

坑道周辺岩盤の水理特性調査・解析技術に関する研究

中岡 健一 畑 浩二
鳥井 原 誠

Study on Hydrogeological Evaluation on in-situ Measurement and Numerical Analysis at Great Depth

Kenichi Nakaoka Koji Hata
Makoto Toriihara

Abstract

It is important to evaluate the excavated damaged zone (hereafter EDZ) in performance assessment of the boundary between an engineered barrier and a natural barrier in radioactive waste disposal. We applied a Mini-Multi-Packer System (hereafter MMPS) to estimate the hydraulic properties of the EDZ. This system was developed to evaluate the EDZ by measuring the detailed hydraulic conductivity of the excavated damaged rock. To demonstrate the performance of the MMPS, we applied several hydraulic tests on man-made rock. This showed that the hydraulic conductivities obtained from these tests were reasonably well estimated, thus showing that this method was applicable for evaluating the EDZ. We also applied an analysis code for Connect Flow. This code could handle a hybrid model of a fracture network in a porous medium model. The hybrid model analysis performed well in simulation of a cavern in fractured rock. We thus determined that the Connect Flow will be an effective tool for estimating ground water flow.

概要

放射性廃棄物処分における処分場の性能評価のためには、廃棄体を処分する坑道周辺に発生すると考えられる掘削影響領域（以下、EDZ）の透水特性とその範囲を把握する必要がある。本研究では、坑道周辺のEDZの範囲と透水性を調査するための新しい技術として、短区間透水試験装置を導入するとともに周辺装置を構築した。そして、この装置の有効性を調べるため、堆積軟岩に近い透水特性となるように配合したモルタル供試体を用いて透水試験を行った。試験の結果、試験装置は適切に作動し、透水係数を測定できたことから、我が国に適用できると判断した。一方、調査結果を用いて地下水流動を予測する新しい技術として、亀裂媒体と多孔質媒体によるハイブリッドモデルを解析できるコードConnect Flowを導入した。試解析ではハイブリッドモデルを問題なく解き、亀裂媒体を扱う場合は有効な手段となり得ることを確認した。

1. はじめに

空洞を岩盤中に掘削すると、その周辺には、掘削のための発破振動や、掘削によって周辺岩盤の応力が解放され、応力が再配分することによる影響を受けて、力学的・水理学的性質が掘削前に比べて変化する領域が発生するものと考えられる。このような領域を一般的に掘削影響領域 (Excavated damaged zone: 以下、EDZと略す) と呼ぶ。

放射性廃棄物処分は、地下に処分坑道と呼ばれる坑道を掘削し、その中に廃棄体を埋設処分する方法が検討されている。廃棄体は設置された後、坑道壁面との間に、粘土を主成分とする極めて透水性の低い緩衝材と呼ばれる材料を充填することが検討されており、放射性核種の移行の遅延が図られている。廃棄体容器は長期の間に劣化し、いずれは放射性核種が緩衝材の中を移行し、さらに、地下水によって岩盤中を移行して地表まで到るといった地下水シナリオが、処分場の性能評価のために考えられている¹⁾。放射性廃棄物の地層処分における処分坑道周辺にも前述のようなEDZが生じると考えられ、地下水シナリオに則っ

た処分場の性能評価のためには、EDZの水理学的特性とその範囲を把握する必要がある。そこで、Fig.1に示すように、EDZの幅に比して十分短い区間による透水試験を実施し、壁面から深度方向の透水係数の分布を求め、透水係数が掘削前の状態から変化している領域とその度合いを評価しなければならない。そして、これらの調査結果などを反映した広域的なモデルを用いた地下水流動予測が行われ、地下水によって運ばれる放射性核種の移行評価がなされることとなる。処分場が、亀裂系岩盤中に建設される場合、岩盤中の水の流れは亀裂に支配される。処分場周辺では、

