

地盤沈下対策を目的とした大規模復水工法

RECHARGE WELL METHOD FOR PREVENTION OF LAND SUBSIDENCE

立川喜吉*・土橋 浩**・大田 弘***・吉本豊彦****

By Kiyoshi TACHIKAWA, Hiroshi DOBASHI, Hiroshi OHTA and Toyohiko YOSHIMOTO

With regard to the construction of the 3rd stage, No.2 Haneda Tunnel for the Metropolitan Expressway Bay-Shore Route, the recharge well method was adopted to prevent the land subsidence caused by lowering of the ground water level due to pumping well. We could decrease the consolidation settlement of the ground within the allowable value by this method. This report deals with the plan, design, maintenance and effect of the recharge well method by monitoring ground water levels.

Keywords: recharge well method, pumping well, dewatering, consolidation settlement

1. はじめに

首都高速道路高速湾岸線(3期)羽田第二トンネル建設工事において大規模な山留め掘削工事を行った。掘削地点においては被圧水頭が高く、盤ぶくれに対する安全率が不足するため、ディープウェルによる地下水位低下工法を採用した。

一方、工事地点に近接して、羽田空港B滑走路および精密機械設置工場群があり、被圧水頭低下による沖積シルト層の圧密沈下を許容値以内に抑える必要があった。この対策として、経済性・工期等を検討し、揚水した地下水を再度地盤に注水する復水工法を採用することとした¹⁾。復水工法は一般的に経済性に優れているが、注水井戸の目づまり問題にいかに対処するかが当工法の成否を左右するといっても過言ではない。この問題に対して、当現場では情報化施工による井戸の機能管理を行い、本工法の当初の目的を達成することができた。

本報文は、当現場における復水工法の、①計画・設計、②施工、③管理方法、④効果等について述べたものである。

2. 概要

(1) 工事概要

本工事は、首都圏の広域的機能の再整備、自動車交通の混雑緩和などの目的で、東京湾岸道路・東京湾横断道路・湾口部横断道路から構成される東京湾環状道路の一環として建設されている首都高速湾岸線(3期)および国道357号のうち、京浜島と羽田空港を結ぶ京浜南運河横断部に位置する羽田第二トンネルの建設を行うものである。

施工方法としては図-1に示すように陸上部は山留め開削工法、運河部は半川締切り開削工法²⁾により大断面の道路トンネルを構築するものである(写真-1参照)。

工事主要数量を表-1に示す。

(2) 地質概要

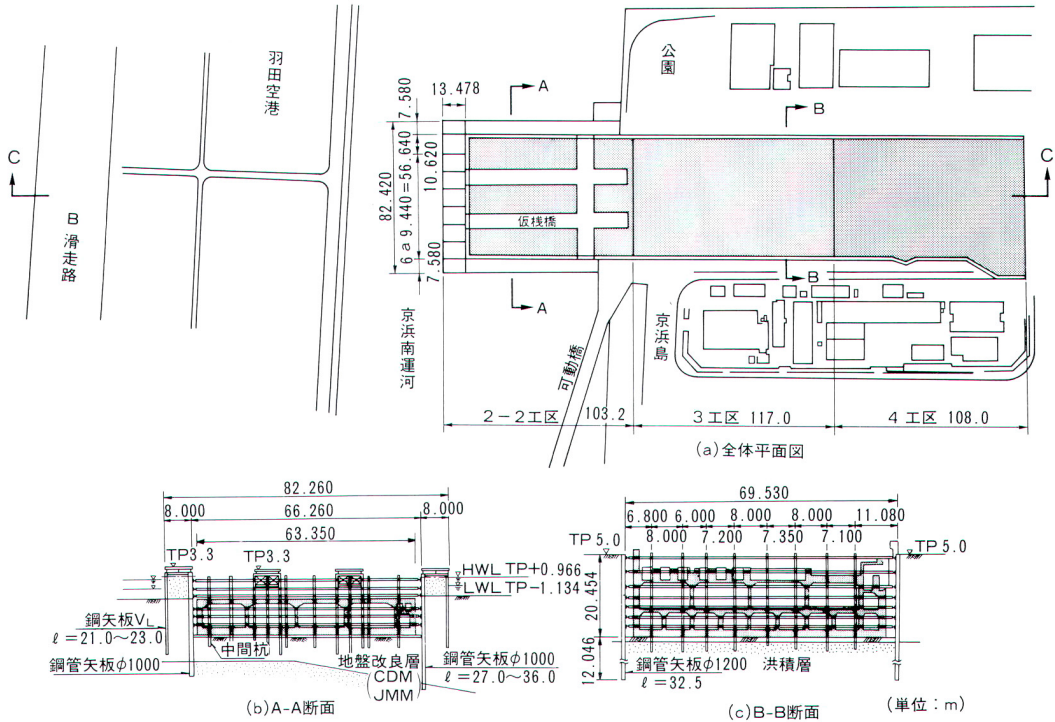
図-2に当地域の地層断面図を示す。N値0~3の軟弱シルト層(A_{c1})がTP-5.0~-19.0mに層厚6.0~8.0mで連続的に分布し、さらに部分的に別の軟弱シルト層(A_{c2})がTP-19.0m以深で最大約15.0mにわたって堆積している。盤ぶくれ防止のために被圧水低下

