

地下水流動シミュレーションに基づく 掘削影響評価システムの構築

DEVELOPMENT OF EXCAVATION EFFECT EVALUATION SYSTEM BASED ON GROUNDWATER FLOW SIMULATION

今井 久¹・岩瀧清治²・吉本靖俊²・樋口晃²・江口正勝³

Hisashi IMAI, Kiyoharu IWATAKI, Yasutoshi YOSHIMOTO, Akira HIGUCHI and Masakatsu EGUCHI

¹正会員 株式会社間組 技術・環境本部 (〒305-0822 茨城県つくば市荻間515-1)

²正会員 国土交通省 九州地方整備局 (〒812-0013 福岡市博多区博多東2-10-7 福岡第2合同庁舎)

³正会員 株式会社間組 九州支店 (〒812-8562 福岡市博多区下呉服町1-1 日通ビル)

When construction of underground facilities were planned at the sites where the ground is composed of soft sediments with high water level, groundwater management plans should be made to keep the excavation construction site safe and dry, and to avoid harmful settlement around the construction site. In such case, efficient and quick design tools are needed to estimate the construction influence and counter-measure effect on groundwater level and on settlement of the field. We developed a simple settlement evaluation system utilizing the data set of MODFLOW groundwater flow simulation. The settlement estimation is executed quickly and easily using commercial software "MS Excel". The system is applied to a road tunnel construction site. The outline of the system and the results applied to an actual tunnel construction site are presented.

Key Words : *settlement, groundwater level, deep well, excavation, Alluvium soft sediments, numerical simulation*

1. はじめに

わが国の大都市の多くは河口付近の沖積層上に存在し、地下水位が高くその地質は粘土層を有し軟弱であることが多い。従来このような都市部での掘削工事では掘削部の安全性確保とともに周辺地盤の地下水位への影響やそれに伴う地盤沈下対策が重視され、工事計画や仮設設計に際し重要課題とされてきた。一方、コスト競争の激化、工程短縮要求など、このような重要課題に対し、より高精度で迅速な対応が望まれている。

著者らは沈埋トンネル陸上接続部の開削工事に際し、各種対策工の影響・効果の評価をより効率的に実施すべく、地下水流動シミュレーションを中心として各種地下水対策の影響や効果の評価をすると共に、地下水シミュレーションに際して構築する水理地質構想モデルのデータセットを利用して3次元的地質構造を考慮した地盤沈下量を簡易に推定するシステムを開発し、本工事の対策工立案に適用した。本論文は、開発したシステム概要とその適用状況、適用結果について報告するとともに、今後の課題、改善点等について示す。

2. 掘削影響評価システム

(1) システム概要

本システムは市販の地下水流動シミュレーションソフトVisual MODFLOW¹⁾をベースに施工対象エリアの地質構造モデルを作成し、各種地下水対策を反映した地下水流動シミュレーションを実施すると共に、作成したモデルデータや地下水流動シミュレーション結果のデータを市販の表計算ソフト (Microsoft Excel) に展開し、モデル各要素の沈下量を算定、鉛直方向に各要素の沈下量を足し合わせることで地表沈下量を簡易手法により算定するものである。

Visual MODFLOWは、米国地質調査所により開発された公開プログラムMODFLOWに、プリ・ポスト機能を付加しパッケージとして商用化したもので比較的安価なソフトである。世界的に多くの地下水技術者に利用されている。

MODFLOWは、ダルシーの法則を仮定した水の質量保存則を有限差分法に基づいて数値的に解く3次元の地下水流動解析プログラムである。差分法のため、モデル形状の表現は格子状の制約を受け、FEMのように自由のモデル形状を反映することは難しい。一方で容易に要素分割、

結合が可能であり作業効率は高い。また、モデル内での井戸の設定や透水係数などの物性値の設定も容易で迅速な対応が可能である。

このシステムのオリジナリティーとしては、市販の Visual MODFLOW と表計算ソフトを利用し、地下水解析から沈下量算定までを簡易に評価できるようにする考え方、Visual MODFLOW データ構造を理解し沈下量算定に必要なデータを表計算ソフトへ展開できるインターフェイスの開発、表計算ソフト内での沈下量算定ロジックにあると考える。

