

合意形成のための地下水流動保全に関する モデル実験とその考察

西垣 誠¹・坪田 邦治²

¹正会員 岡山大学大学院 環境学研究科 (〒700-8530 岡山市津島中3-1-1)

E-mail: n_makoto@cc.okayama-u.ac.jp

²正会員 岡山大学大学院 自然科学研究科 (〒700-8530 岡山市津島中3-1-1)

(在籍：中部土質試験協同組合(〒463-0009 名古屋市守山区緑ヶ丘804番))

E-mail: tsubota@geolabo-chubu.com

下水道工事に伴い敷設する函渠による地下水流動への影響に対して、函渠周辺に通水層（人工透水層）を敷設する全断面集排水工法を採用し、地下水を保全することとした。そこで、地下水に対する影響を、室内モデル実験、断面二次元浸透流解析および準三次元浸透流解析によって検証を行った。この中で、事業者、地下水利用関係者、学識経験者等で構成された宮水保存調査会の委員に、室内モデル実験における地下水の動向を直接視察し、理解を深めた上で審議を進めた。この結果、合意形成を図ることができ、事業を円滑に行えたとともに、日本でも有名な西宮の「宮水」の流動保全が行えた。本論文では、このような合意形成のために実施した室内モデル実験と解析をベースにした設計・施工の有用性について論述する。

Key Words : groundwater flow preservation, model test, FEM analysis, agreement formation

1. はじめに

未固結地盤が分布している都市近郊域で、地下に構造物を構築する場合には、近隣での地下水利用に関する影響を極力低減し、地下水流動を保全することが環境保全の観点からも重要な課題といえる。

このためには、調査計画段階において、帯水層の分布、地下水の動態を把握し、計画構造物に対して施工時および施工完了後の地下水影響解析を実施することによって、構造物構築に伴う影響を極力低減することが必要といえる。これら地下水流動保全に対して、各種の対策工法が提案されている¹⁾。

現在では、このような施工に伴う地下水影響予測は、FEM解析で推測することが一般的である。しかしながら、解析は、地盤のモデル化などによるシミュレーションであって、実際の施工では各種の条件による影響で予測した結果と合致しないこともあり、地元住民の理解がなかなか得られないことが多い。

本論文では、下水道工事に伴い線状に敷設する函渠による地下水への影響を、函渠周辺に通水層（人工透水層）を敷設する全断面集排水工法によって地下水の流向・流量を保全することを、室内モデル実験と断面二次元浸透流解析²⁾・準三次元広域浸透流解析³⁾により検証を試みた。この過程の中で、事業者、酒造関係者、学識経験者等で

構成されている宮水保存調査会⁴⁾の委員が直接モデル実験結果を視察することで、対策工を施すことにより、地下水の流れが保全されることを直接、確認することができた。

このことが、結果的に調査～解析の各種の内容に対して理解を深めることができ、施工に対する合意形成が得られたと考えられる。

これら、一連の作業のなかで、モデル実験と解析結果を対比することによって、地下水保全に対して、ここで実施した対策工（全断面集排水工法）において、一定の効果が期待できることが判るとともに、通水層の仕様（厚さと透水係数）を簡易に設定できる知見が得られた。

なお、函渠周辺に対策工としての通水層を設置した場合には、函渠縦断方向に地下水の流れが促進され、地下水の流動を変化させる懸念があった⁵⁾。これに対して、流動防止板を用いた実験および解析、さらに現場における揚水試験による遮水性の確認によって、縦断方向の地下水流動を防止し、現状回復できることが判明した。

また、公共事業を執行する際には、地元住民（ここでは酒造関係者）の理解を得ることが非常に重要となる。このことから、室内モデル実験と解析をベースにした設計・施工の有用性について論述するとともに、それらの結果の説明責任のために、室内モデル実験を見学することで、合意形成が図れたプロセスについて論述する。

2. 対象地域の地盤環境と地下水流動保全

兵庫県西宮市の国道43号線より南側はいわゆる宮水地帯といわれ、六甲山から流下している表層地下水が醸造用水に最適であり、歴史的にも多くの酒造メーカーがこれを使用し、その保護に細心の注意を払ってきた地域である⁶⁾(図-1参照)。この宮水分布地帯は、時代とともに上流側へ推移している。ここで対象としている宮水帯水層は、図-2に示す表層のGL-2.0~5.0mに分布する砂質土層である⁷⁾。

このような地盤環境を有する地域において、その表層地下水を遮断する地下構造物である下水道函渠(標準断面B=2.66, H=2.06m, 市街地施工延長L=12.8km)の埋設が計画されたが、線状の地下構造物を施工すると、表層地下水の流れを遮断することが懸念され、1840年⁴⁾頃

から多くの酒造メーカーが酒造用水として採水し、その保護に細心の注意を払ってきた採水井戸が枯れる危険性があった。

このことから、地下水の流動阻害の対策工として、ここでは、図-3に示すような地下構造物の周囲に通水層(人工透水層)を作製する全断面集排水工法を用いて、地下水を従来の流向に浸透させる工法を採用した。

しかし、このままだと平面的には上流から浸透してきた地下水が図-4に示すように、函渠周囲の通水層を函渠の縦断方向に流下することも考えられる。そこで函渠に図-5に示すように、縦断方向流動防止板を設けて、地下構造物に沿った浸透を防止させ、従来の地下水の流動方向を確保することを試みた。