* 首都高速道路公団湾岸線建設局京浜島工事事務所所長
(〒143 大田区大森北3-43-1)

** 正会員 首都高速道路公団工務部工務企画課
(〒100 千代田区霞が関1-4-1)

*** 正会員 (株)熊谷組土木本部土木設計部第二課主任
(〒162 新宿区津久戸町2-1)

**** 正会員 (株)熊谷組土木本部土木設計部第二課(同上)



図一 工事概要



写真一 全景写真 (1986年6月撮影)

が必要な層は D_{s1} 、 D_{s2} 層 (上部帯水層) および、 D_{s3} 層 (下部帯水層) である。また、被圧水低下による圧密沈下が問題となる層は A_{c1} 層と A_{c2} 層である。

3. 現場試験

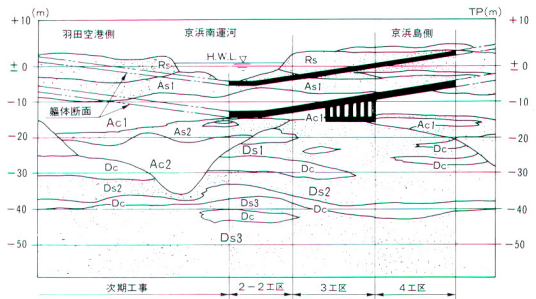
(1) 現場揚水試験

D_s 層の透水性および被圧水頭を調査するため、上部帯水層 (D_{s1} 、 D_{s2})、下部帯水層 (D_{s3}) それぞれについて多孔式現場揚水試験を実施した。

揚水試験は、図一3に示す井戸配置で段階揚水試験、一定量の揚水試験、長期的 (10日間) な一定量の揚水

表一 主要工事数量

工種	数量
掘削	346,200 m ³
埋戻し	66,800 m ³
地盤改良 (CDM)	73,350 m ³
地盤改良 (JMM)	14,600 m ³
躯体コンクリート	93,460 m ³
鉄筋 (SD30)	4,000 t
鉄筋 (SD35)	10,600 t



図二 地質断面図 (C-C 断面)

試験および回復試験を実施した。さらに、潮位変動による地下水位変動量を測定した。データは、Jacob 法・Thiem 法および回復法により解析し、透水係数・貯留係数・影響半径を求めた。

被圧帯水層の水位は、上部帯水層、下部帯水層とも潮位により時間遅れなく応答し、その量は潮位変動量の約

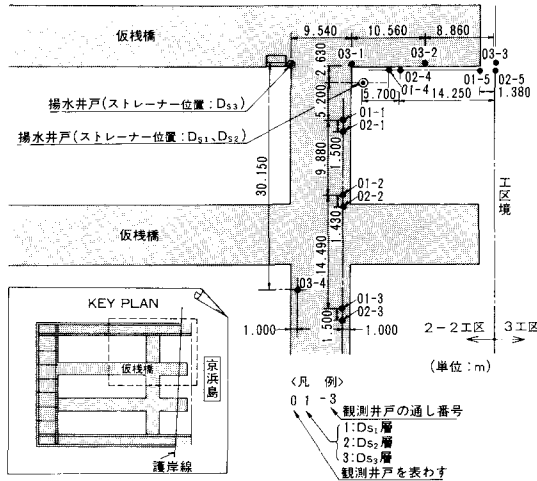


図-3 試験井戸配置

表-2 揚水試験結果 (長期的な一定量の揚水試験)

揚水層	帯水層名	透水係数 (cm/sec)	貯留係数 ($\times 10^{-3}$)	帯水層厚 (m)	透水係数 (cm/sec)	影響半径 (m)
Ds ₁ +Ds ₂	Ds ₁	2.65	1.61	15	1.77×10^{-3}	500
	Ds ₂	4.31	0.125		2.87×10^{-3}	1900
Ds ₂	Ds ₂	16.33	0.285	4	4.02×10^{-3}	5000

※ Ds₁, Ds₂ 層は方向によりパラツキが大きい

25%であった。また、上部帯水層、下部帯水層の初期水位は、満潮時 (TP+0.966 m) においてともに約 TP-2.0 m であった。揚水試験結果の解析にあたっては、潮位変動量による影響を考慮し補正した。

