

令和元年6月11日現在

機関番号：51401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06496

研究課題名(和文) 泥炭地盤上に建設された道路の長期沈下挙動のモデル化とLCC最小化の試み

研究課題名(英文) LCC minimization for roads on peat grounds through long-term settlement modeling and prediction

研究代表者

山添 誠隆 (Yamazoe, Nobutaka)

秋田工業高等専門学校・その他部局等・准教授

研究者番号：60760238

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：関東以北には超軟弱土の泥炭地盤が広範囲に分布する。この地盤上に建設された道路では、供用後も大きな長期沈下が継続的に発生し、維持修繕のコストを増大させている。この現状を踏まえ、本研究では室内土質試験および過去の工事の沈下記録から、泥炭の時間依存性挙動を評価するとともに、数値モデル化を行い、それを有限要素法に実装した。また、この汎用予測ツールを実スケール問題に適用し、十分な精度が期待できることを確認した。さらに、長期沈下の低減に向けた対策工法の仕様検討例も示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従前、泥炭地盤の沈下予測は簡易な経験式で変形を一次元に限定して行っていた。本研究は力学理論に基づき汎用性が高く、かつ多次元問題にも適用可能な予測ツールの構築を目指したものであり、これまで困難とされてきた部分改良や複数工法の組み合わせなど複雑かつ多様な問題であっても力学的・合理的に泥炭地盤変状を説明できる可能性を示した。この研究成果は供用後の道路の効率的かつ合理的な維持管理に資することが期待される。

研究成果の概要(英文)：The peat ground of soft soil is widely distributed in the north of Kanto region. Roads constructed on this ground has occurred a long-term settlement even after the service and the cost of maintenance and repair has increased. Therefore, In this study, the time-dependent behavior of peat was evaluated from the results of laboratory soil testing and the settlement records of test embankments, and numerical modeling was carried out. The development tool was applied to test embankments, and it was confirmed that there was sufficient accuracy. Furthermore, The designs of countermeasures for soft ground to reduce long-term settlement was discussed.

研究分野：地盤工学

キーワード：泥炭 長期沈下 圧密 軟弱地盤対策工 せん断

1. 研究開始当初の背景

主として東北、北海道には未分解な植物繊維で構成される泥炭地盤が広範囲に分布・堆積している。泥炭地盤は超軟弱で、この地盤上に構造物を建設すると、間隙水圧の消散により数 m を超える圧密沈下（一次圧密）が発生する。また、間隙水圧が消散し有効応力が一定になったあとも、二次圧密による沈下がかなり生じることが知られている。

図 1 は軟弱地盤対策に要したコストと供用開始後の長期沈下による修繕補修費の関係概念図である。建設時に沈下対策を入念に行くと供用後の長期沈下を抑えることができるが、ライフサイクルコスト LCC（トータルコスト）は増大する。一方、初期建設費を極力抑え、長期沈下については維持補修で対処した場合、長期的には LCC は高くなる。最適な設計とは、建設時に適切な沈下対策を実施し、かつ供用後の維持補修も抑えたケースであり、性能設計の導入が進みつつある泥炭地盤の地盤設計においても、この概念をもとに LCC の最小化が求められている。

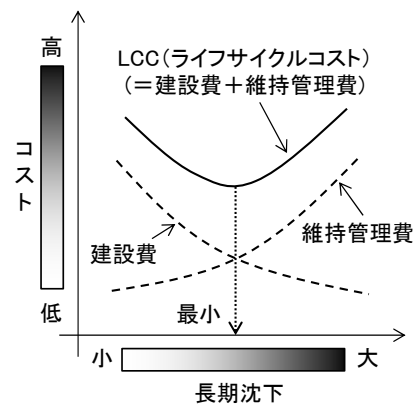


図 1 軟弱地盤対策の LCC 概念図¹⁾

一方、近年、泥炭地盤においても、プラスチックボードドレーン（以下 PBD）や真空圧密工法のように、安価で簡易な圧密促進工法が積極的に採用されている。また、これらの工法と安定補強工法の併用や、コストを抑えるために部分改良など、対策工の仕様は多様かつ複雑化している。

従前、長期沈下を含む沈下の予測は変形を一次元に限った簡易な経験式で大まかに行われてきたが、このような簡易な方法では上記のような対策工に適用することは困難である。泥炭地盤上の構造物の LCC 低減のためには、多次元まで拡張された精度の高い長期変形予測ツールの構築が急務であった。

