

軟弱地盤上の道路盛土の性能設計に関する研究（その１） 土/水連成弾粘塑性 F E Mを用いた盛土の 性能照査手法の提案と適用性の検証

藤 山 哲 雄 武 部 篤 治
石 黒 健 稲 垣 太 浩^{*1}

要 旨

軟弱地盤上の道路盛土の設計は現在、設計要領に定める仕様規定に基づいて行われているが、近い将来、性能設計への移行が予定されている。本研究では、性能設計移行への準備として、軟弱地盤上の道路盛土の長期的な性能（Performance）を事前に予測・照査するためのツールの整備を行うとともに、これを援用して初期建設費＋維持管理費（ライフサイクルコスト）を最小化する最適設計の一連の流れを示し、軟弱地盤上の道路盛土性能設計法の確立を目的とした検討を行っている。本論文（その１）では、軟弱地盤上の道路盛土の性能予測ツールとして土/水連成弾粘塑性FEMを援用した手法を提案し、実盛土計測結果との比較からその適用精度の検証を行った。この結果、提案手法によって道路盛土の長期的な性能を評価でき、性能設計の有力なツールとなり得ることを示した。

キーワード 性能設計 / 道路盛土 / 軟弱基礎地盤 / 土/水連成弾粘塑性FEM / 長期変形挙動 / 盛土施工時の安定性評価

目 次

- | | |
|----------------------------------|---------------|
| 1．はじめに | 4．盛土の維持補修費の予測 |
| 2．道路盛土の供用後長期変形挙動
の再現 | 5．結論 |
| 3．盛土～軟弱基礎地盤の施工時安
定性評価手法と精度の検証 | |

PERFORMANCE-BASED DESIGN OF ROAD EMBANKMENT ON SOFT GROUND -No.1- AN APPLICATION OF ELASTO-VISCO-PLASTIC FEM

Tetsuo Fujiyama
Takeshi Ishiguro

Atsuji Takebe
Motohiro Inagaki

Synopsis:

The current design of road embankment on soft ground is based on the regulated specifications. But the performance-based design is scheduled to introduce in the near future. In this paper, an applicability of an elasto visco-plastic soil/water coupled FEM to the performance-based road design is discussed. FEM analysis was carried out to simulate the long-term stress-deformation behaviour and the stability during construction of the actual road embankment on the soft ground. The analyzed and measured results agreed well. The maintenance cost estimated by the calculated residual settlement also agreed with the actual cost. FEM analysis is presented as the reasonable means to design the road embankment on soft ground based on its performance.

* 1 日本道路公団試験所

1. はじめに

現在我が国では、建築、道路橋、港湾施設、鉄道構造物等多くの分野で設計基準の性能規定化が進んでいる¹⁾。しかし、道路土工をはじめ、各機関の指針および日本道路公団設計要領では、軟弱地盤上の道路盛土の設計は指針に定める仕様規定に基づいて行われているのが現状である。近い将来、軟弱地盤上の道路盛土の設計においても、建築等と同様に性能設計への移行が予定されている²⁾。性能設計では、従来のような細かい仕様規定は示されず、図-1³⁾のごとく道路盛土が供用開始後の長期間にわたって安全性、走行性、耐久性、環境適合性、経済性、維持管理の容易性等を確保し、提示された要求性能を満足できるのであれば、どのような設計法、施工法、施工管理方法をとってもかまわない。ただし、道路盛土の要求性能が十分に確保されることを、設計段階であらかじめ何

らかの手法により保証しておく必要がある。性能設計では構造物に要求される性能が示されているに過ぎず、性能照査の具体的な方法は何も提示されていない。そこで本研究では、軟弱地盤上の道路盛土の長期にわたる性能(Performance)を事前に予測、照査するための有力なツールとして土/水連成弾粘塑性FEMを取り上げ、ライフサイクルコストの算出も含めて、「性能設計」としての実現性、成立性を、道路盛土の実例をモデルケースとして検討するものである。FEMでは、各現場それぞれの複雑な地盤条件、境界条件、施工条件をも比較的容易にモデル内に取り込むことができるため、各現場に対応した「最適設計」を行える可能性がある。本論文は(その1)として、土/水連成弾粘塑性FEMにより、軟弱地盤上の道路盛土の長期的な応力、変形挙動ならびに安定性を再現し、実測値との比較から盛土パフォーマンスの予測手法としての精度検証を行う。

