

平成 22 年 6 月 4 日現在

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2007～2009

課題番号：19780180

研究課題名（和文）粒子特性に基づく下負荷面モデルの材料パラメータ決定法の構築

研究課題名（英文）The determination method of the material parameters of the subloading surface model based on particle properties.

研究代表者

瀬戸内 秀規 (SETOUCHI HIDEKI)

琉球大学・農学部・准教授

研究者番号：90305186

研究成果の概要（和文）：

土木構造物などの基礎地盤を合理的・経済的に設計するためには、弾塑性モデルによるシミュレーションの実施が有用である。種々の弾塑性モデルのなかで下負荷面モデルは、土の応力-ひずみ関係を最も適切に表現し得るモデルの一つである。本研究では、土を構成する土粒子の特性の一つである粒子形状が砂などの粒状体の力学・変形特性に与える影響を実験的研究により明らかにし、粒子形状に基づいた下負荷面モデルの材料パラメータの選定方法を提示した。

研究成果の概要（英文）：

The execution of the simulations using the elastoplastic model for soil is useful for constructing rationally and economically the foundation of the structure. It is one of the models in which the subloading surface model can most appropriately describe the stress-strain behavior of the soil in various elastoplastic models. In this study, the influence of the soil particle shape for the mechanical behavior of the granular materials like sand was revealed from the laboratory experiments. Then, it was presented the determination method of the material parameters of the subloading surface model based on the particle shape.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,000,000	0	2,000,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
総計	3,400,000	420,000	3,820,000

研究分野：地盤工学

科研費の分科・細目：農業工学・農業土木学・農村計画学

キーワード：土木材料，地盤工学，粒状体，粒子特性，強度

1. 研究開始当初の背景

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性体の限界荷重のみを問題とし、変形や沈下を定量的に予測できない。

2. 研究の目的

土の変形挙動を現実的に表現し得る弾塑性モデルの一つとして「下負荷面モデル」がある。本モデルは、土の応力一ひずみ関係の連続性条件、滑らか条件を満たす最も合理的な基本特性を有している。また、本モデルは、砂の繰返し非比例負荷を含む種々の負荷条件下の砂に適用され、実測値との比較により本モデルの妥当性が実証されている。しかしながら、本モデルに含まれる材料パラメータ値の選定においては煩雑・困難さを伴うことから、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となっている。

本研究では、下負荷面モデルに含まれる材料パラメータの粒子特性に基づいた選定方法を構築することを目的として、粒子特性のうち最も影響度の大きい粒子形状と粒状体の力学・変形特性の関係を一面せん断および一次元圧縮試験を実施した。

3. 研究の方法

(1) 粒子形状の定量化

粒子形状の定量化は、簡便でかつ個人計測誤差が少ない吉村・小川の凹凸係数 FU ¹⁾ を採用する。凹凸係数 FU は次式で与えられる。

$$FU = 4\pi \frac{A}{\ell^2}$$

ここに、 A および ℓ は粒子の長軸と中軸を含む投影象の面積および周囲長である。 FU 値は、完全球の場合 $FU=1.0$ で、形状が angularity になると減少する係数である。本研究では、光学顕微鏡によるデジタル画像から Image-Pro Plus 4.0 (Media Cybernetics) を用いて砂粒子の面積 A および周囲長 ℓ を求めた。なお、吉村・小川は、 FU 値は立体的な粒子についてはその形状を評価できるが、雲母などのような扁平な粒子や針状の粒子については、その形状を評価できな

いとしている。

(2) 試料

試料は、シリカ(SiO_2)を主成分とするシリカ砂、炭酸カルシウム(CaCO_3)を主成分とする石灰質砂、金属材料および合成樹脂材料の4種の主成分からなる、それぞれ粒子形状の異なる計13種類の粒状材料である。表1に、土粒子密度 ρ_s および凹凸係数 FU を示す。また、粒度組成の影響を軽減するため豊浦標準砂を除く全ての試料の粒径幅を0.425–0.85mmに調整した。均等係数 U_c はいずれも $U_c < 1.7$ である。ところで、さんご砂の土粒子密度は、 $\rho_s = 2.703$ であるが、さんご砂は生物の遺骸を起源としており、粒子は多孔質であることから、さんご砂の間隙比には土粒子内部の空隙が含まれる。土粒子内部の空隙を考慮した間隙比を用いて粒状材料の力学・変形特性を調べることは適切ではないので、本研究ではさんご砂の間隙比には粒子内部空隙を考慮しない見かけの土粒子密度²⁾(表1括弧内)を用いた。

