

大規模根切り現場における層別揚水工法の適用例

石川 明
(技術研究所)
高坂 信章
(技術研究所)
三宅 紀治
(技術研究所)
吉森 美成
(東京支店建築6部)

§1. はじめに

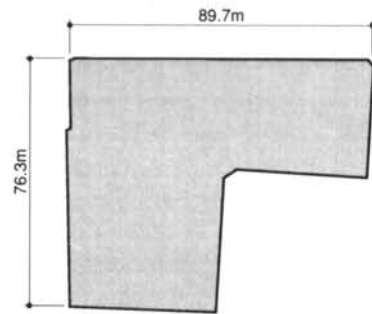
層別揚水工法は部分揚水工法とも呼ばれ、根切り工事のための地下水揚水量を最小とするために開発され、5年前から東京都内の大規模根切り現場に適用してきた。揚水量を最小にすることは、下水道など場外放流量や周辺地下水低下量の低減を意味し、環境面においても有効である。この工法は根切り底付近の帯水層の地下水位を根切り底面以深に低下させ、その深部に盤ぶくれ、ボイリングなどが生じうる被圧帯水層がある場合、この層の水頭を掘削底面の安定性確保に必要な程度まで低下させ、根切り底面までは低下させない。これにより揚水が必要な帯水層の水頭を一律低下させていた従来工法に比べて、最大40%の揚水量低減が可能になった¹⁾。

この工法は、上下の帯水層を区分する粘性土層のような不透水性土層がある地盤で最も有効であるが、微細砂層のような低透水性土層が介在する地盤でも効果がある。このような効果の評価は、不均質地盤の透水性を評価するための層別揚水試験²⁾、³⁾ (部分揚水試験とも呼ぶ)、さらに軸対称浸透流解析などの数値シミュレーションを実施することにより行われる。これらの結果より、止水性山留め壁の設置前であればこの必要深さが検討できるし、山留め壁の設置後であれば根切り段階に合わせた排水設備の運転計画が立てられる。これらの適用事例については既に報告した¹⁾、⁴⁾。

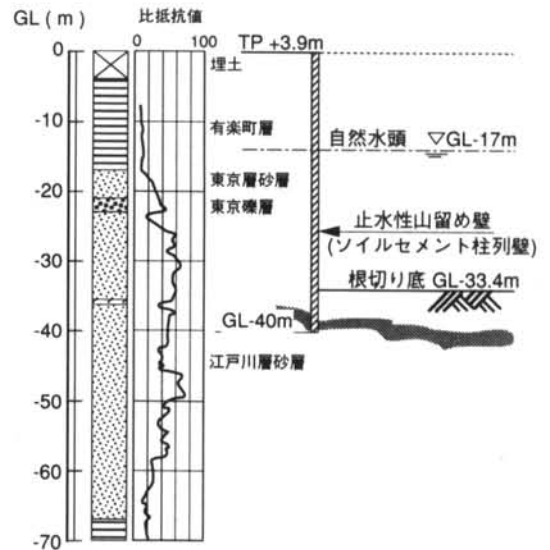
本稿は、東京都内の根切り深さ33.4mの大規模根切り現場に層別揚水工法を適用した事例を示すものである。止水壁設置前後に実施した層別揚水試験、その結果に基づく数値シミュレーションによる層別揚水型ディープウェルの設計、これらを用いて実施した確認揚水試験、さらに施工中の状況について報告する。

§2. 地盤および工事の概要と地下水処理の検討フロー

敷地の平面形状は図-1(a)に示すように、既存建築物の関係からL字型の特殊な形状となっている。地



(a) 地下工事平面図



(b) 地盤概要と地下工事断面図

図-1 地盤と地下工事の概要

下部はこの全域が深さ30～33.4mの根切り対象となる大規模な地下工事である（図－1(a)）。

地盤の概要を図－1(b)に併記する。地表（TP+3.9m）より、埋土・表土（層厚約4m）、有楽町層（N値3以下の軟弱な粘性土層層厚13～18m）、東京層砂層（層厚1～4m）、東京礫層（層厚0.5～2m）、江戸川層砂層の順に堆積している。GL-22～25m以深に堆積する江戸川層砂層は層厚40m以上の帯水層を形成している。所々に薄いシルト層を介在しているがその連続性は明確でない。同図中にこのボーリング孔で実施した電気検層の結果を示したが、この検層結果からも透水性が低い部分（比抵抗値が低い部分）が何層か認められる。東京礫層および江戸川層の自然水頭はいずれもGL-17m（TP-13m）程度でほぼ静水圧分布を示している。

