



幌延深地層研究計画における人工バリア性能確認試験

－ 350m 調査坑道における人工バリアの設置および坑道の埋め戻し－

The in-situ Experiment for Performance Confirmation of Engineered Barrier System
at Horonobe Underground Research Laboratory
-Installation of Engineered Barrier System and Backfilling the Test Niche
at the 350m Gallery-

中山 雅 大野 宏和

Masashi NAKAYAMA and Hirokazu OHNO

核燃料・バックエンド研究開発部門
幌延深地層研究センター
深地層研究部

Horonobe Underground Research Department
Horonobe Underground Research Center
Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste Management Technology Development

December 2019

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<https://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方2番地4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Institutional Repository Section,
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,
Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2019

幌延深地層研究計画における人工バリア性能確認試験 －350m 調査坑道における人工バリアの設置および坑道の埋め戻し－

日本原子力研究開発機構 核燃料・バックエンド研究開発部門
幌延深地層研究センター 深地層研究部

中山 雅, 大野 宏和

(2019年8月26日 受理)

日本原子力研究開発機構が、北海道幌延町で実施している幌延深地層研究計画では、堆積岩を対象として、深地層の科学的研究、地層処分技術の信頼性向上や安全評価手法の高度化等に向けた基盤的な研究開発および安全規制のための研究開発を実施している。

平成 26 年度からは幌延深地層研究センターの地下施設の 350m 調査坑道（試験坑道 4）において、幌延の地質環境をひとつの事例に、処分孔竖置き方式を対象として実規模の人工バリアを設置した。電気ヒーターによる模擬オーバーパックの加熱を平成 27 年 1 月から開始した。この人工バリア性能確認試験は、実環境下において人工バリア定置後の再冠水までの過渡期の現象（熱－水－応力－化学連成挙動）を評価する事を目的としている。

本報告では、人工バリア性能確認試験において実施した、試験坑道および試験孔の掘削、緩衝材および模擬オーバーパックの設置、転圧締め固めおよびブロックによる坑道の埋め戻し、コンクリートプラグの設置およびコンタクトグラウト工の実施、および計測システムの整備などについて述べる。上記の作業を通じて、開発した大口径掘削機による試験孔掘削の実証、緩衝材ブロック定置における真空把持装置の適用性、埋め戻し材転圧締め固めにおける品質管理手法の提示、低アルカリ性セメント材料によるコンクリートプラグの施工などについて確認を行い、実環境において処分概念の実現が十分に可能であることを示した。

**The in-situ Experiment for Performance Confirmation of Engineered Barrier System at Horonobe Underground Research Laboratory
- Installation of Engineered Barrier System and Backfilling the Test Niche at the 350m Gallery -**

Masashi NAKAYAMA and Hirokazu OHNO

Horonobe Underground Research Department
Horonobe Underground Research Center
Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste Management Technology Development
Japan Atomic Energy Agency
Horonobe-cho, Teshio-gun, Hokkaido

(Received August 26, 2019)

The Horonobe Underground Research Laboratory (URL) Project has been pursued by Japan Atomic Energy Agency to enhance the reliability of relevant disposal technologies through investigations of the deep geological environment within the host sedimentary formation at Horonobe, northern Hokkaido. The URL Project consists of two major research areas, “Geoscientific Research” and “Research and Development on Geological Disposal Technologies”.

The in-situ experiment for performance confirmation of engineered barrier system (EBS) experiment had been prepared from 2013 to 2014 fiscal year at GL-350m gallery, and heating by electric heater in simulated overpack had started in January, 2015. One of objectives of the EBS experiment is acquiring data concerned with coupled Thermal – Hydrological – Mechanical – Chemical (THMC) behavior. These data will be used in order to confirm the performance of engineered barrier system.

This report shows following works had carried out at the GL-350 m gallery, excavation of a test niche and a test pit, setting buffer material blocks and a simulated overpack into the test pit, backfilling the niche by compaction backfilling material and setting backfilling material blocks, casting concrete type plug and contact grouting, and consolidate measurement system

Through these works, the excavation method of a test pit using the developed large diameter drilling machine were demonstrated, the applicability of the installation method of the buffer material block using vacuum grasping technology were confirmed, the quality management methodology to the construction of the backfill material using the compaction technique were presented, and the workability of a concrete type plug using the low alkaline cement were confirmed. These techniques and methodologies have shown the feasibility of the repository concept in the actual geological environment.

Keywords: Geological Disposal, Buffer Material, Backfilling Material, Overpack, Engineered Barrier System, Concrete-type Plug, THMC, In-situ Experiment, Sedimentary Rock, Horonobe URL

目次

| | |
|--------------------------------|----|
| 1. はじめに | 1 |
| 2. 人工バリア性能確認試験の目的 | 2 |
| 3. 試験坑道の掘削 | 4 |
| 3.1 坑道断面 | 4 |
| 3.2 掘削 | 5 |
| 4. 試験孔の掘削 | 9 |
| 4.1 試験孔 | 9 |
| 4.2 大口径掘削機 | 9 |
| 4.2.1 大口径掘削機による試験孔の掘削フロー | 9 |
| 4.2.2 大口径掘削機の諸元 | 10 |
| 4.3 試験孔の掘削 | 12 |
| 4.3.1 大口径掘削機の搬入 | 12 |
| 4.3.2 試験孔の掘削 | 13 |
| 4.3.3 試験孔の出来形確認 | 15 |
| 4.4 試験孔の整備 | 21 |
| 5. 緩衝材および模擬オーバーパック | 24 |
| 5.1 仕様 | 24 |
| 5.1.1 緩衝材 | 24 |
| 5.1.2 模擬オーバーパック | 24 |
| 5.2 計測計画（試験孔） | 27 |
| 5.2.1 緩衝材 | 27 |
| 5.2.2 模擬オーバーパック | 33 |
| 5.2.3 計測センサーの仕様 | 33 |
| 5.3 緩衝材ブロックの加工 | 42 |
| 5.4 試験孔内への設置 | 44 |
| 5.4.1 緩衝材 | 44 |
| 5.4.2 模擬オーバーパック | 51 |
| 6. 埋め戻し材 | 56 |
| 6.1 施工方法についての検討 | 56 |
| 6.2 埋め戻し材の仕様 | 57 |
| 6.3 計測計画（埋め戻し材） | 57 |
| 6.3.1 計測センサーの配置 | 57 |
| 6.3.2 計測センサーの仕様 | 61 |
| 6.4 注水管の設置 | 61 |
| 6.5 転圧締め固め | 62 |
| 6.5.1 施工 | 62 |
| 6.5.2 品質管理 | 68 |
| 6.6 埋め戻し材ブロック | 79 |
| 6.6.1 施工 | 79 |
| 6.6.2 品質管理 | 85 |
| 7. コンクリートプラグ | 90 |
| 7.1 要求性能 | 90 |
| 7.2 使用材料および配合 | 90 |
| 7.3 実機試験練り | 91 |
| 7.3.1 フレッシュ性状 | 92 |
| 7.3.2 硬化後性状 | 94 |
| 7.3.3 採用配合 | 97 |
| 7.4 施工 | 97 |
| 7.4.1 施工計画および型枠の設置 | 97 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 7.4.2 | コンクリート打設 | 104 |
| 7.5 | 品質管理 | 110 |
| 7.5.1 | コンクリート供給量 | 110 |
| 7.5.2 | フレッシュ性状 | 111 |
| 7.5.3 | 打込み温度 | 112 |
| 7.5.4 | 硬化後性状 | 113 |
| 7.6 | コンタクトグラウト | 113 |
| 7.6.1 | 使用材料および使用機材 | 114 |
| 7.6.2 | 注入準備工 | 115 |
| 7.6.3 | コンタクトグラウトの施工 | 117 |
| 8. | 計測システムの整備および計測の開始 | 120 |
| 8.1 | 計測システムの整備 | 120 |
| 8.1.1 | 計測センサーの動作確認 | 120 |
| 8.1.2 | 貫通ダクト | 120 |
| 8.1.3 | 計測システムの設置 | 122 |
| 8.2 | 注水システム | 122 |
| 8.2.1 | 採水用ボーリング孔 | 122 |
| 8.2.2 | システムの構成 | 123 |
| 8.3 | 計測の開始 | 125 |
| 8.3.1 | 計測開始 | 125 |
| 8.3.2 | 模擬 OP ヒーターによる加熱の開始および注水装置による注水の開始 | 125 |
| 9. | 見学者用展示物の整備 | 126 |
| 9.1 | 作業の紹介 | 126 |
| 9.2 | 緩衝材および埋め戻し材ブロックの展示 | 126 |
| 10. | まとめ | 128 |
| | 謝辞 | 130 |
| | 参考文献 | 130 |
| | 付録 | 132 |
| | 付録 CD-ROM | |

Contents

| | |
|--|-----|
| 1. Introduction..... | 1 |
| 2. Objective of the in-situ experiment for performance confirmation of engineered barrier system | 2 |
| 3. Excavation of Niche No.4..... | 4 |
| 3.1 Cross section of the niche | 4 |
| 3.2 Excavation | 5 |
| 4. Drilling test pit..... | 9 |
| 4.1 Test pit | 9 |
| 4.2 Drilling machine for large diameter | 9 |
| 4.2.1 Procedure drilling test pit using drilling machine for large diameter | 9 |
| 4.2.2 Specifications of the drilling machine | 10 |
| 4.3 Drilling test pit | 12 |
| 4.3.1 Carrying dilling machine for large diameter in Niche No.4 | 12 |
| 4.3.2 Drilling test pit..... | 13 |
| 4.3.3 Confirmation of the test pit shape | 15 |
| 4.4 Preparation of setting buffer material blocks in the test pit | 21 |
| 5. Setting buffer material blocks and simulated overpack..... | 24 |
| 5.1 Specification..... | 24 |
| 5.1.1 Buffer material block | 24 |
| 5.1.2 Simulated overpack | 24 |
| 5.2 Monitoring plan (test pit)..... | 27 |
| 5.2.1 Buffer material..... | 27 |
| 5.2.2 Simulated overpack | 33 |
| 5.2.3 Specification of sensors | 33 |
| 5.3 Chase buffer material for sensors..... | 42 |
| 5.4 Setting buffer material blocks and simulated overpack into the test pit | 44 |
| 5.4.1 Buffer material blocks | 44 |
| 5.4.2 Simulated overpack | 51 |
| 6. Backfilling material | 56 |
| 6.1 Consideration of construction technique of tunnel backfill | 56 |
| 6.2 Specification of backfilling material | 57 |
| 6.3 Monitoring plan (backfilling material) | 57 |
| 6.3.1 Arrangement of sensors | 57 |
| 6.3.2 Specification of sensors | 61 |
| 6.4 Setup groundwater injection line..... | 61 |
| 6.5 Compaction backfilling material..... | 62 |
| 6.5.1 Construction technique..... | 62 |
| 6.5.2 Quality management | 68 |
| 6.6 Backfilling material block | 79 |
| 6.6.1 Setting | 79 |
| 6.6.2 Quality management | 85 |
| 7. Concrete type plug | 90 |
| 7.1 Specification..... | 90 |
| 7.2 Using materials and composition | 90 |
| 7.3 Test mixing using concrete plant | 91 |
| 7.3.1 Property of fresh concrete..... | 92 |
| 7.3.2 Property of hardened concrete..... | 94 |
| 7.3.3 Composition for concrete type plug | 97 |
| 7.4 Casting concrete | 97 |
| 7.4.1 Casting plan and setting fromwork..... | 97 |
| 7.4.2 Casting concrete..... | 104 |
| 7.5 Quality management..... | 110 |
| 7.5.1 Supply of concrete | 110 |

| | |
|---|-----|
| 7.5.2 Property of fresh concrete..... | 111 |
| 7.5.3 Concrete temperature..... | 112 |
| 7.5.4 Property of hardened concrete..... | 113 |
| 7.6 Contact grouting..... | 113 |
| 7.6.1 Material and equipment..... | 114 |
| 7.6.2 Preparatory work for grouting..... | 115 |
| 7.6.3 Contact grouting operation..... | 117 |
| 8. Consolidate measurement system and start measuring..... | 120 |
| 8.1 Consolidate the system of measurement..... | 120 |
| 8.1.1 Operation check of sensors..... | 120 |
| 8.1.2 Duct for cables..... | 120 |
| 8.1.3 Setup measurement system..... | 122 |
| 8.2 Groundwater injection system..... | 122 |
| 8.2.1 Borehole for groundwater..... | 122 |
| 8.2.2 Constitution of the injection system..... | 123 |
| 8.3 Start measuring..... | 125 |
| 8.3.1 Start measuring..... | 125 |
| 8.3.2 Start heating and injection groundwater..... | 125 |
| 9. Exhibited object for contribution of visitors' understanding..... | 126 |
| 9.1 Introduction of tests in the niche by short movie..... | 126 |
| 9.2 Exhibition of buffer material block and backfilling material block..... | 126 |
| 10. Summary..... | 128 |
| Acknowledgement..... | 130 |
| References..... | 130 |
| Appendix..... | 132 |
| Appendix CD-ROM | |

List of figures

| | | |
|---------|--|----|
| Fig. 1 | Layout of Horonobe URL..... | 1 |
| Fig. 2 | Location of Niche No.4 in 350m gallery..... | 2 |
| Fig. 3 | Schematic cross-section view of test pit at Niche No.4..... | 2 |
| Fig. 4 | Flowchart of EBS experiment..... | 3 |
| Fig. 5 | Cross section of Niche No.4..... | 4 |
| Fig. 6 | Cross section of the drift of Horonobe URL..... | 4 |
| Fig. 7 | Horizontal and vertical sectional view of Niche No.4..... | 5 |
| Fig. 8 | Local safety factor..... | 7 |
| Fig. 9 | Shape of concrete-type plug (A-A cross section in Fig. 10)..... | 8 |
| Fig. 10 | Digging invert concrete before excavation cutout for plug..... | 8 |
| Fig. 11 | Disposal pit (vertical-emplacment concept)..... | 9 |
| Fig. 12 | Procedure drilling test pit using drilling machine for large diameter..... | 9 |
| Fig. 13 | Flow of drilling test pit using a casing drilling machine for large diameter.... | 10 |
| Fig. 14 | Dimensional data of drilling machine for large diameter..... | 11 |
| Fig. 15 | Measurement of test pit depth..... | 15 |
| Fig. 16 | Measure line of diameter of test pit..... | 16 |
| Fig. 17 | Measurement step by 3D scanner..... | 17 |
| Fig. 18 | Results of 3D scan (overhead view)..... | 19 |
| Fig. 19 | Results of 3D scan (projection view)..... | 20 |
| Fig. 20 | Radius vs depth of test pit..... | 21 |
| Fig. 21 | Conceptual diagram of drainage water layer..... | 22 |
| Fig. 22 | Schematic plane view of buffer material..... | 24 |
| Fig. 23 | Structure of simulated overpack..... | 25 |
| Fig. 24 | Structure of heater in simulated overpack..... | 25 |
| Fig. 25 | Image of simulated overpack..... | 26 |
| Fig. 26 | Measurement section..... | 27 |
| Fig. 27 | Original plan..... | 28 |
| Fig. 28 | Distribution of pressure cell..... | 29 |
| Fig. 29 | Measurement section of borehole extensometer in buffer material..... | 31 |
| Fig. 30 | Location of sensors in buffer material block..... | 31 |
| Fig. 31 | Cross section of specific resistance tomography..... | 32 |
| Fig. 32 | Location of thermocouple on surface of simulated OP..... | 33 |
| Fig. 33 | Setting pH indicator of optical pH sensor..... | 36 |
| Fig. 34 | Diagram of carbon steel corrosion sensor..... | 37 |
| Fig. 35 | Processing of buffer material block (for pressure cell)..... | 42 |
| Fig. 36 | Work methods for backfilling..... | 56 |
| Fig. 37 | Cross section of arrangement of sensors in backfilling material and plug.... | 57 |
| Fig. 38 | Location of sensors in backfilling material..... | 58 |
| Fig. 39 | Conceptual diagram of injection groundwater to backfilling material..... | 62 |
| Fig. 40 | Compaction layers..... | 62 |
| Fig. 41 | Compaction layers at the test pit..... | 63 |
| Fig. 42 | Arrangement survey point..... | 69 |
| Fig. 43 | Arrangement survey point in the test pit and lower half part of the niche... | 70 |
| Fig. 44 | Result of dry density by sand replacement method..... | 72 |
| Fig. 45 | Result of dry density by RI method..... | 73 |
| Fig. 46 | Relational expression between water content and thermal conductivity..... | 75 |
| Fig. 47 | Result of dry density by QTM..... | 76 |
| Fig. 48 | Calculated dry density from input and thickness of backfilling material..... | 77 |
| Fig. 49 | Comparison the results of dry density using different methods..... | 79 |
| Fig. 50 | Number of backfilling material blocks (cross section)..... | 81 |
| Fig. 51 | Number of backfilling material blocks (vertical section)..... | 82 |
| Fig. 52 | Sequence of setting backfillig material blocks..... | 84 |
| Fig. 53 | Clearance between blocks and niche wall (crown)..... | 88 |

| | | |
|---------|--|-----|
| Fig. 54 | Uniaxial compressive strength | 95 |
| Fig. 55 | Flowchart of casting plug concrete and contact grouting | 97 |
| Fig. 56 | Cradle for reinforcing steel and stage..... | 98 |
| Fig. 57 | Grout stopper and bentonite strips..... | 99 |
| Fig. 58 | Pipe arrangement for contact grouting | 100 |
| Fig. 59 | Setting design of concrete pipe (projection view) | 102 |
| Fig. 60 | Design of formwork..... | 103 |
| Fig. 61 | Design of bracing | 104 |
| Fig. 62 | Casting situation of plug concrete | 105 |
| Fig. 63 | Design of setting thermocouple and concrete sensor | 106 |
| Fig. 64 | Flowchart of grouting | 114 |
| Fig. 65 | Injection plant and pumping line..... | 115 |
| Fig. 66 | Pipe arrangement for contact grouting (overhead view) | 116 |
| Fig. 67 | Water-tight seal of duct for cables | 121 |
| Fig. 68 | Location of borehole for groundwater | 123 |
| Fig. 69 | Water injection system configuration for the bottom of the pit..... | 124 |
| Fig. 70 | Water injection system configuration for the backfilling material..... | 124 |

List of tables

| | | |
|----------|---|----|
| Table 1 | Specifications of the drilling machine..... | 11 |
| Table 2 | Attachment member of the drilling machine | 12 |
| Table 3 | Time schedule of test pit drilling | 12 |
| Table 4 | Results of test pit depth | 16 |
| Table 5 | Results of test pit diameter (diameter of End casing) | 16 |
| Table 6 | Result of sieving test (Iwaki silica sand No.3) | 23 |
| Table 7 | Result of sieving test (Iwaki silica sand No.4) | 23 |
| Table 8 | Specifications of buffer material block | 24 |
| Table 9 | Insulation paint using for simulated OP | 26 |
| Table 10 | Sensors installed in buffer material | 30 |
| Table 11 | Specifications of Pressure cell..... | 33 |
| Table 12 | Specifications of Piezometers | 34 |
| Table 13 | Specifications of Borehole extensometer | 35 |
| Table 14 | Specifications of pH meter | 36 |
| Table 15 | Specifications of Thermocouple..... | 36 |
| Table 16 | Specifications of Carbon steel corrosion sensor..... | 37 |
| Table 17 | Specifications of platinum electrode | 38 |
| Table 18 | Specifications of Hygrometer | 38 |
| Table 19 | Specifications of Psychrometer | 39 |
| Table 20 | Specifications of FDR-V..... | 40 |
| Table 21 | Specifications of swelling sensor..... | 40 |
| Table 22 | Specifications of Pressure cell (wireless sensor) | 41 |
| Table 23 | Specifications of Piezometers (wireless sensor) | 41 |
| Table 24 | Specifications of electrode for measuring specific resistance | 41 |
| Table 25 | Spec of vacuum grasp system | 45 |
| Table 26 | Spec of mechanical grasp system..... | 47 |
| Table 27 | Example of combined work methods for upper and lower halves of a tunnel | 56 |
| Table 28 | Specification of backfilling material | 57 |
| Table 29 | Sensors installed in concrete-type plug and backfilling material | 58 |
| Table 30 | Specifications of Pressure cell..... | 61 |
| Table 31 | Specifications of FDR-V..... | 61 |
| Table 32 | Specifications of compactor | 63 |
| Table 33 | Construction results of compaction | 68 |
| Table 34 | Confirmation method and measure point of dry density | 69 |

| | | |
|----------|--|-----|
| Table 35 | Dry density of backfilling material by sand replacement method | 72 |
| Table 36 | Specification of density and moisture meter by RI method..... | 73 |
| Table 37 | Dry density of backfilling material by RI Method | 74 |
| Table 38 | Thermal conductivity and water content rate at laboratory test | 74 |
| Table 39 | Dry density of backfilling material by QTM..... | 76 |
| Table 40 | Calculated dry density using input and thickness of backfilling material ... | 78 |
| Table 41 | Cycle time of every method | 79 |
| Table 42 | Specification of backfilling material block..... | 80 |
| Table 43 | Number of setting blocks per day | 85 |
| Table 44 | Specification of blocks (dimension and weight)..... | 85 |
| Table 45 | Length of setting blocks | 87 |
| Table 46 | Width of setting blocks | 87 |
| Table 47 | High of setting blocks | 87 |
| Table 48 | Clearance between block and niche wall..... | 88 |
| Table 49 | Materials of concrete type plug..... | 91 |
| Table 50 | Considered range of composition of concrete type plug | 91 |
| Table 51 | Composition of concrete type plug | 91 |
| Table 52 | Properties of fresh concrete..... | 93 |
| Table 53 | Results of strength test | 95 |
| Table 54 | Adopted composition of concrete type plug..... | 97 |
| Table 55 | Amount of concrete | 111 |
| Table 56 | Fresh concrete property | 112 |
| Table 57 | Results of strength test for plug concrete..... | 113 |
| Table 58 | Chemical component of low alkaline grout..... | 114 |
| Table 59 | Equipment of grouting | 114 |
| Table 60 | Result of water test | 117 |
| Table 61 | Injection cement milk (crown of plug) | 117 |
| Table 62 | Grout (cement milk) composition..... | 118 |
| Table 63 | Results of grout injection | 118 |
| Table 64 | Confirmation results of specific weight | 119 |
| Table 65 | Instruments of water injection system | 125 |

List of photos

| | | |
|----------|---|----|
| Photo 1 | Excavation of Niche No.4 using hydraulic breaker..... | 5 |
| Photo 2 | Taking out excavated rocks by conveyor..... | 6 |
| Photo 3 | Widening for concrete-type plug | 6 |
| Photo 4 | Niche No.4 before casting roadbed concrete..... | 7 |
| Photo 5 | Niche No.4 after casting roadbed concrete | 7 |
| Photo 6 | Excavation cutout of lower part for plug | 8 |
| Photo 7 | Drilling machine for large diameter | 10 |
| Photo 8 | Setup drilling machine at Niche No.4 (front view) | 13 |
| Photo 9 | Setup drilling machine at Niche No.4 (rear view) | 13 |
| Photo 10 | Drilling test pit by casing..... | 14 |
| Photo 11 | Drilling test pit by auger..... | 14 |
| Photo 12 | Taking out excavated rock from test pit | 14 |
| Photo 13 | Completion of test pit excavation..... | 15 |
| Photo 14 | Measurement of the test pit depth and diameter | 16 |
| Photo 15 | Steel frame for casing jack-up..... | 18 |
| Photo 16 | Measurement surface figure of test pit using 3D scanner..... | 18 |
| Photo 17 | Setting unwoven cloth | 22 |
| Photo 18 | Leveling by silica sand | 22 |
| Photo 19 | Layout of groundwater injection into test pit..... | 23 |
| Photo 20 | Insulation paint for covers of simulated OP (using NITTORU 120R) | 26 |
| Photo 21 | Insulation paint for body of simulated OP (using Duralco 4525 IP) | 27 |

| | | |
|----------|---|----|
| Photo 22 | Pressure cell..... | 34 |
| Photo 23 | Piezometer | 34 |
| Photo 24 | Borehole extensometer | 35 |
| Photo 25 | Optical pH sensor | 36 |
| Photo 26 | Thermocouple | 37 |
| Photo 27 | Carbon steel corrosion sensor | 38 |
| Photo 28 | Pt electrode | 38 |
| Photo 29 | Hygrometer | 39 |
| Photo 30 | Psychrometer | 39 |
| Photo 31 | FDR-V | 40 |
| Photo 32 | Swelling sensor | 40 |
| Photo 33 | Wireless sensor (piezometer and pressure cell)..... | 41 |
| Photo 34 | Electrode for measuring specific resistance | 42 |
| Photo 35 | Setting template | 43 |
| Photo 36 | Sandblasting | 43 |
| Photo 37 | After sandblasting block..... | 43 |
| Photo 38 | Chased buffer material block for sensor (pressure cell)..... | 44 |
| Photo 39 | Vacuum grasp system (for one block)..... | 45 |
| Photo 40 | Setting buffer material block using vacuum grasp system | 46 |
| Photo 41 | Setting buffer material block into test pit using vacuum grasp system | 46 |
| Photo 42 | Mechanical grasp system | 47 |
| Photo 43 | Setting buffer material block into test pit using mechanical grasp system | 48 |
| Photo 44 | Setting sensors at the bottom of test pit..... | 48 |
| Photo 45 | Working situation in test pit | 49 |
| Photo 46 | Setting a piezometer to chase of buffer material block..... | 49 |
| Photo 47 | Infilling a chase with buffer material (bentonite-silicasand powder) | 49 |
| Photo 48 | After infilling a chase | 49 |
| Photo 49 | Setting buffer material block in test pit | 50 |
| Photo 50 | Simulated OP (body and bottom cover) | 52 |
| Photo 51 | Move simulated OP into test pit | 52 |
| Photo 52 | Setting thermocouple on surface of simulated OP..... | 53 |
| Photo 53 | Setting simulated OP into the center of buffer material blocks | 53 |
| Photo 54 | Putting weight into the body..... | 53 |
| Photo 55 | Setting upper cover..... | 54 |
| Photo 56 | Filling oil to simulated OP | 54 |
| Photo 57 | Move heater into test pit | 54 |
| Photo 58 | Setting heater | 55 |
| Photo 59 | Completed setting simulated OP | 55 |
| Photo 60 | Setting sensors to the niche wall and into backfilling material..... | 60 |
| Photo 61 | Compaction using rammer (Layer No.1) | 64 |
| Photo 62 | Infilling a chase with backfilling material | 64 |
| Photo 63 | Compaction layer No.12 by rammer | 65 |
| Photo 64 | After Compaction of backfilling material (Layer No.12) | 65 |
| Photo 65 | Confirmation of level after compaction..... | 65 |
| Photo 66 | Instration and leveling backfilling material | 66 |
| Photo 67 | Compaction by hand guide roller | 66 |
| Photo 68 | Wall for backfilling material guards | 67 |
| Photo 69 | Compaction by rammer | 67 |
| Photo 70 | Laying sensor cables..... | 67 |
| Photo 71 | After compaction (Layer No.30) | 68 |
| Photo 72 | Sand replacement method (Layer No.27, Point A-R) | 71 |
| Photo 73 | RI method (Layer No.29)..... | 73 |
| Photo 74 | QTM (Layer No.27)..... | 75 |
| Photo 75 | Storage situation | 80 |

| | | |
|-----------|---|-----|
| Photo 76 | Temporary storage at the East access shaft | 81 |
| Photo 77 | 1st layer blocks setting | 82 |
| Photo 78 | Setting blocks cutting of edge | 82 |
| Photo 79 | Setting situation (until 5th section, 25 layers) | 83 |
| Photo 80 | Setting situation (18th section, 25 layers~20th section, 20 layers) | 83 |
| Photo 81 | Completion setting blocks | 84 |
| Photo 82 | Setting a partition wall | 84 |
| Photo 83 | Confirmation of specification of backfilling material block | 86 |
| Photo 84 | Measuring length and width of setting blocks | 87 |
| Photo 85 | Measuring height of setting blocks | 88 |
| Photo 86 | Measuring clearance | 89 |
| Photo 87 | Concrete plant at Horonobe URL | 92 |
| Photo 88 | Mixing | 92 |
| Photo 89 | Slump flow | 92 |
| Photo 90 | Air content | 93 |
| Photo 91 | O-funnel flow test | 93 |
| Photo 92 | U-shaped filling test | 93 |
| Photo 93 | Quality inspection | 94 |
| Photo 94 | Test pieces | 94 |
| Photo 95 | Uniaxial compressive strength test | 95 |
| Photo 96 | Quality inspection of strength (28 day) | 96 |
| Photo 97 | Results of uniaxial compressive strength test | 96 |
| Photo 98 | Setting bentonite strips and grout stopper | 99 |
| Photo 99 | Setting pressure cell before casting plug | 100 |
| Photo 100 | Setting reinforcing steel | 101 |
| Photo 101 | Setting concrete pipe and vent of concrete | 102 |
| Photo 102 | Setup formwork | 103 |
| Photo 103 | Setup bracing | 104 |
| Photo 104 | Casting plug concrete (inside of formwork) | 107 |
| Photo 105 | Direction center | 107 |
| Photo 106 | Concrete-filled situation (inside of formwork) | 108 |
| Photo 107 | Measuring displacement of formwork | 108 |
| Photo 108 | Removal action of formwork | 109 |
| Photo 109 | Completion of demolding | 110 |
| Photo 110 | Setting strain meter | 110 |
| Photo 111 | Confirmation of fresh concrete property and test piece sampling | 112 |
| Photo 112 | Strength test for plug concrete | 113 |
| Photo 113 | Setup injection plant | 115 |
| Photo 114 | Water leakage and caulking | 116 |
| Photo 115 | Operation check of sensors | 120 |
| Photo 116 | Cable arranging and caulking | 121 |
| Photo 117 | Duct for cables (after casting concrete-type plug) | 122 |
| Photo 118 | Measurement system room | 122 |
| Photo 119 | Boreholes for groundwater supply | 123 |
| Photo 120 | Water injection system at the Niche No.4 | 124 |
| Photo 121 | Introduction DVD monitor | 126 |
| Photo 122 | Exhibition of buffer material blocks | 127 |
| Photo 123 | Exhibition of backfilling material blocks | 127 |
| Photo 124 | Full view of Niche No.4 | 127 |

This is a blank page.

1. はじめに

日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）幌延深地層研究センターが、北海道幌延町で実施している幌延深地層研究計画¹⁾は、堆積岩を対象として、深地層の科学的研究、地層処分技術の信頼性向上や安全評価手法の高度化に向けた基盤的な研究開発を実施している。

幌延深地層研究計画は、「地上からの調査研究段階（第1段階）」、「坑道掘削（地下施設建設）時の調査研究段階（第2段階）」および「地下施設での調査研究段階（第3段階）」の3つの段階から構成される。幌延深地層研究センターの地下施設（以下、幌延 URL）は平成26年7月には、換気立坑および東立坑が深度380m、西立坑が深度365mまで掘削が完了しており、それら3本の立坑をつなぐ形で深度140m、250mおよび350mに調査坑道が完成している（Fig. 1の赤線部分）。これらの坑道を利用した第3段階の調査研究は、平成22年度から順次開始しており、平成26年度からは350m調査坑道において、人工バリア性能確認試験を実施している。本報告では、人工バリア性能確認試験における坑道および試験孔の掘削、緩衝材および模擬オーバーパックの設置、坑道の埋め戻しおよびプラグの設置までの一連の適用性確認試験について述べる。

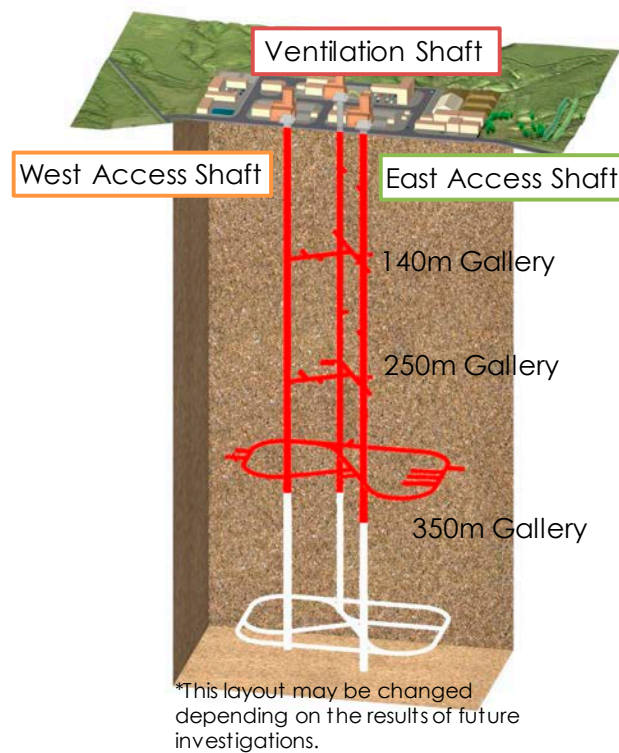


Fig. 1 Layout of Horonobe URL
Red line shows constructed part, and white line shows planning part

2. 人工バリア性能確認試験の目的

人工バリア性能確認試験は、幌延の地質環境をひとつの事例に、処分孔竖置き方式を対象として実規模の人工バリアを設置し、実環境下において人工バリア定置後の再冠水までの過渡期の現象を評価する事を目的としている。

具体的には、下記の3点である。

- ① 「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ」²⁾ (以下、第2次取りまとめ) で示した処分概念が実際の地下で構築できることの実証
- ② 人工バリアや埋め戻し材の設計手法の適用性確認
- ③ 熱・水・応力・化学連成挙動に関わるデータの取得

本報告では、主に目的の①に関わる事項について述べるとともに、②についても一部記述する。本試験の実施場所 (350m 調査坑道の試験坑道 4) を Fig. 2 に、試験の概念図を Fig. 3 に示す。

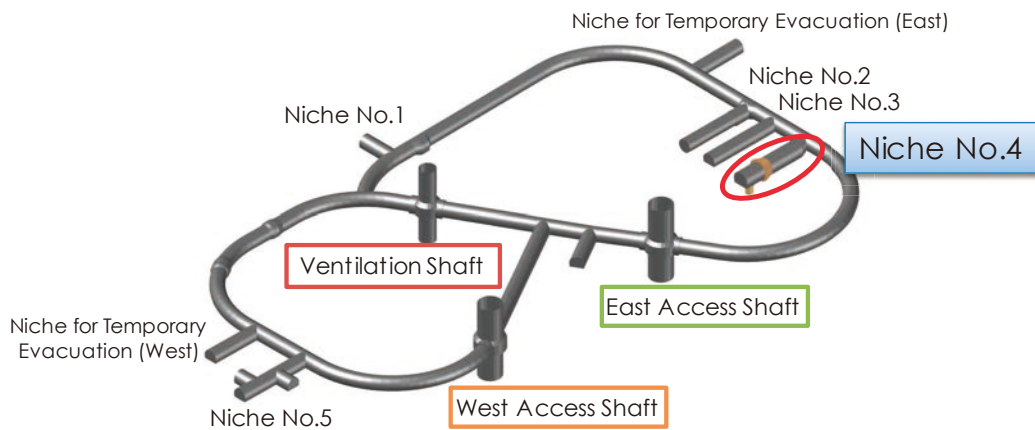


Fig. 2 Location of Niche No.4 in 350m gallery

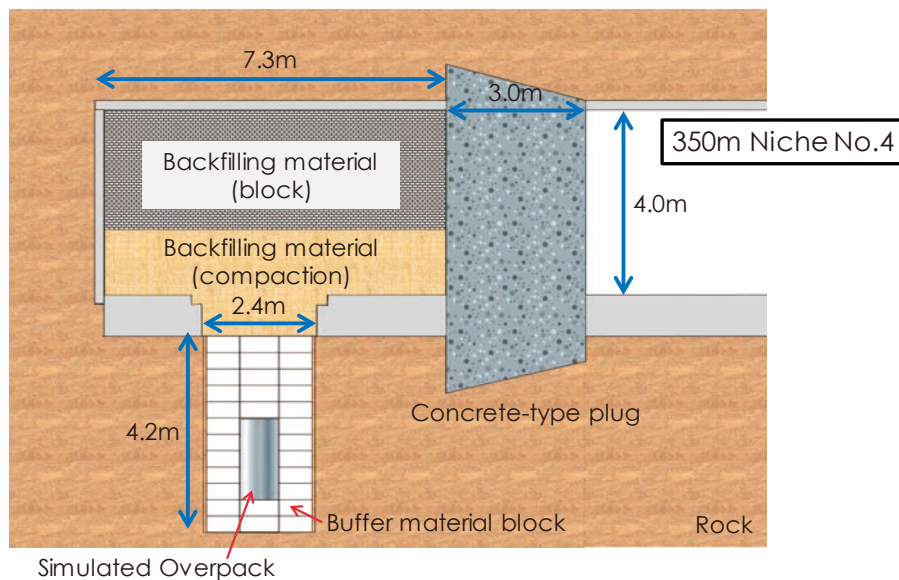


Fig. 3 Schematic cross-section view of test pit at Niche No.4

人工バリア性能確認試験における実際の地下での処分概念の構築に関わる全体のフローを Fig. 4 に示す。平成 25 年 11 月から坑道 (試験坑道 4) の掘削に始まり、平成 26 年 11 月までに、試験孔の掘削、各種計測センサーの設置を行いながらの緩衝材・模擬オーバーパック (以下、模擬

OP) の設置、坑道の埋め戻しおよびコンクリートプラグの施工を行った。その後、各種計測システムを整備し計測を開始するとともに、模擬 OP 内のヒーターによる加熱および試験孔部・埋め戻し部外周への注水を開始した（平成 27 年 1 月）。なお、プラグコンクリートは打設後に収縮し、周辺岩盤との間に微細な隙間が生じる可能性が考えられることから、収縮がある程度収束した平成 27 年 5 月にコンタクトグラウト*2を実施し、周辺岩盤との一体性を確保した。

原位置での作業とは別に、それぞれの段階の施工に間に合う様に、試験孔掘削のための大口径掘削機の開発、模擬 OP、緩衝材ブロックおよび埋め戻し材などの製作を行った³⁾。

本報告では、原位置（地下）での作業（Fig. 4 の赤枠）について順に述べる。

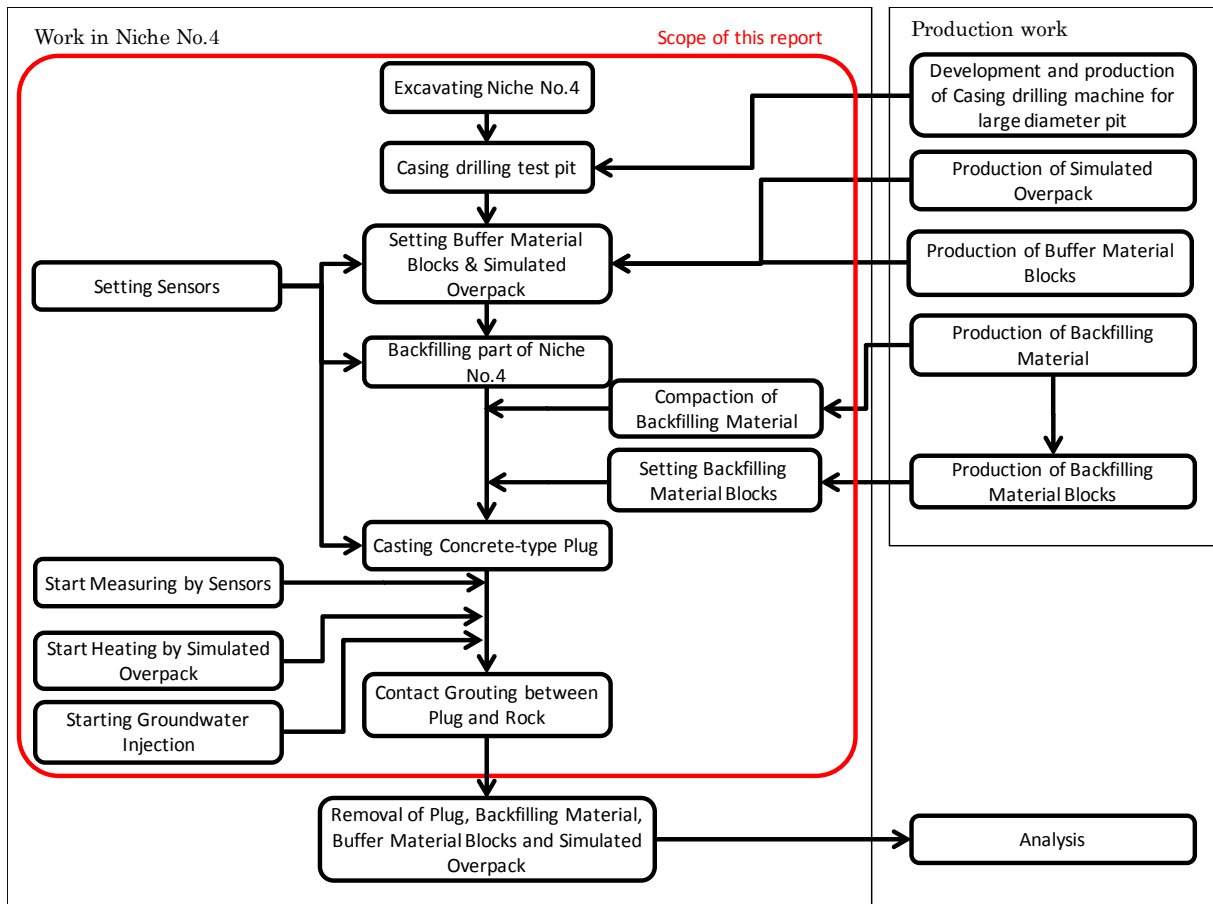


Fig. 4 Flowchart of EBS experiment

*2 コンクリートの硬化収縮などにより、コンクリート躯体と周辺岩盤の境界付近に生ずる隙間に対し、コンクリートの水和熱がある程度収まり、硬化収縮が落ち着いた段階で実施するグラウト。

3. 試験坑道の掘削

3.1 坑道断面

人工バリア性能確認試験を実施する試験坑道 4 は、第 2 次取りまとめ 2)における、軟岩系岩盤・処分孔竖置き方式の処分坑道として設定されている三心円の断面 (Fig. 5) とした。一方、幌延 URL の通常の水平坑道断面は同じく三心円ではあるが、水平坑道で実施する各種試験で必要となる断面の大きさや、幌延 URL の建設工事における使用機材や費用面の制約などを考慮し、Fig. 5 と比べて 20%程度小さい断面となっている (Fig. 6)。そのため、350m 調査坑道 (周回坑道) から試験坑道 4 を掘削する際には断面の拡幅が必要であった。拡幅に際しては、資機材の搬出入などの面からは底盤を揃えることが有利であるが、幌延地域の地下水はメタンガスが溶存しているため、掘削作業中などにメタンガスが発生した場合、拡幅部となる坑道上部に滞留し引火・爆発の可能性があるため、作業時の安全確保の観点から、坑道の上部を揃えた形で拡幅を行った。試験坑道 4 の水平および垂直断面図を Fig. 7 に示す。

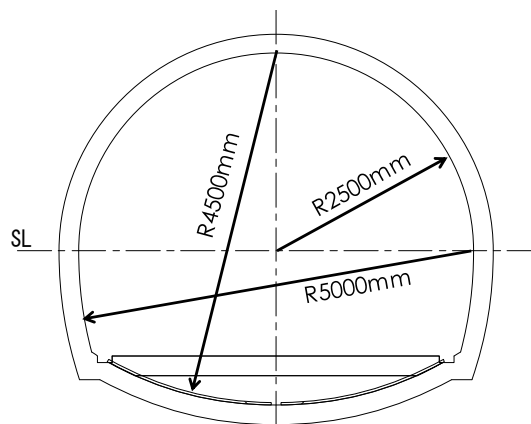


Fig. 5 Cross section of Niche No.4

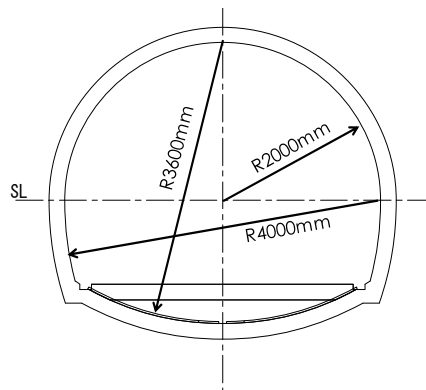


Fig. 6 Cross section of the drift of Horonobe URL

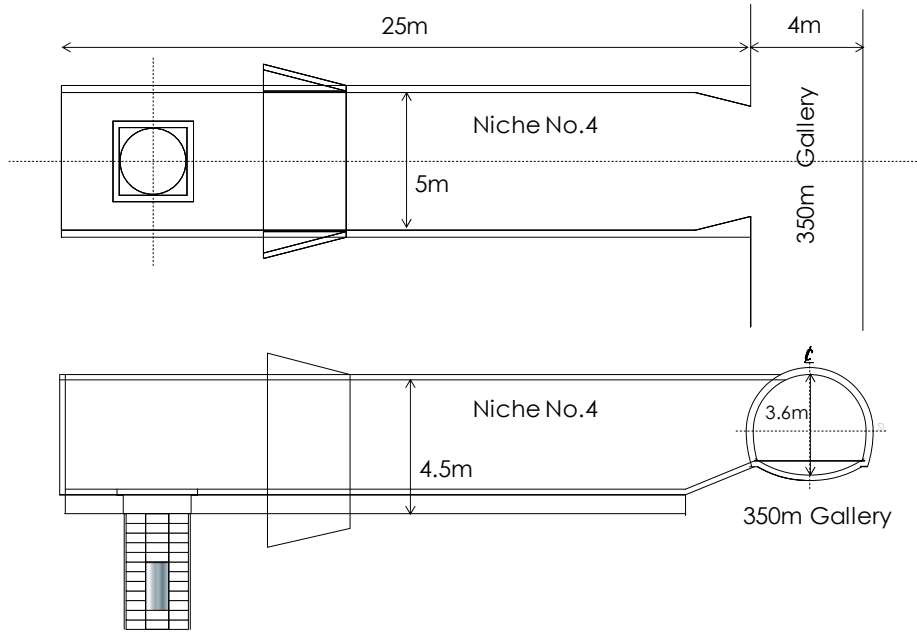


Fig. 7 Horizontal and vertical sectional view of Niche No.4

3.2 掘削

試験坑道 4 の掘削は、他の調査坑道と同様に油圧ブレーカーを用いて行った。1~1.5 m 掘削した後、鋼製支保工の設置、コンクリート吹付けを順次行って、これを繰り返して全長 25 m の試験坑道を掘削した。掘削は昼夜 2 交替で行い、2013 年 10 月 29 日から 12 月 6 日までの約 40 日間を要した。掘削状況を Photo 1 に、掘削土（ズリ）の搬出状況を Photo 2 に示す。



