

多機能工学バリアシステムの提案と止水性能評価

—人工バリアを用いた汚染土の封じ込め—

西田 憲司 須藤 賢
佐藤 晶子 納多 勝

(本社土木技術本部技術第四部) (本社土木技術本部技術第四部)

Proposal and Evaluation of Hydraulic Conductivity for Smart Subsurface Barrier System

— Containment of Contaminated Soil by Artificial Barrier —

Kenji Nishida Ken Sudo
Shoko Sato Masaru Noda

Abstract

Contamination of soil and groundwater by pollutants buried without proper treatment has become a social problem around the world. The objective of this project was to develop a Smart Subsurface Barrier System (SSB) that has functions of enclosing pollutants and remediating contaminated soils. This report describes a method for evaluating the hydraulic conductivity of the SSB using a seepage test, and an assumption method for joint defects using a radioisotope method (RI method). Both methods have been put to practical use. A thorough study has shown that the hydraulic conductivity of SSB is less than $k=1.0 \times 10^{-7}$ cm/sec, which is one of the strictest criteria of the EPA standard, so it is confirmed that the SSB is effective.

概要

近年、世界各地において適切な処置をされずに投棄・埋設された廃棄物による土壌汚染が問題となっている。こうした背景から本研究では、原位置で汚染物質を長期にわたり封じ込め、さらに汚染物質を含む浸出水を集積、排出して汚染地盤の浄化を行うバリアシステムの開発を目指している。本報告では、定水位透水試験を応用した実大規模のバリアシステムの止水性能評価法、ラジオアイソトープ(RI法)によるバリア継手部の漏水箇所推定手法の適用に関する検討結果を述べている。検討の結果、いずれの手法とも実用可能であることが確認された。さらに、実大規模で施工されたバリアの透水係数は $k=1.0 \times 10^{-7}$ cm/sec以下で、世界で最も厳しい基準である米国環境保護庁(EPA)の要求性能を満たしており、本バリアシステムの有効性も確認できた。

1. はじめに

近年、世界各地において過去に適切な処置をせずに投棄・埋設された廃棄物による土壌・地下水汚染が社会的な問題となっている。汚染地盤内に不透水層が適当な深さに存在する場合は、従来手法で鉛直な止水壁を不透水層まで設置することにより、汚染物質を封じ込めることができる。しかし、不透水層が適当な深さに存在しない場合、上述の手法では汚染物質封じ込めが極めて困難となる。こうした背景から本研究では、Fig. 1に示すように不透水層に依存することなく地盤内に3次元的バリアを構築し、汚染物質を長期にわたり確実に封じ込める技術の開発を目指している。特に、実大規模のバリア止水性能評価法、漏水箇所推定法は確立された手法が見あたらないため、対応技術の一手法をここで提案する。

本研究で開発するバリアは、汚染物質を封じ込めるだけでなく、汚染物質を含む浸出水を集積、排出する機能を追加することも想定している。そのため、筆者らは開

発バリアのことを「多機能工学バリア」と称している。多機能工学バリアは、汚染地盤周辺に構築する不透水性バリアであるため、種々の汚染源に適用可能である。バリアの品質としては、世界で最も厳しい基準である米国環境保護庁(EPA)の要求性能、すなわち透水係数 $k=1.0 \times 10^{-7}$ cm/sec以下を目標としている。

本報告では、まず多機能工学バリアシステムの概要と施工方法について述べ、実証試験による多機能バリア構

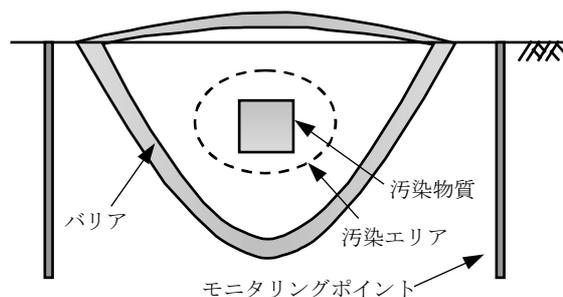


Fig. 1 多機能工学バリアシステムの概念
Smart Subsurface Barrier System(SSB)