この地盤条件のもと最深部深さ33.4mの根切りを行うために必要な地下水処理は、

- (1)根切り底付近の帯水層の水位を根切り底面下（GL-34m）まで低下させる。
- (2)根切り底より深い帯水層の水圧を低下させ、盤ぶくれ・ボイリングなどの発生を防止する。

などである。このような大規模根切りでは、止水性の山留め壁とディープウェルを用いた地下水処理工法が一般的である。しかし、近年の都市部における地下水水位の上昇と周辺環境への影響、また揚水した地下水の処理方法などを考えると、従来型の地下水処理では長期間、多量の揚水が必要となるため種々の問題が予想された。

当現場では、地下水処理工法の採用に際して、山留め壁の長さやディープウェルの揚水深度を工夫して地盤内に鉛直方向の地下水流を発生させれば必要揚水量を減じることが可能になることに着目し、図－2のフローに従い地下水処理を総合的に検討、評価した。はじめに、地盤の三次元的な透水性を評価するための層別揚水試験を実施した。この試験結

果の解析により対象地盤のモデル化および水理定数の推定を行った。次に、この地盤モデルを対象に排水設計のシミュレーションを行い止水壁としての山留め壁長の妥当性を検証するとともに、地下水処理設備の設計を行った。この間、現場では山留め壁と上記の設計に基づくディープウェルの施工が行われた。

山留め壁およびディープウェルの設置が完了した段階でこれらを利用して確認揚水試験を実施した。この試験は地下水処理設備の充足度を確認するとともに、施工期間中のディープウェル運転設定を行うためのものである。また、確認揚水試験結果と、層別揚水試験より作成した地盤モデルに対するシミュレーション結果とを比較して、地盤モデルの妥当性を検証し一部修正した。

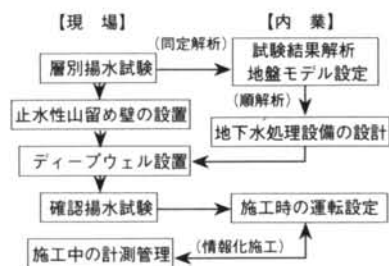
施工期間中は確認揚水試験結果より設定したディープウェル運転を基本とした、現場に設置した水圧計により水頭低下状況を計測管理し、状況に応じてディープウェルの運転設定を変更しながら施工をすすめた。

§ 3. 層別揚水試験

3.1 試験の概要

帯水層、不透水性土層ごとに、鉛直方向の透水性を含む三次元的な水理特性を把握することを目的に層別揚水試験を実施した。

試験実施に先立ち図－3に示すように、敷地内に2本の揚水井（Y1, Y2）および2本の観測孔（K1, K2）を設置した。揚水井は帯水層ごとの揚水が可能となるようにA, B, C, Dの4深度のスクリーンを有する構造で、スクリーン間をパッカーで遮断している。このパッカーには地上から開閉可能なバルブが装備されており、任意のスクリーンから揚水することができる。また、スクリーンの深度ごと、およびC～Dスクリーン間の合計5深度に水圧計を設置した。観測孔は1本のボーリング孔に4個の水圧計を埋設した構造のもので、深度ごとの水頭変動が計測できる。孔内水圧計間は遮水材により水の連通を防いだことはいふまでもない。水圧計の設置深度は揚水井のスクリーン対象層に相当する深度を図－3に示す電気検層の結果から想定し決定した。これらの配置は施工期間中、揚水井はディープウェルとして、観測孔は計測管理用にそれぞれ利用できるよう決定した。