Photo 1 Excavation of Niche No.4 using hydraulic breaker



Photo 2 Taking out excavated rocks by conveyor

人工バリア性能確認試験では、坑道を埋め戻した後にコンクリートプラグ（力学プラグ）を設置するため、プラグ設置部分を拡幅する必要がある。当初計画では試験坑道 4 の掘削が終了し、試験孔掘削後にラインドリングなどによる該当部分の拡幅掘削を計画していた⁴⁾が、その場合、いったん設置した坑道のコンクリート支保を撤去することとなるため、岩盤の崩落などが生じる可能性が高まると考えられる。そのため、作業の安全性を考慮し、試験坑道 4 の掘削の進捗に合わせて該当部分を拡幅することとした。拡幅時の作業状況を Photo 3 に、試験坑道 4 の掘削終了時の状況を Photo 4 に示す。ただし、4.3 で後述する試験孔掘削のための大口径掘削機の作業性を考慮し、底盤部の拡幅は試験孔掘削の後とした。Photo 5 に路盤コンクリート打設後の状況を示す。なお、試験孔掘削時の作業性を考慮し、試験孔部分の路盤は箱抜きにより岩盤が露出したままとした。

また、拡幅は約 0.77 m とし、事前の解析により、拡幅により坑道周辺の掘削損傷領域（塑性域）が分断されることを確認した⁵⁾。解析には、汎用非線形有限要素法プログラム ABAQUS を用いた。解析ステップは実際の施工と同様、1 m ごととし、支保工の設置は掘削後 2 ステップ後とした。局所安全率分布の解析結果を Fig. 8 に示す。



Photo 3 Widening for concrete-type plug



Photo 4 Niche No.4 before casting roadbed concrete



Photo 5 Niche No.4 after casting roadbed concrete

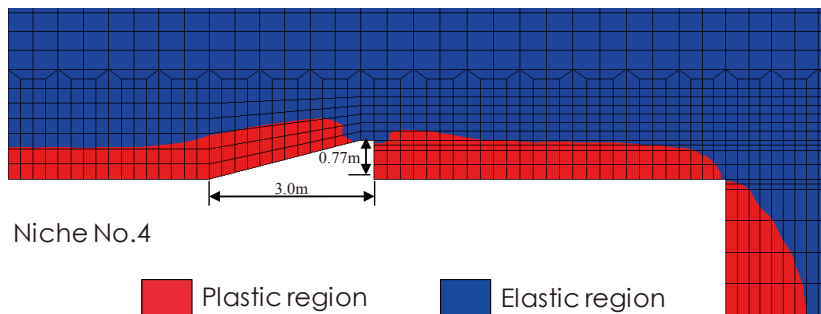


Fig. 8 Local safety factor
(Cross section view)

試験孔掘削（4.3 で後述）後に、試験坑道底盤部の拡幅を実施した。プラグコンクリートの形状は、上半部の拡幅に際して実施した解析結果 ⑤ を基に、試験坑道の掘削影響領域が坑道中心から同心円状に分布することを想定し、ほぼ円形状と設定した（Fig. 9）。これにより、下半部の拡幅の最大深さが約 1.7 m（路盤コンクリート天端から約 2.1 m）と、上半部の拡幅幅（約 0.77 m）

よりも大きくなったため、施工機械の制約から拡幅部手前のインバート部を一部掘り下げて拡幅を行った (Fig. 10)。底盤部の拡幅作業状況を Photo 6 に示す。

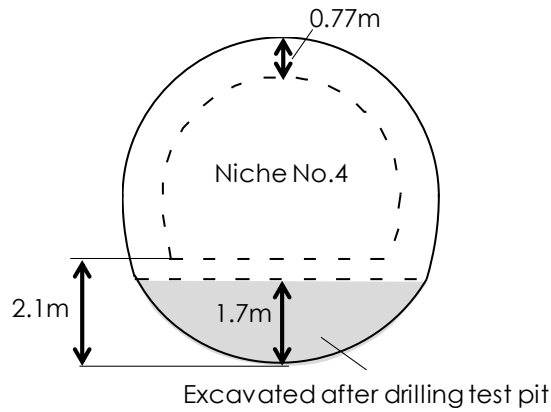


Fig. 9 Shape of concrete-type plug (A-A cross section in Fig. 10)

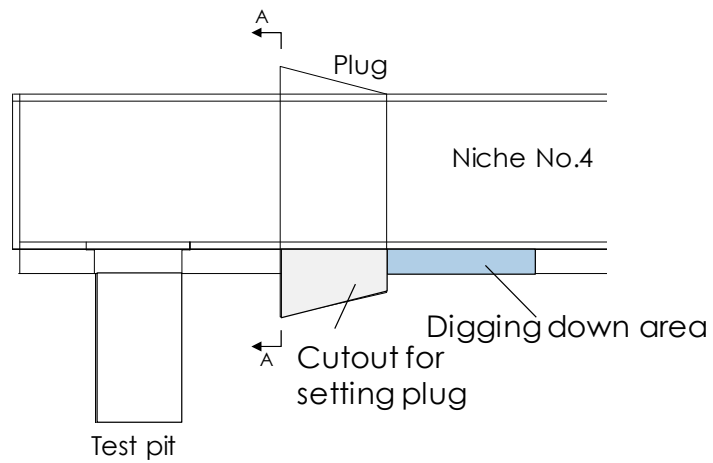


Fig. 10 Digging invert concrete before excavation cutout for plug



Photo 6 Excavation cutout of lower part for plug

4. 試験孔の掘削

4.1 試験孔

試験孔は、第2次取りまとめ²⁾で示された、処分孔豎置き方式における緩衝材の直径 2220 mm、深さ 4130 mm (Fig. 11) を基本に、緩衝材と岩盤、緩衝材と模擬 OP とのクリアランスおよび計測器の設置・配線等に要する隙間を考慮し、直径 2400 mm とし、深さを岩盤表面から 4200 mm とした (Fig. 3 参照)。

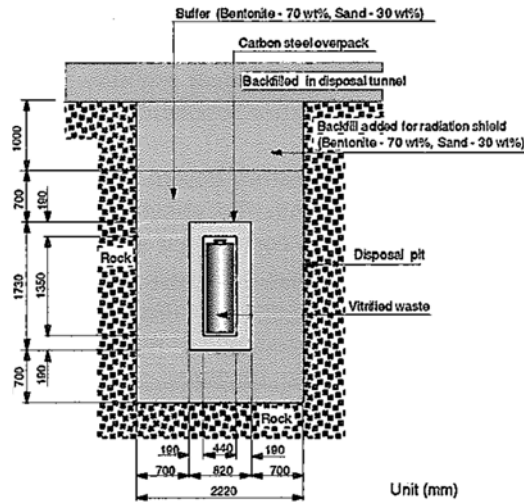


Fig. 11 Disposal pit (vertical-emplacment concept)²⁾

4.2 大口径掘削機

4.2.1 大口径掘削機による試験孔の掘削フロー

試験孔の掘削に際しては、全旋回ケーシング掘削と中堀オーガー掘削を組み合わせた掘削機械 (以下、大口径掘削機) を開発、製作した³⁾。試験孔掘削のイメージを Fig. 12 に示す。試験孔の掘削は、鋼製ケーシングを継ぎ足しながら行い、所定深度に到達後、中堀オーガーでケーシング (掘削に使用した鋼製ケーシングを残置) 内部を掘削する。

鋼製ケーシングは、搬入経路や揚重作業などを考慮し深度方向に 4 分割とし、中堀オーガーの直径は大・中・小の 3 段階とした。

試験孔の掘削フローを Fig. 13 に、開発した大口径掘削機の外観を Photo 7 に示す。

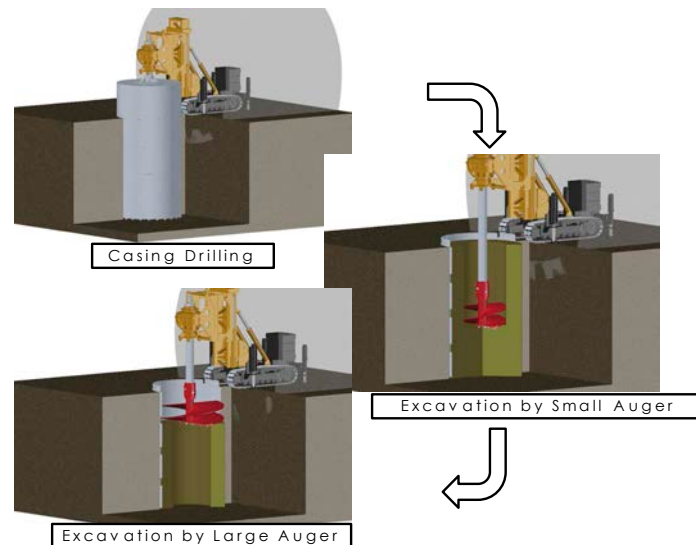


Fig. 12 Procedure drilling test pit using drilling machine for large diameter

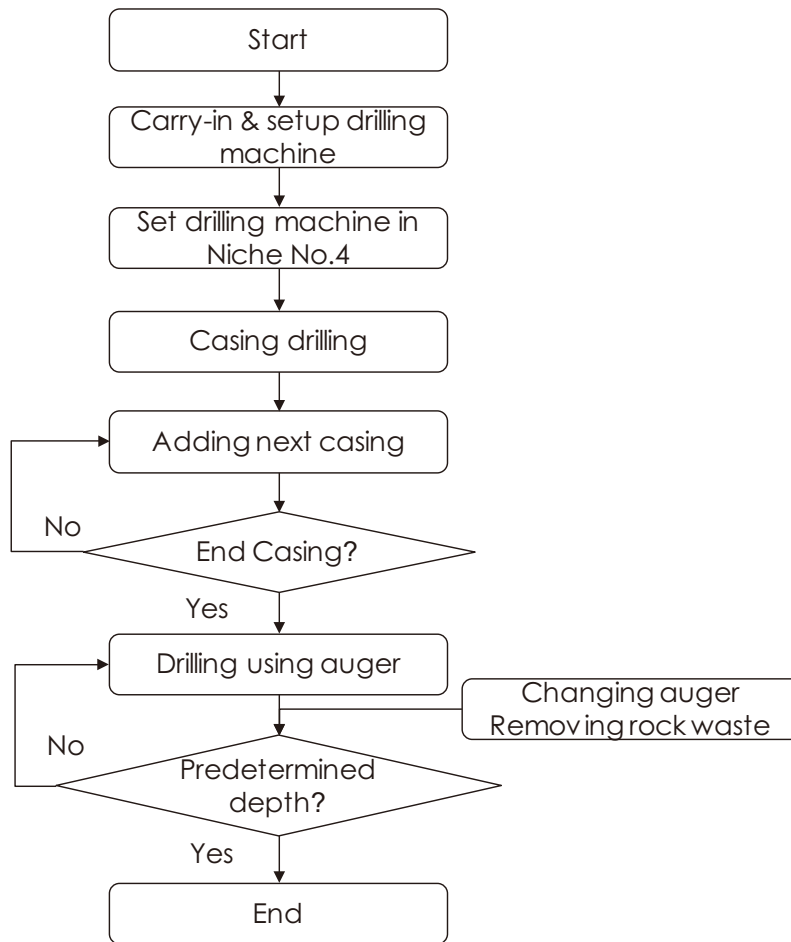


Fig. 13 Flow of drilling test pit using a casing drilling machine for large diameter



Photo 7 Drilling machine for large diameter

4.2.2 大口径掘削機の諸元

開発した大口径掘削機の諸元を Fig. 14、Table 1 および Table 2 に示す。

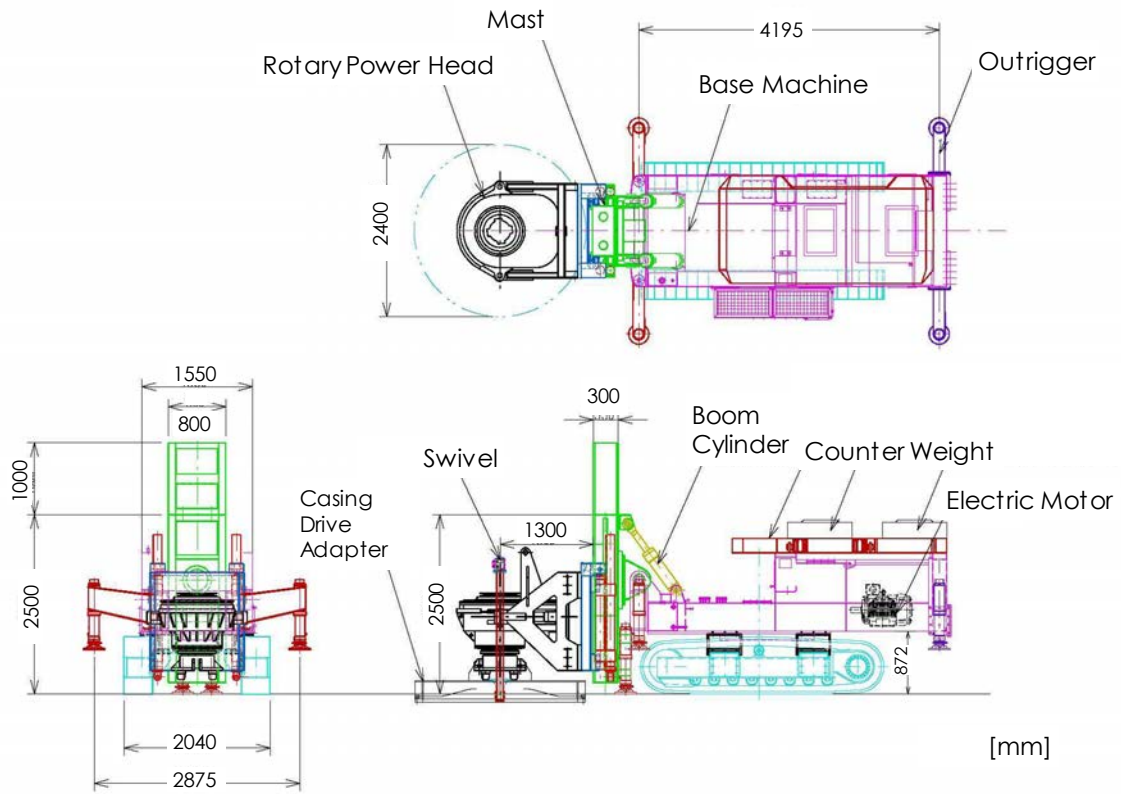


Fig. 14 Dimensional data of drilling machine for large diameter³⁾

Table 1 Specifications of the drilling machine

| Equipments | | Model/Ability | Electrical voltage (V) | Electrical power (kW) | Numerical quantity | Unit weight (t) | Subtotal weight (t) |
|--------------------|------------------|---|------------------------|-----------------------|--------------------|-----------------|---------------------|
| Drilling machine | Drilling machine | Torque (Max) 14.0 t·m | - | - | - | - | 32.0 |
| | Power unit | 75 kW(400 V), Rotary percussion drill, Core unit (explosion protection) | 400 | 90 | 2 | 2.0 | 4.0 |
| High pressure pump | | SG-30V II, 4.9MPa, 230L/min | 200 | 22 | 2 | 1.6 | 3.2 |
| Mud screen | | TM-10, Capacity 1000 L/min, 44.1 MPa, 144 L/min | 200 | 1.5 | 1 | 0.40 | 0.40 |
| Sand pump | | TURUMI pump NKZ3-100H, Bore 100 mm, 1.0 m ³ /min | 200 | 11 | 1 | 0.19 | 0.19 |
| Submerged pump | | Bore 50 mm, 250 L/min (Water tank ↔ boring tank) | 200 | 1.5 | 2 | 0.10 | 0.20 |
| Water tank | | 1.5 m ³ | - | - | 2 | 0.20 | 0.40 |
| Tools and supplies | | Tool box, etc. | - | - | 1 | 0.20 | 0.20 |
| Total weight (t) | | | | | | | 40.59 |

Table 2 Attachment member of the drilling machine

| Attachment | Value of standard | Numerical quantity | Unit weight (kg) |
|----------------------|---------------------------|--------------------|------------------|
| Casing drive adapter | 2400 mm | 1 | 600 |
| 1st casing | φ2400 mm, L=1.4 m | 1 | 1600 |
| 2nd casing | φ2380 mm, L=1.3 m | 1 | 1220 |
| 3rd & End casing | φ2380 mm, L=1.3 m, halved | 4 | 1050 |
| Auger (small) | φ650 mm, H=1.0 m | 1 | 800 |
| Auger (medium) | φ1060 mm, H=1.0 m | 1 | 1000 |
| Auger (large) | φ2200 mm, H=1.0 m | 1 | 2000 |
| Stemrod | SP6-120, L=1.0 m | 5 | 100 |
| Swivel | Double tube | 1 | 50 |

4.3 試験孔の掘削

大口径掘削機による試験孔の掘削工程実績の概略を Table 3 に示す。大口径掘削機の搬入設置および掘削までは、昼夜 2 交代で作業を行い、掘削終了後は昼勤のみで片付け、資機材搬出を実施した。以下に具体的な作業の実施状況について述べる。

Table 3 Time schedule of test pit drilling

| | Shift | Mon | Tue | Wed | Thu | Fri | Sat | Sun |
|----------|-------|------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-------------------|
| 1st week | Day | Preparation drilling (Start) | Preparation drilling | Preparation drilling | Preparation drilling | Preparation drilling | Preparation drilling | - |
| | Night | Preparation drilling | Preparation drilling | Preparation drilling | - | Preparation drilling | Preparation drilling | - |
| 2nd week | Day | Preparation drilling | Drilling (Casing) | Drilling (Casing) | Drilling (Auger) | Drilling (Auger) | Drilling (Auger) | - |
| | Night | Drilling (Casing) | Drilling (Casing) | Drilling (Casing) | Drilling (Auger) | Drilling (Auger) | Drilling (Auger) | - |
| 3rd week | Day | Clean up Niche No.4 | Clean up Niche No.4 | Remove equipments | - | Remove equipments | Remove equipments | Remove equipments |
| | Night | - | - | - | - | - | - | - |
| 4th week | Day | Remove equipments (End) | | | | | | |
| | Night | | | | | | | |

4.3.1 大口径掘削機の搬入

大口径掘削機は、分割して東立坑から搬入し、ベースマシン部分は東立坑坑底（当時は深度 350 m）にて組み立て、自走にて試験坑道 4 に移動した。その他の部分については試験坑道 4 にて組立を行った。試験坑道 4 への設置状況を Photo 8 および Photo 9 に示す。



Photo 8 Setup drilling machine at Niche No.4 (front view)



Photo 9 Setup drilling machine at Niche No.4 (rear view)

4.3.2 試験孔の掘削

ケーシング掘削状況およびオーガー掘削状況を Photo 10 および Photo 11 に、掘削土（ズリ）搬出状況を Photo 12 に示す。掘削手順を以下に示す。

- ① ケーシングで所定の深度まで掘削（順次ケーシング継ぎ足し）
- ② オーガー小（ $\phi 650$ mm）にてロッド 1 本分（約 1 m）まで掘削、掘削土（ズリ）搬出
- ③ オーガー中（ $\phi 1060$ mm）に交換して掘削、掘削に伴いケーシング内部の岩盤が崩れた部分を随時掘削土（ズリ）として搬出
- ④ 以降、ロッドを継ぎ足しながら所定の深度までオーガー中（ $\phi 1060$ mm）を用いて掘削・掘削土（ズリ）搬出を繰り返す

掘削期間は Table 3 に示したように昼夜 2 交代で約 5.5 日であった。掘削速度は、事前の地上での試験結果（ケーシング掘削：200 min/m、オーガー小：90 min/m、オーガー中 110 min/m）と同程度であった。

掘削終了後は、孔壁の崩落などを防止するため、緩衝材設置などの孔内作業実施までの期間ケーシングを残置した。掘削終了後の試験孔の状況を Photo 13 に示す。



Photo 10 Drilling test pit by casing



Photo 11 Drilling test pit by auger

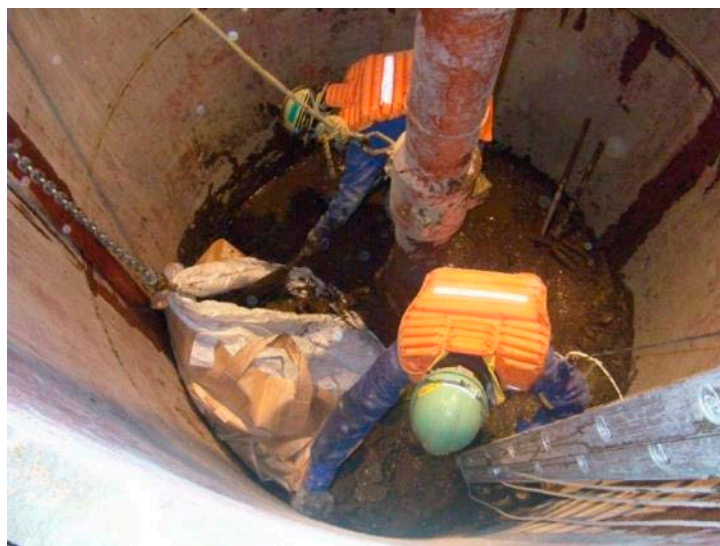


Photo 12 Taking out excavated rock from test pit



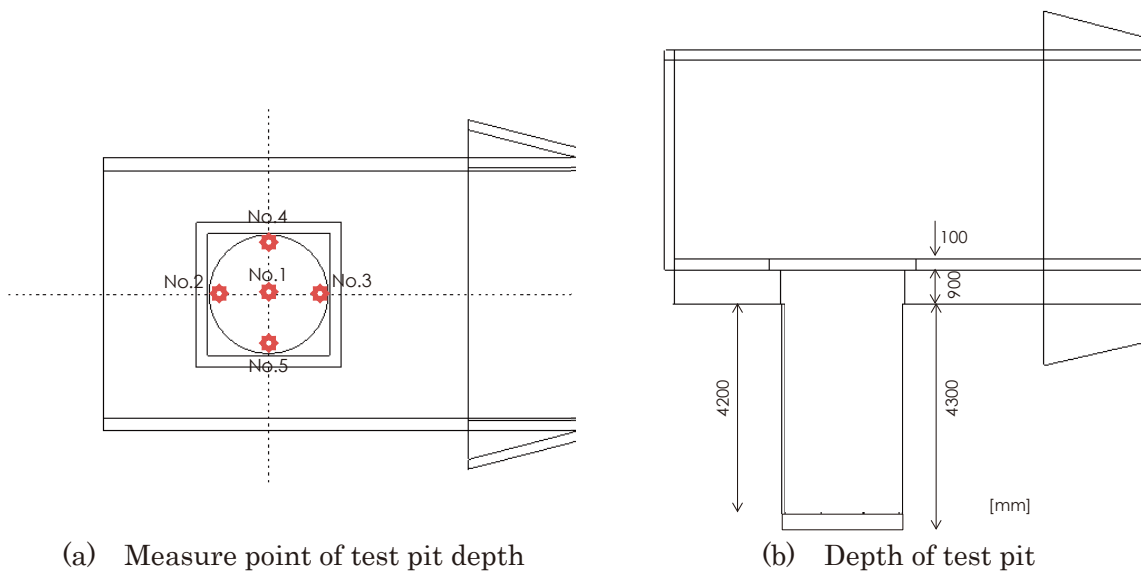
Photo 13 Completion of test pit excavation

4.3.3 試験孔の出来形確認

(1) 測量による確認

掘削した試験孔の出来形確認として、削孔深度および削孔径を測定した。深度および削孔径の測定位置を Fig. 15 および Fig. 16 に示す。

設計値は、削孔深度が試験坑道 4 の路盤コンクリートから 5300 mm 以上（緩衝材ブロック設置必要深度 4200 mm、路盤コンクリートから削孔前岩盤まで 1000 mm、底盤のケイ砂敷き均し厚さ 100 mm）とし、削孔径が 1st ケーシングの下端外径 2400 mm、エンドケーシング上端外径 2380 mm と設定した。



(a) Measure point of test pit depth

(b) Depth of test pit

Fig. 15 Measurement of test pit depth

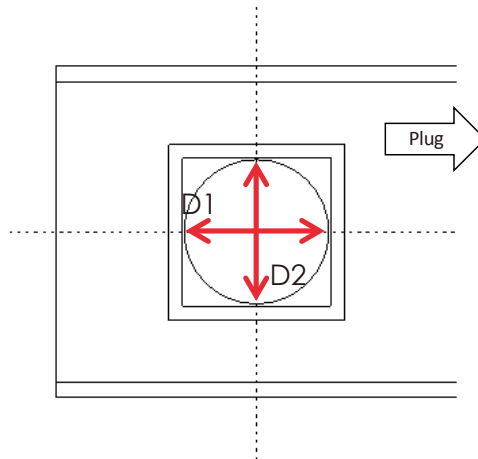


Fig. 16 Measure line of diameter of test pit

測定結果を Table 4 および Table 5 に示す。試験孔の深さは当初設定通り 5300 mm 以上を確保することができた。また、削孔径については、エンドケーシングの上端外径を測定し、設計値通りであることを確認するとともに、試験孔内でのケーシングの破損・変形がないことから削孔径が確保されていることを確認した。測定状況を Photo 14 に示す。なお、出来形確認に要した時間は、準備約 30 分、測量約 120 分、片付け約 30 分であった。

Table 4 Results of test pit depth

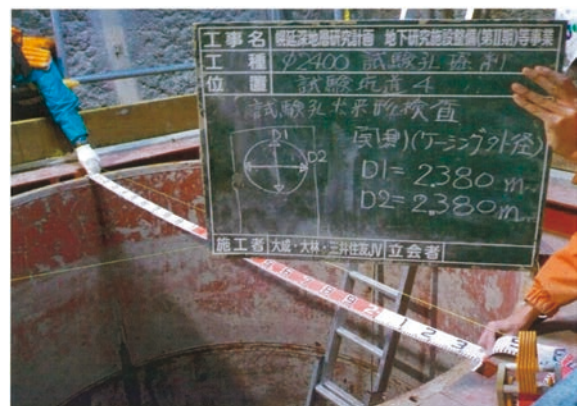
| No. | Measured value (m) | Difference (m) | Design value (m) |
|------|--------------------|----------------|------------------|
| No.1 | 5.398 | 0.098 | 5.300 |
| No.2 | 5.373 | 0.073 | |
| No.3 | 5.385 | 0.085 | |
| No.4 | 5.381 | 0.081 | |
| No.5 | 5.389 | 0.089 | |
| Ave. | 5.385 | — | — |

Table 5 Results of test pit diameter (diameter of End casing)

| Measure line | Results of measurement (mm) | Design value (mm) | Difference (mm) |
|--------------|-----------------------------|-------------------|-----------------|
| D1 | 2380 | 2380 | 0.0 |
| D2 | 2380 | 2380 | 0.0 |



(a) Depth



(b) Diameter

Photo 14 Measurement of the test pit depth and diameter

(2) 3D レーザースキャナによる坑道形状の確認

掘削した試験孔の形状および孔壁の状態を確認するため、3D レーザースキャナによる測定を実施した。作業の安全性確保の観点から、ケーシングを一段分（約 1.3 m）引き上げて孔壁を露出させ測定を行った後に緩衝材を設置する、という手順を繰り返して孔壁全体の測定を行った（Fig. 17）。

なお、ケーシングの引き上げは、大口径掘削機を用いて実施可能であることを地上試験で確認しているが³⁾、本試験においては、坑道内での作業エリアを十分に確保できないため、ケーシング周囲にジャッキアップ用の鋼製枠（Photo 15）を取り付け、ジャッキアップによりケーシングの引き上げを行った。

3D レーザースキャナによる測定に際しては、周回坑道にある基準点から測定ごとに基準点測量を実施し、東西の絶対座標値を算出し、試験孔内のデータを連結した。測定状況を Photo 16 に示す。

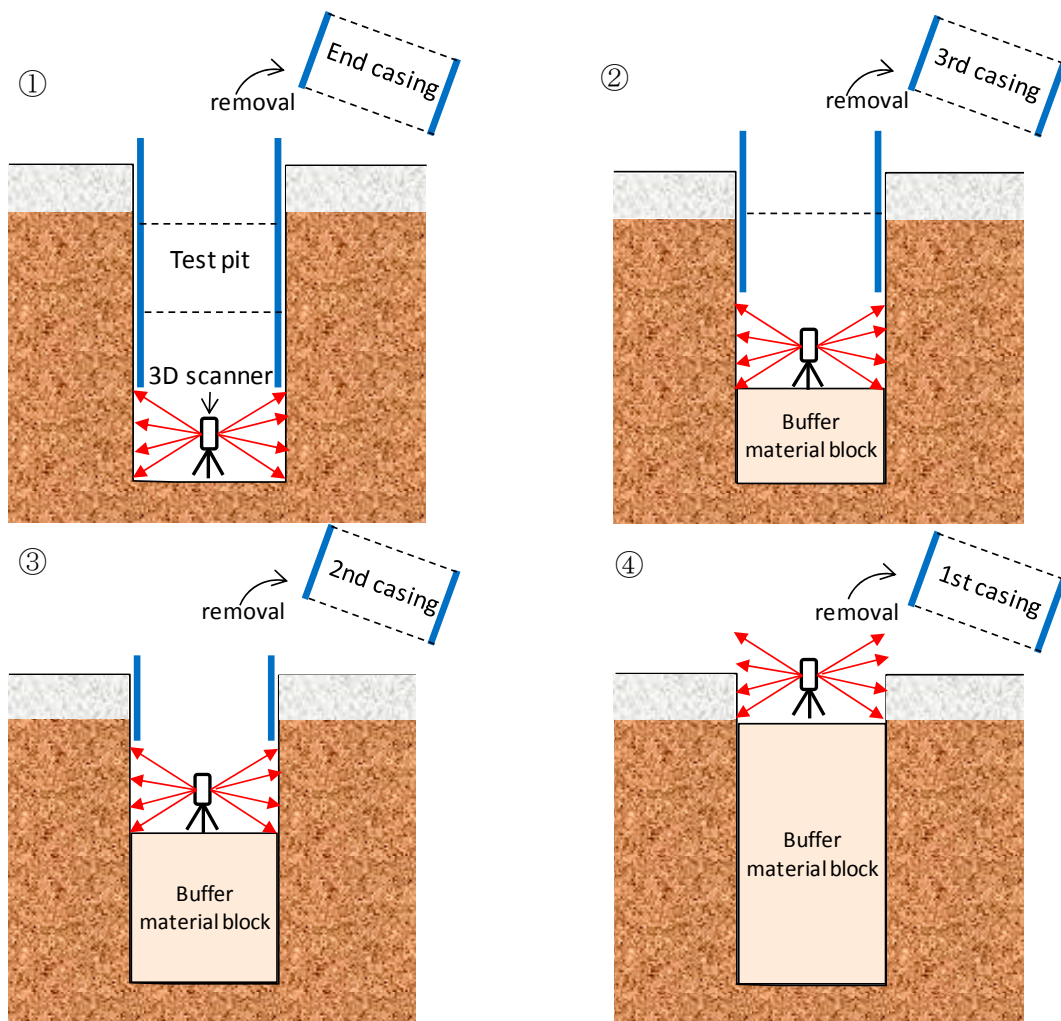


Fig. 17 Measurement step by 3D scanner



Photo 15 Steel frame for casing jack-up



(a) Measurement at bottom of the pit



(b) Measurement at top of the pit



(c) Measurement system of 3D scanner

Photo 16 Measurement surface figure of test pit using 3D scanner

測定結果を Fig. 18 に示す。測定結果は点群として表され、なお、各点の色はレーザーの反射強度を反映しており、暖色系の色は反射強度が大きく、寒色系の色は反射強度が低いことを示し、試験孔中心からの距離を反映したものではないことに注意が必要である。点群の座標データは付録に掲載した。試験孔の水平断面を深度ごとに区分けし、各区分内の全点をプロットしたものを Fig. 19 に、試験孔の深さ方向に対する半径の分布を Fig. 20 に示す。Fig. 20 においては、北東～

南東方向の径を“East”、北西～南西方向を“West”、北西～北東方向を“North”および南東～南西部分を“South”としてプロットしている。

Fig. 19 および Fig. 20 から、坑道底盤付近では試験孔の径にばらつきが見られるが、深度が増すにつれてばらつきが小さくなる傾向が見られる。また、東西方向に比べて南北方向の径のばらつきが大きくなっており、幌延 URL 近傍の地層における最大主応力方向が概ね東西方向であることと整合的である。試験坑道底盤の箱抜き部分を除いた、深度 351 m 以深の半径の平均値は 1.215 m であった。以上の結果から、試験孔は孔壁の大きな崩壊などは無く、適切に施工されたことを確認した。

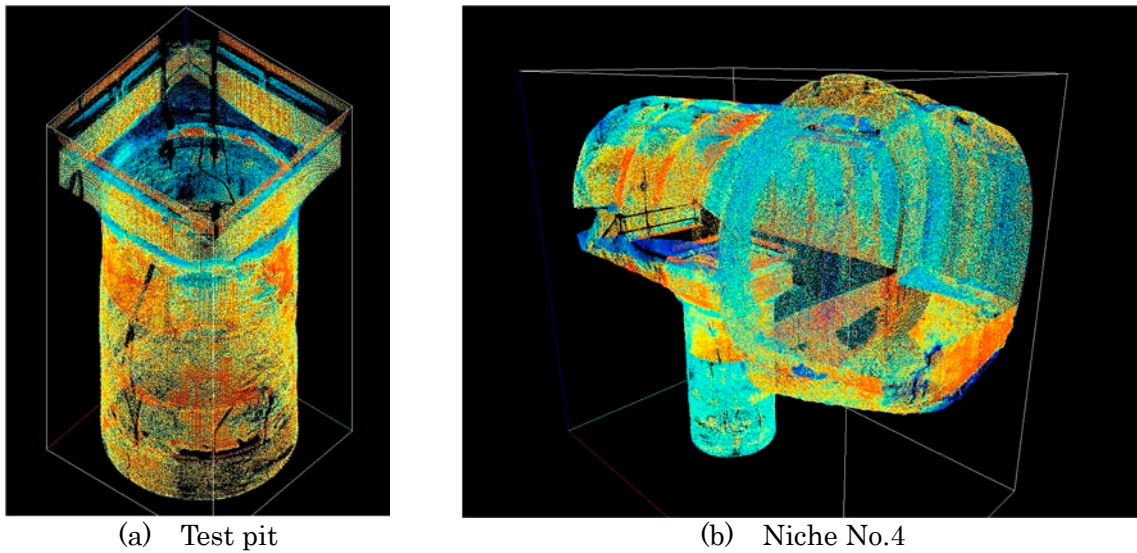
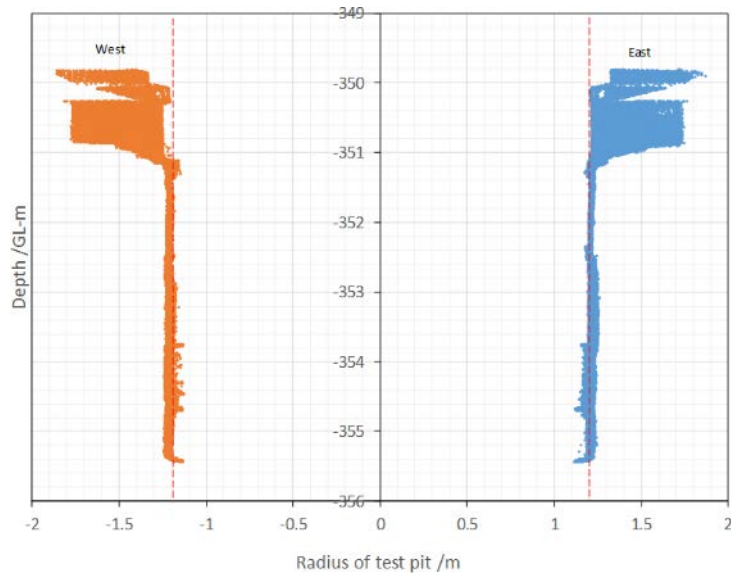
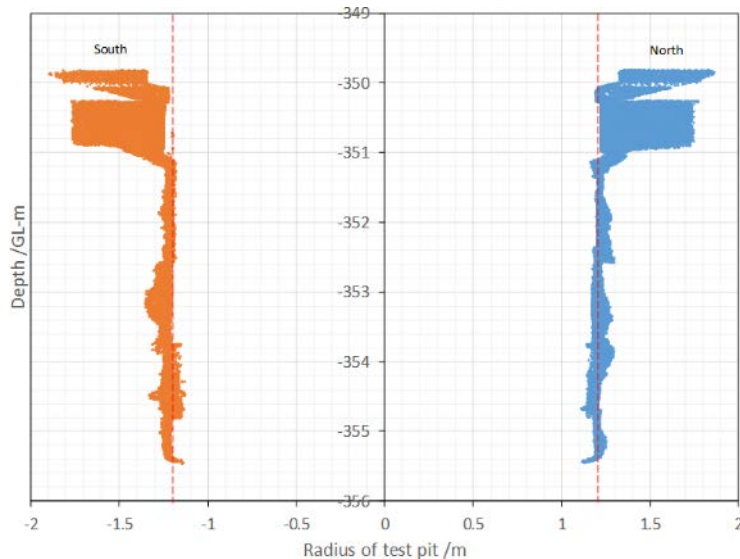


Fig. 18 Results of 3D scan (overhead view)



(a) East-West



(b) North-South

Fig. 20 Radius vs depth of test pit

4.4 試験孔の整備

人工バリア性能確認試験では、埋め戻し後の再冠水過程を再現するため、試験孔底から地下水を注水することとした。注水する地下水は、8.2にて後述するように350m調査坑道に採水用のボーリング孔を掘削して得られる湧水を使用することとした。一方、試験孔掘削後、試験孔全体でおよそ80 mL/minの湧水が見られたので、緩衝材の設置作業中の膨潤・変形などを防ぐために、孔底に排水層（厚さ50 mm）を設けた。排水層は不織布およびケイ砂（いわきケイ砂3号）にて敷き均し、有孔処理した排水管を敷設し、試験孔外に設置したポンプで常時排水することとした。不織布の設置状況をPhoto 17に、ケイ砂（いわきケイ砂3号）の敷き均し状況をPhoto 18に示す。排水層は遮水シートによって注水管や緩衝材ブロックから隔離し、注水開始後に排水管が水みちとならないように配慮した。また、排水層（遮水シート）の上部にはケイ砂（いわきケイ砂4号、厚さ100 mm）を敷き均し、注水管を設置した。排水層および注水管の配置の概念図をFig. 21に示す。



Photo 17 Setting unwoven cloth

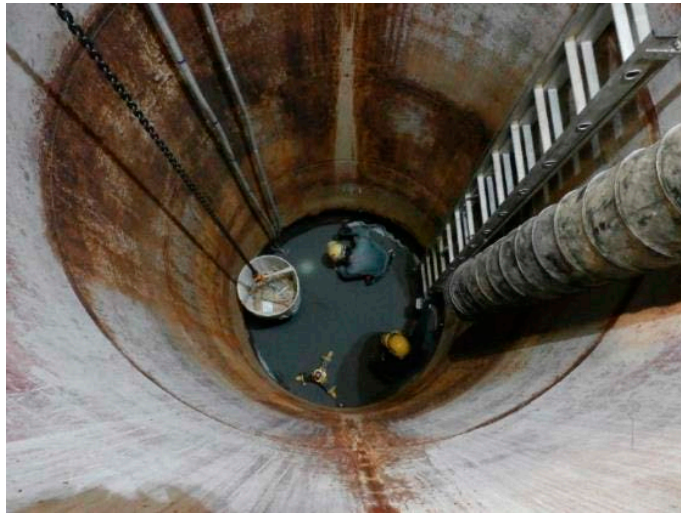


Photo 18 Leveling by silica sand

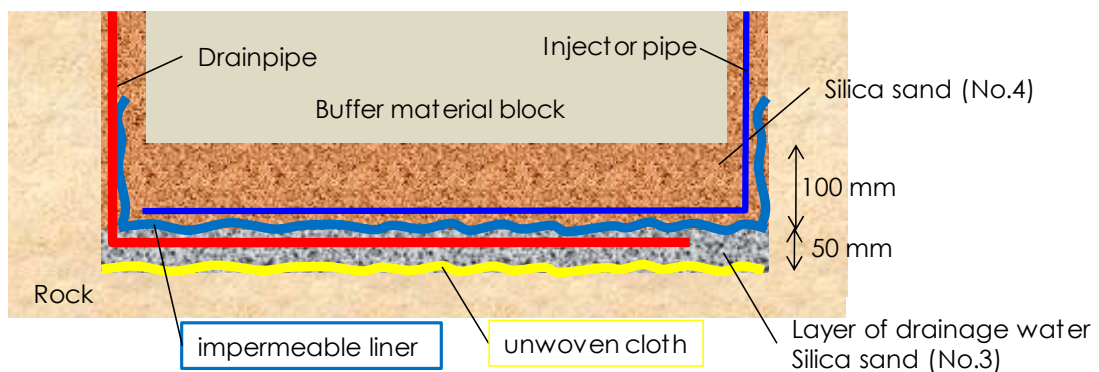


Fig. 21 Conceptual diagram of drainage water layer

試験孔内に均等に地下水を行き渡らせるために、試験孔底および緩衝材ブロックと岩盤の隙間にケイ砂（いわきケイ砂 4 号）の層を設け、試験孔底から地下水を供給することとした。試験孔底部分の注水管は有孔処理を施し、不織布を巻いて異物の混入を防ぐ構造とした⁶⁾。注水管の設置状況を Photo 19 に示す。また、いわきケイ砂 3 号および 4 号の篩い分け試験結果を Table 6 および Table 7 に示す。

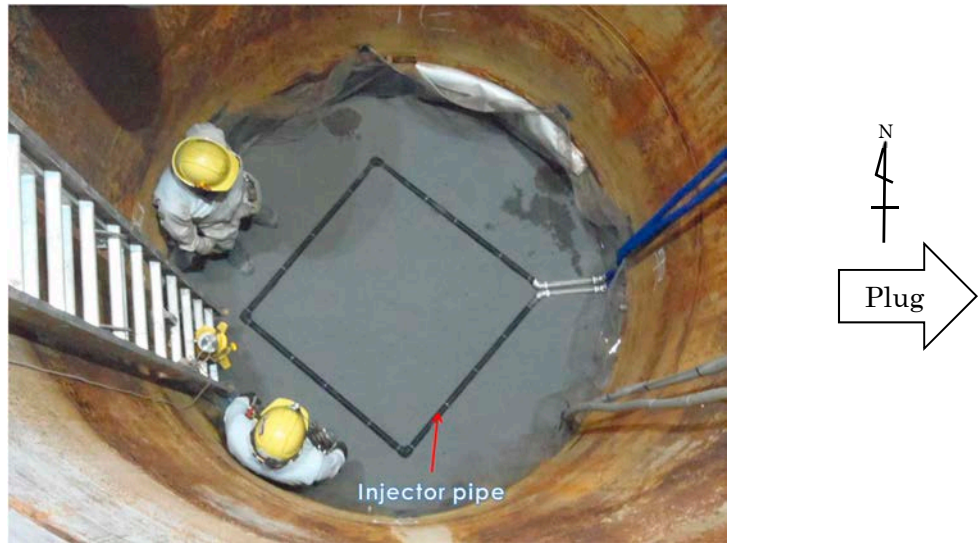


Photo 19 Layout of groundwater injection into test pit⁶⁾

Table 6 Result of sieving test (Iwaki silica sand No.3)

| Mesh (mm) | 2.360 | 1.700 | 1.400 | 1.180 | 1.000 | 0.850 | 0.710 | 0.500 | <0.500 | Total |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
| Weight percent (wt%) | 0.0 | 0.6 | 9.9 | 36.8 | 27.6 | 12.3 | 6.3 | 4.7 | 1.8 | 100.0 |

Table 7 Result of sieving test (Iwaki silica sand No.4)

| Mesh (mm) | 1.400 | 1.180 | 1.000 | 0.850 | 0.600 | 0.425 | 0.300 | 0.212 | 0.150 | 0.106 | <0.106 | Total |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
| Weight percent (wt%) | 0.0 | 3.4 | 11.2 | 18.8 | 33.9 | 21.3 | 10.1 | 1.2 | 0.1 | 0.0 | - | 100.0 |

5. 緩衝材および模擬オーバーパック

5.1 仕様

緩衝材および模擬 OP の仕様は、第 2 次取りまとめ²⁾および幌延の地下環境条件における検討結果⁷⁾を基に設定した。

5.1.1 緩衝材

緩衝材はブロック定置方式とした。ブロック定置方式の場合、第 2 次取りまとめでは緩衝材と岩盤の間に、定置時に必要となる空間を設定している。本試験では、緩衝材が膨潤してこの空間を閉塞した場合に乾燥密度が 1.60 Mg/m^3 となるように、製作時の乾燥密度を 1.80 Mg/m^3 と設定した。緩衝材はベントナイト (クニゲル V1) にケイ砂を混合した材料とし、ケイ砂混合率 30 wt% を標準とした。ケイ砂については、3 号と 5 号を 1:1 で混合したものを使用した³⁾。Table 8 に緩衝材ブロックの仕様を示す。なお、本試験では緩衝材と岩盤の間の空間はケイ砂を充填した。

Table 8 Specifications of buffer material block³⁾

| | Specifications | Remarks |
|---------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Materials | Bentonite (Kunigel V1) | Kunimine Industries Co.,Ltd. |
| | Silica sand | Nittoren Genryo K.K. |
| Mixing rate | Kunigel V1 70wt% Silica sand 30wt% | Silica sand (No.3:No.5=1:1) |
| Mixing water | tap water | |
| Water content | 10.5 % | |
| Dry density | 1.80 Mg/m^3 | after swelling: 1.60 Mg/m^3 |