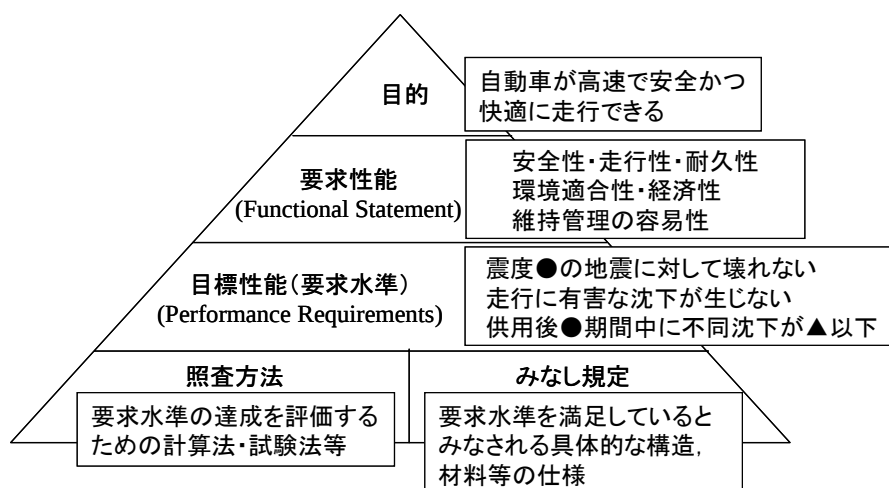


図-1 軟弱地盤上の道路盛土の性能設計の考え方（稲垣，三嶋³⁾による）

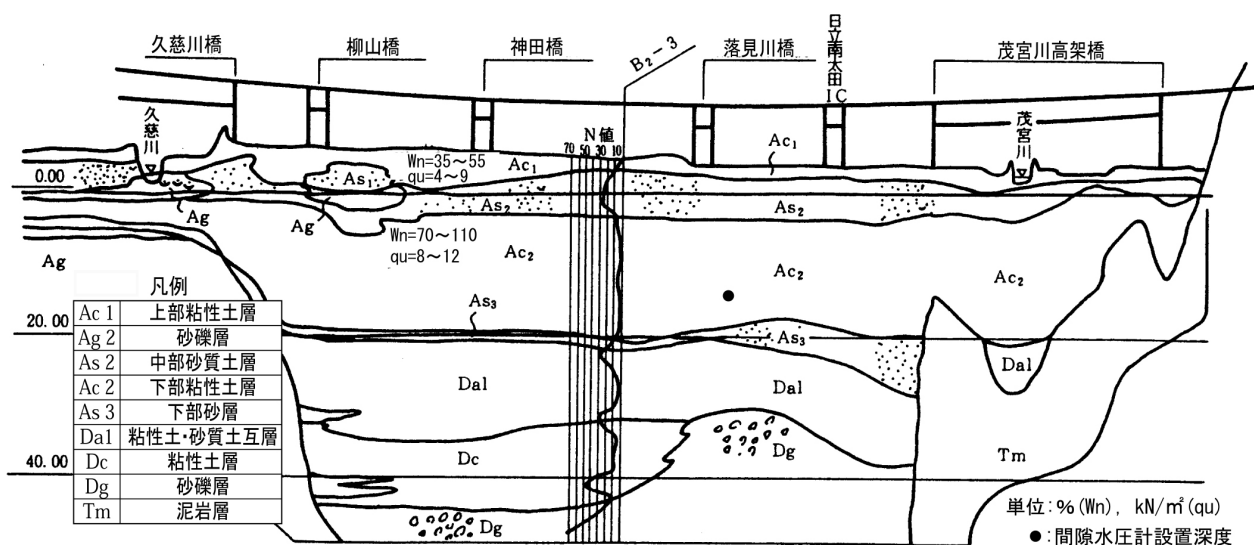


図-2 軟弱地盤箇所地盤概要

2. 道路盛土の供用後長期変形挙動の再現

2.1 解析対象モデル地区の長期地盤変状と維持補修工事状況

解析対象としたのは、常磐自動車道神田地区の久慈川橋～日立南太田ICの間、約1.8kmの区間である。当地区では、厚さが20mにも及ぶ海成粘土（Ac2）で構成される軟弱地盤の上に、高さ約10mの道路盛土が築造されている。図-2に、本地区の地層縦断図を示す（軟弱粘性土の自然含水比、一軸圧縮強度の範囲を図中に併記）。この海成粘土（Ac層）は 10^{-7} cm/secオーダーの透水係数を有するため、盛土荷重が加わった後の軟弱地盤の圧密沈下には、相当の時間を要するものと考えられた。そこで、軟弱地盤の圧密特性、ならびに改良工法としてのサンドドレーンの適用性を調査するために、本工事に先立って試験盛土が実施された。無処理地盤の試験盛土A、サンドドレーンによる地盤改良を行った試験盛土Bの位置を図-3中（右上）に示す。一方、高速道路の設計要領では、数多くの既往施工実績における経済性の観点から「沈下対策は十分な放置期間の確保等、時間効果の有効活用を図るものとし、残留沈下対策としての地盤処理工は原則として実施しないものとする。」ことを基本としている⁴⁾。

試験盛土の結果、サンドドレーンによる改良効果は確認されたが、本地点には軟弱粘土層の上部に砂層（As2）があるため、盛土のすべり破壊に対する安定性が問題とならなかったこともあり、経済性等を考慮して、結局、本線工事には圧密促進対策は施されず、道路の余裕幅員の確保やカルバートボックスの上げ越しなどの対策がとられるにとどまった。しかし、図-3に示すように、道路供用開始（昭和60年）後、橋台部（杭基礎）での段差やカルバート部周辺での上載荷重の違いに起因する不同沈下が縦断方向に顕著に見られ、また、当初の想定をはるかに越える残留沈下が長期間にわたって発生した。この残留沈下量は道路公団の過去の沈下実績を大きく上回り、橋台部の段差や縦断勾配の補修、そして、盛土周辺の田畑の連れ込み沈下に対する補修工事費は、道路延長1kmあたり約9億円と、膨大なものとなった。1983年の設計当時、当地点は一次元圧密理論による慣用法にて沈下予測が行われていた。もし、当時、現在の最新の解析手法を駆使して、不同沈下による縦断方向の路面勾配変化、周辺田畑への連れ込み沈下の影響等を精度良く予測することができたならば、何らかの軟弱地盤対策を施し、維持補修費用をここまで増大させることはなかったかもしれない事例である。