図－2 地下水処理の検討フロー

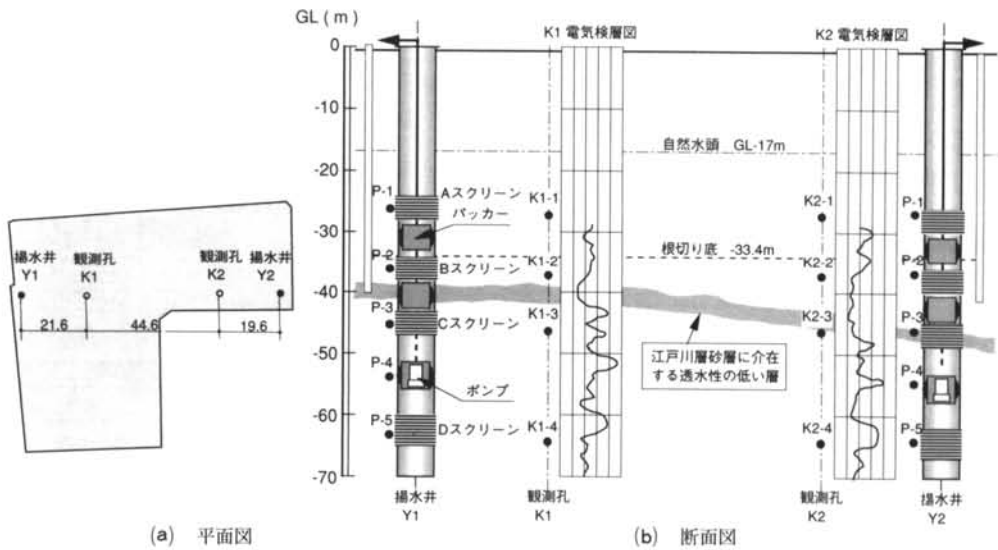


図-3 層別揚水試験に用いた揚水井、観測孔の概要

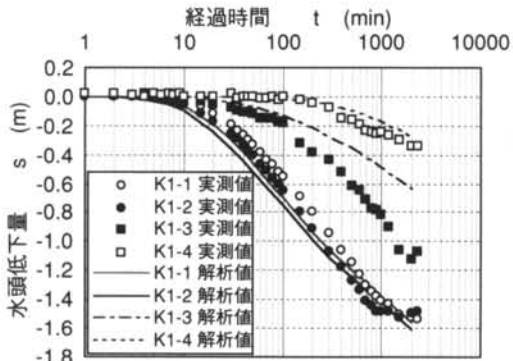


図-4 層別揚水試験結果(観測孔K1)

試験は揚水の開始と同時に水頭および揚水量の変化を経時的に計測するものであり、揚水対象深度や揚水井戸本数を変化させた種々の試験を実施した。

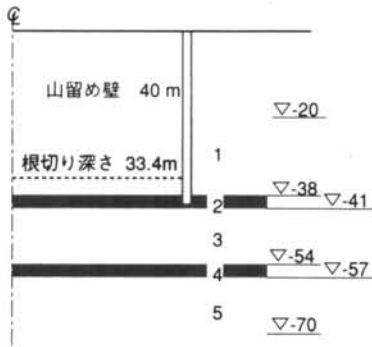
3.2 試験結果と同定解析結果

実施した層別揚水試験結果の一例を図-4に示す。これは揚水井Y1のBスクリーン揚水試験における観測孔K1の各深度の水頭変動を片対数紙上に経時変化図として示したものである。揚水継続時間は2370min、揚水量は0.6~0.4m³/minであった。水圧計K1-1およびK1-2ではほぼ同じ水頭低下挙動を示しているが、他の水圧計(K1-3、K1-4)は深度ごとに異なる水頭低下曲線が得られている。これは柱状図に表れない薄い低透水性層が存在することを

意味するもので、鉛直方向の地下水流を有効に利用すれば施工時の必要揚水量を減じることが可能なることを示唆するものである。

揚水スクリーンの深度および揚水井の位置や本数を種々変化させて実施した揚水試験の結果を総合的に評価して地盤モデルを設定し、この地盤モデルに対して軸対称浸透流解析に基づく同定解析を実施して地盤の透水性を評価した。結果の概要を図-5に示す。地盤は3層の帯水層とこの間に介在する2層の透水性の低い層によってモデル化できる。図-3の試験概要に示すように敷地内で地盤の傾斜が想定されたが、地盤を軸対称モデルにより表現しているためこの傾斜は考慮されていない。帯水層の透水係数は $(2.8\sim 4.8) \times 10^{-3} \text{m/min}$ ($(5\sim 8) \times 10^{-3} \text{cm/sec}$)で、この間に介在する低透水性層の透水係数は2オーダー程度小さい。

この地盤モデルに対し実施した揚水試験シミュレーション結果を図-4に併示した。部分的に試験結果と解析結果が合致していない部分もあるが、大まかには試験結果をよく表現している。このような傾向は実施した全ての揚水試験について確認できた。図-5に示した地盤モデルおよび水理定数は実地盤の情報を実用上十分な精度で表現しているものといえる。



土層区分	層厚 (m)	透水係数		比貯留係数 (1/m)
		水平方向 (m/min)	鉛直方向 (m/min)	
1	18	4.8×10^{-3}	2.4×10^{-3}	5.6×10^{-4}
2	3	2.8×10^{-5}	2.8×10^{-5}	2.9×10^{-4}
3	13	2.8×10^{-3}	2.8×10^{-3}	2.2×10^{-5}
4	3	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}	1.7×10^{-5}
5	13	4.4×10^{-3}	2.5×10^{-3}	1.2×10^{-5}