以上に示す対策工としての通水層の効果、流動防止板の効果の評価するために、室内モデル実験と地下水浸透流解析(図-6のフロー参照)を実施した。

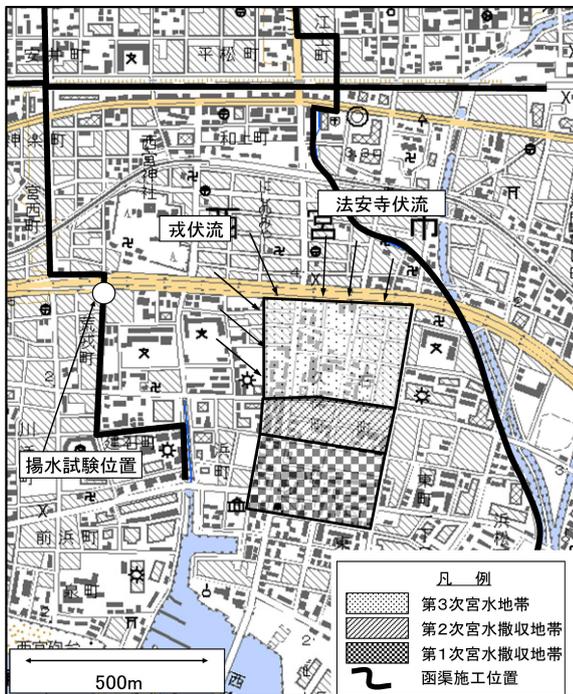


図-1 宮水地帯の変遷⁶⁾と函渠施工位置

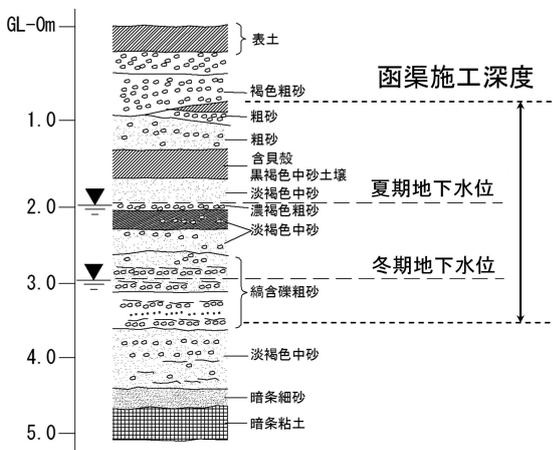


図-2 対象地域の代表的地盤モデル⁷⁾に加筆

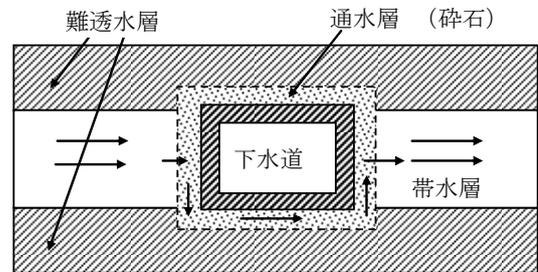


図-3 函渠周囲の迂回浸透⁵⁾

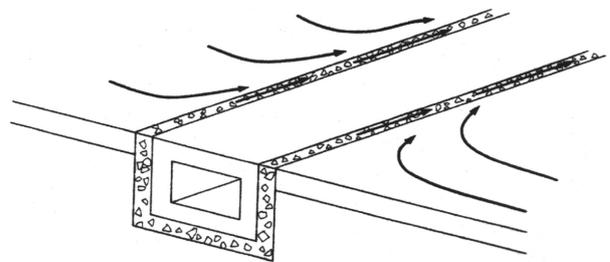


図-4 下水道溝周囲の浸透⁵⁾

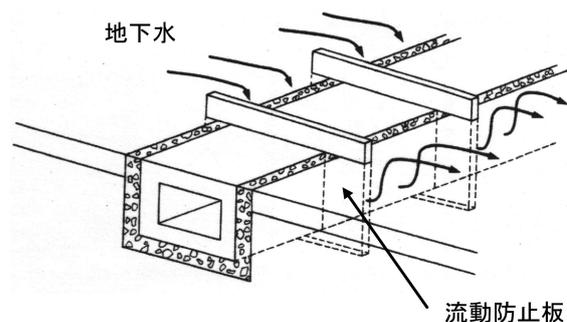


図-5 流動防止板付き函渠⁵⁾

3. 横断方向への地下水の流下問題

(1) 室内モデル実験

a) 実験の目的

室内モデル実験は、前述の宮水帯水層を対象として実施した。試験モデルは、なるべく現実に近いものが望ましいことから、土質調査時における20cmピッチでの室内透水試験結果を参考にして、現地の複雑な地層を透水層・難透水層に区分した結果、代表的な3モデルを作製した。このモデルを土槽内で再現し、実験に適用した。

b) モデルスケールの構築

モデルは実物大のモデルを用いて実験を行うことが、施工状況に近く望ましいことであるが、工費・工期などが莫大にかかるため非現実的である。一方、室内モデル実験で再現させる場合には、モデルの縮尺に関する相似則の妥当性の検証が必要となる。

スケールが大きすぎると、定常流を作るまでと、実験に要する時間が長くなる。その逆に、スケールが小さすぎると、流線が実際のものとは異なってしまい、相似則が成立しないことになる。また、西宮地域では六甲山地から大阪湾までの距離が短く、一般的には動水勾配が急

であるが、これに比較すると、対象としている西宮市内の地盤での動水勾配は、1/100~1/300程度と極めて緩やかとなる。このために、このままモデル化した場合、水位差が数cmオーダーとなり、精度の高い実験を再現することがかなり難しいことが想定された。

これらのことから、図-6に示すフローにしたがって、実施工の地盤断面モデル（幅188.9m,高さ8.9mのモデル）で、断面二次元浸透流解析を行った。この解析結果より、地下水の浸透について、1日経過後における水圧変化から、水位は定常とならないことが判った。したがって、実務的な室内試験のスケジュールに調整するために、実際に想定される断面の1/10のスケールモデルで、再度解析を実施した。これによって、水位は約1日で定常状態となり、水圧もほぼ平衡に伝達することが判明した。これにより、27日〔（モデル作製1日+水平透水1日+定常実験1日）×3ケース（自然地盤，函渠，対策工）×地盤モデル3〕で実験が完了することとなり、実務的な試験モデルとして適切と判断した。

以上のことから、モデルは1/10モデルとし、土槽は幅1.70m,奥行き0.16m,高さ0.86m(内径1.40m,0.12m,0.80m)として設定した。

なお、実験用モデルの透水係数については、1/10に低減し、一方、動水勾配を実際の10倍に設定した実験を行い、現場と同等の流れを再現するとともに、計測精度の向上を計った。

c) 実験用の試料の選定

実験に用いる試料は、現場のものを用いることが望ましいが、4m³程度必要なために、現場から採取することが困難であり、標準砂等を用い、密度・粒度を調整して、現場の1/10の透水係数とした。これらの結果を、表-1に示した。

d) 実験手法

図-7に示すように、各土層は締め固めて作製し、帯水層内の水頭分布を計測するためマノメーターと間隙水圧計を設置した。ただし、函渠の入るケースの場合は、実際の施工手順と異なるが、土層モデル完了後に函渠の設置を行うのではなく、各土層と同時に函渠も作製した。

水位については、試験モデルの両端に、所定の水位(同じ水位)を与えて安定水位とした。その後、地下水流動場を作製するために、左側(供給側)の水位を10~15cm程度上昇させ、水位が完全に定常状態となり、飽和状態に

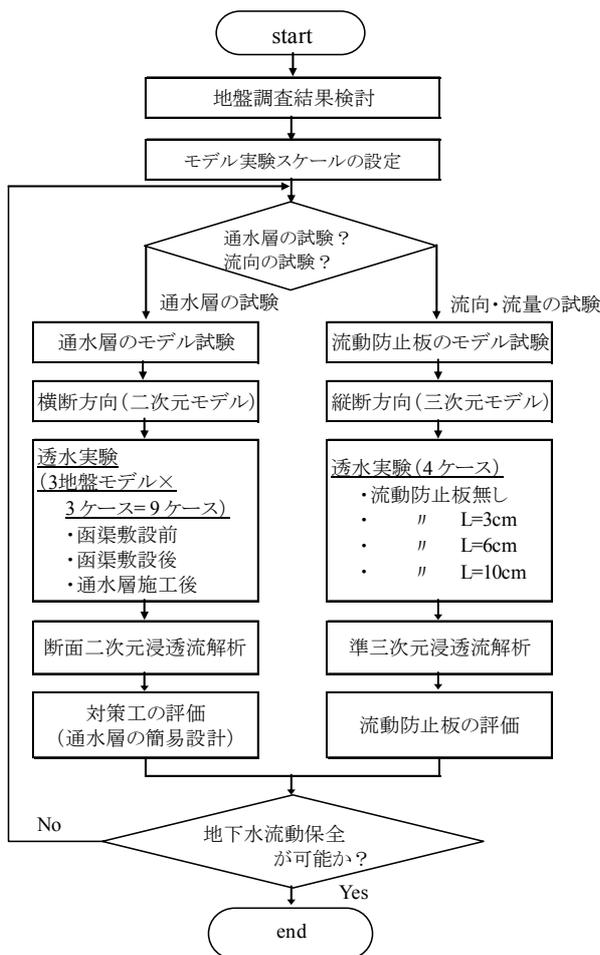


図-6 モデル実験～解析評価のフロー

表-1 室内モデル実験試料

土質区分	対象土層	透水係数k (m/s)
標準砂	宮水帯水層	1.60×10 ⁻⁴
マサ土	一般土層	2.79×10 ⁻⁵
渋川砂(岡山県)	対策工(フィルター層)	1.82×10 ⁻³

なるまで水位一定を保ち、流出量 Q 、土層内部の間隙水圧分布を測定した。その際に、染料を投入して流線を観察、ビデオ・写真にて結果を収録し、染料が下流まで到達後に実験を終了した。その後、函渠設置等の条件（対策工実施）を図-8のように変え、この手順を繰り返した。実験ケースとしては、実地盤を想定して、地盤状況を図-8のように3モデル（全層宮水帯水層、帯水層を一部遮断するモデル、帯水層を全層的に遮断するモデル）とし、施工前、函渠施工、函渠+対策工の3ケースとし、合計の9ケースを行った。実際に施工する場合には、函渠延長が長いこともあって、各種の地盤条件（難透水層と透水層の組合せ）があり、全部を包括した実験はできないことから、代表的な3断面を想定して実験を実施した。