築およびバリアの止水性能評価手法の提案とその妥当性検証結果について記している。

2. バリアシステムの概要

Fig. 1の多機能工学バリアシステムはFig. 2に示す不透水性工学バリアとFig. 3に示す浸出水集積バリアから構成される。

Fig. 2に示す不透水性工学バリアは、各種物質により汚染された地盤に対し、その側面および底部に極めて透水性の小さいバリアを設置して汚染土壌を長期間封じ込める。バリアは連続した鋼管パイプとその周囲に注入する充填材から構成され、その透水係数の目標値は $k=1.0 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ 以下を設定している。バリア性能を保持する期間は100年を目標とする。

Fig. 3に示す浸出水集積バリアは、主に溶解性の汚染物質により汚染された土壌に対し、その底部に浸出水集積バリアを設置して降水あるいは強制散水により汚染物質を含んだ地下水を集積し、汚染地盤を修復するものである。浸出水集積バリアは、不透水性バリア同様に鋼管パイプとその周囲に注入する充填材から構成されている。ただし、バリアの鋼管パイプは浸出水集積のために汚染土壌側のみに多数の孔が設置されており、汚染物質がバリア背面側に漏洩することはない。鋼管パイプ内に入り込んだ汚染水は、Fig. 4に示すとおり浸出水集積バリアを施工する際に、勾配を持たせることで回収しやすくなる。

3. 実規模バリアの施工

3.1 概要

隣接する鋼管との接続を確実にする継手構造および充填材料とその注入方法を検討した結果、試作した継手構造を有したモデルバリアの止水性能は透水係数 $k=1.0 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ 以下を満足することを確認している^{1,2)}。

本研究では人工地盤を作製し、小口径管推進機による掘削を伴って実大規模のバリアを設置し、施工方法を実証する。

3.2 人工地盤の造成

試験全体計画をFig. 5に示す。バリアは、幅約3.4m×高さ2.1m×奥行4.5mの鋼製大型試験土槽内に設置した。

バリア設置前に土槽内全体にポーラスモルタルを打設して、均質な地盤を造成した。ポーラスモルタルの配合はTable 1に示すとおりである。打設1ヶ月後にポーラスモルタルからコアを採取して調査した結果、透水係数は $k=4.9 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ であった。

