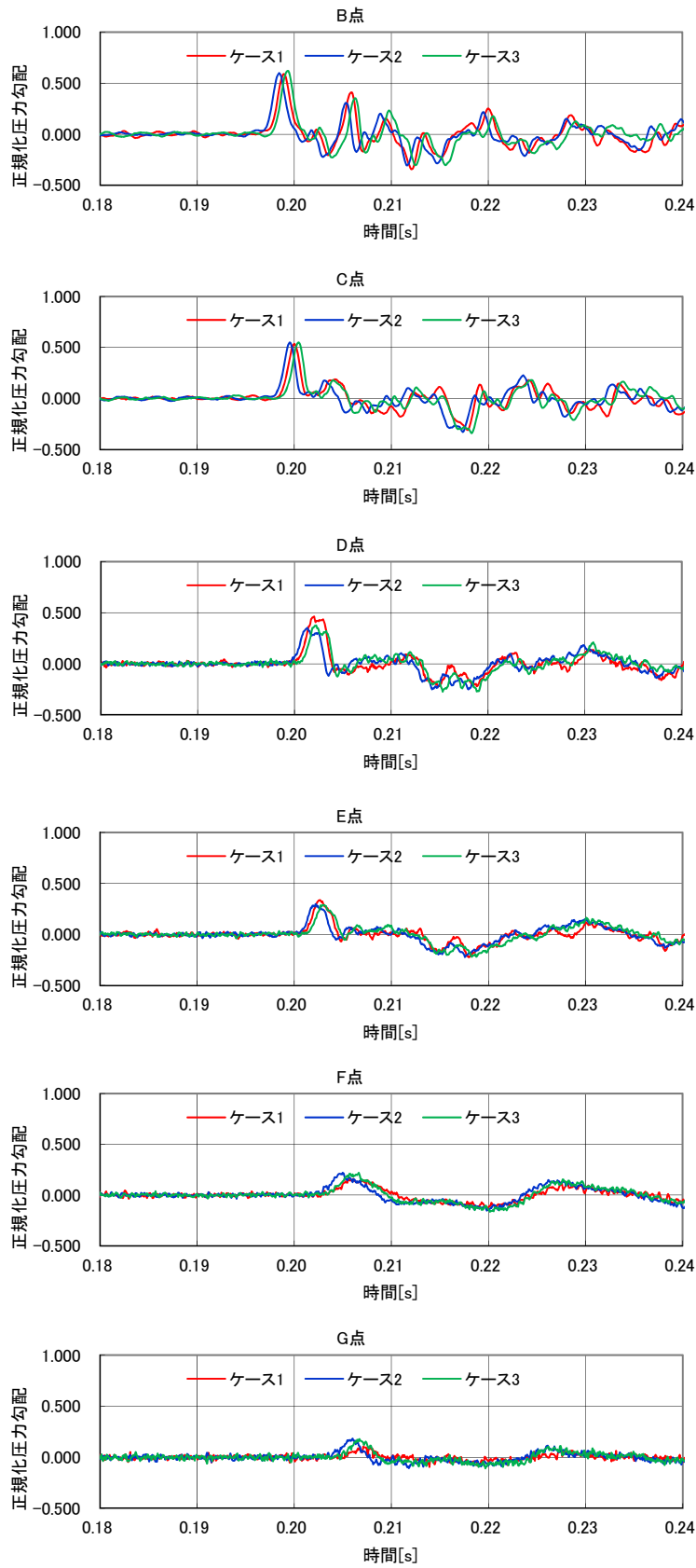


図-5.3.6(b) 各計測点 (B点からG点) における圧力勾配波形 (規準圧縮波の圧力勾配で正規化)

各ケースにおける坑口の外のH点で計測した微気圧波の波形を図-5.3.7に示す。圧力値は実スケール20m地点の微気圧波基準値である50Pa⁹⁾で正規化している。微気圧波が計測点H点に到達する時刻は約0.21s（図中赤い破線の丸の箇所）である。拡大断面のケース2，ケース3の微気圧波の値はそれぞれケース1の1.62倍，1.45倍になっており微気圧波が従来型枝坑と比較して大きくなって悪化する結果となった。これは前述したとおり断面拡大により背後空気層のエリアが縮小することなどの要因によって多孔板対策工の効果が弱まるためと推察される。

表-5.3.3にE点，F点，G点の圧力勾配およびH点の微気圧波についてケース2およびケース3のケース1に対する比率を示す。G点におけるケース1に対する圧力勾配の比率はケース2で1.74，ケース3で1.70となっている。微気圧波は圧縮波の放射直前の圧力勾配に比例するためH点で計測したケース2，ケース3における微気圧波のケース1の微気圧波に対する比率はG点の圧力勾配の比率と同じ程度になると予測されたが，H点におけるケース1に対する微気圧波の比率は前述のとおりケース2で1.62，ケース3で1.45であり予測と異なる結果となった。ケース3ではノイズの影響によりG点とH点の比率が異なると推測されるがケース2で予測と結果が異なった原因は不明である。

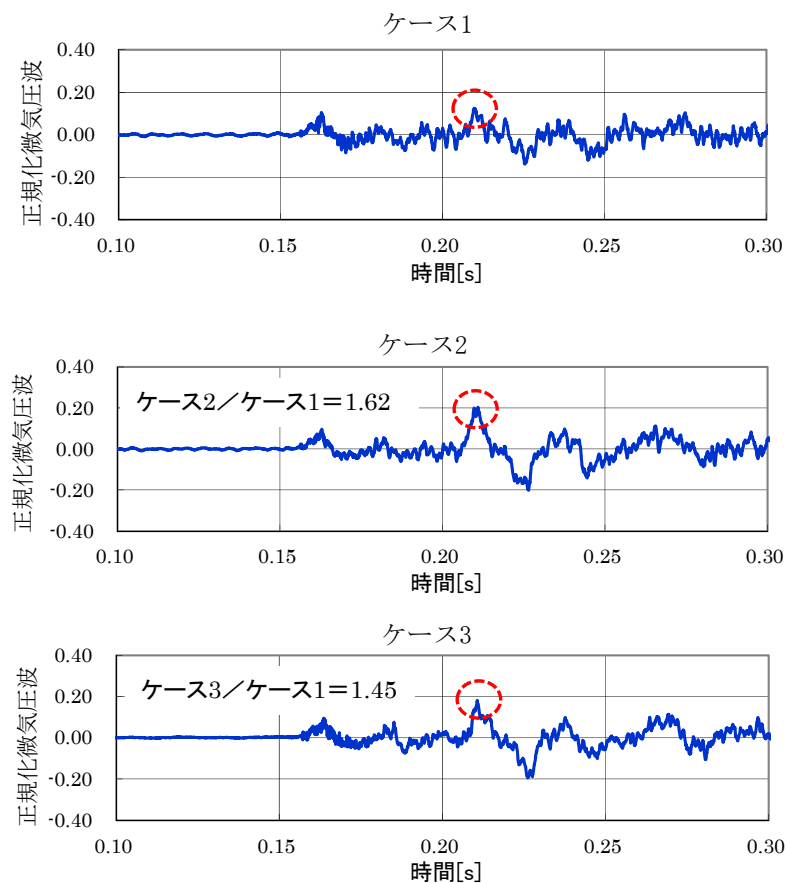


図-5.3.7 各ケースにおけるH点の微気圧波波形

表-5.3.3 E点, F点, G点の圧力勾配およびH点の微気圧波における
ケース2とケース3のケース1に対する比率

		ケース 1	ケース 2	ケース 3
枝坑断面 (辺長[mm])		従来型断面 (152)	拡大断面 (212)	
多孔板幅[mm]		152	152	212
圧力勾配	E 点	1.00 (規準)	0.88	0.85
	F 点	1.00 (規準)	1.39	1.39
	G 点	1.00 (規準)	1.74	1.70
微気圧波	H 点	1.00 (規準)	1.62	1.45

5.3.3 音響解析による微気圧波の検討

(1) 音響解析による微気圧波予測の概要

次に多孔板対策工による圧力勾配の低減効果について圧力波の周波数による影響を把握するために模型実験と同様の状況を数値的に再現する。本検討ではまず周波数の異なる入力波を多孔板対策工に通過させて多孔板対策工通過後の圧力値をもとに各周波数ごとの圧力低減量を求め圧力低減率を算出する。次に多孔板対策工を有する領域の入口に入力する時間波形を高速フーリエ変換して入口波形の周波数特性を計算し、入口波形に境界要素法により求めた圧力低減率を掛け合わせることで多孔板対策工を有する領域の出口における波形の周波数特性を計算する。出口側の周波数特性を逆高速フーリエ変換して出口側波形の周波数特性を計算し、最後に出口側の波形を時間微分して圧力勾配を得る。微気圧波が放射直前の圧力勾配に比例することからこの圧力勾配の値をもって微気圧波の評価を行う。

(2) 解析条件および解析モデルの形状

従来型断面と拡大断面の枝坑を対象にして多孔板対策工を設置した場合と設置しない場合の双方について解析を行う。多孔板対策工を有する領域による圧力低減量は多孔板対策工を含む枝坑内部の音場を境界要素法によって波動方程式を解き得られた周波数特性をもとに算出する。

図-5.3.8に解析モデルの形状を示す。解析は多孔板対策工による圧力低減量を求めることを目的としているため解析領域は多孔板対策工と前後の領域のみを対象とする。多孔板対策工の寸法（長さ20m）と枝坑との位置関係は実物と同じである。ただし、入出力境界における条件を従来型断面と拡大断面の場合とで同一にするため従来型断面の枝坑の出入口部分のみ拡大断面と同じ寸法にした。そのため従来型断面の解析形状は出入口部分にそれぞれ高さ10mの断面拡大部が設けられている。多孔板対策工の多孔板の幅は前節の実験条件と同様に多孔板幅5mの場合に加えて拡大断面については幅7mの場合についても検討した。表-5.3.4に解析ケースをまとめる。

境界要素法による音響解析においては要素幅を波長の1/10～1/6程度以下とすれば精度よく計算できることから、微気圧波の低周波数領域を考慮に入れ枝坑内部の風路および多孔板対策工周囲の音場の要素幅は500mmとした。多孔板は2.2.1(2)節の式(2-3)～式(2-5)で示す伝達行列式で表現される伝達要素とし、吸音層の深さは多孔板と多孔板対策工周囲との離隔として設定した。対象とする周波数は0.5Hzから200Hzまで0.5Hz刻みとした。図-5.3.8に示すとおり、対象とする解析モデルは鉛直方向に対して軸対象であることから計算時間の節約を目的として解析領域はモデルの4分の1の領域のみを計算対象とした。

本解析では吸音過程に音圧依存性があるのを前提としているため、境界条件については枝坑入口では圧力波振幅 P_I が対大気圧相当で0.01となる粒子速度 $u_I = P_I/\rho c = 2.45\text{m/s}$ で全面一様加振境界とし、入力する圧力波は圧力値が圧力波の振幅 P_I に設定した対大気圧相当0.01となるまでの範囲で一定の圧力勾配をもって変化するものとした。また枝坑出口における音響インピーダンスは無反射端として設定した。