揚水試験の結果から算出した水理定数を表-2 に示す。

(2) 現場注水比較試験

復水工法を実施するうえで最も問題となるのは、注水に伴う井戸の目づまりの発生である。この目づまり現象は、注入水の水質に大きく影響される。そこで、注水井戸を用いて、目づまり対策工の検討用のデータ収集を目的として、水道水と現地地下水による現場注水比較試験を実施した。

試験は、水道水を流量 48 l/min で連続 66 時間、引続いて現地地下水を流量 22~25 l/min で連続 120 時間注水し、井戸内水位の変化を測定した。

注水井戸の目づまりの進行速度については以下に示す比注水量³⁾で評価した。

$$\text{比注水量}(\text{m}^3/\text{min}/\text{m}) = \frac{\text{注入量}(\text{m}^3/\text{min})}{\text{注水井戸内水位上昇量}(\text{m})}$$

現場注水比較試験の解析フローを図-4 に、試験結果を図-5 に示す。

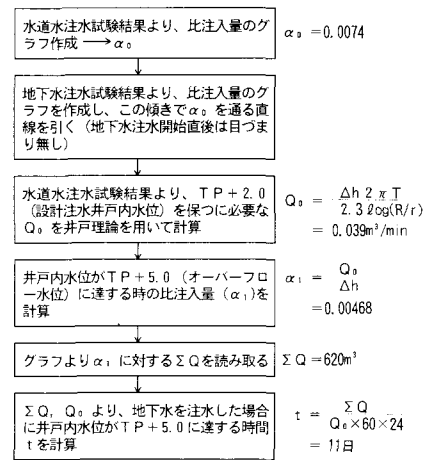


図-4 現場注水比較試験解析フロー

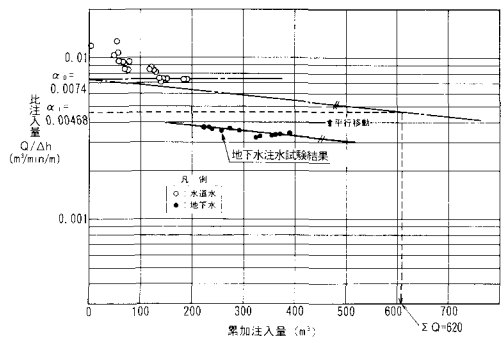


図-5 現場注水比較試験結果

水道水を注水した場合の比注水量 (α) は、累加注入量 (ΣQ) が増えるに従い徐々に低下し、その後一定値となった。これは、注水初期の非定常状態から定常状態に移行したためと考えられ、定常に達した時点での比注水量を目づまりのない比注水量 (α_0) とした。

次に、地下水の注水試験結果から、比注水量の低下速度 ($\log(Q/\Delta h) \sim \Sigma Q$ の勾配) を求め、図-5 に示すように α_0 を原点として目づまりの進行度を推定することとした。なお、地下水注水試験結果のデータが、累加注入量の途中からプロットされている理由は、当初、水道水と同様に 48 l/min で注水を開始したが、途中でオーバーフローしていることが確認され、急ぎよ流量を 25 l/min に低下させたため、この間のデータの信頼性に問題があると考えたためである。

一方、①目づまり速度の注入量依存性、②注水井戸の初期水位の平面的ばらつき、③地層構成の複雑性などを考えると、今回行った試験だけでは注水による目づまりを定量的に求めることは難しいと思われるが、ここでは、復水工法を管理していくうえで逆洗頻度の概略値を事前に把握する必要があったことからこのような検討を行っ

た。

検討の結果、現地地下水を注水した場合、目づまりによって11日後には注水井戸内水位が注水井戸天端（TP+5.0）に達し、オーバーフローすることがわかった。一方、復水工法の実施期間は約14か月間という長期間であるため、注水として水道水を使用することは経済的に困難であった。このため、注水としては揚水した現地地下水を使用せざるを得なかった。この対策としては、注水井戸の機能回復を逆洗により適宜はかりながら注水を行うこととした。

4. 復水工法の計画・設計

(1) 井戸の配置計画

注水井戸の本数・配置は、以下の条件を満足するようにケーススタディーを行い、施工性も考慮して決定した（図-6参照）。

① 工事区域と工場群との官民境界、および羽田空港滑走路での被圧水低下による圧密沈下量の管理値を5cmとする。管理値5cmについては、建物の許容最大沈下量（圧密沈下の場合）の標準値が10cmであること（日本建築学会：建築基礎構造設計指針より）、および精密機械が設置してあることを考慮して決定した。

② 羽田空港B滑走路および精密機械設置工場群の過度な被圧水低下を防止する。

③ 特に、京浜南運河を45°方向に横切る最大厚15mの沖積シルト層（A_{c2}）上下の被圧水低下をできるだ

け防ぐ。

④ 隣接する工事用可動橋梁の基礎は支持杭ではあるが、過大な圧密沈下が発生した場合、ネガティブフリクションによる杭応力の増加、および杭の沈下が懸念されたため、この付近の被圧水低下をできるだけ防ぐ。

