

地下水解析に基づく地盤沈下量簡易推定システムの開発

今井 久*・江口正勝**・若山裕介***

軟弱層を含む地盤での掘削工事では、掘削地盤の安定やドライワークのために排水計画とともに周辺地盤の沈下量推定と地盤沈下対策立案が必要となる。このような工事の設計・計画に際しては、排水計画の影響評価や地盤沈下対策工の効果をできるだけ簡易かつ迅速に評価することが望まれる。これらニーズに対し、市販の3次元地下水解析ソフトVisual MODFLOW¹⁾を利用し、地下水解析を実施すると共に地下水解析データを利用して地盤の3次元構造を考慮して地盤沈下量を簡易に推定するシステムを開発し、実際の工事に適用、その有効性を確認した。本報告は開発したシステムの概要、システムの検証、実サイトへの適用事例について示す。

キーワード：軟弱層、地盤沈下、地下水位、掘削、ディープウェル

1. はじめに

わが国の大都市の多くは河口部の沖積層上に存在し、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地下水位や地盤沈下への影響が重視され、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、このようなニーズに対し、地下水解析ソフトVisual MODFLOW¹⁾（以降MODFLOW）を利用し、地下水流動解析による工事の地下水への影響や対策工の効果評価を実施すると共に地下水解析データを利用し、工事対象地点の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た。本報告は開発したシステムの概要、システムの検証、実サイトへの適用事例について示す。

2. 沈下量簡易評価システム

開発した沈下量評価システムは、現地の地質構造、遮水壁、およびディープウェルなどの地下水流れへの影響を考慮した3次元地下水解析を実施し、この地下水解析データ（3次元的地質構造、地下水位分布）を利用して地表面の地盤沈下量を算定するシステムである。

沈下量評価手順としては

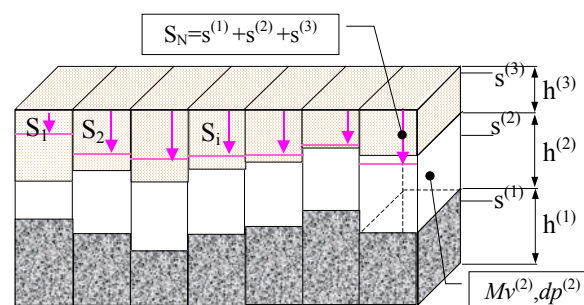
- ①工事対象領域およびその周辺領域の地質構造や地下水流れ規制要因の把握
- ②地質構造区分の設定（地下水流動解析と地盤の沈下

量算定の両者を見込んだ区分が必要）

- ③地下水解析領域の設定とMODFLOWを用いた地下水解析用モデル作成
 - ④工事前の条件での地下水解析の実施（初期間隙水圧分布の設定）
 - ⑤掘削等工事に伴う排水や必要な対策工を考慮した地下水解析の実施（工事の影響を考慮した間隙水圧分布の算定）
 - ⑥初期間隙水圧、工事の影響を受けた間隙水圧、解析モデルの形状、物性区分データの表計算ソフト（マイクロソフト・エクセル）への入力
 - ⑥表計算ソフト上での手順に沿ったデータ変換と地表面沈下量の集計による沈下量分布把握
- の6ステップにより実施される。
- 沈下量の算定²⁾は差分モデルの各セルに対して次式(1)により算定される。

