

57. 人工構造物構築に伴う地下水流動保全工法の一例

西垣 誠 正会員 (岡山大・院)
○坪田邦治 学生会員 (中部土質試験協同組合 (岡山大・院))
小松 満 正会員 (岡山大・院)
森田悠紀雄 (元 基礎地盤コンサルタンツ (株))

1. はじめに

未固結地盤が分布している都市近郊域で人工構造物を構築する場合には、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環境保全の観点から重要な課題といえる。これらに対して、現在では各種の対策工法が提案され実施されている¹⁾。

本論文では、下水道工事に伴い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）を敷設することによって流量を確保することを、室内モデル実験と断面2次元浸透流解析による検証を試みた。

この結果、地下水保全に対して、一定の効果が期待できるとともに、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ことから報告する。

2. 対象地域の地盤環境と検討フロー

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、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（図-1参照）である。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。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の埋設が計画されたが、連続した地下構造物を施工すると、酒造用水として採水されている表層地下水の水みちを遮断する危険性があった。

このような地下水の流動阻害の対策工として、地下構造物の周囲に通水層（人工透水層）を作成し、地下水を浸透させる工法を採用し、図-3のフローで示すように、室内モデル実験と地下水浸透流解析

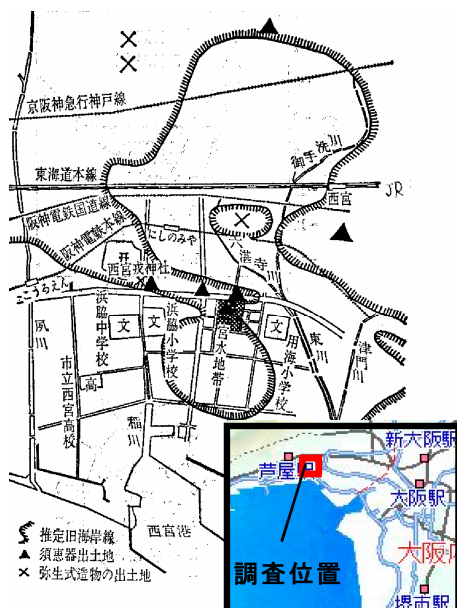


図-1 調査位置案内図²⁾に加筆

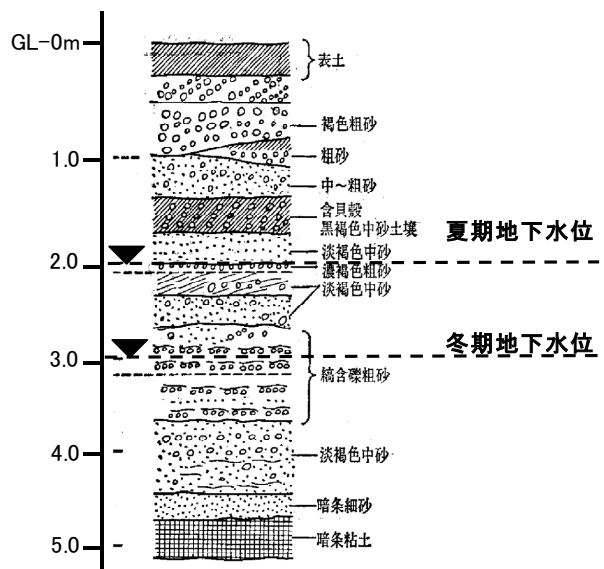


図-2 対象地域の代表的地盤モデル²⁾に加筆

を用いた検証解析を実施した。

3. 室内モデル実験

(1)目的

室内透水モデル実験は、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、複雑な地層を透水層・難透水層の区分を行い、3～4層でモデル化し、土槽内で再現させた。

なお、透水性の低い地層で、対策工を実施した場合には、透水性が改善されることから、実験の必要はないものと判断し、透水性の比較的良好な地盤での函渠の設置に対する影響および対策工の効果を確認することを目的とした。

