

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

秋田工業高等専門学校 非会員 ○熊地 純人 正会員 山添 誠隆
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泥炭地盤は、高含水比で高い圧縮性を示し、一次圧密終了後も粘性に起因するきわめて大きな継続沈下（二次圧密）が生じる。近年、泥炭地盤上に建設された道路が長期沈下に起因する路面の不陸によってメンテナンス費が増大した事例が増えていることを受けて、残留沈下に関する厳しい要求性能が課されるようになったり。本研究は、泥炭地盤の長期的な圧密挙動の予測精度向上を目指し、長期圧密試験により泥炭の長期沈下挙動を調べた。また、FEM 解析を用いたシミュレーションを行い、適用モデルを評価した。

2. 用いた試料と試験方法

本試験で用いた泥炭は北海道空知郡南幌町で採取した不攪乱試料である。表 1 は試料の物理・化学・圧密特性である。用いた試料は、高含水かつ繊維質である。また、24 時間毎の段階載荷圧密試験から求めた圧密降伏応力は $\sigma_{vy}=16\text{kN/m}^2$ である。実施した圧密試験は、圧密中にひずみ速度を段階的に変化させた定ひずみ速度圧密（CRS）試験と長期圧密試験である。このうち長期圧密試験は、段階載荷圧密試験機を用いて実施した。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。初期に鉛直有効応力 $\sigma_{vi}=10\text{kN/m}^2$ で 24 時間圧密したのち、上載荷重 δ を載荷した。 δ の大きさは $\delta/\sigma_{vi}=0.5, 3, 9$ である。載荷期間は $\delta/\sigma_{vi}=0.5, 3$ が 1 ヶ月、 $\delta/\sigma_{vi}=9$ が 3 ヶ月である。

3. 実験結果および考察

図 1 は段階 CRS 試験の結果から得られた $\varepsilon\text{-log}\sigma_v$ 関係（ ε : ひずみ, σ_v : 鉛直有効応力）である。この図から、ひずみ速度を大きくすると右側へ、小さくすると左側へシフトするアイソタック挙動が確認できる。

図 2 は長期圧密試験の結果から得られた $\varepsilon\text{-log}t$ 関係（ t : 時間）である。これより、一次圧密が終了する時間 t_p は δ が大きくなるほど増大している。これは、泥炭の

表 1 試料の物理・化学・圧密特性

固体部分の密度 ρ_s (Mg/m ³)	1.71
自然含水比 w_n (%)	750
強熱減量 L_i (%)	70
圧密降伏応力 σ'_{vy} (kN/m ²)	16

各値は平均値

圧密係数 c_v が圧密圧力の増加に対して著しく低下することに起因する。また、 δ の大きさに依らず二次圧密係数 $C_{\alpha\epsilon}$ は同じである。

4. 適用モデルの評価

実験結果のシミュレーションにより適用モデルを評価する。段階 CRS の結果より、構成モデルには超過応力型の弾粘塑性モデルを採用した。また、ひずみ速度特性については Watabe ら²⁾が提案する式(1)を用いた。

$$\sigma'_{vy} = \sigma'_{vy,s} [1 + \exp(c_1) (\varepsilon^{vp})^{c_2}] \quad (1)$$

ここで $\sigma'_{vy,s}$ は圧密降伏応力 σ'_{vy} の下限値、 ε^{vp} は粘塑性ひずみ速度、 c_1, c_2 は定数である。式(1)において、 $\varepsilon^{vp} \rightarrow 0$ になると $\sigma'_{vy} \rightarrow \sigma'_{vy,s}$ に収束する。図 3 は式(1)をもとに描いた $\varepsilon\text{-log}\sigma_v$ 曲線である。解析に用いた構成モデル

