

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 27 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25820214

研究課題名(和文)パッケージ型インフラ海外展開を視野に入れた軟弱地盤の長期沈下対策方針の提案

研究課題名(英文) Proposal of countermeasures against long-term settlement of soft ground with a view to overseas deployment of integrated infrastructure systems

研究代表者

田代 むつみ (Tashiro, Mutsumi)

名古屋大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：00422759

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：PEATや粘土を含む軟弱地盤上の盛土施工では、供用後もダラダラと沈下が継続することがあり、維持補修に多大な労力と費用を必要とする。本研究では、我が国の高速道路事業における盛土施工の技術的な実績をもとに、同様に軟弱地盤で苦しむ海外諸国への技術移転も視野に入れた、軟弱地盤に対する新しい対策方針の提案を行った。これまで予測困難とされてきた軟弱地盤の長期沈下に対して、新しい数値解析手法により、予測精度を向上させると共に、鉛直ドレーン打設や真空圧密による地盤改良工法の有効性に対して、地盤条件や工期・工費なども考慮した定量的な評価を行った。

研究成果の概要(英文)：When embankments are constructed on soft ground, including peat/clay, large residual settlement due to long-term settlement are often observed after the entry into service, and maintenance and repair work should be carried out repeatedly. This study proposed a countermeasure policy against long-term settlement of soft ground due to embankment loading with the aim of transferring the Japanese advanced technology to foreign countries which are also suffered from soft ground. The new numerical method could be effective tool for improving prediction accuracy for the long-term settlement, and also quantitatively evaluating the ground improvement effect of vertical drains/vacuum consolidation, considering ground conditions, construction costs and construction period.

研究分野：地盤工学

キーワード：地盤の挙動 長期沈下 鉛直ドレーン 真空圧密

1. 研究開始当初の背景

我が国では、名神高速道路の建設以降、約50年に亘り、沖積粘土やピートを含む軟弱地盤上にも高速道路用盛土を施工してきた多くの技術的な実績を持つ。軟弱地盤では、「安定」と「沈下」の2つが問題になるが、地盤改良技術が世界トップクラスとなった現在、盛立て時の「安定」に対しては、もはや問題無いとまで言われている。しかし、「沈下」については、地盤力学の進歩が十分に追い付かず、高速道路各社では「二次圧密」や「遅れ圧縮」を伴う沈下に対して、事実上予測困難との烙印が押され、その結果、残留沈下に対しては、オーバーレイ等により維持管理段階で補うことが基本方針とされてきている。

実際、研究代表者らによる、国内の高速道路用盛土の載荷に伴う沈下の実態調査によれば、軟弱地盤（を構成する軟弱土の種類）によっては、テルツァギの圧密理論に基づく従前の沈下予測法や観測の方法では、沈下の量・時間ともに小さく見積もる可能性があり、この結果、これらの現場では、供用後に大きな残留沈下が発生し、段差修正や周辺田畑の修繕など、維持管理段階で莫大な労力を費やしている。

我が国の高速道路整備事業は、維持管理段階へと移行しつつあるが、今もなお泥炭や沖積粘土を含む軟弱地盤上に、新たな盛土建設が進められている。長期沈下を考慮しなかった結果、通称「ドラゴンロード」とも呼ばれる不陸の激しい軟弱地盤上の道路用盛土の実態を目の当たりにした現場技術者の間では、「安定」のみならず「沈下」についても事前に対策する重要性がようやく認識され始め、真空圧密工法やドレーン打設、さらには軽量盛土工などを、「長期沈下対策」として取り入れつつある。しかし、長期沈下を検討するためには、現場でどのような土質試験や動態観測を行えばよいのか、またこれらの結果を沈下予測や対策工の設計・施工にどのように反映させていけばよいのか、長期沈下の対策方針は未だ体系化されていない。

