

温度変化の影響を考慮した地盤材料の構成モデル

名古屋工業大学 学生員 ○ 京川 裕之

名古屋工業大学 正会員 菊本 統, 中井 照夫, ホサイン シャヒン

1. はじめに

近年, 放射性廃棄物処理や熱エネルギー貯蔵, 海底地下資源の開発, 高電圧ケーブル埋設など様々な目的での地盤開発や利用が増加している。これに関連してしばしば課題となるのは, 温度変化の影響を考慮した地盤応答の取り扱いである。地盤の熱-水-応力連成解析はしばしば実施されているが, 既往の数値計算に用いられている土の構成則が温度変化の影響を適切に考慮しているとはいえない。本研究では, 過去の実験事実を参照しながら温度変化の影響について整理し, 種々の地盤材料の諸特性を合理的に考慮できる方法¹⁾を参考に温度変化の影響を考慮した地盤材料の構成モデルを提案する。

2. 異なる温度下での土の応答特性と正規圧密曲線

Fig.1 に異なる温度下での不攪乱シルト質粘土の標準圧密試験²⁾の結果を示す。図より, 試料は当初やや過圧密な状態にあるが, いずれ圧密降伏応力に達して, 正規圧密挙動を呈する。このとき, 温度が高いものほど圧密降伏応力小さく, その後に見られる正規圧密線が下方に平行移動する傾向が見られる(傾きはほとんど変わらない)。次に, Bäckebol clay の温度履歴を与えた標準圧密試験³⁾の結果を Fig.2 にまとめる。試験では, 25°C一定条件で圧密し, 所定の載荷圧で温度を 35, 45, 55°C と増加させ, その後温度一定(破線)あるいは 25°C(実線)で再び圧密を行っている。図より, 圧密によって正規状態に近づいた土は, 温度増加とともに土は体積圧縮を生じながら各温度に対応する正規状態の密度へと移行していると考えられる。温度を 25°C に戻したケースでは, 再圧密時に土は過圧密な挙動を呈しながら, 25°C に対応する正規圧密線に戻る。つまり, 昇温履歴を受けて正規圧密線がいったん下降した土でも, 降温時には再びものの位置まで正規圧密線は上昇する。すなわち, 文献¹⁾で示した状態変数 ψ を温度 T の関数として定義することで説明可能と考える。したがって, 提案モデルでは温度に応じて一意な正規圧密線を規定し, その移動量を $\psi(T)$ と定義する。

また Fig.2 の結果より, 温度増加にともなう体積圧縮量は過圧密領域では小さく, 正規状態では大きくなる。Fig.3 に過圧密比を変えた Boom clay の平均応力一定条件での昇温/降温試験⁴⁾の結果を示す。図より, 降温時には過圧密比によらず土の体積圧縮量はほぼ等しく, 特に過圧密比の大きい土では昇降温により可逆な変形特性を呈している。これは土の熱膨張特性による弾性変形と捉える。一方で, 正規圧密土は昇温時に大きく圧縮して降温時に変形が回復しない弾塑性挙動を呈している。

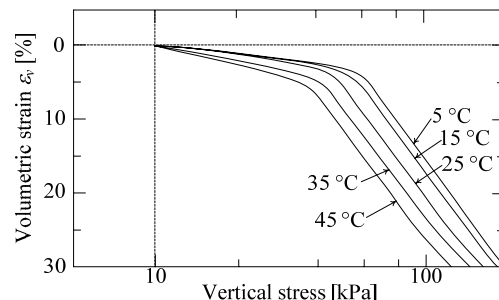
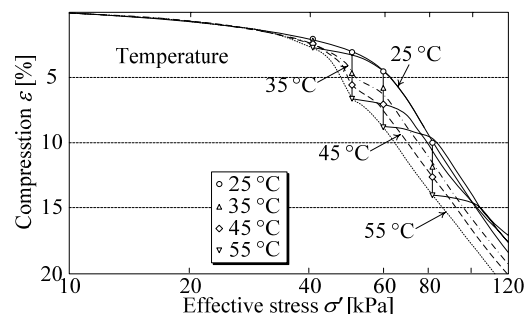
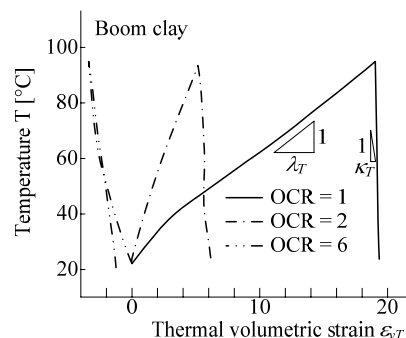
以上から, 温度変化に伴う総間隙比変化 $(-\Delta e)^T$ と熱膨張によるその弾性成分 $(-\Delta e)^{eT}$ を次式で与える。

