

511.37
TA

高濃度のポリマー溶液を利用して
乱さない試料を採取する方法の開発

(課題番号 16360235)

平成 16 年度～平成 17 年度

科学研究費補助金

(基盤研究 (B)) 研究成果報告書

平成 18 年 3 月

横浜国立大学附属図書館



11758864

研究代表者 谷 和夫

(横浜国立大学大学院 工学研究院 教授)

研究の概要

未固結な土質地盤においては、砂礫や崖錐などの乱れが少ない試料のサンプリングが難しい。また、岩盤においては、D 級岩盤や破碎帯の固結度が低い部分を循環水で洗い流してしまうという問題がある。一方、あらゆる地盤において乱れが少ない試料を得る方法として、循環水を使用しないで、高濃度の水溶性ポリマー（ポリアクリルアミド）溶液を利用したロータリー・ドリリングによるサンプリング方法（Rotary Drilling using Polymer、以後 RDP サンプリングと称す）が提案されている。しかし、適用が浅部に限定され、また、試料に浸透するポリマー溶液の影響が懸念される。

そこで、以下を目的とした研究を行い、RDP サンプリングの実務への普及を図ることとした。

- ・ コアバレルを改良し、深部地盤に対しても適用できるようにする。
- ・ ポリマー溶液の特性と浸透メカニズムを解明し、ポリマー溶液がコアの表層に浸透することの影響を把握する。

以下に 2 年間（平成 16～17 年度）の研究成果を示す。

- ・ コアバレルの挙動模擬実験を行い、コアの側面に作用するせん断応力は非常に小さいが、逆に、ワイゼンベルク効果により垂直応力（拘束圧）が作用することが分かった。
- ・ ポリマー溶液の浸透試験を行い、ポリマー溶液の砂層への浸透モデルを作成した。そして、RDP サンプリングによって砂層に浸透する距離は数 mm 以下と推定され、影響が少ないことが分かった。
- ・ ポリマー溶液の粘度とずり速度（シア・レイト）の関係を計測し、擬塑性流体としての特性をモデル化した。
- ・ 深部地盤に RDP サンプリングを適用するため、孔底を仕上げるための一文字ビット、ポリマー溶液を封入するためのフリーピストン、ウォーターウェイとスリットを特徴とするコアリフターを製作した。そして、未固結な砂層に貝殻片が高い密度で含まれる地層（17m 以深）からも、きれいな棒状コアを採取することに成功した。採取された試料を用いて三軸圧縮試験を行い、サウンディングや物理探査の結果と比較した結果、乱れの影響が非常に小さいことが分かった。
- ・ ポリマー溶液を含浸させた細砂の供試体に対して三軸圧縮試験を行った。その結果、高濃度（数%）のポリマー溶液においても、内部摩擦角には影響が認められず、また、見かけの粘着力の増加も数 kPa 程度と小さいことが分かった。
- ・ 孔底三軸試験において孔底に精度良く円柱形状の試験体を作製する方法として、RDP サンプリングの技術を応用した技術を開発した。

キーワード

①サンプリング、 ②乱さない試料、 ③ボーリング、 ④ポリマー

研究組織

A. 研究代表者

谷 和夫

(横浜国立大学・大学院工学研究院・教授)

B. 研究分担者

なし

C. 研究協力者

金子 進

(基礎地盤コンサルタンツ株式会社・技術本部・主任調査技師)

交付決定額（配分額）

	交付を受けた金額	直接経費	間接経費
平成 16 年度	2,400,000	2,400,000	0
平成 17 年度	3,000,000	3,000,000	0
合 計	5,400,000	5,400,000	0

研究発表

A. 研究論文

なし

B. 国際会議発表

- 1) Tani, K., Kaneko, S., Yoshida, Y. and Ikemi, M.: Development of instrumented drilling technology for geotechnical investigation of rock mass, *Proc. 3rd Asian Rock Mechanics Symposium*, Kyoto, pp.1181-1186, 2004.

C. 国内会議発表

- 1) 柳沢希実、谷 和夫、金子 進、酒井運雄：水溶性ポリマーの濃厚溶液を使用した新しいサンプリング方法のメカニズム、第 33 回岩盤力学に関するシンポジウム、土木学会、pp. 49-56、2004.
- 2) 白井美代、谷 和夫、金子 進：水溶性ポリマーの濃厚溶液を用いたサンプリング方法と泥

水を用いたサンプリング方法の検討ー粘性係数の比較ー、第 33 回岩盤力学に関するシンポジウム、土木学会、pp.319-324、2004.

- 3) 谷 和夫、白井美代、金子 進：水溶性ポリマーの濃厚溶液を利用したサンプリング方法の考え方、第 39 回地盤工学研究発表会、地盤工学会、pp.145-146、2004.
- 4) 池野谷尚史、山田眞一、金子 進、谷 和夫：三軸試験による貝殻混じり砂の力学特性、第 1 回関東支部研究発表会、地盤工学会、pp.63-66、2005a.
- 5) 池野谷尚史、山田眞一、金子 進、谷 和夫：水溶性ポリマーを用いたサンプリングにより採取された貝殻混じり砂の力学特性、第 50 回地盤工学シンポジウム、地盤工学会、pp.129-136、2005b.
- 6) 池野谷尚史、山田眞一、金子 進、谷 和夫：三軸試験および各種原位置試験による貝殻混じり砂の力学特性、第 40 回地盤工学研究発表会、地盤工学会、pp.503-504、2005c.
- 7) 金子 進、谷 和夫：水溶性ポリマーの濃厚溶液を利用したサンプリング方法の深部地盤への適用、第 40 回地盤工学研究発表会、地盤工学会、pp.183-184、2005.
- 8) 谷 和夫：ハイドレート層の力学特性を調べるための原位置試験の提案、2005 年度資源・素材学会春季大会、I -3411、pp.195-196、2005.
- 9) 池野谷尚史、鶴 俊太郎、金子 進、立川日出男、谷 和夫：差動トランス式変位計測装置を利用した新しい原位置三軸試験装置の開発、第 35 回岩盤力学に関するシンポジウム、土木学会、pp.145-148、2006.

D. 工業所有権

- 1) 谷 和夫、池野谷尚史、鶴俊太郎：軸変位計測装置及び軸変位計測方法、特願 2005-303764、2005.

E. 学会誌

- 1) 谷 和夫、金子 進：水溶性ポリマーの濃厚溶液を利用した乱さない試料のサンプリング方法、土と基礎、第 54 巻、第 5 号、p.**-**, 2006.

F. 卒業論文・修士論文

- 1) 白井美代：ポリマー溶液を用いたサンプリングと泥水を用いたサンプリングとの比較、横浜国立大学、卒業論文、2004.
- 2) 徳脇拓也：ポリマー溶液を含んだ砂の力学特性を調べる三軸圧縮試験、横浜国立大学、卒業論文、2006.
- 3) 池野谷 尚史：リングコア型 LVDT を利用した新しい原位置孔底三軸試験方法に関する基礎的検討、横浜国立大学、修士論文、2006.

目 次

第1章 研究の背景	．．．	1
1. 1 乱れが少ない試料のサンプリング	．．．	1
1. 2 高濃度の水溶性ポリマーを利用した新しいサンプリング方法の提案	．．．	1
1. 3 著者らの研究経過と研究の準備状況	．．．	2
第2章 研究の目的	．．．	3
第3章 研究の計画	．．．	3
3. 1 平成16年度の計画	．．．	3
3. 2 平成17年度の計画	．．．	4
第4章 研究の実施体制	．．．	5
第5章 研究内容と成果	．．．	5
5. 1 平成16年度の成果	．．．	6
5. 2 平成17年度の成果	．．．	7
第6章 まとめ	．．．	8
謝辞	．．．	9
参考文献	．．．	9
表・写真・図面	．．．	10
付録	．．．	14
A1. 関連する研究成果の外部発表リスト (1985年～2003年)	．．．	14
A2. 本研究の成果の外部発表 (2004年～2006年)	．．．	17

第1章 研究の背景

1. 1 乱れが少ない試料のサンプリング

土質地盤において乱れが少ない試料を得るサンプリング方法としては、軟弱な粘土に対する固定ピストン式シンウォールサンプリングや、砂や砂礫に対する凍結サンプリングが挙げられる。しかし、凍結サンプリングは細粒分を含む場合に難しく、またコストが非常に高いことが問題である。

一方、岩盤においては、ロータリー・ドリリングによるサンプリングが一般的である。しかし、ビットの冷却や掘り屑（カッティングス）の排出には循環水が必要となり、D級岩盤や破碎帯などでは、固結度が低い部分を洗い流してしまうという問題がある。また、循環水の代わりに泡を利用する気泡ボーリングでも、地下水位より下の地盤に対する適用性が低いという問題がある。

1. 2 高濃度の水溶性ポリマーを利用した新しいサンプリング方法の提案

あらゆる地盤においても乱れが少ない試料を得る方法として、循環水を使用しないロータリー・ドリリングによるサンプリング方法（基礎地盤コンサルタンツ、1999）に注目した。そして、高濃度の水溶性ポリマー（ポリアクリルアミド）溶液を利用したロータリー・ドリリングによるサンプリング方法（Rotary Drilling using Polymer、以後 RDP サンプリングと称す）を提案した。

この RDP サンプリングは、既存の手法に比較して以下の3点で格段に優れている。

- あらゆる地盤に適応できる。従来は乱れが少ない試料の採取が不可能だった細粒分を含む砂礫、風化して粘土化した不均質な岩盤、さらに崖錐堆積物などにおいても、乱れの影響が非常に少ない試料が得られる。
- 砂礫地盤に対する凍結サンプリングなどに比較して、非常に低コストで経済性に優れている。
- 気泡ボーリングの適用が難しい地下水位より下の地盤に対しても、適用が可能である。

この RDP サンプリングの特徴は、高濃度のポリマー溶液が有する特有の性質を上手に利用した点である。

- 循環水を利用しないので、未固結または弱固結な部分を洗い流さない。
- ポリマー溶液のワイセンベルク効果（粘弾性流体の法線応力効果により流線方向に直交する方向に圧力が生じる効果）によって、試料に拘束圧が作用する。また、保護皮膜が形成されてコアの表層崩壊が防止される効果も期待される。
- コアバレルの内側ではせん断速度が大きいので粘性が小さく、コアに作用するせん断力が小さい（擬塑性流体は高速度下で低粘性）。

- ・コアバレルの外側ではせん断速度が小さいので粘性が大きく、掘り屑（カッティングス）の取り込み・排出効果大きい（擬塑性流体は低速度下で高粘性）。
- ・ダイヤモンド・ビットを用いたロータリー・ドリリングによって、硬質な礫もきれいに切削・研磨できる。
- ・曳糸性によりコア表面の一体化が図れる（ただし、水中でも期待できるかは疑問である）。

1. 3 著者らの研究経過と研究の準備状況

（1）高濃度の水溶性ポリマー溶液を利用したサンプリング方法を考案（平成 13 年度以前）

高濃度の水溶性ポリマー溶液を利用したロータリー・ドリリングによるサンプリング方法（RDP サンプリング方法）を新たに考案し、方法の原理、サンプリング装置の構造に関して特許を 2 件取得した。

- ・酒井運雄、金子 進：地盤試料採取方法とその装置、特許 2696472、1993。
- ・酒井運雄、金子 進、川原 隆：粒状体地盤コアバレル、特許 3456637、1999。

（2）計測ボーリングと堆積軟岩の試料の乱れに関する研究（平成 13 年度以前）

通常のロータリー・ドリリングによるサンプリング方法では、剛性は高いが強度に劣る堆積軟岩において乱れが少ない試料を採取することが難しいことを明らかにした。また、関連技術としてサンプリング時の状況を正確に計測する計測ボーリング技術や、この技術を応用したサンプリング条件の最適化システムも開発して、特許を 2 件出願した。

- ・谷 和夫、川崎 了、伊藤 洋：ボーリング技術の高度化に関する研究（均質な堆積軟岩におけるサンプリングによる試料の乱れの評価）、電力中央研究所研究報告、No.U97066、1997。
- ・谷 和夫：ロータリー式サンプリング法による試料採取方法、特願 1997-318702、1997。
- ・谷 和夫、酒井運雄：計測ボーリングを応用したサンプリング条件の最適化システム、特願 2001-384533、2001。

（3）浅部地盤において RDP サンプリングを実証（平成 14 年度）

数回の試行的な屋外実験を行い、以下の事項について基礎的な検討を行った。

- ① ポリマー溶液の配合
- ② 単管コアバレルの構造
- ③ サンプリング方法の手順

さらに、砂礫および山砂の盛土地盤において、地表面から 2 メートルの範囲で実証試験を行った。全く固結度を有さない山砂が緩まず、側面が滑らかなコアを採取することに世界で初めて成功した。径が 2mm～数 cm の礫もきれいに切削されており、その切削された断面は、写真 1.1 に示すように磨いたような光沢を放っていた。

しかし、ポリマー溶液が試料の表面から数 mm～数 cm 浸透している部分も観察され、浸透が過度に生じないような配合や削孔条件を明らかにすることが課題として指摘された。また、2m 以上の深度（深部地盤）に対する適用性を拡大するため、コアの底部を切断する技術の開発も課題として指摘された。

- ・ 柳沢希実、金子 進、酒井運雄、谷 和夫：高濃度ポリマー溶液を使用した新しいサンプリング方法の実験的検討、第 32 回岩盤力学に関するシンポジウム、土木学会、pp.311-316、2003.

（４）実大の模型実験の実施（平成 15 年度）

深さ 2.0m の土槽を利用して RDP サンプリングを行った。計測ボーリング技術によりビットに作用する軸荷重とトルク荷重、ポリマー溶液の圧力、掘進速度などを計測し、サンプリング現象を詳細に観測したことが特徴である。

- ・ 柳沢希実：水溶性ポリマーの濃厚溶液を用いた乱れの少ない試料のサンプリングのメカニズムに関する実験的検討、横浜国立大学、修士論文、2003.

