

堆積軟岩を対象にした短区間透水試験法の 適用性に関する基礎的研究

中岡 健一¹・畑 浩二²・安藤 賢一³

¹正会員 株式会社 大林組 技術研究所 (〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640)
E-mail:nakaoka.kenichi@obayashi.co.jp

²正会員 株式会社 大林組 技術研究所 (〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640)

³正会員 株式会社 大林組 東京本社土木技術本部 (〒204-8558 東京都港区港南2-15-2)

放射性廃棄物処分における天然バリアの性能評価のためには、掘削影響領域の特性とその範囲を把握する必要がある。本研究では、掘削影響領域の範囲と透水性を評価するため、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、得られた透水係数は設定した透水係数に近く、本試験および装置の妥当性を確認した。また、試験区間同士の水圧の影響が小さいことから複数の区間で同時試験が可能であり、透水試験を効率化できる可能性についても確認した。

Key Words : MMPS, man-made rock, soft rock, hydraulic test, excavated damaged zone

1. はじめに

空洞周辺岩盤は、掘削に用いられる発破や掘削に伴う応力解放による影響を受け、力学的・水理学的性質が健岩部とは異なる掘削影響領域 (Excavated damaged zone: 以下、EDZと略す) が発生するものと考えられる。放射性廃棄物の地層処分における処分坑道周辺にもこのようなEDZが生じると考えられ、天然バリアの性能評価のためには、特に水理学的な観点からEDZの範囲や特性を把握する必要がある。

そこで、筆者らはEDZの範囲と透水性を評価する試験手法であるMini Multi Packer System (以下、MMPSと略す) を用いた短区間透水試験に着目した。MMPSは、パッカーに挟まれた短い試験区間が5つ並んだもので、通常数メートルから10数メートルの区間長の透水試験を10cmの区間で独立して実施できるように開発されたものである¹⁾。これにより、図-1に示すように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できると期待される。また、亀裂性岩盤においては同図に示すように亀裂の連続性を同定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の範囲を評価した実績があるものの¹⁾、国内ではまだない。そこで、本装置のわが国の岩盤条件に対する有効性を調べることを目的に、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。本論文では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. 短区間透水試験システムの概要

(1) MMPSの概要

MMPSは図-2に示すように、長さ10 cmの透水区間と長さ10 cmのパッカーが交互に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1 m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10 cm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

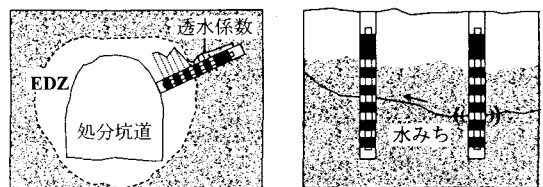


図-1 MMPSの適用例

させるための注水管が独立してつながっており、それぞれ独立して機能させることができる。中間部のパッカーを機能させないことにより、透水区間長を10 cm、30 cm、50 cm、70 cm、90 cmの間で任意に選定することも可能である。MMPSの基本仕様を表-1に示す。

(2) 周辺装置の概要

本研究ではMMPSの導入とともに、周辺装置の構築を行った。試験区間およびパ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。本試験では流量測定ユニットを一系統とし、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。流量計は幅広い透水性に対応するため、1~30 cc/minと30~700 cc/minの二つの測定範囲のものをを用いた。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保存される。定流量ポンプの注水量の範囲は30~700 cc/minとし、注水圧力を正確に制御するため、マリオットタンクを設けた。

3. 模擬岩盤の概要

模擬岩盤は図-3に示すように、長さ2.9 m、高さおよび幅を0.8 m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