(2)モデルスケールに関する検討

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、全実験に要する時間が大きくなる。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う、相似則が成立しないことになる。また、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程度で極めて緩やかなために、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。

このことから、実際に想定される断面（幅188.9m,高さ8.920mのモデル）で、鉛直2次元浸透流解析³⁾を行った。この解析結果では、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、水位は定常と変わらないことが判った。このことから、実際に想定される断面の1/10のスケールとして、再度解析を行った。この結果、水位は約1日で定常状態となり、水圧もほぼ平行に伝達することが判明した。このことから、モデルは1/10モデルとし、土槽は横1.70m,巾0.16m,高さ0.86m(内径1.40m, 0.12m, 0.80m)として実施した。なお、実験用モデルの透水係数については、1/10に低減し、動水勾配を1/10とした実験を行った。

(3)実験に適用した試料

実験に用いる試料は、現場のものを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、現場とほぼ同等の透水係数を再現させた。これらの結果を、表-1に示した。

(4)実験手法

図-4に示すように、各土層の作成は、締め固めて作成し、間隙水圧計、ピエゾメーターを設置した。ただし、函渠の入るケースの場合は、各土層と同時に設置した。

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、加圧のために、左側

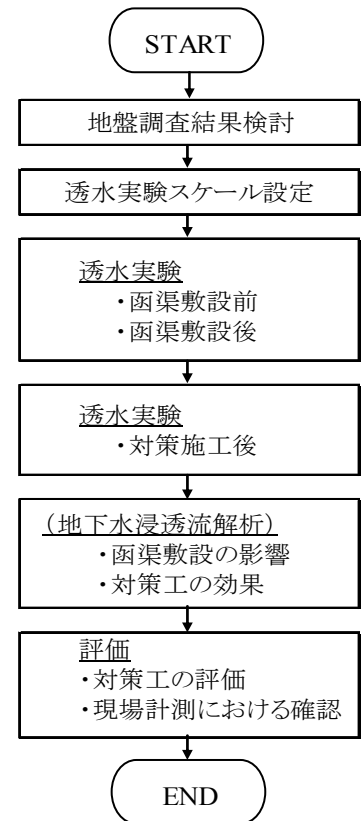


図-3 検討フロー

表-1 室内モデル実験試料透水係数一覧

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}

(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、函渠設置等の条件を変え、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 A,B,C の 3 モデル (表-2 参照) 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 (表-2) を行った。

(5)実験結果

表 - 3 および図 - 5 に

示すように、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) では、22%の流量が減少

(Q_1/Q_0) するが、対策工設置後 (Q_2) では、現況に対し 13%減少 (Q_2/Q_0) にとどまる。

同様に、地盤モデル B では、現況の状態に対し、函渠敷設後 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。

地盤モデル C では、現況の状態に対し、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わかった。

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わかったが、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、対策工を設置することによって、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。これらの実験状況を図-6に示す。

