

除荷を受けた有機質土の長期沈下挙動と解析

秋田工業高等専門学校 非会員 ○小坂 龍河 非会員 熊地 純人 正会員 山添 誠隆 正会員 花田 智秋
秋田大学大学院 正会員 荻野 俊寛

1. はじめに

関東以北に広範囲に分布する超軟弱土の泥炭地盤は、施工中の沈下のみならず、供用後も二次圧密による長期沈下が発生し、構造物の維持管理に大きな影響を及ぼす。その対策に予め構造物よりも大きな荷重を載荷し、所定の沈下量に到達後、除荷するプレロード工法がしばしば用いられる。しかしプレロード後の沈下挙動には不明な点が多く、事前照査法は確立していない。筆者らは先行研究¹⁾で繊維分が卓越する泥炭（高有機質土）について、除荷後の再沈下を含む圧縮則にアイソタック則が適用できることを明らかにした。本研究では、先行研究よりも分解が進み、低含水な有機質土に対して系統的な長期圧密試験を実施し、分解度に依らず同様にアイソタック則が適用できるのかを検討した。また、試験結果に対して超過応力型 Cam-clay モデルを用いて再現解析を行なった。

2. アイソタック則と除荷時の挙動

アイソタック則では、図 1 に示すように $e-\ln\sigma'_v$ 曲線がひずみ速度によって一意に決まる。載荷過程におけるアイソタック則の適用性には多くの既往研究（主に粘土：例えば Leroueil²⁾など）があるが、除荷後については限られており、とくに泥炭では不明な点を多く残す。一定荷重を載荷した場合の状態変化は、図 1 において①→②'→③→④となり、有効応力一定後に長時間掛けて二次圧密が発生する（②'→③→④）。一方、荷重を除荷するプレロード工法では①→②→③→④となり、除荷によって粘塑性ひずみ速度は大幅に低下する。

除荷を受けた泥炭に対してアイソタック則が成立するものと仮定すると、急速・弾性的な除荷に伴う粘塑性ひずみ速度の低減率 α は、図 1 から式(1)のようになる。

$$\alpha = \left(\frac{\dot{\epsilon}_2^{vp}}{\dot{\epsilon}_1^{vp}} \right) = \left(\frac{\sigma'_{v1}}{\sigma'_{v2}} \right)^{-\frac{\lambda-\kappa}{\lambda_{ac}}} \quad (1)$$

ここで、 $\dot{\epsilon}^{vp}$ は粘塑性体積ひずみ速度、 σ'_v は鉛直有効応力で、下添え字の 1 と 2 はそれぞれ除荷直前、直後を表す。また、 λ 、 κ ：圧縮、膨張指数、 λ_{ac} ：二次圧密係数である。 $\sigma'_{v1}/\sigma'_{v2}$ は過圧密比 OCR である。

3. 用いた試料と試験方法

本試験で用いた試料は北海道岩見沢市北村で採取した不攪乱試料である。表 1 は試料の物理化学特性で、先行研究¹⁾の北海道空知郡南幌の試料と比較すると、当該試料（北村泥炭）は含水比が低く、繊維質が少ない。

試験は除荷を伴う長期圧密試験と定ひずみ速度 (CRS) 圧密試験を行った。前者の試験では、段階載荷圧密試験

機を用いた。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。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、プレロード荷重に相当する荷重 $\Delta\sigma_p$ を一定時間 (10min, 1h) 載荷した。 $\Delta\sigma_p$ の大きさは荷重で定義した過圧密比 OCR が 1.0, 1.1, 1.3, 1.5, 2.0 となるように決めた。その後 $\Delta\sigma_u$ で除荷し、沈下量を 1 カ月計測した。ここで、最終の圧密圧力は $\sigma_f=80\text{kN/m}^2$ である。OCR=1.0 の圧密度 90%の時間は $t_{90}=8\text{min}$ である。したがって、載荷時間 10min は未圧密を残す状態で除荷を行った実験シリーズ、また 1h は二次圧密中に除荷したものである。

