

地下水流動障害対策工法の開発

深見 秀樹 須藤 賢
上野 孝之

Development of obstructing groundwater flow countermeasure method

Hideki Fukami Ken Sudo
Takayuki Ueno

Abstract

The new obstructing groundwater flow countermeasure methods (OGFC methods) proposed here was cut-off wall with a water penetration device. This device is made of raw decomposition nature materials to be the temporary water tightness and fitted with a washing function to restore the original permeability of aquifer into which slurry was penetrated. The decomposition properties of raw decomposition nature materials were grasped quantitatively at laboratory tests. Column tests and large soil tank tests showed the applicability of back washing method to wash slurry penetrated into ground away. Based on these experimental results, the water penetration device for a diaphragm wall was designed and subjected to in-situ test. In conclusion, easiness to install it and restoration to the original permeability of an aquifer were demonstrated.

概要

地下水流動障害対策工法の一つとして遮水壁に集排水機能を有する装置を適用する工法がある。この工法では、工事時の遮水壁の止水性、工事完了後の通水性、遮水壁構築時の泥水により低下した帯水層の透水性の回復が要求される。ここでは、装置への泥水浸透を防止する一時的な止水材として生分解性材料を採用し、その分解能を要素試験で定量的に把握した。遮水壁構築時に浸透した泥水により低下した帯水層の透水性を回復させる方法としての逆洗浄法の有効性をカラム試験、大型土槽試験で確認した。これらの結果をもとに、設計した装置が、連続地中壁の鉄筋籠の配筋設計を変更することなく短期間で設置できること、低下した帯水層の透水性を原地盤の透水性まで回復させることが可能であることを現場実験で確認した。

1. はじめに

近年、構造物の大規模化、大深度化に伴い、地下水流動障害への関心が高まっている。地下水流動障害とは、地下水の流れがある地盤に、その流れに直交する方向に不透水性の構造物が建設されると、構造物が地下ダムのような機能を果たし、上流側では地下水位の上昇が起こり、下流側では水位の低下が起こる、いわゆるダムアップ現象が生じることである。その結果、Table 1の地下水流遮断により生じる問題に示すように、上流側では地下

室への浸水、下流側では井戸枯れ等様々な問題が生じる。そこで、ダムアップ現象を解消することを目的に、連続地中壁に通水装置を設置することにより、地下水流動障害を防ぐ対策工法の研究・開発を行った。

2. 地下水流動障害対策工法

2.1 地下水流動障害対策工法の考え方

Fig. 1に地下水流動障害対策工法の基本的な考え方を

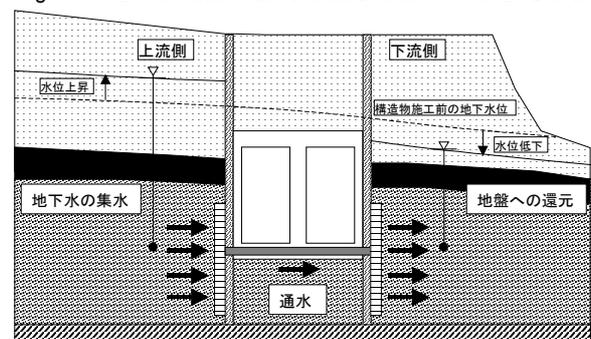


Fig. 1 地下水流動障害対策工法の基本的な考え方
Basic Plan of OGFC Method

Table 1 地下水流遮断により生じる問題
Influence on Obstructing Groundwater

	上流側(水位上昇)	下流側(水位低下)
地下水に与える影響	滞留による水質低下	井戸枯れ・湧水枯渇 塩水化
地盤環境に与える影響	液化化危険度の増大 根腐れによる樹木被害 地盤内生物への影響	地盤沈下 樹木の立ち枯れ 水生生物への影響
構造物に与える影響	浮力増大 地下漏水量増大	間隙水圧の低下による 沈下