第 2 章 研究の目的

水溶性ポリマーの濃厚溶液を利用したサンプリング（RDP サンプリング）は、ポリマー溶液の封入やコア底部の切断作業が困難なために深部地盤に適用することができない。また、ポリマー溶液の濃度や配合によって、試料にポリマー溶液が浸透してしまう問題がある。よって、以下の目的について研究・開発を行い、実務への普及を図ることとした。

- ・ コアバレルを改良し、深部地盤に対しても適用できるようにする。
- ・ ポリマー溶液の特性と浸透メカニズムを解明し、ポリマー溶液がコアの表層に浸透することの影響を把握する。

第 3 章 研究の計画

3. 1 平成 16 年度の計画

（１）コアバレルの挙動模擬実験

ポリマー溶液と泥水を用いて、コアバレルの挙動模擬実験を行う。実験装置は 2 重管の内側に掘削水を封入したものである。外側の円筒をコアバレルに、内側の円筒（外径 100mm）をコアに見立てて、外側の円筒のみを回転させる。ワイセンベルク効果などが発揮されるメカニ

ズムを解明するため、外側の円筒の内径、回転速度、ポリマー溶液の濃度や圧力を制御して、内側の円筒に作用する拘束圧やせん断応力を測定できる点が特徴である。

(2) ポリマー溶液の浸透試験

ポリマー溶液がコアに浸透するメカニズムを解明するために、ポリマー溶液の浸透試験を実施する。最も浸透が顕著な砂を試料に用いて、試料の含水状態や粒度、ポリマー溶液の濃度や圧力などを制御して、ポリマー溶液の浸透状況を観察する。

(3) ポリマー溶液の粘性の計測

非ニュートン流体であるポリマー溶液の粘性を回転式粘度計（ビスコ・ハーケ社、ビスコテスターVT6L 型）により計測し、その粘度とずり速度（シア・レイト）の関係を検討する。

(4) 深部地盤に適用可能なコアバレルの開発

深部地盤に RDP サンプリングを適用するためには、孔底面の整形、コアバレル降下時のポリマー溶液の漏洩防止、回転切削後にコア底部の切断を行う必要がある。そのため、孔底整形用のビット、フリーピストン、コアリフター（コアキャッチャー）を特徴とするコアバレルを開発する。

(5) 貝殻混じり砂層における実証試験

基礎地盤コンサルタンツ（株）の千葉実験場において、砂地盤の下層に存在する貝殻混じり砂層に対して RDP サンプリングを行う。コア径は 100mm とする。未固結な砂層に貝殻片が高い密度で挟在する地層から乱れが少ない試料を得ることは、非常に難しい。よって、当該研究の成果を確認するための実験となる。

(6) 貝殻混じり砂層の物理試験および力学試験

項目（5）で得られた試料が、実際に乱れの影響が少ないものであるかを確認する。具体的には、超音波速度計測と三軸圧縮試験を実施し、過去に行われたサウンディングや物理探査の結果と比較する。

3. 2 平成 17 年度の計画

(1) ポリマー溶液を含浸した試料の力学実験

異なる濃度のポリマー溶液を含浸させた砂の供試体を作製して、三軸圧縮試験を実施する。そして、ポリマー溶液がコアの表層に浸透することにより、コアの乱れの防止にどれほど効果

があるか、また、どれほど力学特性を変化させてしまうかを評価する。

（２）大孔径サンプリング用のコアバレルの開発

大径の礫や貝殻片を含む不均質な地盤を対象とした大孔径のサンプリングを対象としたコアバレルを開発する。昨年度と同じく、基礎地盤コンサルタンツ（株）の千葉実験場において、貝殻混じりの砂層を対象に実証試験を行い、その性能を確認する。掘り屑（カッティングス）の量に応じてポリマー溶液の供給量を調整できるようにポリマー溶液供給装置を設置すること、フリーピストンの簡便化などを特徴とする。

（３）孔底三軸試験への応用

孔底で三軸試験を行う孔底三軸試験では、孔底に精度良く円柱形状の試験体を作製することが肝要である。そこで、RDP サンプリングの技術に応用して試験体を作製することを検討する。リングコア型の差動トランス式変位計を組み込んだ孔底三軸試験装置用にコアバレルを開発して、モルタルを用いた模型地盤に対してポリマー溶液を利用して試験体を作製することに挑戦する。

第４章 研究の実施体制

地盤調査において、特にボーリングやサンプリングに関わる鑿井技術あるいは削孔技術は、非常に特殊なオペレーション技術の要素を含んでいる。当該研究では、このオペレーション技術の専門家であるフォアマンの協力が欠かせない。そこで、表 4.1 に示すように、基礎地盤コンサルタンツ（株）・技術開発部・主席調査技師の金子 進氏に研究協力者として研究に参加をしてもらった。なお、基礎地盤コンサルタンツ（株）は、RDP サンプリング技術の開発当初からの研究パートナーでもある。

第５章 研究内容と成果

具体的な研究作業は、主に横浜国立大学の卒業研究ないし修士研究として実施された。よって、その内容と成果の詳細は、卒業論文および修士論文に詳述されている。また、その概要および主要な成果は、研究論文や会議発表を通じて外部発表されており、その内容を巻末の付録 A2（本研究の成果の外部発表）に掲載した。

なお、各研究項目の後ろにリストアップした【文献表示】は、巻頭の文献表示に従っている。

5. 1 平成 16 年度の成果

(1) コアバレルの挙動模擬実験

ポリマー溶液と泥水を用いてコアバレルの挙動模擬実験を行った。外側の円筒の内径、回転速度、ポリマー溶液の濃度や圧力を変化させて、内側の円筒に作用する拘束圧やせん断応力を測定した。その結果、ポリマー溶液が擬塑性流体であることを反映して、コアの側面に作用するせん断応力が非常に小さく（数 kPa 程度）、コアを乱すほどではないことが分かった。また、ワイゼンベルク（回転に伴う垂直応力増加）効果により、コアの側面に数 kPa 程度の垂直応力（拘束圧）が作用し、皮膜効果と併せてコアのせん断強さの増加に寄与することが分かった。

【国際会議論文】Tani et al. (2004)

【国内会議発表】柳沢 他 (2004)、白井 他 (2004)、谷 他 (2004)

【卒業論文・修士論文】白井 (2004)

(2) ポリマー溶液の浸透試験

砂を試料に用いてポリマー溶液の浸透試験を行った。試料の含水状態や粒度、ポリマー溶液の濃度や圧力などを変化させて、ポリマー溶液の浸透状況を観察した。その結果、細砂に相当する粒度の乾燥試料に対して、ポリマー溶液の浸透モデルを作成することができた。そして、RDP サンプリングで想定される条件下でポリマー溶液がコアに浸透する距離は数 mm 以下と推定され、その影響が小さいことが分かった。しかし、飽和試料に対しては、浸透距離の観測が困難であったため、浸透メカニズムを解明することはできなかった。

【国内会議発表】柳沢 他 (2004)、白井 他 (2004)、谷 他 (2004)

【卒業論文・修士論文】白井 (2004)

(3) ポリマー溶液の粘性の計測

回転式粘度計（ビスコ・ハーケ社、ビスコテスターVT6L 型）を用いて、ポリマー溶液および泥水の粘度とずり速度（シア・レイト）の関係を計測した。その結果、ポリマー溶液の擬塑性流体としての特性が明らかになり、粘性係数を濃度とずり速度の関係としてモデル化した。また、泥水の粘性特性と比較することにより、粘性特性が RDP サンプリングにより乱れが少ない試料が得られる主な原因ではないことが明らかになった。

【国内会議発表】柳沢 他 (2004)、白井 他 (2004)、谷 他 (2004)

【卒業論文・修士論文】白井 (2004)

(4) 深部地盤に適用可能なコアバレルの開発

深部地盤に RDP サンプリングを適用するために、3 点の改良を行った。1 点目は、孔底面を

平坦でスライムを排除した状態に仕上げるために、磨り潰し効果と焼き付け効果による整形を特徴とする孔底仕上げ用の一文字ビット（写真 5.1）を開発した。2 点目は、コアバレル降下時にポリマー溶液が漏洩することを防止するために、封入栓となるフリーピストン（写真 5.2）をコアバレルの先端に設けることとした。3 点目は、回転切削後にコア底部を切断するために、ポリマー溶液がビットにスムーズに供給するためのウォーターウェイとスリットを特徴とするコアリフター（コアキャッチャー）を製作した。また、ロッドの上部と下部に排水孔を設けたセグメントチューブと、ドーナツ状のゴムを使用した衝撃・振動の緩和装置も作製した。

【国内会議発表】池野谷 他（2005a、2005b）、金子 他（2005）

【学会誌】谷・金子（2006）

【卒業論文・修士論文】池野谷（2006）

（５）貝殻混じり砂層における実証試験

基礎地盤コンサルタンツ（株）の千葉実験場において、未固結な砂地盤を対象にコア径が 100mm のサンプリングを 10～22m の深さで実施した。そして、未固結な砂層に貝殻片が高い密度で挟在する地層（17m 以深）から、少なくとも見掛け上は乱れの影響が分からない程度にきれいな棒状コア（写真 5.3）を採取することに成功した。

【国内会議発表】池野谷 他（2005a、2005b、2005c）、金子 他（2005）

【卒業論文・修士論文】池野谷（2006）

（６）貝殻混じり砂層の物理試験および力学試験

項目（５）で得られた試料が、実際に乱れが少ないものであるかを確認するために、各種の物理試験（密度試験、粒度試験）および力学試験（三軸圧縮試験、超音波速度計測）を行った。そして、過去に行われたサウンディング（標準貫入試験、プレッシャーメータ試験）や物理探査（サスペンション P S 検層）の結果と比較した。その結果、RDP サンプリングにより得られた試料から評価される剛性や強度が、サンプリングによる乱れの影響を受けないサウンディングや物理探査から評価された結果に調和的であることから、試料の乱れは非常に小さいものであることが分かった。

【国内会議発表】池野谷 他（2005 a、2005b、2005c）、金子 他（2005）

【卒業論文・修士論文】池野谷（2006）

5. 2 平成 17 年度の成果

（１）ポリマー溶液を含侵した試料の力学実験

異なる濃度のポリマー溶液を含侵させた砂の供試体を作製して、一連の三軸圧縮試験を行った。その結果、高濃度（数％程度）のポリマー溶液によっても、内部摩擦角には影響が認められず、また見かけの粘着力の増加も数 kPa 程度に限定されることが分かった。よって、サンプ

リングによってコアに浸透するポリマー溶液は表層に限定されることと、間隙水に希釈されることを考慮すれば、試料の力学特性に与える影響は極めて小さいと推定される。

【国内会議発表】柳沢 他 (2004)

【卒業論文・修士論文】徳脇 (2006)

(2) 大孔径サンプリング用のコアバレルの開発

大径の礫や貝殻片を含む不均質な地盤を対象とした大孔径のサンプリングを対象としたコアバレルを開発した。平成 16 年度と同じく、基礎地盤コンサルタンツ（株）の千葉実験場において、貝殻混じりの砂層を対象に実証試験を行い、その性能が十分であることを確認した。掘り屑（カッティングス）の量に応じてポリマー溶液の供給量を調整できるようにポリマー溶液供給装置を設置すること、フリーピストンの軽量化を図ったことなどを特徴とする。

【国内会議発表】金子 他 (2005)

【学会誌】谷・金子 (2006)

【卒業論文・修士論文】徳脇 (2006)

(3) 孔底三軸試験への応用

孔底三軸試験において孔底に精度良く円柱形状の試験体を作製するために、RDP サンプリングの技術を応用して試験体を作製する技術を開発した。リングコア型の差動トランス式変位計を組み込んだ孔底三軸試験装置用にコアバレル（写真 5.4）を開発した。そして、モルタルを用いた模型地盤に対して、ポリマー溶液を利用してきれいな試験体が精度良く作製できることを確認した。

【国内会議発表】池野谷 他 (2006)、金子 他 (2005)、谷 (2005)

【工業所有権】谷 他 (2005)

【卒業論文・修士論文】池野谷 (2006)

第6章 まとめ

高濃度の水溶性ポリマー溶液を利用したサンプリング（RDP サンプリング）に関して、以下の 2 点を目的とした研究・開発を行い、実務への普及を図った。

- ・コアバレルを改良し、深部地盤に対しても適用できるようにする。
- ・ポリマー溶液の特性と浸透メカニズムを解明し、ポリマー溶液がコアの表層に浸透することの影響を把握する。

その成果の具体的な中身については、概要を第 5 章に示した。また、主要な成果は、国際会議発表 1 件、国内会議発表 9 件、工業所有権 1 件、学会誌 1 件を通じて外部発表してきた。詳

細については、修士論文 1 件と卒業論文 2 件を参照されたい。なお、平成 17 年度に検討した成果については、平成 18 年度中に研究論文として外部への公表に努める予定である。

最も重要な成果は、RDP サンプリングが深部地盤にも適用できるようになり、実用技術として完成したことである。本研究の成果を受けて、実務での事例も、盛り土、自破碎性の火成岩、崖錐など困難な地盤条件において、すでに数十地点に及んでいる。

今後は、コストダウンと作業の効率化を図ることが必要であろう。

謝辞

本研究の成果は、柳沢希実（ライト工業（株））、池野谷尚史（東急建設（株））の修論生 2 名、および白井美代（NGO）、徳脇拓也（未定）の卒論生 2 名の精力的な努力に負うところが非常に大きい。末筆ながら謝意を表します。

（2006 年 2 月 6 日）

参考文献

- 1) 基礎地盤コンサルタンツ：高機能サンプリングシステム「GP サンプラー」、技術資料、1999.

表 4.1 研究の実施体制

氏 名	所属・職位	専門分野	役割分担
谷 和夫 (研究代表者)	横浜国立大学大学院 工学研究院 教授	岩盤工学 地盤工学 応用地質学	<ul style="list-style-type: none"> ● 研究の企画と総括 ● 室内実験の実施 ● ポリマーの性能分析
金子 進 (研究協力者)	基礎地盤コンサルタンツ(株) 技術本部 主任調査技師	地盤工学 鑿井技術 削孔技術	<ul style="list-style-type: none"> ● ポリマー制御治具の開発 ● 現場掘削実験の実施

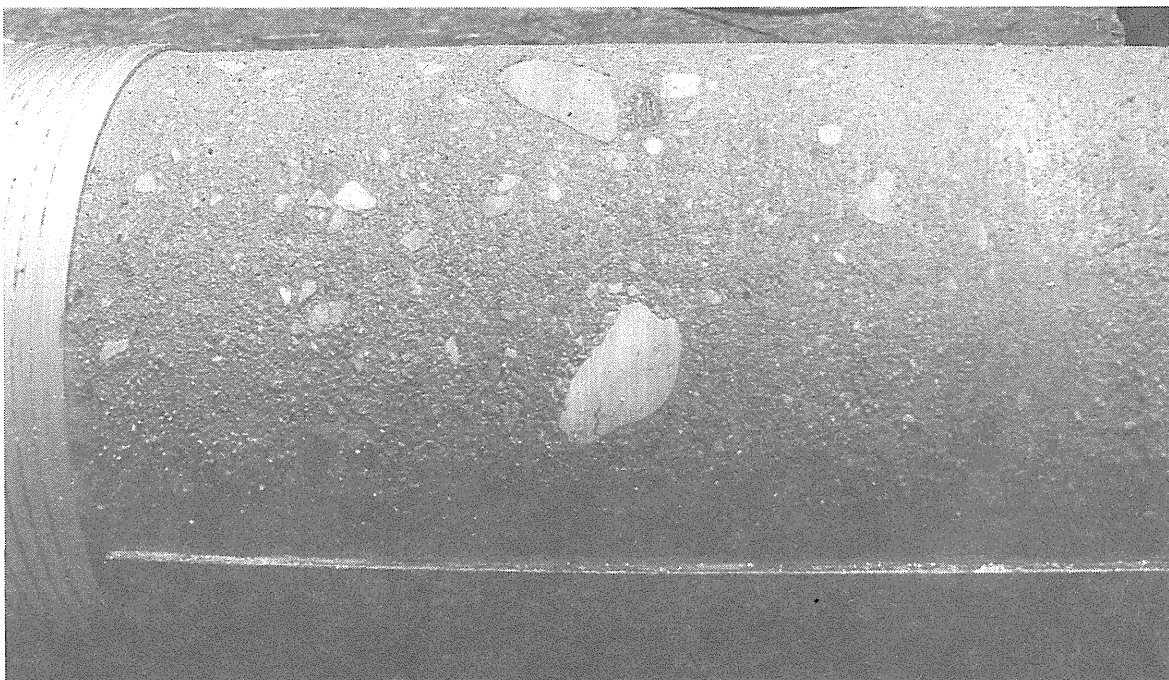


写真 1.1 礫を含む未固結な砂地盤から RDP サンプリングにより得られた試料
(砂地盤には乱れや緩みの兆候は認められず、礫の切削面は光沢を有する)