$$s^{cell} = m_v^{cell} \cdot h^{cell} \cdot \Delta p^{cell} \quad (1)$$

ここで、 s :セルの沈下量、 m_v :体積圧縮係数、 h :セルの高さ、 Δp :有効間隙水圧増分、添え字 $cell$ は各セルにしていることを示す。



図－1 沈下量算定模式図

図-1の例では第N番位置のセルは3段から成り、各セルの沈下量 $s^{(1)}$, $s^{(2)}$, $s^{(3)}$ の合計が該地点での鉛直方向1次元の沈下量として与えられる。これを各位置のセルに対して算定すると地表面沈下量の平面分布が得られる。体積圧縮係数 m_v は、粘性土を対象にした室内圧密試験により与えられる。砂質土に関してはN値に基づくHough³⁾より示された圧縮特性曲線(図-2)を参考に与えている。図-3に表計算ソフトのファイル内に構築された沈下量算定システムの手順シートを示す。表計算ソフトのファイルは、①手順シート、②土性入力シート、③MODFLOW結果入力シート、④地表面沈下並べ替えシート、⑤砂の沈下特性シートから構成される。表-1に土性シートの一列を示す。表中透水係数が示されているが沈下量の算定には反映されない。表計算ソフトでの作業は図-1に示されるように、各セルの沈下量算定と、平面的に同一地点にあるセルの沈下量の鉛直方向の合計値算定のためのデータ並び替え、データの切り貼りである。最終的に計算結果はセルの平面座標(x, y)とそれに対する沈下量Sとして、地表面沈下並べ替えシート内に得られる。

3. 沈下量算定システムの作動確認

沈下量算定システムの作動の妥当性を確認するため、解析結果の評価が容易なモデルを設定し、当システムを適用し、得られる解の妥当性を吟味した。図-4に使用した例題の概要を示す。

例題は、領域形状と透水係数が同じで体積圧縮係数の異なる隣接する二つの領域(soil-1, soil-2)で形成さ

れる地盤を対象とする。領域soil-2の体積圧縮係数 m_v は領域soil-1の2倍の値とする。図-4(b)に示すように初期に地表面まであった水位が、その右端で10m水位低下した際の地盤沈下量を算定するものである。この例題では、①水位低下に応じた沈下量が算定されること、②物性値の違いが反映されていること、③算定された沈下量が妥当な値であることを確認する。

表-1 土性入力シート例

物性区分	透水係数 (k(m/s))	単位体積重量(水中) (kN/m ³)	N値	M _v (m ² /kN)	←M _v は、粘土のみ入力。 砂は入力しない
1	1×10^{-5}	10	35		盛土:B
2	7×10^{-5}	9	22		沖積砂質層:As1
3	4×10^{-5}	9	10		沖積砂質層:As23
4	1×10^{-9}	6	4	0.0002	沖積粘土層:Ac
5	1×10^{-5}	10	15		洪積砂礫層:Dsg
6	5×10^{-5}	8	10		風化礫岩:W-lcg
7	5.5×10^{-5}	8	10		礫岩:lcg
8	1×10^{-10}	8	10		遮水壁:Retain Wall
9	5.5×10^{-6}	8	10		破砕帯:Damaged Zone
10	1×10^{-9}	8	10	0.00001	洪積粘土層:Dc
11	-	8	10		改良部A:Improved Zone-A
12	1×10^{-5}	8	10		改良部B:Improved Zone-B
地表面標高(EL+m)				2.500	
地下水位(EL+m)				0.000	
モデル下端標高(EL+m)				-50.0	
ポテンシャル値丸め用しきい値				-10 (tf/m ²)	
気中比重差				25.0	kN/m ²