$$(-\Delta e)^T = \lambda_T(1+e_0)(T-20.0), \quad (-\Delta e)^{eT} = \kappa_T(1+e_0)(T-20.0) \quad \text{ここに } \lambda_T > 0, \kappa_T < 0 \text{ であり, 基準温度は } 20.0^\circ\text{C} \quad (1)$$

また, κ_T は体積膨張係数と $\kappa_T = 3\alpha$ の関係を満たす。両式の差より塑性成分は次式で求まる。

$$(-\Delta e)^{pT} = (\lambda_T - \kappa_T)(1+e_0)(T-20.0) = \psi(T) \quad (2)$$

これは, 先に示した温度変化による正規圧密線の移動量: $\psi(T)$ に等しい。

Fig.1 温度一定標準圧密試験¹⁾Fig.2 温度履歴を与えた標準圧密試験²⁾Fig.3 異なる過圧密比の温度増加/減少³⁾

キーワード: 構成式, 弾塑性, 温度効果

連絡先: 〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町 名古屋工業大学, TEL&FAX: 052-735-7157

3. 温度変化の影響を考慮した1次元提案モデル

前節の実験事実を参考に提案モデルの定式化を行う。その際、中井らが提案する手法に倣い簡単な1次元問題として定式化を行う。今、Fig.4に示すようにI点からP点へ(温度変化を伴う)载荷が生じたときの総間隙比変化の塑性成分は、(応力に関して)弾性成分との差から次式で求まる。

$$\begin{aligned} (-\Delta e)^p &= (-\Delta e) - (-\Delta e)^e = \{ (e_{N0} - e_N) - (\rho_0 - \rho) - (\psi_0 - \psi) - (-\Delta e)^e \} \\ &= \lambda \ln(\sigma/\sigma_0) - (\rho_0 - \rho) - (\psi_0 - \psi) - \kappa \ln(\sigma/\sigma_0) \end{aligned} \quad (3)$$

さらに式(4)を一般的な弾塑性論での降伏関数に書き換えると

$$f = F - \{ H + (\rho_0 - \rho) - (\psi_0(T) - \psi(T)) \}, \quad F = (\lambda - \kappa) \ln(\sigma/\sigma_0), \quad H = (-\Delta e)^p \quad (4)$$

式(5)に関して適応条件($df=0$)より塑性間隙比増分は式(6)で求まり、総間隙比増分は弾性成分との和から式(7)となる。

$$d(-e)^p = \frac{(\lambda - \kappa) \cdot (d\sigma/\sigma) + d\psi/dT \cdot dT}{1 + G(\rho)}, \quad d(-e) = \frac{(\lambda - \kappa) \cdot (d\sigma/\sigma) + d\psi/dT \cdot dT}{1 + G(\rho)} + \kappa \cdot (d\sigma/\sigma) + \kappa_e dT \quad (5), (6)$$

なお $G(\rho)$ は密度による影響を表し、ここでは $G(\rho) = a\rho$ として与える。また流れ則を仮定した多次元モデルへの拡張は簡単に行うことができるが、詳細は別報⁵⁾を参照されたい。

