

平均応力および間隙比の影響を考慮した砂の簡単な応力比・ひずみ式

A simple stress ratio-strain equation for sand under different mean stresses and void ratios

鈴木輝一

Kiichi SUZUKI

博(工) 埼玉大学助教授 工学部建設工学科 (〒338-8570 埼玉県浦和市下大久保255)

A liquefaction analysis for a strong earthquake in the future is required to predict with good accuracy. The stress-strain relationship and the dilatancy relationship in constitutive models for sand are very important factors. The purpose of this paper is to verify especially a proposed simple stress ratio-strain equation for different mean stresses and void ratios. Through the verification in the drained triaxial compression tests using Sacramento River sand, we see that the proposed stress ratio-strain equation is able to simulate well the experimental results for different confining stresses and void ratios. We may go on from this to the conclusion that the proposed equation could easily take the influence of mean stress and void ratio as well as inherent anisotropy and b -value into consideration within the framework of the existing plasticity theory.

Key Words: dilatancy, mean stress, sand, stress ratio-strain, void ratio

1. まえがき

1995年の阪神淡路大震災において、液状化現象によって埋立地等で甚大なる被害を蒙ったこと¹⁾は、まだ記憶に新しい。この阪神淡路大震災を境として、大地震時における液状化を考慮した地盤-構造物系のより詳細な検討が求められてきている。その有力な検討手段の一つとして、二相系液状化解析がある。著者他も液状化解析を用いて、種々の適用例を示している²⁾³⁾が、阪神淡路大震災以降、そのニーズが増えたことにより、解析例が急増している状況にある。これら液状化解析結果の信頼性は、砂の構成則に依存していると言うことができる。構成則は、初期構造異方性、間隙比等の物性や種々の複雑な応力条件の影響をすべて考慮できるものでなければならないが、必ずしもそれらの影響を十分に考慮しているというわけではない。それゆえ、実際に構成則を液状化解析等に適用する場合には、その適用範囲を配慮して用いることが必要となる。

液状化解析結果の信頼性を検討すべく、ベンチマークテスト⁴⁾が実施されている。そのテストで、比較的良好な結果を示したのが多曲面モデルタイプのMulti-yieldモデル⁵⁾である。また、著者他は、Multi-yieldモデルと同様な負荷曲面を用いて、初期構造異方性と中間主応力の相対的大きさの影響を考慮した構成則を提案して

いる⁸⁾¹⁰⁾。これらのモデルの基本的な考え方は、ひずみ成分を偏差成分と体積成分に分解して、偏差量で表される相当応力・相当ひずみ関係の応力・ひずみ式、ならびにダイレイタンシー式のそれぞれのユニークな特性を塑性論に展開することである。しかしながら、これらの構成則では、地盤のいくつかの代表点で物性を定めて用いることを前提としており、同じ試料に対する平均応力や間隙比の影響を十分に考慮した汎用的な構成則にはなっていない。今後、より詳細な液状化解析を実施するためには、構成則に平均応力や間隙比の影響を考慮することが不可欠であり、また、その十分な検証が求められる。

一方、平均応力と間隙比の影響を考慮した砂の構成則としては、State indexモデル¹¹⁾に代表されるように、定常状態あるいは準定常状態を基準としたタイプの構成則があるが、初期構造異方性或中間主応力の相対的大きさ(b 値)の影響を考慮した汎用的な構成則としては、まだ確立されていないのが現状である。このように、それぞれの構成則は一長一短を持っている。

本研究の目的は、既に提案している構成則¹⁰⁾における応力・ひずみ式とダイレイタンシー式を基にして、平均応力と間隙比の影響を考慮する方法を示すとともに、初期構造異方性と中間主応力の相対的大きさの影響をも考慮したより汎用的な構成則への展開の可能性

を示すことにある。ただし、初期構造異方性、中間主応力、平均応力それに間隙比の影響をすべて網羅できる実験データが得られていないため、ここでは、排水三軸圧縮試験における平均応力と間隙比の影響について検討することとし、初期構造異方性等の影響を考慮しない一般的な応力・ひずみ式を対象としている。また、比較のために、Multi-yieldモデルで用いている応力・ひずみ式とダイレイタンシー式の特性についても論じる。提案するモデルの適用性については、平均応力と間隙比の影響について一連の実験結果が得られている Sacramento River sand¹²⁾を用いて検討した。

2. 応力・ひずみ式

構成モデルの物性パラメータ算定のためには、通常、対象とする地盤の要素実験データが必要とされる。Multi-yieldモデル⁷⁾のように、各負荷曲面における塑性係数等を算定する場合には、応力・ひずみ曲線の実験データを入力してプログラム内で処理する¹³⁾ことが合理的である。その場合、増分法による解析の精度を上げるために、応力・ひずみ曲線を関数式で表し、それを用いて十分な数の負荷曲面を作成するのが一般的である。それらの関数式として古典的なものがKondnerによって提案されている原型双曲線式¹⁴⁾である。ここでは、原型双曲線、Multi-yieldモデル、それに提案モデルについて、それらの特質を述べる。

2.1 原型双曲線

Kondnerによって提案された原型双曲線式¹⁴⁾は次式で表される。

$$Y = \frac{X}{1+X} \quad (1)$$

ここで、 Y, X はそれぞれ応力、ひずみの正規化量であり、次式で定義される。

$$Y = \frac{q}{q_{\max}}, \quad X = \frac{\bar{\epsilon}'}{\bar{\epsilon}'_{ref}} \quad (2)$$