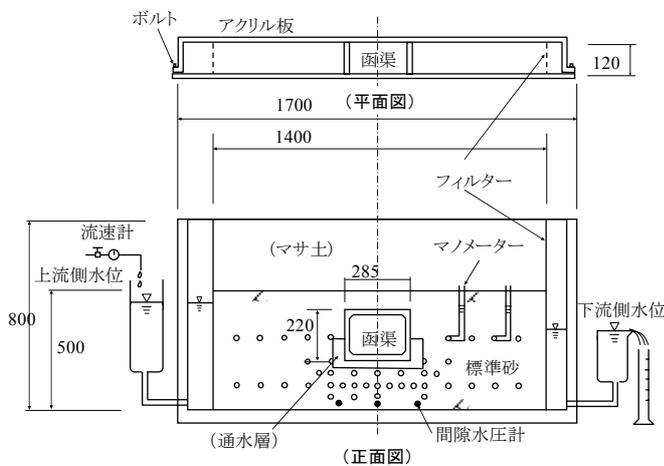


図-7 横断方向モデル実験装置 (単位: mm)

e) 実験結果

実験結果で得られた水頭分布（図-8参照）によると、函渠施工に伴い上流側の水位上昇は、CASE-3が顕著であり、 $\Delta h=3.60\text{cm}$ であった。逆に、下流側での顕著な変化は、CASE-3の $\Delta h=4.10\text{cm}$ の低下が見られた。このCASE-3の下流側では、対策工を実施することで、施工前の水頭分布にほぼ回復する（現状に対して $\Delta h=0.50\text{cm}$ の上昇）ことも確認できた。

また、得られた流量（図-9、表-2参照）については、地盤モデルA（全層が透水層）では、現況の状態（ Q_0 ）に対し、函渠敷設後（ Q_1 ）、下流側の流量比（ Q_1/Q_0 ）は、22%減少するが、対策工設置後（ Q_2 ）では、現況に対し、流量比（ Q_2/Q_0 ）が13%の減少にとどまることが判った。

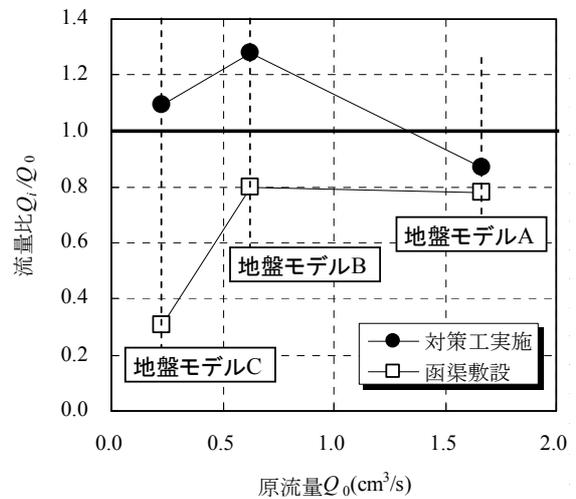


図-9 原流量～流量比相関

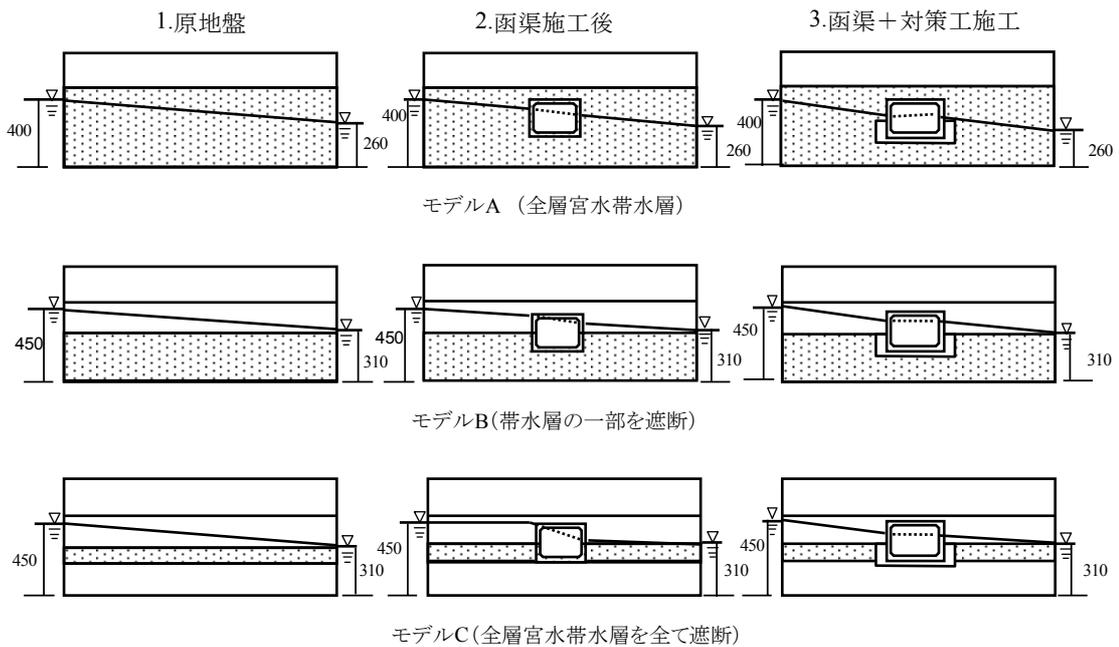


図-8 横断方向モデル実験結果（水頭分布） (単位: mm)

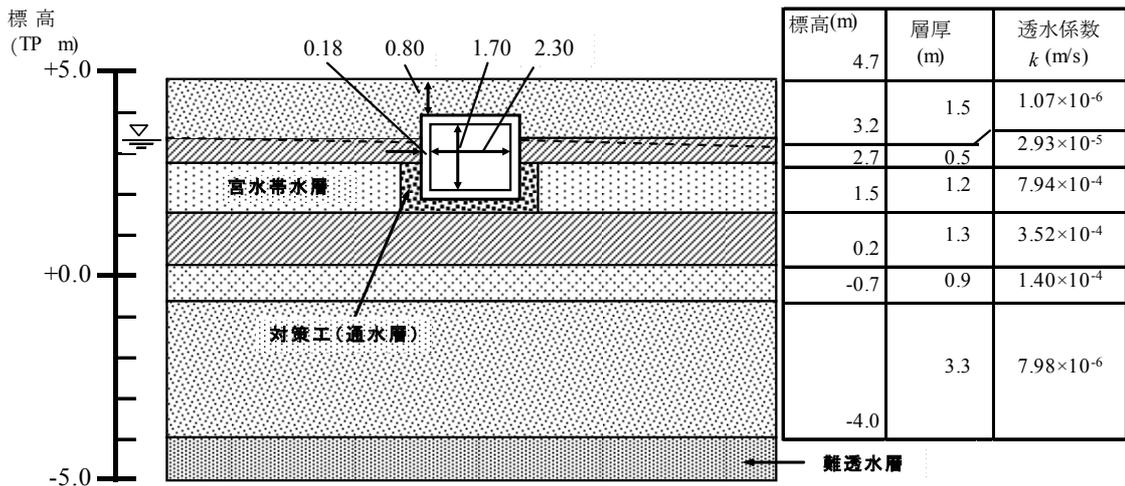


図-10 解析用地盤モデル (函渠の単位: m)

表-2 横断モデル実験結果

地盤モデル	原地盤 Q_0 (cm ³ /s)	函渠施工時		函渠施工+対策工	
		Q_1 (cm ³ /s)	Q_1/Q_0	Q_2 (cm ³ /s)	Q_2/Q_0
モデルA	1.67	1.30	0.78	1.46	0.87
モデルB	0.63	0.50	0.80	0.80	1.28
モデルC	0.23	0.07	0.30	0.25	1.10

同様に、地盤モデルBでは、現況の状態に対し、函渠敷設後では、下流側で20%の流量が減少するが、対策工設置後では、現況に対し28%流量が増加する結果が得られた。地盤モデルCでは、現況の状態に対し、下流側では、函渠敷設後70%の流量が減少する結果となり、函渠設置の影響が大きい、対策工設置後では、10%流量が増加することが判り、対策工効果が大きいことが判った。

また、地盤モデルA,B,Cの順に、対策工の効果が大きくなっていることが判ったが、これは函渠が帯水層を遮断する面積の割合が大きくなっていることによる。

これらの結果から、函渠横断方向の流れに対しては、函渠施工に伴って減少する流量を、周辺地盤より1~2オーダー高い透水係数を有する対策工を設置した効果によって、最低でも87%まで回復させることが可能であるといえる。特に函渠が透水層を遮断する面積が大きいほど対策工の効果は大きいことが判った。この結果、透水層を用いた対策工(全断面集排水工法)は有効であることが判った。

