

令和 5 年 5 月 2 日現在

機関番号：51401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04607

研究課題名（和文）統合型プレロード技術で改良された泥炭地盤の沈下予測と設計最適化

研究課題名（英文）Settlement prediction and design optimization of peat ground improved by integrated pre-loading method

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） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：軟弱地盤の主要な対策工であるプレロード工法で改良された泥炭地盤の、施工中から除荷後の圧密挙動を予測できる汎用解析ツールを新たに開発することを目的に、系統的な室内試験を実施し、その結果を isotach 則により解釈、Critical state 理論によってモデル化するとともに有限要素法プログラムに実装した。開発した汎用解析ツールによって室内試験をシミュレーションし、計測値との比較から解析手法の信頼性を確認した。また、真空圧密工法で改良された泥炭地盤についても解析を実施し、原位置挙動を良好に予測できることを明らかにした。加えて、パラメトリックスタディを通じて改良効果の最適化に関する設計例を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

事前に圧密促進を図るプレロード工法はコストが安価で、関東以北に広範囲に分布する超軟弱土の泥炭地盤においても一般的に用いられるが、供用中の長期沈下によって上部構造物に機能損傷が生じる可能性がある。本研究は供用中の地盤変状を力学理論に基づき予測する新たな汎用解析ツールを開発したものである。従前、長期沈下は過去の計測結果から経験的な方法により予測がなされていたが、開発したツールでは不均一性の考慮など解析条件に関する自由度が高く、また複数の工法との組み合わせにより多様化が進むプレロード工法に対しても導入が容易である。また、改良仕様の最適化への寄与が期待される。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to develop an analysis tool that can predict the consolidation behavior of peat ground improved by the preloading method. For this purpose, systematic laboratory tests were conducted, the results were modeled using isotach law and critical state theory, and implemented in a finite element method program. The laboratory tests were simulated using the developed analysis tool, and the reliability of the analysis method was confirmed by comparing the measured values. Analysis was also performed on peat ground improved by the vacuum consolidation method, and it was found that the in-situ behavior was well reproduced. In addition, design example regarding optimization of the improvement effect was presented through parametric study.

研究分野：地盤工学

キーワード：泥炭 プレロード工法 長期沈下

### 1. 研究開始当初の背景

北日本を中心に広範囲に分布する泥炭は未分解な植物繊維を主な構成物とする超軟弱土である。泥炭地盤は高い圧縮性を示し、圧密後も粘性に起因する大きな沈下（二次圧密）が起こる。また、初期透水性が高いが、圧縮とともに透水係数が大幅に減少するため、有効応力の変化による沈下（一次圧密）と二次圧密を分離することがむずかしく、供用後の長期沈下によって大規模な補修を余儀なくされた事例が起きている。

泥炭地盤のような軟弱地盤の主要な対策工の一つであるプレロード工法は、あらかじめ構造物よりも大きな荷重をかけて所定の沈下量まで到達後、荷重の一部を撤去し、最終構造物を建設する。この工法で改良された地盤には過圧密領域が生成するため、長期沈下が低減される。近年は安定補強の新工法を併用することによって（本研究課題ではこれを“統合型プレロード技術”と呼んでいる）、さらなる効果の発現が期待される。

プレロード工法の設計では、プレロードの大きさおよび载荷期間を如何にして決めるかが肝要で、改良効果が不十分な場合には、荷重撤去後に再び沈下が発生し上部構造物の機能損傷等を引き起す。しかし、再沈下は経験的な方法で予測を行っているのが現状で、不均質でかつ境界条件が複雑な自然地盤においては不確実性を伴う。また、統合型プレロード技術のように従前とは異なる施工条件や荷重規模に対する適用についても不明な点を多く残しており、力学理論に基づいた汎用解析ツールの開発が求められている。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、多様な応力状態、複雑な形状および境界条件にも対応できる汎用性の高い解析ツールを開発し、建設中の圧密・せん断挙動から荷重撤去後の再沈下までを一貫して定量的に予測できる方法を確立すること、また効果的で経済的な設計法の提示を試みることである。そのために、1) 室内試験（除荷を伴う長期圧密試験、定ひずみ速度圧密試験）を実施し、除荷後の泥炭の時間依存性挙動を明らかにする。次に、2) 室内試験の結果に基づき除荷後の圧密と粘塑性変形を Critical state 理論と isotach 則<sup>1)</sup>をベースに数理モデル化し、二次元水/土連成有限要素法（FEM）プログラムに実装する。3) 開発した汎用解析ツールを用いて、除荷を伴う長期圧密試験を解析し、試験結果の再現性について評価する。さらに、4) 原位置への適用例として、真空圧密工法で改良された泥炭地盤について FEM 解析を実施し、予測精度を照査する。加えて、5) 真空ポンプの载荷期間を変化させた仮想解析を通じて、設計の最適化・高度化を試みる。