3.3 実規模のバリアの施工

小口径管推進機としてアイアンモールハイパーTP95S-2を使用した。通常の推進工においては、掘削水や摩擦低

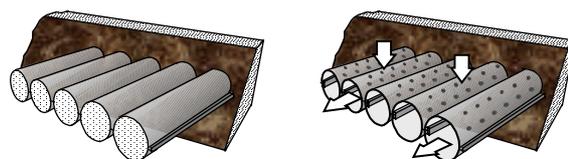


Fig. 2 不透水性バリア Impermeable Barrier Fig. 3 浸出水集積バリア Semi-Permeable Barrier

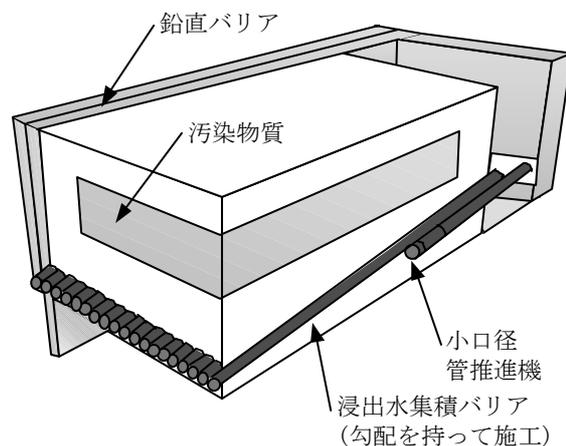


Fig. 4 浸出水集積バリア設置方法 Conceptual Design for Smart Subsurface Barrier

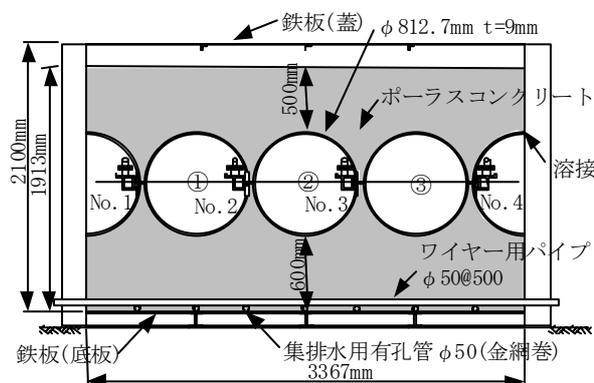


Fig. 5 試験全体計画図 Test Plan

Table 1 人工地盤の配合 Mixture of Artificial Foundation

配合名	示方配合						空隙率 (%)	混和剤
	W/C (%)	W/P (%)	単位重量 (kg/m³)					
			W	C	Lm	S		
P3	75	40	150	200	175	1457	15.0	なし

減のための滑材をそれぞれ切羽および管周辺に注入しながら削孔を行う。しかし、後に行う継手部充填材注入における悪影響を最小限にすること、海外など地下水がほとんど存在しない地域でのバリア設置も想定することか

ら、ここでは無水削孔を採用した。

削孔は、842mm径でFig. 5内の①～③で示す順序で行った。①～③それぞれの削孔直後には、外径812mm、長さ5mの鋼管を水平に設置した。各鋼管はPhoto 1に示す継手部を介して接続されている。バリアの止水性能を向上させるため、継手部はモルタル充填材が注入できる構造になっている。鋼管設置後、各継手部にTable 2に示す性状のセメントモルタルを最大注入圧1.28MPaで継手No. 1に128L、No. 2に61L、No. 3に74L、No. 4に57Lそれぞれ充填注入した。

なお、実際のバリアは5mを越える長さとなり、設置にあたっては原位置での鋼管、継手部の溶接が必要になる。今回のバリア設置に際しても溶接に関する検討を行ったが、問題はなかったため詳細は割愛する。

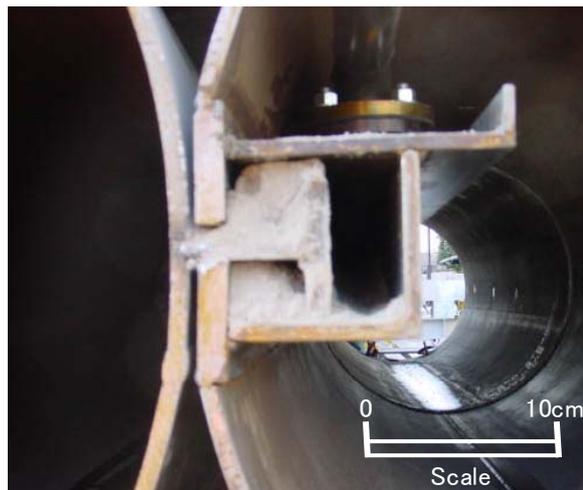


Photo 1 継手構造
Joint Structure of SSB

4. 実規模のバリアの止水性能評価

4.1 通水試験方法

ここでは、バリア内部に水を湛水し、定水位透水試験を応用した止水性能評価手法を提案する。

試験方法の概要をFig. 6に示す。後にバリア内の浸透状況確認を容易にするため、赤色ローダミン着色水をバリア上部に湛水した。着色水は図中の越流孔から溢れ、土槽に隣接して設置されている大型水槽に流れ込む。大型水槽内の着色水は水中ポンプにより土槽上部に汲み上げられ、再びバリア上部に湛水される。こうした仕組みによりバリア上部における着色水の水位は一定に保たれる。

一方、水槽内では、土槽内バリアに浸透した流量分だけ水量が減少するため、水位が低下する。その水位の時間変化を差圧計により測定した。また、水温の変化を把握するため、大型水槽内に熱電対を設置して測定した。