これまで研究代表者らは、「土の骨格構造の働き」に着目した最新の弾塑性構成式(SYSカムクレイモデル)に基づき、軟弱地盤の長期沈下のメカニズムを説明してきた。そして、長期沈下の可能性を事前に土質試験結果(鋭敏比と圧縮指数比)から簡易判定する方法や、数値解析(GEOASIA)により沈下の将来予測を行う方法を提案してきた。これらの提案手法は、実際に建設中の国内の超軟弱ピート地盤、及びベトナム国の超軟弱粘土地盤の対策工検討に適用された実績を持つ。

これらの経験から、本提案手法は、我が国の沖積粘土のみならず、ピートなどの特殊土や海外の粘性土地盤に対しても適用拡大の

可能性があることを確認している。しかし同時に、長期沈下を検討するためには、その理論的背景にある「土の骨格構造の働き」、すなわち対象とする軟弱土の骨格構造の「発達程度」や、盛土載荷・地震などの外力に対する「乱れやすさ」を評価するための、適切な土質試験や動態観測を現場で行う必要があることも詳しく分かってきた。

上記の背景のもと、本研究課題では、土質調査、設計、施工、動態観測、維持管理までも視野にいれた軟弱地盤の長期沈下対策方針を、最新の地盤力学に基づき体系化することを目的とする。特に、平成22年に閣議決定された「新成長戦略」以降、アジアを中心とする海外のインフラ需要に対応した「パッケージ型インフラ」の海外展開が推進されていることも受け、我が国の高い技術力をより効果的に、維持管理段階までも視野に入れて設計・施工に反映させるために、どのような土質試験や動態観測を行えばよいのか、基準化を行う。また、長期沈下による被害想定と強化ポイントの抽出、適切な対策工の選定を行い、社会インフラの長寿命化を目指す。

2. 研究の目的

(1) 長期沈下の検討に必要な土質試験および動態観測の基準化

軟弱地盤に遭遇した際、長期沈下の可能性や将来沈下を予測する上で、どのような土質試験や動態観測を実施すればよいのかを、「土の骨格構造概念」に沿って、基準化する。実務における現状を調査した上で、海外の現場技術者への技術提供も視野に入れ、必要項目や手順、重要度によるランク付け、また実施できない場合の代替手法も含め、より簡便に明示することを目指す。

(2) 長期沈下の将来予測技術の向上

これまでに提案した「長期沈下が起こる可能性のある土の簡易判定法」と「沈下の将来予測法」について、国内外の広範な土種類からなる軟弱地盤への適用拡大と精度向上を目指す。

(3) 軟弱地盤の長期沈下対策方針の体系化

盛土載荷による軟弱地盤の長期沈下に対して、真空圧密やドレーン打設、軽量盛土等の対策工法の効果を数値解析により検討し、長期沈下の対策方針の最適化をはかる。

3. 研究の方法

1) 国内の軟弱地盤に対する長期沈下対策の実態調査

長期沈下の再現解析および将来予測を過去に実施済・実施予定の現場を中心に、土質試験や動態観測データ、および当時の設計・施工指針を収集し、長期沈下問題にどのように対応がなされてきたか調査する。

2) パッケージ型インフラ海外展開を行う上

での問題点抽出

高速道路を含む海外のインフラ事業に携わる現場技術者との勉強会を通して、海外の軟弱地盤対策の実態や、現地技術者による土質試験・動態観測の技術レベルや我が国との相違点などについて情報を収集し、海外への技術移転を行う上での問題点を抽出する。

3) 数値解析に必要な土質試験・動態観測データの検討

長期沈下の簡易判定、将来予測、対策工検討を数値解析で実施するにあたり、どのような土質試験・動態観測データの項目が必要か、実現場をモデル化した数値解析を実施し、各項目が解析結果に与える影響を検討する。

4) 長期沈下の将来予測技術の精度向上

これまでに提案した「長期沈下が起こる可能性のある土の簡易判定法」と「沈下の将来予測法」について、国内外の類似現場に適用した数値解析を実施し、適用拡大と精度向上を目指す。

