

水位低下工法に伴う地表面沈下とその予測数値解析

基礎地盤コンサルタンツ（株）	阪上最一
基礎地盤コンサルタンツ（株）	柴 錦春
基礎地盤コンサルタンツ（株）	榎本雅夫
基礎地盤コンサルタンツ（株）	吉丸哲司

1. はじめに

一般に、 $N > 50$ 以上の洪積砂地盤は、いわゆる工学基盤であるため、これまで、変形特性を知る必要性は少なかったと言えよう。しかし、G.L.-50mを越える大深度地盤の利用が進むにつれて無視し得ないケースも生じて来ている。東京近郊の洪積砂層に、ディープ・ウェルを併用して、G.L.-51.4mまでケーソンを沈設することから、水圧低下による周辺地盤の沈下が懸念された。本研究は、この大深度の立抗掘削に伴う地下水低下工法による地表面沈下を詳細な土質調査結果¹⁾に基づき数値解析により予測したものである。沈下予測精度に影響する洪積砂層の変形係数は、変形時のひずみレベルを考慮し事前に実施した揚水試験結果の貯留係数から算定した。その結果、地表面沈下を精度よく予測することができた。また、工事終了後、計測結果より洪積砂中に連続して存在した薄い粘性土層の地盤沈下への影響も検討している。

2. 水位低下工法と原地盤の変形特性

(1) 水位低下工法

立抗建設のためケーソンを沈設するが、G.L.-47.6m以深の設置からは、立抗内の圧気低減の補助工法として28日間5mの水位低下が計画された。立抗近くの観測井戸での水位低下計画を図-1に示す。立抗と水位低下のためのディープ・ウェルを含むモデル地盤を図-2に示す。ディープ・ウェルによる揚水は先端のストレーナー（スクリーン）より行った。水位低下時には、G.L.-30m付近に堆積する厚さ4~8mのレンズ状の洪積粘性土層N3cが、その下層の洪積砂層N4s, N5sで生じる水圧低下の上層への伝達を妨げる働きをすることが期待された。このため、水位低下による地盤沈下の主原因は、洪積砂層N4s, N5s層の圧縮とN3c層の圧密と考えられた。

(2) 土質調査と地盤状況¹⁾

ボーリングと標準貫入試験が行われ、地盤の変形特性を調べるために不攪乱試料が採取された。そして、標準圧密試験および三軸圧縮試験（CD）が、それぞれ、粘性土と砂質土に対して実施された。また、原位置での地盤の変形性を調べるため各土層でプレシオ・メーター試験が実施された。さらに、設置されたディープ・ウェルを利用した揚水試験が実施された。

水位低下により圧縮が生じるN4s, N5s層の変形特性は、三軸圧縮試験（CD）、プレシオ・メーター試験結果から、平均的に見れば、プレシオ・メーター試験結果のオーダーと概ね一致し、約 $E = 6,000$ (tf/m²)であることが分かった。但し、プレシオ・メーターの値は、経験的に E_{50} に相当することが多いとの事例から、ひずみレベルの違いを考慮すれば（道路橋示方書、下部構造）、地下水低下時には小さなひずみレベルで変形が生じるため、これらの4倍程度大きいもの

Comparison between the measurements and the numerical analyses of ground surface settlement induced by dewatering: Sakajo, S., Chai, J. C., Enomoto, M. and Yoshimaru, T. (Kiso-jiban Consultants Co., Ltd.)

と推定された。そこで、揚水試験結果から得られる貯留係数 $S^{2)}$ から N4s, N5s層の変形係数 E を次式により計算した。

$$E = 3 \cdot (1 - 2\nu) \cdot \frac{b}{S} \quad (1), \quad \nu = \frac{K_0}{1 + K_0} \quad (2)$$

ここに、 K ：体積圧縮係数、 b ：帯水層厚さ、 ν ：ポアソン比、 K_0 ：静止土圧係数で0.5と仮定。
この結果、平均値でN4s層が $E=28,000$ 、N5s層が $E=21,000$ (tf/m^2) であり、室内試験・原位置試験結果の約5倍大きい値であると評価された。これは、揚水試験は広域な（試験結果か揚水試験の影響半径が500～800mにも及ぶ。）地盤の応力～変形と浸透流との連成応答を調べる試験であり、地盤を乱すことなくその空間的な代表値として、レベルの小さなひずみ領域での値が求められたためと解釈される。以上の検討結果から得られた土質定数を表-1にまとめて示す。

