

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 5日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2011

課題番号：21760371

研究課題名（和文）

盛土載荷に伴い残留沈下の可能性がある軟弱地盤の判定法と沈下予測法の確立

研究課題名（英文）

Establishment of methods for assessing and predicting the susceptibility of soft grounds to large long-term settlement due to embankment loading.

研究代表者

田代 むつみ (TASHIRO MUTSUMI)

名古屋大学・工学研究科・助教

研究者番号：00422759

研究成果の概要（和文）：軟弱地盤上への盛土載荷を対象とし、供用後に長期に亘り発生する残留沈下問題に対して、①「大きな残留沈下の可能性がある軟弱土」を室内力学試験結果（鋭敏比と圧縮指数比）から事前判定する方法、および②大きな残留沈下の可能性がある判断された軟弱地盤に対する沈下予測法の提案、を行った。また、上記提案手法を、現在施工中の国内外の軟弱粘土、超軟弱PEAT地盤に適用し、実務設計への展開を行った。

研究成果の概要（英文）：This research project proposed two methods for (1) assessing the susceptibility of soft grounds to large residual consolidation settlement due to embankment loading from the results of laboratory test (compression index ratio and sensitivity ratio), and (2) predicting the long-term settlement that could occur in the future. Aiming at practical design development, these proposed methods were applied to actual sites being under construction in Japan and abroad where grounds are composed of soft clay, or ultra-soft peat.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
2011年度	743,174	222,952	966,126
総計	4,243,174	1,272,952	5,516,126

研究分野：地盤工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：地盤の挙動

1. 研究開始当初の背景

旧日本道路公団により、これまで軟弱地盤上に高速道路用盛土が建設された事例は、全国で50地区以上あるが、そのうち約2割の地区において供用後に残留沈下が1m以上発生し、深刻な問題となっている。例えば、地盤自動車道神田地区では、供用後に20年以上かけて約2mもの残留沈下が発生した結果、14年間で累計20億円、道路延長1kmあたりでは約9億円もの莫大な維持管理費を費やしている。

「大きな残留沈下の発生」とは、言い換えれば、室内力学試験結果などから求めた事前の予測よりも、原位置では量も時間も大きな沈下が発生したことを意味する。このような粘土の「時間依存性挙動」に対しては、粘土の土骨格自体がもともと粘性を持っているために起こる現象であるとして、粘塑性理論などにより記述されてきた。しかし、これらの理論はあくまで現象論的な見方を超えず、ある現場の特殊な現象を記述できたとしても、その理由の説明や他の現場への応用は難

しかった。

これに対し、名古屋大学地盤力学研究グループでは、粘土の遅れ圧密が「自然堆積した」軟弱粘土地盤に特有の現象であって、その粘土を十分に練り返した「人工の」粘土では起こりにくいことに着目し、両者の差にその原因を求めることにより、長期に亘りダラダラと続く「遅れ圧密大沈下」のメカニズムを説明してきた。すなわち、自然堆積した粘土は、堆積環境に応じて「骨格構造」が発達した状態にあり、骨格構造の働きを記述した弾塑性構成式 (SYS カムクレイモデル) を水～土連成の初期値・境界値問題として解けば、条件に応じて自ずと「時間依存性」が現れてくることを説明してきた。

さらに当研究グループでは、実際に軟弱地盤上に高速道路用盛土が載荷された全国の現場を対象として、自然堆積粘土の室内力学試験結果に見られる傾向を整理した。そして、大きな残留沈下の可能性がある粘土の判定基準を「鋭敏比 8 以上、圧縮指数比 (不攪乱試料と練返し試料の圧縮線の最急勾配の比) 1.5 以上」として、実務でも利用可能な簡易判定法を提案してきた。また、サンプリング時の乱れの影響を考慮した原位置粘土の初期状態の推定法を提案することにより、この種の粘土を含む地盤では、なぜ大きな残留沈下が発生するのかを説明してきた。そして、名古屋大学が開発した地盤解析コード **GEOASIA** による、精緻な水～土連成有限変形解析により、遅れ圧密大沈下の再現に成功してきた。