2. 研究の目的

本研究課題の目的は次のとおりである。i) 各種室内試験により泥炭の圧密・せん断時における時間依存特性を明らかにする。また、ii) 詳細な計測結果が得られた試験盛土に対して動態解析を実施し、原位置で計測された長期変形挙動を分析・評価する。その上で、iii) 泥炭の時間依存性挙動を Critical state 理論（カムクレイモデル）と Isotach 則を核に数値モデル化し、多次元下まで拡張した解析ツールを開発する。また、開発したツールを実スケールの問題にも適用し、その精度を検証する。さらに、iv) この解析ツールを用いて、近年施工実績が増大している PBD で改良された泥炭地盤を例に、長期沈下（残留沈下）の低減に着目した PBD の設計例を提示する。このように、本研究では泥炭地盤というきわめて扱いが困難な地盤の長期挙動の力学的記述と LCC 低減可能な対策工の合理的な評価・提示を試みたものである。

3. 研究の方法

本研究は上記目的の達成のため、次の研究方法により実施した。

(1) 室内試験による泥炭の時間依存性挙動の解明

室内試験として、定ひずみ圧密試験（以下 CRS）・長期圧密試験・三軸圧縮試験を実施した。試験に用いた試料は、北海道内の各地および秋田県内から採取した不攪乱泥炭である。いずれも表層付近に堆積していた泥炭を円柱状の亚克力管サンプラーを押し込んで採取した。サンプラーの内径は供試体の直径を同じ大きさとした。これは植物繊維や木片を混在する泥炭では側面の成型がきわめて困難なためである。

圧密時の時間依存性挙動に関しては、CRS 試験を実施した。CRS 試験は圧密中一定のひずみ速度で行う定速 CRS と、圧密中にひずみ速度を変化させる変速 CRS の 2 種類を行った。また、長期圧密特性については、一定の荷重を載荷させたのち約 1 カ月放置し、粘性特性を計測した。せん断時の時間依存性の評価は、圧密時の体積ひずみ速度とせん断過程における軸圧縮速度を種々変化させた系統的な非排水三軸圧縮試験を実施した。

(2) 原位置における長期沈下挙動の検討

対象とした試験盛土は北海道内で実施されたものである。基礎地盤は典型的な泥炭性軟弱地盤で、軟弱層下端まで PBD が打設され圧密促進改良が施されている。この地盤上に盛土厚 6.6m の盛土が約 80 日で施工された。各種計測機器として沈下板のみならず、層別沈下計や間隙水圧計、孔内傾斜計、変位杭が設置されており、盛土建設中から建設後までの詳細な計測値が取得された。ここで得られた計測結果を動態解析し、原位置のひずみ速度領域における泥炭層の二次圧密による沈下挙動を検討した。また、既往文献等から二次圧密係数の分析・評価を行うとともに、泥炭の圧密係数の圧密圧力依存性に着目した一次元圧密解析を実施し、圧密圧力の増加に伴う

圧密係数の急激な減少が長期沈下に及ぼす影響を検討した。

(3) 時間依存性挙動のモデル化と実問題の適用

後述するように、室内試験から明らかになった泥炭の時間依存性挙動は、近年、粘性土においてその有効性が認められつつある **Isotach** 則が適用できることが明らかとなった。モデル化は、既往研究²⁾を参照し塑性ひずみ速度を状態変数とし、この大きさにより正規圧密線 (NCL) がシフトするものと仮定し、これをカムクレイモデルに組み込み、先行研究で開発した汎用弾塑性有限要素法プログラムに実装した。実問題への適用性を調べるために、北海道で実施された試験盛土に対して開発した解析ツールを適用し、原位置で計測された長期沈下の再現性、並びに精度を検証した。なお、解析条件の詳細は〔雑誌論文〕1)に詳しく記述されている。

(4) 対策効果の検証：PBD 改良地盤を例に

泥炭地盤の長期沈下問題については、i) 粘性に起因する長期沈下と、ii) 圧密圧力の増加に伴い大幅に低下する圧密係数に起因する長期沈下 (一次圧密) がある。後述するように、ii) は二次圧密に見える見かけの一次圧密による沈下である。i) については、二次圧密係数が想定される応力範囲内にある場合、応力レベルにはあまり依存しないことから、本研究では ii) が長期沈下に及ぼす影響を、PBD 改良地盤を例に系統的な解析を通じて明らかにした。解析に先立ち、北海道で実施された 4 つの試験盛土群の再現解析を行い、用いた解析手法やパラメータの同定法を検証したのち、有機質粘性土から繊維分が卓越する泥炭地盤までの地盤条件に対して、上載荷重の大きさや PBD の打設間隔を変化させた仮想解析を実施し、長期沈下の低減可能な対策工の仕様を検討・例示した。

