

下負荷面モデルの材料パラメータの決定法に関する研究

Research on Determination of Material Parameters of the Subloading Surface Model

瀬戸内秀規*・橋口公一**

Hideki Setouchi and Koichi Hashiguchi

*農博 琉球大学助手, 農学部生産環境学科 (〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町字千原 1 番地)

** 工博, 農博 九州大学農学研究院学術特任教員, 農学研究院生産環境科学部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

The subloading surface model would possess the most pertinent physical and mathematical structures among various existing elastoplastic constitutive models, and thus it has been widely applied to the analyses of deformation behavior of soil structures in the society of basic research for mechanics. However, it has not been applied sufficiently to the mechanical design of soil structures in the industrial world. The reason for this present situation would be the insufficiency in the information for the material parameters in the subloading surface model. Aiming at the extensive application of the subloading surface model in the industrial field, the basic information for the determination of material parameters are given in this article. First, examining reports or literatures on the application of the subloading surface model to soils, the lists and graphs of the material parameters are provided. Further, the trends of material parameters with the variation of void ratio are described analyzing these lists and graphs.

Key Words: clay, material parameters, sand, subloading surface, void ratio

1. 緒言

近年半世紀来の数値解析法の急速な発展は目覚しく、複雑な構造物の変形に関する境界値問題の解析が可能となり、構成式についても現実の挙動を表現し得る多少複雑なモデルでも高精度な解が得られるになった。弾塑性構成式についても、多面モデル^{1),2)}、二面モデル^{3),4)}、単面モデル⁵⁾、下負荷面モデル⁶⁾⁻⁸⁾その他、多くのモデルが提案されているが、これらの中で、下負荷面モデルは連続性条件、滑らか条件⁹⁾⁻¹¹⁾を満たす最も合理的な基本特性を有するモデルである。

地盤工学における基本的課題は、地盤が構造物を安全に支え得るか、つまり支持力問題に他ならない。地盤建設業界の実務設計においては、今なお、旧来からの“極限平衡法”が支持力解析法の主流である。しかし、極限平衡法は、弾性変形を無視し、また、硬化も軟化も生じない過度に単純化された剛完全弾塑性体の限界荷重のみを問題とし、変形(支持力問題の場合、沈下)を定量的に予測できない。なお、金属機械構造物の実務設計においては既に弾塑性有限要素法が主流となっている状況への著しい立ち遅れが見られるが、これは地盤材料特有の内部摩擦によりもたらされる独特かつ難解な課題に直面することによると判断される。

一方、学術研究面においては、地盤変形解析に最

も広く用いられてきた正規圧密側の“Cam-clayモデル”に過圧密側の“Drucker-Pragerモデル”を付加する“Capモデル”¹²⁾の多くの基本的難点の殆ど全てを克服した“下負荷面モデル”⁶⁾⁻⁸⁾が提案され、支持力問題にも十分対応し得る状況が誕生している。つまり、

1. Capモデルは、降伏面の内部を純粋弾性域とする古典塑性論に属するので、降伏面に向かって弾性的に急激に立ち上がり、その後、急降下し鋭利に折れ曲がった応力-ひずみ曲線が表現される。特に、これは軟化現象の表現において非現実的な予測をもたらす。一方、下負荷面モデルにおいては、常に現応力点を通して降伏面に相似な下負荷面を仮定し、降伏面の大きさに対する下負荷面の大きさの比“正規降伏比”の増大につれて塑性変形が発達するので、常に滑らかな応力-ひずみ曲線が表現される。
2. Capモデルの場合、塑性変形が進展するか否かの負荷判定(基準)において、応力が降伏面に達したか否か、つまり、降伏判定が必要である。一方、下負荷面モデルにおいては、負荷面の役割を持つ下負荷面上に常に現応力点が存在するので、降伏判定は不要である。
3. 正規降伏比の発展則に、塑性負荷状態においては応力を降伏面に漸近させる自動制御機能が組み込まれており、粗いステップで高効率な計算が可

能で、正に数値計算に適している。

4. Drucker-Pragerモデルでは、塑性体積膨張を抑えるために降伏面と異なる塑性ポテンシャル面を付加した非関連流動則を用いざるを得ず、構成式が複雑となる。一方、下負荷面の現応力点における接平面はDrucker-Pragerモデルに付加される塑性ポテンシャル面の接平面に大略一致し、下負荷面モデルにおいては関連流動則が適用し得る。
5. Drucker-Pragerモデルでは、非関連流動則を用いるので、弾塑性構成テンソルは非対称となり、境界値問題解析上の難点が生じる。一方、下負荷面モデルにおいては関連流動則が適用されるので、弾塑性構成テンソルは対称となり、このような難点は生じない。
6. Drucker-Pragerモデルでは、応力のピークが生じる軸ひずみと最大圧縮体積ひずみが生じる軸ひずみが一致する。一方、下負荷面モデルでは、実際現象でみられるように、ピーク応力の生じる軸ひずみと軸ひずみに対する体積ひずみ速度の変曲点の生じる軸ひずみが一致する。
7. Drucker-Pragerモデルでは、破壊応力状態線は負荷経路に依存しない。破壊状態線は単にピーク応力を繋いだもので、物質特性として構成則に予め取り入れられるべきものではない。一方、下負荷面モデルでは、破壊応力状態線の負荷経路依存性が現実的に表現される。
8. Drucker-Pragerモデルでは、そのままでは負圧に耐えられることになるので、テンションカットが必要である。一方、下負荷面モデルでは、降伏面の内部の応力変化で塑性変形が生じ、負圧には達し得ないので、テンションカットの必要は無い。
9. Capモデルにおいては、Cam-clay降伏面とDrucker-Prager降伏面の交線やテンションカット線上では法線方向が不定となり、塑性係数場の特異点となり、非現実的であるとともに境界値問題の解析に難点を生じる。一方、下負荷面モデルにおいては、単一の滑らかな楕円体を用いるので、塑性係数場の特異点は生じない。
10. Drucker-Pragerモデルでは、材料定数は、Cam-clayモデルに比して降伏面と塑性ポテンシャル面の勾配の少なくとも2個増える。一方、下負荷面モデルでは、正規降伏比の発展速度を規定する材料定数が1個増えるだけである。

以上のように、数値解析法に加えて、構成式の面でも、地盤材料の変形挙動を合理的かつ簡明に表現し得る下負荷面モデルが提案されるに至っている。しかし、地盤建設業界の実務設計においては、今なお、すべり線解法等の極限解析法が主流である。その最も大きな理由は、業界技術者が下負荷面モデルに含まれる材料パラメータ値の選択に煩雑・困難さを感じることにありとされる。力学モデルが提案され学術的にその合理性が認められても、実務設計

への普及・合理化には、力学モデルの構築にとどまらずモデル適用の蓄積を通じて材料パラメータの決定法に関する研究の積み重ねが不可欠である。

降伏応力、弾性係数を含む強度、その他の土の変形の基本特性は間隙比に依存するといえる。従来の弾塑性モデルにおいては、同一粒子からなる土でも、材料パラメータを初期密度ごとに与えている。一方、地盤材料に関するCam-clayモデルに下負荷面および上負荷面の概念を導入することにより、間隙比をはじめとする内部構造の変形特性への影響を考慮した下・上負荷面モデル^{13), 14)}が提案され、本モデルにより一組の材料パラメータで初期密度の異なる砂の変挙動を統一的に表現する試みがなされているが、なお未解明な部分が少なくない。

上述の状況において、本研究では、これまで適用された材料パラメータを収集整理するとともに、土の種類および初期間隙比に対応させた材料パラメータ表、さらには材料パラメータの簡易決定に資するグラフを呈示する。これらの成果は、地盤材料の構成式として最も有効なモデルの一つと見なしえる下負荷面モデルの地盤構造物の力学設計への広範な活用を期待される。