また、注水井戸の天端高は、注水効率を上げるためできるだけ高くして高い圧力で注水することが望ましいとも考えられたが、注水井戸が掘削地点に近いことから、高くしすぎると注水井戸と揚水井戸間の動水勾配が大きくなり、パイピングが懸念されたこと、さらに、周辺環境との景観上の調和を考えて、地盤高と同レベル（TP+5.0）とした。

(2) 復水工法の解析

地下水位の変動予測は、地層構成が複雑であるため、帯水層の厚さの変化を考慮できるDupuitの仮定に基づいた準三次元地下水解析により行った。

具体的な解析方法を示すと以下のようである。

① 上部帯水層であるD_{s1}、D_{s2}層は、3工区（図-2参照）で同一層となっているため、解析上の帯水層についても同一帯水層とし、その厚さは（D_{s1}+D_{s2}）とした。下部帯水層であるD_{ss}層については復水工法の対象層でないため計算上考慮していない。

② 透水係数は揚水試験の結果から $k=2.0 \times 10^{-3}$ cm/sとした。

③ 解析領域は、トンネル縦断方向に1300m、横断方向に1100mとした。

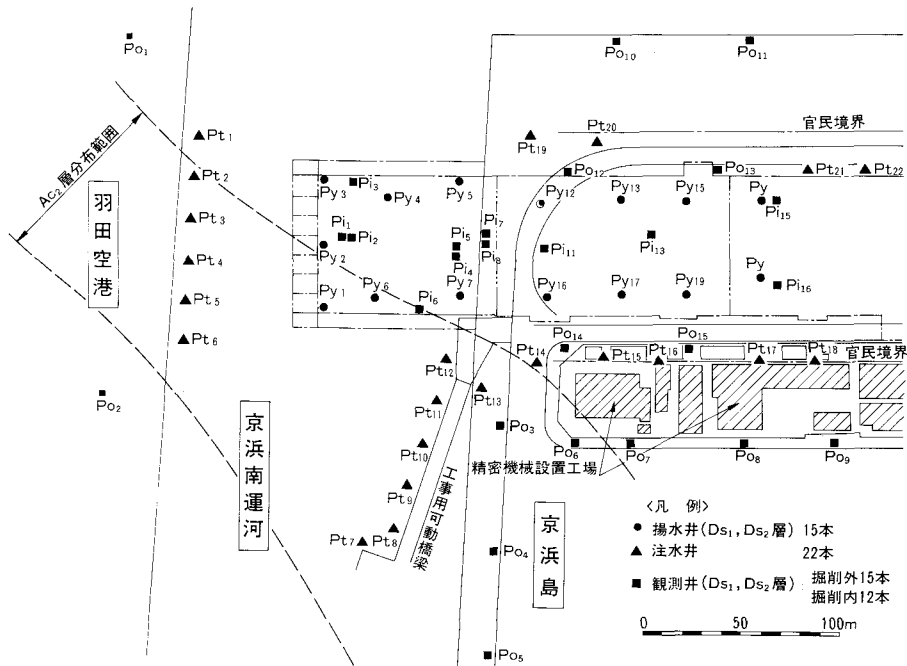


図-6 井戸配置

表一三 計測項目

計測項目	数量	計測頻度
揚水井水位	19	1回/5分*
注水井水位	22	// *
観測井水位	31 (掘削内:16 掘削外:15)	// *
揚水井流量	19	1回/日
注水井流量	22	//
地盤沈下(水準測量)	57	2回/月

*は自動計測(データは2回/日収録)

④ 解析にあたっては揚水井戸、注水井戸ともに水位固定とした。注水井戸については地盤高 TP+5.0 に対して多少安全側をみて TP+2.0 で水位固定、揚水井戸の水位については盤ぶくれに対する安全率 ($F_a=1.2$) を満足するように繰り返し計算を行った。盤ぶくれに対する安全率を満足するような掘削域の必要水位低下量は、地層構成が複雑なため平面的にいくつかのブロックに分けて計算した。

周辺地盤の沈下予測は、地下水位低下量をもとにテルツァーギーの一次元圧密理論により行った。計算方法は、 $e-\log P$ 曲線による方法とした。圧密係数は土質試験の結果から A_{c1} 、 A_{c2} 層でそれぞれ $579 \text{ cm}^2/\text{day}$ 、 $810 \text{ cm}^2/\text{day}$ とした。