5) 長期沈下検討に必要な設計指針の基準化

軟弱地盤の長期沈下検討に必要な土質試験・動態観測の必要項目や手順、重要度によるランク付け、また実施できない場合の代替手法も含めより簡便に明示し、基準を提案する。軟弱地盤の実務に携わる国内外の現場技術者、地質調査会社との研究討議を通して、より実務に則した基準化を目指す。

6) 軟弱地盤の長期沈下対策方針の提案

上記で適用性拡大・精緻化を進めた各基準・手法を、我が国の高い軟弱地盤対策技術がより効果的に活かされるように組み込み、長期沈下対策方針のフローを作成する。海外へのパッケージ型インフラ展開を視野に入れ英文学術論文への研究成果の公表を行うと共に、現場技術者への成果報告・討議を通して、実務への適用を目指す。

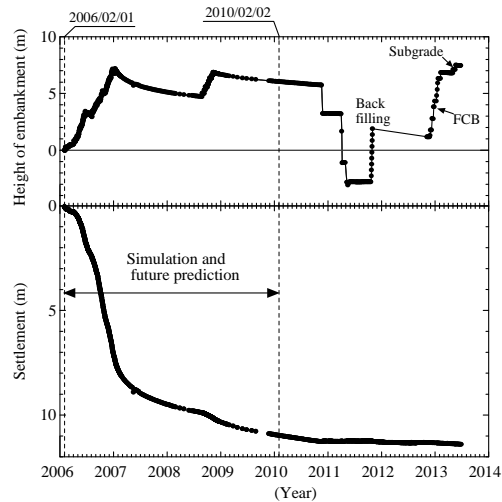
4. 研究成果

(1) ピートを含む超軟弱地盤の長期沈下対策の効果検討（動態観測結果の比較）

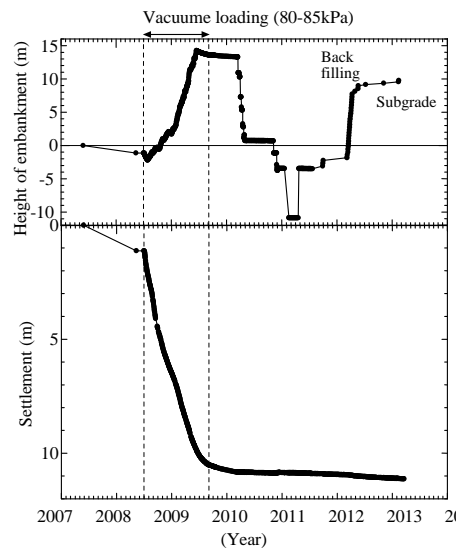
上述の通り、我が国の高速道路建設の実務では、盛り立て時の「安定」が問題になった場合のみ地盤改良を事前に行い、「残留沈下」については、供用後の維持補修で対応するとして、一般的に設計段階では考慮されてこなかった。しかし、試験盛土の実施とその後の動態観測の結果、この従来の設計方針が全く通用しなかった事例を示す。

図1は、過去に研究対象とした、舞鶴若狭自動車道向笠地区の試験盛土（図1-(a)）と、そこから約1.1km離れた地点で建設された盛土（図1-(b)）の動態観測結果を示す。両地点とも、深度40~50m付近まで軟弱なピート層が連続的に厚く堆積している点が共通している。先に施工された試験盛土では、11mにも及ぶ大沈下が発生し、周辺地盤でも最大約

1mの隆起と2mの水平変位が発生するなど、周辺地盤に大きな影響を与えた。また、安定のため浅部の地盤（深度20mまで）がSD（サンドドレーン）により改良された結果、致命的な破壊は回避できたものの、未改良の深部ピート層で残留沈下が発生し、長期に亘り継続することが、数値解析の結果、明らかになった。このため、試験盛土では、盛土の一部をカルバートボックスに置換する際、周辺盛土の軽量化に加え、断面余裕高を設けたカルバートボックスの設計を行う必要があった。