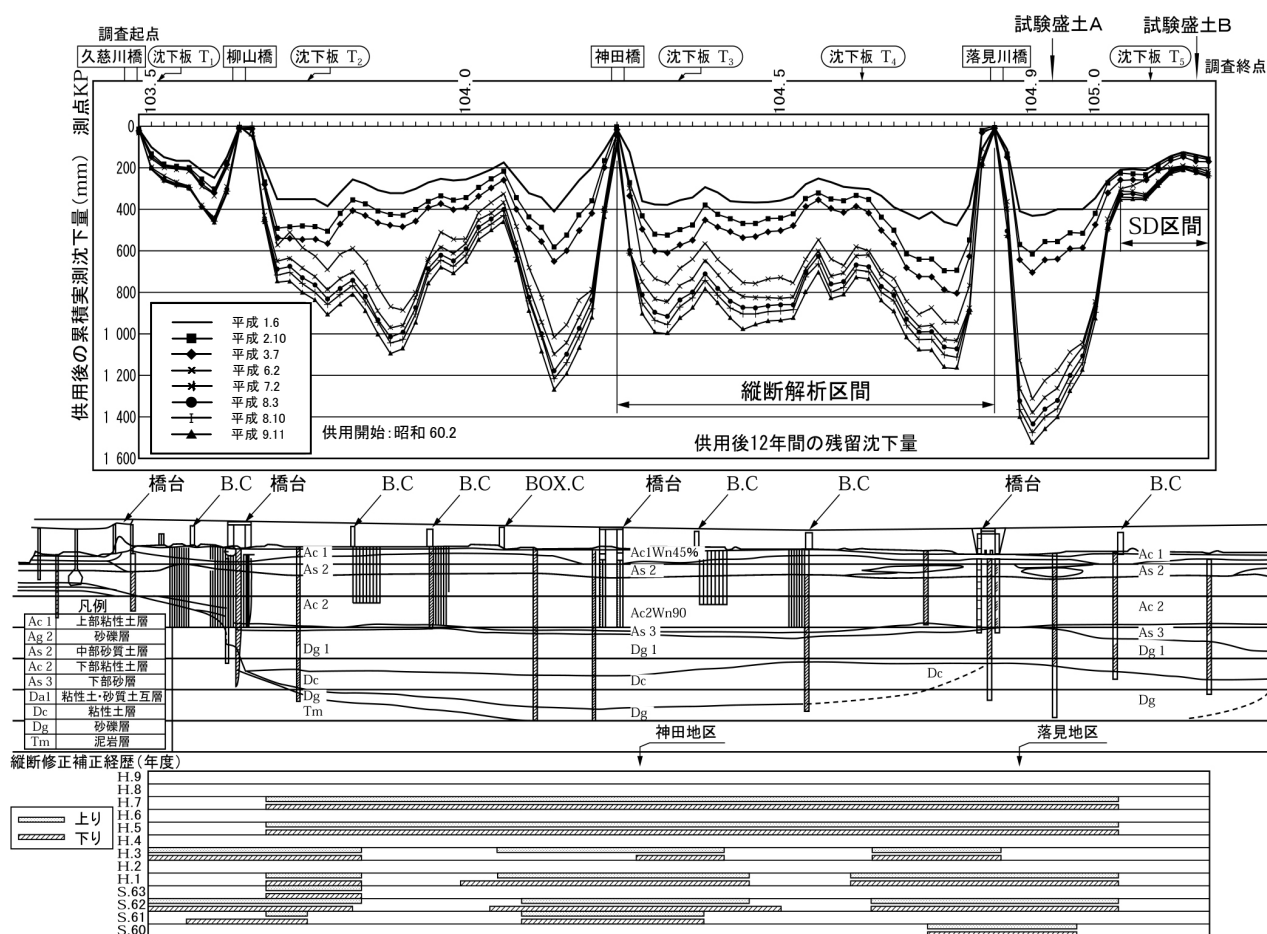


図-3 神田地区（久慈川橋～日立南太田IC）の長期的地盤沈下及び縦断修正経歴の状況

2.2 土/水連成弾粘塑性FEMによる道路盛土の供用後長期沈下挙動の再現

(1) 解析手法及び解析条件

解析手法としては、土の構成モデルとして関口・太田モデル⁵⁾を取り込んだ土/水連成弾粘塑性FEMを用いた。解析コードは、当社土木設計部開発の弾粘塑性圧密解析プログラムVPCUPLAである。解析は二次元平面ひずみモデルとし、盛土は、実工程に合せて要素を逐次追加することでモデル化した。図-4(a)、(b)に解析に用いたメッシュ図を示す。図-4(a)は、盛土横断方向を、図-4(b)は盛土縦断方向(図-3中の神田橋～落見川橋間)をモデル化したものである。関口・太田モデルに用いる各種の弾粘塑性パラメータは、試験盛土地区の土質試験結果を利用して設定した。その他、室内試験によって直接的に求められていないパラメータについては塑性指数 I_p 、自然含水比 w_n に基づいて推定する方法^{6), 7)}を適宜採用した。サンドドレーン打設地盤(試験盛土B)については、地盤要素の透水係数を等価換算し⁸⁾、変形特性は周辺の原地盤と同一とした。解析モデルおよび解析に用いたパラメータの詳細については、文献⁹⁾を参照されたい。

解析の手順としては、まず、横断方向解析により試験盛土A、Bの短期挙動、及び沈下板により求められた供用後残留沈下の再現を試みた。次に、縦断方向の解析モデル(図-3中の神田橋～落見川橋間をモデル化)、縦断方向の不同沈下の再現を試みた。盛土の縦断方向に対して二次元平面ひずみ条件を課すのは実情には合致しないが、多数の横断解析を行うことが実務的に不可能であったため、便宜的な方法として、複数点の横断解析モデルによる地表面沈下と縦

断解析結果との相関性を調べ(キャリブレーション)、両者の比率を用いて縦断解析結果にフィードバックする方法で対処した。

(2) 解析結果と実測データの比較

図-5は、前出の2つの試験盛土A(無対策)、B(サンドドレーン打設)の施工時および施工後の短期の地盤挙動(沈下および粘性土層の過剰間隙水圧)について、実測値と解析値を比較したものである。神田地区の基礎地盤は、表層部分にクラスト(硬い粘土層)が存在し、その物性の設定が非常に難しい¹⁰⁾。その影響もあって、短期の沈下量は完全な一致を見るには至っていないが、粘性土層での過剰間隙水圧の発生と消散、盛土築造に伴う沈下発生量の違いなど、サンドドレーンの有無による地盤挙動の違いがうまく表現されている。

試験盛土の施工が終了した後、久慈川橋～日立南太田IC間で沈下板による縦断方向の沈下計測が長期間にわたって続けられた。供用開始以降の長期残留沈下を3箇所の沈下板(図-3参照。ドレーン打設箇所も含む)の位置で比較した結果が図-6である。無対策部、ドレーン打設部を含めて、良好な精度で供用開始以降の残留沈下傾向を再現できていることが分かる。次に、盛土縦断方向の沈下について、実測データと解析結果を比較したものを図-7に示す。両者を比較するとその整合性は路面の縦断線形、その時間的な推移共に比較的良好と言える。