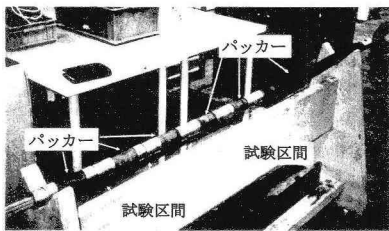


図-2 MMPSの概要

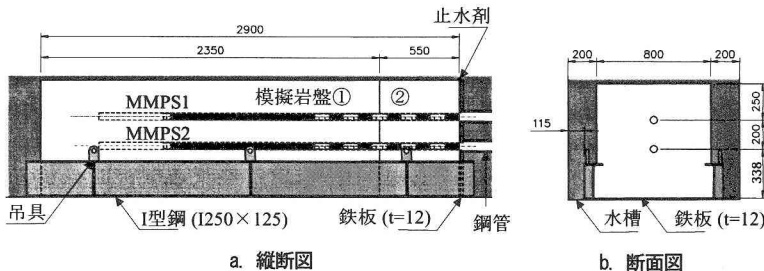


図-3 模擬岩盤の概要

表-1 MMPSの基本仕様

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

表-2 模擬岩盤の基本仕様

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

間の水圧応答を測定できるように2本設け、それぞれMMPS1、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} ~ 10^{-8} 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てEDZ相当の透水係数になることを期待した。また、本装置の亀裂位置同定への適用性を調べるため、模擬岩盤①と②と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、本試験で設定したパッカー圧(1 MPa)によって引張り破壊しないように定めた。

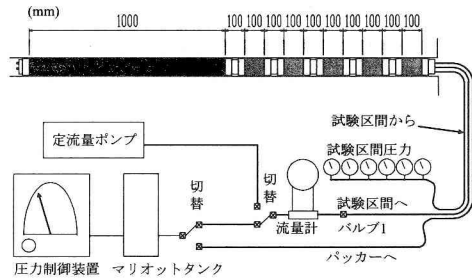
模擬岩盤はモルタル撒出し、タンパーによる締め固めを9層に分けて打設し、作製した。MMPS挿入用孔は、所定の位置に鋼管を設置してモルタルを打設し、硬化後に鋼管を引抜いて構築した。その後40日間水中養生して飽和をはかり、水中に浸したまま透水試験に供した。

4. 試験方法および透水係数の導出方法

(1) 試験方法

本研究ではパルス試験、定流量試験、定圧試験を実施する。以下にそれぞれの概要を述べる。

パルス試験は岩盤の透水係数の概要を把握し、正確な



透水係数を求めるための試験方法を設定するために行う。試験方法は、試験区間につながる注水管のバルブ（図-2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。他の手法に比べて試験に要する時間が短い。

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、図-2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、図-2に示す圧力制御装置およびマリ奥特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。

(2) 透水係数の算出

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と仮定し、以下の基礎方程式にのっとり解析を行う。

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

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 は時間である。境界条件はMMPS挿入用孔中心から模擬岩盤側面までの距離である $r=40\text{cm}$ において、水頭 $h=0\text{m}$ とした。

	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						

図-4 試験区間の配置

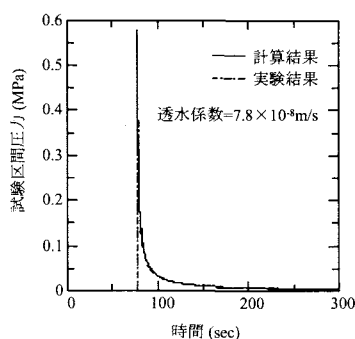


図-5 試験区間 1-2 におけるパルス試験結果

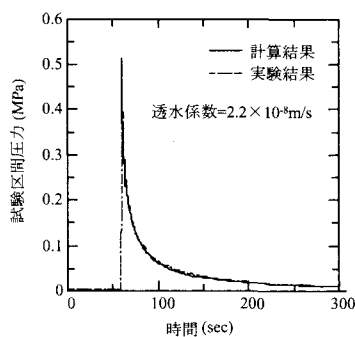


図-6 試験区間 1-3 におけるパルス試験結果

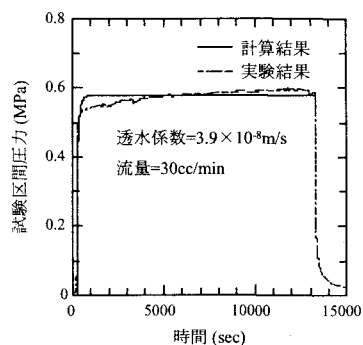


図-7 試験区間 1-3 における定流量試験結果

5. 透水試験の結果

(1) パルス試験の結果

図-5に試験区間1-2、図-6に試験区間1-3におけるパルス試験の結果を示す。試験区間は図-4に示すように、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。いずれもピークから徐々に初期圧力である0 MPa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^{-8}m/s オーダーで、模擬岩盤に設定した透水係数 $10^{-10}\text{m/s} \sim 10^{-8}\text{m/s}$ に近いことから、パルス試験によって得られた透水係数は妥当と考える。