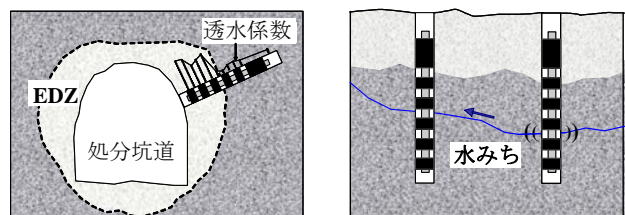


Fig.1 MMPSの適用例
Examples of MMPS application

亀裂と処分坑道の位置関係を考慮する必要がないとはいえないため、亀裂をモデル化することが望ましい。しかし、広域モデル(数km~10数km)全体を亀裂モデルとすることは、现阶段の計算機的能力を考えると効率的ではない。

本研究では、以上の課題を解決できる可能性がある新しい調査技術と解析技術を海外から導入した。調査技術はMini Multi Packer System (以下、MMPSと略す)による短区間透水試験技術であり、室内で製作した模擬岩盤を対象に、この装置の適用性試験を行った。解析技術は亀裂媒体と多孔質媒体のハイブリッドモデルを解析できるConnect Flowであり、試験解析を行ってハイブリッドモデルを計算できるか検討した。本報告はそれらの結果について示す。

2. 地下水調査技術に関する検討

前述のように、処分場の性能評価に必要なゆるみ領域の水利特性と範囲を評価するには、岩盤の透水係数を短区間で数多く測定しなければならないが、従来の透水試験は、数m~10数mと長い区間で行われており、ゆるみ領域を評価するには不十分であった。そこで、岩盤の局所的な透水係数の分布を効率的に測定するため、MMPSがNAGRAによって開発された。この装置は、短い試験区間が5つ並んだもので、岩盤の局所的な透水係数の分布を測定し、EDZの範囲と透水係数を評価するものである。また、亀裂性岩盤においてはFig.1右に示すように亀裂の連続性を評価できる可能性がある。海外においては、本装置を用いて坑道壁面から透水係数の分布を測定し、EDZの範囲とその透水性を評価した実績があるもの²⁾、国内ではまだない。そこで、本装置のわが国の岩盤条件での適用性を調べることを目的として、堆積軟岩に近い透水係数となるように配合したモルタル供試体(以下、模擬岩盤と称す)を用いた適用性試験を行った。本章ではMMPSの概要と試験結果の概要、MMPSの有効性の考察について報告する。

2.1 MMPSの概要

MMPSはFig.2に示すように、長さ10cmの試験区間とパッカーが交互に5つ並んだ構造で、端部(写真では右端、右側の図では左端)には1mの長さのパッカーが配置され、先端部でシングルパッカーによる試験が可能である。

それぞれの試験区間にはFig.3に示すように、注水管と試験区間の圧力を測定するための管が独立してつながっており、パッカー間10cmにおける短区間での独立した透水試験を行える。また、各パッカーには、パッカーを拡張させるための注水管が独立してつながっており、それぞれ独立して拡張させることができる。中間部のパッカーを拡張させないことにより、透水区間長を30cm, 50cm, 70cm, 90cmの間で任意に選定することも可能である。MMPSの基本仕様をTable 1に示す。

2.2 周辺装置の構築

本研究ではMMPSの導入とともに、わが国の堆積軟岩に合わせた周辺装置の構築を行った。短区間透水試験システムは、孔内部からの配管および水圧測定ユニット、流量測定ユニット、定流量注水ユニット、定圧注水ユニット、デ