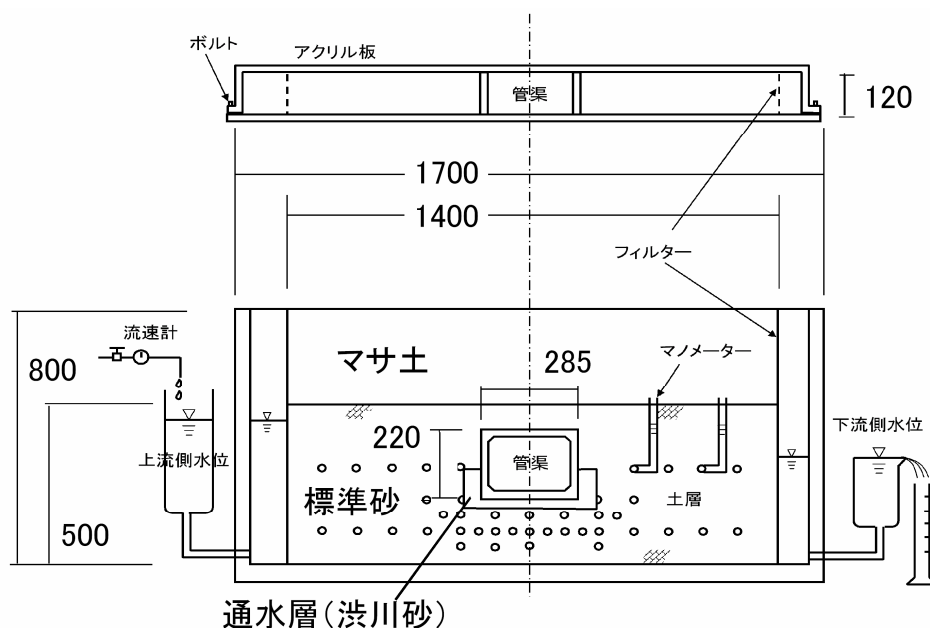


図-4 横断方向モデル実験装置(単位:mm)

表-2 横断モデル実験ケース

Case	構造物モデル	地盤モデル			計
		A	B	C	
1	原地盤モデル	1	1	1	3
2	函渠施工モデル	1	1	1	3
3	対策工施工モデル	1	1	1	3
合 計		3	3	3	9

注) 地盤モデル A : 全層が帯水層

地盤モデル B : 帯水層の一部を函渠が遮断

地盤モデル C : 全帯水層を函渠が遮断

4. 通水層 (人工透水層) 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、地下水浸透流解析を用いて検証した。

ここでは、断面2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、図-7に示す

ような宮水対象層を遮断

する形で函渠が敷設され

る場所を選定し、検討を行った。地下水位

は上流側+4.5m、下流側+4.3mと設定した。

得られた解析結果から、原地盤の流量

$Q_0(\text{m}^3/\text{s})$ と、各ケースの流量 $Q(\text{m}^3/\text{s})$ との流量

比と、透水係数との相関を考慮して作成

すると、図-8に示す。

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

数が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

表-3 横断モデル実験結果

地盤モデル	原地盤 Q_0 (m^3/s)	函渠施工時		函渠施工+対策工	
		$Q_1(\text{m}^3/\text{s})$	Q_1/Q_0	$Q_2(\text{m}^3/\text{s})$	Q_2/Q_0
モデル A	1.67×10^{-6}	1.30×10^{-6}	0.778	1.46×10^{-6}	0.872
モデル B	0.63×10^{-6}	0.50×10^{-6}	0.797	0.80×10^{-6}	1.276
モデル C	0.23×10^{-6}	0.07×10^{-6}	0.303	0.25×10^{-6}	1.096

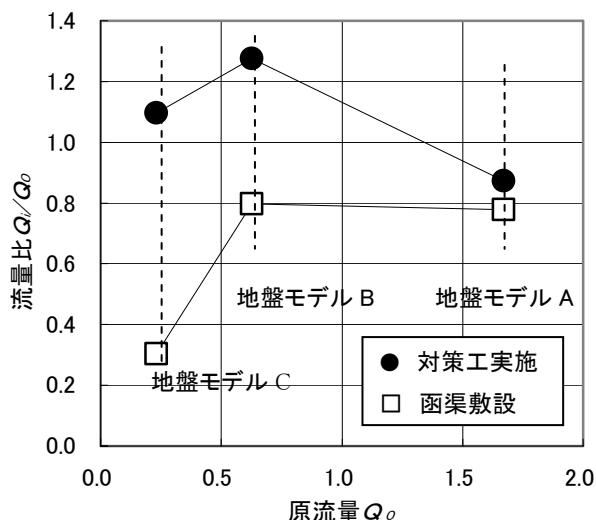


図-5 原流量 Q_0 ～流量比相関 Q_i/Q_0 ($Q_i = Q_1, Q_2$)