本研究課題では、上記提案手法のより広範な種類の土への適用性拡大と精度の向上、およびこれらに基づく新たな設計・施工・維持管理計画のフローの確立を目指す。

2. 研究の目的

(1) 「大きな残留沈下の可能性がある土」の簡易判定法の適用性拡大

我が国における軟弱地盤上への盛土載荷事例をより多く調査し、沈下の主要因となる土の室内試験結果を収集・整理する。そして、これまでに提案してきた簡易判定法の適用性拡大、精度向上を目指す。

(2) 将来起こり得る遅れ圧密大沈下に対する予測技術の向上

現在沈下が進行中の現場に対し、提案した「原位置初期状態の推定法」の適用と、解析コード **GEOASIA** による遅れ圧密大沈下の再現を行い、より精度の高い沈下の将来予測を目指す。

(3) 新たな設計・施工・維持管理計画フローの確立

地盤改良による事前の対策工、また供用後の維持・管理工の効果を数値解析により調べ、ライフサイクルコストの低減を目指した、新

たな設計・施工・維持管理計画のフローを提案する。

3. 研究の方法

(1) 軟弱地盤上への盛土載荷現場に対する実態調査

盛土載荷による沈下の実態及び各種現場データを収集し整理を行う。現場関係者の協力が得られる場合は、現場調査や採取試料の提供も依頼する。

(2) 沈下の主要因となる土の室内試験結果の収集

各現場において、沈下の主要因となった土に対する室内試験結果を収集する。入手可能な採取試料については、名古屋大学や他の試験機関において力学試験 (標準圧密試験と一軸試験) を追加実施する。不攪乱試料にあわせて練返し試料の試験結果も重要であるため、液性限界試験との連動により、練返し試料の作製方法の確立も合わせて目指す。

(3) 「大きな残留沈下の可能性がある土の簡易判定法」の適用性拡大

(1)(2) で収集したデータを整理し、これまでに提案した「大きな残留沈下の可能性がある土の簡易判定法」の精度向上・適用性拡大を検討する。沈下の主要因となる土の種類や状態を系統的に整理し、より広範な種類の土 (粘土に限定しない) に適用可能な判定基準の提案を目指す。

(4) 遅れ圧密大沈下に関する再現精度の向上

すでに沈下が発生した現場のうち、(1)(2) で必要データが揃った地区に対し、地盤解析コード **GEOASIA** により、現地の地盤条件・載荷履歴を再現した数値解析を実施する。複数の再現計算を通して、これまで提案した「原位置初期状態の推定法」の妥当性を確認し、改良・高度化を行う。

(5) 将来起こり得る遅れ大沈下に対する沈下予測

(4) の成果を受け、現在沈下が進行中の現場に対し、再現解析と同じ解析パラメータのまま計算を続けることで、沈下の将来予測を行う。原位置における間隙水圧等の実測データとも整合性を検証し、より精度の高い沈下予測を目指す。

(6) 建設前の対策工および供用後の維持・管理の検討

(4)(5) で解析対象とした現場にたいし、ドレーン打設や SCP などの地盤改良による建設前の対策工、また供用後のオーバーレイや軽量盛土置換による維持・管理の効果を、解析コード **GEOASIA** による数値解析で検討する。

(7) 新たな設計・施工・維持管理計画のフローの作成

(1)～(6) の研究成果をまとめ、ライフライクコストの低減を目指した、新たな設計・

施工・維持管理計画のフローを作成する。本研究課題の成果は、“沈下に対しては地盤は無処理とし、供用後の維持・補修で対応すること”とされてきた従来の設計離縁に、真っ向から新たな提案を行うものである。このため、学会発表ならず現場技術者への成果報告・討議も積極的に実施し、実務で利用可能なフローの作成を目指す。