なお、風雨の影響をなくし、さらに着色水の蒸発を防ぐために、土槽および水槽上部には軽量の鉄板で蓋を設置し、蓋周囲にはパッキンを取り付けた。

Table 2 継手部充填材の基本性状
Properties of Injection Material

測定項目	Pロート流下時間 (sec)	圧縮強度 (N/mm ²)	透水試験 (cm/sec)
測定結果	36	96.2	6.9×10^{-13}

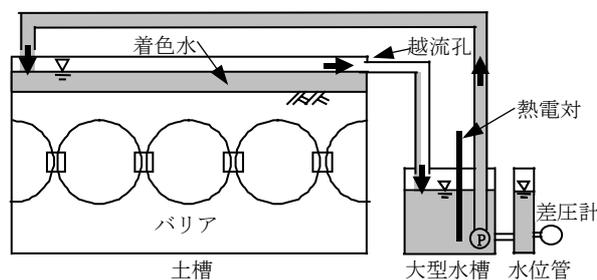


Fig. 6 通水試験概要
Seepage Test

4.2 通水試験結果

通水は30日間行ったが、通水が安定している通水後半部17日間のデータをバリア止水性能評価に用いることにした。17日間のバリア累計通水量および水温の時間変化をFig. 7に示した。

水温は1日周期の変化を見せている。1日の最大水温差は5℃であり実験条件としては温度差が大きく、通水に影響を及ぼしていると考えられる。したがって、透水係数の温度補正が必要と考えられる。

Fig. 7における右側縦軸の累計通水量は、大型水槽内水量の減少分を表すため負の値で表示されている。すなわち、理論的に累計通水量グラフは理論的に右下がりの傾向を示すことになる。しかし、気温、水温、あるいは風や気圧等の影響のため、累計通水量は変化している。ただし、累計通水量の回帰直線(Fig. 7の破線)は右下が

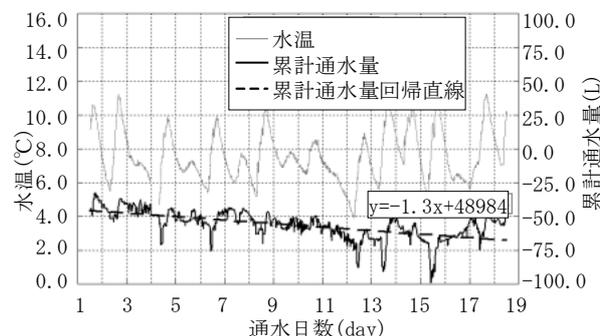


Fig. 7 通水試験結果
Result of Seepage Test

りになっており、全体平均としてはバリア内に着色水が浸透していると考えられる。

4.3 止水性能評価法

ここではEPAの基準と照合するため、バリアの止水

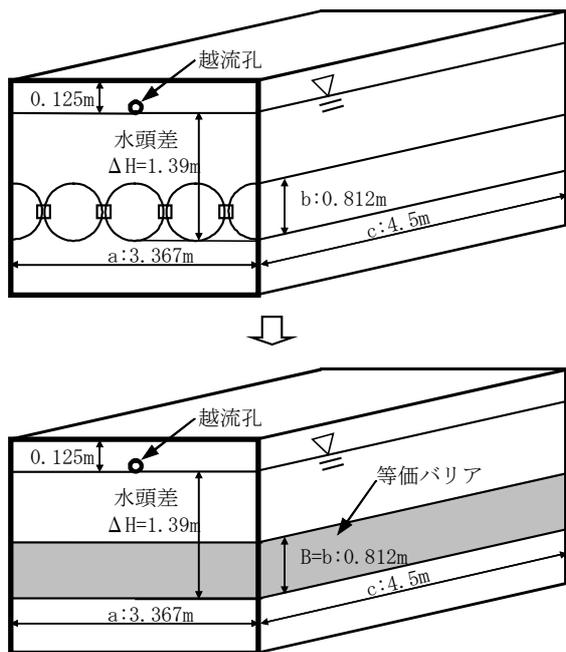


Fig. 8 透水係数算出条件
Factors for Hydraulic Conductivity

性能を透水係数で表す。バリアにおける透水場は、鋼管の継手部内の充填材であり、この透水場をモデル化することにより、バリアの止水性能(透水係数)を評価することができると考えられる。しかし継手部内の浸透形態は非常に複雑であり、また土質条件や施工状況によって充填材の注入範囲も異なることが予想され、モデル化は非常に困難である。

