

地下水流動保全工法に関するモデル実験とその考察

中部土質試験協同組合
専務理事 坪田 邦治

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、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、予測結果と合致しないことも多くあり、解析結果のみの説明では地元住民の理解が得られないことも多々発生することがある。

本論文の事例では、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によって地下水流動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⁾による検証を試みた。

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、地下水流動保全対策工（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。

また、函渠周辺に通水層を設置した場合には、通水層方向（函渠縦断方向）への流れを促進する可能性があることから、地下水の流向を変えてしまう懸念があったが、これに対して、流動防止板を設置し、函渠施工前の地下水の流向を確保する可能性があ

ることが判明した。

これらの過程の中で、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⁴⁾の委員が、代表的モデルではあるが、モデル実験結果を視察することで、対策工によって、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、結果的には、調査～解析結果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に大きく貢献したと考える。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必要となるが、本論文では、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の有用性について論述する。

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⁾（加筆修正（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。ここで対象とした宮水帯水層は、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⁷⁾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、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、流動防止板の効果を評価するために、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。

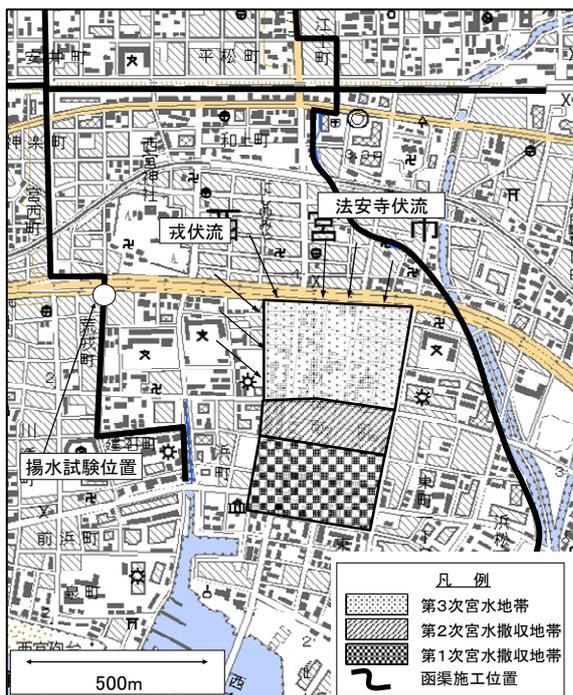


図-1 宮水地帯の変遷⁶⁾と函渠施工位置

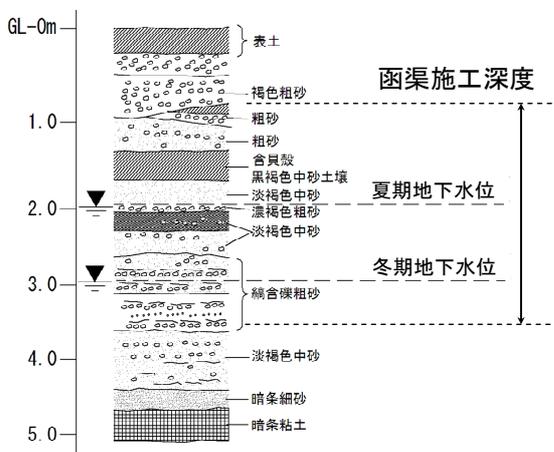


図-2 対象地域の代表的地盤モデル⁷⁾に加筆

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。

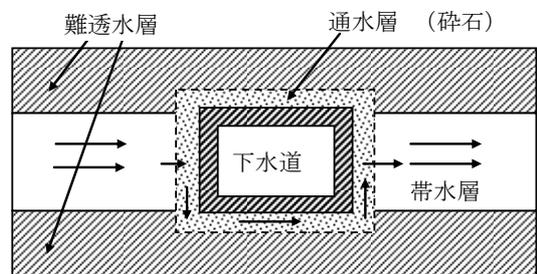


図-3 函渠周囲の迂回浸透⁵⁾

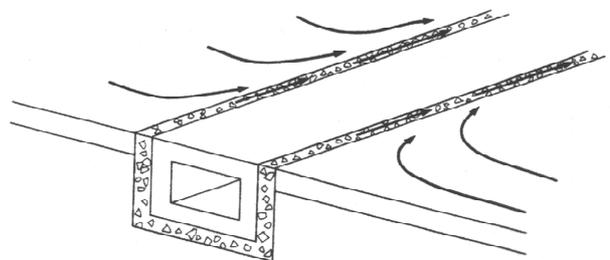


図-4 下水道溝周囲の浸透⁵⁾

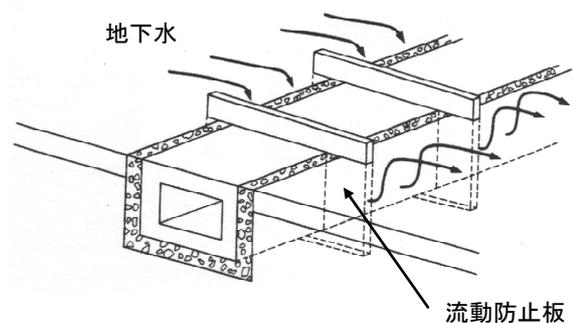


図-5 流動防止板付き函渠⁵⁾

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。このモデルを採用することで、試験期間として、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、スケールは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。

