

III-420

沈下防止を目的とした復水工法の実施例：事前検討・試験工事及び実施結果

（株）竹中土木 正員 森嶋 章 瀬下 正 波多野 敬
竹中技術研究所 正員 本城 勇介

1. まえがき

本報告では、開削工事の掘削に伴い地下水水頭低下工法としてディープウェル工法を採用した際、工区に近接した精密環境を要求される工場の沈下防止対策として復水工法を併用した工事例について述べる。⁽¹⁾ 最近復水工法は、下水道料金節約のため、揚水を地下土層に還元するためしばしば用いられている。しかし、復水工法を沈下防止のため適用し成功した例は決して多くはないようである。その原因としては、復水工法を持つ予測の難しさ（透水量係数の推定、注水井戸効率の予測、井戸の目詰り現象の原因究明の不十分）が挙げられると考えられる。本報告では特にこの点を考慮し、復水工法実施に当り事前検討→試験工事→本工事という各ステップで、このような不確実性にどのように対処したかを述べる。

2. 工事概要と事前検討

図-1に今回の計画の概要と、工区の土層断面図を示した。検討の対象となったのは、S3、S4層の水頭低下によるC3層の圧密沈下であり、これを防止するため工場前でS3、S4層に注水を行うことにより水頭を現状に維持し、沈下を防止するため復水工法を実施することにした。

試験工事前に行った事前検討結果を表-1に示した。復水ラインでの必要注水量は、工区付近の平面形状を模擬したFEM解析により、山留め壁背面の水頭をG.L.-17.0m、工場下の水頭をG.L.-7.5m以上に保つという条件下で求めた。表-1中に示したFEMによる定数Cとは、与えられた形状下（平面形状、滞水層厚など）で必要な水頭分布を得るための確保すべき注水量を算定するためFEM計算結果に基づいて設定した定数である。必要注水量 Q_r は、この定数Cと透水係数 k 及び滞水層厚 b の積として求まると仮定し、以後の計算を簡便化した。

設定した定数中特に透水係数は粒度分布に基づき経験式によって推定されたものであり、また注水井戸効率 α は井戸の掘削法、地盤条件など多くの未解明な要因に依存しており、特に不確実性の高い定数と考えられた。従って表-1の試算の精度が十分であると到底判断できなかった。このような状況は現実の地下水水理の問題では一般的であり、試験工事による予測精度の向上は工法の適用性判断のため不可欠である。

3. 試験工事

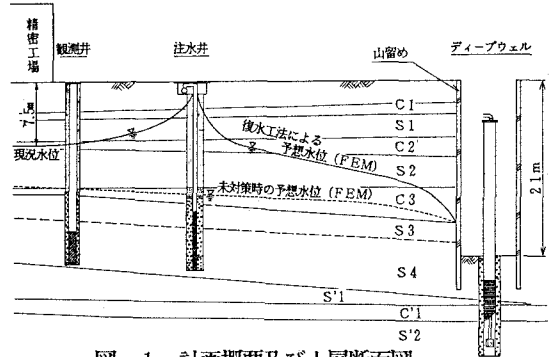


図-1 計画概要及び土層断面図

表-1 試験工事前の復水工法検討

必要注水量 Q_r (FEM解析結果に基づく)	
$Q_r = Ckb = 414$ (ℓ/min)	
可能注水量 Q_p	
$Q_p = 2\pi\alpha k b N \frac{\Delta h}{\ln(R/r_w)} = 25N$ (ℓ/min)	
ここに、	
k : 透水係数	3.4×10^{-3} cm/sec ($2.1 \times 10^{-2} \sim 6.0 \times 10^{-3}$)
b : 透水層厚	7 m (4~10 m)
α : 井戸効率	0.3 (0.05~0.5)
R : 影響半径	50 m (10~100 m)
r_w : 井戸半径	0.075 m
N : 井戸本数	
Δh : 注入水頭 (自然水頭で約6.0 m)	
C : FEMによる定数 ($1.7.4 \times 10^3$)	

試験工事は工場前の予定復水ラインの一部を用いて行った。注水井戸を3m間隔で4本設け、このほか3本の観測井を設けた。注水井は当初清水掘りを試みたが孔壁が安定せず、やむを得ずベントナイト泥水を使用した。注水はポンプにより加圧できる構造となっている（また注水には清純な工業用水を使用し、井戸の目詰りの危険を最小限度とすることとした）。

表-2に試験工事で実施した内容、目的及び結果を示した。単井注水試験は、地盤の水理定数と加圧注水の効果の把握を目的として行った。図-2に各観測井における水頭上昇量と経過時間の関係をプロットし、これよりJacobの方法によって透水量係数を求めた。滞水層厚を7mと仮定した場合、各観測井で得られた k は注水井に近接した順に 1.27×10^{-3} 、 1.38×10^{-3} 、 1.85×10^{-3} cm/sec となり、注水井より隔たるほど大きくなった。

この原因としては、i) 地盤の不均質性の反映 ii) 孔壁に付着していると考えられるベントナイトの影響 iii) 井戸近傍の乱流状態による見掛け上の k の低下などが考えられる。