そこで本研究では、実証試験における水位差と通水量のデータから止水性能を評価することを試みた。すなわち、Fig. 8に示すとおり多機能工学バリアを、厚さB一定の多孔質媒体バリアに置き換える。地盤の透水係数はバリアのそれよりも十分大きいと考え、またバリア内部が飽和しているとすれば、等価バリアの透水係数kは、ダルシーの一次元流れ理論から式(1)で表される。

$$k = (Q \times B) / (\Delta H \times a \times c \times t) \quad (1)$$

ここに、Q：累計通水流量、ΔH：水頭差、a×c：通水面積、t：通水時間。式(1)から得られる透水係数は、バリア厚さBの設定により異なる。本研究では後述する切り出しバリア片の透水試験を行った際の供試体高さb(=鋼管径)をBと仮定し、バリアの透水係数を式(2)で求める。

$$k = (Q \times b) / (\Delta H \times a \times c \times t) \quad (2)$$

実際の多機能工学バリアの透水場は継手部のみであり、鋼管部は不透水であるため、バリアを多孔質媒体に置き換えることは不整合と考えられる。しかし広域的にa×cという通水面積で考えれば、不透水部および透水部全てを考慮した平均的なバリアの透水係数を算出する意味で問題ないと考えられる。

累計通水量は4.2節のとおり一定ではないため、ここでは回帰直線から通水量を設定した。回帰直線は通水後半

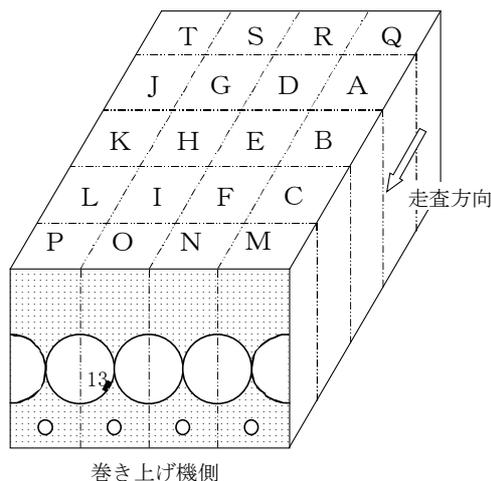


Fig. 9 ブロック分割図
Division of Experimental Body

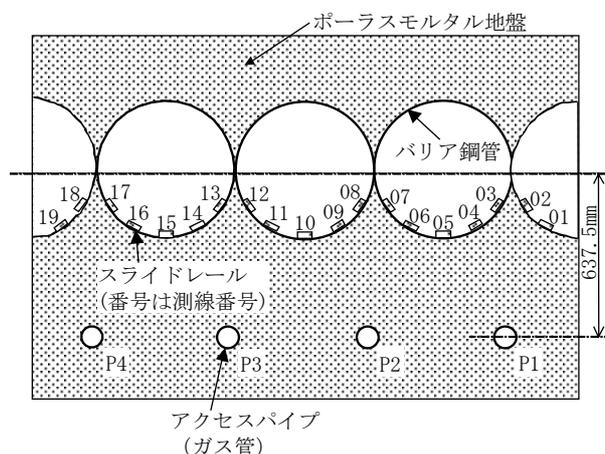


Fig. 10 RI法の測定概要図
Measurement Position for RI Method

17日間を対象とした。データ整理の結果、平均水温7.6℃、累計通水量22.1Lとして透水係数を算出し、得られた値を水温15℃に換算すると最終的にバリアの透水係数kは 7.2×10^{-8} cm/secであり、目標の $k=1.0 \times 10^{-7}$ cm/sec以下を達成している。

5. 止水性能評価結果の妥当性検証

5.1 概要

4.3節で得られたバリアの透水係数は、ある仮定条件下において従来にはない手法から得られている。そこで、得られた透水係数の妥当性検証を行う必要がある。検証にあたっては、バリアをFig. 9に示すようにワイヤーソーを用いて切断分割し、いくつかのブロックを供試体にして変水位透水試験を実施した。そしてその結果に基づき、改めてバリア片の透水係数を求めて4.3節の結果と比較検討した。