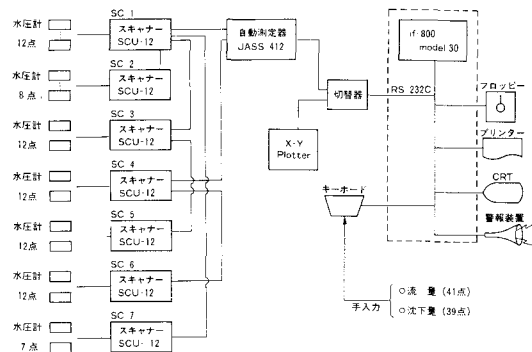
(3) 計測計画

主に盤ぶくれの管理と復水工法の管理を目的に、表一三に示す計測を行った。表中の*印については、パソコンによる自動計測とし、計測は5分ごとに行い、盤ぶくれに対する安全率および井戸内水位をパソコンのディスプレイに常時表示可能とした⁴⁾。盤ぶくれに対する安全率、および井戸内水位が管理値を越えた場合には、計測室および事務所において警報が作動するようにした。

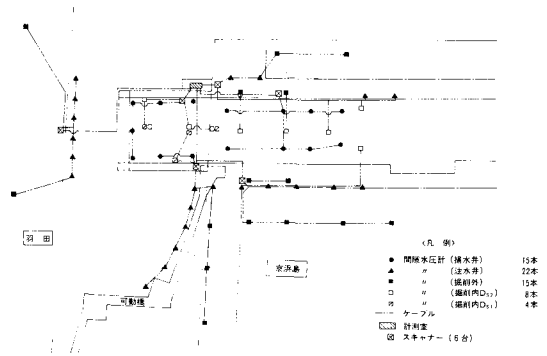
計測システム構成を図一七に、計器設置位置を図一八に示す。

(4) 目づまり対策

注水井戸の目づまりは、表一四に示すような種々の原因が考えられる⁵⁾。



図一七 システム構成図



図一八 計器設置平面図 (上部帯水層)

当現場の地下水は、特に、溶解鉄(Fe)・マンガン(Mn)の濃度が高く ($\text{Fe}=26 \text{ mg/l}$, $\text{Mn}=3 \text{ mg/l}$)、このような地下水がいったん空気に触れると、 Fe_2O_3 、 Mn_2O_3 の形に変化し、これらが注水井戸の近傍地盤に蓄積して目づまりが発生する(写真一2参照)。前述の比較注水試験の結果からは、約2週間で注水井戸としての機能が果たせなくなることがわかっており、事前の目づまり対策を以下のとおりとした。

① 注水中の空気混入を少なくするために、受水槽の位置を注水井戸天端から2m程度高くするとともに、注水井戸内の注水管を井戸内水位以下まで延ばし、注水が注水井戸内を自由落下しないようにした。

② 井戸のスクリーン部の酸化による影響を防止するため、スクリーン部の網を樹脂系にした。

表一四 目づまりの原因

目づまりの原因	概要	対策
井戸掘削中の泥水による目づまり	リチャージ工法の成否は、注水井の機能に左右されるため、施工には最善の注意が必要である。	①井戸施工時の十分な洗浄 ②揚水による洗浄 ③難溶なフィルター材の充てん
注入水中の懸濁物質	懸濁物による目づまりはそれが帯水層の間隙に抑留され、間隙を塞ぐことよって生ずるものであり、懸濁物による目づまりの程度を左右する要因としては、帯水層間隙特性、注入速度、懸濁物の濃度などが考えられる。	①注入水(揚水)は、沈殿槽、フィルターを通した後、注水する。
注入水や帯水層中の微生物の増殖	微生物の増殖による目づまりは懸濁物質による目づまりと関連が深い。懸濁物質は有機性のものと無機性のものに分けられ、有機性の懸濁物質がストレーナー、帯水層内に抑留されると、それを栄養源として微生物の増殖がはじまる。	①フィルターによる洗浄 ②注水温度を高くしない(水槽、配管)
気泡	気泡による目づまりは過飽和の溶存空気が析出し、気泡化するものと、気泡が直接混入し、帯水層の間隙を閉塞するものが考えられる。	①下図に示す様な方法により、できるだけ気泡を入れない構造とする。
溶解鉄、マンガンの酸化及びストレーナー、ケーシングの腐食	注入水に含まれる溶解鉄・マンガンが酸化され、 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 、 Fe_2O_3 、 Mn_2O_3 等の形で注入井の近傍に蓄積され目づまりとなる。注入水に元来、 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} が含まれていなくても、注入井のケーシングおよびストレーナーが酸化され、目づまりが発生することがある。	①ステンレスなど腐食しにくい材質にする。