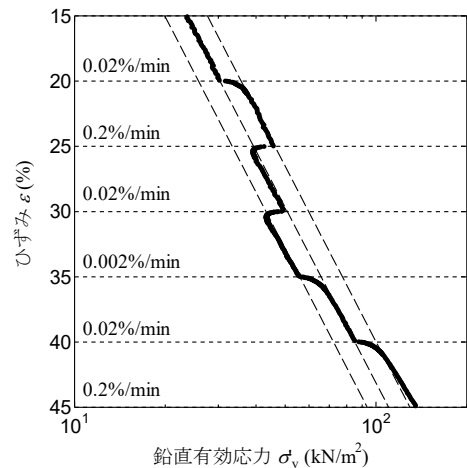


図 1 段階 CRS 試験から求めた $\varepsilon\text{-log}\sigma_v$ 関係

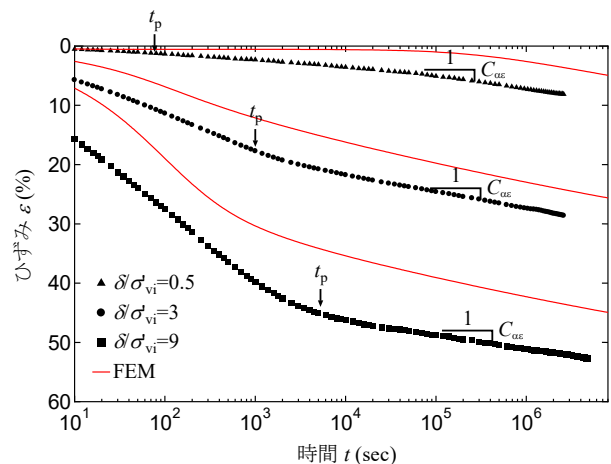


図 2 長期圧密試験から求めた $\varepsilon\text{-log}t$ 関係および FEM 解析結果

キーワード：泥炭, アイソタック, 圧密, 二次圧密, Peat, Isotach, Consolidation, Secondary consolidation

連絡先：〒011-8511 秋田県秋田市飯島文京町 1 番 1 号

は、式(1)を正規圧密線 NCL に採用し、同じ降伏曲面では粘塑性流動係数が同じであると仮定し³⁾一般応力状態に拡張した。使用したパラメータは表 2 に示すとおりで、実験の結果に基づき決めた。解析結果に大きな影響を及ぼす圧密および時間依存特性のうち、 λ , κ , e_0 , k_0 , λ_k は別途実施した段階載荷圧密試験および CRS 試験の結果を用いた。また、 c_1 , c_2 は次のように決めた。図 4 はひずみ速度を 10 倍大きくしたことによる鉛直有効応力のシフト ($\sigma'_{vy1} \rightarrow \sigma'_{vy2}$) を表している。二次圧密係数 C_{ae} はひずみ速度が 1/10 倍になったときの間隙比 e の変化であるので、応力変化と C_{ae} / C_c の間には式(2)が近似的に成り立つ。

$$\log \frac{\sigma'_{vy2}}{\sigma'_{vy1}} \approx \frac{C_{ae}}{C_c} \quad (2)$$

図 5 は今回実施した長期圧密試験および原位置データ⁴⁾におけるひずみ速度と C_{ae} / C_c をプロットしたものである。 C_{ae} / C_c はひずみ速度の低下とともに減少しており、 c_1 , c_2 はこれらのデータをもとに図中に示すように決めた。圧密係数 $c_v (=k/(\gamma_w m_v))$ の応力依存性に関しては、圧密過程における体積圧縮係数 m_v の低下よりも透水係数 k の低減を相対的に大きくすることで表現した ($\lambda > \lambda_k$)。FEM 解析の結果は図 2 に示したとおりで、実験で確認された沈下挙動の特徴（一次圧密の遅れ、および二次圧密）を概ね表現しており、適用モデルの妥当性が確認された。