Table 1 MMPSの仕様
Specifications of MMPS

全長	直径	適用孔径	パッカー圧
2m	48mm	50~55mm	最大 6MPa

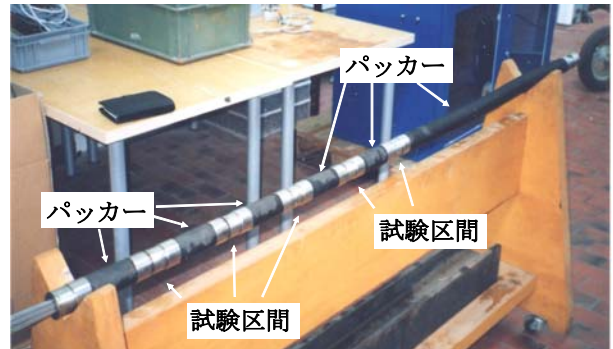


Fig.2 MMPSの概観
Appearance of MMPS

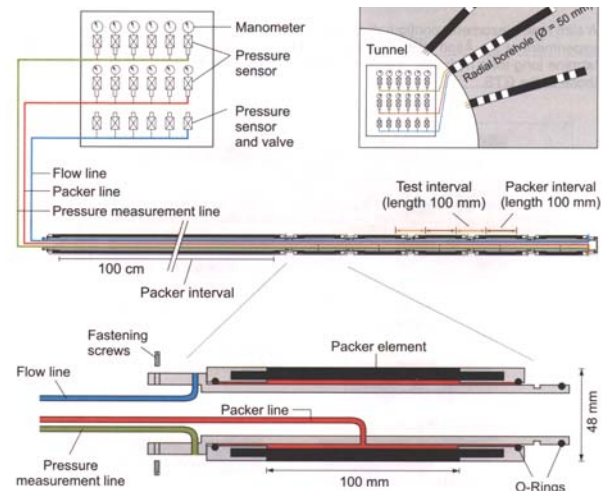


Fig.3 MMPSの構造²⁾
Structure of MMPS

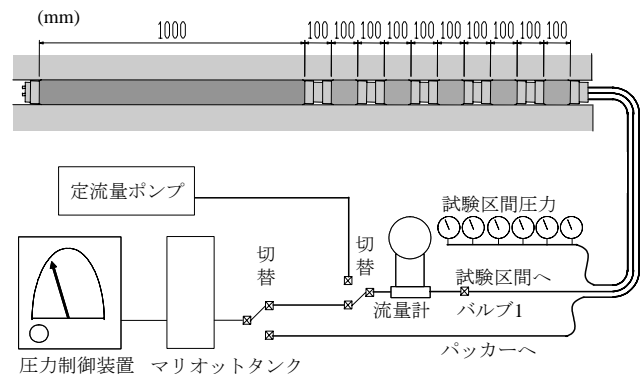


Fig.4 短区間透水試験システムの概要
Configuration of hydraulic test system using MMPS

ータ収録ユニット,そしてMMPSから構成される (Fig.4参照)。

MMPSからの配管と,水圧計や注水ユニットなど周辺装置との接続には,内径4mm,外径6mmのナイロンチューブを用いた。試験区間およびバッカーの水圧測定ユニットは,6つの区間それぞれ,独立してブルドン管水圧計と電気式水圧計を有している。

流量測定ユニットは,本試験では一系統とし,試験を行う区間に応じてその都度注水管を流量計につなぎ変えた。各区間に流量計を設ければ,複数の試験区間で同時に定圧試験を行うことができる。流量計は幅広い透水性に対応するため,1~30cc/minと30~700cc/minの二つの測定範囲のものを用いた。定流量ポンプの注水量の範囲は30~700cc/minとした。最大吐出圧力は1MPaである。

定圧注水ユニットは,コンプレッサで加圧した空気を,圧力制御装置を介してマリOTTタンクに送気し,一定水圧を得るものである。マリOTTタンクはタンク内部の水位が変動しても,得られる水圧が変化しない仕組みになっている。制御圧は最大1MPaとした。

水圧および流量の計測データは,最小1秒の任意の時間間隔で自動的に,パソコンに保存される。モニタには流量や水圧のグラフが絶えず描画され,試験状況を確認することができる。MMPSおよび周辺装置をもって短区間透水試験システムと呼ぶ。

2.3 適用性試験の方法および評価方法

2.3.1 模擬岩盤の概要 MMPSの適用性確認試験は,模擬岩盤を用いて実施した。模擬岩盤はFig.5に示すように,長さ2.9m,高さおよび幅を0.8mとし,材料は透水係数を制御するために間隙率を調整したモルタルとした。MMPS挿入用孔は,孔間の水圧応答を測定できるように2本設け,上側をMMPS1,下側をMMPS2とした。MMPS先端部の試験区間においても試験できるように,孔の端部を同じ配合のモルタルで閉塞した。

