

東京湾横断道路川崎人工島建設における 大深度に位置する難透水層の透水性評価

佐野幸洋¹・中川修²・鈴木健一³・上村佳司⁴

¹本州四国連絡橋公団 企画開発部 道路課長 (〒105 東京都港区虎ノ門5-1-5)
(前・東京湾横断道路(株)川崎事務所)

²正会員 工修 大成建設(株)土木設計第二部 海洋設計室課長 (〒163-06 東京都新宿区西新宿1-25-1)
(前・川崎人工島東工事共同企業体)

³正会員 鹿島建設(株)土木設計本部 設計長 (〒107 東京都港区赤坂6-5-30)
(前・川崎人工島西工事共同企業体)

⁴正会員 工修 大成建設(株)土木設計第一部 岩盤施設設計室 (〒163-06 東京都新宿区西新宿1-25-1)

本報は、東京湾横断道路川崎人工島建設工事において、地中連続壁の根入れ部付近に存在する層厚の薄い難透水層の透水性の評価手法について述べたものである。難透水層の透水性の評価は、地中連続壁構築前と構築後について行った。まず、地中連続壁構築前の難透水層の透水性の評価は、揚水試験のシミュレーションおよびHantushのt-s曲線による解析法により行った。次に、地中連続壁構築後の難透水層の透水性の評価は、地中連続壁近傍の漏水を透水性評価エレメントと称する1次元の棒要素を用いてモデル化することにより、計測結果をシミュレーションできることがわかった。

Key Words: permeability, water pressure, drawdown test, groundwater, finite element method, anisotropy, Kawasaki Man-made Island, Trans-Tokyo Bay Highway

1. はじめに

近年、構造物の大型化に伴い被圧帯水層を有する堆積層地盤にも、大規模な掘削工事が見受けられるようになってきた。このような場合に特に問題となるのは、基盤層が深く連壁を基盤層まで根入れすることが困難な時である。基盤層が比較的浅い場合は、連壁を基盤層まで根入れすれば良いが、基盤層が深い場合には、帯水層中の途中に存在する比較的層厚の薄い難透水層に根入れすることがある。東京湾横断道路川崎人工島の場合は、難透水層の透水性の評価は次の4点について重要となった。

- 1) 盤ぶくれ発生の有無の判断
- 2) 掘削面への湧水量 (ポンプ容量の決定)
- 3) 連壁長の決定
- 4) ディープウェルによる難透水層上部への偏水圧の影響

現在のところ、難透水層の透水性を直接試験して求める方法は、標準化されておらず、揚水試験の結果から間接的に求める方法が一般的である。本報では、東京湾横断道路川崎人工島建設工事において実施された揚水試験の概要を示すと共に、連壁の根入れ部付近に存在する層厚1m程度の難透水層の透水性を浸透流解析および

Hantushのt-s曲線法により評価した結果を示す。

また、連壁の施工時の乱れによる連壁近傍の難透水層の透水性の変化を逆解析を行い評価することにより、連壁施工後の3次元の地下水挙動のシミュレーション結果を示す。

2. 工事概要

東京湾横断道路川崎人工島は直径98mの円筒形の構造物で、シールド工事期間中はシールド発進基地として、完成後は換気立坑としての機能を果たす。川崎人工島は東京湾湾央部(水深28m)に、円筒形の地中連続壁を構築し、その内部を海底面下約42m(海面下約70m)という大深度の掘削を行って、本体構造を建設するものである。

図-1は、地中連続壁の断面を示したものである。また、表-1に地質層序表を示す。川崎人工島周辺の地層構成は、海底面(TP-28m)からTP-72m付近までは粘性土と砂質土の互層地盤、TP-92.5m付近までは砂礫層となっており、その下部はTP-111m付近(D_{sc1}層:層厚1m)およびTP-125m付近(D_{sc2}層:層厚4m)に存在する二つの粘性土層を除き、ボーリングにより

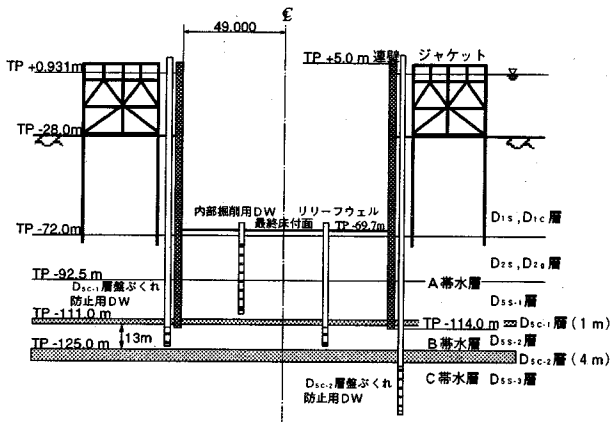


図-1 地中連続壁断面図

表-2 必要水位低下量

		必要低下水位	水位低下量
内部掘削用水位	A帯水層	TP-70.7m	71.6m
	B帯水層	TP-44.7m	45.6m
盤ぶくれ対策用水位 (Fs = 1.2)	C帯水層	TP-34.9m	35.8m

注) 設計潮位: TP+0.931m

TP-270m付近までは砂質土であることが確認されている。

主な帯水層は、TP-72m~TP-111mにあるD_{2s}・D_{2c}・D_{5s-1}層 (A帯水層)、TP-112m~TP-125mにあるD_{5s-2}層 (B帯水層)、TP-129m以深にあるD_{5s-3}層 (C帯水層)である。

TP-111m付近およびTP-125m付近に存在する二つの粘土層は、内部掘削時に盤ぶくれを起こすことが予測されるため、これらの下部に存在するB帯水層およびC帯水層に減圧用井戸の設置が必要であった。

盤ぶくれ対策用としては、それぞれの層の盤ぶくれに対する安全率 (Fs=1.2) を満足する水位まで水位低下を行うものとした。表-2にその必要水位低下量を示す。

内部掘削時には、大深度掘削をドライワークで行うための内部掘削用ディーブウェル (4本) と、二つの難透水層 (D_{5c-1}層・D_{5c-2}層) の盤ぶくれを防止するための減圧用ディーブウェル (B帯水層8本, C帯水層12本) ・リリーフウェル (B帯水層10本) を設置して地下水処理を行った。