(2) 透水層の検証解析

モデル実験により、透水層を用いた地下水流動保全効果を確認できたことから、透水層の仕様について、断面二次元浸透流解析を用いて、透水層の厚さと透水係数の相関について検証した。解析モデルとしては、宮水対象層を遮断する形で函渠が敷設される場所(図-10参照)を

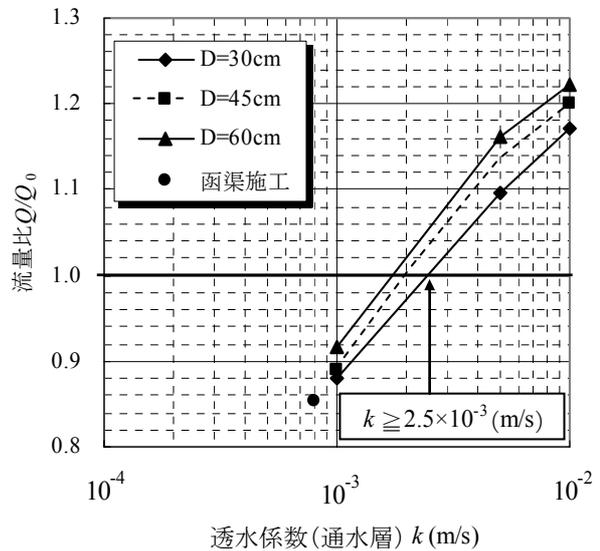


図-11 透水係数(透水層) ~ 流量比

選定し、検討を行った。解析モデルの幅は、実験結果と対比させるために、モデル実験の10倍モデルとしたB=15mと設定し、水位は現地状況に合わせて、上流側T.P.+3.20m、下流側+3.05mと設定(動水勾配*i*=1/100)した。

得られた解析結果から、原地盤の流量 Q_0 (m³/s)と、各ケースの流量 Q (m³/s)との流量比と、透水係数との相関を考慮して作製した(図-11参照)。宮水対象層の透水係数は、 $k=7.94 \times 10^{-4}$ (m/s)であることから、対策工の透水係数はこれ以上であることが望ましく、対策工の層厚が大きくなるとともに流量比が大きくなる関係が得られた。

この結果、 $Q/Q_0=1.0$ となる場合が、原地盤と同等な流量を確保できるものと考えられることから、以下のケースが適合するといえる。

- a) 透水層の層厚 $D=60\text{cm}$: $k \geq 1.6 \times 10^{-3}$ (m/s)
- b) 透水層の層厚 $D=45\text{cm}$: $k \geq 2.0 \times 10^{-3}$ (m/s)
- c) 透水層の層厚 $D=30\text{cm}$: $k \geq 2.5 \times 10^{-3}$ (m/s)

これらのことから、通水層の透水係数が $k \geq 2.5 \times 10^{-3}$ (m/s)を確保できるのであれば、ここで検討しているケースの場合には、 $Q/Q_0 \geq 1.0$ となり、通水層の層厚は、30cmで対応可能と考えられる。

課題点として、施工後数年経過すれば、目詰まりの懸念⁸⁾などがあり、安全側の透水性の確保が望ましいと考え、施工性にも配慮し、通水層厚は50cmとして設計した。

また、今回の実験、解析では、対策工を実施した場合に原地盤より流量が増加する結果となる実験、解析結果が得られたが、これについては、境界条件による影響を受けているとも考えられる。また、実現場においては、掘削時に地盤を乱して、透水性を低下させることもあり、上記したように、安全側の透水性の確保（透水係数、層厚など）も必要と考える。

(3) 通水層の仕様（層厚、透水係数）

図-7の実験状況に示すように、函渠などの地中構造物がなければ、地下水の浸透は、上流側から下流側に向かって流下している。しかし、函渠施工の場合には、函渠の周囲に迂回浸透流が発生し、地下水浸透が二次元的になる。ここでは、横断方向モデルのモデル実験および解析結果から通水層の仕様について考察する。

図-12に示すように、通水層の層厚を D_f 、透水係数を k_f とし、原地盤の層厚を D_0 、透水係数を k_0 とすると、単位奥行きあたりの必要通水量 q_0 は、自然動水勾配 (I) により、次式で表される⁹⁾。

$$q_0 = k \times I \times D \quad (1)$$

函渠上流側の通水量と函渠下を通下する通水量は等しいことが望まれることから、動水勾配一定と考えると次式に展開される。

$$D_0 \times k_0 \leq (D_f \times k_f + D_1 \times k_0) \quad (2)$$

よって、通水層の材料特性である透水係数 k_f は、層厚 D_f との関連で以下の式で算定できる。

$$k_f \geq (D_0 - D_1) k_0 / D_f \quad (3)$$

ここで、検討対象としている図-10のモデルでは、 $D_1=0$ であることから、式(3)は、式(4)となる。

$$k_f \geq (D_0 \times k_0) / D_f \quad (4)$$

各層の透水係数および層厚を、それぞれ k_i 、 h_i とし、図-10の地盤定数を代入し上流側の n 層の透水層の平均透水係数 k_0 を算定すると以下となる。

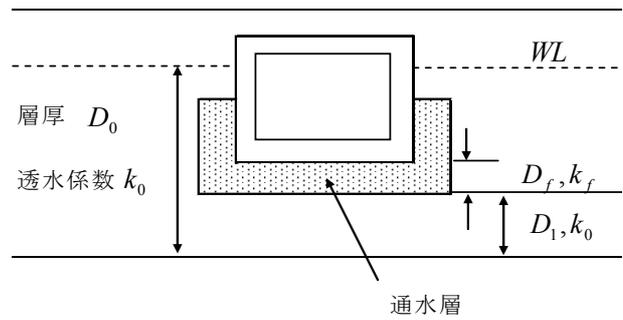


図-12 通水層の仕様

$$k_0 \geq \sum_{i=1}^n (k_i \times h_i) / \sum_{i=1}^n (h_i) \quad (5)$$

これより、図-10を用いると、平均透水係数は次のように決定できる。

$$k_0 = 3.23 \times 10^{-4} \text{ (m/s)}$$

この結果、式(4)より通水層を $D_f = 0.3m$ とすれば、通水層の透水係数は、次の値になる。

$$k_f = 3.2 \times 10^{-3} \text{ (m/s)}$$

ここで $D_f = 0.3m$ とした場合に、通水層のこの透水係数値は、断面二次元浸透流解析結果（図-11参照）によると、次式を満足する透水係数とよく整合することが判る。

$$Q/Q_0 \geq 1.0 \quad k = 2.5 \times 10^{-3} \text{ (m/s)}$$

同様に、 $D_f = 0.45, 0.60m$ を適用すると、それぞれ以下のようになり、図-11の $Q/Q_0 \geq 1.0$ にほぼ一致する。

$$D_f = 0.45m \quad k_f = 1.6 \times 10^{-3} \text{ (m/s)}$$

$$D_f = 0.60m \quad k_f = 2.1 \times 10^{-3} \text{ (m/s)}$$

以上のことから、ここで検討しているような事例では、通水層の材料仕様（透水係数、通水層の層厚）の設計については、式(3)の適用が可能と判定できる。

(4) 函渠施工前後の水位変化について

ここで検討している全断面集排水工法を適用した場合に、地下水位の変化の推定に、大東ら¹⁰⁾及び高坂・石川¹¹⁾が提案している簡易計算法を適用し、図-8で得られている実験結果（モデル-A～C）と比較した。

a) 全層帯水層の場合（図-13参照）

（施工前上流側水位： h_{1i} ）

$$h_{1i} = \sqrt{\frac{H_u^2 (x_3 - x_1) + H_1^2 (x_1 - x_0)}{(x_3 - x_0)}} \quad (6)$$

(施工前下流側水位: h_{2i})

$$h_{2i} = \sqrt{\frac{H_u^2(x_3 - x_2) + H_1^2(x_2 - x_0)}{(x_3 - x_0)}} \quad (7)$$

(施工後上流側水位: h_{1c})

$$A = \left(\frac{x_2 - x_1}{2b(x_1 - x_0)} \right) \quad (8)$$

とすると、以下の式を解いて水位を算定する。

$$A^2 \times h_{1c}^4 + 2A \times h_{1c}^3 + 2(1 - A^2 \times H_u^2)h_{1c}^2 - 2(A \times H_u^2 \times h_{1c}) + A^2 \times H_u^4 - H_u^2 - H_1^2 = 0 \quad (9)$$