### 3. 研究の方法

#### (1) 除荷を受けた泥炭の時間依存特性の評価

除荷を受けた泥炭の時間依存特性を把握するために、除荷を伴う長期圧密試験、および定ひずみ速度（CRS）圧密試験を行った。実験に用いた試料は北海道内で採取された不攪乱試料で、繊維分が卓越する泥炭（南幌泥炭）と分解が進んだ有機質土（北村泥炭）の2種類である。

除荷を伴う長期圧密試験は、段階载荷圧密試験機を用いて行った。供試体寸法は直径 60mm、高さ 20mm で、排水条件は両面排水である。図 1 に示すように、正規圧密状態となるよう初期に  $\sigma_0=40\text{kN/m}^2$  で 1 時間圧密したのち、プレロードに相当する上载荷重  $\Delta\sigma_p(=\sigma_p-\sigma_0)$  を 10min、1h、24h 載せた。 $\Delta\sigma_p$  の大きさは荷重（全応力）で定義した過圧密比が  $OCR(=\sigma_p/\sigma_f)=1.0, 1.1, 1.3, 1.5, 2.0$  となるように決めた。その後  $\Delta\sigma_u(=\sigma_p-\sigma_f)$  で除荷を行い、沈下量を約 1 ヶ月計測した。最終の圧密圧力は  $\sigma_f=80\text{kN/m}^2$  である。

CRS 試験は、内径 60mm、高さ 20mm の圧密リングに供試体をセットしたのち、脱気水で圧密容器内を満たし、背圧（ $100\text{kN/m}^2$ ）を载荷した。上端は排水、下端は非排水面とした排水条件のもとで、軸圧縮応力を载荷し、沈下量と供試体下端における過剰間隙水圧を測定した。ひずみ速度は  $0.02\%/min$  を基準とし、基準ひずみ速度に対してひずみ速度を 10 倍および 1/10 倍に交互に変化させる段階 CRS を実施した。

#### (2) 時間依存性挙動のモデル化と室内試験の再現性

室内試験により得られた時間依存特性を、間隙比-鉛直有効応力（圧密圧力）-粘塑性ひずみ速度の間に一意の関係があると仮定する isotach 則（図 2）によって解釈した。また、これと Critical state 理論（カムクレイモデル）の組み合わせにより一般応力条件に拡張し、

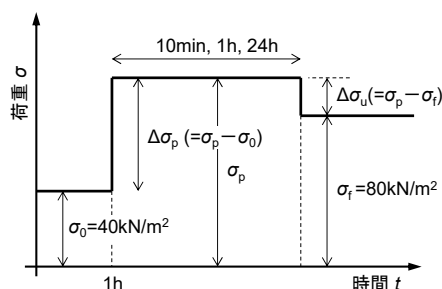


図 1 除荷を伴う長期圧密試験の荷重履歴

多次元水／土連成有限要素法（FEM）プログラムに搭載した。また、開発したプログラムを用いて室内試験をシミュレーションし、計測値と解析値を比較することによって、解析手法の信頼性を検証した。

### (3) 原位置の適用性と設計の最適化

室内試験の応力-ひずみ-時間関係をシミュレーションできれば、原位置の長期沈下も予測可能と考えられる。しかし、層厚が大きい原位置ではひずみ速度が室内試験と比較してかなり小さく、このようなひずみ速度域での時間依存特性は明らかではない。そこで、北海道江別市美原で実施された盛土併用真空圧密工法を対象に開発した汎用解析ツール（FEM）を用いて解析を実施し、予測精度を検証した。当該試験施工では、過圧密効果が高めるため、真空ポンプの稼働期間を通常の施工よりも延長している。真空ポンプの稼働期間を変えた仮想のシミュレーションも実施し、改良効果（圧縮ひずみ速度の低減）に及ぼす影響についても解析的に検討した。