本論文においては、応力（速度）およびひずみ（速度）は引張を正とする。

2. 拡張下負荷面モデルの構成式

本節では、拡張下負荷面モデル^{15), 16)}について概説する。ひずみ速度 $\mathbf{D}$ （速度勾配 $\mathbf{L}$ の対称成分 $\mathbf{D} \equiv (\mathbf{L} + \mathbf{L}^T)/2$ ）は、弾性ひずみ速度 $\mathbf{D}^e$ と塑性ひずみ速度 $\mathbf{D}^p$ に加算分解される。つまり、

$$\mathbf{D} = \mathbf{D}^e + \mathbf{D}^p \quad (1)$$

ここに、弾性ひずみ速度 $\mathbf{D}^e$ は次式で与えられる。

$$\mathbf{D}^e = \mathbf{E}^{-1} \dot{\boldsymbol{\sigma}} \quad (2)$$

$\mathbf{E}$ は4階の弾性係数テンソル、 $(\)^{-1}$ はその逆テンソルを表し、 $\boldsymbol{\sigma}$ はCauchy 応力、 $(\dot{\ })$ は客観性を満たす共回転速度を表す。なお、 $\mathbf{E}$ は次のHooke型で与えられると仮定する。

$$E_{ijkl} = \left(K - \frac{2}{3} G \right) \delta_{ij} \delta_{kl} + G (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) \quad (3)$$

ここに、 K および G はそれぞれ体積弾性係数およびせん断弾性係数である。また、 δ_{ij} は Kronecker のデルタで $\delta_{ij} = 1: i=j$, $\delta_{ij} = 0: i \neq j$ を満たす。

ここで、常に現応力点を通り降伏面（以降、正規降伏面と称する）と相似性を満たす下負荷面を導入する。下負荷面は次式で与えられる。

$$f(\bar{\boldsymbol{\sigma}}, \mathbf{H}) = RF(H) \quad (4)$$

$$\bar{\boldsymbol{\sigma}} = \boldsymbol{\sigma} - \bar{\boldsymbol{\alpha}}, \quad \bar{\boldsymbol{\alpha}} = \mathbf{s} - R(\mathbf{s} - \boldsymbol{\alpha}) \quad (5)$$

ここに、2階のテンソル $\mathbf{H}$ およびスカラー H は、それぞ

れ異方硬化変数および等方硬化変数である。2 階のテンソル α は正規降伏面内部の参照点で、 $\bar{\alpha}$ は下負荷面内部の α の共役点である。 $\mathbf{s}$ は正規降伏面と下負荷面の相似中心である。 R ($0 \leq R \leq 1$) は正規降伏面に対する下負荷面の大きさの比を表し、正規降伏状態への接近の度合を表すので、正規降伏比と呼ばれる。

正規降伏比 R の発展則は次式で与えられる。

$$\dot{R} = U \parallel \mathbf{D}^p \parallel \text{ for } \mathbf{D}^p \neq \mathbf{0} \quad (6)$$

ここに、 $(\cdot)$ は物質時間微分、 $\parallel \parallel$ は大きさを表す。 U_f は、次の条件を満たす R の単調減少関数である。

$$U_f = \begin{cases} \infty & \text{for } R = 0 \\ 0 & \text{for } R = 1 \end{cases} \quad (7)$$

$$(U_f < 0 \text{ for } R > 1)$$

式(7)の条件を満たす最も簡単な関数 U_f は次式で与えられる。

$$U_f = -u \ln R \quad (8)$$

あるいは

$$U_f = -n_1 \left(\frac{1}{R^{n_2}} - 1 \right) \quad (9)$$

ここに、 u 、 n_1 および n_2 は材料定数である。

相似中心 $\mathbf{s}$ の移動則は次式で与えられる。

$$\dot{\mathbf{s}} = c_s \parallel \mathbf{D}^p \parallel \frac{\tilde{\boldsymbol{\sigma}}}{R} + \dot{\boldsymbol{\alpha}} + \frac{1}{F} \left\{ \dot{F} - \text{tr} \left(\frac{\partial f(\tilde{\mathbf{s}}, \mathbf{H})}{\partial \mathbf{H}} \dot{\mathbf{H}} \right) \right\} \tilde{\mathbf{s}} \quad (10)$$

$$\tilde{\boldsymbol{\sigma}} \equiv \boldsymbol{\sigma} - \mathbf{s}, \quad \tilde{\mathbf{s}} \equiv \mathbf{s} - \boldsymbol{\alpha} \quad (11)$$

ここに、 c_s は材料定数である。 $\text{tr}(\cdot)$ は対角和を表す。

関連流動則に従う塑性ひずみ速度 $\mathbf{D}^p$ は次式で与えられる。

$$\mathbf{D}^p = \lambda \bar{\mathbf{N}} = \frac{\text{tr}(\bar{\mathbf{N}} \dot{\boldsymbol{\sigma}})}{\bar{M}^p} \bar{\mathbf{N}} \quad (12)$$

$$\bar{\mathbf{N}} \equiv \frac{\partial f(\bar{\boldsymbol{\sigma}}, \mathbf{H})}{\partial \bar{\boldsymbol{\sigma}}} / \left\| \frac{\partial f(\bar{\boldsymbol{\sigma}}, \mathbf{H})}{\partial \bar{\boldsymbol{\sigma}}} \right\| \quad (\parallel \bar{\mathbf{N}} \parallel = 1) \quad (13)$$

ここに、 λ は正值の比例係数である。 $\bar{\mathbf{N}}$ は下負荷面の正規化された外向き法線テンソルである。 $\bar{M}^p$ は塑性係数と称され次式で与えられる。

$$\bar{M}^p \equiv \text{tr} \left[\bar{\mathbf{N}} \left(\bar{\boldsymbol{\alpha}} + \left\{ \frac{F'}{F} h - \frac{1}{RF} \text{tr} \left(\frac{\partial f(\bar{\boldsymbol{\sigma}}, \mathbf{H})}{\partial \mathbf{H}} \mathbf{h} \right) + \frac{U_f}{R} \right\} \bar{\boldsymbol{\sigma}} \right) \right] \quad (14)$$

$$F' \equiv \frac{dF}{dH} \quad (15)$$

h 、 $\mathbf{h}$ および $\bar{\boldsymbol{\alpha}}$ は λ を 1 次で含み、これらは $\dot{H}$ 、 $\dot{\mathbf{H}}$ および $\dot{\bar{\boldsymbol{\alpha}}}$ と次式で関連付けられる。

$$h \equiv \frac{\dot{H}}{\lambda}, \quad \mathbf{h} \equiv \frac{\dot{\mathbf{H}}}{\lambda} \quad (16)$$

$$\bar{\boldsymbol{\alpha}} \equiv \frac{\dot{\bar{\boldsymbol{\alpha}}}}{\lambda} = \mathbf{z} - U(\mathbf{s} - \boldsymbol{\alpha}) - R(\mathbf{z} - \boldsymbol{\alpha}), \quad \boldsymbol{\alpha} \equiv \frac{\dot{\boldsymbol{\alpha}}}{\lambda} \quad (17)$$

$$\mathbf{z} \equiv \frac{\dot{\mathbf{z}}}{\lambda} = c_s \frac{\tilde{\boldsymbol{\sigma}}}{R} + \mathbf{a} + \frac{1}{F} \left\{ F' h - \text{tr} \left(\frac{\partial f(\tilde{\mathbf{s}}, \mathbf{H})}{\partial \mathbf{H}} \mathbf{h} \right) \right\} \tilde{\mathbf{s}} \quad (18)$$

式(1)、(2)および(12)より、ひずみ速度 $\mathbf{D}$ は次式で与えられる。

$$\mathbf{D} = \mathbf{E}^{-1} \dot{\boldsymbol{\sigma}} + \frac{\text{tr}(\bar{\mathbf{N}} \dot{\boldsymbol{\sigma}})}{\bar{M}^p} \bar{\mathbf{N}} \quad (19)$$