(a) 洗浄前



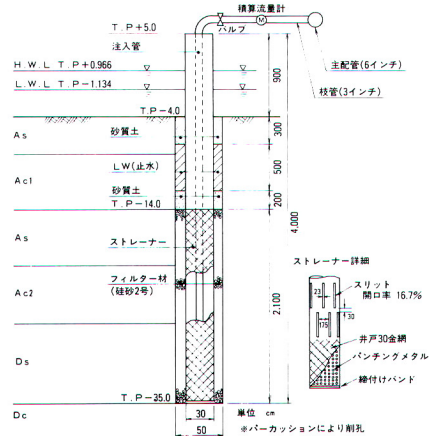
(b) 洗浄後

写真一 流量計翼への酸化鉄の付着

③ 羽田空港側については、注水効率をできるだけ高めるため、注水が空気に触れないように揚水井戸～注水井戸間の配管を直結した。

④ 注水井戸内には、揚水用ポンプを常設し、目づまりによる注水効率が低下した場合は、揚水と注水を繰り返す方法（逆洗⁹⁾）により井戸機能の回復をはかった。なお、逆洗の方法としては文献6)を参考にして、揚水と注水を30分程度繰り返し、揚水が澄んできたことを確認してストップすることとした。

逆洗による注水井戸の管理については6. で詳細に述べる。



図一 注水井戸構造図

(5) 停電対策

停電により、揚水ポンプが停止した場合には、被圧地下水水位上昇に伴う盤ぶくれの危険性があるため、以下の対策を行った。

① 各掘削段階で、各揚水井戸の側面に穴を明け、揚水ポンプが停止した場合にはこれらの穴から地下水が流れ出る構造とした（リリースフェルの機能）。

② 二次電源としてジェネレーターを設置し、3～5分程度で揚水ポンプが再稼働できる設備とした。

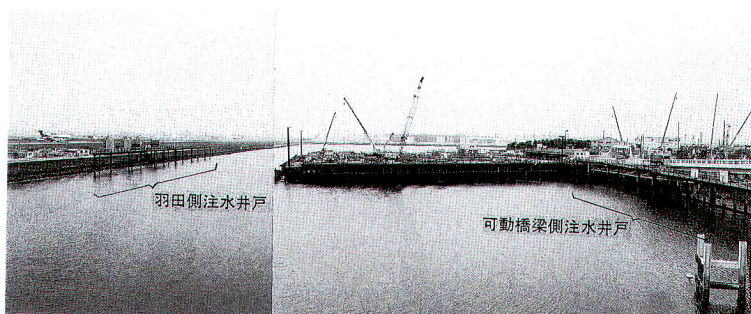
工事中幾度かポンプの故障や停電が生じたが、穴からの湧水により地下水水位の急激な上昇を抑えることができた。

5. 井戸の施工

井戸の構造を図一9に、注水井戸の設置状況を写真一3に示す。揚水ポンプは、3インチ、7.5 kW、45 m高揚程のものを、注水井戸内逆洗用ポンプは、2インチ、5.5 kW、28 m高揚程のものを使用した。

6. 復水工法の管理

注水井戸の目づまり対策は不確実な面が多いため事前



写真一 注水井戸設置状況

の予測のみで対処することは困難である。そこで、復水工法開始後、計測結果をもとに地盤の透水係数、圧密定数などを修正し（以下現状解析という）、次の施工段階における地下水位の変動、沈下量の予測（以下予測解析という）を行い、管理値を越えると予測された場合には計画を変更していく、いわゆる、情報化施工を採用した。

注水井戸の目づまりの回復は、逆洗による方法が一般的であるが、逆洗を用いた復水工法の管理方法は試行錯誤に頼っているのが現状である。この問題に対して、当現場においては、以下に示す方法で対処した（図-10参照）。

① 復水工法開始後、現状の計測結果をもとに現状解析を行い、透水係数を推定する。また、比注入量グラフにより実績注水量から可能注水量および逆洗頻度を推定する。

② 掘削内の必要水位低下量、および設計注水量をもとに周辺水位を予測する（準三次元地下水解析）。それをもとにテルツァーギーの一次元圧密理論により周辺地盤沈下量を計算する。

③ 計算された沈下量と管理値（5cm）を比較し、計算値が管理値を越えると予測された場合には、注水井戸の増設または水質浄化装置の設置の検討を行う。計算

値が管理値以下の場合には、そのまま設計注水量以上で注水を続ける。

④ 日常管理としては図-10中の（イ）～（ハ）の判定条件に従い逆洗を実施する。具体的にはブロックごとの合計注水量がブロックごとの合計設計注水量を下回った場合には、設計注水量を下回った注水井戸についてのみ逆洗を実施する。また、（ハ）で示したように実測水位が許容水位より低下した場合には許容水位を下回った観測井戸の近傍の注水井戸を逆洗する。（ロ）の判定を取り入れた理由は、ブロックごとの合計設計注水量が満足されていれば、問題となるような周辺地盤の水位低下が生じないことが事前の解析により明らかになっていたからである。

（ニ）～（ヘ）の判定に従い、次工程のため揚水量を増加する必要がある場合、または、目づまりが激しく、逆洗で今後の対処が不可能と思われる場合には、再度①からの検討を行う。