## 4. 研究成果

以下に主要な研究成果を述べる。

### (1) 除荷を受けた泥炭の時間依存特性の評価

図3は、除荷を伴う長期圧密試験から求めた、南幌泥炭の除荷前後の粘塑性ひずみ速度の低減率  $\alpha$  と過圧密比 OCR の関係（両対数）である。図中には、isotach 則による両者の関係（実線）も示した。ここで、 $\lambda$ 、 $\kappa$ ：圧縮、膨張指数、 $\lambda_{ae}$ ：二次圧密係数で、別途実施した除荷過程を含む CRS 試験より  $\kappa/\lambda=0.1$ 、また段階 CRS 試験より  $\lambda_{ae}/\lambda=0.075$  とした。この図から、 $\alpha$  は OCR の増加に対して線形的に減少していることがわかる。また、室内試験の結果は荷重（OCR）の大きさや荷重時間（1h, 24h）によらず、概ね isotach 則によるライン上にプロットされている。同様の傾向は分解が進んだ泥炭（北村泥炭）についても認められた。これらの結果は除荷後の圧縮挙動は荷重履歴に依らず isotach 則によって説明できる可能性を示唆するものである。

### (2) 時間依存性挙動のモデル化と室内試験の再現性

#### 1) 時間依存性挙動のモデル化

除荷された泥炭の圧縮挙動は、(1)で述べたように isotach 則によって記述できる可能性が高い。そこで、isotach 則と Critical state 理論を用いて応力速度-ひずみ速度関係を導いた。本研究では Hooke 則を弾性変形に採用し、時間依存性として isotach 則を粘塑性変形に適用した超過応力型の弾粘塑性モデル<sup>2)</sup>によってモデル化した。構成モデルにおける弾粘塑性流動則は以下のように表される

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{vp} = \gamma \langle \Phi(F) \rangle \frac{\partial f}{\partial \sigma'_{ij}} \quad (1)$$

ここで、 $\sigma'_{ij}$ は有効応力テンソル、 $\gamma$ は流動パラメータ、 $\Phi$ は超過応力関数  $F$  をパラメータとする粘塑性流動関数で、 $F > 0$  のとき  $\langle \Phi(F) \rangle = \Phi(F)$ 、 $F \leq 0$  のとき  $\langle \Phi(F) \rangle = 0$  である。また、降伏関数  $f$  には Original Cam-clay モデルを採用した。ここで  $\gamma \Phi(F)$  は、Bodas Freitas et al<sup>3)</sup>に倣い同じ降伏曲面では一定と仮定し、等方圧密時の値を用いた。このようにして得られた応力ひずみ関係を増分形で FEM に組み込んだ。

#### 2) 室内試験の再現性

除荷を伴う長期圧密試験の結果に対して、上記の構成モデルを用いて FEM 解析を実施し、沈下挙動の再現性を検証した。解析に用いたパラメータは、室内試験の結果に基づき決めた。FEM 解析により求めたひずみ  $\epsilon$  の時間変化を図4に示す（上載荷重の荷重時間 1h のケース

