

荷重除荷履歴を受けた泥炭の長期沈下挙動と解析

秋田工業高等専門学校 非会員 ○土橋俊 正会員 山添誠隆

1. はじめに

関東以北に分布する泥炭地盤は超軟弱土であるため、この地盤上に構造物を建設すると非常に大きな圧密沈下が発生する。構造物の建設に先立ち、予め構造物よりも大きな荷重を載荷し圧密を促進させるプレロード工法は、施工費が安価なため、泥炭に対しても適用実績が多い。しかし、荷重撤去後に生じる再沈下挙動は経験的な方法で予測が行われているのが現状で、プレロード荷重の大きさや載荷時間についての設計体系が理論的に整備されているとは言えない。別報¹⁾では、不攪乱泥炭試料に対して行われた荷重除荷を伴う系統的な長期圧密試験の結果を示した。本研究では、その試験結果をアイソタック則に基づく超過応力型 Cam-clay モデルによってモデル化し、試験結果の再現解析を通して、同モデルの適用可能性を検討した。

2. 解析方法

土の時間依存性挙動の記述にはいくつかの手法があるが、本論文では超過応力理論に基づく弾粘塑性モデルを用いた。弾粘塑性モデルでは、有効応力変化に伴う土の変形は、弾性成分と粘塑性変形に分解されるものとした上で、弾性変形には Hooke の微小変形弾性を仮定する。また、粘塑性変形については、次のような粘塑性変形に対する流れ則を仮定する。

$$\{\dot{\varepsilon}^{vp}\} = \gamma \langle \varphi(F) \rangle \left\{ \frac{\partial g}{\partial \sigma'} \right\}$$

ここに、 γ は流動パラメータ、 φ 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ある。また、 g は塑性ポテンシャルで、ここでは関連流れ則 ($g=f$) を仮定し、降伏関数 f には Original Cam-clay モデルを採用した。記号は $\langle A(F) \rangle$ は $F>0$ の時 $\langle A(F) \rangle = A(F)$ 、 $F \leq 0$ の時 $\langle A(F) \rangle = 0$ を意味する。本研究では、Bodas Freitas et al (2011) に倣い、同じ降伏曲面では粘塑性流動関数は同じと仮定し、 $\gamma\varphi(F)$ を決めた。

別報¹⁾で述べたように、荷重除荷を伴う長期圧密試験に用いた供試体寸法は直径 60mm、高さ 20mm である。両面排水条件のもと、 $p_0=40\text{kN/m}^2$ で 1 時間圧密し、これを初期状態とした。なお、供試体は正規圧密状態にあり、一次圧密は終了している。FEM 解析は実験と同様、 $p_0=40\text{kN/m}^2$ で圧密後を初期状態(高さ 16mm)としており、供試体の中心深度より上部を図 1 に示すように 10 個の有限要素メッシュでモデル化し、上端面にのみ排水条件を与えた。

解析に用いたパラメータは、表 1 に示すとおりである。設定パラメータのうち、圧密特性を表すパラメータ

キーワード：泥炭、プレロード、沈下、Peat, Preload, Settlement

連絡先：〒011-8511 秋田県秋田市飯島文京町 1 番 1 号

表 1 解析に用いたパラメータ

パラメータ	
圧縮指数 λ	3.0
膨張指数 κ	0.30
初期間隙比 e_0	10.0
限界状態応力比 M	1.86
ポアソン比 ν	0.15
透水係数の初期値 $k_0(\text{m/s})$	1.20E-08
透水係数指数 λ_k	1.00
二次圧密係数 λ_{ae}	0.210
初期粘塑性体積ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_v^{vp} (1/\text{min})$	4.80E-04

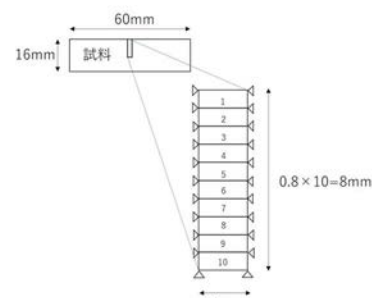


図 1 有限要素メッシュ

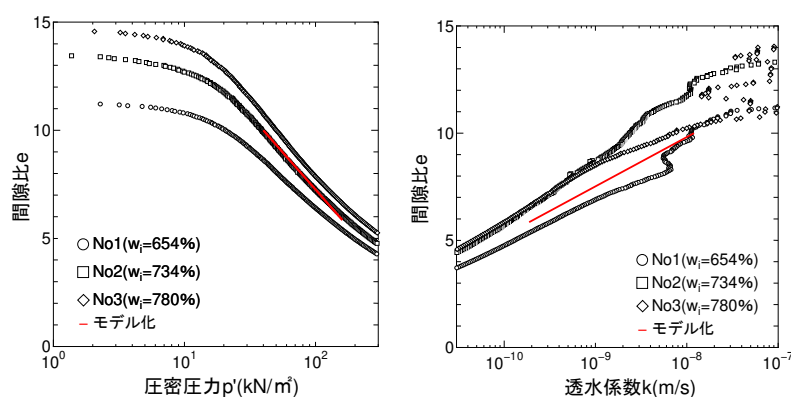
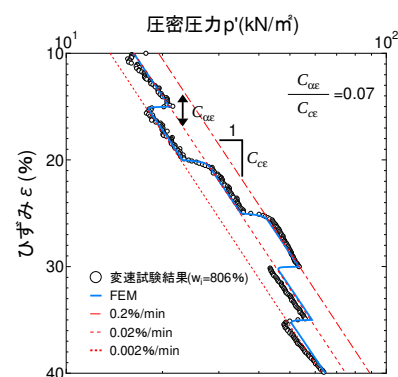