(2) 沈下量算定手法

沈下量は、地下水位低下に伴う有効応力の増分から、各要素の変形特性値、層厚から各要素の沈下量を独立に算定する。沈下量は 式(1)により算定する。式(1)では粘土の沈下量算定で使用される体積圧縮係数 m_v を示している。本システムでは、粘土のほか砂質土の沈下量も考慮できるように、物性区分で砂質土を識別し、砂質土に対しては体積圧縮係数の代わりに、変形係数や N -値に応じて設定可能な砂の圧力-間隙比曲線⁴⁾ から体積圧縮係数 m_v 相当値（変形係数の逆数、圧縮指数 C_c と初期圧力より与えられる体積圧縮係数³⁾）を設定できるようにしている。

$$S = m_v \cdot H \cdot \Delta p \quad (1)$$

ここで、 S ：沈下量、 m_v ：各要素の体積圧縮係数、 H ：各要素の高さ（層厚）、 Δp ：有効応力の増分である。地表面での沈下量は柱状に鉛直方向に連なる各要素の沈下量の総和として次式で与えられる。

$$S = \sum_i S_i = \sum_i m_{v_i} \cdot H_j \cdot dp_j \quad (2)$$

この算定イメージを図-1に示す。この沈下量算定シ

ステムでは沈下に伴う水平方向への変形は考慮しておらず鉛直方向だけの沈下変形を扱う。このため簡易沈下量推定システムと称す。

本システムの妥当性に関しては、3次元で評価が容易で他方法との沈下量算定結果比較の可能なモデルを想定し、本システムを適用、その計算上の妥当性を確認³⁾している。

(3) 沈下量算定表計算ファイル

沈下量算定表計算ファイルを図-2に示す。当ファイルは下記5枚のワークシート

- ①使用手順を示すシート
- ②物性値を入力するシート
- ③MODFLOWからのデータを貼り付け計算するシート
- ④地表面沈下計算のためデータを並べ替えるシート
- ⑤砂の圧力-間隙比曲線のデータシート

から構成される。

必要な物性値は物性区分番号、水中重量、 N -値、体積圧縮係数である。沈下量算定は物性値の入力、MODFLOWからのデータ抽出・貼り付け、データの並び替えにより、地表面沈下量分布として表面沈下並び替えシートに沈下量評価地点の x,y 座標と算定された沈下量とが与えられ、必要に応じて沈下量コンタや測線上の沈下量分布として利用できる。

対策工の検討は、開削状態の継続期間を考慮して定常解における沈下量算定を基本としている。

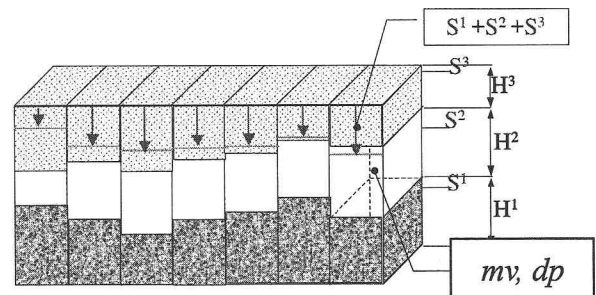


図-1 沈下量算定イメージ

簡易沈下算定システム.xls															
1	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
2	①	@土性入力シートに土性、地表面標高およびモデル下端標高を入力													
3	②	@ModFlow結果入力シートのA~E列に、セル重心xyz座標、ポテンシャル、土性番号を入力													
4	③	A~E列全体を選択して、データメニューの並び替えを実行													
5		範囲の先頭行...データを選択													
6		最優先されるキー...列A 降順													
7		2番目に優先されるキー...列B 降順													
8		3番目に優先されるキー...列C 降順													
9	④	A列(x座標)、B列(y座標)、C列(上層累計沈下量)、D列(最下層識別子)迄													
10	⑤	@地表面沈下並び替えシートにコピー&ペースト(形式を選択して貼り付け...値)													
11	⑥	A~D列全体を選択して、データメニューの並び替えを実行													
12		範囲の先頭行...データを選択													
13		最優先されるキー...列D 降順													
14	⑦	最下層識別子が1の行がアウトプット													