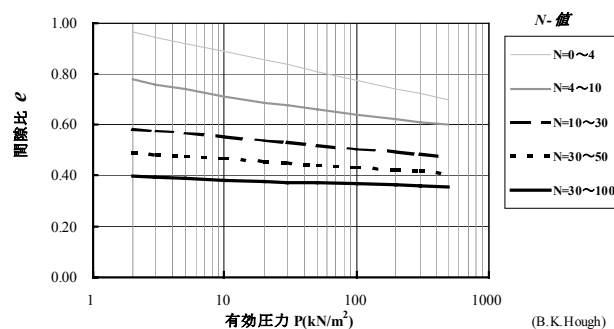


図-2 砂質土の圧縮特性曲線

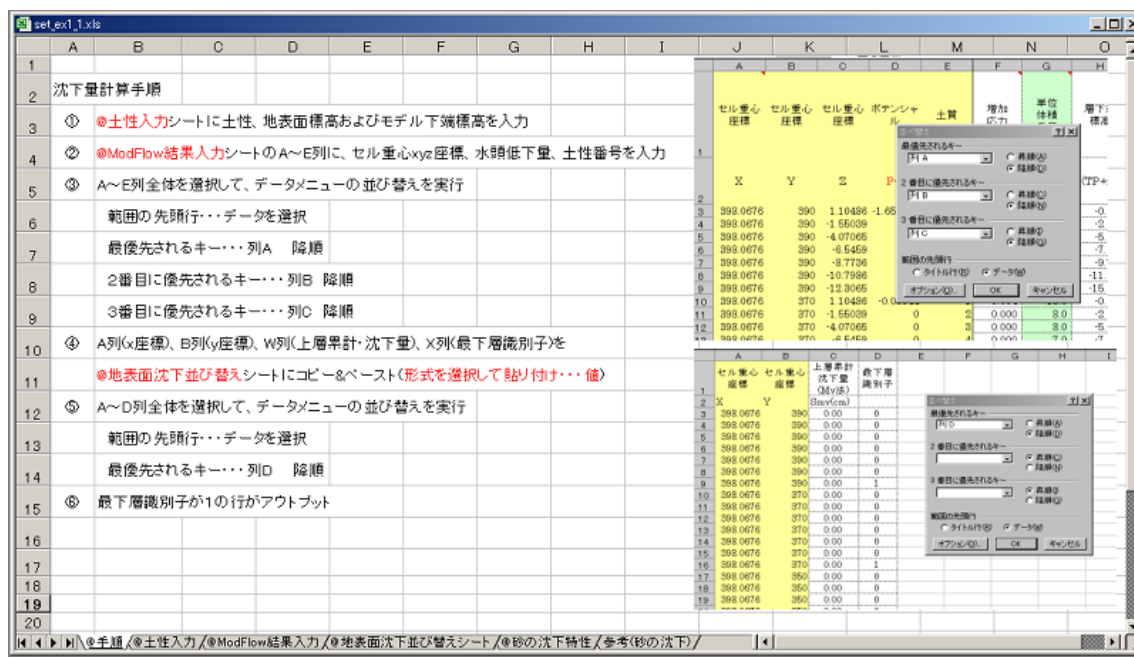


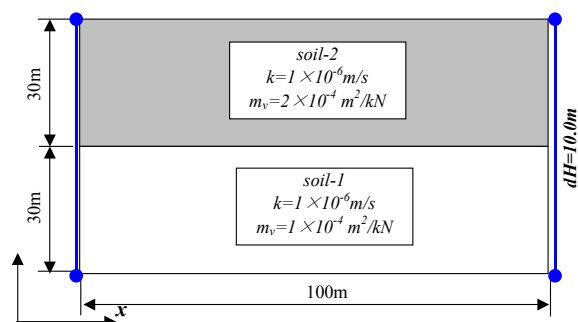
図-3 表計算ソフト内に構築された沈下量算定システムの手順シート

図－４ (c)は沈下量算定結果として、地表面沈下量の平面的分布を示す。沈下量は10cm間隔のコンタで示され、地下水位低下量に応じた沈下量分布を示し、また領域soil-2は領域soil-1の2倍の沈下量となって妥当な算定結果を示している。