4. 提案モデルによるシミュレーション

提案モデルの検証は先に示した Fig.1～Fig.3 の実験と同様の解析を行った。その際用いたパラメータは、藤の森粘土のパラメータを基本として設定した(Table 1)。Fig.5に温度一定圧密試験、Fig.6に温度履歴を与えた圧密試験、Fig.7に载荷圧一定下での温度増加/減少試験の解析結果を示す。Fig.5より、提案モデルは実測値に見られる温度増加に伴う正規圧密線の下降を適切に表現できている。さらにFig.6の解析結果より、提案モデルは圧密中の温度変化に伴う体積変化および正規圧密線の移動を表現している。また、体積変化に関しては過圧密比の異なる実測値に見られた拘束圧/間隙比の影響を適切に考慮できている。次にFig.7より、提案モデルでは過圧密比が大きな試料の実測値に見られる、温度増加による体積膨張傾向を表現する。これは、過圧密な土では温度上昇によって正規圧密線が下降する影響よりも、固体自身が持つ熱膨張の影響が卓越するために生じ、概ね実測値と同様のメカニズムを再現できていると考える。

5. おわりに

本稿では、温度変化の影響を正規圧密間隙比の増減としてモデル化する簡単な1次元構成則を提案し、解析結果の一例を示した。提案した温度効果のモデル化の方法は、実験事実に基づいており定式化もシンプルであるので、既往の多くの弾塑性モデルに適用することができる。

参考文献：

- 1) 中井ら. 2009. 第44回地盤工学研究発表会概要集. 2) Eriksson. 1989. Proc. 12th International Conference on SMFE 3, 2087-2090. 3) Tidfors & Sallfors. 1989. Geotech. Testing J. 12(1), 93-97. 4) Baldi, G. et al.. 1991. CEC Report EUR 13365/a and 2. 5) 中井ら. 2009. 応用力学論文集 12.

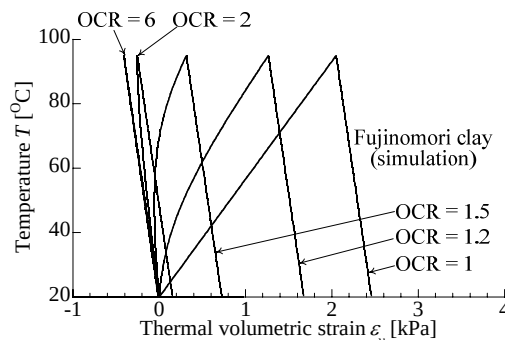


Fig.7 異なる過圧密比の温度増加/減少-解析

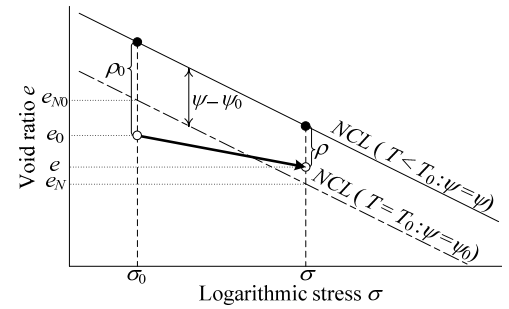


Fig.4 提案モデル概要図

Table 1 構成パラメータ

Parameter of constitutive model (1D)		
λ	0.104	Compression Index
κ	0.01	Swelling Index
N	0.83	Void ratio under 98kPa
a	100	Effect of over consolidated
λ_T	0.0005	Effect of temperature
κ_T	-0.0001	

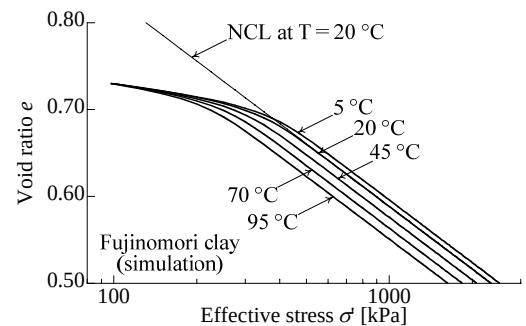


Fig.5 温度一定圧密試験-解析

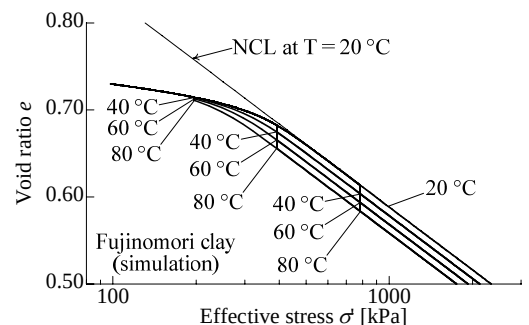


Fig.6 温度履歴を与えた圧密試験-解析