ここでは以上の理由から、広い範囲の代表値である $1.85 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ を設計値として採用した。また、単井の場合、井戸効率は0.15と推定され、事前検討時に期待された0.3に達しなかった。

図-3に注水量と注水圧の関係を、単井注水、群井注水両者の場合について示した。何れの場合も加圧することによって注水量を増すことができる。また2本6m間隔と4本3m間隔の群注水井によって注水量に差異のないのは、井戸の干渉効果のためである。なお図-4において何れの場合も、計測値から外挿される直線が原点を通過しない理由については、ベントナイト泥水の孔壁への付着が疑われる。（土質学会刊「土質試験法」P. 353参照）

図-4に6m隔たった2本の注水井より 0.5 kg/cm^2 の加圧下で、24時間注水を継続した場合の水頭上昇の様子を示した。また合わせて群井戸公式⁽²⁾を用いて計算した水頭上昇の理論値を示した。 $k = 1.8 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ 、 $R = 50 \text{ m}$ と仮定した場合、実測値と理論値は良い一致を見た。同様に、3m間隔4本の注水井より注水を行った場合にも、実測値と理論値は良い一致を見た。すなわち、井戸の干渉効果も群井戸公式を用いる事によって評価できる。以上の結果を踏まえ、表-2に示した計算により6m間隔に2本の注水井を配置し、 0.5 kg/cm^2 程度で加圧注水を行うことに決定した。

4. 本工事の結果

3カ月のディープウェル稼働期間中、工場では変状は全くなく復水工法は有効であったが、一時注水のための加圧は許容できる最大限まで達した。施工期間中の揚水量は $120 \sim 150 \text{ l/min}$ であったのに対し、注水量は $90 \sim 100 \text{ l/min}$ であり、予想値の半分程度であった。これは先に述べた通り透水係数を高めに設定した事、試験工事区域の水理特性が全工区のそれを必ずしも代表していない事などに原因があったと思われる。

5. 結論

当工事の経験により、復水工法では効率の良い井戸を確保することが極めて重要であり、従って井戸の掘削方法には十分な注意が必要であることが分かった。

本工事で、削孔方法にもう少し注意を払えば、注水管理は井戸効率の向上によりかなり余裕のあるものになったと考えられる。一方、復水工法は現状では不確実性の高い工法と考えられがちであるが、十分に計画された試験工事によりその確実性を向上させることできる。

〔参考文献〕(1) 中島 信 (1988)「地下鉄工事におけるリチャージ工法の施工」基礎工；6月号

(2) 久保田敬一ほか「透水—設計へのアプローチ」鹿島出版会 pp.39-41

表-2 試験工事実施内容と結果

実施試験名	目的	結果	図
単井注水試験	1. 水頭上昇の経時変化に基づき、透水量係数 ($T=kb$)、貯留係数 (S)、透水係数 (k) を推定する。 2. 注水量と注水圧の関係を求める。	$T = 1.30 (\text{cm}^2/\text{sec})$ $S = 2 \times 10^{-3}$ $k = 1.8 \times 10^{-3} (\text{cm/sec})$ 加圧する事によって注水量を増加できる。	図-3 図-4
群井注水試験 2本6m間隔 4本3m間隔	1. 注水量と注水圧の関係を求める。 2. 注水による水頭上昇効果の確認 3. 井戸の干渉効果	加圧する事によって注水量を増加できる。 得られた水理定数を用いて計算すると、測定値と計算値はほぼ一致する。 干渉効果のため2本6m間隔の井戸と、4本3m間隔の井戸の総注水量に大きな差はない	図-4 図-5

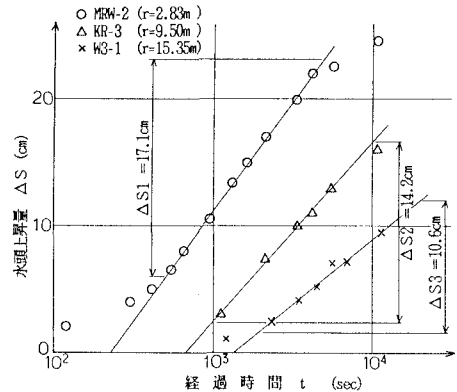


図-2 経過時間と水頭上昇量の関係

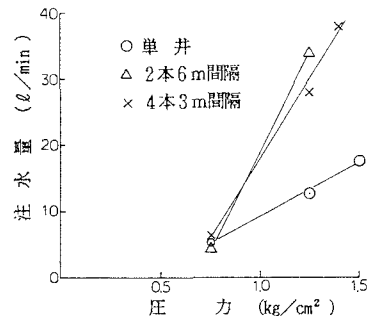


図-3 注水圧と注水量の関係

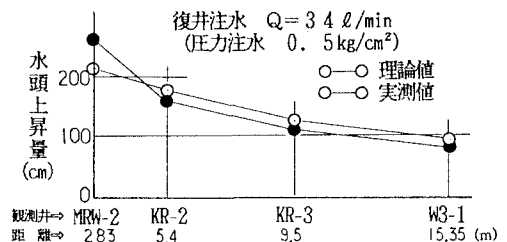


図-4 上昇水頭線図