図-5 地盤モデルと同定解析結果

§ 4. 地下水処理工法の設計

4.1 必要揚水量の算定

層別揚水試験結果をもとに作成した地盤モデルについて山留め排水計画のシミュレーションを行い、工事期間中の地下水処理について検討した。地下水処理工法の検討にあたり着目すべきポイントは山留め壁をどこまで伸ばし、どこかの深度の地下水を揚水するかということである。山留め壁長や揚水深度を工夫することにより、地盤内に鉛直方向の流れが発生するため、地盤の三次元的な透水性を有効に利用することが可能となり、必要揚水量を減じることができる。当現場の山留め壁はソイルセメント柱列壁で止水性の高い山留め壁を構築することができるが、施工機械の性能上、40m以上の山留め壁構築の場合、施工性低下、止水性の不備などが想定される。

本来ならば、山留め壁長を数種類変化させた地下水処理計画について比較検討すべきであるが、本現場では山留め壁長が40mに設定されたうえでの地下水処理計画となった。試算ではあるが、図-5の地盤モデルに対し山留め壁長を変化させた場合の根切り最終段階における必要揚水量を図-6に比較した。山留め壁を伸ばすことにより必要揚水量は減少するが、その関係は地盤状況により比例関係にはなく、

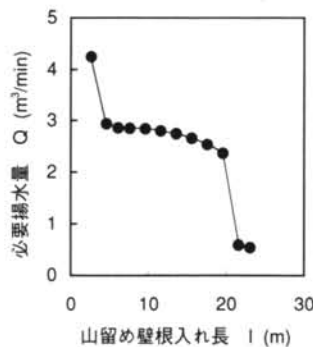


図-6 山留め壁長と必要揚水量の関係

止水壁として山留め壁を伸ばす効果が大きい部分と小さい部分がある。つまり、山留め壁を透水性の低い層に貫入する場合は必要揚水量が大幅に減少するが、透水係数に異方性のみられない帯水層の中で山留め壁を伸ばしてもその効果は小さいことがこの図から読みとれる。

採用した山留め壁長40mに対する揚水量の算定結果を図-7に示す。先にも述べたように敷地内で地盤の傾斜が認められ、江戸川層砂層内に介在する粘性土層の出現深度に差がみられる。このため、基本的には山留め壁はこの粘性土層まで貫入し、これより浅い帯水層（上層、図-5の地盤モデルでは第1層）を遮断しているが、部分的に上層を山留め壁で完全に遮断できない領域もありうる。このような観点から、必要揚水量の算定にあたっては山留め壁が上層を完全には遮断していないモデル（I 上層不完全遮断モデル）と上層を完全に遮断したモデル（II 上層完全遮断モデル）について検討した。また、地下水処理方法として上層と下層の水頭を同様に低下させる従来工法、上層と下層の水頭低下量を各々設定し下層の揚水量を減じよう工夫した層別揚水工法、層別揚水工法で揚水した地下水をさらに深部の帯水層に注水する鉛直リチャージ工法を併用した方法、の3通りについて検討した。図-7から、不完全遮断モデルは完全遮断モデルに比べ必要揚水量が1.5～1.7倍に増加するが、実際の地盤ではこの中間的な揚水量となることが想定される。また、層別揚水工法を採用することにより従来工法に比べ揚水量が65～75%に減じられること、さらに鉛直リチャージ工法を採用した場合は外部への排水量が大幅に減じられることがわかる。

しかし、ここに示した最大可能リチャージ量は注水層において盤ぶくれが発生しない水頭まで注水で

	検討ケース		必要揚水量 (m ³ /min)		最大可能リチャージ量 (m ³ /min)	外部排水量 (m ³ /min)
	モデル形状	地下水処理方法	上層	下層		
I 上層不完全遮断モデル		従来工法	4.78		—	4.78
		層別揚水工法	3.59		—	3.59
		層別揚水工法 + 鉛直リチャージ工法	3.17	0.42	3.09	1.96
II 上層完全遮断モデル		従来工法	3.16		—	3.16
		層別揚水工法	2.11		—	2.11
		層別揚水工法 + 鉛直リチャージ工法	0.32	1.79	2.59	0.57

図-7 必要揚水量の算定結果

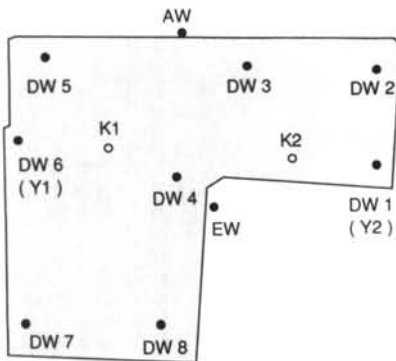


図-8 ティープウellsの配置平面図

きるといふ観点から設定された量であり、実際の現場で長期的に多量の注水を行うためにはリチャージウェルが多数必要となる。また、別途実施した地下水の水質検査から揚水層の地下水はリチャージに適さないことが判明した。これらのことから当現場では鉛直リチャージ工法は採用せず、層別揚水工法のみで地下水処理を行うこととした。