なお解析で模擬する多孔板は実際多孔板の仕様である板厚2mm，孔径2mm，開口率4.5%と設定した。

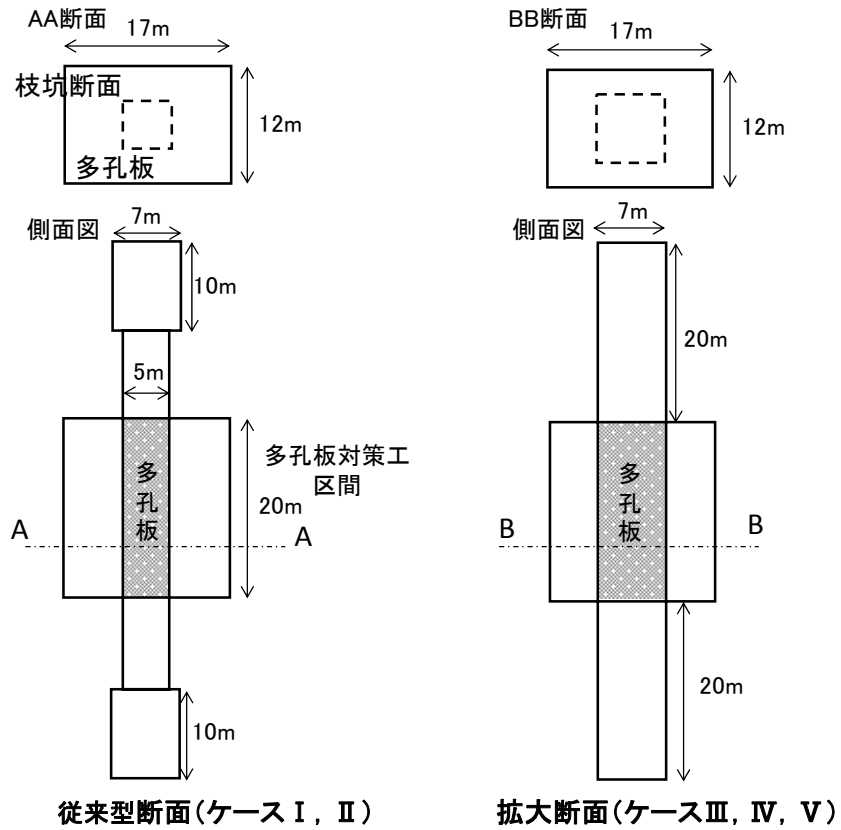


図-5.3.8 枝坑多孔板対策工の解析モデルの形状

表-5.3.4 解析ケース

	ケース I	ケース II	ケース III	ケース IV	ケース V
枝坑断面	従来型断面		拡大断面		
枝坑の辺長	5m		7m		
多孔板幅	多孔板なし	5m	多孔板なし	5m	7m

(3) 解析結果

圧力波の多孔板通過による周波数ごとの圧力低減量を枝坑の入口と出口における音圧レベル差として図-5.3.9に示す。ケースⅢでは枝坑が単なるダクトとなるため入口と出口での音圧レベル差はゼロとなるがケースⅠでは図-5.3.8に示したような枝坑出入口部分の断面積変化によるものと推測される微小な変動のみが生じている。多孔板対策工を設置した場合に従来型断面のケースⅡが最も大きな低減効果を示している。特に微気圧波の主成分となる10Hz以下の周波数帯においては従来型断面のケースⅡは拡大断面で多孔板対策工を設置したケースⅣ,Ⅴより音圧レベル差で最大2倍程度の低減効果になっている。また同じ拡大断面のケースⅣとケースⅤでは同程度の音圧レベル差となっており多孔板幅の違いは低減効果にほとんど影響しないと考えられる。

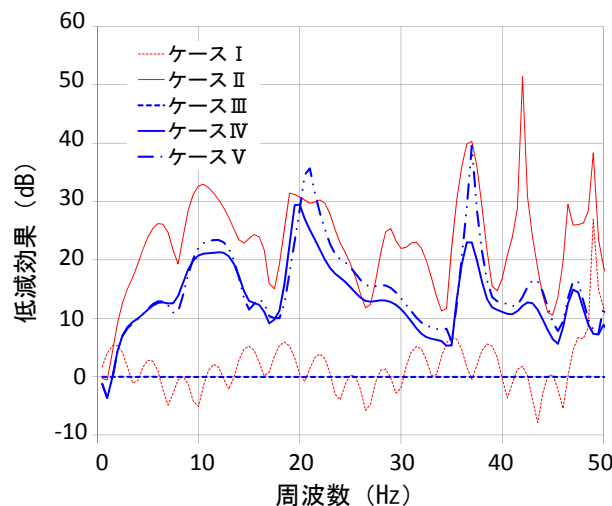


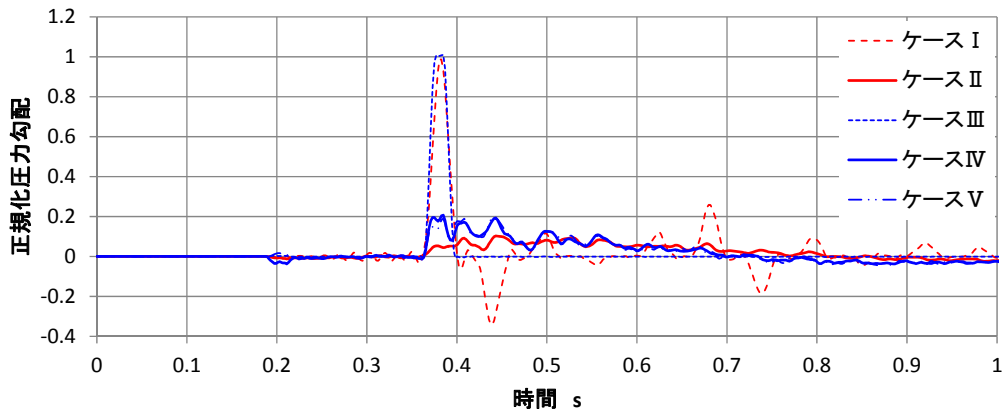
図-5.3.9 解析での枝坑の入口と出口の音圧レベル差（周波数毎の低減効果）

入力する圧力波の圧力勾配が規準圧縮波の圧力勾配の場合を多孔板がない場合（ケースⅠ，Ⅲ）と比較するとケースⅡとⅣでは多孔板設置の効果によって圧力勾配がそれぞれケースⅠの0.10，0.21倍と大きく減少した。多孔板対策工を通過した後には拡大断面（ケースⅣ）では従来型断面（ケースⅡ）よりも最大圧力勾配が約2倍程度まで大きい結果となった。

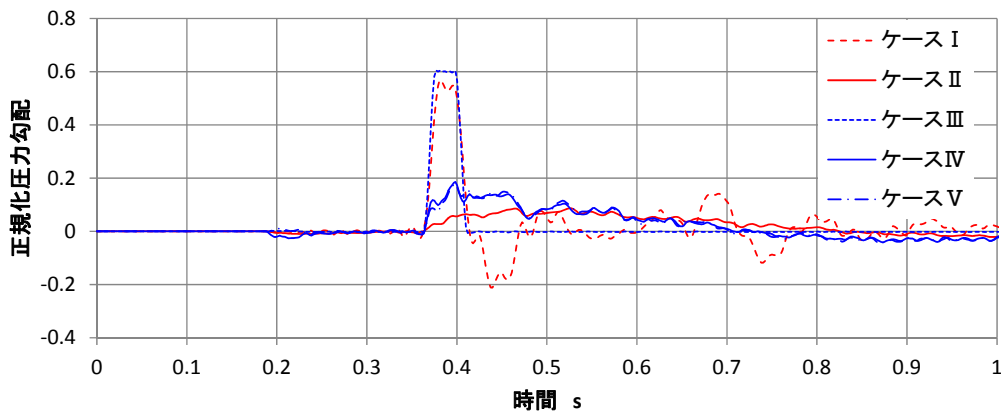
一方、模型実験では表-5.3.2の結果に示すように多孔板を通過する前に対する多孔板対策工を通過した後の圧力勾配最大値の比率は拡大断面で約60%で従来型断面では約30%と約2倍になっており音響解析の結果における拡大断面と従来型断面での圧力勾配の比率（約2倍）は模型実験での最大圧力勾配の比率と一致している。ただし絶対値は大きく異なっており、圧力波の周波数の違いが要因と考えて分析を行う。

入力する圧力波の圧力勾配を規準圧縮波の圧力勾配のほかにその60%，20%となる計3ケースを設定して同様の音響解析を行い比較した。各ケースにおける多孔板対策工を通過した後の圧力波形を図-5.3.10に示す。なおグラフの縦軸は規準圧縮波の圧力勾配で正規化している。

(i) 規準圧縮波の圧力勾配を入力した場合



(ii) 規準圧縮波の60%の圧力勾配を入力した場合



(iii) 規準圧縮波の20%の圧力勾配を入力した場合

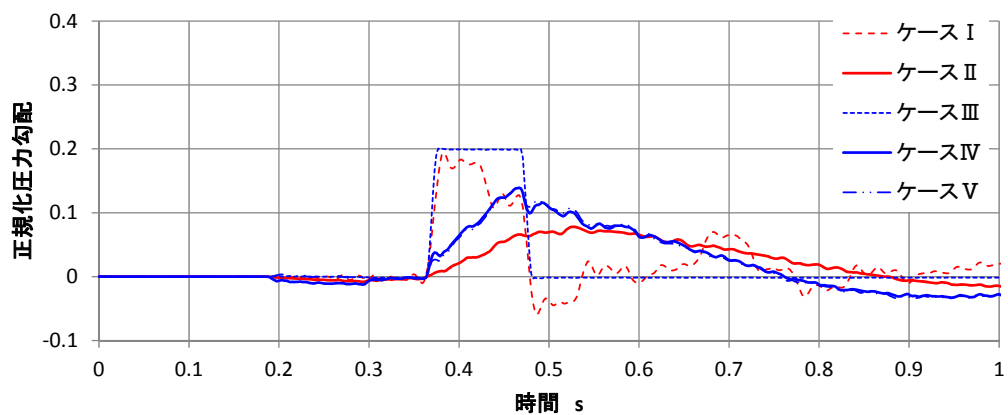


図-5.3.10 音響解析による多孔板対策工通過後の圧力勾配の波形
 (規準圧縮波の圧力勾配に対する圧力勾配の入力値：
 上段100%，中段60%，下段20%)

また図-5.3.10の結果をもとに各入力圧力波に対して多孔板対策工の通過による圧力低減効果を把握するために多孔板対策工がないケースⅠやケースⅢを基準として各ケースの多孔板対策工を通過した後の圧力勾配最大値の圧力勾配の入力値に対する低減比率

$(\frac{\partial P}{\partial t}|_{\text{多孔板通過後}} / \frac{\partial P}{\partial t}|_{\text{入力}})$ をまとめたものを表-5.3.5に示す。

表-5.3.5 解析による多孔板対策工通過後の圧力勾配最大値の
圧力勾配入力値に対する低減率

		ケースⅠ	ケースⅡ	ケースⅢ	ケースⅣ	ケースⅤ
枝坑断面		従来型断面		拡大断面		
枝坑の辺長		5m		7m		
多孔板幅		多孔板なし	5m	多孔板なし	5m	7m
入力波形の 圧力勾配 ^{※1}	20%	—	0.40 ^{※2}	—	0.69 ^{※3}	0.69 ^{※3}
	60%	—	0.15 ^{※2}	—	0.31 ^{※3}	0.30 ^{※3}
	100%	—	0.10 ^{※2}	—	0.21 ^{※3}	0.20 ^{※3}