4. 研究成果

本研究から得られた主な成果は次のとおりである。

(1) 室内試験結果と泥炭の時間依存性挙動

図 2 は変速 CRS 試験から得られた $\varepsilon - \log \sigma'_v$ 関係の一例である (ε : 圧縮ひずみ、 σ'_v : 圧密圧力)。本試験では基準ひずみ速度を $0.02\%/min$ とし、 ε が 5% 毎にひずみ速度を $10, 1/10$ 倍に変化させたが、得られた応力・ひずみ関係はひずみ速度に依存し、ひずみ速度が大きくなると右側に、小さくなると左側に平行移動する **Isotach** 挙動を示すことがわかった。また、長期圧密試験から、一次圧密終了後は $\log t$ (t : 時間) に比例して ε が増大することを確認した。

三軸圧縮試験は体積ひずみ速度が $0.0015, 0.00015\%/min$ に減少するまで等方圧密したのち、軸ひずみ速度 $0.01, 0.1, 1\%/min$ で非排水三軸圧縮した。実験結果は〔学会発表〕5)に詳しく述べているが、多くのケースでせん断開始直後より過剰間隙水圧が急増し、有効応力径路は直線的に CSL (限界状態線) に向かった。図 3 は、カムクレイモデルの降伏曲面を塑性体積ひずみ速度の関数とし **Isotach** 粘性を考慮した有効応力径路 (p : 平均有効応力、 q : 偏差応力、下添え字の 0 は圧密終了時の値) である。微小線形弾性に等方性 ($E_h'/E_v'=1, E_h', E_v'$: 水平、鉛直方向の弾性係数) を仮定した解析値 (破線) は有効応力径路の再現性が低いが、異方性 ($E_h'/E_v'=3$) を考慮した結果 (実線) は実験結果の特徴をある程度捉えることができた。

以上のように、室内試験から得られた泥炭の時間依存性挙動は **Isotach** 理論と異方弾性体の 2 つを加えるだけで、その特徴的な挙動をかなり表現できることがわかってきた。今後も多様な実験条件のもとで実験データを蓄積し、構造異方性が卓越する泥炭の時間依存性挙動を記述できる構成モデルの構築を行っていく予定である。

(2) 原位置における長期沈下挙動の検討結果

動態解析の対象とした試験盛土は圧密促進工法の PBD で地盤改良が施されており、泥炭層では盛土建設後早期に過剰間隙水圧が消散していることを確認した。したがって、その後に計測された長期沈下は二次圧密によるものである。原位置のひずみ速度は $10^{-9}s^{-1}$ 程度で、二次圧密係

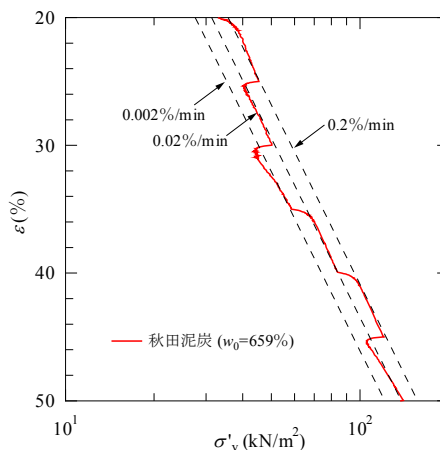


図 2 変速 CRS 試験結果：秋田泥炭

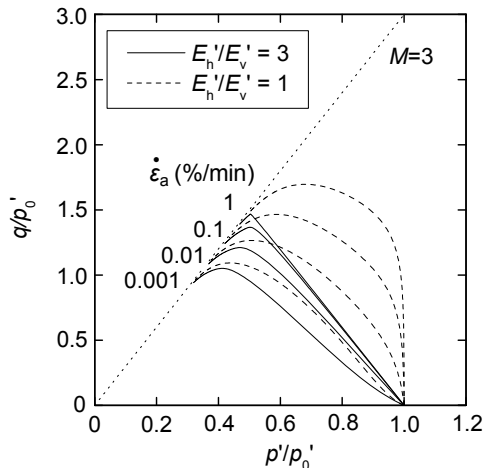


図 3 等方/異方弾性と **Isotach** 粘塑性による有効応力経路 ($\varepsilon_p=0.0015\%/min$)

数 C_a は Mseri が提案した関係式から求めた値とほぼ同じであった。また、既往文献から北海道泥炭の C_a を調査したところ、ひずみ速度の減少に伴い C_a は多少減少するような傾向が認められたが、概ね Mesri の関係式から推定された範囲内にあった。泥炭の圧密係数の圧密圧力依存性に着目した次元圧密解析の結果からは、とくに繊維分が卓越する高含水な泥炭では、圧密の進展とともに大幅に低下する圧密係数に起因し、圧密後半に一次圧密の遅れが発生することがわかった。