表1 本研究に用いた試料

試料		ρ_s (g/cm^3)	FU
シリカ質	ガラスビーズ	2.482	0.964
	豊浦標準砂	2.647	0.864
	ガラスビーズの碎屑物	2.539	0.794
石灰質	ペレット	2.704	0.946
	丸みをおびた石灰岩の碎屑物	2.704	0.849
	石灰岩の碎屑物	2.704	0.783
	さんご砂	2.703(2.399)	0.752
金属	スチールショット	7.698	0.988
	スチールラウンドカッター	7.768	0.942
	スチールグリッド	7.398	0.759
	アルミニウム	1.753	0.728
合成樹脂	丸みをおびたアクリルの碎屑物	1.191	0.829
	アクリルの碎屑物	1.191	0.728

4. 研究成果

(1) 内部摩擦角と FU の関係

気乾状態の試料について、改良した三笠式一面せん断試験装置³⁾を用いて、せん断面上の垂直応力を制御しない圧密圧力一定の簡易定圧一面せん断試験を行った。供試体は、空中落下法により相対密度 $D_r = 0-40, 40-65$ および $65-100\%$ になるように、試料を0, 15 および 50cmの高さからせん断箱内に落下させて作成した。供試体寸法は直径 60mm, 層厚 20mm である。

圧密圧力は、せん断強度に与える粒子破碎の影響をできるだけ軽減するため、 $50kPa$ とした。上下せん断箱間隔およびせん断速度は、それぞれ $0.5mm$ および $0.2mm/min$ である。

図1に、せん断変位 $\delta=8mm$ における、それぞれ初期間隙比の異なる供試土の内部摩擦角 $\phi_{\delta=8mm}$ と FU の関係を示す。ここに、せん断変位 $\delta=8mm$ の体積変化はいずれの試料も 0 であったため、この時の内部摩擦角に与えるダイレイタンスの影響はないと考え、せん断変位 $\delta=8mm$ における内部摩擦角を限界状態時の内部摩擦角とする。図に示すようにせん断変位 $\delta=8mm$ における内部摩擦角は粒子形状の影響が支配的で、 FU が小であるほど内部摩擦角は大となる。

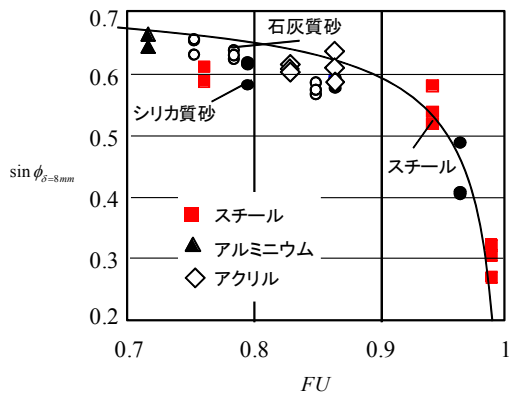


図1 せん断変位 $\delta=8mm$ における内部摩擦角 $\phi_{\delta=8mm}$ と FU の関係

(2) せん断強度とダイレイタンス係数の関係

せん断強度（ピーク時）における応力比 $(\tau/\sigma_n)_{max}$ とダイレイタンス係数 $\tan v_{max}$ の関係を Taylor の提案式⁴⁾で示すと次式となる。

$$\left(\frac{\tau}{\sigma_n}\right)_{max} = \left(\frac{\tau}{\sigma_n}\right)_c + \tan v_{max}$$