$q, \bar{\epsilon}', q_{\max}, \bar{\epsilon}'_{ref}$ は、それぞれ相当応力、相当ひずみ、強度、それに基準ひずみを示す。なお、ここでは三軸圧縮試験を対象として次のように定義する。

$$q = \sigma_a - \sigma_r = s_a - s_r, \quad \bar{\epsilon}' = \epsilon_a - \epsilon_r = e_a - e_r \quad (3)$$

下添字 a, r は鉛直および半径方向を示す。 s および e は、それぞれ、 σ および ϵ の偏差成分である。また、この場合の基準ひずみは初期剛性 G_0 を用いて次式で表される。

$$\bar{\epsilon}'_{ref} = \frac{q_{\max}}{2G_0} \quad (4)$$

式(1)の原型双曲線式では初期剛性 G_0 と強度 $q_{\max}$ が与えられれば、正規化した応力・ひずみ関係は、ユニークに決まることになる。しかしながら、実際の土は、渋谷他¹⁵⁾が示しているように、原型双曲線にあてはま

らず、原型双曲線の上下両側に種々の応力・ひずみ曲線が存在するのが一般的である。Kondner¹⁴⁾は、補正係数を用いて初期剛性ならびに強度を変えることによって、カーブフィッティングすることも提案しているが、物性値の物理的意味合いがあいまいになることや、非排水時の計算の場合、初期剛性すなわち弾性剛性が計算結果に大きな影響を及ぼすことから一般的には不適当である。

2.2 Multi-yieldモデル

Prevost and Keane¹⁶⁾, Griffiths and Prevost¹⁷⁾は、種々の応力・ひずみ曲線に対応すべく、破壊ひずみを有限な値 $\bar{\epsilon}'_{\max}$ として、そのパラメータを一つ付け加えることによって、次式を提案している。

$$Y^* = Y_1^* \frac{X^*}{Y_1^* + X^*} - \frac{Y_1^{*2}}{(Y_1^* + 1)^2} \frac{X^{*m+1}}{(m+1)} \quad (5)$$

ここで、

$$Y^* = \frac{q}{2G_0 \bar{\epsilon}'_{\max}}, \quad X^* = \frac{\bar{\epsilon}'}{\bar{\epsilon}'_{\max}}, \quad Y_{\max}^* = \frac{Y_1^*}{Y_1^* + 1} - \frac{Y_1^{*2}}{(Y_1^* + 1)^2} \frac{1}{m+1} \quad (6)$$

また、 m は曲線の形状をコントロールするパラメータであり、パラメータ Y_1^* は m と $Y_{\max}^* (= \bar{\epsilon}'_{ref}/\bar{\epsilon}'_{\max})$ から得られる。

式(5)で表される曲線を $Y_{\max}^*$ をパラメータとして、Griffiths and Prevost¹⁷⁾が示したように $Y-X^*$ で表示したのが図-1(a)である。しかしながら、より一般的な表示である $Y-X$ で示すと、図-1(b)のように原型双曲線の上側のみを対象としていることが分かる。これについては、龍岡、渋谷¹⁸⁾も同様に指摘している。

そこで、Multi-yieldモデルにおいても、林他¹⁹⁾が原型双曲線の上下両側の種々の応力・ひずみ曲線に対応できるように、更に次式を提案している。

$$Y = e^{-\alpha|X|} \frac{\left(\frac{2}{n_l}X+1\right)^{n_l}-1}{\left(\frac{2}{n_l}X+1\right)^{n_l}+1} + \left(1-e^{-\alpha|X|}\right) \frac{\left(\frac{2}{n_u}X+1\right)^{n_u}-1}{\left(\frac{2}{n_u}X+1\right)^{n_u}+1} \quad (7)$$

ここで、 α, n_l, n_u は材料の非線形を表すパラメータである。

2.3 提案モデル

ここでは、まず、Kondnerの原型双曲線¹⁴⁾を用いて誘導した簡単な応力・ひずみ式を示す。次いで、その提案式によって種々の応力・ひずみ曲線が表せることを示す。提案式は、平均応力の影響を含めて考慮するために、応力比・ひずみ式の形となる。そのため、原型双曲線をまず次のように表す。