(施工後下流側水位: h_{2c})

$$h_{2c} = h_{1c} + A(h_{1c}^2 - H_u^2) \quad (10)$$

ここでは、帯水層の残存厚さを**b**とし、降雨浸透による涵養がないとしての算定式¹⁰⁾を適用した。これ以外のパラメーターは、**図-13**を参照されたい。

b) 被圧帯水層の場合 (図-14~15参照)

水位変動量を s_c とすると、上流側および下流側の水位変動量は等しいとされている¹¹⁾。なお、ここで、 W は構造物の半幅とし、 β : 帯水層残存率 (=b/D) とした。これ以外のパラメーターは**図-14~15**を参照されたい。なお、領域については、I: 上流側、II: 構造物部、III: 下流側と設定¹⁰⁻¹¹⁾されている。これにより、 s_c は次式で得られる。

表-3 水位の比較 (単位: m)

モデル-A	函渠無		函渠施工後	
	室内実験	簡易式	室内実験	簡易式
函渠上流側	0.353	0.352	0.356	0.353
函渠下流側	0.314	0.332	0.303	0.320
モデル-B	函渠無		函渠施工後	
	室内実験	簡易式	室内実験	簡易式
函渠上流側	0.393	-	0.401	0.395
函渠下流側	0.353	-	0.349	0.355
モデル-C	函渠無		函渠施工後	
	室内実験	簡易式	室内実験	簡易式
函渠上流側	0.402	-	0.438	0.455
函渠下流側	0.365	-	0.324	0.315

$$s_c = \left\{ \frac{1}{(1 - W/R_2) \times \beta + W/R_2} - 1 \right\} I \times W \quad (11)$$

当地域での被圧モデルの場合、上下に難透水層が分布する場合 (**図-15**参照) には、式(11)に $\beta = 0$ を代入することで対応できる。

式(6)~式(11)に室内モデル実験のデータを代入してみると、**表-3**のように、簡易式と実験結果がほぼ整合し、施工後の水位をよく再現しているといえる。

以上のことから、大東ら¹⁰⁾ および高坂・石川¹¹⁾が提案している簡易予測式は、実務においても十分適用可能と考えられる。

4. 縦断方向への地下水の流下問題

(1) 室内モデル実験

a) 実験の目的

縦断方向モデル実験では、地下水保全対策工の設置時に生じる可能性のある函渠下流方向への流下を防止し、本来の地下水の流れである函渠を横断する流下を促進さ

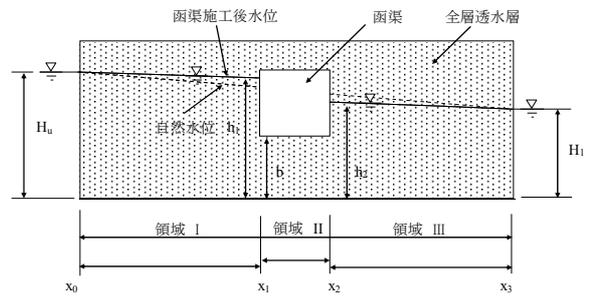


図-13 函渠施工モデル (不圧帯水層)

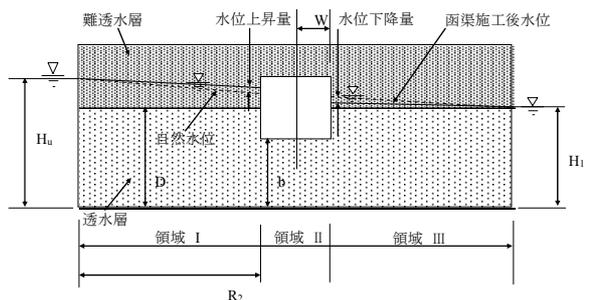


図-14 函渠施工モデル (被圧帯水層)

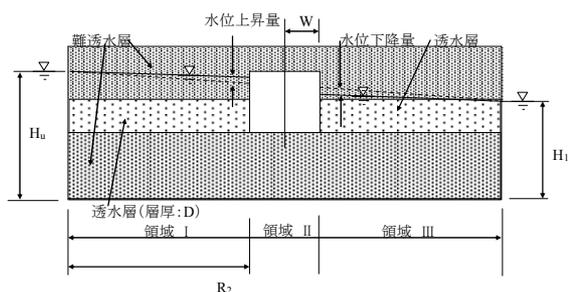


図-15 函渠施工モデル (上下被圧帯水層)

せる目的で、対策工（流動防止板）の効果判定を行った。

b) 実験手法

実験に用いた試料は、横断方向モデル実験で採用した材料と同様に、密度・粒度の調整を行って、現場とほぼ同等の流れを再現する透水係数を有する標準砂等（表-1）を用いた。横断モデルと同様に、実験槽の大きさを1/10モデルとし、長さ2,000m、高さ0.745m、奥行き0.245m（図-16参照）として、流動防止板の効果検証のため、実験装置を立てた状態で、流動防止板の長さを変更して、函渠を横断してくる流量（ Q_2 ）を測定する流下実験を行った。土槽の材料は、流動防止板の効果検証を主目的としたために、1層（透水係数 $k=1.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$ ）とし、通水層（透水係数 $k=1 \times 10^{-3} \text{m/s}$ ）を設置した。水位は、上流側WL=+0.695m、下流側WL=+0.633mと設定した。

実験は、流動防止板を設置しないケース（流動防止板0cm）を基本として、流動防止板の長さをL=3cm（通水層の厚さ $t=3\text{cm}$ +原地盤への貫入長 $l=0\text{cm}$ ）、およびL=6cm（ $t=3\text{cm}+l=3\text{cm}$ ）、L=10cm（ $t=3\text{cm}+l=7\text{cm}$ ）の合計4ケースで実施した。函渠上流側からの全流量（ Q_a ）を、函渠に沿って流下する流量（ Q_1 ）と、函渠を横断して流下する流量（ Q_2 ）に区分し測定した。

c) 縦断方向モデル実験結果

この結果、流動防止板が無い場合（L=0cm）には、函渠縦断方向への流量 Q_1 は、88%が流下し、横断方向へは、12%が浸透するだけであり、函渠施工に伴って流路が変わる可能性があるといえる（図-17、表-4参照）。

次に、L=3cmの場合では、 $Q_1=72\%$ に低減することができ、流動防止板の無い場合（L=0cm）に比較して、 $\Delta Q=+16\%$ の流量を横断方向に流下する効果が期待できることが判明した。また、L=6cm（ $l=3\text{cm}$ ）では+1.7%、L=10cm（ $l=7\text{cm}$ ）では、+3.6%程度横断方向に増加するだけであることも判った。このように、流動防止板の長さを2倍、3倍強に伸ばしても、その効果はそれほど期待できないことも判明した。

以上から、函渠に沿って流れる縦断方向への流量は、

表-4 縦断方向モデル実験結果

流動防止板長 (cm)	函渠下流 流出量 Q_1 (cm ³ /s)		函渠横断 流出量 Q_2 (cm ³ /s)		全流量 Q_a (cm ³ /s)
	流量 Q_1	Q_1/Q_a	流量 Q_2	Q_2/Q_a	
0	13.30	0.88	1.87	0.12	15.10
3	10.20	0.72	3.98	0.28	14.20
6	9.70	0.70	4.10	0.30	13.80
10	9.20	0.68	4.24	0.32	13.40