7. 復水工法の効果

（1）地下水位低下量

復水工法を採用した場合と採用しない場合の水位低下量（解析値）を図-11に示す。図-11の（b）は、準三次元地下水解析により、最終床付時の揚水量、注水量および周辺水位の実測値に計算値ができるだけ一致するように透水係数をパラメーターとして繰り返し計算した結果である。この解析から推定された上部帯水層の透水

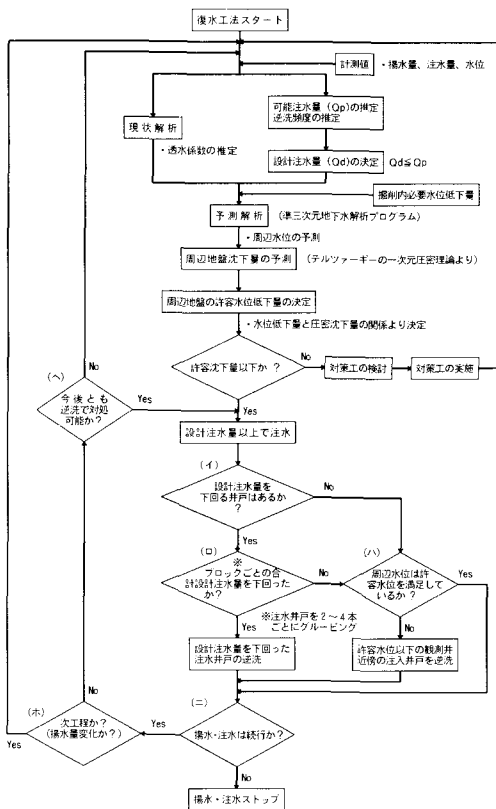


図-10 復水工法管理フロー

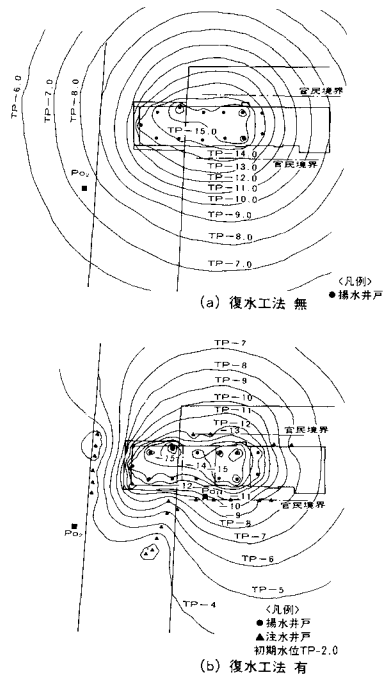
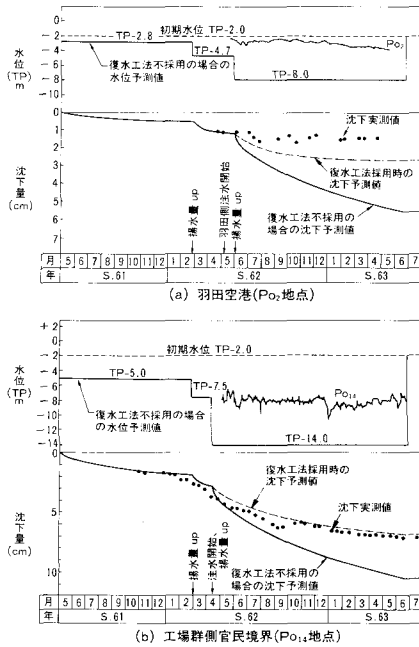


図-11 地下水位低下量（最終床付時）



図—12 地盤沈下量（予測値は最終床付け時（62年10月）における解析結果）

係数は、 $k=1.24 \times 10^{-3}$ cm/s であった（揚水試験より求めた透水係数は、 D_{s1} 層で 1.77×10^{-3} cm/s, D_{s2} 層で 2.87×10^{-3} cm/s）。

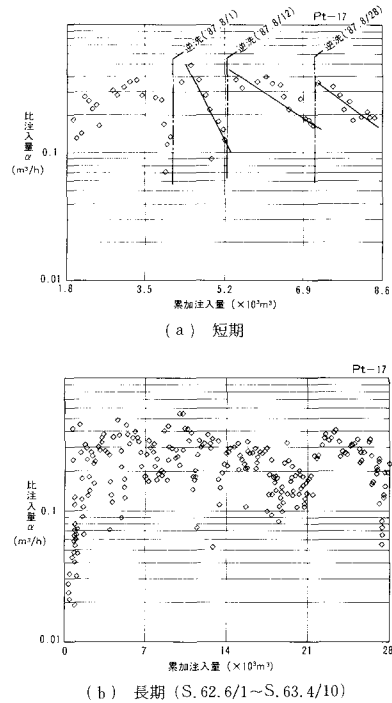
一方、(a) は、(b) で推定した透水係数をもとに復水工法を採用しなかった場合の水位を計算した結果である。(b) の結果は実測水位とほぼ一致しており、(a) と (b) の差が復水工法による効果を表わしている。