道路盛土を築造すると、敷地外へも地盤変状の影響が及ぶ。図-8は、盛土横断方向の解析を行って、供用開始以降の周辺地盤の連れ込み沈下量の分布を再現した結果

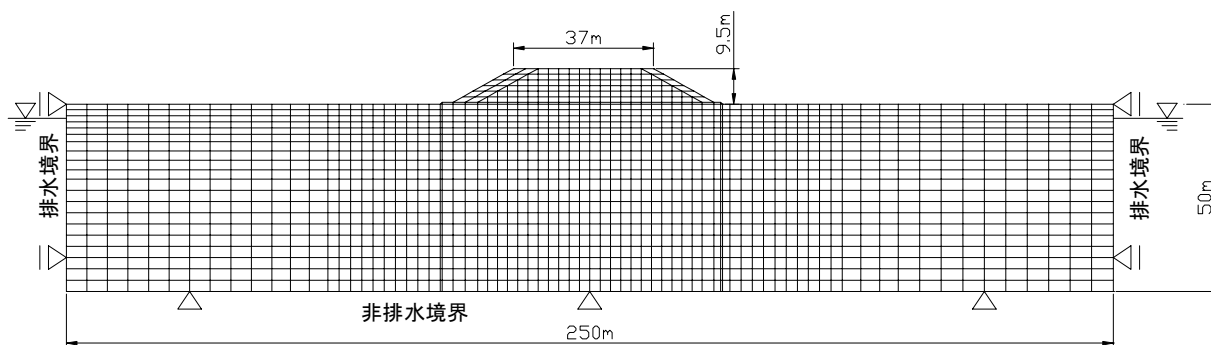


図-4(a) 解析に用いたメッシュ図(盛土横断モデル)

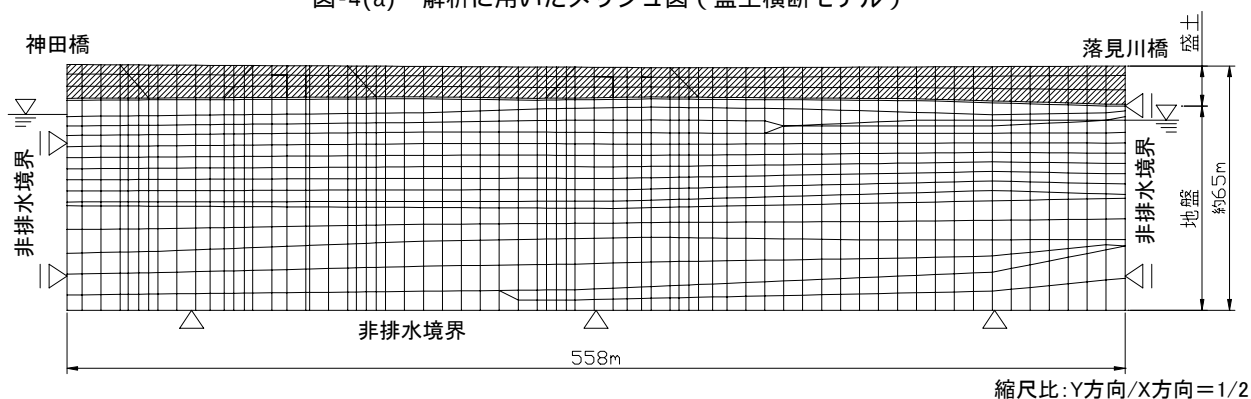


図-4(b) 解析に用いたメッシュ図(盛土縦断モデル)