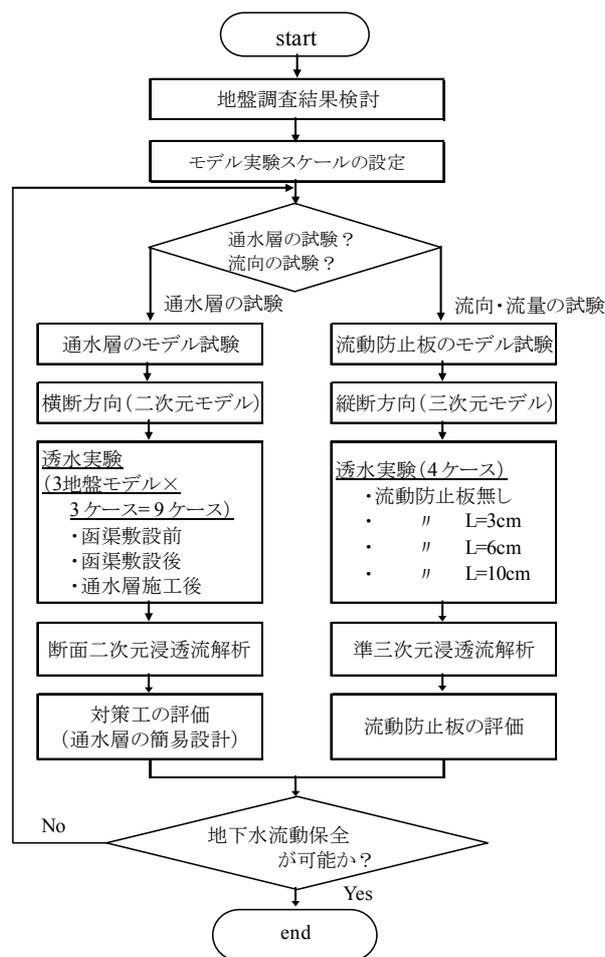


図-6 モデル実験～解析評価のフロー

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、現場で得られる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ン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、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、帯水層を全面的に遮断するモデル）とし、原地盤、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。

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、モデルC

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}

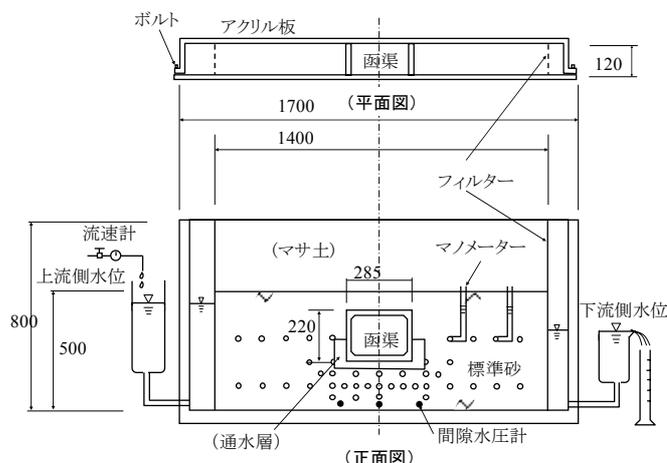


図-7 横断方向モデル実験装置 (単位: mm)