3. 揚水試験の概要および結果

揚水試験はジャケットの施工終了後、連壁の施工に先立ち、平成3年5月~9月にかけて、A・B・Cの各帯水層についてそれぞれ実施した。

表-1 地質層序表

地質時代	地質名	地質記号		土質の名称	層相				
		区分	細区分						
新 第 四 更 新 代 紀 世	有楽町層	B	F	埋土・盛土					
				浮泥	粘性土 (ヘドロ)				
				As1	砂質土	細砂, 中砂			
		A	A	Ac1	粘性土	シルト質粘土			
				As2	砂質土	細砂, 中砂, 粗砂			
				Ac2	粘性土	粘土質シルト			
		上部	D	D1s	D1s	砂質土	細砂, 微細砂, 中砂		
						D1c	粘性土	シルト	
				D1	D1	D11	粘性土	火山灰質粘性土	
						D1c	粘性土	シルト, 砂混りシルト	
				下部	D2	D2	D2s	砂質土	細砂, 微細砂
							D2c	粘性土	砂混りシルト
				最下部	D2	D2	D2s	砂質土	細砂, 微細砂
							D2c	粘性土	シルト, 砂混りシルト
				成田層部相当層	D3	D3	D3c	粘性土	砂混りシルト
D3s	砂質土						細砂, シルト混り砂		
D3c	火山灰質土						ローム		
D3s	砂質土						砂礫		
長沼屏風ヶ浦相当層	D4	D4	D4c	粘性土	シルト, シルト質粘土				
			D4s	砂質土	シルト混り細砂~粗砂				
			D4p	有機質土	腐植土				
			D4s	砂質土	細砂, シルト質砂				
上総層群	D5	D5	D5s	砂質土	シルト, 砂混りシルト				
			D5c	粘性土					

表-3 揚水試験項目および揚水井と観測井の関係

揚水井と観測井	DW						OW									
	A			B			A		B		C					
帯水層の種類	A			B			A		B		C					
井戸番号	1	2	3	4	5	6	1	2	3	1	2	3	4	4	5	6
Aタイプ単井連続揚水試験	東側	●	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
	西側	△	●	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
Bタイプ単井連続揚水試験						●				△	△	△	△	△	△	△
Cタイプ単井連続揚水試験						●							△	△	△	△
Aタイプ群井連続揚水試験	●	●	●	●	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△

凡例 ●揚水および水位観測 △水位観測

揚水試験の試験項目および揚水井と観測井の関係を表-3に、揚水井および観測井の構造を図-2に示す。さらに、揚水試験時の井戸配置を図-3に示す。

(1) 水位観測結果

水位観測は、各帯水層に設置された観測井の井戸内水位および潮位の変化に対する地下水位変化の影響を把握する目的で実施した。

井戸内水位と潮位の観測結果の例を図-4に示す。一般的にタイムラグが無い場合は、図-5(1)に示すように水位と潮位は線型関係になるが、タイムラグがある場合は、図-5(2)に示すようにループを描くと考えられる。水位観測の結果潮位と井戸内水位の相関は、各帯水層とも0.997以上の高い相関性があり、時間的な遅れはほとんど認められなかった。

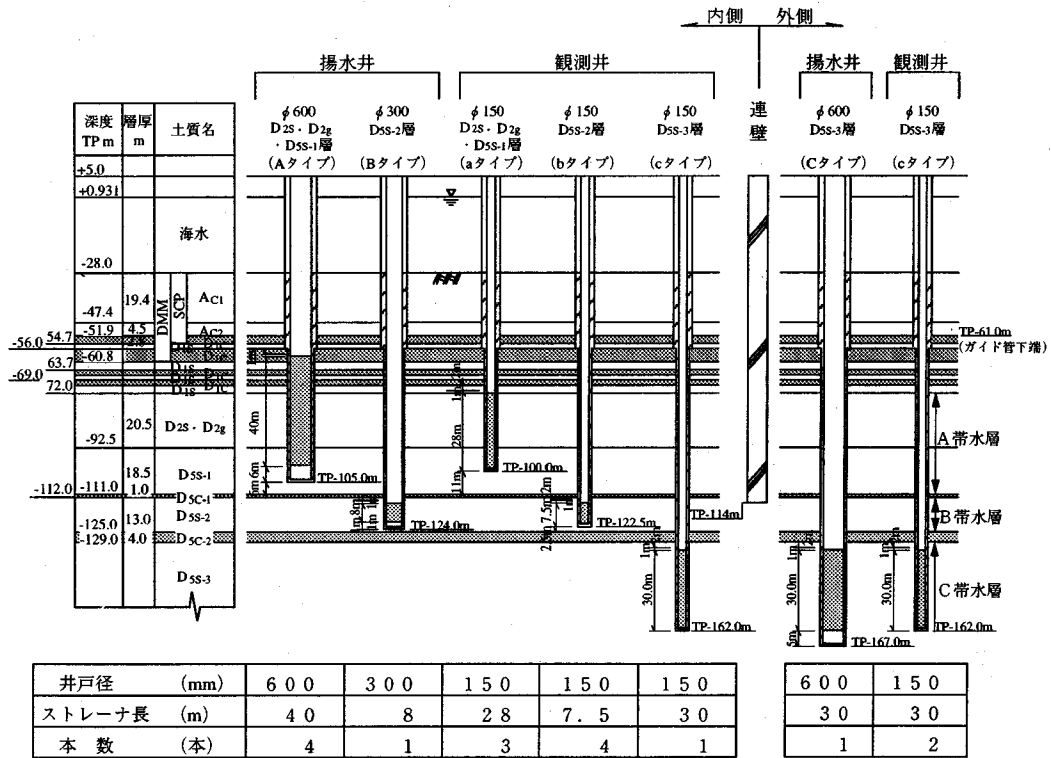


図-2 揚水井および観測井の構造図

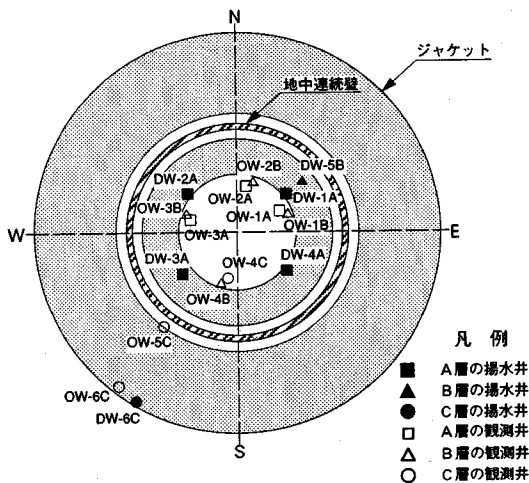


図-3 揚水試験時の井戸配置

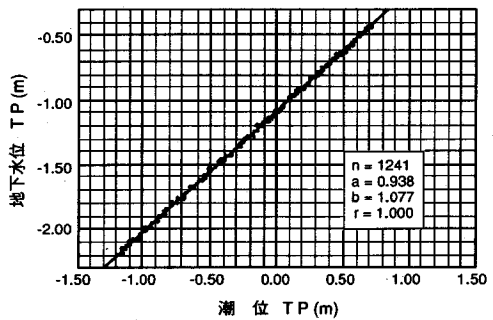


図-4 潮位と井戸内水位の相関関係図(DW-1A)