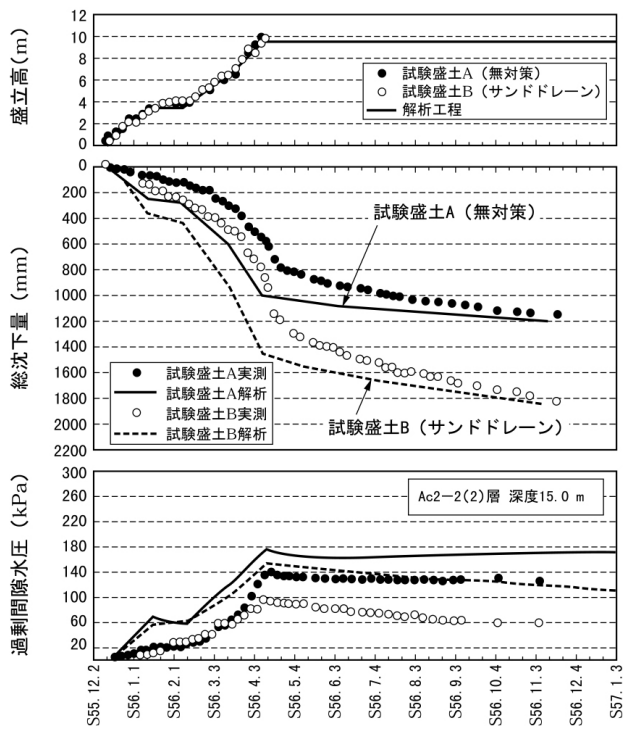


図-5 試験盛土時の短期地盤挙動に関する解析値と実測値の比較

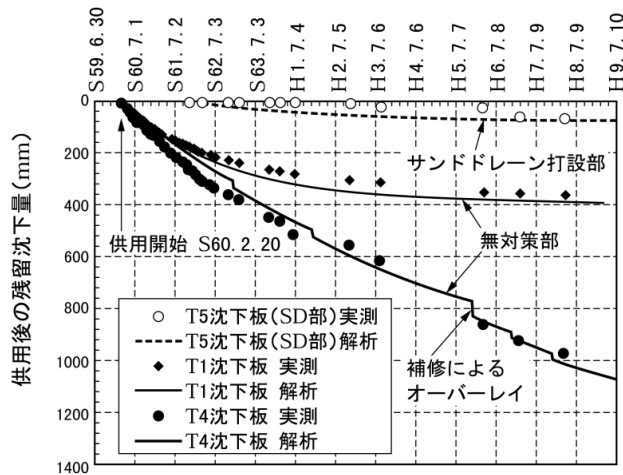


図-6 供用開始以降の長期残留沈下に関する解析値と実測値の比較

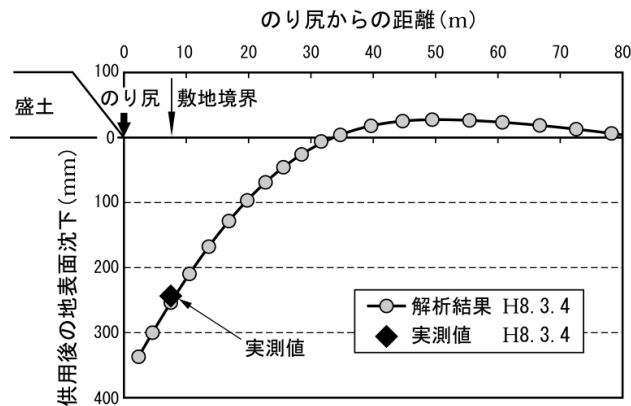


図-8 周辺地盤の連れ込み沈下に関する解析値と実測値の比較

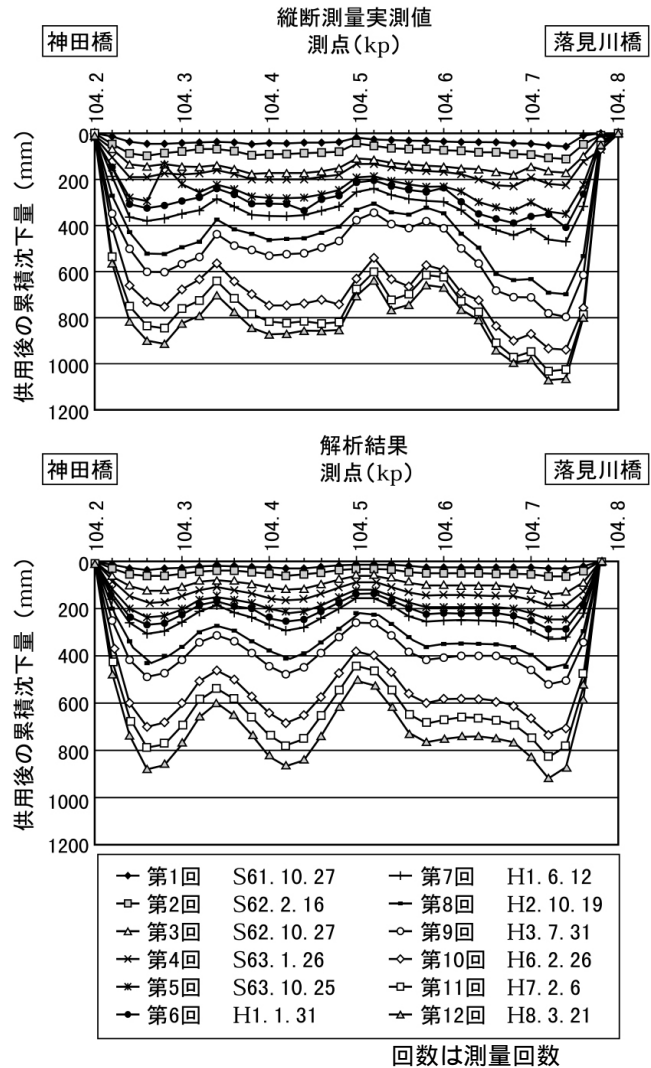


図-7 神田橋～落見川橋間の縦断方向沈下形状に関する解析値と実測値の比較

である。実測値が敷地境界部の1点しかないが、現地ヒアリングによる周辺の沈下状況（敷地境界から20～30mの範囲まで沈下の影響が見られた）ともよく合致している。

以上の結果から、土/水連成弾粘塑性FEMにより、盛土の横断方向の短期的、長期的な応力変形挙動、および盛土縦断方向に見られる不同沈下を精度良く表現でき、計算モデルの妥当性を確認することができた。

3. 盛土～軟弱基礎地盤の施工時安定性評価手法と精度の検証

(1) 盛土施工時安定性評価手法の提案

軟弱地盤上の道路盛土の施工時安定性照査には、円弧すべり法が一般的に用いられているが、この方法では盛土築造時の基礎地盤の応力変形挙動や対策工法の効果を詳細に表現することは難しい。そこで、本研究では、慣用の円弧すべり法よりも詳細なモデル化、軟弱地盤の挙動予測、あるいは対策工のパフォーマンス評価が可能で、かつ剛塑性極限支持力解析手法^{11),12)}よりも簡易、実

務的な方法として、土/水連成弾粘塑性FEMを援用した評価方法¹³⁾を採用する。これにより、「盛土施工時の短期安定性」と「道路供用後の長期残留沈下」の2つの問題を同一のツールで評価することが可能となる。

