

複数の FEM プログラムによる解析結果の比較と考察

—軟弱地盤上における盛土の圧密解析の場合—

Comparative Study of Consolidation of Embankment on Soft Ground by Several FEM Programs

藤 山 哲 雄 (ふじやま てつお)

前田建設工業(株) 技術研究所

杉 江 茂 彦 (すぎえ しげひこ)

(株)大林組技術研究所 地盤岩盤研究室

1. はじめに

本報告では、軟弱地盤上に盛土を構築した際の圧密挙動の予測に対し、複数の FEM プログラムを用いて比較解析した結果を示す。FEM の解析結果に影響を与える問題としては、計算性能や解法の精度といったプログラム自体の問題と、物性パラメータや境界条件設定の良否といった解析者の技量に関わる問題が存在するが、本比較解析ではパラメータや境界条件等、入力条件をすべて同一に固定した例題を設定し、前者の問題について検討することを目的としている。なお後者の問題については、本号で三村ら¹⁾が別途報告しているので参照されたい。

2. 例題の解析条件

2.1 例題のモデル概要

例題に用いたのは、ある軟弱地盤上で実施された試験盛土の実例²⁾である(図-1)。用いた解析メッシュモデルと初期・境界条件を図-2に示す。ここでは、粘土層のみ関口・太田モデル³⁾を構成則とする弾塑性体または弾粘塑性体、他の砂層や基礎岩盤等はすべて線形弾性体とした。圧密対象となる粘土層の主な物性パラメータのみ表-1に示す。設定根拠ならびに他のパラメータ値は、文献²⁾もしくは委員会報告書⁴⁾を参照されたい。

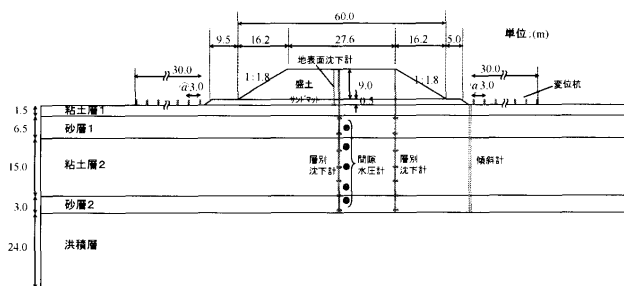


図-1 例題盛土の概要

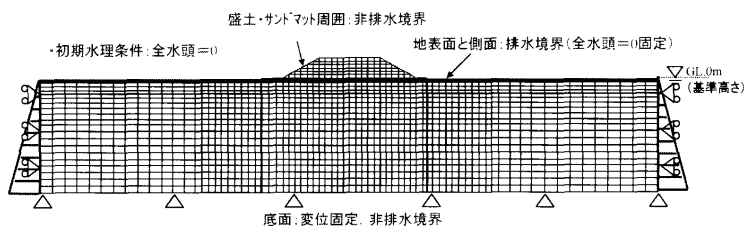


図-2 メッシュおよび境界条件

2.2 解析プログラムの概要

比較解析は、委員会の一斉解析に応募のあった六つのプログラムを用いて行った。各プログラムは商用・非商用、大学で開発された公開ソースコードを改良したもの・全くオリジナルに論文ベースで作成されたもの等、その開発経緯は様々であるが、すべて関口・太田モデル³⁾を構成則とする土・水連成の有効応力解析プログラムである。各プログラムの具体的な違いとして、連立方程式の解法や数値積分法など様々な点が予想されるが、特に従来から圧密解析に与える影響が議論されてきた変位と水頭の離散化方法について^{5),6)}、各プログラム開発元からヒアリングした結果を表-2に示した。

本比較解析では、図-2に示すメッシュモデル、初期・境界条件、物性パラメータ、盛土の載荷工程から解析ステップ数まで、計算に必要な入力条件はすべて同一に固定しており、解析結果には純粋に各プログラムの性能による違いが生じるものと期待される。

3. 弾塑性モデルの比較解析結果

粘土層を弾塑性体とした場合について、盛土中央下の地表面における沈下、ならびに粘土層中央 (GL-15m) における過剰間隙水圧の時系列計算結果を図-3、図-

表-1 下部粘土層の弾粘塑性解析パラメータ

弾粘塑性パラメータ	設定値	弾粘塑性パラメータ	設定値
圧縮指数	λ 0.596	先行時の間隙比	e_0 2.299
膨張指数	κ 0.272	有効ポアソン比	ν' 0.40
圧密降伏応力	σ'_{vo} 135.5 kN/m^2	内部摩擦角	ϕ' 24.2
初期の鉛直有効応力	σ'_{vi} 135.5 kN/m^2	透水係数	k $7.33 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$
先行時の静止土圧係数	K_0 0.66	二次圧縮指数	α 9.03×10^{-3}
原位置静止土圧係数	K_1 0.66	初期体積ひずみ速度	v_0 6.02×10^{-5}