$$\hat{Y} = \frac{\hat{X}}{1+\hat{X}} \quad (8)$$

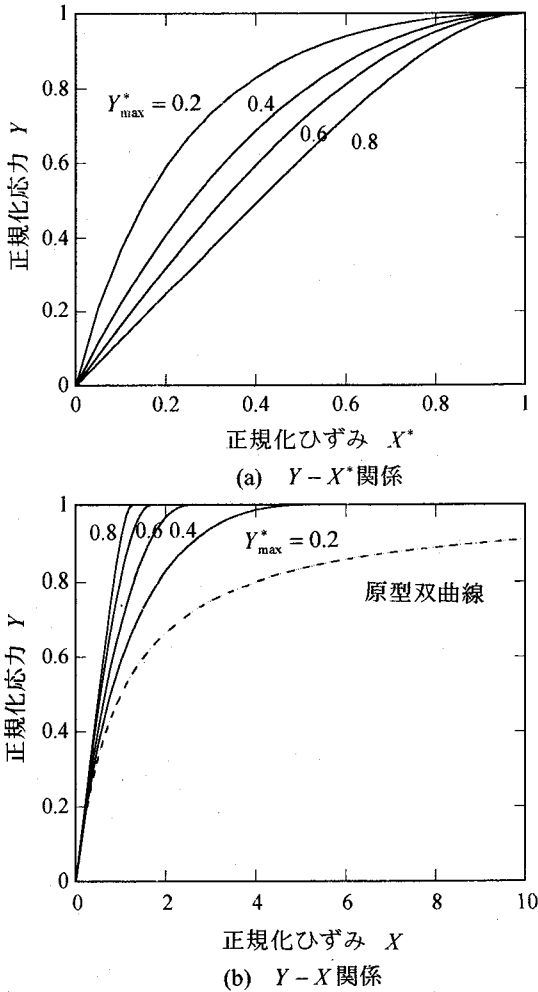


図-1 Multi-yield モデルの正規化応力・ひずみ関係

ここで、

$$\hat{Y} = \frac{q/p}{(q/p)_{\max}}, \hat{X} = \frac{\bar{\varepsilon}}{\bar{\varepsilon}_{ref}} \quad (9)$$

なお、応力量、ひずみ量はより一般的な表示として次のように定義する。

$$\begin{aligned} p &= \frac{1}{3} \sigma_{ii}, q = \sqrt{\frac{3}{2} (\sigma_{ij} - p \delta_{ij}) (\sigma_{ij} - p \delta_{ij})} \\ d\varepsilon_{vol} &= d\varepsilon_{ii}, \\ d\bar{\varepsilon} &= \sqrt{\frac{2}{3} \left(d\varepsilon_{ij} - \frac{1}{3} d\varepsilon_{vol} \delta_{ij} \right) \left(d\varepsilon_{ij} - \frac{1}{3} d\varepsilon_{vol} \delta_{ij} \right)} \\ \varepsilon_{vol} &= \sum d\varepsilon_{vol}, \bar{\varepsilon} = \sum d\bar{\varepsilon} \end{aligned} \quad (10)$$

この場合、式(9)の基準ひずみは次式で与えられる。

$$\bar{\varepsilon}_{ref} = \frac{q_{\max}}{3G_0} \quad (11)$$

更に、三軸試験の場合には、式(10)は次のようになる。

$$\begin{aligned} p &= \frac{1}{3} (\sigma_a + 2\sigma_r), q = \sigma_a - \sigma_r, \\ d\varepsilon_{vol} &= d\varepsilon_a + 2d\varepsilon_r, d\bar{\varepsilon} = \frac{2}{3} (d\varepsilon_a - d\varepsilon_r) \end{aligned} \quad (12)$$

次に、式(8)で表される原型双曲線の弾性ひずみ成分について考えてみる。弾性ひずみは、式(9)および式(11)の定義から、自ずと次式で表されることになる。

$$\hat{X}^e = \hat{Y} \quad (13)$$

このとき、式(11)の弾性係数は、一般には、次式の Iwasaki and Tatsuoka²⁰⁾の提案式のように平均応力および間隙比の関数となる。

$$G = 88290 \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} \left(\frac{p}{98.1} \right)^{0.4} \quad (14)$$

なお、ここでは単位を kPa に変換している。e は間隙比を意味する。次に、塑性成分について考える。

$$\hat{X}^p = \hat{X} - \hat{X}^e \quad (15)$$

式(8)および式(13)を式(15)に代入すると、次式が得られる。

$$\hat{X}^p = \frac{\hat{Y}^2}{1 - \hat{Y}} \quad (16)$$

図-2 に $\hat{Y}-\hat{X}$ 関係、ならびにその弾性、塑性成分を示す。このように $\hat{Y}-\hat{X}$ で表示すると、平均応力の影響も含めてユニークに表されることになる。これは、通常、用いられる応力比・ひずみ ($q/p-\bar{\varepsilon}$) 関係で示すと、図-3 のようになる。ここでは、間隙比 0.8、最大応力比 1.2 として、3 種類の一定平均応力 49.05kPa, 98.1kPa, それに 196.2kPa の場合について示している。式(14)に示されるようにその平均応力の値によって弾性剛性が異なることから、相当弾性ひずみ増分 $d\bar{\varepsilon}^e$ は当然異なってくる。同様に、式(9)、式(11)および式(16)から分かるように、相当塑性ひずみ増分 $d\bar{\varepsilon}^p$ も平均応力に依存して異なる。すなわち、弾性ひずみ、塑性ひずみ共に平均応力依存性を示し、図-3 に示されるように平均応力に依存した応力比・ひずみ曲線が得られることになる。

更に、式(8)で表される原型双曲線を、次式のように塑性成分の曲線形状に関するパラメータ $\hat{a}$ を用いることによって、種々の応力・ひずみ関係をより単純な式で表すことを提案する。 $\hat{a}$ が 1.0 の場合は原型双曲線を表す。

$$\begin{aligned} \hat{X} &= \hat{X}^e + \hat{a} \hat{X}^p \\ &= \hat{Y} + \hat{a} \frac{\hat{Y}^2}{1 - \hat{Y}} \end{aligned} \quad (17)$$

この場合、 $\hat{Y}-\hat{X}$ 関係における接線係数は、次式のように導かれる。

$$\frac{d\hat{Y}}{d\hat{X}^p} = \frac{1}{\frac{d\hat{X}^p}{d\hat{Y}}} = \frac{(1 - \hat{Y})^2}{\hat{a}(2 - \hat{Y})\hat{Y}} \quad (18)$$