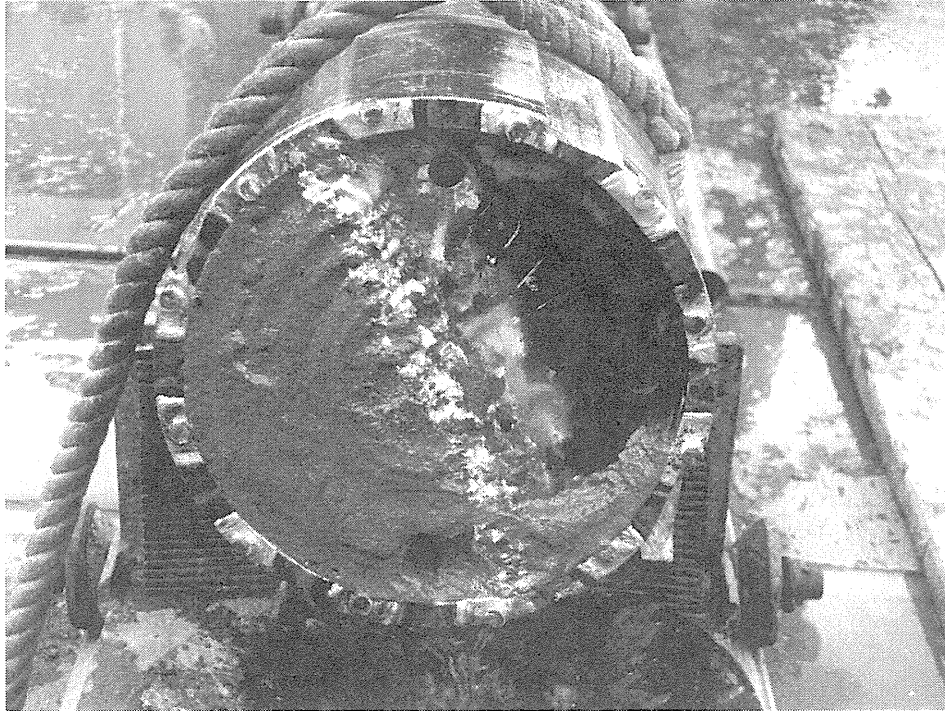


写真 5.1 孔底の整形用に用いる一文字ビット

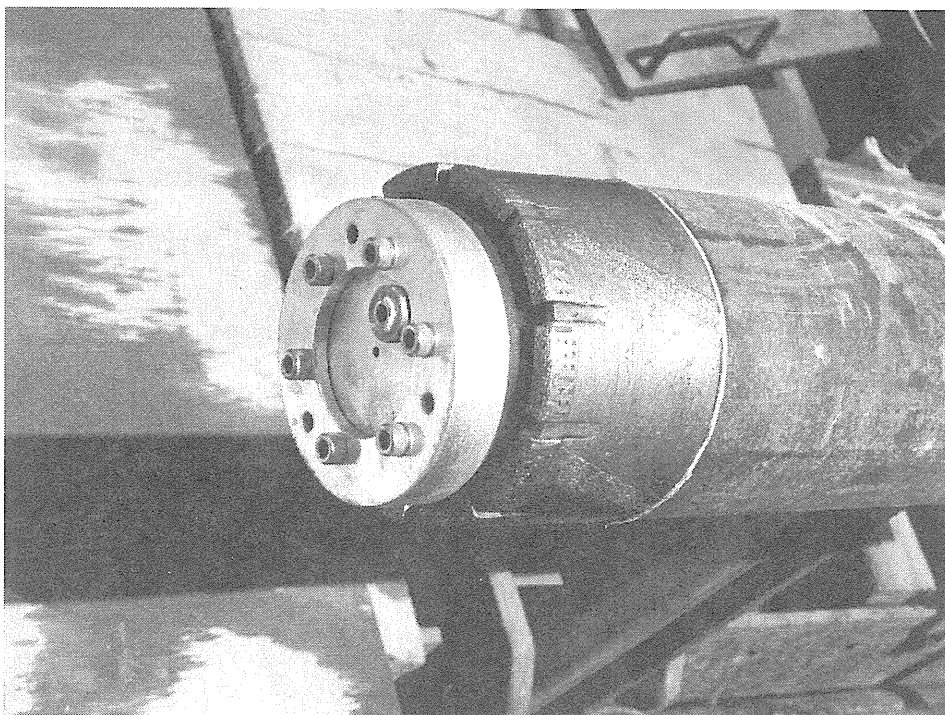


写真 5.2 ポリマー溶液の封入栓となるフリーピストン（コア径 100mm 用）

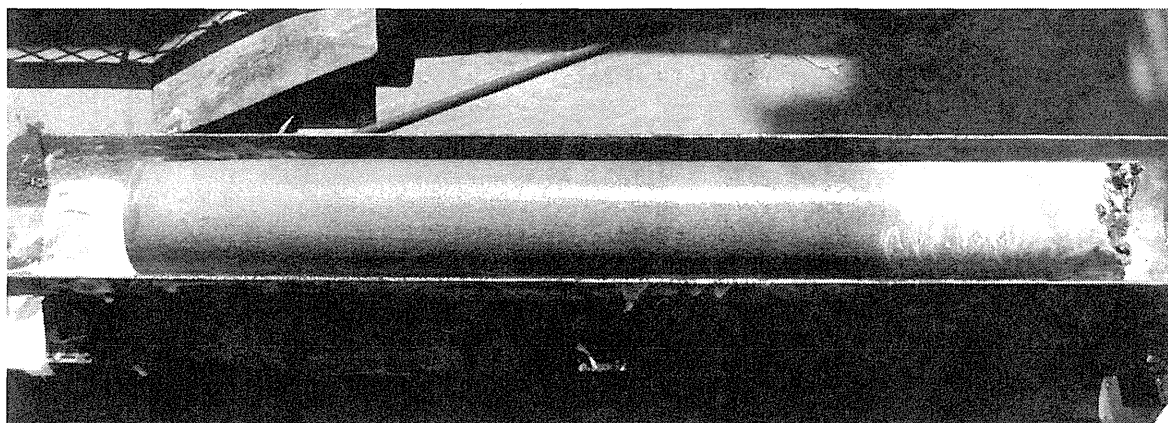


写真 5.3 未固結な砂層から得られたコア（深度 17-18m、径 100mm）

上段： 地上に回収して取り出した直後の様子で、ポリマー溶液がコアの側面に付着している

下段： ポリマー溶液をスポンジで拭き取った直後の様子で、右側 1/5 の部分に貝殻混じりの砂層が見える

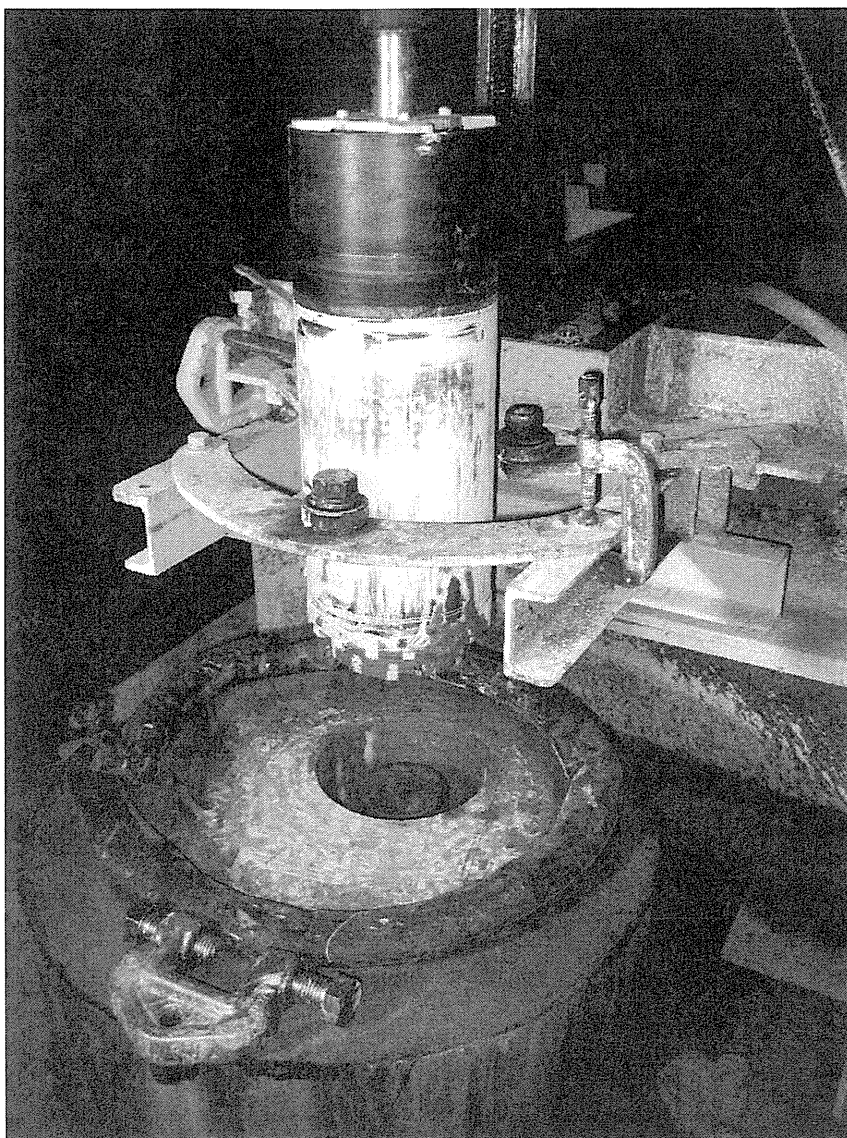


写真 5.4 孔底三軸試験用のコアバレル

(試験体の径は 90mm、高さは 250mm である)

付 録

A1. 関連する研究成果の外部発表リスト（1985 年～2003 年）

[1985]

- 酒井運雄、湯川浩則、斉藤幸雄、金子 進：土圧バランス式サンプラーの試作について、サンプリング・シンポジウム論文集、pp.103-108、1985.

[1993]

- 酒井運雄、金子 進：地盤試料採取方法とその装置、特願平 05-160440、特開平 06-346431 特許 2696472、1993.
- 金子 進 他（分担執筆）：ボーリング計測マニュアル、（社）全国地質調査業協会連合会、1993.

[1996]

- 谷 和夫、川崎 了、金子 進、豊岡義則：室内ボーリング実験装置の開発、第 31 回地盤工学研究発表会、地盤工学会、pp.417-418、1996.
- 金子 進、豊岡義則：ロータリー・サウンディング・システムの開発、第 31 回地盤工学研究発表会、pp.433-434、1996.
- 川崎 了、谷 和夫、金子 進、豊岡義則：軟岩コア品質評価のための室内ボーリング実験、第 31 回地盤工学研究発表会、地盤工学会、pp.1425-1426、1996.

[1997]

- 谷 和夫：ロータリー式サンプリング法による試料採取方法、特願平 09-318702、特開平 11-152982、1997.
- 谷 和夫、川崎 了、豊岡義則、金子 進：均質な堆積軟岩（シルト岩）の地盤からボーリングによって採取された試料の乱れを評価するパラメータ、日本応用地質学会平成 9 年度研究発表会、pp.133-136、1997.

[1998]

- Tani, K. : Importance of instrumented drilling, *Proc. International Conference on Site Characterization*, Atlanta, Vol.1, pp.431-437, 1998.
- 谷 和夫：電力中央研究所における「計測ボーリング」技術の開発経緯、電力土木、No.278（11月号）、pp.117-121、1998.
- 谷 和夫、池見元宣、金子 進、豊岡義則：計測ボーリングのシステムを構築する上で重要な留意点、日本応用地質学会平成 10 年度研究発表会、pp.217-220、1998.
- 谷 和夫、金子 進、豊岡義則、川崎 了：ロータリー・コア・サンプリング時のコア・バレルの揺動と新しいサンプリング法の提案、第 53 回年次学術講演会、土木学会、III-A407、pp.810-811、1998.

- 谷 和夫、川崎 了、伊藤洋：ボーリング技術の高度化に関する研究 ― 均質な堆積軟岩におけるサンプリングによる試料の乱れの評価 ―、電力中央研究所、研究報告、No.U97066、27p、1998.

[1999]

- 酒井運雄、金子 進、川原 隆：粒状体地盤コアバーレル、特願平 11-279160、特開 2001-098539、特許 3456637、1999.
- 池見元宣、谷 和夫：計測ボーリングの室内実験システムの開発、第 29 回岩盤力学に関するシンポジウム、土木学会、pp.271-275、1999.
- 谷 和夫、池見元宣、金子 進、豊岡義則：計測ボーリングにおける循環水の圧力計測に関する知見、第 34 回地盤工学研究発表会、地盤工学会、pp.291-292、1999.
- 谷 和夫、池見元宣、金子 進、豊岡義則：計測ボーリングによって堆積軟岩の強度特性を評価する手法の検討、日本応用地質学会平成 11 年度研究発表会、pp.223-226、1999.
- 谷 和夫：ボーリング技術の高度化に関する研究 ― 「計測ボーリングシステム」の開発と堆積軟岩における実証実験 ―、電力中央研究所、研究報告、No.U98021、59p、1999.

[2000]

- 豊岡義則、谷 和夫、野崎隆司、金子 進：ロータリーサンプリングにおけるサンプラーおよびその周辺の挙動について、軟岩と硬質土のロータリー式サンプリング技術と物性評価に関するシンポジウム、地盤工学会、pp.89-94、2000.
- 谷 和夫、川崎 了、金子 進、豊岡義則：コアバレルの揺動現象に関する室内および現場実験における計測結果、軟岩と硬質土のロータリー式サンプリング技術と物性評価に関するシンポジウム、地盤工学会、pp.155-160、2000.
- 中込敦久、谷 和夫、岡田哲実、中村敏明：計測ボーリングと室内三軸試験によって得られた堆積軟岩の強度定数の比較、第 35 回地盤工学研究発表会、地盤工学会、pp.481-482、2000.

[2001]

- 酒井運雄、谷 和夫、豊岡義則：計測ボーリングを応用したサンプリング条件の最適化システム、特願 2001-384533、特開 2003-184062、2001.
- 三枝弘幸、谷 和夫、金子 進：振動給圧掘削式サウンディング手法による軸力制御条件の影響と評価手法としての信頼性、第 56 回年次学術講演会、土木学会、III-A309、pp.618-619、2001.

[2002]

- 三枝弘幸、谷 和夫、金子 進、我妻達弥：振動給圧式ボーリングによるサウンディングの開発 ― 掘削条件が及ぼす影響と適用性の検討 ―、土木学会論文報告集、No.722/III-61、pp.253-264、2002.
- 眞本悠一、谷 和夫、金子 進：計測ボーリングによって掘進中のトラブルの発生および回避作業のモニタリングした事例、土と基礎、地盤工学会、第 50 巻、第 11 号、pp.9-11、2002.

- 三枝弘幸、谷 和夫、金子 進：堆積軟岩を対象とした振動給圧式サウンディング手法の掘削条件の影響に関する実験的研究、第 11 回岩の力学国内シンポジウム、A10、6p、2002.
- 眞本悠一、谷 和夫：ボーリング掘削における軸力制御に対する掘削効率の検討、第 11 回岩の力学国内シンポジウム、K01、6p、2002.
- 我妻達弥、金子 進、豊嶋賢治、谷 和夫：振動給圧式サウンディング手法による強度定数の評価に関する検討、大深度地下利用における地盤および構造物の調査・計測技術に関するワークショップ、地盤工学会、pp.4/11-16、2002.
- 谷 和夫、眞本悠一、金子 進：計測ボーリング技術によって凍結サンプリングをモニタリングした事例報告、日本応用地質学会平成 14 年度研究発表会、pp.295-298、2002.
- 我妻達弥、谷 和夫、金子 進：計測ボーリングによる振動給圧式サウンディングの砂地盤への適用性に関する実験的検討、第 57 回年次学術講演会、土木学会、III-695、pp.1389-1390、2002.

[2003]

- 眞本悠一、谷 和夫、金子 進：計測ボーリング技術を活用したボーリング機械の掘削制御に関する実験的検討、第 32 回岩盤力学に関するシンポジウム、土木学会、pp.17-24、2003.
- 柳沢希実、金子 進、酒井運雄、谷 和夫：高濃度ポリマー溶液を使用した新しいサンプリング方法の実験的研究、第 32 回岩盤力学に関するシンポジウム、土木学会、pp.311-316、2003.
- 谷 和夫、眞本悠一：計測ボーリング技術を活用したボーリング機械の掘進制御モデルの提案、第 38 回地盤工学研究発表会、地盤工学会、pp.129-130、2003.
- 柳沢希実、金子 進、酒井運雄、谷 和夫：水溶性ポリマーの濃厚溶液を用いた乱れの少ないサンプリング、第 38 回地盤工学研究発表会、地盤工学会、pp.137-138、2003.
- 坂梨仁哉、谷 和夫、我妻達弥：計測ボーリングと三軸試験による強度定数の比較、第 30 回土木学会関東支部技術研究発表会、土木学会、III-6、2p、2003.

A2. 本研究の成果の外部発表（2004 年～2006 年）

[2004]

- Tani, K., Kaneko, S., Yoshida, Y. and Ikemi, M.: Development of instrumented drilling technology for geotechnical investigation of rock mass, *Proc. 3rd Asian Rock Mechanics Symposium*, Kyoto, pp.1181-1186, 2004.
- 柳沢希実、谷 和夫、金子 進、酒井運雄：水溶性ポリマーの濃厚溶液を使用した新しいサンプリング方法のメカニズム、第 33 回岩盤力学に関するシンポジウム、土木学会、pp.49-56、2004.
- 白井美代、谷 和夫、金子 進：水溶性ポリマーの濃厚溶液を用いたサンプリング方法と泥水を用いたサンプリング方法の検討ー粘性係数の比較ー、第 33 回岩盤力学に関するシンポジウム、土木学会、pp.319-324、2004.
- 谷 和夫、白井美代、金子 進：水溶性ポリマーの濃厚溶液を利用したサンプリング方法の考え方、第 39 回地盤工学研究発表会、地盤工学会、pp.145-146、2004.