応力速度 $\dot{\boldsymbol{\sigma}}$ をひずみ速度で表す逆関係は次式で与えられる。

$$\dot{\boldsymbol{\sigma}} = \mathbf{E} \mathbf{D} - \frac{\text{tr}(\bar{\mathbf{N}} \mathbf{E} \mathbf{D})}{\bar{M}^p + \text{tr}(\bar{\mathbf{N}} \mathbf{E} \mathbf{N})} \mathbf{E} \bar{\mathbf{N}} \quad (20)$$

負荷基準は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{D}^p \neq \mathbf{0}: & \text{tr}(\bar{\mathbf{N}} \mathbf{E} \mathbf{D}) > 0, \\ \mathbf{D}^p = \mathbf{0}: & \text{otherwise} \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

3. 地盤材料の材料関数

本節では、前節の構成式に含まれる材料関数の地盤材料に対する具体形¹⁶⁻¹⁸⁾を以下に示す。

負荷関数 $f(\bar{\boldsymbol{\sigma}}, \mathbf{H})$ は次式で与えられる。

$$f(\bar{\boldsymbol{\sigma}}, \mathbf{H}) = \bar{p}(1 + \bar{\chi}^2) \quad (22)$$

ここに、

$$\bar{p} \equiv -\frac{1}{3} \text{tr} \bar{\boldsymbol{\sigma}} \quad (23)$$

$$\bar{\boldsymbol{\eta}} \equiv \bar{\mathbf{Q}} - \beta, \quad \bar{\mathbf{Q}} \equiv \frac{\bar{\boldsymbol{\sigma}}^*}{\bar{p}} \quad (24)$$

$$\bar{\chi} \equiv \frac{\parallel \bar{\boldsymbol{\eta}} \parallel}{\bar{m}} \quad (25)$$

$\bar{m}$ は、限界状態における応力比 $\parallel \bar{\boldsymbol{\sigma}}^* \parallel / \bar{p}$ で Hashiguchi¹⁷⁾ が提案した凸面性を満たす関数を用いると次式で与えられる。

$$\bar{m} = \frac{14\sqrt{6} \sin \phi_c}{(3 - \sin \phi_c)(8 + \cos 3\bar{\theta}_\sigma)} \quad (26)$$

$$\cos 3\bar{\theta}_\sigma \equiv \sqrt{6} \text{tr} \left(\frac{\bar{\boldsymbol{\eta}}}{\parallel \bar{\boldsymbol{\eta}} \parallel} \right)^3 \quad (27)$$

ここに、 ϕ_c は軸対称圧縮における限界状態の内部摩擦角である。図-1 に、主応力空間、 π 平面および応力 $(-\sigma_3^*, p)$ 平面における下負荷面形状を示す。

地盤材料の場合、異方硬化変数 $\mathbf{H}$ は回転硬化変数 β ¹⁸⁾ で与えられる。その発展則は次式で与えられる。

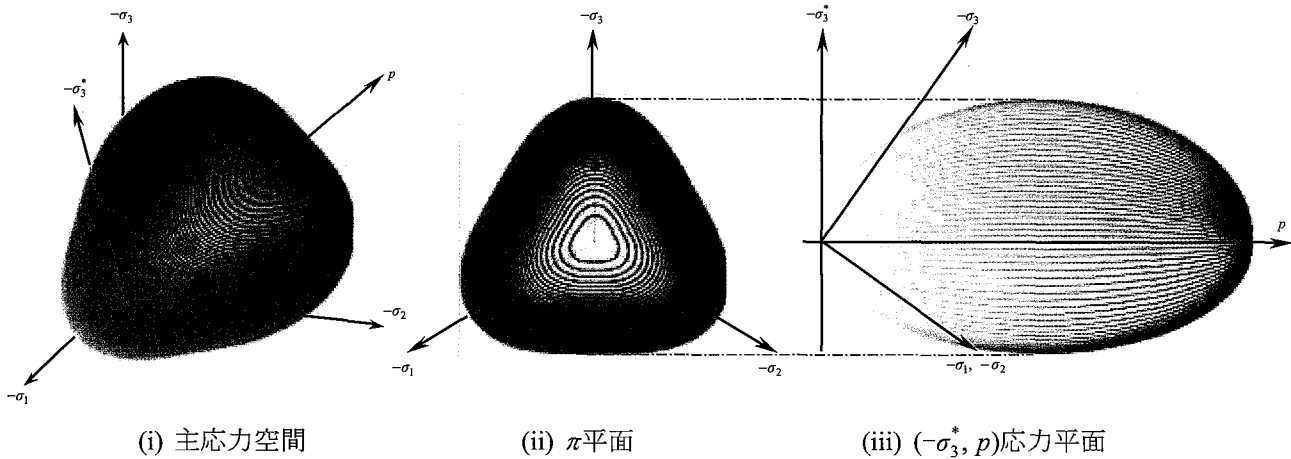


図-1 下負荷面形状

$$\dot{\beta} = b_r \parallel \mathbf{D}^{p*} \parallel \|\bar{\eta}\| \bar{\eta}_b \quad (28)$$

ここに,

$$\bar{\eta}_b \equiv \bar{m}_b \bar{t} - \beta, \quad \bar{t} \equiv \frac{\bar{\eta}}{\|\bar{\eta}\|} \quad (29)$$

b_r は回転硬化の速度を規定する材料定数である。 $\bar{m}_b$ は回転限界面における応力比で、次式で与えられる。

$$\bar{m}_b = \frac{14\sqrt{6} \sin \phi_b}{(3 - \sin \phi_b)(8 + \cos 3\theta_\sigma)} \quad (30)$$

ϕ_b は、回転限界角と称され下負荷面の回転限界を表す材料定数である。

等方硬軟化関数 F は次式で与えられる。

$$F = F_0 \exp\left(\frac{H}{\rho - \gamma}\right) \quad (31)$$

ここに、 F_0 は F の初期値。 ρ および γ は材料定数である。等方硬軟化変数 H の発展則は次式で与えられる。

$$\dot{H} = -D_v^p + \mu \parallel \mathbf{D}^{p*} \parallel (\|\bar{\eta}\| - \bar{m}_d) \quad (32)$$

ここに,

$$D_v^p \equiv \text{tr } \mathbf{D}^p, \quad p \equiv -\frac{1}{3} \text{tr } \boldsymbol{\sigma} \quad (33)$$

μ は材料定数であるが、 $\bar{m}_d$ は、次式で与えられる。

$$\bar{m}_d = \frac{14\sqrt{6} \sin \phi_d}{(3 - \sin \phi_d)(8 + \cos 3\theta_\sigma)} \quad (34)$$

ここに、 θ_σ は応力角である。

$$\cos 3\theta_\sigma \equiv \sqrt{6} \text{tr} \left(\frac{\boldsymbol{\sigma}^*}{\|\boldsymbol{\sigma}^*\|} \right)^3 \quad (35)$$

μ および ϕ_d は、塑性変形の偏差成分いわゆる塑性偏差ひずみ速度 $\mathbf{D}^{p*}$ によって誘導される等方硬軟化挙動を表現する材料定数である。

体積弾性係数 K およびせん断弾性係数 G は次式で与え

られる。

$$K = \frac{p}{\gamma}, \quad G = \frac{3(1-2\nu)}{2(1+\nu)} K \quad (36)$$

ここに、 ν はポアソン比である。

以上、述べた材料パラメータをまとめると以下の通りである。

F_0 : F の初期値で、土が過去に受けた圧密圧力 (先行圧密圧力) に等価である。

ρ, γ : 等方圧密の試験結果に一致するように決定され、等方圧密の体積比 $\nu (= 1 + e)$ と平均主応力 p の両対数線形関係 ($\ln \nu - \ln p$) における正規圧密線および圧密除荷線の勾配である。ここに、 e は間隙比である。

ϕ_c : 軸対称圧縮における限界状態の内部摩擦角である。

u, n_1, n_2 : 正規降伏比 R の発展速度を規定する u および n_1, n_2 は、それぞれ弾性から正規降伏状態に移行する応力-ひずみ曲線の曲率により決定される。一般にいずれの材料定数も供試体の密度が大であるほど大である。