示す。地下水流動障害対策工法は、基本的に、構造物で遮断される上流側の地盤から地下水を集め通水管を通して、再び下流側の地盤に還元することにより、地下水状況を構造物施工前と同じにするものである。実際への適用には、遮水壁の工事施工中の止水性、工事完了後の透水性という相反する性能や遮水壁施工に伴い低下した帯水層の透水性回復が要求される。これらをいかに効率よく設計・施工するかがこの工法のキーポイントである。

2.2 通水連壁装置

本研究で開発した通水連壁装置の断面図をFig. 2に示す。Fig. 2に示すように、通水連壁装置は主に、(A)中央部に伸縮機能を持つ通水管部、(B)地山側の地下水を集水するフィルターからなる集水部、(C)工事施工中の止水を目的とした空気弁からなる止水部、(D)泥水・泥膜洗浄を目的とした洗浄管部、(E)集水部を地山に密着させるためのジャッキ部から構成されている。この装置を地盤の上流側と下流側にそれぞれ設置して、通水管で接続することにより、地下水状況を構造物施工前と同じにする。この装置における課題とそれに対する対策方法をTable 2

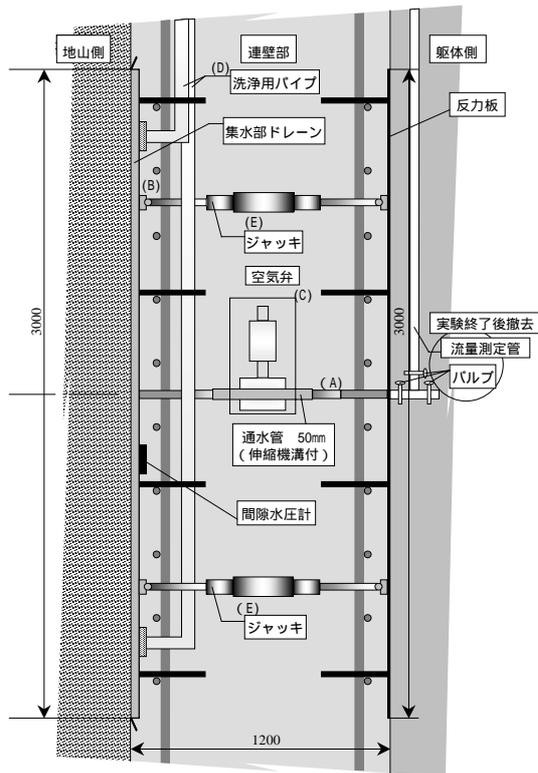


Fig. 2 通水連壁装置の断面図

Sectional Plan of Permeability Device

Table 2 通水装置開発における課題と対策

Problems and Measures on Development of Permeability Device

課題	課題に対する対策方法
1) 連続地中壁施工時の泥水の通水装置への止水方法	生分解性シートを一時止水材として利用
2) 連続地中壁施工時の泥水が地盤に与える影響	逆洗浄法で地盤の透水性を回復
3) 連続地中壁への通水装置取り付け時の施工性向上および通水性能把握	装置のコンパクト化・現場実験の実施

に示す。対策方法については、次章以降で詳細に述べる。

3. 通水装置集排水部に浸透する泥水止水方法

3.1 生分解性シートの利用

本研究で開発する連続地中壁を対象とした通水装置の集排水部には透水性が非常に大きい板状のドレーン材を通水マットとして使用する。しかし、通水装置は連続地中壁施工時に使用する泥水中に設置するため、泥水による通水マットの目詰まりが危惧される。その対策法としては、生分解性材料を一時的な止水材として通水マット被覆材に用いることを考えた。生分解性材料(生分解性シート)は、通常は一般のプラスチックと同等の性能を有するが、土壌に埋設すると、その土壌および地下水中のバクテリア等により分解されるものであり、医療分野では頻繁に使用されている。この分解特性は、材質(無機物系か有機物系)やシート厚さにより変化する。この生分解性材料の分解特性を定量的に把握する目的で、水中分解特性および土中分解特性に関する要素試験を行った。