表-2 各プログラムの変位・水頭の離散化条件

プログラム	離散化に関する条件		
	変位の空間での離散化	水頭空間での離散化	水頭の時間的変化に対する離散化
A	1次(4節点)アイソパラメトリック要素	要素重心位置で評価(赤井・田村による方法 ⁷⁾ に基づくが、要素境界中央点の水頭も考慮	後退差分
B	四辺形要素を対角線により三角形に分割し、定ひずみ三角形要素の剛性を重ね合わせる方法	要素重心位置で評価(赤井・田村の方法 ⁷⁾)	後退差分
C	2次(8節点)アイソパラメトリック要素	節点で評価。1次(4節点)アイソパラメトリック要素	後退差分
D	四辺形要素を対角線により三角形に分割し、定ひずみ三角形要素の剛性を重ね合わせる方法	要素重心位置で評価(赤井・田村の方法 ⁷⁾)	後退差分
E	1次(8節点6面体および6節点5面体)アイソパラメトリック要素*	節点で評価。1次(8節点6面体および6節点5面体)アイソパラメトリック要素*	後退差分
F	1次(4節点)アイソパラメトリック要素	節点で評価。1次(4節点)アイソパラメトリック要素	後退差分

*3次元要素。今回は境界条件により2次元解析を実施

論 文

4に示す。図-3は盛土開始から約1年間の時系列、図-4は時間軸を長期（盛土完了後約30年まで）に延ばして示したものである。これらより、以下のことがわかる。

【各プログラムの沈下のバラツキ】

図-3より、各プログラムの沈下は比較的大きなバラツキを有している。例えば道路公団設計要領⁸⁾では、盛土完了後600日までの計算沈下量を設計上の短期沈下として評価するが、今回ケースでは各プログラムでおよそ2.0~2.7 m程度となっており（図-4）、実務的に有意なバラツキを生じている。長期放置後の最終沈下量は、図-4中に示すように $D \approx A < B < E \approx F < C$ の大小関係で、その差は最大279 mm（約8%）であった。

【各プログラムの間隙水圧のバラツキ】

過剰間隙水圧の発生は、短期では大きな差はないものの、長期で見ると消散のスピードに差が見られる。例えば、本盛土の供用開始時（1985年2月）を見ると、プログラムEの水圧は盛土完了時の約73%、一方Dでは約55%となっており、これを便宜上の圧密度と考えれば、実務上無視できない差である。

【Christian系とSandhu系による間隙水圧傾向】

間隙水圧の長期消散傾向（図-4）を見ると、プログラムB・Dと、A・C・E・Fに2群されるようである。B・Dは要素内の水圧を一定と考え水圧を要素中心で表すChristian系（赤井・田村⁷⁾の方法）、C・E・Fは1次の形状関数を用いて節点で間隙水圧を評価するSandhu系であり、この違いが2群に分けられる主要因と予想される。しかし、AはChristian系でありながらSandhu系の結果に近くっており、要素境界辺の中央点でも水頭を評価できるよう工夫が施されている点が影響し

ている可能性があるが、明確なことは不明である。

【既往報告⁶⁾との比較】

荒井ら⁶⁾はChristian系の方法とSandhu系の変位2次・水圧1次のアイソパラメトリック要素を用いた二つのプログラムで、弾塑性体の地盤（構成則は関口・太田モデル）に盛土を载荷する比較計算を行い、Sandhu系が10%ほど沈下を大きめに評価する結果を得ている。ここではCとDがこの条件に当てはまるが、最終沈下量が最大のCは最小のDより約8%大きい結果となっており（図-4）、物性等の諸条件が異なるにもかかわらず、今回の結果も荒井が示した傾向と符合していることは興味深い。

【変位と水頭の形状関数次数の影響】

変位、水頭ともに1次のアイソパラメトリック要素を用いているEとFは、築堤中のわずかな休止期間の際に、水圧が他より大きく出て、速く消散する傾向を示していることが特徴的である（図-3）。この傾向は、変位と水頭の次数が異なる他のA~Dでは見られない。従来、変位の微分で得られるひずみ（応力）と間隙水圧が同次数で表すことができる組み合わせ（変位が水圧より1階高次である組み合わせ）が計算の安定性が良いと言われている。上記について、この問題が影響している可能性は否定できないが、現状では明確なことは言えない。