4. 研究成果

(1) 盛土载荷により「大きな残留沈下の可能性がある土」の簡易判定法の提案

道路用盛土が载荷された、国内の代表的な軟弱地盤地区について、沈下の実態と地盤構成、および沈下の主要因となる土の室内試験結果を収集し、整理した。

この結果、盛土载荷により大きな残留沈下が発生するか否かの、簡易判定法（一次ふるい）を以下の通り提案した。

① 軟弱層が厚く堆積する

（砂層を含まない軟弱層厚が 10m 以上、または軟弱層の最大排水距離が 5m 以上）

② 盛土荷重により圧密降伏応力を跨ぐ

③ 軟弱層を構成する土が、室内力学試験結果より「大きな残留沈下の可能性ある土」と判定される

ここで「大きな残留沈下の可能性がある土」とは、図 1 で示すように、圧縮指数比（不攪乱試料と練返し試料の圧縮線の最急勾配の比）が 1.5 以上、かつ鋭敏比が 8 以上の土として簡易判定できることを示した。

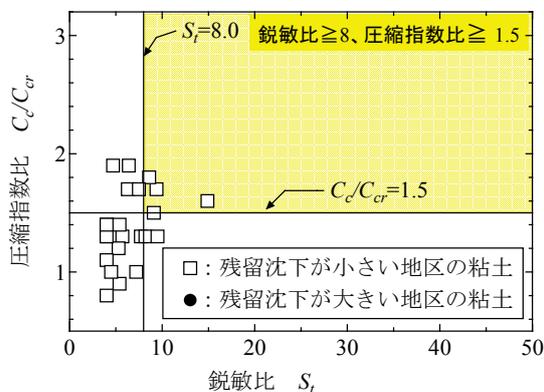


図 1 鋭敏比・圧縮指数比による大きな残留沈下が発生する土の簡易判定法

(2) 練返し試料の作製方法の提案

上記の簡易判定法では、不攪乱試料にあわせて練返し試料の室内試験結果が必要となる。練返し試料とは、完全に骨格構造の影響を喪失した状態の試料あり、その作製方法や試験方法については明確な定義が無く、特に圧密試験については、試験が実施されること自体が非常に少ない。

そこで、本研究課題ではあわせて、各種土試料の練返し試料に対する試験結果を考察

し、特に練返し時の含水比の影響に着目して、以下の結論を得た。

① 液性限界よりも低含水比で練返すと、土試料が固く練返しに大きな力を要した結果、圧縮曲線は過圧密土的となる

② 液性限界よりも高含水比で練返すと、練返しによる構造（嵩張り）の喪失が十分に進まず、圧縮曲線は嵩張った挙動を示す

③ 完全に骨格構造を喪失した練返し試料の作製に最も適した含水比は液性限界である

④ 練返し試料の試験が実施できない、または試験結果が無い場合には、Skempton(1944)にの試験式は圧縮指数の簡易同定法として有効である

(3) 沈下の将来予測と対策工の検討

本研究課題では、(1)の簡易判定法により、大きな残留沈下の可能性があるとして判定された、国内外で施工中の 2 つの現場に対して、沈下の将来予測と対策工の検討を行い、実務設計において適用された。現場毎に、研究成果を示す。

① 超軟弱ピート地盤における大沈下の再現と沈下の将来予測、対策工の検討

舞鶴若狭自動車道の小浜西 JCT～敦賀 JCT の約 50km は現在建設中の高速道路であり、このうち小浜 IC～三方 IC 間では、ピートを含む軟弱層が厚く堆積し、軟弱地盤対策が課題となった。このため、本施工に先立ち軟弱地盤対策工法の選定を目的として、福井県向笠地区において試験盛土が実施された。その結果、盛土施工完了時点で非常に大きな沈下が発生し、最も軟弱層厚が大きい SD 区間では、盛土計画高約 7m を確保するために、盛土厚 (= 盛土高 + 沈下量) が 15m にも達した。盛土前の予測沈下量は、深部ピート層まで沈下対象領域とした場合に 8.6m であったが、それを大きく上回る大沈下が現在までに発生している。大沈下に伴い周辺地盤も広範囲に亘り大きく変形し、法尻付近では最大約 1m の隆起と約 2m の水平変位が観測され、周辺地盤の水路の傾斜や、地盤の亀裂が発生した。2010 年 1 月現在、沈下は 4.0cm/月の速度で進行中であり未だ収束傾向にない。当試験盛土では C-BOX 置換工事も予定されており、大沈下の発生メカニズムの解明と今後発生する沈下量の推定が喫緊の課題となった。