ϕ_b, b_r : 誘導回転硬化はせん断による誘導異方性を補完するように決定され、その回転は塑性偏差ひずみ速度 $\mathbf{D}^{p*}$ により誘導される。回転の限界角 ϕ_b およびその発展速度を規定する b_r は、一般に粒子の形状が粗いほど大と考えられる。

s_0, c_s : 正規降伏面と下負荷面の相似中心の初期値 s_0 およびその発展速度を規定する c_s は、繰返し負荷のヒステリシスを適切に表現するように決定される。

ϕ_d, μ : 塑性偏差ひずみ速度 $\mathbf{D}^{p*}$ によって誘導される等方硬軟化挙動を表現し、その値はいずれも供試体の密度が大であるほど小である。

4. 材料パラメータの具体値

表-1に、粘土、砂、泥岩、Cemented sand さらにはメタンハイドレート混合土を含む地盤材料¹⁹⁾⁻³⁶⁾に適用された材料パラメータ^{16), 24)-26), 33), 34), 37)-39)}を示す。表-1 下段に、文

献 36) の材料定数表に見られる種々の粘土の初期間隙比 e_0 、内部摩擦角 ϕ_c 、 ρ および γ を示す。ここに、 ρ および γ は、間隙比 e と圧力 p の片対数 ($e - \ln p$) 線形関係における λ および κ から次式で近似的に算定し得る。

$$\rho = \frac{\lambda}{1+e_0}, \quad \gamma = \frac{\kappa}{1+e_0} \quad (37)$$

e_0 は初期間隙比である。応力比 M は次式の軸対称圧縮における限界状態の内部摩擦角 ϕ_c で整理した。

$$\phi_c = \sin^{-1} \frac{3M}{6+M} \quad (38)$$

文献 25), 33), 34) による下負荷面の発展則の材料定数 u_a および誘導異方性を表現する材料定数 b_a は、それぞれ次式により材料定数 u および b_r で整理した。

$$u = \frac{u_a}{D}, \quad b_r = \frac{b_a}{D}, \quad D = \frac{\lambda - \kappa}{M(1+e_0)} \quad (39)$$

表-1 中の豊浦砂の一部の材料パラメータは、新たに本研究で得られたものである。予測の対象とした実測値は、福島²⁹⁾による非排水単調ねじりせん断試験である。予測結果を図-2に示す。ここに、 $\sigma_{a\theta}$ および $\varepsilon_{a\theta}$ は、それぞれせん断応力およびせん断ひずみである。予測値は実測値の変形挙動を十分近似している。

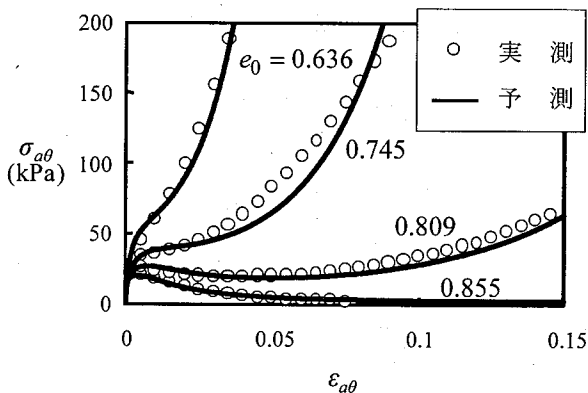


図-2 非排水単調ねじりの予測

Banding 砂、シラス砂および豊浦砂の材料パラメータと初期間隙比 e_0 の関係を図-3(i)に示す。土の種類および材料がそれぞれ異なる粘土、砂、泥岩、Cemented sand およびメタンハイドレート混合土の材料パラメータと初期間隙比 e_0 の関係を図-3(ii)に示す。なお、図-3(ii)の間隙比の不明な材料パラメータは図の右側欄外にまとめて示した。一方、図-3(i), (j) および (ii), (j) は、Banding 砂と新潟砂の材料定数 n_1 および n_2 を示す。

(i) 砂の材料パラメータと初期間隙比 e_0 の関係

シラス砂においては、相似中心の移動およびせん断硬化軟化を考慮していない。

F_0 : 材料で大きさは異なるが、同じ砂では間隙比と関連性があり、いずれの砂も間隙比が大であるほど小である。

ϕ_c : Banding 砂は間隙比が大であるほど小であるが、シラ

ス砂および標準砂は一部の解析を除いて間隙比によらず一定である。

ρ : いずれの砂も間隙比が大であるほど大である。間隙比に対する変化の割合は材料により異なる。

γ : いずれの砂も 0.01 より小で、 ρ と同様の傾向が見られる。

u, n_1, n_2 : Banding 砂は式(9)、シラス砂および豊浦砂は式(8)を用いている。関数 U_f と正規降伏比 R の関係を図-4に示す。いずれの砂も間隙比が大であるほど U_f は小である。

ϕ_b, b_r : Banding 砂および豊浦砂は、一部の解析を除いて、間隙比によらず一定である。シラス砂は間隙比が大であるほど小である。

s_0, c_s : Banding 砂は、間隙比が大であるほど大である。一方、豊浦砂の c_s は間隙比が大であるほど小であり、Banding 砂の傾向とは対照的である。

ϕ_d, μ : Banding 砂および豊浦砂は、間隙比が大であるほど大である。

(ii) 粘土、砂、泥岩、Cemented sand およびメタンハイドレート混合土の材料パラメータの比較

粘土において、誘導回転硬化および相似中心の移動を考慮した解析は、唯一大阪粘土について実施されている。泥岩において、相似中心の移動を考慮した解析は実施されていない。また、Cemented sand およびメタンハイドレート混合土は、誘導回転硬化、相似中心の移動およびせん断硬化軟化のいずれも考慮した解析例はない。

F_0 : Hostun 砂、Reid Bedford 砂、新潟砂および Cemented sand は、Banding 砂、シラス砂および豊浦砂が取り得る値と同程度である。これに対し、粘土は 300–6000kPa と広範の値を取り得る。

ϕ_c : 粘土は、Banding 砂、シラス砂および豊浦砂を考慮すると、一部の解析を除いて砂に比して小である。泥岩およびメタンハイドレート混合土は、砂と同程度かそれより大である。Cemented sand は、粘土と砂の中間的値である。

ρ : 粘土は砂に比して大で、かつ広範な値を取り得る。粘土の間隙比が示されているデータでは、材料によらず間隙比が大であるほど大である。泥岩およびメタンハイドレート混合土は、砂より大である。Cemented sand は、砂と同程度である。