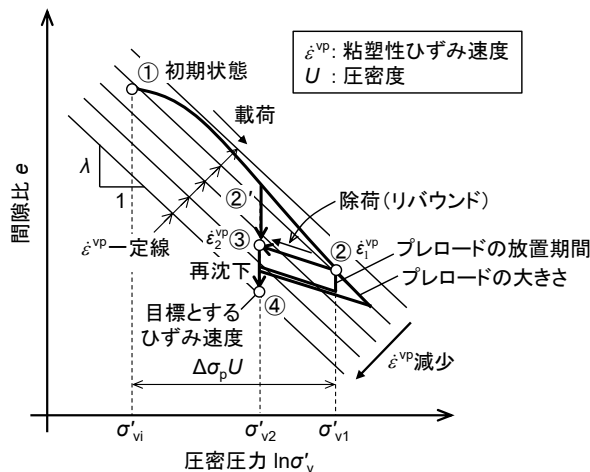


図2 プレロード工法で改良した土の圧密曲線と isotach 則による解釈

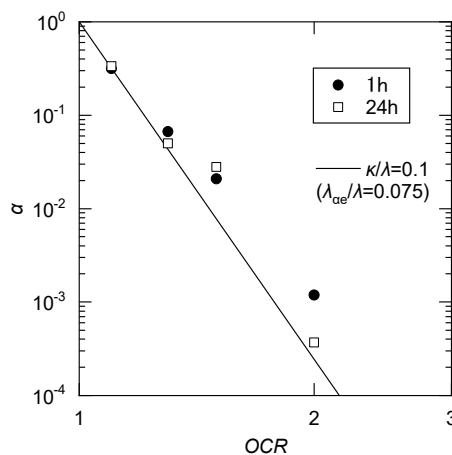


図3 長期圧密試験の荷重履歴：南幌泥炭

のみ掲載)。この図から、除荷にともない泥炭試料は一旦膨張し、体積変化が生じない平衡状態を続いたのち、再び沈下に転じていることがわかる。膨張量および再沈下が生じるまでの時間は、OCRが大きいほど、また荷重時間が大きくなるほど大きくなる。FEM解析結果は、荷重による圧密沈下から除荷によるリバウンド、再沈下に至るまでの過程を定量的に再現できており、解析手法の信頼性が確認された。

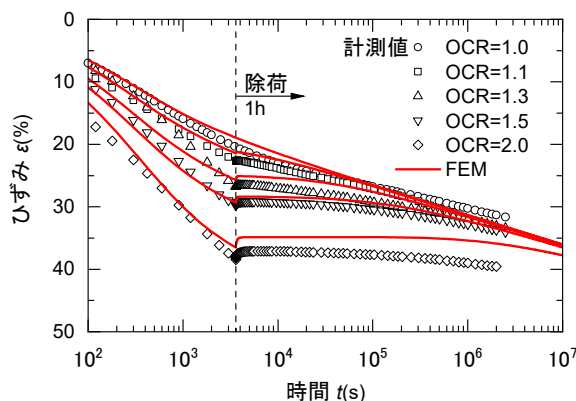


図4 除荷を伴う長期圧密試験結果とFEM解析結果の比較：荷重時間：1h

### (3) 原位置の適用性と設計の最適化

#### 1) 原位置の適用性

開発した汎用解析ツールの、原位置の適用性を評価するため、北海道江別市美原で実施された盛土併用真空圧密工法を対象にFEM解析を実施した。当該地は深度20m程度まで泥炭性軟弱地盤が堆積しており、このうち表層に泥炭層(Ap)が層厚4.5mで分布する。Ap層の上部(Ap-u)は自然含水比 $w_n=410-820\%$ 程度、下部(Ap-l)は $w_n=230-365\%$ 程度である。当該試験施工の地盤調査および動態観測結果の詳細については文献4)を参照されたい。モデル化では、盛土-基礎地盤系を要素数1501、節点数1587の有限要素メッシュで分割し、泥炭および粘土は粘塑性変形が isotach 則にしたがうものとした弾粘塑性モデルを適用し、十分な剛性を有する盛土やサンドマット、砂層に関しては弾性体を適用した。プラスチックボードドレーンは0.8mの正方形配置で、真空ポンプによって改良域内に付与された負圧による集排水効果は拡張マクロエレメント法によって表現した。