※1：規準圧縮波の圧力勾配で正規化

※2：ケースⅠに対する割合

※3：ケースⅢに対する割合

表-5.3.5から圧力勾配の入力値が大きいほど枝坑断面や多孔板幅に関わらず多孔板による圧力勾配の低減効果が大きいことがわかる。本音響解析において入力する圧力波の振幅値 P_I は対大気圧相当0.01で一定であり，入力する圧力波は圧力値が圧力波の振幅 P_I となるまでの範囲で一定の圧力勾配をもって変化するものとしたため，以下の図-5.3.11に示すイメージのとおり入力圧力勾配は最大圧力値をその圧力値までの上昇にかかる時間（周期 T の $1/4$ ）

で除したものになる。このため圧力波の周波数の主成分 $f[\text{Hz}=1/\text{s}]$ と入力圧力勾配 $\frac{\partial P}{\partial t}|_{\text{入力}}$ との関係は以下の式(5-1)のようになる。したがって入力圧力勾配のケース毎に圧力波の周波数成分 f が異なることが原因であると考えられる。

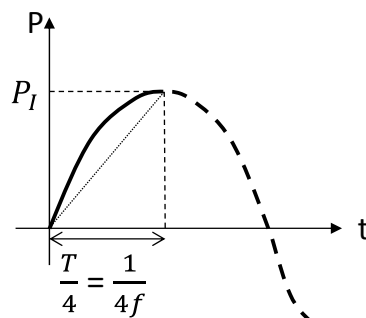


図-5.3.11 入力圧力勾配 $\frac{\partial P}{\partial t}|_{\text{入力}}$ のイメージ

$$f = 4 \left. \frac{\partial P}{\partial t} \right|_{\text{入力}} \div P_I \quad (5-1)$$

入力圧力勾配が大きいほど高周波数までの周波数成分を含み、周波数が大きくなれば（すなわち $\omega = 2\pi f$ により角速度が増大すれば）2.2.1(2)節の式(2-4)によって多孔板の減衰を表す Γ の実部（ $Re[\Gamma]$ ）が大きくなり多孔板対策工による圧力勾配の低減も大きくなる．本音響解析によって多孔板対策工の各ケース（表-5.3.5のケースⅡ，Ⅳ，Ⅴ）について圧力勾配の入力値に対する多孔板対策工通過後の圧力勾配を算出しプロットしたものを図-5.3.12に示す．圧力勾配の入力値が大きいほど多孔板対策工による圧力勾配の低減が大きくなっていることがわかる．

一方，模型実験の場合は多孔板対策工へ流入する圧力波の圧力勾配は図-5.3.6（b）のE点の圧縮勾配に見られるように規準圧縮波の圧力勾配に対してケース1では約34%，ケース2では約30%，ケース3では約29%であった．これらを多孔板対策工への圧力波の入力値として図-5.3.12の曲線で多孔板対策工通過による低減効果を求めて模型実験で得られた低減効果と比較すると表-5.3.6のようになるので，音響解析によって得られた多孔板対策工の通過による圧力勾配の低減の割合は表-5.3.2に示した模型実験における多孔板対策工通過後の圧力勾配の低減割合の結果と概ね一致していると言える．

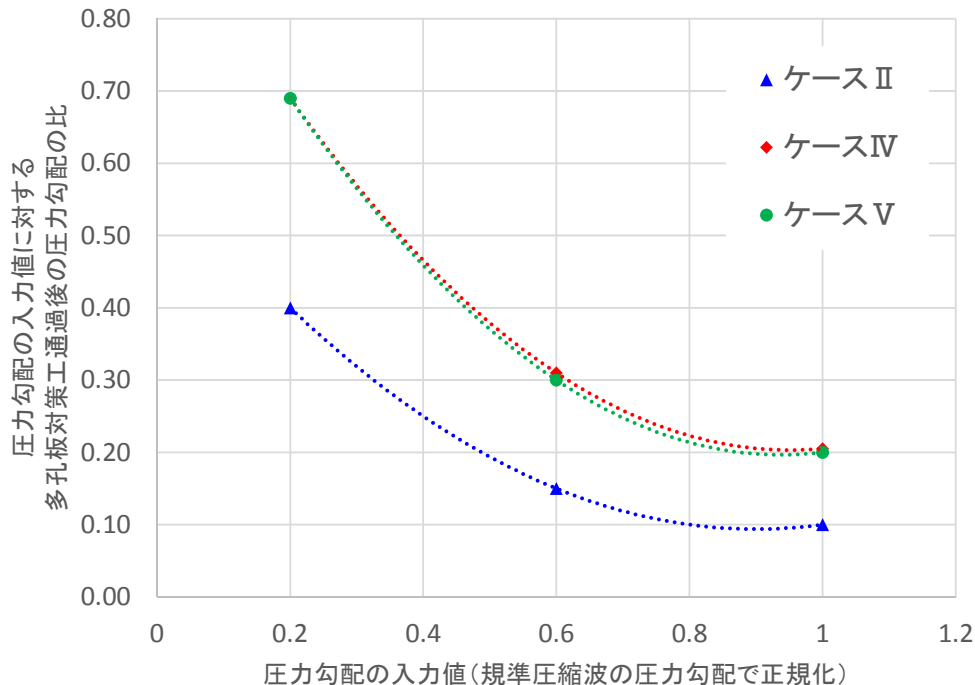


図-5.3.12 多孔板対策工への圧力波の圧力勾配の入力値と多孔板対策工通過後の圧力勾配の関係

表-5.3.6 模型実験と音響解析による多孔板対策工通過に伴う圧力勾配の低減効果

	模型実験 ケース	音響解析 ケース	入力圧力勾配 模型実験E点※	図-5.3.12曲線 による低減率	模型実験に よる低減率
従来型断面 多孔板幅5m	ケース1	ケースⅡ	0.34	0.29	0.31
拡大断面 多孔板幅5m	ケース2	ケースⅣ	0.30	0.57	0.62
拡大断面 多孔板幅7m	ケース3	ケースⅤ	0.29	0.58	0.63

※規準圧縮波の圧力勾配で正規化

次に解析モデルの出口側の圧力勾配値でもって断面拡大による圧力勾配への影響を把握しあわせて模型実験との比較を行う。比較する模型実験の圧力勾配の結果は表-5.3.3において多孔板対策工を通過して坑口付近に位置するG点の圧力勾配の最大値である。模型実験の結果も音響解析の結果もとともにそれぞれの手法によって得られる従来型断面の多孔板対策工を通過した出口側の圧力勾配（模型実験：ケース1のG点における最大値，音響解析：ケースⅡの出口での値）に対する拡大断面の多孔板対策工を通過した出口側の圧力勾配（模型実験：ケース2，3のG点における最大値，音響解析：ケースⅣ，Ⅴの出口での値）の比率で評価しており結果を表-5.3.7に示す。

模型実験および音響解析の結果から枝坑の断面を2倍に拡大することにより出口における圧力勾配の最大値は1.7～2.0倍程度となることがわかった。微気圧波は放射直前の圧縮波の圧力勾配に比例することから断面拡大により坑口付近の微気圧波も1.7倍～2.0倍程度に増大するものと予測される。なお模型実験および音響解析の結果からは多孔板の幅は圧力勾配の増大にはあまり影響を与えないことも把握できた。

なお、図-5.3.12において同じレベルの圧力勾配の値を入力した場合の多孔板対策工通過前後の圧力勾配の比率（後／前）は断面の拡大によって圧力勾配の入力値が規準圧縮波の圧力勾配レベルで約半分に低下し規準圧縮波の20%の圧力勾配レベルで約60%に低下する。断面の拡大による出口付近の圧縮勾配の増大に関してはこれらの逆数をとることによって圧力勾配の入力値が規準圧縮波レベルで約2倍となるが規準圧縮波の20%の圧力勾配レベルでは約1.7倍に抑えられることがわかる。表-5.3.3の多孔板対策工を通過する前であるE点の圧力勾配のデータは断面の拡大により圧力勾配が12%～15%程度低下しているので拡大断面により圧力勾配の入力値の低下を図ることができることは坑口で発生する微気圧波の増大をなるべく抑える観点からも有利に働いていると言える。

表-5.3.7 模型実験と音響解析による出口付近の圧力勾配の比率の比較

拡大断面	模型実験		音響解析	
多孔板幅5m	ケース2／ケース1	1.74	ケースⅣ／ケースⅡ	1.97
多孔板幅7m	ケース3／ケース1	1.70	ケースⅤ／ケースⅡ	2.00

5.3.4 模型実験と音響解析の結果のまとめ

5.3.2 節および 5.3.3 節において、風切り音低減を目的として風速を低く抑えるために枝坑の断面を拡大した場合の多孔板対策工の効果および微気圧波へ与える影響について模型実験および音響解析により検討した。その結果を以下のとおりまとめる。

- ・ 模型実験においても音響解析においても、枝坑の断面の拡大によって圧力波が多孔板対策工を通過することに伴う圧力勾配の低減効果は従来型断面と比較してほぼ半減することが判明した。
- ・ これは断面を拡大したことにより多孔板対策工内の背後吸音層のエリアが縮小して多孔板対策工の効果が低減したためである。
- ・ 断面の拡大によって多孔板対策工による圧力勾配の低減効果が低下することから多孔板対策工を通過した後の枝坑坑口における圧力勾配は断面を拡大しない場合と比較して約 1.7 倍～2.0 倍となる。音響解析と模型実験では圧力勾配の増大率に 1 割程度の差異があったのは模型実験では圧力波が含んでいる様々な圧力勾配のうちの最大値を代表値として検討を実施したのに対して音響解析では低減率の分析を行うための圧力波の圧力勾配は一定とする前提としたことが原因と考えられる。
- ・ 微気圧波は放射直前の圧縮波の圧力勾配に比例することから枝坑の断面拡大により坑口付近での微気圧波の大きさも約 1.7 倍～2.0 倍になると考えられる。なお断面拡大時の模型実験による坑口付近での微気圧波の測定結果は拡大前と比較して約 1.5 倍～1.6 倍となり上述の予測と比較して若干増大が小さくなったが理由は不明である。
- ・ 音響解析において圧力波の周波数が多孔板対策工による圧力勾配の低減効果に与える影響について検討を行った結果、入力波の周波数が高いほど多孔板対策工を通過した後に圧縮勾配の低減がより高くなった。圧力波の圧力勾配と周波数の関係を把握することによって多孔板対策工に入力する圧力勾配から多孔板対策工による低減効果を予測することが可能である。

5.4 枝坑内付帯設備の微気圧波の低減効果

前節までの検討から、風切り音低減を目的とし風速を低く抑えるため風路となる枝坑断面を拡大したことにより多孔板対策工内の背後吸音層のエリアが縮小して多孔板対策工の効果が低減するため微気圧波が増大することが模型実験および数値解析で明らかになった。しかし、図-5.1.2に示すように枝坑には多孔板対策工を増大するための空間的余裕がないため追加の措置が必要となる。そこで枝坑内の付帯設備を多孔板対策工と組み合わせることにより微気圧波を低減させて基準値内に収めることを試みる。このため模型実験により個々の付帯設備による微気圧波低減効果を評価する。