(a) 試験盛土の動態観測結果



(b) 真空圧密 + 深部までのPBD打設改良を行った盛土の動態観測結果

図1 事前の長期沈下対策の効果

一方、この試験盛土の結果を教訓に、図1-(b)に示す盛土では「残留沈下対策」を考慮した事前対策として、深度34mまでPBD（プラスチックボードドレーン）を打設すると同時に、急速施工時でも安定性を確保するために、深度16mまでドレーンを追加打設した上で、真空圧密工法を適用した。この結果、11m

を越す大沈下が発生したものの、深部ピート層の圧密が促進され、残留沈下量が大きく低減された。また、真空圧密により周辺地盤の変状も抑制された。試験盛土と同様に、盛土の一部がカルバートボックスに置換されたが、残留沈下が少ないため、周辺盛土の軽量化は不要となった。

(2) 国内外の長期沈下対策設計指針の調査

軟弱地盤の特性を調べるための地盤調査や土質試験の種類、及びそこから得られるパラメータ、実務における設計方針、対策工法の種類等について、国内外の設計指針を収集し、実態を調査した。研究代表者が所属する研究室に在籍する、アフリカ・アジアからの留学生とも連携し、設計指針が生まれてきた背景等にも注目して調査・比較した。

基本的には、欧米の代表的な試験基準や設計コードが、各国の基準のベースとして使われているが、各国の土の種類や状態、地形、社会インフラの開発程度に応じて、設計や施工の経験を重ねていく中で、独自のコードが発達していったことを確認した。我が国に限られた国土の中、山岳地帯や軟弱地盤にもインフラ整備をすることが余儀なくされた結果、特にこの分野に関するノウハウが蓄積され、高い技術力を持つ。鉛直ドレーンと真空圧密による地盤改良は、近年ではベトナムを始めとする諸外国でも広く適用されており、施工条件をより合理的に設定するための、設計方針の確立が必要であることが明らかになった。

(3) 鉛直ドレーン / 真空圧密の改良効果検討

実際に盛土載荷時に、鉛直ドレーンと真空圧密が併用された軟弱ピート地盤を対象とし、各種地盤挙動の観測結果を数値解析により再現し、将来予測を行った。また、当該地区で広域に観測された周辺沈下の原因を、数値解析により考察すると共に、鉛直ドレーン / 真空圧密による地盤改良効果を検討した。

「真空圧密工法」の実務の設計では、真空載荷による間隙水圧の減少分を荷重の増加分に置き換えて、Baron の解に基づく一次元圧密計算を簡易的に行うことが多い。しかし、負の過剰水圧を改良域に加えることにより発生する、真空圧密特有の改良域内向きの変形を考慮するためには、多次元での有限要素解析を実施することが望まれる。一方、多次元の有限要素解析では、メッシュを細かく分割して鉛直ドレーンを直接表現すると、膨大な要素数が必要となるため、鉛直ドレーンのピッチや透水性に応じた改良効果を、「巨視的」に表現する手段が必要となる。

本研究課題では、巨視的な鉛直ドレーンの表現方法として、(1)鉛直ドレーンを含む地盤のマスとしての透水性を逆解析的に表現す

る方法(マスパーミアビリティ法)、(2)改良域内部の個々の要素にドレーンの集水機能を持たせることで鉛直ドレーンの効果を表現する方法(マクロエレメント法)、(3)(2)の手法に、ドレーンの連続式を支配方程式に加えることで高機能化した、ドレーンの集・排水機能を具備したマクロエレメント法、の3手法に着目し、各手法を搭載した慣性力対応の水-土連成有限変形解析コード GEOASIA (名古屋大学地盤工学研究室が開発)による解析により、再現性能の比較を行った。