MMPS挿入口から奥側の模擬岩盤①は,透水係数が我が国の堆積軟岩地山に相当する $10^{-10} \sim 10^{-8} \text{m/s}$ となるように配合検討し,挿入口側の模擬岩盤②は空隙率を大きくし,掘削の影響によって透水係数が大きくなっている状態を模擬した。また,本装置が,孔間を結ぶ水みちの評価への適用性を調べるため,模擬岩盤①と②の間は無処理の打継目とし,水みち亀裂をモデル化した。設計強度は,本試験で設定したバッカー圧(1MPa)によって引張り破壊しないように定めた。

配合されたモルタルは,セメントと水が少ないため流動性がなく,撒出し・締め固めを型枠内で9層に分けて打設し,模擬岩盤を製作した。MMPS挿入用孔は,所定の位置に鋼管を設置してモルタルを打設し,硬化後に鋼管を引抜いて構築した後,MMPS挿入口の反対側を本体と同じ配合のモルタルを充填した。その後40日間水中養生して飽和をはかり,水中に浸したまま透水試験に供した。Table 2に模擬岩盤の基本仕様を示す。

2.3.2 試験方法 本研究ではパルス試験,定流量試験,定圧試験,および孔間透水試験を実施した。以下にそれぞれの概要を述べる。

パルス試験は岩盤のおおむねの透水係数を把握するために行われることが多い。試験方法は,試験区間につながる注水管のバルブ(Fig.4のバルブ1)を一時的に開き,直ちに閉じるもので,定常状態である初期圧力への回復を測定する。その結果は,正確な透水係数を求めるための試験方法を設定することに用いられる。他の手法に比べて試験に要する時間が短い特徴を有する。

定流量試験は,比較的高い透水性を有する岩盤に適している。試験方法は, Fig.4に示す定流量ポンプを流量計につなぎ,試験区間に一定流量で注水し続けるもので,岩盤の透水性が低い場合は一定流量で注水することが困難な場合がある。

定圧試験は比較的低い透水性の岩盤に適している。試験方法は, Fig.4に示す圧力制御装置およびマリOTTタンクを流量計につなぎ,試験区間に一定の水圧を作用させ続けるもので,岩盤の透水性が高い場合は水圧を一定に保つことが困難な場合がある。

孔間透水試験は,孔間の水圧応答などを調べることで,孔間を結ぶ水みちを評価することができる³⁾。

2.3.3 透水係数の評価 模擬岩盤の透水係数を求めるために,非定常井戸解析によって試験から得られた水圧または流量の時刻歴へのフィッティング解析を行う。試験結果と解析結果が最も一致したときの透水係数を,模擬岩盤の透水係数と考える。水の流れは放射状流で,孔軸方向の流れはないと仮定し,式(1)に則った解析を行う。

Table 2 模擬岩盤の基本仕様
Specification of man-made rock

寸法	間隙率	設計強度
長さ: 2.9 m	模擬岩盤①: 5%	引張強度 1MPa
高さ, 幅: 0.8m	模擬岩盤②: 7%	

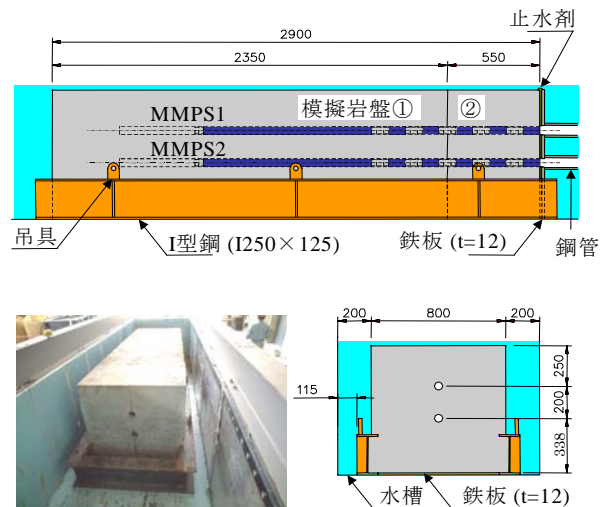


Fig.5 模擬岩盤の概要
Overview of man-made rock

$$s \frac{\partial h}{\partial t} = k \frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{k}{r} \frac{\partial h}{\partial r} \quad (1)$$