[2005]

- 谷 和夫、池野谷尚史、鶴俊太郎：軸変位計測装置及び軸変位計測方法、特願 2005-303764、2005.
- 池野谷尚史、山田眞一、金子 進、谷 和夫：水溶性ポリマーを用いたサンプリングにより採取された貝殻混じり砂の力学特性、第 50 回地盤工学シンポジウム、地盤工学会、pp.129-136、2005.
- 曾布川茂、岡田哲実、辻野敏文、立川日出男、谷 和夫：原位置三軸試験における変位計測システムの改良と適用性の検討、第 34 回岩盤力学に関するシンポジウム、土木学会、pp.201-206、2005.
- 金子 進、谷 和夫：水溶性ポリマーの濃厚溶液を利用したサンプリング方法の深部地盤への適用、第 40 回地盤工学研究発表会、地盤工学会、pp.183-184、2005.
- 池野谷尚史、山田眞一、金子 進、谷 和夫：三軸試験および各種原位置試験による貝殻混じり砂の力学特性、第 40 回地盤工学研究発表会、地盤工学会、pp.503-504、2005.
- 池野谷尚史、山田眞一、金子 進、谷 和夫：三軸試験による貝殻混じり砂の力学特性、第 1 回関東支部研究発表会、地盤工学会、pp.63-66、2005.

[2006]

- 谷 和夫、金子 進：水溶性ポリマーの濃厚溶液を利用した乱さない試料のサンプリング方法、土と基礎、第 54 巻、第 5 号、p.**-**、2006.
- 池野谷尚史、鶴 俊太郎、金子 進、立川日出男、谷 和夫：差動トランス式変位計測装置を利用した新しい原位置三軸試験装置の開発、第 35 回岩盤力学に関するシンポジウム、土木学会、pp.145-148、2006.

上に示す報告書以外の各論文を以下に添付する。

以下の頁は著作権者の許諾を得ていないため、公表できません。

p. 18 ~ p. 72

p. ~ p.

p. ~ p.

p. ~ p.

p. ~ p.

水溶性ポリマーの濃厚溶液を利用したサンプリング方法の深部地盤への適用

サンプリング、ボーリング、試料の乱れ

基礎地盤コンサルタンツ (株)

正会員

金子 進

横浜国立大学大学院

国際会員 ○ 谷 和夫

1. はじめに

水溶性ポリマーの濃厚溶液 (以後、ポリマー溶液と称す) を利用したサンプリング方法 (Rotary Drilling using Polymer) は、細粒分を含む砂礫、崖錐堆積物、破碎帯、風化岩盤などのようなサンプリングが難しい地盤においても、ロータリー・ドリリングによって乱さない試料を得ることを可能にした¹⁾。また、これまでの検討によって、そのメカニズムの解明や^{2),3)}、サンプリング条件を設定する考え方の整備が進められた⁴⁾。しかし、適用が可能な深度が数メートルと浅部に限定されていた。

そこで、予めポリマー溶液を封入したコアバレルを孔底に下ろしてからサンプリングを行うことが可能な機器を開発した。そして、未固結な砂質地盤において 20m を超える深度までサンプリングを実施し、地盤深部より従来よりも格段に乱れが少ないと思われる試料を採取できることを確認した⁵⁾。

2. 深部地盤用のサンプリング機器の開発

サンプラー本体の長さは 1158mm、コアの最大採取長さは 945mm とし、ビット (インブリグネーティッド・ダイヤモンド) の外径は 116mm、内径は 97mm で呼び径 100mm に対応する。

2.1 孔底の仕上げに関わる改良

孔底から転動ないし浮遊する礫などの粗粒物を排除し、平滑に仕上げることを目的としたビットを作製した。先端から 10mm 上方に底盤を有し、外周と底面中央に一文字状にチップを配した構造をしている。底盤とビット先端の距離が短くし、循環水の供給を底盤の外周に沿って設けられた小孔 4 箇所限定することで、磨り潰し効果や焼き付き効果が期待できる。

2.2 ポリマー溶液に関わる改良

コアバレル降下中にポリマー溶液の漏洩を防ぐことを目的とした先端プラグ (パッカー方式のフリー・ピストン、直径 95mm、高さ 148mm) を作製した。側面にゴム膜を配し、0.5MPa のパッカー圧力によりコアバレルの先端に保持される。コアバレルが孔底に着座すると、先端にセットしたパイロット針がラバー・バルブに貫入して、パッカー部の圧力が開放される (予め真空にした排水用チャンバーに加圧媒体の水が吸い込まれてパッカーが収縮する)。そして、コアバレル内に封入したポリマー溶液がビット周辺に適切な分量だけ供給される。

また、削孔によりカッティングスを含んだポリマー溶液を回収するため、コアバレルの直上にセグメント・チューブを配した。カッティングスのみを沈降分離して回収することは不可能なので、チューブ内のロッドの底部と上部に排水孔を設けて、ポリマー溶液で泥水を置換して回収する方式とした。

2.3 コアの回収に関わる改良

掘削水が循環しないために、コア・キャッチャー部におけるスライムの洗浄が不十分となり、背面部が閉塞状態になってキャッチャー・ケースに張り付く虞がある。そこで、張り付き防止と、ポリマー溶液のビットへのスムーズな供給経路を確保することを目的として、背面に細溝を刻み、さらに上端の肉薄部に矩形鋸歯状の切り込み部を設けた。

2.4 ロッドの揺動防止に関わる改良

ロッドの揺動を防ぐために、ベアリングを内蔵するセントライザーと衝撃吸収用のダンパーを設けた。

3. 砂地盤における実証試験

3.1 地盤の概要

千葉市長沼原において厚く堆積する未固結な完新統を対象とした。近傍で行われた過去のボーリング結果より、地表下 4m まではローム、その下に N 値が 2~20 程度の粘土・シルト・砂の互層が深さ 11m まで連続する。サンプリングの対象は、11m 以深に堆積する N 値が 15~30 の細砂 (深度 10m~23m) とした。深度 17~22m 付近には貝殻を大量に含み N 値が 50 を大幅に上回る層が挟まれていることが特徴である。また、サスペンション PS 検層による弾性波速度は、12~16m の細砂層で P 波速度 $V_p = 1330 \sim 1430 \text{ m/s}$ 、S 波速度 $V_s = 280 \sim 310 \text{ m/s}$ 、17~22m の貝殻混じり砂層で $V_p = 1660 \sim 1820 \text{ m/s}$ 、 $V_s = 310 \sim 500 \text{ m/s}$ だった。

3.2 サンプリングの方法

先端プラグをセットした後に、濃度を数%に調整したポリマー溶液をコアバレル内に封入する。孔底に着座して先端

プラグが開放されてビットの周辺にポリマー溶液が供給されてから削孔を開始する。過度な給圧や揺動が生じないように注意し、掘進速度を 0.5～4.5cm/min に制御した。回転数は 300～350rpm である。サンプリング 1 回の掘進長は 80～85cm、孔底を仕上げるための掘進長は 20～25cm とした。

3.3 サンプリングの結果

コアパレルから取り出した直後の試料を写真-1 に示す。側面に付着したポリマー溶液が発揮するワイゼンベルク効果と皮膜形成効果により、試料が削孔中および回収中に適切に保護されていたことが推測される。写真-2 は、側面に付着したポリマー溶液を濡れ雑巾で拭き取った直後の試料を示す。拭き取りの際に観察されるポリマー溶液の顕著な曳糸性は、試料表面の土粒子の一体化に貢献している可能性を示唆しているようであるが、その効果のほどは不明である。

深度 10.3～17.2m の砂層の範囲で行った 6 本は、12.0m と 14.9m 付近に分離面が観察されたことを除いて、すべて側面が滑らかな棒状のコアとして採取された。10.7m と 11.7m の付近に暗灰色の礫（粒径 2～5mm）を部分的に含むが、側面に現れたすべて礫が滑らかな面で切断されており、周囲の砂層を乱した形跡は目視では認められなかった。

17.5m 以深で得られた砂層と貝殻混じり砂層の境界部の試料を写真-3 に示す。試料底部の切断面を見ると、大量の貝殻（主に二枚貝）が含まれていることが分かる。従来のサンプリング技術では、貝殻がビットに押し潰されたり、砂が掘削水に洗い出されたり、貝殻片が移動して周辺の砂を乱したりして、このように大量に貝殻を含む未固結な砂層において見掛けの上でも乱れが少ない試料を得ることは不可能であった。しかし、今回のサンプリングにより得られた試料には、大きさが数 cm の二枚貝が大量に、また部分的には 10cm 程度の巻き貝も含まれるにもかかわらず、側面が非常に滑らかな棒状コアとして分離面を含まずに連続して得ることに成功した。ただし、見掛けの上だけでなく、力学的にも乱れが少ない品質が高い試料であるかどうかは、得られた試料を用いた力学試験などを行って詳細に検討する必要がある⁵⁾。

なお、試料底部の切断面を観察する限り、ポリマー溶液が試料の深部にまで（数 mm を超えて）浸透している様子は認められなかった。浸透したポリマー溶液が試料の力学特性に及ぼす影響についても、今後検討する必要がある。

4. まとめ

水溶性ポリマーの濃厚溶液を利用したサンプリング方法は、従来の技術では乱れが少ない試料を採取することが困難な地盤でも、ロータリー・ドリリングによって乱さない試料を得ることを可能にした。浅い地盤に適用が限定されるという深度上の制約も本研究により解決し、技術的に完成した。今後は、得られた試料の乱れの程度を評価すること⁵⁾、実務において適用事例を蓄積し、さらに効率の向上を図る必要がある。

参考文献：（1）基礎地盤コンサルツ（株）：高機能コアリングシステム技術資料「GP コアラー」、1999。（2）柳沢希実他：第 33 回岩盤力学に関するシンポジウム、pp.49-56、2004。（3）白井美代他：第 33 回岩盤力学に関するシンポジウム、pp.319-324、2004。（4）谷 和夫他：第 39 回地盤工学研究発表会、pp.145-146、2004。（5）池野谷尚史他：第 40 回地盤工学研究発表会、2005（投稿中）。



写真-1：コアパレルから取り出した直後のコア
（白く見える部分は、表面に付着しているポリマー溶液）

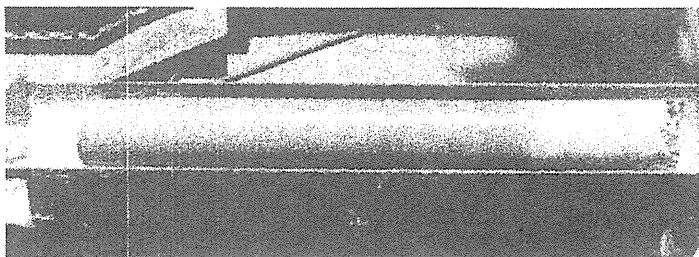


写真-2：ポリマー溶液を濡れ雑巾で拭き取った直後のコア
（右側の白く見える部分は、貝殻混じり砂層）

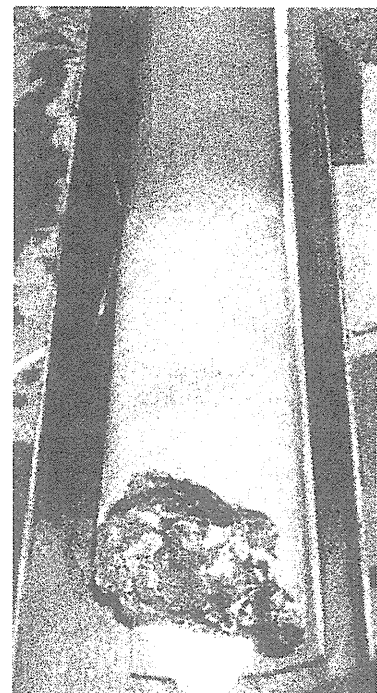


写真-3：採取された貝殻混じり砂層

三軸試験および各種原位置試験による貝殻混じり砂の力学特性

三軸試験 原位置試験 砂質土

横浜国立大学大学院 学生会員 ○池野谷尚史
 基礎地盤コンサルタンツ(株) 正会員 山田真一
 基礎地盤コンサルタンツ(株) 正会員 金子 進
 横浜国立大学大学院 国際会員 谷 和夫

1. はじめに

新しいサンプリング方法として、ベントナイト泥水の代わりに水溶性ポリマーの濃厚溶液を利用したサンプリング方法(Rotary Drilling using Polymer)が提案されている^{1),2)}。本報では、この方法により採取した砂および貝殻混じり砂の力学特性を検討し、採取試料の品質について評価した。

2. 各種原位置試験と室内試験の比較

2-1. 地盤および試験概要

試験の対象地盤は千葉市長沼原にある未固結な完新統地盤である。地盤の柱状図および N 値の分布を図-1 に示す。地盤は深さ 17~22m 付近で多量の二枚貝の貝殻を混入しており、特に 19~21m 間は貝殻だけの層を成している。この貝殻を含む層では、 N 値がその上下の層に比べて大きく増加しており、この層では物理・力学特性が大きく変化する。

原位置試験は標準貫入試験、サスペンション PS 検層および孔内水平載荷試験を実施した。孔内水平載荷試験はプレボーリング方式によって行った。

室内試験は超音波速度測定および三軸圧縮試験を実施した²⁾。用いた試料は深さ 15.5~17.6m で採取した砂と 18.0~22.1m で採取した貝殻混じり砂である。

2-2. 微小ひずみ領域での変形特性

図-2 に三軸試験、超音波速度測定および PS 検層から求めた変形係数の関係を示す。ここで、三軸試験から求められた変形係数は、静的載荷におけるせん断初期のひずみが 10^{-5} 程度のときのヤング率 E_i を用いた。なお、三軸試験および超音波速度測定から求められた変形係数については、試験時の有効拘束圧が原位置での有効土被り圧と異なる場合があるため、下に示す式(1)によって拘束圧の影響を補正した値を用いた。式中の n の値は既往の研究³⁾より $n=0.5$ とした。

$$E = E_0 \times \left(\frac{\sigma'_v}{\sigma'_v_0} \right)^n \quad \cdots \text{式(1)}$$

式(1)の σ'_v_0 は試験時の有効拘束圧、 E_0 はその拘束圧条件で求めた変形係数である。また、 σ'_v はそれぞれの試料の原位置での有効土被り圧である。

これより、超音波速度測定から求められた変形係数の値は、多少のデータのばらつきはあるものの、おおむね PS 検層から求められた値と一致していることが分かる。一方、三軸試験から求められた変形係数は、原位置試験の値よりも小さい値が得られた。

堀ら(2001)⁴⁾によると、粗い材料を含む地盤では、三軸試験から求めた剛性は原位置試験から求めたものよりも小さくなるため、試料の乱れを評価する場合には原位置試験と同じせん断波速度から評価すべきであるとしている。今回対象とした地盤において

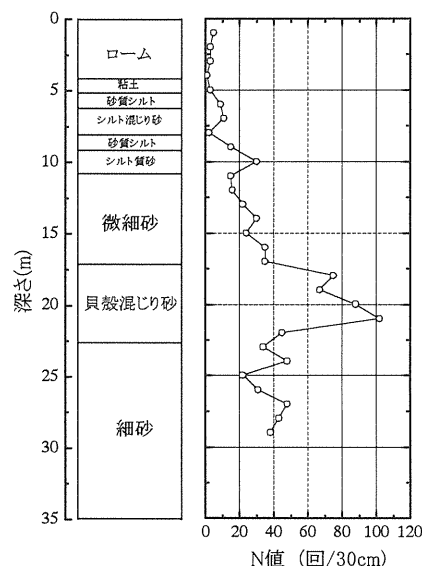
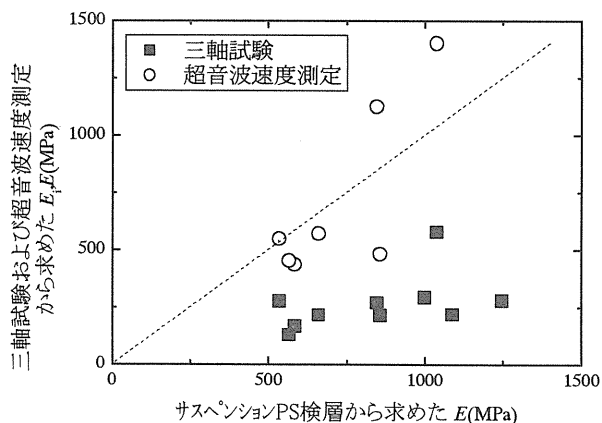
図-1 地盤の柱状図および N 値分布