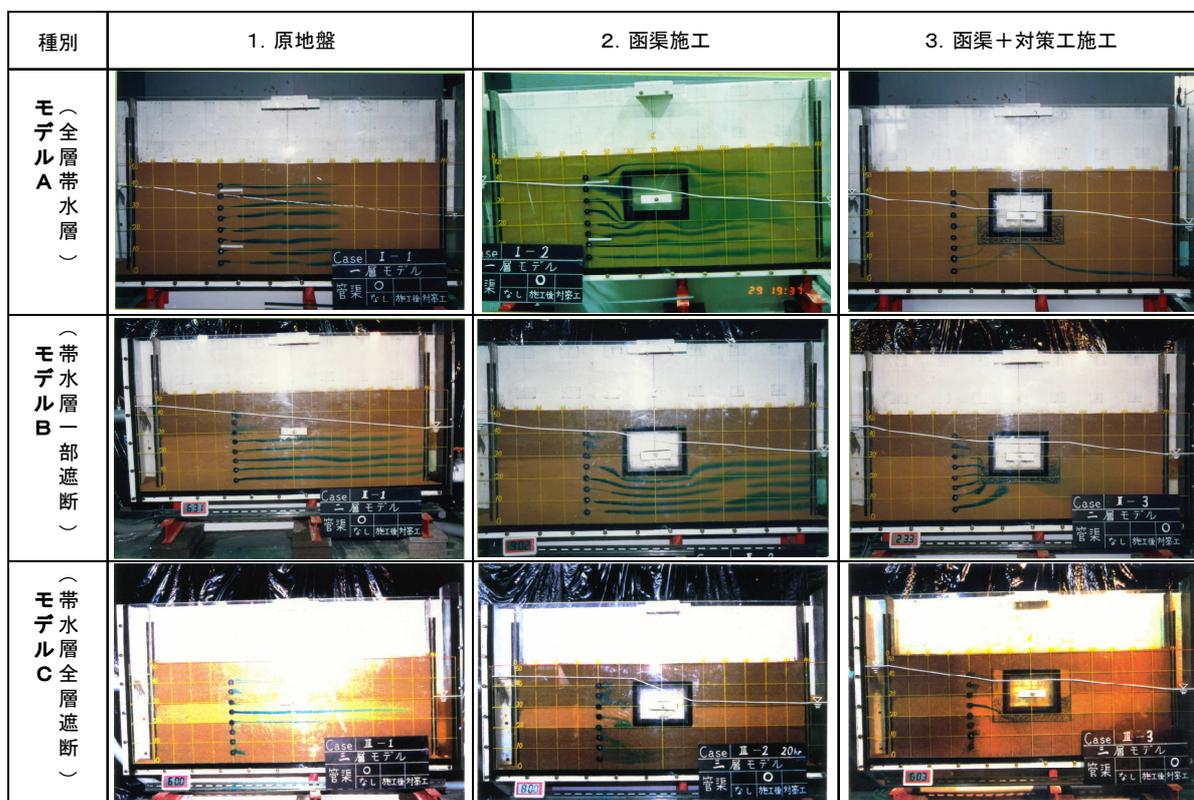


図-8 横断方向モデル実験状況

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、モデルCの $\Delta h = 4.10\text{cm}$ の低下が見られた。このモデルC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。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が、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、通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) 通水層の検証解析

モデル実験により、通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、通水層の仕様について、断面二次元浸透流解析を用いて、通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 $B = 15\text{m}$ と設定し、

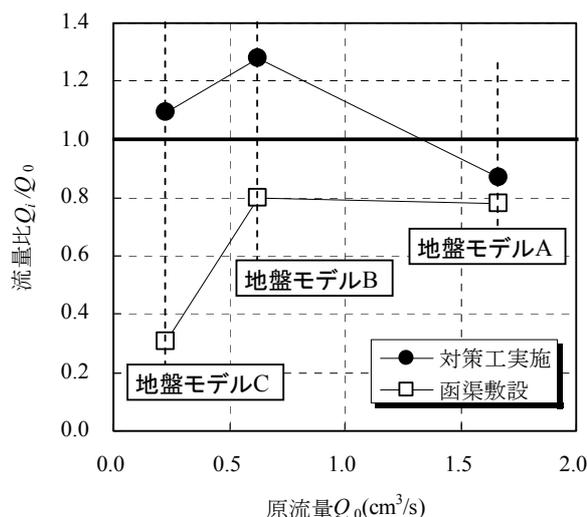


図-9 原流量～流量比相関

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 （ m^3/s ）と、各ケースの流量 Q （ m^3/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、原地盤と同様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) 通水層の層厚 $D = 60\text{cm} : k \geq 1.6 \times 10^{-3}$ （ m/s ）
- b) 通水層の層厚 $D = 45\text{cm} : k \geq 2.0 \times 10^{-3}$ （ m/s ）
- c) 通水層の層厚 $D = 30\text{cm} : k \geq 2.5 \times 10^{-3}$ （ 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。