ここに、s は非貯留係数、k は透水係数、r は試験孔中心からの距離、h は水頭、t は初期状態から経過した時間である。ここで、定常状態を仮定すると式(1)の左辺は0となり、左辺を0として式(1)を解くと水頭hの分布は式(2)のようになる。

$$h = \alpha + \beta \log r \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{h_0 \log R + H \log r_0}{\log r_0 - \log R} \quad \beta = \frac{h_0 - H}{\log r_0 - \log R} \quad (3)$$

ここに、r₀は井戸の半径、h₀は井戸壁面における水頭、Rは考慮するモデルの範囲、Hはモデル周囲の水頭である。流量は式(2)を微分して得られる動水勾配に透水係数を乗じたもので、定常流量Qは井戸壁面の面積に流速を乗じたものであるから、

$$Q = 2\pi km\beta \quad (4)$$

となる。ここで、mは放射状流の厚さで、本試験の場合は試験区間の長さに対応する。式(4)および式(3)から、モデル領域Rが大きくなればなるほど、試験区間から注入される時間当たりの水の量Qが少なくなり、その値は収束しない。そのため、原位置試験のシミュレーションにおいてはモデル範囲の設定が難しいため、逆解析項目とする場合もある。本試験ではモデル範囲をMMPS挿入用孔中心から模擬岩盤側面までの距離であるr=40cmとし、境界の水頭h=0mとした。

2.4 透水試験の結果

2.4.1 パルス試験の結果 Fig.6に示すように、試験区間は挿入孔奥側からMMPS1については1-1～1-6、MMPS2については2-1～2-6とした。

パルス試験結果の一例として、Fig.7～9に、試験区間1-1～1-3における区間圧力と時間の関係を示す。いずれもピークから徐々に初期圧力である0MPaに近づく典型的なパ

ルス試験の圧力履歴を示しており、3分程度で初期状態に戻った。フィッティング解析によって算出された透水係数は10⁻⁸m/sオーダーで、定流量、定圧試験ともに適用可能であると判断した。また、本計測システムはパルス試験に適用可能であることが分かった。

2.4.2 定流量試験の結果 定流量試験結果の一例として、Fig.10および11に試験区間1-3および2-1における区間圧力と時間の関係を示す。模擬岩盤の透水係数が低く、定常状態に至るまでに長時間要する場合は、水圧は緩やかな曲線を描き、徐々に定常水圧に近づくことを事前解析で確認している。それに対し、本試験では、いずれの試験区間においても、注水と同時に急激に水圧が上昇した後、わずかに水圧が増え続ける傾向が見られた。この原因としては、模擬岩盤が完全には飽和していなかったことが考えられる。ただし、試験区間1-3では10000秒以降はほとんど増加がなく、定常状態に近いと考えられ、透水係数を評価するには問題ないと判断した。得られた試験区間1-3の透水係数は、同じ区間のパルス試験の結果と同じ10⁻⁸ m/sオーダーである。一方、試験区間2-1においては、評価された透水係数が10⁻⁶ m/sオーダーで他の試験区間よりも高い値を示した。この試験区間はMMPS先端部であり、MMPS挿入用孔の端部はモルタルで充填している。充填したモルタルは、機械では締め固めできず、本体に比べて間隙が大きくなり、透水係数が高くなった可能性がある。

2.5.3 定圧試験の結果 Fig.12に試験区間1-4における定圧試験の結果を示す。この区間は打継目と交差している。加圧開始から圧力が最大になるまで1分程度要しているが、これは急激な流量変化に対する流量計の応答遅れのためである。ここでは、フィッティング解析は定常状態になっ

	模擬岩盤①			模擬岩盤②		
MMPS1	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6
MMPS2	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5	2-6