セル重心座標	セル重心座標	セル重心座標	ポテンシャル	土質	増加	厚
X	Y	Z	P		cm	
1						
2						
3	398.0676	390	1.10486	-1.05		
4	398.0676	390	-1.55039			
5	398.0676	390	-4.07065			
6	398.0676	390	-6.5459			
7	398.0676	390	-9.7756			

セル重心座標	セル重心座標	上層累計沈下量	最下層識別子
X	Y	Smv(cm)	
1			
2			
3	398.0676	390	0.00
4	398.0676	390	0.00
5	398.0676	390	0.00
6	398.0676	390	0.00
7	398.0676	390	0.00
8	398.0676	390	0.00
9	398.0676	390	0.00
10	398.0676	390	0.00
11	398.0676	390	0.00
12	398.0676	390	0.00
13	398.0676	390	0.00
14	398.0676	390	0.00

図-2 簡易沈下算定システムファイル

3. 適用サイトの概要

(1) 工事概要

本工事は、新若戸道路（港湾整備事業1, 181m）のうち若松側沈埋函接続部に位置する陸上トンネル区間120mの2連ボックスカルバート（幅約36m、高さ約11m）を開削トンネル形式で構築する工事である。開削工事は、護岸部から約150m、幅約40m、深さ約15～20mの掘削となる。図-3にサイトの平面図を示す。図中○は揚水井、◎は観測井、▼は注水井、■は層別沈下計設置位置を示す。

(2) 地質

図-4に地質断面図を示す。現地は海岸に隣接した埋立地で、地質は下位から基盤礫岩（Icg）、基盤風化部（W-Icg）、洪積砂礫層（Dsg）、沖積粘土層（Ac）、細砂下層（As2, As3）、細砂上層（As1）および表土・埋土からなる。基盤風化部（W-Icg）および洪積砂礫層（Dsg）は被圧地下水を有し、護岸から約200m程度沖合の海水と通じ、海水位より高い位置で水位変動²⁾している。基盤礫岩には破碎帯が存在し、掘削時の揚水量、地下水位低下量の予測・把握を難しくしている。

表-1に地質区分と物性値を示す。

表-1 地質区分と物性値

物性区分 番号	土質	記号	透水係数 (m/s)	水中密度 (g/cm ³)	N値	変形係数 (kN/m ²)	m _v (m ² /kN)
1	埋め土	B	1.0E-05	1.0	35	1.0E+04	-
2	細砂上層	As1	7.0E-06	0.9	22	1.1E+04	-
3	細砂下層	As2,3	4.0E-06	0.9	10	1.1E+04	-
4	沖積粘土層	Ac	1.0E-09	0.6	6	6.0E+03	2.0E-04
5	砂礫層	Dsg	1.0E-05	1.0	28	1.1E+04	-
6	風化基盤礫岩	W-Icg	5.0E-05	1.5	50	9.0E+04	-
7	基盤礫岩	Icg	5.5E-06	1.5	50	2.5E+06	-
8	遮水壁	RW	1.0E-10	2.0	50	2.5E+06	-
9	破碎帯	DZ	5.5E-06	1.2	50	9.0E+04	-
10	洪積粘土層	Dc	1.0E-09	0.7	28	1.1E+04	-
13	底盤改良部	Imp	5.0E-07	1.0	50	1.1E+04	-

