

Subloading tij モデルを用いた泥岩の弾塑性解析における拘束圧依存性の検討

清水建設	正会員	○ 奥野 哲夫
清水建設	正会員	中谷 篤史
名古屋工業大学	正会員	中井 照夫
名古屋工業大学	正会員	Hossain Md. Shahin

1. はじめに

都市部のトンネル掘削時の周辺地山挙動の予測や覆工の合理的設計を目的に、著者らはトンネル建設現場で採取した泥岩を用いて Subloading tij モデル^{1), 2)}の適用性を検討している。泥岩とその再構成試料の圧密試験と三軸圧縮試験(圧密排水せん断試験)³⁾から泥岩の固結度を考慮した変形挙動の再現性の検討結果⁴⁾を基に、本稿ではさらに拘束圧依存性について解析を実施し、モデル化の検討を行った結果を報告する。

2. 室内試験

自然堆積粘土では初期間隙比が繰り返した正規圧密粘土の正規圧密線より小さくても、载荷により正規圧密線より間隙比が大きな状態になり、その後の载荷で急激な圧縮が起こる「擬似的な圧密降伏応力の増加」²⁾が生じるものがある。対象とする泥岩の間隙比と等方有効応力 p の関係ならびにその泥岩の再構成試料の正規圧密線を求め図1に示す⁴⁾。図1より固結度を有する泥岩においても擬似的な圧密降伏応力の増加を示すことから、これを広義の「ボンディング効果」²⁾と捉え、間隙比と等方有効応力の関係ならびに拘束圧 1.2MPa の圧密排水せん断試験の挙動を再現可能なモデルを検討した⁴⁾。

対象とする泥岩では、これ以外の拘束圧下の圧密排水せん断試験も実施しており³⁾、以下ではこれらの異なる拘束圧下の挙動も再現可能なモデルの検討を行う。なお、これらの室内試験から得られている土質定数を表1に示す。

3. 数値シミュレーション

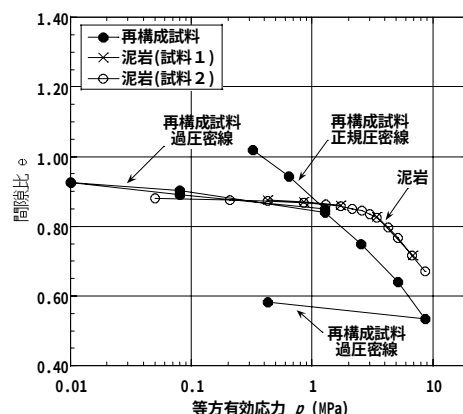
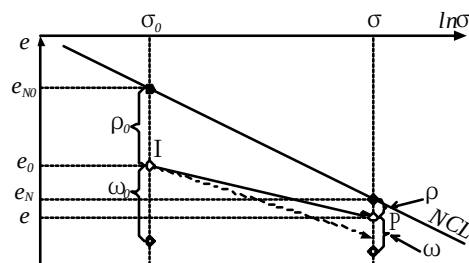
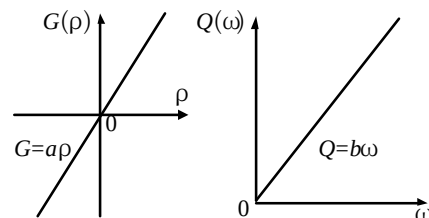
中井ほか²⁾により、1次元圧密状態を例に間隙比増分 $d(-e)$ が式(1)で与えられる。

$$d(-e) = d(-e)^p + d(-e)^e = \left\{ \frac{\lambda - \kappa}{1 + G(\rho) + Q(\omega)} + \kappa \right\} \cdot \frac{d\sigma}{\sigma} \quad (1)$$