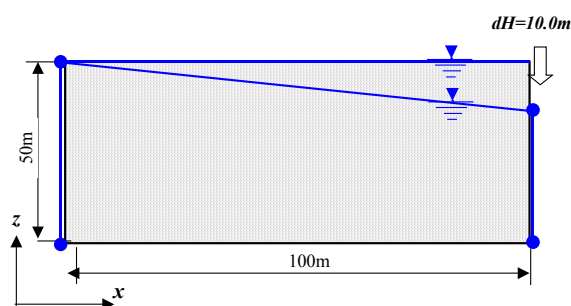
図－４ (d)は各領域（領域soil-1では $y = 15\text{m}$ ，領域soil-2では $y = 45\text{m}$ ）における x 方向の沈下量分布を示している。グラフの■，○印はMODFLOWの解析モデルグリッドの中心位置（評価点）を示している。領域右端部に着目すると、水位低下量10m（ $\approx 100\text{kN/m}^2$ ），層厚50m，体積圧縮係数（領域soil-1では $m_v = 0.0001\text{m}^2/\text{kN}$ ，領域soil-2では $m_v = 0.0002\text{m}^2/\text{kN}$ ）となり，前述の式(1)に代入し領域soil-1では沈下量100cm，領域soil-2では50cmと計算される。これらは，図－４ (d)に示す沈下量算定システムにより算定された結果と一致する。このことは，開発した沈下量算定システムが，水位変化による有効応力増加量を考慮し，有効応力増加量に応じた沈下量を評価し，物性区分を認識して体積圧縮係数設定に応じた正しい沈下量を算定することが確認される。このことから，開発したシステムが，少なくとも設定した例題に関して妥当な算定結果を示すことが確認される。

4. 海岸に隣接した掘削工事への適用事例

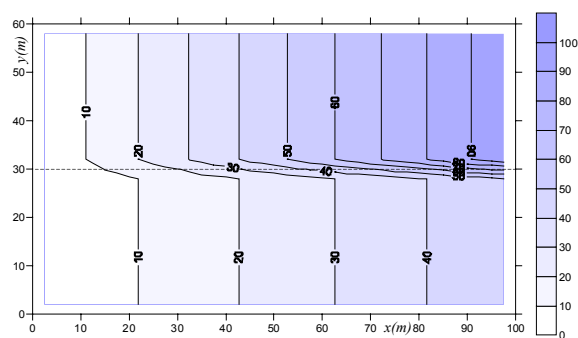
開発した沈下量算定システムを実際の工事⁴⁾に適用した。対象としたサイトは運河に設置される沈埋トンネルの陸部への接続部に当たる箇所で，図－５ (a)に工事箇所付近の平面図を示す。工事箇所は海岸に面した掘削部で，その広さは140m×40m程度である。図－５ (b)に掘削部の縦断面図を地質構造とともに示す。図中掘削底面を太線で示す。掘削深度はおよそ15～20mである。当該箇所の地質構造は下位より，基盤礫岩（Icg），基盤風化部（W-Icg），洪積砂礫層（Dsg），洪積粘土層（Dc），沖積粘土層（Ac），沖積砂層（As），埋め土（B）から構成される。沖積粘土層は5～6m程度と厚く，掘削部でディープウェルなどにより排水した場合，沖積粘土層が沈下する可能性が懸念される。図－５ (c)には，掘削に伴い遮水壁内部の水位をディープウェルにより掘削底部より1m下方まで水位低下させた際の掘削部周辺の地表での沈下量算定結果を沈下量コンタ図として示す。また，図－５ (d)には掘削箇所周辺の砂礫層と粘土層の分布を示す。沈下量コンタ図をみると掘削部を中心に沈下量が大きく，周辺ほど沈下量が同心円状に小さくなっている。