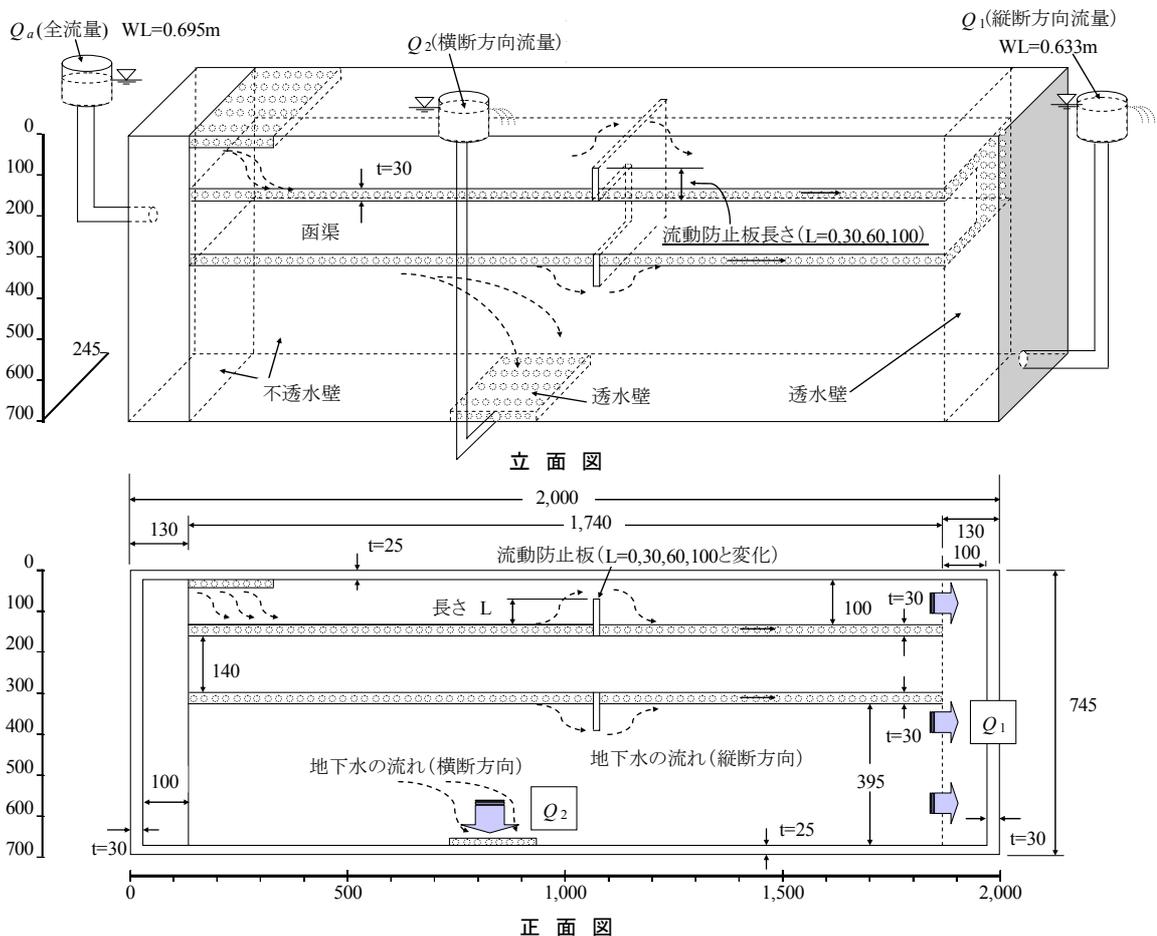


図-16 縦断方向モデル実験装置（単位：mm）

限定的であるものの流動防止板によって防止することができることが判明した。

(2) 流動防止板の効果の検証解析

実験結果を評価するために、準三次元広域浸透流解析を実施し、流動防止板の有効性を検証した。解析においても、流動防止板の長さを変化させて、函渠施工に対する影響検討を7ケースの定常解析で実施した(図-18, 表-5参照)。また、地盤モデルは、最も地下水流動に影響が生じると考えられる、宮水帯水層であるAs(3)層を遮断するモデルとした。

- a) 函渠施工前の現状での地盤
- b) 函渠施工
- c) 函渠の周囲に通水層のみを設置した場合(L=0cm)
- d) 通水層内に流動防止板を設置した場合(L=50cm)
- e) 地山内に流動防止板を35cm貫入させた場合(L=85cm)
- f) 地山内に、e)の2倍の70cm貫入させた場合(L=120cm)
- g) 地山内にf)+50cm貫入させた場合(L=170cm)

表-5 入力地盤定数

材料	透水係数 k (m/s)	層厚(m)
As(1)	1.07×10^{-6}	1.50
As(2)	2.93×10^{-5}	0.50
As(3): 宮水層	7.94×10^{-4}	1.20
Ac(1)	1.00×10^{-9}	1.30
Ac(2)	1.00×10^{-9}	0.20
対策工(通水層)	1.00×10^{-2}	0.50
函渠	1.00×10^{-9}	B=2.66m H=2.06m
流動防止板	1.00×10^{-9}	L=0~120cm

解析における境界条件は、すべて定水位境界とし、当地域の動水勾配が $i=1/100 \sim 1/200$ であることから、上流側をT.P.+4.50m、下流側をT.P.+4.30mとして与えた。

さらにモデルの大きさについては、構造物延長の7倍程度とすることが望ましい¹²⁾とされているが、流動防止板の効果を確認することを目的として、20m×20mのプロトタイプモデルで解析を行った。

解析の結果、函渠と平行な面より流出する縦断方向流量を Q_1 (m^3/s)とし、函渠横断方向の流量を Q_2 (m^3/s)として整理を行った。ここでは、 $Q_1 + Q_2$ を全流量 Q_a として、流量比 Q_1/Q_a 、 Q_2/Q_a と、現状および函渠施工時、流動防止板長さとの相関を作製した(図-19参照)。