そこで本研究課題では、解析コード **GEOASIA** による水～土連成有限変形解析により、現在までに発生した大規模な沈下の再現をし、今後起こり得る残留沈下を推定すると同時に、軟弱地盤に対する対策工の有効性を解析で検討することを目的とした。

始めに、地盤の形成史や地盤内の間隙水圧の実測値、圧密降伏応力分布を考察した結果、

当地盤は谷底が常に被圧した状態で有機物が厚く堆積して形成されたことを予測し、被圧を考慮した地盤内の水圧分布、有効土被り圧分布を推定した。続いて、室内試験結果を骨格構造の働きを記述する弾塑性構成式 (SYS カムクレイモデル) により再現して材料定数を決定した。その上で、これまでに提案した「原位置初期状態の推定法」を適用し、地盤の初期状態を決定し、施工履歴を再現することで沈下の再現を行った。

そして、ここで、対象地区の深部ピートは、植物繊維の混入などによる試料の「不均質性」が著しく、また高含水比で強度が小さいことに起因して試験開始までの「乱れ」も大きいため、同一層内であっても試験結果のばらつきが大きいことを考慮して、複数の初期状態を想定して解析を行い、最も実測値（層別沈下量）をよく再現する値を求めた。ピートは圧縮性が非常に高いことから、間隙比の減少に伴い透水性が小さくなる $e-\ln k$ 関係を新たに導入した。

上記の試みの結果、図2に示すように現在までの大規模な沈下挙動を再現すると同時に、周辺地盤の隆起や押し出しの様子（図省略）、また図3に示す過剰水圧の分布についても良く再現された。そして、同じパラメータで計算を続けることでその後の沈下挙動を予測した結果、今後約70年に亘り約1.5mの沈下の可能性があることを示した。

続いて対象地盤におけるSD打設の有効性を解析により検討した。SD打設を行わなかった場合、初期に発生する沈下量は小さいが、地盤内で非排水的なせん断が発生し、盛立て中に図4(b)に示すような地盤深部を含む大きな円弧滑りが発生することが明らかとなり、SD打設が致命的な滑り破壊の回避には有効であったことを示した。

さらに、当現場では、基礎無しのC-BOX置換が予定されているため、荷重軽減を行った場合の効果についても検討した。実務設計では本解析結果を用いて、沈下を許容しながら段差をより少なくする、C-BOXおよび周辺盛土の軽量化が検討され、施工が行われている。

