

山王共同ビル建設工事における層別地下水処理工法の適用

高坂 信章 三宅 紀治 岡口 澄夫 仲林 清文 高杉 麻里子
(技術研究所) (技術研究所) (東京支店) (東京支店) (東京支店)

An Application of a Multi-Layer Dewatering and Recharge Deep Well System in Excavation Work at the Sanno Kyodo Building

by Nobuaki Kohsaka, Noriharu Miyake, Sumio Okaguchi, Kiyofumi Nakabayashi and Mariko Takasugi

Abstract

A multi-layer dewatering and recharge deep well system was used in the underground construction of the Sanno Kyodo Building. In-situ investigations such as deep borings and multi-layer pumping tests were completed, then the stratification and their hydraulic properties were estimated. The length of the earth retaining wall was determined and the specifications of recharge deep wells designed. After installation of the retaining wall and the wells, a confirmation pumping test was executed. A wells operation program was then set up to secure the proper drawdown. Drawdown was observed by an automatic measuring system and controlled to minimize.

The cumulative quantity of discharge and drainage was reduced drastically. Underground construction was completed economically and with low environmental impact.

概 要

最深部の根切り深さが約28mとなる山王共同ビル建設工事において、層別地下水処理工法の適用を検討した。深部地盤調査、層別揚水試験を原位置で実施し、地盤の層序、透水性などを把握した。この結果に基づき山留め壁長を決定し、層別揚水工法、鉛直リチャージ工法の適用性を評価して地下水処理設備の設計を行った。現場着工後、山留め壁・リチャージディープウェルを設置し、確認揚水試験を実施した。確認揚水試験結果に基づき設計値の見直しを行うとともに、施工時のディープウェル稼働計画を設定した。施工期間中は自動計測システムを採用して現場内外の水頭低下状況を把握し、必要最小限の水頭低下が得られるよう管理した。

この結果、作業性・安全性が十分確保できる水頭低下を得るとともに、揚水量・外部排水量を大幅に削減した地下水処理が実現できた。経済性および周辺環境への影響低減という観点から有効な成果を収め、地下工事を無事完了した。

§ 1. はじめに

永田町二丁目再開発地区は、国際都市東京の政治、文化、交流の中核機能を担うにふさわしい都市市街地の形成を目指して整備されつつある。(仮称)山王共同ビルはこの地区のシンボルタワーとなるもので、地上44階、地下4階のオフィスビルとして約11,000人を収容する一大地区が形成される。現在(1999年1月)、2000年1月の竣工に向けて鋭意施工中である。

地下工事は、面積約12,500m²、最深部の根切り深さが約28mの大規模、大深度工事である。根切り底以深にGL-11mの水頭を有する砂層が厚く堆積しており、この層の地下水を19m程度低下させなければ地下工事を円滑に進めることができない。このためには多量の揚水が必要になることから、工事の安全性・作業性を確保しながら、経済的にしかも周辺環境への影響を少なく抑えるための地下水処理計画が必要となった。

当社では、揚水規制にともなう地下水頭の上昇、地下工事の大深度化、揚水した地下水の処理に要する下水道使用料金の高騰などを背景に、地下工事における地下水処理を合理化すべく層別地下水処理工法の研究・開発を約10年前から行ってきた。この工法はすでにいくつかの現場に適用され良好な成果を収めている。本現場においても地下水処理が工事の成否を左右する重要な技術と位置づけて、1991年の計画時点から層別地下水処理工法の検討が進められてきた。

本報告は山王共同ビル建設工事における層別地下水処理工法の検討の経緯と適用の実績を、調査～設計～施工のフローに合わせてまとめたものである。

§ 2. 地盤と地下工事の概要

本現場における地下工事の概要を図-1および図-

2に示す。図-1は平面図であり、図-2は断面図である。特徴として、以下の点が挙げられる。

- ・掘削面積約 12,500m²、掘削土量約 290,000m³ の大規模地下工事である。
- ・深さ約 28m の大深度根切り工事である。
- ・敷地周辺を地下鉄 4 線が走る近接工事である。
- ・このうちの 1 本（千代田線）は敷地内を通過しており根切り工事はこれを跨ぐ形で行われる。
- ・高層棟と低層棟で根切り深さが異なる。

地盤の概要を図-2に示す。高層棟中心付近では地表（設計地表面高=TP+7.7m）より、埋土層（B層、層厚 2m 程度）、有楽町層（Yul 層、沖積粘性土層：層厚約 6m）、東京層（To 層、洪積の粘性土と砂の互層：層厚約 10m）、東京礫層（Tog 層、層厚約 3m）、江戸川層砂層（Eds 層、洪積の砂層、ところどころに粘性土を介在：層厚約 30m）、江戸川層粘性土層（Edc 層、層厚約 3m）、城北砂礫層（Edgs 層、層厚約 20m）でこの下部が上総層（Kam 層、固結シルト層）となっている。これら各層の層厚および出現深度は場所により大きく異なる。

山留めの変形を抑制するために、山留め壁は壁厚 1m の RC 地中連続壁とし、さらに逆打ち工法を採用した。根切り底以深に堆積する Eds 層は自然地下水頭が GL-11m (TP-3m) 程度、層厚が約 30m、透水係数 $5 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ 程度と想定され、この帯水層の地下水をどのように処理するかが地下工事の計画を左右する重要なポイントであった。つまり、ドライ施工と盤ぶくれ防止などの根切り底面の安定性確保のために地下水位ならびに水頭を低下させる必要があるが、根切り面積が広いこと、水頭低下量が大きいこと、地盤の透水性が高いことなどから多量の揚水が必要であり、これに伴う周辺環境への影響、下水道使用料金によるコスト増が懸念された。

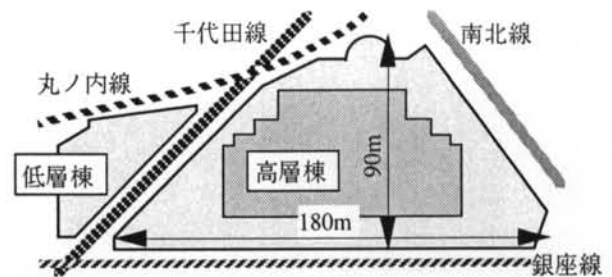


図-1 地下工事平面概要

以上の背景から、止水壁としての山留め壁深度、ディープウェルによる揚水量、揚水深度、ディープウェルの本数と配置、さらに揚水した地下水放流先としてのリチャージ工法の検討などが地下水処理検討の課題となった。

§ 3. 層別地下水処理工法の概要と検討フロー

3.1 層別揚水試験

一般に、水成堆積地盤では均一とみえる帯水層であっても、粘性土層を介在するなどの層序をなしているため、鉛直方向の透水性は水平方向の透水性に比べて小さい。層別揚水試験²⁾は、こうした地盤の不均質性、透水係数の異方性などを原位置で調査し、定量的に評価する手法として開発されたものである。

従来の揚水試験は図-3 (a) に示すように、揚水対象となる帯水層のほぼ全層にわたりスクリーンを有する揚水井および観測井を用いる。このため、試験時の地下水の流れは水平方向の成分が卓越するものとなり、透水量係数、貯留係数など水平方向流れに関するパラメータしか得られない。