緩衝材ブロックの分割数については、公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター（以下、原環センター）が製作した緩衝材の搬送定置装置^{8),9)}による真空把持による定置を想定し、1 段あたり 8 分割（扇形ブロック 8 個）または 9 分割（扇形ブロック 8 個、円柱形ブロック 1 個）とした。Fig. 22 に 9 分割の場合のブロック配置を示す。

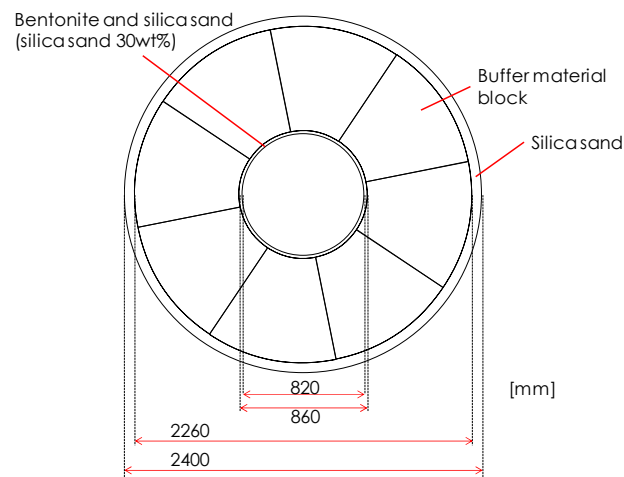


Fig. 22 Schematic plane view of buffer material

5.1.2 模擬オーバーパック

模擬 OP は第 2 次取りまとめ²⁾で候補材料として示されている炭素鋼を基本とし、圧力容器用炭素鋼鍛工品である SFVC1 を使用した。試験に使用する模擬 OP の要求性能として、①実際の（ガラス固化体を封入した）OP と重量および大きさが同等であること、②表面温度が制御できる

こと、③試験終了後には取り出して表面の腐食状態（面積、深さなど）が評価できること、および④試験場所である深度 350m で想定される最大圧力（緩衝材の膨潤圧および静水圧）に耐える力学的構造を持つこと、などが挙げられる。これらの要件および幌延 URL における揚重設備などを考慮し、模擬 OP の構造を決定した。模擬 OP 本体は筒状とし、上下の蓋はボルトにより固定する構造とした。実際の OP の重量（5.7 t）および温度を再現するために、内部に錘をいれ、空洞部分には熱媒体としてのオイルを充填し、ヒーターにより模擬 OP 内部から加熱する構造とした。ヒーターは発熱部をガラス固化体と同等の長さ（1350 mm）とし、試験中に速やかに設定温度に到達させるため、発熱量を最大で 13kW とした。模擬 OP には内部に充填するオイルを攪拌する機能は付与していないので、熱対流により内部の温度を均一にすることを指向し、発熱部を 2 箇所にて設け、独立に出力を制御できるようにした。模擬 OP およびヒーターの構造を Fig. 23 および Fig. 24 に示す³⁾。

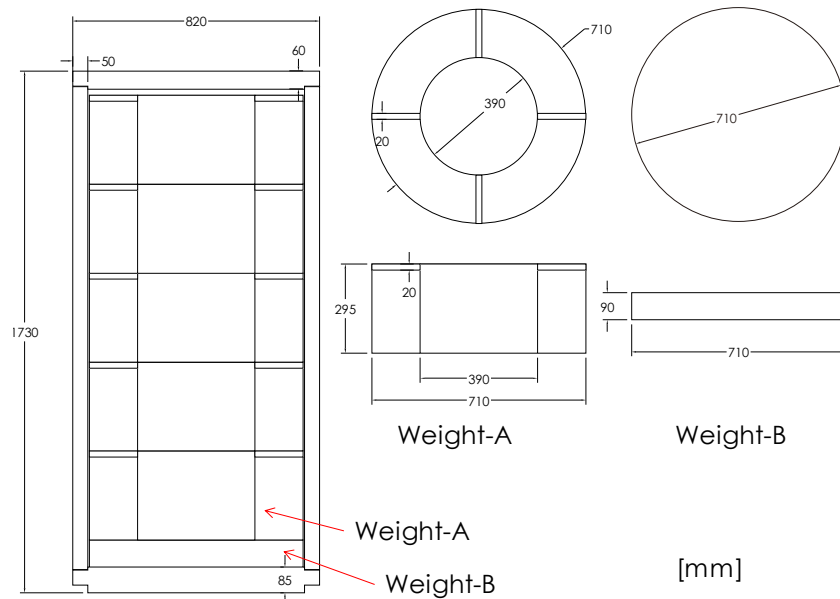


Fig. 23 Structure of simulated overpack

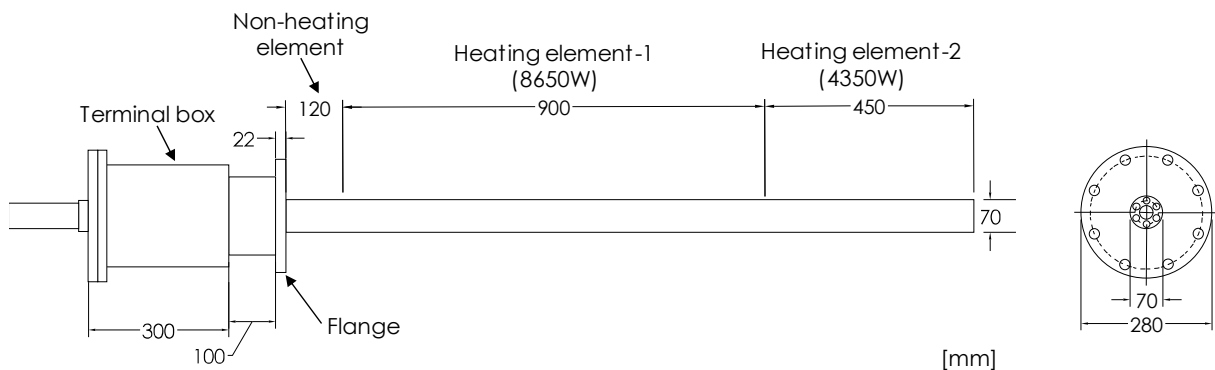


Fig. 24 Structure of heater in simulated overpack

組立後の模擬 OP の概念図を Fig. 25 に示す。本試験では上下の蓋はボルトでの固定としたため、実際の OP（一体型または溶接）とは腐食の形態が異なることが懸念された。そのため、蓋部分は腐食評価の対象外とし、本体部分から絶縁するために、蓋（Fig. 25 の茶色部分）には絶縁塗料を塗布した。また、本体の腐食量評価の基準面を設けるため、本体の一部（幅約 15 cm、Fig. 25 の黒色部分）には絶縁塗料を塗布し、腐食が進行しないように処置した。使用した絶縁塗料を Table 9 に示す。塗布状況を Photo 20 および Photo 21 に示す。

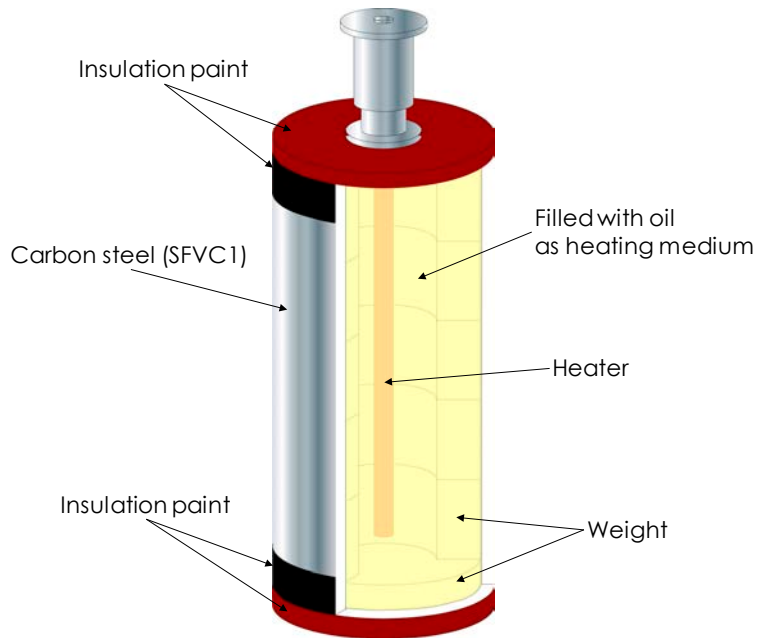
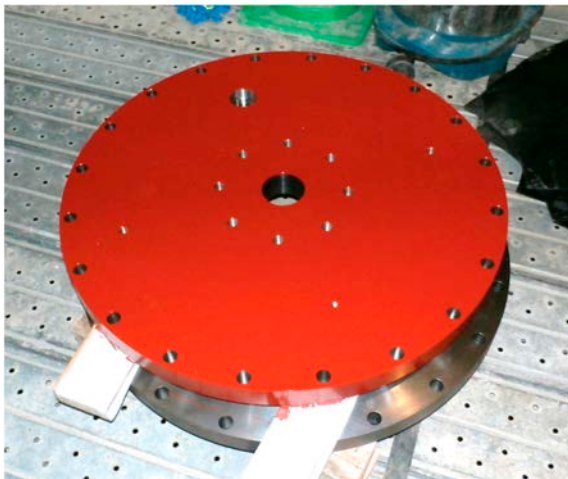


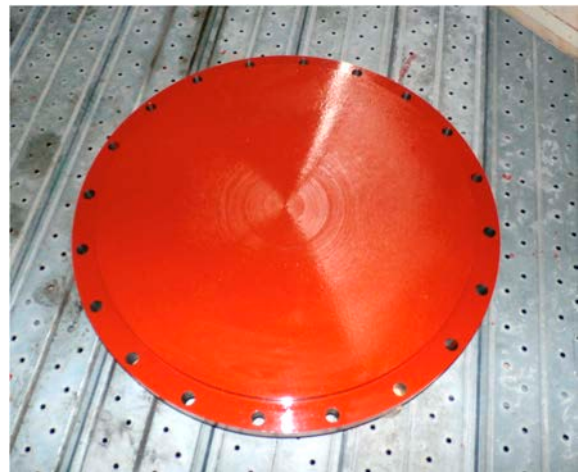
Fig. 25 Image of simulated overpack

Table 9 Insulation paint using for simulated OP

| Part of simulated OP | Insulation paint | Remarks |
|----------------------|------------------|---|
| Cover | NITTORU 120R | Nitto Shinko Brown part of Fig. 25 |
| Body | Duralco 4525 IP | TAIYO WIRE CLOTH Black part of Fig. 25 |



(a) Upper cover



(b) Bottom cover

Photo 20 Insulation paint for covers of simulated OP (using NITTORU 120R)



Photo 21 Insulation paint for body of simulated OP (using Duralco 4525 IP)

5.2 計測計画（試験孔）

5.2.1 緩衝材

(1) 当初計画および外部レビュー

地下水の浸潤による緩衝材の挙動を把握するために、計測センサーは試験孔底部のケイ砂層に 1 断面、緩衝材の 5 断面（1,3,5,6,9 段目）に配置することとした（Fig. 26）。水平断面内および垂直断面内において計測結果の分布が分かる計測センサーの配置計画とした⁴⁾。以下、設置断面を「Section-（緩衝材ブロック段数）」と表記する。すなわち、Section-5 は緩衝材ブロック 5 段目の上面、Section-0 は、試験孔底のケイ砂層を表す。

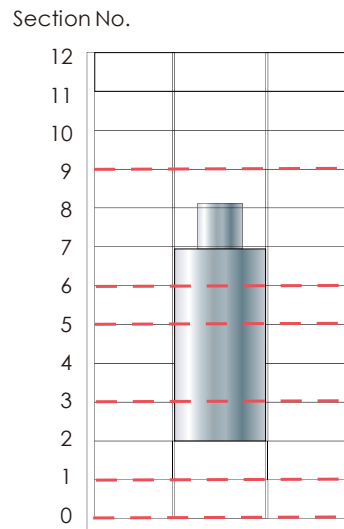


Fig. 26 Measurement section

計測センサーの配置は、中心に模擬 OP の無い断面 (Section-0,1,9) には、土圧計、間隙水圧計、変位計を設置し、模擬 OP のある断面 (Section-3,5,6) には、それらに加えて、pH 計、炭素鋼電極、白金または金電極、サイクロメータおよび湿度計を配置し、化学的特性 (特に模擬 OP の腐食) に関するデータを取得する計画とした。当初計画の計測器配置の概念図を Fig. 27 に示す。

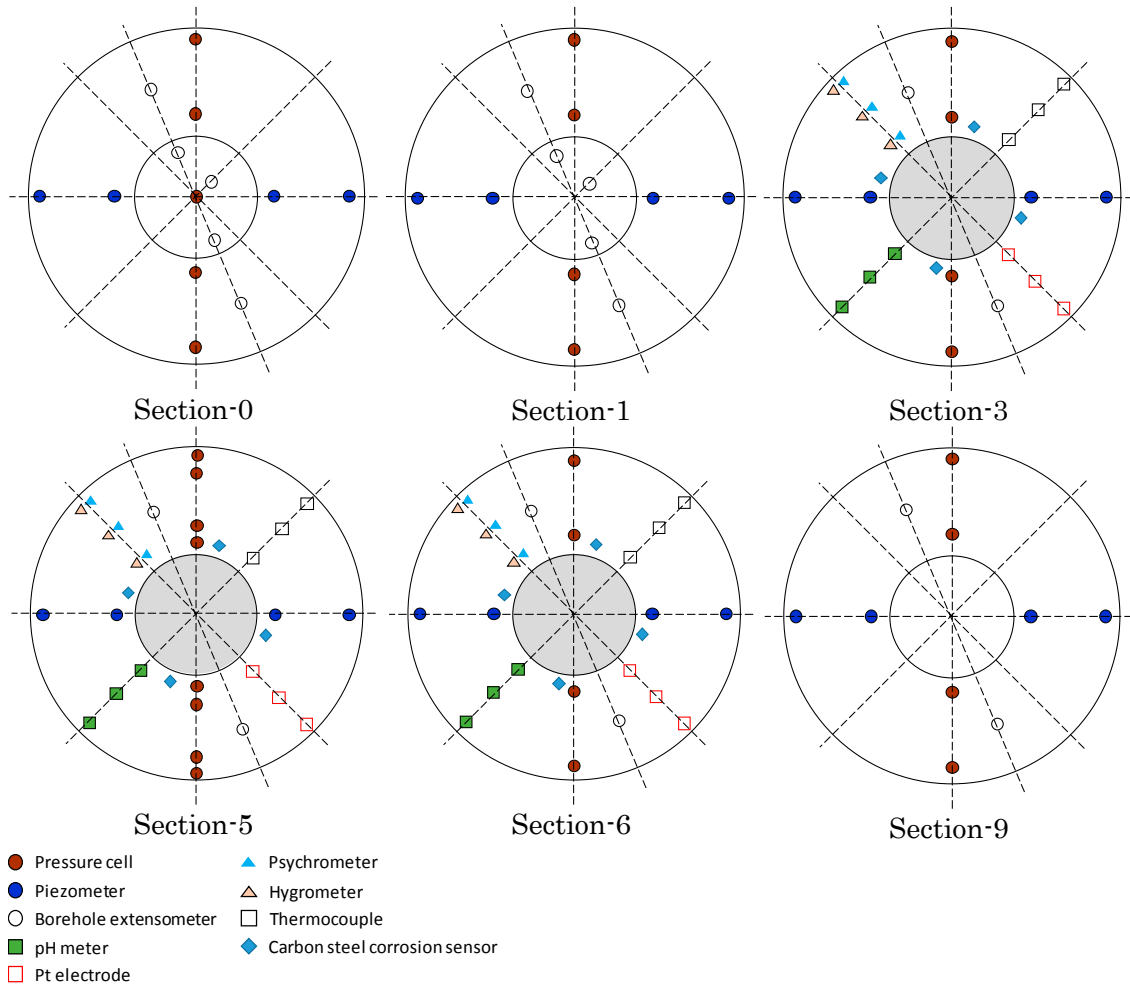


Fig. 27 Original plan

当初計画では、センサー数が多く、各センサーからのケーブルが地下水の浸潤の経路となることなどから計測値への影響が懸念されたため、センサーの形状、大きさやケーブル類の取り回しなどを考慮しつつ、センサーの配置や数量について計画の合理化を検討した。その結果、試験孔には底部から注水を行うこと、岩盤と緩衝材の隙間のケイ砂層を通じて緩衝材の周囲から均等に地下水が浸透していくと想定されることから、各断面において対称に計測センサーを配置する必要はないと考え、試験孔の片側 (例えば左側半分) にまとめて配置して、計測センサー数を約半数とする案を作成した。この案では、ケーブル類を試験孔の片側にまとめることができるため、試験終了後の解体調査において、ケーブル類の影響の有無を比較することができるという利点もある。

上記の 2 案 (当初計画およびセンサー数半減案) について、Äspö Hard Rock Laboratory における実規模での試験経験を有するスウェーデンの SKB (Swedish Nuclear Fuel and Wastes Management Co.) による外部レビューを受けた。レビューの要点を以下に示す。

<計測センサー数について>

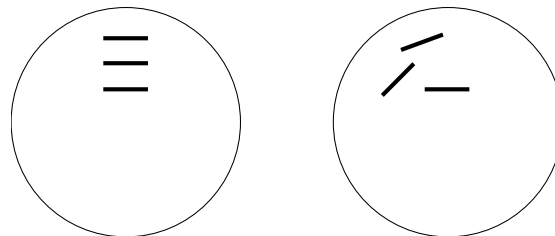
- ・ 緩衝材の半分 に計測センサーを設置せず、残り半分で計測を実施するという考え方は効率的である。飽和過程のモニタリングと同時に、解体調査においてセンサーの設置されていない

い側での分析が可能となる。また、完全飽和前に解体調査を実施する場合でも、両者を比較して飽和過程における計測センサー設置の影響を評価することができる。

- SKB の実施した、**Canister Retrieval Test** ではデータに深度依存性は認められなかったことから、計測センサーの削減の観点から、**Section-3** には計測センサーを設置しないことも可能と考えられる。緩衝材の飽和が比較的速く進むと予測されるのであれば計測センサーを削減することを推奨するが、飽和過程に時間が掛かると予測する場合は計測センサーの設置を推奨する。
- 土圧計の方向を径方向の圧力を測定できるようにすることで、高い空間分解能を得ることができると考えられる。
- 上記により、計測センサー数の削減は、場への影響が比較的小さく、信頼性も高いと考えられるため、SKB はセンサー数の削減案に賛同する。

<その他の提言>

- **Section-5** で、土圧計を径方向の圧力を測定するように配置する場合、センサー背面への地下水の回り込みを阻害し、飽和を遅延する可能性がある。そこで、土圧計を径方向に連続的に配置するのではなく、接線方向に配置することを提案する (Fig. 28)。また、径の小さい土圧計を使用することで影響を小さくすることが可能である。



(a) normal distribution (b) tangential distribution
Fig. 28 Distribution of pressure cell

- 飽和過程で緩衝材の変位により生じる計測センサーの機械的損傷が懸念される。変位により計測センサーとケーブルの接続部に大きな負荷が生じると考えられる。
- 緩衝材の周囲に設けられたケイ砂層から地下水が均一に浸潤するという過程は合理的と考えられるが、もし不均一に浸潤した場合、解体調査時に含水比などのデータがばらつく可能性があり、その要因を明らかにすることは困難である。ケイ砂層に均一に地下水が注水されていることを確認するために、計測センサーを設置した側および設置していない側の双方を対称に、間隙水圧計を試験孔底部および中間の高さに設置することを提案する。また、モデル化における境界条件設定の観点からも、ケイ砂層への間隙水圧計の設置は有用である。

上記の外部レビュー結果について、SKB とのワークショップを開催し (2014 年 4 月)、最終的な計測センサーの配置について議論を行った。議論の主な結果を以下に示す。

- 模擬 OP からの熱の影響なども考慮すると、緩衝材の飽和過程には時間を要すると考えられること、模擬 OP のある断面で重点的にモニタリングを行うため、**Section-3** の計測センサーは残す。
- 計測センサーは試験孔の片側に寄せて設置し、計測センサーを設置しない緩衝材ブロックを増やす。ただし、模擬 OP が中心にある断面 (**Section-3,5,6**) については、ケーブルの有無によって地下水の浸潤状況が異なった場合に、化学的特性 (特に模擬 OP の腐食) に与える影響が大きいことが懸念されたため、対称に計測センサーを配置する。
- 土圧計は模擬 OP 周辺の断面 (**Section-3,5**) においては径方向の圧力を測定するように配置する。設置数の多い **Section-5** では、提言の通り、接線方向に配置する。ただし、径の小さな土圧計を使用した場合は十分な反力が確保できずに計測値の信頼性が低くなることが懸念されるため、やや大きい径の土圧計を使用する。

- ・ 提言にあった通り、計測センサーの配置が多い側、少ない側の両側を対象として、緩衝材と岩盤との境界部（ケイ砂層）に間隙水圧計を設置する。これにより、緩衝材の周囲から均等に地下水が供給されているか否か、つまり試験中における水理境界条件を確認することができる。

(2) 計測センサーの配置

外部レビューおよびワークショップの議論を経て決定した計測センサーの配置に加え、原環センターとの共同研究として、地中無線モニタリング装置を用いた計測センサーを設置した。他の有線の計測センサーやケーブルの影響を排除するため、当該センサーは他のセンサーの配置されていない断面（Sectio-11）に設置することとした¹⁰⁾。なお、地中無線モニタリング装置は、経済産業省資源エネルギー庁（以下、資源エネルギー庁）の委託事業である、「地層処分技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発」¹¹⁾において開発されたものである。

また、緩衝材ブロックと埋め戻し材との境界部では、緩衝材が埋め戻し材側に膨出することが予想されるため、解体調査時に、その膨出形状を確認できるように、緩衝材と埋め戻し材の境界部分（Section-12）に埋設標識シート（弱電用、W=150 mm）を十文字に敷設した。さらに、膨出の経時変化をモニタリングするために、ひずみ計を利用した緩衝材膨出センサーを、資源エネルギー庁の委託事業である「地層処分技術調査等事業 処分システム評価確証技術開発」にて新たに開発して¹²⁾設置することとした。

緩衝材部分に設置する計測センサーの種類および数量を断面ごとに Table 10 に示す。また、Fig. 29 に変位計の計測区間を、Fig. 30 に各断面の計測センサーの配置を示した。図中の計測センサーの略称は Table 10 に示したセンサーの ID（TP####、PP####など）と対応している¹³⁾。上記の他、緩衝材への地下水の浸透状況をモニタリングするために、比抵抗トモグラフィ測定用の電極を垂直 2 断面、水平 1 断面（緩衝材 5 段目中央高さ）に設置した（Fig. 31）。電極数は、垂直断面で 190 個（95 個×2 断面）、水平断面で 72 個であり、電極間の距離はおおよそ 10 cm である。

Table 10 Sensors installed in buffer material

| Sensors | ID | Measurement | Section unit | 0 | 1 | 3 | 5 | 6 | 9 | 11 | 12 | total |
|---------------------------------|----------------------|--|-----------------------|---------------|----------------------|-----------------------------------|-----------|----|---|-----|---------|-------|
| | | | | Pressure cell | TP#### TPWL####*1 | swelling pressure, temperature | kPa °C | 3 | 2 | 2 | 4 | |
| Piezometer | PP#### PPWL####*1 | pressure head, temperature | kPa °C | 4 | 2 | 2 | 4 | 2 | 2 | 2*1 | | 18 |
| Borehole extensometer | DS#### | displacement, temperature | mm °C | | | | | | | | | 6 |
| Optical pH meter | PH#### | pH | - | | | 3 | 3 | 3 | | | | 9 |
| Thermocouple | TE#### | temperature | °C | | | 6 | 6 | | | | | 12 |
| Pt electrode | EH#### | V vs Ag/AgCl KCl sat. | V | | | 3 | 3 | 3 | | | | 9 |
| Carbon steel corrosion sensor | CO#### | corrosion potential, carbon steel potential | Ωcm ² V | | | 4 | 4 | 4 | | | | 12 |
| Hygrometer | RH#### | relative humidity | % | | | 3 | 3 | | | | | 6 |
| Psychrometer | PS#### | water potential | MPa | | | 3 | 3 | 3 | | | | 9 |
| FDR-V*3 | FD#### (TEFD####) | volume water content (temperature) | % (°C) | | | 3 | 3 | | | | | 6 |
| Buffer material swelling sensor | CH## TEBS## | strain, temperature | - °C | | | | | | | | 14 2 | 16 |
| total | | | | 7 | 5 | 29 | 33 | 15 | 9 | 3*1 | 16 | 117 |

*1: Using wireless sensor: collaborative research with Radioactive Waste Management Funding and Research Center (RWMC).

*2: Measurement section of temperature by borehole extensometer.

*3: Frequency-Domain Reflectometry - Vector Network Analyzer

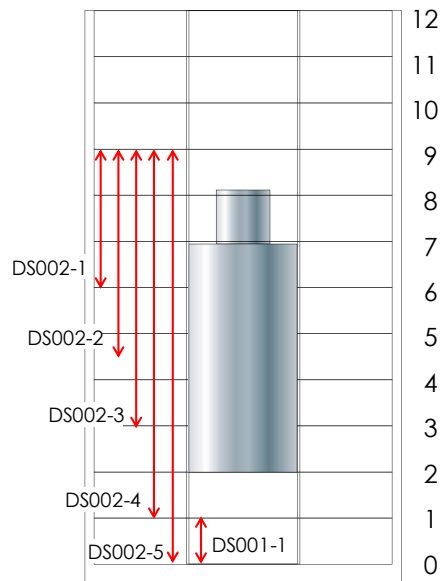


Fig. 29 Measurement section of borehole extensometer in buffer material

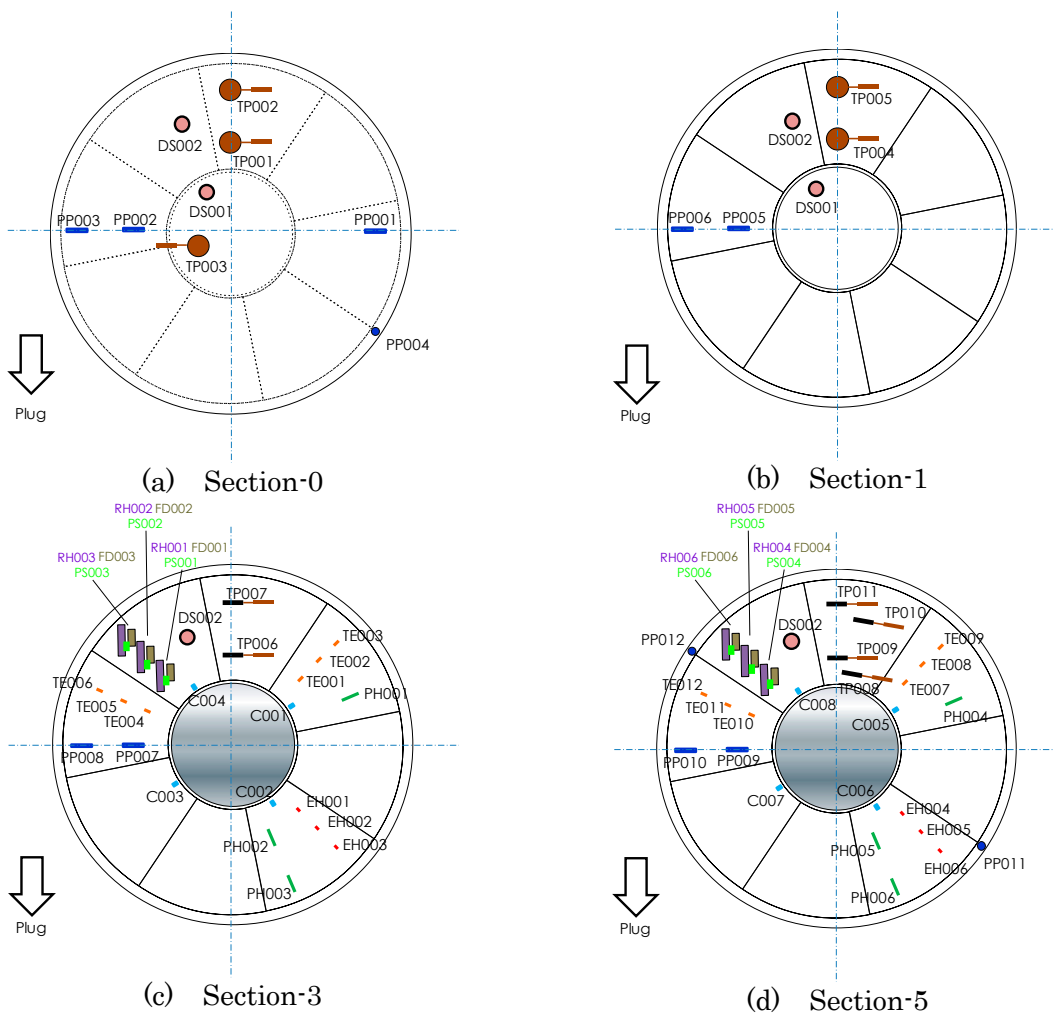


Fig. 30 Location of sensors in buffer material block (1/2)

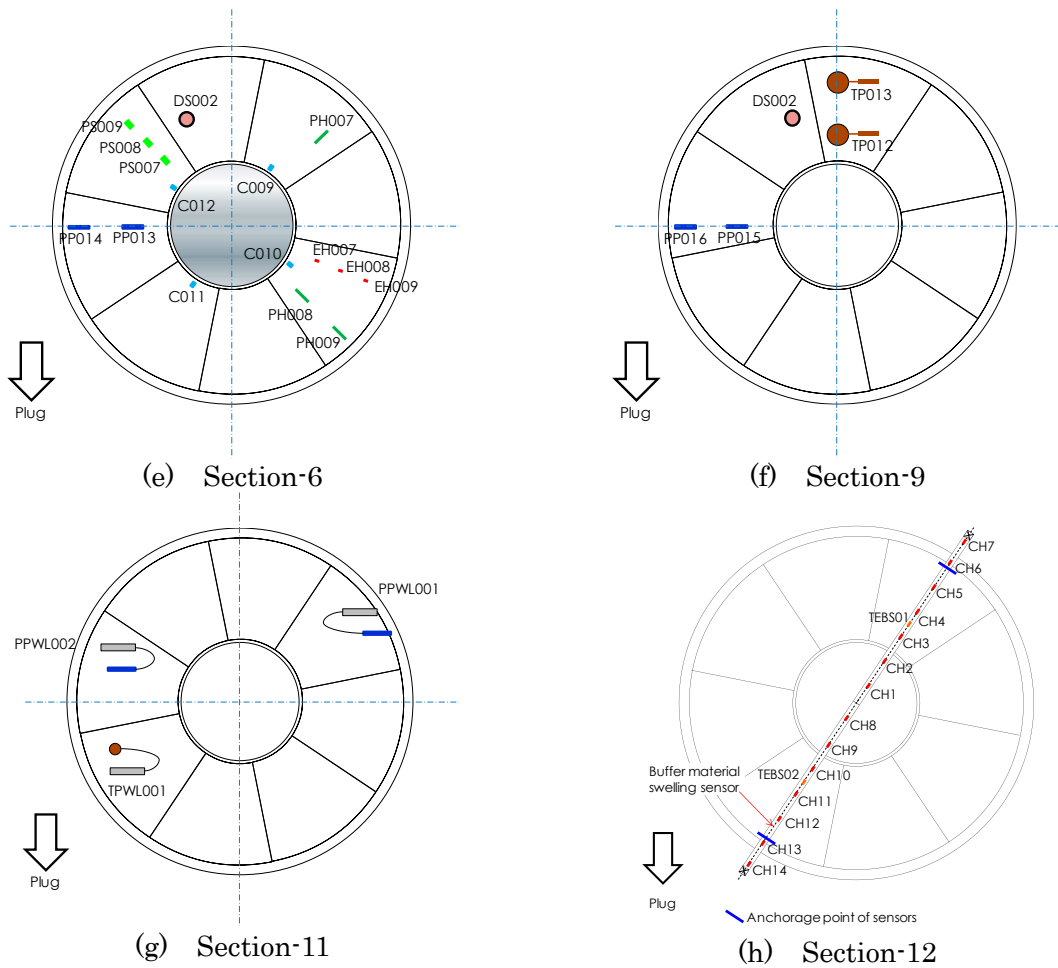


Fig. 30 Location of sensors in buffer material block (2/2)

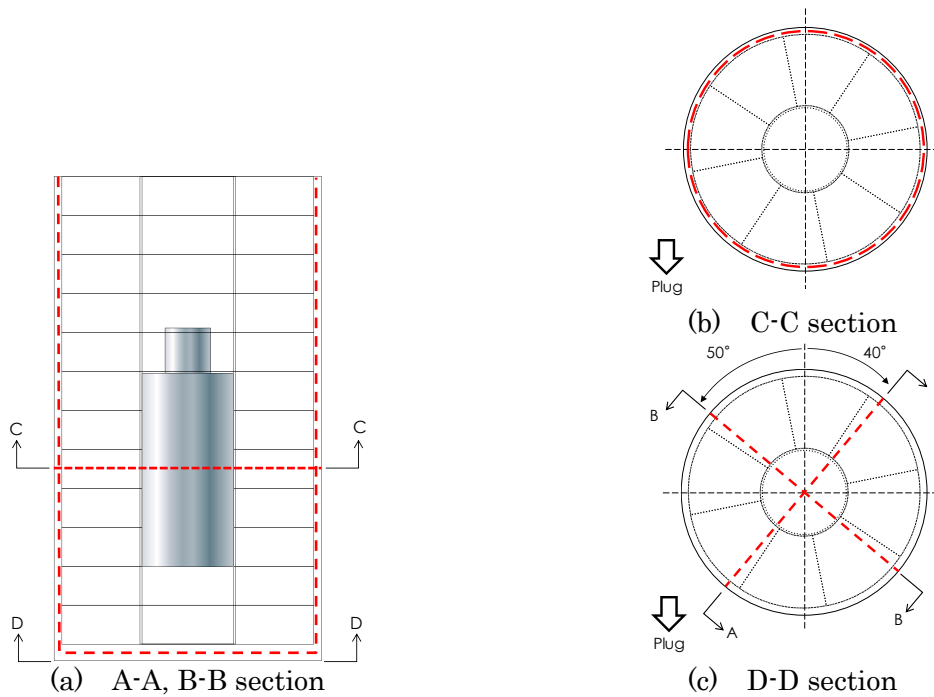


Fig. 31 Cross section of specific resistance tomography

5.2.2 模擬オーバーパック

模擬 OP には、表面の温度を把握するために熱電対を 10 個設置した¹³⁾。熱電対は Fig. 32 に示すように、模擬 OP の底面および上面、Section-3、5、6 に相当する位置および模擬 OP の中間高さ（緩衝材ブロック 5 段目の中央）に設置した。なお、底面に当たる TEO P001 については、作業の効率・安全などの観点から、直接設置することが困難であったため、緩衝材 2 段目（Section-2）の円柱ブロックに設置した。

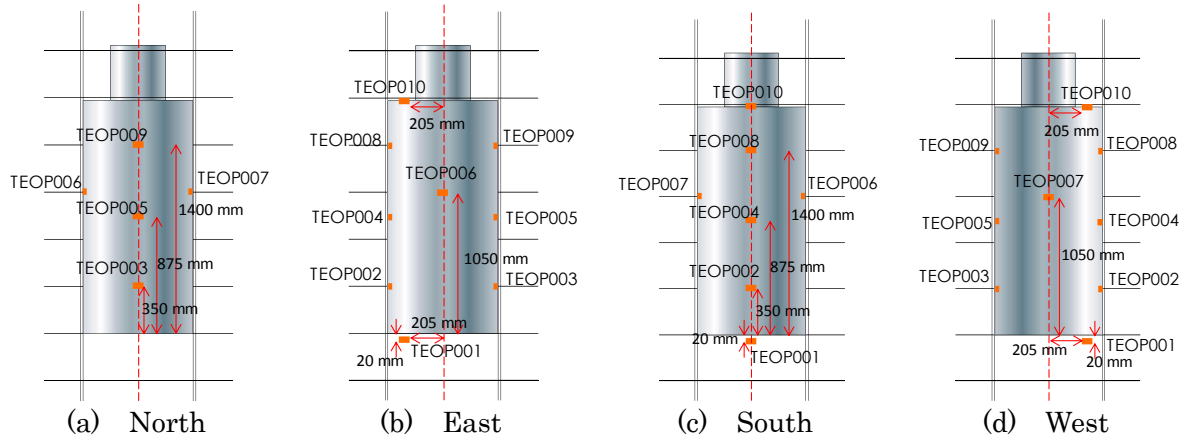


Fig. 32 Location of thermocouple on surface of simulated OP

5.2.3 計測センサーの仕様

人工バリア性能確認試験は、少なくとも 5 年程度以上の観測期間を想定しており、坑道の埋め戻し後は、外部からセンサー類のメンテナンスなどが不可能となることから、緩衝材や岩盤中において 5 年以上の稼働実績のある機器を基本として、工学規模の室内試験¹⁴⁾や釜石原位置試験で使用したセンサー¹⁵⁾などを参考に選択した。5.2.1 (2) 5.2.2 で示した計測センサーそれぞれの仕様を以下に示す。

(1) 土圧計（振動弦式）

緩衝材の膨潤挙動を把握するために土圧計を設置する。経年劣化の影響を受けにくいとされる振動弦式のセンサーを選定した。測定メカニズムは、セルに加わった圧力が、セル内に充填された脱気油に伝わり、振動弦の張力の変化により発生する周波数をコイルが感知し（振動弦式圧力変換器）、これを電気信号に変換して測定する。Table 11 に土圧計の仕様を、Photo 22 に外観を示す。

Table 11 Specifications of Pressure cell

| Maker | Geokon (4800-1X-2MPa) |
|------------------------|-----------------------|
| Range | 2 MPa |
| Accuracy | ±0.1 %F.S. |
| Safe temperature range | -20 °C to 80 °C |
| Length × Diameter | 350×150 mm |
| Material | SUS |



Photo 22 Pressure cell

(2) 間隙水圧計（振動弦式）

緩衝材の膨潤挙動および地下水の浸潤状況を把握するために振動弦式の間隙水圧計を設置する。測定メカニズムは、圧力センサーのダイヤフラムに圧力が加えられると振動弦式圧力変換器により、電気信号に変換して測定する。Table 12 に間隙圧計の仕様を、Photo 23 に外観を示す。

Table 12 Specifications of Piezometers

| | |
|------------------------|-----------------------|
| Maker | Geokon (4500S-700kPa) |
| Range | 700 kPa |
| Accuracy | ±0.1 %F.S. |
| Safe temperature range | -20 °C to 80 °C |
| Length × Diameter | 133×19.1 mm |
| Material | SUS |



Photo 23 Piezometer

(3) 変位計（振動弦式）

緩衝材の変形挙動を把握するために、振動弦式の変位計を設置する。緩衝材を貫くボアホールにロッドで連結されたアンカーを設置し、そのアンカー間の変位を測定する。Table 13 に変位計の仕様を、Photo 24 に外観を示す。

Table 13 Specifications of Borehole extensometer

| Maker | Geokon (A-5) | |
|---------------------------|-----------------|------------|
| Type | Type1 | Type2 |
| Amount | 5 | 1 |
| Range | ±50 mm | |
| Accuracy | ±0.05 mm | |
| Safe temperature range | -20 °C to 80 °C | |
| Length × Diameter | 350×150 mm | 70×88.9 mm |
| Material | SUS | |
| Water pressure resistance | 1.72 MPa | |

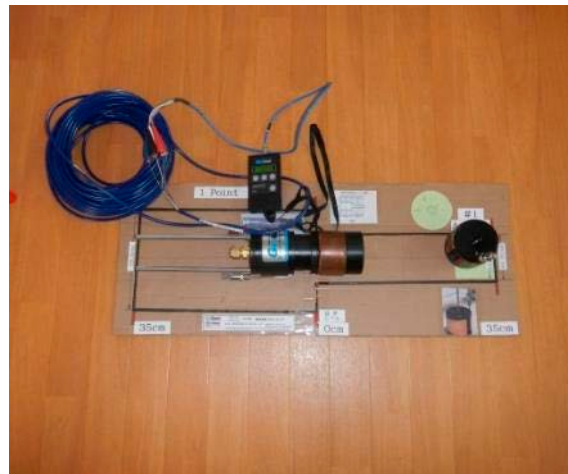
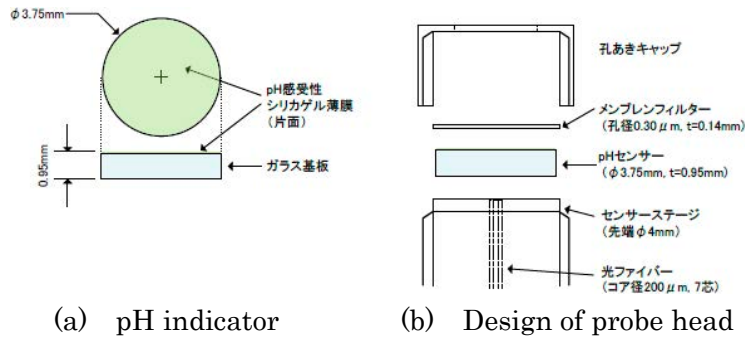


Photo 24 Borehole extensometer

(4) 光学式 pH 計

緩衝材中の間隙水の化学的特性の把握のために、pH 計を設置する。通常ガラス電極法では、設置後の校正や内部液の補充などのメンテナンスが不可能であることから、光学式 pH 計を選択した。本試験で適用した光学式 pH 計は、資源エネルギー庁の委託事業である「地層処分技術調査等事業処分システム評価確証技術開発」¹²⁾にて開発したものであり、Ocean Optics Inc.製のプローブに、原子力機構の開発した pH 指示薬を組み込んだものである (Fig. 33)。光ファイバーを介して、プローブ先端に充填された pH 指示薬に可視光を照射し、反射光を分光器に導いて極大吸収波の吸光度を測定し、吸光度と pH の関係式により pH を求める。仕様および外観を Table 14、Photo 25 に示す。



(a) pH indicator (b) Design of probe head
 Fig. 33 Setting pH indicator of optical pH sensor¹²⁾

Table 14 Specifications of pH meter

| | |
|------------------------|---|
| Maker | OceanOptics /JAEA ¹²⁾ RFP200-UV-VIS (DOP-SGTF-BCG-2014) |
| Range | 5 to 9 |
| Accuracy | ±0.3 (pH 5.0)~±0.1 (pH 7.0) ~±0.3 (pH 9.0) |
| Safe temperature range | -5 °C to 70 °C |



Photo 25 Optical pH sensor

(5) 温度計 (熱電対)

模擬 OP 表面の温度管理および緩衝材中の温度分布の把握を目的に、熱電対を設置する。測定メカニズムは、異なる材料の 2 本の金属線を接続して 1 つの回路 (熱電対) を作り、2 つの接点に温度差を与えると回路に電圧が発生すること (Seebeck 効果) を利用し、温度を測定する。熱電対の仕様と外観を Table 15 および Photo 26 に示す。

Table 15 Specifications of Thermocouple

| | |
|----------|---|
| Maker | Tokyo Sokki (Sheathed thermocouple Type T) |
| Range | -40 °C to 133 °C |
| Accuracy | ±1 °C |
| Diameter | 6.4 mm |
| Material | SUS (protecting tube) |



Photo 26 Thermocouple

(6) 炭素鋼腐食センサー

炭素鋼腐食センサーは、模擬 OP の材料である炭素鋼 (SFVC1) の腐食速度を把握するために設置する。センサーは炭素鋼電極、参照電極 (カーボン電極) および対極 (チタン) から構成されており (Fig. 34)、模擬 OP 製作時に採取した炭素鋼を使用して製作した。本センサーは、光学式 pH 計と同様に、資源エネルギー庁の委託事業である「地層処分技術調査等事業処分システム評価確証技術開発」¹²⁾にて開発し、交流インピーダンス法により分極抵抗を測定し、炭素鋼電極の腐食速度を求めるものである。炭素鋼腐食センサーの仕様と外観を Table 16 および Photo 27 に示す。

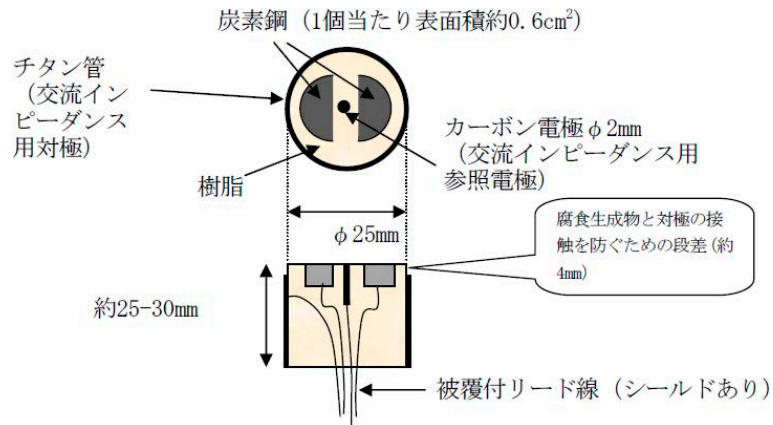


Fig. 34 Diagram of carbon steel corrosion sensor¹²⁾

Table 16 Specifications of Carbon steel corrosion sensor

| Maker | JAEA |
|-------------------|---------------------|
| Length × Diameter | 25.4×36 mm |
| Material | Teflon coated cable |



Photo 27 Carbon steel corrosion sensor

(7) 白金電極

白金電極は緩衝材中の間隙水の化学的特性の把握のために設置する。酸化還元電位 (Eh、ORP) を直接測定することは pH 計と同様に難しいことから、資源エネルギー庁の委託事業である「地層処分技術調査等事業処分システム評価確証技術開発」¹²⁾にて新たに開発したものをを用いた。白金電極と参照電極 (KCl 飽和の Ag/AgCl 電極) との電位差を測定し、酸化還元状態を把握することとした。白金電極の仕様と外観を Table 17 および Photo 28 に示す。

Table 17 Specifications of platinum electrode

| Maker | JAEA |
|-------------------|---------------------|
| Length × Diameter | 14×15 mm |
| Material | Teflon coated cable |