(2) 定流量試験の結果

図-7に試験区間1-3における定流量試験の結果を示す。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、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、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、透水係数を同定するには問題ないと判断した。得られた透水係数は、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、定流量試験によって得られた透水係数は妥当と考える。

(3) 定圧試験の結果

図-8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た後を対象とした。導出された透水係数は 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。

(4) 孔間透水試験の結果

図-9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。

(5) 隣接する試験区間への水圧応答

図-10にパッカーの機能を確認するため、隣接する試験区間2-2と2-3の水圧応答を合わせて示した。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。

6. まとめと今後の課題

MMPSを用いて種々の透水試験を行い、 10^{-8} m/sオーダーの母岩と 10^{-6} m/sオーダー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を確認した。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、水みちを同定できることを示している。以上の試験結果からMMPSは、わが国の堆積軟岩に適用できるものと判断した。また、隣接区間同士の水圧の影響が小さいことを確認したことから、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。今後は実際の堆積軟岩地山での適用性検証を通し、試験ノウハウを取得する予定である。

謝辞: 研究を遂行するに当たり、Bernad Fricg氏 (Nagra) に多大なご協力を頂きました。ここに謝意を申し上げます。

参考文献

- 1) Thury, M., Bossart, P.: Mont Terri Rock Laboratory Results of the Hydrogeological, Geochemical and Geotechnical Experiments Performed in 1996 and 1997, 1999

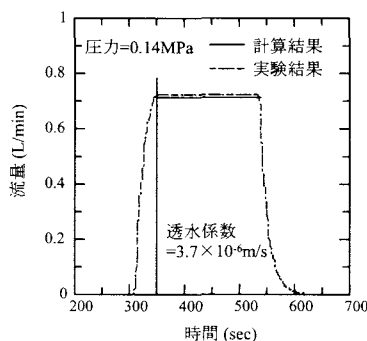


図-8 試験区間1-4における定圧試験結果

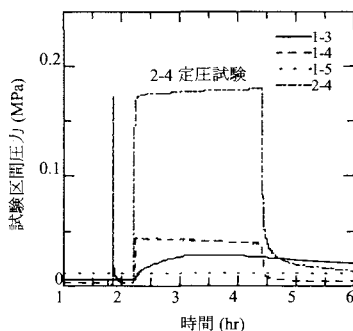


図-9 孔間透水試験結果

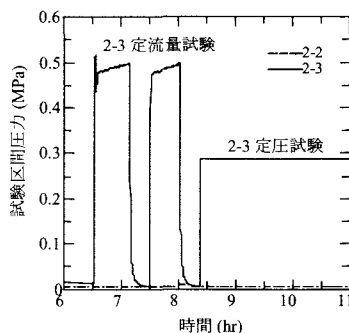


図-10 隣接する試験区間への影響

A STUDY ABOUT AVAILABILITY OF MINI MULTI PACKER SYSTEM WITH SEDIMENTARY SOFT ROCK

Kenichi NAKAOKA, Koji HATA and Kenichi ANDO

To evaluate the excavated damaged zone (here after EDZ) is important for performance assessment of boundary between the engineered barrier and natural barrier in radioactive waste disposal. We applied Mini Multi Packer System (here after MMPS) for estimating hydraulic property of the EDZ. This equipment was developed for evaluate the EDZ by measuring detail hydraulic conductivity of the excavated damaged rock. To demonstrate the performance of the MMPS, we applied pulse test, constant flow rate test and constant pressure test on man-made rock. Derived hydraulic conductivity by these tests were reasonably well estimated with the predicted value, therefore we conclude this method could be applicable for evaluating the EDZ. Furthermore we confirmed that the packer could seal the interval and it was possible to carry out a series of test simultaneously.