層別揚水試験では図-3 (b) に示すように、帯水層のごく一部から揚水して地盤中に鉛直方向の流れを含

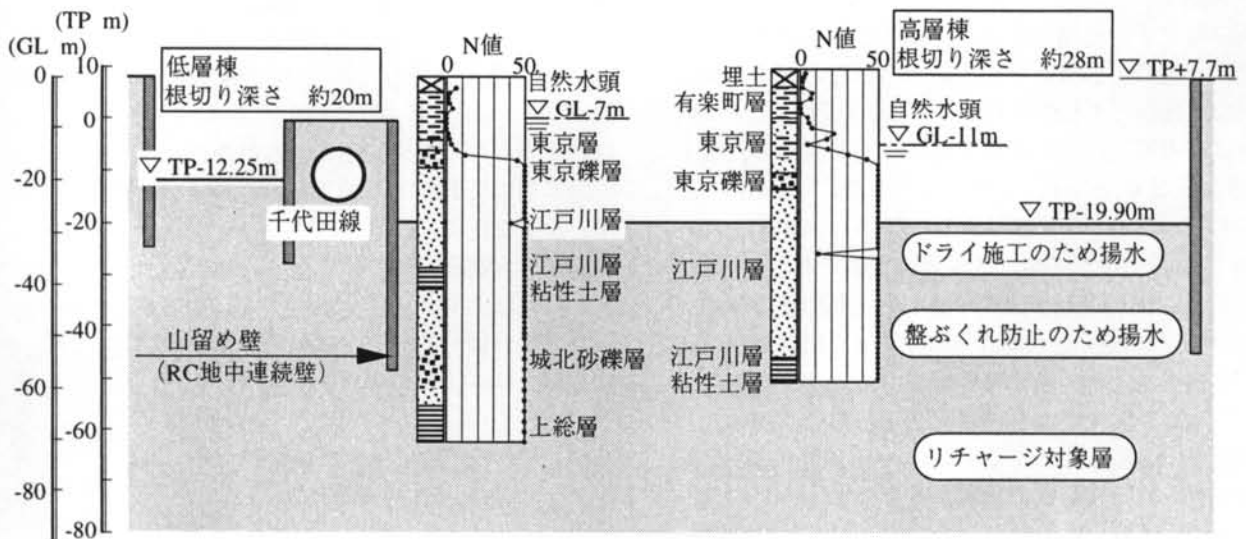


図-2 地下工事の断面と地盤の概要

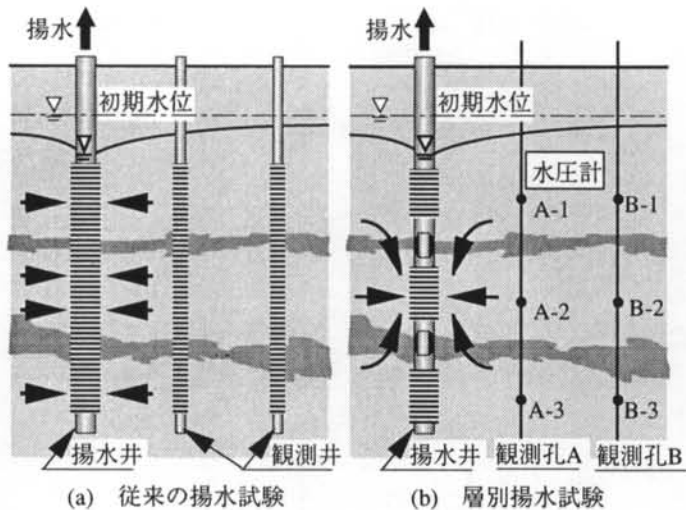


図-3 層別揚水試験の概要

む三次元的な流れを発生させる。このとき、深度の異なる複数の観測ポイント（水圧計）で水頭の変動を計測し、この結果を解析して帯水層中に介在する難透水層の透水性や透水係数の異方性などを評価する。

揚水井は図-3 (b) に示すように複数のスクリーンを有しており、このそれぞれから揚水する試験を実施する。全ての試験結果を総合的に評価すれば帯水層系全体の透水性が求まる。

3.2 層別揚水工法

従来の地下水処理では図-4 に示すように、揚水対象となる帯水層全体にスクリーンを有するディープウェルを設置し、すべての帯水層の地下水を一律に低下させる。この結果、過大な揚水期間、水頭低下量が必要となり、施工期間中の累積揚水量は膨大なものになる。そのため周辺地盤の水位も大きく低下する。

層別揚水工法では、層別揚水試験で求めた各層ごとの透水係数を考慮して山留め壁の長さを決定する。さらに、複数のスクリーンを有し、このそれぞれから独立して揚水できる構造のディープウェルを用いることにより、各層の水頭低下を必要最小限の量と期間におさめる。つまり、床付け直下の帯水層はドライ施工を達成するために根切り底面以深まで地下水位を低下させるが、深部の帯水層においては盤ぶくれやボイリングなど根切り底面の安定性が保てるだけの水頭低下が得られるよう揚水する。さらに、深部帯水層の揚水は根切り底面の安定性が損なわれる期間のみ行う。この結果、施工期間の累積揚水量は大幅に低減され、同時に周辺の地下水位低下量も低減される。

3.3 鉛直リチャージ工法

揚水した地下水の排水経路が確保できない場合、排水に要する費用（下水道使用料金）が膨大になる場合、あるいは揚水による周辺環境への影響が懸念される場

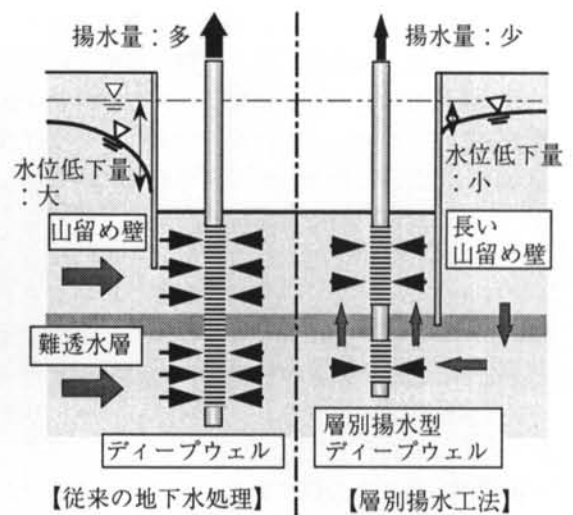


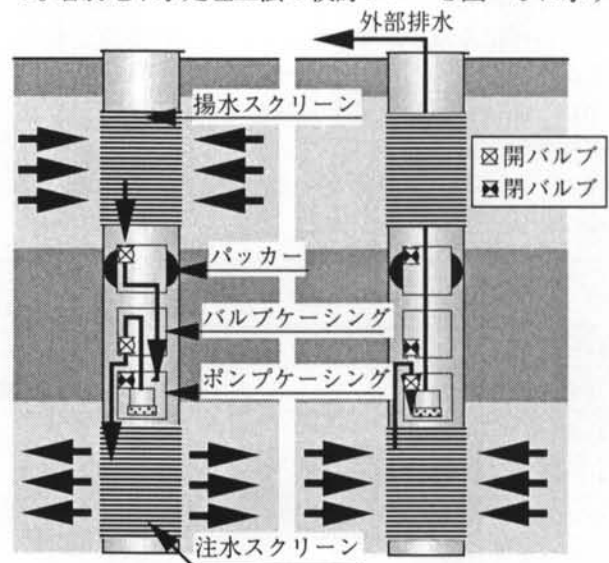
図-4 層別揚水工法の概要

合など、これを地盤中に還元するリチャージ工法が有用となる。しかし、都市部の建築工事などではリチャージウェルを設置するための用地確保が難しく、実施できるケースは少ない。この問題を解決するために、揚水した地下水をより深部の帯水層に還元する鉛直リチャージ工法を開発した。

本現場では、図-5 に示すタイプのリチャージディープウェルを採用した。この井戸は地下水の揚水とリチャージを1本の井戸で行うことができると同時に、注水スクリーンの目詰まりが進行した場合には、逆洗による注水能力の回復が地上からのバルブ操作により容易にできる構造になっている。