4.2 地下水処理設備の概要

以上の設計計算から層別揚水工法を採用すること

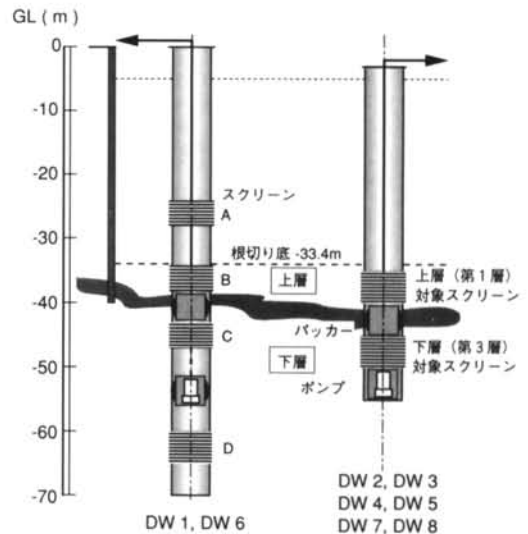


図-9 ティープウellsの構造概要図

により、最終根切り段階における必要揚水量が2.0~3.5m³/min程度になることが判明した。この結果を受け、施工に用いるティープウellsの設計を行った。

図-8にティープウellsの平面配置を示す。敷地全体の水頭が均等に低下すること、井戸相互間の干

渉による井戸効率の低下を最小限に抑えること、等を念頭におき8本のディープウェルを配置した。このうち2本(DW1, DW6)は層別揚水試験に用いた揚水井(Y1, Y2)である。

図-9にディープウェルの構造概要を示す。揚水試験の揚水井を転用したディープウェルはA,Bスクリーンを上層揚水用、Cスクリーンを下層揚水用とした。Dスクリーンは実施工では使用しない。新たに設置した6本のディープウェルは上層、下層を対象とした2つのスクリーンと、この間を遮断するバッカーを有する構造とした。

§ 5. 確認揚水試験

5.1 試験の実施方法

排水設備設置後にその充足度を確認し、施工期間中のディープウェル稼働方法を設定することを目的に確認揚水試験を実施した。

試験は表-1に示す工程のように、揚水するディープウェルの本数や揚水深度を順次変化させること

試験段階	揚水対象層	揚水本数	所要日数											
			0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
1	上層	1	DW6 (上層)											
	下層	0												
2	上層	2	DW1,6 (上層)											
	下層	0												
3	上層	4	DW1,3,6,8 (上層)											
	下層	0												
4	上層	8	すべてのDW (上層)											
	下層	0												
5	上層	8	すべてのDW (上層)											
	下層	4	すべてのDW (下層)											
6	上層	8	すべてのDW (上下層)											
	下層	8												

表-1 確認揚水試験工程表

により行った。第1~第4段階では上層部からの揚水本数を1, 2, 4, 8本と増やし、このときの揚水量と各層の水頭低下量を計測した。第5, 第6段階では下層からの揚水を4, 8本と追加することにより上下層から同時に揚水し、両層の揚水量と水頭低下量を計測した。水頭低下状況は、山留め壁の内側では層別揚水試験時に設置した観測孔(K1, K2)で計測し、山留め壁の外側では観測孔(AW, EW)を用いた。AW, EWにはそれぞれ4個の水圧計を

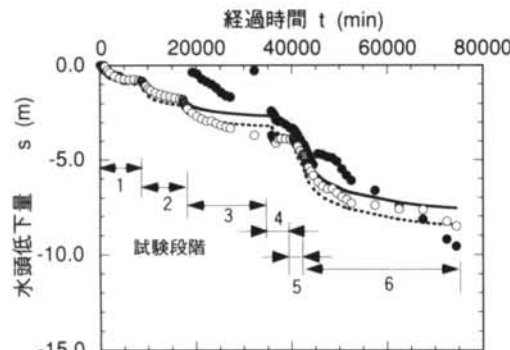
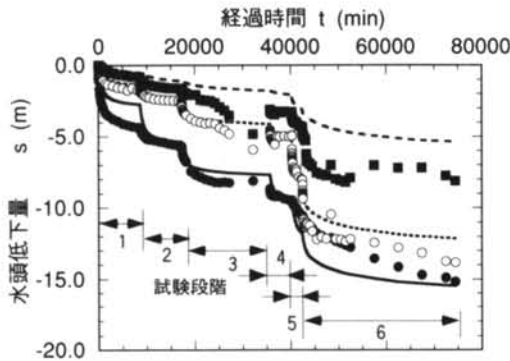
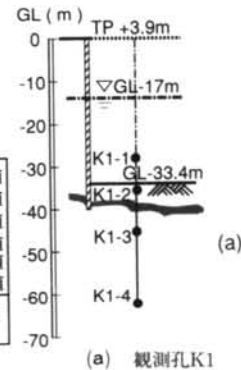
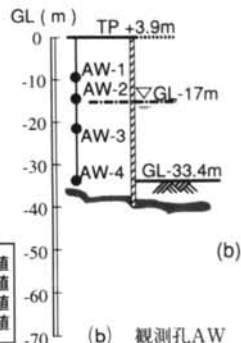