以上の知見をまとめると、泥炭地盤の長期沈下は粘性に起因する二次圧密によるものと、圧密係数の圧密圧力依存性に起因する一次圧密の遅れに起因するものに分けることができる。前者の沈下量については Mesri の経験式から求めた値に近いことがわかった。二次圧密係数の経験式のなかには後者の沈下成分も含めて定式化したものもあり、経験式の使用・選択には、各経験式に込められた工学的意味を正しく理解しておくことが重要である。この点についての詳細な説明は〔雑誌論文〕1)を参照のこと。

(3) 時間依存性挙動のモデル化と実スケール問題への適用

(1)の試験結果に基づき Isotach 則を塑性ひずみ速度を状態変数とし、この変化によって NCL (正規圧密線) がシフトするものとしてカムクレイモデルに組み込み、これを先行研究で開発した汎用弾塑性有限要素法に実装した。基本的な動作検証を行ったのち、開発した解析ツールを実スケール問題(2)で扱った試験盛土)に適用し、その精度を検証した。図 4 は盛土中央下で計測された沈下量と解析結果の比較である (A_p : 泥炭層、 $A_{c1,2,3}$: 粘性土層)。これからわかるように、解析結果は泥炭層のみならず、粘性土層の計測値も概ね再現できており、解析ツールの精度が検証・担保できた。

このように本研究から、現状の変形を一次元に限定した簡易な沈下式による予測から、泥炭地盤であっても Critical state と Isotach の理論をベースとした簡潔な手法で、原位置における長期沈下についても合理的に予測・説明できる可能性が高まった。この研究成果を土台に、今後は簡易な沈下式では取り扱いがきわめてむずかしいとされてきた部分改良や安定補強を施した多次元断面の長期変形問題の解決が望まれる。

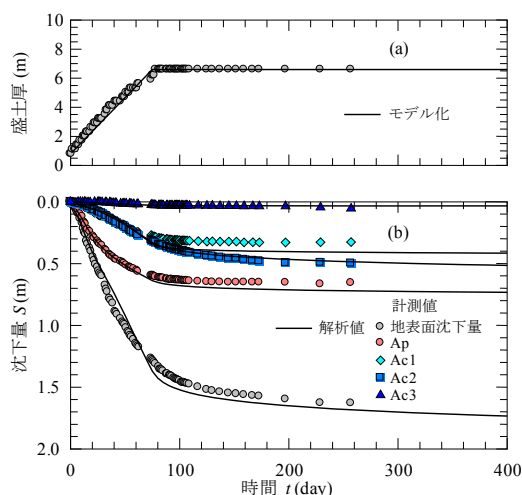


図 4 沈下量の計測値と解析結果の比較

(4) 対策工の最適化：PBD 改良地盤を例に

開発した解析ツール、および上記知見をもとに、LCC を最小化するための対策効果の検討を系統的な仮想解析から実施した。具体的には、代表的な圧密促進工法である PBD で改良された層厚 5m の泥炭地盤を例に、有機質粘性土 ($w_n=200\%$)、部分的に分解が進んだ繊維質泥炭 ($w_n=500\%$)、繊維質明確な泥炭 ($w_n=1000\%$) の 3 つの地盤条件を想定し、上載荷重 $\Delta p=50, 100, 150\text{kN/m}^2$ を $1\text{kN/m}^2/\text{d}$ の速度で単調に載荷させて、その長期沈下挙動を調べた。なお、粘性に起因する沈下(二次圧密)は、圧密応力の大きさにはあまり依存しないことから、解析では圧密係数の圧密圧力依存性に起因する長期沈下)にのみ着目し、残留沈下量 $S_r=10\text{cm}$ に達する時間 t_r と PBD の打設間隔 d の関係を整理した。図 5 は $w_n=1000\%$ の場合の解析結果である。上載荷重が大きくなるにしたがい、圧密の進行にしたがい圧密係数が大幅に減少するため、圧密終盤の沈下速度が小さくなり、 $S_r=10\text{cm}$ に要する日数は増大する。したがって、このような地盤条件では PBD の打設間隔 d をかなり小さくする必要がある。