3.4 層別地下水処理工法の検討フロー

これらの技術を組み合わせて調査～設計～施工にわたる検討を行うことにより、地下水処理の合理化が図れる。層別地下水処理工法の検討フローを図-6 に示す。



(a) 集水・注水運転 (b) 目詰まり時逆洗

図-5 リチャージディープウェルの構造と機能

第1段階は、地盤調査とこの結果に基づく地盤モデルの作成、層別揚水試験の計画、実施、解析といった調査に相当する部分である。地盤モデルの作成が今後の計画を支配するため、この作業は慎重に行わなければならない。また、リチャージの採用を検討する場合には揚水層および注水層の水質検査を実施して、リチャージによる水質悪化が生じないことを確認する。

第2段階では、層別揚水試験で決定した地盤モデルに対して、山留め壁長やディープウェルの揚水深度などを変化させた地下水処理設計案の比較検討を行う。最適な排水設計案を設定し、ディープウェル、リチャージウェルの本数および配置を決定する。

第3段階は施工の段階である。設計結果に基づき山留め壁、排水設備を設置し、この充足度を確保するための確認揚水試験を実施する。さらに、この結果より施工期間中の排水設備の稼働計画を設定する。施工期間中は計測管理による情報化施工を行い、十分な水頭低下が得られていることを確認するとともに、過大な揚水、水頭低下にならないよう運転する。

本現場においても上記フローに則り、表-1に示す経緯で地下水処理の検討を行った。

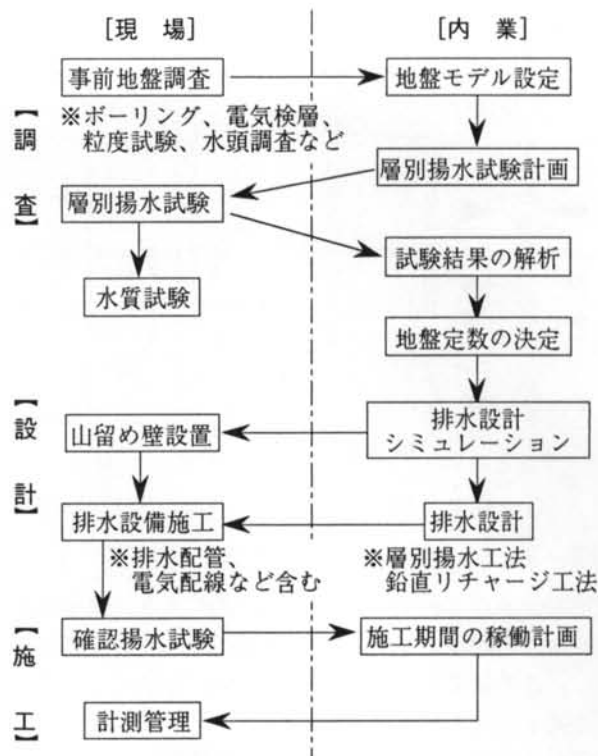


図-6 層別地下水処理工法の検討フロー

この結果、高層棟の西端付近で地盤が急激に傾いていること、またここを境に地下水頭に3~4m程度の差がみられること（西側がTP 0m程度、東側がTP-3m程度）が判明した。地下水処理はこの2つの領域（西側：高水頭領域、東側：低水頭領域）に分けて検討す

§ 4. 地盤調査と層別揚水試験

4.1 大深度地盤調査

§2で示したように本現場は大規模、大深度の地下工事であるが、深度60m以上の地盤調査は図-2に示した2本のみしかなく、また、この結果にかなりの差がみられることから、地層の連続性を評価するには不十分である。山留め壁長や効果的な地下水処理法を決定し、さらに鉛直リチャージ工法の可能性を検討するためには深部地盤の層序、連続性、その透水性を知る必要がある。このために、図-7に示す平面配置で深度70~100mの地盤調査を実施した。図-8にボーリング柱状図と電気検層の結果を並べて地層想定断面図を作成した。帯水層の連続性の検討にあたっては、電気検層結果を参考としている。

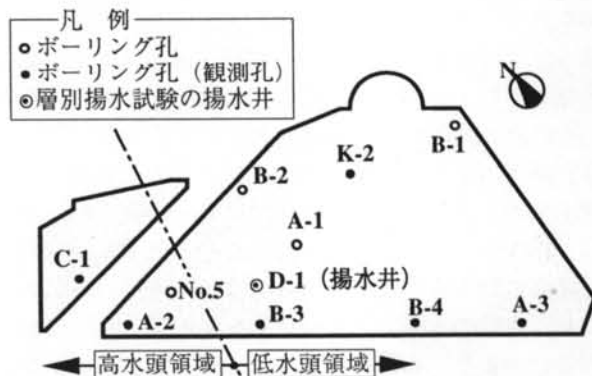
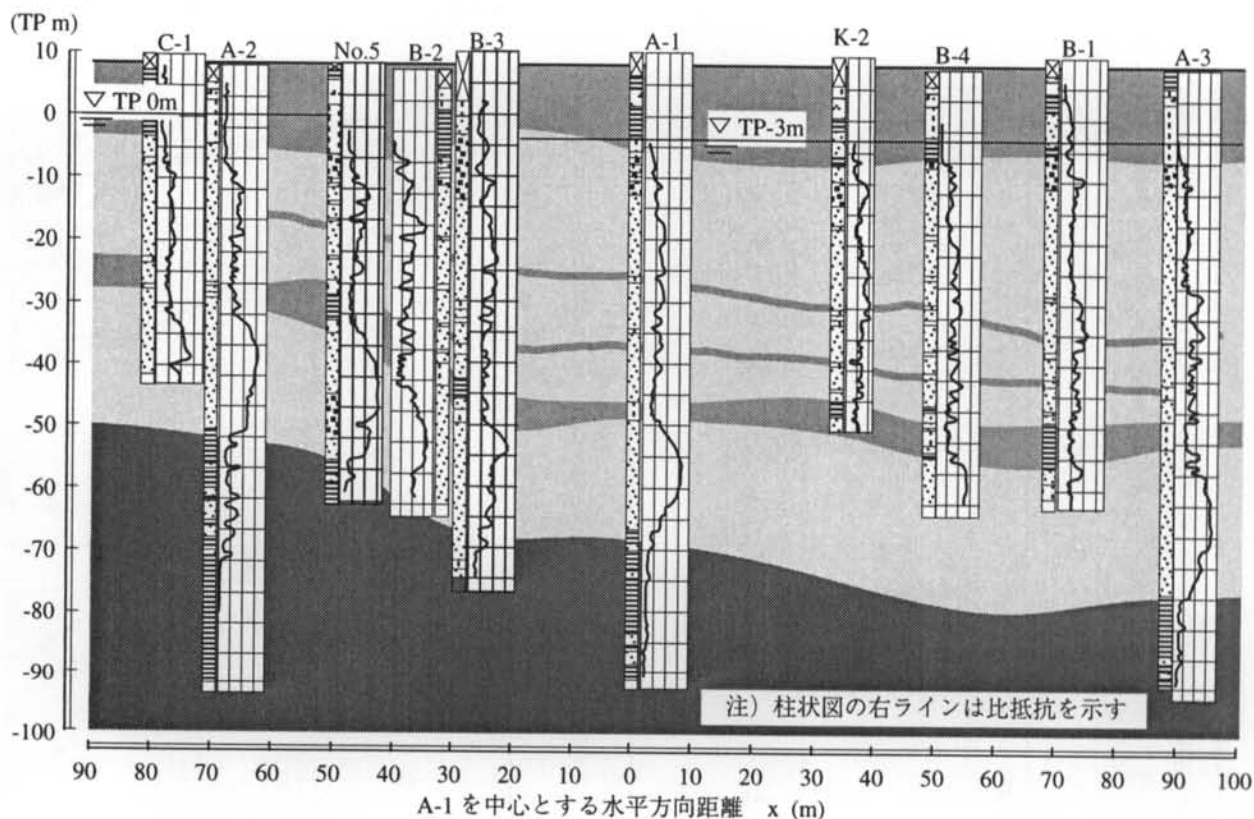