5.4.1 模型実験で考慮した枝坑の付帯設備

山梨実験線の枝坑を模擬した実験模型を図-5.4.1に示す。多孔板対策工のほかに微気圧波を低減させるための付帯設備として換気ファンおよびサイレンサを考慮した。模型実験の幾何縮尺は実スケールの1/33であり、換気ファン、サイレンサそれぞれの形状を内部構造に至るまで再現して微気圧波の減衰に影響する有効開口率（風路面積／設備設置面積）も実物と模型とで一致させた。

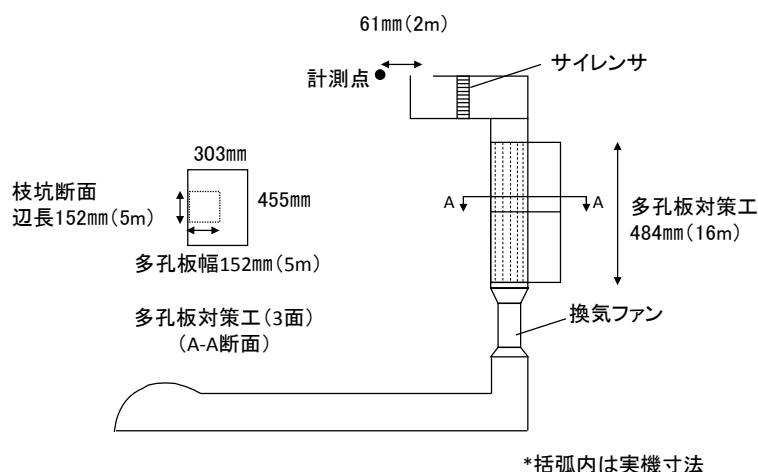


図-5.4.1 枝坑（実験線）を模擬した実験模型

実物の換気ファンは換気風量が毎秒300m³で風路となる動翼部の有効開口率は40%である。図-5.4.2に換気ファンの実験模型の形状を示す。換気ファン内部の風路の形状は微気圧波の減衰に影響するため動翼や電動機なども含めて忠実に再現し有効開口率も一致させた。

サイレンサは換気ファンの機械騒音を低減するためのものである。実物では筒状の風路の内部に吸音材が収められて内側の風路に接する面はパンチングメタルで構成される吸音構造となっている。図-5.4.3にサイレンサの実験模型の形状を示す。各風路の入口は実物を模擬してテーパ状に加工しているが、サイレンサの実物で用いられる吸音材は微気圧波の主成分である低周波数帯では効果がないため模型では模擬しない。サイレンサ内の有効開口率は実物と合わせて35%とした。

これら付帯設備の模型実験は営業線ではなく実験線の枝坑を模擬した既設の模型を用いたため従来型断面の枝坑で実験を行った。なお低周波数帯が主成分となる微気圧波の低減効果は付帯設備内の風路の形状と有効開口率が支配的であり枝坑断面積の大きさそのものの影響は軽微である。したがって従来型断面を用いても拡大断面を用いた場合と同等の結果が得られる。

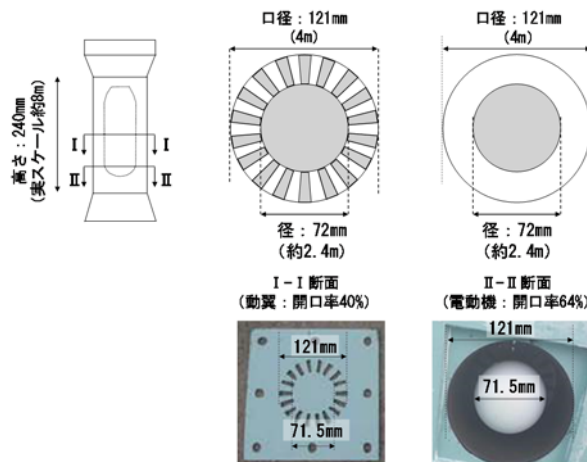


図-5.4.2 換気ファンの実験模型（上段：換気ファンの形状，下段：模型の写真）

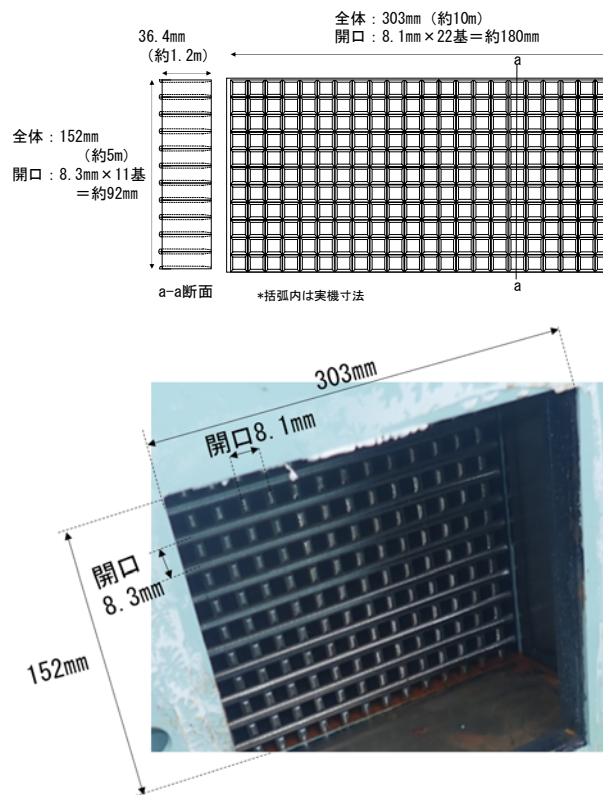


図-5.4.3 サイレンサの実験模型（上段：模型実験の形状，下段：模型の外観写真）

5.4.2 模型実験結果

換気ファンおよびサイレンサをそれぞれ設置した場合と設置しない場合の計4ケースについて実験を行った。放射される微気圧波へのノイズや現地における周辺地形の影響を極力排除するため図-5.4.1に示すように坑口中心から61mm（実スケール2m）離れた位置で計測する。

実験結果を表-5.4.1に示す。換気ファン、サイレンサのいずれも設置しない場合（ケース1）の微気圧波を基準として各ケースの微気圧波を正規化している。

換気ファンだけを設置したケース2の微気圧波はケース1の68%まで、サイレンサだけを設置したケース3は85%まで低減する。換気ファンとサイレンサの有効開口率はそれぞれ40%、35%で差異は小さいが微気圧波の低減効果にこれ以上の差が生じることとなった。これは換気ファンは内部の風路の縮小拡大によって圧力損失が大きいのに対してサイレンサは風路入口にテーパ加工が施されている程度で損失が小さいためである。

換気ファンとサイレンサの双方を設置したケース4ではケース1の62%となる。換気ファンだけを設置した場合（ケース2）とサイレンサだけを設置した場合（ケース3）のそれぞれの効果を単純に掛け合わせるとケース1の57%程度となるので双方を設置したケース4はこれに近い低減効果が得られていることになる。これは換気ファンとサイレンサが図-5.4.1に示すように離れた位置にあるのでそれぞれの効果がほぼ独立して作用するためと考えられる。

以上の結果から枝坑の付帯設備のうち換気ファンとサイレンサを活用することによって微気圧波を6割ほどに低減できることが明らかになった。つまり前節の模型実験の結果で示されたように断面拡大によって背後空気層のエリアが縮小して微気圧波が約1.6倍に増大する分を付帯設備によって相殺できたことになる。付帯設備に5.2節で示した換気口を追加することでさらに微気圧波を低減することも可能である。

表-5.4.1 付帯設備を設置した際の微気圧波の最大値
(ケース1の微気圧波で正規化)

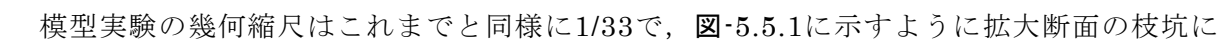
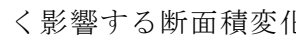
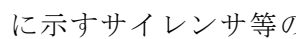
ケース	換気ファン	サイレンサ	正規化圧力
1	無	無	1.00
2	有	無	0.68
3	無	有	0.85
4	有	有	0.62


5.5 提案する営業線仕様における微気圧波低減効果の確認

前節までの結果を踏まえて多孔板対策工と付帯設備を設置した営業線仕様の枝坑の微気圧波の低減効果を実験により検証する。超高速列車が突入するトンネル入口から枝坑までの距離と枝坑に微気圧波低減対策を施した場合の枝坑坑口付近での微気圧波との関係を把握して微気圧波の低減効果について評価することとし手続きは、以下のとおりである。

1. 拡大された枝坑断面に多孔板対策工を設置し営業線仕様の付帯設備（換気口、換気ファン、サイレンサ）も模擬した模型実験を実施して模型実験で入力する圧力勾配と微気圧波の関係を把握する。
2. 次に枝坑のトンネル坑口からの位置が微気圧波に与える影響について検討する。坑口に多孔板緩衝工を有するトンネル入口に超高速列車が突入した際に発生する圧縮波がトンネルを長距離伝播するときの距離に応じた圧力勾配の変化を把握する。
3. 1.および2.から枝坑のトンネル内の位置と多孔板対策工と付帯設備を設置した営業線仕様の枝坑坑口から放射される微気圧波との関係を得て、提案する営業線仕様の枝坑における微気圧波対策の低減効果の評価を行う。

5.5.1 模型実験による圧力勾配と微気圧波の関係の把握

模型実験の幾何縮尺はこれまでと同様に1/33で、に示すように拡大断面の枝坑に開口率4.5%、多孔板幅212mmの多孔板対策工（5.3節）、換気口（5.2節）、換気ファン、サイレンサなどの付帯設備（5.4節）をすべて設置した。換気口の実験模型では5.2節で説明した整流板やサイレンサ等の詳細形状については模擬していないが微気圧波低減効果に大きく影響する断面積変化は実物と一致させている。またに示す換気ファン、に示すサイレンサ等の付帯設備の模型は5.4節で示したとおり幾何形状を実物に忠実に再現し有効開口率を一致させている。

枝坑へ入力する圧縮波は5.3節で示した規準圧縮波およびパラメータスタディのため圧力勾配が規準圧縮波の60%、40%の圧縮波の計3ケースとした。なお、規準圧縮波に相当するケースの実験は2回実施している。微気圧波についてはの平面図に示すように換気口中心から水平方向に606mm（実スケール20m）離れた位置で測定した値を地面反射を考慮したうえで微気圧波の基準値である50Pa⁹⁾で正規化した。