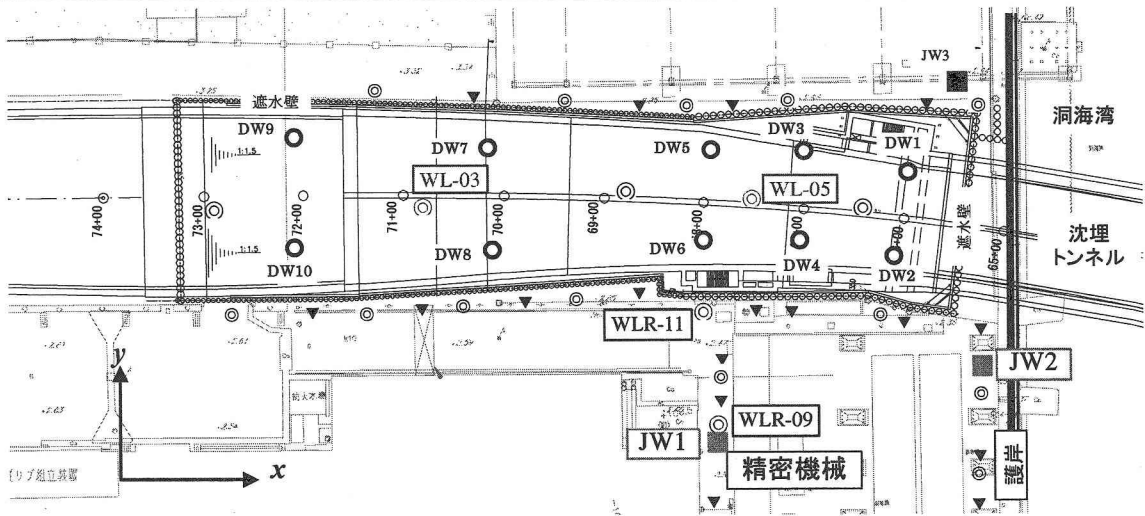


図-3 対象サイトの平面図

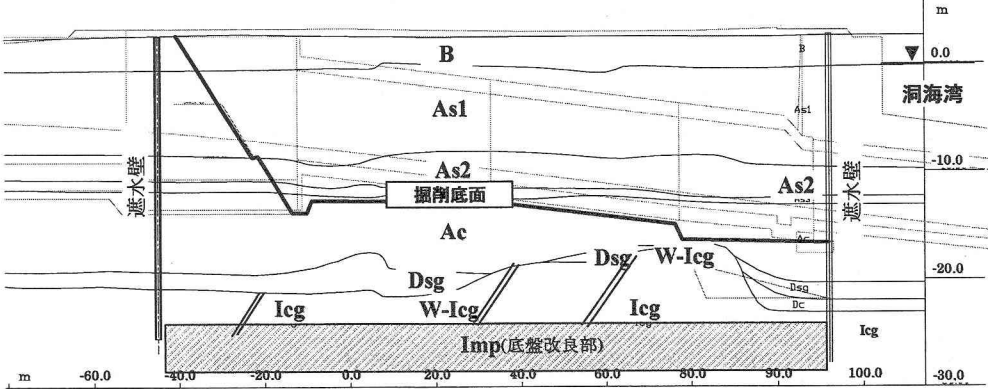


図-4 対象サイトの地質構造

(3) 本工事で必要な対策検討課題

図-4の断面に示すように掘削底部は粘土層 (Ac) にあり、粘土層の下には透水性の高い洪積砂礫層²⁾があり、砂礫層の被圧水による粘土層の盤ぶくれ対策が必要となる。対策としてはこの被圧水を井戸により排水して圧力低下することとしている。一方、この掘削部に隣接し、精密機械基礎や天井クレーン基礎を有する工場が存在、被圧水の排水に伴う地盤沈下を生じると精密機械での生産やクレーンの作動に影響を与える。このため、排水に伴う掘削部に隣接する周辺の地盤沈下予測とその対策が必要となる。また、基盤岩は風化部、破碎帯を有し、上面の形状は図に示すように不規則であり透水性状が把握し難い。また、基盤上にある砂礫層の基盤形状の影響で不規則な分布をしており同様に透水係数設定が難しい。

4. 対策工の検討

(1) 対策工

主な対策工としては①掘削部の盤ぶくれ対策としてディープウェル設置の検討、②掘削部揚水による周辺地盤の沈下対策がある。ここでは、掘削内安定化のための水位低下が確保された状態で周辺に与える沈下の影響とそれを抑制するための対策工の比較結果を示す。比較は開発したシステムで算定した沈下量分布として示す。

主な対策工としては

- ①底盤全面の透水性を低下させる底盤改良
- ②遮水壁根入長を長くするカーテングラウト
(精密機械側だけに施工、図-3の中紙面下側)