式(18)より、初期状態、すなわち $\hat{Y} = 0$ の時、接線係数は無限となり、また、最大応力比状態、すなわち $\hat{Y} = 1$ の時、接線係数は零となることを示している。ただし、この場合 $\hat{a}$ は零でないとする。また、全ひずみの接線係数は、次の式で与えられる。

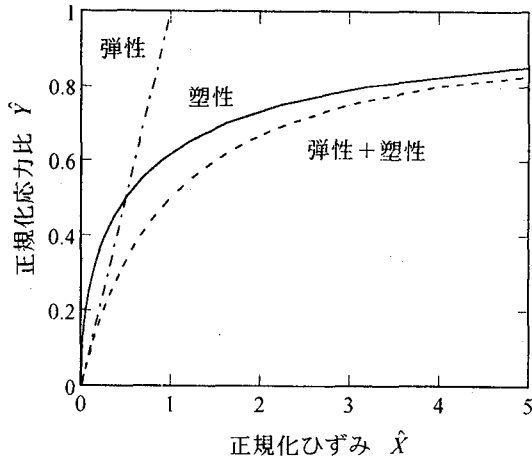


図-2 原型双曲線の正規化応力比・ひずみ関係

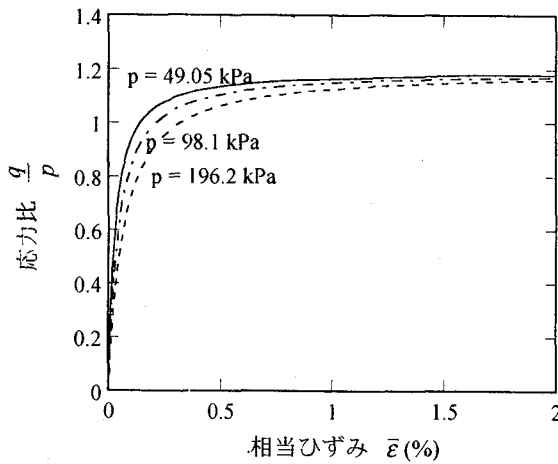


図-3 応力比・ひずみ関係（原型双曲線）の平均応力依存性

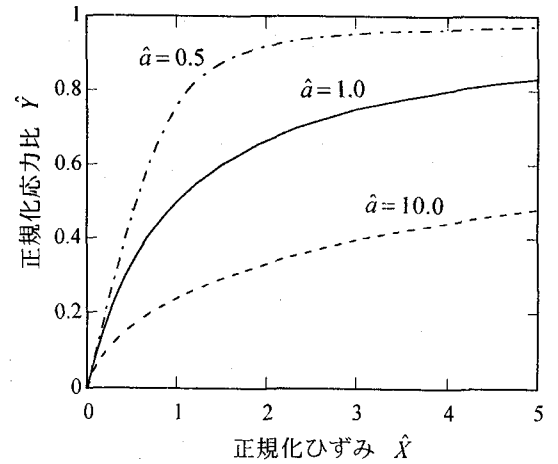
$$\frac{d\hat{Y}}{d\hat{X}} = \frac{1}{\frac{d\hat{X}}{d\hat{Y}}} = \frac{(1-\hat{Y})^2}{(1-\hat{Y})^2 + \hat{a}(2-\hat{Y})\hat{Y}} \quad (19)$$

パラメータ $\hat{a}$ を 0.1, 1.0, 10.0 の 3 ケースについて、 $\hat{Y}-\hat{X}$ 関係ならびに $d\hat{Y}/d\hat{X}-\hat{Y}$ 関係を示したのが、図-4(a),(b) である。澁谷他¹⁰⁾が示しているように、種々の地盤材料の応力・ひずみ曲線、ならびに接線剛性の低下の任意のパターンが式(17)で表されることが分かる。

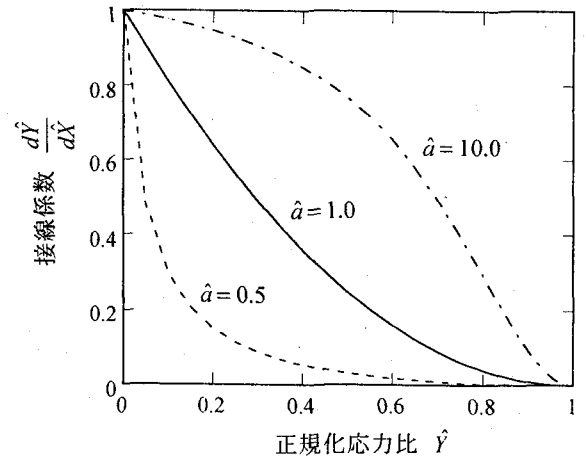
このような応力比・ひずみ式については、既に著者他によって報告している⁸⁾⁻¹⁰⁾。また、Multi-yield モデル⁷⁾でも同様に平均応力を考慮したモデルとなっているが、今まで、その平均応力依存性については厳密に述べられておらず、また、その検証例も示されていない。

3. ダイレイタンスー式

何らかの方法でユニークな応力・ひずみ式あるいは応



(a) 種々の曲線形状



(b) 接線係数の低下

図-4 提案モデルの正規化応力比・ひずみ関係

力比・ひずみ式、それとダイレイタンスー式が実験から得られれば、塑性論に基づいた構成則の構築は容易である¹⁰⁾。ここでは、まず、塑性論を展開する上で、ダイレイタンスー式がどのように表されるかを Multi-yield モデルを例に示し、次いで、比較的、一般的に用いられている正規化塑性仕事と相当塑性ひずみとの関係²¹⁾を用いたモデルを示すとともに、それらのダイレイタンスー式の特徴を比較する。

