

実務分野における三次元 土／水 連成 FEM 解析の利用状況

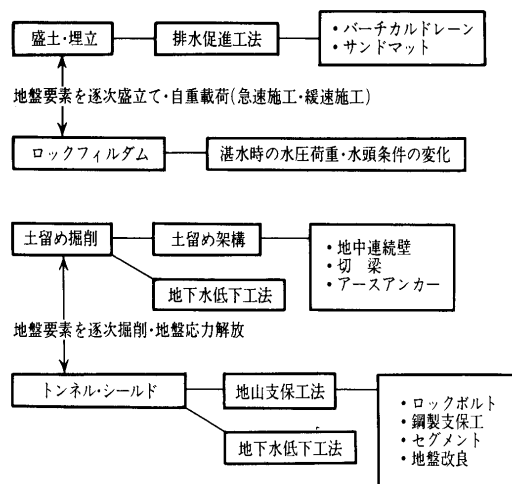
Practical Use of Three-Dimensional Soil/Water Coupled Analysis

杉 江 茂 彦 (すぎえ しげひこ)

(株)大林組技術研究所数値解析研究室 副主任研究員

1. はじめに

軟弱地盤を対象とした盛土や掘削工事では、工事を安全かつ効率よく施工するために、設計・施工の各段階で、地盤の応力・変形特性、地下水環境の変化を的確にとらえる必要がある。土／水連成 FEM 解析は、そのために有効な数値解析技術であり、地盤の応力・変形計算と地下水の浸透流計算とを、同時に連立させて行うところに特徴がある。これにより、工事で生じる地下水環境の変化を、地盤の応力・変形予測の条件にいれることができる。また、地下水挙動の予測においては、盛土や掘削で生じる境界条件の変化を、逐次計算条件にいれることができる。実務面においても、地盤の応力・変形情報と地下水情報の両方を、計算業務の一単位（データ作成～計算～結果整理）のなかで得ることができ、マンパワー的に有利である。これまでは二次元計算での使用がほとんどであり、実務に適用されている二次元土／水連成解析プログラムの代表として、DACSAR¹⁾をあげることができる。盛土や掘削工事で生じる種々の施工条件（図—1）に対応でき、設計・施工法の検討に数々の適用実績がある。さらに、実務で生じる三次元問題にも対応していくために、DACSAR をベースとして、三次元プログラム GRASP-3D^{2),3)}が開発されている。すでにいくつかの工事への適用を経て、実用段階にはいっている。本報告では、GRASP-3D を例として、三次元土／水連成解析の実務利用で必要となる解析システムの概要を述べる。また、盛土、双設地下タンク、山岳トンネルの計算例をあげて、実務分野での利用状況を述べる。

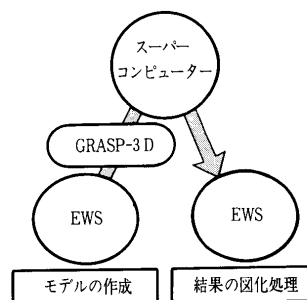


図—1 実務での広範にわたる適用分野

2. 実務使用における計算業務の効率化

2.1 解析システムの必要性

三次元土／水連成解析では、三次元計算と非定常計算が重複するため、演算量・情報量ともに膨大となる。実務遂行上の時間・コストの制約のなかで解答を得るためには、コンピューターの性能に大きく寄りかからざるをえない。GRASP-3D の実務使用にあたっては、スーパーコンピューターとエンジニアリング・ワークステーション (EWS) を援用した解析システム（図—2）を構築し、モデル作成から大規模演算、解析結果の評価のための図化処理までを一貫して行い、計算業務の効率化をはかっている。口絵写真 4～8 は、この解析システムによる計算結果のビジュアル化例である。コンピューター・グラフィックによるビジュアル化は、地盤内部の三次元的な力学状態をマクロにとらえるための道具として、設計・施工法の検討の場ですでに積極的に活用されており、計算業務の効率化に大きく貢献している。



図—2 実務支援のための一貫処理システム

2.2 解析プログラムに求められる高速演算性能

計算業務の効率化を追求するなかで、システムの核となる解析プログラム自体に、高い計算効率が備わっていることが大前提である。三次元計算では演算に要する時間とコストが増すため、より高い水準が求められる。スーパーコンピューターの高速演算性能を十分に引き出すためには、一般に解析プログラムに90% 近いベクトル化率（すべての演算に占める、ベクトル処理（スーパーコンピューターによる複数演算の同時処理）が可能な部分の割合）が求められる。図—3 は GRASP-3D におけるベクトル化率を解く問題の規模に対して示したものである。参考に、SX3/21R (NEC) による CPU 時間も示している。ここでは、連立方程式の解法にスカイライン・ソルバー：COLSOL⁴⁾を採用している。また、剛