③リチャージウェル外周部の地下水保持を検討し、①②③の組み合わせやそれぞれの設置位置、数量の変化に関して多くの検討を実施した。

(2) 地盤沈下量推定結果

各対策工の沈下量への影響評価結果に先立ち、対策工を実施しない場合の表層面の沈下量分布コンタを図-5に示す。図-5に示すa-a'断面での沈下量分布を図-6に示す。

沈下量の算定に際しては、表-1に示すパラメータを設定する。粘土層の体積圧縮係数は、室内圧密試験結果から $m_v=2 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{kN}$ を設定している。基盤岩等はほとんど変形をしないとして非常に小さい値を設定している。埋め土、細砂層、砂礫層は表-1に示す変形係数の逆数を体積圧縮係数に相当する変形パラメータとして設定している。

図-5では掘削部を中心に沈下量が大きく、離れるにつれて沈下量は小さくなる。掘削部に接した箇所では14cm程度の沈下量となっている。海側の沈下量は海からの地下水の供給により沈下量は陸側より小さくなっている。

図-6のa-a'断面での沈下量分布では、①無対策での沈下分布、②無対策で粘土層だけの沈下量を示した分布、③底盤全面を深さ5mで透水係数を $5 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ を目標に改良したケース、④遮水壁の根入れ長をカーテングラウト

トにより伸ばしたケース、⑤底盤改良に加え掘削部外周にリチャージ（井戸17本、平均間隔約25m、注水量 $28.8 \text{ m}^3/\text{day}$ ）をしたケースでの推定結果を示す。

5. 計測値とシミュレーション結果

実際の工事は先の結果を参考に、底盤改良に加え掘削部外周にリチャージをすることとした。掘削内には粘土層下部被圧砂礫層を対象に10本のディープウェルを設置し揚水した。以下に対策工実績と測定された地下水位、層別沈下計による地表、砂層（上）、砂層（下）、粘土