3.1 Multi-yield モデル

一般に流れ則は次式によって示される。

$$d\epsilon_{ij}^p = \lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} \quad (20)$$

ここで、 λ は比例定数であり、 g は塑性ポテンシャルである。式(20)の左辺、すなわち塑性ひずみ増分を偏差ひずみ増分 $d\epsilon_{ij}^p$ と体積ひずみ増分 $d\epsilon_{vol}^p$ に分けると次式が得られる。

$$d\epsilon_{ij}^p = d\epsilon_{ij}^p + \frac{1}{3} d\epsilon_{vol}^p \delta_{ij} \quad (21)$$

また、式(20)の右辺も同様に、偏差応力成分と平均応力成分に分解すると、

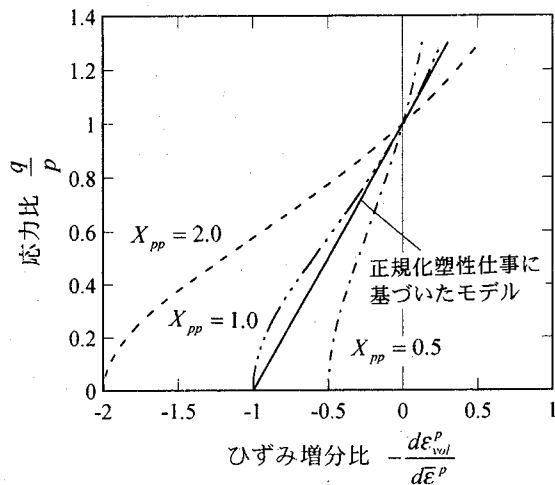


図-5 ダイレイタンシー関係

$$\begin{aligned} \lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} &= \lambda \left(\frac{\partial g}{\partial s_{ij}} \frac{\partial s_{ij}}{\partial \sigma_{ij}} + \frac{\partial g}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial \sigma_{ij}} \right) \\ &= \lambda \frac{\partial g}{\partial s_{ij}} + \frac{1}{3} \lambda \frac{\partial g}{\partial p} \delta_{ij} \end{aligned} \quad (22)$$

よって、式(20)から式(22)を用いて、次の関係が得られる。

$$de_{ij}^p = \lambda \frac{\partial g}{\partial s_{ij}} \quad (23a)$$

$$d\epsilon_{vol}^p = \lambda \frac{\partial g}{\partial p} \quad (23b)$$

更に、Multi-yield モデル⁷⁾では、平均応力で正規化した偏差応力面上で、負荷曲面を規定しており、負荷関数 f は Drucker-Prager タイプとなる。また、偏差成分に対しては、その負荷関数で定まるとして、式(23a)の塑性ポテンシャルの偏導関数は、負荷関数の偏導関数に等しいとしている。

$$\frac{\partial g}{\partial s_{ij}} = \frac{\partial f}{\partial s_{ij}} \quad (24)$$

一方、相当塑性偏差ひずみ増分 $d\bar{\epsilon}^p$ は式(10)と同様に次のように書ける。

$$d\bar{\epsilon}^p = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{de_{ij}^p de_{ij}^p} \quad (25)$$

式(25)を主偏差ひずみ増分で記述すると、

$$d\bar{\epsilon}^p = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{de_1^p{}^2 + de_2^p{}^2 + de_3^p{}^2} \quad (26)$$

Multi-yield モデルでは、Drucker-Prager タイプの負荷関数を用いていることから、式(23a)と式(24)を用いると、式(25)あるいは式(26)から次のように次式が成り立つ。

$$d\bar{\epsilon}^p = \lambda \quad (27)$$

また、塑性ポテンシャルの平均応力による偏導関数を次のように仮定している。

$$\frac{\partial g}{\partial p} = \frac{1 - (q/Mp)^2}{1 + (q/Mp)^2} X_{pp} \quad (28)$$

ここで、 X_{pp} は物性パラメータで、変相応力比 M は一定

としている。式(27)および式(28)を式(23b)に代入すると、

$$d\epsilon_{vol}^p = \frac{1 - (q/Mp)^2}{1 + (q/Mp)^2} X_{pp} d\bar{\epsilon}^p \quad (29)$$

式(29)から分かるように、 X_{pp} はダイレイタンシーに関するパラメータとなっている。

3.2 正規化塑性仕事に基づいたモデル

兵藤他²¹⁾は、履歴、密度、初期構造異方性に関わらず正規化塑性仕事と相当塑性ひずみの間には、次式で示すユニークな関係があることを明らかにしている。

$$\frac{dw^p}{p} = \mu(\bar{\epsilon}^p) d\bar{\epsilon}^p \quad (30)$$

応力と塑性ひずみ増分の共軸性を仮定すれば次式が得られる。

$$d\epsilon_{vol}^p = \left(\mu - \frac{q}{p} \right) d\bar{\epsilon}^p \quad (31)$$