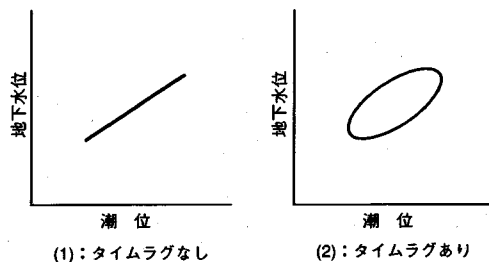


図-5 潮位と井戸内水位の模式相関関係図

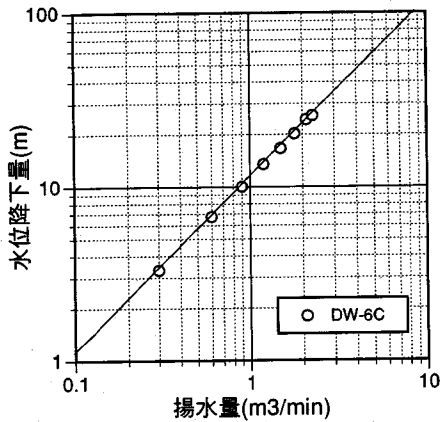


図-6 C帯水層段階揚水試験結果

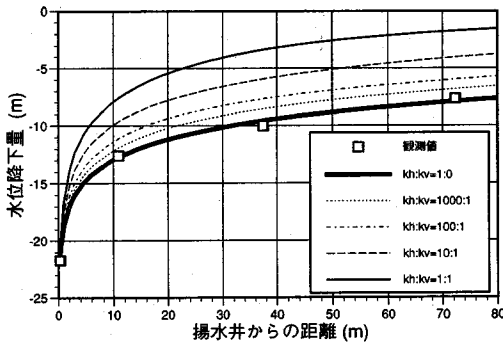


図-7 C帯水層異方性の検討

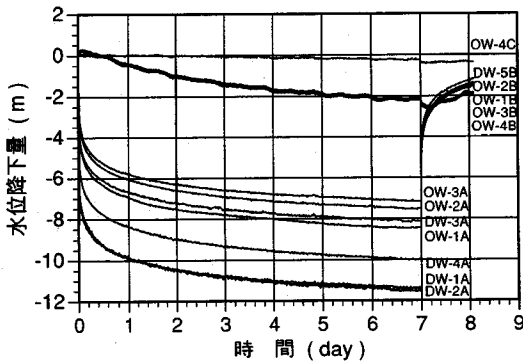


図-8 A帯水層群井揚水試験結果

(2) 段階揚水試験

段階揚水試験は、A、B、C各帯水層について実施した。揚水維持時間は、A帯水層およびB帯水層については90分、C帯水層については180分とした。図-6は、C帯水層の段階揚水試験の結果を示したものである。

段階揚水試験時に揚水ポンプの最大能力まで揚水した

表-4 適正揚水量

	A帯水層		B帯水層		C帯水層
井戸径 (mm)	φ 600	φ 300	φ 600	φ 200	φ 600
適正揚水量 (m³/min)	2.0	0.3	(0.4)	(0.14)	1.8

() 内はス・カ・アラソフの限界流速の式を用いて推定

表-5 揚水試験結果

	A帯水層	B帯水層	C帯水層
透水係数 (cm/sec)	6.64×10^{-2}	1.35×10^{-3}	6.79×10^{-3}
比貯留係数 (l/m)	6.54×10^{-5}	1.29×10^{-5}	9.53×10^{-6}
影響半径 (m)	500~1500	443	1650
透水係数算定時の層厚 (m)	20.5	13.0	30.0

表-6 各帯水層の塩素イオン濃度

	塩素イオン濃度 (mg/l)
A帯水層	80.4
B帯水層	10.1
C帯水層	6.7
海水	19000

が、各帯水層とも明瞭な折点(限界揚水量)は確認されなかった。しかしながら、ポンプの限界揚水時には砂の流入が観測されたため、本報における適正揚水量の設定は揚水時にケーシング内に砂が流入しない揚水量から決定した。各帯水層の適正揚水量を表-4に示す。

(3) 単井連続揚水試験

単井連続揚水試験は、A帯水層2孔(DW-1A,DW-2A)、B帯水層1孔(DW-5B)、C帯水層1孔(DW-6C)について実施した。単井連続揚水試験の結果得られた透水係数および比貯留係数を表-5に示す。A帯水層およびB帯水層は帯水層厚さが明確であるが、C帯水層についてはボーリングによりTP-129mからTP-270mまで連続していることが確認されているが層厚は確認されていない。そこで、事前に有限要素法による浸透流解析を行い、下部の境界条件の影響を受けない帯水層厚さを求めC帯水層の帯水層厚さとした。これよりC帯水層の帯水層厚さは、約230mと推測された。C帯水層の層厚を230mとし井戸の貫入量を30mとしてC帯水層揚水試験のシミュレーションを行った。揚水井の井戸内水位を固定しC帯水層を均質等方性と仮定して観測井での水位のフィッティングを行ったところ、実測水位の方が解析値

に比べて水位降下量が大きくなった。この水位降下量の差を帯水層の異方性の影響と考え、鉛直方向の透水性を水平方向に対して低減した異方性の検討を行った。その結果、図-7に示すように鉛直方向の透水係数をゼロとした場合が、観測結果と最も良く一致することがわかった。この原因としては、次の二通りの場合が考えられる。1) C帯水層自体が異方性を有している場合。2) 揚水井の根入れ部分に粘土のシーム層が存在している場合。本揚水試験では鉛直方向の圧力分布を測定していないため、観測結果から直接異方性を確認することはできなかった。しかし、いずれの場合にしろ人工島近傍のC帯水層に関しては、鉛直流と比較して水平流が卓越していると考えられる。

(4) 群井揚水試験

群井揚水試験は、 $D_{sc.1}$ 層および $D_{sc.2}$ 層の連続性を調査することを目的として実施された。揚水は、DW-1A, 2A, 3A, 4Aの4孔を用いて行った。揚水量は、各揚水井とも $2.0\text{m}^3/\text{min}$ 合計 $8.0\text{m}^3/\text{min}$ の揚水を7日間連続で行った。図-8に群井揚水試験の結果観測されたA・B・C各帯水層の圧力の継時変化を示す。

試験の結果、A帯水層で揚水した場合に難透水層である $D_{sc.1}$ 層を隔てたB帯水層の水位が変化することがわかった。しかしながら、その圧力降下量はほぼ定常状態であると判断される揚水開始7日後においてA帯水層の $1/4\sim 1/6$ 程度であること、および、最終状態のB帯水層内各観測井の圧力降下量がほぼ同一であることから、 $D_{sc.1}$ 層は連続して分布しており顕著な漏水現象はないと考えられる。

(5) 水質分析結果

A・B・C各帯水層から揚水した水を採水して、水質検査を行った。その中で地下水流動特性を知る上で特に重要な指標となる塩素イオン濃度を表-6に示す。

塩素イオン濃度は、A帯水層で 80.4mg/l とやや高いもののBおよびC帯水層は 10mg/l 程度と低いことがわかった。海水の塩素イオン濃度は約 19000mg/l であることから各帯水層とも海水の混入はほとんどないものと考えられる。

4. 連壁施工前の難透水層の透水性評価

連壁の根入れ長および連壁内部湧水量の検討を行う際に特に大きな影響を及ぼす要因は、連壁根入れ部付近に存在する二つの粘土層の透水性の評価である。群井揚水試験の結果から、A帯水層の水位低下量 11.5m に対してB帯水層およびC帯水層の水位低下量は、それぞれ