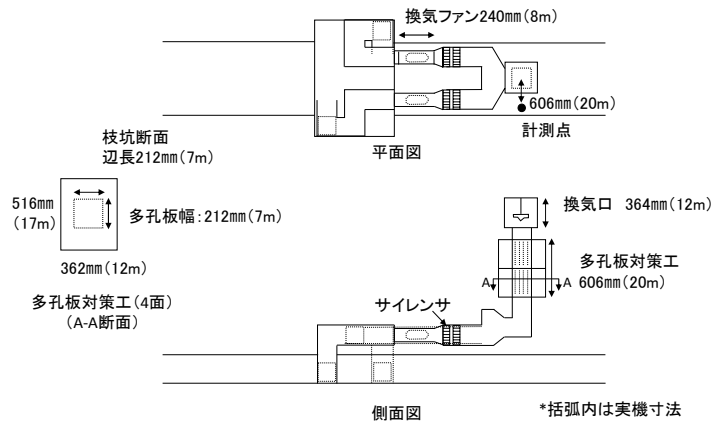


図-5.5.1 枝坑（営業線）を模擬した実験模型

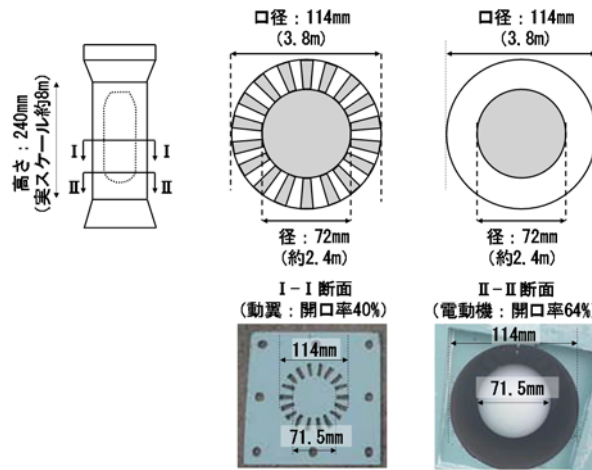


図-5.5.2 換気ファンの実験模型（上段：模型実験の形状，下段：模型の外観写真）

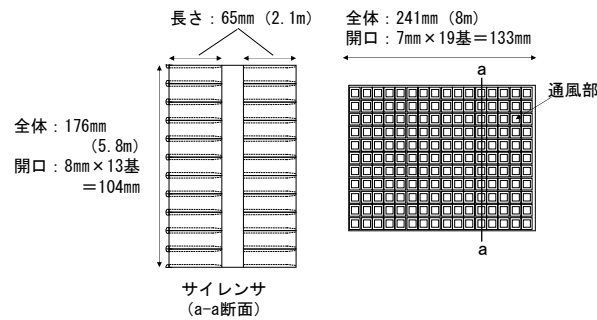


図-5.5.3 サイレンサの実験模型（上段：模型実験の形状，下段：模型の外観写真）

模型実験の結果をもとにトンネル内の圧力勾配と枝坑から放射される微気圧波が比例関係にあることを考慮して最小二乗法を用いて圧力勾配と微気圧波の関係について原点を通る一次近似を行った結果を図-5.5.4に示す。

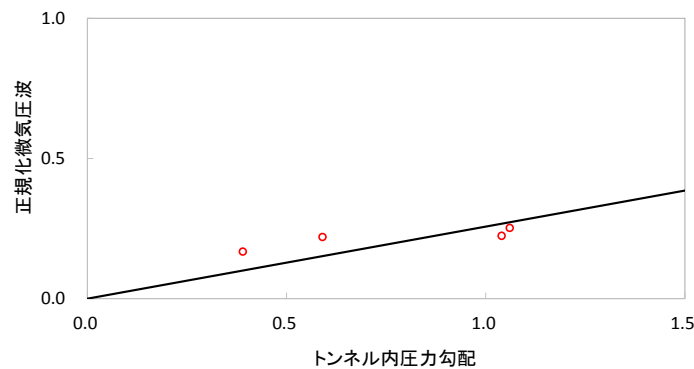


図-5.5.4 模型実験による営業線仕様の枝坑における圧力勾配の入力値と放射される微気圧波の関係

5.5.2 枝坑位置と圧力勾配の関係の把握

次に枝坑のトンネル坑口からの位置が微気圧波に与える影響について検討する。列車がトンネル坑口に設置された多孔板緩衝工に突入した際に発生する圧縮波がトンネルを長距離伝播した後に多孔板対策工と付帯設備を設置した営業線仕様の枝坑坑口から放射される微気圧波を予測する。超高速列車がトンネル坑口に設置された延長 150m の標準的な多孔板緩衝工に突入する際に発生する圧縮波をもとに、トンネル内での一次元波動伝播解析から得られる長距離伝播後の圧縮波の圧力勾配は 2.2.2(2)節に記載した手法¹⁰⁾によって求められ図-5.5.5に示すとおりである。なお、縦軸の圧力勾配の値はこのグラフの圧力勾配の最大値、すなわちトンネル入口から枝坑までの距離が約 11km の地点を伝播した場合に得られる最大圧力勾配で正規化している。

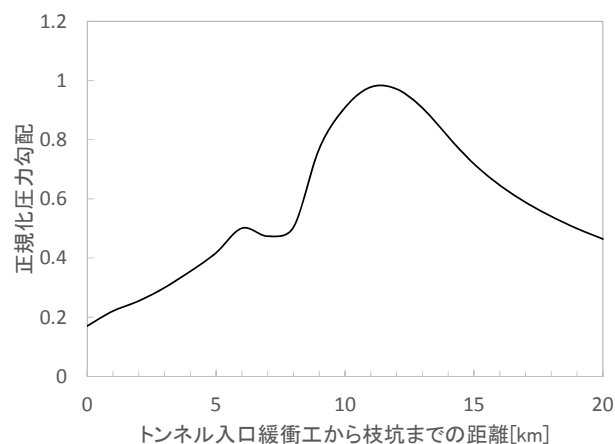


図-5.5.5 標準的な多孔板緩衝工に突入した際に発生する圧縮波の伝播解析の結果

5.5.3 枝坑位置と微気圧波の関係把握による微気圧波低減効果の評価

営業線仕様の枝坑から放射される微気圧波は、列車がトンネル坑口に設置された多孔板緩衝工（長さは標準的な 150m）に突入した際に発生する圧縮波がトンネル内を長距離伝播した場合のトンネル内での圧力勾配（図-5.5.5）と、トンネル内の圧力勾配と多孔板対策工および付帯設備を設置した営業線仕様の枝坑から放射される微気圧波との関係（図-5.5.4）から求めることができる。その結果を図-5.5.6 に示す。なお微気圧波は基準値である坑口中心から 20m 地点の 50Pa⁹⁾で除して正規化している。

すなわち、図-5.5.5 のトンネル入口緩衝工から枝坑までの距離(x)と正規化圧力勾配(y)の関係を $y = f(x)$ 、図-5.5.4 の正規化圧力勾配(y)と正規化微気圧波(z)の関係を先述の回帰直線関係を用いて $z = g(y) = \alpha y$ とすると図-5.5.6 のトンネル入口緩衝工から枝坑までの距離(x)と正規化微気圧波(z)の関係は、

$$z(x) = g(y) = g(f(x)) = \alpha f(x) \quad (5-2)$$

となって図-5.5.5 のトンネル入口緩衝工から枝坑までの距離(x)と正規化圧力勾配(y)の関係を y 方向に縮めたものになる。トンネル坑口の多孔板緩衝工（延長 150m）から枝坑までの伝播距離が 11km 程度の場合に圧力勾配がピークとなるため同地点の枝坑坑口における微気圧波もピークとなる。このピークにおいて放射される微気圧波は基準値の最大 0.3 程度であるので基準値を十分に下回る。したがって、本研究で検討したすべての対策を講じることで枝坑から放射される微気圧波を十分に低減できることが確認できた。

また図-5.5.4 においてトンネル内圧力勾配と微気圧波の線形近似による近似を行ったが、圧力勾配が小さい領域の試験結果については回帰直線からの誤差が見られる。模型実験による微気圧波の値の近似値に対する誤差は圧力勾配が 0.37 のときに約 60%、0.56 のときに約 41%であり直線近似による微気圧波の予測値が過小となってしまう。そこで 4 つの測定結果のうち近似による乖離が一番大きかったケースすなわち圧力勾配が 0.37 の場合の誤差を用いて補正を行う。近似による微気圧波に対する模型実験による微気圧波の割合を一定の代表値 ($\beta=1.60$) として図-5.5.6 の微気圧の基準値である坑口中心から 20m 地点の 50Pa⁹⁾で正規化した微気圧波に乗じて補正を行った微気圧波 ($z'(x)$) を図-5.5.7 に示す。すなわち、

$$z'(x) = \beta z(x) = \alpha \beta f(x) \quad (5-3)$$

近似の誤差の補正を行った場合においても放射される微気圧波の最大値は基準値の 0.42 程度であり基準値を下回ることを確認した。なお図-5.5.4 において圧力勾配が比較的高い領域においては回帰直線との誤差の割合が小さくなっているため最大の微気圧波については安全側の評価をしていると考えられる。

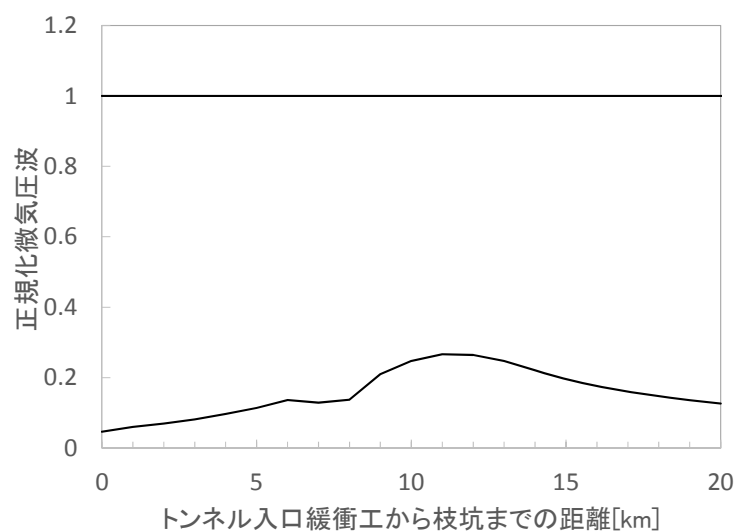


図-5.5.6 トンネル入口緩衝工（延長 150m）から枝坑までの距離に対する
微気圧波の予測値

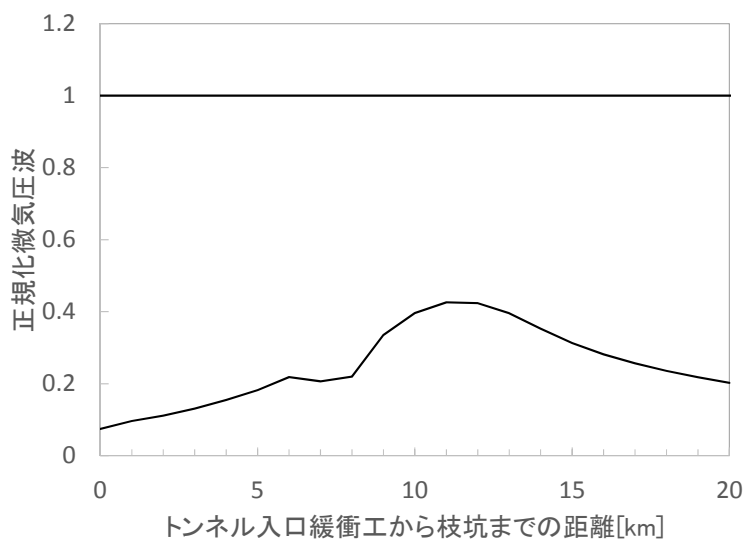


図-5.5.7 トンネル入口緩衝工（延長150m）から枝坑までの距離に対する
補正後の微気圧波の予測値

5.6 まとめ

本章では中央新幹線のトンネルの途中に設けられる旅客の避難やトンネル内の換気を目的とした非常口の枝坑（風路）の微気圧波対策について検討を行った。第2章で実施した現状把握において、山梨実験線の枝坑（立坑）の従来型断面において東京~大阪の全区間開業時にトンネル内部の蓄熱排除のために必要な換気容量を前提とした枝坑内の風速に対しては地上部での騒音が大きくなることを把握した。これに対しては枝坑の断面拡大により風速低減を図るとともに騒音低減とトレードオフの関係にある微気圧波低減との両立を図る必要がある。枝坑内の風速低減を目的として風路となる枝坑断面を2倍に拡大する条件で、多孔板対策工による微気圧波の低減効果を見込みつつ、模型実験と音響解析により坑口で発生する微気圧波の把握を行った。多孔板対策工内の枝坑の断面拡大により背後吸音層のエリアが縮小して坑口における放射直前の圧力勾配は1.7倍~2.0倍となった。微気圧波が圧力勾配に比例することから断面拡大によって地上部における微気圧波も同程度に増大し悪化する予測となった。