図-2 室内試験および PS 検層から求められた変形係数の関係

Mechanical Characteristics of Sand with Shell by Triaxial Test and Various In-situ Test

Takafumi Ikenoya, (Yokohama National University), Shinichi Yamada, (kiso-jiban Consultants Co., Ltd)

Susumu Kaneko, (kiso-jiban Consultants Co., Ltd), Kazuo Tani, (Yokohama National University)

も貝殻という粗粒材料を含んでいるため、三軸試験から求めた変形係数が PS 検層から求めたものよりも小さい値を示したと考えられる。

したがって、超音波速度測定の結果から判断すると、試料の乱れは少ないと考えられる。

2-3. 中ひずみ領域での変形特性

図-3 に三軸試験と孔内水平載荷試験から求められた変形係数の関係を示す。ここで、孔内水平載荷試験から求められた変形係数は、室内試験結果における中ひずみ領域での変形係数に相当していると言われている⁵⁾。そこで、三軸試験から求められた変形係数は E_{50} を用いた。また、 E_{50} は試験時の有効拘束圧が原位置でのそれと異なるため、式(1)によって補正した値を用いた。

一般に三軸試験から得られる変形係数 E_{50} と孔内水平載荷試験から得られた変形係数 E はおおむね一致するとされている⁶⁾。図-3 を見ると、結果がばらついており、三軸試験から求めた E_{50} が孔内水平載荷試験から求めた E と一致しているとは言い難く、またどちらが大きいとも小さいとも言い難い結果になった。このことから、三軸試験から求めた E_{50} が孔内水平載荷試験から得られた E に比べ、過小な値を示すわけではないことが分かる。

2-4. 内部摩擦角

表-1 に三軸試験と標準貫入試験から求められた内部摩擦角 ϕ_d を示す。標準貫入試験から ϕ_d を求める際には下に示す式(2)を用いた⁷⁾。

$$\phi_d = \sqrt{20N_1 + 20} \quad (3.5 \leq N_1 \leq 20) \quad \dots \text{式(2)}, \quad N_1 = \sqrt{\frac{98}{\sigma'_v}} \times N \quad (\sigma'_v \text{ は原位置の有効土被り圧})$$

$$\phi_d = 40 \quad (20 < N_1)$$

三軸試験から得られた ϕ_d と標準貫入試験から式(2)を用いて求めた ϕ_d の値はほぼ一致しており、その差は微細砂層において 2.2° および貝殻混じり砂層において 2.9° である。畑中ら(1999)⁷⁾が原位置凍結サンプリング試料の三軸試験結果による ϕ_d と検討した結果によると、三軸試験から求められた ϕ_d は N 値から式(2)を用いて求めた ϕ_d の $\pm 3^\circ$ の範囲にあると報告されている。このことから、内部摩擦角 ϕ_d に関しては、本サンプリング方法は原位置凍結サンプリング方法と同程度の品質の試料が採取できていると考えられる。

3. まとめ

砂および貝殻混じり砂を対象として、RDP サンプリングを行い、室内試験結果と原位置試験結果を比較検討することによって、採取試料の品質を評価した。

- ・ 超音波速度測定から得られた変形係数 E とサハシソシ PS 検層から得られた変形係数 E はおおむね一致した。
- ・ 三軸試験から得られた変形係数 E_{50} は内水平載荷試験から得られた変形係数 E に比べ過小な値を示すということはない。
- ・ 三軸試験から得られた内部摩擦角 ϕ_d と標準貫入試験から得られた ϕ_d の関係は、 $\pm 3^\circ$ の範囲内にあった。

以上の結果より、RDP サンプリングで採取した砂、貝殻混じり砂は、実務的に見て品質が良い試料であると考えられる。しかし、今回の結果のみではデータ数も少なくばらつきも見られるため、さらにデータを蓄積し、より精度の高い品質評価を行いたいと考えている。

参考文献

- 1)金子・谷:水溶性ポリマーの濃厚溶液を利用したサンプリング方法の深度地盤への適用、第 40 回地盤工学研究発表会、投稿中、2005
- 2)池野谷ら:三軸試験による貝殻混じり砂の力学特性、第 1 回地盤工学会関東支部研究発表会、投稿中、2005
- 3)Ishihara, K.: Soil Behavior in Earthquake Geotechnics, Oxford Science Publications, 1996
- 4)堀ら:原位置試験と室内試験による初期合成の比較、第 36 回地盤工学研究発表会、pp.445~446、2001
- 5)Tani, K. et al: Deformation characteristics of soft rock by pressuremeter test, Pre-failure deformation of geomaterials (IS-Hokkaido), Vol. 1, pp.203~206、1994
- 6)地盤工学会:地盤調査の方法と解説、2004
- 7)畑中ら:砂質地盤の内部摩擦角 ϕ_d と正規化された標準貫入試験の N 値(N_1)の関係、土と基礎、Vol.47、No.8、pp.5~8、1999

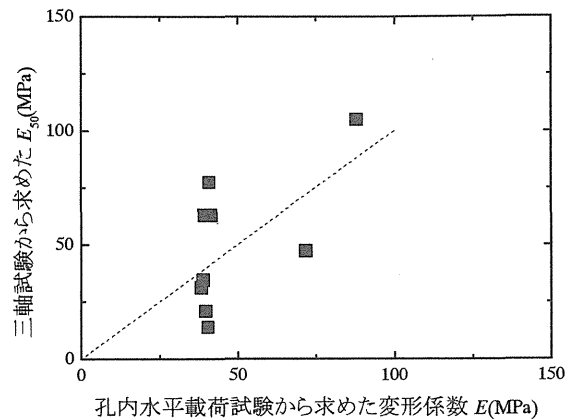


図-3 三軸試験および孔内水平載荷試験から求められた変形係数の関係

表-1 三軸試験と標準貫入試験より求められた内部摩擦角 ϕ_d

試料	三軸試験	標準貫入試験
微細砂層	37.2($^\circ$)	39.4($^\circ$)
貝殻混じり砂層	42.9($^\circ$)	40.0($^\circ$)

三軸試験による貝殻混じり砂の力学特性

貝殻混じり砂 三軸試験

横浜国立大学大学院 学生会員 ○池野谷尚史
 基礎地盤コンサルタンツ 正会員 山田眞一
 基礎地盤コンサルタンツ 正会員 金子 進
 横浜国立大学大学院 国際会員 谷 和夫

1. はじめに

新しいサンプリング方法として、ペントナイト泥水の代わりに水溶性ポリマーの濃厚溶液を利用したサンプリング方法が提案されている⁽¹⁾。本報では、この方法により採取した砂および貝殻混じり砂の力学特性について報告する。

2. 試料の物理特性

採取試料は砂と貝殻混じり砂である。砂を S 試料(供試体 No.S1～S5)、貝殻混じり砂を SS 試料(供試体 No.SS1～SS5)とする。また、貝殻混じり砂の貝殻混入率 S を、次式のように定義した。

$$\text{貝殻混入率 } S = \frac{W_{\text{shell}}}{W_{\text{sand}}}$$

ここで W_{shell} は試料に含まれる貝殻の重量、 W_{sand} は砂の重量である。それぞれの重量の測定は三軸試験後の供試体をふるい分けして行った。ふるいで分けきれない分については、塩酸を用いて貝殻を溶かすことで砂の重量を測定した。供試体の物理特性を貝殻混入率の測定結果と共に表-1 に示す。SS 試料については、貝殻の含まれた状態での間隙比と相対密度の他に、貝殻を計算によって除去して求めた間隙比と相対密度を示した。また、図-1 に各試料の粒径加積曲線を示す。ここで、S 試料の粒度試験の結果は S2 のものを代表値とした。試料に含まれる砂と貝殻それぞれの密度は、砂の密度 $\rho_s=2.740(\text{g/cm}^3)$ 、貝殻の密度 $\rho_s=2.938(\text{g/cm}^3)$ であった。

表-1 より、S 試料は密な状態であることが分かる。一方、SS 試料は貝殻を含んだ状態では相対密度が 100%を超える

表-1 試料の物理特性

	粗礫分 (%)	中礫分 (%)	細礫分 (%)	粗砂分 (%)	中砂分 (%)	細砂分 (%)	シルト分 (%)	粘土分 (%)	50%粒径 $D_{50}(\text{mm})$	均等係数 U_c
S2	0	0	0	0.2	62.8	36.3	0	0	0.292	2.31
SS1	5.3	17.1	6.7	3.1	58.1	9.4	0	0	0.411	2.50
SS2	0	5.1	14.3	22.7	53.6	4.1	0	0	0.773	2.84
SS3	8.9	18.8	14.7	9.7	42.9	6	0	0	1.103	7.98
SS4	22	17.2	12.1	6.4	39.5	8.2	0	0	2.308	14.82
SS5	0	24.6	13.8	2.8	56.3	2.5	0	0	0.765	3.83
平均	7.24	16.56	12.32	8.94	50.08	6.04	0	0	1.072	6.39

	貝殻混入率 S	湿潤密度 $\rho_t(\text{g/cm}^3)$	含水比 $w(\%)$	間隙比 e	相対密度 $D_r(\%)$	間隙比 e^*	相対密度 $D_r^*(\%)$
S1	0.0	1.887	31.5%	0.70	67.9%		
S2		1.922	31.0%	0.68	77.5%		
S3		1.851	32.1%	0.71	57.3%		
S4		1.835	32.3%	0.72	52.8%		
S5		1.863	30.0%	0.70	67.3%		
平均	0.0	1.872	31.4%	0.70	64.6%		
SS1	0.47	1.967	29.9%	0.66	90.8%	0.95	-92%
SS2	0.73	1.994	15.8%	0.58	141.3%	0.98	-108%
SS3	1.06	2.107	18.6%	0.56	152.4%	1.12	-199%
SS4	1.21	2.063	19.1%	0.58	143.2%	1.23	-268%
SS5	1.01	2.117	30.5%	0.62	118.6%	1.20	-248%
平均	0.90	2.050	22.8%	0.60	129.3%	1.10	-187%

※計算で貝殻を除去して求めた間隙比および相対密度

Mechanical Characteristics of Sand with Shell by Triaxial Test

Takafumi Ikenoya, (Yokohama National University), Shinichi Yamada, (kiso-jiban Consultants Co., Ltd)

Susumu Kaneko, (kiso-jiban Consultants Co., Ltd), Kazuo Tani, (Yokohama National University)

表-2 超音波速度測定の結果

No.	貝殻混入率 S	S波速度 V_s (m/s)	P波速度 V_p (m/s)	ポアソン比 ν	せん断剛性率 G (MPa)	ヤング率※1 E (MPa)	ヤング率※2 E (MPa)
S1	0.0	176.8	752.4	0.457	59.0	172.0	193.0
S2		178.1	739.6	0.455	61.0	177.5	149.0
S3		158.6	583.5	0.443	46.5	134.3	187.8
S4		160.7	669.6	0.456	47.4	137.9	178.9
S5		163.1	793.7	0.468	49.5	145.4	176.3
平均値	0.0	167.5	707.8	0.456	52.7	153.4	177.0
SS1	0.47	225.9	-	-	100.4	-	260.9
SS2	0.73	253.4	-	-	128.1	-	210.9
SS3	1.06	256.8	1193.2	0.464	139.0	407.1	108.6
SS4	1.21	258.6	-	-	138.0	-	59.0
SS5	1.01	226.4	937.9	0.455	108.5	315.8	301.6
平均値	0.90	244.2	1065.6	0.460	122.8	361.5	188.2

ヤング率は※1が超音波速度測定から求められた値、※2が三軸試験より求められた値である。

ものも存在している。また、貝殻を計算によって除去すると、逆に負の値を示す。前者の要因は、相対密度を求める際に砂のみの e_{\max} 、 e_{\min} を用いたためと考えられる。貝殻の密度が砂に比べて高いために、相対密度が過大評価されるものと考えられる。一方、貝殻を除去して考えた場合、砂部分の相対密度が小さくなる要因として、貝殻には微細孔が無数に空いていることが考えられる。この孔に砂粒子が入ることはできないため、貝殻を計算で除去する際、間隙の体積が過大評価され、相対密度が小さくなるものと考えられる。

3. 試験内容

採取試料の力学特性を把握することを目的として、超音波速度測定および三軸試験を実施した。直径が約10cmの採取試料を長さ20cm超に切り出し、上下端面のみを整形して高さ20cmとした。側面はなめらかであったので整形は行っていない。SS試料の場合、端面の凹凸が大きいため、砂の供試体整形の際に生じた削りかすを用いて整形した。

超音波速度測定は、三軸セル内に供試体を設置し、二重負圧法により約20kPaの負圧を与えて飽和させた後に実施した。三軸試験は、地盤工学会規準に準拠して、所定の有効拘束圧 ($\sigma'_c = 100, 150, 270, 400 \text{ kPa}$: S試料、80, 130, 320, 400 kPa) 図-1 各試料の粒径加積曲線

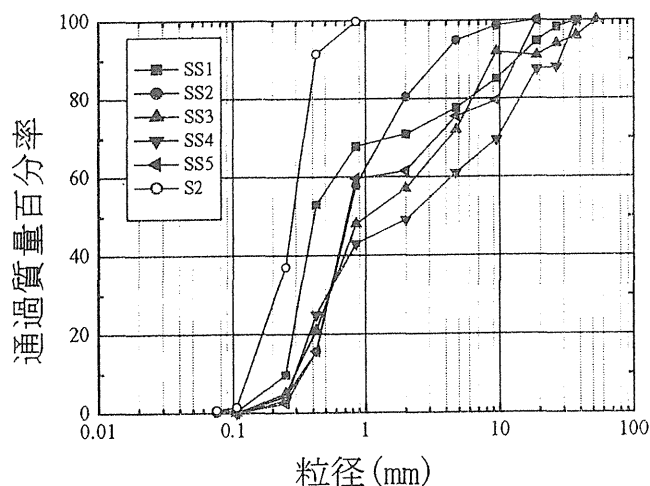
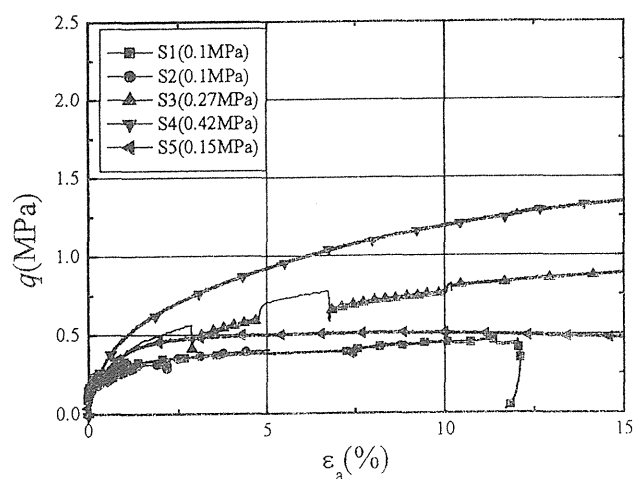


図-1 各試料の粒径加積曲線

図-2 S試料の $q \sim \varepsilon_a$ 関係

4. 試験結果および考察

表-2に超音波速度測定の結果を、図-3～8に三軸試験の結果を示す。凡例の()内に有効拘束圧を示してある。SS1、2、4のP波速度およびS3、SS2の体積ひずみは、センサーの不調に

より計測することができなかった。

表-2 から、砂と貝殻混じり砂の S 波および P 波速度を見ると、S 試料に比べ SS 試料の方が大きな値を示している。また、ポアソン比、せん断剛性率、ヤング率を見ると、ポアソン比は、明確な差は認められないが、せん断剛性率、ヤング率は SS 試料の方が大きな値を示している。三軸試験により求められたヤング率についても、わずかではあるが SS 試料の方が大きな値を示している。この要因は、砂と貝殻の密度の差によるもので、密度の大きい貝殻を混入することにより超音波の伝播速度が上昇し、求められる剛性が上昇するものと考えられる。超音波速度測定によるヤング率と三軸試験によるヤング率の値が異なっているのは、試験時の有効拘束圧の違いによるものと考えられる。

図-3、図-6 に示す $q \sim \varepsilon_a$ 関係を見ると、破壊形式は貝殻混入の有無によらず、おおむね延性的であることが分かる。一方、発揮される最大軸差応力は SS 試料の方が大きい。表-1 に示したように砂部分の間隙比は SS 試料の方が大きいのであるが、混入している貝殻が一種の補強材のような役割を果たしているのではないかと考えられる。