性方程式の誘導にあたっては、支配方程式・境界条件の離散化理論の見直し²⁾までさかのぼり、結果的に90%近いベクトル化率を達成している。

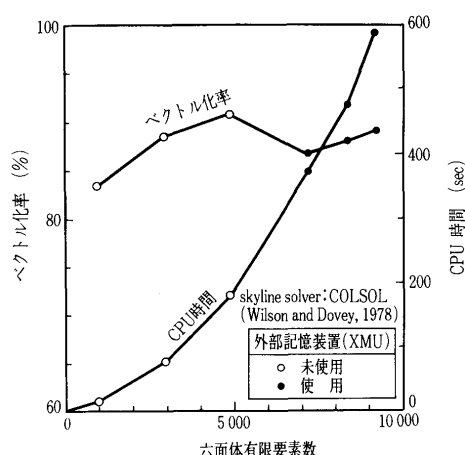


図-3 GRASP-3D のベクトル化率と計算時間³⁾

3. 実務分野での利用状況

3.1 軟弱地盤上での盛土問題

土/水連成解析が実務でいち早く利用されたのは、軟弱地盤を対象とした盛土の分野である。道路盛土や広域埋立工事が主な対象であり、一般に、地盤の変形を二次元(平面ひずみ)問題として扱うことにより用いられてきた。一方、最近では盛土分野においても、三次元計算を使用する機会が増えている。臨海埋立地では、環境保全の立場から、大規模掘削工事で生じる掘削残土を、敷地内で利用する機会が増えている。これに伴い、種々の平面形状をもつ盛土が施工され、公共性の高い既設施設との近接施工となる場合が生じている。既設施設への影響の把握と対策工の検討に、現場の条件をより詳細に反映できる三次元土/水連成解析が使用されている。

ここでは、倉敷試験盛土⁵⁾(図-4)の事例について、二次元(平面ひずみ)計算と三次元計算の地盤の変形値の比較を示す。二次元計算(A-A断面での平面ひずみ計算)と三次元計算のともに、三次元プログラムGRASP-3Dを用いた。A-A断面の有限要素メッシュも、二次元計算と三次元計算で同じとした。粘土地盤の構成則には関口と太田の提案⁶⁾による弾・粘塑性構成式を用いた。計算に必要な情報は、柴田・関口⁵⁾より引用した。図-5～8にA-A断面での計算結果を示す。実測値もあわせて示す。実線は実際の平面形状(盛土延長 L と敷幅 B の比: $L/B=2.0$)による計算値である。破線は二次元計算(平面ひずみ: $L/B=\infty$)での計算値である。参考に、二次元計算との差が最も大きいと期待できる $L/B=1.0$ の結果を鎖線で加えている。二次元(平面ひずみ)計算と三次元計算を比べると、二次元では沈下が小さめに、側方変位が大きめに得られている。とは言っても、平面形状が $L/B=2.0$ 以上では、二次元計算と三次元計算の差はわずかである。一方、盛土の平面形状が $L/B=2.0$ より小さくなると、二次元計算と三次元計算の差が大きくなっている。実測値との比較では、

沈下(図-5, 6)はうまくシミュレートできている。地中側方変位(図-7)は二次元計算と三次元計算($L/B=2.0$)ともに実測値より大きめである。今後の実務問題での検討においても、挿入式傾斜計による実測値との比較では、測定精度を加味した上での評価が必要と考える。法先地表の側方変位の距離による減衰効果(図-8)は実測の傾向をうまく表している。