Photo 28 Pt electrode

(8) 湿度計

緩衝材への地下水の浸潤挙動の把握のため、湿度計を設置する。緩衝材製作時の含水比 (10.5 %) が相対湿度 100 % に近いいため、緩衝材中の水分分布については、後述のサイクロメータおよび FDR-V と併せて観測する。測定メカニズムは、電極間に挟まれた感湿膜の水分吸脱湿に伴い誘電率が変化し、その変化がもたらす電極間の静電容量の変化から湿度を測定する。湿度計の仕様と外観を Table 18 および Photo 29 に示す。

Table 18 Specifications of Hygrometer

| Maker | Rotronic (HC2-IE105) |
|------------------------|----------------------|
| Range | 0 to 100 %R.H. |
| Accuracy | 25 °C : ±0.8 %R.H. |
| Safe temperature range | -100 °C to 200 °C |
| Pressure resistance | 5 MPa |
| Long term stability | <1% R.H./year |



Photo 29 Hygrometer

(9) サイクロメータ

緩衝材への地下水の浸潤挙動の把握のため、サイクロメータにより水分ポテンシャルを測定する。熱電対により冷却電流を供給し、冷やすことによって表面が結露するときの温度から水分ポテンシャルを求める。水分ポテンシャルは不飽和時にはマイナスの値を示し、飽和に伴い 0 MPa に漸近する。釜石原位置試験¹⁵⁾などから耐久性に課題のあることが示されているため、湿度計および FDR-V と併せて観測を行う。サイクロメータの仕様と外観を Table 19 および Photo 30 に示す。

Table 19 Specifications of Psychrometer

| Maker | Wescor (PST-55) |
|------------------------|-----------------|
| Range | -0.05 to -8 MPa |
| Accuracy | ±0.03 MPa |
| Safe temperature range | -25 °C to 70 °C |
| Pressure resistance | 5 MPa |
| Long term stability | <1% R.H./year |



Photo 30 Psychrometer

(10) FDR-V

緩衝材への地下水の浸潤挙動を把握するために、FDR-V を設置する。緩衝材中では温度の影響を強く受けるため、温度保証型とした。FDR-V は土壌構成鉱物に比べて水の比誘電率が大きい性質を利用し、比誘電率から水分量の推定を行うもので、センサープローブに電気信号を与え、電磁波の反射係数の比を求めることで比誘電率を算定し、キャリブレーション試験により得られた校正式により体積含水率を求める。FDR-V の仕様と外観を Table 20 および Photo 31 に示す。

Table 20 Specifications of FDR-V

| | |
|------------------------|-----------------------------|
| Maker | Hazama Ando FDR-V-double |
| Range | 0 to 100 %R.H. |
| Safe temperature range | 80 °C |
| Length × Diameter | 200×60 mm |
| Material | SUS |



Photo 31 FDR-V

(11) 緩衝材膨出センサー

緩衝材の埋め戻し材側への膨出挙動を把握するため、境界部に緩衝材膨出センサーを設置する。本センサーは、光学式 pH 計、炭素鋼腐食センサーなどと同様、資源エネルギー庁の委託事業である「地層処分技術調査等事業処分システム評価確証技術開発」¹²⁾にて開発したものである。センサーは板状で光ファイバー式のひずみ計を等間隔に配置したもので、緩衝材の膨出に伴って生じるひずみから緩衝材の膨出形状を算定する。緩衝材膨出センサーの仕様と外観を Table 21 および Photo 32 に示す。

Table 21 Specifications of swelling sensor

| | |
|--------------------------|-----------------|
| Maker | Kyowa |
| Safe temperature range | -20 °C to 80 °C |
| Allowable bending radius | R900 |
| Pressure resistance | 4 MPa |



Photo 32 Swelling sensor

(12) 地中無線モニタリング装置

原環センターとの共同研究として、地中無線モニタリング装置の適用性を確認するために、地中無線モニタリング装置に土圧計および間隙水圧計を設置し、緩衝材の膨潤挙動を測定する。なお、本モニタリング装置は、資源エネルギー庁の委託事業である、「地層処分技術調査等事業処分システム工学確証技術開発」¹¹⁾において開発された。土圧計および間隙水圧計の仕様を Table 22 および Table 23 に、外観を Photo 33 に示す。

Table 22 Specifications of Pressure cell (wireless sensor)

| | |
|------------------------------|--------------------------|
| Maker | Geokon (4800-1X-3MPa) |
| Range | 3 MPa |
| Resolution | ±0.025% F.S.R.* |
| Accuracy | ±0.5% F.S.R.* |
| Over range | 150% F.S.R.* |
| Housing Material | Stainless Steel type 316 |
| Operating temperature | -20 °C to +80 °C |
| Cell dimension (Active area) | φ 76.2 mm |

Table 23 Specifications of Piezometers (wireless sensor)

| | |
|-----------------------|--------------------------|
| Maker | Geokon (4500SH-3-3MPa) |
| Range | 3 MPa |
| Resolution | ±0.025% F.S. (minimum) |
| Accuracy | ±0.1% F.S. |
| Linearity | <0.5% F.S. |
| Over range | 2 x rated pressure |
| Housing Material | Stainless Steel type 316 |
| Operating temperature | 0 °C to +250 °C |
| Cell dimension | φ 25.4 mm x 194 mm |



Photo 33 Wireless sensor (piezometer and pressure cell)

(13) 比抵抗トモグラフィ用電極

緩衝材中の飽和度の分布をモニタリングするために、比抵抗トモグラフィを実施することとし、垂直断面（2断面）および水平断面（1断面）に電極を設置した（Fig. 31 参照）。工学規模の試験では、緩衝材に直接電極を差し込んで固定したが、人工バリア性能確認試験においては、緩衝材ブロックを1個ずつ試験孔内に搬入・設置することから、緩衝材と岩盤との境界部に設けたケイ砂層に電極を配置することとした。比抵抗トモグラフィ用に設置した電極の仕様と外観を Table 24 および Photo 34 に示す。

Table 24 Specifications of electrode for measuring specific resistance

| | |
|------------------------|--|
| Maker | Hazama Ando, Dia Consultants (Cable electrode type) |
| Safe temperature range | 0 °C to 70 °C |
| Length × Diameter | 30×26 mm |
| Pressure resistance | 4 MPa |



Photo 34 Electrode for measuring specific resistance

5.3 緩衝材ブロックの加工

Fig. 29 および Fig. 30 に示した計測センサーおよび計測ケーブルの設置のために、該当する緩衝材ブロックに溝加工を施した。加工図の一例を Fig. 35 に示す。全ブロックの加工図は付録に示した。

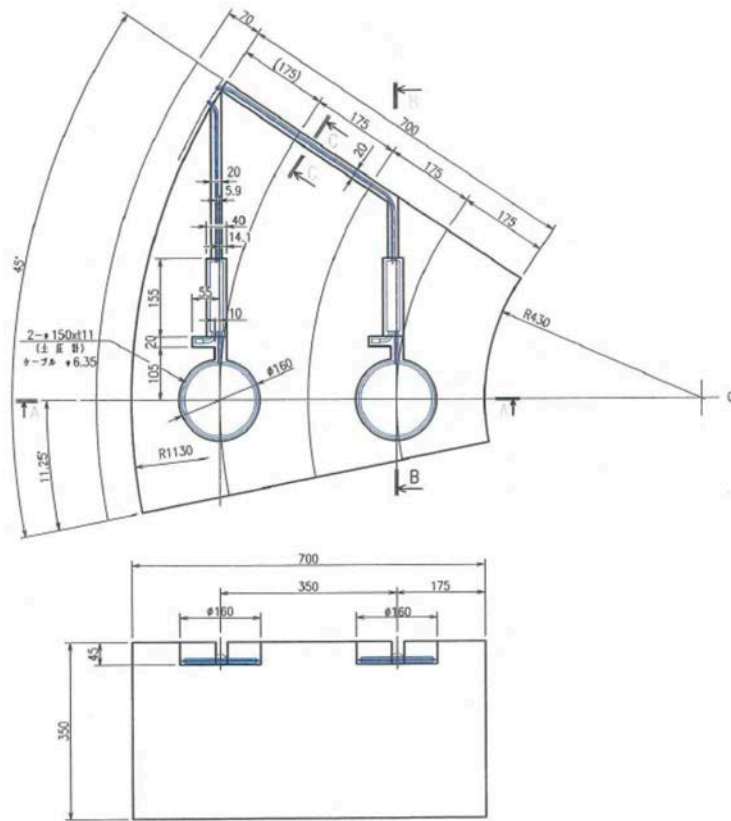


Fig. 35 Processing of buffer material block (for pressure cell)

溝の加工は、センサーおよびケーブルの形状に合わせて、サンドブラストによる加工を基本とし、細かい部分は手作業にて加工した。加工手順は以下の通りである。

- ① 緩衝材ブロック表面にセンサーおよびケーブル配置のテンプレートを固定 (Photo 35)
- ② 圧縮空気により砂を吹付け (Photo 36)、緩衝材ブロックに溝を構築 (Photo 37)

③ 必要に応じて手作業にて溝を構築
加工後の一例として、Fig. 35 に示したブロックの仕上がり状況を Photo 38 に示す。



Photo 35 Setting template



Photo 36 Sandblasting



Photo 37 After sandblasting block



Photo 38 Chased buffer material block for sensor (pressure cell)

5.4 試験孔内への設置

緩衝材および模擬 OP は試験坑道 4 の上部に設置したクレーンを使用して、試験孔内に設置した。緩衝材ブロックを 1 段（8 個または 9 個）設置するごとに該当断面のセンサーを設置した。模擬 OP が設置される 3～7 段目の設置作業においては、模擬 OP 部分が空洞となるため、落下防止など作業の安全性を考慮し、中心部分に段差が生じないようにするスペーサーを設置しながら行った。7 段目の設置が完了した時点でスペーサーを取り外し、中心部に模擬 OP を設置した。

5.4.1 緩衝材

緩衝材ブロックはブロック間の隙間が深度方向に連結しないように、1 段ごとに 22.5 度ずつずらして設置した。緩衝材ブロックと岩盤の隙間には、ケイ砂（いわきケイ砂 4 号、Table 7 参照）を充填し、試験孔底から注水する地下水が緩衝材の外周表面に均等に行き渡るようにした。また、扇形ブロックと円柱形ブロック（または模擬 OP）との隙間には、緩衝材と同配合の粉体（ベントナイト：ケイ砂=70:30 wt%、Table 8 参照）を充填した。

定置方式については、処分孔縦置き方式による緩衝材ブロックの定置に対して、原環センターは真空把持装置を用いた緩衝材の搬送定置装置を開発しており^{8),9)}、地上での定置試験により、適用性が確認されている。本試験においては、地下環境における真空把持装置の適用性確認を目的に真空把持装置を使用した定置を行った。ただし、本試験においては、実際の処分孔に設置される緩衝材ブロックとは異なり、計測センサー設置のために溝加工が施されているブロックがおおよそ半数程度ある。溝加工が施されているブロックに対しては真空把持装置が使用できないことから、機械式の把持装置を製作して使用した。以下に、それぞれの把持装置による緩衝材ブロックの定置について述べる。

(1) 真空把持装置による設置

溝加工の施されていない緩衝材ブロックに対して、緩衝材ブロック 1 個用の真空把持装置（Photo 39、Table 25）を用いて試験孔内への設置を行った。真空把持装置は、真空パッド（φ500mm）およびポンプからなり、試験坑道 4 においては真空パッドをクレーンにて移動させながら設置を行った。

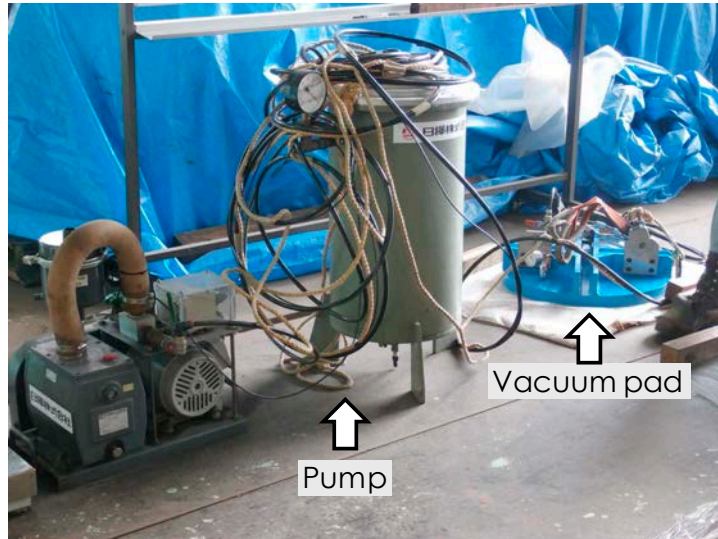


Photo 39 Vacuum grasp system (for one block)

Table 25 Spec of vacuum grasp system

| 把持装置 | 把持可能重量(kg) | 製作メーカー | 管理項目 |
|---------------------------------|------------|--------------|------------------------------|
| 扇形、円柱形緩衝材用 真空把持装置 φ 500mm | 1500 | 日揮(株)製 (特注品) | 真空吸引による圧力値 -0.08~-0.1 MPa |

真空把持装置を用いた緩衝材ブロックの定置作業状況を Photo 40 および Photo 41 に示す。定置作業における真空把持装置の管理値は、原環センターが開発した搬送定置装置⁹⁾における管理値を参考に-0.08 MPa~-0.1 MPa（把持可能重量 1500 kg）とした。作業に際しては、万一の落下に備えて補助ベルトを使用した。また、機械式把持装置の場合と比べ、真空パッドとポンプをつなぐホースの取り回しや、つり上げる緩衝材の水平の維持に留意した。

また、作業の安全に配慮し、試験孔へブロックを吊り降ろす際には試験孔内を立入禁止とし、定置高さ付近（作業員の腰高程度の高さ）まで降ろした後に作業員が孔内に入り所定の位置に定置することとした。定置後は計測器設置などの作業を実施するため、緩衝材ブロックの破損を防ぐ目的で表面にゴムシートを設置した（Photo 41 の黒い部分）。設置したゴムシートは次の段の緩衝材ブロック定置の前に取り除き、上記の手順を繰り返して定置作業を行った。定置作業時に不具合などはなく、順調に作業を進めることができ、真空把持装置の原位置での適用性が確認された。



Photo 40 Setting buffer material block using vacuum grasp system

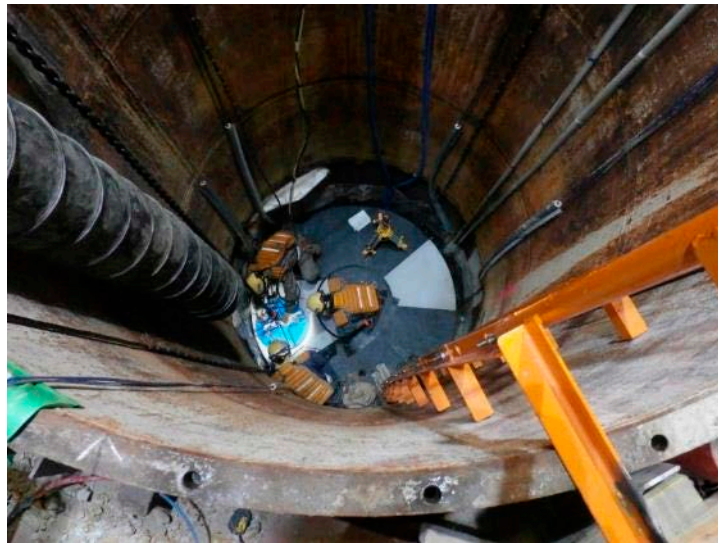


Photo 41 Setting buffer material block into test pit using vacuum grasp system

(2) 機械式把持装置による設置

真空把持装置の使用できない（溝加工の施された）緩衝材ブロックに対して、機械式の把持装置を用いた。機械式把持装置は、クレーンでつり上げることによって緩衝材ブロックを左右から挟み込む機構である。装置は、扇形ブロック用（新規作成、最大使用荷重 400kg）と円柱形ブロック用（マキノ式クランプ SF-28、最大使用荷重 800kg）の 2 種類を使用した。それぞれの機械式把持装置を Photo 42 に、仕様を Table 26 に示す。



(a) For fan-shaped block



(b) For cylinder block

Photo 42 Mechanical grasp system

Table 26 Spec of mechanical grasp system

| 把持装置 | 把持可能重量 (kg) | 製作メーカー | 管理項目 |
|---------|-------------|--------------------------------|----------|
| 扇形緩衝材用 | 400 | (株) オーシャン・システムス・エンジニアリング (特注品) | 把持可能重量未満 |
| 円柱形緩衝材用 | 800 | MAKINO 製 SF-28 (規格品) | |

機械式把持装置を使用した定置作業状況を Photo 43 に示す。真空把持装置を使用した場合と同様に、万一の落下に備えて補助ベルトを使用した。機械式把持装置は、真空把持装置と比較すると、真空を確認するまでの時間が不要であるため比較的作業が容易であることが利点としてあげられるが、緩衝材が破損する可能性があること、定置時に岩盤や他の緩衝材との間にある程度の隙間が必要であることなどに留意した。なお、作業手順については、真空把持装置と同様である。



Photo 43 Setting buffer material block into test pit using mechanical grasp system

(3) 計測センサーの設置

各種計測センサー（Table 10 参照）は、ケイ砂を敷き均したあとの孔底部分、および緩衝材ブロックを 1 段設置するごとに、所定の位置に加工された溝（5.3 参照）に設置し、計測センサーのケーブル類は緩衝材ブロックと試験孔壁の間のケイ砂部分に配線した。設置箇所およびケーブルを敷設した水の隙間は、水みちとならないように緩衝材と同配合の粉体で充填した。試験孔底のセンサー設置状況を Photo 44 に、緩衝材ブロックへの設置作業状況を Photo 45 に示す。また、間隙水圧計の設置を例に Photo 46 から Photo 48 に作業状況を示す。



Photo 44 Setting sensors at the bottom of test pit



Photo 45 Working situation in test pit



Photo 46 Setting a piezometer to chase of buffer material block

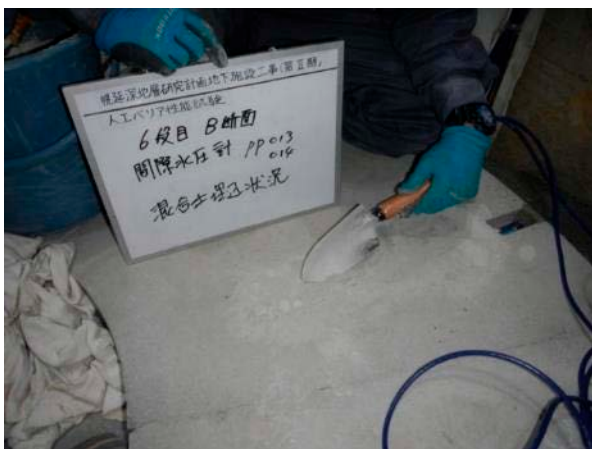


Photo 47 Infilling a chase with buffer material (bentonite-silicasand powder)



Photo 48 After infilling a chase

(4) 緩衝材ブロック設置状況

緩衝材ブロックは全部で 12 段設置した。各段の設置状況を Photo 49 に示す。なお、3 段目 (Section-3) から 7 段目 (Section-7) までは模擬 OP 部分が空洞となるため、落下防止など作業の安全確保の観点から中心部に段差が生じないようにスペーサーを設置しながら作業を行った (Photo 49 の(d)、(e)、(f)、(g))。7 段目 (Section-7) まで緩衝材ブロック設置した後にスペーサーを取り外して模擬 OP を設置し、さらに 8 段目 (Section-8) 以降の緩衝材ブロックを設置した。



(a) Section-1



(b) Section-2



(c) Section-3



(d) Section-4



(e) Section-5



(f) Section-6

Photo 49 Setting buffer material block in test pit (1/2)



(g) Section-7



(h) Section-8



(i) Section-9



(j) Section-10



(k) Section-11



(l) Section-12

Photo 49 Setting buffer material block in test pit (2/2)

5.4.2 模擬オーバーパック

(1) 試験孔内への設置

緩衝材ブロックを7段目まで設置した後にスペーサーを撤去し、模擬 OP を緩衝材中心部に定置した。模擬 OP は Fig. 23 に示したように、本体、上下の蓋、錘、オイルおよびヒーターからなり、総重量は実際の OP と同じく約 5.7t となる。試験坑道 4 に既設のクレーン設備の揚重制限から、模擬 OP を組み立てた後に試験孔内に定置することが出来ないため、本体と下部の蓋を組み立てた状態で試験孔内に定置し、残りの部材を孔内で組み立てることとした。手順および実施状況を以下に示す。

模擬 OP 設置手順

- ① 本体および下部蓋の組み立て、熱電対の位置だし (Photo 50)
- ② 試験孔へ降下 (Photo 51)
- ③ 試験孔内にて、熱電対の取り付け (Photo 52)
- ④ 緩衝材中心部への定置 (Photo 53)
- ⑤ 本体内部への錘の設置 (Photo 54)
- ⑥ 上部蓋の設置 (Photo 55)
- ⑦ オイル (熱媒体) の充填 (Photo 56)
- ⑧ ヒーターの設置 (Photo 57、Photo 58)



Photo 50 Simulated OP (body and bottom cover)



Photo 51 Move simulated OP into test pit



Photo 52 Setting thermocouple on surface of simulated OP



Photo 53 Setting simulated OP into the center of buffer material blocks

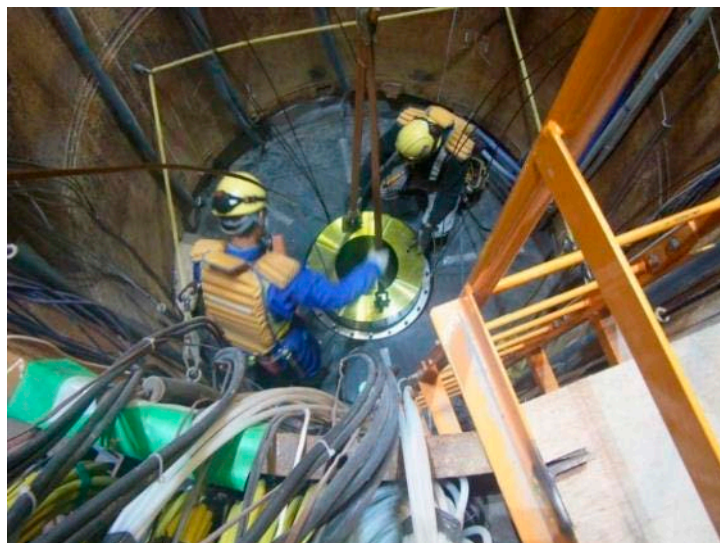


Photo 54 Putting weight into the body



Photo 55 Setting upper cover



Photo 56 Filling oil to simulated OP



Photo 57 Move heater into test pit



Photo 58 Setting heater

模擬 OP の設置完了状況を Photo 59 に示す。



Photo 59 Completed setting simulated OP

6. 埋め戻し材

6.1 施工方法についての検討

坑道の埋め戻しに関しては様々な方法が考えられ、第2次取りまとめ²⁾では坑道埋め戻しの施工方法として、ブロック工法、巻きだし・締め固め工法、吹付け工法、横締め固め工法および流動体工法について示されている。このうち流動体工法については、セメント系材料を想定しており、緩衝材へのセメント影響の懸念があることから、本試験では検討対象外とした。残る4つの工法について施工のイメージ図を Fig. 36 に示す。

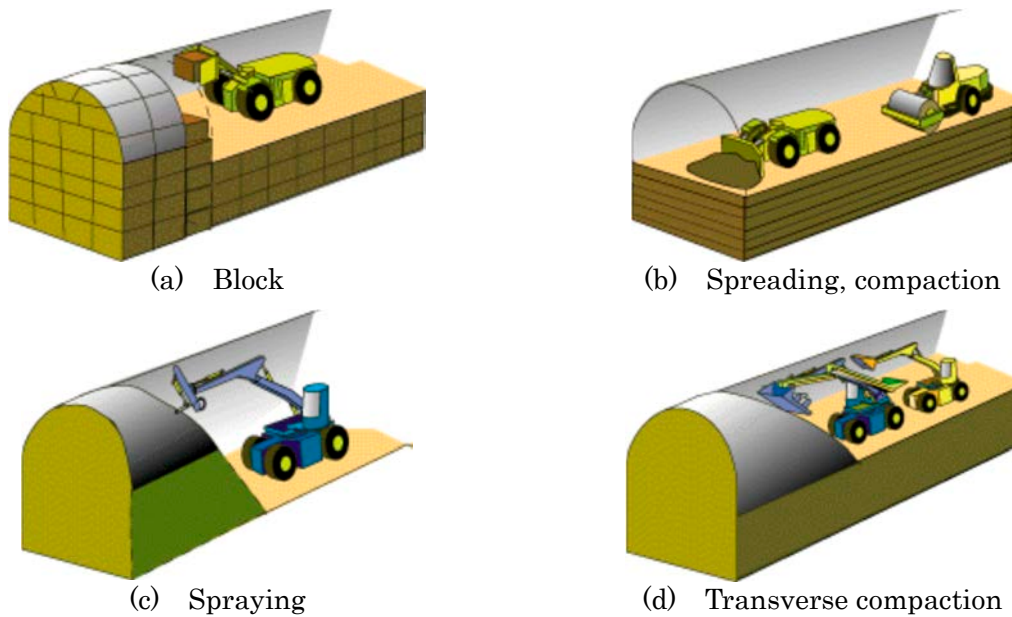


Fig. 36 Work methods for backfilling

実際の坑道の埋め戻しに際しては、上記の工法を組み合わせることが考えられ、第2次取りまとめでは Table 27 のような組合せを例示している²⁾。人工バリア性能確認試験では、これらの組合せの中から、下半部：巻きだし・締め固め工法（以下、転圧締め固め）、上半部：ブロック工法（以下、埋め戻し材ブロック）を採用し、幌延 URL を事例とした両工法の施工性などについて検討することとした。

Table 27 Example of combined work methods for upper and lower halves of a tunnel²⁾

| Lower half | Spreading and compaction | | | Transverse compaction |
|------------|--|--|---|--|
| Upper half | Block laying + Spraying | Spraying | Transverse compaction | Transverse compaction |
| Evaluation | Effective to assure quality in the upper half. Control of blocks and of tunnel environment is important. | The issue is whether the bentonite-aggregate mixture is emplaced to satisfy the quality required by the specification. | Although there is limited experience with such a machine, the method is a reasonable one if the machine is developed and if the quality of work is confirmed. | The method is applicable only if the work speed is confirmed to be superior to the normal spreading and compaction method. |

また、実際の処分場における埋め戻しには、作業効率の観点などから、狭隘な空間での作業性を勘案した専用の施工機械や、坑道形状に応じたブロックの製作などが必要と考えられるが、本試験においては、埋め戻す坑道長が約 7 m と短いことから、既存の機械および人力による施工を基本とした方法を採用した。

6.2 埋め戻し材の仕様

埋め戻し材には、坑道の力学的安定性や埋め戻した坑道が有意な水みちとならないような透水性などが求められる。このような埋め戻し材の仕様については、第2次取りまとめ²⁾で基本設計が示された後、幌延の地下環境条件を対象に検討した結果から、ベントナイトとケイ砂の混合土に対して、ベントナイト混合率40%、乾燥密度1.8 Mg/m³が示されている⁷⁾。実際の処分場での埋め戻しに際しては、百数十 km におよぶ坑道の掘削により大量に発生する掘削土（ズリ）を再利用することが考えられるため²⁾、人工バリア性能確認試験では、幌延 URL の建設によって発生した掘削土（ズリ）を用いた埋め戻し材の仕様について検討した。その結果、転圧締め固め用の埋め戻し材および埋め戻し材ブロックとして Table 28 に示す仕様を設定した¹⁶⁾。

埋め戻し材の製作には、幌延 URL の西立坑の深度 330~340 m を掘削する際に発生した掘削土（ズリ）（稚内層）およびベントナイト（クニゲル V1）を使用した。埋め戻し材の製作および品質管理については、既報の通りである³⁾。

Table 28 Specification of backfilling material

| | Backfilling material for compaction | Backfilling material block |
|--------------------------|--|----------------------------|
| Material | Bentonite and rock waste (Wakkanai formation) | |
| Mixing rate of bentonite | 40 % | |
| Grain size of rock waste | Under 20 mm | |
| Mixed water | Well water in Horonobe town ¹⁷⁾ (using for Horonobe URL construction) | |
| Water content | 33 – 39 % | 30 % |
| Dry density | 1.2 Mg/m ³ | 1.4 Mg/m ³ |

6.3 計測計画（埋め戻し材）

6.3.1 計測センサーの配置

埋め戻し材部分に設置するセンサーとして、埋め戻し材の膨潤状況を測定するための土圧計および地下水の浸潤状況を把握するための水分計（FDR-V）を設置することとした。また、コンクリートプラグと岩盤との境界面に土圧計、コンクリートプラグの表面にひずみ計を設置し、コンクリートプラグの経時的な変化を測定することとした。設定した測定断面は、Fig. 37 に示す 8 断面（Section-A~G）である。

埋め戻し材およびプラグ部分に設置した計測センサーの種類および数量を断面ごとに Table 29 に示す。また、Fig. 38 に各断面の計測センサーの配置を示した。各種計測センサーの略称は Table 29 に示したセンサーの ID（STP####、TPP####など）と対応している。Section-E には、緩衝材の Section-11 と同様、原環センターとの共同研究として、地中無線モニタリング装置を用いた計測センサー（土圧計、間隙水圧計）を設置した^{10),13)}。

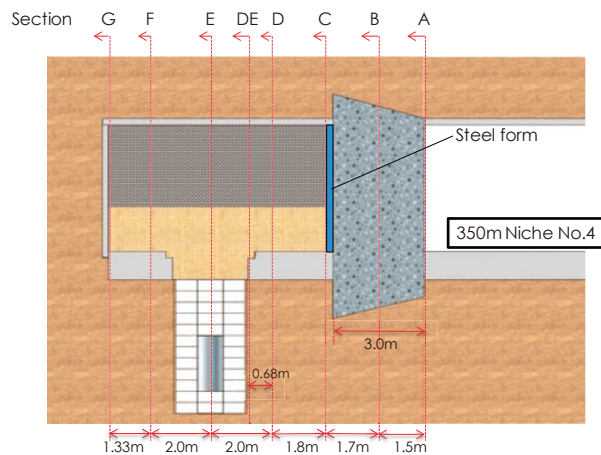


Fig. 37 Cross section of arrangement of sensors in backfilling material and plug

Table 29 Sensors installed in concrete-type plug and backfilling material

| Sensors | No. | Measurement | Section unit | Plug | | Backfilling material | | | | | Total | |
|--------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------|------|----|----------------------|---|----|---------|---|-------|----|
| | | | | A | B | C | D | DE | E | F | | G |
| Strain meter | STP### | strain, temperature | mm, °C | 8 | | | | | | | | 8 |
| Pressure cell | TPB### TPP### TPBWL###* | pressure, temperature | kPa, °C | | 10 | 11 | | 1 | 8 2* | | 11 | 43 |
| Water content (FDR-V) | FDB### | volume water content | % | | | | 5 | | 5 | 5 | | 15 |
| Piezometer | PPWL###* | pore pressure, temperature | MPa, °C | | | | | | 2* | | | 2 |
| Total | | | | 8 | 10 | 11 | 5 | 1 | 17 | 5 | 11 | 68 |

*Using wireless sensor: collaborative research with RWMC.

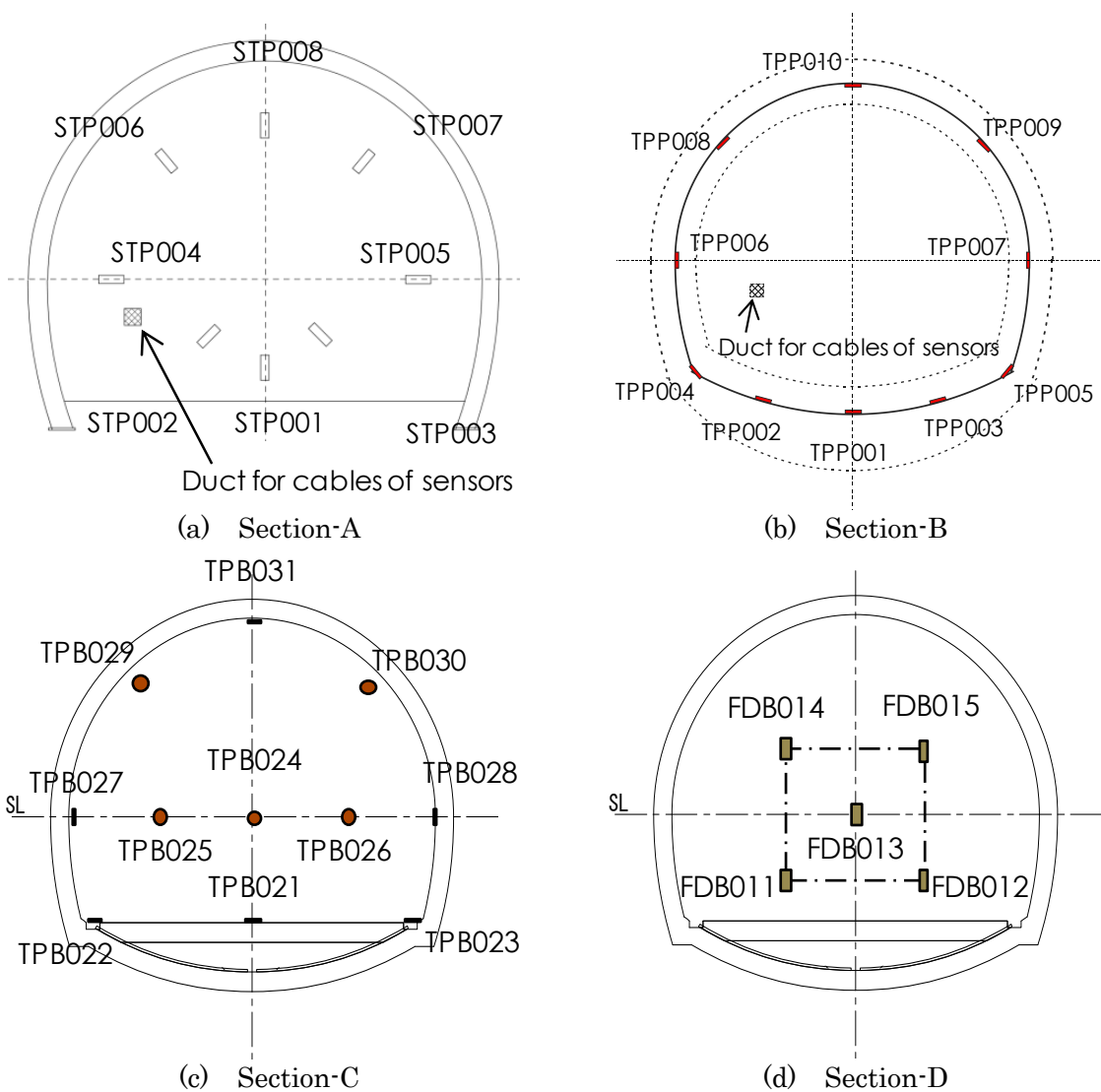


Fig. 38 Location of sensors in backfilling material (1/2)

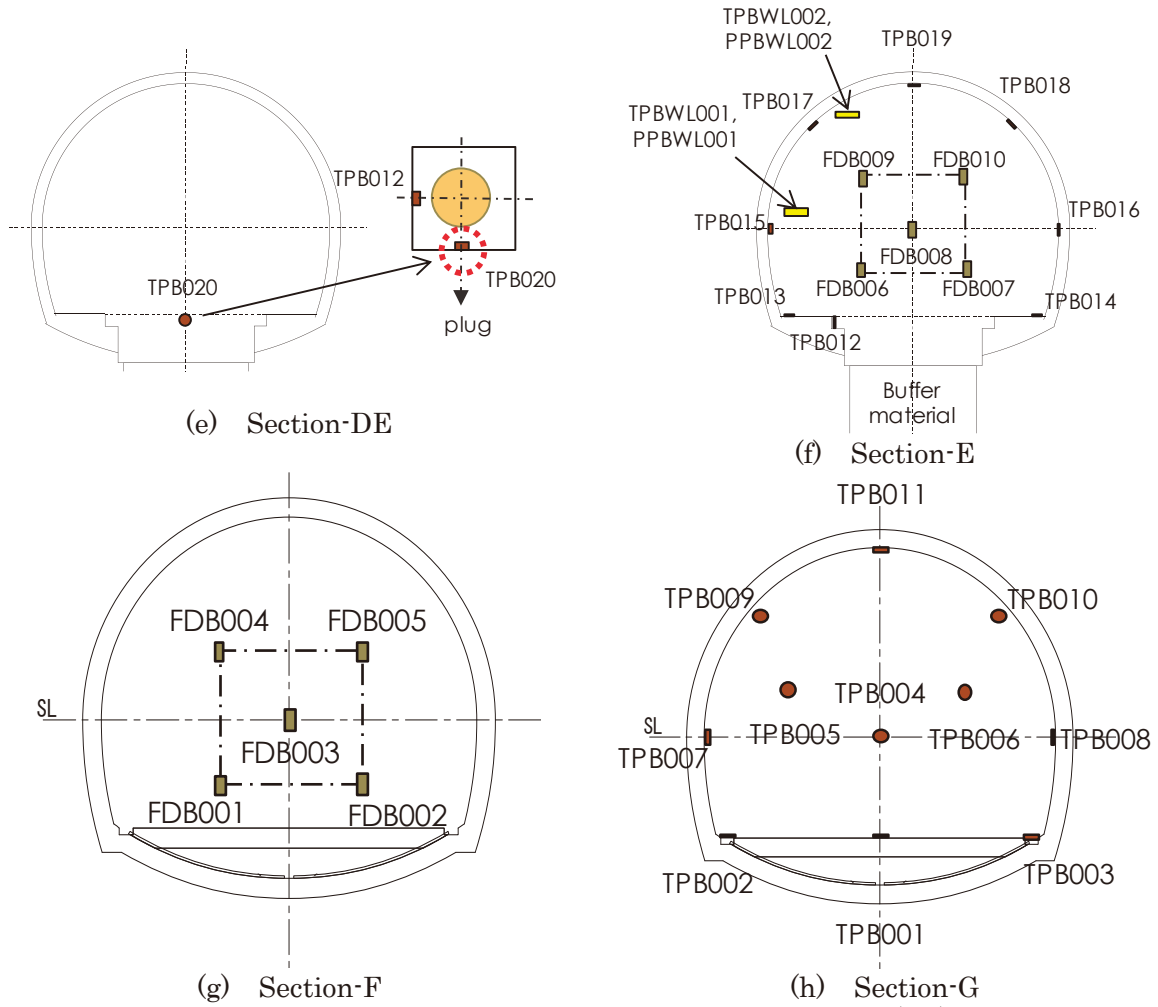


Fig. 38 Location of sensors in backfilling material (2/2)

各種計測センサーの設置状況を Photo 60 に示す。センサー設置後の隙間やケーブル部分は、埋め戻し材（ベントナイト：掘削土（ズリ）=40:60 wt%）を用いて充填した。なお、後述する埋め戻し材ブロックと坑道壁面に生じる隙間については加工したブロックを設置するが、そこで生じるわずかな隙間の充填は行っていない。



(a) Pressure cell (niche wall: Section-G)



(b) Pressure cell (crown of the niche)



(c) FDR-V (in backfilling material block)



(d) After infilling a cable



(e) Wireless sensor



(f) Infilling wireless sensor

Photo 60 Setting sensors to the niche wall and into backfilling material

6.3.2 計測センサーの仕様

(1) 土圧計（振動弦式）

埋め戻し材の膨潤状況を測定するために土圧計を設置する。土圧計は、坑道壁面方向および坑道軸方向にはたらく圧力が測定可能なように配置した。Table 30 に土圧計の仕様を示す。

Table 30 Specifications of Pressure cell

| | |
|------------------------|-----------------------|
| Maker | Geokon (4800-1X-5MPa) |
| Range | 5 MPa |
| Accuracy | ±0.1 %F.S. |
| Safe temperature range | -20 °C to 80 °C |
| Length × Diameter | 350×150 mm |
| Material | SUS |

(2) FDR-V

埋め戻し材への地下水の浸潤状況を把握するために、FDR-V を設置する。坑道壁面から内部へ向かって地下水が浸潤することを想定し、坑道中心部およびその周辺に配置した。Table 31 に FDR-V の仕様を示す。

Table 31 Specifications of FDR-V

| | |
|------------------------|----------------------|
| Maker | Hazama Ando |
| | FDR-V-single |
| Range | 0 to 100 %R.H. |
| Safe temperature range | ordinary temperature |
| Length × Diameter | 120×20 mm |
| Material | SUS |

(3) 地中無線モニタリング装置

原環センターとの共同研究として、地中無線モニタリング装置の適用性を確認するために、地中無線モニタリング装置に土圧計および間隙水圧計を設置し、埋め戻し材の膨潤挙動を測定する。なお、本モニタリング装置は、資源エネルギー庁の委託事業である、「地層処分技術調査等事業処分システム工学確証技術開発」¹¹⁾において開発された。土圧計および間隙水圧計の仕様は緩衝材中に設置したものと同様である (Table 22 および Table 23 参照)。

6.4 注水管の設置

埋め戻し材部への注水管の概念図を Fig. 39 に示す。実際の設置は、後述する埋め戻し材の転圧締め固めおよび埋め戻し材ブロックの設置に合わせて随時実施した。再冠水時には坑道周辺から地下水が浸潤してくることを想定し、注水管は坑道壁面 (図中青線) を基本として設置した。注水管はスリット加工がされており、全体に均等に地下水が行き渡るようにした。また、将来的に埋め戻し材の飽和を促進する試験が実施できるように埋め戻し材中 (図中赤線) にも注水管を設置した。坑道周辺および埋め戻し材中の 2 系統は、それぞれ独立に地下水の注水を管理することができる。詳細については試験孔底からの注水管同様、JAEA-Data/Code 2015-013⁶⁾に示した通りである。

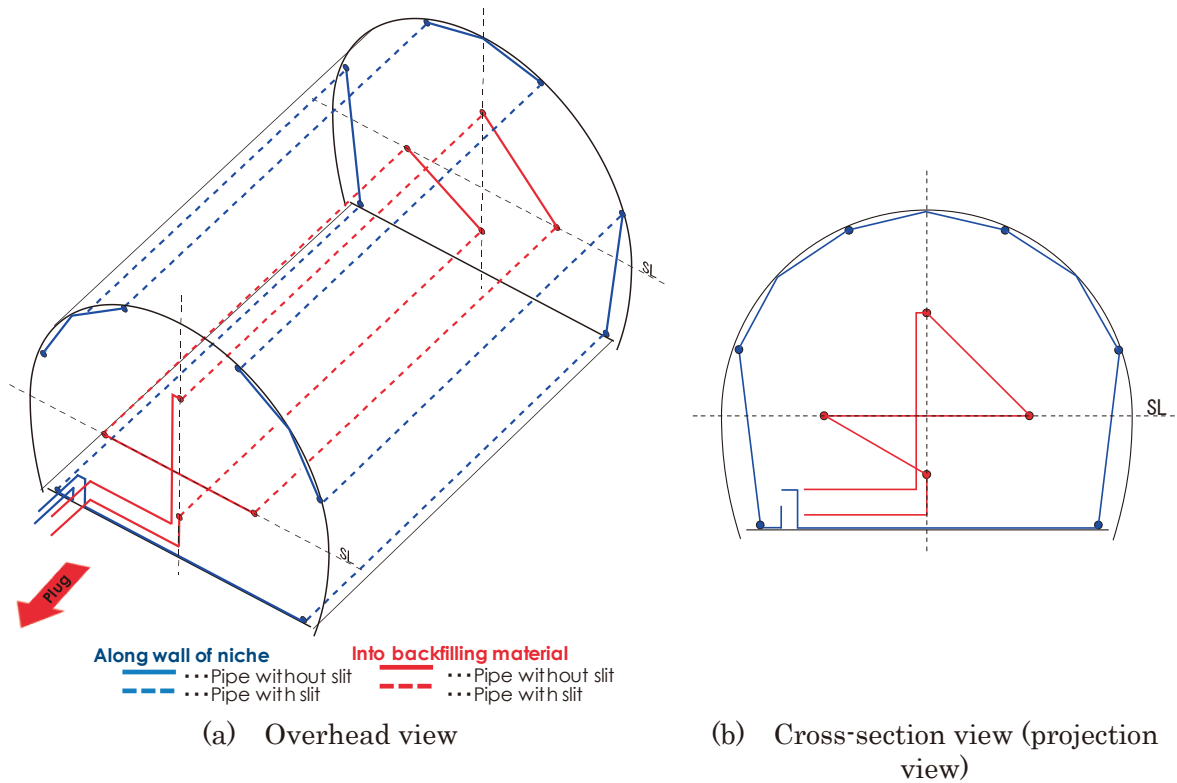


Fig. 39 Conceptual diagram of injection groundwater to backfilling material

6.5 転圧締め固め

6.5.1 施工

(1) 施工範囲

転圧締め固めは、坑道下半部および試験孔内の緩衝材上部から試験坑道の底盤までの範囲 (Fig. 3 参照) とし、事前の検討結果から、目標乾燥密度 (1.2 Mg/m^3) を達成するために、巻きだし厚さ 100 mm 、仕上がり厚さ 65 mm を基本とした³⁾。その結果、本試験においては、試験孔内の緩衝材上部から試験坑道 4 の底盤までが 15 層、試験坑道底盤からスプリングラインまでが 22 層の、計 37 層となった (Fig. 40)。試験孔部分 (1~15 層目) までの寸法を Fig. 41 に示す。試験坑道底盤の箱抜き部分の段差のため、12 層目のみ仕上がり厚さが 45 mm となっている。