3.2 水中分解性能要素試験

試験概要はFig. 3に、試験結果をPhoto 1に示す。Fig. 3に示すように、試験に用いた生分解性シートは、厚さを変えた無機物系シート3種類と有機物系シートの合計4種類で、水中に放置してシートの分解・消滅を観察した。なお、試験に用いた水は現場より採取した地下水である。試験の結果、厚さ0.25mmの有機物系シートは、無機物系シートよりもシート厚さがあるにもかかわらず、地下水中のバクテリアにより、150日程度で分解・消滅することが判明した。なお、有機物系シートは初期の止水性能として300kPaの水圧に耐えられることも確認した。

3.3 土中分解性能要素試験

有機物系生分解性シートの土中分解性能室内試験を行った。試験概要はFig. 4に、試験結果をPhoto 2に示す。試験は、生分解性シートの上をマサ土試料で覆って、上部から一定水頭10cm状態で放置し、シートの分解に伴う浸透量の増加程度を観察した後、シートを掘り出して分解状況を目視確認した。試験の結果、生分解性シートは140日程度で土中のバクテリアによっても分解し、その強度も著しく低下することを確認した。以上より、通水装置の集排水部の一時的な止水材として、有機物系の生分解性シートが最も適していることを確認した。

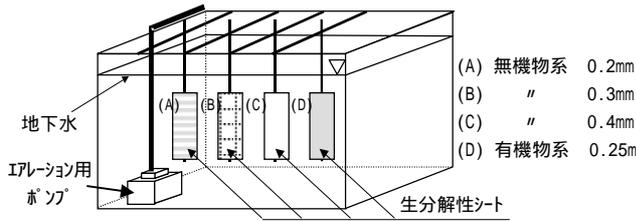


Fig. 3 水中分解室内試験概要図
Decomposition test in groundwater

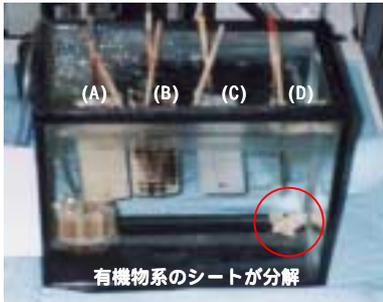


Photo 1 地下水中の生分解性シート分解状況 (150日後)
Decomposition Situation on Raw Decomposition Nature Materials in Groundwater (150 days after)

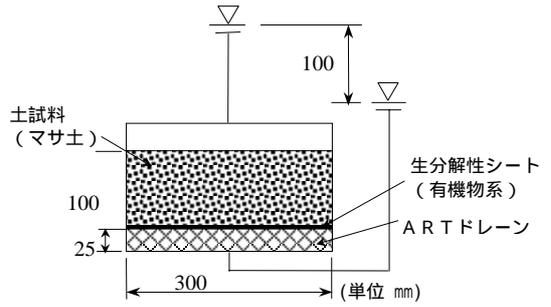


Fig. 4 土中分解室内試験概要図
Decomposition Test in Masado

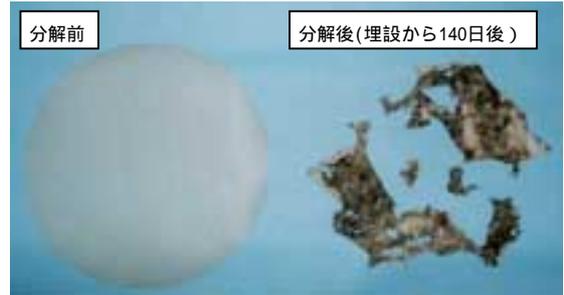


Photo 2 土中の生分解性シート分解状況 (140日後)
Decomposition Situation on Raw Decomposition Nature Materials in Masado (140 days after)