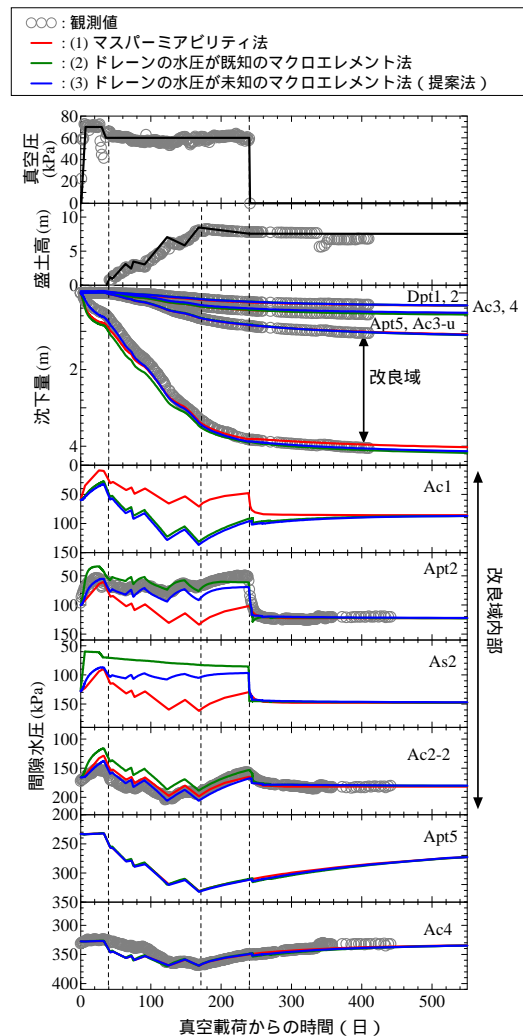


図2 盛土中央の沈下量と間隙水圧の再現

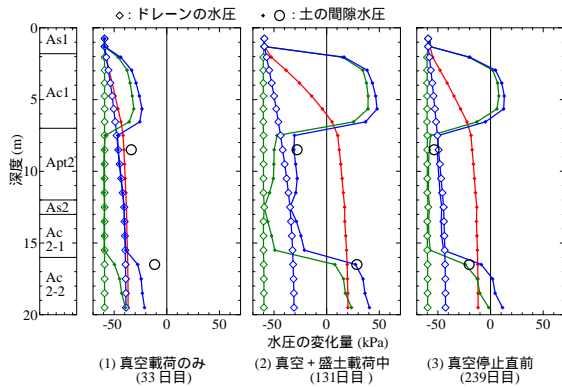


図3 ドレーンと土の水圧変化量

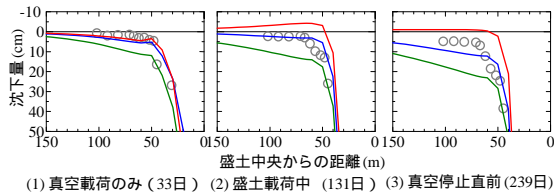


図4 周辺地盤の沈下

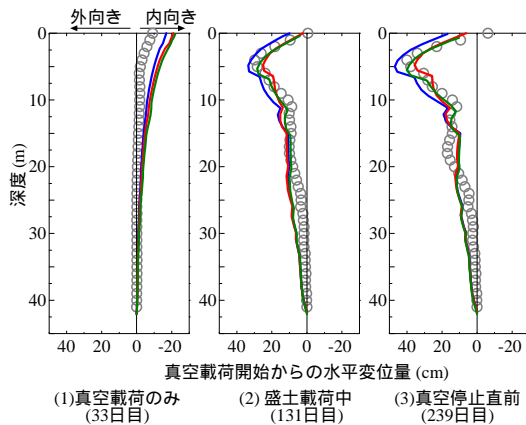


図5 法尻直下の水平変位量

解析の結果、図2～5示す通り、(1)の手法では、改良域を貫く中間砂層が原因で発生する周辺地盤の水圧低下、広域沈下を表現できないこと、(2)の手法では、真空圧密の影響を過大に評価する可能性があることを明らかにした。一方、新たに開発した(3)の手法では、鉛直ドレーン/真空圧密により改良された多層系地盤の、盛土荷重による圧密問題に対し、各種観測結果を包括的に概ね精度良く再現でき、中間砂層の影響を定量的に予測する有効な手段であることを示した。