以上、沈下と水圧の結果についてみると、プログラムにより実務上無視できない差が生じていることがわかった。Christian系とSandhu系に対する安定性や数値解精度の議論は過去に幾つか行われているが^{5),6)}、透水係数の組み合わせやメッシュの切り方等、種々の要因により結果が変化し、どの方法がベストと結論できる段階には至っていないようである。一方、ここで比較した各プログラムは、離散化方法以外にも様々なプログラミングの相違点があり、例えばBとDは全く同じ離散化手法を用いていながら1%強沈下に差が生じているなど、離散

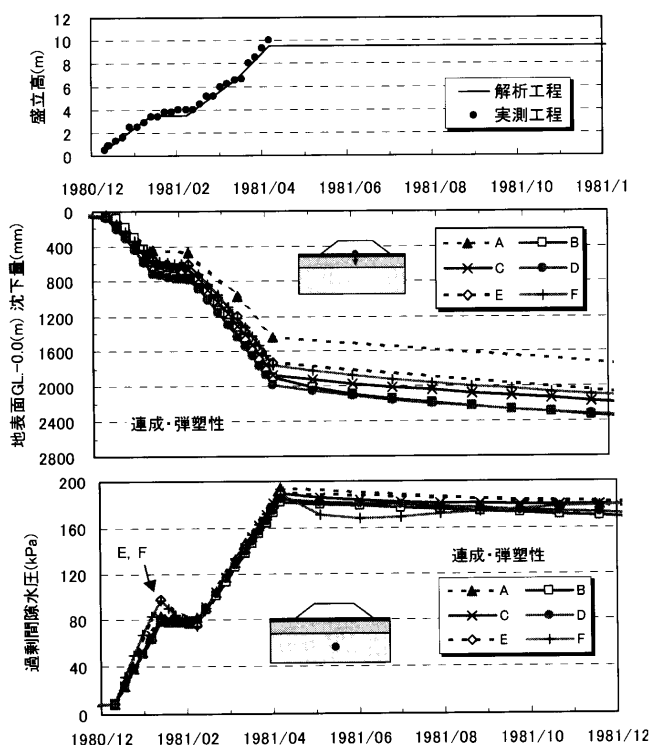


図-3 弾塑性の沈下・過剰間隙水圧時系列比較結果（短期）

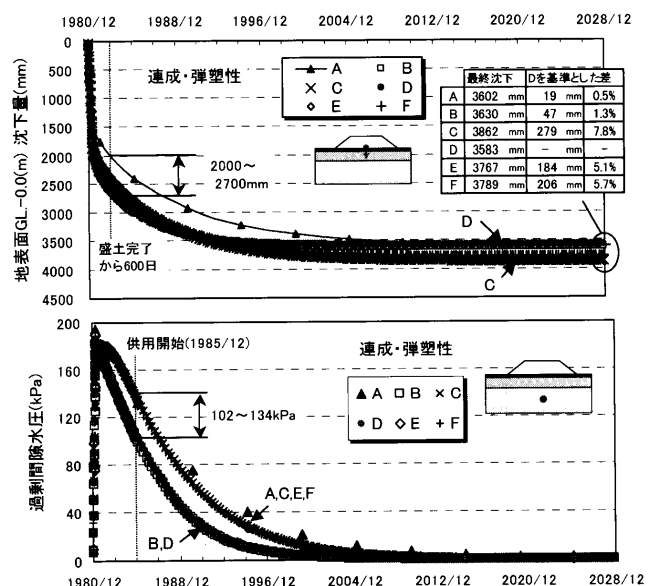


図-4 弾塑性の沈下・過剰間隙水圧時系列比較結果（長期）

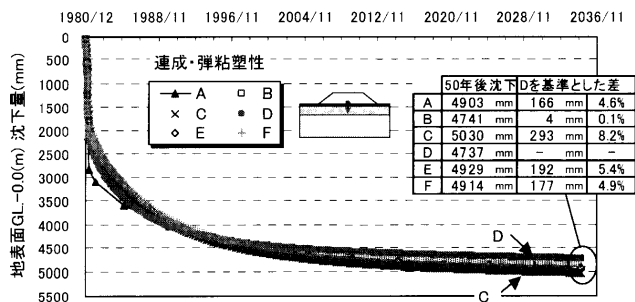


図-5 弾粘塑性の沈下の時系列比較結果（長期）

化方法以外の影響も伺える。今後の詳しい分析が望まれる。

4. 弾粘塑性モデルの比較解析結果

粘土層を弾粘塑性体とした場合について、地表面の長期沈下（盛土完了から50年後）の結果を図-5に示す。粘性項を入れた構成モデルはより複雑であり、粘性なしの計算に比べ結果がばらつくかと予想したが、50年後の沈下はおよそ4740～5030 mm（約8%）の幅であり、先の弾塑性体とした場合のバラツキと同程度であった。今回のケースの場合は、粘性の考慮が各プログラムの違いを際立たせる結果とはならなかった。