4. 連続地中壁背面の泥水浸透特性と泥水洗浄方法

4.1 室内カラム試験

連続地中壁施工時に使用する泥水は通水装置の集排水部に悪影響を与えるだけでなく、背面地盤に浸透することによって透水性の低下を引き起こすことが懸念される。そこで、地盤に浸透する泥水の浸透特性とその浸透した泥水の洗浄効果を定量的に把握するために、Fig. 5に示す装置を用いたカラム試験を実施した¹⁾。試料モールドは、直径20cm、長さ1mで泥水浸透距離が目視観察できるように透明アクリル製である。また、その端部には泥水給水槽と定水位流出水槽が接続されている。試験に使用した土試料は、実際の透水地盤状態を表現するために、珪砂2号～7号を混合して、透水性が 10^{-3} オーダーのもの(タイプA:珪砂3+5+7号)と 10^{-2} オーダーのもの(タイプB:珪砂2+4+6号)の2種類を作成した。また、泥水試料は水溶性高分子のポリマー泥水を使用し、浸透時に目視観察が行えるように着色剤(フルルゼインナトリウム(緑色, 蛍光発色))を添加した。泥水浸透状況をPhoto 3に示す。

なお、試験に先立ち、泥水浸透距離の予測を行った。喜田ら²⁾は、泥水の粗粒地盤中における浸透現象の予測には、細管中のニュートン流体流動式であるHagen-Poiseuilleの式が適用できるとしている。以下にその式を示す。

$$L = \frac{\Delta P g_a D^2}{32 v_a \mu} \dots \dots \dots (a)$$

P: 損失圧力(g/cm^2), v_a : 平均流速(cm/sec), L: 流動距離(cm), g_a : 重力加速度換算係数, D: 細管の直径(cm), μ : 流体の粘度($g/cm \cdot sec$)

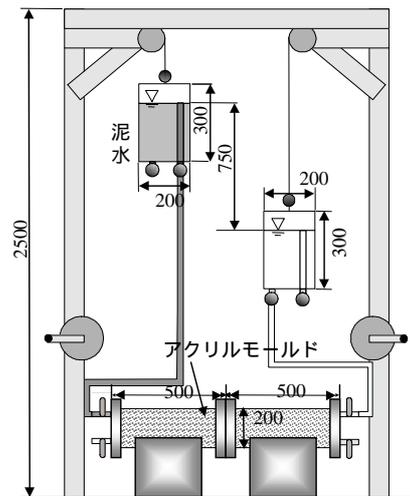


Fig. 5 試験装置の概要図
Outline of Slurry Seepage Test



Photo 3 泥水浸透状況 (タイプA)
Situation of Slurry Seepage (Example Type A)

Table 3に(a)式を使用した泥水浸透距離の予測値と浸透実験から得られた実測値を示す。また、予測値は、粗充填時の $e=1.00$ 、密充填時の $e=0.40$ と仮定し、今回の試験における各ケースの間隙比($e=0.47$:タイプA, $e=0.48$:タイプB)と比較することにより算定している。予測値と実測値を比較すると、タイプAに関しては、実測値に対して予測値がほぼ妥当な値となっているが、タイプBに関しては実測値が予測値より大きくなっている。これは、タイプBの粒度が、粒径20%(D_{20})ではタイプAとほぼ同じ程度の大きさであるのに対し、粒径50%では大きく異なるため、 D_{20} 値を用いる予測式では完全に表現できないことに起因すると考えられる。また泥水浸透距離は、当然泥水の粘度が同じ場合は透水係数が大きいほど長くなるが、泥水の粘度が高くなると浸透距離は短くなるため、浸透距離の制御は可能であると考えられる。

各試験で得られた結果をまとめてTable 4に示す。泥水目詰まり後の供試体の透水係数は、両方の試料とも $3.0 \sim 5.0 \times 10^{-4}$ (cm/s)程度で、初期透水係数の大きさに影響を受けない。なお、泥水浸透部の透水係数は 10^{-3} オーダーの試料(タイプA)で 8.0×10^{-5} (cm/s)、 10^{-2} オーダーの試料(タイプB)で 4.0×10^{-4} (cm/s)である。加圧、減圧の繰り返しによる洗浄(逆洗浄法)100回後の透水係数は、どちらも $3.0 \sim 4.0 \times 10^{-3}$ (cm/s)まで回復した。また洗浄回数300回後においては、元試料の透水係数程度まで回復することが判明した。以上のことから、泥水浸透地盤の透水性は、逆洗浄法を用いて洗浄することで回復することが示唆された。