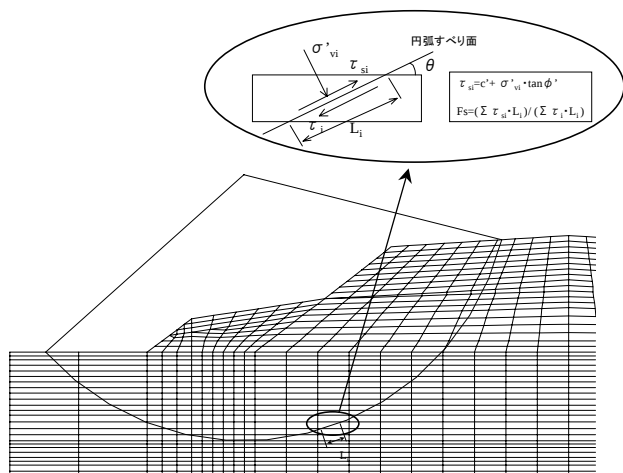
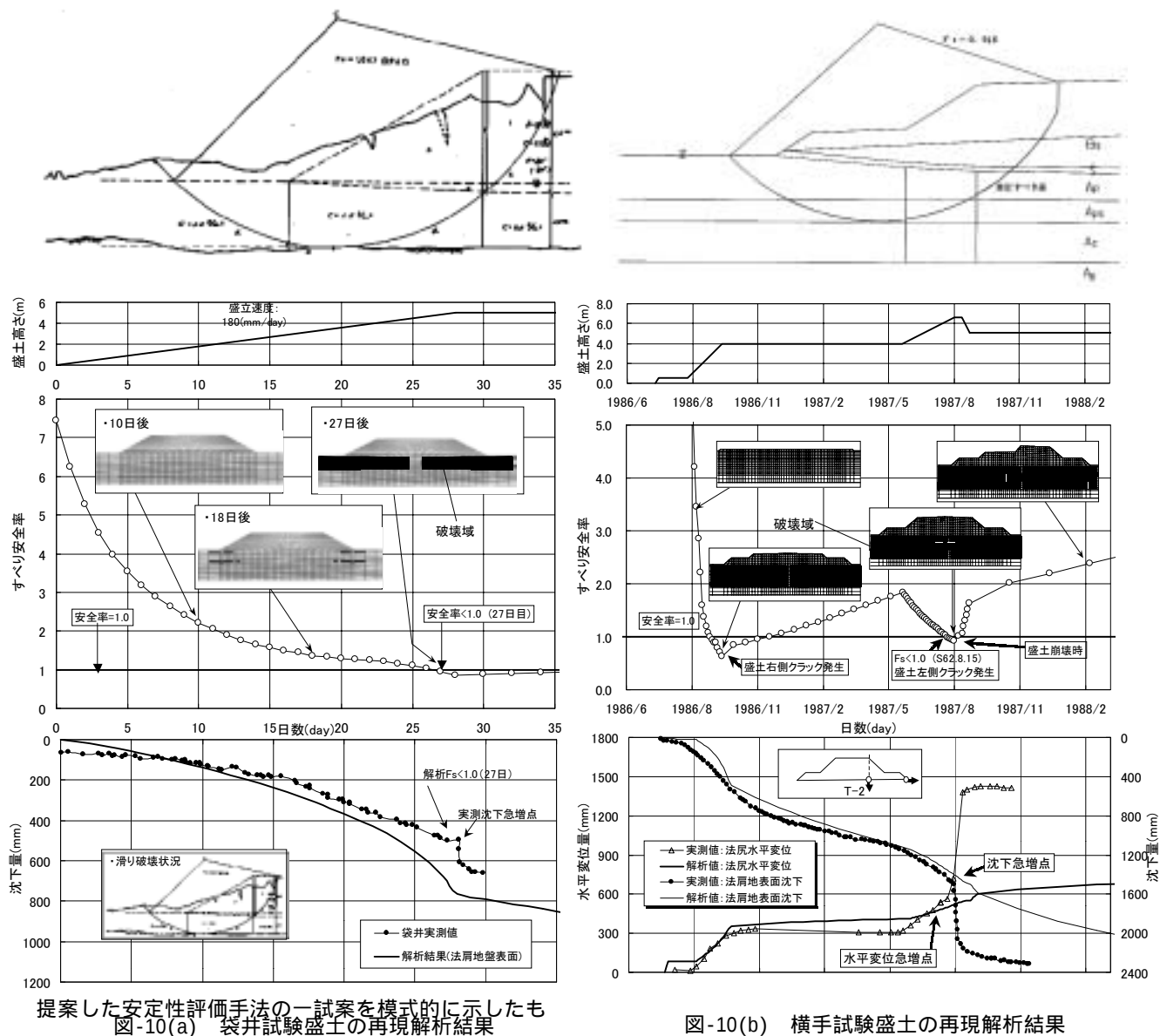


図-9 有効応力解析結果を用いた安定性評価法¹³⁾

のが図-9である。FEM解析により、盛土築造中の基礎地盤内の有効応力状態を計算する。次に、基礎地盤を通る円弧すべり線を設定し、FEMモデルの中ですべり線を横切るすべての要素に関して、すべり線上に働く有効垂直応力 σ_v' とせん断応力 τ を求め、図中に併記した算式によりすべり安全率を算定する。この方法によれば、盛土築造に伴う基礎地盤内での過剰間隙水圧の発生や消散、盛土形状に対応した地中有効応力増分や対策工の効果などを詳細に考慮したうえで、すべり安全率を定量的に評価することが可能となる。なお、今回は慣用の円弧すべり計算を別途実施し、最小安全率を与える円弧に固定して計算を行ったが、本来は、FEMモデルの中ですべり線の位置を種々に変え、最小値を求める必要がある。

(2)解析結果と精度の検証

提案手法の妥当性や精度を検証するためには、実際に完全崩壊の生じた事例での検討が必要と思われる。前出の神田地区の事例は、盛土施工時の安定性には問題がなかったため、ここでは、完全に崩壊に至った事例として