図-7 ボーリング配置平面図

	平成3年 1991	平成6年 1994	平成7年 1995	平成8年 1996	平成9年 1997	平成10年 1998
1) 第1回層別揚水試験	■					
2) 大深度地盤調査		■				
3) 第2回層別揚水試験		■				
4) リチャージウェル適用試験			■			
5) 山留め排水設計			■			
6) 確認揚水試験				▼着工	■	
7) 施工中のフォロー					■	■

表-1 本現場における対応の経緯



図一 8 地層想定断面図

る必要がある。以下では、根切り深度が深く、根切り面積が広い高層棟低水頭領域の地下水処理を中心に記述する。

なお、地盤調査に使用したボーリング孔には水圧計を埋設し、層別揚水試験および施工管理用の観測孔として利用した。

4.2 層別揚水試験

地盤調査結果をもとに図一 9 に示す地盤モデルを作成し、各帯水層とこの間に介在する粘性土層の透水性を求めるための層別揚水試験を計画・実施した。層別揚水試験設備の概要を図一 9 に示す。試験に用いた揚水井および観測孔の配置は図一 7 に示した。

揚水井(D-1)はスクリーンが 4 箇所あり、この各々から独立して揚水できる。観測孔は合計 6 本で、孔ごとに水圧計の設置個数が異なるが、基本的には揚水井のスクリーンに対応する帯水層に水圧計を設置した。

試験結果の例(最上段のスクリーンから揚水したときの水頭低下状況)を図一 10 に示す。揚水井からの離れが 14m (B-3)と 106m (A-3)の観測孔における各深度の水頭低下状況を経時変化図で示した。この図で実測値は点で示した。この結果を解析して各層の透水係数、貯留係数を求めた結果を表一 2 に示す。地盤定数の決定にあたっては各層ごとに実施した

全ての揚水試験結果を可能な限り忠実に再現できる値を選定した。図一 10 には求めた地盤定数を用いて解析した水頭低下量を実線および破線などによって示す。この図のように、計測値と解析値に十分な一致が認められ、各層の地盤定数が精度よく求められている。

§ 5. 地下水処理設備の設計と山留め壁長の決定

5.1 山留め壁長と必要揚水量

作成した地盤モデルに対して有限要素法による浸透流解析を行い、種々の山留め排水設計案についての比

地層名	層厚 D (m)	透水係数 k		比貯留係数 Ss (l/m)	透水量係数 T (m ² /min)
		(cm/sec)	(m/min)		
Tog層	2	3.3×10^{-2}	2.0×10^{-2}	5.0×10^{-4}	4.0×10^{-2}
Edc1層	4	8.0×10^{-6}	4.8×10^{-6}	8.3×10^{-6}	
Eds1層	6	4.0×10^{-3}	2.4×10^{-3}	1.6×10^{-4}	1.5×10^{-2}
Edc2層	1	3.0×10^{-5}	1.8×10^{-5}	8.6×10^{-6}	
Eds2層	8	7.8×10^{-3}	4.7×10^{-3}	5.6×10^{-5}	3.8×10^{-2}
Edc3層	1	6.7×10^{-6}	4.0×10^{-6}	8.8×10^{-6}	
Eds3層	9	4.2×10^{-3}	2.5×10^{-3}	2.3×10^{-5}	2.2×10^{-2}
Edc4層	5	3.3×10^{-5}	2.0×10^{-5}	7.9×10^{-6}	
Edgs層	20	5.0×10^{-3}	3.0×10^{-3}	6.0×10^{-5}	6.0×10^{-2}

表一 2 層別揚水試験の同定解析結果

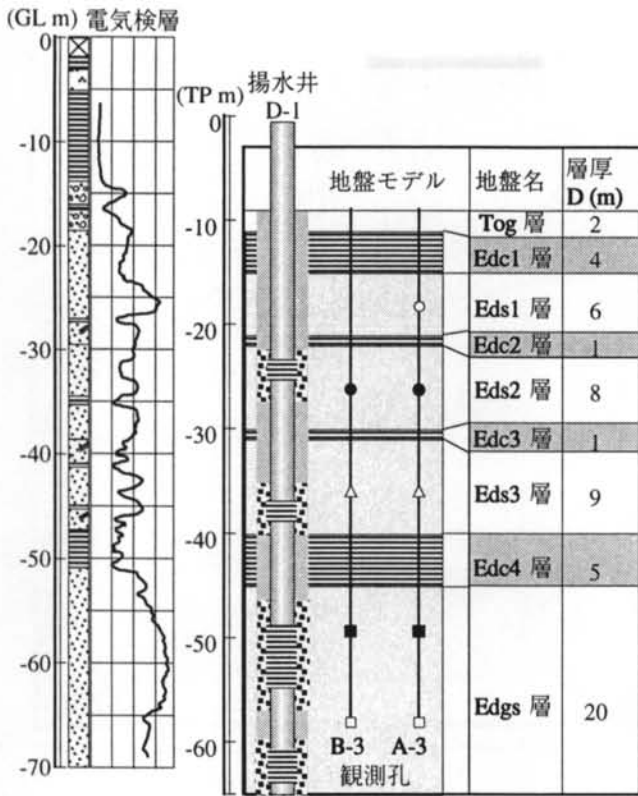


図-9 地盤モデルと揚水試験設備概要

較検討を行う。解析は軸対称・定常解析とした。地層の傾斜を考慮することができないが、高層棟低水頭領域においては各帯水層の層厚はほぼ一定であるため、近似的にこのモデルを採用した。

図-11 に示す山留め壁長を変化させた条件での排水設計を行い、必要揚水量、山留め背面水頭低下量を求めた。揚水条件として図に示す層別揚水型ディープウェルを考慮した。図-12 (a) に示す最終根切り段階での必要揚水量より、山留め壁が Edc3 層に到達しないケース (CASE1 および CASE2) では $3\text{m}^3/\text{min}$ 以上の揚水が必要となるが、山留め壁を Edc3 層まで根入れすることにより (CASE3) 必要揚水量は約 $1/3$ に減じられることがわかる。さらに山留め壁を伸ばして Edc4 層まで根入れしても (CASE4) 必要揚水量削減の効果は小さい。図-12(b) に示す山留め背面の水頭低下量も必要揚水量とほぼ比例の関係で変化する。Edc3 層まで山留め壁を根入れすることにより、山留め背面の水頭低下量を 2m 以下に減じることができる。

図-13 は、各ケースの地下工事期間中の累積排水量を試算したものである。この図より、CASE1 および CASE2 では施工全期間で 150万 m^3 以上の揚水が必要となるが、CASE3 では累積揚水量が 50万 m^3 程度まで減じられる。さらに、CASE3 の山留め壁長で鉛直リチャージ工法を併用することにより累積排水量を 20万 m^3 とすることが可能になる。