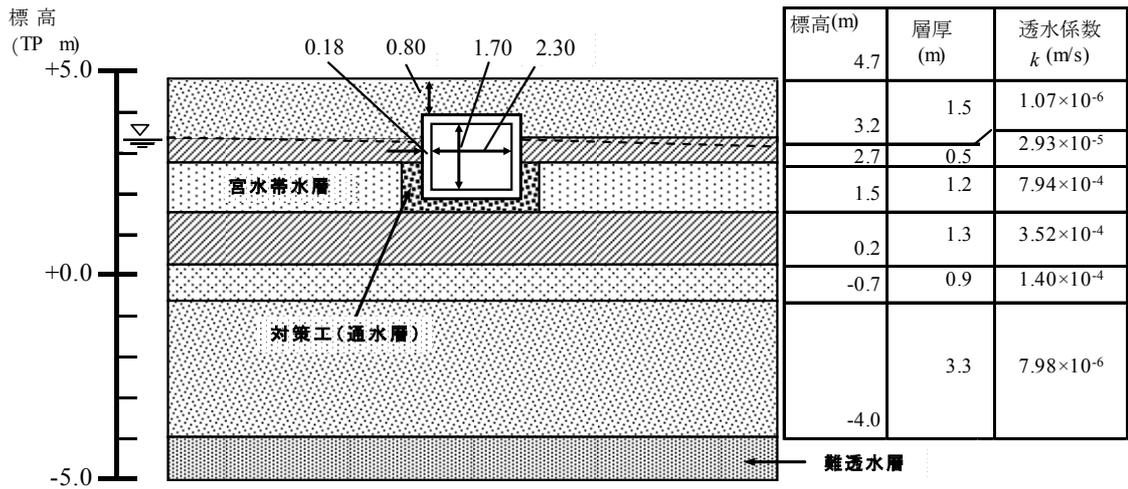


図-10 解析用地盤モデル (函渠の単位 : m)

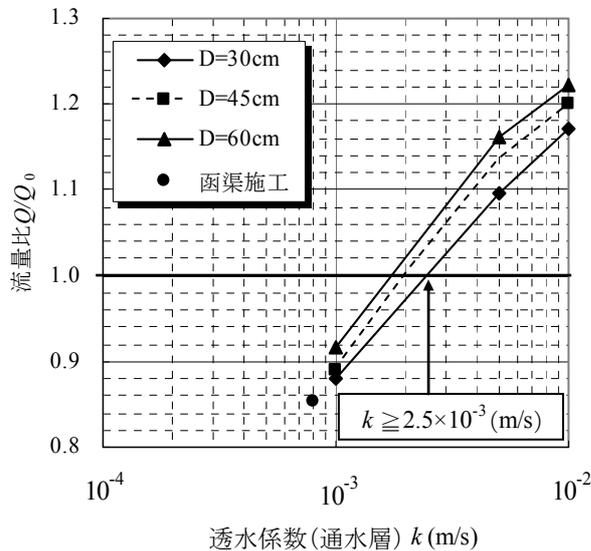


図-11 透水係数 (通水層) ~ 流量比

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-8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

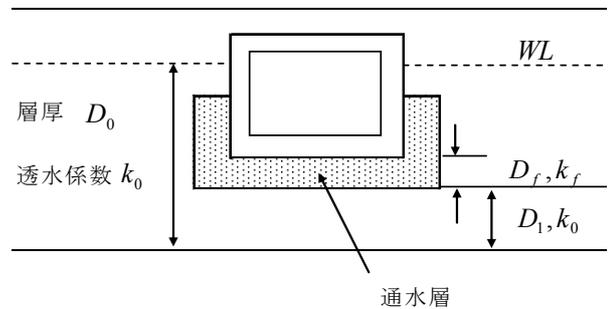


図-12 通水層の仕様

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、 $D_1=0$ であり、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。

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

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。

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

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。

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

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。

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

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。

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

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

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. 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-13**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 $k=1.0 \times 10^{-4} m/s$) とし、通水層 (透水係数 $k=1 \times 10^{-3} m/s$) 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 $t = 3cm$ + 原地盤への貫入長 $l = 0cm$)、および $L=6cm$ ($t=3cm+l=3cm$)、 $L=10cm$ ($t=3cm+l=7cm$) 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

実験結果によると、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-14**, **表-2**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、 $L=6cm$ ($l=3cm$) では+1.7%、 $L=10cm$ ($l=7cm$) 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。

表-2 縦断モデル実験結果

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

以上から、函渠に沿って流れる縦断方向への流量は、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った。

(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-15~16参照)。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)