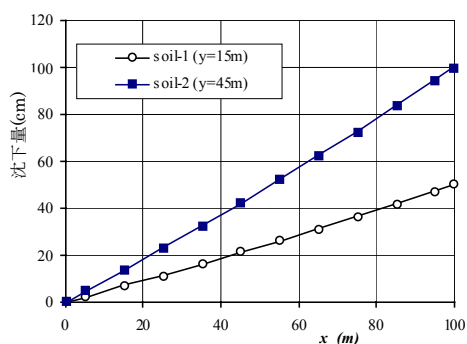
(a) モデル平面図



(b) モデル鉛直断面図

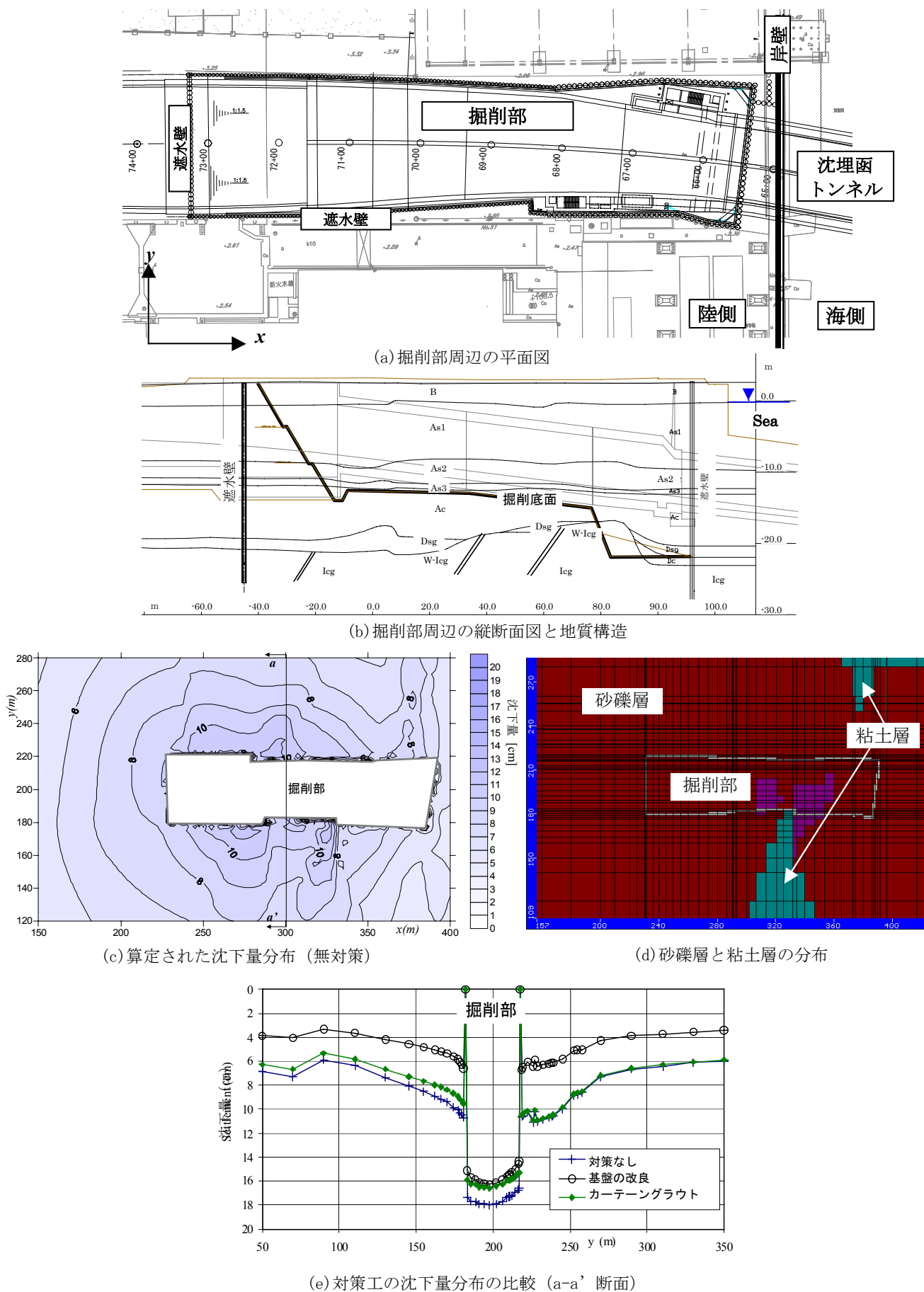


(c) 沈下量分布平面図（沈下量単位cm）



(d) 沈下量分布図

図－４ 例題モデルの形状・算定結果



図－5 海岸に隣接した掘削工事の平面・地質構造と沈下量算定結果

これは水位低下量の影響が沈下量に現れていることを示した結果の一つと考えられる。また、 $x=300\text{m}$ 付近の掘削部より紙面下方で沈下量の少ない箇所が認められる。この箇所は(d)で示される粘土層の存在する箇所に相当する。粘土層は透水係数が小さく、砂礫層は透水係数が大きい。このため粘土層部分では水位低下が小さく、沈下懸念のある粘土層であるが水位低下量が小さく、有効応力の増分が小さいために、沈下量が小さくなっている。これは本システムが地下水解析結果、地盤物性を適切に沈下量算定に反映させていることを示唆した結果であると考えられる。

システムの有効性が示された一例であると考えられる。

図-5(e)は対策工の沈下量への影響を比較した事例である。ここでは図-5(c)で示されるa-a'断面における沈下量の分布を示している。対策工の比較として、①対策工のないケース、②掘削部基盤の地盤改良による透水性低下対策を実施してディープウェルによる揚水量を低減し周辺地下水低下を抑制するケース、③遮水壁の深度を延長するようなカーテングラウトを実施して掘削部へ流入する周辺地下水侵入長を伸ばし、掘削部への流入量を抑制して周辺の地下水位低下量を低減させるケースを示している。ここで示される三者を比較すると、無体策は明らかに沈下量が大きく、対策工を実施した、掘削部基盤改良ケースとカーテングラウトケースでは基盤改良ケースのほうが周辺地盤の沈下量低減効果が大きいことが理解される。このように、本システムは、各種地下水対策からその効果を反映した地盤沈下量評価までが比較的容易に実施できるシステムである。

この事例で使用した解析モデルのグリッド数は57120で、MODFLOWでの定常解析の計算時間が15分程度(Pentium4 3.2GHzのパソコン使用)である。実作業を考えると、対策工や地盤改良等の影響を解析モデルに組み込むための作業として約30分、MODFLOWの解析結果を

表計算ソフトに貼り付け、並べ替えなどの操作に15分程度で必要である。従って本システムでは6万グリッド程度のモデルで地下水解析から地盤沈下量算定まで、対策工の考慮した地盤沈下量の算定に1時間程度で実施可能であり、本システムはより高精度に、より迅速にまた比較的容易に使用することができる有効な設計補助ツールであると考えられる。