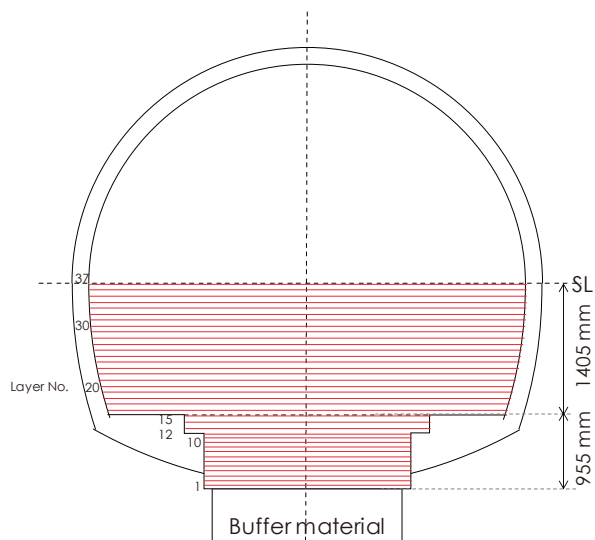


Fig. 40 Compaction layers

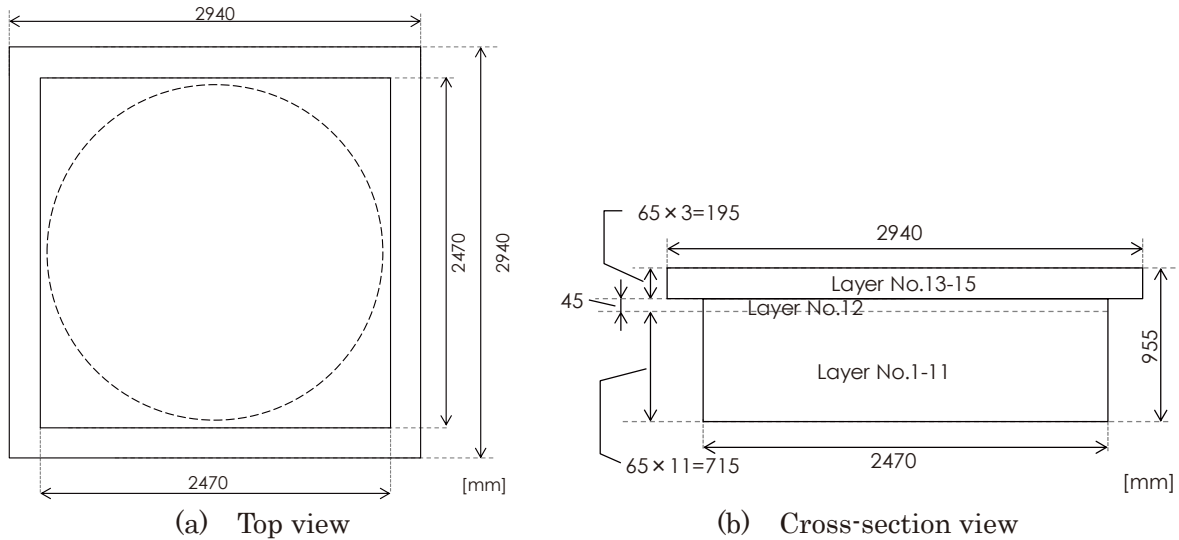


Fig. 41 Compaction layers at the test pit

(2) 使用機械

転圧締め固めには、電動ランマーおよびハンドガイドローラーを使用した。電動ランマーは試験孔部分（1～15 層目）および坑道の端の部分などハンドガイドローラーでは転圧が難しい部分に使用した。使用機械を Table 32 に示す。

Table 32 Specifications of compactor

| Compactor | Specifications | Remarks |
|-------------------|---|------------------------------|
| Rammer | 1050 W (100 V, 25 A) MIKASA MTX-M55 Weight 55 kg Striking power 7.3～8.3 kN | MIKASA Sangyo co., LTD |
| Hand guide roller | Low-noise type HV60ST Weight 660 kg Vibratory force 11.8 kN | SAKAI Heavy Industries, LTD. |

(3) 施工手順

埋め戻し材の転圧締め固めの作業手順を以下に示す。

- ① 製作済みの埋め戻し材を計量し、あらかじめ設定した量を投入し、敷き均す。
- ② 敷き均し厚さを確認する（100 mm/層）。
- ③ 敷き均した埋め戻し材を電動ランマーおよびハンドガイドローラーを使用し、転圧する。
- ④ レベル測量により仕上がり厚さを確認する（65 mm/層）。
- ⑤ 乾燥密度の測定（該当層のみ：砂置換法、RI 法、QTM）

上記の手順は、実処分場には存在しない計測センサーおよびケーブルなどを保護すること、埋め戻しの坑道長が短いこと、などの制約があることから、実処分場における手順とは異なることに注意が必要である。実処分場においては、転圧機械の性能および使用材料の特性などに合わせて層厚や手順など含めた設計が必要と考えられる。

(i) 試験孔部分（1～15 層目）

試験孔部分の埋め戻し材転圧締め固めの施工状況を以下に示す。埋め戻し材と緩衝材の境界部には、緩衝材膨出センサーが設置されており、緩衝材中に設置した各種センサーからのケーブル

類なども存在する。転圧によるセンサーやケーブル類の破損を防止するため、箱抜き材を設置して転圧締め固めを実施した (Photo 61)。1層の転圧後に箱抜き材を撤去し、箱抜き部分に埋め戻し材を充填した (Photo 62)。12層目の施工状況および転圧後の状況を Photo 63 および Photo 64 に示す。また、転圧後のレベル測定の状況を Photo 65 に示す。



Photo 61 Compaction using rammer (Layer No.1)



Photo 62 Infilling a chase with backfilling material



Photo 63 Compaction layer No.12 by rammer



Photo 64 After Compaction of backfilling material (Layer No.12)



Photo 65 Confirmation of level after compaction

(ii) 坑道下半部（16～37層目）

坑道下半部も試験孔部と同様の手順で転圧締め固めを実施した。ハンドガイドローラーが使用できない孔壁近傍などは、電動ランマーにより転圧を行った。また、坑道手前部分（プラグ打設

部分)には土留め壁を順次設置し、転圧により埋め戻し材がプラグ側に崩れ落ちないようにした。なお、この土留め壁は、プラグ打設時の内型枠としても利用することとした。施工状況を Photo 66 から Photo 71 に示す。



Photo 66 Instration and leveling backfilling material



Photo 67 Compaction by hand guide roller



Photo 68 Wall for backfilling material guards



Photo 69 Compaction by rammer



Photo 70 Laying sensor cables



Photo 71 After compaction (Layer No.30)

施工実績を Table 33 に示す。試験孔部分（約 6～8 m²/層）で 1 日あたり 6 層、坑道下半部（約 34～36 m²/層）で 1 日あたり 4 層の施工実績であった。

Table 33 Construction results of compaction

| Day | Shift | Contents of work | Layer No. |
|-----|-------|-------------------------------|------------|
| ① | Day | Cable arrangement, compaction | 1 |
| | Night | Compaction | 2, 3 |
| ② | Day | Compaction | 4, 5, 6 |
| | Night | Compaction | 7, 8, 9 |
| ③ | Day | Compaction | 10, 11, 12 |
| | Night | Compaction | 13, 14, 15 |
| ④ | Day | Construction wall | |
| | Night | Construction wall, compaction | 16 |
| ⑤ | Day | Construction wall, compaction | 16 |
| | Night | Compaction | 16 |
| ⑥ | Day | Compaction | 16, 17 |
| | Night | Compaction | 18, 19 |
| ⑦ | Day | Compaction | 20 |
| | Night | Compaction | 21, 22 |
| ⑧ | Day | Construction duct for cables | |
| | Night | Compaction | 23, 24 |
| ⑨ | Day | Compaction | 25, 26 |
| | Night | Compaction | 26, 27 |
| ⑩ | Day | Cable arrangement, compaction | 27 |
| | Night | Compaction | 28, 29 |
| ⑪ | Day | Compaction | 30, 31 |
| | Night | Compaction | 32, 33 |
| ⑫ | Day | Compaction | 34, 35 |
| | Night | Compaction | 36, 37 |

6.5.2 品質管理

埋め戻し材の転圧締め固め施工では、適切な敷き均し厚さで材料を投入し、一定の締め固めエネルギーで均一な締め固めが可能となる。そのため、設計で設定された敷き均し厚さで施工し、各締め固め工程での出来形によって、施工密度を管理することができる。また、出来高管理以外の施工密度の品質管理方法としては、砂置換法や RI (Radio Isotope) 法など様々な手法が挙げられる。本試験では、レベル測量による出来高管理に加えて、埋め戻し材の施工密度の確認方法として、砂置換法、RI 法および熱伝導率を用いた QTM (Quick Thermal conductivity Method) を採用し、それぞれの手法を比較することでその適用性を確認した。

測定点の配置を Fig. 42 に示す。それぞれの測線の交点において測定を実施した。全層に対して埋め戻し材の投入量および仕上がり厚さから出来形検査により乾燥密度を算出するとともに、それをベースに砂置換法、RI 法および QTM 法、それぞれの手法の比較検討が実施できるように、各手法の測定箇所を Table 34、Fig. 43 に示す通りとした。以下にそれぞれの測定方法における乾燥密度の測定結果を示す。なお、測定結果の詳細については付録に掲載した。

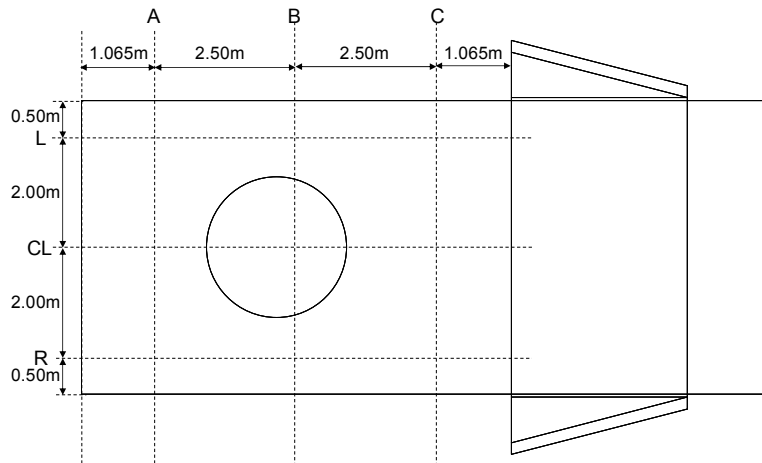


Fig. 42 Arrangement survey point

Table 34 Confirmation method and measure point of dry density

| | Layer No. | Method | | | Survey point | | | Total |
|------------------------------|-----------|-------------------------|-----------|--------|--------------|---------------------------|--------|-------|
| | | Sand replacement method | RI method | QTM | Line-A | Line-B | Line-C | |
| Lower half part of the Niche | 37 | | ○ | ○ | L-CL-R | | | 6 |
| | 36 | ○ | | | | L-CL-R | | 3 |
| | 35 | ○ | | | L-CL-R | | | 3 |
| | 33 | ○ | ○ | ○ | | | L-CL-R | 9 |
| | 31 | ○ | ○ | ○ | | L-CL-R | | 9 |
| | 29 | | ○ | ○ | | | L-CL-R | 6 |
| | 27 | ○ | ○ | ○ | L-CL-R | | | 9 |
| | 26 | ○ | | | | | L-CL-R | 3 |
| | 24 | | ○ | ○ | | L-CL-R | | 6 |
| | 22 | ○ | | | | L-CL-R | | 3 |
| | 20 | ○ | ○ | ○ | | | L-CL-R | 9 |
| | 18 | ○ | | | L-CL-R | | | 3 |
| 17 | | ○ | ○ | L-CL-R | | | 6 | |
| Test pit | 14 | ○ | | | | 3 points in the test pit* | | 3 |
| | 10 | | ○ | ○ | | 3 points in the test pit* | | 6 |
| | 7 | ○ | ○ | ○ | | 3 points in the test pit* | | 9 |
| | 4 | ○ | | | | 3 points in the test pit* | | 3 |
| Total | | | | | | | 96 | |

*: Refer to Fig. 43

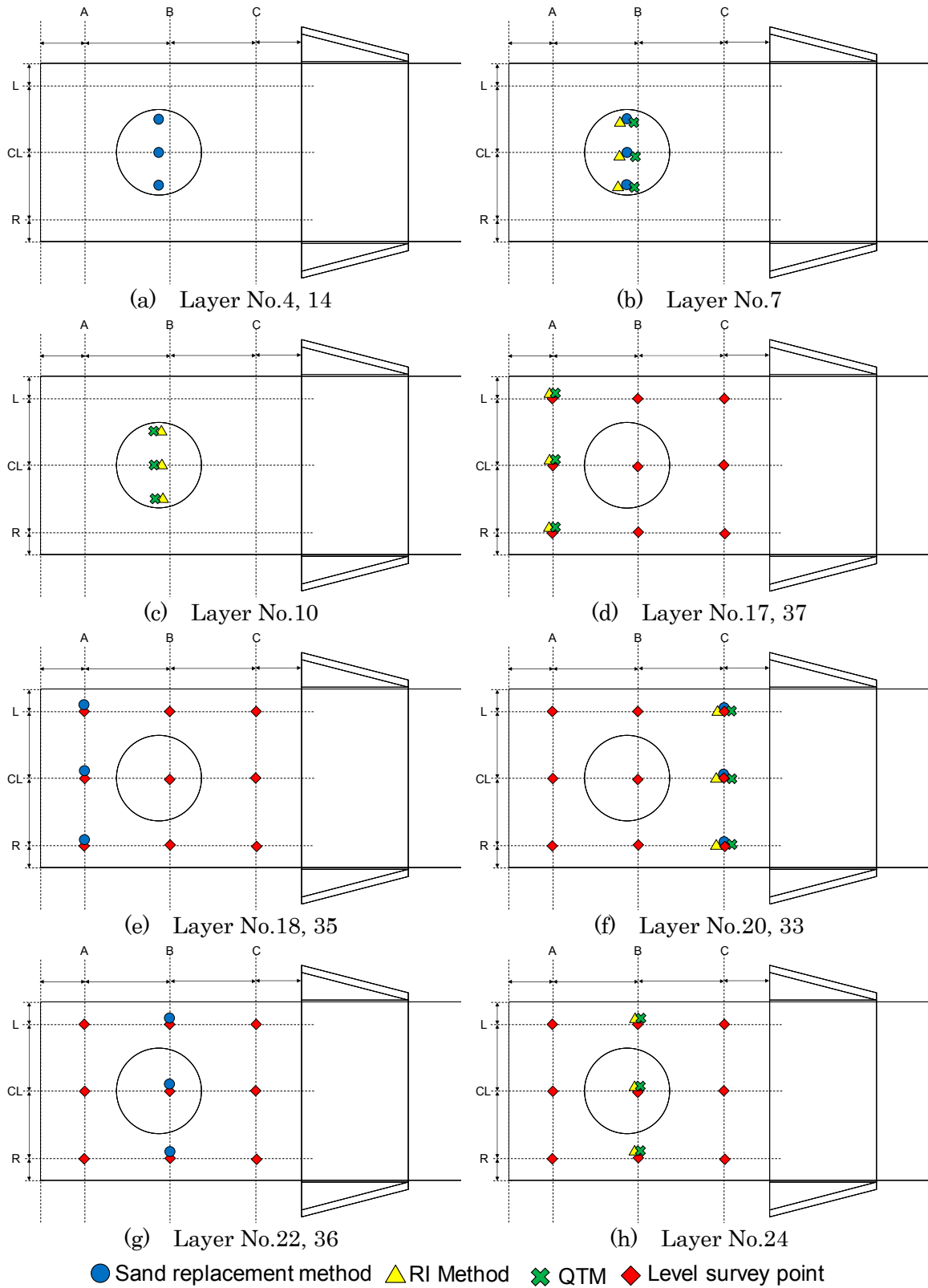


Fig. 43 Arrangement survey point in the test pit and lower half part of the niche (1/2)

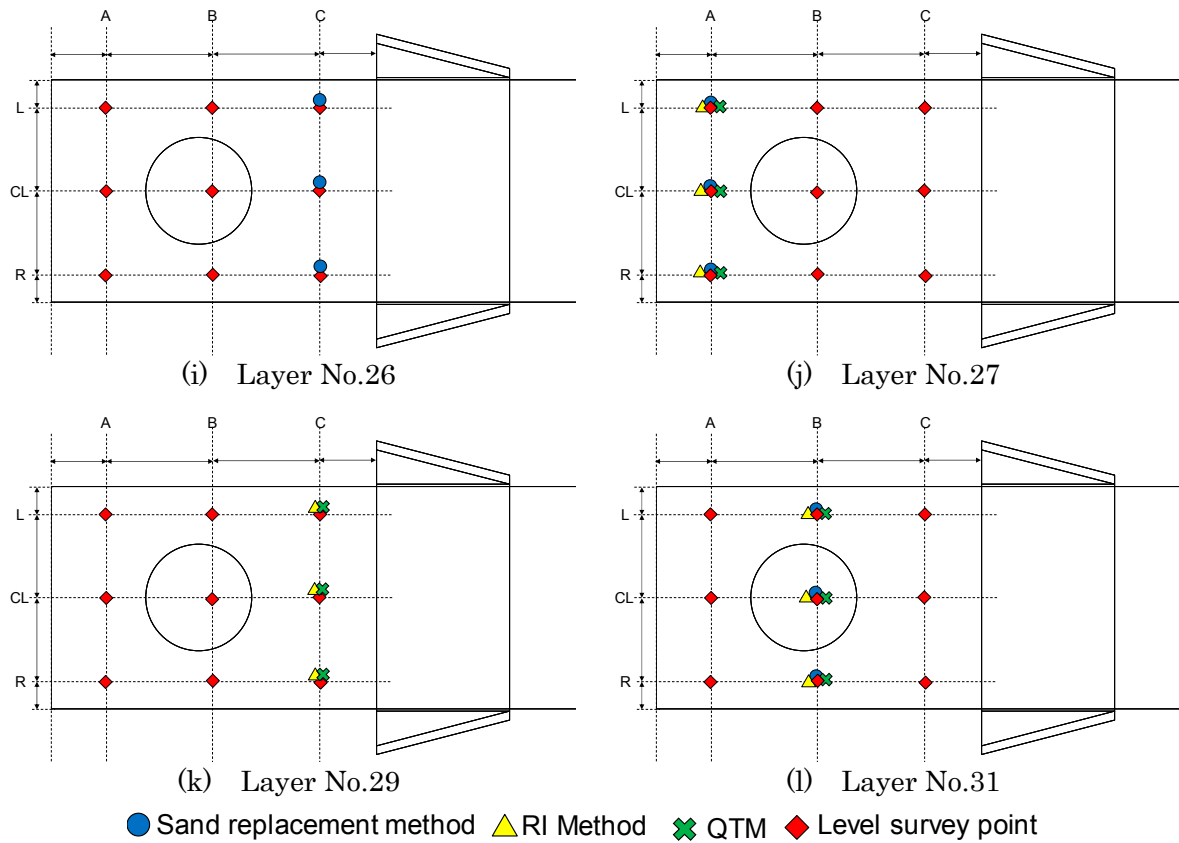


Fig. 43 Arrangement survey point in the test pit and lower half part of the niche (2/2)

(1) 砂置換法

砂置換法（JIS A 1214）は、採取した土質材料の代わりに砂を充填し、採取試料の体積を求める方法である。作業状況を Photo 72 に、乾燥密度の測定結果を Table 35 および Fig. 44 に示す。なお、測定結果は、3 点の平均値である。測定した全ての層において、目標とした乾燥密度（1.2 Mg/m³ 以上）を満たす結果が得られ、適切に転圧締め固めが行われたと考えられる。



Photo 72 Sand replacement method (Layer No.27, Point A-R)

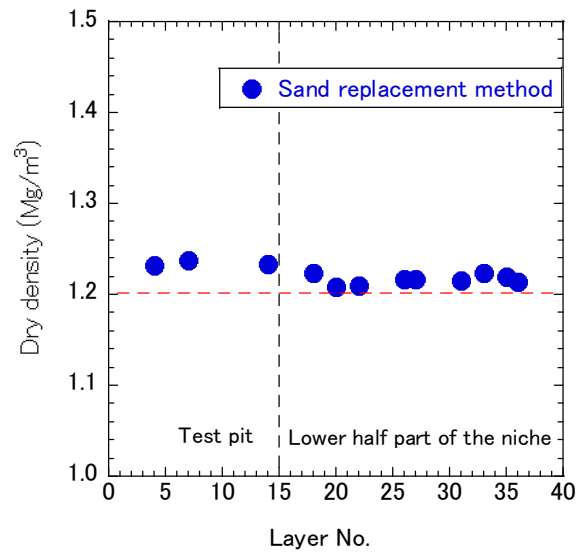


Fig. 44 Result of dry density by sand replacement method

Table 35 Dry density of backfilling material by sand replacement method

| | Layer No. | Wet density (Mg/m ³) | Dry density (Mg/m ³) | Water content (%) |
|------------------------------|-----------|----------------------------------|----------------------------------|-------------------|
| Test pit | 4 | 1.665 | 1.232 | 35.1 |
| | 7 | 1.681 | 1.238 | 35.8 |
| | 14 | 1.688 | 1.234 | 36.8 |
| Lower half part of the Niche | 18 | 1.661 | 1.223 | 35.8 |
| | 20 | 1.657 | 1.209 | 37.1 |
| | 22 | 1.669 | 1.210 | 37.9 |
| | 26 | 1.665 | 1.217 | 36.8 |
| | 27 | 1.661 | 1.217 | 36.5 |
| | 31 | 1.665 | 1.216 | 37.0 |
| | 33 | 1.661 | 1.223 | 35.8 |
| | 35 | 1.658 | 1.220 | 35.8 |
| | 36 | 1.649 | 1.214 | 35.8 |
| | Average | 1.665 | 1.221 | 36.4 |

(2) RI 法

RI 法は、放射性同位元素を利用して、土の湿潤密度および含水比を現場において直接測定するものであり、土の密度測定にはガンマ線を、含水比測定には中性子線を用いる。砂置換法に比べて以下のような特徴を持つ。

- ・ 短時間の測定で結果が直ちに得られる
- ・ 測定値に個人による誤差が少ない
- ・ 同一箇所を繰り返し測定できる

本試験においては、「RI 計器による土の密度試験 (JGS 1614-2012)」に準じて測定を実施した。測定に使用した RI 計器の仕様を Table 36 に示す。

RI 法による測定状況を Photo 73 に、乾燥密度の測定結果 (3 点の平均値) を Fig. 45 および Table 37 に示す。砂置換法の結果と比較するとやや高めを示し、値のばらつきも大きかったが、概ね整合する値が得られている。一般に、RI 法では測定面と計器底面に空隙がある場合には測定結果に大きな影響があるとされており、本測定においても測定点の平滑度などが影響した可能性がある。

Table 36 Specification of density and moisture meter by RI method

| | Specification |
|--------------------|---|
| Model | FT-301 (Fieldtech Co., LTD) Scattering type density and moisture meter using RI |
| Measurement method | Wet density: Backscatter γ -ray system Moisture content: Backscatter fast neutron system |
| Measurement range | Wet density: 1.200~2.500 g/cm ³ Moisture content: 0.050~0.800 g/cm ³ |
| Radiation source | γ -ray source: ⁶⁰ Co, 2.6MBq, T _{1/2} = 5.2 year Neutron source: ²⁵² Cf, 1.1MBq, T _{1/2} = 2.6 year |
| Measurement time | Standard: 5min Field: 1min |



Photo 73 RI method (Layer No.29)

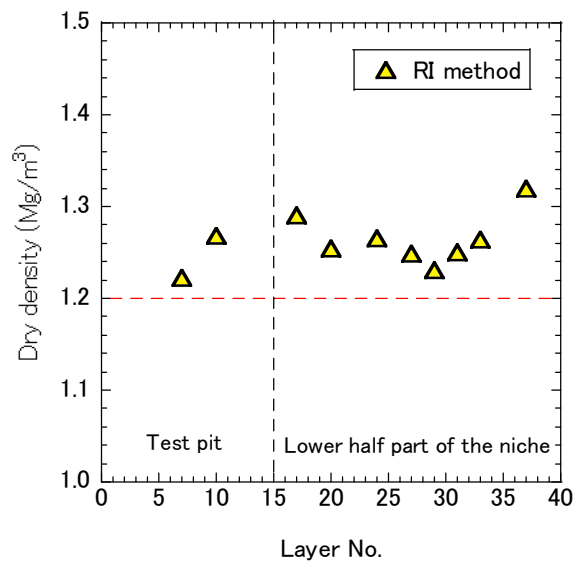


Fig. 45 Result of dry density by RI method

Table 37 Dry density of backfilling material by RI Method

| | Layer No. | Wet density (Mg/m ³) | Dry density (Mg/m ³) | Water content (%) |
|------------------------------|-----------|----------------------------------|----------------------------------|-------------------|
| Test pit | 7 | 1.654 | 1.222 | 35.4 |
| | 10 | 1.705 | 1.268 | 34.5 |
| Lower half part of the Niche | 17 | 1.715 | 1.291 | 32.9 |
| | 20 | 1.708 | 1.254 | 36.2 |
| | 24 | 1.692 | 1.265 | 33.7 |
| | 27 | 1.678 | 1.249 | 34.4 |
| | 29 | 1.672 | 1.230 | 35.9 |
| | 31 | 1.680 | 1.250 | 34.4 |
| | 33 | 1.722 | 1.264 | 36.2 |
| | 37 | 1.785 | 1.319 | 35.5 |
| | Average | 1.701 | 1.261 | 34.9 |

(3) 熱伝導率法 (QTM)

本手法は、既知の含水比を持った埋め戻し材の熱伝導率を事前に測定し、検量線を作成することで、現場で測定した熱伝導率から転圧締め固め施工を実施した埋め戻し材の含水比を求め、他の方法で測定した湿潤密度から乾燥密度を求めるものである。本試験においては、湿潤密度は RI 法により得られた値 (Table 37 参照) を用いて乾燥密度を算出した。

検量線作成のために、室内試験で取得した熱伝導率と含水比を Table 38 に示す。

Table 38 Thermal conductivity and water content rate at laboratory test

| Thermal conductivity (W/mK) | Water content (%) | Wet density (Mg/m ³) | Dry density (Mg/m ³) |
|-----------------------------|-------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 0.640 | 20.29 | 1.442 | 1.198 |
| 1.154 | 39.23 | 1.683 | 1.209 |
| 1.059 | 42.96 | 1.696 | 1.186 |
| 0.564 | 11.27 | 1.449 | 1.302 |
| 0.705 | 20.48 | 1.573 | 1.306 |
| 0.738 | 19.66 | 1.558 | 1.302 |
| 1.108 | 33.40 | 1.696 | 1.271 |
| 1.266 | 38.65 | 1.805 | 1.302 |
| 1.264 | 38.37 | 1.802 | 1.302 |

Table 38 の熱伝導率と含水比の関係を Fig. 46 に示す。両者の関係を線形で近似すると以下の式が得られる。

$$\lambda = 0.27417 + 0.022816\omega \quad \text{式(1)}$$

ここで、含水比:ω (%), 熱伝導率λ (W/mK)である。

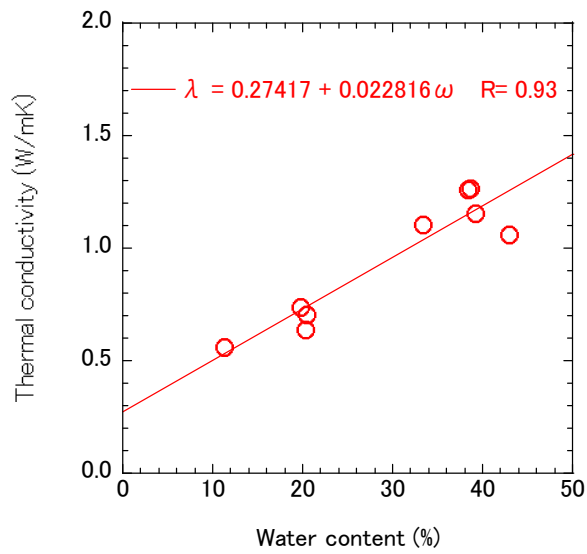


Fig. 46 Relational expression between water content and thermal conductivity

現場での熱伝導率の測定状況を Photo 74 に示す。測定した熱伝導率から、式(1)を用いて含水比を算出し、RI 法で求めた湿潤密度から乾燥密度を導出した結果を Fig. 47 および Table 39 に示す。砂置換法および RI 法と比較すると、値のばらつきが大きい傾向が認められたが、乾燥密度は 1.2~1.3 Mg/m³ の値を示し、他の方法と概ね整合する値が得られた。



Photo 74 QTM (Layer No.27)

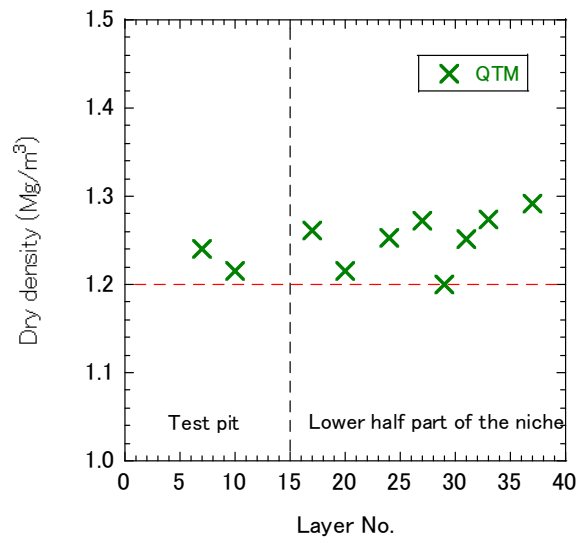


Fig. 47 Result of dry density by QTM

Table 39 Dry density of backfilling material by QTM

| | Layer No. | Thermal conductivity (W/mK) | Water content (%) | Wet density (RI method) (Mg/m³) | Dry density (Mg/m³) |
|------------------------------|-----------|-----------------------------|-------------------|---------------------------------|---------------------|
| Test pit | 7 | 1.032 | 33.2 | 1.654 | 1.241 |
| | 10 | 1.195 | 40.4 | 1.705 | 1.215 |
| Lower half part of the Niche | 17 | 1.096 | 36.0 | 1.715 | 1.261 |
| | 20 | 1.198 | 40.5 | 1.708 | 1.216 |
| | 24 | 1.074 | 35.1 | 1.692 | 1.253 |
| | 27 | 1.002 | 31.9 | 1.678 | 1.272 |
| | 29 | 1.172 | 39.4 | 1.672 | 1.200 |
| | 31 | 1.055 | 34.2 | 1.680 | 1.252 |
| | 33 | 1.079 | 35.3 | 1.722 | 1.273 |
| | 37 | 1.144 | 38.1 | 1.785 | 1.292 |
| Average | | 1.105 | 36.4 | 1.701 | 1.248 |

(4) 投入量および仕上がり厚さ（レベル測量）

各層における転圧締め固めに対して、面積および仕上がり厚さから目標乾燥密度（1.2 Mg/m³以上）を達成するための投入量を算出し、設計投入量とした。設計投入量算出の際には、埋め戻し材の含水比は全て 39%とした。設計投入量算出の式を以下に示す。

$$\text{設計投入量} = \text{乾燥密度} \times \text{体積} \times (1 + \text{含水比}/100) \quad \text{式(2)}$$

ここで、乾燥密度=1.2 Mg/m³、含水比=39%である。

施工時には、ケーブル敷設経路など、箱抜きをしている部分があるため、計算上は箱抜き部分を差し引いて体積を算出している。実投入量は設計投入量よりも多くなるようにし、転圧前後のレベル測量の結果から、実際の層厚を測定した。実投入量および実際の層厚から湿潤密度を算出し、含水比を一律 39%として乾燥密度を求めた。結果を Fig. 48 および Table 40 に示す。乾燥密度が 1.2 Mg/m³ よりも低い値を示す部分も見られるが、この原因は、製作した埋め戻し材の含水比を製作時の目標含水比の最大値 (39%) に設定したためと考えられる。すなわち、含水比が 39% よりも低い場合には、乾燥密度が低く算出されることになる。また、乾燥密度が 1.4 Mg/m³ 以上

となった部分 (16,18,19 層目) については、設計厚さ 65mm に比べて仕上がり厚さが小さくなっていることが原因と考えられる (Table 40 参照)。それぞれの転圧層における設計投入量の計算および実投入量などについては付録に掲載した。

Fig. 48 から分かるように、他の方法に比較して乾燥密度の値のばらつきが大きくなっている。本手法にて埋め戻し材の乾燥密度の管理を行う場合には、埋め戻し材の含水比を一定に管理することや、実際に投入した材料の含水比を反映させること、または設計投入量と実投入量の差に管理値を設けるなどの対応が必要となると考えられる。

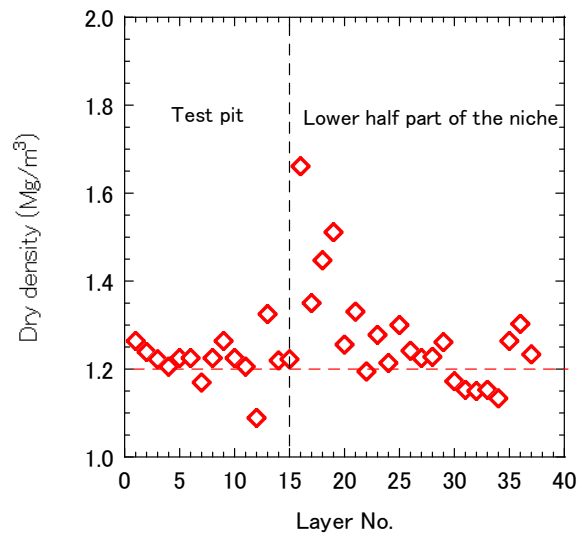


Fig. 48 Calculated dry density from input and thickness of backfilling material

Table 40 Calculated dry density using input and thickness of backfilling material

| Layer No. | Total area (m ²) | Subtraction area (m ²) | Design thickness (m) | Design input (Mg) | Observed input (Mg) | Observed thickness (m) | Wet density* (Mg/m ³) | Dry density* (Mg/m ³) |
|-----------|------------------------------|------------------------------------|----------------------|-------------------|---------------------|------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 1 | 6.101 | 0.450 | 0.065 | 0.613 | 0.6360 | 0.064 | 1.759 | 1.265 |
| 2 | 6.101 | 0.706 | 0.065 | 0.585 | 0.5950 | 0.064 | 1.723 | 1.240 |
| 3 | 6.101 | 0.706 | 0.065 | 0.585 | 0.5950 | 0.065 | 1.697 | 1.221 |
| 4 | 6.101 | 0.636 | 0.065 | 0.593 | 0.5950 | 0.065 | 1.675 | 1.205 |
| 5 | 6.101 | 0.636 | 0.065 | 0.593 | 0.5950 | 0.064 | 1.701 | 1.224 |
| 6 | 6.101 | 0.636 | 0.065 | 0.593 | 0.5950 | 0.064 | 1.701 | 1.224 |
| 7 | 6.101 | 0.636 | 0.065 | 0.593 | 0.5950 | 0.067 | 1.625 | 1.169 |
| 8 | 6.101 | 0.636 | 0.065 | 0.593 | 0.5950 | 0.064 | 1.701 | 1.224 |
| 9 | 6.101 | 0.636 | 0.065 | 0.593 | 0.5950 | 0.062 | 1.756 | 1.263 |
| 10 | 6.101 | 0.636 | 0.065 | 0.593 | 0.5950 | 0.064 | 1.701 | 1.224 |
| 11 | 6.101 | 0.636 | 0.065 | 0.593 | 0.5950 | 0.065 | 1.675 | 1.205 |
| 12 | 6.101 | 0.636 | 0.045 | 0.410 | 0.4630 | 0.056 | 1.513 | 1.088 |
| 13 | 8.644 | 0.472 | 0.065 | 0.886 | 0.8875 | 0.059 | 1.841 | 1.324 |
| 14 | 8.644 | 0.472 | 0.065 | 0.886 | 0.8870 | 0.064 | 1.696 | 1.220 |
| 15 | 8.644 | 0.472 | 0.065 | 0.886 | 0.8885 | 0.064 | 1.699 | 1.222 |
| 16 | 33.725 | 1.800 | 0.065 | 3.461 | 3.5410 | 0.048 | 2.311 | 1.662 |
| 17 | 33.915 | 1.800 | 0.065 | 3.482 | 3.7980 | 0.063 | 1.877 | 1.351 |
| 18 | 34.080 | 4.800 | 0.065 | 3.175 | 3.5900 | 0.061 | 2.010 | 1.446 |
| 19 | 34.293 | 4.800 | 0.065 | 3.198 | 3.5900 | 0.058 | 2.099 | 1.510 |
| 20 | 34.506 | 1.740 | 0.065 | 3.552 | 3.7760 | 0.066 | 1.746 | 1.256 |
| 21 | 34.719 | 4.920 | 0.065 | 3.231 | 3.3080 | 0.060 | 1.850 | 1.331 |
| 22 | 34.932 | 5.360 | 0.065 | 3.206 | 3.3370 | 0.068 | 1.659 | 1.194 |
| 23 | 35.074 | 6.150 | 0.065 | 3.136 | 3.2900 | 0.064 | 1.777 | 1.279 |
| 24 | 35.216 | 6.150 | 0.065 | 3.151 | 3.2900 | 0.067 | 1.689 | 1.215 |
| 25 | 35.358 | 1.400 | 0.065 | 3.682 | 3.7430 | 0.061 | 1.807 | 1.300 |
| 26 | 35.500 | 1.520 | 0.065 | 3.684 | 3.8760 | 0.066 | 1.728 | 1.243 |
| 27 | 35.642 | 1.520 | 0.065 | 3.700 | 3.8900 | 0.067 | 1.702 | 1.224 |
| 28 | 35.784 | 1.040 | 0.065 | 3.767 | 3.9110 | 0.066 | 1.706 | 1.227 |
| 29 | 35.855 | 1.040 | 0.065 | 3.775 | 3.9100 | 0.064 | 1.755 | 1.262 |
| 30 | 35.926 | 0.000 | 0.065 | 3.895 | 3.9200 | 0.067 | 1.629 | 1.172 |
| 31 | 35.997 | 0.000 | 0.065 | 3.903 | 3.9240 | 0.068 | 1.603 | 1.153 |
| 32 | 36.068 | 0.000 | 0.065 | 3.910 | 3.9220 | 0.068 | 1.599 | 1.150 |
| 33 | 36.139 | 0.000 | 0.065 | 3.918 | 3.9390 | 0.068 | 1.603 | 1.153 |
| 34 | 36.210 | 0.000 | 0.065 | 3.926 | 3.9390 | 0.069 | 1.577 | 1.134 |
| 35 | 36.210 | 0.000 | 0.065 | 3.926 | 3.9410 | 0.062 | 1.755 | 1.263 |
| 36 | 36.210 | 0.000 | 0.065 | 3.926 | 3.9380 | 0.060 | 1.813 | 1.304 |
| 37 | 36.210 | 0.000 | 0.065 | 3.926 | 3.9735 | 0.064 | 1.715 | 1.234 |
| Average | | | | | | | 1.743 | 1.254 |

*: Calculated value using observed input and thickness

(5) 各手法の比較

上記(1)~(4)で得られた乾燥密度をまとめて Fig. 49 に示す。また、各測定手法のサイクルタイムを Table 41 に示す。このサイクルタイムは現場での測定時間を示しており、乾燥密度の算出には、砂置換法の場合には炉乾燥の時間などが別途必要となることに注意が必要である。乾燥密度の値は、砂置換法、RI 法および QTM では、顕著な差は観測されなかったが、レベル測量では、ばらつきが大きくなっている。

本試験で適用した 4 種類の手法を比較すると、砂置換法では採取試料の密度・含水比を直接測

定するために得られる値の信頼性は高いが、含水比の測定に時間を要する。また、現場での作業時間は、レベル測量<砂置換法、RI法<QTMとなり、レベル測量が有利であるが、得られる乾燥密度の値のばらつきが大きい。RI法、QTMおよびレベル測量は非破壊で比較的簡便に測定することができるが、レベル測量およびQTMでは含水比を別途測定するか、材料製作時の含水比を厳密に管理する必要がある。

以上を考慮すると、実際の処分場で、埋め戻し材の転圧締め固めの品質管理を行うことを想定すると、簡便に測定できること、測定後すぐに乾燥密度が得られることなどから、RI法が本試験で試行した手法の中では、もっとも適していると考えられる。また、レベル測量による管理は、短時間で測定が可能であることから、含水比一定の材料製作が可能ならば、実際の処分場でも十分に適用可能と考えられる。

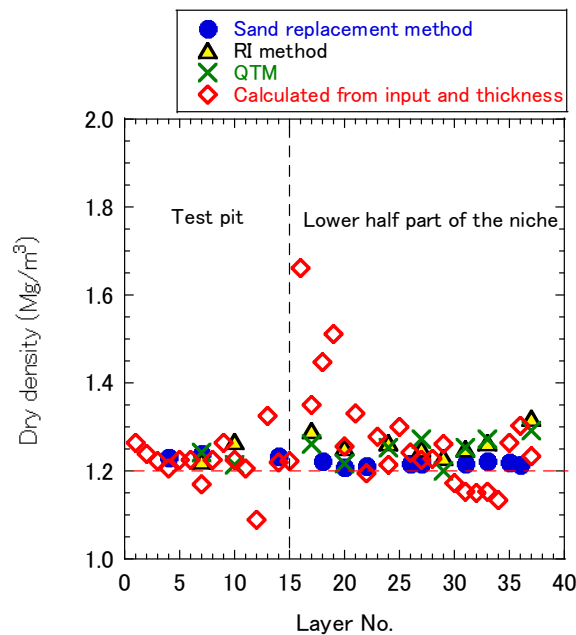


Fig. 49 Comparison the results of dry density using different methods

Table 41 Cycle time of every method

| Method | Time (min) | | | |
|-------------------------|-------------|------------------|---------|-------|
| | Preparation | Measuring | Cleanup | Total |
| Sand replacement method | 10 | 30 (3 points) | 5 | 45 |
| RI method | 28 | 12 (3 points) | 5 | 45 |
| QTM | 35 | 30 (3 point) | 5 | 70 |
| Level survey | 5 | 5 (9 points) | 5 | 15 |

6.6 埋め戻し材ブロック

6.6.1 施工

(1) 施工範囲

埋め戻し材ブロックは、転圧締め固めに用いたものと同様に製作した埋め戻し材を加圧成型して製作した³⁾。埋め戻し材ブロックは坑道上半部 (Fig. 3 参照) を対象とした。埋め戻し材ブロックは転圧締め固めをした面に設置することとなるため、表面に凹凸があると設置段数が増えた場合に、傾きなどによってブロック設置が困難になることが想定されたため、表面の微妙な凹凸を

ベントナイトとケイ砂の混合土（クニゲル V1:ケイ砂= 40:60 wt%）にて平滑になるように整地した。また、埋め戻し材ブロックの隙間が坑道の縦断方向へ連続しないように千鳥配置とし、吹付けコンクリートとの隙間は切断加工した埋め戻し材ブロックを充填することで隙間が 100 mm 以下となるようにした。隙間を埋めるために切断加工したブロックの寸法は、標準 (Type A) の 1/2 (Type B)、1/3 (Type C) および 2/3 (Type D) の 3 種類である。なお、100 mm 以下の隙間については、別材料による充填は行っていない。これは、埋め戻し材ブロックの膨潤圧を測定するために坑道壁面に設置した土圧計への擾乱を防ぐためである。製作した埋め戻し材ブロック仕様を Table 42 に示す。

Table 42 Specification of backfilling material block

| Item | | Specification |
|--|--------------------------|---------------|
| Dimension (mm) | Standard (Type A) | 300×300×100 |
| | 1/2 of standard (Type B) | 300×150×100 |
| | 1/3 of standard (Type C) | 300×100×100 |
| | 2/3 of standard (Type D) | 300×200×100 |
| Average water content rate (%) | | 32.3 |
| Average dry density (Mg/m ³) | | 1.356 |
| Average weight (kg, Type A) | | 16.23 |

(2) 埋め戻し材ブロックの設置

埋め戻し材ブロックは、既報³⁾で述べたように製作後、乾燥防止にラップ養生をした上で水分が凍結しないように定温倉庫にて 0℃以上の条件で保管した。保管期間は概ね 6 ヶ月程度であった。保管状況を Photo 75 に示す。施工時には、定温倉庫から東立坑建屋に搬入し、随時試験坑道 4 まで搬入した。東立坑建屋への搬入状況を Photo 76 に示す。



Photo 75 Storage situation



Photo 76 Temporary storage at the East access shaft

坑道および埋め戻し材ブロックの形状・寸法から、埋め戻し材ブロックの設置は 25 段、24 断面となり (Fig. 50)、数量は坑道奥側から奇数断面で 362 個、偶数断面で 376 個となった (Fig. 51)。総量は 8856 個 (切断加工したブロック数も含む) となり、全て手作業にて設置した。設置手順は、坑道中心部から標準のブロック (Type A) を設置していき (Photo 77)、坑道壁面部分は切断加工したブロック (Type B,C,D : Fig. 51) を設置した。また、状況に応じて角を削ったブロックを使用した (Photo 78)。

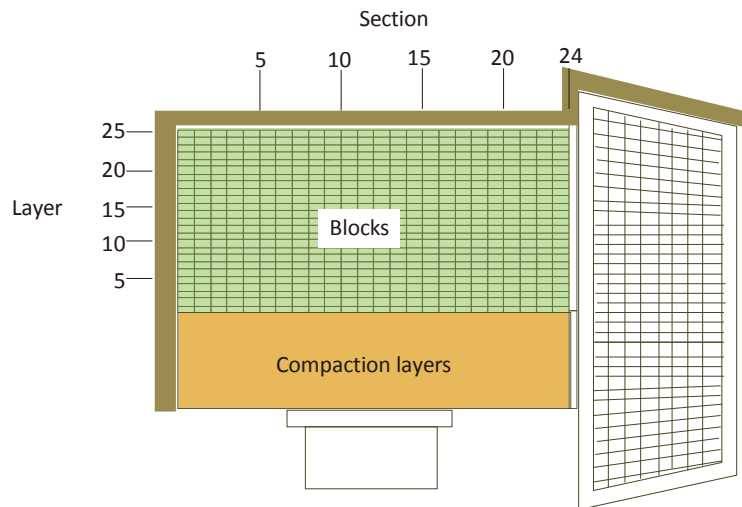


Fig. 50 Number of backfilling material blocks (cross section)

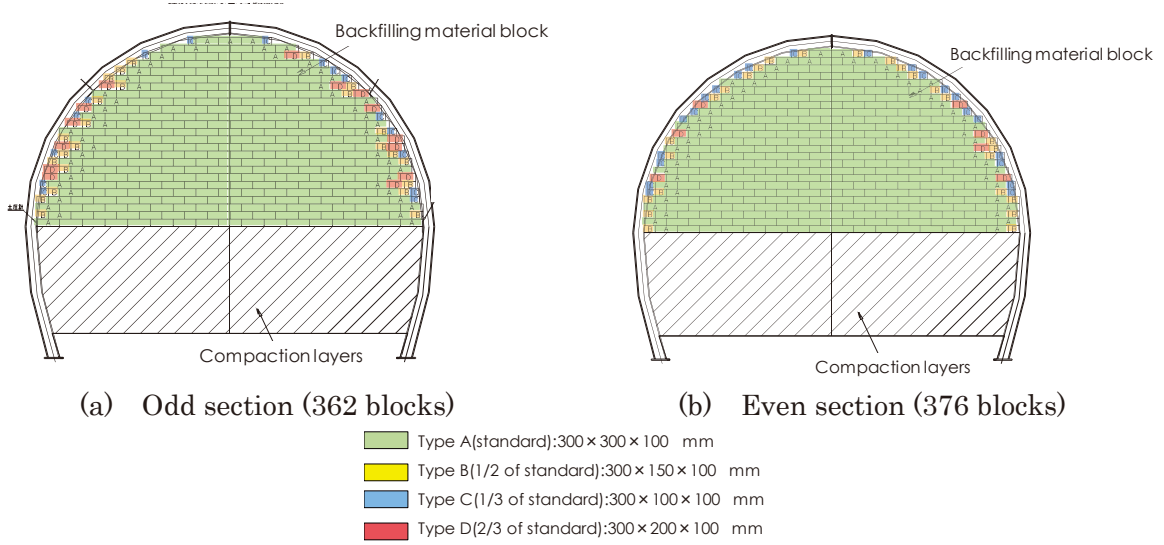


Fig. 51 Number of backfilling material blocks (vertical section)



Photo 77 1st layer blocks setting



Photo 78 Setting blocks cutting of edge

施工においては、崩落を防ぐために坑道奥側から階段状に随時設置することとした（Photo 79 および Photo 80）。Fig. 52 に 1 日（昼夜作業）ごとの設置実績を、設置完了の状況を Photo 81 に示す。また、ブロック設置後は崩落防止およびコンクリート打設時の内型枠として鋼製の隔壁を設置した（Photo 82）。また、この隔壁にて、埋め戻し材ブロックと坑道壁面の隙間へのコンクリート材料の流入を防止している。

実際の処分場においても、コンクリートプラグを設置する場合には、埋め戻し材と坑道の隙間にコンクリートが流入することを防止するため、また埋め戻し材の崩落防止などの作業の安全性の観点から、内型枠が必要となると考えられる。一方、カナダにおけるトンネルシーリング性能試験では、粘土プラグの移動、膨出を抑制する目的で坑道の開放側に鋼製の隔壁を設置した実績があり²⁾、十分な強度が確保されれば、鋼製の隔壁などの金属材料を力学プラグとして使用することも考えられる。



Photo 79 Setting situation (until 5th section, 25 layers)



Photo 80 Setting situation (18th section, 25 layers~20th section, 20 layers)

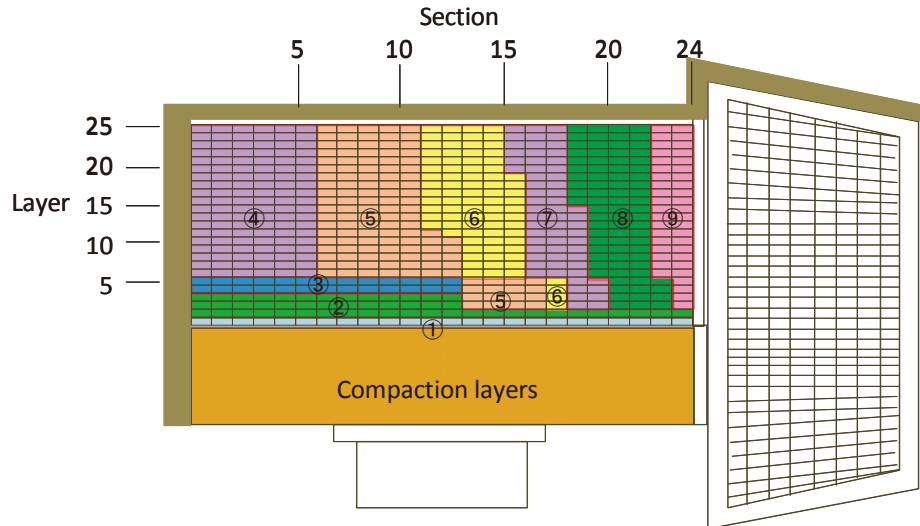


Fig. 52 Sequence of setting backfilling material blocks



Photo 81 Completion setting blocks



Photo 82 Setting a partition wall

Fig. 52 に示した、作業日（昼方、夜方）あたりの設置個数を Table 43 に示す。昼夜 2 交替で 9 日間の作業を行い、合計で 8774 個のブロックを設置した。これは実際の坑道形状に合わせた設置個数の実績であり、設計個数 8856 個の 99.1 % と、その誤差は 1 % 未満であることから、設計通りに施工できたことを確認した。

Table 43 Number of setting blocks per day

| Day* | Shift | Type A | Type B | Type C | Type D | Total |
|-------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|
| ① | Day | 132 | 8 | 0 | 0 | 420 |
| | Night | 264 | 16 | 0 | 0 | |
| ② | Day | 396 | 24 | 0 | 0 | 875 |
| | Night | 429 | 26 | 0 | 0 | |
| ③ | Day | 396 | 45 | 34 | 8 | 1074 |
| | Night | 513 | 30 | 27 | 21 | |
| ④ | Day | 266 | 24 | 24 | 12 | 976 |
| | Night | 532 | 48 | 48 | 22 | |
| ⑤ | Day | 649 | 39 | 44 | 33 | 1740 |
| | Night | 832 | 63 | 52 | 28 | |
| ⑥ | Day | 386 | 34 | 33 | 18 | 1131 |
| | Night | 561 | 41 | 37 | 21 | |
| ⑦ | Day | 389 | 29 | 16 | 16 | 864 |
| | Night | 331 | 36 | 35 | 12 | |
| ⑧ | Day | 280 | 17 | 17 | 12 | 1098 |
| | Night | 640 | 57 | 52 | 23 | |
| ⑨ | Day | 212 | 18 | 12 | 13 | 596 |
| | Night | 289 | 23 | 22 | 7 | |
| Total | | | | | | 8774 |

*: Refer to Fig. 52.