ここに、 τ :せん断応力、 σ_n せん断面上の垂直応力、 $(\tau/\sigma_n)_c$:限界状態における応力比である。また、先述のことから、

$$\left(\frac{\tau}{\sigma_n}\right)_c = \left(\frac{\tau}{\sigma_n}\right)_{\delta=8mm}$$

が成り立つ。ここに、 $(\tau/\sigma_n)_{\delta=8mm}$:せん断変位 $\delta=8mm$ における応力比である。図2に、せん断

強度時の応力比を $(\tau/\sigma_n)_{max} - (\tau/\sigma_n)_{\delta=8mm}$ で整理して、この時のダイレイタンス係数 $\tan v_{max}$ との関係を示す。なお、紙面の都合上、金属材料およびアクリル材料のデータだけを示す。図に示した関係は図中に示した Taylor 式とは一致しないものの、図2のように整理すると材料の種類の違いに関係なく応力比は一つの直線近傍で関係付けられる。つまり、ピーク時のせん断強度を限界状態のせん断強度で差し引いたせん断強度の大きさは、材料の種類に関係なく、正のダイレイタンスの大きさに支配されて発現する。

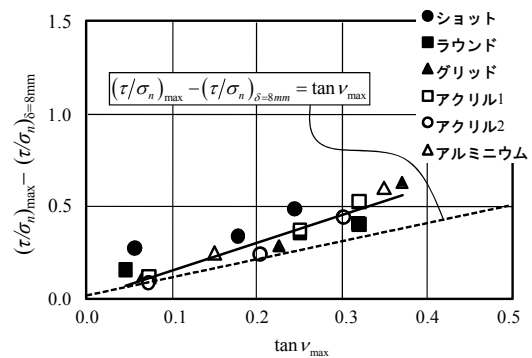


図2 $(\tau/\sigma_n)_{max} - (\tau/\sigma_n)_{\delta=8mm}$ と $\tan v_{max}$ の関係

(3) 初期間隙比とせん断強度時のダイレイタンス係数の関係

図3に、ピーク時のせん断強度を支配する最大のダイレイタンス係数 $\tan v_{max}$ と初期間隙比 e_0 の関係を示した。なお、横軸の初期間隙比は対数 $\ln e_0$ で整理している。図に示すようにダイレイタンス係数 $\tan v_{max}$ は間隙比が小であるほど大となり、また FU が小であるほど大きな間隙比にも関わらず大きなダイレイタンスを発揮する。また、初期間隙比とダイレイタンスの関係は、いずれの試料も図中に示した直線

$$\tan v_{max} = -0.9 \cdot \ln e_0 + b$$

で関係付けられ、 $\tan v_{max} - \ln e_0$ 上における初期間隙比 e_0 に対する $\tan v_{max}$ は、材料の種類に関係なく勾配 0.9 で示される。ここに、 b 値は粒子形状によって決定されるパラメータである。

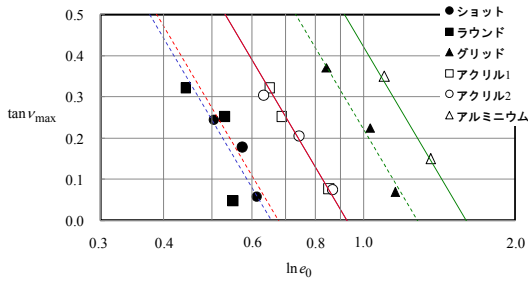


図3 初期間隙比 e_0 と
ダイレイタンス係数 $\tan v_{\max}$ の関係

(4) ポアソン比 ν

粒状体のポアソン比 ν を算定するため、静止土圧が測定可能な一次元圧縮試験装置を用い実験を行った。供試体は、一面せん断試験と同様に空中落下法により相対密度 $D_r = 0-40, 40-65$ および $65-100\%$ になるように、試料を $0, 15$ および 50cm の高さから圧密リング内に落下させて作成した。なお、本試験では試料を湿潤状態としている。供試体寸法は直径 60mm 、層厚 24.8mm である。圧密圧力は、 $0.003, 0.006, 0.013, 0.025, 0.05, 0.1, 0.16, 0.32, 0.47, 0.63, 0.79, 0.95, 1.1, 1.3, 1.4, 1.6\text{MPa}$ としてそれぞれ圧密時間を 5min とした。