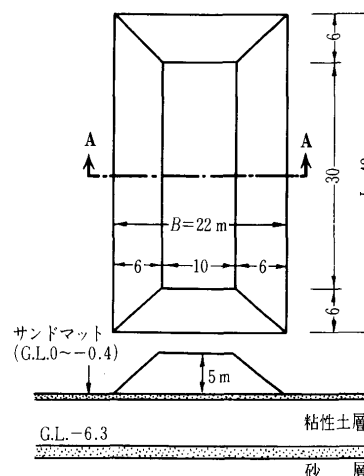


図-4 倉敷試験盛土の断面形状

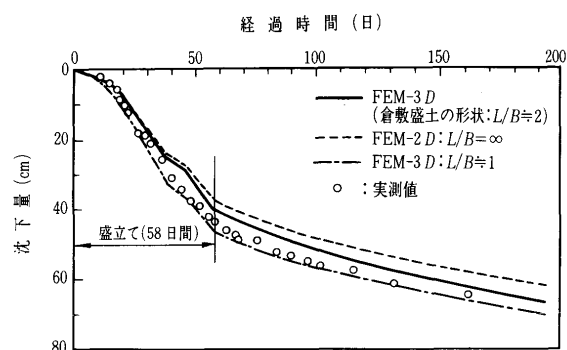


図-5 盛土中心の沈下～時間関係

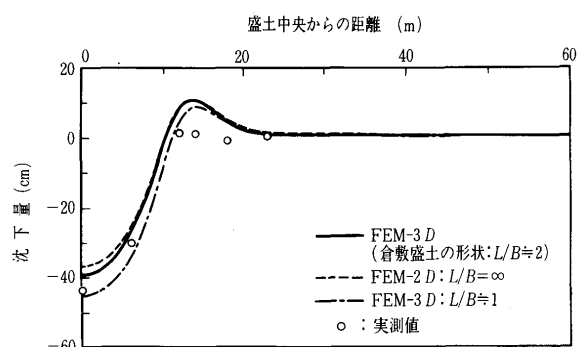
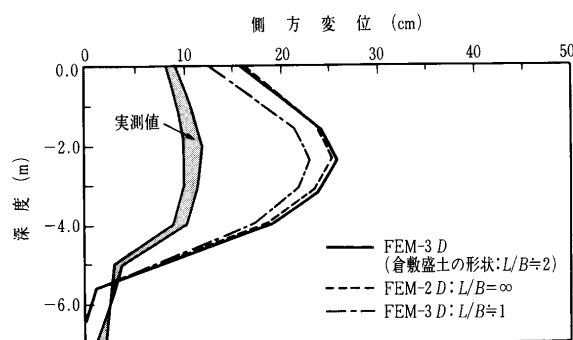
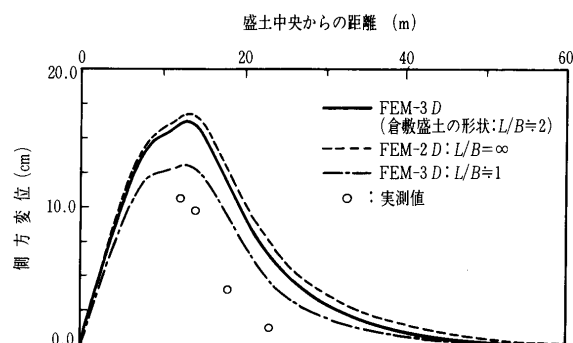


図-6 盛土横断面の沈下分布 ($t=58$ 日)

こうした盛土の平面形状に加えて、軟弱層の厚さや層構成、透水性、地盤改良工の仕様によっても、二次元計算と三次元計算の差の現れかたは異なってくる。そのため盛土実務では、重要構造物との近接施工の場合、かつ工事規模が比較的大きい場合に限定されてはいるが、三次元計算を用いて地盤の変形と安定性を確かめている。従来の二次元計算でどの範囲まで扱えるのか、三次元計

図-7 法先での地中側方変位の深度分布 ($t=74$ 日)図-8 法先地表での側方変位の水平方向の分布 ($t=74$ 日)