3. 地盤変状予測解析と再解析

これらの原地盤の変形性の評価結果に基づき、地盤を線形弾性体と仮定した応力～変形と浸透流の連成を考慮する有限要素法を用いて、水位低下に伴う地表面沈下の予測解析を行った。また、工事後に計測結果の分析に基づき解析条件を変更した再解析を行った。

3.1 解析モデルと解析

解析に用いた有限要素法は、Sadu and Wilsonの方法³⁾に従いモデル化したコードを用いた。水位線より上の不飽和地盤は挙動は、大西・村上の方法⁴⁾に従ってモデル化している。要素は、1次のアイソパラメトリック要素を用い地盤をモデル化した。図-1に今回の解析で仮定した土質調査結果¹⁾に基づく地質断面図から作成した立抗を通る東西方向断面のモデルを示した。予測解析では、N4s層とN5s層との間に存在するN4c層の連続性が確認できなかったため、この層はモデル化していない。また、図-2に作成した有限要素分割図を示す。境界条件は、変形に関しては、左右の側方で水平変位固定とし、底面で鉛直・水平変位固定とした。また、水圧に関しては、左右の側方および底面で水圧固定とした。

まず、所定の水位低下計画に従い水位低下開始より28日間の地盤変状の予測解析を行った。図-1に、立抗近くの観測井戸で測定された水位低下量を、図-4の下段に、実際に与えられたディープ・ウェル内の水位低下量を示す。これらの図から明らかのように、低下水位は、水

表-1 解析に用いる土質定数

地層名	土質	単位体積重量 γ (tf/m^3)	N値	E (tf/m^2)	ν	k^{**} (m/sec)
Bs	砂	1.85	4	300	0.33	1.0×10^{-5}
Lm	砂	1.45	3	200	0.33	1.0×10^{-8}
As	砂	1.80	14	1,000	0.33	1.0×10^{-5}
Ac	粘土	1.50	3	200	0.33	5.0×10^{-10}
N1s	砂	1.85	29	2,000	0.33	1.0×10^{-5}
N2s	砂	1.90	50	3,500	0.33	1.0×10^{-5}
N1c, N3c	粘土	1.50	13	900	0.33	2.8×10^{-10}
N3s	砂	1.85	57	4,000	0.33	3.2×10^{-5}
N4s	砂	1.90	400	28,000	0.33	5.8×10^{-5}
*N4c	粘土	—	—	—	—	—
N5s	砂	1.90	300	21,000	0.33	5.2×10^{-5}

*：再解析でモデル化された薄い粘性土層

**：不飽和時にはサクシオンに応じ透水係数を低減する。

位低下開始より14日までは計画水位に従うが、水位低下開始より15日後に水位低下が停止され水位が回復している。これは、N4s層下の薄い粘性土層N4c層をケーソンが破り、その際に、空気圧が砂層N5sをブローし、ディープ・ウェル内で噴発が生じたためである。図-1に示すようにケーソンの沈設が25日目に完了しその後断気している。このように、予測解析条件は実際と異なっていたため、工事後に改めてこの粘性土の薄層N4cをモデル化し図-1の実測の水位低下工程に従い再解析を行いそれらの解析への影響について検討した。

3.2 解析結果と実測値との比較

(i) 予測結果と実測値との比較

図-4に立抗より西へ17m離れたJ地点における、予測解析結果に基づく地盤沈下の管理値と実測された沈下量の経時変化を示す。同図の上段には地表面沈下を、中段にはG.L.-30m (J₃点)での地盤沈下を、また、下段にはディープ・ウェル内の水位低下を示している。さらに、図-5にJ地点での地表面傾斜の管理値と計測結果との比較を示す。

図-4の上段と中段より、全水位低下工程において、管理値は、地表面沈下および地盤沈下とも実測値を過大評価しているものの、J₃点での地盤沈下に関しては、噴発が生じる前の時点まで、実測値とよい一致を示していることが分かる。また、図-5より、地下水低下に伴う地表面の実測傾斜(M)は、予測解析結果に基づく一次管理値 -0.67×10^{-3} (rad)の約1/3と小さく、予測値が実測値を過小評価したことが明らかとなった。