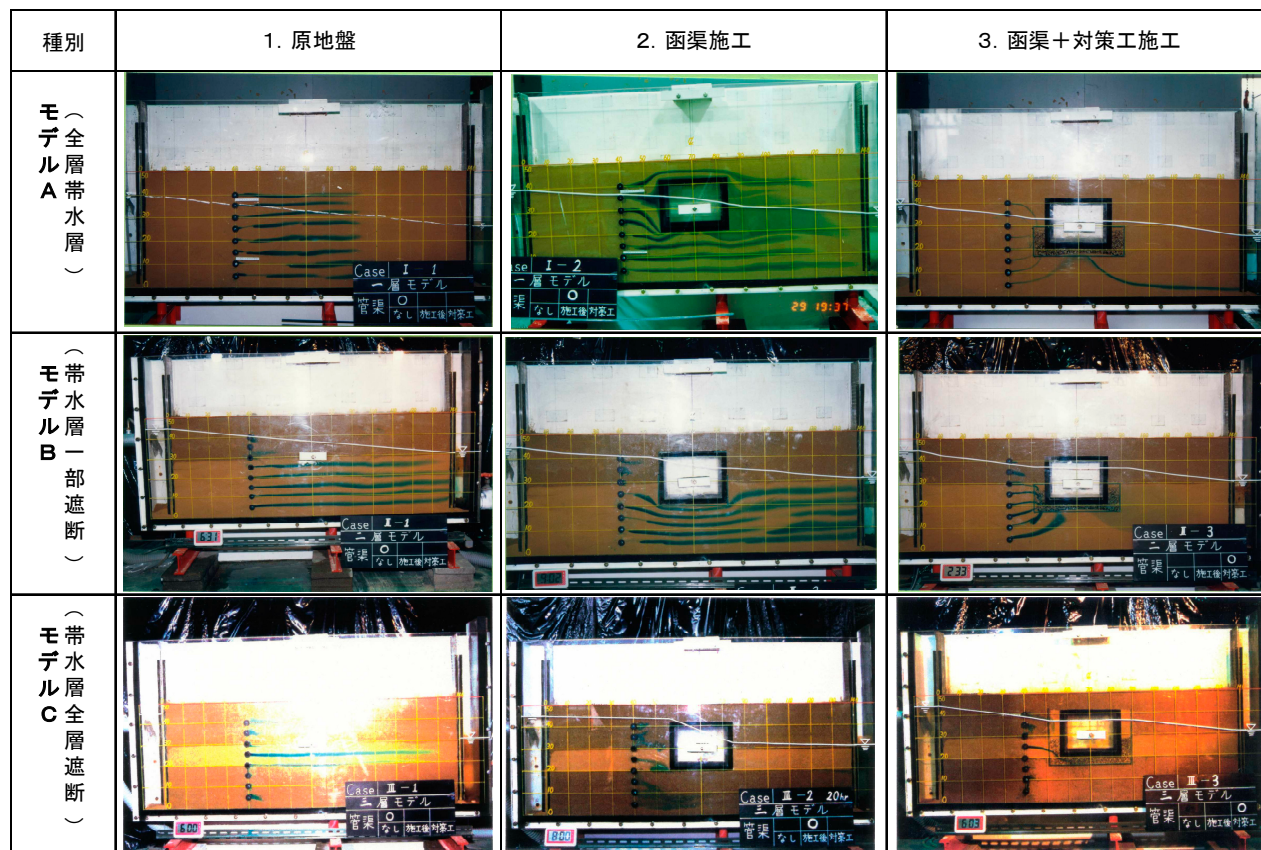


図-6 横断方向モデル実験状況

えられることから、以下のケースが適合するといえる。

- ・通水層層厚 $D=60\text{cm}$
: $k \geq 1.6 \times 10^{-3} \text{ (m/s)}$
- ・通水層層厚 $D=45\text{cm}$
: $k \geq 2.0 \times 10^{-3} \text{ (m/s)}$
- ・通水層層厚 $D=30\text{cm}$
: $k \geq 2.5 \times 10^{-3} \text{ (m/s)}$