算データを蓄積して確かめていく必要がある。

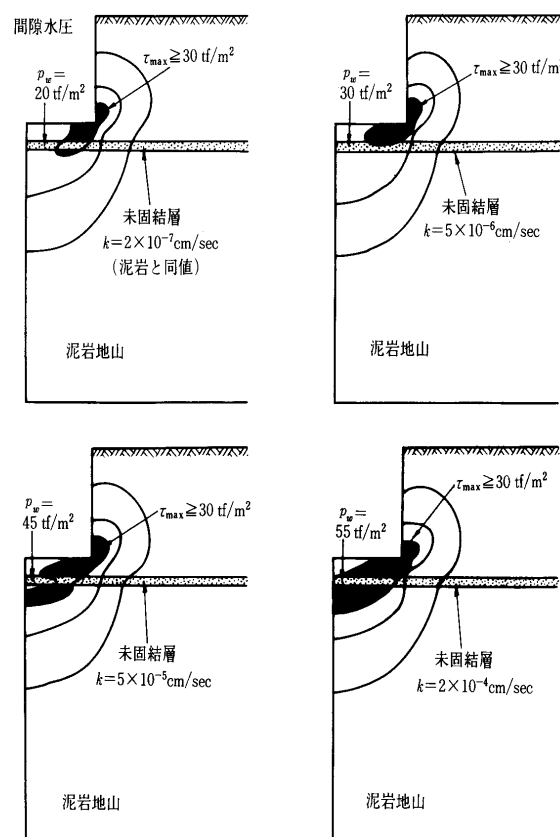
3.2 地盤・岩盤の掘削問題

(1) 双設施工をとまなう円筒地下タンク

深い掘削をとまなう円筒地下タンクの施工では、揚水掘削による地下水の変動とそれにとまなう掘削地盤・土留めへの影響が基本的な検討事項となる。また既設あるいは施工中のタンクとの双設施工となる場合が多く、相互のタンクの干渉の影響も検討にいく必要がある。

図-9は、泥岩地山を対象に、底部地盤の掘削安定性を土/水連成解析で検討した結果である。ここでは軸対称モデルを用いている。事前調査により最終掘削敷付近に未固結層が確認された。未固結層の透水性が不明であったため、盤ぶくれの可能性と未固結層での現場透水試験の必要性を検討したものである。黒塗部は、強度試験の結果から判断して、泥岩の安定性が懸念された領域である。黒塗部の範囲は、未固結層に想定した透水係数に応じて変化しており、地盤の安定性が地下水に大きく影響を受けることがわかる。未固結層の透水係数が 10^{-5} 乗オーダーより大きくなると、周辺からの水の流入により、間隙水圧が $p_w=45 \text{ tf/m}^2$ と高く被圧され、黒塗部の範囲が底部地盤全体に拡大している。すなわち盤ぶくれの可能性が考えられた。この結果から現場透水試験が実施され、幸いに同層の透水性が先の数値よりもかなり低いことが確認された。

口絵写真-4～6は、双設施工による地盤・地下水・土留め壁の挙動を、三次元土/水連成解析で検討した結果である。図-10は底部地盤の間隙水圧の変化を掘削深度に対して示したものである。計算にあたっては、揚水にとまなう地下水の変動を考慮しながら、掘削過程を実

図-9 底部地盤に挟在する未固結層の透水係数と最大せん断応力 ($\tau_{\max}$) の分布

際の施工時間で追跡している。掘削底部の地盤では、背面地盤からの地下水の流入によって、間隙水圧がかなり高く保持されている。また両タンク間の地盤では大きなせん断応力が発生し、タンク周辺の地盤に三次元的な偏圧が生じている。これにとまない土水圧を支持する土留め壁にも偏圧が生じる。このように、個々のタンクは軸対称構造物であるが、双設の影響によって軸対称性が乱されるので、設計ではこの非軸対称性を考慮にしている。