この結果、函渠施工前(現状)における横断方向への

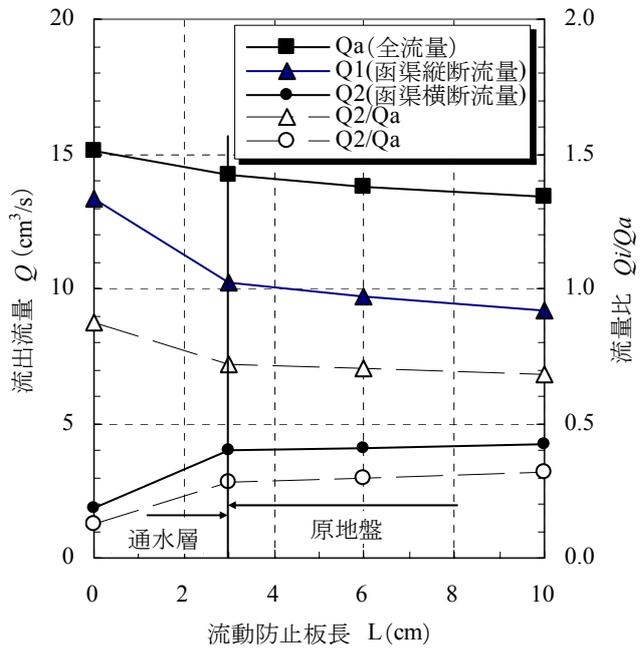


図-17 流動防止板長～流出流量, 流量比

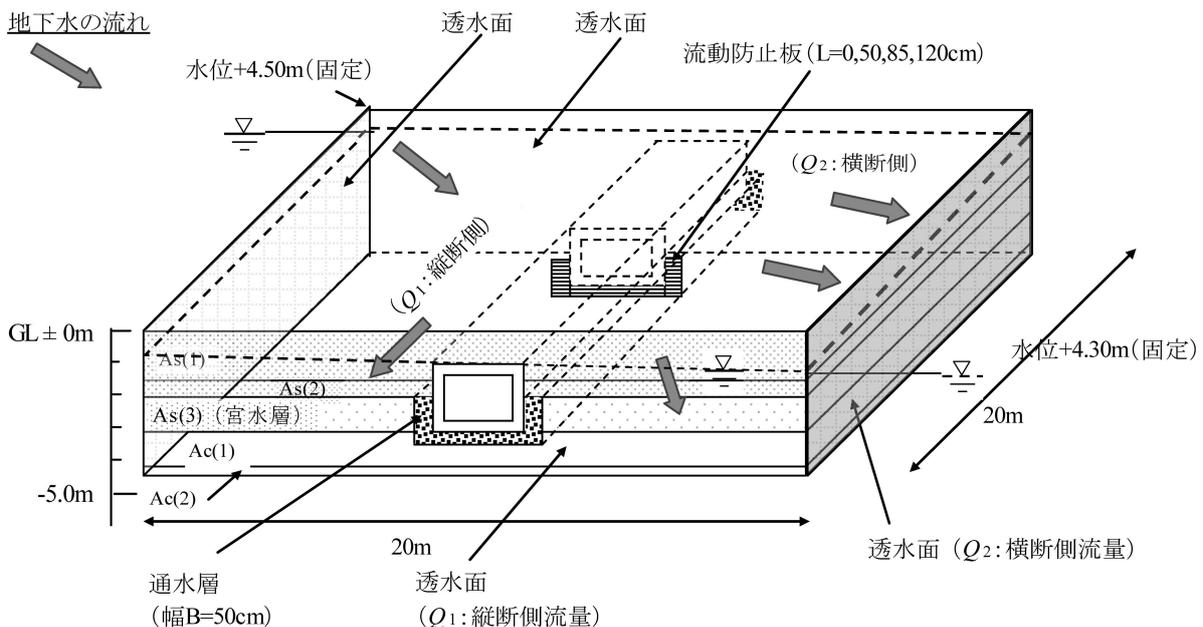


図-18 縦断方向解析モデル

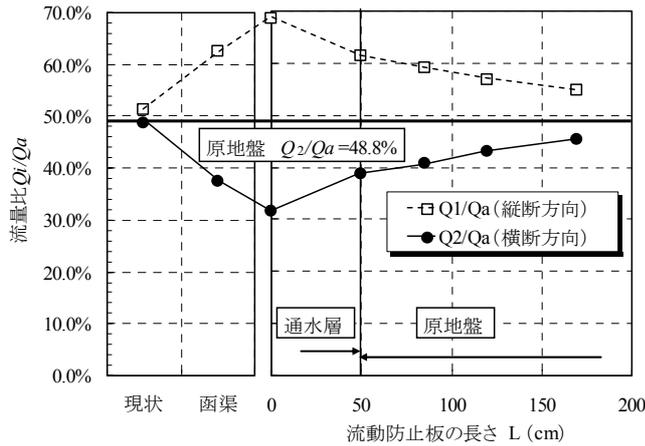


図-19 流動防止板長～流量比 (解析結果)

流量比は、 $Q_2/Q_a=48.8\%$ が得られた。これに比較して、函渠施工により $Q_2/Q_a=37.6\%$ 、通水層の施工によって、縦断方向への流れが加速し、 Q_2/Q_a はさらに低下し、 $Q_2/Q_a=31.5\%$ となる。これに対して、流動防止板を $L=50\text{cm}$ (地盤への貫入長 $l=0\text{cm}$) 設置することで、 $Q_2/Q_a=38.6\%$ と7%程度回復することができる。 $L=85\text{cm}$ ($l=35\text{cm}$) で $Q_2/Q_a=40.8\%$ 、 $L=120\text{cm}$ ($l=70\text{cm}$) で $Q_2/Q_a=43.1\%$ 、 $L=170\text{cm}$ ($l=120\text{cm}$) で $Q_2/Q_a=45.2\%$ と横断方向への地下水の回復が可能となることが判る。

以上により、流動防止板の長さを $L=120\text{cm}$ とした施工を行うことで、横断方向への地下水を88%まで回復可能なことが判った。このように、 $L=0\text{cm}$ に対して、 $L=50\text{cm}$ の回復傾向は、実験結果 (図-17参照) と整合することを確認でき、流動防止板の効果検証ができた。

なお、地下水の流向と地下構造物の延長方向との交角の影響、解析モデルサイズの最適化などについての検討と、今回のケースでは、20m間隔での設置ピッチでの検討としたが、実施設計上では、各種の地盤モデルを用いた流動防止板の設置間隔・貫入深さの最適化が必要と考える。

5. 流動防止板の遮水効果確認試験

実際の地盤において函渠施工時に、通水層と流動防止板の施工を実施した箇所 (図-20参照) において、揚水孔 No.3にて水位を低下させて、通水層内の観測孔と周囲の観測孔および流動防止板を越えた観測孔で揚水試験 (揚水量 $Q=140\sim 200\text{ l/m}$) を実施し、流動防止板 ($L=50\text{cm}+$ 地盤改良杭70cmにより、全長120cm) の止水効果を検証した。

揚水孔 (通水層) で $\Delta h=1.26\text{m}$ 低下させたところ、函渠反対側のNo.4観測孔では、 $\Delta h=1.21\text{m}$ となり、周囲の地

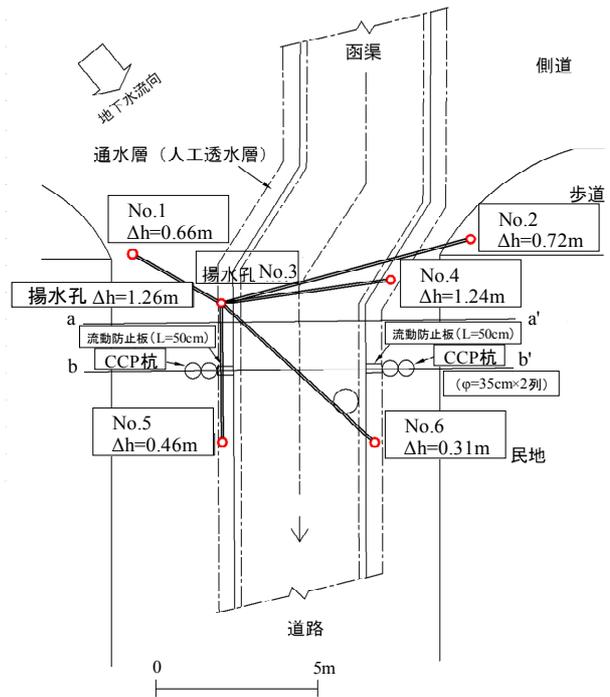


図-20 流動防止板の遮水効果確認試験

盤での観測孔 (No.1,2) と比較して、揚水孔の水位と近似しており、対策工の透水性が良好であり、通水層として機能していることが確認できた。一方、揚水孔から4.2~6.7mの距離にあり、流動防止板によって遮断された通水層内のNo.5~6観測孔では、同じ通水層内のNo.1~2に比較すると、水位低下量が $\Delta h=0.46\sim 0.31\text{m}$ にとどまっていることが判った。

このことから、遮水効果を期待することができ、通水層内を流下する地下水の流れは、流動防止板で遮水され、より透水性の良い通水層を迂回する函渠横断方向に流れることが予想されることを確認した。

なお、ここでは、函渠施工時に止水のために鋼矢板を打設し、透水層を完全に仕切って施工し、施工完了後に鋼矢板撤去での施工としている。このために、この鋼矢板打設ラインで透水層が攪乱され、通水層に支障をきたすことも懸念されていたが、本試験によって、地盤内の水位低下も良好であることから、通水層の透水性について、施工に伴う攪乱障害は発生していないと評価した。

現実的には、本工法の施工後、平成7年の阪神淡路大震災を経た後、10年程度経過した現在でも、宮水は酒造用水として利用されている。

ただし、施工時には、地下掘削のために、鋼矢板を用いたものの、所定の地下掘削が完了し、鋼矢板を引き抜くことになった段階で、通水層である砂質土層内に、鋼矢板に付着した粘性土が混入したことから、地下水保全の通水層が遮断されて、機能しなかったところもあったとされている¹³⁾。今後、同様な工法を採用し施工する際の留意点としたい。

6. 当地域における合意形成のプロセス

近年、公共事業の計画～事業の実施にあたり、地元住民等との意見交換がより一層求められるようになってきた。一方で、環境意識の高まりから、意見交換会を開催しても、共通の方向性を見つけることが難しい状況になりつつあることも事実であろう。

特に当地域のように広範囲に下水道を敷設するような事例では、社会に大きな影響を及ぼす社会資本整備であるにもかかわらず、地元で歴史的にも価値のある宮水の保存に直結する課題であることから、合意形成が得られにくいことも事実である。このような場合、整備が遅れ、生活環境の悪化を招くことも考えられる。

従来、採用されてきた社会的合意（コンセンサス）を得るための手段として一般的に、委員会を設立し、その委員会に委託して、調査～施工の手法について審議（オーソライズ化）されることが多い。しかしながら、実際の審議の中で、解析結果を事例にすると、あくまでも地盤をモデル化し、一定の境界条件における結果であることから、委員会の承認を得るまでには、相当の説明努力と時間が必要であることも事実であろう。