供試土は等方弾性体として、得られた静止土圧係数 k_0 から、次式により粒状体のポアソン比 ν を求めた。

$$\nu = \frac{k_0}{1+k_0}$$

図 4-5 に、シリカ砂および石灰質砂の初期間隙比 e_0 とポアソン比 ν の関係を示す。いずれの試料もポアソン比は初期間隙比に依存し、緩い供試土ほど大きなポアソン比を示すが、初期間隙比に対するポアソン比の増減の程度は粒子形状に依存しており、 FU 値が大であるほど初期間隙比の影響が顕著に表れる傾向にある。また、同じ初期間隙比 $e_0 = 0.8$ に対応するポアソン比は FU 値が大であるほど大きい。また、主成分の異なる石灰質砂とシリカ砂のポアソン比は、石灰質砂の方がシリカ砂に比して相対的に小さく、粒状土のポアソン比には主成分の違いによる影響があることが推察される。

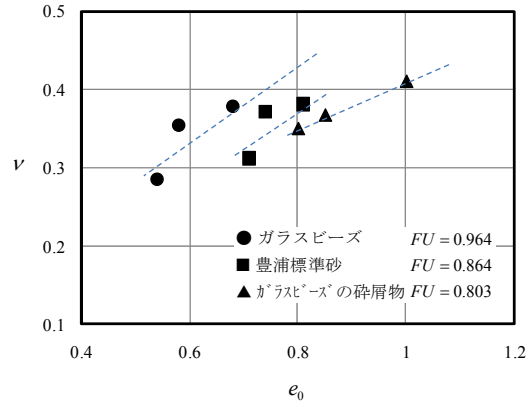


図4 シリカ砂のポアソン比 ν と
初期間隙比 e_0 の関係

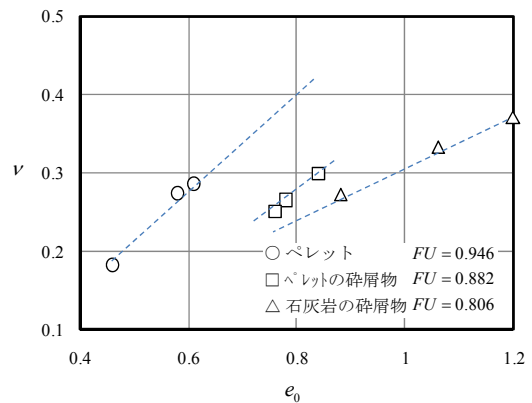


図5 石灰質砂のポアソン比 ν と
初期間隙比 e_0 の関係

(5) 正規圧密線の勾配 ρ

図 6-7 に、一次元圧縮試験により得られた、シリカ砂および石灰質砂の初期間隙比 e_0 と正規圧密線の勾配 ρ の関係を示す。正規圧密線の勾配は初期間隙比に依存し、いずれの試料も緩い状態の供試土ほど大きな勾配を示す。粒子形状による初期間隙比に対する正規圧密線の勾配の増減の程度は豊浦砂を除いて、有意な差は見られないが、粒径の小さい豊浦砂では他の試料に比して初期間隙比による影響が大きく表れる結果となっている。一方、同じ初期間隙比 $e_0 = 0.8$ における正規圧密線の勾配は FU 値が大であるほど大きい。また、ポアソン比で確認されたような主成分の違いによる影響は確認されない。