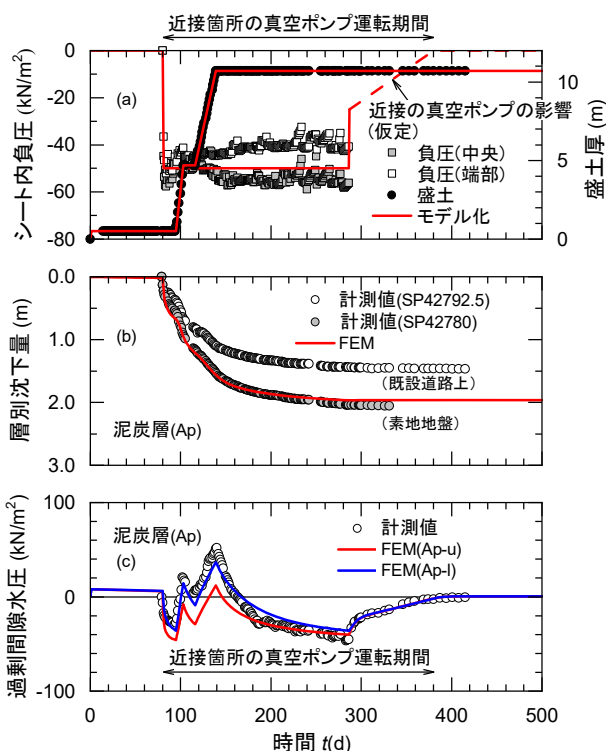


図5 動態観測結果およびFEM解析結果<sup>5)</sup>

図5は、真空ポンプと盛土の施工履歴、および泥炭層(Ap)で測定された沈下量と過剰間隙水圧の経時変化である。図5(a)からわかるように、サンドマット敷設後、負圧を単独で2週間程度与え、盛土の建設工事が行われた。盛土後約5ヶ月間、真空ポンプを稼働し続け、間隙水圧が静水圧以下になるのを確認したのち、286日に解除した。Ap層で発生した沈下量は、図5(b)に示すとおりである。SP42,780で測定された沈下量は、真空ポンプの停止時点(286日)で約2mである。SP42,792.5の沈下量は相対的に小さいが、これは同地点が既設道路により先行圧密を受けていたためである。ただし、粘性に起因する沈下(二次圧密)は有効応力に依存しないため、長期沈下の計測値に用いた。過剰間隙水圧に関しては(図5(c))、真空ポンプの運転停止(286日)とともに過剰間隙水圧はゼロ(静水圧)に戻っている。したがって、Ap層は過圧密履歴を受けた。

FEM解析の施工履歴は、図5(a)の赤線で示したようにモデル化した。FEM解析結果は、計測された泥炭層(Ap)の沈下量(図5(b))および過剰間隙水圧(図5(c))を良好に再現している。したがって、開発した汎用解析ツールは、除荷を含む原位置の沈下挙動の予測に用いることができる。

#### 2) 設計の最適化

次に、真空ポンプの運転期間を変化させたケーススタディを実施し、残留沈下の低減効果を検討した。真空ポンプの稼働期間は、盛土完了時点で真空ポンプを停止したCase1と、残留沈下を抑えるために盛土後に約5ヶ月間運転を続けたCase2である。前者は真空圧密による対策効果を安定問題に限定したものである。一方、後者は安定性の向上のみならず、過圧密効果を高め、残留沈下の低減を試みた計算例である。なお、Case2は上記1)と真空ポンプの荷重期間が同じであるが、1)では近接箇所真空ポンプ運転期間の影響を考慮して、真空ポンプを段階的に解除したが(図5(a))、本ケーススタディでは通常通り瞬間的に解除した。図6は、FEM解析によって得られた盛土中央における泥炭層上部(Ap-u)の圧

縮ひずみ速度と時間の対数関係である。二次圧密が時間の対数 ( $\log t$ ) に比例するものとする、二次圧密中の時間と粘塑性ひずみ速度の関係は式(2)で与えられるので、これを同図にプロットした。

$$\dot{\epsilon}^{vp} = \frac{\lambda_{ae}}{t} \quad (2)$$

ここで、 $\lambda_{ae} (= \lambda_{ae} / (1+e_0))$ ,  $e_0$ : 先行圧密時の間隙比) は  $\epsilon - \ln t$  関係 ( $\epsilon$ : ひずみ) で定義される二次圧密係数である。図には参考までに「泥炭性軟弱地盤対策工マニュアル<sup>6)</sup>」に示された要求水準の沈下速度  $20\text{mm/year}$  を圧縮ひずみ速度に換算した  $1.6 \times 10^{-10}\text{s}^{-1}$  を示してある。

FEM 解析で得られた圧縮ひずみ速度は、真空単独載荷 ( $t=80-95$  日) および盛土建設 ( $t=95-139$  日) によって増大し、その後の放置期間で過剰間隙水圧の消散とともに徐々に低下する。盛土建設後 (139 日) に真空ポンプを解除した Case1 は、1000 日を過ぎて残留沈下の要求水準 ( $1.6 \times 10^{-10}\text{s}^{-1}$ ) に到達する。一方、盛土後も真空ポンプを稼働し続け 286 日に停止した Case2 は、圧縮ひずみ速度が大幅に減少し、ポンプ停止直後に要求水準以下となる。また式(2)の下側にプロットされていることから、見かけ上の圧密時間が大幅に低下していることがわかる。このように開発した汎用解析ツールを用いることによって、真空ポンプの稼働期間と残留沈下の低減効果の関係を定量的に示すことができた。