2.1m および 0.2m であった。

B帯水層のA帯水層に対する水位低下の割合およびC帯水層のB帯水層に対する水位低下の割合は、それぞれ $1/5$ および $1/10$ であった。水位低下の割合および層厚から判断すると $D_{sc.2}$ 層は比較的健全であると判断されるが、 $D_{sc.1}$ 層は透水性の評価が必要と考えられる。

先にも述べたが、 $D_{sc.1}$ 層の透水性の評価は、以下の4点に関して特に重要となる。

- 1) 盤ぶくれ発生の有無の判断
- 2) 掘削面への湧水量の把握
- 3) 連壁長の妥当性の確認
- 4) ディープウェルによる難透水層上部への偏水圧の影響

1) は、 $D_{sc.1}$ 層が不連続であったり、ある程度透水性が大きい場合など、 $D_{sc.1}$ 層の透水性を考慮した上で盤ぶくれ発生の有無を判断する必要がある。2) は、掘削面への湧水量を定量的に把握し、内部掘削時にドライワークが可能となるようにポンプの能力および本数を決定する必要がある。3) は、連壁長の検討に際して、構造力学的な検討だけでなく、水理学的な検討による確認も必要である。4) は、人工島外側連壁近傍で $D_{sc.1}$ 層の下部から揚水した場合に、 $D_{sc.1}$ 層を隔てた上部の連壁にどの程度の偏水圧の影響があるか検討を要する。

粘性土層を介する二層帯水層モデルにおいて、上部帯水層のみから揚水を行った時に下部帯水層の地下水位も同時に低下が観測された場合、このような下部帯水層への圧力低下伝播の原因としては、次の二つの場合が考えられる¹⁾。

- 1) 介在粘土層の透水性に起因する現象
介在粘土層は不透水層ではなく難透水性であり、二層の帯水層においては地下水の連続性(流入)があると考えられる場合。
- 2) 被圧帯水層の弾性変形に起因する現象
上部帯水層における水位低下は、下部帯水層に対する水荷重の減少であると考え、下部帯水層ではその荷重の減少分に応じた弾性的な変形(膨張)を生じて水位低下が発生するとした場合。

上記1)と2)では介在粘土層の評価が全く異なり、1)による解析結果は2)に比べて介在粘土層の透水性を過大に評価してしまうことになる。2)のような現象は浸透のみを対象とした数値解析手法によって説明することは困難であり、浸透と変形を連成させた解析手法が必要となる。しかしながら、 $D_{sc.1}$ 層の同定に際しては、 $D_{sc.1}$ 層の層厚が 1m と薄いことから、層厚の変化及び層の連続性を考慮し、介在粘土層の透水性に起因する現象

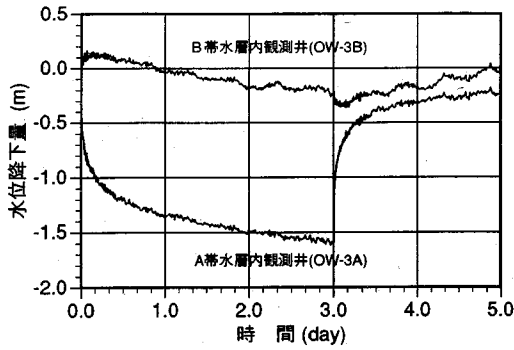


図-9 A帯水層単井連続揚水試験結果

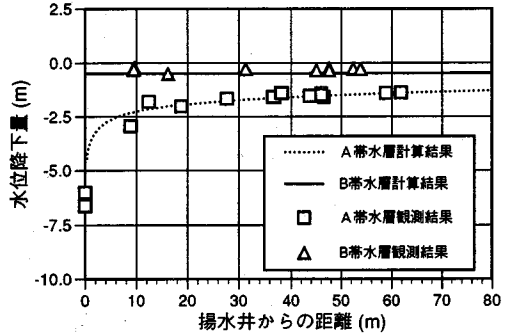


図-11 単井連続揚水試験解析結果

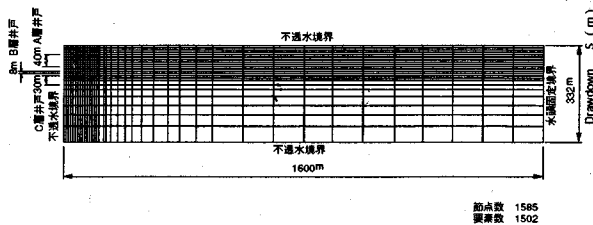


図-10 メッシュおよび境界条件

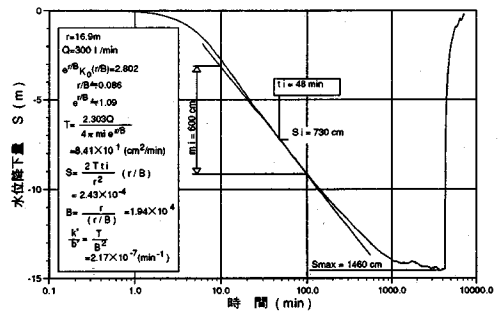


図-12 HantushのT-s曲線による解析結果(OW-1B)

表-7 連壁施工前の同定結果

帯水層	地層区分	透水係数 (cm/sec)	比貯留係数 (1/m)
A	D _{2s} 、D _{2e}	5.5×10 ⁻²	6.6×10 ⁻⁵
	D _{5s-1}	1.0×10 ⁻³	2.4×10 ⁻⁵
難透水層	D _{5c-1}	3.0×10 ⁻⁷	1.8×10 ⁻⁴
B	D _{5s-2}	1.0×10 ⁻³	2.4×10 ⁻⁵
難透水層	D _{5c-2}	3.0×10 ⁻⁸	1.8×10 ⁻⁴
C	D _{5s-3}	6.8×10 ⁻³	9.5×10 ⁻⁶

注) D_{5c-2}層は、粒度分布および圧密試験より決定

表-8 D_{5c-1}層漏水係数および透水係数一覧

測点	漏水係数(min ⁻¹)	透水係数(cm/sec)
OW-1B	2.17×10 ⁻⁷	3.62×10 ⁻⁷
OW-2B	1.59×10 ⁻⁷	2.65×10 ⁻⁷
OW-3B	6.10×10 ⁻⁸	1.02×10 ⁻⁷
OW-4B	6.24×10 ⁻⁸	1.03×10 ⁻⁷

であると判断した。

浸透流解析によるD_{5c-1}層の透水性の評価は、A帯水層揚水試験の結果を利用して行った。A帯水層揚水試験を行った際に、難透水層(D_{5c-1}層)を隔てたB帯水層内の圧力降下量を測定し、A帯水層内で揚水した場合にB帯水層内の圧力降下量が等しくなるようにD_{5c-1}層の透水係数のパラメータスタディーを行った。

(1) 浸透流解析による評価

単井連続揚水試験により求めた結果は各帯水層の平均的な透水係数であり、各帯水層を構成する各地層ごとの透水係数は求められない。そこで、単井連続揚水試験の結果を軸対称浸透流解析によりシミュレーションするこ