5. プログラムの機能に対する留意

今回の例題では、簡単のため初期応力は各物性ゾーンに一律の値を付与したが、実際には深さ方向に土被り圧が増加するため、要素毎に土被り圧を考慮して設定することが望ましい。今回用いたプログラムでは、初期応力をパラメータとして物性ゾーンに一律付与しかできないものがある一方、内部で別途自重計算を行って自動設定する機能が標準となっているものなど様々であった。この他、1st ステップにおける基礎地盤を出現させた時の基礎地盤自身の自重変形、あるいは初期水理条件と境界条件の設定の違いから生じる圧密変形などは、通常の実務解析には無意味な変形なので初めから内部でキャンセルして出力する機能を有するものもある。すなわち、プログラムによっては、ユーザーの実務面での利便性を考慮した機能がいろいろ盛り込まれており、当然、これら内部処理があるなしで出力値が大きく異なってくるから、ユーザーはそのプログラムが持つ機能を十分理解した上で出力値を解釈しなくてはならない。初歩的な話ではあるが、今後、設計実務の場面で多くのユーザーが正しくFEMを利用していく状況を望むにあたり、このような点でのプログラムの違いが存在することも認識しておきたい。

6. おわりに

近年、実測挙動との比較検証事例が豊富に報告されつつある関口・太田モデルを構成則とする圧密解析について、複数のプログラムに対する比較解析を行った結果、計算入力条件をすべて同一に設定したにもかかわらず、各プログラムで実務上無視できない差が生じることがわかった。この原因として、変位・水頭の離散化方法の違いが有力な要因として考えられた。

各プログラムは、理論の整合性と実務性（数値安定性や計算速度など）をバランスさせながら、それぞれの思想があって構築されており、どれが正しいと評価できるものではない。むしろ「この程度の差が生じるものだ」と理解すべきであろう。設計への適用を考えた場合、特に発注者側にとっては、どの設計者が行っても一定の品質になるよう、道具となるプログラムはすべて同じ答えを出すことが必要と考えがちである。しかしFEMの場合、現場毎に設定すべきパラメータや境界条件の設定いかん（極言すれば解析者の技量）で答えは大きく変わり、今回示した程度のプログラム間の差は、容易にそれに埋没される可能性がある。むしろ、あるプログラムを使って多くの現場に対する実測と解析比較をこなし、適切な条件設定に関する知見とノウハウ、ならびにプログラムへの正しい理解に基づき解析された結果は、用いたプログラムがどれであれ、十分信頼に足るものと言える。FEMの設計への適用を考える場合、理論と解析プログラムが高度・精緻であるほど、プログラム本体の性能もさることながら、それを使う解析者との組み合わせという観点が一層重要になるのではないだろうか。

参考文献

- 1) 三村 衛・幸繁宜弘：FEM解析結果に影響する因子の評価～圧密解析を題材に～，土と基礎 Vol. 53, No. 8, pp. 28～30, 2005.
- 2) 竜田尚希・稲垣太浩・三嶋信雄・藤山哲雄・石黒 健・太田秀樹：軟弱地盤上の道路盛土の供用後長期変形挙動予測と性能設計への応用，土木学会論文集，No. 743/Ⅲ-64, pp. 173～187, 2003.
- 3) Sekiguchi, H. and Ohta, H.: Induced anisotropy and time dependency of clay, Proc. Specialty Session 9, 9th ICSMFE, pp. 475～484, 1977.
- 4) 地盤工学会：FEMの設計への適用に関する研究委員会報告書，2005.
- 5) 大平 彰・芳賀健彦・齊藤一郎・西崎晶士：有限要素多次元圧密解析における要素モデルの比較と計算事例，土と基礎，Vol. 29, No. 4, pp. 25～32, 1981.
- 6) 荒井克彦・渡辺知幸・田行啓一：多次元圧密数値解析手法の比較，土質工学会論文報告集，Vol. 23, No. 3, pp. 189～195, 1983.
- 7) 赤井浩一・田村 武：弾塑性構成式による多次元圧密の数値解析，土木学会論文報告集，第269号，pp. 95～104, 1978.
- 8) 日本道路公団：設計要領第一集，土工編 第5章 軟弱地盤上の盛土，pp. 5-1～5-100, 1998.

（原稿受理 2005.4.28）