γ : 粘土は砂に比して広範な値を取り得る。泥岩、Cemented sand およびメタンハイドレート混合土は、砂と同程度である。

表-1(a) 材料パラメータ

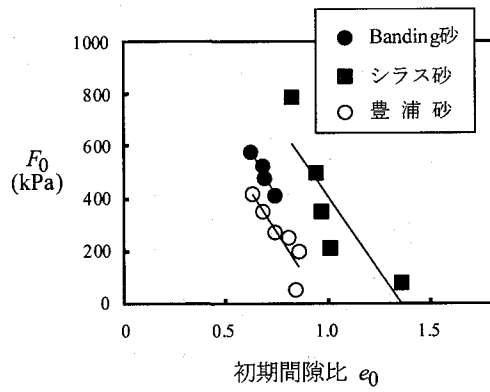
材 料	解 析 者	試 験	物理特性			供試体の初期状態		Fの初期値 $F_0(\text{kPa})$	限界状態 $\phi_c(\text{deg.})$
			ρ_s	$e_{\max}$	$e_{\min}$	e_0	$D_{r0}(\%)$		
粘土	Hashiguchi et al. (2002)	Weald粘土						330	36.2
		Kaolinite-silt mixtures						6000	36.2
		London粘土						1700	36.2
		Red粘土						300	36.2
		Compacted kaolin						2000	36.2
砂	Toplonicki (1990)	平面ひずみ	2.68			0.600			17.1
	Nakano et al. (2005)	非排水三軸圧縮				1.500			31.5
	Hira et al. (2002)	等方圧密, 排水三軸圧縮, 排水三軸圧縮	2.42	1.48	0.75	0.830 0.945 0.970	89.3 73.4 70.0	790 495 350	36.0 36.0 36.0
						1.010	64.5	210	36.0
						1.360	16.0	80	36.0
	Setouchi et al. (2006)	繰返し非排水三軸 繰返し排水三軸				0.679 0.845	80.0 35.5	350 50	32.0 32.0
		非排水ねじりせん断	2.64	0.98	0.61	0.855 0.809 0.745	33.0 45.0 62.0	200 250 270	30.0 30.0 30.0
	Hashiguchi and Chen (1998)	非排水三軸圧縮		0.84	0.51	0.742 0.693 0.684	29.0 44.0 47.0	410 480 520	26.0 30.0 31.0
		真の三軸試験装置による 等方圧密, 排水軸対称圧縮など	2.67	0.98	0.61	0.628	64.0	580	32.0
		繰返し非排水三軸	2.65	0.82	0.52	0.620 0.670	96.9 49.7	400 180	27.0 27.0
泥岩	中井・中野・浅岡 (2003)	非排水三軸圧縮				0.737		539	28.0
	中野・中井 (2004)	標準圧密試験				1.280 0.360			25.4 30.0
						1.130			38.2
	Hashiguchi et al. (2002) 上野ら(2004)	排水三軸圧縮						450	25.3
		排水三軸圧縮				1.650			32.8
粘土	Schofield and Wroth (1968)	Klein Belt Ton				1.350			21.7
		Wiener Tegel V				0.558			25.6
		London粘土				0.700			22.8
		Weald粘土				0.480			24.2
		Kaolin				1.065			25.8

* ρ_s : 土粒子密度(g/cm^3), e_0 : 初期空隙比, D_{r0} : 初期相対密度, $e_{\max}$: 最大空隙比, $e_{\min}$: 最小空隙比

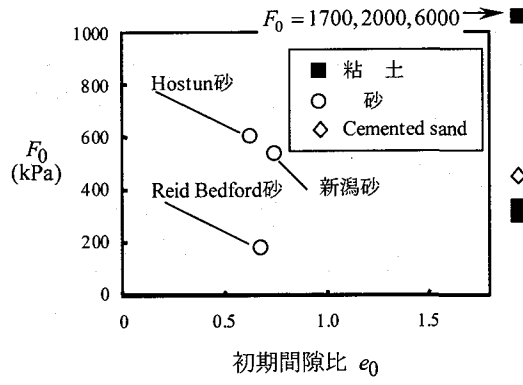
表-1(b) 材料パラメータ

材 料	ln(v)-ln(p)関係			せん断弾性係数		正規降伏比 R の発展則			誘導回転硬化変数		相似中心の移動則		せん断硬・軟化関数	
	ρ	γ	p_h (kPa)	ポアソン比	G (kPa)	u	n_1	n_2	ϕ_b (deg.)	b_r	s_0 (kPa)	c_s	ϕ_d (deg.)	μ
粘土	Weald粘土	0.0450	0.0020		0.37	33								
	Kaolinite-silt mixtures	0.1000	0.0060		0.3	35								
	London粘土	0.0220	0.0063		0.3	70								
	Red粘土	0.0350	0.0120		0.3	20								
	Compacted kaolin	0.1000	0.0080		0.3	40								
	Powdered Kaolin	0.0530	0.0100		19000						0	10		
砂	大阪粘土	0.0920	0.0260		0.3	341			25.4	0.0189				
	シラス (鹿児島市内)	0.0398	0.0020	0	0.3	65			23	350	0	0	0	0
		0.0420	0.0020	0	0.3	60			22	300	0	0	0	0
		0.0390	0.0040	0	0.3	40			25	130	0	0	0	0
		0.0469	0.0020	0	0.3	50			19	210	0	0	0	0
		0.0450	0.0050	0	0.3	35			10	70	0	0	0	0
	豊浦砂	0.0018	0.0010	0	0.3	15			20	100	0	100	29	0.8
		0.0045	0.0017	0	0.3	10			17	80	0	1	30	1
		0.0045	0.0011	0	0.3	3			20	100	0	30	35	1.5
		0.0037	0.0011	0	0.3	4			20	100	0	38.7	33.2	1.29
		0.0029	0.0011	0	0.3	5			20	100	0	68.5	31.5	1.1
		0.0016	0.0011	0	0.3	9			20	100	0	100	29.7	0.85
泥岩	Banding砂	0.0250	0.0067	0		1800	0.1	0.1	20	10	200	20	40	1
		0.0180	0.0065	10		2300	0.3	0.4	20	10	110	18	33	0.65
		0.0140	0.0060	30		2500	0.5	0.5	20	10	100	14	30	0.3
		0.0100	0.0058	80		3500	1	0.7	20	10	80	8	20	0.1
		0.0080	0.0030	10		200000	1.5	3.8	26	110	50	20	25	0.6
		0.0045	0.0025		0.3	50			20	70	0	15	27.5	1
	Hostun砂 Reid Bedford砂 新潟砂 硅砂 岡山泥岩 有間川泥岩 Cemented sand メタンハイドレート混合土	0.0100	0.0065	4.9		176400	8	1.3	35	120	19.6	34	35	1
		0.0220	0.0053		0.3	4			18.3	209.58				
		0.1020	0.0051		0.3	15			25.4	0.0124				
		0.0730	0.0070		0.3	38			25.4	0.0238				
		0.0300	0.0010		0.3	20								
		0.0880	0.0010		0.333	234000	10							
粘土	Klein Belt Ton	0.1120	0.0580											
	Wiener Tegel V	0.0660	0.0580											
	London粘土	0.0800	0.0310											
	Weald粘土	0.0550	0.0210											
	Kaolin	0.0980	0.0190											

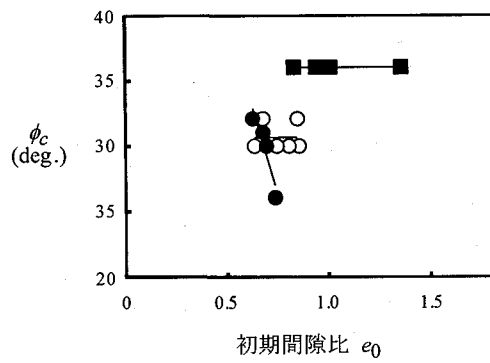
* I:恒等テンソル



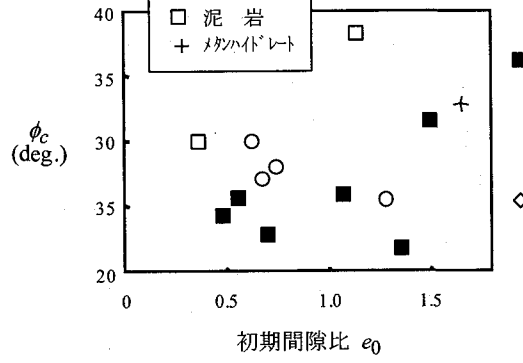
(a)



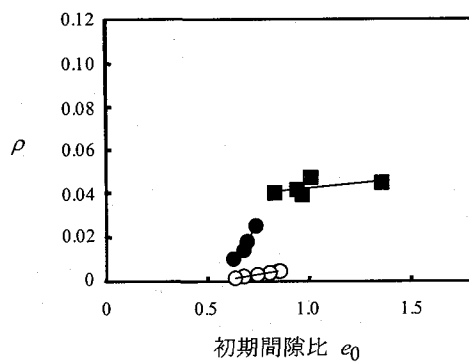
(a)