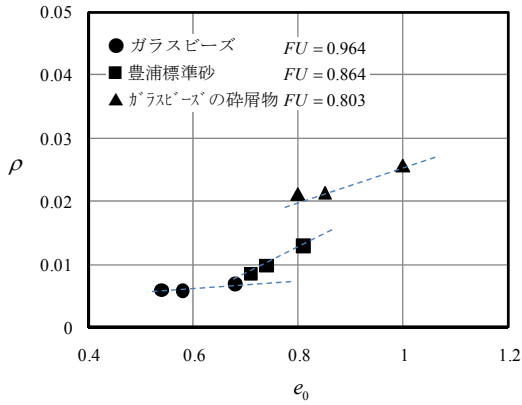


図6 シリカ砂の正規圧密線の勾配 ρ と初期間隙比 e_0 の関係

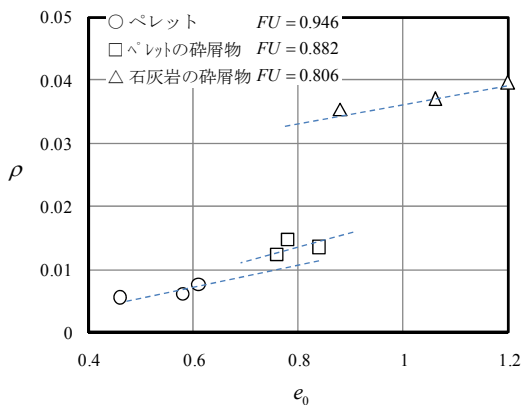


図7 石灰質砂の正規圧密線の勾配 ρ と初期間隙比 e_0 の関係

(6) 膨潤線の勾配 γ

図8に、シリカ砂および石灰質砂の初期間隙比 e_0 と膨潤線の勾配 γ の関係を示す。膨潤線の勾配は初期間隙比および粒子形状に関係なくいずれの試料も 0.004 程度である。

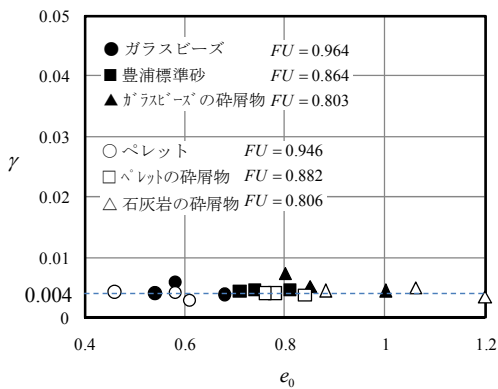


図8 シリカ砂および石灰質砂の膨潤線の勾配 γ と初期間隙比 e_0 の関係

(7) 下負荷面モデルの材料パラメータの選定方法

本研究は、4種の主成分からなり種々の粒子形状を有する粒径幅の狭い（均等係数 $U_c < 1.7$ ）粒状材料を対象に、一面せん断および一次元圧縮試験を行い、粒状材料の限界状態における内部摩擦角、ピーク時におけるダイレイタンス係数およびポアソン比、さらに正規圧密線および膨潤線の勾配と初期間隙比および粒子形状との関係を把握した。これらの関係図を活用することで、初期下負荷面モデルにおける材料パラメータの決定方法に資するデータを得ることができた。以下に、初期下負荷面モデルの材料パラメータの選定方法を簡単に述べる。

まず、表に、初期下負荷面モデルにおける地盤材料パラメータを示しておく。

表2 初期下負荷面モデルの地盤材料パラメータ

力学特性	材料パラメータ	記号	備考
等方圧密	正規圧密線の勾配	ρ	$\ln(v_y/v_{y0}) = -\rho \ln(p_y/p_{y0})$
	膨潤線の勾配	γ	$\ln(v/v^p) = -\gamma \ln(p/p_0)$
弾性	ポアソン比	ν	$G = \frac{3(1-2\nu)}{2(1+\nu)}K$ G :せん断弾性係数, K :体積弾性係数
限界状態	限界状態時の内部摩擦角	ϕ_c	$m_c = \frac{14\sqrt{6} \sin \phi_c}{(3 - \sin \phi_c)(8 + \cos 3\theta_\sigma)}$ m_c :限界状態時の応力比, θ_σ :Lode角
等方硬化	等方硬化関数の初期値	F_0	$F = F_0 \exp\left(\frac{H}{\rho - \gamma}\right)$ H :等方硬化化変数
下負荷面の発展則	正規降伏比の発展係数	u	$\square \dot{R} = -u \ln R \ \mathbf{D}^P \ $ R :正規降伏比, $\ \mathbf{D}^P \ $:塑性ひずみ速度の大きさ