図-5 と図-8 に示すモール円を比較すると、内部摩擦角が 12° 大きいことが分かる。発揮される最大軸差応力が增大したことによる結果であると考えられる。

次に、図-4、図-7 に示す $\varepsilon_v \sim \varepsilon_a$ 関係を見ると、S 試料の場合は全ての供試体において膨張性を示すが、SS 試料の場合、SS3、SS5 が膨張性を示し、SS1、SS4 は逆に収縮性を示した。特に SS1 と SS5 は同じ拘束圧であるにもかかわらず、逆のダイラタンシー挙動を示した。このことと貝殻混入率との間には、何らかの関係は認められない。しかし、表-1 に示す試料の物理特性を見ると、収縮性を示した SS 試料の粗礫分が多いことが確認できる。中礫分以降の値からはダイラタンシー挙動との間に、何らかの関係を認めることはできない。したがって、粒径の小さいものの方がインターロッキングによる体積膨張が大きくなり、粒径の大きいものはインターロッキングによる体積膨張が起こる過程で、粒子の破碎(この場合は貝殻の破碎)が生じ、体積膨張があまり生じなかったものと考えられる。

4. まとめ

1. 貝殻が混入する影響として、最大軸差応力、内部摩擦角や剛性の増大が確認された。
2. S 試料の内部摩擦角は $\phi_d = 37.2^\circ$ 、粘着力は $c_d = 0.014 \text{ (MPa)}$ であった。

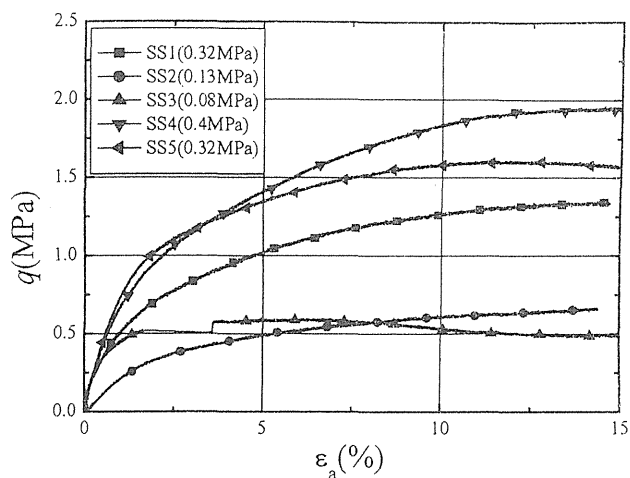


図-3 SS 試料の $q \sim \varepsilon_a$ 関係

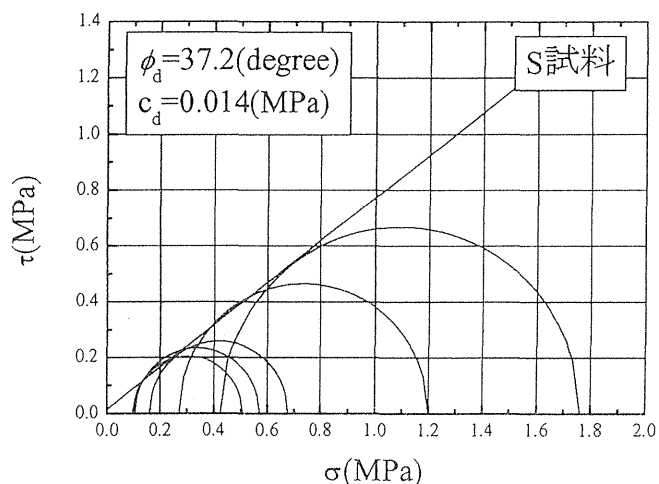


図-4 S 試料のモール円

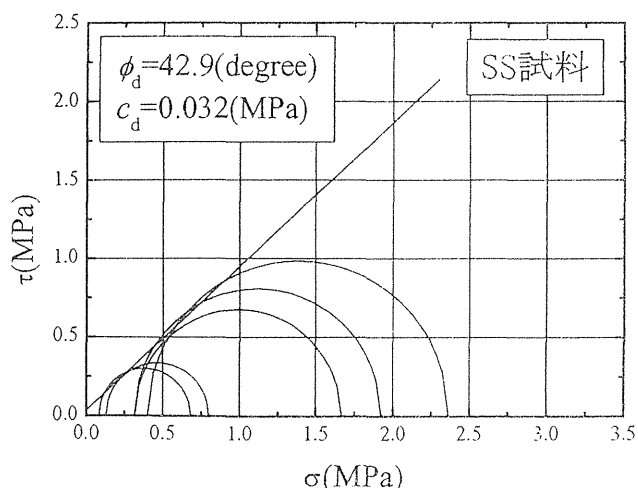


図-5 SS 試料のモール円

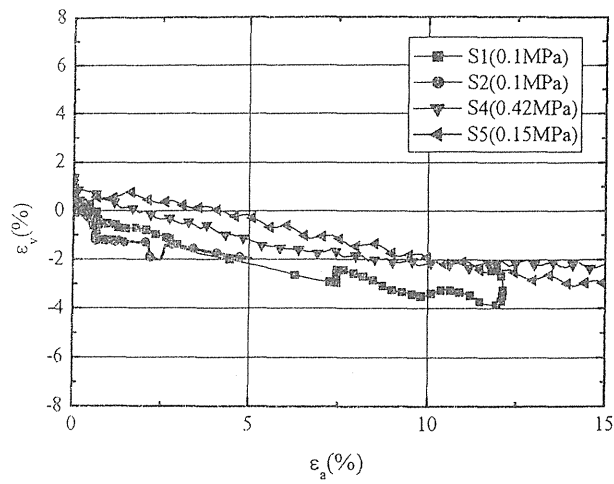


図-6 S 試料の $\varepsilon_v \sim \varepsilon_a$ 関係

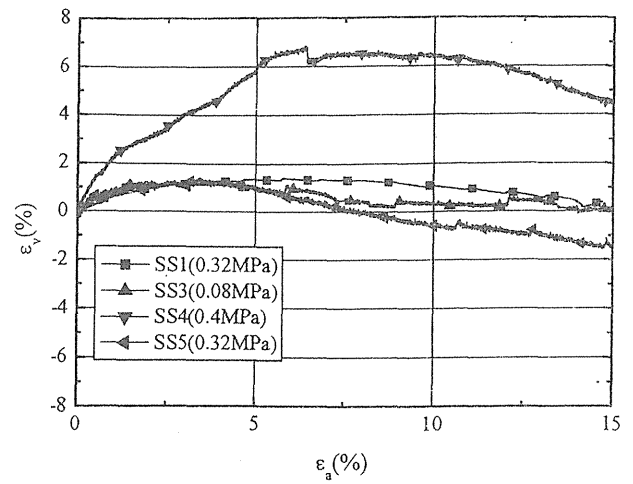


図-7 SS 試料の $\varepsilon_v \sim \varepsilon_a$ 関係

3. SS 試料の内部摩擦角は $\phi_d = 49.2^\circ$ 、粘着力は $c_d = 0.032 \text{ (MPa)}$ であった。
4. 混入している貝殻の粗礫分によって、体積膨張が阻害される可能性が確認された。

参考文献

(1) 金子・谷：水溶性ポリマーの濃厚溶液を利用したサンプリング方法の深度地盤への適用、関東支部地盤工学研究発表会、投稿中、2005

水溶性ポリマーの濃厚溶液を利用した乱さない試料のサンプリング方法

Undisturbed Sampling Method using Thick Water-Soluble Polymer Solution

谷 和 夫 (たに かずお)
横浜国立大学大学院 教授

金 子 進 (かねこ すずむ)
基礎地盤コンサルタンツ (株) 主席調査技師

1. はじめに

砂・砂礫層、崖錐堆積物、破碎帯、風化岩盤、自破碎溶岩などから成る地盤では、粗粒な部分（岩石や砂・礫粒子）と細粒な部分（シルト・粘土粒子）が未固結な状態で混在しているので、乱さない試料をサンプリングすることが非常に難しい。粗粒な部分を滑らかな切口で切削するためにはダイヤモンド・ビットを用いたロータリー・ドリリングによらなければならないが、ポンプで循環される掘削流体により未固結な粒子が洗い出されてしまうためである。

この洗い出しを防止するために、固結度を付与する凍結サンプリングや掃流作用を低減する気泡ボーリングも開発されているが、コストが非常に高くなってしまう。しかも、前者は細粒分を含む場合に適用することができず、また後者は地下水位中での適用が難しいという問題もある。

筆者らは、未固結な地盤においても、ロータリー・ドリリングにより乱れが少ない試料を低コストに得ることができる新しいサンプリング方法を開発した。以下に概要、メカニズム、適用例を報告する。

2. 水溶性ポリマーの濃厚溶液を利用したサンプリングの概要

開発したサンプリング方法のポイントは、ビットの洗浄および冷却とカッタングスの排出の各機能を有する掘削流体にあり、特徴は以下の 2 点である。

- ① 粒子の洗い出しを防ぐため、ビットへの供給量は必要最小限度とする。
- ② ビットの切削性能を引き出し、コアを保護する性能に優れた水溶性ポリマーの濃厚溶液（以後、ポリマー溶液と称す）を利用する。

具体的には、掘削泥水に添加する増粘剤（テルナイト製、イーゾードリル）として一般的な合成高分子の一種（ポリアクリルアミド）を用いる。通常は濃度 0.2~0.5% に薄めて利用するところを¹⁾、数%とすることで特異な機能が発揮される²⁾。

図-1 に露頭の表面近く（2メートル以浅）の試料をサンプリングする状況を示す。露頭面に立てた単管のコアバレルにポリマー溶液を封入し、ロータリー・ドリリングにより削孔する。削孔の進捗に伴い、コアバレルに取

り込まれる試料（コア）に押し出される形で掘削流体であるポリマー溶液がビットに供給される。このポリマー溶液の供給量が排出すべきカッタングス量に比べて少ない（コアの断面積とビットの断面積の比が 6 以下の）場合には、ロッドを通じてポリマー溶液を補給する必要があるが、ビットの内径と外径の比が 0.9 以上であれば必要ない³⁾。削孔終了後は、コアの底部を引張り破壊させてコアバレルを回収する。

礫を含んだ山砂からなる盛土から得られたコアを口絵写真-1 に示す。コアバレルは呼び径 160mm、採取長 1,600mm の単管式で、外径 160mm、内径 150mm のインブリグネーテッド・ダイヤモンド・ビットを用いた。掘削制御は回転数 350rpm、掘進速度 13mm/min 程度で、岩盤を削孔する条件に近い。下側の写真に示すように、未固結な砂礫が崩れることなく円柱形状に切り出され、礫の切切断面は磨いたような光沢を放っている。側面の触感是非常に滑らかでざらつき感はない。

3. 乱さない試料が得られる理由

乱れが少ない試料が得られる要因として以下の 3 点が考えられる。

- ① 掘削流体の掃流作用が抑えられ、未固結な細粒分の洗い出しが防止される。
 - ② ダイヤモンド・ビットにより、硬質な砂礫部分も滑らかに切削される。
 - ③ ポリマー溶液の特異な性質により、コアバレルに取り込まれたコアが乱されない。
- ③に記すポリマー溶液の機能は、作用する外乱が抑える機能と、コアを保護する機能に分類される。まず外乱が抑える機能としては、試料の側面に作用するせん断応

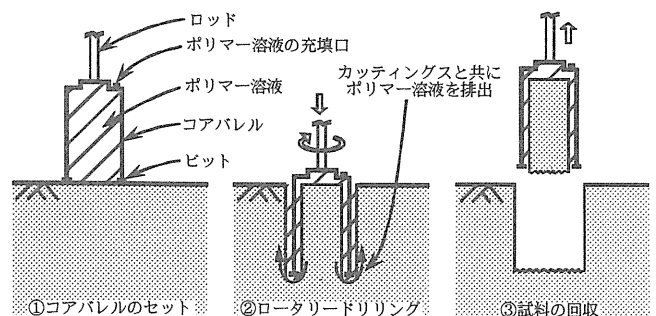


図-1：露頭からサンプリングする方法

力が極めて低いことが挙げられる。ポリマー溶液の粘性は通常の泥水より1桁高く、高速に回転するコアバレルの影響（コアに振れを受ける影響）が懸念される⁴⁾。しかし、ポリマー溶液はシア・シンニング（shear-thinning）粘性（せん断速度が増大すると低粘性になる性質）を有する擬塑性流体であるため、コアの側面に作用するせん断応力は非常に低いことが模型コアバレル実験により確認されている⁵⁾。回転部とポリマー溶液セルから構成される実験装置を図-2に示す。回転部は2重構造で、回転する外管（内径102mm）はコアバレルを、静止した内管（外径100mm）はコアを模擬する。よって、ポリマー溶液が充填される内管と外管のクリアランスは1mmである。内管の中央高さには、中心角度90°で高さ100mmの受圧板を対角位置に2枚設置して、それぞれ周面に作用する直荷重 N とせん断荷重 T を2方向ロードセルにより計測した。ポリマー溶液に作用する拘束圧 P_{m0} が100kPaと149kPaの場合について、計測されたせん断荷重から求めた平均のせん断応力 τ_m と外管の回転数 R の関係を図-3下に示す。静止状態のポリマー溶液の粘性が非常に高く（数百～千Pa・s）、高速に回転する外管（ $R_{max}=400\text{rpm}$ の時の周速度は約2m/s）とのクリアランスはたった1mmと薄いにも係わらず、内管の側面に作用するせん断応力がほとんどゼロ（ $|\tau_m|_{max} < 0.12\text{kPa}$ ）であることは注目に値する。

コアを保護する作用は複合的な要因に拠ると推測される。まず、口絵写真-2に示すように回転軸の周りにポリマー溶液の高分子（ポリマー）が巻き付いて放射（半径）内側向きの直応力が増大するワイゼンベルク効果²⁾により、試料に法線方向応力が作用してせん断強さを維持することが挙げられる。模型コアバレル実験で計測された静止状態からの直応力の増分 $\Delta\sigma_m$ は、図-3上に示すようにせん断応力 τ_m に比較して非常に大きく、数kPa程度の応力増分が50rpm以上の回転速度で計測された。また口絵写真-1上に示すように、ポリマー溶液がコアの側面にべったりと張り付くことにより表層部分が一体化すること（被覆型の皮膜形成効果²⁾）もコアの表面保護に寄与すると考えられる。さらに、ポリマー溶液がコアの表層にわずかに浸潤して高分子（ポリマー）の曳糸性（納豆が糸を引くような性質）²⁾により粒子が絡み込まれた層を形成する浸潤型の皮膜形成効果も期待される。することで見かけの粘着力が付与されることが挙げられる。ポリマー溶液により飽和した豊浦砂の供試体（直径50mm、高さ100mm、間隙比0.72）に対して一軸圧縮試験を行ったところ、図-4に示すように濃度（重量比） $C_p=0.1\sim 3.5\%$ の範囲で一軸圧縮強さ $q_u=3.8\sim 4.5\text{kPa}$ であった。このわずか2kPa程度の見掛けの粘着力 $c_a(=q_u/2)$ であっても、高さ50cm（鉛直限界高さ $H_c=4c_a/\gamma_t$ ： γ_t は単位体積重量）のコアが無拘束状態で立つので、サンプリング時の乱れを抑える上で多少は有効に働くと考えられる。