ここで σ は応力、 $d(-e)^p$ 、 $d(-e)^e$ はそれぞれ間隙比増加の塑性成分と弾性成分である。また ρ と ω は図2に示すように、正規圧密線(NCL)からの距離 ρ を密度の状態変数として定義し、ボンディングは土の剛性をさらに大きくして見かけ上密度をさらに大きくする効果と捉え、ボンディングを仮想上の密度増加 ω と考える。なお図2で、NCL 上の間隙比には添字 N を、初期応力 σ_0 に対応する間隙比には添字 0 を用いている。初期間隙比 e_0 が過圧密粘土と同一であっても、ボンディング効果によって剛性が大きくなり、間隙比の減少量は図2に示す過圧密粘土(破線)より小

表1 土質定数

定数	泥岩	再構成試料
圧縮指数: λ	0.1901	0.14626
膨潤指数: κ	0.00525	0.01695
初期間隙比: e_0	大気圧時: 0.89	0.32MPa圧密時: 1.02
限界状態係数: M	1.54	—

図1 圧密試験結果⁴⁾図2 自然堆積粘土の間隙比変化²⁾図3 単調増加関数の $G(\rho)$ と $Q(\omega)$ ²⁾

キーワード 構成式, 泥岩, 弾塑性解析, 拘束圧依存性, 三軸圧縮試験

連絡先 〒135-8530 東京都江東区越中島三丁目4-17 清水建設(株)技術研究所 TEL 03-3820-8356

さく実線のようになる．また塑性変化に伴う ρ の発展則は実際の密度 ρ と仮想上の密度増加 ω により決まると考え，仮想上の密度増加 ω も実際の密度 ρ と同じように塑性変形に伴って減少し最終的にゼロになるとする．その結果，密度増分 $d\rho$ は $G(0)=0$ を満たす単調増加関数 $G(\rho)$ に加えて仮想上の密度増加分 $d\omega$ の影響を加味し， $d\omega$ は $Q(0)=0$ を満たす単調増加関数 $Q(\omega)$ で表わされるとして，以下の式(2)，(3)に基づき式(1)が成立する．

$$d\rho = -\{G(\rho) + Q(\omega)\} \cdot d(-e)^p \quad (2) \quad d\omega = -Q(\omega) \cdot d(-e)^p \quad (3)$$

$G(\rho)$ と $Q(\omega)$ の一例を図3に示す．ここでは $\rho \geq 0$ の場合： $G=a\rho^2$ ， $\rho < 0$ の場合： $G=-a\rho^2$ ， $Q=b\omega$ の関係を仮定する．以上より，ボンディング効果に寄与するパラメータ ω_0 と b をパラメータスタディにより求める．なお，間隙比 e と応力 σ の関係へのパラメータ ρ ， ω の影響を図4に示す．

図1の間隙比と等方有効応力の関係においては，再構成試料と泥岩の間隙比は等方有効応力 $p=1.28\text{MPa}$ 程度で交差する．このことから再構成試料と泥岩の間隙比が同一である有効拘束応力 1.28MPa でせん断挙動を調べれば，せん断に対するボンディング効果のみが評価できるものと考えられる．この点も踏まえ，図1の間隙比と等方有効応力の関係，ならびに有効拘束圧 $0.05, 0.21, 0.43, 0.86, 1.28\text{MPa}$ での排水せん断試験の挙動を比較的良く再現できるパラメータ ω_0 と b をパラメータスタディにより求め，それを用いた解析結果を図5～8に示す．

4. 考察とまとめ

図5～8の解析結果は，全て $a=4600$ ， $\omega_0=65$ ， $b=1.2$ に設定した場合である．図5の間隙比と等方有効応力の関係および図8の有効拘束圧 1.28MPa のせん断挙動において再構成試料の解析結果は試験結果に良く一致している．これより，まずボンディングのパラメータ以外は適切に評価されていると考えられる．また，図5～8の泥岩の挙動は解析結果が試験結果と若干異なる部分もあるが概ね同様の挙動を示し，等方有効応力の比較的低い $p=0.05, 0.21, 0.43\text{MPa}$ の場合は，解析においても軟化現象を再現している．このことからボンディングのパラメータ ω_0 と b も概ね妥当な値と考えられる．今後はこれらのパラメータの最適値の設定方法を検討し，実構造物への適用に向けた検討を行う予定である．