5. 結論

段階 CRS 試験、長期圧密試験および FEM 解析から以下のことが明らかになった。

- 1) 段階 CRS 試験より、泥炭の圧密挙動はアイソタック則にしたがう。
- 2) 長期圧密試験より、泥炭の長期沈下は二次圧密のみならず、 c_v の低下による一次圧密の遅れも含まれる。
- 3) 圧密係数 c_v の応力依存性およびアイソタック則に基づく FEM 解析結果は、長期圧密挙動を適切に記述できることがわかった。今後は、さらなるデータの集積に加えて、より長期間の測定を行い二次圧密係数に及ぼすひずみ速度の影響を明らかにしていきたい。

<参考文献>

- 1) (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
- 2) Watabe, Y., Udaka, K., Morikawa, Y.: Strain rate effect on long-term consolidation of Osaka bay clay, Soils and Foundations, 48 (4), 495-509, 2008
- 3) Bodas Freitas, T.M., Potts, D.M., Zdravkovic, L.: A time dependent constitutive model for soils with isotach viscosity, Computers and Geotechnics, 38 (6), 809-820, 2011
- 4) 宮下隆雄・沢彰男：道央自動車道（札幌～岩見沢）盛土施工における現場計測結果について、泥炭に関する研究討論会論文集，土質工学北海道支部，pp.115-120, 1986

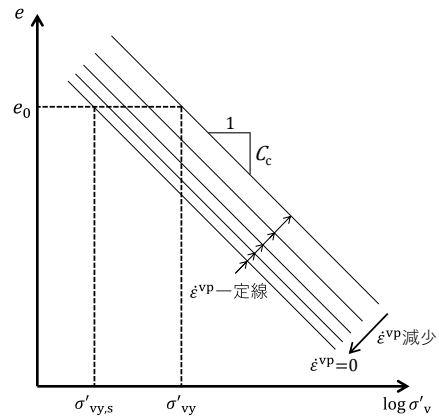


図3 Watabe らに基づくアイソタックモデルの圧密過程

表 2 FEM 解析に用いたパラメーターおよび参照値

圧縮指数 λ	2.91
膨張指数 κ	0.291
初期間隙比 e_0	12.8
透水係数の初期値 k_0 (m/s)	8.0×10^{-8}
透水係数指数 λ_k	1.13
限界状態応力比 M	1.86
ポアソン比 ν	0.15
定数 c_1	2.0
定数 c_2	0.11
初期粘塑性体積ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{v0}^{VP}$ (1/s)	4.6×10^{-11}

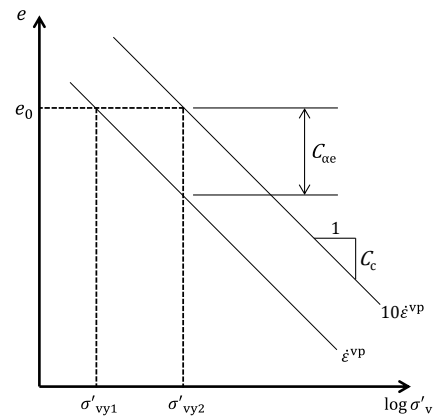


図 4 ひずみ速度増大による鉛直有効応力のシフト

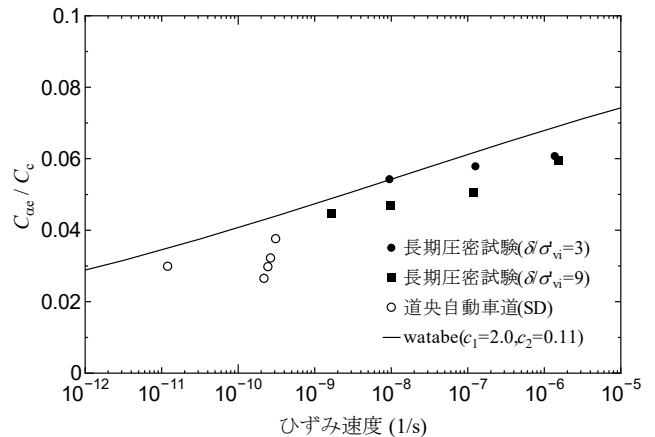


図 5 ひずみ速度と C_{ae} / C_c の関係