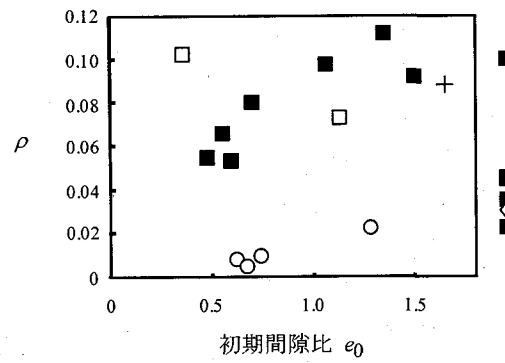
(b)



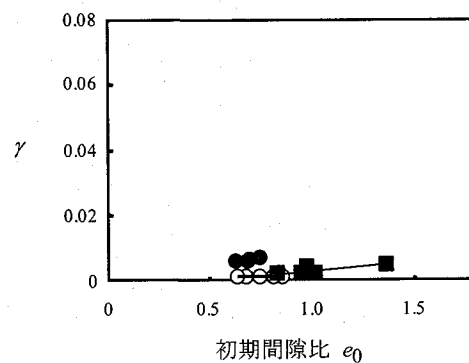
(b)



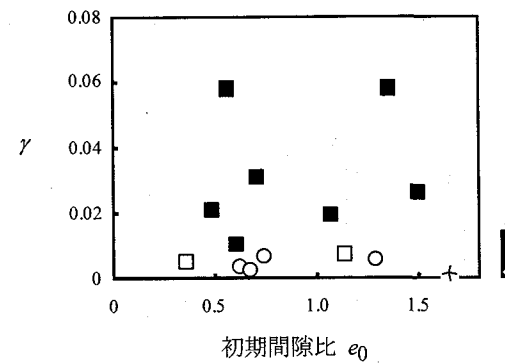
(c)



(c)



(d)

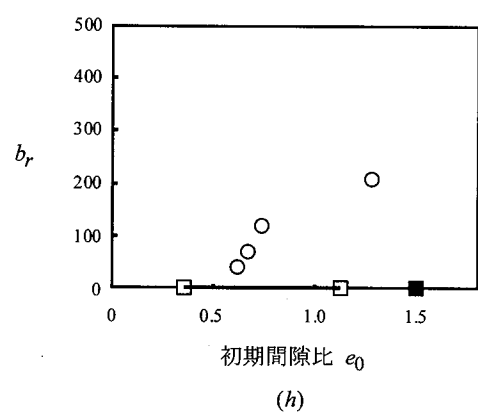
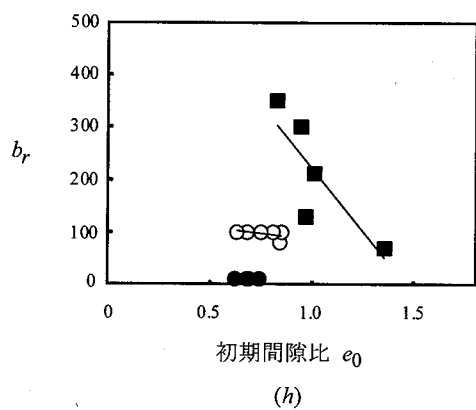
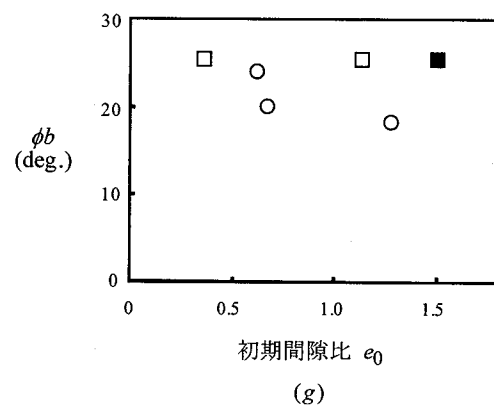
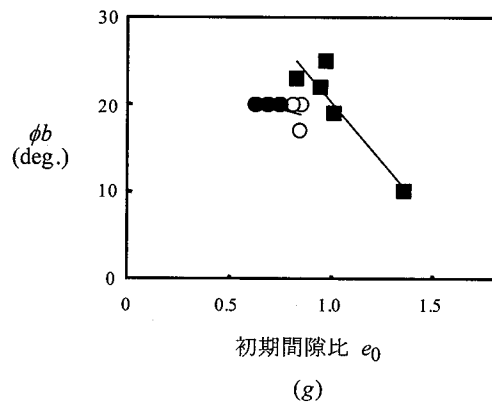
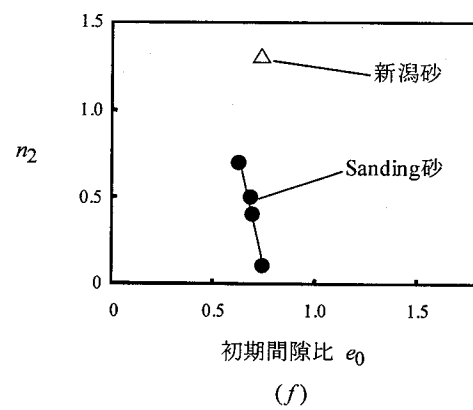
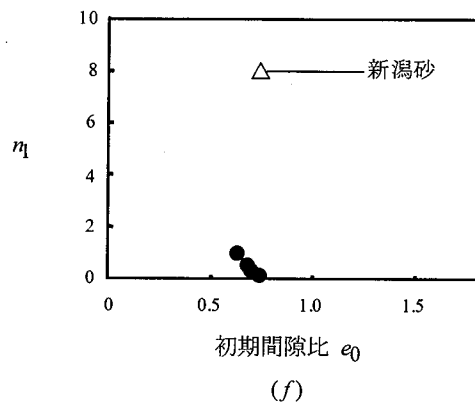
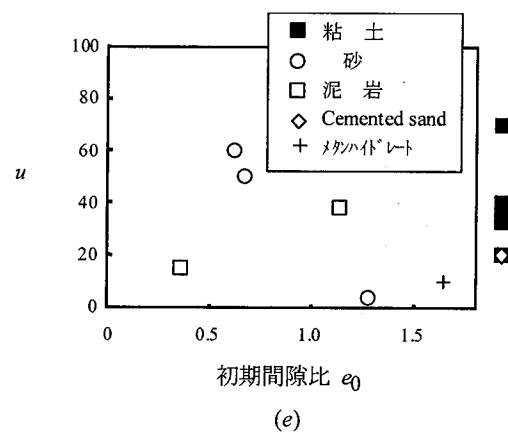
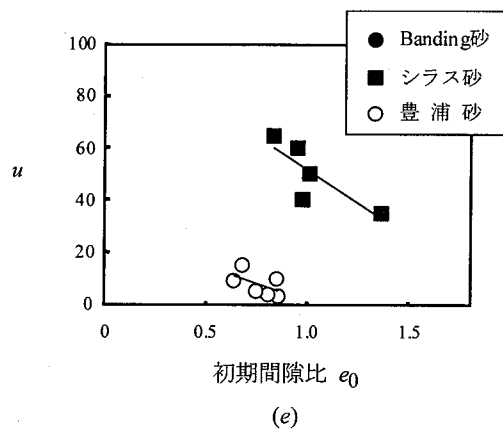


(d)