Table 3 泥水浸透距離に対する予測値と実測値の比較
Comparison of Estimated and Measured
Slurry Seepage Distance

粘度 (cp)	試料	浸透距離 l (cm)			
		D20 粗充填	D20 密充填	予測値	実測値
12	タイプ A	152	21	36	26.0
					24.5
12	タイプ B	221	31	56	92

Table 4 泥水浸透距離の予測値と実測値の比較
Results of Slurry Seepage Test

	タイプ A (100回洗浄)	タイプ B (100回洗浄)	タイプ A (300回洗浄)
泥水浸透前の 透水係数	$5.8E-03$ (cm/sec)	$2.5E-02$ (cm/sec)	$5.1E-03$ (cm/sec)
泥水浸透後の 透水係数	$2.9E-04$ (cm/sec)	$4.8E-04$ (cm/sec)	$3.0E-04$ (cm/sec)
泥水洗浄後の 透水係数	$3.4E-03$ (cm/sec)	$4.4E-03$ (cm/sec)	$5.0E-03$ (cm/sec)
泥水浸透部の 透水係数	$7.8E-05$ (cm/sec)	$4.4E-04$ (cm/sec)	$7.7E-05$ (cm/sec)
泥水浸透 距離	26 (cm)	92 (cm)	24.5 (cm)
洗浄による 回復率	58 (%)	17 (%)	98 (%)

4.2 長大土槽試験

長大土槽試験は、通水装置現場実験を行う前に、4.1節のカラム試験結果を基にして、大型の土槽を用いた逆洗浄法の洗浄効果確認を目的として行った。試験装置をFig. 6に示す。Fig. 6に示すように、試験に用いた土槽は、幅2.1m、長さ4.5m、高さ2.0mで、2ヶ所に鋼製の仕切板を設置し、土槽を、(A)地山部、(B)連壁部、(C)掘削部の3ヶ所に分けている。また、(A)と(B)の間の仕切板には50cm×50cmの開口部を設けている。(A)の地山部は被圧帯水層をモデル化したものであり、飽和水を供給する碎石層(RC-30)と砂層(岐阜砂)から成り立っている。碎石層には20mmの塩ビパイプにより絶えず水が供給され、供試体を定水頭に保っている。遮水層としてはカオリンを層厚100mmで敷設している。また、仕切板側にはドレーン材が敷き詰めである。(B)の連壁部には、通水管および泥水浸透・洗浄管が設置してあり、この部分から泥水を浸透させた後、清水を使用して洗浄を行う。使用する泥水は現場で採取したポリマー泥水で、その粘度は226cpである。(C)の掘削部には、流量測定管が設置してあり、泥水浸透前、泥水浸透後、および泥水洗浄後の流量をそれぞれ計測した。

試験で得られた結果をTable 5に示す。試験では、泥水は4時間浸透させ、その時の泥水使用量は160L(リットル)であった。従って、土試料中に浸透した泥水浸透距離は