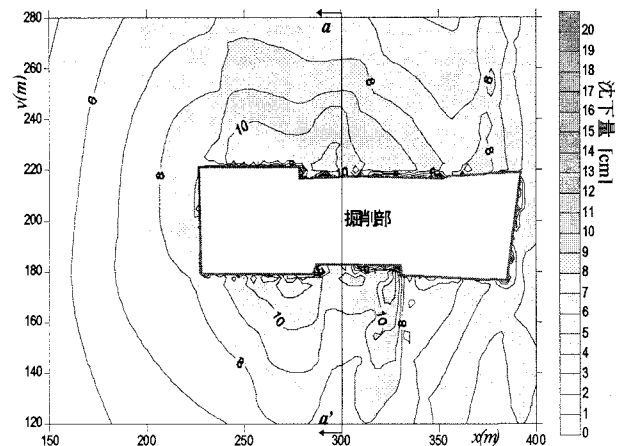


図-5 対策工を実施しない場合の表層面の沈下量分布コンタ

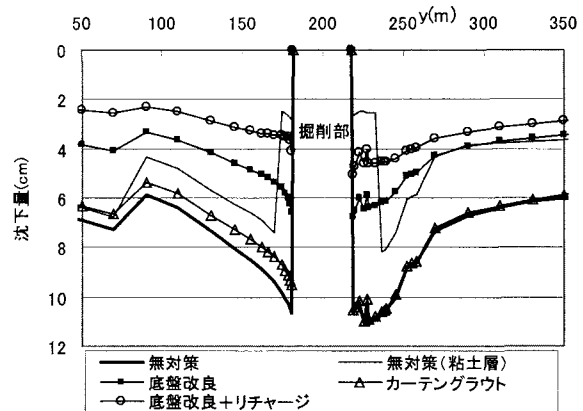


図-6 a-a'断面での沈下量分布

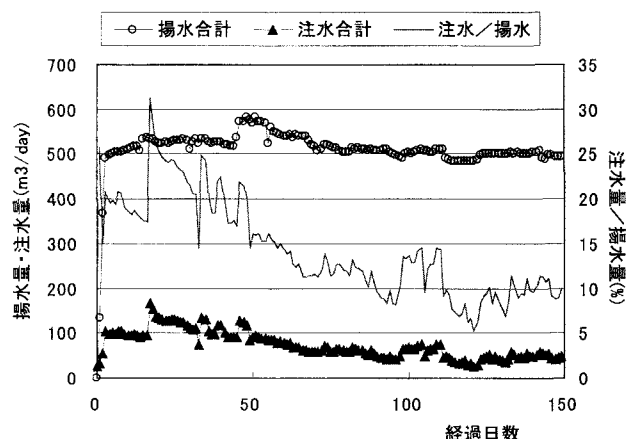


図-7 全揚水・注水量と注水／揚水の比率

層における沈下量を示す。また、合わせて揚水、注水実績を地下水シミュレーションに反映し、開発したシステムでの沈下量算定結果を実測値と合わせて示し考察する。

(1) 揚水・注水実績

揚水量と注水量の実績を図-7に示す。また、注水量の揚水量に対する比率（右軸）を合わせて示す。注水量は初期に揚水量の1/5程度であるが、時間の経過と共にその比率は低下している。これは目詰まりによると考えられる。

(2) 計測値とシミュレーション

揚水量と注水量の実績をシミュレーションに反映させ、解析的に揚水量と注水量による地下水シミュレーションを実施し、その結果から開発したシステムによる沈下量の算定と実際の沈下量との対比を実施した。以下に、実測された地下水位とシミュレーションによる地下水位の比較、実測された沈下量とシミュレーション・簡易沈下量算定システムによる沈下量の比較結果を示す。

a) 地下水位

地下水の実測値とシミュレーション（解析）結果の比較例を図-8に示す。WL-03、WL-05は掘削部の揚水している砂礫層の水位、WLR-09とWLR-11は掘削部外側の精密機械のある付近での砂礫層の水位である。また解析で、対策前とは底盤改良までの段階で潮汐応答などから同定した各地層の透水係数を設定した解析結果、対策後は底盤改良後に揚水試験を実施し設定した透水係数を適用した解析での結果である。水位変化傾向はある程度、解析により表現されているが、WL-05を除き1m～6mと水位が異なっている。対策前に同定した透水係数での解析と対策後同定した透水係数設定では後者のほうが実測に近く、より底盤改良の影響を反映した透水係数設定ができていたことが示唆される。

WLR-09とWLR-11は掘削部外側の精密機械付近にあり水位低下による地盤沈下が懸念される注目観測点である。解析との対比ではWLR-09は解析の水位低下が実測値よりも大きく、WLR-11は実測値の水位低下が解析よりも大きく、水位予測に関してはWLR-09では安全サイドの予測、WLR-11では危険サイドの予測であったといえる。

b) 沈下量

沈下量は図-3に示すJW1、JW2に設置された層別沈下計で測定され、JW1、JW2とも図-9に示す4つの測点、地表および砂層・粘土層の中央での鉛直変位を示している。その測定結果を図-10、図-11に示す。各測定点間の沈下量の差は2点間の層厚の変化を示している。