続いて、鉛直ドレーン/真空圧密の改良効果について、ドレーンピッチの影響に着目し、検討した(解析結果省略)。一連の解析の結果、以下の結論が得られた。

- 真空圧密を併用しない、鉛直ドレーン単体による地盤改良であっても、十分な排

水効果が得られるドレーンピッチを、地盤の透水性に応じて適切に選定すれば、安定性の増加および周辺変位の低減ができる。また、真空併用と同程度の残留沈下低減効果も得られる。

- 残留沈下や周辺変位、特に外向きの水平変位をより抑制する必要がある場合は、真空圧密の併用は効果的である。
- 軟弱地盤への鉛直ドレーン/真空圧密の適用にあたっては、地盤の透水性や中間砂層の存在などの地盤条件に加え、周辺地盤への影響、さらには工費や工期を十分に精査した上で、ドレーンのピッチや真空圧密併用の有無を検討することが重要である。本研究課題で再現性を確認した解析手法は、各影響を定量的に評価し、実務における総合的な判断を行うための、有効な手段の1つである。

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3件)

Tashiro, M., Nguyen, H. S., Inagaki, M., Yamada, S. and Nota, T.: Simulation of large-scale deformation of ultra-soft peaty ground under test embankment loading and investigation of effective countermeasures against residual settlement and failure, *Soils and Foundations*, **55**(2), pp.343-358, 2015 (査読有)。

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S003808061500030X>

Yamada, S., Noda, T., Tashiro, M. and Nguyen H. S.: Macro element method with water absorption and discharge functions for vertical drains, *Soils and Foundations*, **55**(5), 2015 (査読有, in press)。

Nguyen H. S., Tashiro, M., Inagaki, M., Yamada, S. and Noda, T.: Simulation and evaluation of improvement effects by vertical drains/ vacuum consolidation on peat ground under embankment loading based on a macro-element method with water absorption and discharge functions, *Soils and Foundations*, **55**(5), 2015 (査読有, in press)。

[学会発表](計16件)

Tashiro, M., Inagaki, M. and Asaoka, A.: Prediction of and countermeasures for embankment-related settlement in ultra-soft ground containing peat, *The 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ICSMGE 2013)*, pp.2981-2984, 2013年9月2-6日,

Paris (France).

Nguyen, H. S., Yamada, S., Noda, T. and Tashiro, M.: Simulation of the well resistance of vertical drains using a new macro-element method, *The 1st International Conference on Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems* (COMPSAFE 2014), pp.164-167, 2014年4月14日, 仙台国際会議場(宮城).
Nguyen, H. S., Tashiro, M., Noda, T. and Yamada, S.: Numerical analysis of improvement effects on peaty ground by vertical drains/vacuum consolidation based on a new macro-element method, *The 14th International Conference of the International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics* (14th IACMAG), pp.1145-1150, 2014年9月22-25日, 京都国際会議場(京都).

田代むつみ, Nguyen, H. S., 山田正太郎, 野田利弘: マクロエレメント法を適用した水～土連成解析による中間砂層を含むピート地盤に対する真空圧密適用性の検討, 第59回地盤工学シンポジウム, pp.457-462, 2014年11月28日, 長野市生涯学習センター(長野).

山田正太郎, 野田利弘, 田代むつみ, Nguyen, H. S.: パーチカルドレーンの集排水機能を具備するマクロエレメント法の近似精度の検証, 第59回地盤工学シンポジウム, pp.497-504, 2014年11月28日, 長野市生涯学習センター(長野).

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