図-10 確認揚水試験結果(経時変化図)



(a) 観測孔K1



(b) 観測孔LAW

設置し、場外の水頭変動が計測できる構造となっている。

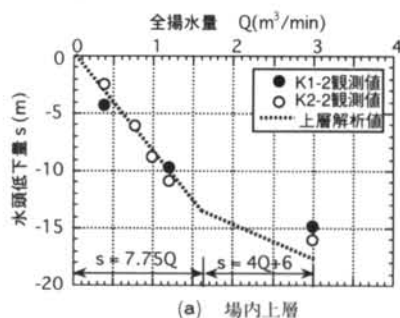
5.2 試験の実施方法

図-10は場内観測孔K1と場外観測孔AWについての試験結果であり、揚水するディープウェルの稼働本数や揚水深度を変えることにより、水頭が段階的に変化している。場内観測孔では、層別揚水試験時と同様に、水圧計の設置深度ごとに水頭低下状況に差が認められる。また、上層のみの揚水を行っている第1～第4段階ではK1-2～K1-3間の水頭差が大きい。下層からの揚水を開始した第5、第6段階ではこの差が小さい。このことは、先に示した層別揚水試験の結果と同様に揚水深度の工夫により、深度ごとの水頭を必要な量だけ低下させることが可能であることを示している。

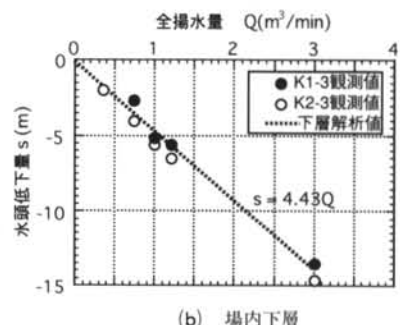
同図には層別揚水試験結果から設定した地盤モデル(図-5)を用い、確認揚水試験の揚水条件を与えて、試験全段階の水頭低下状況を軸対称解析によりシミュレートした結果も併示した。なお、地盤の傾斜や、場内構真柱の施工などによる地盤条件の変化を考慮するために地盤モデルの手直しを一部行い、また第1段階の水頭低下状況を参考にパラメータを若干修正している。この図より、場内外とも、観測値と解析値により一致が認められ、設定した地盤モデルの妥当性が検証された。

図-11は各試験段階における揚水量と最終水頭低下量の関係をまとめたものである。図-11(a)に示す場内の水頭低下量は上層のみの揚水を行っている範囲では $1\text{ m}^3/\text{min}$ の揚水につき 7.75 m の水頭低下が見込めるが、下層からの揚水を追加した後は、 $1\text{ m}^3/\text{min}$ の揚水につき 4 m 程度の水頭低下しか見込めず、揚水量～水頭低下量グラフが折れ線となっている。一方、図-11(b)に示す場内下層および同図(c)に示す場外の水頭低下量は、揚水量とに直線関係が認められ、揚水深度の違いによる効率の差はない。なお、同図中には軸対称モデルによる解析値を示したが、観測地と同様の傾向を表わしており、地盤モデルの妥当性がこの結果からも確認された。これらより、各根切り段階で所定の水頭低下量を得るための必要揚水量が設定できる。

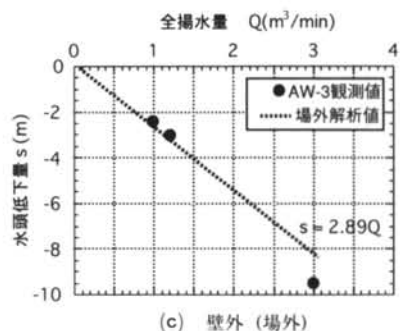
当現場では最終根切り時に上層の水頭を 18 m 、下層の水頭を 13 m 低下させる必要がある。図-11(a)によれば上層の水頭低下に必要な揚水量は約 $3\text{ m}^3/\text{min}$ であり、また同図(b)からこの揚水により下層の