5.2 RI法によるバリア欠陥部推定と試験体の選定

第4章で記した湛水直後と通水試験後にFig. 10に示すバリア下部位置すなわち測線No. 01~19でRI法による地盤内水分量測定を行い、漏水箇所の推定を行った。ほとんどの箇所では水分量変化量は見られなかった。しかし、Fig. 11に示すとおり、唯一測線No. 13の120cm付近すなわちFig. 9に示すG付近だけに大きな水分量変化が認められた。G付近の平均水分量変化は $\Delta \rho_m = 3.1 \times 10^{-3} \text{g/cm}^3$ であった。また、その他のブロックではRIセンサーの性質上、水分量変化が負値となる箇所があるが、こうした箇所は全て水分変化ゼロと見なせる。

Fig. 9に示す破線に沿ってワイヤーソーで土槽を切断後、バリア上部地盤とバリアのみを撤去し、バリア下部に接していた地盤を観測したところ、Fig. 12に示す結果となった。G付近は明らかに切断前から赤く着色していると考えられ、RI法によるバリア欠陥部の推定が妥当であったと考えられる。

漏水箇所となっているGを変水位透水試験の供試体として加工することにした。その他、健全なバリア部と考えられるI、Kも供試体として選定した。

5.3 変水位透水試験方法

切り出したバリア片G、I、Kは、変形しないよう鉄筋棒を溶接して補強し、バリア鋼管方向に直交する形で厚さ9mmの鉄板を強力接着剤で取り付けした。また通水方向にはボルトによって鉄板を取り付け供試体に仕上げた。

透水試験装置をFig. 13に示す。供試体の透水係数は小さいと予想されるため、今回の透水試験は加圧型変水位透水試験を採用した。本試験においては多機能工学バリアの実際の通水状況を模擬するために、供試体上部から下部への通水としている。

供試体飽和にあたっては、供試体上部に水を入れ、その後、供試体を反転させて下部に水を入れた。そしてあらかじめ設置していたコックから供試体内に溜まった空気を排除し、飽和度を高めた。供試体の上部から下部に水が流れるよう配管し、コンプレッサー、レギュレータを用いて一定水圧にて通水を行った。通水中は間隙水圧計で供試体上端すなわち流入時の水圧を、また熱電対で水温を、通水量測定管に接続されている差圧計で通水量をそれぞれ20分毎に測定した。

供試体Gは注水時水圧を $7.05 \times 10^5 \text{Pa}$ 、供試体Iは水圧 $1.67 \times 10^4 \text{Pa}$ 、供試体Kは水圧 $1.52 \times 10^4 \text{Pa}$ 一定で通水した。

5.4 試験結果および考察

試験結果の一例として供試体Gの通水量および水温の時間変化をFig. 14に示す。図のとおり累計流出量は時間の経過とともに増加している。また、水温は実験中ほぼ一定であった。

こうした結果を基に変水位透水試験の透水係数算出式(3)を用いてバリア片の透水係数を算出した。

$$k = 2.3 (sb / (a' \times c')) (t_2 - t_1) \log (h_1 / h_2) \quad (3)$$

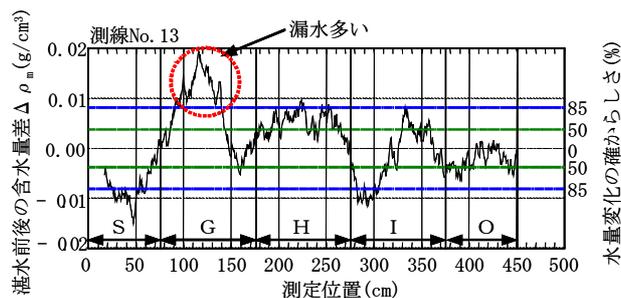
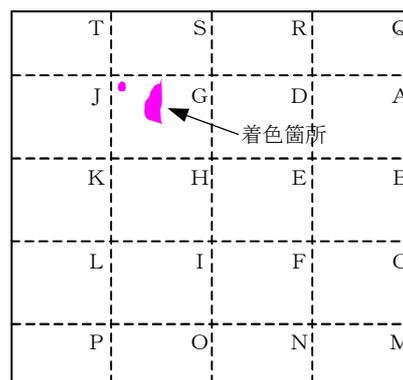