とにより、D_{5c-1}層および各地層の透水係数を求めた。

A帯水層から揚水した場合のD_{5c-1}層を挟んだA帯水層およびB帯水層の圧力地下の経時変化を図9に示す。OW-3AおよびOW-3Bは、できる限り近接した井戸を選定した。

これより、揚水開始三日後の圧力低下は、A帯水層・B帯水層とも非定常状態と判断される。難透水層を挟んだ帯水層での圧力変化は、圧力の変化速度が遅いため、一般に定常状態になるまで試験を行うことは困難である。そこでD_{5c-1}層の透水係数の同定は、D_{5c-1}層の透水係数をパラメータとして非定常解析を実施し、揚水開始三日後のA帯水層およびB帯水層の圧力分布をシミュレートすることにより行った。

解析に用いたメッシュ図および境界条件を図-10に示し、最終的に求めた透水係数および貯留係数を表-7に示す。また、解析の結果求めたA帯水層およびB帯水層内の圧力分布を図-11に示す。

これより、 $D_{sc.1}$ 層の透水係数は、 10^{-7} cm/secのオーダーであることがわかった。

(2) Hantushのt-s曲線^{2), 3)}による解析からの評価

一般的に、帯水層から漏水がある場合は、Jacobの直線解析法の場合のように片対数グラフにプロットすると、途中から折れ曲がり、時間が経過しても水位が降下しないようになる。

水位降下の最大の値が確認されるほど長時間揚水が行われた場合、水位降下が最大となる値を s_{max} とし、その1/2に相当する値を s_i として曲線上に求める。曲線上の s_i の点における t_i を読み取る。ついで s_i における接線をひき、 $\log t$ の1サイクルにおける水位降下量 m_i を求める。

このようにしてグラフより求めた s_i と m_i の値と、Hantushが示した $e^{r/B}$ 、 $K_0(r/B)$ の関数値を式(1)に代入することにより r/B 、 $e^{r/B}$ を得ることができる。これより、式(2)～式(4)を用いて $T, S, k/b$ が求められる。

$$e^{r/B} K_0\left(\frac{r}{B}\right) = 2.303 \left(\frac{S_i}{m_i}\right) \quad (1)$$

$$T = \frac{Q}{4\pi s_i} K_0\left(\frac{r}{B}\right) = \frac{2.303Q}{4\pi m_i e^{r/B}} \quad (2)$$

$$S = \frac{2Tt_i}{r^2} \left(\frac{r}{B}\right) \quad (3)$$

$$\frac{k}{b} = \frac{T}{B^2} \quad (4)$$

ここに、

s : 水位降下量

r : 揚水井の中心から観測井の中心までの距離

B : 漏水関数 ($B = \sqrt{T(b'/k)}$)

b' : 難透水層の厚さ

k' : 難透水層の透水係数

T : 主帯水層の透水量係数

K_0 : 第二種0階のベッセル関数

である。

B帯水層で揚水した場合の単井連続揚水試験結果をHantushのt-s曲線による解析法^{2), 3), 4), 5)}により整理した

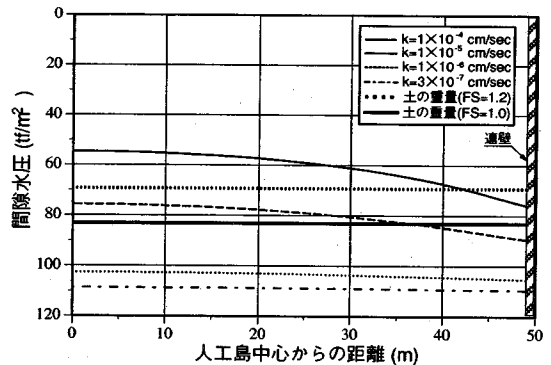


図-13 B帯水層内間隙水圧と土の重量の関係

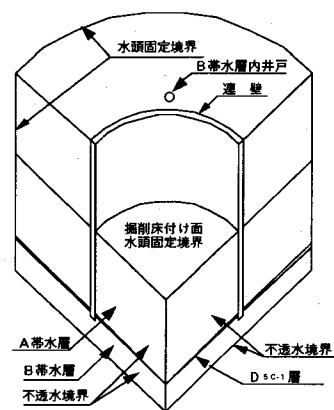


図-14 三次元解析モデル概念図

ものを図-12および表-8に示す。

この結果、Hantushのt-s曲線による解析法からも $D_{sc.1}$ 層の透水係数は、 10^{-7} cm/secのオーダーであることがわかった。

(3) 盤ぶくれの有無

$D_{sc.1}$ 層を不透水層として評価すると、盤ぶくれの発生が予測される場合でも、 $D_{sc.1}$ 層の透水性を考慮すると、盤ぶくれを起こさないことが考えられる。そこで、 $D_{sc.1}$ 層の透水係数をバタメータとして減圧用井戸を稼働しない状態での盤ぶくれ発生の有無の検討を行った。検討の結果求めたB帯水層内の間隙水圧と土の重量の関係を図-13に示す。

その結果、 $D_{sc.1}$ 層の透水係数が 1×10^{-4} cm/secの場合には盤ぶくれの発生は認められないが、 1×10^{-5} cm/secの場合には、連壁から約1.5mの範囲で土の重量よりも大きな間隙水圧が発生した。これらの結果より、

盤ぶくれは、 $D_{sc.1}$ 層の透水係数が 10^{-4} cm/secのオーダーよりも大きな場合には発生しないことがわかった。

揚水試験および数値解析により $D_{sc.1}$ 層の透水係数は 10^{-7} cm/secのオーダーであることから、盤ぶくれの対策が必要である。

(4) 偏水圧の影響

B帯水層に設置される減圧用ディープウェルは、連壁の外側近傍に設置されるため、 $D_{sc.1}$ 層上部の壁体にはほぼ偏水圧の影響が懸念された。そこで連壁周方向の偏水圧の大きさを把握するために3次元浸透流解析を実施した。解析に用いたモデル図を図-14に示す。解析は、人工島外側B帯水層でディープウェルを稼働した場合に $D_{sc.1}$ 層上部の壁体に与える偏水圧の大きさの検討を行った。 $D_{sc.1}$ 層の透水係数が 10^{-7} cm/secオーダーの場合には、B帯水層に設置した井戸の水位を9.5m低下させた場合でも $D_{sc.1}$ 層を隔てた壁面の圧力水頭の低下量は約0.9m程度で、偏水圧の大きさは圧力水頭で0.05m程度であった。また、 $D_{sc.1}$ 層の透水係数が 10^{-5} cm/secオーダーの場合は、 $D_{sc.1}$ 層を隔てた壁面の圧力水頭の低下量は約7.5mで、偏水圧の大きさは圧力水頭で2.0m程度であった。以上の結果より、 $D_{sc.1}$ 層の透水係数が 10^{-7} cm/secオーダーの場合には、偏水圧の影響はほとんどないと考えられる。

(5) 連壁長およびポンプ容量の決定

川崎人工島の連壁の根入れは、①地中連続壁内流入量の検討、②動水勾配の検討、③インターナルエロージョンの検討、④ボーリングの検討等を行って総合的に判断した結果、 $D_{sc.1}$ 層下部TP-114mまで根入れすることとした。これらの検討については、すでに文献⁶⁾があるためここでは割愛する。