(a) 場内上層



(b) 場内下層



(c) 壁外 (場外)

図-11 揚水量～水頭低下関係

水頭も根切り底面の安定性を確保するために必要な水頭低下($s=13\text{ m}$)が得られることが判明した。

§ 6. 施工中の地下水処理

6.1 ディープウェル稼働計画

確認揚水計画をもとに設定した各根切り段階ごとのディープウェル稼働計画を表-2に示す。根切り深さに応じて、上層はドライワークのため、下層は

根切り段階	1次	2次	3次	4次	5次	6次	7次	8次	9次	備考
根切り深さ (TP-m)	-0.1	-2.5	-5.5	-9.3	-13.6	-17.1	-21.8	-25.1	-29.8	
上層管理水頭 (TP-m)	-13.0	-13.0	-13.0	-13.4	-15.2	-20.2	-22.0	-26.0	-31.0	
下層管理水頭 (TP-m)	-13.0	-13.0	-13.0	-13.0	-13.0	-13.0	-13.0	-17.0	-26.0	

揚水量 (m³/min)	上層	-	-	-	0.3	1.0	1.2	1.6	1.6
	下層	-	-	-	-	-	-	-	0.2
合計	-	-	-	-	0.3	1.0	1.2	1.8	3.0

稼働本数	上層	-	-	-	2 (1,6)	4 (1,3 6,8)	8	8	8	()内は稼働 ディーブウェル No.
	下層	-	-	-	-	-	-	0	2 (1,6)	

表-2 ディーブウェル稼働計画

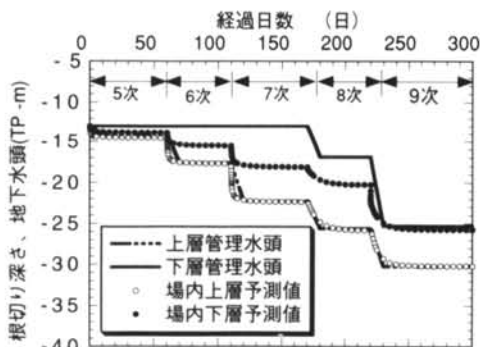


図-12 運転設定に基づく水頭変動予測

盤ぶくれ防止のために必要な管理水頭を定め、この水頭低下に必要な揚水量およびディーブウェル稼働本数を決定した。なお、水頭低下量の設定に際しては、現場の施工性、安全性を考え0.5m程度の水頭の余裕をみている。

この結果、7次根切りまではドライワークのために必要な水頭低下を得るために、上層のみからの揚水を行い、下層の揚水は行わない。8次および9次の根切り段階では上層のみからの揚水では盤ぶくれ防止、根切り対策に必要な水位低下が得られないため、下層からの揚水を追加して施工する計画とした。このような運転により、根切りの浅い段階から上下層の揚水を一様に行っていた従来工法に比べて大幅に揚水量を減じることが可能になる。

図-12には、表-2に示したディーブウェル稼働

計画に基づき運転したときの水頭変動を、確認揚水試験により設定した地盤モデルを用いて、予測解析を行った。この図から上層の水頭値は管理値とほぼ一致しているが、下層では第8次根切りまでは過大な水頭低下が得られている。

つまり、この段階までは上層の管理水頭がクリティカルになっているために、表-2の運転設定になっている。第9次根切りの段階では上下層とも管理水頭どおりの水頭低下が得られる結果となっており、表-2の稼働計画で施工中の運転管理を行うことにした。

6.2 施工期間中の水頭変化

施工期間中の場内外観測孔K1,AWにおける水頭経時変化を図-13に示す。初期の大きな水頭低下は確認揚水試験時のものである。本格的な揚水を開始した1994年11月以降は表-2に示すディーブウェル稼働計画に沿って運転を行い、図-13(a)に示す場内観測孔で水頭低下状況を確認しながら一部運転設定を変更し施工した。ここでK1-2は根切り対象層の水頭を、K1-3は盤ぶくれ対象層の水頭をそれぞれ示している。根切り深度が深くなるに伴い、ディーブウェル運転本数、揚水量を増加させた結果として所定の水頭低下が得られている様子がわかる。最終根切り段階で、最大揚水量3.0m³/minとほぼ当初予定通りの揚水量で、必要な水頭低下を得ることができた。図-13(b)に示す場外観測孔では、東京層