この問題に対しては従来の多孔板対策工に加えて枝坑内の換気ファンやサイレンサのような付帯設備の効果も考慮に入れた微気圧波低減効果について評価を行った。これら設備の設置効果を模型実験によって測定したところ各付帯設備単体での微気圧波低減効果は風路形状や有効開口率に応じて1割~3割程度となった。多孔板対策工や換気ファン、サイレンサをすべて組み合わせると微気圧波を6割程度に抑えられるので枝坑の断面拡大で背後空気層のエリアが縮小することにより微気圧波が増大する分を相殺できることが明らかになった。

最後に営業線仕様での確認のため、拡大断面に従来の多孔板対策工を施して換気口、換気ファン、サイレンサといった付帯設備を設置した枝坑について、トンネルの入口に営業線で標準的な延長150mの緩衝工を設置し超高速列車がトンネルに突入する際に発生する圧縮波が伝播し枝坑の坑口で放射される微気圧波の低減効果について評価を行った。様々な大きさの圧縮勾配の値をインプットして微気圧波と関連付ける模型実験およびトンネル突入波に対し枝坑の位置と圧力勾配とを関連づける1次元長距離伝播解析により枝坑のトンネル内での位置に関係なく微気圧波は基準値の最大0.3程度となって基準値を大きく下回ることを確認した。

本章の検討では、枝坑断面を拡大しつつも付帯設備を考慮することにより坑口における風切り音の低減対策とトレードオフの関係にある微気圧波低減対策とを両立させて超高速鉄道のトンネル枝坑の微気圧波対策を確立することができた。また風切り音の抑制のために枝坑断面を拡大した結果として換気口の構造が簡易で保守しやすいものとなるとともに平均風速の低下による圧力損失低減によって建設コストおよび換気負荷の軽減によるランニングコストの低減といった副次的な効果も期待できる。

参考文献

- 1) 岩田眞：中央新幹線（東京都・名古屋市間）の建設計画，土木施工，Vol. 59, No. 10, 2018.
- 2) 本田敦，高橋和也，野澤剛二郎，土肥哲也，小川隆申，飯田雅宣，藤野陽三：超高速鉄道のトンネル内圧縮波伝播性状と出口側緩衝工による微気圧波低減効果，土木学会論文集 A1（構造，地震工学），Vol. 71, No. 1, pp. 128-138, 2015.
- 3) 高橋和也，本田敦，野澤剛二郎，土肥哲也，小川隆申：超高速鉄道トンネルにおける入口側円形型緩衝工の微気圧波低減効果，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol. 71, No. 2, pp. 167-172, 2015.
- 4) 高橋和也，本田敦，山極伊知郎，野澤剛二郎，土肥哲也，小川隆申：超高速鉄道におけるトンネル枝坑からの微気圧波の低減対策，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol. 72, No. 1, pp. 41-46, 2016.
- 5) 日本機械学会編：管路・ダクトの流体抵抗，p. 55 および pp. 109-114, 1979.
- 6) T. H. Melling, The acoustic impedance of perforates at medium and high sound pressure levels, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 29, pp. 1-65, 1973.
- 7) 山極伊知郎，田中俊光：超低周波数領域における多孔板構造吸音特性予測技術の研究，環境工学総合シンポジウム講演論文集，No. 14, pp. 66-69, 2004.
- 8) 前川純一，森本政之，坂上公博：建築・環境音響学，共立出版，1990.
- 9) 中央新幹線（東京都・名古屋市間）環境影響評価書，東海旅客鉄道株式会社，2014.
- 10) 本田敦：超高速鉄道トンネルの微気圧波の評価およびその低減対策の提案，東京大学博士論文，2015.

第6章 結論

本研究では、超高速鉄道の微気圧波問題のうち、高速鉄道では中央新幹線で初めて設置されるトンネル内の分岐部のような断面積変化区間を列車が超高速で通過する際に新たに発生する圧縮波による微気圧波への影響およびその低減対策を主眼として検討を実施した。従来の微気圧波低減策として用いられた多孔板が分岐部のような断面積変化区間には空間的制約により適用できないことから文献調査や現状把握をもとに新しい原理に基づく解明を行い、分岐部で発生する圧縮波による微気圧波を低減することが可能な「並行トンネル」を提案した。

また枝坑を通過し坑口から放射される微気圧波問題については多孔板による対策が確立されているが、将来のトンネル内の換気風量の増大に伴う風切り音の低減との両立が必要なため、制御可能な方法を提案した。

以下に本研究で得られた結論をまとめる。

「第2章 分岐部を有する超高速鉄道トンネルの微気圧波に関する現状調査と課題抽出」では、山梨実験線においてトンネル内に枝坑が設置される区間を超高速列車が通過する際の圧力波の形成に関する調査による現状把握を行った。また山梨実験線のトンネル内には分岐装置がないことから数値解析による坑口における微気圧波レベルのシミュレーション予測を行い、既存の手法で低減が可能かどうかの検討を行った。

枝坑の通過による微気圧波問題についても将来の換気風量の増大に伴う風切り音による騒音予測を行い、風速低下を目的とした流路拡大について簡易な検討を行って課題を把握した。

以下に本章で得られた知見をまとめる。

- 1) 山梨実験線における計測では、超高速列車が断面積変化部を通過する場合は断面変化率の増大とともに発生する圧力波が増大し、横坑を通過する際には列車前方に正圧の圧縮波、横坑内には負圧の膨張波が生成し反射する。
- 2) 分岐部に関する数値解析によるシミュレーションでは、超高速列車の分岐部通過に伴い、分岐部で新たに生成された圧縮波がトンネル本坑を長距離伝播して、緩衝工のないトンネル坑口で放出された際には、微気圧波が基準値の4倍程度となり問題となる可能性があることがわかった。
- 3) 既存の手法による解決として、トンネル内の分岐区間の断面積変化を緩和する「すりつけ対策」と「連通対策」の有効性を3次元数値流体解析(CFD)により確認した。しかし両者とも施工やコストの面で現実的なものとは言えず、新しい原理に基づいた対策の提案が必要であることを把握した。
- 4) 枝坑を通過する圧縮波による微気圧波問題について換気流に伴う坑口での風切り音による騒音を予測したところ、山梨実験線の風路断面(5m×5m断面)では風速が大きく地上部での騒音が大きくなり騒音基準値を超過する可能性があることがわかった。
- 5) 風速の低減を目的とした枝坑の流路拡大による圧力変動への影響を把握する簡易な検討によ

り、流路の拡大は坑口での微気圧波の増大につながる可能性のあることがわかった。風切り音の低減とトレードオフの関係となる微気圧波低減との両立を図る必要があることを把握した。

「第3章 トンネル分岐部通過時に発生する微気圧波の低減手法の検討」では、超高速列車が分岐部を通過する際に新たに発生する微気圧波の低減のため新たな原理に基づく「並行トンネル」を提案した。以下に本章で得られた知見をまとめる。

- 1) 分岐部を列車が高速で通過する際に新たに発生する圧縮波の形状を模型試験および3次元数値流体解析(CFD)によって把握した。列車先頭の車体の断面積が変化する部分が分岐断面を超高速で通過する約0.1秒間に急激に圧力が上昇することを確認した。
- 2) 微気圧波と比例関係にある圧縮波の圧力勾配を低減させるためには、他の位相の異なる圧力波との重畳が有効である。1)で得られた圧縮波の形状からして必要な重畳波は正のパルス波に続いて負のパルス波が続く波形であり、これは山梨実験線で列車が横坑を通過する際に発生する圧力波に近い波形であることがわかった。すなわち横坑を発展させた「並行トンネル」の設置により列車通過時に正圧と負圧のパルス波を時間差で発生させ、それらを圧縮波に重畳させることにより圧縮波の圧力勾配を低減できると考えられる。
- 3) 「並行トンネル」による圧力波を再現するための簡易モデルを構築した。このモデルにより、圧縮波の圧力勾配を低減できる重畳波を発生させることの可能な「並行トンネル」の各坑の長さや断面積などの諸元を決定できた。また「並行トンネル」の連絡坑を分散させると所定の振幅の重畳波を得られることが簡易モデルにより確認できた。
- 4) 決定した諸元に基づく「並行トンネル」を分岐部に設置する状況を模擬した模型試験および3次元数値流体解析(CFD)によって、圧縮波の圧力勾配が3割程度低減する効果があることを確認した。
- 5) また長距離伝播解析を実施した結果、分岐部への「並行トンネル」の設置により坑口の緩衝工の長さに依らず放射される微気圧波を大幅に低減でき、基準値(坑口中心から20m地点で50Pa以下)以内となることを確認した。

「第4章 営業線における並行トンネルの適用性の評価」では、第3章で述べた検討をもとに、中央新幹線の営業線に向けた分岐部を有するトンネルの微気圧波低減対策案として、営業線の山岳トンネルの分岐区間に設置する「並行トンネル」の諸元を提案し、その実用面からの有効性を検証した。以下に本章で得られた知見をまとめる。

- 1) 「並行トンネル」はNATMにより施工が可能である。
- 2) 簡易モデルにより、提案した諸元の「並行トンネル」について効果が発揮される速度領域を明らかにした。また、感度分析により将来の列車の速度向上に対しては「並行トンネル」の設計の修正(連絡坑の位置の調整)で対応可能であることを示した。
- 3) 他の周辺環境の変化要因として、掘削する地山の地質が軟質であった場合でも連絡坑の本数を減らすことにより微気圧波の低減には対応可能であることがわかった。またトンネル内壁面の表面粗度、断面形状、曲率が変化した場合についても、微気圧波の長波長性から及ぼす影響は軽微である。このように「並行トンネル」は諸条件の変化のもとでも有効に機能し、実用

的であることを確認した。

「第5章 トンネル枝坑における付帯設備を考慮した微気圧波対策」では、微気圧波が放出される枝坑坑口における風切り音の騒音対策を満足に実施できる多孔板対策工の風路の諸元について検討を行い、騒音対策とトレードオフの関係である微気圧波対策と両立可能な対策を提案した。以下に本章で得られた知見をまとめる。

- 1) 風切り音の低減を目的とした風路断面の拡大による微気圧波への影響を模型実験および音響解析によって検討したところ、微気圧波が2倍弱程度に増大する予測結果となった。これは風路断面の拡大により多孔板対策工内の背後の吸音層が縮小し、多孔板対策工による圧力波の圧力勾配の低減効果が低下することが原因である。
- 2) これに対し、換気口の整流、枝坑内の換気ファンやサイレンサのような付帯設備の効果も考慮に入れて微気圧波低減効果について評価を行ったところ、多孔板対策工内の風路断面を拡大しても微気圧波を基準値内に抑制できることを確認した。
- 3) 長距離伝播解析を行った結果、多孔板対策工、風路の断面拡大、換気口による整流、付帯設備を活用した仕様の枝坑による微気圧波の大きさは、列車が突入するトンネル入口から枝坑までの距離にかかわらず微気圧波の基準値の3割程度に抑えられることを把握した。風切り音対策と微気圧波対策の両立が可能な対策として提案する。