4. 深部地盤への適用

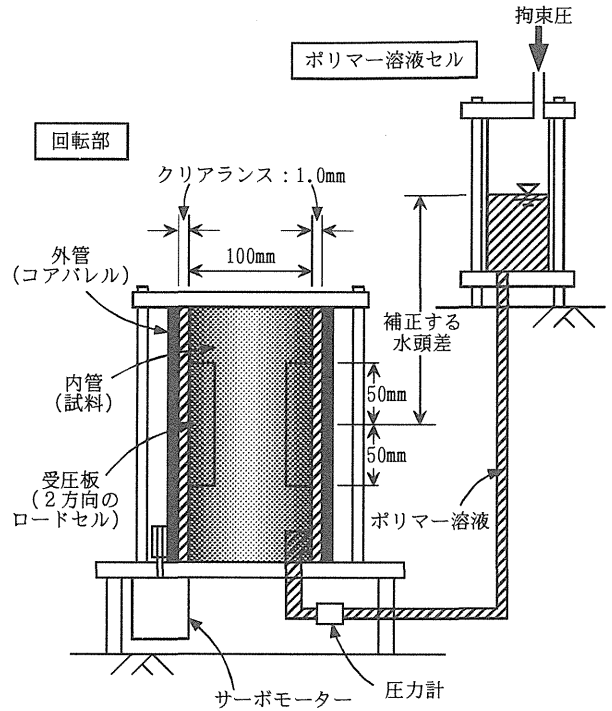


図-2：模型コアバレル実験の装置

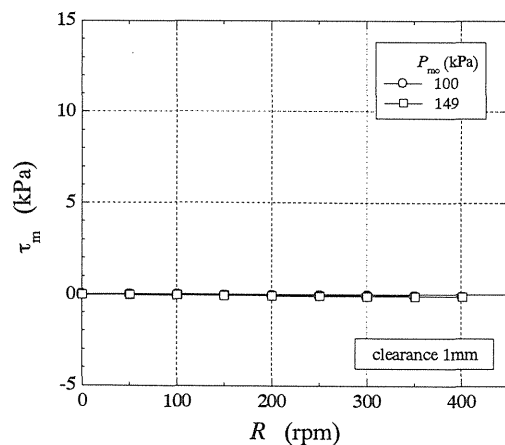
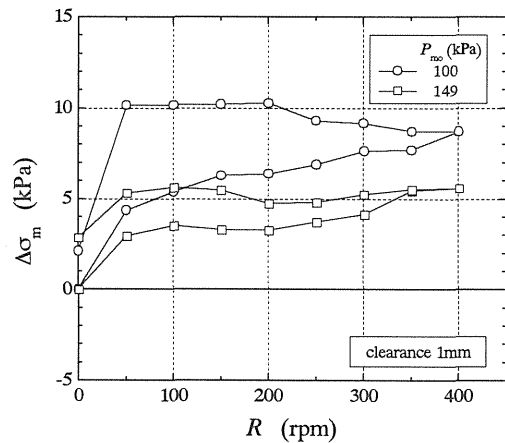


図-3：模型コアバレル実験の結果

従来は、ポリマー溶液を封入したコアバレルを孔底に

下ろす作業や削孔後にコアを回収することが難しかったので、このサンプリング方法の適用は深度が数メートルと浅部に限定されていた。そこで、予めポリマー溶液を封入したコアバレルを孔底に下ろしてからサンプリングを行うことが可能な機器を2004年に開発した⁶⁾。

まず、孔底から転動ないし浮遊する礫などの粗粒物を排除し、底面を平滑に仕上げることを目的として口絵写真-3に示す孔底仕上げ用ビットを作製した。先端から10mm上方に底盤を有し、外周と底面中央に一文字状にチップを配した構造をしている。底盤とビット先端の距離が短くし、循環水の供給を底盤の外周に沿って設けられた小孔4箇所限定することで、磨り潰し効果や焼き付き効果が期待できる。次に、コアバレルを降下する間にポリマー溶液が漏洩することを防ぐことを目的として口絵写真-4に示すフリー・ピストン方式の先端プラグを作製した。コアバレルが孔底に着座するとビットの先端より突出したピストンがコアバレル内に押し込まれて、封入したポリマー溶液がビット周辺に適切な分量だけ供給される構造とした。さらに、張り付き防止と、ポリマー溶液のビットへのスムーズな供給経路を確保することを目的として、口絵写真-5に示すようにコア・キャッチャーの背面に細溝を刻み、さらに上端の肉薄部に矩形鋸歯状の切り込み部を設けた。

これらの改良の効果を確かめるために、未固結な砂質地盤において20mを超える深度までサンプリングを実施した⁶⁾。対象は千葉市長沼原において厚く堆積する未固結な完新統で、近傍で行われた過去のボーリング結果より、地表下11m以深に堆積するN値が15~30の細砂(深度10m~23m)とした。深度17~22m付近には、貝殻を大量に含みN値が50を大幅に上回る層が挟まれていることが特徴である。また、サスペンションPS検層による弾性波速度は、12~16mの細砂層でP波速度 $V_p=1330\sim1430\text{m/s}$ 、S波速度 $V_s=280\sim310\text{m/s}$ 、17~22mの貝殻混じり砂層で $V_p=1660\sim1820\text{m/s}$ 、 $V_s=310\sim500\text{m/s}$ だった。

コアバレルから取り出したコアを口絵写真-6に示す。左側の灰色の砂層にわずかに含まれる暗灰色の礫(粒径2~5mm)も滑らかな面で切断されており、周囲の砂層を乱した形跡は目視では認められなかった。右側の白っぽく見える部分は、重量比で40~60%も貝殻(主に二枚貝)を含む貝殻混じり砂層である。大きさが数cmの二枚貝が大量に、また部分的には10cm程度の巻き貝も含まれるにもかかわらず、側面が非常に滑らかな棒状コアとして分離面を含まずに連続して得られたことは驚異的である。従来のサンプリング技術では、貝殻片がビットに押し潰されたり移動して周辺の砂を乱したり、砂が掘削流体に洗い出されたりして、このように大量に貝殻を含む未固結な砂層から見掛けの上でも乱れが少ない試料を得ることは不可能であった。なお、今回得られた試料を用いて三軸試験を行い、別途実施された弾性波探査、各種のサウンディングの結果と比較・検討した結果、見掛け上だけでなく力学的な面からも試料の品質が高いことが確認されている⁷⁾。

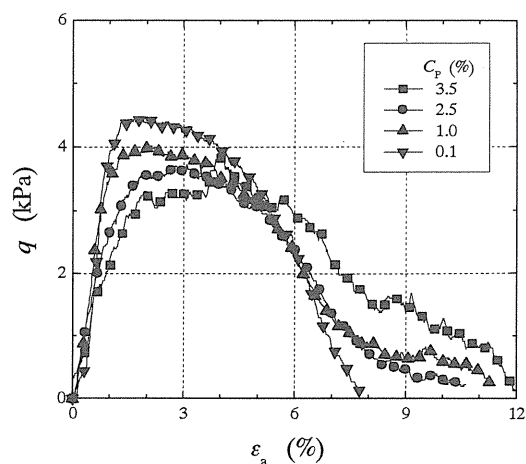


図-4：一軸圧縮試験の結果

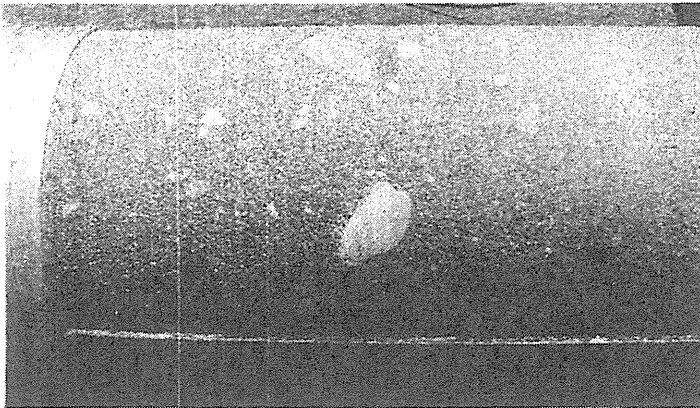
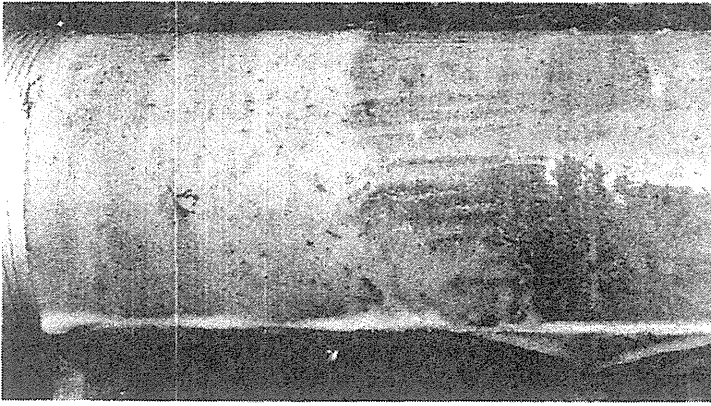
5. まとめ

水溶性ポリマーの濃厚溶液を利用したサンプリング方法により、従来の技術では乱れが少ない試料を採取することが困難な地盤でも、ロータリー・ドリリングによって乱さない試料を得ることが可能となった。開発当初は適用が浅い地盤に限定されていたが、現在では深部地盤からも問題なく採取できるようになり、技術的に完成の域に達した。ここに紹介した未固結な砂礫地盤だけでなく、崖錐堆積物、破碎帯、風化岩盤、自破碎溶岩などから成る地盤にも適用が広がり、2005年末の段階で適用実績は数十地点に及んでいる。今後、さらなる普及を通じて、品質と経済性の向上に努めたい。

参考文献

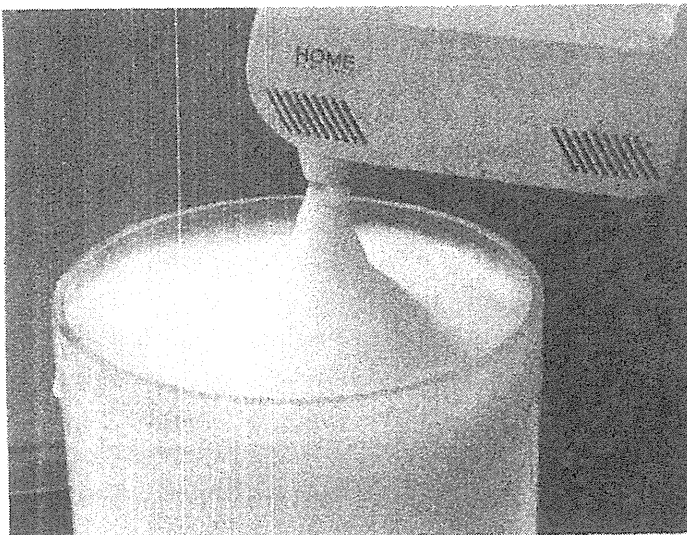
- 1) 沖野文吉：ボーリング用泥水，技報堂出版，1981.
- 2) 堀内照夫：水溶性高分子の最新技術，シーエムシー，2000.
- 3) 谷 和夫・白井美代・金子 進：水溶性ポリマーの濃厚溶液を利用したサンプリング方法の考え方，第39回地盤工学研究発表会，pp.145~146，2004.
- 4) 白井美代・谷 和夫・金子 進：水溶性ポリマーの濃厚溶液を用いたサンプリング方法と泥水を用いたサンプリング方法の検討ー粘性係数の比較ー，第33回岩盤力学に関するシンポジウム，pp.319~324，2004.
- 5) 柳沢希実・谷 和夫・金子 進・酒井運雄：水溶性ポリマーの濃厚溶液を使用した新しいサンプリング方法のメカニズム，第33回岩盤力学に関するシンポジウム，pp.49~56，2004.
- 6) 金子 進・谷 和夫：水溶性ポリマーの濃厚溶液を利用したサンプリング方法の深部地盤への適用，第40回地盤工学研究発表会，pp.183~184，2005.
- 7) 池野谷尚史・山田眞一・金子 進・谷 和夫：水溶性ポリマーを用いたサンプリングにより採取された貝殻混じり砂の力学特性，第50回地盤工学シンポジウム，pp.129~136，2005.

(原稿受理 2005.12.22)

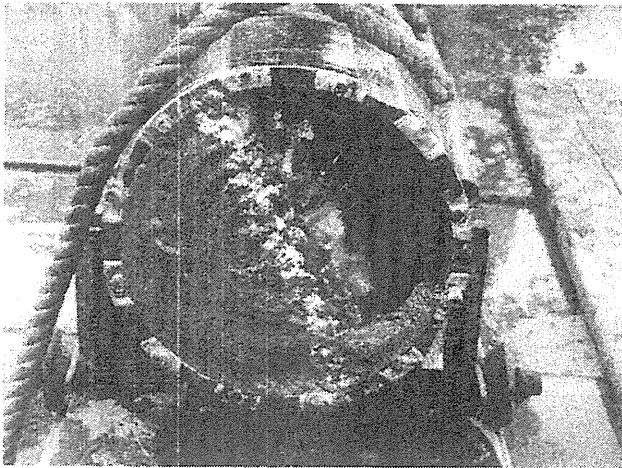


口絵写真-1：山砂から成る盛土より採取したコア

（上：採取直後で、ポリマー溶液が表面に付着している。下：ポリマー溶液を拭き取った後で、礫も滑らかに切断されている。）



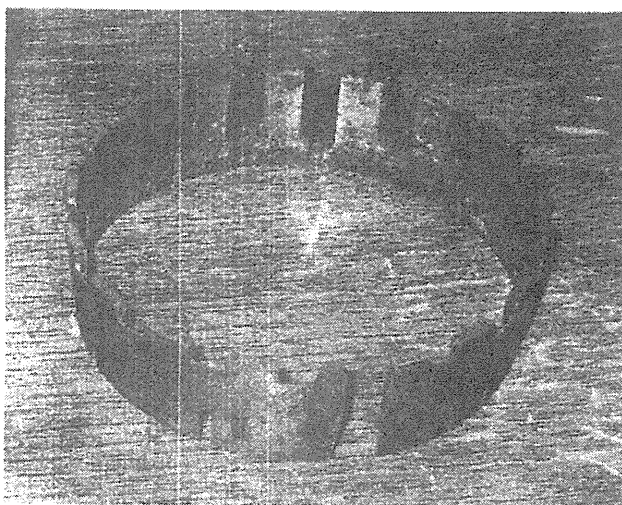
口絵写真-2：ワイゼンベルグ効果（ミキサーの回転軸にポリマー溶液が絡み付いて上昇する。）



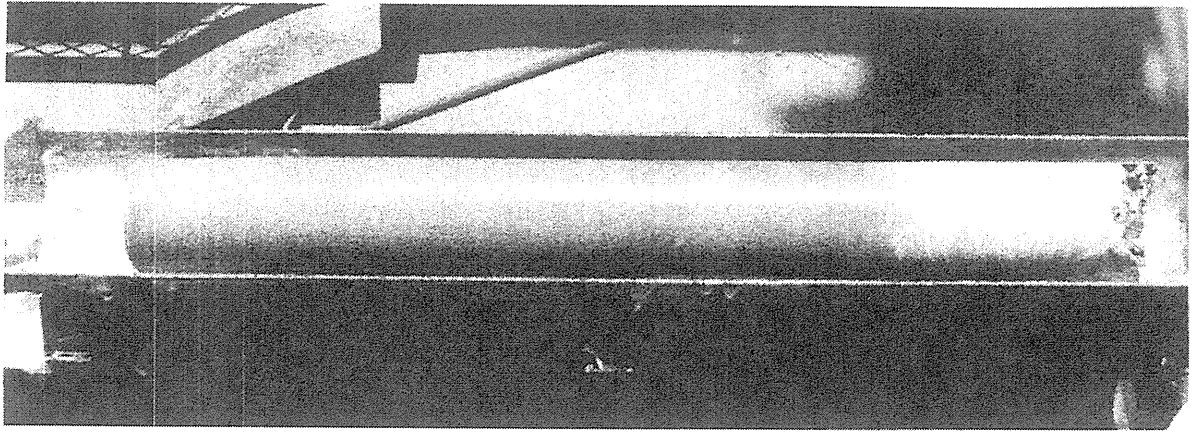
口絵写真-3：孔底仕上げ用のビット（底盤を有することにより，磨り潰し効果や焼き付き効果が期待できる。）



口絵写真-4：フリー・ピストン方式の先端プラグ（孔底に着座すると，突出した部分が内側に押し込まれることによりポリマー溶液がビットの周辺に供給される。）



口絵写真-5：コア・キャッチャー（背面に細溝を刻み，さらに上端の肉薄部に矩形鋸歯状の切り込み部を設けた。）



口絵写真-6：未固結な砂層および貝殻混じり砂層から得られたコア（右側の白く見える部分は，貝殻混じり砂層）

以上

差動トランス式変位計測装置を利用した 新しい原位置三軸試験装置の開発

池野谷尚史¹・鶴 俊太郎²・金子 進³・立川日出男⁴・谷 和夫⁵

¹横浜国立大学大学院 工学府 (〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)

E-mail: d04gc104@ynu.ac.jp

²(株)サンキ産業 (〒251-0042 神奈川県藤沢市辻堂新町3-10-33)