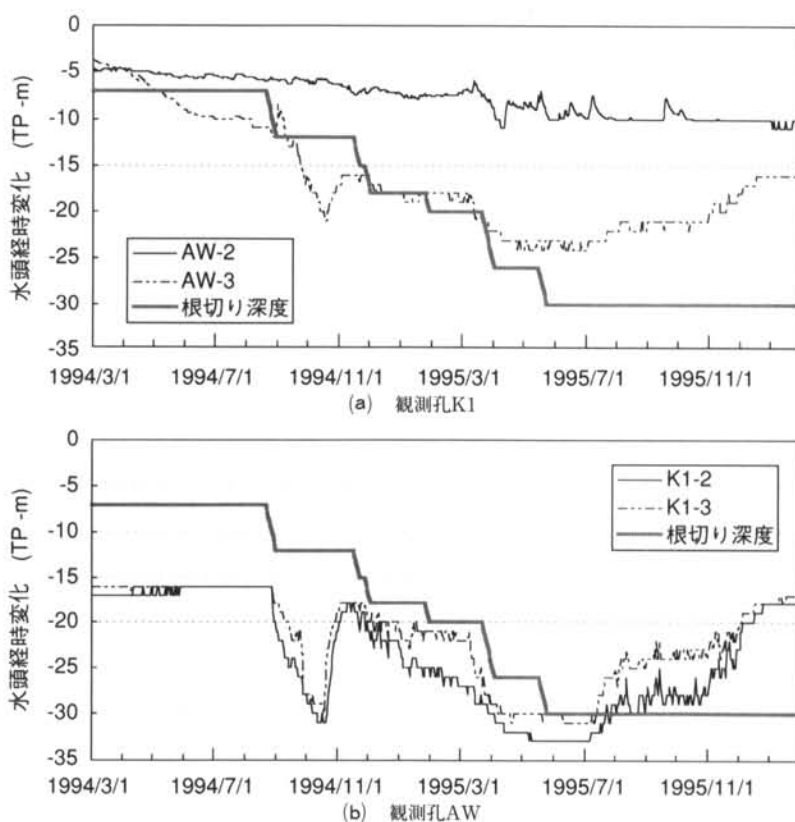


図-13 施工時の水頭変動

(礫層)に設置した水圧計AW-3では場内の排水条件により水頭が変動しているが、山留め壁の止水効果により場内に比べて水頭低下量は少ない。一方、有楽町層(粘土層)に設置した水圧計AW-2では低下の傾向が見られるがディープウェルの運転条件に連動したものではなく、また降雨の影響により一時的に水頭が上昇する傾向が認められる。AW-2の水頭低下の直接的な原因は1995年の小雨によるものと推測される。

§7. おわりに

以上示したように、本現場では層別揚水工法の適用により従来工法に比べて約30%の揚水量低減が図れた。首都圏のように、広域的な地盤沈下対策として揚水規制がとられた地域では深い地下水の上昇が顕著であり、かつてに比べて地下工事が深くなっていることと相まって地下水処理が困難になっている。安易に止水壁を深くすることはコストばかりか、恒

久的な障害物が残ってしまうという別な問題を招く結果にもなる。環境上の問題や可能放流量の問題さえクリアできれば、本現場のように地下水処理工法として止水壁と併用する排水工法が現実的ではないだろうか。

層別揚水試験、確認揚水試験にある程度の時間を要するのはやむを得ないと考えるが、パラメータの同定のための数値シミュレーションを短時間で行えれば、本工法の適用がさらに容易になる。また、解析地盤条件が複雑な場合、シミュレーション手法として軸対称だけでは困難であるし、特に複数の帯水層、粘性土層ばかりでなく、細砂層のような比較的透水性の低い地盤を3次元的に流れる地下水を一括して扱うには、3次元シミュレーションの導入が不可欠と思われる。今後はこの問題にも取り組んでいく予定である。

最後に、本工法を適用していただき、また様々な現場調査を含めてご協力をいただいた社内外の関係の方々には厚く御礼を申し上げます。

<参考文献>

- 1) 高坂信章, 三宅紀治: “建築工事での新しい地下水処理工法”, 基礎工, Vol.21, No.7, pp.90~96, 1993.7
- 2) 高坂信章, 三宅紀治, 平野文昭, 天利実, 玉置克之, 天野賢: “自動計測システムを用いた部分揚水試験の開発と適用” 清水建設研究報告Vol.54 (1991年) pp.11~19
- 3) 三宅紀治, 高坂信章, 玉置克之, 天野賢: “部分揚水試験による三次元透水性の評価” 第27回土質工学会研究発表会 平成4年度発表講演集(社)土質工学会, pp35-36, 1992.5
- 4) 高坂信章, 三宅紀治: “三次元的な地下水流を考慮した地下水処理の調査と施工(部分揚水試験と部分揚水工法)” 土と基礎, Vol.43, No9, pp30-32, 1995.9