これらのことから、通水層の透水係数が $k \geq 2.5 \times 10^{-3} \text{ (m/s)}$ 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

合には、通水層の層厚は30cmで対応可能と考えられる。ただし、現実の課題として、施工後数年経過すれば、目詰まりの懸念⁴⁾があり、層厚50cm程度の安全側の透水性の確保が望ましいと考える。

5. 通水層の仕様(層厚, 透水係数)

図-6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ほぼ水平に流下している。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2次元的になる。

図-9に示すように、通水層の層厚を D 、透水係数を k とし、原地盤の層厚を D_0 、透水係数を k_0 とすると、必要通水量 q_0 は、自然動水勾配(I)により、次式⁵⁾で表される。

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

函渠上流側の通水量と函渠下を通過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。

$$D_0 \times k_0 = (D \times k + D_1 \times k_1) \quad (2)$$

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

$$k = \{(D_0 \times k_0) - (D_1 \times k_1)\} / D \quad (3)$$

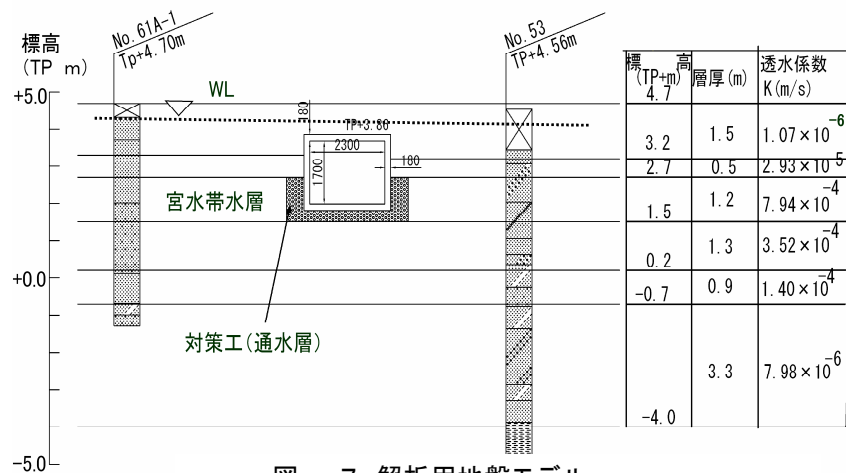
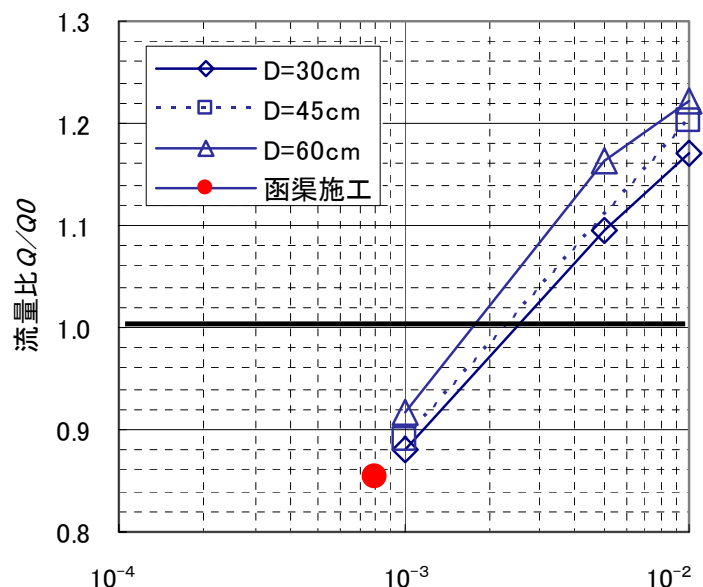