5. 連壁施工後の難透水層の透水性評価

前述の多孔式揚水試験は、連壁施工前の $D_{sc.1}$ 層が比較的健全な状態での試験結果である。ここでは、連壁施工後、連壁内部の海水を排除した状態で試験揚水を行い連壁内部に湧水して来る水の量を測定し、浸透流解析でシミュレーションを行うことにより、連壁近傍の $D_{sc.1}$ 層の透水性の変化を調べた。

連壁施工後、人工島内側の海水（水深約28m）を排水した結果、人工島内側海底面に定常的に約650m³/day程度の水の流入が観測された。軸対称解析による事前の検討では、連壁内側をTP-69.7mまで掘削した場合でも、約150m³/day程度の流入量であった。

この理由としては、連壁の施工およびB帯水層・C帯水層の揚水井・観測井が $D_{sc.1}$ 層を貫通するため、これらの施工による $D_{sc.1}$ 層の乱れの影響と、連壁内側の水圧・土圧の排除による壁体の変形に伴う $D_{sc.1}$ 層の乱れの影響のため $D_{sc.1}$ 層を通過する水が多くなったと考えられる。また、連壁内部の海水を排除することにより、人工島全体に鉛直方向の大きな水頭勾配が発生するため、 $D_{sc.1}$ 層に潜在的に弱部が存在する場合には、そこが水みちとなることも考えられる。

人工島内側に流入してくる水の流れとしては、 $D_{sc.1}$ 層を直接通過するものと、 $D_{sc.1}$ 層を貫通する井戸や連壁近傍からの漏水がある。このような現象を数値解析によりモデル化する方法として、次の二通りの場合を考えた。

- 1) 連壁の施工に伴う連壁近傍の透水性の変化および $D_{sc.1}$ 層を貫通する井戸近傍からの漏水の影響を人工島内側の $D_{sc.1}$ 層の透水性が一様に大きくなったと考えてモデル化する場合。
- 2) 連壁の施工に伴う連壁近傍の透水性の変化を透水性評価エレメントを用いてモデル化する場合。
(ここで、透水性評価エレメントとは、連壁の施工による周辺地盤の透水性の変化や連壁内部の排水・掘削により連壁が変形することによる連壁と地盤の間の隙間を通る水の流れを表現するために用いた一次元の棒要素である。)

そこで、連壁施工後に減圧用井戸を利用して試験揚水を行い、その結果を用いて連壁近傍の $D_{sc.1}$ 層の透水性の再評価を行った。

(1) 試験揚水の概要と結果

試験揚水は、連壁施工後人工島内の海水を排水した後内部掘削が行われる前に、本設のディープウェルを利用して、A帯水層およびB帯水層について試験的に揚水を実施したものである。

a) A帯水層試験揚水

A帯水層の試験揚水は、人工島内側のA帯水層内に設置された揚水井DW-2A（図-15(1)参照）の水位をTP-60mに保った場合の揚水流量および水位観測を行ったものである。観測井は、A帯水層に3箇所、B帯水層に8箇所設置した。しかし、これらの観測井の中で、潮汐との相関性から判断して信頼性の高い観測井は、A帯水層に1箇所、B帯水層に5箇所であった。観測井の配置を図-15(1)に示す。

b) B帯水層試験揚水

B帯水層の試験揚水は、人工島内側A帯水層内に設置された揚水井DW-2A（図-15(1)参照）の水位をTP-60m

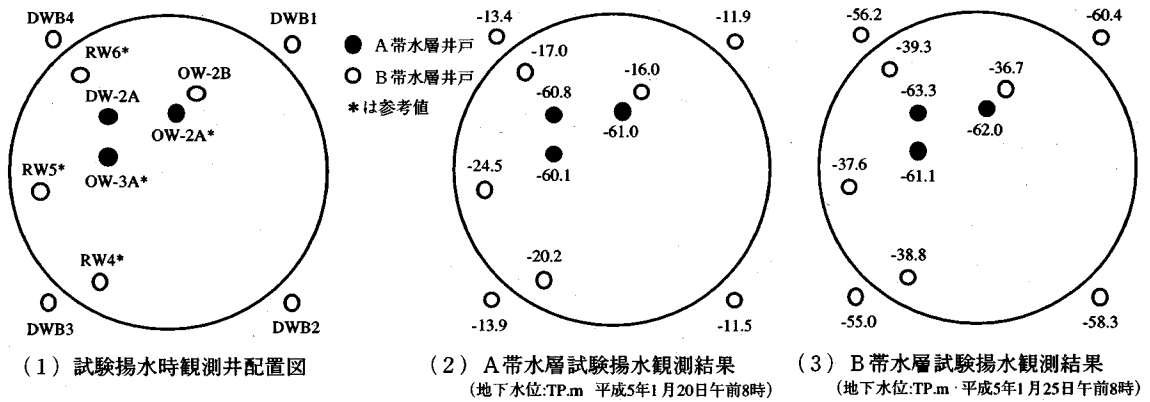


図-15 観測井分布図および試験揚水観測結果

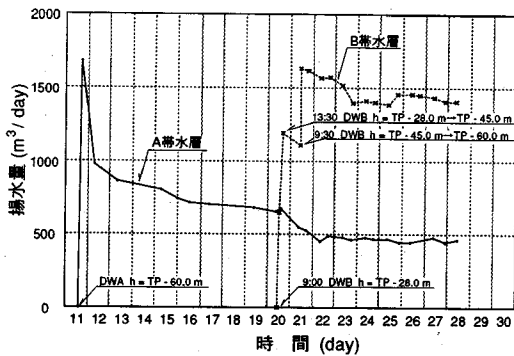
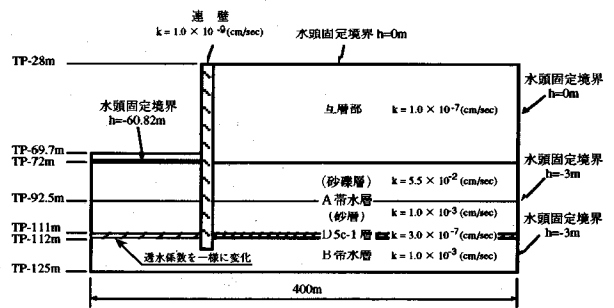


図-16 試験揚水時揚水量の経時変化



(1) モデル1解析概念図

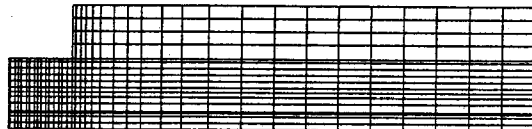
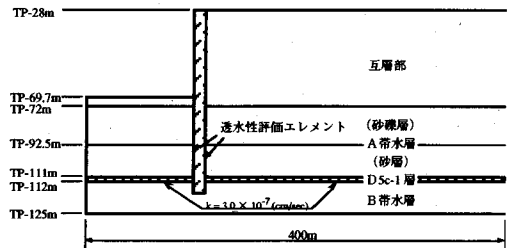