すなわち、平均応力による塑性ポテンシャルの偏導関数は、次式で表される。

$$\frac{\partial g}{\partial p} = \left(\mu - \frac{q}{p} \right) \quad (32)$$

ここでは、 $\mu(\bar{\epsilon}^p) = M$ 一定とみなしうと考えると、式(31)と式(29)の関係を比較すると、図-5 のようになる。

ただし、この場合、変相応力 M を 1.0 と仮定し、パラメータ X_{pp} は 0.5, 1.0, 2.0 の 3 種類について示してある。

正規化塑性仕事によるモデルが実験データに近いものであることから、図-5 から明らかなように、 X_{pp} が一定値であれば 1.0 と大きく異なることはあり得ず、 X_{pp} を用いる場合には、Popescu²²⁾が液状化試験における繰返し応力比と X_{pp} との間の関連性を述べているように、ひずみ履歴等の関数で表される必要がある。

4. 適用例および考察

ここでは、提案モデルの応力比・ひずみ式および正規化塑性仕事に基づいたダイレイタンシー式の適用性について、既往の実験データを用いて検討した。検討に用いた実験データは、Lee and Seed¹²⁾によって拘束圧と間隙比の影響について行われた一連の排水三軸圧縮試験結果である。試料はSacramento River sandで、やや角張ったものからやや丸まったまでの形状を持ち、土粒子比重 $G_s = 2.68$ 、最大、最小間隙比 $e_{max} = 1.03$ 、 $e_{min} = 0.61$ である。2 種類の間隙比 0.87 と 0.61 (相対密度 $D_r = 38\%$ と 100%) に対して、拘束圧が 98.1kPa から 11,772kPa までの広い範囲を対象として実験が行われている。

計算は、増加する平均応力の影響を考慮するために、随時、その平均応力の関数式である接線係数を用いて、増分法によって偏差ひずみ増分を求める。次いで、正規化塑性仕事に基づいたモデルを用いて、その偏差ひずみ増分からダイレイタンシー成分を得る。ここでは、変相応力比 $M = 1.3$ とした。併せて、平均応力増分による体

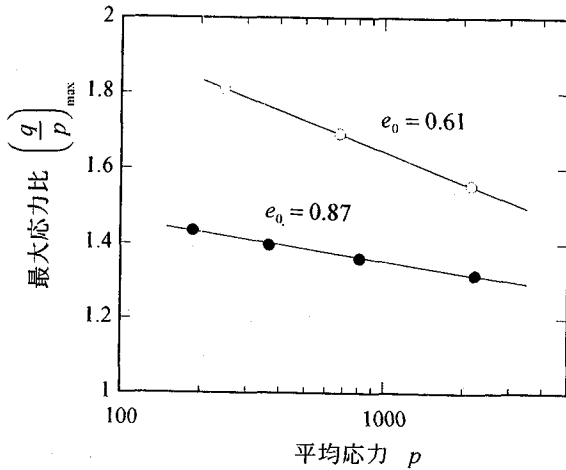
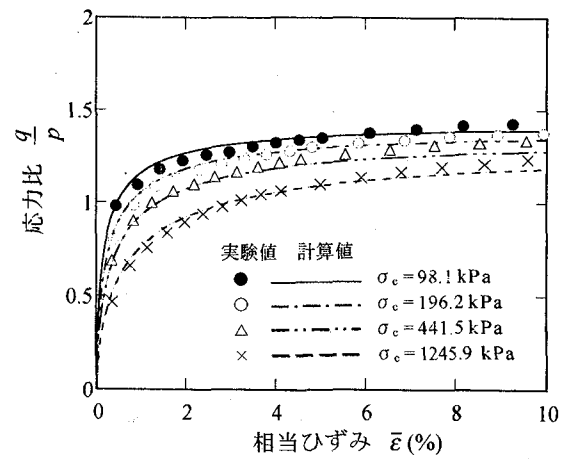


図-6 最大応力比の平均応力、間隙比依存性

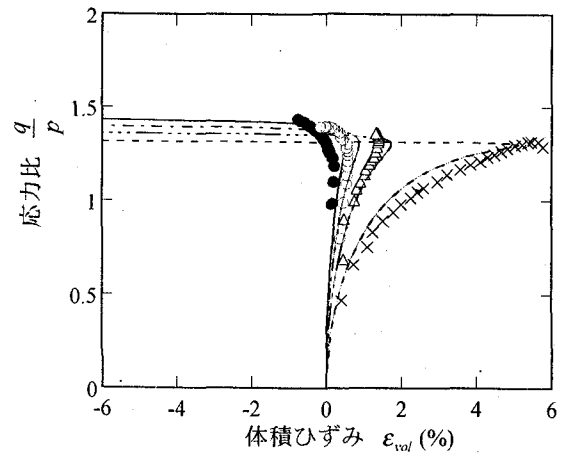
積弾性ひずみ増分も計算する。剛性は式(14)から算定し、ポアソン比は0.33を用いた。実験データから得られた最大応力比と平均応力との関係 $(q/p)_{\max} - \ln p$ を図-6に示す。ここで対象とする拘束圧の範囲では、平均応力が大きくなるに従い最大応力比が小さくなっている。計算でも最大応力比の平均応力依存性を考慮して、図-6の関係から、随時、最大応力比を求めている。間隙比については、初期間隙比のみに着目し、間隙比の変化分までは考慮していない。