図 - 7 解析用地盤モデル



透水係数(通水層) $k(\text{m/s})$

図 - 8 透水係数(通水層)～流量比との相関

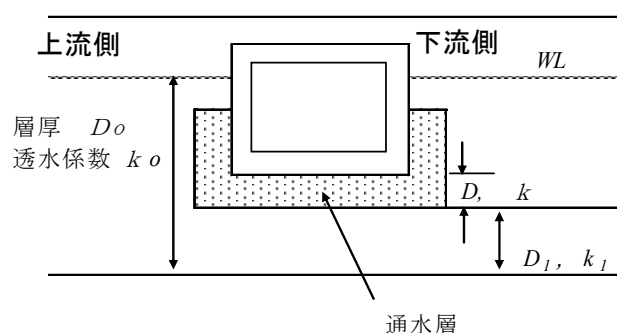


図-9 通水層の仕様

ここで、検討対象としている図-7のモデルでは、 $D_I=0$ であることから、(3)式は、(4)式となる。

$$k = (D_0 \times k_0) / D \quad (4)$$

ここに図-7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。

$$k_0 = \sum_{i=1}^n (k_i \times h_i) / \sum_{i=1}^n (h_i) \quad (5)$$
$$= \{(1.3 \times (1.07 \times 10^{-6})) + (0.5 \times (2.93 \times 10^{-5})) + (1.2 \times (7.94 \times 10^{-4}))\} / (1.3 + 0.5 + 1.2) = 3.23 \times 10^{-4} (m/s)$$

この結果、(4)式より透水層を $D=0.3m$ とすれば、透水層の透水係数は以下のように算出される。

$$k = (D_0 \times k_0) / D = 3.0 \times (3.23 \times 10^{-4}) / 0.3 = 3.2 \times 10^{-3} (m/s)$$

この透水層の透水係数は、 $D=0.3m$ であることから、2次元浸透流解析結果による図-8と比較すると、流量比 $Q/Q_0 \geq 1.0$ である $k=2.1 \times 10^{-3} (m/s)$ と比較してもほぼ整合することがわかる。同様に、 $D=0.45, 0.60m$ に適用すると、それぞれ、 $k=2.1 \times 10^{-3}, 1.6 \times 10^{-3} (m/s)$ となり、図-8の $Q/Q_0=1.0$ にほぼ一致する。ここで検討しているような事例では、透水層の仕様の設定については、式(3)の適用が可能と考える。

6. まとめ

地下水流動保全工法の中で、透水層を用いて浅層の地下水を保全することによって、課題となった西宮の「宮水」の地下水保全を実施した事例について以下のような報告を実施した。

- ① 函渠の周囲に透水層（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2次元浸透流解析によって示した。
- ② 課題点として、対策工の施工後に原地盤よりも透水性が高くなり、その部分に集まる流れで流速が大きくなると、今まで動かなかった細粒分が移動して目詰まりを生じる危険性が高くなると考えられるが、この検討が残されている。また、地下水の流れが3次元である時には、横断方向への浸透が十分でなく、地中構造物の透水層沿いに下流側への浸透が懸念される。これに対して地下水流動防止板⁶⁾によって、地下水の浸透方向が維持できる可能性があるが、この詳細検討については別途報告する。
- ③ 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験し、10年程度経過した現在でも、上流側、下流側の水位は平常状態であり、宮水としての機能を保持していると伺っている。

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）に深謝の意を表します。

- （参考文献）1) 杉村孝雄：4.3 地下水流動保全工法の選定，地下水流動保全工法の設計・施工，地盤工学会，地盤工学・実務シリーズ19，地下水流動保全のための環境影響評価と対策，pp.123～133，2004
- 2) 灘酒研究会：宮水地帯地層断面図，1969
- 3) 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，第264号，pp.87～96，1977
- 4) 地下水地盤環境に関する研究協議会（地下水流動保全工法に関する研究委員会）：地下水流動保全工法，pp.3～35～3～37，2002
- 5) 並川賢治：地下水流動保全工法の設計・施工，地盤工学会，地盤工学・実務シリーズ19，地下水流動保全のための環境影響評価と対策，pp.165～167，2004
- 6) 西垣誠：地下水に関する環境評価法，基礎工，pp.29～30，1992.11