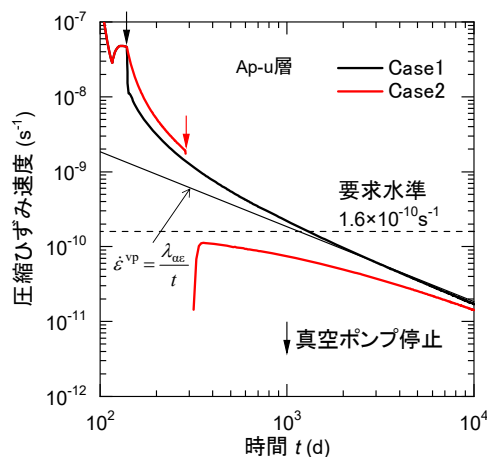


図6 泥炭層上部 (Ap-u) の圧縮ひずみ速度の経時変化

#### <参考文献>

- 1) Šuklje, L.: The analysis of the consolidation process by the isotache method, Proceedings of 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, London, 1, pp.200-206, 1957.
- 2) Adachi, T., Oka, F.: Constitutive equations for normally consolidated clay based on elasto-viscoplasticity, Soils and Foundations, Vol.22, No.4, pp.57-70, 1982.
- 3) Bodas Freitas, T.M., Potts, D.M., Zdravkovic, L.: A time dependent constitutive model for soils with isotach viscosity, Computers and Geotechnics, Vol.38, No.6, pp.809-820, 2011.
- 4) 林宏親、西本聡、橋本聖、梶取真一：真空圧密工法によって改良された泥炭性軟弱地盤の長期沈下挙動、地盤工学ジャーナル、Vol.8, No.3, pp.415-424, 2013.
- 5) 山添誠隆、西村聡、田中洋行、萩野俊寛、林宏親：第62号 地盤工学会北海道支部 技術報告集、pp.426-435, 2021.
- 6) (独)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、pp.46-47, 2017.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 熊地純人, 山添誠隆, 荻野俊寛
2. 発表標題 室内試験に基づく泥炭の長期沈下挙動とシミュレーション
3. 学会等名 令和4年度 土木学会東北支部技術研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐藤こまち, 柳田紘希, 山添 誠隆, 林宏親
2. 発表標題 真空圧密工法を適用した泥炭地盤の長期沈下挙動予測
3. 学会等名 令和3年度 土木学会東北支部技術研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小坂龍河, 熊地純人, 山添誠隆, 花田智秋, 荻野俊寛
2. 発表標題 除荷を受けた有機質土の長期沈下挙動と解析
3. 学会等名 令和3年度 土木学会東北支部技術研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山添誠隆, 西村聡, 田中洋行, 荻野俊寛, 林宏親
2. 発表標題 除荷を受けた泥炭の長期沈下に関するモデルと原位置計測事例による検証
3. 学会等名 第62回 地盤工学会北海道支部年次技術報告会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山添誠隆, 西村聡, 田中洋行, 林宏親
2. 発表標題 圧密・せん断時における泥炭の時間依存性挙動とモデル化に関する検討
3. 学会等名 第61回 地盤工学会北海道支部 年次技術報告会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 金子孝幸, 吉田武春, 山添誠隆, 花田智秋, 荻野俊寛
2. 発表標題 異なるサンプリング方法により採取された繊維質泥炭の物理・力学特性
3. 学会等名 令和2年度 土木学会東北支部技術研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 安養寺由紀菜, 工藤颯太, 山添誠隆, 花田智秋, 荻野俊寛
2. 発表標題 荷重除荷を受けた泥炭の長期沈下挙動とアイソタック則による解釈
3. 学会等名 令和2年度 土木学会東北支部技術研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 土橋俊, 山添誠隆
2. 発表標題 荷重除荷履歴を受けた泥炭の長期沈下挙動と解析
3. 学会等名 令和2年度 土木学会東北支部技術研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山添誠隆, 田中洋行, 荻野俊寛, 西村聡
2. 発表標題 サンプリング方法が泥炭試料の物理・力学特性に及ぼす影響
3. 学会等名 第55回 地盤工学研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川辺東緒子, 山添誠隆, 花田智秋, 荻野俊寛
2. 発表標題 サンプリング方法が泥炭試料の物理・力学特性に与える影響
3. 学会等名 令和元年度 土木学会東北支部技術研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小笠海香, 山添誠隆
2. 発表標題 アインタックモデルを用いた泥炭地盤の長期圧密沈下挙動の整理
3. 学会等名 令和元年度 土木学会東北支部技術研究発表会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	西村 聡  (Nishimura Satoshi)  (70470127)	北海道大学・工学研究院・教授   (10101)	



6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	荻野 俊寛  (Ogino Toshihiro)  (80312693)	秋田大学・理工学研究科・准教授    (11401)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	田中 洋行  (Tanaka Hiroyuki)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関