Fig. 11 RI法による表面散乱型水分計測定結果(測線No. 13)
Result of Surface Moisture Content (Line No. 13)



(a)切断平面図 (バリア下部接触面)



(b)切断断面図 (模擬地盤下部)

Fig. 12 バリア下部着色状況
Dyed Area Below the Barrier

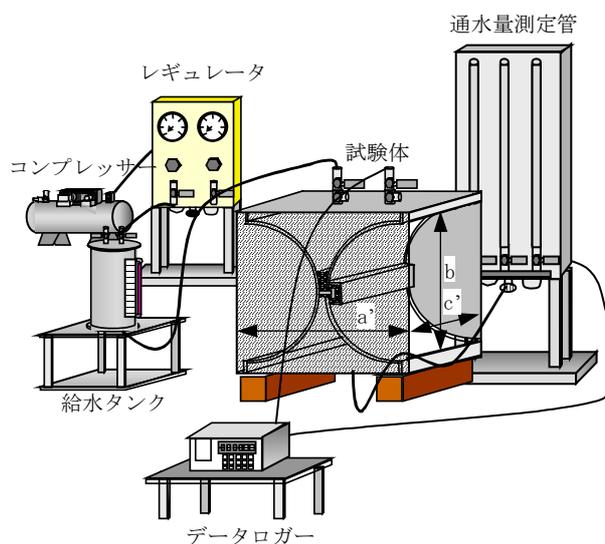


Fig. 13 透水試験装置
Experimental Equipment for Seepage

ここに、s: 水位測定管断面積、b: 供試体高さ(=鋼管径)、 $a' \times c'$: 通水面積、 $t_2 - t_1$: 測定時間、 h_1, h_2 : 測定開始時と終了時の水位測定管水位。算出された透水係数を

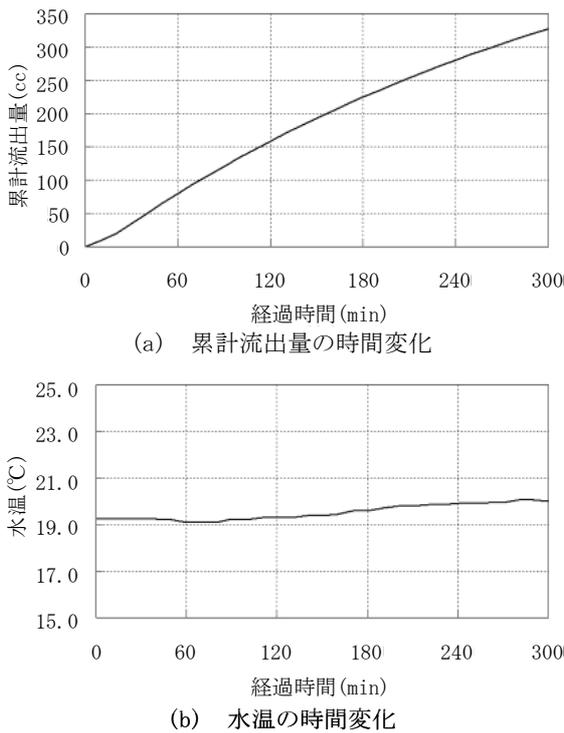


Fig. 14 供試体G変水位透水試験結果
Results of Seepage Test

Table 3に示す。供試体Gの透水係数は、4.3節で得た透水係数と大きく異なり、さらに目標値より大きな値である。これは、ワイヤーソー切断後の観察結果およびR I法調査に基づく欠陥部推定結果を裏付けるものと考えられる。

Table 3には供試体Gと同様に算出した供試体I, Kの透水係数も記している。I, Kの透水係数は、4.3節のバリア全体透水係数よりも小さく、目標に達している。こうした事実は、R I法による水分量変化量が認められなかったことを裏付けている。