JW1を見ると粘土層の沈下が大きい、また粘土層と砂下層との差も大きく、粘土層の沈下の寄与が大きいものと考えられる。

JW2では地表と砂上層の差が大きく、大半が埋土層の沈下量と思われる。揚水は粘土層の下で行っているため埋土層の沈下は揚水以外の要因が考えられる。

図-12、図-13には開発したシステムの算定方法を非定

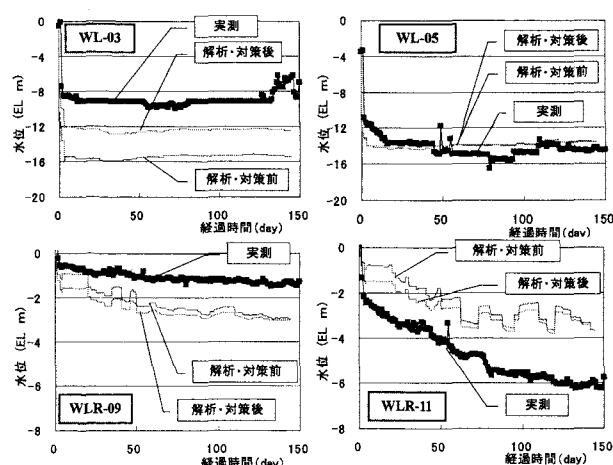


図-8 地下水の実績と解析

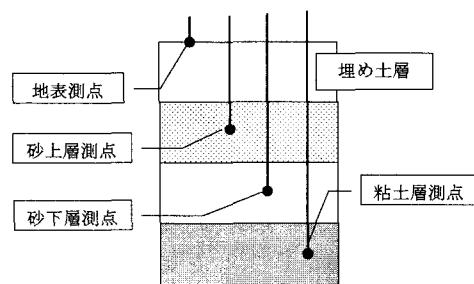


図-9 層別沈下計設置位置概要

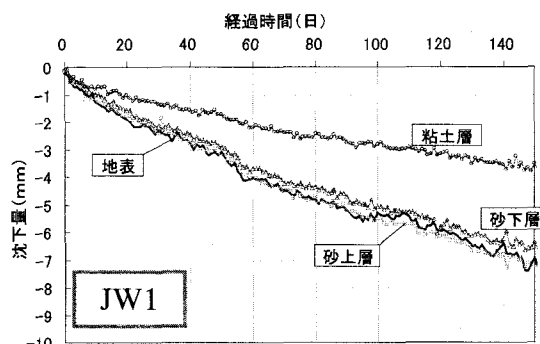


図-10 JW1での沈下量測定結果

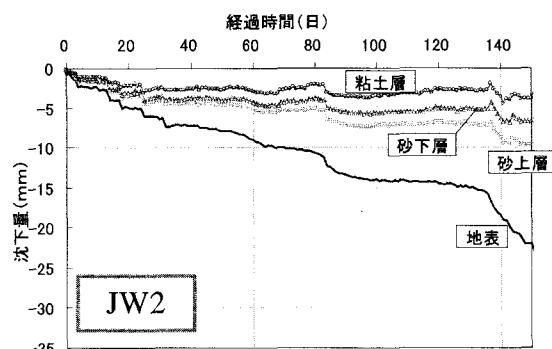


図-11 JW2での沈下量測定結果

常な水位低下に応用し、沈下量の経時変化を算定した結果を実測値と共に示す。今回開発した沈下量算定システムは定常の地下水シミュレーション結果から沈下量を算定する目的で開発し、非定常現象への適用には現象的にやや無理があるが、その適用性を知るため適用した。

算定結果は実測値と比較し、およそ2倍の大きな値を示している。これは、揚水初期に大きく沈下量が発生していることから、表層の埋め土、細砂層の水位低下に伴

う沈下量を大きく算定していることに原因がある。つまり埋め土、細砂層に設定した変形のパラメータ（表-1に示す変形係数の逆数）が大きすぎたことを示唆している。この変形係数は山留めの水平方向の変位量計算に適用したものであり、確認が必要であるが鉛直方向の変形係数が水平方向よりも大きい可能性が考えられる。

粘土層についてもやや沈下量推定システムによる沈下量が大きくなっている。粘土層に対し非定常の水位低下量（有効応力増分）に線形関係とする沈下量算定には今後検討の余地があると考えられる。

図-14には、地下水シミュレーションによる粘土層からの排水量と粘土層の体積減少が等しいとして算定したシミュレーションからの沈下量と粘土層の沈下量実測値の対比を示す。体積圧縮係数から算定される沈下量よりも実測値に近い値を示し、粘土層に対しては有効な沈下量算定方法と考えられる。

本システムの実用に際しては上述のように体積圧縮係数の設定が重要となる。体積圧縮係数の設定に際しては、揚水初期における沈下量測定値から体積圧縮係数を見直すなど、実用に際しての適切なリスク回避措置が必要と考えられる。

6. おわりに

海岸に隣接する開削トンネル工事に際して、掘削底盤安定のための地下水揚水計画と揚水に伴う周辺への水位低下、地盤沈下の影響を抑える対策について地下水シミュレーションを中心に検討した。ここでは、作業の効率化、対策工選定・意志決定の迅速さを目的に地下水シミュレーションのために構築したモデルデータを地盤の沈下量算定に適用することを試みた。