6.6.2 品質管理

(1) 寸法および重量

埋め戻し材ブロックの品質管理については、含水比、寸法などを製作時に確認しているが³⁾、設置時に無作為抽出により、寸法、重量の確認を実施した。設計基準値を Table 44 に、寸法の確認状況を Photo 83 に示す。確認結果から、埋め戻し材ブロックには変形、ひび割れなどはなく、保管方法（ラップ養生の上、定温保管）が適切であったと考えられる。

Table 44 Specification of blocks (dimension and weight)

| Type of block | Dimension (mm) | Weight (kg) |
|--------------------------|----------------|-------------|
| Standard (Type A) | 300×300×100 | 16.25 |
| 1/2 of standard (Type B) | 300×150×100 | 8.16 |
| 1/3 of standard (Type C) | 300×100×100 | 5.42 |
| 2/3 of standard (Type D) | 300×200×100 | 10.83 |



(a) Type A



(b) Type B



(c) Type C



(d) Type D

Photo 83 Confirmation of specification of backfilling material block

(2) 設置寸法（出来形）

埋め戻し材ブロックの設置後の品質管理として、出来形の確認を行った。確認項目は、ブロック設置の延長、設置幅、積み上げ高さおよび坑道壁面とブロックとの隙間長さである。それぞれの設計値および測定値を Table 45 から Table 48 に示す。坑道壁面との隙間の設計値は上記 Type C のブロック寸法から側壁で 100 mm 以下とし、天端部分は坑道形状が複雑となるため設計値は特に設けなかった。表中の Section No.および Layer No.は Fig. 50 の通りである。出来形の確認状況を Photo 84 から Photo 86 に示す。また、天端部分の坑道壁面との隙間の測定位置を Fig. 53 に示した。

出来形確認の結果、設計値と測定値の誤差は最大でも 1 %程度であり、埋め戻し材ブロックが適切に設置されたことを確認した。

本試験では、試験坑道および周回坑道における作業空間などの制約から、人力での設置を前提にブロックの設計・製作を実施したが^{3),16)}、実際の処分場で埋め戻し材ブロックを施工する場合には埋め戻す坑道が長大となることから、作業効率の観点から、ある程度大きなブロックを重機により設置していくことが考えられる。その場合、坑道形状およびブロックの形状との兼ね合いから、ブロックと坑道壁面の隙間も大きくなることが予想され、適切な充填材料・施工方法の検討が課題として挙げられる。

Table 45 Length of setting blocks

| Section No. | Layer No. | Design value (m) | Measured value (m) | Difference (m) |
|-------------|-----------|------------------|--------------------|----------------|
| 1-5 | 6 | 1.45 | 1.45 | ±0.0 |
| 6-13 | 5 | 2.40 | 2.40 | ±0.0 |
| 14-23 | 2 | 3.00 | 3.00 | ±0.0 |
| 24 | 1 | 0.28 | 0.28 | ±0.0 |

Table 46 Width of setting blocks

| Section No. | Layer No. | Design value (mm) | Measured value (mm) | Difference (mm) |
|-------------|-----------|-------------------|---------------------|-----------------|
| 9 | 5 | 5000 | 4970 | -30 |
| 15 | 25 | 1250 | 1260 | +10 |
| 16 | 17 | 3900 | 3900 | ±0 |
| 18 | 6 | 4900 | 4900 | ±0 |
| 19 | 15 | 4000 | 4030 | +30 |
| 20 | 6 | 4900 | 4920 | +20 |
| 23 | 2 | 5000 | 5000 | ±0 |



(a) Length (Section 13-24, Layer 2)



(b) Width (Section 9, Layer 5)

Photo 84 Measuring length and width of setting blocks

Table 47 Height of setting blocks

| Section No. | Layer No. | Design value (mm) | Measured value (mm) | Difference (mm) |
|-------------|-----------|-------------------|---------------------|-----------------|
| 1-5 | 6 | 100 | 100 | ±0 |
| 5-13 | 3-5 | 300 | 300 | ±0 |
| 24 | 1-2 | 200 | 200 | ±0 |
| 15 | 18-25 | 800 | 805 | +5 |
| 16 | 7-17 | 1100 | 1105 | +5 |
| 18 | 4-6 | 300 | 300 | ±0 |
| 19 | 3-4 | 200 | 200 | ±0 |
| 19 | 7-15 | 900 | 905 | +5 |
| 18 | 16-25 | 1000 | 1000 | ±0 |
| 20 | 3-6 | 400 | 400 | ±0 |
| 23 | 3-25 | 2300 | 2320 | +20 |



(a) Section 16, Layer 7-17



(b) Section 23, Layer 3-25

Photo 85 Measuring height of setting blocks

Table 48 Clearance between block and niche wall

| Section No. | Layer No. | Design value (mm) | Measured value (mm) | | Remarks |
|-------------|-----------|-------------------|---------------------|-------------------------|------------|
| 9 | 5 | <100 | Left side | 95 | Side wall |
| 16 | 17 | <100 | Right side | 20 | |
| | | | Left side | 30 | |
| 18 | 6 | <100 | Right side | 70 | |
| | | | Left side | 60 | |
| 15 | 25 | - | Upside | 50 | Crown wall |
| 15 | 25 | - | Right side | Height 130 | |
| | | | | Width 350 | |
| 15 | 24 | - | Right side | Height 130 | |
| | | | | Width 250 | |
| 15 | 23 | - | Right side | Height 130 Width 250 | |

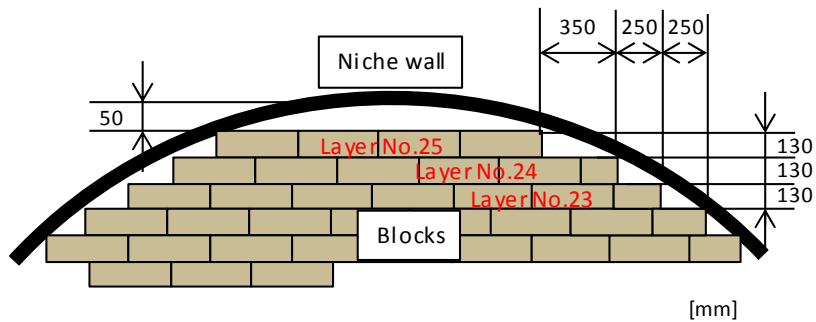


Fig. 53 Clearance between blocks and niche wall (crown)



(a) Section 9, Layer 5 (left side)



(b) Section 15, Layer 25 (upside)



(c) Section 15, Layer 24 (right side)
Photo 86 Measuring clearance

7. コンクリートプラグ

7.1 要求性能

地層処分で使用されるプラグには、止水プラグおよび力学プラグが想定されている²⁾。このうち、止水プラグではベントナイトなどの粘土材料を使用し、湧水量の多い割れ目を挟み込むように設置することで、緩衝材や埋め戻し材の流出を抑制することが考えられている。一方、力学プラグではコンクリート材料を使用し、処分坑道から主要坑道への緩衝材または埋め戻し材の移動、流出を防止することが考えられている。

人工バリア性能確認試験におけるプラグについては、試験区間が短く、区間内に湧水量の多い割れ目が存在しないことから、止水プラグは設置せずに力学プラグとしてコンクリートプラグのみを設置し、埋め戻し材の坑道への膨出を抑止することとした。しかしながら、本試験では試験孔および埋め戻し材部に注水することから、プラグ躯体および周辺岩盤との境界部からの漏水が生じない程度の止水性は必要となる。そのため、試験期間中にプラグ躯体を貫通するようなひび割れが発生しないことを解析的に確認するとともに、プラグ躯体および周辺岩盤との境界部からの漏水を防止するためにコンタクトグラウト（7.6 参照）を施工することとした。以下に、本試験におけるコンクリートプラグへの要求性能を示す^{18), 19)}。

- ① 止水性：周辺岩盤と一体となり止水性を確保する。
- ② 構造安定性：周辺岩盤と一体となり水圧や膨潤圧に耐えられる。
- ③ 体積安定性：収縮が少なくプラグ躯体と周半岩盤との境界部周辺域やプラグ躯体内部に水みち等を形成することがない。
- ④ 施工性、品質安定性：確実にコンクリート材料を充填でき、施工中や凝結前に材料分離もなく、均質で連続した硬化体を構築できる。
- ⑤ 化学的安定性：岩盤や人工バリアに長期間化学的影響を与えることが少ない。

上に挙げたような要求性能を満たすためにはコンクリートの特性として、低透水性、ひび割れ抑制、ブリーディング抑制、高強度、高弾性（剛性）、低発熱、低収縮、高流動性、高充填性、低アルカリ性などが求められる。

地層処分の力学プラグとしては、施工したプラグは坑道に残置されることになる。このため、上記要求性能のうち特に⑤化学的安定性、すなわち低アルカリ性が重要となることから、人工バリア性能確認試験においては、原子力機構が開発した低アルカリ性セメント（Highly Fly-ash contained Silica-fume Cement、以下 HFSC）を用いた高流動コンクリートを使用した。

7.2 使用材料および配合

使用する HFSC の配合は、幌延 URL の原位置施工確認試験にて吹付けコンクリートおよび覆工コンクリートとして施工実績のある HFSC424（普通セメント：シリカフューム：フライアッシュ＝40:20:40 wt%）とし²⁰⁾、普通セメントにはプラグに要求される低発熱性を考慮して低熱ポルトランドセメント（LPC）を使用した。使用材料を Table 49 に示す。LPC 以外の材料は、幌延 URL の建設に使用したコンクリート材料と同等のものとした。

Table 49 に示した材料を用いて、事前に室内試験で配合検討を行った¹⁹⁾。検討した配合の範囲を Table 50 に、選定した代表配合を Table 51 に示す。

Table 49 Materials of concrete type plug

| Material | Designation | Company, production area | Density (g/cm ³) |
|--|-------------|--|------------------------------|
| Low-heat cement | LPC | Taiheiyo Cement Corporation | 3.22 |
| Silicafume | SF | Elkem Japan | 2.22 |
| Fly ash | FA | Hokuden kogyo co., LTD, JIS II | 2.25 |
| Expansive component | Ex | Taiheiyo Material Corporation | 3.09 |
| Fine aggregate | S | Sand, Horonobe-cho Hamasato | 2.67 |
| Coarse aggregate | G | Sand, Horonobe-cho Hamasato, Gmax:20mm | 2.70 |
| High-performance AE water reducing agent | SP | BASF Pozzoloth Ltd. | 1.065 |

Table 50 Considered range of composition of concrete type plug

| W/B (%) | s/a (%) | Unit weight (kg/m ³) | | | | | | | |
|-----------|-----------|----------------------------------|---------|--------|---------|----|---------|---------|-----------|
| | | W | B | | | | S | G | SP |
| | | | LPC | SF | FA | Ex | | | |
| 29.0-35.0 | 46.4-50.0 | 165-175 | 195-226 | 98-113 | 195-226 | 20 | 694-812 | 774-836 | 7.62-9.36 |

W: water, s/a: sand percentage, LPC:SF:FA = 40:20:40 wt% (HFSC424)

Table 51 Composition of concrete type plug

| W/B (%) | s/a (%) | Air content (%) | Slump flow (mm) | Unit weight (kg/m ³) | | | | | | | |
|---------|---------|-----------------|-----------------|----------------------------------|-----|----|-----|----|-----|-----|---------------------------|
| | | | | W | B | | | | S | G | SP |
| | | | | | LPC | SF | FA | Ex | | | |
| 32.5 | 47.9 | 4.5 | 650±50 | 165 | 195 | 98 | 195 | 20 | 760 | 837 | 8.38~8.64 (B×1.65~1.70 %) |

W: water, s/a: sand percentage

7.3 実機試験練り

選定した代表配合 (Table 51) を用いて、幌延 URL のコンクリートプラント (Photo 87) を用いた実機試験練りを実施した。この実機試験練りによって、その基礎物性と施工性を確認するために以下の試験を実施し、施工に用いる最終配合を確定した。また、製造時の練り混ぜ容量や時間、粉体材料投入順序などの確認も合わせて行った。

- ・実施した試験
- フレッシュ性状
 - ・スランプフロー (JIS A 1150)
 - ・空気量 (JIS A 1128)
 - ・O ロート流下試験 (JSCE-F512)
 - ・U 型充填性試験 (JSCE-F511)
 - ・温度
- 硬化後性状
 - ・圧縮強度試験 (JIS A 1108)
 - ・割裂引張強度試験 (JIS A 1113)

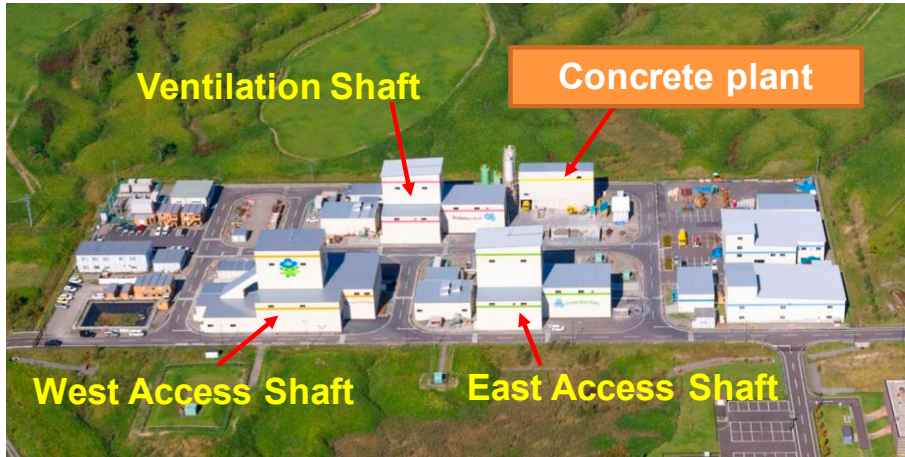


Photo 87 Concrete plant at Horonobe URL

7.3.1 フレッシュ性状

試験練りで確認するフレッシュ性状として、スランプフローの測定、空気量の確認、O ロート流下試験、U 型充填性試験および温度の測定を実施した。試験の実施状況を Photo 88 から Photo 92 に、試験結果を Table 52 に示す。また、品質確認状況を Photo 93 に示す。フレッシュ性状の確認結果から、1 回目はスランプフローと U 型充填性試験で基準を下回ったが、2 回目には全て規準値を満たしており、実機によりプラグ打設に適当なコンクリートが製作できることを確認した。



Photo 88 Mixing



Photo 89 Slump flow



Photo 90 Air content



Photo 91 O-funnel flow test



Photo 92 U-shaped filling test

Table 52 Properties of fresh concrete

| | Results | | Value of standard | Standard test method |
|------------------------------|---------|---------|---|----------------------|
| | No.1 | No.2 | | |
| Slump flow (mm) | 630×630 | 680×655 | 675 ± 25×675 ± 25 (rough standard) | JIS A 1150 |
| Air content (%) | 4.4 | 3.5 | 4.5 ± 1.5 | JIS A 1128 |
| O-Funnel flow test (s) | 6.5 | 3.4 | — | JSCE-F512 |
| U-shaped filling test (mm) | 285 | 356 | Over 300 (Rank 1) | JSCE-F511 |
| Temperature of concrete (°C) | 18 | 18 | Cold weather concrete: 5-20 Hot weather concrete: ≤ 35 | - |



Photo 93 Quality inspection

7.3.2 硬化後性状

硬化後性状として、圧縮強度試験を実施した。試験練りにて作製した円柱供試体に対して、一軸圧縮強度試験および割裂引張強度試験を実施した。供試体製作状況を Photo 94 に、試験結果を Table 53 に示す。一軸圧縮強度は、材齢 91 日以内に 50 N/mm^2 以上と設定したが、材齢 28 日の時点で 63 N/mm^2 を示し、その後も強度が増進している傾向が見られた (Fig. 54)。



Photo 94 Test pieces

Table 53 Results of strength test

| | Age (day) | Value of standard (N/mm ²) | Measured value (N/mm ²) | Standard test method |
|-------------------------------|-----------|--|-------------------------------------|----------------------|
| Uniaxial compressive strength | 7 | 50 (until 91days) | 26.6 | JIS A 1108 |
| | 28 | | 63.0 | |
| | 56 | | 79.2 | |
| | 91 | | 87.6 | |
| | 182 | | 97.8 | |
| Splitting tensile strength | 7 | (参考値) | 2.55 | JIS A 1113 |
| | 28 | | 4.60 | |
| | 91 | | 6.31 | |

*: Average 3 tests

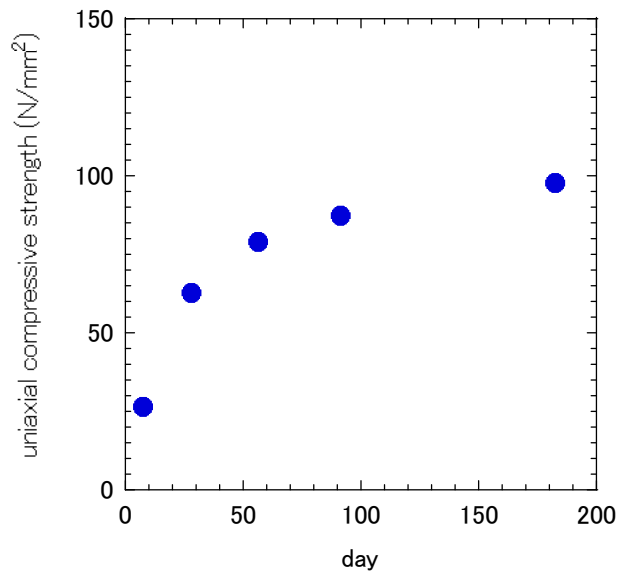


Fig. 54 Uniaxial compressive strength

一軸圧縮強度試験の実施状況、品質確認状況および結果の一覧を Photo 95 から Photo 97 に示す。



Photo 95 Uniaxial compressive strength test



Photo 96 Quality inspection of strength (28 day)

| | | | | |
|---------------------------------|------------|--------------------------|------------------------------|----------|
| 工事件名 幌延深地層研究計画 地下研究施設整備(第二期)等事業 | | | | |
| 立坑 アラコンクリート 圧縮強度試験 | | | | |
| (位置 GL- m ~ GL- m) | | | | |
| 配合: 50-65-20 HFSC 試験練 | | | | |
| 採取年月日 | 平成26年5月27日 | 材齢 | | |
| 試験年月日 | 平成26年6月3日 | 7日 | | |
| No | 荷重 (KN) | 圧縮強度(N/mm ²) | 平均 | 養生方法 |
| 1 | 213 | 27.1 | 26.6 (N/mm ²) | 現場 標準 |
| 2 | 206 | 26.2 | | |
| 3 | 209 | 26.6 | | |
| 施工者 大成・大林・三井住友JV 立会者 中山氏 | | | | |

(a) 7 day

| | | | | |
|---------------------------------|------------|--------------------------|------------------------------|----------|
| 工事件名 幌延深地層研究計画 地下研究施設整備(第二期)等事業 | | | | |
| 立坑 アラコンクリート 圧縮強度試験 | | | | |
| (位置 GL- m ~ GL- m) | | | | |
| 配合: 50-65-20 HFSC 試験練 | | | | |
| 採取年月日 | 平成26年5月27日 | 材齢 | | |
| 試験年月日 | 平成26年6月24日 | 28日 | | |
| No | 荷重 (KN) | 圧縮強度(N/mm ²) | 平均 | 養生方法 |
| 1 | 512 | 65.2 | 63.0 (N/mm ²) | 現場 標準 |
| 2 | 506 | 64.4 | | |
| 3 | 486 | 59.3 | | |
| 施工者 大成・大林・三井住友JV 立会者 | | | | |

(b) 28 day

| | | | | |
|---------------------------------|------------|--------------------------|------------------------------|----------|
| 工事件名 幌延深地層研究計画 地下研究施設整備(第二期)等事業 | | | | |
| 350m水平坑道 コンクリート 圧縮強度試験 | | | | |
| 位置(人工バリア仕上り試験 アラコンクリート) | | | | |
| 配合: 50-65-20 L 試験練 | | | | |
| 採取年月日 | 平成26年5月27日 | 材齢 | | |
| 試験年月日 | 平成26年7月22日 | 56日 | | |
| No | 荷重 (KN) | 圧縮強度(N/mm ²) | 平均 | 養生方法 |
| 1 | 594 | 75.6 | 79.7 (N/mm ²) | 現場 標準 |
| 2 | 653 | 83.1 | | |
| 3 | 620 | 78.9 | | |
| 施工者 大成・大林・三井住友JV 立会者 | | | | |

(c) 56 day

| | | | | |
|---------------------------------|------------|--------------------------|------------------------------|----------|
| 工事件名 幌延深地層研究計画 地下研究施設整備(第二期)等事業 | | | | |
| 350m水平坑道 コンクリート 圧縮強度試験 | | | | |
| 位置(人工バリア仕上り試験 アラコンクリート) | | | | |
| 配合: 50-65-20 L 試験練 | | | | |
| 採取年月日 | 平成26年5月27日 | 材齢 | | |
| 試験年月日 | 平成26年8月26日 | 91日 | | |
| No | 荷重 (KN) | 圧縮強度(N/mm ²) | 平均 | 養生方法 |
| 1 | 775 | 98.7 | 87.6 (N/mm ²) | 現場 標準 |
| 2 | 830 | 80.2 | | |
| 3 | 658 | 83.8 | | |
| 施工者 大成・大林・三井住友JV 立会者 | | | | |

(d) 91 day

| | | | | |
|---------------------------------|-------------|--------------------------|------------------------------|----------|
| 工事件名 幌延深地層研究計画 地下研究施設整備(第二期)等事業 | | | | |
| 350m水平坑道 コンクリート 圧縮強度試験 | | | | |
| 位置(人工バリア仕上り試験 アラコンクリート) | | | | |
| 配合: 50-65-20 L 試験練 | | | | |
| 採取年月日 | 平成26年5月27日 | 材齢 | | |
| 試験年月日 | 平成26年11月25日 | 182日 | | |
| No | 荷重 (KN) | 圧縮強度(N/mm ²) | 平均 | 養生方法 |
| 1 | 798 | 102 | 97.8 (N/mm ²) | 現場 標準 |
| 2 | 718 | 91.4 | | |
| 3 | 788 | 100 | | |
| 施工者 大成・大林・三井住友JV 立会者 | | | | |

(e) 182 day

Photo 97 Results of uniaxial compressive strength test

7.3.3 採用配合

幌延 URL のコンクリートプラントを用いて実施した試験練りの結果（7.3.1 および 7.3.2 ）から、今回、配合設計したコンクリートの性状は、プラグ部に打設施工するコンクリートとして十分な品質であることが確認され、検討した配合をコンクリートプラグの採用配合と決定した。Table 54 に採用配合を示す。

Table 54 Adopted composition of concrete type plug

| W/B (%) | s/a (%) | Air content (%) | Slump flow (mm) | Unit weight (kg/m ³) | | | | | | | |
|---------|---------|-----------------|-----------------|----------------------------------|-----|----|-----|----|-----|-----|--------------------|
| | | | | W | B | | | | S | G | SP |
| | | | | | LPC | SF | FA | Ex | | | |
| 32.5 | 47.9 | 4.5 | 650±50 | 165 | 195 | 98 | 195 | 20 | 760 | 837 | 6.86 (B×1.35 %) |

W: water, s/a: sand percentage

7.4 施工

7.4.1 施工計画および型枠の設置

(1) 計画概要

プラグ施工の概略手順を以下に示すとともに、フローチャートを Fig. 55 に示す。

- ①底盤整形・清掃
- ②鉄筋・架台・ベントナイトストリップス・グラウトストッパーの設置
- ③コンタクトグラウト配管、計測機器の設置
- ④コンクリート打設用配管、型枠、外部足場の設置
- ⑤コンクリート打設（一括打設）
- ⑥脱型、計測器設置
- ⑦コンタクトグラウト（コンクリートの収縮が収束した後）

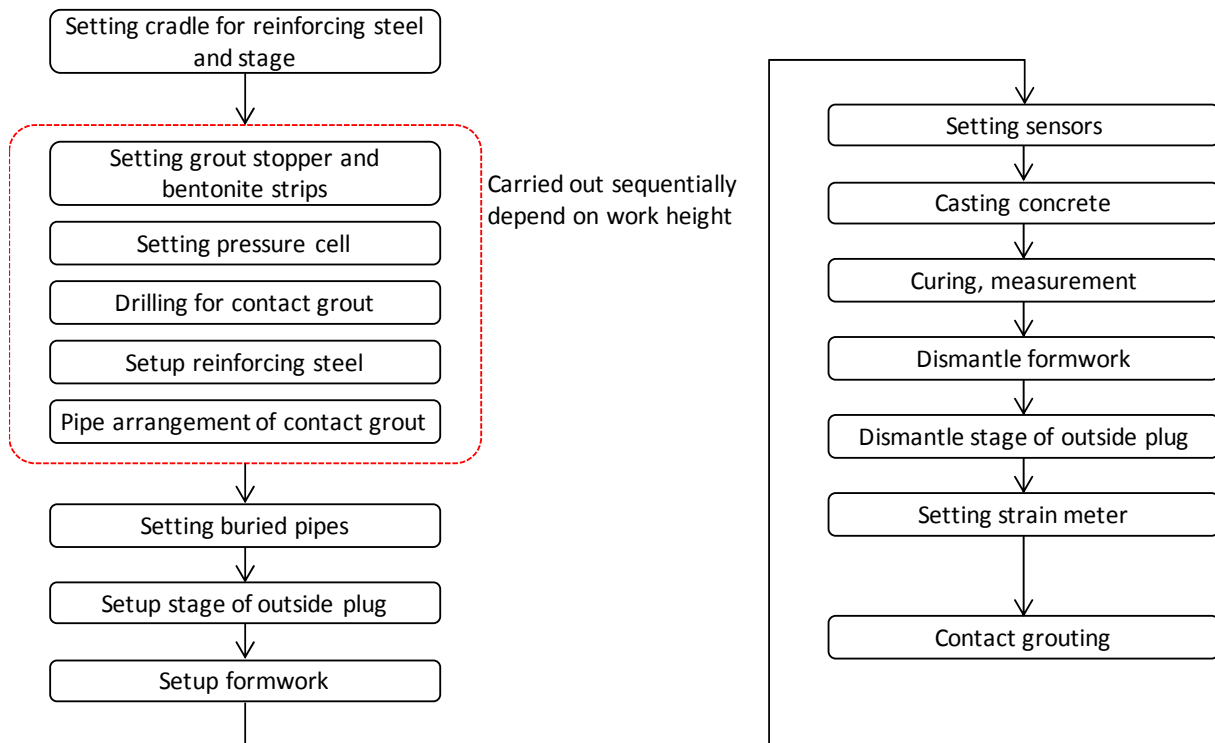


Fig. 55 Flowchart of casting plug concrete and contact grouting

(2) 型枠等の設置

(i) 鉄筋架台兼用足場設置

鋼材 (L-65×65×8) を井桁に組み、溶接もしくはボルトにて接合し、端部は既設支保工などに固定した。中央部には昇降用の階段梯子を設置し、組み上げた架台に足場板を敷設し、内部作業用足場と兼用とした。鉄筋架台兼用足場の計画図を Fig. 56 に示す。

(ii) グラウトストッパー・ベントナイトストリップスの設置

グラウトストッパーは、プラグコンクリート打設後のコンタクトグラウト施工時における、グラウト材料のプラグ表面へのリーク防止を目的として設置した。このグラウトストッパーは、L字の鋼材 (L-50×50×6×200) であり、コンクリートの収縮によって発生する岩盤または吹付け面とプラグコンクリートの隙間が連続しないように岩盤および吹付けコンクリート面にアンカーで固定した。

一方、ベントナイトストリップスは、加圧注水を行った場合にプラグと岩盤の境界部からの漏水を防止する目的で設置した。ここで使用したベントナイトストリップスは、ベントナイトを使用した止水材 (クニシール C31) であり、岩盤および吹付け面に釘で固定しながら設置した。

グラウトストッパーおよびベントナイトストリップスの設置位置および設置イメージを Fig. 57 に、設置状況を Photo 98 に示す。

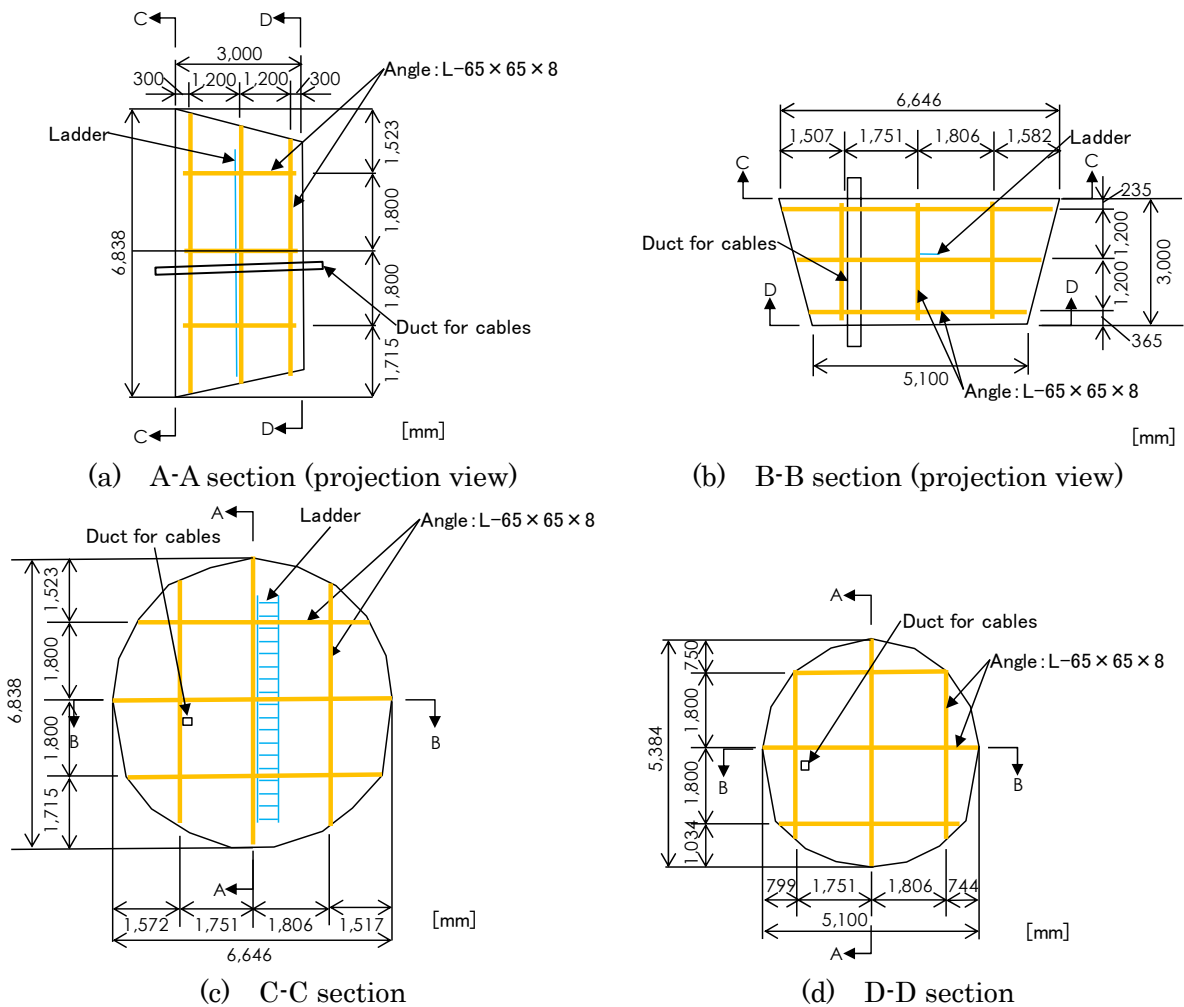
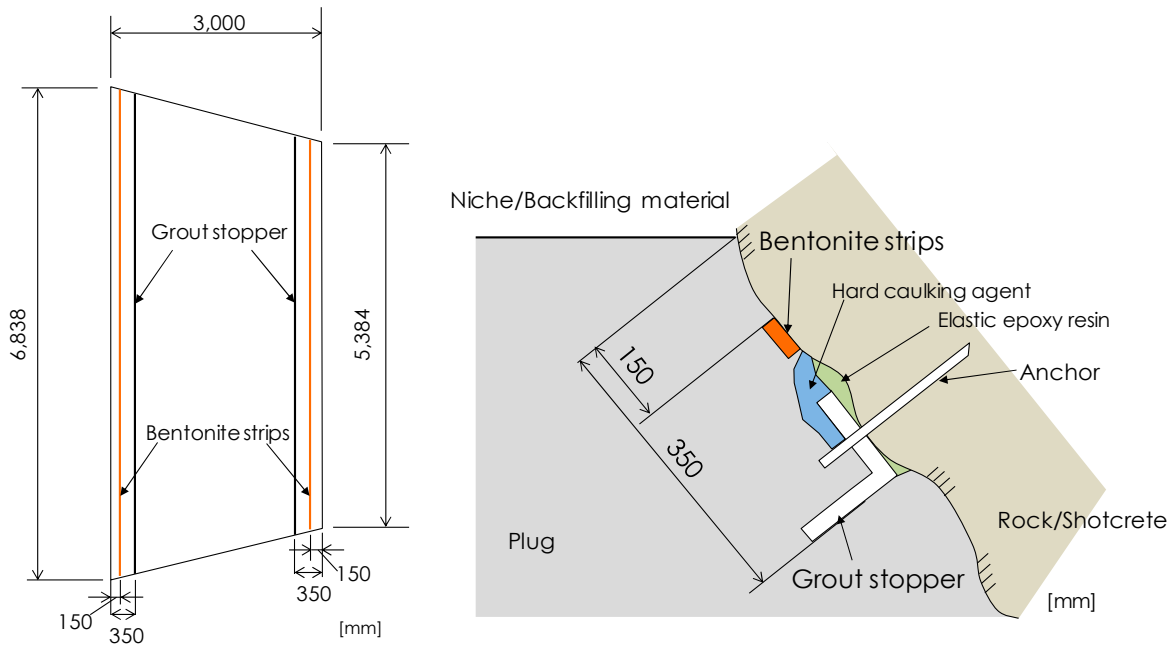


Fig. 56 Cradle for reinforcing steel and stage



(a) Design of setting (side view) (b) Illustration of setting
 Fig. 57 Grout stopper and bentonite strips



(a) Bentonite strips (b) Grout stopper
 Photo 98 Setting bentonite strips and grout stopper

(iii) 計測センサーおよびグラウト用配管の設置

プラグ設置前に土圧計を Section-B に設置した (Fig. 38)。設置状況を Photo 99 に示す。設置位置および数量については、6.3.1 にて、埋め戻し材部分へ設置の計測センサーと合わせて示したので、ここでは省略する (Table 29 および Fig. 38)。

プラグコンクリート打設後のコンタクトグラウトに備えて、坑道壁面に削孔し、グラウトの注入管を設置した。注入管は上半部と下半部の 2 系統とし、さらにプラグの奥側、手前側の 2 断面に配置した (Fig. 58)。削孔深さは坑道周辺の掘削影響領域を分断するように 1000 mm とし、もっとも収縮の影響が大きいと考えられる天端部のみ 1500 mm とした。



(a) Setting pressure cell



(b) After setting

Photo 99 Setting pressure cell before casting plug

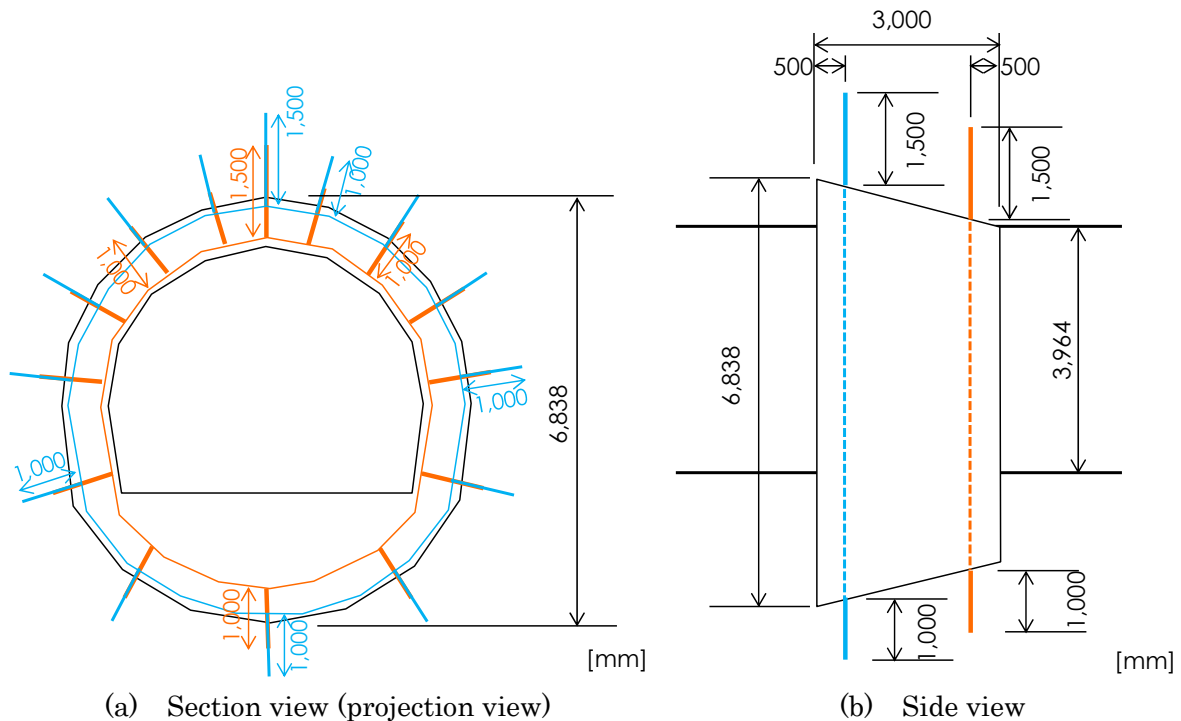


Fig. 58 Pipe arrangement for contact grouting

(iv) 鉄筋組立、コンクリート配管設置

鉄筋は埋め戻し側より順次組み立てた。組立作業時には、計測ケーブルの貫通ダクト、埋設配管などに損傷を与えないように留意し、坑道側には通り抜け用の開口部を設け、打設終盤に閉口できるように鉄筋を配置した。鉄筋組立の作業状況を Photo 100 に示す。

鉄筋組立と並行して、コンクリート打設用の配管を随時設置した。コンクリート打設配管およびコンクリートベント管を固定金具、溶接にて架台に堅固に固定した。打設配管およびベント管の配置図を Fig. 59 に、設置状況を Photo 101 に示した。

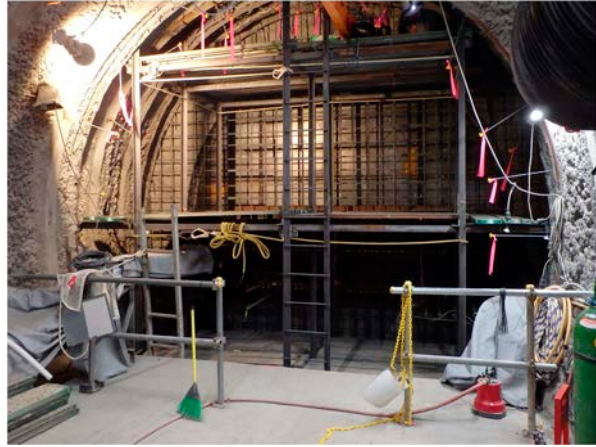
(v) 型枠組立および型枠控え鋼材の設置

プラグの坑道側（手前側）に合板（厚さ 12 mm、2 枚重ね）を用いて型枠を設置した。埋め戻し材側（奥側）は、埋め戻し材設置時に使用した土留め壁（Photo 82）を利用し、内型枠とした。貫通配管と合板の隙間は、プラグ内部からコーキング剤を用いて閉塞した。また、岩盤または吹付けコンクリート面との境界部についても同様の処理を実施した。また、型枠には鉄筋同様に通