³(株)基礎地盤コンサルタンツ 事業本部 酒井研究室 (〒263-0001 千葉県千葉市稲毛区長沼原51)

⁴(株)立川機械製作所 (〒262-0012 千葉県千葉市花見川千種町133)

⁵横浜国立大学大学院 工学研究院 (〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)

現在、岩盤の力学特性を把握するために実施される原位置岩盤試験として、中空円筒形状の試験体を利用した原位置岩盤三軸試験法の普及が始まっている。しかし、試験体が大きく作製手順が複雑で、計測システムも複雑であるなどの理由から、試験費用が高価なものとなっている。そこで、差動トランスの原理を利用した新しい変位計測装置を提案し、これを利用した小型の原位置三軸試験装置を開発した。

開発した装置は、ボーリング孔底に成形した円柱形状の試験体に対し、ゴム膜を介して拘束圧を作用させ、軸方向に載荷したときの試験体の軸方向および半径方向の変形挙動を計測できる。これにより、試験体寸法の小型化、形状の単純化が可能となり、従来の試験法に比べて格段に低コストになると予想される。

Key Words : rock mass, in-situ test, triaxial test, test equipment, site investigation

1. はじめに

岩盤の力学特性を把握する際には、試料の乱れなどが大きな問題となるため、サンプリングした試料を用いて室内で力学試験を実施するよりも、原位置において力学試験、特に三軸試験を実施することが望ましい。

これを実現する手段として、原位置岩盤三軸試験(図-1)が開発された¹⁾。この試験はボーリングの孔底に中空円筒形状の試験体を掘削し、中央の小孔と外周溝(スリット)に側圧を作用させると共に、上面を軸方向に載荷したときの試験体の変形を計測するものである。岩盤の平均的な応力～ひずみ関係(変形特性と強度特性)を、乱れやゆるみの影響をほとんど受けずに直接に計測できることが特長である。この試験は、すでに実用化されているものの、以下のような理由から、その試験費用は高価である。

①試験体の形状が中空円筒であるために、その作製手順が複雑である。

②試験体の寸法($\phi 400\text{mm} \times H1000\text{mm}$)が大きい。

③採用されている円孔変位計測システムが機械的に複雑で、小型化が難しい。

また、上記①～③の制約は試験深度が深くなるほど厳しくなる。そのため、この試験は露頭や試掘坑などの浅部(深度1～2m)において実施する試験として利用され、地下深部における適用は実現していない。

そこで、これらの問題を克服した、低コストで、地下深部においても適用可能な試験法の開発が必要である。

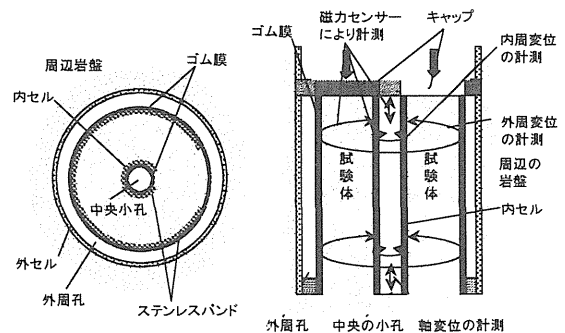


図-1 原位置岩盤三軸試験の概要

2. 差動トランスの原理を利用した変位計測装置

現在採用されている円孔変位計測システム（ICD：Instrumentation for Cavity Deformation）は、磁力センサーでターゲットである磁石の移動を随時スキャンニングする方式である。軸方向変位の計測を中心軸上で行うので中央の小孔が必要であり、機械的に複雑で小型化も難しい。そこで、原位置岩盤三軸試験を簡便で低コストなものにするために、次のような条件を満足する新しい変位計測装置を考案した。

- ①試験体中央の小孔を省略できる。
- ②計測装置が機械的に単純である。
- ③コンパクトである（スペースを必要としない）。

(1)変位計測装置の原理

考案した計測装置は、従来技術である差動トランス変位計（LVDT）の原理を応用したものである。差動トランス変位計は、図-2に示すように1次コイルPおよび2次コイル S_1 と S_2 の2種類のコイルと、鉄などの磁性体を材料とするコア（core）で構成される。実際の形態は図-2(b)に示すように、1次コイルPの両側に2次コイル S_1 および S_2 が配置された円筒形状である。コアが円筒の軸方向の中央位置にあるとき、交流電圧をかけて励磁された1次コイルPと2次コイル S_1 および S_2 の両コイルとの磁気的結合の度合いは等しい。その後、コアが $+x$ もしくは $-x$ の方向に移動すると、コイル S_1 およびコイル S_2 とコイルPとの磁気的結合の度合いの差に起因するコイル S_1 と S_2 の誘導電圧の差 ΔV が生じ、これを出力とする。

一般のLVDTでは棒状のコアを用いているが、今回開発した装置では薄肉円筒形状（リング状）とした。これを、試験体の側面に巻きつけるように設置し、メンブレンと一体化させることにより、メンブレンにコアの機能を融合させた。さらに、コイルをセルの内側に設置することで、ある高さにおける試験体の変位を計測することができる。

(2)変位計測装置の特長

考案したリング状コア型のLVDTは、原位置岩盤三軸試験に利用する上で以下の3つの特長を有する。

- ①中央の小孔が必要ない：軸変位を円柱形状の試験体の側面で計測できるので、中央の小孔を掘削する手間が省ける。
- ②構造がシンプル：構成部品はコイル3つとコアのみで、駆動部分がない。
- ③コンパクトである：コイル部分の厚みは14mm程度、コアの厚みは2mm程度である。

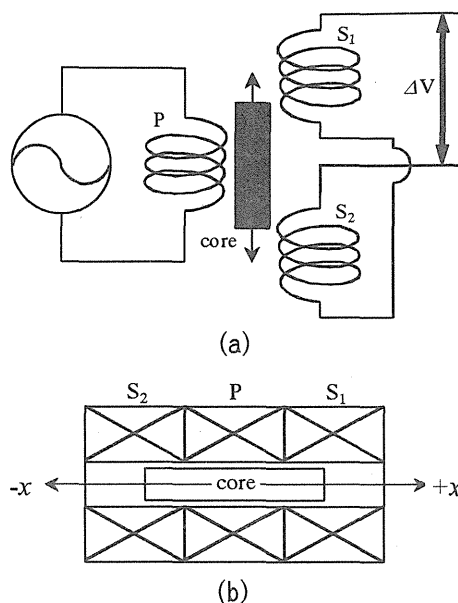


図-2 LVDTの原理

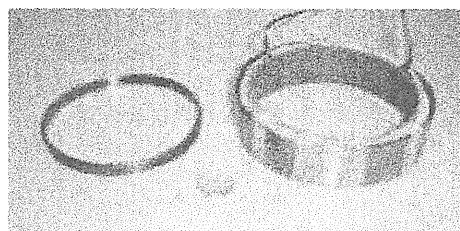


写真-1 試作品の概要（左：コア、右：コイルを内蔵したケース）

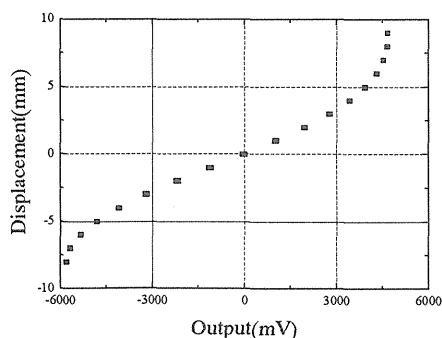


図-3 試作品の検定結果

(3) 変位計測装置の試作および検定

計測原理の妥当性と性能を確認するために、試作品を製作し、検定試験を実施した。写真-1に試作したリング状コア型のLVDTの概要を示す。

試作品は内径107mm、外径129mm、高さ30mmのコイルと、内径102mm、外径106mm、高さ12mmのコアから構成される。コイルを内蔵したケースの内側には市販の塩化ビニル管、外側ケースおよびコアには冷間圧延鋼板SPCC-1を使用した。

検定試験は、コイルを内蔵したケースの内径107mmよ

りやや小さい径（106mm）の円盤上に薄肉円筒のコアを載せ、円盤を上下させることでコアに変位を与えた。

図-3に試作品の検定結果を示す。与えた10mm程度の変位に対して出力電圧が6～5Vの範囲で変化している。±3Vの範囲で線形性かつ再現性が高く、本計測装置の原理が妥当であり、数mm程度の計測が可能であることが分かる。実用上は±3mmの範囲での計測を行うものとする、線形部分の傾きは0.000987(mm/mV)であるから、試作品の分解能は10⁻³mm程度である。

3. 原位置三軸試験装置

(1) 三軸装置の概要

製作した装置の概要を図-4に示す。本装置で対象としている円柱形状の試験体の寸法は、コイルを内蔵しているケースの内側に使用している市販の塩化ビニル管の内径（107mm）を考慮して、直径90mmとした。高さは、試験体底部が地盤に連続していることによる拘束効果を考慮して直径の2.5倍程度が望ましく、また、試験体下部に拘束圧の加わらない部分（高さ約20mm）が存在することから276mmとした。既存の原位置岩盤三軸試験に供する試験体（直径400mm、高さ1000mm）の約1/4であり、試験の大幅なコストダウンが期待できる。その一方で、試験体の小型化に伴う寸法効果の影響が懸念される。そこで、装置の最下部に試験体キャッチャーを設けることにより、寸法効果の影響を検討するために試験後に試験体を回収してその性状や破壊状態を観察することが可能となっている。

また、既存の原位置岩盤三軸試験では円筒セルの両側にメンブレンを設置して、セル圧載荷時の反力を周辺岩盤に期待している。一方、本装置では円筒セルの剛性に反力を期待している。これによっても、試験装置の小型化を図ることができる。

本装置の特長として、以下の2点が挙げられる。

- ①装置全体が一つのユニットである：試験体に装置を被せるだけで試験が開始できる。
- ②コンパクトな計測システムである：同じサイズの供試体を対象とした室内三軸試験に利用されるセルに比べてはるかに小さなセルである。

(2) 三軸装置と掘削装置の構成

a) 試験体の掘削装置

ボーリングマシン、ビット（図-5）などより構成される。

インブリグネーティッド・ダイヤモンドを先端に配置したビットの先端は階段状になっており、ボーリング孔底が三軸試験装置に合わせた形状となる。階段状にする

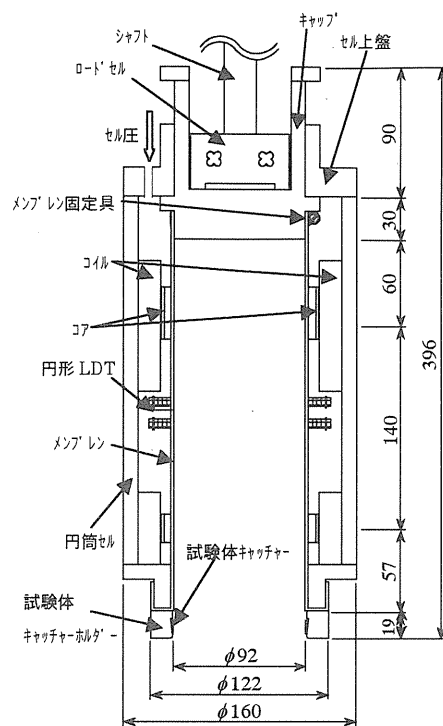


図-4 装置の概要

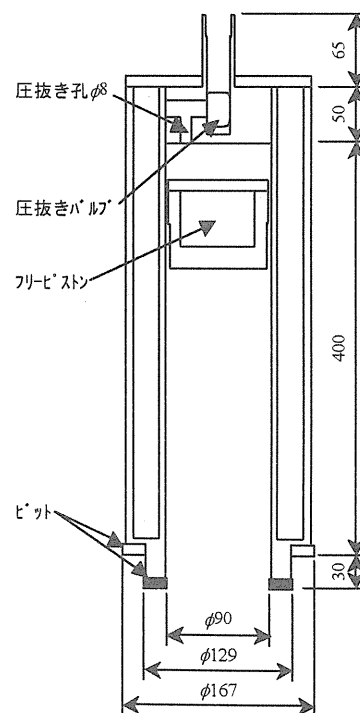


図-5 コアバレルの概要

ことで、掘削時のガイド効果とトルクを減らす効果が期待されるからである。

また、コアバレル内には水溶性ポリマーの濃厚溶液を予め封入しておく方法を採用した。ポリマーを用いることで、側面が非常に滑らかで乱れが少ない試料を得られることが既に報告^{2), 3)}されており、掘削に伴う乱れの影響を極力排除するためである。

b) 載荷システム

試験体に拘束圧を作用させる円筒セル，軸荷重を作用させるキャップなどより構成される。

円筒セルはゴム膜を介して最大2MPaの圧力を試験体の側面に作用させることができる。ゴム膜の上端は専用の治具によりキャップに固定されている。一方，下端は円筒セルの底部と試験体キャッチャーホルダーで挟むことによって固定されている。

キャップには軸荷重用ロードセル，シャフトが取り付けられている。キャップの最大移動量は30mmで，試験体のひずみにすると約10.8%である。また，軸荷重の最大値は約200kNで，試験体に作用する最大軸応力は約30.8MPaである。

c) 計測システム

軸荷重はキャップとシャフトの間に挟んだロードセルによって，セル圧はセルに取り付けた圧力計によって計測する。

軸方向変位は今回開発した変位計測装置によって計測する。コア（内径101mm，外径105mm，高さ22，27mm）とメンブレン（厚さ2mmのネオプレンゴム）は厚さ4mm程度の樹脂製のスポンジ板を介して接着されている。拘束圧によって試験体に圧着されたメンブレンの軸方向の変位，つまりは試験体の軸変位に追従したコアの動きをコイルの電圧差によって計測する。また，スポンジ板を挟むことによって軸圧縮に伴う試験体の直径方向の膨張（ポアソン比 $\nu=0.5$ とした場合， $\epsilon_{\max}=10.8(\%)$ のとき4.86mm）を吸収することができる。装置は2深度（計測区間長140mm）において設置することで，コアの

相対変位からベディングエラーの影響を含まない試験体の平均的な軸ひずみを計測することができる。

側方変位はメンブレンの中央高さに取り付けた円形状のLDT（内径120mm，外径120.6mm，高さ8mm）によって計測する。また，直交する2方向の変位を計測することで，試験体の平均的な側方変位を計測することができる。

4. まとめ

今回，差動トランスの原理を利用した変位計測装置を考案し，これを組み込んだ新しい原位置三軸試験装置を開発した。

今後は，紹介した試験装置を用いて実証試験を検討中である。試験は，ゲルリンやモルタルなどのダミー試験体や模擬地盤などに対して実施する。装置の妥当性や精度の確認などを行い，実地盤への適用性を検討する予定である。

参考文献

- 1) 谷 和夫，立川日出男，金子 進，豊岡義則：孔底の中空円筒試験体を利用した新しい岩盤試験装置の開発，第31回岩盤力学に関するシンポジウム，pp.82-86，2001。
- 2) 金子 進，谷 和夫：水溶性ポリマーの濃厚溶液を利用したサンプリング方法の深部地盤への適用，第40回地盤工学研究発表会，pp.183-184，2005。
- 3) 池野谷尚史，山田真一，金子 進，谷 和夫：水溶性ポリマーを用いたサンプリングにより採取された貝殻混じり砂の力学特性，第50回地盤工学シンポジウム，2005（投稿中）。

DEVELOPMENT OF A NEW APPARATUS FOR IN-SITU TRIAXIAL TEST USING LVDT

Takafumi IKENOYA, Syuntarou TSURU, Susumu KANEKO,
Hideo TACHIKAWA and Kazuo TANI

To measure the stress-strain relationship of rock mass, the in-situ triaxial test on a large downhole hollow cylindrical specimen is conducted. However, this test method is very expensive for its gigantic scale and complicated shape of specimens and difficult measurement system. To solve this problem, a new displacement measurement device using a principle of LVDT (Linear Variable Differential Transformer) is proposed, and a new apparatus for in-situ triaxial test is developed.

The new apparatus is designed to use a columnar specimen of diameter 90mm formed at the bottom of drillhole. Axial and radial deformations of the specimen can be measured by LVDT and LDT respectively. Since the specimen is downsized by a factor of four and its shape is made simpler eliminating the center hole, the cost of testing is expected to be reduced dramatically.