当地域の場合には、事業者が一方的に計画を進めるのではなく、地元酒造関係者代表により構成された「西宮市下水道調査会」に、計画段階から協議することで、地下水に対する影響について、情報提供、意見交換、意見

の集約などを図ることによって合意形成が行われた（図-21）。一連の合意形成過程において、モデル実験を行って、実際に地下水の動向を事業者・地元関係者（酒造組合代表）が視察したことにより、地下水に関する理解を深める結果となり、地下水解析結果などについても円滑な意見交換がなされることとなった。同様に、その後の調査会の審議の際に、事業者が提案する各種の調査・設計・施工内容に関しても、忌憚のない意見の交換がなされることとなった。

このように、モデル実験を実施・観察することは、PI（パブリックインボルブメント）手法としても有効であり、その後の事業の透明性、効率性の確保に貢献したといえる。これらの結果、地下水モデル実験の実施・観察および地下水解析は、事業の推進に対する合意形成の一手法として有効な手法と考える。

7. 結論

本研究によって得た結論を、以下に列挙する。

- (1) 地下水流動保全の中で、浅層の地下水を保全することによって、西宮の「宮水」の流動保全を達成した結果について報告した。
- (2) 事業者、酒造関係者、学術経験者等で構成されている宮水保存調査会の委員の方々が、室内モデル実験を見学することで、その後の調査会の審議を円滑な移行に

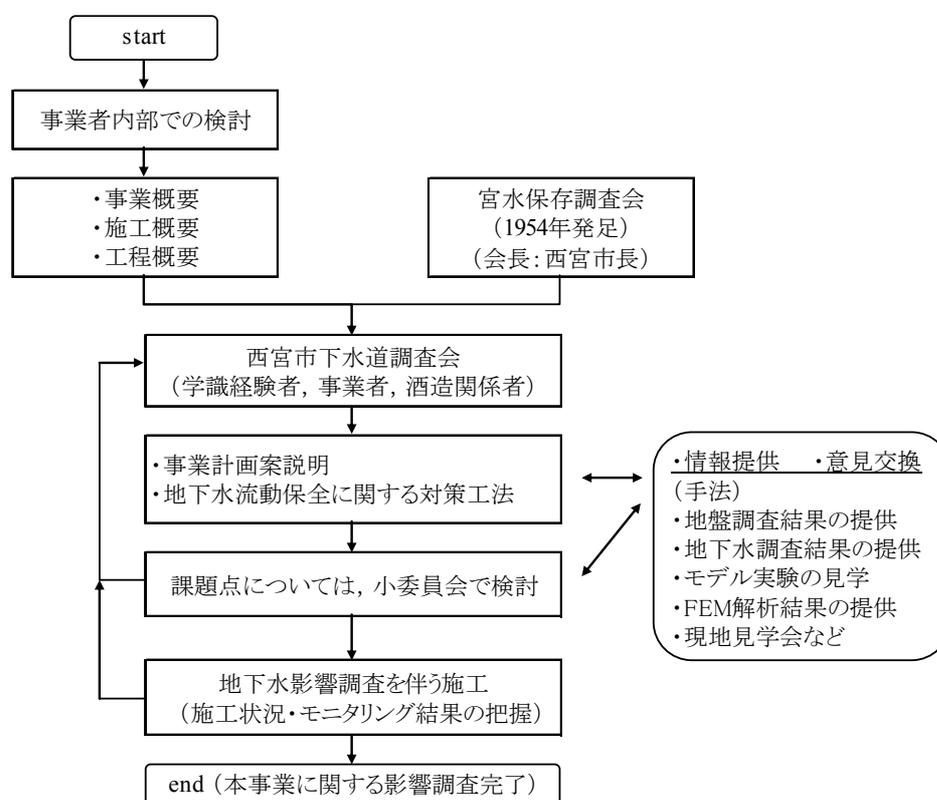


図-21 合意形成のプロセス

非常に役立ったと考えている。このことから、室内モデル実験は、社会資本整備の際に、地元住民等に合意形成を行ううえで極めて有効であるといえる。

- (3) 函渠の周囲に通水層（人工透水層としてのフィルター層）を設けることによって、上、下流の地下水の流動保全が可能なことを、室内におけるモデル実験と断面二次元解析によって示した。
- (4) 室内モデル実験をシミュレートする上で、一般的には FEM による浸透解析が行われるが、地下に構造物を構築した場合に、大東らの提案している簡易式で地下水位を予測できる可能性があることを示した。
- (5) 地下水の流れが3次元である時には、地中構造物の通水層沿いに下流側への浸透が懸念されるが、これに対して縦断方向流動防止板によって、限定的ではあるが、従来の地下水の浸透方向が維持できる可能性があることを室内モデル実験および準三次元浸透流解析によって示した。
- (6) 函渠施工後に実施した揚水試験によって、対策工の通水性および流動防止板の止水性を確認できた。また、函渠施工時の仮設鋼矢板の撤去に伴う通水層の攪乱の影響も発生していないと評価した。

今後の課題として、地下水の流向と地下構造物の延長方向との交角の影響、解析モデルサイズの最適化などについての検討と、実施設計上では自然に近い横断方向への流下率の向上を目途として、流動防止板の設置間隔・貫入深さの最適化が必要と考える。

謝辞：本研究にあたり、多大なご便宜とご指導をいただきました久宗仁宣氏（西宮市土木局）、宮水保存調査会の学識経験者として宮水の保存に精力的に活動されており、数々のご指導を頂きました済川要理学博士に深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 地盤工学会：地下水流動保全のための環境影響評価と対策—調査・設計・施工から管理まで—, pp.123-133, 2004.
- 2) 赤井浩一, 大西有三, 西垣誠：有限要素法による飽和不飽和浸透流の解析, 土木学会論文報告集, No.264, pp.87-96, 1977.
- 3) 河野伊一郎, 西垣誠：有限要素法による広域地下水の準三次元浸透解析—その手法とプログラム解説—, 岡山大学工学部土木工学教室レポート, No.'82-1, 1982.
- 4) 済川要：都市開発に伴う浅層地下水の保全について—阪神間の70年間の事例—, 地下水技術, 第38巻, 第6号, pp.16-30, 1996.
- 5) 西垣誠：地下水に関する環境評価法, 基礎工Vol.20, No.11, pp.25-31, 1992.
- 6) 岩井重久：みず—天の恵み宮水の不思議, 灘の酒博物館, p.83, 講談社, 1903.
- 7) 灘酒研究会：灘酒, p.102, 1969.
- 8) 地下水流動保全工法研究委員会：地下水流動保全工法, pp.3・35-3・37, 2002.
- 9) 地盤工学会：地下水流動保全のための環境影響評価と対策—調査・設計・施工から管理まで—, pp.165-167, 2004.
- 10) 大東憲二, 植下協, 市川悦男：堀割構造物周辺の地下水流動状態保全に関する研究, 土木学会論文集, No.535/III-34, pp.13-21, 1996.
- 11) 高坂信章, 石川明：地下水流動阻害現象の三次元影響評価式の提案, 第36回地盤工学研究発表会, No.638, pp.1257-1258, 2001.
- 12) 地下水流動保全工法研究委員会：地下水流動保全工法, pp.2-82, 2002.
- 13) 西垣誠：都市の地下水環境の現状と課題（その3：地下水流動保全）, 地下水流動保全工法と今後の課題, 水循環—貯留と浸透—, Vol.59, pp.5-10, 2006.

(2006. 6. 26 受付)

A MODEL EXPERIMENT AND THE CONSIDERATION ON GROUNDWATER FLOW PRESERVATION FOR THE AGREEMENT FORMATION

Makoto NISHIGAKI and Kuniharu TSUBOTA

To construct artificial structures such as a box culvert in sub-urban regions under which unconsolidated geological formations exist, it is important to understand the distribution of aquifers and movements of groundwater from the view point of environmental preservation. A study through a laboratory model experiment revealed that the obstruction to groundwater flow caused by laying box culvert could be minimized by (1) putting permeable material around the box, (2) controlling longitudinal flow velocity along box axis with seepage control walls, placed perpendicularly at some intervals. A further 2-dimensional seepage analyses and instrumentation monitoring in the laboratory was conducted. The study confirmed that the influence of sewer box construction on groundwater flow can be reduced. We describe about utility of a design based on the model experiment and analysis for such agreement formation.