4. 実験結果と考察

図 2 は、載荷時間 1h、OCR=1.3 のひずみ ϵ とひずみ速度の関係である。図中に示した t_{90} より、除荷前には有効応力一定の状態 ($\sigma'_{v1}=104\text{kN/m}^2$) でひずみが発生し（二次圧密状態）、除荷直前の粘塑性ひずみ速度は $\dot{\epsilon}_1^{vp}=5.1\times 10^{-6}\text{s}^{-1}$ である。除荷を受けると、供試体は一旦リバウンドし、その後、有効応力一定 ($\sigma'_{v2}=80\text{kN/m}^2$) のもとで再沈下が起きる。除荷直後の粘塑性ひずみ速度は $\dot{\epsilon}_2^{vp}=1.5\times 10^{-7}\text{s}^{-1}$ で、除荷前と比較した粘塑性ひずみ速度の低減率 α (式(1)) は 3×10^{-2} となる。このように過圧密履歴を与えることによって、泥炭のひずみ速度は大幅に低減する。

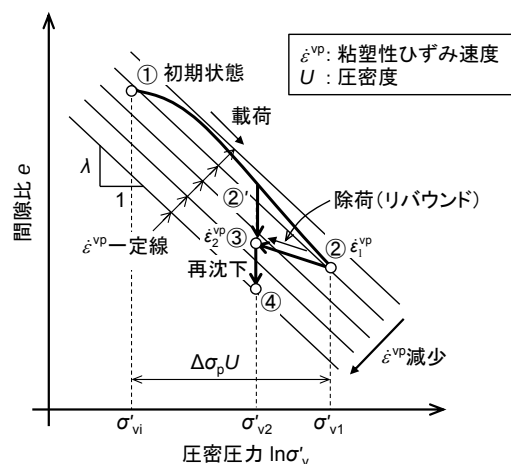


図 1 プレロード工法で改良した土の圧密曲線とアイソタック則による解釈

表 1 試料の物理化学特性

	北村泥炭	南幌泥炭 ¹⁾
固体部分の密度 $\rho_s(\text{Mg/m}^3)$	2.06	1.71
自然含水比 $w_n(\%)$	300	683
強熱減量 $L_t(\%)$	37	71

各値は平均値

キーワード：泥炭、プレロード、長期沈下、Peat, Preload, Long-term settlement

連絡先：〒011-8511 秋田県秋田市飯島文京町 1 番 1 号

図3は、このようにして求めた荷重時間1hの α とOCRの関係である。図中、式(1)において λ と κ の比(κ/λ)を0.1および0.2として求めた α とOCRの関係も示してある。なお、 λ_{ae} と λ の比($\lambda_{ae}/\lambda=0.06$)は圧密中にひずみ速度を変化させたCRS試験の結果から求めた。この図から、 α はOCRの増加に対して線形的に減少すること、またこの実験結果に合う式(1)の κ/λ は0.2であった。

図4は、荷重時間10minの場合のひずみ ε の時間変化である。この図から、除荷後の二次圧密挙動に着目すると、除荷を受けた試験結果(OCR=1.1, 1.3, 1.5, 2.0)は、除荷を伴わない試験結果(OCR=1.0)とほぼ同じ ε とひずみの時間変化となっている。二次圧密過程では有効応力は同一($\sigma'_{v2}=80\text{kN/m}^2$)であるので、このことは除荷履歴の有無や過圧密比の大きさに関わらず、同一の有効応力-ひずみ-ひずみ速度関係(アイソタック則)が成立することを表している。

5. FEM 解析

上記のように除荷履歴を受けた泥炭の圧密挙動はアイソタック則に従うことから、粘塑性変形にアイソタック則を仮定する超過応力理論に基づく弾粘塑性モデルを用いて、試験結果の再現解析を行う。用いたモデルの降伏関数 f にはOriginal Cam-clayモデルを採用し、同じ降伏曲面では粘塑性流動関数は同じであると仮定した。鉛直方向に10個の有限要素メッシュでモデル化し、試験と同じ境界条件を与えた。解析に用いたパラメータは表2のとおりで、圧密に関するパラメータはCRS試験の結果に基づき決めたが、一部推定式³⁾を用いた。 κ は4章より λ の0.2倍とした。

FEM解析結果は図4に書き入れた。これからFEM解析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概ね再現できていることがわかる。