Fig.6 試験区間の配置

Layout of test interval

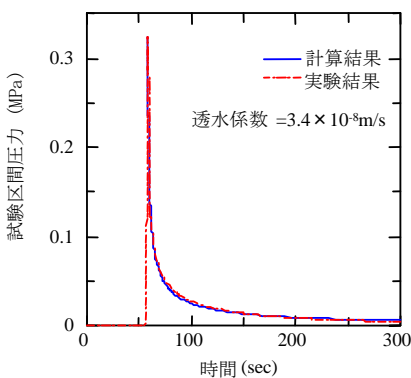


Fig.7 試験区間1-1におけるパルス試験結果

Result of pulse test of test interval 1-1

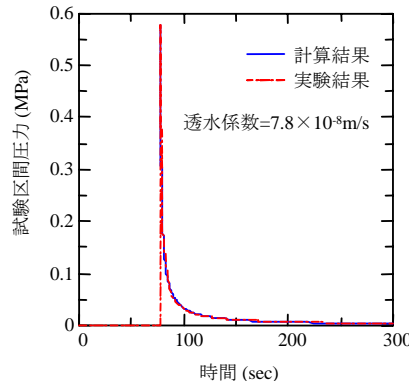


Fig.8 試験区間1-2におけるパルス試験結果

Result of pulse test of test interval 1-2

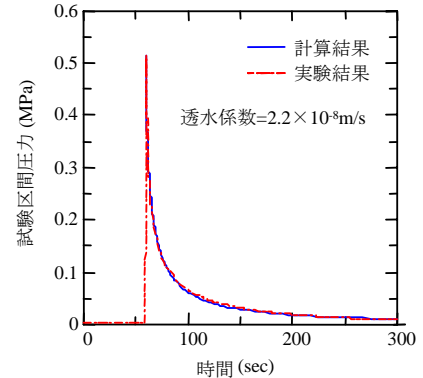


Fig.9 試験区間1-3におけるパルス試験結果

Result of pulse test of test interval 1-3

た後を対象とした。評価された透水係数は 10^{-6} m/sオーダーで他の試験区間に比べて高く、打継目に水みちが生じていることを示唆している。

2.5.4 孔間透水試験の結果 Fig.13に孔間透水試験として試験区間2-4に加圧したときの試験区間1-3～1-5の水圧応答を示す。加圧した試験区間と同じ打継目に位置する試験区間1-4に直ちに応答が現れており、打継目に水みちが生じていると考えられる。この結果は、先の定圧試験と調和的である。その隣の試験区間1-3は応答が遅れ、徐々に水圧が高くなったことに対し、試験区間1-5にはほとんど応答が見られない。事前検討から、模擬岩盤の透水係数は1オーダー程度ばらつく可能性があることを想定している。試験区間1-3と1-5の応答の違いはこのばらつきによるものとする。

2.5.5 パッカー機能確認試験の結果 Fig.14に隣接する試験区間2-2と2-3の水圧応答を合わせて示す。図より隣接区間への水圧伝播は小さく、2つの試験区間の間に位置するパッカーは機能していると考えられる。

3. 地下水流動予測技術に関する検討

本章では、試解析によってConnect Flowのノウハウを蓄積すること、ハイブリッドモデルを解析できることの確認を目的とした。

3.1 Connect Flowの概要

Connect FlowはNAGRA, POSIVA, SKBが開発している地下水流動評価解析コードで、評価対象とする空洞周辺部を亀裂ネットワーク媒体、その外部を多孔質媒体としたハイブリッドモデルを解析できるコードである。このコードの実用性を高めるために、iCONNECT Clubが組織され、NAGRA, POSIVA, SKBがコードの拡張・修正を行っており、大林組もこの組織に参画している。岩盤をハイブリッドモデルとすることにより、亀裂性岩盤の場合は空洞から遠方領域まで亀裂をモデル化することなく、モデル領域の拡大あるいは、計算の高速化が可能となる。

3.2 試解析の条件

試解析の一例として、Fig15のようなトンネルを想定した。亀裂モデルは、亀裂密度と平均的な走向傾斜を入力すれば自動的に生成される。ここでは亀裂密度を $0.08\text{m}^2/\text{m}^3$ と仮定した。この値は12.5m間で亀裂が並んだ状態である。亀裂の透水量係数は $2 \times 10^{-8}\text{m/s}$ と仮定した。亀裂モデ