「第6章 結論」では、本研究で得られた結論を述べた。

本研究により、超高速鉄道の微気圧波問題である列車のトンネル突入による微気圧波および列車の分岐部通過に伴う圧縮波による微気圧波の両方の問題がクリアとなった。本研究は、先の別の研究によって多孔板による対策が提案されて解決済みとなっていた微気圧波問題と合わせ中央新幹線のトンネル微気圧波低減対策の集大成である。

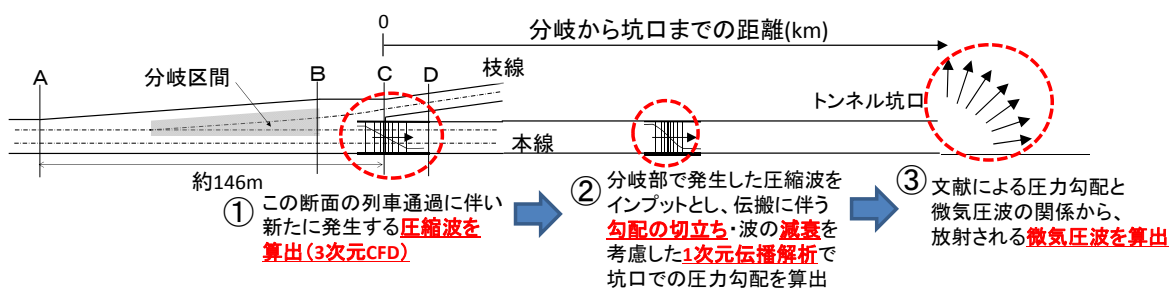
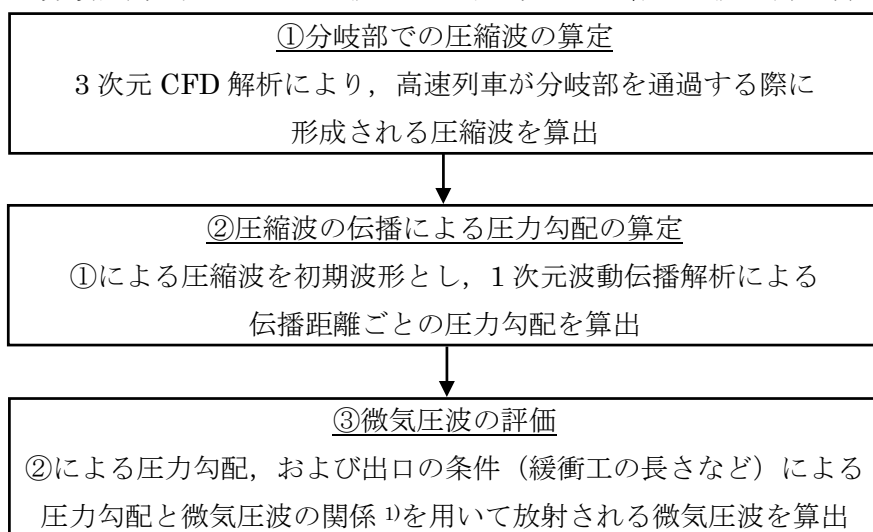
本研究によって中央新幹線での問題が解決されたことにとどまらず、既往の理論や研究の適用範囲がさらに拡張されて今後の類似の問題への応用が可能になることを期待している。

補遺 本論文の解析の詳細

補-1 圧縮波の形成・伝播，放射される微気圧波の算出に関する解析手順

第2章で示した，超高速列車の分岐区間通過に伴う圧縮波の形成，その圧縮波のトンネル内の伝播，および，トンネル坑口にて放射される微気圧波の予測手順を示す表(表-2.2.1)および図(図-2.2.13)の一部を以下のとおり，表・補1，図・補1として再掲する．①～③の手順で用いた解析手法それぞれの詳細について補-2.1～補-2.3のとおり記述する．

表・補1 分岐区間で発生した圧力波のトンネル坑口での微気圧波予測手順（再掲）



図・補1 分岐区間を列車が通過した場合の圧縮波の形成，伝播，放射される微気圧波の算出手順（再掲）

補-2 解析の詳細

補-2.1 3次元 CFD 解析

列車がトンネル入口側坑口の緩衝工に高速で突入するとき発生する圧縮波を算定するために、本田ら¹⁾が列車のトンネル突入を再現した Ogawa and Fujii の方法²⁾に基づいて実施した 3次元圧縮性流体解析に準じた解析を行い、列車が分岐区間を通過する際に形成される圧縮波を算定する。列車の分岐区間への突入速度は時速約 500km、マッハ数で 0.4 程度を対象とするため、空気の圧縮性を考慮する。実際の流れ場では粘性の影響も存在するが、トンネル内の圧力波の波面に与える粘性の影響は小さいため、本研究では列車表面に対する粘性の影響のみを考慮し、その他の境界面における粘性の影響は無視する。3次元圧縮性 Navier Stokes 方式による基礎方程式(質量保存則, 運動量保存則, エネルギー保存則)はデカルト座標においてそれぞれ次のように表せる。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho v_j}{\partial x_j} = 0 \quad (\text{補-1})$$

$$\frac{\partial \rho v_i}{\partial t} + \frac{\partial (\rho v_i v_j + \delta_{ij} p)}{\partial x_j} = Re^{-1} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (\text{補-2})$$

$$\frac{\partial e}{\partial t} + \frac{\partial (e+p)v_j}{\partial x_j} = Re^{-1} \frac{\partial (v_i \tau_{ij} + q_j)}{\partial x_j} \quad (\text{補-3})$$

ここで、 ρ : 密度, t : 時間, x_i : 各座標 ($i=1, 2, 3$ でそれぞれ x, y, z 方向を表す), v_i : トンネル進行方向の速度 ($i=1, 2, 3$ でそれぞれ x, y, z 方向の速度成分 u, v, z を表す), e : 単位あたりのエネルギー, δ_{ij} はクロネッカーのデルタ (Kronecker delta), p : 圧力, τ_{ij} : 流体の応力, q_i : 熱流束の項である。

圧力 p は、以下に示す理想気体の状態方程式によって密度, 全エネルギー, 速度成分から求めることができる。ここに、 γ : 比熱比(=1.4)である。

$$p = (\gamma - 1) \left(e - \frac{1}{2} \rho v_j^2 \right) \quad (\text{補-4})$$

一般座標系における基礎方程式を対流項は Roe スキーム³⁾により離散化し, MUSCL (Monotone Upstream-centered Schemes for Conservation Laws) 法⁴⁾により数値流束の高精度化を行っている。時間積分には二段階陽積分法を用いている。解析領域は領域分割法により, 移動する列車周辺の領域とトンネルや軌道など静止している領域に分け, 時間ステップ毎にそれぞれの領域を相対的に移動させながら領域間で解強制置換法⁵⁾によりデータの交換を行っている。

境界条件としては, 物体表面では非粘性計算の場合は壁面に垂直な方向の速度成分が 0, 粘性計算の場合は壁面上の速度が 0 であるという条件とし, 領域における遠方境界では計算領域から外部へ伝播する波の非物理的な反射を発生させないために境界に垂直な方向において 1 次元的に特性量の伝播を考慮する無反射境界条件を適用している。

補-2.2 1次元波動伝播解析（長距離伝播解析）

トンネル内を伝播する圧縮波の数値解析モデルについて説明する。伝播過程については、トンネル内の圧縮波の伝播性状変化を予測するため、圧縮性Navier Stokes方程式を基礎方程式とする1次元波動伝播解析法を用い、現地計測結果と比較を行ってその精度を検証している。トンネルの径に比べて十分に長くて一様な断面のトンネル内を伝播する圧縮波は20Hz以下の低周波数を前提とすれば平面波となっていると言える。実際の流れ場では粘性の影響も存在するが、トンネル内の圧力波の波面に与える粘性の影響は小さいため、本論文では、トンネル断面内の物理量が一様であると仮定した1次元の圧縮性Euler方程式を離散化して解く。基礎方程式は以下のような質量保存、運動量保存、エネルギー式となる。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + \rho \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (\text{補-5})$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = -f(u) \quad (\text{補-6})$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + u \frac{\partial p}{\partial x} + \gamma p \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (\text{補-7})$$

ここで、 t : 時間、 x : トンネル進行方向の座標（1次元）、 ρ : 密度、 u : トンネル進行方向の速度（1次元）、 p : 圧力、 γ : 比熱比、 $f(u)$: トンネル壁面摩擦の項である。実際には壁面付近では摩擦により風速が小さくなり、境界層を形成しているが、その摩擦による効果は運動量保存式の右辺に $f(u)$ として与える。

圧縮波はほぼ音速で伝播することがわかっているのでトンネル全長を計算格子で再現する必要はなく、圧縮波波面前後の範囲のみを音速で移動する計算格子で再現する。伝播解析の初期波形として現地計測（地上固定点）の圧力変動を用いるが、圧縮波は音速で伝播するものとして、現地計測で得られた圧力時刻歴を空間変動に変換することで解析の初期条件とする。また、圧縮波波面では等エントロピー波と見なせるという仮定のもと、流速の初期波形は現地計測で得られた圧力変動量から以下の式で与える。

$$u = \frac{\Delta p}{\rho c_0} \quad (\text{補-8})$$

ここで、 Δp は圧力変動量、 ρ は密度、 c_0 は音速、 u が速度である。

トンネル壁面と空気の流れによる摩擦から生ずる摩擦項 $f(u)$ は、定常摩擦項と非定常摩擦項に分けられる。本論文では定常摩擦項として層流と乱流の両方のモデルを用い、層流から乱流に移る臨界レイノルズ数に応じて層流と乱流のモデルを切り替えるものとする。また、壁面から発達する境界層の厚さはトンネル径に比べると十分に小さいものとして、平板上を発達する境界層に対応したモデルを用いる。層流の定常摩擦項 f_s を以下の式で与える。

$$f_s = \frac{2}{D} c_f u |u| \quad (\text{補-9})$$

ここで、 c_f は平板上を発達する境界層の流速分布がブラジウスの式に従うと仮定した場合の局所抵抗係数で、以下の式で表すことができる⁶⁾。

$$c_f = \frac{0.664}{\sqrt{Re_x}} \quad (\text{補-10})$$

ここで、 Re_x は流速 u と乱流遷移点からの吹走距離 x_l で与えられるレイノルズ数(ux_l/ν)である。ここに ν : 空気の動粘性係数である。本論文では吹走距離 x_l を静止していた空気が圧縮波により加速され移動した距離として下式で与えることとする。

$$x_l = \int_0^t u(t) dt \quad (\text{補-11})$$

乱流の定常摩擦項 f_s は式(補-9)において粗面上を発達する乱流境界層の局所抵抗係数 c_f を以下の式(補-12)で与えることにより表すことができる⁷⁾。

$$c_f = 4 \left\{ 1.4 + 3.7 \log_{10} \left(\frac{x_l}{k_s} \right) \right\}^{-2} \quad (\text{補-12})$$