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

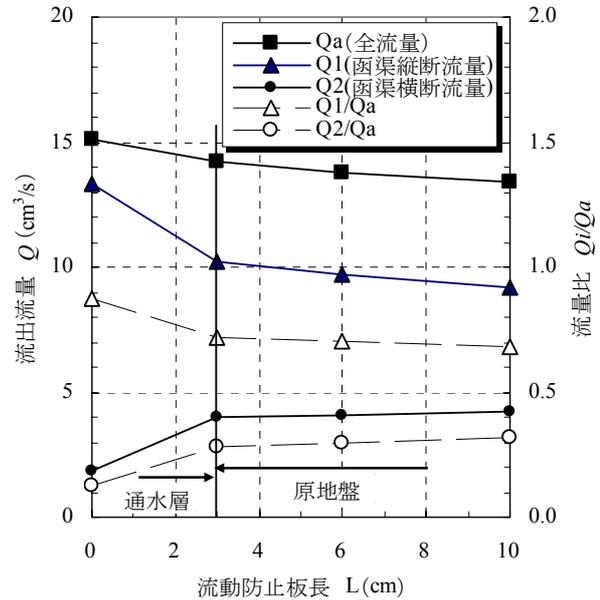


図-14 流動防止板長～流出流量、流量比

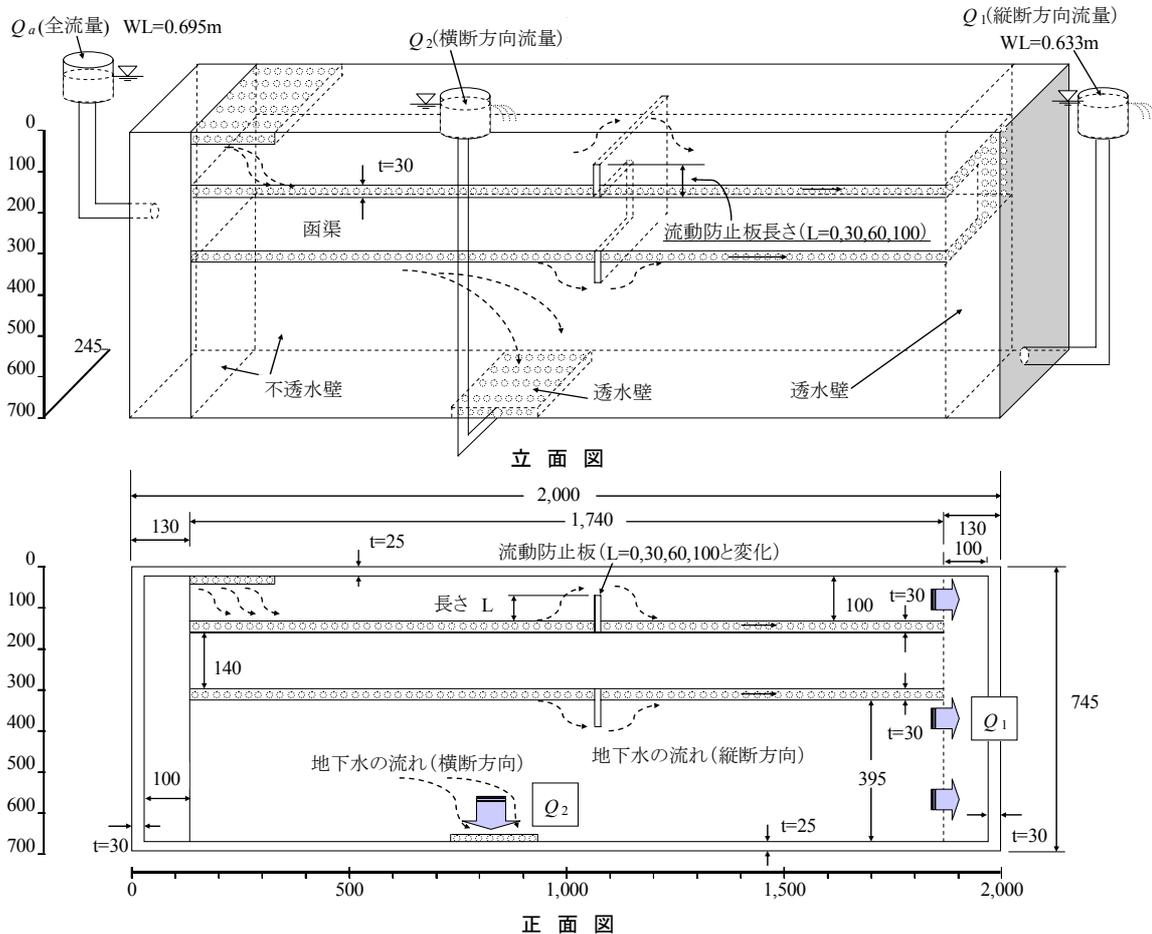


図-13 縦断方向モデル実験装置 (単位: mm)

して与えた。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¹⁰⁾とされているが、流動防止板の効果を明確に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した。