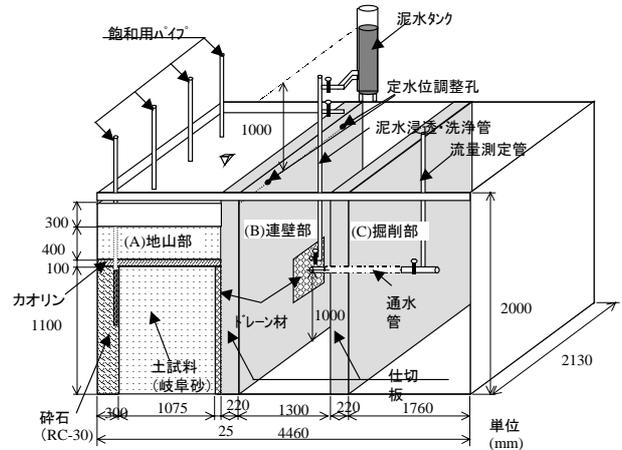


Fig. 6 長大土槽試験概要
Outline of Slurry Seepage Test
Using Large Soil Tank

Table 5 長大土槽試験結果
Results of Slurry Seepage Test
Using Large Soil Tank

項目	岐阜砂
泥水浸透前の透水係数 (cm/sec)	$2.2E-02$
泥水浸透後の透水係数 (cm/sec)	$7.6E-03$
泥水洗浄後の透水係数 (cm/sec)	$1.8E-02$ (50回洗浄後)
泥水浸透部の透水係数 (cm/sec)	$4.1E-04$
泥水浸透距離 (cm)	4.0
洗浄による回復率 (%)	82

3.0~4.0cm程度と考えられる。泥水目詰まり後の地山部の透水係数は、 7.6×10^{-3} (cm/sec)で、泥水浸透前の透水係数 2.2×10^{-2} (cm/sec)の約1/3まで低下した。なお泥水浸透部の透水係数は 4.1×10^{-4} (cm/sec)である。加圧・減圧の繰り返しによる逆洗浄は、洗浄50回後で、泥水による水質の濁りは残るものの、透水係数はほぼ元試料の値に回復した。その後、洗浄を300回まで行った結果、地山部から流出してくる水の濁りもなくなり、泥水浸透前の透水係数と同じになった。これは、今回の試験に使用した泥水の粘度が高かったことから、泥水は浸透面付近にマッドケーキを形成するものの、地山内部にはあまり浸透せず、そのため、少ない洗浄回数で供試体の透水性が回復したことを示唆している。

5. 通水装置の施工性・通水性能

通水装置の施工性および通水性能を確認するため現場実験を行った。Fig. 7に実験手順のフローを示す。実験の手順は、まず、地上で装置の作動確認をした後に、連続地中壁の鉄筋籠に装置を取り付け、洗浄管をつなぎ込みながら地中（泥水中）に挿入し、透水層に集水部をジャッキにより密着させ、コンクリートを打設する。また、工事中は中央部の通水管の空気弁を閉じて地下水を止水し、掘削側への地下水の流入防止をしている。掘削完了後は空気弁（止水弁）を開放し、洗浄管によって地山および通水装置本体の泥分を除去して通水量を確認する。

5.1 通水連壁装置の施工性

現場実験に先立ち、通水装置の可動部の作動確認を目的とした作動試験を行った。確認事項は、ジャッキにより集水部および通水管が確実に地山に密着するかどうかである。試験の結果、地山への密着性の確認は、ジャッキを押し出す際の圧力変化で管理できることが判明した。また、掘削部が傾斜している場合でも、通水管を鋼管と耐圧ホースからなる構造とすることによって、地山に密着させることが可能であることも確認した。なお、通水連壁装置は、実現場での設置においても、連続地中壁の鉄筋の配筋を変更することなく設置でき、装置の搬入、鉄筋籠への設置、装置の挿入、地山への密着、コンクリート打設までの一連の作業を三日間で行うことができた。鉄筋籠に取り付けた通水装置の設置状況をPhoto 4に示す。

5.2 通水性能確認試験

5.2.1 通水量予測解析 通水性能確認試験に先だつて、泥水浸透前、泥水浸透後および泥水洗浄後の通水量の予測解析を3次元飽和浸透流解析によって行った。この時の泥水浸透距離は4.1節で述べたHagen-Poiseuilleの式より、土質が密な場合で3.4cm、緩い状態で24.3cmと算定された。また、原地盤の透水係数は、 5.0×10^{-3} (cm/sec)であり、泥水浸透後の透水係数および泥水洗浄後の透水係数も4.1節の室内カラム試験の結果から、それぞれ 5.0