以上の結果から、経済性・施工性・安全性さらに周

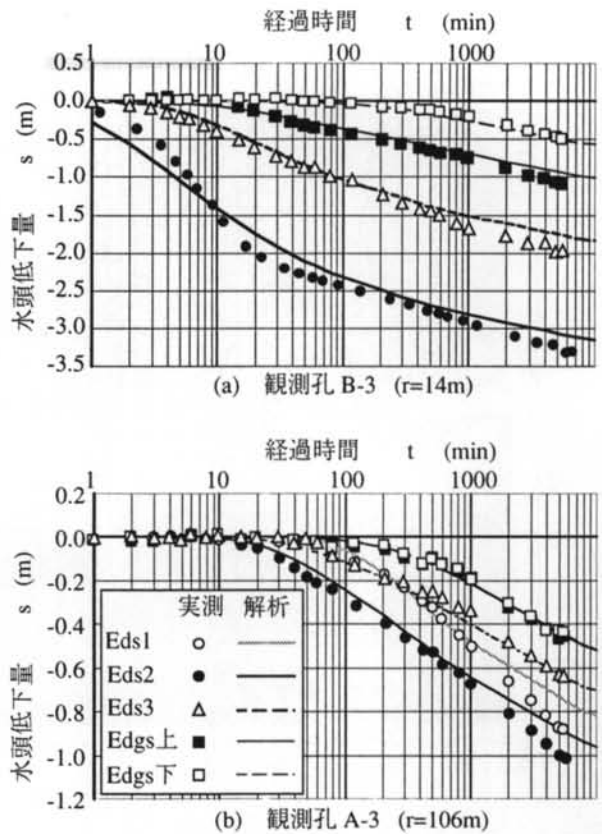


図-10 層別揚水試験結果の例

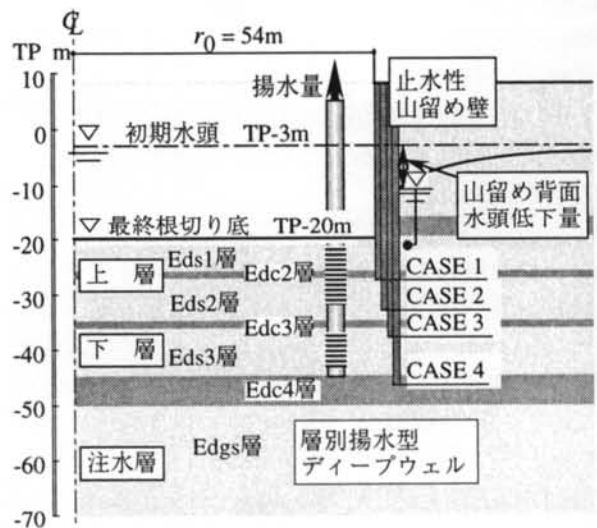


図-11 排水設計比較モデル

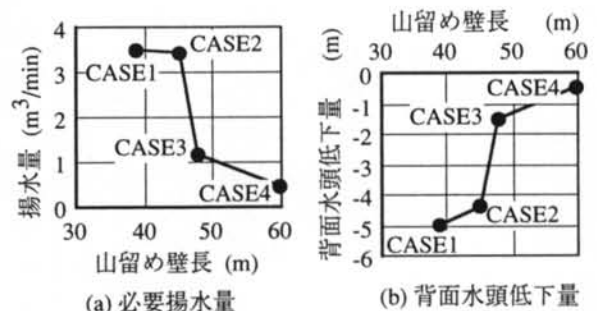


図-12 山留め壁長による必要揚水量、背面水頭低下量の変化

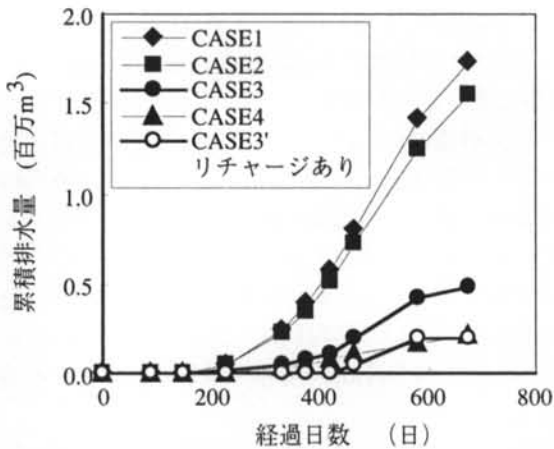


図-13 山留め壁長による累積排水量の比較

辺地盤への影響を総合的に評価して、

- ・山留め壁はEdc3層まで根入れする
 - ・ディープウェルは層別揚水型とする
 - ・鉛直リチャージ工法を採用して揚水した地下水を深部地盤に還元する
- などを設計の基本方針とした。

5.2 ディープウェル・リチャージウェルの設計

この現場で採用した井戸の構造を図-14に示す。この井戸は§3で示した層別揚水型のディープウェルと、リチャージディープウェルの機能を併せもつものである。つまり、揚水用のスクリーンが2つあり、これらのスクリーンから目的に応じた量・期間の揚水を行うことが可能である。さらに、注水用のスクリーンが1つあり、揚水した地下水をここから地盤に還元できる

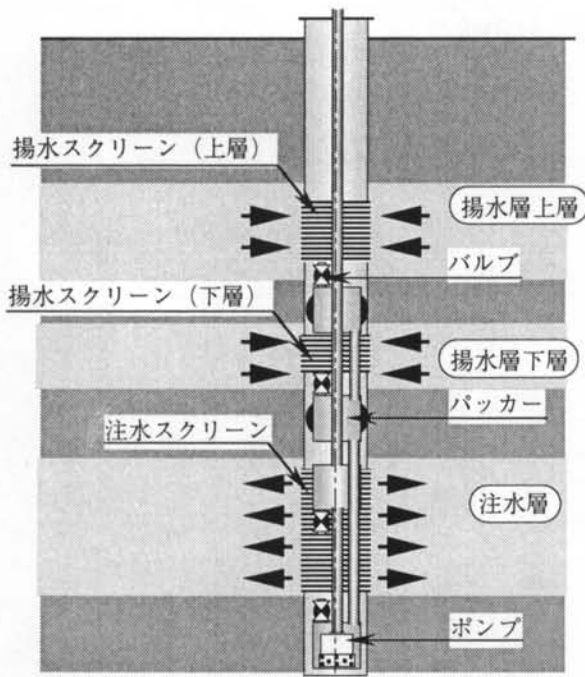


図-14 層別揚水型リチャージディープウェルの構造

構造になっている。

各帯水層からの必要揚水量、可能注水量は、有限要素法による浸透流解析により算出した。最終根切り段階では、揚水層上層からの必要揚水量 $Q_u=1.0\text{m}^3/\text{min}$ 、揚水層下層からの必要揚水量 $Q_l=0.1\text{m}^3/\text{min}$ 、可能注水量 $Q_r=0.6\text{m}^3/\text{min}$ が算出された。

次に、これらの揚・注水量を得るための井戸本数を決定する。 n 本の井戸を半径 l の円周上に均等に設置した場合、井戸損失および井戸干渉を考慮した井戸1本あたりの揚水量 q_n は次式により算出できる³⁾。

$$q_n = \frac{2\pi T \cdot s_w}{\ln \left(\frac{R^{n-1} \cdot \frac{1}{\eta}}{n \cdot l^{n-1} \cdot r_w \cdot \frac{1}{\eta}} \right)} \quad (1)$$