ここで、 k_s は等価粒径粗さで、壁面の凹凸の程度を表す長さの次元を持ったパラメータであり、等価粒径粗さはトンネルによって異なるため、実測値データから同定する必要がある。 x_l は層流の場合と同様に吹走距離である。既往の一次元伝播解析^{8,9)}では非定常摩擦項としてZielke¹⁰⁾の管内非定常圧縮性流れの解析解に基づいて定式化された式で与えているが、本論文では黒川ら¹¹⁾と同様に空気の加速度 a に比例する非定常摩擦項 f_u を下式で与える。

$$f_u = \alpha a \quad (\text{補-13})$$

ここで、 α は加速域における係数で、本論文では現地計測結果に基づいて一定値を与える。よって、このモデルで与えられる摩擦項 f は定常摩擦項 f_s と非定常摩擦項 f_u の和として式(補-14)のように表現できる。

$$f = f_s + f_u \quad (\text{補-14})$$

なお、本田らの研究¹⁾では、層流から乱流に切り替えるために臨界レイノルズ数として、中畑ら¹²⁾の式を山梨実験線の現地計測結果に基づいて修正した、以下の式(補-15)により与えており、本論文でもこれを使用している。ここで代表長さを $D/10^m$ として与え、現地計測結果に基づいて長さスケールのパラメータを求めると $m=1.5$ となる。

$$Re_c = 1.33 \left\{ \frac{D(a/v^2)^{1/3}}{10^m} \right\}^{1.86} \quad (\text{補-15})$$

壁面摩擦応力モデルに含まれるパラメータは、乱流の定常摩擦項 f_s に現れる等価砂粒径 k_s と非定常摩擦項 f_u に現れる加速域における係数 α の二つである。本田らの研究¹⁾では、この二つのパラメータを山梨実験線で現地計測されたトンネル内を伝播する圧縮波の波形から同定している。

本田らの検討¹⁾では、計算スキームには、対流項に対しては5次精度風上差分法、時間積分には4段階4次精度Runge Kutta法を採用している。本論文の伝播解析の過程では、本田らの1次元波動伝播解析手法を踏襲しつつ、更に高精度に圧力波の急峻な切り立ちを再現するため、5次精度風上差分に代えてWENO (Weighted Essentially Non-Oscillatory polynomial interpolation) スキーム^{13,14)}を採用している。WENOは精度悪化の原因となる数値振動が小さいスキームとして知られている。これにより、長大トンネル内の圧縮波の伝播性状を安定して解くことができるだけでなく、高周波数成分の再現性も向上する。解析モデル構築にあたってWENOスキームの次数に関する予備検討を行った結果、要求される計算精度や所要時間を勘案して、ここでは9次精度のスキームを採用している。また、中央新幹線においては横坑などの断面変化部および枝坑などが設置され圧縮波は減衰するが、本解析では一様なトンネル内を伝播することとし、安全側の評価を行っている。

補-2.3 圧力波と微気圧波の関係

第2章で記したとおり，坑口付近で放射直前の圧縮波から微気圧波を解析にて求める手法は①の3次元CFD解析手法と同様である．坑口での圧力変動を初期波形として3次元CFD解析を行い，最大圧力勾配と微気圧波の大きさの関係を求める．両者には比例関係があることが知られているため，多孔板緩衝工長さや多孔板開口率ごとに最大圧力勾配と微気圧波の解析結果を整理して両者の回帰直線を求めておくことにより，②の長距離伝播解析によって得られた坑口における圧力勾配から微気圧波を予測することが可能となる．参考に本田ら¹⁾が，標準的な緩衝工において適当とした多孔板の開口率1.5%の条件のもと，多孔板緩衝工長さをパラメータとして本解析により得られた圧力勾配と微気圧波の関係を線形関係で整理した結果を図-補2に示す．本論文では，このうち中央新幹線で標準的に使用される，多孔板が150m長にわたって設置された緩衝工の場合の関係をを用いて最終的な微気圧波の評価を行っている．

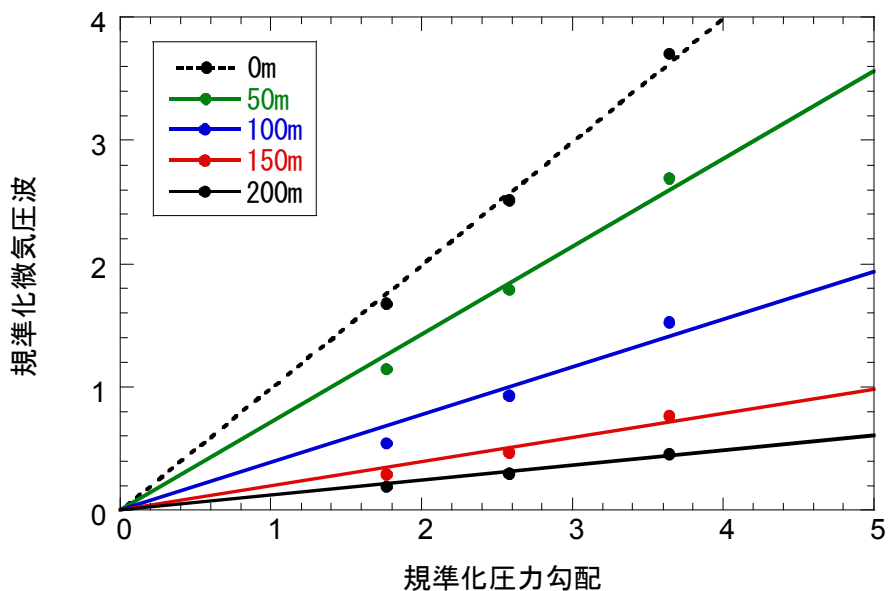


図-補2 解析で算定した多孔板設置延長をパラメータとしたときの最大圧力勾配と微気圧波の関係¹⁾

参考文献

- 1) 本田敦, 高橋和也, 野澤剛二郎, 土肥哲也, 小川隆申, 飯田雅宣, 藤野陽三: 超高速鉄道のトンネル内圧縮波伝播性状と出口側緩衝工による微気圧波低減効果, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 71, No. 1, pp. 128-138, 2015.
- 2) Ogawa, T. and Fujii, K.: Numerical Investigation of Three-dimensional Compressible Flows Induced by a Train Moving into a Tunnel, Computers and Fluids, Vol. 26, No. 6, pp. 565-585, 1997.
- 3) Roe, P.: "Approximate Riemann solver, parameter vectors and difference schemes", Journal of Computational Physics, No. 43, pp. 357-372, 1981.
- 4) Van Leer, B.: "Towards the ultimate conservative difference scheme. V. A second order sequel to Godunov's method", Journal of Computational Physics, No. 23, pp. 276-299, 1979.
- 5) Fujii, K.: Unified Zonal Method Based on the Fortified Solution Algorithm, Journal of Computational Physics, Vol. 118, pp. 92-108, 1991.
- 6) 日野幹夫: 流体力学, 朝倉書店, 1992.
- 7) White, F. M.: Viscous Fluid Flow, Second Edition, McGraw Hill, p. 434, 1991.
- 8) 前田達夫: 列車の空気力学的特性およびトンネル内微気圧波低減対策法に関する研究, 鉄道総研報告, 特別 20 号, 1998.
- 9) 福田傑, 小澤智, 飯田雅宣, 鷹崎徹, 若林雄介: 長大スラブ軌道トンネル内を伝播する圧縮波の変形, 日本機械学会論文集 (B 編), Vol. 71, No. 709, pp. 2248-2255, 2005.
- 10) Zielke, W., "Frequency-Dependent Friction in Transient Pipe Flow", Journal of Fluids Engineering, Vol. 90, No. 1, pp. 109-115, 1968.
- 11) 黒川淳一, 森川 薫博: 円管内の加速・減速流れに関する研究 (第 1 報, 速度分布と管摩擦係数), 日本機械学会論文集 (B 編), Vol. 51, No. 467, pp. 2076-2083, 1985.
- 12) 中畑祐介, Knisely, C. W., 西原一嘉, 佐々木康, 井口学: 円管内等加速度流れの臨界レイノルズ数, 実験力学, Vol. 7, No. 2, pp. 142-147, 2007.
- 13) X. D. Liu, S. Osher, and T. Chan: Weighted essentially non-oscillatory schemes, Journal of Computational Physics, Vol. 115, No. 1, pp. 200-212, 1994.
- 14) G. Jiang and C.-W. Shu: Efficient implementation of weighted ENO schemes, Journal of Computational Physics, Vol. 126, pp. 202-228, 1996.

謝 辞

品川・名古屋間で中央新幹線のトンネル工事が進められています。本論文では、中央新幹線において超高速列車が走行することに伴い発生する微気圧波に係る課題のうち、トンネル内の分岐部に起因する微気圧波の低減をテーマとして取り上げました。本論文は、平成 26 (2014) 年から平成 29 (2017) 年にかけて多くの方々の御協力を得て研究を実施し、先立って成果が示されている多孔板緩衝工によるトンネル坑口の微気圧波の解決策とともに、中央新幹線のトンネル微気圧波低減対策の集大成として取りまとめたものです。

特に、横浜国立大学教授の藤野陽三博士には、最初に本論文を取りまとめる機会を与えていただき、一貫して懇切丁寧な御指導を賜りました。藤野先生の熱心な御指導によって最終的な成果の取りまとめに至ることができましたことに、心より感謝申し上げます。

横浜国立大学教授の勝地弘博士には、藤野先生から引き継いで快く主査をお引き受けいただくとともに、論文の取りまとめに際しまして貴重な御指導・御助言を賜り、ブラッシュアップした論文とすることができましたことに、心より感謝申し上げます。

成蹊大学教授の小川隆申博士には、模型試験、1次元波動伝播解析、3次元圧縮性流体解析、論文構成の指導および論文の審査など多岐にわたり、貴重な御指導・御助言を賜り、「並行トンネル」を学術的に仕上げることができましたことに、心より感謝申し上げます。

また、横浜国立大学教授の山田均博士、前川宏一博士、中村文彦博士、宮路幸二博士、には、論文の審査にあたって様々な観点から貴重な御意見・御指導をいただきました。厚く御礼申し上げます。

株式会社大崎総合研究所副所長の野澤剛二郎博士には、山梨実験線における試験結果の評価、1次元波動伝播解析、3次元圧縮性流体解析の実施におきまして多大な御協力・御支援をいただきました。

株式会社神戸製鋼所の山極伊知郎氏には、打ち込み試験の実施、並行トンネルのアイデア考案、音響解析におきまして多大なご協力をいただきました。

東海旅客鉄道株式会社元取締役専務執行役員の関雅樹博士、副社長の宇野護博士、常務執行役員の本田敦博士には、終始変わらぬ激励と御支援をいただきました。

本研究に必要な様々な現地計測データ等の提供は、リニア開発本部長で専務執行役員の寺井元昭氏に多大な御協力をいただきました。

本研究のコーディネーターであり様々な試験結果・解析結果を確認していただいた中央新幹線建設部の久保淳一郎博士、本論文の各論を構成する主要論文の共著者である大森洋志主任、有田貴司主任に厚く御礼申し上げます。

あらためて関係各位の御尽力に深く感謝の意を表しますとともに、本研究の成果を踏まえまして中央新幹線の早期実現に向けて全力を尽くしてまいる所存です。

最後に、本学で言語学を研究しつつも私の転勤に付き添うために勉学を中断してくれた亡き妻緑に本論文のすべてを捧げます。

令和 3 年 3 月 水野 孝則