参考文献

- 1) Nakai, T. and Hinokio, M.: A Simple Elastoplastic Model for normally and over consolidated soils with unified material parameters, Soils & Foundations, 44(2), pp53-70, 2004., 2) 中井照夫ほか：地盤材料の諸特性の簡単且つ統一的なモデリングー密度、ボンディング、時間効果特性を例としてー，土木学会 応用力学論文集, Vol.12, pp.371-382, 2009., 3) 中谷篤史ほか：圧密および三軸圧縮試験に基づく上総層泥岩の変形特性，第46回地盤工学研究発表会，投稿中, 2011. 4) 奥野哲夫ほか：Subloading t_{ij} モデルを用いた泥岩の三軸圧縮試験時挙動の数値シミュレーション，第46回地盤工学研究発表会，投稿中, 2011.

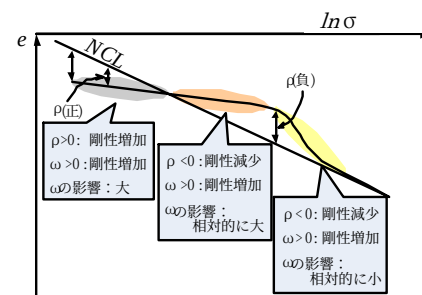


図4 自然堆積粘土の間隙比と応力

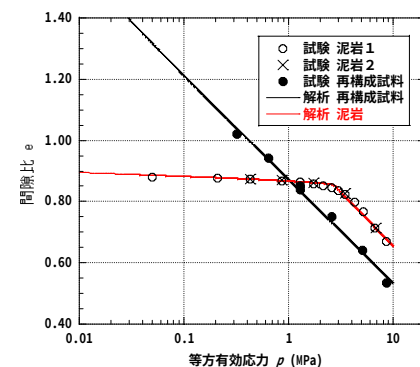


図5 圧密試験の解析結果

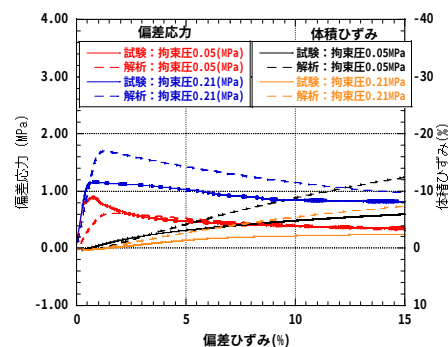


図6 試験結果と解析結果の比較

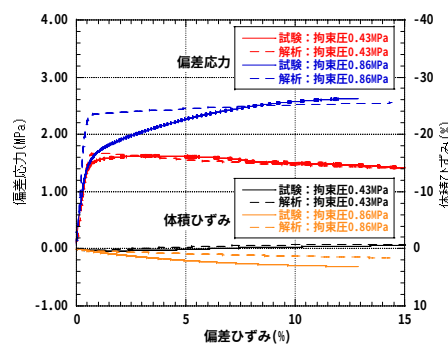


図7 試験結果と解析結果の比較

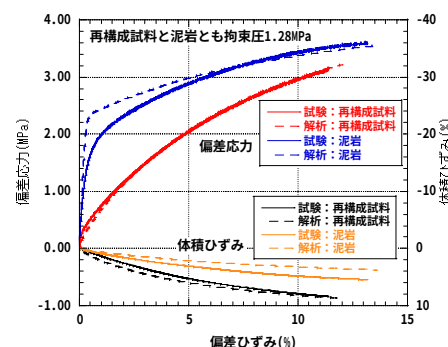


図8 試験結果と解析結果の比較