ここに、 s_w :ディープウェル内の可能水位低下量

T :帯水層の見かけの透水量係数

R :見かけの影響圏半径

r_w :ディープウェルの半径

η_l :井戸損失による井戸効率

である。この式から明らかなように、この設計に必要な地盤のパラメータは、山留め壁を設置した後の根切り内での水頭低下曲線を表す見かけの透水量係数と影響圏半径である。これらは山留め壁設置後の揚水試験シミュレーションにより算定可能であり、揚水層上層については $T=3.75 \times 10^{-2} \text{m}^2/\text{min}$ 、 $R=4650\text{m}$ が得られた。他のパラメータは井戸の設置条件、施工条件から決定される値であり、 $s_w=24\text{m}$ 、 $l=47\text{m}$ 、 $r_w=0.3\text{m}$ 、 $\eta_l=0.8$ を式(1)に代入すると、ディープウェル本数 n による q_n の変化が算定される。ディープウェル本数による全揚水量 $Q_n = nq_n$ と根切り内水頭低下量 s_0 の変化を図-15に示した。揚水層上層で $Q=1.0\text{m}^3/\text{min}$ の必要揚水量を確保し、根切り内水頭低下量 $s_0=19\text{m}$ を得るためには6本のディープウェルが必要であることがわかる。

逆洗時の揚水能力低下などを考慮して高層棟低水頭領域には7本のディープウェル(うち5本はリチャージ)

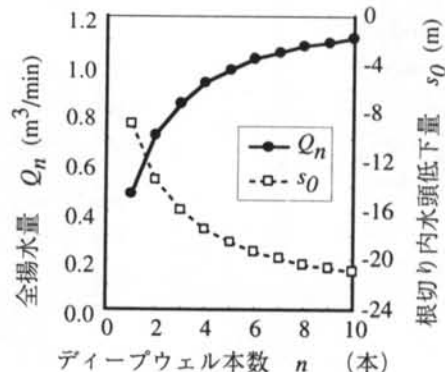


図-15 ディープウェル本数と揚水量、水頭低下量の関係

ジディーブウェル)を設置する計画とした。その他の領域を含めたディーブウェルの配置を図-16に示す。根切り域内の水頭ができるだけ均等に低下するように、外周に均等に配置するとともに中心付近に1本設置した。

5.3 山留め壁長の決定

高層棟低水頭領域においては揚水層上層(Eds1層およびEds2層)の地下水を根切りがドライに行えるよう揚水し、揚水層下層(Eds3層)の水頭は盤ぶくれが発生しない程度まで低下させる。さらに、揚水した地下水を注水層(Edgs層)に還元する。5.1に示した

ように山留め壁はEdc3層に根入れするため、揚水層上層は山留め壁で遮断される。地盤の傾斜を考慮して、Edc3層に確実に根入れする山留め壁長を決定した。

一方、高層棟の高水頭領域(西側の一部)では上記で注水層とするEdgs層が浅く、この水頭が高いためこの層からも揚水して水頭を低下させなければ盤ぶくれに対する安定性が確保できない。しかも、この帯水層には直近でリチャージが行われる。リチャージした水がこの領域の根切り部内に回り込まないようにするために、山留め壁をEdgs層の下端まで根入れすることとした。

山留め壁長の断面概要と地下水処理の概念を図-17

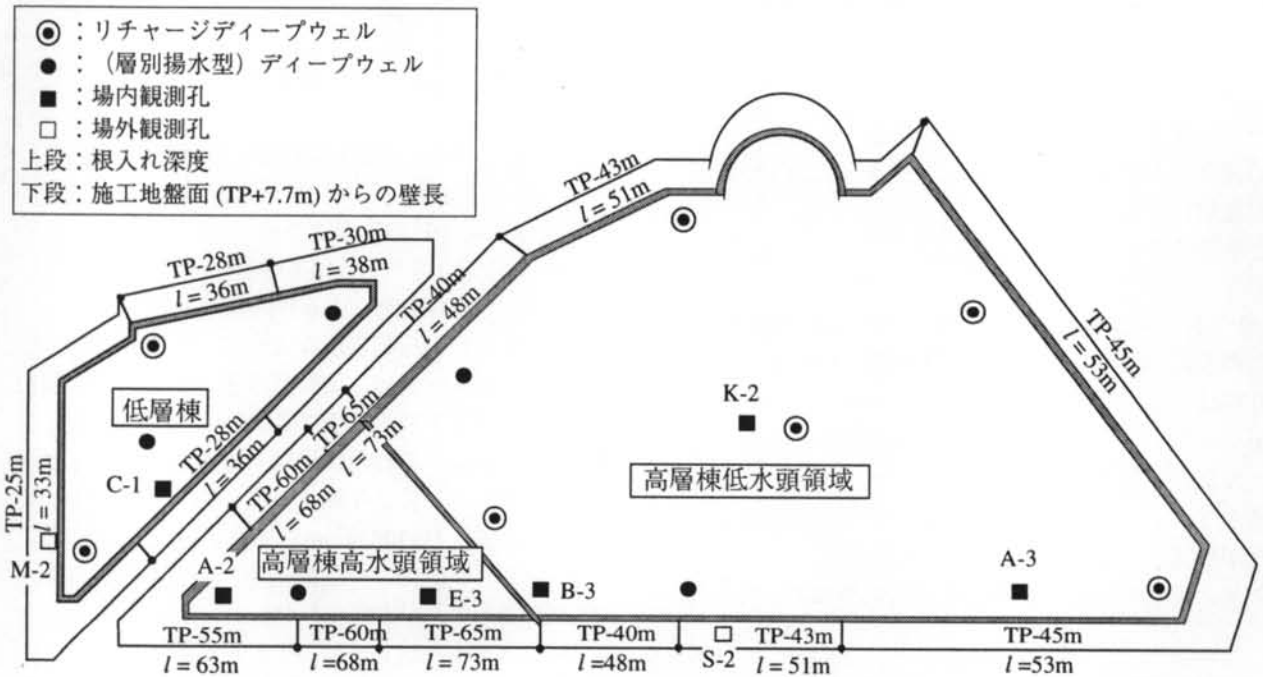


図-16 ディーブウェルの配置と山留め壁長の平面配置

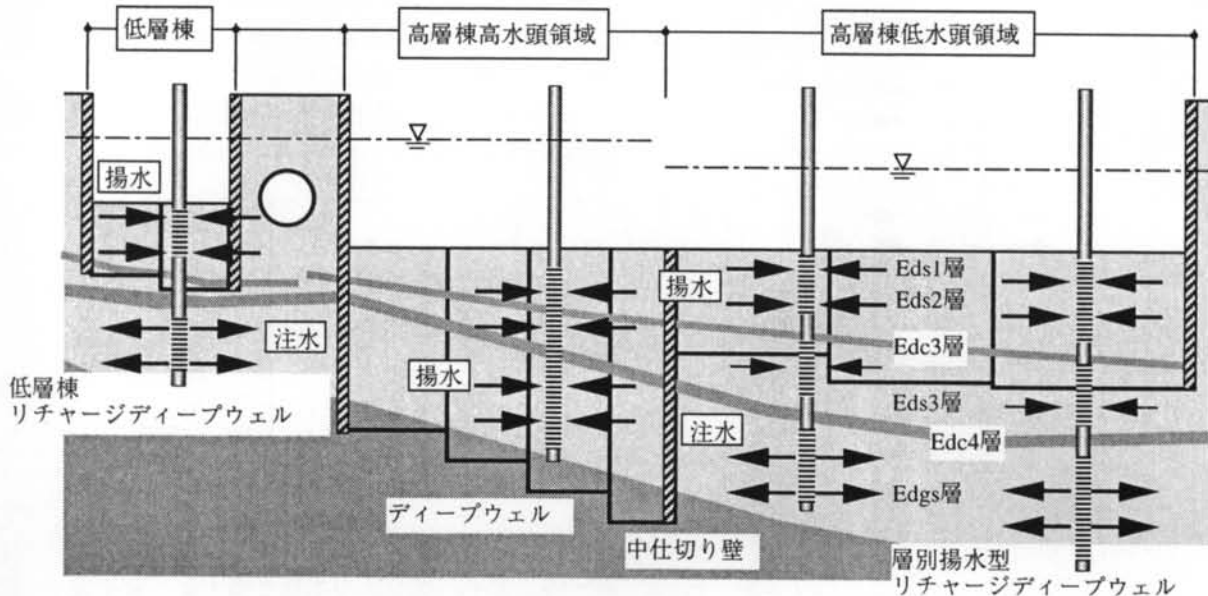


図-17 山留め壁長と地下水処理の断面概要

がこの現象を示している。

この原因として、地盤モデルを軸対称モデルとして簡略化したため複雑な地盤条件を十分には表現できていないこと、山留め壁 (RC 地中連続壁) や構真柱の施工により層別揚水試験時と確認揚水試験時とで地盤状況が変化したこと、などが考えられる。