り抜け用の開口部を設けておき、打設終盤に閉口することとした。型枠の設計図面および設置状況を Fig. 60 および Photo 102 に示す。



(a) Setting reinforcing steel (1)



(b) Setting reinforcing steel (2)



(c) Setting reinforcing steel (3)



(d) Setting reinforcing steel (4)

Photo 100 Setting reinforcing steel

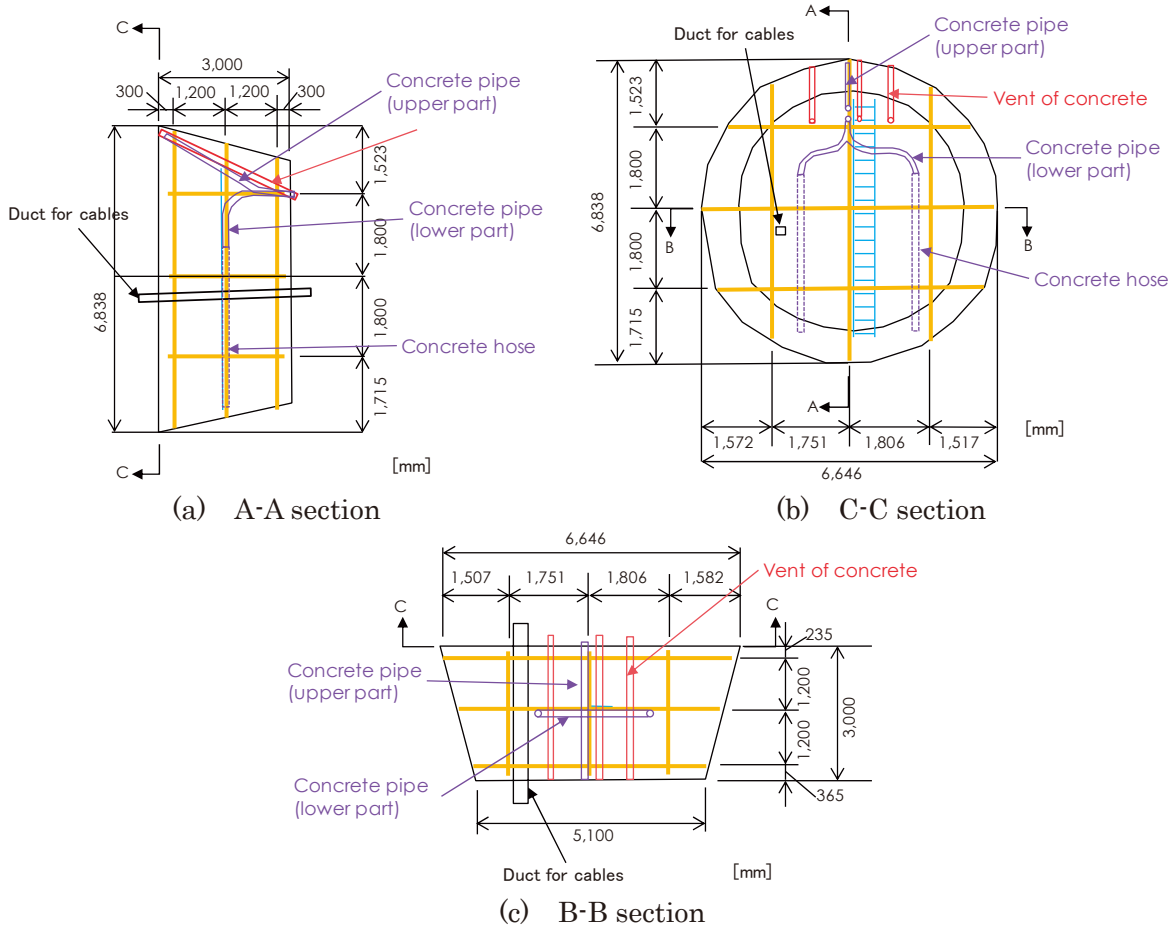
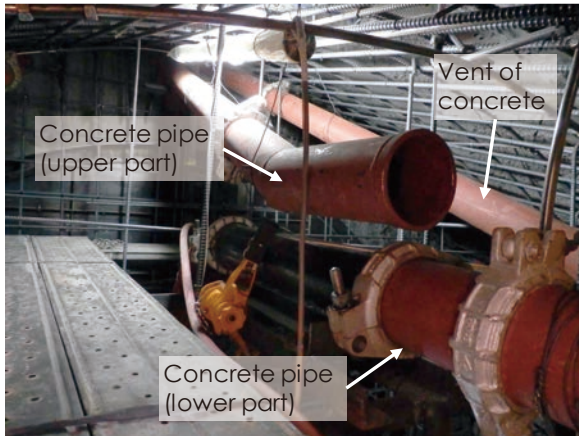
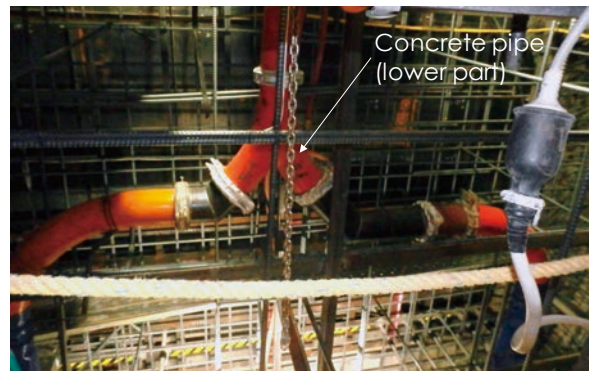


Fig. 59 Setting design of concrete pipe (projection view)



(a) Upper part



(b) Lower part

Photo 101 Setting concrete pipe and vent of concrete

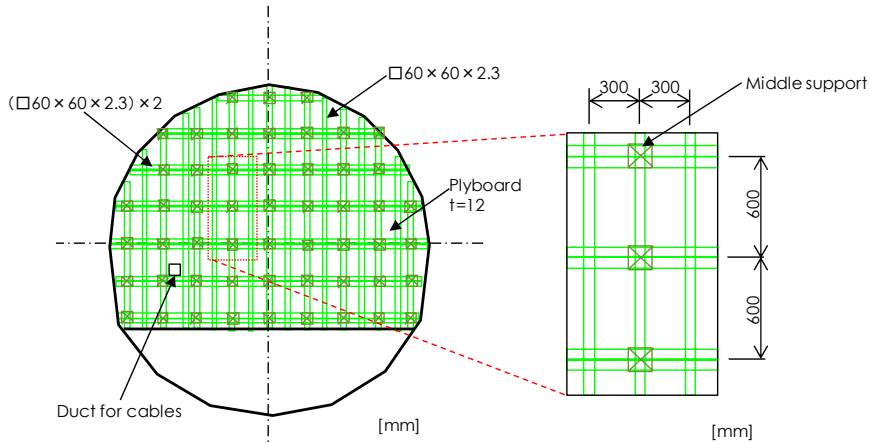


Fig. 60 Design of formwork

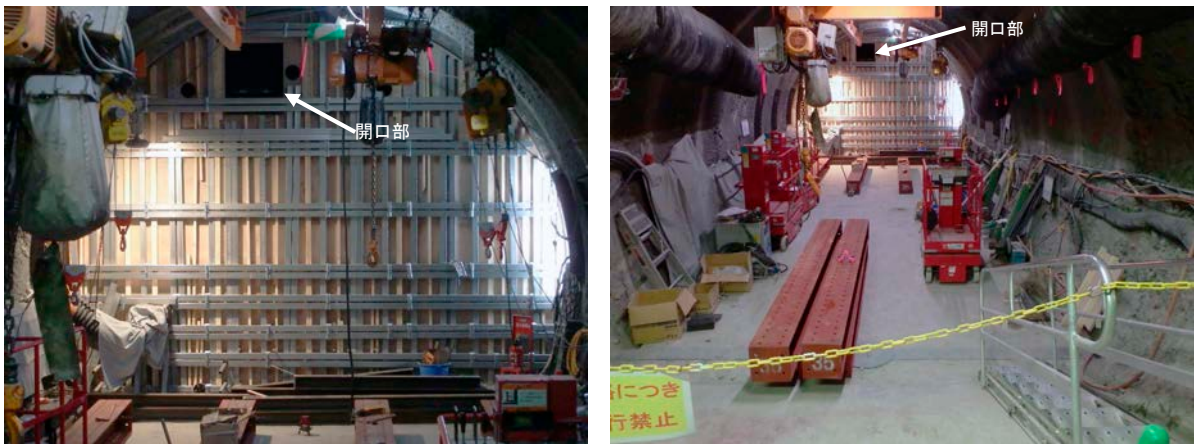


Photo 102 Setup formwork

型枠構築後に、コンクリート打設による型枠の破損、坑道方向へのはらみだしなどを防止するため、山留め鋼材（H300×300×10×15）を用いて型枠控えを構築した。鋼材は必要に応じて、既設の支保工に溶接し反力が確保できるようにした。型枠控え材の設計図面および設置状況を Fig. 61 および Photo 103 に示す。

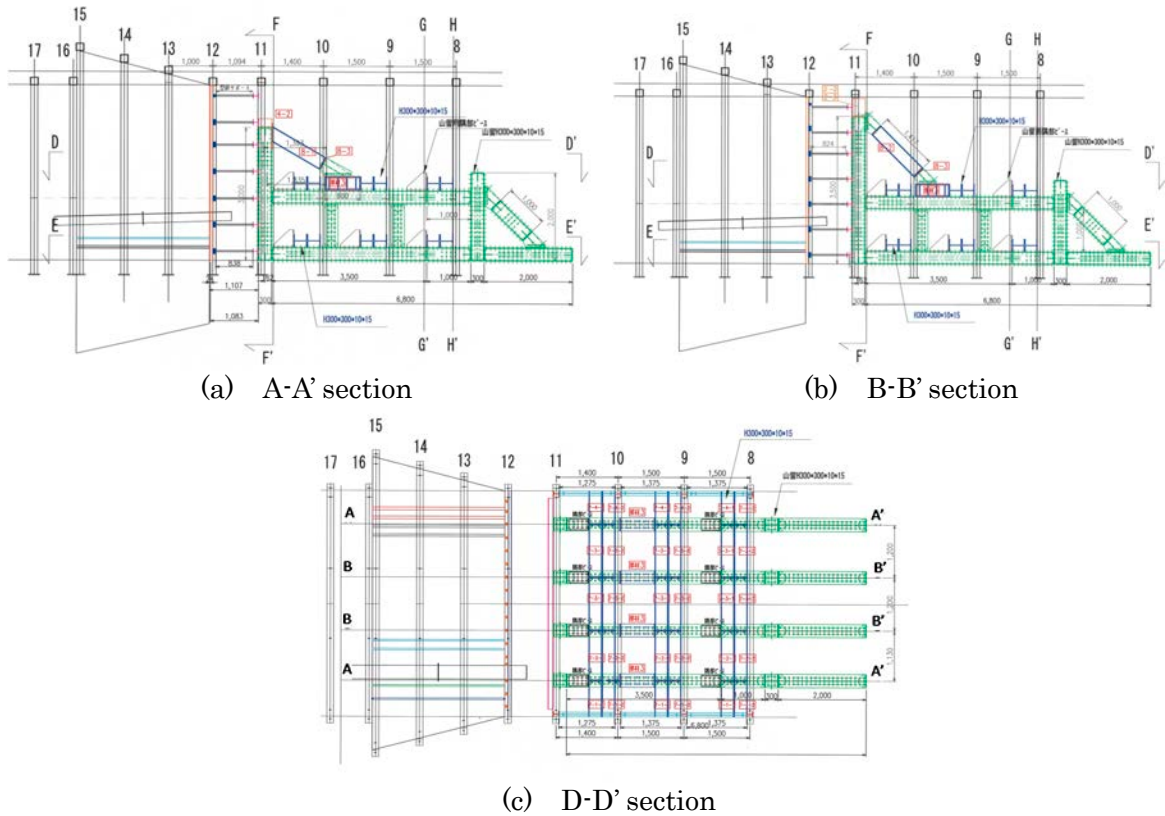


Fig. 61 Design of bracing



Photo 103 Setup bracing

7.4.2 コンクリート打設

(1) 打設

コンクリートプラントで製造したコンクリートをアジテーター車で東立坑櫓に搬入し、コンクリートキブルに移した後、深度 350m に設置したコンクリートポンプおよび 350m 調査坑道に設置した配管を通じて、試験坑道 4 のプラグ型枠まで圧送した。一連の作業状況を Fig. 62 に示す。また、打設中の作業状況を Photo 104 に示す。

打設時のコンクリート充填状況を確認するため、プラグ内部にコンクリートセンサーを 10 個、温度管理用の熱電対を 5 個設置した。設置位置を Fig. 63 に示す。

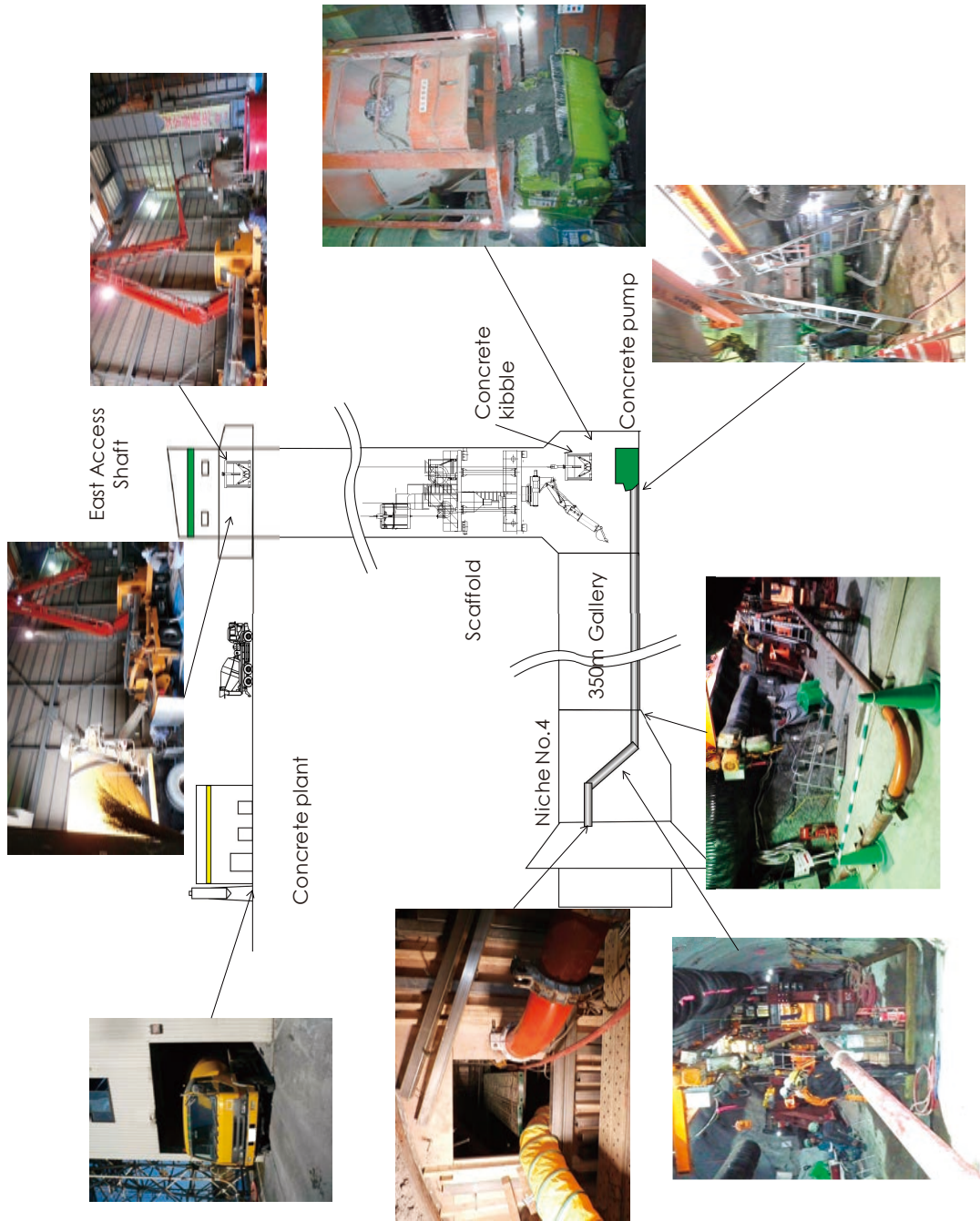


Fig. 62 Casting situation of plug concrete

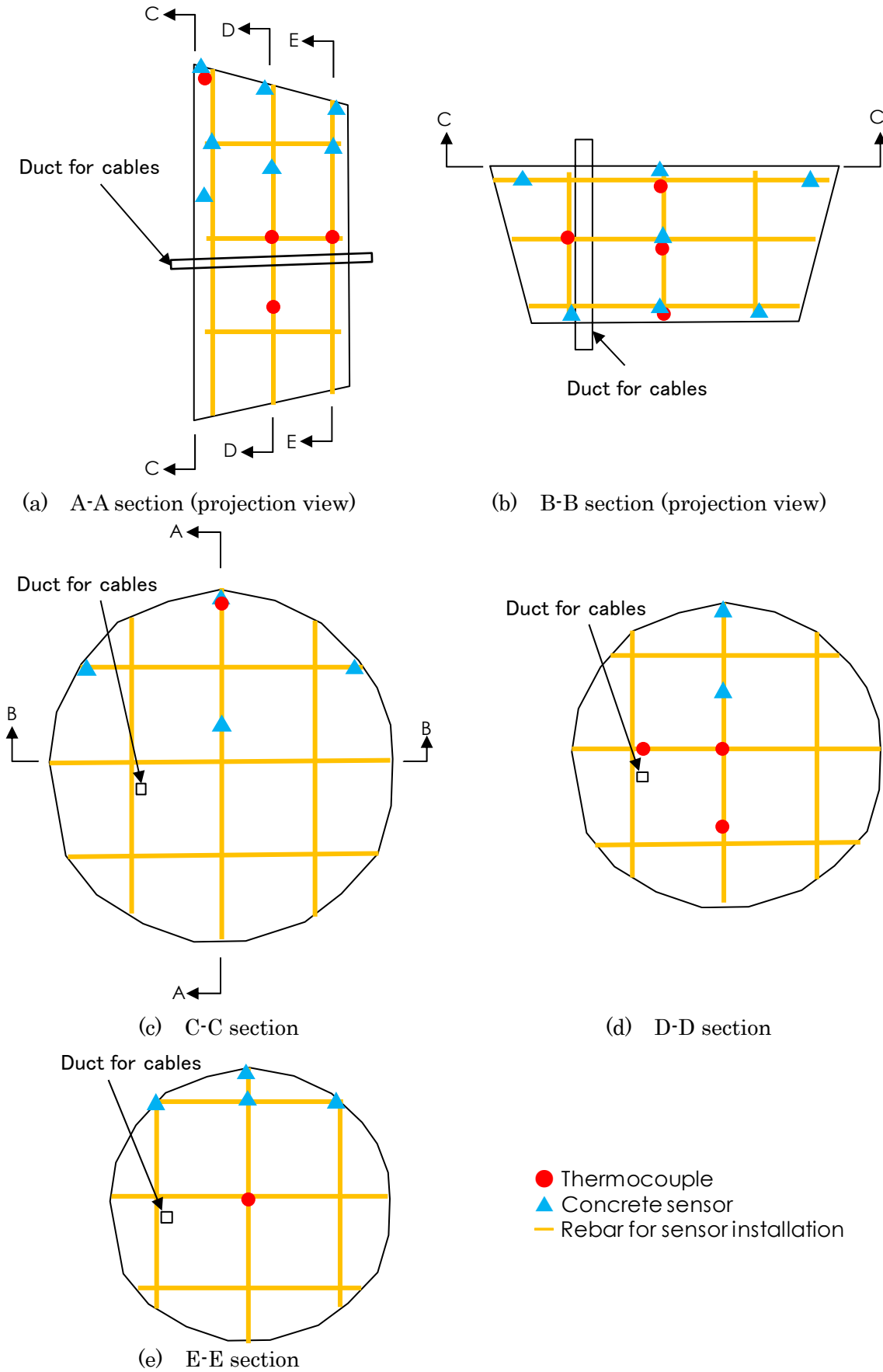


Fig. 63 Design of setting thermocouple and concrete sensor



(a) Pumping concrete (outside of formwork)



(b) Inside of formwork



(c) Casting concrete using hose



(d) Casting concrete using pipe

Photo 104 Casting plug concrete (inside of formwork)

コンクリート打設中には、試験坑道 4 の近傍に全作業を統括する作業指揮所 (Photo 105) を設置し、プラグ内部に設置したカメラ (Photo 106) や、上記のコンクリートセンサーにより型枠内の充填状況を確認しながら作業を実施した。また、支保工控え材の変位状況も確認しつつ、作業を進めた (Photo 107)。



Photo 105 Direction center

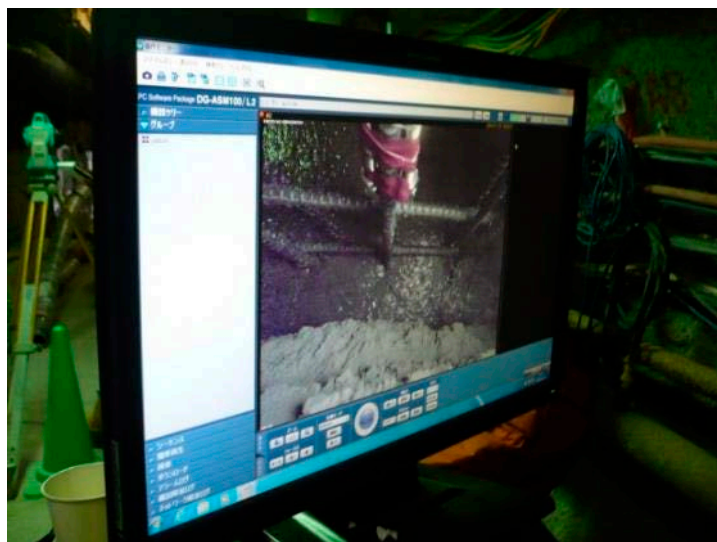


Photo 106 Concrete-filled situation (inside of formwork)



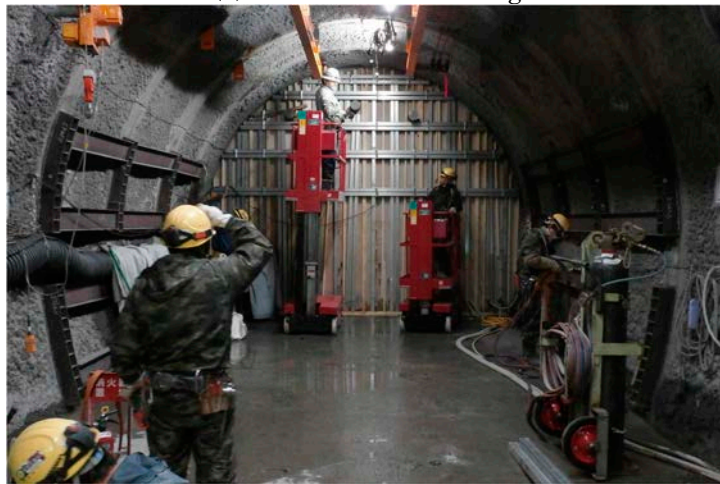
Photo 107 Measuring displacement of formwork

(2) 脱型

打設後、養生期間をおいた後に型枠控え材および型枠の撤去を行った。作業状況および脱型後の状況を Photo 108 および Photo 109 に示す。脱型後のプラグ表面は気泡などもほとんど見られず、適切にコンクリートの打設が行われたと考えられる。脱型後のプラグ表面に表面ひずみ計を設置した。設置状況を Photo 110 に示す。設置レイアウトは Fig. 38 (a)に示した通りである。



(a) Removal of bracing



(b) Removal of formwork(1)



(c) Removal of formwork (2)

Photo 108 Removal action of formwork



Photo 109 Completion of demolding

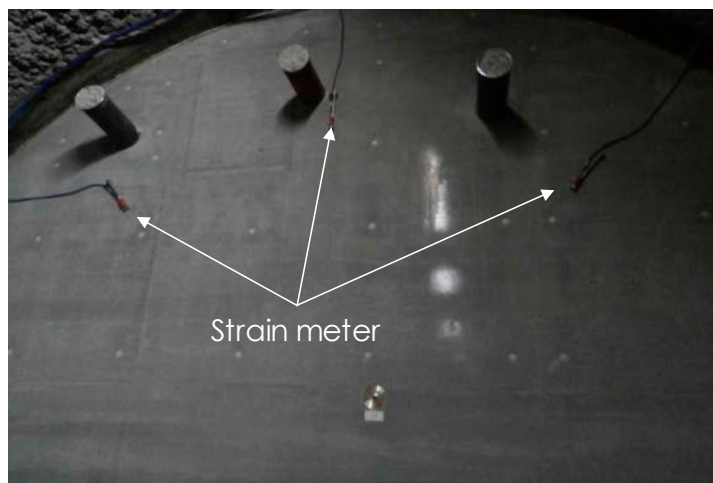


Photo 110 Setting strain meter

7.5 品質管理

7.5.1 コンクリート供給量

コンクリートプラグ打設時は、幌延 URL のコンクリートプラントで製造したコンクリートをアジテーター車 2 台を用いて、連続的に東立坑深度 350m に設置したコンクリートポンプへ供給した (Fig. 62)。コンクリートプラントでは 1 バッチあたり 1.03 m^3 を練り混ぜ、アジテーター車 1 台あたり 4 バッチを基本として供給した。供給量の実績を Table 55 に示す。およそ 50 m^3 ごと (1 台目、13 台目、25 台目) に立会検査を実施し、フレッシュ性状の確認および強度試験用のテストピースを採取した。その他、随時フレッシュ性状を確認しながら供給した。

コンクリートプラントにおける練り混ぜ実績は、合計 112 バッチ ($1.03 \text{ m}^3 \times 112 = 115.36 \text{ m}^3$) であり、うちプラント廃棄量が 5 バッチ ($1.03 \text{ m}^3 \times 5 = 5.15 \text{ m}^3$) であった。また、アジテーター車、コンクリートホッパーおよびコンクリート配管における残量がそれぞれ、 7.21 m^3 、 0.2 m^3 および 1.5 m^3 であった。以上より、コンクリートの打設量は、

$$115.36 - (5.15 + 7.21 + 0.2 + 1.5) = 101.30 \text{ (m}^3\text{)}$$

となった。

なお、混和剤添加量は練り混ぜ時の気温などを考慮し、随時調整した結果、 B (粉体量) $\times 1.350 \sim 1.475 \%$ であった。

Table 55 Amount of concrete

| Truck No. | Amount of concrete (m ³) | Time of handling | | Remarks |
|-----------|--------------------------------------|------------------|--------|-------------------------------------|
| | | Plan | Result | |
| 1 | 4.12 | 10:45 | 10:28 | Fresh concrete property, test piece |
| 2 | 4.12 | 11:15 | 11:08 | |
| 3 | 4.12 | 11:45 | 11:40 | |
| 4 | 4.12 | 12:15 | 12:25 | |
| 5 | 4.12 | 12:45 | 12:55 | Fresh concrete property |
| 6 | 4.12 | 13:15 | 13:25 | |
| 7 | 4.12 | 13:45 | 13:50 | |
| 8 | 4.12 | 14:15 | 14:20 | Fresh concrete property |
| 9 | 4.12 | 14:45 | 14:43 | |
| 10 | 4.12 | 15:15 | 15:10 | |
| 11 | 4.12 | 15:45 | 15:40 | Fresh concrete property |
| 12 | 4.12 | 16:15 | 16:00 | |
| 13 | 2.06 | 16:45 | 16:25 | Fresh concrete property, test piece |
| 14 | 2.06 | 17:15 | 17:45 | |
| 15 | 4.12 | 17:45 | 18:10 | |
| 16 | 4.12 | 18:15 | 18:42 | Fresh concrete property |
| 17 | 4.12 | 18:45 | 19:30 | |
| 18 | 4.12 | 19:15 | 19:55 | |
| 19 | 4.12 | 19:45 | 20:30 | |
| 20 | 4.12 | 20:15 | 20:50 | |
| 21 | 4.12 | 20:30 | 21:16 | |
| 22 | 4.12 | 21:15 | 21:47 | Fresh concrete property |
| 23 | 4.12 | 21:45 | 22:20 | |
| 24 | 4.12 | 22:15 | 22:52 | |
| 25 | 4.12 | 22:45 | 23:24 | Fresh concrete property, test piece |
| 26 | 3.09 | 23:15 | 23:40 | |
| 27 | 4.12 | 23:45 | 0:20 | |
| 28 | 4.12 | 0:15 | 0:50 | Fresh concrete property |
| Total | 110.21 | — | — | — |

7.5.2 フレッシュ性状

コンクリート供給時に、アジテーター車 28 台分の出荷の内、9 台分についてフレッシュ性状の確認を実施した。実施内容はスランプフロー、空気量およびコンクリート温度である。後述する硬化後性状（強度試験）用の供試体はアジテーター車 1 台目、13 台目、25 台目で採取した。Photo 111 にフレッシュ性状確認状況およびテストピース採取状況を示す。また、Table 56 にフレッシュ性状の確認結果を示す。フレッシュ性状の確認結果は、全ての項目に対して基準値内となっており、十分に品質管理されたコンクリートが供給されたことを確認した。



(a) 1st truck (4.12 m³)



(b) 13th truck (51.50 m³)



(c) 25th truck (98.88 m³)

Photo 111 Confirmation of fresh concrete property and test piece sampling

Table 56 Fresh concrete property

| Truck No. | Slump flow (mm) | Air content (%) | Temperature of concrete (°C) | Salinity of concrete (kg/m ³) | Remarks |
|----------------------|-----------------|-----------------|------------------------------|---|---------------------|
| 1 | 630×640 | 5.0 | 14.0 | 0.015 | Attended inspection |
| 5 | 635×620 | 4.9 | 11.9 | — | |
| 8 | 675×675 | 4.1 | 11.8 | — | |
| 11 | 655×670 | 5.0 | 10.5 | — | |
| 13 | 685×685 | 5.6 | 9.8 | 0.013 | Attended inspection |
| 16 | 620×600 | 5.5 | 10.5 | — | |
| 22 | 625×625 | 5.1 | 13.4 | — | |
| 25 | 600×600 | 5.1 | 14.0 | 0.009 | Self inspection |
| 28 | 625×620 | 5.5 | 13.5 | — | |
| Value of standard | 650±50 | 4.5±1.5 | ≤20 | ≤0.3 | — |
| Standard test method | JIS A 1150 | JIS A 1128 | — | (QUANTUB®) | — |

7.5.3 打込み温度

本試験におけるコンクリートプラグは、力学プラグであるが 7.1 で述べたように試験期間中の止水性も求められる。事前のひび割れ解析の結果から、コンクリートの打込み温度が 20 °C または 25 °C の場合は、躯体を貫通するようなひび割れは発生しないことを確認した¹⁸⁾。そのため、打設時には打込み温度を適切に管理することとした。また、打設は冬季（11月）であり、当日は日平均気温が 4 °C 以下と予想されたため、コンクリート標準示方書〔施工編〕に従い、寒中コンクリートとして打込み温度を 5～20 °C で管理することとした。

打込み温度を管理するために、必要に応じて骨材や練り混ぜ水の加温などを行った。また、型枠内に設置した熱電対 (Fig. 63) により、打込み温度を作業指揮所 (Photo 105) にて確認しながらコンクリートを打設した。型枠内の熱電対による打込み温度の測定値は、12.7～16.2 °Cであった。

7.5.4 硬化後性状

フレッシュ性状確認時 (7.5.2) に採取したテストピースを用いて、硬化後性状 (一軸圧縮強度) の確認を実施した。圧縮強度試験は、材齢 7 日、28 日および 91 日で実施した。圧縮強度試験結果を Table 57 に、試験状況および確認状況を Photo 112 に示す。いずれの場合にも目標値である 50 N/mm² 以上 (材齢 91 日以内) となった。

Table 57 Results of strength test for plug concrete

| Truck No. | Uniaxial compressive strength (N/mm ²) | | | Value of standard (N/mm ²) |
|-----------|--|--------|--------|--|
| | 7 day | 28 day | 91 day | |
| 1 | 30.3 | 47.5 | 68.9 | 50 (until 91days) |
| 13 | 30.0 | 48.4 | 68.8 | |
| 25 | 30.3 | 48.0 | 64.2 | |



(a) Uniaxial compressive strength test



(b) Quality inspection, 13th truck (28day)

Photo 112 Strength test for plug concrete

低アルカリ性セメントを用いたコンクリートについては、これまでも幌延 URL にて吹付けコンクリートおよび覆工コンクリートとしての施工実績があり、通常のコンクリート材料と同様の方法にて、十分な品質管理が可能であることを確認している。本試験におけるプラグコンクリートに対しても、通常の手順 (事前の配合検討、実機による試験練りおよび打設時の抽出検査) で品質が確保されることを確認した。

実際の処分場においては、大量のコンクリートが施工されるため、専用のコンクリートプラントが整備されると考えられる。また、処分場におけるコンクリートプラグ打設時には、既に坑道における覆工コンクリートや吹付けコンクリートの施工などにより実機の特徴が十分に把握されており、本試験よりも品質確認の頻度を減らすことができる可能性が考えられるが、施工時の気温や湿度、また打設量や打設の頻度などによって、品質管理の頻度などを設定する必要があると考えられる。

7.6 コンタクトグラウト

人工バリア性能確認試験におけるコンクリートプラグには、通常の力学プラグとしての性能に加え、試験期間中における止水性もある程度求められる。そのため、事前に試験坑道 4 における温度変化およびコンクリートからの発熱を考慮したひび割れ解析を実施し、コンクリートプラグ本体に有意な水みちとなるひび割れが発生しないことを確認した¹⁸⁾。また、周辺岩盤との一体性

を確保するために、施工後約半年が経過しコンクリートの収縮が収まったと考えられる時点で、コンクリートプラグと周辺岩盤および坑道吹付け面との間に生じる微細間隙を充填するためにコンタクトグラウト工を実施した。Fig. 64 にコンタクトグラウト工のフローを示す。

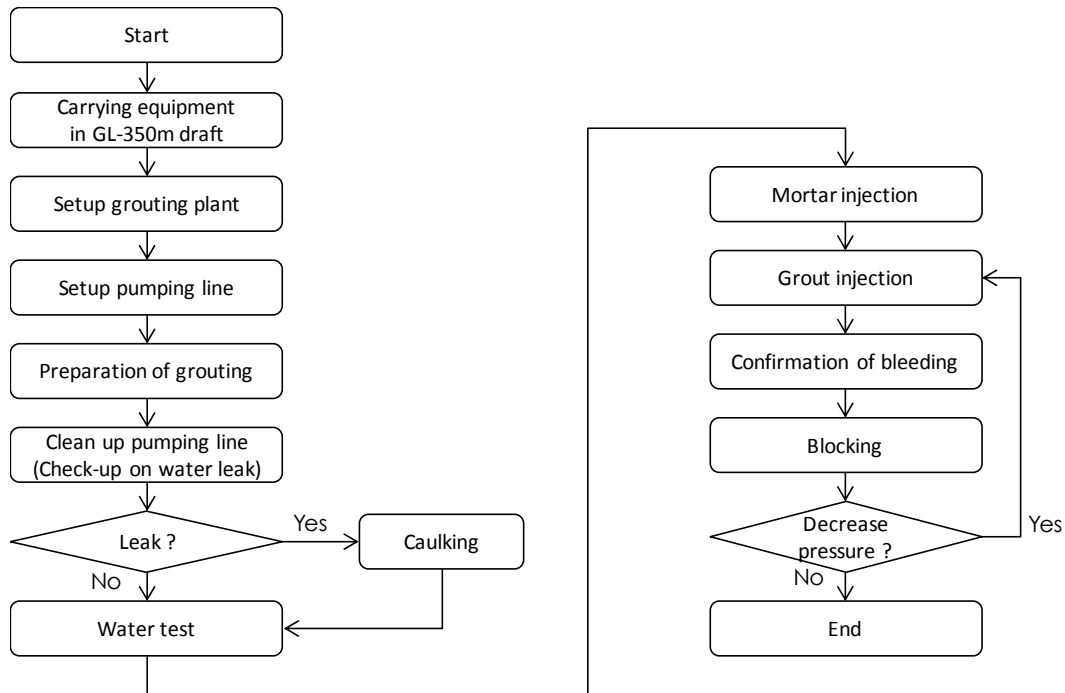


Fig. 64 Flowchart of grouting

7.6.1 使用材料および使用機材

(1) 使用材料

コンタクトグラウト工で使用した材料は周辺環境への影響を低減するために、坑道壁面への吹付けコンクリートおよびコンクリートプラグと同様に低アルカリ性の材料とした。使用した低アルカリ性グラウトは日鉄住金セメント（株）製であり、化学成分は Table 58 に示す通りである。

Table 58 Chemical component of low alkaline grout

| Component (%) | | | | | | | | |
|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|-----|-----------------|------------------|---------------|-----------------|
| SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | SO ₃ | ZrO ₂ | Ignition loss | Minor component |
| 59.9 | 6.7 | 0.8 | 23.3 | 2.7 | 2.5 | 1.6 | 0.6 | 1.9 |

(2) 使用機材

コンタクトグラウト工に使用した主な機材を Table 59 に示す。これらの機材を用いて注入プラントを構築、深度 350 m 調査坑道の試験坑道 4 付近に設置し、圧送ラインをプラグ打設部分まで敷設した。なお、配管は壁面に沿って行ったが、坑道を横断する箇所には、躓き防止の養生を行った。設置箇所および設置状況を Fig. 65 および Photo 113 に示す。

Table 59 Equipment of grouting

| Equipment | Model | Remarks |
|------------------|---------|---|
| Grout pump | CP-10 | 120 L/min |
| Grout mixer | LAM-250 | Two upper and lower tanks-type Content of each tank: 200 L |
| Circulation pump | — | 20 L/min, 0.7MPa |

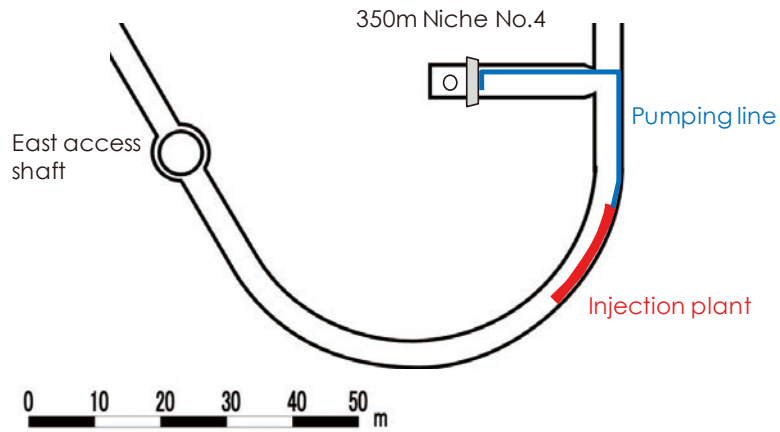


Fig. 65 Injection plant and pumping line



(a) Grout pump



(b) Grout mixer



(c) Pumping line

Photo 113 Setup injection plant

7.6.2 注入準備工

(1) 配管洗浄

プラグ施工時に埋設した注入用配管について、配管の詰まりや異物の混入の有無を確認するため配管内を洗浄した。注入孔の配置は Fig. 58 に示した通りである。注入用配管ラインはサプライ

管とリターン管からなり、A、B断面に対してそれぞれ、上半部、下半部の4系統である。またそれぞれの断面に対して、エア抜き管があり、もっとも隙間が大きくなると想定されるプラグ埋め戻し側の天端部にはモルタル注入管が設置されている (Fig. 66)。洗浄はサプライ管から工事用水を圧送し、リターン管から工事用水が排水されるまで続けた。洗浄時にプラグ境界部分から工事用水のリークが確認された場合には、随時コーキングにより止水した。リーク状況およびコーキング作業状況を Photo 114 に示す。

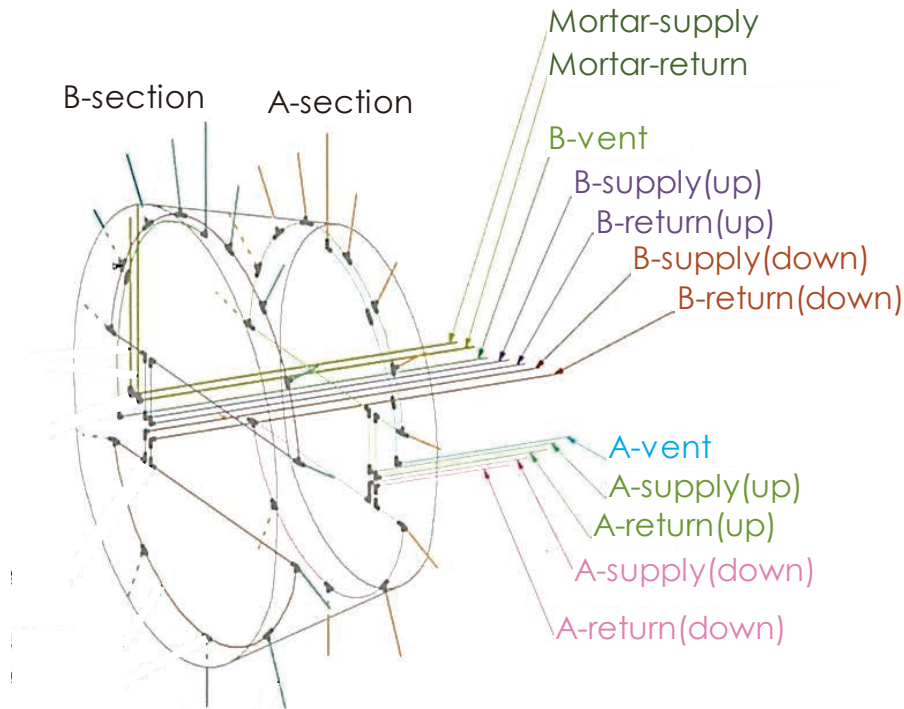
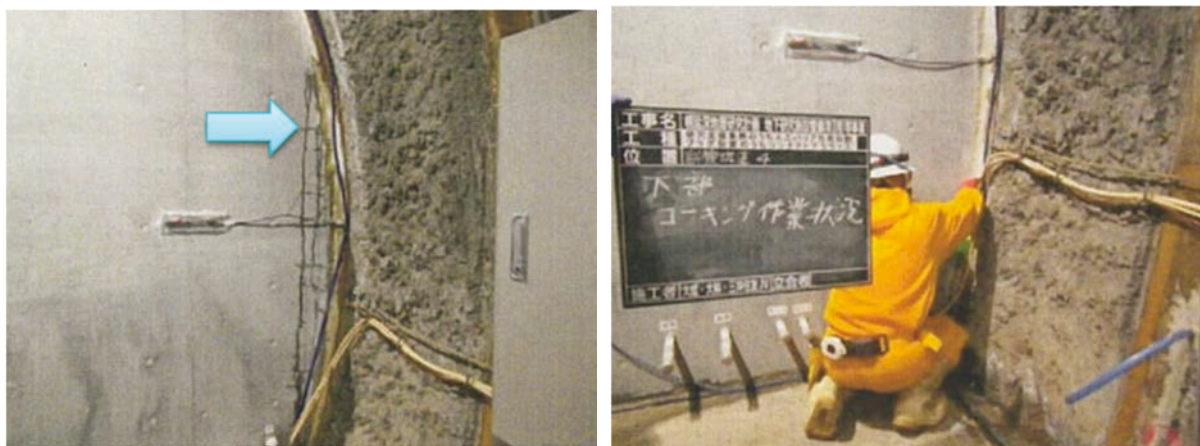


Fig. 66 Pipe arrangement for contact grouting (overhead view)



(a) Water leakage

(b) Caulking

Photo 114 Water leakage and caulking

(2) 水押しテスト

水押しテストは、配管洗浄と同様にサプライ管 (Fig. 66 の A/B-supply(up/down)) から工事用水を圧送した。リターン管 (Fig. 66 の A/B-return(up/down)) からの工事用水の戻りを確認した後、リターン管を閉じて圧力を段階的に上昇させ (最大送水圧力 1.0 MPa)、注水量に留意しながらリークの有無を確認した。水押しテストの結果を Table 60 に示す。コンクリートプラグと坑

道支保工との境界部分から、多少のリークは観測されたが、急結セメントを使用して都度コーキング処理を行った。

Table 60 Result of water test

| Line (refer to Fig. 66) | Injection pressure (MPa) | Amount of injection water (L/min) | Leakage (caulking) point |
|----------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|--|
| Mortar-supply | 0.75 | 3.0 | No leakage |
| Mortar-return | 0.70 | 1.2 | No leakage |
| B-supply(down) B-return(down) | 0.17 | 9.0 | Left&right side boundary between plug and niche wall A-supply/return(down) line |
| A-supply(down) A-return(down) | 0.37 | 10.0 | Lower left&right side boundary between plug and niche wall |
| A-supply(up) A-return(up) | 0.06 | 10.0 | Left&right side boundary between plug and niche wall |
| B-supply(up) B-return(up) | 0.08 | 10.0 | No leakage |
| A-vent | 1.00 | 0.0 | No leakage |
| B-vent | 0.80 | 0.0 | Crown of plug |

(3) モルタル注入

コンタクトグラウトに先立ち、プラグの埋め戻し側の天端部へのモルタル注入を予定していたが、水押しテストの結果、工事用水の注入量も小さく、モルタルが充填されるような空隙はないと判断し、モルタルの代替としてセメントミルクを C/W=1/1 で注入することとした。ここで、C：セメント、W：水である。

サプライ管 (Mortar-supply) から注入を行ったが、リターン管 (Mortar-return) ではセメントミルクが確認できなかったことから、リターン管からも注入を行った。注入結果を Table 61 に示す。