(ii) 再解析と実測値との比較

図-6に立抗より西へ10m離れたI地点とJ地点における、地表面沈下およびG.L.-30m (I₃, J₃点)での地盤沈下の再解析値と実測値との比較を示す。図より、この粘性土の薄層N4cをモデル化した解析結果は、予測解析結果に比べ、地表面沈下および地盤沈下が大幅に減少し著しい改善が見られ、地表面沈下に関しては、解析結果は実測値をほぼ説明していることが分かる。しかし、I₃, J₃点での地盤沈下に関しては、解析結果はまだ実測値を過大評価していることが明らかとなった。これは、本解析が二次元解析であるため、水位低下の変形への影響を過大に評価したためと考えられる。

4. まとめ及び今後の課題

以上のことから、地下水変動に伴う変形解析においては、砂層に狹在する粘性土層のモデル化やひずみレベルに応じた地盤の変形性の評価が重要であることが明らかとなった。今後、さらに、三次元解析を行い検討を進めてゆきたい。

5. 謝辞

本解析結果に対して御議論頂いた東京大学龍岡文夫教授に記して深謝の意を表します。

【参考文献】

- 1)成廣明雄・森田大樹・酒井運雄・阪上最一・山野賢三：よくしまった洪積砂層の変形係数について，第45回土木学会年次学術講演会講演概要集，pp.Ⅲ746-747，1990。
- 2)例えば、土木学会編：技法堂出版，土木工学ハンドブック，pp.288
- 3)Sandu, R. and Wilson, E. L.: Finite element analysis of flow in saturated porous media, Proc. ASCE, Vol.95, EM3, pp.641-652, 1969.
- 4)大西有三・村上毅：有限要素法による地盤の応力・変形を考慮した浸透流解析，土木学会論文報告集，No.298, pp.87-96, 1980。