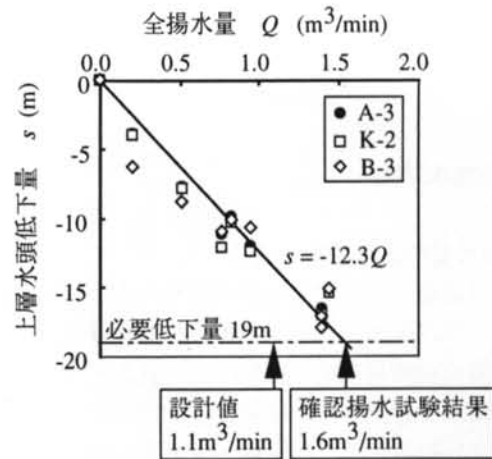
なお、Edgs 層の水頭低下率には山留め壁設置前後に大きな変化は認められない。

6.2 地下水処理設備の充足度の確認

地下水処理設備の充足度を確認するために、実施工で使用されるディープウェル、リチャージディープウェルを設計本数すべて施工した後、これらの運転条件を順次変化させる確認揚水試験を実施した。実施工程を表一3に示す。

第1段階～第3段階までは揚水層上層のみからの揚水を行い、その運転本数を順次増加させた。第4段階～第5段階は揚水層上層で集水した地下水を注水層に還元するリチャージ運転の影響を把握した。第6段階、第7段階では揚水層下層の揚水を追加している。このときの場内観測孔 (K-2) の水頭変動と全揚水量・注水量の経時変化を図一19に示した。揚水条件の変化により、各層の水頭がこれに追従して変化の様子が把握できる。この結果を図一20に全揚水量と上層 (Eds2層) 水頭低下量の関係としてまとめた。全揚水量と上層水頭低下量はほぼ比例関係にある。この図より設計値の $Q = 1.1\text{m}^3/\text{min}$ では根切り内での必要水頭低下量 19m を得ることができず、 $Q = 1.6\text{m}^3/\text{min}$ の揚水が必要となることがわかった。必要揚水量が設計値よりも大きくなることは、6.1で考察した Eds2 層の水頭低下率が設計時の想定値より小さいことに因る。

しかし、現状の設備をフル稼働することにより必要



図一20 全揚水量と上層水頭低下量の関係

な水頭低下が達成されることが確認できたので、設置したディープウェル、リチャージディープウェルを用いて地下工事期間の水頭低下を行うこととした。

6.3 地下水処理設備の稼働計画

確認揚水試験結果をもとに施工期間中の地下水処理設備稼働計画を表一4のように設定した。

各根切り段階ごとに各帯水層の管理水頭を設定する。揚水層上層は根切りのドライ施工が可能になる根切り底面 -1m まで水位を低下させ、揚水層下層は盤ぶくれに対する安全率 1.1 が確保できるよう土被り圧とのバランスで管理水頭を決定した。注水層もリチャージによる水頭上昇の限界値として盤ぶくれに対する安全率 1.0 が確保できる水頭を設定した。

初期水頭 GL -11m と管理水頭との差が必要水頭低下量になる。揚水層下層では盤ぶくれに対する安定性が損なわれるのは6次根切り時のみで、この時点までは揚水する必要がない。このように層別揚水の特徴を

根切り段階		3次根切り	4次根切り	5次根切り	6次根切り	備考
根切り深さ		-13.1	-17.0	-21.5	-27.6	最深部の根切り深さ
管理水頭 h (GL m)	上層	-14.1	-18.0	-22.5	-28.6	1m余裕
	下層	-11.0	-11.0	-11.0	-19.7	安全率 1.1
	注水層	-	-	-	-7.3	安全率 1.0
必要水頭低下量 s (m)	上層	-3.1	-7.0	-11.5	-17.6	初期水頭 GL-11m
	下層	0.0	0.0	0.0	-8.7	〃
必要揚水量 Q (m³/min)	上層	0.3	0.6	0.9	1.4	s=12.3Q
	下層	0.0	0.0	0.0	0.2	確認揚水試験実績より
	合計	0.3	0.6	0.9	1.6	
注水可能量	Qr (m³/min)	0.3	0.6	0.9	1.0	RDW1本あたり0.2m³/min
外部排水量	Qout (m³/min)	0.0	0.0	0.0	0.6	必要揚水量-注水可能量
運転本数	上層揚水	2	3	5	7	1週間前より運転切替
	下層揚水	0	0	0	2	
	リチャージ	2	3	5	5	

表一4 高層棟における地下水処理設備の稼働計画

生かすことにより、下層からの揚水期間を大幅に限定できる。

確認揚水試験により得られた揚水量と水頭低下量の関係から、各根切り段階ごとの必要揚水量を決定する。根切り段階に応じて揚水量を徐々に増やしていく計画とすることで施工期間中の累積揚水量・排水量を減じることが可能になり、経済性、周辺環境への影響という観点から有効である。また、リチャージの併用により5次根切りまでは外部への排水を0にすることが可能となる。