(2) 地盤沈下量

羽田側および工場群側官民境界での沈下量の実測値、および解析値を図—12 に示す。

工場群側官民境界の最終沈下量は、約 7.0 cm であった。官民境界と山留め壁の距離は 20 m と近いため、実測沈下量には山留め壁の変形による影響が含まれる。山留め壁の変形による地表面沈下量を Peck の方法⁷⁾（地盤の種類、掘削深さ、山留め壁からの距離により沈下量を推定）、丸岡らの方法⁷⁾（山留め壁の最大変形量、掘削深さ、山留め壁からの距離により沈下量を推定）、および国鉄指針による方法⁸⁾（山留め壁の変形面積と背面沈下面積が等しいとして算定）により推定すると約 2 cm であることから、圧密沈下量としては 5 cm 程度と思われる。実測沈下量（7 cm）は管理値（5 cm）を多少越える結果となったが、施工途中（最終掘削時）で行った工事完了時の沈下予測値（約 7 cm）が許容最大沈下量（10 cm）以下であったこと、また、周辺の工場に影響が出ていなかったことから特別な対策は施さなかった。

羽田側については最終沈下量は約 1.5 cm であった。



図—13 注水井戸の効率低下

工場群側比べて沈下量が小さい理由は、揚水地点から距離が離れているため水位低下量が少なかったこと、羽田側配管ルートを通じた効果により当ルートの注水井戸の効率の低下を他の注水井戸のそれに比べて小さくできたことによると考えられる。

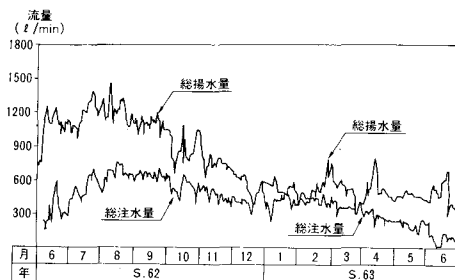
(3) 目づまりの速度と逆洗頻度

工場群側注水井戸の注水量と水位を比注入量グラフにより整理した結果を図—13 に示す。

1~2 週間間隔で逆洗を繰り返すことにより井戸機能を持続することができ、結果として注水井戸の増設などの対策工を実施せずに済んだ。

(4) 総揚水量と総注水量の関係

2-2 工区の総揚水量と総注水量の経時変化を図—14 に示す。総揚水量に対する総注水量の比率は 50~90% であった。



図—14 総揚水量と総注水量の経時変化（2-2 工区）

8. 今後の課題

今後の課題としては、以下に示すことが考えられる。

- ① Deep Well により揚水した地下水の酸化防止方法。
- ② 酸化した地下水の経済的な浄化の方法。
- ③ 目づまりを起こしにくい、または回復が容易な注水井戸の構造。
- ④ 目づまりの程度の確認方法と逆洗実施時期の決定方法の改善、および効果的な逆洗の方法。
- ⑤ 目づまり現象の事前予測の方法。

9. おわりに

復水工法は、一般的に経済性に優れているが、注水井戸の目づまりの予測方法、対策等は今後とも研究していかなければならない課題である。当現場においては、情報化施工による管理手法により、逆洗を繰り返し実施し、沈下量を許容値内に抑えることができた。

本文が類似工事の参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 土橋 浩・上田敏雄・大田 弘・吉本豊彦・生駒尚己：地盤沈下対策としての復水工法の実施例，第43回年次学術講演会講演概要集，pp.216～217，昭和63年10月。
- 2) 林 紀夫・関口隆史・岸 研司：半川締切りの施工例―首都高速，京浜南運河―，基礎工，pp.44～52，1987年4月。
- 3) 地下水ハンドブック，建設産業調査会，p.1297，昭和54年9月8日。
- 4) 大田 弘・吉本豊彦・生駒尚己ほか：山留め・地下水情報化施工管理システムの開発，土木学会第44回年次学術講演会，1989年10月。
- 5) 地下水ハンドブック，建設産業調査会，pp.1293～1302，昭和54年9月8日。
- 6) 長井 茂・村下敏夫：人工地下水における注水井戸の目づまりと井戸能力の回復（妻沼実験地の例），工業用水，第170号，pp.48～54，昭和47年11月。
- 7) 山留め設計施工指針，日本建築学会，pp.57～58，1988年。
- 8) 掘削山留工設計指針（案），社団法人日本鉄道施設協会，pp.107，昭和54年。

(1989.12.5・受付)