Table 61 Injection cement milk (crown of plug)

| Line | C/W | Amount of cement milk (L) | Injection pressure (MPa) | Remarks |
|---------------|-----|---------------------------|--------------------------|------------|
| Mortar-supply | 1/1 | 26.5 | 1.00 | No leakage |
| Mortar-return | 1/1 | 22.4 | 1.00 | No leakage |
| Total | — | 48.9 | — | — |

7.6.3 コンタクトグラウトの施工

(1) 注入仕様

グラウトの練り混ぜには、縦型 2 槽式のグラウトミキサを使用し、原液として C/W=1/1 のセメントミルクを調製し、希釈装置を用いて所定の配合に調整しグラウトポンプを通して圧送した。使用した機材は Table 59 に示した通りである。

注入配合は、1/3.86~1/1 とし、濃度の低い方から 100 L ごとに順次濃度を上げて注入した。注入配合を Table 62 に示す。注入は、①プラグ下部の埋め戻し側、②プラグ下部の坑道側、③プラグ上部の坑道側、④プラグ上部の埋め戻し側、の順 (注入箇所の高い順) に実施した。

注入速度および注入圧力は 10 L/min 以下および湧水圧+1.0 MPa とした。注入量が 0.0 L/min となったことを確認した後に、リターン管を解放し、配管内の余剰水、エアおよび濃度の低いグラウト材料を抜く作業 (ブリード作業) を実施した。ブリード作業の際に、注入しているグラウト配合が C/W=1/1 より低い場合には、C/W=1/1 に切り替えた後に作業を実施した。リターン管から C/W=1/1 のグラウト材料の漏出が確認された後、リターン管を閉じて 5 分間の注入を継続した。注入量 0.0 L/min に変化がないことを確認し、サプライ管を閉じてブロッキング作業を実施

した。ブロッキング作業の 25 分後に管内での圧力低下が見られないことをもって注入の完了とした。

Table 62 Grout (cement milk) composition

| C/W | Low alkaline cement : C (kg) | Water : W (L) | Mixed amount of grout (L) | Design of specific weight (g/cm ³) |
|--------|---------------------------------|------------------|------------------------------|---|
| 1/3.86 | 23.57 | 90.97 | 100 | 1.15 |
| 1/3.17 | 28.14 | 89.22 | 100 | 1.17 |
| 1/2.67 | 32.75 | 87.45 | 100 | 1.20 |
| 1/2.30 | 37.27 | 85.72 | 100 | 1.23 |
| 1/2.00 | 41.96 | 83.92 | 100 | 1.26 |
| 1/1.00 | 72.30 | 72.30 | 100 | 1.45 |

(2) 注入実績および品質管理

グラウト材料の注入実績を Table 63 に示す。注入圧力の上昇傾向、リークの状況および坑道掘削時のプレグラウトの実績などを考慮し、A、B 断面の上部 (A-supply(up)および B-supply(up)) では C/W=1/2 での注入を多くした。注入結果から、プラグ下側よりもプラグ上側に多くのセメントミルクが注入されており、コンクリートの収縮によりプラグ上側に隙間が生じるとした予測と整合的である。また、それぞれの濃度におけるグラウト材料の品質確認として比重測定を実施した結果を Table 64 に示す。注入したグラウト材料の比重は全て、基準値を満たし、十分に品質管理されたグラウト工が実施されたことを確認した。

Table 63 Results of grout injection

| Line | Maximum injection pressure (MPa) | C/W | | | | | | Total amount | |
|----------------|----------------------------------|--------|--------|--------|-------|--------|-------|-----------------|-------------|
| | | 1/3.86 | 1/3.17 | 1/2.67 | 1/2.3 | 1/2 | 1/1 | Cement milk (L) | Cement (kg) |
| B-supply(down) | 0.582 | 100 | 100 | 100 | 70 | — | 15.7 | 385.7 | 121.90 |
| A-supply(down) | 1.049 | 100 | 100 | 100 | 4.1 | — | 9.5 | 313.6 | 92.80 |
| A-supply(up) | 1.011 | 100 | 100 | 100 | 100 | 463.7 | 9.7 | 873.4 | 323.40 |
| B-supply(up) | 1.016 | 100 | 100 | 100 | 100 | 1000 | 597.1 | 1997.1 | 973.00 |
| Total | — | 400 | 400 | 400 | 274.1 | 1463.7 | 632.0 | 3569.8 | 1511.10 |

Table 64 Confirmation results of specific weight

| Line | C/W | Specific weight (g/cm ³) | | Error (%) | Quality control standard (%) | Remarks |
|--------------------------------|--------|--------------------------------------|--------|-----------|------------------------------|---|
| | | Design | Result | | | |
| Mortar-supply Mortar-return | 1/1 | 1.45 | 1.380 | -4.8 | ±5 | Undiluted solution (using cement milk) |
| B-supply(down) | 1/1 | 1.45 | 1.400 | -3.4 | ±5 | Undiluted solution |
| | 1/3.86 | 1.15 | 1.146 | -0.3 | | |
| | 1/3.17 | 1.17 | 1.158 | -1.0 | | |
| | 1/2.67 | 1.20 | 1.185 | -1.2 | | |
| | 1/2.3 | 1.23 | 1.204 | -2.1 | | |
| | 1/1 | 1.45 | 1.299 | -10.4 | 70 and over | Confirmed specific weight from return line solution |
| A-supply(down) | 1/1 | 1.45 | 1.412 | -2.6 | ±5 | Undiluted solution |
| | 1/3.86 | 1.15 | 1.120 | -2.6 | | |
| | 1/3.17 | 1.17 | 1.130 | -3.4 | | |
| | 1/2.67 | 1.20 | 1.191 | -0.7 | | |
| | 1/2.3 | 1.23 | 1.197 | -2.7 | | |
| | 1/1 | 1.45 | 1.230 | -15.2 | 70 and over | Confirmed specific weight from return line solution |
| A-supply(up) | 1/1 | 1.45 | 1.400 | -3.4 | ±5 | Undiluted solution |
| | 1/3.86 | 1.15 | 1.142 | -0.7 | | |
| | 1/3.17 | 1.17 | 1.120 | -4.3 | | |
| | 1/2.67 | 1.20 | 1.192 | -0.7 | | |
| | 1/2.3 | 1.23 | 1.210 | -1.6 | | |
| | 1/2 | 1.26 | 1.245 | -1.2 | | |
| | 1/1 | 1.45 | 1.140 | -21.4 | 70 and over | Confirmed specific weight from return line solution |
| B-supply(up) | 1/1 | 1.45 | 1.400 | -3.4 | ±5 | Undiluted solution |
| | 1/3.86 | 1.15 | 1.120 | -2.6 | | |
| | 1/3.17 | 1.17 | 1.166 | -0.3 | | |
| | 1/2.67 | 1.20 | 1.190 | -0.8 | | |
| | 1/2.3 | 1.23 | 1.208 | -1.8 | | |
| | 1/2 | 1.26 | 1.250 | -0.8 | | |
| | 1/1 | 1.45 | 1.449 | -0.1 | 70 and over | Confirmed specific weight from return line solution |
| B-vent | 1/1 | 1.45 | 1.420 | -2.1 | ±5 | Undiluted solution |
| | 1/20 | 1.03 | 1.027 | -0.3 | | |
| | 1/10 | 1.06 | 1.051 | -0.8 | | |
| | 1/6.62 | 1.09 | 1.088 | -0.2 | | |
| | 1/4.9 | 1.12 | 1.110 | -0.9 | | |
| | 1/3.86 | 1.15 | 1.134 | -1.4 | 70 and over | Confirmed specific weight from return line solution |
| A-vent | 1/1 | 1.45 | 1.400 | -3.4 | ±5 | Undiluted solution |

8. 計測システムの整備および計測の開始

8.1 計測システムの整備

8.1.1 計測センサーの動作確認

緩衝材、埋め戻し材およびプラグの各部分に設置した各種計測センサーについて、設置後も様々な作業が進められることから、各作業段階でセンサーの動作確認を実施した。具体的には、センサー納品時、センサー設置直後、坑道の埋め戻し後およびプラグ設置後の4段階である。それぞれの段階において、各種計測センサーが正常に稼働しており、各作業によって断線などの不具合が生じていないことを確認した。確認状況の例を Photo 115 に示す。



(a) After setting (DS001)



(b) After backfilling (TEOP005)



(c) After casting plug (TP002)

Photo 115 Operation check of sensors

8.1.2 貫通ダクト

緩衝材中および埋め戻し材中に設置した各種計測センサーからの配線は、貫通ダクトに取りまとめてプラグ外へ導き、各種計測システムに接続した。貫通ダクトは、内部からの漏水を防ぐため、Fig. 67 に示すように止水剤およびベントナイトで充填した。充填作業は、ケーブルを1段並べるごとに各材料にて隙間を充填しながら実施した。貫通ダクトの整線および止水材充填の作業状況を Photo 116 に示す。また、コンクリートプラグ打設後の貫通ダクトの状況を Photo 117 に示す。

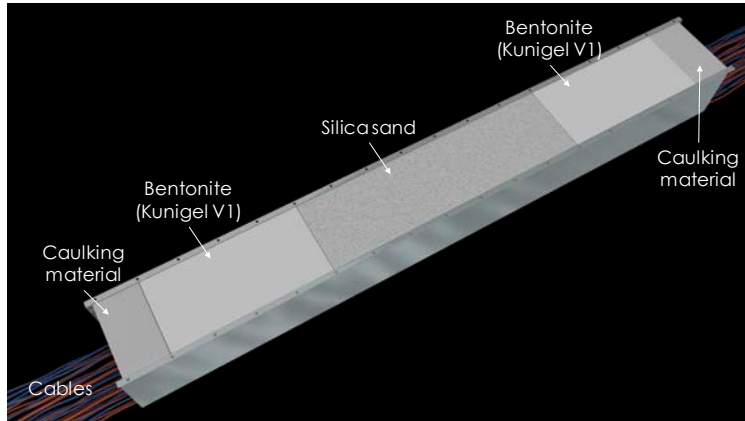
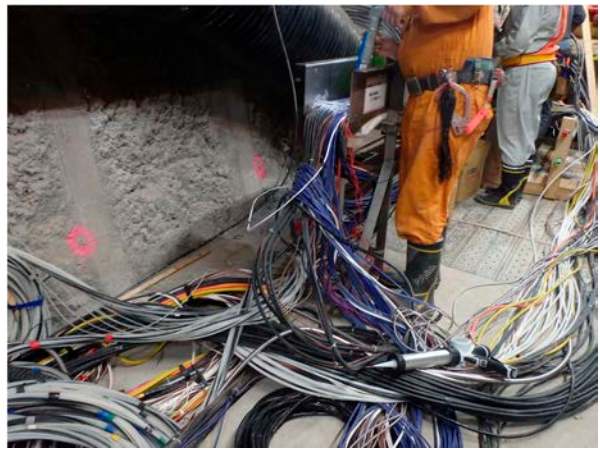


Fig. 67 Water-tight seal of duct for cables



(a) Near view



(b) Distant view



(c) Caulking (1)



(d) Caulking (2)

Photo 116 Cable arranging and caulking



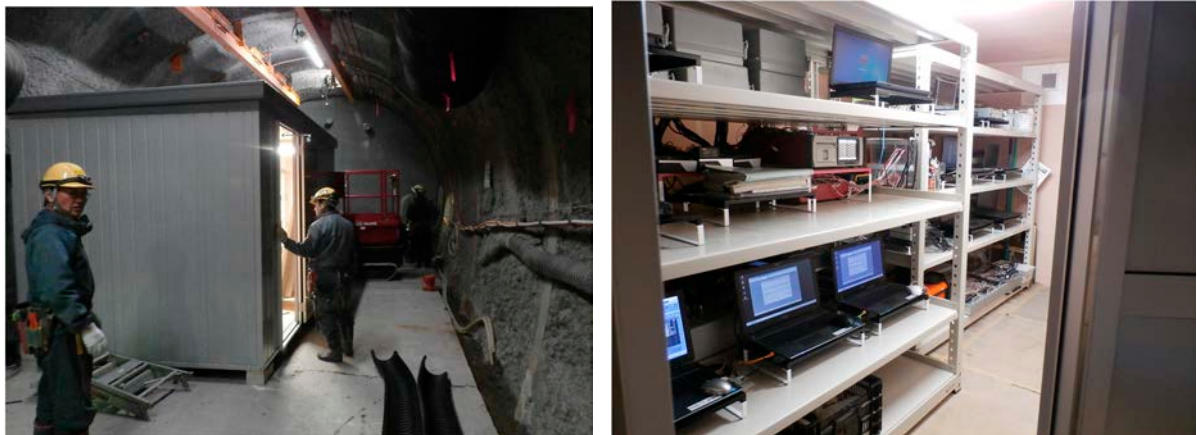
(a) Distant view (b) Near view

Photo 117 Duct for cables (after casting concrete-type plug)

8.1.3 計測システムの設置

プラグの打設後、計測システム室を試験坑道 4 に設置し、各計測センサーに応じて専用ソフトのインストールされた PC やデータロガーを設置した。各計測専用 PC やデータロガーには連続計測したデータが保存され、データ収集 PC で書式を統一し、幌延 URL 内に構築されている研究支援用計測システムを介して、地上の中央監視室のデータサーバーに転送される。データサーバーでは、計測データをデータベース化・保存し、データおよびグラフの出力を行うことが可能である。データおよびグラフは、幌延深地層研究センターの管理棟においてもリアルタイムに閲覧することが可能である。

計測システム室の設置状況および計測システム室内の状況を Photo 118 に示す。



(a) Setup measurement system room

(b) Inside of the room

Photo 118 Measurement system room

8.2 注水システム

試験孔底および埋め戻し材中に埋設した注水管に供給する地下水は、原位置（深度 350m）の地下水とするため採水用のボーリング孔を掘削し、地下水を確保することとした。ただし、地下水を採取してタンクなどに貯留したものを注水する場合には、圧力解放により地下水に溶存している気体（二酸化炭素、メタンなど）の脱ガスや、外気に触れることによる地下水の水質変化により、OP の腐食挙動などへの影響が懸念される。そのため、採水用ボーリング孔にパッカーを設置し、外気に触れることなく試験体へ加圧注水が可能なシステムを構築した。以下に採水用ボーリング孔および注水システムの構成について述べる。

8.2.1 採水用ボーリング孔

採水用ボーリング孔として、350 m 調査坑道の一時避難所（東）付近に約 20m のボーリング孔

を水平方向に 3 本掘削し。試験坑道 4 に設置した注水システムまで配管を設置した。採水孔の位置を Fig. 68 に、孔口の状況を Photo 119 に示す。ボーリング孔掘削直後の湧水量は約 7 L/min、孔口圧は約 0.6 MPa であった。

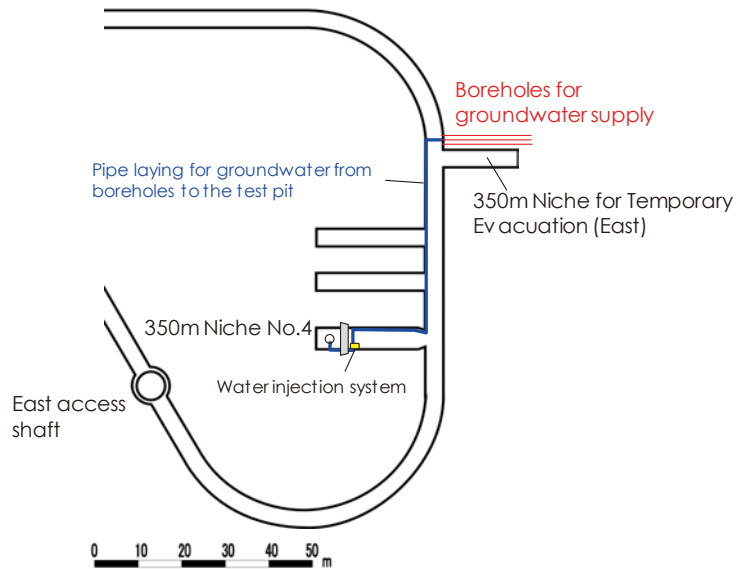


Fig. 68 Location of borehole for groundwater



Photo 119 Boreholes for groundwater supply

8.2.2 システムの構成

注水システムは緩衝材および埋め戻し材でそれぞれ独立に構築し、さらに、埋め戻し材部分への注水については、試験坑道外周部および埋め戻し材内部への 2 系統を設けた。システムの構成を Fig. 69 および Fig. 70 に示す。レンジの異なる流量計を連結し、注水量を変化させた場合にも対応可能とした。設置状況を Photo 120 に、システムを構成するポンプ、流量計、圧力計などについて Table 65 に示す。各機器は深度 350 m での静水圧相当である 3.5 MPa での加圧および測定が可能な仕様とした。

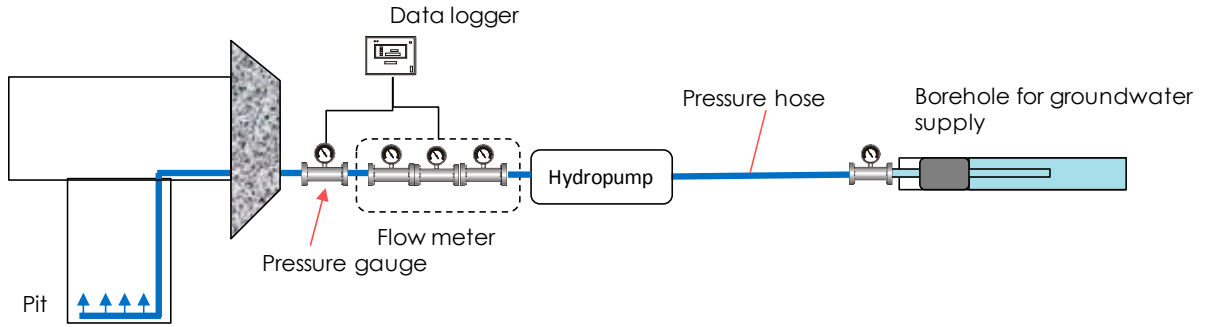


Fig. 69 Water injection system configuration for the bottom of the pit

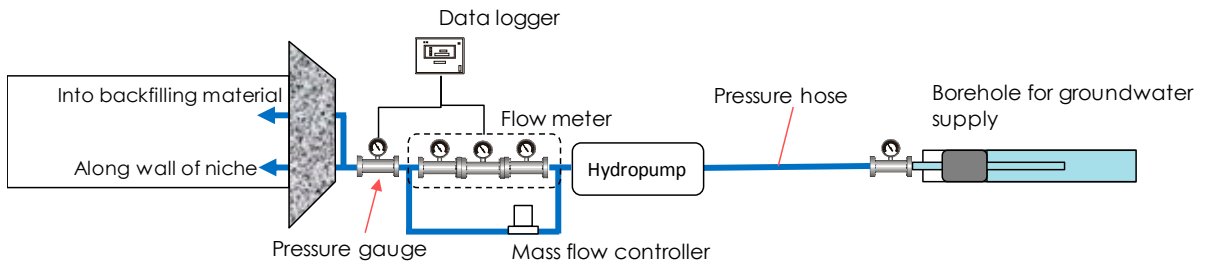
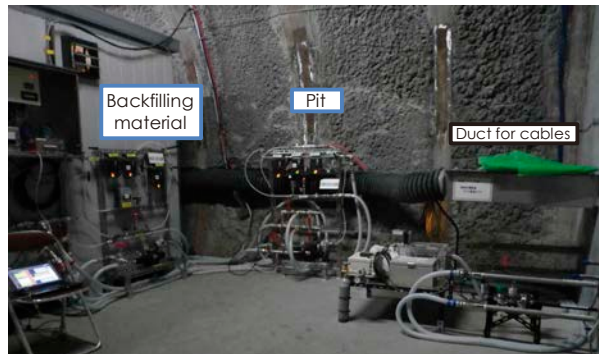


Fig. 70 Water injection system configuration for the backfilling material



(a) Water injection system



(b) For the bottom of the pit



(c) For the backfilling material

Photo 120 Water injection system at the Niche No.4

Table 65 Instruments of water injection system

| Instruments | Model | Specifications | Remarks |
|----------------------|----------------|--|-----------------------------|
| Hydro-pump | MHP5-40 | SAEKI Engineering, Ltd. Intensification rate 1:5 Max. pressure: 4 MPa Consumed amount of air: 1.2 m ³ /min Max. discharge rate: 17.0 L/min | Pit Backfilling material |
| Flowmeter | FD-SS02A | KEYENCE Range: ~200 mL/min Repeatability: ±2 mL/min Degradative ability: 0.1 mL/min Usage environment: <5 MPa | Pit Backfilling material |
| | FD-SS2A | KEYENCE Range: ~2000 mL/min Repeatability: ±20 mL/min Degradative ability: 0.1 mL/min Usage environment: <5 MPa | Pit Backfilling material |
| | FD-SS20A | KEYENCE Range: ~20 L/min Repeatability: ±200mL/min Degradative ability: 0.1 mL/min Usage environment: <5 MPa | Pit Backfilling material |
| Pressure gauge | GP-M100 | KEYENCE Range: 0~10MPa Repeatability: ±0.03 MPa Degradative ability: 0.01 MPa | Pit Backfilling material |
| Mass flow controller | CORI-FLOW® M54 | Bronkhorst Japan Max. flow FS rate: 100 kg/h Min. flow FS rate Liquid: 5 kg/h Zero stability: <0.050 kg/h Repeatability: 0.1 % Control range: 2-100 % | Backfilling material |

8.3 計測の開始

8.3.1 計測開始

上記計測システムの整備が完了した後、加熱・注水を開始する前の初期状態の把握のため、計測を開始した。計測開始は平成 26 年 12 月 19 日とした。緩衝材および埋め戻し材などの設置作業中および測定開始前の緩衝材の膨潤などを防ぐために継続していた、試験孔底からの排水 (Fig. 21 参照) を 3 日後の 12 月 22 日に停止した。

8.3.2 模擬 OP ヒーターによる加熱の開始および注水装置による注水の開始

模擬 OP のヒーターによる加熱は平成 27 年 1 月 15 日に開始した。温度は模擬 OP 表面が 100 °C 程度となるように制御している。また、模擬 OP のヒーターの加熱開始の翌日 (平成 27 年 1 月 16 日) から、試験孔底および坑道壁面からの注水を開始した。得られた計測データの詳細については、随時公開していく計画である^{6)、13)}。

9. 見学者用展示物の整備

幌延 URL は一般の方々を含め、「深地層を体験・理解する場」としての目的も担っているため、研究者や一般の方々の、地下施設の視察・見学を受け入れており、実施している試験の内容を分かりやすく説明するパネルなどが坑道内に整備されている。人工バリア性能確認試験は、実物大の人工バリアを使用し、実際の地下環境（堆積岩系）において坑道の埋め戻しまで実施した、国内外でも例の少ない試験ではあるが、坑道の埋め戻しおよびプラグコンクリートの設置により、間近に試験体などを見学することはできない。そこで、試験坑道 4 に見学者用の展示物を整備した。以下にその概略を述べる。

9.1 作業の紹介

人工バリア性能確認試験は、処分概念の構築を確認することが目的のひとつとなっているため、本報告書において述べてきたような、施工を通じた原位置における実証試験が重要である。実証試験がどのように行われたかについて、作業段階ごとに実施状況を解説音声付きの映像としてまとめた DVD を製作し、試験坑道 4 において視聴できるように画面および再生機器などを整備した。DVD のコンテンツとして、地下施設内での作業のみならず、模擬 OP および緩衝材ブロックなどの製作状況³⁾も合わせて収録した。視聴設備を Photo 121 に示す。また、作業概況については英語版も作成し、海外からの視察・見学者にも対応可能とした。さらに、この視聴設備では、計測システムによって出力されるグラフなども見ることが可能であり、視察・見学者に応じてデータを示しながら詳細な説明を行うことも可能である。



Photo 121 Introduction DVD monitor

9.2 緩衝材および埋め戻し材ブロックの展示

5 章および 6 章において使用した、緩衝材ブロックおよび埋め戻し材ブロックを展示した。緩衝材ブロックは模擬 OP 頂部から上の 7～10 段目をイメージし、模擬 OP 頂部に当たる部分には模擬 OP と同材料（SFVC1）の板を設置した。また、計測器設置のための溝が掘ってある緩衝材ブロックも合わせて展示した（Photo 122）。

埋め戻し材ブロックは、3 列を実際と同様にブロック間の隙間が連続しないように千鳥配置で展示した（Photo 123）。なお、それぞれのブロックは乾燥を防ぐためにラップした状態で展示した。試験坑道 4 の全景を Photo 124 に示す。



(a) Setup blocks



(b) Block with chase

Photo 122 Exhibition of buffer material blocks



Photo 123 Exhibition of backfilling material blocks



Photo 124 Full view of Niche No.4

10. まとめ

本報告書は、人工バリア性能確認試験の目的のうち、第2次取りまとめで示した処分概念が実際に地下で構築できることの実証、および人工バリアや埋め戻し材の設計手法の適用性、を原位において確認した内容を取りまとめたものである。以下に、各項目に対して実施した内容および課題を列挙する。なお、人工バリア性能確認試験は、平成27年1月より模擬オーバーパック内のヒーターを用いた加熱および地下水の注水を開始しており、各種データの取得を継続している。得られたデータについては、随時公開していく予定である。

- ・ 試験坑道および試験孔の掘削

幌延 URL の試験坑道にて、第2次取りまとめに示された堆積岩における処分孔縦置き定置方式の処分孔と同じ仕様の試験孔を掘削可能であることを示した。また、プラグ設置箇所に施す切り欠きについては、坑道掘削完了後に改めて施工する場合には、設置済みの支保を撤去する必要があることから、岩盤の崩落などが懸念されたため、作業の安全性の観点から坑道の掘削と合わせて実施した。実際の処分場においては、プラグの設置箇所も多く、作業の安全確保は重要であることから、プラグ設置箇所の切り欠きの施工を掘削作業に盛り込むことは処分場における施工においても作業安全上重要であると考えられる。

試験孔の掘削については、開発した大口径掘削機を用いて施工可能であることを確認したが、本試験においては、試験孔掘削の掘削土（ズリ）は手作業にて搬出しており、実際の処分場において連続的に処分孔を掘削する場合には、掘削土（ズリ）の搬出方法まで考慮した掘削機械の設計や施工方法の検討が必要であると考えられる。また、処分孔掘削後に人工バリア定置までの時間が空くことが想定され、特に堆積岩の場合には処分孔の孔壁が崩落するなどの懸念があるため、ケーシングの残置やコンクリートなどによる支保の構築など、処分場サイトの地質環境に応じた設計が必要となると考えられる。また、処分孔孔底の凹凸が大きい場合には緩衝材およびオーバーパックの定置時に不具合が生じる可能性も考えられるため、処分孔掘削の品質管理として、処分孔の形状把握が必要となることも考えられる。

- ・ 緩衝材および模擬オーバーパックの設置

緩衝材ブロックは1個ずつ、クレーンを用いて試験孔内に設置した。その際に、計測センサー設置用の溝加工がなされていないブロックについては、真空把持装置（ブロック1個用）の適用性を確認した。模擬オーバーパックについては、胴体部分を試験孔内に設置した後に錘やヒーターを胴体内部に設置した。本試験では、放射性物質は使用していないことから、手作業により設置作業を行ったが、実際の処分場では緩衝材およびオーバーパックの定置は遠隔操作で実施されると想定され、緩衝材ブロックについては1段分（8個または9個）をまとめて定置する装置が開発されている。今後は、緩衝材およびオーバーパックを長大な処分坑道内で適切に精度良く定置するための、定置装置を含めた全体のシステムの構築および実証が必要になると考えられる。

本試験においては、定置作業中の緩衝材の膨潤・変形による定置精度への影響を防ぐために、試験孔内の自然湧水（約80 mL/min）を作業中は排水しており、壁面からの湧水が認められた場合には随時対処した。一方、実際の処分孔では、このような事象を考慮した上で適切な施工方法を選定し、緩衝材およびオーバーパックの定置時の湧水状態や湧水量の許容範囲などを明らかにした上で人工バリアの定置を進めることが重要である。

- ・ 埋め戻し材の施工

本試験においては、坑道の埋め戻し方法として、掘削土（ズリ）とベントナイトを混合した埋め戻し材を設計・製作し、転圧締め固め（坑道下半部）および埋め戻し材ブロックの設置（坑道上半部）を採用し、転圧締め固めの仕上がり品質管理として、通常用いられる砂置換法やレベル測量に加え、RI法およびQTMなどの適用性を確認した。その結果、RI法が比較的簡便に品質管理が可能であることが確認された。

また、本試験では埋め戻し範囲が廃棄体1本分程度の約7mと短いことや作業スペースな

どの制約から、人力を基本とした施工を行ったが、実際の処分場においては、長大な坑道を埋め戻すことから、専用の締め固め機械の使用や、埋め戻し材ブロックの大型化などが想定される。今後は、これらの機械および材料の施工性および適用性の確認および埋め戻し方法に対応した品質管理手法の構築が必要になると考えられる。

- ・ コンクリートプラグ

本試験におけるプラグは、試験区間が短いこと、区間内で顕著な湧水が無いことが想定されたため、埋め戻し材の坑道への膨出を抑制する力学プラグを選定し、原子力機構が開発した低アルカリ性セメントを用いたコンクリートプラグを施工した。幌延 URL の建設で使用した現地のコンクリートプラントにて、コンクリートを製造・供給し、施工中に随時品質確認を行って適切なコンクリートが打設されたことを確認した。

また、本試験では試験孔および埋め戻し材部に注水することから、プラグ躯体および周辺岩盤との境界部からの漏水が生じない程度の止水性は必要となるため、境界部にベントナイトストリップを設置するとともに、事前に躯体を貫通するようなひび割れが発生しないことを解析的に確認した。さらに、施工後には境界部に生じる微細間隙を充填するためにコンタクトグラウトを施工した。

- ・ 計測システムの整備

各種計測センサーを緩衝材中および埋め戻し材中に、各材料の施工に合わせて随時設置した。施工中の断線の有無などを確認するために、設置後、埋め戻し材施工後およびプラグ施工後など複数回の動作確認を実施し、プラグ施工後に計測システムを構築し、各センサーを連続測定が可能となるように整備した。また、プラグに貫通ダクトを設け、センサーからのケーブル類を取りまとめてプラグ外に取り出した。ダクトは、止水材およびベントナイトにより漏水を防止する構造とした。

実際の処分においては、センサー類の設置は今のところ考慮されていないが、埋め戻し後の品質確認などの観点からモニタリングが必要とされる可能性も考えられる。しかしながら、センサーに付随するケーブルが水みちとなり、バリアシステムを阻害することも懸念されることから、無線モニタリングシステムの開発が行われており、本試験においても無線モニタリング装置を一部に使用し、適用性の確認を実施している。

以上の結果から、第 2 次取りまとめで示された処分概念を、実際の地下環境に構築することは十分に可能であり、設計手法の適用性についても、これまでに示された手法により十分に品質を確保した人工バリアや埋め戻し材を製作・施工可能であることが示された。今後は、再冠水までの過渡期の現象を評価するデータの取得を継続し、性能評価手法の妥当性確認および高度化に資するとともに、最終的には人工バリアおよび埋め戻し材の解体・サンプリング・分析を行い、取得データの妥当性やセンサーの適用性について検討する予定である。

謝辞

本報告書は、幌延深地層研究計画地下研究施設整備(第Ⅱ期)等事業において実施している人工バリア性能確認試験における人工バリアの設置および坑道の埋め戻しについて述べたものである。本試験の実施に当たっては、大成・大林・三井住友特定建設工事共同企業体の城まゆみ氏、丹生屋純夫氏、白瀬光泰氏、高橋昭博氏、栗山政徳氏をはじめとする多くの関係者の方々のご協力をいただいた。この場を借りて、関係各位に深く御礼申し上げる次第である。

なお、本報告のうち、地中無線技術による計測器の設置に関しては、公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センターが経済産業省資源エネルギー庁より受託した「平成27年度 地層処分技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発」の成果の一部であり、同センターとの共同研究として実施した。実施に当たっては同センターの中山真理子氏、小林正人氏をはじめ、多くの関係者の方々のご協力をいただいたことに深く感謝申し上げます。また、緩衝材膨出センサーについては、原子力機構が経済産業省資源エネルギー庁より受託した「平成27年度 地層処分技術調査等事業 処分システム評価確証技術開発」の成果の一部である。

参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構，“深地層研究所（仮称）計画”，1998，14p.
- 2) 核燃料サイクル開発機構，“わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ— 分冊2 地層処分の工学技術”，JNC TN1400 99-022，1999，703p.
- 3) 中山雅ほか，“幌延深地層研究計画における人工バリア性能確認試験—大口径掘削機の開発，模擬オーバーパック，緩衝材および埋め戻し材の製作—”，JAEA-Research 2016-010，2016，57p.
- 4) 日本原子力研究開発機構，“幌延深地層研究計画地下研究施設整備（第Ⅱ期）等事業 要求水準書 平成22年8月20日改訂版”，<https://www.jaea.go.jp/02/compe/pfi/pfi.html>，2010。（参照：2019年8月20日）。
- 5) 丹生屋純夫ほか，“幌延 URL における人工バリア性能確認試験（10）プラグ形状に関する解析的検討”，日本原子力学会 2015年秋の大会予稿集，静岡，2015，H56，in CD-ROM.
- 6) 中山雅ほか，“幌延深地層研究計画における人工バリア性能確認試験 計測データ集（平成26年度）”，JAEA-Data/Code 2015-013，2015，53p.
- 7) 藤田朝雄ほか，“幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階(第1段階)研究成果報告書 分冊「地層処分研究開発」”，JAEA-Research 2007-045，2007，140p.
- 8) 原子力環境整備促進・資金管理センター，“平成24年度原子力発電施設広聴・広報等事業 地層処分実規模設備整備事業 報告書”，2013.
- 9) 中司昇ほか，“地層処分実規模設備整備事業における工学技術に関する研究—平成24年度成果報告—（共同研究）”，JAEA-Research 2013-034，2014，70p.
- 10) 原子力環境整備促進・資金管理センター：“平成27年度 地層処分技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発 報告書 第4分冊 モニタリング関連技術の整備”，2016.
- 11) 原子力環境整備促進・資金管理センター：“平成26年度 地層処分技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発 報告書 第3分冊 モニタリング関連技術の整備”，2015.
- 12) 日本原子力研究開発機構：“平成26年度地層処分技術調査等事業 処分システム評価確証技術開発 報告書”，2015.
- 13) 中山雅ほか，“幌延深地層研究計画における人工バリア性能確認試験 計測データ集（平成27年度）”，JAEA-Data/Code 2016-005，2016，55p.
- 14) 日本原子力研究開発機構，“平成22年度地層処分技術調査等委託費高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム化学影響評価高度化開発”，2011.
- 15) 坪田浩二，“釜石原位置試験総括報告書”，JNC-TN7410 99-001，1999，348p.
- 16) 中山雅ほか，“幌延深地層研究計画における人工バリア性能確認試験—坑道の埋め戻し材に関する検討—”，JAEA-Research 2016-002，2016，280p.

- 17) 山本卓也ほか, “幌延深地層研究センターにおける試錐調査 (HDB-1 孔)”, JNC-TJ1400 2002-010, 2002, 921p.
- 18) 中山雅ほか, “幌延 URL における人工バリア性能確認試験 (9)低アルカリ性セメントのプラグコンクリートへの適用”, 日本原子力学会 2014 年秋の大会予稿集, 京都, 2014, F19, in CD-ROM.
- 19) 中山雅ほか: “幌延深地層研究計画における人工バリア性能確認試験ープラグコンクリートの配合検討ー”, JAEA-Research 2017-016, 2017, 62p.
- 20) 中山雅ほか: “幌延 URL における低アルカリ性セメント系材料の適用性確認”, 原子力バックエンド研究, Vol.23, No.1, pp.25-30, 2016.

付録

CD-ROM 収録データ

- 01.絶縁塗料安全データシート
- 02.模擬オーバーパック充填オイル安全データシート
- 03.試験孔 3D スキャンデータ
- 04.緩衝材ブロック加工図
- 05.埋め戻し材転圧締め固め品質管理データ
- 06.埋め戻しブロック材品質管理データ

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

| 基本量 | SI 基本単位 | |
|-------|---------|-----|
| | 名称 | 記号 |
| 長さ | メートル | m |
| 質量 | キログラム | kg |
| 時間 | 秒 | s |
| 電流 | アンペア | A |
| 熱力学温度 | ケルビン | K |
| 物質량 | モル | mol |
| 光度 | カンデラ | cd |

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

| 組立量 | SI 組立単位 | |
|-------------------------|--------------|--------------------|
| | 名称 | 記号 |
| 面積 | 平方メートル | m ² |
| 体積 | 立方メートル | m ³ |
| 速度 | メートル毎秒 | m/s |
| 加速度 | メートル毎秒毎秒 | m/s ² |
| 波数 | 毎メートル | m ⁻¹ |
| 密度, 質量密度 | キログラム毎立方メートル | kg/m ³ |
| 面積密度 | キログラム毎平方メートル | kg/m ² |
| 比体積 | 立方メートル毎キログラム | m ³ /kg |
| 電流密度 | アンペア毎平方メートル | A/m ² |
| 磁界の強さ | アンペア毎メートル | A/m |
| 量濃度 ^(a) , 濃度 | モル毎立方メートル | mol/m ³ |
| 質量濃度 | キログラム毎立方メートル | kg/m ³ |
| 輝度 | カンデラ毎平方メートル | cd/m ² |
| 屈折率 ^(b) | (数字の) | 1 |
| 比透磁率 ^(b) | (数字の) | 1 |

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

| 組立量 | SI 組立単位 | | | |
|-------------------------------|-----------------------|-------------------|----------------------|---|
| | 名称 | 記号 | 他のSI単位による表し方 | SI基本単位による表し方 |
| 平面角 | ラジアン ^(b) | rad | 1 ^(b) | m/m |
| 立体角 | ステラジアン ^(b) | sr ^(e) | 1 ^(b) | m ² /m ² |
| 周波数 | ヘルツ ^(d) | Hz | | s ⁻¹ |
| 力 | ニュートン | N | | m kg s ⁻² |
| 圧力, 応力 | パスカル | Pa | N/m ² | m ⁻¹ kg s ⁻² |
| エネルギー, 仕事, 熱量 | ジュール | J | N m | m ² kg s ⁻² |
| 仕事率, 工率, 放射束 | ワット | W | J/s | m ² kg s ⁻³ |
| 電荷, 電気量 | クーロン | C | | s A |
| 電位差 (電圧), 起電力 | ボルト | V | W/A | m ² kg s ⁻³ A ⁻¹ |
| 静電容量 | ファラド | F | C/V | m ² kg ⁻¹ s ⁴ A ² |
| 電気抵抗 | オーム | Ω | V/A | m ² kg s ⁻³ A ⁻² |
| コンダクタンス | ジーメン | S | A/V | m ² kg ⁻¹ s ³ A ² |
| 磁束 | ウェーバ | Wb | Vs | m ² kg s ⁻² A ⁻¹ |
| 磁束密度 | テスラ | T | Wb/m ² | kg s ⁻² A ⁻¹ |
| インダクタンス | ヘンリー | H | Wb/A | m ² kg s ⁻² A ⁻² |
| セルシウス温度 | セルシウス度 ^(e) | °C | | K |
| 光照射度 | ルーメン | lm | cd sr ^(e) | cd |
| 放射線量 | グレイ | Gy | J/kg | m ² s ⁻² |
| 放射性核種の放射能 ^(f) | ベクレル ^(d) | Bq | | s ⁻¹ |
| 吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ | グレイ | Gy | J/kg | m ² s ⁻² |
| 線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量 | シーベルト ^(g) | Sv | J/kg | m ² s ⁻² |
| 酸素活性化 | カタール | kat | | s ⁻¹ mol |

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g) 単位シーベルト (PV, 2002, 70, 205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

| 組立量 | SI 組立単位 | | |
|-----------------|-------------------|-----------------------|---|
| | 名称 | 記号 | SI 基本単位による表し方 |
| 粘力のモーメント | パスカル秒 | Pa s | m ⁻¹ kg s ⁻¹ |
| 表面張力 | ニュートンメートル | N m | m ² kg s ⁻² |
| 角速度 | ニュートン毎メートル | N/m | kg s ⁻² |
| 角加速度 | ラジアン毎秒 | rad/s | m m ⁻¹ s ⁻¹ = s ⁻¹ |
| 熱流密度, 放射照度 | ラジアン毎秒毎秒 | rad/s ² | m m ⁻¹ s ⁻² = s ⁻² |
| 熱容量, エントロピー | ワット毎平方メートル | W/m ² | kg s ⁻³ |
| 比熱容量, 比エントロピー | ジュール毎ケルビン | J/K | m ² kg s ⁻² K ⁻¹ |
| 比エネルギー | ジュール毎キログラム毎ケルビン | J/(kg K) | m ² s ⁻² K ⁻¹ |
| 熱伝導率 | ジュール毎キログラム | J/kg | m ² s ⁻² |
| 体積エネルギー | ワット毎メートル毎ケルビン | W/(m K) | m kg s ⁻³ K ⁻¹ |
| 電界の強さ | ジュール毎立方メートル | J/m ³ | m ⁻¹ kg s ⁻² |
| 電荷密度 | ジュール毎立方メートル | J/m ³ | m kg s ⁻³ A ⁻¹ |
| 電表面電荷 | クーロン毎立方メートル | C/m ³ | m ⁻³ s A |
| 電束密度, 電気変位 | クーロン毎平方メートル | C/m ² | m ⁻² s A |
| 誘電率 | クーロン毎平方メートル | C/m ² | m ⁻² s A |
| 透磁率 | ファラド毎メートル | F/m | m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ² |
| モルエネルギー | ヘンリー毎メートル | H/m | m kg s ⁻² A ⁻² |
| モルエントロピー, モル熱容量 | ジュール毎モル | J/mol | m ² kg s ⁻² mol ⁻¹ |
| 照射線量 (X線及びγ線) | ジュール毎モル毎ケルビン | J/(mol K) | m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹ |
| 吸収線量率 | クーロン毎キログラム | C/kg | kg ⁻¹ s A |
| 放射線強度 | グレイ毎秒 | Gy/s | m ² s ⁻³ |
| 放射輝度 | ワット毎ステラジアン | W/sr | m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ = m ² kg s ⁻³ |
| 酵素活性濃度 | ワット毎平方メートル毎ステラジアン | W/(m ² sr) | m ² m ⁻² kg s ⁻³ = kg s ⁻³ |
| | カタール毎立方メートル | kat/m ³ | m ³ s ⁻¹ mol |

表5. SI 接頭語

| 乗数 | 名称 | 記号 | 乗数 | 名称 | 記号 |
|------------------|-----|----|-------------------|------|----|
| 10 ²⁴ | ヨタ | Y | 10 ¹ | デシ | d |
| 10 ²¹ | ゼタ | Z | 10 ² | センチ | c |
| 10 ¹⁸ | エクサ | E | 10 ³ | ミリ | m |
| 10 ¹⁵ | ペタ | P | 10 ⁶ | マイクロ | μ |
| 10 ¹² | テラ | T | 10 ⁹ | ナノ | n |
| 10 ⁹ | ギガ | G | 10 ¹² | ピコ | p |
| 10 ⁶ | メガ | M | 10 ⁻¹⁵ | フェムト | f |
| 10 ³ | キロ | k | 10 ⁻¹⁸ | アト | a |
| 10 ² | ヘクト | h | 10 ⁻²¹ | ゼプト | z |
| 10 ¹ | デカ | da | 10 ⁻²⁴ | ヨクト | y |

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

| 名称 | 記号 | SI単位による値 |
|-------|------|---|
| 分 | min | 1 min=60 s |
| 時 | h | 1 h=60 min=3600 s |
| 日 | d | 1 d=24 h=86 400 s |
| 度 | ° | 1°=(π/180) rad |
| 分 | ' | 1'=(1/60)°=(π/10 800) rad |
| 秒 | " | 1"=(1/60)'=(π/648 000) rad |
| ヘクタール | ha | 1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ² |
| リットル | L, l | 1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³ |
| トン | t | 1 t=10 ³ kg |

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

| 名称 | 記号 | SI単位で表される数値 |
|----------|----|---|
| 電子ボルト | eV | 1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J |
| ダルトン | Da | 1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg |
| 統一原子質量単位 | u | 1 u=1 Da |
| 天文単位 | ua | 1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m |

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

| 名称 | 記号 | SI単位で表される数値 |
|-----------|------|--|
| バール | bar | 1 bar=0.1MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa |
| 水銀柱ミリメートル | mmHg | 1 mmHg=133.322Pa |
| オングストローム | Å | 1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m |
| 海里 | M | 1 M=1852m |
| バイン | b | 1 b=100fm ² =(10 ¹² cm ²) ² =10 ⁻²⁸ m ² |
| ノット | kn | 1 kn=(1852/3600)m/s |
| ネーパ | Np | SI単位との数値的関係は、 対数量の定義に依存。 |
| ベレル | B | |
| デシベル | dB | |

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

| 名称 | 記号 | SI単位で表される数値 |
|-----------------------|-----|--|
| エルグ | erg | 1 erg=10 ⁻⁷ J |
| ダイン | dyn | 1 dyn=10 ⁻⁵ N |
| ポアズ | P | 1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s |
| ストークス | St | 1 St=1cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹ |
| スチルブ | sb | 1 sb=1cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻² |
| フオト | ph | 1 ph=1cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx |
| ガリ | Gal | 1 Gal=1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻² |
| マクスウェル | Mx | 1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb |
| ガウス | G | 1 G=1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T |
| エルステッド ^(a) | Oe | 1 Oe _e =(10 ³ /4π)A m ⁻¹ |

(a) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「△」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

| 名称 | 記号 | SI単位で表される数値 |
|-----------|------|---|
| キュリー | Ci | 1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq |
| レントゲン | R | 1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg |
| ラド | rad | 1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy |
| レム | rem | 1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv |
| ガンマ | γ | 1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T |
| フェルミ | f | 1 フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m |
| メートル系カラット | | 1 メートル系カラット=0.2 g=2×10 ⁻⁴ kg |
| トル | Torr | 1 Torr=(101 325/760) Pa |
| 標準大気圧 | atm | 1 atm=101 325 Pa |
| カロリ | cal | 1 cal=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ), 4.184J (「熱化学」カロリ) |
| マイクロン | μ | 1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m |