必要水頭低下量、必要揚水量を達成するための稼働ディープウェル本数を確認揚水試験結果にもとづき設定する。根切りの進行にともなう運転の切り替えは、

次段階根切り開始の約1週間前とした。

§ 7. 層別地下水処理工法の稼働

7.1 施工時の水頭変動

6.3で設定した稼働計画を基本として、根切り段階に対応した地下水処理設備の運転を行った。地下工事期間中の水頭変動計測結果を図-21にまとめた。

図-21 (a) に示す場内観測孔 (K-2) の計測結果は、設定した管理水頭値に応じた水頭低下が得られている。揚水層上層においては根切り底面以深に地下水位が低

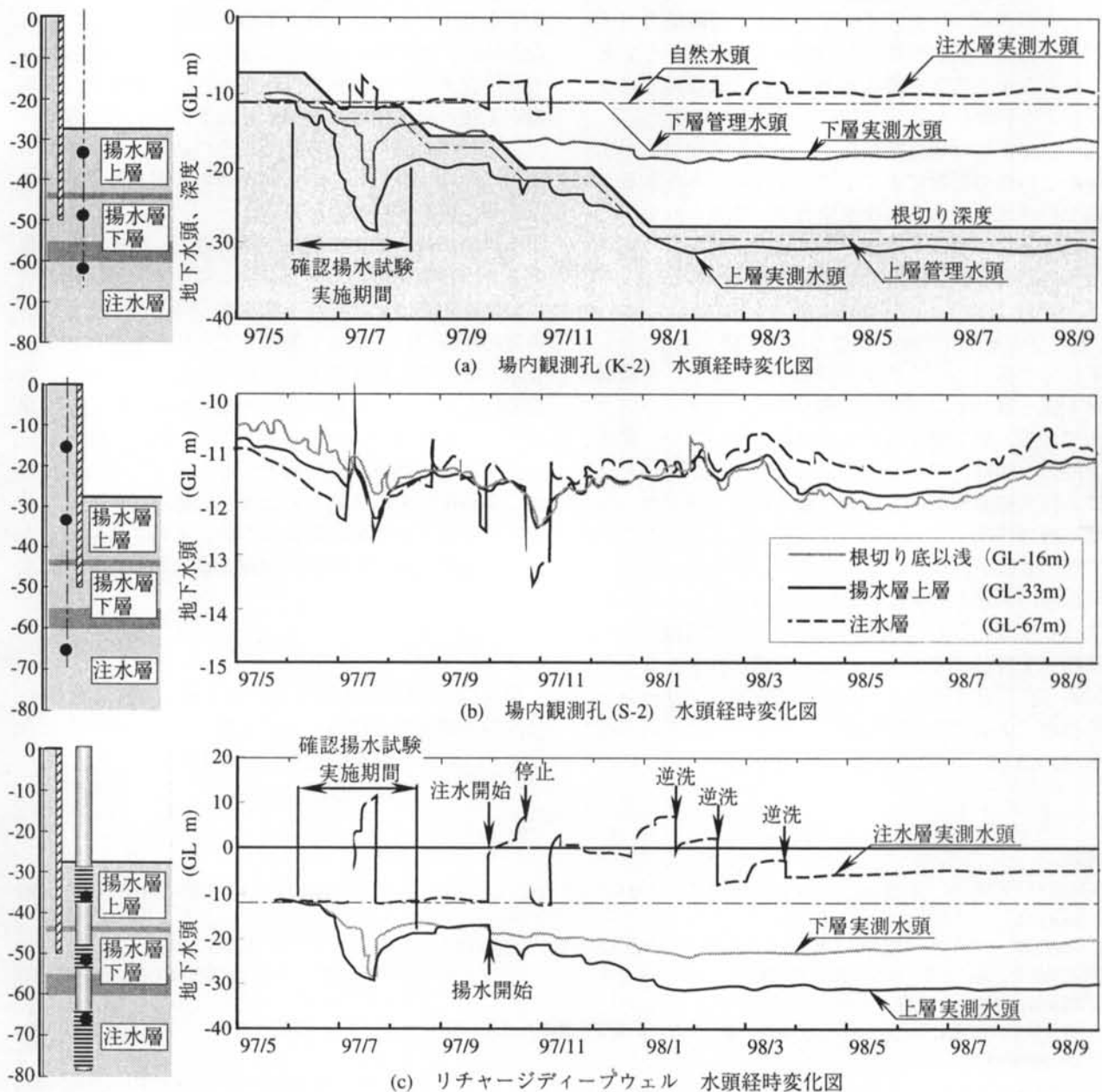


図-21 施工時の水頭経時変化

下しており、施工期間中、根切り部内はドライな状況に保たれた。揚水層下層においては、盤ぶくれに対する管理水頭以下に被圧水頭が低下している。ただし、上層からの揚水により下層の水頭も低下するため、4次根切り、5次根切りの段階では管理水頭より大きな水頭低下が得られている。下層からの揚水は最終根切り段階のみで十分であった。注水層の水頭はリチャージディープウエルの注水により、自然水頭よりも3m程度上昇している。これも盤ぶくれに対する安定性が確保できるよう管理した。

施工期間中はイントラネットを利用した遠隔計測管理システム（ウォッチャー）^{5),6)}を用い、技術研究所など遠隔地においてもリアルタイムで現場データを管理できる体制とした。水頭低下状況によってはディープウエルの運転本数やディープウエルの運転能力（インバータにより調整可能）を当初の稼働計画から変更し、確実な水頭低下を得るとともに、過大な揚水にならないよう管理した。

図-21 (b)には場外観測孔 (S-2) の計測結果を示す。降雨やその他の影響により季節的な変動がみられるが、場内での揚水による有為な水頭低下は認められない。層別揚水工法、鉛直リチャージ工法の採用により周辺環境への影響が少ない施工が達成できたと考える。

7.2 リチャージディープウエルの実績

本現場で採用したリチャージディープウエルの稼働実績を図-21 (c)に示す。このリチャージディープウエルでは揚水層下層からの揚水は行っていない。揚水層上層の水頭は、根切り段階に合わせてインバータによる揚水能力の調節を行い、徐々に低下させた。揚水層上層で集水した地下水を注水層へ還元するため、注水層の水頭が自然水頭よりも上昇している。

注水層の水頭上昇量は、運転の継続にともない徐々に大きくなる。これは注水スクリーン付近に微細粒子が集積して目詰まりが生じ、注入抵抗が大きくなるためである。目詰まりの進行に応じて注水スクリーンからの揚水による逆洗を行った。この現場では1回の逆洗は30分程度とした。逆洗により注水層の水頭が低下

して注水能力が回復する。特に、1998年3月に行った逆洗の後には、十分な注水能力が継続的に維持されている。

設置した全てのリチャージディープウエルで、注水した地下水のほぼ全量を地盤に還元することができた。逆洗のインターバルも平均して2~3か月に1回程度という実績であった。

§8. おわりに

本報では層別地下水処理工法の適用事例として、その検討の経緯を踏まえて紹介した。根切り期間および地下躯体構築期間を通して安全性、作業性に支障ない地下水低下が得られ、地下工事を無事終了するに至った。特に、本現場で初めて本格的に採用した改良型リチャージディープウエルは十分な性能を発揮し、層別揚水工法との併用により揚水量および外部排水量を大幅に減じる効果をもたらした。その結果、経済的さらに周辺環境への影響という観点からも理想的な地下水処理が実現できたものと考えられる。

本現場においては層別地下水処理工法の適用を前提として、長期にわたる検討を行ってきた。特に原位置における調査は、足掛け5年にわたるものとなった。通常の現場では、コスト的にも工期的にも今回のような十分な調査を行うことは容易ではない。しかし、地盤の状況を十分に把握することなく大深度の地下工事を行うことは多くの危険をとまなう。特に、地下水位が高い場合、地下水を原因とするトラブルが長期にわたる工事中断を引き起こしたり、大幅な計画変更を余儀なくするという例は数知れない。このような観点から、ここで紹介した事例は同種工事において非常に参考となる。

謝辞

最後に、本現場における地下水処理の検討にあたり、社内外の関係諸氏に多くのご支援、ご助言をいただきました。ここに厚く御礼申し上げます。

<参考文献>

- 1) 例えば、石川 明、高坂信章、三宅紀治、吉森美成：“大規模根切り現場における層別揚水工法の適用例”，清水建設研究報告，Vol.63，1996，pp.43-52。
- 2) 高坂信章、三宅紀治、平野文昭：“大深度地下開発における地下水問題と部分揚水試験法の提案”，地下水学会誌，Vol.32，No.4，1990，pp.209-220。
- 3) 高坂信章、進士喜英、西垣 誠：“井戸損失と井戸干渉を考慮したディープウエルの最適配置計画”，日本地下水学会 1998 年春季講演会講演要旨，1998，pp.66-71。
- 4) 高坂信章、三宅紀治、石川 明：“山留め壁内における複層地盤の水頭低下特性”，第 33 回地盤工学研究発表会発表講演集，1998，pp.1899-1900。
- 5) 山本裕治、岡田敬一、三田 彰：“イントラネットを利用した施工時モニタリングシステム”，日本建築学会大会学術講演梗概集，1997，pp.687-688。
- 6) 山本裕治、三田 彰、岡田敬一：“イントラネットを利用した遠隔計測管理システム”，日本建築学会大会学術講演梗概集，1998，pp.417-418。