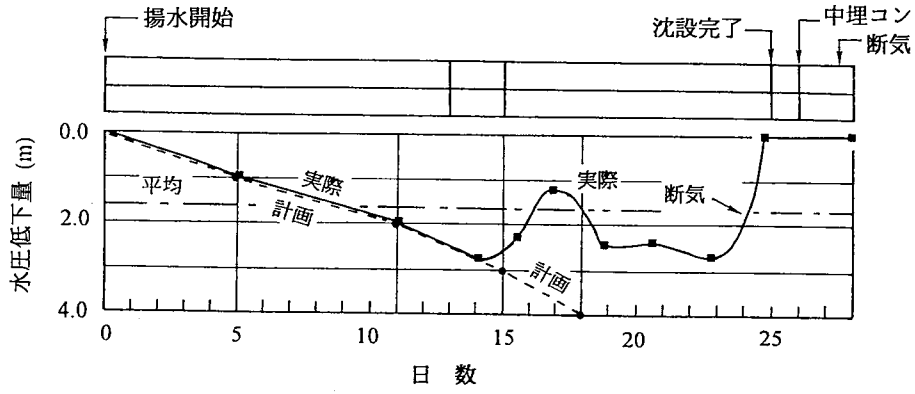


図-1 水圧低下計画と実際の水位低下量

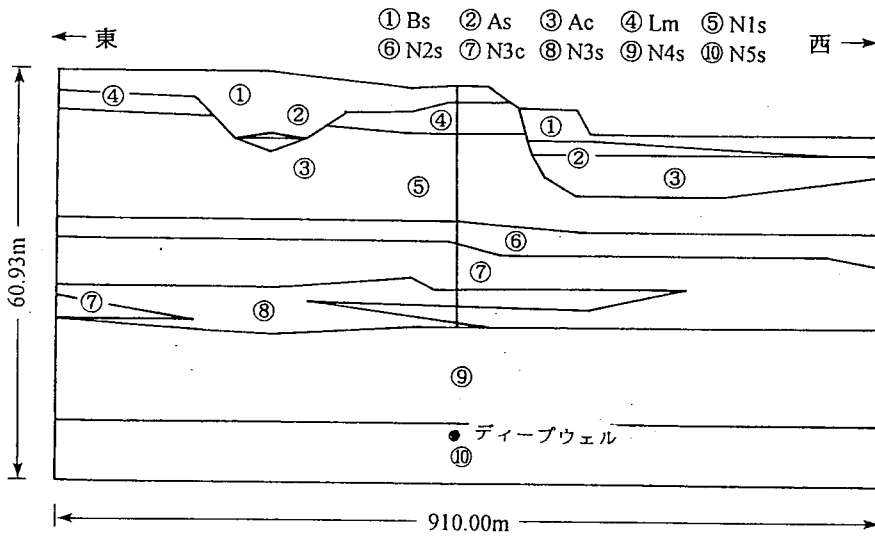


図-2 モデル地盤

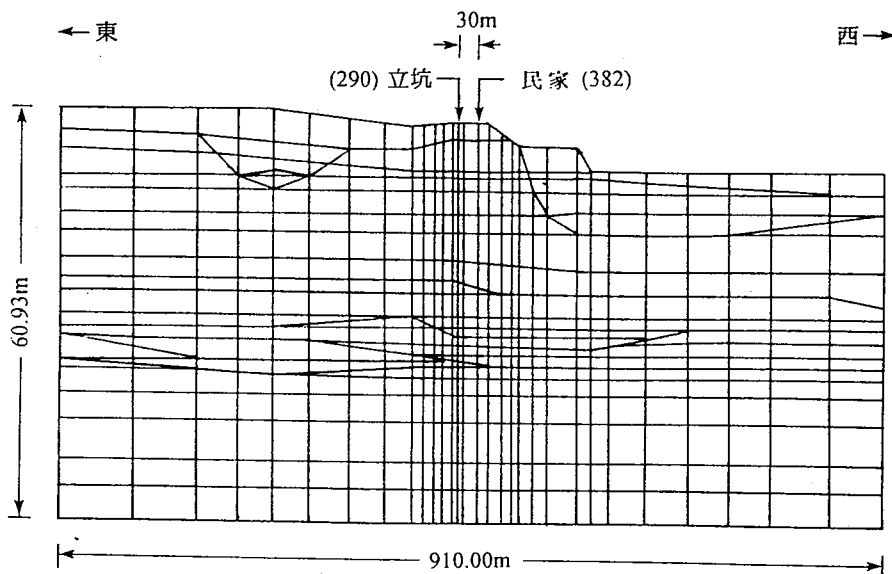


図-3 有限要素分割図

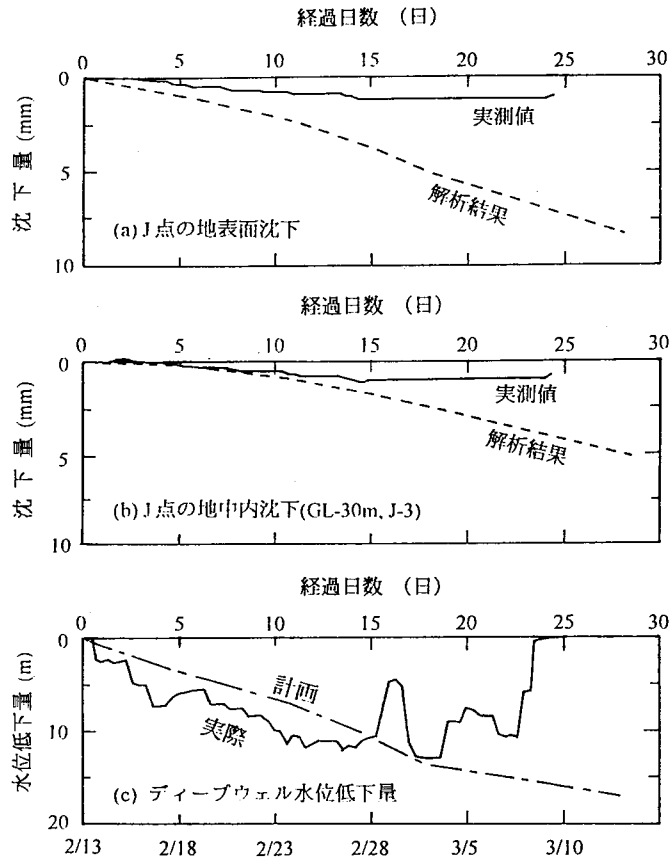


図-4 地盤沈下とウェル内水位低下量

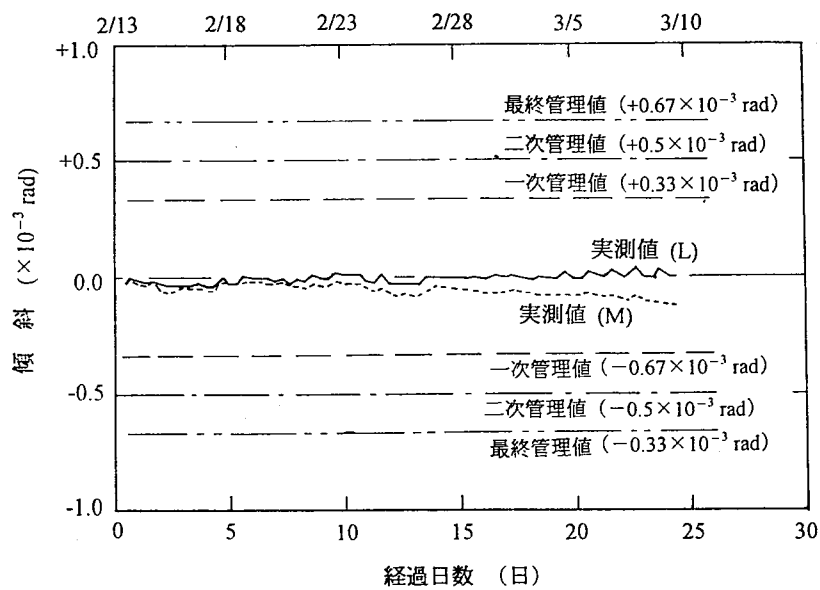