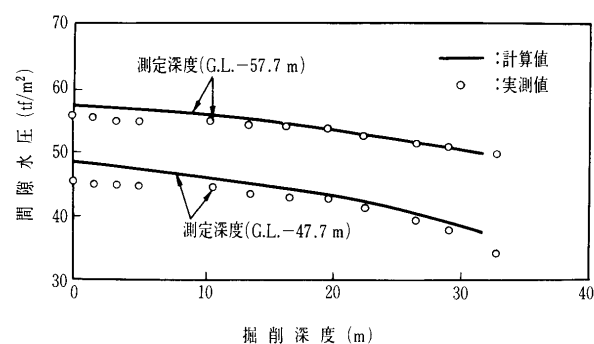


図-10 掘削に伴う底部地盤の間隙水圧の変化

(2) TBM 先進導坑を伴う大断面トンネル

地山強度比（一軸圧縮強度/土被り圧）の小さい地山を対象とした大断面トンネルの施工では、周辺への影響も考慮した地山の安定確保、ならびに経済面からの要求

による急速施工が重要な技術課題である。トンネルの施工で最も崩壊の危険性が高いのは切羽部である。口絵写真-7は、切羽崩壊に伴う切羽出水の影響を検討したものである。切羽崩壊によりトンネル周辺のみならず影響が拡大する可能性があるため、この地山部分の安定維持が重視されている。最近の新たな工法として、切羽の頂部をTBM（トンネル・ボーリング・マシン）で先行掘削した後に、残りの断面を拡幅掘削する試みがある。事前に地山を観察して不良箇所が改良できるため、大型機械で大断面を安心して速く拡幅掘削できる点に強みがある。大断面トンネルの急速施工法として、大きく期待されるものである。ここでは、施工工程を考慮した三次元計算を行い、セグメント支保された先進導坑自体にも切羽安定効果があるかどうかを検討した。図-11、口絵写真-8は、先進導坑がある場合とない場合の切羽地山の安定性を、応力比 $\tau_{\max}/p$ （最大せん断応力 $\tau_{\max}$ を平均応力 p で除した値）で比較した結果である。色が濃い（赤色に近づく）程応力比が高く、安定性の度合いが低いことを表している。先進導坑がある場合(a)では、ない場合(b)に比べて、切羽と周辺地山の全般で安定性が向上している。特に先進導坑横の切羽上半部で、先進導坑設置による安定性の向上が大きいことがわかる。このような工法開発の場においても、新しい試みへの妥当性

の検証に、三次元土／水連成解析が活用されている。

4. おわりに

以上、三次元土／水連成解析の実務での利用状況について、計算業務の効率化で必要となる解析システムの概要、ならびに同解析法の盛土・掘削分野での利用事例をあげて紹介した。これ以外にも、シールドトンネル、ロックフィルダムへの応用が試みられており、適用領域のひろがりが見込まれる。今後、実務での適用実績を多く積み重ねていくなかで、設計における解析結果の利用法を、これまでの設計者個人々の判断による、個々の物件に対するものから、もう少し統一だったものに整備していく必要があると考える。

最後に、三次元土／水解析プログラム GRASP-3Dの開発にあたりご指導をいただきました金沢大学工学部土木建設工学科の太田秀樹教授・飯塚敦助教授に深く感謝の意を表します。また、本稿をまとめるにあたりご助言ご鞭撻いただきました、大林・飛島共同企業体、湯田JV 工事事務所三浦正彦所長ならびに大林組土木技術本部設計第1部白砂健副部長に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) Iizuka, A. and Ohta, H. : A determination procedure of input parameter in elasto-viscoplastic finite element analysis, Soils and Foundations, Vol. 27, No. 3, pp. 71~87, 1987.
- 2) Ohta, H., Iizuka, A., Omote, Y. and Sugie, S. : 3-D analysis of soil/water coupling problems using elasto-viscoplastic constitutive relationships, Proc. 7th Int. Conf. Computer Methods and Advances in Geomechanics, Vol. 2, pp. 1191~1196, 1991.
- 3) 杉江茂彦・飯塚 敦・太田秀樹：三次元土／水連成 FEM 解析における種々の離散化と計算精度・効率，構造工学における数値解析法シンポジウム論文集，第18巻，pp. 33~38, 1993.
- 4) Wilson, E. L. and Dovey, H. H. : Solution or reduction of equilibrium equations for large complex structural systems, Advances in Engineering Software, Vol. 1, No. 1, pp. 19~25, 1978.
- 5) 柴田 徹・関口秀雄：盛土基礎地盤の側方流動解析上の問題点，土と基礎，Vol. 30, No. 5, pp. 47~54, 1982.
- 6) Sekiguchi, H. and Ohta, H. : Induced anisotropy and time dependency in clay, 9th ICSMFE, Proc., Specialty session 9, pp. 229~239, 1977.
- 7) Ohta, H. and Sekiguchi, H. : Constitutive equations considering anisotropy and stress reorientation in clay, Proc. 3rd Int. Conf. Numerical Method in Geomechanics, pp. 475~484, 1979.

(原稿受理 1995.3.27)

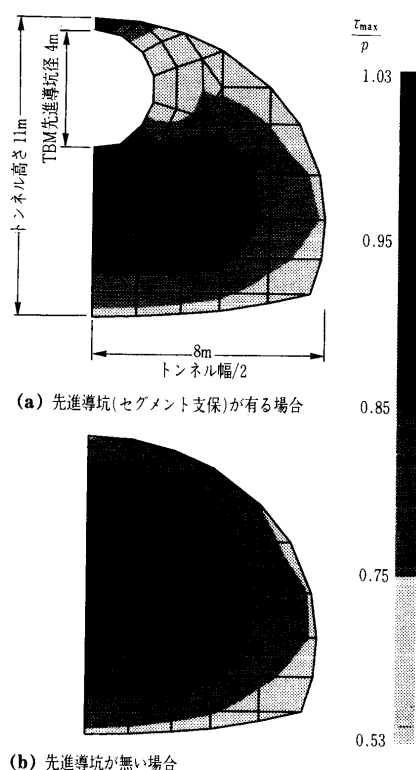


図-11 トンネル切羽での応力比 ($\tau_{\max}/p$) の分布