図 2 e-logp、e-logk 曲線とモデル化

図 3 ε -logp 曲線と FEM 解析結果

($\lambda, \kappa, e_0, k_0, \lambda_k$) は定速 CRS 試験の結果から決めた（図 2 参照）。粘性パラメータのうち、 λ_{ae} は圧密中にひずみ速度 10 倍変化させた変速 CRS 試験の結果から求め（図 3 より $C_{ae}/C_{ce}=\lambda_{ae}/\lambda=0.07$ ），初期体積ひずみ速度はプレロード荷重の載荷前のひずみ速度を用いた。限界状態応力比 M は，試験値がなかったため，強熱減量 L_i から経験式³⁾を用いて求めた。ポアソン比 ν は一般値である。

3. 解析結果および考察

荷重除荷を伴う長期圧密試験の解析に先立ち，はじめに，圧密中にひずみ速度を変化させた変速 CRS 試験に対して FEM 解析による再現を行った。図 3 はひずみ速度 0.02%/min を基準に，圧縮ひずみ 5%毎に 1/10 倍，1 倍，10 倍に交互に変化させた変速 CRS 試験から得られた ε -log p 曲線である。この図からひずみ速度を大きくすると右側に，逆にひずみ速度を小さくすると左側に平行移動するアイソタック挙動を示すことがわかる。図中には 2 章で述べた解析手法によって解析した結果も書き入れており，実験で確認されたアイソタック挙動が良好に再現できていることがわかる。なお，解析に使用したパラメータは本実験結果に基づき決めたもので，長期圧密試験の値（表 1）とは異なる。

次に，荷重除荷を含む長期圧密試験について述べる。実験条件の詳細は別報¹⁾に詳述されているが，本試験では $p_0=40\text{kN/m}^2$ で 1 時間圧密後，プレロード荷重に相当する荷重 Δp を一定時間載荷した。 Δp の大きさは 5 ケースあり，最終の圧密圧力を $p_f=80\text{kN/m}^2$ とし，過圧密比が $OCR=1.0, 1.1, 1.3, 1.5, 2.0$ となるように決めた。また， Δp の載荷時間は 10min, 1h, 24h の 3 ケースである。その後一部荷重を撤去し，沈下量を約 1 ヶ月計測した。

図 4～図 6 はプレロード荷重の載荷時間が 10min, 1h, 24h での実験結果である。荷重除荷を受けた泥炭は，荷重撤去によりリバウンドし，その後再沈下に転じるが，OCR が大きいほど，また載荷期間が長いほど，リバウンド量が大きく，再沈下に転じる時間が大きいことがわかる。同図には FEM 解析結果も入れてある（赤色のライン）。実験ではプレロード荷重の大きさや載荷時間がそれぞれ異なっているが，いずれのケースについても解析結果は荷重除荷によるリバウンドから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。

4. 結論

アイソタック則に基づく超過応力型 Cam-clay モデルを用いて，荷重除荷過程を含む不攪乱泥炭試料の長期圧密沈下の再現解析を行った。その結果，当該モデルを搭載した FEM 解析は，荷重載荷時の圧密沈下から荷重除荷時のリバウンド，再沈下挙動までを比較的良好に捉えることができた。

<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，CD-ROM
- 2) 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.
- 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ー決定に関する検討，第 40 回地盤工学研究発表会講演集，pp.857-858, 2005.

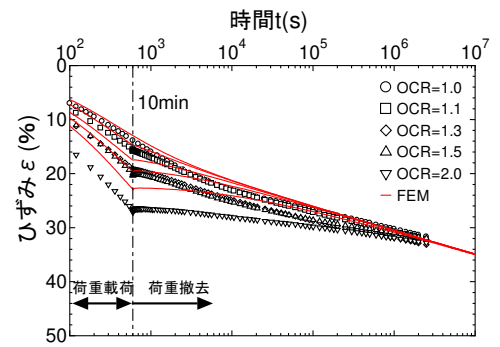


図 4 載荷時間 10min の $\Delta\varepsilon$ -log t 関係と FEM 解析結果

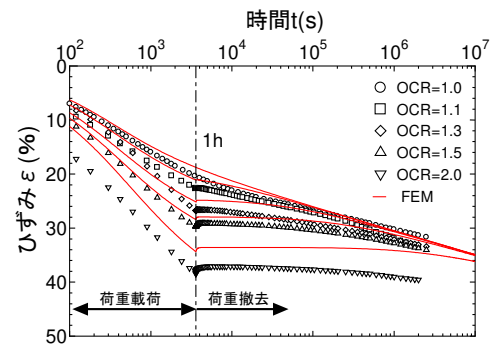


図 5 載荷時間 1h の $\Delta\varepsilon$ -log t 関係と FEM 解析結果

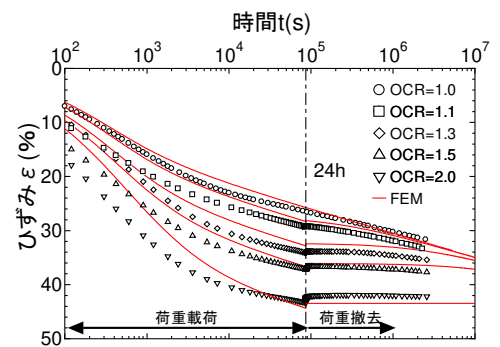


図 6 載荷時間 24h の $\Delta\varepsilon$ -log t 関係と FEM 解析結果