$\times 10^{-5}$ (cm/sec)、 5.0×10^{-4} (cm/sec)と仮定した。解析結果をTable 6に示す。Table 6に示すように、泥水浸透前の通水量は約29L/min、泥水浸透後は1~10L/min、泥水洗浄後は10~24L/minの通水量が予測された。

5.2.2 排水・注水量確認試験 通水性能確認試験は、通水装置設置から438日後に行った。試験は、連続地中壁施工時に用いる泥水の影響を逆洗浄法で洗浄し、地山からの流出量および地山への流入量を測定した。地山からの流出量の測定は、切梁に設置した流量測定用タンク水位と地下水位の水頭差約3.4mにおける排水量を計測し、地山への流入量は、給水タンク水位と地下水位との水位差約8.6mにおける通水装置からの注水量を計測した。

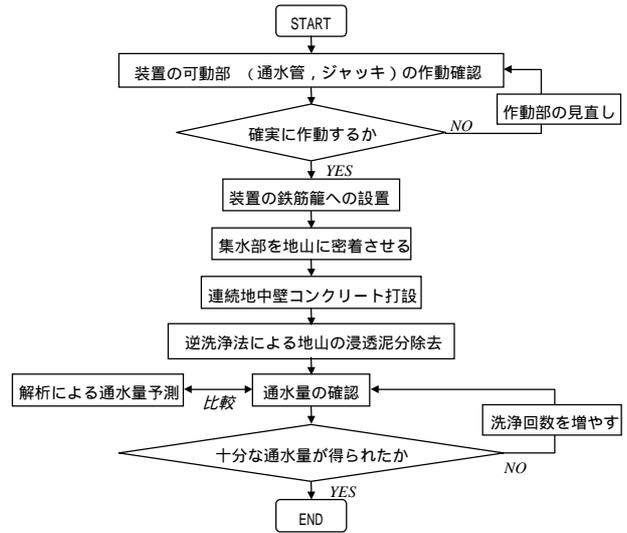


Fig. 7 現場実験手順フローチャート
Flow of Site Test



Photo 4 通水装置設置状況

Outline of Permeability Device establishment

Table 6 泥水浸透距離毎の地下水排水量予測解析結果
Estimation of Drainage Each Slurry
Seepage Distances

解析ケース	地盤の状態	泥水浸透前	泥水浸透後	泥水洗浄後
ケース1(泥水浸透距離3.0cm)		29.0	9.7	24.2
ケース2(泥水浸透距離5.0cm)		29.0	5.9	20.8
ケース3(泥水浸透距離15.0cm)		29.0	2.3	13.7
ケース4(泥水浸透距離30.0cm)		29.0	1.3	9.7

(単位 L/min)

排水試験結果はTable 7に、注水試験結果はTable 8に示す。排水試験結果から、地山に浸透した泥水の影響は逆洗浄法を繰り返し用いることにより軽減され、洗浄300回後では、地山からの流量は泥水浸透初期状態の約3倍まで回復し、通水装置の有効性が確認できた。また、Table 7とTable 8に示す排水量と注水量を同じ水頭差に換算して比較すると、注水量（水頭差1m当り5.2L/min）は、排水量（水頭差1m当り9.0L/min）のおよそ60%程度に低下することが判明し、通水連壁装置の実施工時は、上流側（排水側）の装置より、下流側（注水側）の装置の設置割合を十分確保することが必要であることが示唆された。

5.3 通水性能評価

現場実験結果の通水性能評価は、通水量予測解析結果のケース1（泥水浸透距離3cm）と比較することにより行った。これは、Table 6とTable 7より、予測解析結果のケース1は、泥水浸透後の解析値9.7L/minで、現場での泥水浸透後の実測流量（9.3L/min）に最も近似しており、現場で使用した泥水の粘度が200cpと高いこと、現場の地盤の粒度分布がよく、透水係数が比較的小さいため、地盤密度が高いと考えられることから、泥水浸透距離が短いと予想されるため、妥当性が高いと判断した。