最初に間隙比 $e=0.87$ (相対密度 $D_r=38\%$) のゆるい砂の場合について、実験値と計算値の比較を図-7に示す。図-7(a), (b)は、それぞれ、提案モデルでパラメータ $\hat{a}=4.0$ を用いた場合の応力比・ひずみ関係と応力比・体積ひずみ関係である。拘束圧は98.1kPa, 196.2kPa, 441.5kPa, それに1245.9kPaまでを対象とした。参考のために、原型双曲線を用いた場合の応力比・ひずみ関係を図-7(c)に示す。原型双曲線を用いた場合でも、定性的には平均応力に依存した応力比・ひずみ関係を表せることは既に述べたが、実験値とは一致しない。それに対して、提案モデルでパラメータ $\hat{a}=4.0$ を用いた場合は、平均応力による影響を含めて定性的、定量的によく表している。更に、体積ひずみについても実験値と比較的良好一致を示している。

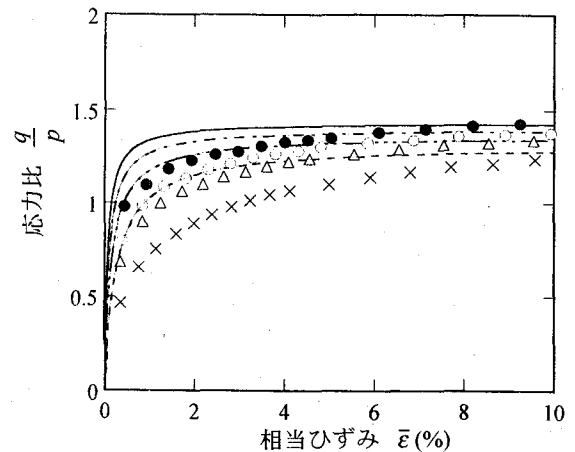
次に、間隙比 $e=0.61$ (相対密度 $D_r=100\%$) の密な砂の場合について、パラメータ $\hat{a}=1.5$ の場合の応力比・相当ひずみ関係と応力比・体積ひずみ関係を図-8(a), (b)に示す。拘束圧は98.1kPa, 294.3kPa, それに1030.1kPaである。密な砂の場合、実験ではひずみ軟化挙動を示すが、ここではピーク強度までを対象としている。ゆるい砂の場合と比べて、拘束圧が小さい場合に、若干、実験値と計算値に差異が見られるものの、それ以外は良好一致を示している。



(a) 応力比・相当ひずみ関係

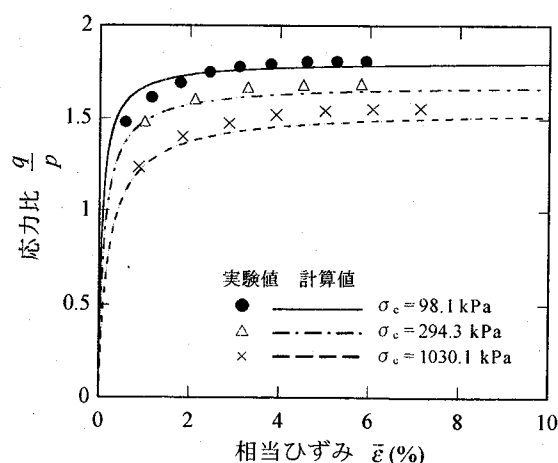


(b) 応力比・体積ひずみ関係

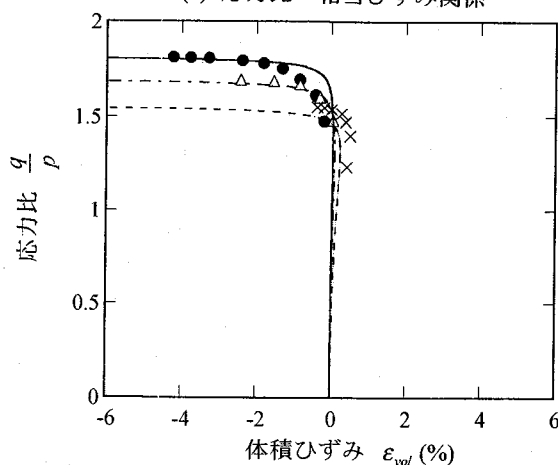


(c) 応力比・相当ひずみ関係 (原型双曲線の場合)

図-7 ゆるい砂 ($e_0=0.87$) の実験値と計算値の比較



(a) 応力比・相当ひずみ関係



(b) 応力比・体積ひずみ関係

図-8 密な砂 ($e_0 = 0.61$) の実験値と計算値の比較

5. 結論

液状化解析において、砂の構成則は最も重要な要因であると考えられる。近年、その精度の向上が求められてきている。ここでは、既に提案している構成則¹⁰⁾における応力比・ひずみ式とダイレイタンシー式を対象として、平均応力と間隙比の影響を考慮する方法について示し、Sacramento River sandの排水三軸圧縮試験結果を用いて、その適用性を検討した。また、液状化解析のベンチマークテストにおいて、比較的適用性が高いとされているMulti-yieldモデルは、ここで扱う構成則と同じタイプのものである。比較のためにMulti-yieldモデルの応力・ひずみ式とダイレイタンシー式の基本的な特性についても検討を行った。これらの検討結果を整理すると以下の通りである。

(1) 原型双曲線を弾性成分と塑性成分に分けて、その塑性成分に補正係数を掛けることによって得られる簡単な応力比・ひずみ式は、初期剛性および強度の物理的意味合いを失わずに、種々の応力・ひずみ曲線のタイプを表すことができる。