提案した安定性評価手法の一試案を模式的に示したも
図-10(a) 袋井試験盛土の再現解析結果

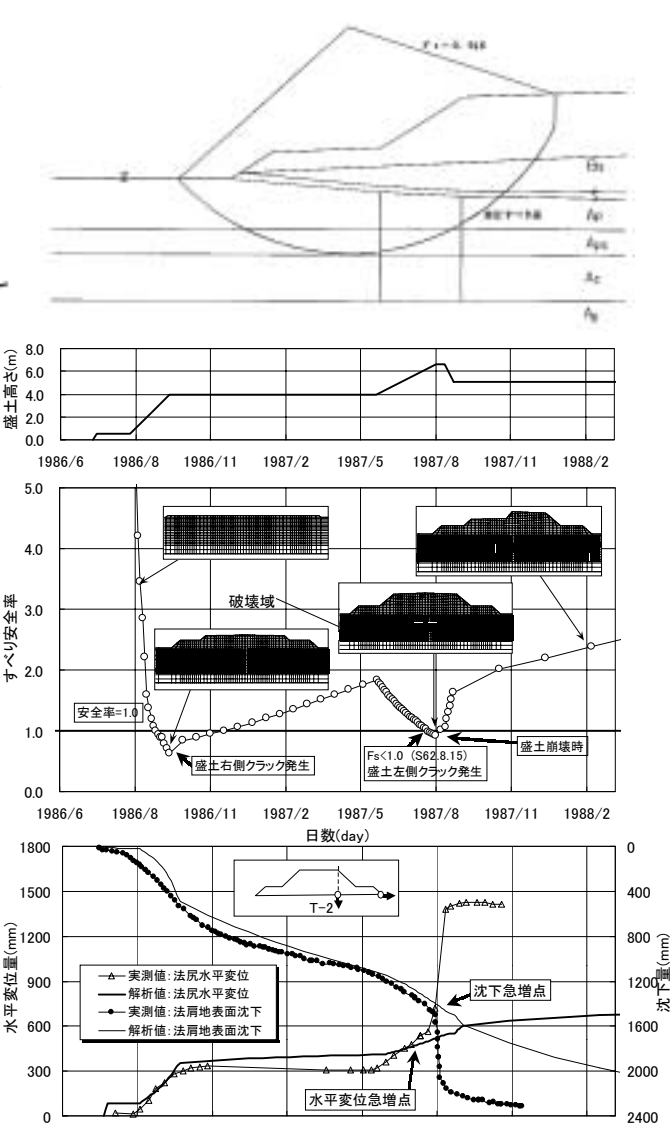


図-10(b) 横手試験盛土の再現解析結果

袋井¹⁴⁾・横手¹⁵⁾の2の試験盛土を取り上げた．図-10(a),(b)は，図-9に示した手法で安全率を追跡した結果を示したものである．図には試験盛土崩壊後の形状スケッチおよび盛土沈下・側方変位実測データ(崩壊発生以降は測定不能となっている)を併記しているが，盛土沈下(袋井・横手)や法尻の側方変位(横手)はある時点(図中の矢印)で急増し，盛土崩壊の発生時点を明確に捉えている．一方，解析に必要なパラメータは自然含水比や一軸圧縮強度をもとに推定したが，いずれも古い事例であるため基礎地盤のパラメータ等は必ずしも明白ではなく，幾つかの仮定や推定を加えざるを得なかった．このため，解析は変位の計測結果と完全に一致するものとはなっていないものの，いずれの試験盛土も，崩壊が生じたと考えられる時点の付近で計算上基礎地盤内に破壊領域が急速に拡大するとともに，すべり安全率が1.0を下回り，盛土崩壊の発生時点を概ね再現することができていると言える．横手試験盛土では，一次盛土終了時に堤体にクラックが発生し，盛土崩壊の予兆が見られた．そして二次盛土完成直前に完全崩壊が生じており，図-10(b)に示したすべり安全率の算定結果は，このような2回にわたる盛土不安定化の発生も概ね再現できているものと思われる．ただし，図からわかるように関口・太田モデルでは沈下や側方変位が盛土破壊時に急増する実測挙動までは追い切れないため，破壊後の変形挙動予測はまた別途の手法が必要である．

以上より，本論文で提案した盛土の施工時安定性評価手法の妥当性，実務的な精度を，崩壊試験盛土の再現解析により概ね確認することができたと言える．なお，ここでは紙面の関係上割愛したが，北海道縦貫自動車道の岩見沢・江別地区の試験盛土に対しても同様の手法で長期の応力変形挙動，ならびに施工時安定性を照査し，実測挙動を良好に再現したことを付記しておく．

4. 盛土の維持補修費の予測

軟弱地盤対策を行えば，確実に残留変形や不同沈下，これに起因する補修工事費を低減できる．しかし，逆に軟弱地盤対策のための初期コストが発生することになる．維持管理コストについては，高橋ら¹⁶⁾が，北海道縦貫道岩見沢・江別地区の実績データを分析し，図-11，図-12のような残留沈下量(橋台間の最大沈下量)と段差補修費，あるいは縦断勾配補修工事費との関係を得ている．これら図中の関係式を援用し，土/水連成弾粘塑性FEMで求めた供用開始以降の推定残留沈下量から維持管理コストを計算してみた．ただし，実補修工事費からは段差，縦断勾配路面補修や，後述する田畑補修工事に無関係な部分を除外し，計算値には別途現場経費を勘案するなど，両者を同一条件で比較できるように工夫を加えた．また，田畑補修工事費については，神田地区での実補修工事費と敷地境界部の残留沈下量(解析値)の関係式を求め，算定式を新たに作成して加算した．図-13に，試算された

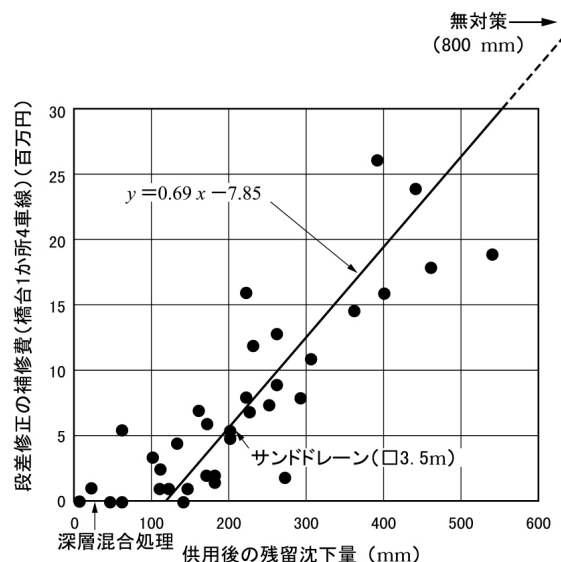


図-11 残留沈下量と段差補修費の関係
(高橋,川井田,土谷,新井¹⁶⁾による)

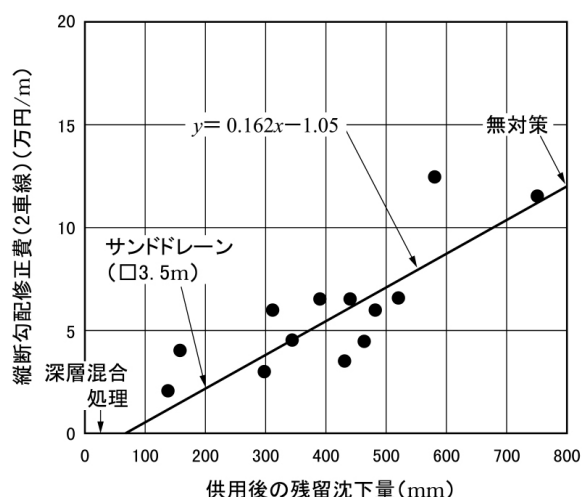


図-12 残留沈下量と縦断勾配補修費の関係
(高橋,川井田,土谷,新井¹⁶⁾による)