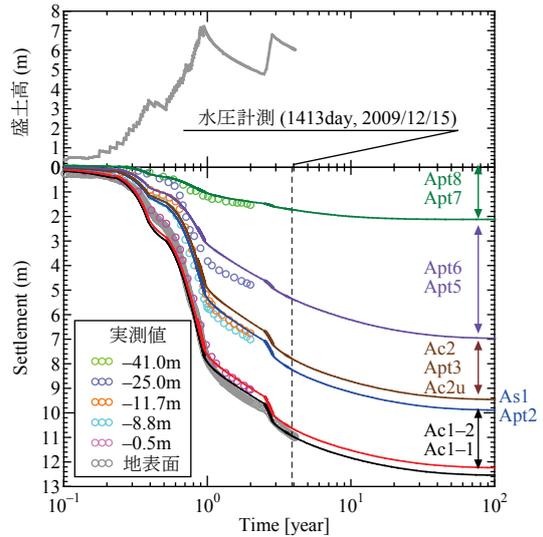


図2 層別沈下量の再現と将来予測

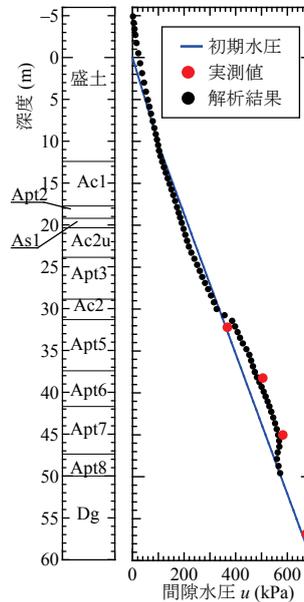


図3 間隙水圧の実測値と解析結果の比較

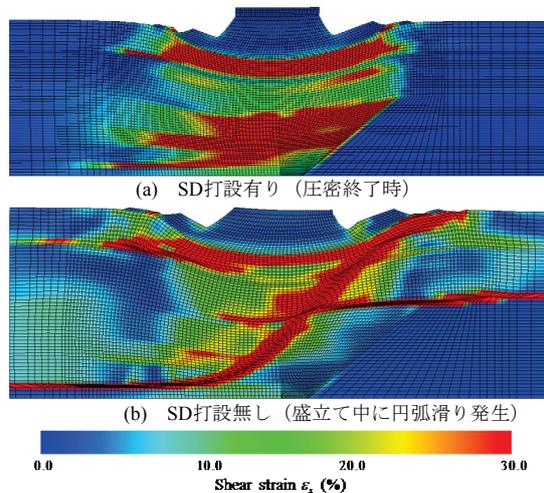


図4 せん断ひずみ分布

②ベトナム国サイゴン東西道路における残留沈下予測と対策工の再検討

現在、インフラ整備が進むベトナム国ホーチミン市南西部において、サイゴン東西道路が建設されている。このうち、サイゴン川左岸の区間は、地表から25～30mの厚さで軟弱層が堆積する後背湿地であり、道路用盛土の建設にあたり、PVD打設とサーチャージ盛土工法が採用された。9か月以上のサーチャージ期間を経て舗装工事を開始した結果、当初の予測を超える残留沈下が発生し、2011年1月現在も3cm/月のペースで沈下が継続中である。今後の残留沈下の推定と、それに基づく対策工の検討が必要急務となった。

そこで本研究課題では、我が国の粘性土地盤から得られた研究成果が、ベトナム国の当該現場に適用できるかを検討し、以下の結論を得た。

- 1) 原位置から採取したベトナム国の粘性土試料の室内試験結果を整理し、我が国の代表的な地区における軟弱粘土の試験結果と比較を行った。この結果、各種物性値や圧縮曲線において類似性が確認された。
- 2) 我が国の軟弱粘土の試験結果から得られた、「鋭敏比・圧縮指数比による長期・大沈下が起こるか否かの簡易判定法」を、対象としたベトナム国の粘土に対しても適用した結果、鋭敏比・圧縮指数比ともに大きく、対象現場において長期・大沈下の可能性があることが分かった。
- 3) SYSカムクレイモデルを用いて弾塑性性状を同定した結果、当該ベトナム粘土は、構造が高位で劣化が速く、圧密降伏応力を跨ぐ大きな盛土荷重を載荷されると、塑性圧縮を伴う軟化に起因して遅れ圧縮が起こることが分かった。
- 4) 地盤解析コード **GEOASIA** を用いた水～土連成解析を実施し、沈下挙動の再現を行い、残留沈下の原因を検討した。加えて、事前の残留沈下対策を再検討した。この結果、当該現場においては、サーチャージ荷重や放置期間が十分で無かったことにより、サーチャージの効果が十分に発揮されていなかった可能性を示した。

(4) 軟弱地盤上の道路用盛土の残留沈下地作設計に対する新たなフローの提案

従来、軟弱地盤上への盛土荷重に対する従来の基本理念は、「安定」に対してはドレーン打設等の地盤改良による事前対策を行うが、「沈下」に対しては地盤は無処理とし供用後の維持・補修で対応することとなっていた。しかし、本研究課題で指摘した通り、供用後続く大きな残留沈下は、長期に亘り莫大な維持・補修費が必要となり、後世への大きな負の遺産となる。

本研究課題の成果のまとめとして、現場技

術者との討議を行った結果、実務でも適用可能な、下記に示す設計フローを提案した。

① 1次ふるいの適用

対象地盤が盛土載荷により大きな残留沈下が発生するか否かを、下記の条件により事前判定する。3条件が全てあてはまる場合は、従来の Δe 法のような簡易予測法では沈下を小さく見積もる可能性が高いため、②に示す詳細な沈下予測を行う。