図-5 地表面の傾斜

I2, J2 : GL-42m, I3, J3 : GL-30m, SF : 地表面

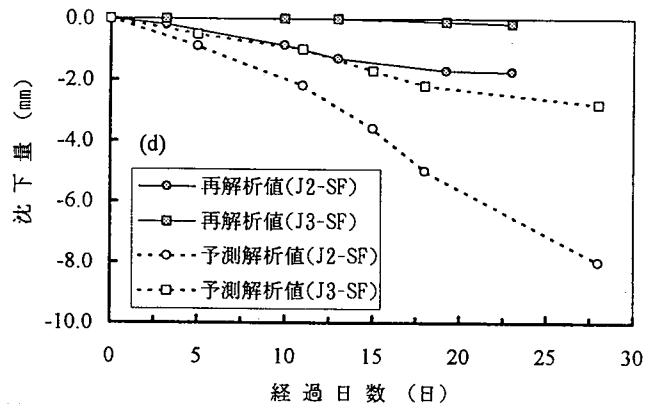
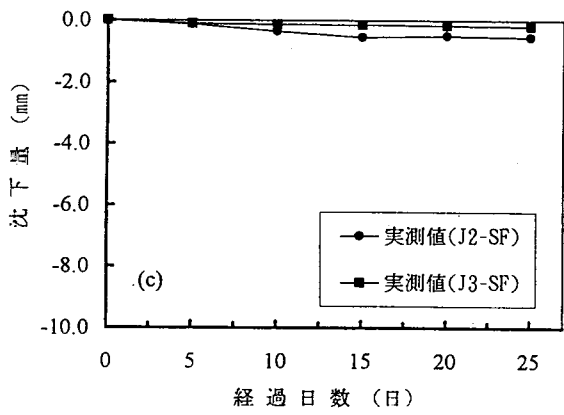
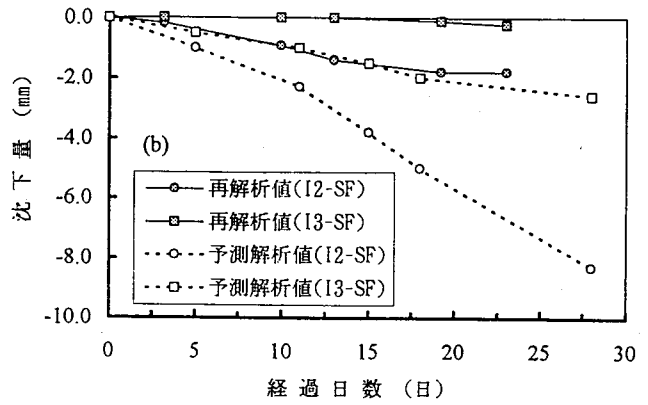
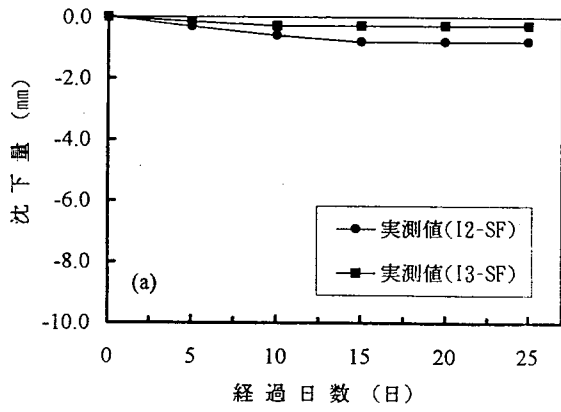


図-6 地盤沈下の実測値と解析値の比較