図-18 軸対称解析要素分割図



(2) モデル2解析概念図

表-9 連壁施工後の同定結果

解析ケース	D _{sc} 層 透水係数 (cm/sec)	連壁内側透水性 評価エレメント透 水係数(cm/sec)	連壁外側透水性 評価エレメント透 水係数(cm/sec)	人工島内側 流入流量 (m³/day)
1	3.0 × 10 ⁻⁷	-	-	108
2				709
3				657
1	3.0 × 10 ⁻⁷	5.5 × 10 ⁻³	5.5 × 10 ⁻³	645
2				681
3				664
観測値	-	-	-	650

図-17 軸対称解析概念図

付近に固定し、人工島外側のB帯水層に設置された揚水井 (DWB1, DWB2, DWB3, DWB4) の井戸内水位をTP-45mに保つように揚水を行ったときの揚水流量および各帯水層の圧力分布の観測を行ったものである。

試験揚水の結果得られた揚水量の経時変化を図-16に示す。この結果より、ほぼ定常と考えられる平成5年1月20日午前8時の観測結果および平成5年1月25日

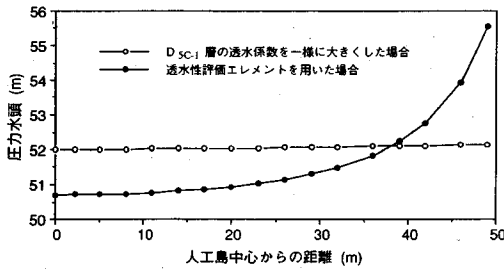


図-19 D_{sc1}層上端部の圧力分布

午前8時の観測結果を用いて難透水層であるD_{sc1}層の評価を行った。それぞれの観測結果を図-15(2)および図-15(3)に示す。

(2) 難透水層の評価

先に述べたように、構造物の構築に伴う難透水層の透水性の変化をモデル化する方法として、①連壁内側難透水層全体の透水係数が一様に变化したとする方法(モデル1)と、②構造物と地盤が接する部分に透水性評価エレメントを用いてモデル化する方法(モデル2)が考えられる。

これらの内、どちらのモデル化が妥当であるかを調べるために、A帯水層およびB帯水層の試験揚水のシミュレーションを行った。

a) 軸対称解析による同定

3次元FEM浸透流解析を行う事前検討として、解析モデルの選定と概略の透水係数を求めることを目的とし、軸対称FEM浸透流解析を行った。解析はA帯水層試験揚水の結果を用いて行い、解析上の地盤モデルは、D_{sc2}層よりも上部をモデル化して行った。解析モデルを図-17(1)および図-17(2)に示し、要素分割図を図-18に示す。透水性評価エレメントの厚さは、連壁の変位量から推定して全周にわたって厚さ1cmと仮定した。解析領域の範囲は、連壁施工前に行われたB帯水層の段階揚水試験結果から400mとした。A帯水層およびB帯水層の初期水位は、連壁施工後の自然状態の観測結果から、潮位より3m程度低下していた。そこで、同定用の解析モデルでは、解析領域境界部の固定水頭をAおよびB帯水層ともにTP-3mに設定した。また、連壁内側の水位は、A帯水層観測井でのThiessen法による加重平均水位を算出し水頭固定境界とした。B帯水層内の井戸の境界条件は水頭固定境界とした。同定は、試行錯誤法により行いA帯水層試験揚水の結果求った揚水量650

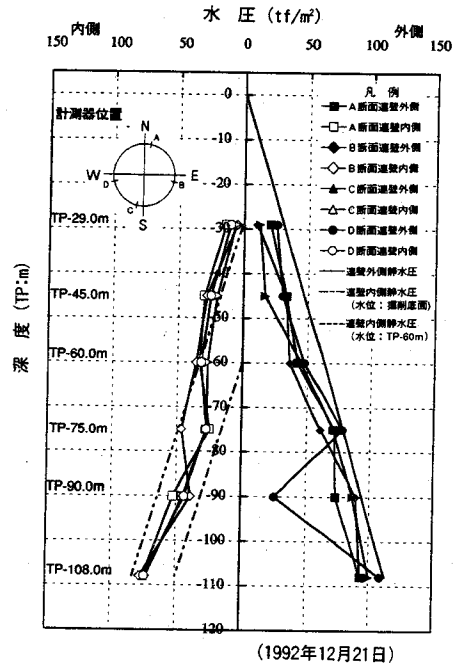


図-20 壁体間隙水圧計測結果

m³/dayと解析上求った湧水量がほぼ同じになるように難透水層または透水性評価エレメントの透水係数の修正を行った。

解析の結果で求ったD_{sc1}層および透水性評価エレメントの透水係数を表-9に示す。また、解析の結果求ったD_{sc1}層上部の圧力分布を図-19に示す。

これらの結果より、D_{sc1}層の透水係数を一様に大きくした場合には、D_{sc1}層上部の圧力分布はほぼ一様になり、透水性評価エレメントを用いた場合にはD_{sc1}層の上部の圧力分布が人工島中心部で小さく、連壁近傍で大きくなるのがわかる。連壁内部排水後における壁体に取り付けられた間隙水圧計の計測結果を図-20に示す。この結果によれば、実際の地下水挙動として連壁外側では静水圧と比較して圧力が低下する傾向にあり、逆に連壁内側では圧力が上昇する傾向にあることがわかる。透水性評価エレメントによるモデル化を行えば、連壁近傍での圧力変化を説明することができる。

b) 3次元解析による同定

先に行った軸対称解析では、平均的な透水性評価エレメントの透水係数が求ったが、平面的な分布を知ることができない。そこで、透水性評価エレメントの平面的な透水係数の分布を求めるために、3次元FEM浸透流解析を行った。

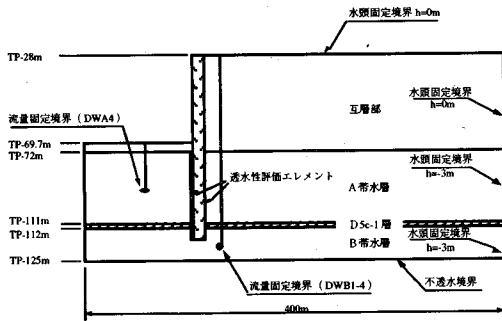


図-2 1 地層構成および境界条件 (断面図)

節点総数 4570
要素総数 4512

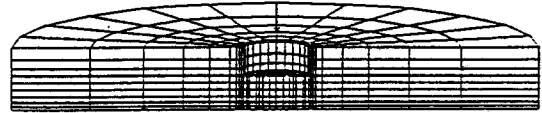
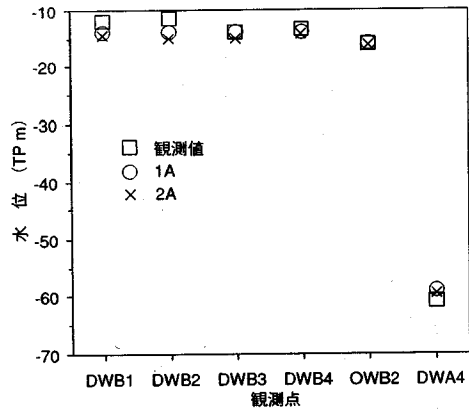