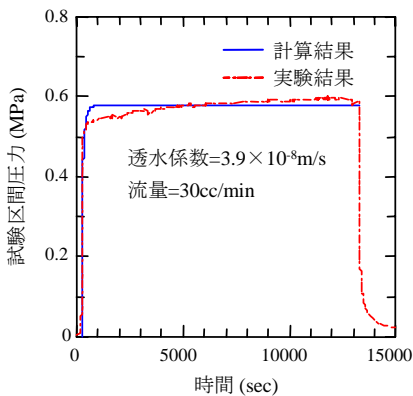


Fig.10 試験区間1-3における定流量試験結果

Result of testing with constant flow rate test interval 1-3

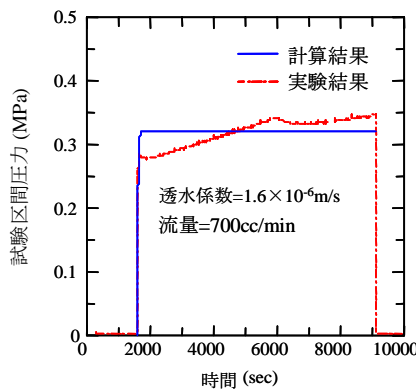


Fig.11 試験区間2-1における定流量試験結果

Result of testing with constant flow rate at test interval 2-1

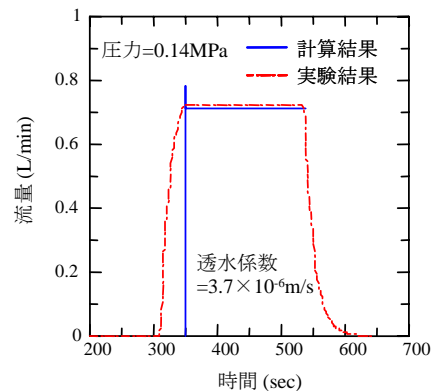


Fig.12 試験区間1-4における定圧試験結果

Result of testing with constant head at test interval 1-4

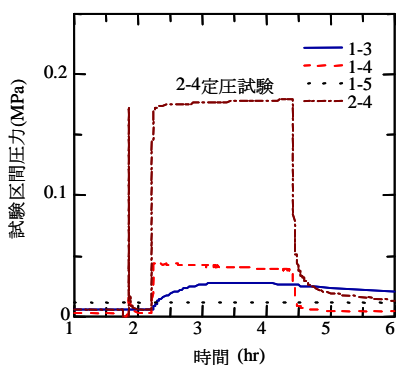


Fig.13 孔間透水試験結果
Result of cross hole test

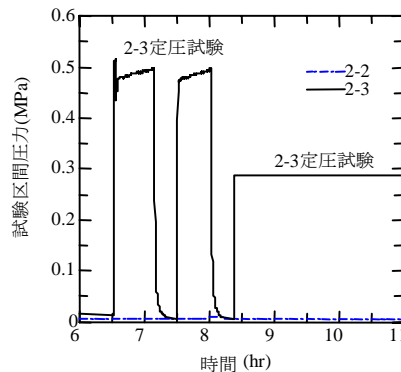


Fig.14 隣接する試験区間への影響
Influence for next interval

ル周囲の多孔質媒体の透水係数として、亀裂を含むマクロな透水係数は $1 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ とする。解析モデルをFig.15に示す。

3.3 試解析の結果

Fig.16に解析結果として圧力水頭コンターを示す。比較のために多孔質媒体モデルのみによる解析結果をFig.17に示す。Fig.16は亀裂の水圧を示しており、空間的に不連続になっている。圧力水頭は、空洞から離れた所では深い位置ほど高くなっており、空洞壁面では低くなっている。また、亀裂媒体領域と多孔質媒体領域との境界の圧力水頭は連続的である。空洞周辺部の圧力水頭分布の傾向はFig.17の多孔質媒体による結果に近い。