対策工検討のプロセスにおいては開発したシステムが有効に機能し、対策工の検討、評価を効率的に進めることができた。初期の水利地質モデル構築には地質調査結果からのモデル化、原位置での水位観測結果との対比によるモデルやパラメータの修正に時間を要したが、各対策工の効果評価に際しては整備したシステムが機能し、所期の目的が達せられた。

沈下量算定システムの算定結果の妥当性に関しては、算定結果が実測値よりも大きく、やや過大評価している傾向がみられた。この原因としては、①本システムは本来定常状態で沈下量を算定するシステムであり、対象とした実測の沈下量は非定常過程にあること、②設定した変形パラメータの誤差などが挙げられる。

図-14に地下水シミュレーションの粘土層からの排水量から沈下量を算定した結果を示しているが、これは図-12、図-13で示される沈下量よりも実測に近い値を示す。これは、今後当システムの改良として、粘土層に関しては排水量のデータを反映させて沈下量を算定すると、非定常過程へも精度良く展開できる可能性の示唆と考えられる。

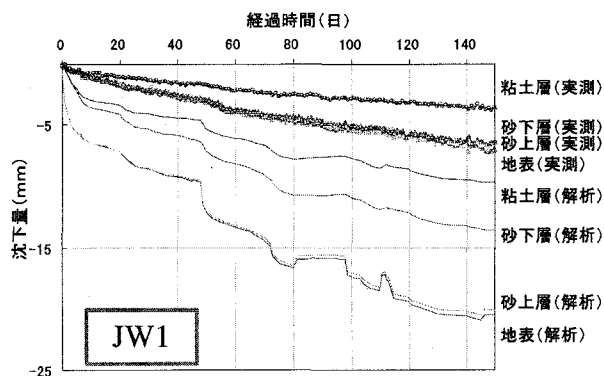


図-12 JW1での沈下量とシステム算定結果

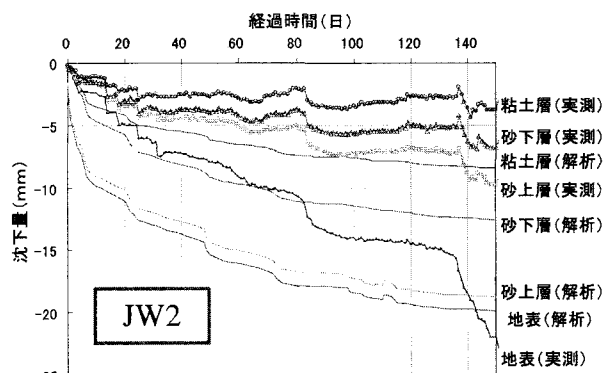


図-13 JW2での沈下量とシステム算定結果

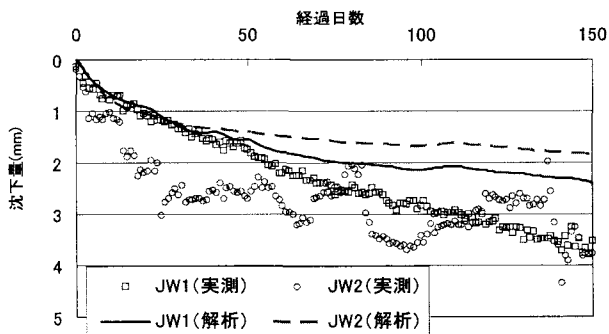


図-14 粘土層からの排水量から算定した沈下量

参考文献

- 1) <http://water.usgs.gov/nrp/gwsoftware/modflow2000/mudflow2000.html>
- 2) 今井 久, 江口正勝, 米澤 朗, 日吉 智: 海岸付近の潮汐応答・地下水位分布に関する一考察, 土木学会第59回年次学術講演会, pp.637-638, 2004.
- 3) 石原研而: 土質力学, 丸善, pp.121-156, 1988.
- 4) 道路公団: 設計要領第一集, 土工・舗装・排水・造園, Vol.1, pp.5-56, 1998.
- 5) Imai H., Eguchi M., Wakayama Y., Yonezawa A.: Simple settlement evaluation system based on the three-dimensional groundwater flow simulation and applied results, International Conference on Finite Element Models, MODFLOW, and More: Solving Groundwater Problems, pp.369-372, 2004.