正規圧密線の勾配 ρ :

下負荷面モデルの材料パラメータである正規圧密線の勾配 ρ は、本来等方圧密により得られるものである。しかし、等方圧密による正規圧密線の勾配は一次元圧縮試験による正規圧密線の勾配と同程度であると考えられるため、本一次元圧縮試験で得られた正規圧密線の勾配で下負荷面モデルにおける正規圧密線の勾配 ρ について考察する。また、

膨潤線の勾配 γ についても同様である。正規圧密線の勾配 ρ は、図 6-7 の初期間隙比と粒子形状別に示した正規圧密線の勾配 ρ により、対象とする材料の粒子形状および初期間隙比を考慮して選定することができる。ただし、本研究では正規圧密線の勾配 ρ に与える粒径の影響が確認されたため、今後粒径の影響についてのデータを充実させる必要がある。

膨潤線の勾配 γ :

等方圧密における膨潤線の勾配 γ は、図 8 より供試土の初期間隙比および粒子形状に関わらず $\gamma = 0.004$ と選定できる。

ポアソン比 ν :

ポアソン比 ν は、図 4-5 の初期間隙比と粒子形状別に示したポアソン比により、対象とする材料の粒子形状および初期間隙比を考慮して選定することができる。ただし、ポアソン比の場合、主成分の違いによるポアソン比への影響に留意する必要がある。

限界状態時の内部摩擦角 ϕ_c :

限界状態時の内部摩擦角 ϕ_c は、供試土の初期間隙比に関わらず、粒子形状から図 1 から一義的に選定可能である。

正規降伏比の発展係数 u :

正規降伏比の発展係数 u は、下負荷面が正規降伏面に漸近する速度を規定し、発展係数 u が大であるほど速く正規降伏面に漸近する。また、発展係数 u が大であるほどピーク時における正の塑性体積ひずみ速度が大となり、大きな正のダイレイタンスー係数を表現する。図 3 は初期間隙比と粒子形状別にピーク時におけるダイレイタンスーを示したものであるが、この関係図より対象とする材料の粒子形状および初期間隙比を考慮した正規降伏比の発展係数 u の選定が可能である。

等方硬化関数の初期値 F_0 :

等方硬化関数の初期値 F_0 は解析上で合理的に選定することができる。すなわち、等方硬

化関数の初期値 F_0 は下負荷面モデルにおける初期の正規降伏面の大きさを表し、地盤モデルが正規圧密状態であれば現応力状態を表現する下負荷面とその大きさは一致する。一方、地盤モデルが過圧密状態であれば、正規降伏面は下負荷面より大となる。従って、過圧密状態における等方硬化関数の初期値 F_0 は、対象とする地盤材料の先行圧密圧力まで側方変位を拘束した地盤モデルに、正規圧密状態から圧密圧力を加え、現応力状態まで圧密圧力を除荷することで設定できる。

参考文献

- 1) 吉村優治・小川正二：砂のような粒状体の粒子形状の簡易な定量化法，土木学会論文集，No. 463/III-22, 95-103, 1993.
- 2) 瀬戸内秀規・小宮康明：シリカ砂および石灰質砂の粒子形状と間隙比および内部摩擦角の関係，地盤工学ジャーナル，Vol. 1, No. 4, 169-174, 2006.
- 3) 新城俊也・瀬戸内秀規：さんご礁石化質堆積物の鋼材との摩擦特性，土と基礎，Vol. 49, No. 8, 4-7, 2001.
- 4) Taylor, D.W.: Fundamentals of soil mechanics, John Wiley and Sons, New York, 1948.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

6. 研究組織

(1)研究代表者

瀬戸内 秀規 (SETOUCHI HIDEKI)

琉球大学・農学部・准教授

研究者番号：90305186