ここでの作業時間は基本となる地質構造や境界条件設定などのモデルができてからの作業時間であり、基本となる地質構造を反映させた3次元モデル構築や物性値の評価には別途数日を要すことを付け加えておく。

5. おわりに

工事にともなう地下水への影響評価や地下水対策の比較検討をより迅速に、より容易にする市販の地下水流動解析ソフト MODFLOW と市販の表計算ソフトを組み合わせた簡易地盤沈下量算定システムを開発し、その妥当性、適用性を確認し、その有効性が示された。今回の検討では安全側の評価として定常解析に基づきシステムを構築した。粘土層の圧密沈下は年オーダの長期現象であり非定常過程を考慮するとより現実的、経済的な設計計画立案が可能であると考えられ、今後の課題としたい。

参 考 文 献

- 1) http://www.waterloohydrogeologic.com/software/visual_modflow_pro/visual_modflow_pro_ov.htm
- 2) 石原研而：土質力学 丸善株式会社 pp.132-156 1984
- 3) 日本道路公団：設計要領第一集 土工・舗装・排水・造園 p.5-56, 1998
- 4) 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

Simple Settlement Evaluation System Based on the Three-Dimensional Groundwater Flow Simulation and Applied Results

Hisashi IMAI, Masakatsu EGUCHI and Yusuke WAKAYAMA

When the construction of underground facilities are 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 cases, efficient and quick design tools are needed to estimate the construction influence and counter-measure effects 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 of the application to an actual tunnel construction site are presented.