解析結果は、函渠と平行な面より流出する縦断方向流量を $Q_1(\text{m}^3/\text{s})$ とし、函渠横断方向の流量を $Q_2(\text{m}^3/\text{s})$ 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-17~18参照)。

この結果、函渠施工前(現状)における横断方向への流量比は、 $Q_2/Q_a=48.8\%$ 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-14参照)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といえる。

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

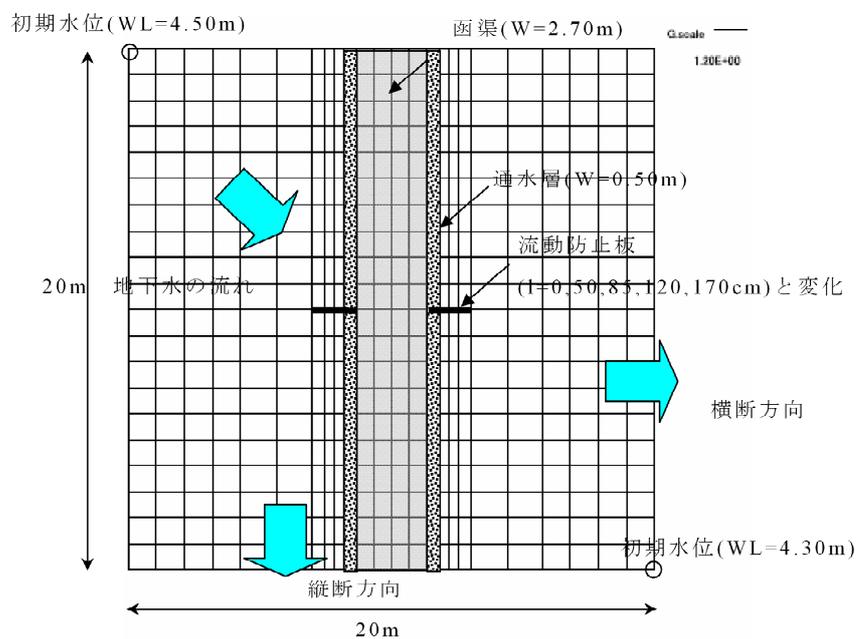


図-15 解析モデルメッシュ

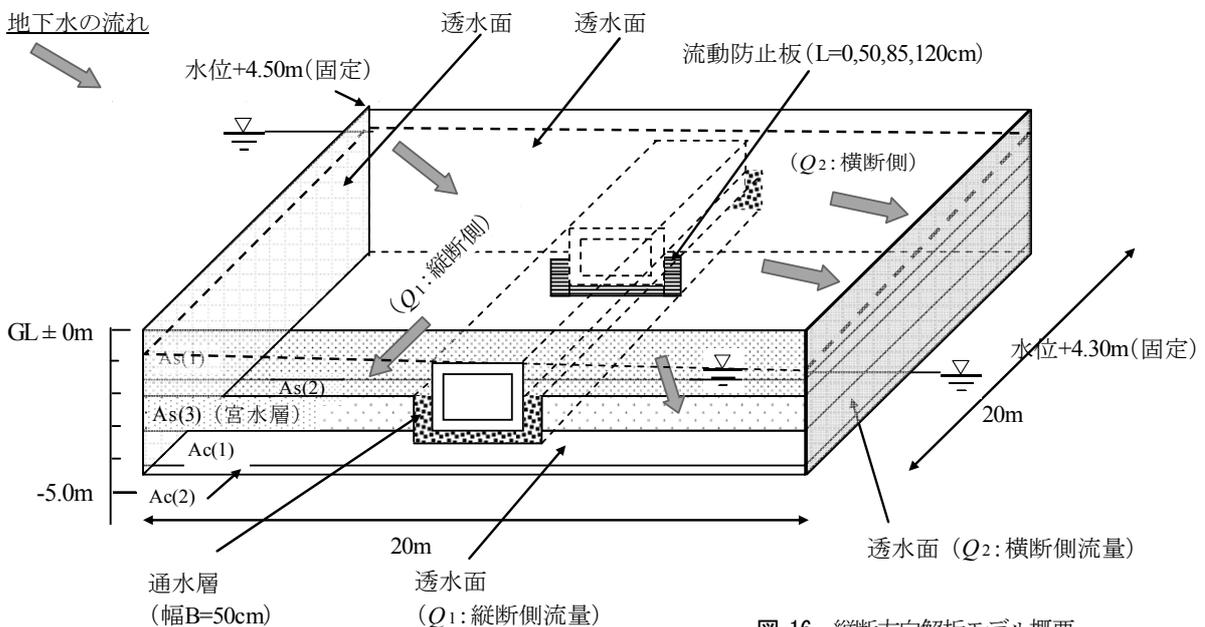


図-16 縦断方向解析モデル概要

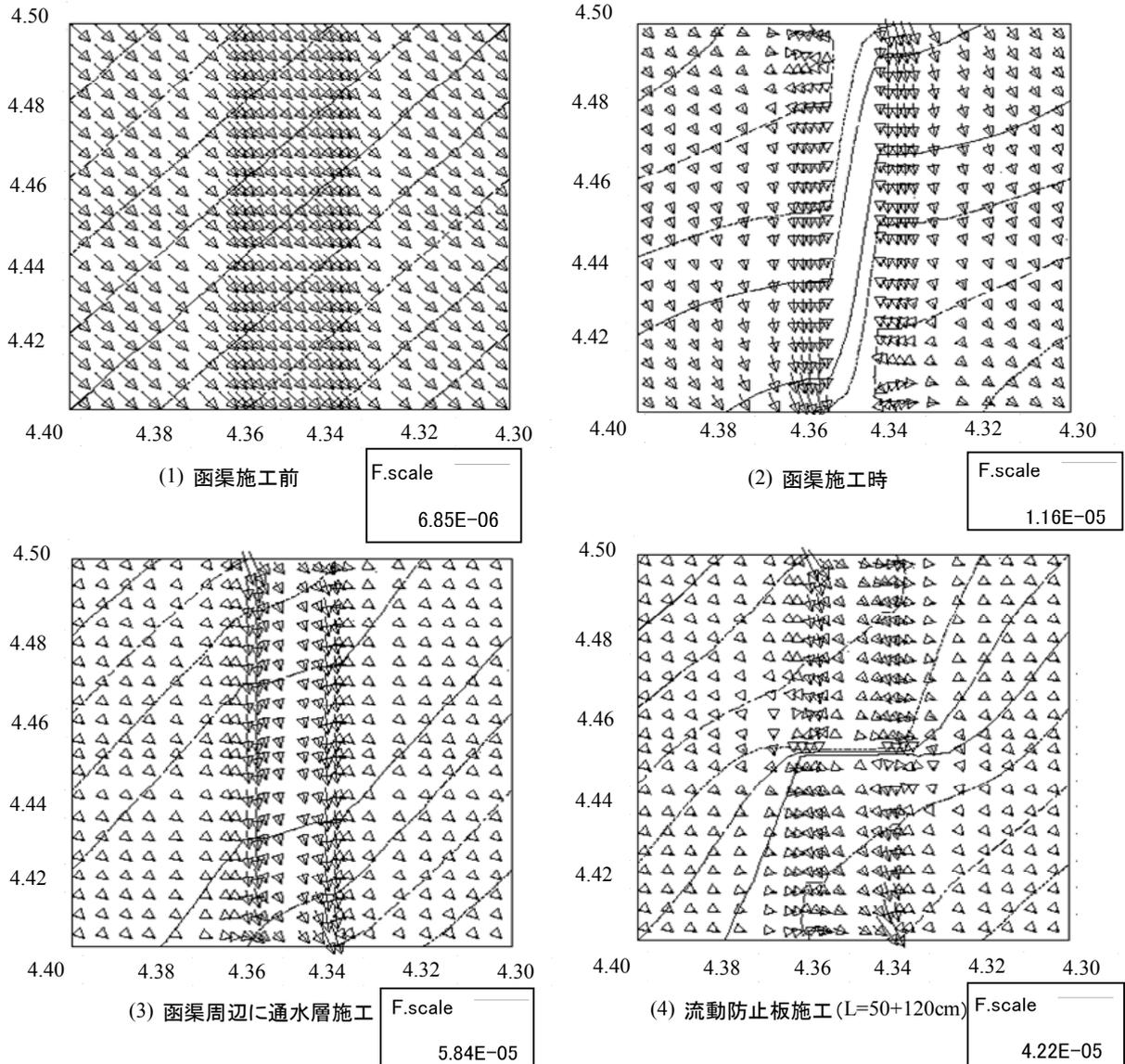


図-17 解析結果（地下水位コンター（TP+m）と流速ベクトル（m/s））

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。

6. モデル実験の合意形成への適用

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

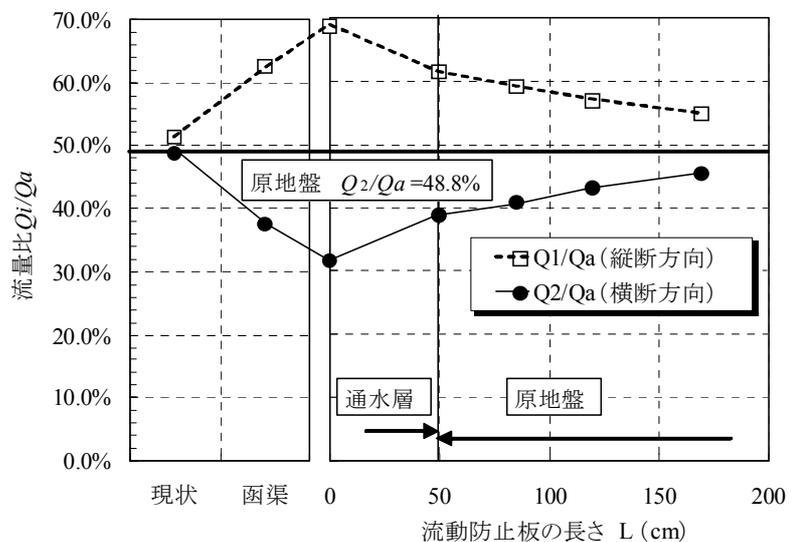