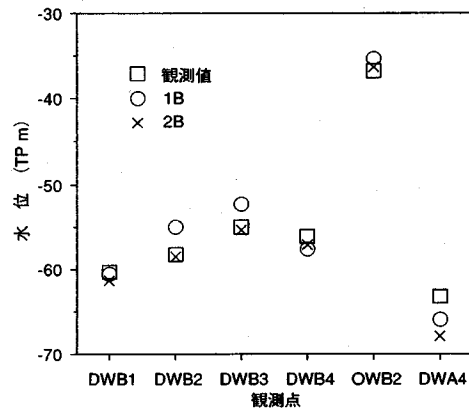
図-2 2 3次元解析要素分割図 (半断面を表示)

表-1 0 3次元解析ケース一覧

揚水量 (m ³ /day)	A帯水層		B帯水層			
	DWA4	DWB1	DWB2	DWB3	DWB4	
1 A	650	0	0	0	0	
1 B	470	390	330	300	360	
2 A	650	0	0	0	0	
2 B	470	390	330	300	360	
解析ケース	ケース1 A、ケース1 B		ケース2 A、ケース2 B			
透水性評価 エレメント						
透水係数 (cm/sec)						



(1) A帯水層試験揚水シミュレーション結果



(2) B帯水層試験揚水シミュレーション結果

図-2 3 3次元解析結果

3次元解析モデルは軸対称解析の場合と同様にD_{sc-2}層よりも上部を全断面モデル化して行った。解析モデルの作成の際には、井戸の部分貫入の影響を考慮するためストレーナーの貫入量を正しく表現した^{7),8)}。3次元解析モデルの地層構成および境界条件の概略を図-21に示し、要素分割の様子を示すために3次元解析モデルを半分に分割した場合の要素分割図を図-22に示す。

3次元解析による透水性評価エレメントの同定は、A帯水層試験揚水およびB帯水層試験揚水それぞれに対して行った。

A帯水層試験揚水は、人工島内側のA帯水層内のポンプのみ稼働しているため、連壁内側の透水性評価エレメントの透水性の評価に適していると考えられる。また、B帯水層試験揚水は、A帯水層内のポンプの稼働に加え人工島外側のB帯水層内のポンプも稼働するため、連壁外側A帯水層からの水の供給が多くなると考えられる。したがって、B帯水層試験揚水は、連壁外側の透水性評価エレメントの透水性の評価に適していると考えられる。

そこで、連壁内側の透水性評価エレメントの同定にはA帯水層試験揚水の結果を、連壁外側の透水性評価エレ

メントの同定にはB帯水層試験揚水の結果を用いて同定を行った。同定は、試行錯誤により透水性評価エレメントの透水係数を修正することにより行った。

透水性評価エレメントの透水係数が全周均質な場合と同定の結果最終的に求めた透水係数の分布を表-10に示

す。また、観測井位置での水位を図-23(1)および図-23(2)に示す。人工島内側の透水性評価エレメントの透水係数に関しては、信頼性の高い観測井が人工島内側A帯水層に一点であったため均質とした。人工島外側に関しては、B帯水層内井戸の位置関係から透水性評価エレメントの透水係数の分布を東西南北の軸で4等分した。

同定の結果、透水性評価エレメントの透水性は、人工島北側部分の透水性がやや大きく南側部分が小さい分布となっていることがわかった。

6. おわりに

本報では、東京湾横断道路川崎人工島建設工事において減圧用井戸の計画し特に問題となった海面下110m付近に位置する層厚の薄い難透水層の透水性の評価を行った結果を示した。以下に、検討の結果得られた知見を示す。

- ①非定常軸対称浸透流解析の結果、 D_{sc-1} 層の透水係数は、 $3 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ 程度であることがわかった。
- ②Hantushのt-s曲線による解析の結果においても、 D_{sc-1} 層の透水係数は、 10^{-7}cm/sec のオーダーであることがわかった。
- ③川崎人工島の場合盤ぶくれは、難透水層の透水係数が 10^{-4}cm/sec のオーダーよりも大きな場合には発生しないことがわかった。
- ④難透水層の透水係数が 10^{-7}cm/sec のオーダーでは、偏水圧の影響はほとんどないことがわかった。
- ⑤連壁近傍の透水性の変化は、透水性評価エレメントを用いることにより考慮できることを示した。

⑥多層系の被圧帯水層において、特定の帯水層の減圧を行う場合に、帯水層を分離する難透水層の層厚が薄い場合には、鉛直流を考慮した検討が必要である。これには三次元浸透流解析が有用な手段であった。

謝辞：本研究を進めるに当り、終始温かいご指導ならびにご助言を戴いた岡山大学環境理工学部西垣誠教授ならびに竹下祐二講師に心より感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 西垣誠, 竹下祐二他：多層地盤での大深度地下掘削における地下水保全のための浸透特性の計測法とその検討例, 地下水学会誌, 第31巻, 第4号, pp.189-198, 1989.
- 2) Hantush, M.S.: Aquifer tests on partially penetrating wells, *Trans. of ASCE*, Vol. 127, pp.284-308, 1962.
- 3) Hantush, M.S.: Drawdown around a partially penetrating well, *Trans. of ASCE*, Vol. 127, pp.268-283, 1962.
- 4) Sato, T. and Ueshita, K.: Determination of aquifer thickness by partially penetrating well, *Soils and Foundations*, Vol. 24, No. 3, pp.41-51, 1984.
- 5) 地下水ハンドブック編集委員会：地下水ハンドブック, 株式会社建設産業調査会, pp.304-311, 1984.
- 6) 木村栄一：東京湾横断道路川崎人工島における地下水処理, 基礎工, Vol. 21, No. 7, pp.43-53, 1993.
- 7) 西垣誠, 進士善英：不完全貫入井による揚水試験結果からの被圧帯水層厚の算定法, 土質工学会論文報告集, Vol. 26, No. 4, pp.197-204, 1986.
- 8) 西垣誠：不完全貫入井による被圧帯水層における揚水試験結果の解釈, 地下水と井戸とポンプ, 第29巻, 第10号, 1987.

(1995.9.20 受付)

A STUDY ON THE ESTIMATION OF PERMEABILITY OF AN AQUICLUDE LAYER IN DEEP ZONE NEAR AN EARTH RETAINING, CUT-OFF WALL DURING CONSTRUCTION OF KAWASAKI MAN-MADE ISLAND

Yukihiro SANO, Osamu NAKAGAWA, Kenichi SUZUKI and Keiji UEMURA

This paper is concerned with the estimation of permeability of an aquiclude clay layer in deep zone during construction of Trans-Tokyo Bay Highway and Kawasaki Man-made Island. The estimation was tried before and after construction of diaphragm walls.

First, the estimation of permeability of clay layer before the construction of the wall was simulated by pumping tests and Hantush's conventional t-s type curve method. Second, we estimated the permeability of clay layer after the construction of the wall by using 'permeability estimation element' in the model.