Fig. 8に排水試験で得られた結果とケース1（泥水浸透距離3cm）の予測解析結果の比較を示す。Fig. 8より、以下のことが判明した。

- (A)地盤の透水性は、逆洗浄法による洗浄50回で、泥水浸透前状態の60%程度まで回復する。
- (B)予測解析の泥水洗浄後流量（24.2L/min）は、洗浄150回時（23.6L/min）の流量とほぼ等しい。
- (C)洗浄300回時の流量（30.4L/min）は予測解析の泥水浸透前流量（29.0L/min）とほぼ等しい。

Table 7 排水試験結果
Results of Drainage Test

洗浄回数 (回)	測定流量 (L)	測定時間 (sec)	単位時間当たり流量 (L/min)
0(泥水浸透後)	4.6	30.0	9.3
5	5.1	30.0	10.2
50	9.1	30.0	18.2
100	10.4	30.0	20.7
150	11.8	30.0	23.6
200	13.4	30.0	26.8
250	13.9	30.0	27.8
300	15.2	30.0	30.4

(水頭差1mあたり9.0L/min)

Table 8 注水試験結果
Results of Grouting Test

測定回数	測定流量 (L)	測定時間 (sec)	単位時間当たり注水量 (L/min)
1回目	50.0	65.8	45.6
2回目	50.0	66.7	45.0
3回目	50.0	67.5	44.5
平均	50.0	66.7	45.0

(水頭差1mあたり5.2L/min)

これらの理由は、予測解析では泥水洗浄後の地盤の透水係数を泥水浸透前の10%と設定していたが、実際は、泥水が地盤内にあまり浸透せず、少ない洗浄回数で地盤の透水性が大きく回復し、最終的に地盤の洗浄後の透水係数は泥水浸透前の値まで回復したためと考えられる。

6. おわりに

通水連壁装置開発を目的として、止水材の要素試験、地盤洗浄法のカラム試験・大型土槽試験、通水装置の施工性・通水性を確認する現場実験を行った。その結果は以下の通りである。

- 1) 通水装置の集排水フィルターの一時的な止水材として生分解性シートを用いることを提案した。生分解性シートの分解特性の要素試験を行った結果、初期の止水性能として300kPaの水圧に耐えること、地下水および地盤中のバクテリアによって150日程度で分解・消滅することを確認した。
- 2) 連続地中壁構築時の浸透泥水により低下した帯水層の透水性回復方法として逆洗浄法を提案した。カラム試験・大型土槽試験を行った結果、泥水浸透距離が短い場合の透水性は泥水浸透前の98%まで回復できた。
- 3) 施工性・通水性確認を目的に現場実験を実施した結果、通水装置は連続地中壁の鉄筋籠の配筋設計を変更することなく短期間で設置できた。また、低下した帯水層の透水性は原地盤の透水性まで回復させることが可能であることを確認した。

今後は、これまでの研究成果を踏まえ、通水装置を複数設置した場合の設置割合や装置のコストダウンに関して検証を行い、実用化を図っていく必要がある。

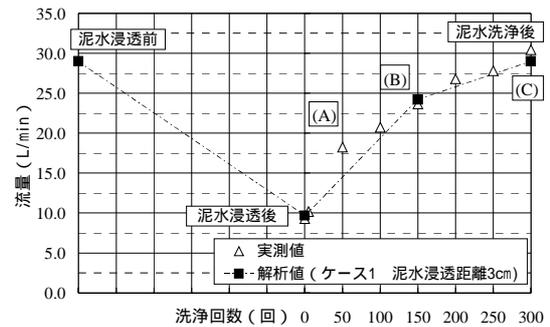


Fig. 8 排水量の実測値と予測解析値の比較
Comparison of Estimated and Measured Flow Volume

参考文献

- 1) 深見秀樹：連続地中壁背面の泥水浸透特性と透水性について、第34回地盤工学研究発表会論文集（2分冊の2，pp.1277～1278，（1999）
- 2) 喜田大三：泥水シールド工法における泥水に関する研究（その1）-粗粒地盤における泥壁の形成について-、大林組技術研究所報，No.17，p.79，（1978）