(i) Banding 砂, シラス砂, 豊浦砂

(ii) 粘土, 砂, 泥岩, Cemented sand, メタンハイドレート混合土

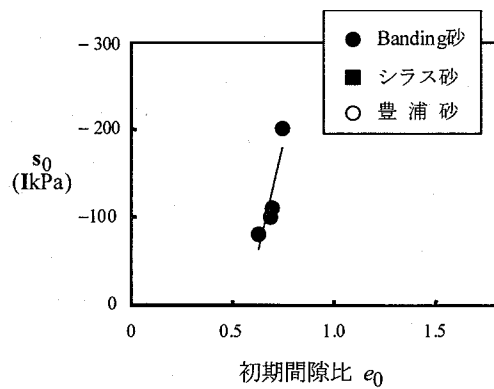
図-3(a)-(d) 材料パラメータと初期間隙比の関係



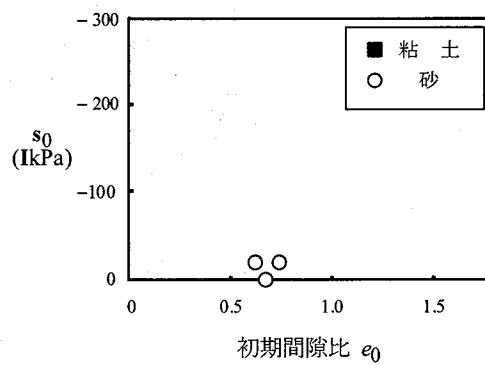
(i) Banding 砂, シラス砂, 豊浦砂

(ii) 粘土, 砂, 泥岩, Cemented sand, メタソライト混合土

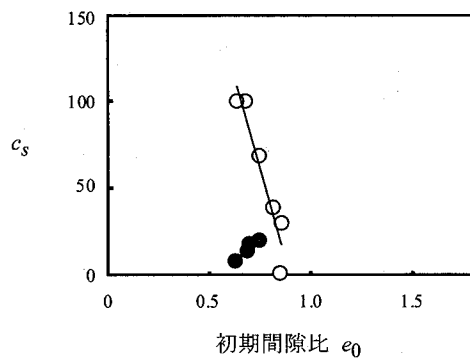
図-3(e)-(h) 材料パラメータと初期間隙比の関係



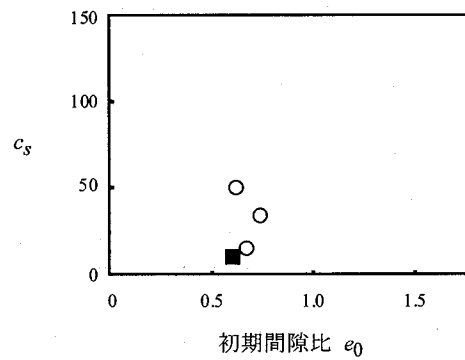
(i)



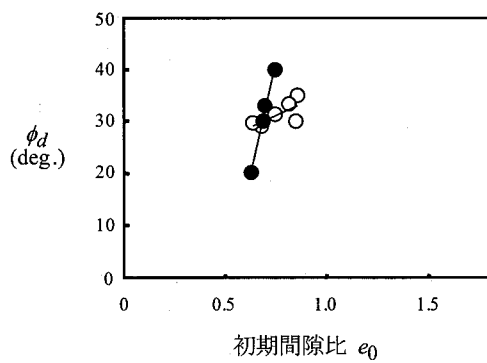
(i)



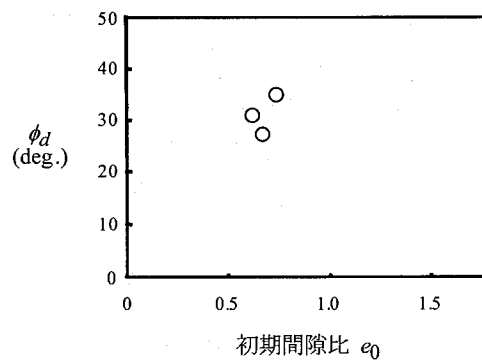
(j)



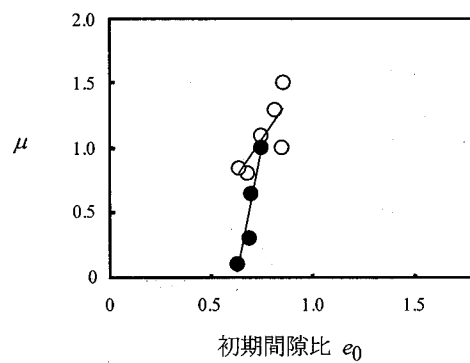
(j)



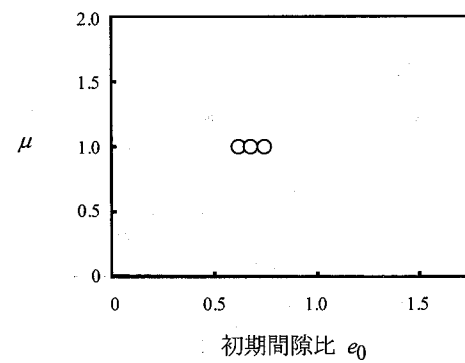
(k)



(k)



(l)



(l)

(i) Banding 砂, シラス砂, 豊浦砂

(ii) 粘土, 砂, 泥岩, Cemented sand, メタンハイドレート混合土

図-3(i)-(l) 材料パラメータと初期間隙比の関係

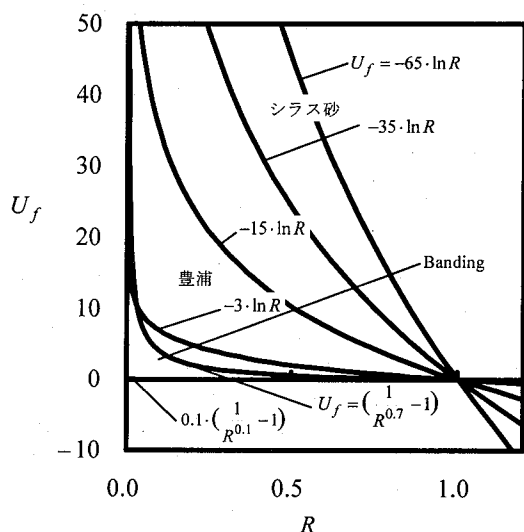


図-4 関数 U_f と正規降伏比 R の関係

u, n_1, n_2 : 土の種類による特性は見られない. 新潟砂の n_1 および n_2 は, Banding 砂に比して大である.

ϕ_b, b_r : データが少ないため, 定性的な評価ができないが, ϕ_b は土の種類による特性は見られない. 砂の b_r は, Banding 砂, シラス砂および豊浦砂の関係と同様に, 材料により大きく変動する. 粘土および泥岩の b_r は砂に比して極めて小さい.

s_0, c_s : Hostun 砂, Reid Bedford 砂および新潟砂の s_0 は, 共に Banding 砂に比して小である. 大阪粘土の c_s は, Banding 砂と同程度である.

ϕ_d, μ : Hostun 砂, Reid Bedford 砂および新潟砂の ϕ_d および μ は, 共に豊浦砂が取り得る領域近傍にある.

誘導回転硬化, 相似中心の移動およびせん断硬化化に関する材料パラメータについては, さらにデータを蓄積し, 土の種類による影響および初期間隙比との関連性を明らかにする必要がある.

5. 結 言

本研究では, 粘土から砂, シラス, 泥岩, Cemented sand さらにはメタンハイドレートに至る広範な地盤材料について, 下負荷面モデルに含まれる材料パラメータを収集整理し, これらの特性の分析を行った. 得られた主な結果以下の通りである.

- 1) 材料パラメータを土の種類および初期間隙比に対応させて整理し, これらの一覧表を提供した.
- 2) 数種の砂の材料パラメータと初期間隙比の関係を図示し, 任意の初期間隙比における具体値の決定に供した.
- 3) 土の種類による材料パラメータの比較を図示した.

構成式の実在材料への適用に当たっては, 含まれる材料

パラメータ値を適切に決定することが求められる. 下負荷面モデルは, 物理的, 数学的にはその妥当性が認められているが, 本モデルに含まれる材料パラメータに関する体系的な考察はなされていない. 本研究では, これらについて, シミュレーションの実施に加えて, 広く文献資料の調査, 分析を行った結果を報告した. 本研究はその最初の試みであるが, 今後さらに調査分析, 情報収集を進めて材料定数表, グラフの充実を図ることにより, 本モデルの実用設計への普及に少なからず資すると期待される.

また, 地盤材料のせん断特性は, 状態量としての密度のみでなく, 土粒子の鉱物組成, 硬度, 表面粗度および粒子形状さらに粒度組成の影響を受ける. 今後は, このような粒子特性と材料パラメータの関連性も明らかにしていく必要がある.