以上のことから、R I法による水分量変化量はバリアの透水係数と相関関係にあることがわかる。Fig. 15には各ブロックの水量変化と透水係数をまとめた。供試体G, I, K以外のブロックについては透水係数は得られていないが、R I法による水分量変化がゼロであることから、同じ水分量変化のないI, Kの平均値から算出した。これらの結果から式(4)を用いてバリア全体平均の透水係数を算出した。

$$k = \Sigma(k_i S_i) / (a \times c) \quad (4)$$

ここに、 k_i : iブロックの透水係数、 S_i : iブロックの面積。計算の結果、 $k=6.4 \times 10^{-8}$ cm/secとなり、4.3節で算出した $k=7.2 \times 10^{-8}$ cm/secとほぼ一致する。したがって、本研究の止水性能評価法は妥当であると考えられる。

R I法による水分量変化量はバリアの透水係数と相関関係を利用すれば、多機能工学バリアの本施工において、バリア欠陥部が予測できる。したがって、測定領域内平均の水分変化量が正值と判断されたならば、その近辺の

Table 3 各供試体の試験条件と透水係数
Results of Seepage Test

供試体	寸法 (mm)	試験体上端水圧 (Pa)	水温 (°C)	透水係数 (cm/sec)	15°C換算透水係数 k_{15} (cm/sec)
G	1028×700×931	7.05×10^3	19.5	9.5×10^{-7}	8.5×10^{-7}
I	1050×700×938	1.67×10^4	19.9	3.3×10^{-8}	2.9×10^{-8}
K	963×820×965	1.52×10^4	18.5	9.4×10^{-9}	8.6×10^{-9}

0	T	0	S	0	R	0	Q
1.8×10^{-8}		1.8×10^{-8}		1.8×10^{-8}		1.8×10^{-8}	
0	J	3.1×10^{-3}	G	0	D	0	A
1.8×10^{-8}		8.5×10^{-7}		1.8×10^{-8}		1.8×10^{-8}	
0	K	0	H	0	E	0	B
8.6×10^{-9}		1.8×10^{-8}		1.8×10^{-8}		1.8×10^{-8}	
0	L	0	I	0	F	0	C
1.8×10^{-8}		2.9×10^{-8}		1.8×10^{-8}		1.8×10^{-8}	
0	P	0	O	0	N	0	M
1.8×10^{-8}		1.8×10^{-8}		1.8×10^{-8}		1.8×10^{-8}	

上段：
水分変化量 $\Delta \rho_w$ (g/cm³)
下段：
透水係数k (cm/sec)

Fig. 15 各ブロックの水量変化と透水係数
Moisture Content and Hydranlic Conductivity of Each Area

透水係数は大きいと考えられ、継手部充填材を再注入すれば対処できるといえる。

6. おわりに

本報告では、多機能工学バリアの止水性能評価について検討し、以下に記す結論を得た。

- 1) バリアの止水性能は、バリア上部に湛水して定水位透水試験を応用することにより評価できる。
- 2) 鋼管厚さをバリア厚と仮定した場合、本研究の多機能工学バリアは $k=1.0 \times 10^{-7}$ cm/sec以下の透水係数を有し、世界で最も厳しい基準である米国環境保護庁(EPA)の要求性能を満たす。
- 3) 地下水がほとんど存在しない地盤においては、ラジオアイソトープ(RI法)を用いることで、バリアの局所的な欠陥部(漏水箇所)が推定できる。したがって、本施工において欠陥部と判断された場合、追加充填材注入などの対処が可能と考えられる。

最後に、本研究は、(財)地球環境産業技術研究機構の地球環境保全関係産業技術開発促進事業の一環として行ったものであることを付記して結びとする。

参考文献

- 1) 西田憲司・須藤賢・上野孝之・佐藤晶子・納多勝・河村秀樹：不透水性バリアの性能評価、第37回地盤工学研究発表会講演集, pp.1233~1234, (2002)
- 2) 西田憲司・須藤賢・上野孝之・佐藤晶子・納多勝・河村秀樹：不透水性工学バリアの性能評価(第二報)、第57回土木学会年次学術講演会講演集, 第VII部門, pp.279~280, (2002)