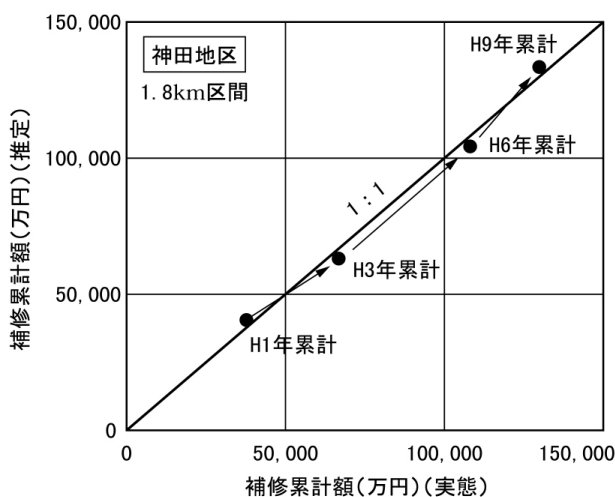


図-13 補修費の予測値と実態の比較結果

補修工事費と実際の補修工事費を平成元年から平成9年までの累計値同士で比較した結果を示す。図-11、図-12の算定式を用いた推定結果は、道路供用開始後の維持管理に要する補修費の実態を良く再現できていることが分かる。したがって、FEMにより長期の残留沈下を予測すれば、図-11、図-12を用いて維持補修費を計算することができ、ひいては軟弱地盤上のライフサイクルコスト(初期建設費+維持補修費)を予測することができる。FEMは、各現場の複雑な地盤条件、境界条件や、施工条件を比較的容易にモデル化できるという利点を有する。よって、提案手法を用いれば、ある軟弱地盤に対し、複数の対策工のメニューについて残留沈下の予測を行い、各々のライフサイクルコストを比較しつつ、最適な工法を選択するという最適設計を行う事が可能である。本論文(その2)¹⁷⁾では、これに着目したケーススタディを行っている。

5. 結論

本論文で得られた知見を以下に示す。

土/水連成弾粘塑性FEMを用いた再現解析の結果から、軟弱地盤上の道路盛土における短期的・長期的な応力変形挙動を良好に再現することができた。また、道路縦断方向解析においても、不同沈下の発生等を再現でき、計算モデルの妥当性を確認することができた。慣用の一次元圧密解析では、複雑な地盤条件や施工条件を考慮することは困難であるが、FEMが周辺地盤の変状も含めて道路盛土の長期変形挙動を再現・予測する有用なツールとなる可能性を示した。

応力変形解析用の土/水連成弾粘塑性FEMを援用し、盛土の施工時安定性を詳細に評価するための実務的な計算手法を提案した。完全に崩壊に至った袋井、横手の2つの試験盛土事例に対して再現解析を行い、いづれの試験盛土も、盛土崩壊の発生時点を概ね再現しており、その妥当性を確認することができた。

盛土の長期にわたる残留沈下を予測することにより、道路の維持補修費が算出できることを示した。これにより、様々な要求性能を満たし、ライフサイクルコストを最小とするような「最適設計」への可能性を示した。

参考文献

- 1) 本城勇介：基礎構造物の性能設計と耐震設計，地質と調査 小特集 新しい耐震設計法，pp.2～pp.8，2001年第4号。
- 2) 大下武志，青山憲明，橋本聖，森芳徳：道路盛土の性能規定化と品質管理・検査，土木技術資料，pp.26～pp.31，43-5. 2001。

- 3) 稲垣太浩，三嶋信雄：土木施工別冊，軟弱地盤対策工の設計・計算例 9章，pp.161～pp.163，2002年5月号
- 4) 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～pp.5-100，平成10年5月。
- 5) Sekiguchi, H. and Ohta, H. : Induced anisotropy and time dependency in clays, Proc. Specialty Session 9, 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, pp.229～pp.237, 1977.
- 6) Iizuka, A. and Ohta, H. : A determination procedure of input parameters in elasto-viscoplastic finite element analysis, Soils and Foundations, Vol.27, No.3, pp.71-87, 1987.
- 7) 軽部大蔵：規格以外の三軸圧縮試験方法とその問題点，第20回土質工学シンポジウム論文集，pp.45～pp.60，1975.
- 8) 三嶋信雄，長尾和之，福山雅典，石黒健，菅井正澄：基礎地盤の透水性が盛土載荷時の沈下および安定性に及ぼす影響，第30回土質工学研究発表会，pp.1275～pp.1278, 1995.
- 9) 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，土木学会論文集投稿中，2003.
- 10) 飯塚敦：軟弱地盤の変形・安定解析に関する基礎的研究，京都大学博士論文，1988.
- 11) 浅岡 顕，小高猛司，松尾 稔：複合地盤の非排水支持力に関する研究，土木学会論文集，No.448 / -19，pp.63～pp.71，1992.
- 12) Tonogaito, M., Kawaida, M., Betsui, T., Ishiguro, T., Takahashi H., and Kumagai, K.: On the effect of settlement acceleration and the increase of foundation strength by vertical drain method in peat ground, IS TOHOKU, 1998.
- 13) 三嶋信雄，長尾和之，杵山 務，菅井正澄，石黒 健：バーチカルドレーンを打設した盛土基礎地盤の安定性に関する解析的検討，第29回土質工学研究発表会，pp.1325～pp.1326，1994.
- 14) 日本道路公団高速道路静岡建設局・日本道路公団試験所・不動建設：東名高速道路袋井試験盛土工事報告書，1967.
- 15) 日本道路公団仙台建設局・横手地区軟弱地盤委員会：東北横断自動車道横手地区軟弱地盤の検討報告書，第4集 軟弱地盤対策工，1987.
- 16) 高橋朋和，川井田実，土谷和博，新井新一：高速道路における建設費と管理費を考慮した軟弱地盤対策の事後評価，土木学会論文集 No.693 / -53, pp.47～pp.59, 2001.
- 17) 前田和亨，武部篤治，石黒健，藤山哲雄：軟弱地盤上の道路盛土の性能設計に関する研究(その2)性能設計のケーススタディ，前田建設工業技術研究所報 vol.44 投稿中，2003.