4. まとめ

地下水調査技術の検討においては、MMPSを用いて種々の透水試験を行い、10-8 m/sオーダの母岩と10-6 m/sオーダの水みちの透水係数を測ることができた。また、パッカー機能確認試験より、隣接区間の水圧応答は小さくなることから、パッカーは十分機能できることが判明した。孔間透水試験では、水みちでつながった試験区間への応答が顕著で、水みちを評価できることを示している。以上の試験結果からMMPSは、わが国の透水係数10-6~10-8m/sオーダの堆積軟岩には適用可能であり、ゆるみ領域を評価できる可能性が高いことが分かった。また、隣接区間同士の水圧の影響が小さいことから、岩盤の透水性にもよるが、複数の試験区間で同時に透水試験ができ、試験の効率を向上できる可能性を示唆した。

地下水流動評価技術の検討においては、解析に必要な条件を適切に設定できれば、ハイブリッドモデルにより評価できる可能性が高いことが分かった。ただし、付属のモデルおよび入力データ作成システムはハイブリッドモデルを扱うには不十分で、直接入力データを編集する必要がある。

参考文献

- 1) 日本原子力研究開発機構 (当時核燃料サイクル開発機構): 我が国における高レベル放射性廃棄物地層処分技術的信頼性 -地層処分研究開発第2次取りまとめ- 総論レポート, JNC TN1400 99-020 (1999)
- 2) Thury, M., Bossart, P.: Mont Terri Rock Laboratory Results of the Hydrogeological, Geochemical and Geotechnical Experiments Performed in 1996 and 1997, (1999)
- 3) 竹内竜史, 他: 孔間水理試験装置の開発, サイクル機構技報, No8 2000.9 (2000)

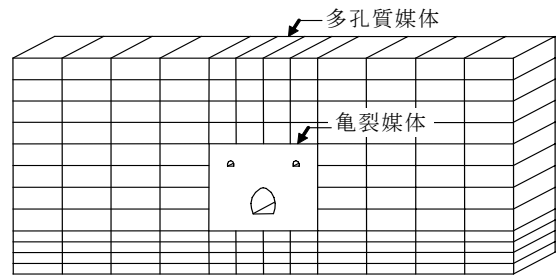


Fig.15 ハイブリッド解析モデル
Hybrid model for seepage analysis

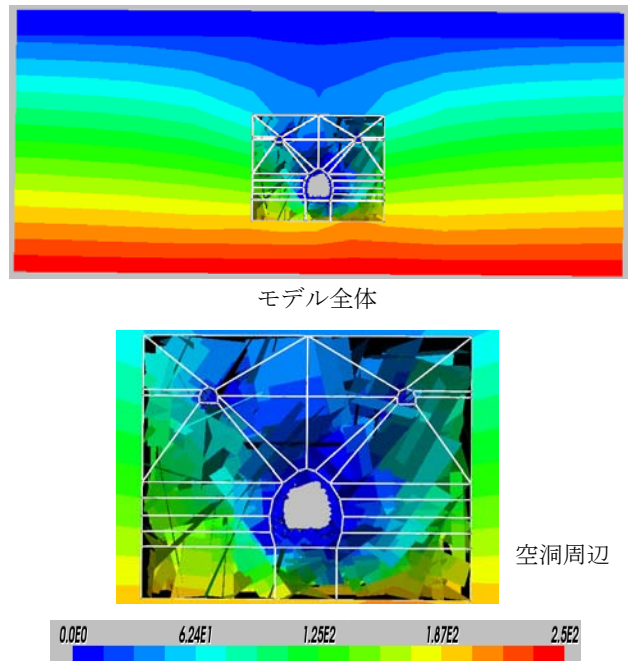


Fig.16 水頭の分布
Distribution of pressure head

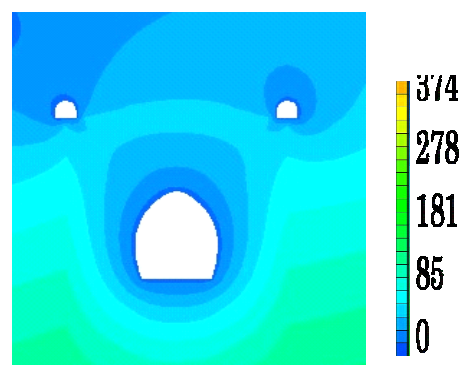


Fig.17 多孔質媒体モデルによる水頭の分布 (空洞周辺)
Distribution of pressure head by porous media model