6. 結論

北海道北村で採取した有機質土を用いて、除荷を伴う長期圧密試験を行った。その結果、次の点が明らかになった。1) 高有機質土(泥炭)と同様、有機質土についても、除荷過程を含む圧縮則にアイソタック則が適用できる。2) 除荷後の挙動を規定するパラメータとして重要となる κ は、 λ の0.2程度であった。3) アイソタック則に基づくモデルを用いたFEM解析結果は、除荷後の再沈下挙動までを比較的良好に捉えることができた。以上より、泥炭の分解度に依らず除荷時の圧縮則にアイソタック則が適用できることが明らかになった。

<参考文献> 1) 安養寺由紀菜, 工藤颯太, 山添誠隆, 花田智秋, 荻野俊寛: 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, 令和2年度 土木学会東北支部技術研究発表会 2) Leroueil, S.: The isotache approach. Where are we 50 years after its development by Professor Šuklje? (2006 Prof. Šuklje's Memorial Lecture), Proceedings of 13th Danube-European Conference on Geotechnical Engineering, Slovenian Geotechnical Society, Ljubljana, Slovenia, pp.55-88, 2006. 3) 林宏親, 三田地利之, 西本聡: 泥炭地盤有限要素解析用のカムクレイパラメータ

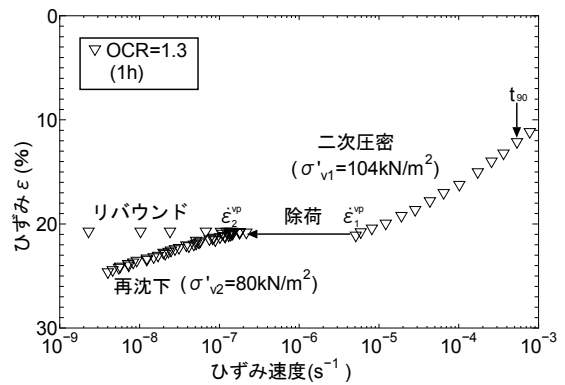


図2 除荷を伴う長期圧密試験から求めたひずみとひずみ速度の関係: 荷重期間1h, OCR=1.3の場合

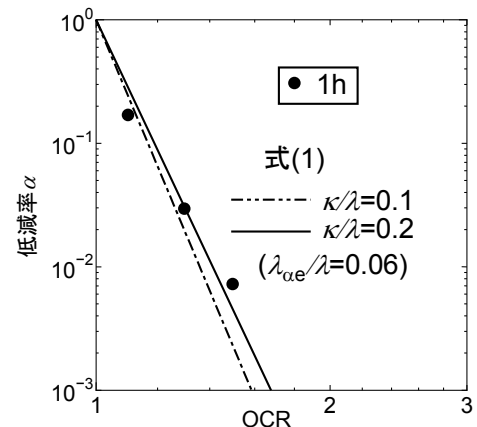


図3 除荷を伴う長期圧密試験から求めた粘塑性ひずみ速度の低減率 α とOCRの関係: 荷重時間1hの場合

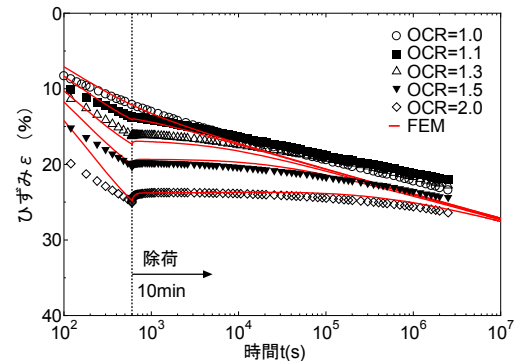


図4 除荷を伴う長期圧密試験から求めたひずみの時間変化: 荷重時間10minの場合

表2 FEM解析に用いたパラメータおよび参照値

圧縮指数 λ	1.56
膨張指数 κ	0.312
初期間隙比 e_0	5.75
透水係数の初期値 k_0 (m/s)	2.0×10^{-8}
透水係数指数 λ_k	0.50
限界状態応力比 M	1.59
ポアソン比 ν	0.1
二次圧密係数 λ_{ae}	0.094
初期粘塑性体積ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_{v0}^{vp}$ (s^{-1})	3.0×10^{-6}