参考文献

- 1) Mroz, Z.: On the description of anisotropic work hardening, *J. Mech. Phys. Solids*, **15**, pp. 163-175, 1967.
- 2) Iwan, W.D.: On a class of models for the yielding behavior of continuous and composite systems, *J. Appl. Mech. (ASME)*, **34**, pp. 612-617, 1967.
- 3) Dafalias, Y.F. and Popov, E.P.: A model of nonlinearly hardening materials for complex loading, *Acta Mechanica*, Vol. **21**, pp. 173-192, 1975.
- 4) Krieg, R.D.: A practical two surface plasticity theory, *J. Appl. Mech. (ASME)*, **42**, pp. 641-646, 1975.
- 5) Dafalias, Y.F. and Popov, E.P.: Cyclic loading for materials with a vanishing elastic region, *Nucl. Eng. Design*, **41**, 293-302, 1977.
- 6) Hashiguchi, K. and Ueno, M.: Elastoplastic constitutive laws of granular materials, *Constitutive Equations of Soils (Proc. 9th Int. conf. Soil Mech. Found. Eng., Spec. Session 9, Tokyo)*, JSSMFE, pp.73-82, 1977.
- 7) Hashiguchi, K.: Plastic constitutive equations of granular materials, *Proc. US-Japan Seminar Continuum Mech. Stat. Appr. Granular Materials*, Sendai, pp. 321-329, 1978.
- 8) Hashiguchi, K.: Constitutive equations of elastoplastic materials with elastic-plastic transition, *J. Appl. Mech. (ASME)*, **47**, pp. 266-272, 1980.
- 9) Hashiguchi, K.: Fundamental requirements and formulation of elastoplastic constitutive equations with tangential plasticity, *Int. J. Plasticity*, **9**, pp. 525-549, 1993.
- 10) Hashiguchi, K.: Mechanical requirements and structures of cyclic plasticity models, *Int. J. Plasticity*, **9**, pp. 721-748, 1993.
- 11) Hashiguchi, K.: Fundamentals in constitutive equation: continuity and smoothness conditions and loading criterion, *Soils and Foundations*, **40**(4), pp. 155-161, 2000.
- 12) Dimaggio, F.L. and Sandler, I.S.: Material model for granular soils, *J. Eng. Mech. Div. (ASCE)*, **97**, 935-950, 1971.
- 13) Asaoka, A., Nakano, M. and Noda, T.: Superloading Yield Surface Concept for Highly Structured Soil Behaviour, *Soils and Foundations*, **40**(2), 99-110, 2000a.
- 14) Asaoka, A., Nakano, M., Noda, T. and Kaneda, K.:

- Delayed Compression/ Consolidation of Natural Clay Due to Degradation of Soil Structure, *Soils and Foundations*, **40**(3), 75-85, 200b.
- 15) Hashiguchi, K.: Subloading surface model in unconventional plasticity, *Int. J. Solids Struct.*, **25**, pp. 917-945, 1989.
 - 16) Hashiguchi, K. and Chen, Z.-P. : Elastoplastic constitutive equations of soils with the subloading surface and the rotational hardening, *International Journal for Numerical Analytical Methods Geomechanics*, **22**, pp. 197-227, 1998.
 - 17) Hashiguchi, K.: A Proposal of the simplest convex-conical surface for soils, *Soils and Foundations*, **42**(3), pp. 107-113, 2002.
 - 18) Hashiguchi, K.: Description of inherent/induced anisotropy of soils: Rotational hardening rule with objectivity, *Soils and Foundations*, **41** (6), pp. 139-145, 2001.
 - 19) Skempton, A.W. and Brown, J.D.: A landslide in boulder clay at Selset, Yorkshire. *Geotechnique*, **11**(4), pp. 280-293, 1961.
 - 20) Stark, T.D., Ebeling, R.M. and Vettel, J.J.: Hyperbolic stress-strain parameters for silts. *J. Geotech. Eng. (ASCE)*, **120**, pp. 420-441, 1994.
 - 21) Bishop, A.W., Webb, D.L. and Lewin, P.I.: Undisturbed samples of London clay from the Ashford Common shaft: strength-effective stress relationships. *Geotechnique*, **15**(1), pp. 1-31, 1965.
 - 22) Wesley, L.D.: Influence of structure and composition on residual soils. *J. Geotech. Eng. (ASCE)*, **116**, pp. 589-603, 1990.
 - 23) Watahiki, K.: Deformation and strength of compacted kaolin clay under triaxial compression, extension and creep conditions, *Soils and Foundations*, **17**(4), pp. 75-86, 1977.
 - 24) Topolnicki, M.: An elasto-plastic subloading surface model for clay with isotropic and kinematic mixed hardening parameters, *Soils and Foundations*, **30**(2), 103-113, 1990.
 - 25) Nakano, M., Nakai, K., Noda, T. and Asaoka, A.: Simulation of shear and one-dimensional compression behavior of naturally deposited clays by Super/subloading Yield Surface Cam-clay model, *Soils and Foundations*, **45**(1), pp. 141-151, 2005.
 - 26) Hira, M., Hashiguchi, K., Okayasu, T. and Miwa, K. : Deformation behavior of "Shirasu" and its prediction by the subloading surface model, *Soils and Foundations*, **42** (5), pp. 37-46, 2002.
 - 27) Tatsuoka, F., Toki, S., Miura, S., Kato, H., Okamoto, M., Yamada, S., Yasuda, S. and Tanizawa, F.: Some factors affecting cyclic undrained triaxial strength of sand, *Soils and Foundations*, **26** (3), pp. 99-116, 1986.
 - 28) Pradhan, T. B. S., Tatsuoka, F. and Sato, Y.: Experimental stress-dilatancy relations of sand subjected to cyclic loading, *Soils and Foundations*, **29** (1), pp. 45-64, 1989.
 - 29) 福島伸二：ねじりせん断試験による砂の変形・強度特性の実験的研究，学位論文，1982.
 - 30) Castro, G.: Loquefaction of Sands, *Ph.D. Thesis, Harvard Soil Mech. Series*, No. 1, 1969.
 - 31) Saada, A. S. and Bianchini, G.: *Proc. Int. Workshop on Constitutive Equations for Granular Non-cohesive Soils*, Cleveland, Balkema, Rotterdam, 1989.
 - 32) Ishihara, K., Tatsuoka, F. and Yasuda, S.: Undrained deformation and liquefaction of sand under cyclic stresses, *Soils and Foundations*, **15**(1), pp. 29-44, 1975.
 - 33) 中井健太郎，中野正樹，浅岡顕：粒土分布を変化させた砂の力学特性と上負荷面カムクレイモデルに基づく考察，第15回地盤工学シンポジウム論文集，pp.53-60, 2003.
 - 34) 中野正樹，中井健太郎：粘土化のしやすさの異なる第三紀泥岩粉碎砕石集合体の一次元圧縮挙動，応用力学論文集(土木学会)，7, pp. 685-692, 2004.
 - 35) Reddy, K.R. and Saxena, S.K.: Effects of cementation on stress-strain and strength characteristics of sands. *Soils and Foundations*, **33**(4), pp. 121-134, 1993.
 - 36) Schofield, A.N. and Wroth, C.P.: *Critical State Soil Mechanics*, London, McGraw-Hill, 1968.
 - 37) Hashiguchi, K., Saitoh, K., Okayasu, T. and Tsutsumi, S.: Evaluation of typical conventional and unconventional plasticity models for prediction of softening behavior of soils, *Géotechnique*, **52**, No. 8, pp. 561-578, 2002.
 - 38) Setouchi, H., Hashiguchi, K., Shikanai, T. and Okayasu, T.: Extended tangential-subloading surface model for general loading behavior of soils: Application to nonproportional loadings, *Soils and Foundations*, in press.
 - 39) 上野俊幸，中田幸男，兵動正幸，吉本憲正，香月大輔，海老沼孝郎：内部応力の項を導入したメタンハイドレート混合土の弾塑性構成モデルの提案，地盤工学研究発表会発表講演集，Vol.39th, pp. 375-376, 2004.

(2006年4月13日 受付)