図-18 流動防止板長～流量比（解析結果）

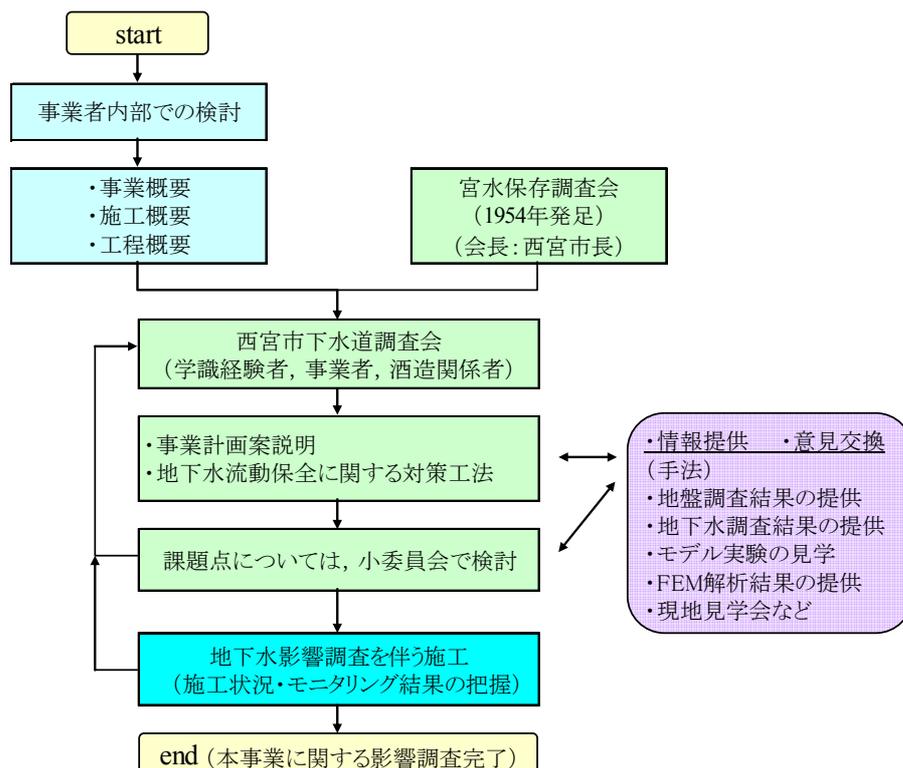


図-19 合意形成のプロセス¹²⁾

ことが難しい状況になりつつあることも事実と考えられる。

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、環境面で社会に大きな利点をもたら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は一般的に、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、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-19）。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。

事実、最近の建設コンサルの報告においても、このようなモデル実験を提案し、合意形成に適用され

ている¹³⁾。これらのことから、ここで提案した場合形成を得るためのモデル実験の適用は、今後も有効な一手段となりうると考えている。

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) 地下水の流れが三次元的である時には、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。
- (5) 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。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¹⁴⁾。
- (6) 今後の課題として、地下水流向と地下構造物の延長方向との交角の影響、解析モデルの最適化などについての検討、実施設計上での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。

なお、簡易に水位変化を予測する手法についても検討したが、紙面の都合で割愛した。

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西垣 誠教授（岡山大学）、久宗仁宣氏（西宮市土木局）、済川 要理学博士（（有）スミカワ研究所）、阪上最一氏および 宋 徳君氏（基礎地盤コンサルタンツ（株））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：みずー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) 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。
- 11) 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。
- 12) 西垣誠，坪田邦治：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，土木学会論文集F，Vol. 63，No. 3，pp.239-250，2007。
- 13) 建設技術研究所：小型模型（ミニモデル）による流れの予測，日経コンストラクション，9-14号，p.105，2007。