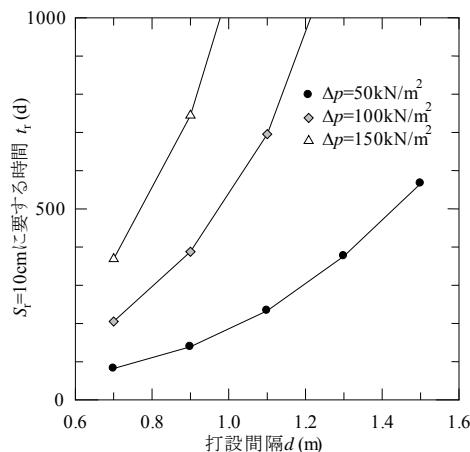


図 5 PBD 改良地盤の残留沈下に及ぼす打設間隔の影響

上記解析例のように、泥炭地盤の長期沈下問題は、粘性に起因する二次圧密に加えて、圧密係数の圧密圧力依存性も大きく影響し、残留沈下量を抑え LCC の最小化を試みるためには、上載荷重の規模や地盤条件に応じて、これらの影響を適切に解析に取り入れることが必要である。

- 1) 土木研究所 寒地土木研究所：泥炭性軟弱地盤対策工マニュアル、p.9、2017
- 2) Nakai, T., Shahin, H. M., Kikumoto, M., Kyokawa, H., Zhang, F. and Farias, M. M.: A simple and unified three-dimensional model to describe various characteristics of soils, Soils and Foundations, Vol.51, No.6, pp.1149-1168, 2011.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- 1) 山添誠隆、田中洋行、西村聡、林宏親：泥炭の二次圧密係数とプラスチックボードドレイン改良地盤への適用、地盤工学ジャーナル、Vol.12, No.4, pp.409-424, 2017、査読有
DOI:<https://doi.org/10.3208/jgs.12.409>

[学会発表] (計 13 件)

- 1) 那須野海秀、荻野俊寛、田口岳志、山添誠隆：秋田泥炭の変形特性に及ぼす圧密応力の影響、平成 30 年度 土木学会東北支部技術研究発表会、2019
- 2) 近江康太郎、田中慎也、山添誠隆、花田智秋、永井雄斗、奈良葵：アイソタック則に基づく定ひずみ圧密試験の補正法と泥炭への適用、平成 30 年度 土木学会東北支部技術研究発表会、2019
- 3) 永井雄斗、奈良葵、山添誠隆、花田智秋、近江康太郎、田中慎也：プラスチックボードドレイン工法により改良された泥炭地盤の圧密メカニズムについて、平成 30 年度 土木学会東北支部技術研究発表会、2019
- 4) 山添誠隆：泥炭に対する定ひずみ圧密試験の適用と時間効果補正法、第 59 号 地盤工学会北海道支部 技術報告集、2019
- 5) 市川瑠、西村聡、山添誠隆：泥炭の粘塑性せん断挙動に関する室内実験とモデル化の検討、第 59 号 地盤工学会北海道支部 技術報告集、2019
- 6) 多田駿太郎、西村聡、山添誠隆：泥炭の異方透水性とその応力依存性に関する実験的検討、第 59 号 地盤工学会北海道支部 技術報告集、2019
- 7) 花田智秋、山添誠隆：秋田泥炭に対するアイソタック則の適用性、平成 29 年度 土木学会東北支部技術研究発表会、2018
- 8) 市川瑠、山添誠隆、西村聡：泥炭の圧密・せん断挙動の時間依存性とアイソタック則の適用性、第 52 回地盤工学研究発表会、2018
- 9) 三木拓也、西村聡、山添誠隆：泥炭地盤表層におけるアイソタック則を考慮した弾粘塑性モデルの適用検討事例、第 52 回地盤工学研究発表会、2018
- 10) 荻原遼恭、山添誠隆、林宏親、斎野崇：プラスチックボードドレインで改良された泥炭地盤の水平方向透水係数、平成 28 年度 土木学会東北支部技術研究発表会、2017
- 11) 畑下侑輝、荻野俊寛、高橋貴之、山添誠隆：三軸繰返しおよび室内弾性波試験による微小ひずみ域での泥炭の変形特性、平成 28 年度 土木学会東北支部技術研究発表会、2017
- 12) 永井雄斗、八柳秀紀、山添誠隆、荻野俊寛：三軸圧縮・伸長試験による広範囲なひずみ域での泥炭の変形挙動、平成 28 年度 土木学会東北支部技術研究発表会、2017
- 13) 田中洋行、山添誠隆、林宏親：泥炭式が持つ意味、第 57 回地盤工学会北海道支部技術報告会、2017

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：西村 聡

ローマ字氏名：(NISHIMURA, satoshi)

所属研究機関名：北海道大学

部局名：工学研究院

職名：准教授

研究者番号 (8 桁)：70470127