- (2) 提案するタイプの応力比・ひずみ式を用いることによって、平均応力の影響を定性的に表すことができる。
- (3) 応力比・ひずみ曲線の形状を表すパラメータ $\hat{a}$ は、主として間隙比に依存して、平均応力には依存しないことを明らかにした。また、パラメータ $\hat{a}$ を用いることによって、比較的良く実験値をシミュレーションできることを示した。
- (4) 提案する応力比・ひずみ式は、もともと、初期構造異方性や中間主応力の相対的大きさの影響を考慮することができるもので、平均応力および間隙比の影響を含めたより汎用的なモデルに容易になりうる可能性を持つことを示した。
- (5) Multi-yieldモデルを含め、ここで対象としているタイプの構成則は、より精度の高い応力比・ひずみ式やダイレイタンシー式が得られれば、容易に、塑性論に基づいた構成則の改良ができることを示した。

参考文献

- 1) 土木学会, 日本建築学会, 地盤工学会, 日本地震学会, 日本機械学会共編: 阪神・淡路大震災調査報告, 丸善, 1996.
- 2) 庄子幹雄, 松本喬, 鈴木輝一, 奥村聡: Multi-mechanism モデルによる液状化解析とその応用, 第1回地盤工学における数値解析法シンポジウム論文集, pp.217-222, 1986.
- 3) 鈴木輝一, 鄭京哲, Prevost, J.H.: 幾何学的非線形性を考慮した液状化解析による地盤側方流動の検討, 第9回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.979-984, 1994.
- 4) 鈴木輝一, 鄭京哲, 大保直人, 林寛: 鋼矢板リングを用いた液状化対策工法の評価検討, 土と基礎, Vol.43, No.7, pp.31-33, 1995.
- 5) Zheng, J., Ohbo, N., Suzuki, K., Suzuki, R., Mishima, N. and Nagao, K.: Analysis of results of centrifuge tests on seismic behavior of embankment, Proc. 1st Int. Conf. Earthquake Geotech. Engrg., Tokyo, pp.1069-1074, 1995.
- 6) Popescu, R. and Prevost, J. H.: Numerical class "A" predictions for models No.1, 2, 3, 4a, 4b, 6, 7, 11 and 12, Proc. Int. Conf. Verif. Numer. Proc. Analysis Soil Liq. Problems, Davis, pp.1105-1206, 1993.
- 7) Prevost, J.H.: A simple plasticity theory for frictional cohesionless soils, Soil Dynam. Earthquake Engrg., Vol. 4, pp. 9-17, 1985.
- 8) 鈴木輝一, 菅野高弘, 柳澤栄司: 初期構造異方性を有する砂の排水時せん断挙動特性, 土木学会論文集, No.481/III-25, pp.117-124, 1993.
- 9) 鈴木輝一, 菅野高弘, 柳澤栄司: 初期構造異方性を有する砂の排水時繰返しせん断挙動特性, 土木学会論文集, No.511/III-30, pp.89-98, 1995.

- 10) 鈴木輝一, 柳澤栄司: 初期横等方性を有する砂の構成則の定式化. 構造工学論文集, Vol.44A, pp.391-398, 1998.
- 11) Cubrinovski, M and Ishihara, K.: State concept and modified elastoplasticity for sand modelling, Soils and Foundations. Vol.38, No.4, pp.213-225, 1998.
- 12) Lee, K. L. and Seed, H. B.: Drained strength characteristics of sands, J. Soil Mech. Found. Div., ASCE, Vol. 93, No.SM6, pp. 117-141, 1967.
- 13) Prevost, J.H.: DYNAFLOW: A nonlinear transient finite element analysis program, Department Civil Engrg. Operation Research, Princeton University, 1981.
- 14) Kondner, R.B.: Hyperbolic stress-strain response, Cohesive soils, J. Soil Mech. Found. Div., ASCE, Vol.89, No. SM1, pp. 115-143, 1963.
- 15) 澁谷啓, 関村昌義, 小澤裕, 三田地利之: 各種地盤材料の応力-ひずみ関係の非線形フィッティングモデルの提案, 土木学会第51回年次学術講演会, pp. 488-489, 1996.
- 16) Prevost, J. H. and Keane, C. M.: Shear stress-strain curve generation from simple material parameters, J. Geotech. Engrg. Div., ASCE, Vol. 116, No. 8, 1990.
- 17) Griffiths, D.V. and Prevost, J.H.: Technical note on practical applications stress strain curve generation from simple triaxial parameters, Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech., Vol. 14, pp. 587-594, 1990.
- 18) 龍岡文夫, 澁谷啓: 地盤材料の広い範囲のひずみでの応力・ひずみ関係式について, 第26回土質工学研究発表会, pp. 537-540, 1991.
- 19) 林寛, 菅原俊幸, 本田満彦: 土の非線形応力-ひずみモデルに関する研究, 鹿島建設技術研究所年報, No. 38, pp. 155-160, 1990.
- 20) Iwasaki, T. and Tatsuoaka, F.: Effects of grain size and grading on dynamic shear moduli of sands, Soils and Foundations, Vol. 17, No. 3, pp. 19-35, 1977.
- 21) 兵藤英明, 東畑郁生, 石原研而, 鈴木弘二: 繰返し排水剪断による砂の硬化, 第25回土質工学研究発表会, pp. 465-466, 1990.
- 22) Popescu, R.: Stochastic variability of soil properties: data analysis, digital simulation, effects on system behavior, Ph.D. Thesis, Princeton University, 1995.

(2000年9月14日受付)