- ・地盤タイプは深層型(Ⅲ型)である
- ・盛土荷重により圧密降伏応力をまたぐ
- ・軟弱土の圧縮指数比が1.5以上かつ鋭敏比が8以上

② 骨格構造概念を導入した水～土連成有限変形解析による沈下予測

①で残留沈下の可能性があるかと判定された場合、沈下の主要因となる軟弱土に対して、サンプリング時の乱れを考慮した「原位置初期状態の推定法」の適用し、解析コード **GEOASIA** により沈下予測を行う。より精度の良い沈下予測を行うためには、沈下にあわせて間隙水圧の観測も行い、これらを再現して解析パラメータを求めることが望ましい。

③ 対策工の検討

②の沈下予測の結果、残留沈下が大きく発生する場合は、盛土載荷前にSCP打設やSD打設により、積極的に地盤を乱し排水性を改善することで、残留沈下量の低減が可能となる。また、盛土の軽量化による沈下量の低減も有効な対策工である。これらの対策工の選定は、数値解析により事前検討が可能である。

④ 維持・管理計画の検討

供用後の残留沈下に伴い発生する維持補修費として、オーバーレイ補修費の算定方法を提案した。オーバーレイ舗装体積は残留沈下の二乗に比例して増加するため、大きな残留沈下が発生する地盤においては、軽量盛土への置換等、維持・管理の早期終了が可能な抜本的な対策の検討が必要となる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

- ① Tashiro, M., Noda, T., Inagaki, M., Nakano, M. and Asaoka, A.: Prediction of Settlement in Natural Deposited Clay Ground with Risk of Large Residual Settlement due to Embankment Loading, *Soils and Foundations*, 51(2), pp.133-149, 2011.
- ② Takaine, T., Tashiro, M., Shiina T., Noda, T. and Asaoka A.: Predictive simulation of

deformation and failure of peat-calcareous soil layered ground due to multistage test embankment loading, *Soils and Foundations*, 50(2), pp.245-260, 2010.

- ③ Inagaki, M., Nakano, M., Noda, T., Tashiro, M. and Asaoka, A: Proposal of a simple method for judging naturally deposited clay grounds exhibiting large long-term settlement due to embankment loading, *Soils and Foundations*, 50(1), pp.109-122, 2010.
- ④ 田代むつみ, 稲垣太浩, 中野正樹, 野田利弘, 浅岡顕: 練返し試料の圧縮曲線に及ぼす試料作製時の含水比の影響, 地盤工学ジャーナル, 5(1), pp.81-87, 2010.
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jgs/5/1/5_1_81/_pdf

〔学会発表〕(計4件)

- ① 川合裕太, 野田利弘, 山田正太郎, 田代むつみ, 浅岡顕: サイゴン東西道路における残留沈下の再現解析と沈下対策の再検討, 地盤工学会 第47回研究発表会, 地盤工学会第47回研究発表会, 2012年7月14~16日, 八戸工業大学(発表確定).
- ② 稲垣太浩, 山田耕一, 田代むつみ, 黒川雄一, 山田正太郎, 野田利弘: 水~土連成有限変形解析によるピートを含む超軟弱地盤上盛土の残留沈下対策と予測, 地盤工学会第46回研究発表会, pp.755-756, 2011年7月5日, 神戸国際会議場.
- ③ 稲垣太浩, 榊原和成, 山田耕一, 田代むつみ, 野田利弘, 中野正樹, 浅岡顕: 盛土載荷に伴い大変形を起こしたピートを含む超軟弱地盤の初期状態の推定, 地盤工学会第45回研究発表会, pp.751-752, 2010年8月18日~20日, 愛媛大学城北キャンパス.
- ④ 田代むつみ, 堀利明, 野田利弘, 中野正樹, 浅岡顕, 稲垣太浩, 榊原和成, 山田耕一: 水~土連成有限変形解析によるピートを含む超軟弱地盤上盛土の残留沈下予測, 地盤工学会第45回研究発表会, pp.749-750, 2010年8月18日~20日, 愛媛大学城北キャンパス.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田代 むつみ (TASHIRO MUTSUMI)
名古屋大学・工学研究科・助教
研究者番号: 00422759

(2) 研究分担者なし

(3) 連携研究者なし