

3.3.10 地盤の三次元挙動評価技術の開発（その2）

目 次

(1) 業務の内容

- (a) 業務題目
- (b) 担当者
- (c) 業務の目的
- (d) 5カ年の年次実施計画
- (e) 平成14年度業務目的

(2) 平成14年度の成果

- (a) 業務の要約
- (b) 業務の実施方法
 - 1) 中間主応力の異なる場合の繰返し変形試験
 - 2) 二次元ハイブリッド要素モデルの提案
 - 3) FEMとDEMによる数値解析手法の検討
- (c) 業務の成果
 - 1) 中間主応力の異なる場合の繰返し変形試験
 - 2) 二次元ハイブリッド要素モデルの提案
 - 3) FEMとDEMによる数値解析手法の検討
- (d) 結論ならびに今後の課題
- (e) 引用文献
- (f) 成果の論文発表・口頭発表等
- (g) 特許出願，ソフトウェア開発，仕様・標準等の策定

(3) 平成15年度業務計画案

- (a) 平面ひずみ場における中間主応力の異なる条件化での砂供試体の繰返変形特性の評価
- (b) 二次元効果を考慮した盛土、構造物地盤系モデルの遠心模型振動実験
- (c) ハイブリッド要素法と通常の等方応力要素を用いた数値解析
- (d) 土の三次元挙動を評価するためのFEMとDEMによる数値解析手法の開発

(1) 業務の内容

(a) 業務題目 地盤の三次元挙動評価技術の開発（その2）

(b) 担当者

所 属	役 職	氏 名
独立行政法人防災科学技術研究所 特定プロジェクトセンター 実大三次元震動破壊実験施設利用プロジェクト 清水建設技術研究所 社会基盤技術センター Wayne State University (USA)	プロジェクトリーダー 主席研究員 Associate Professor	佐藤 正義 社本 康広 香川 崇章

(c) 業務の目的

E - ディフェンスでの地盤 - 構造物系実験における二、三次元の地震入力に対する地盤と構造物の耐震性能の革新的評価のため、土の三次元応力ひずみ関係モデルを開発するとともに、FEM と DEM の両者を考慮できる地盤の三次元挙動評価技術の開発を行う。すなわち、土の応力ひずみ関係は応力場に依存した明確な誘導異方性を有しているが、従来から提案されている土の繰返変形モデルは、簡単のため等方仮定のもとで作成されており、誘導異方性の効果を考慮することができない。ここでは、応力場に依存した土の力学特性に与える誘導異方性の影響を評価するための検討を行う。

- 1) 三次元応力場を再現した繰返し土要素の変形特性の評価
- 2) 中間主応力の影響を受ける土の応力ひずみ関係の表現
- 3) 土の三次元挙動を評価するための FEM と DEM による数値解析手法の開発

(d) 5 ヶ年の年次実施計画

1) 平成14年度：

中間主応力の異なる軸対称供試体の繰返し変形特性。

応力場の異方性を表現できる二次元のハイブリッド要素モデルの提案と妥当性の評価。

FEM用のパイロットプログラム作成とDEMによる数値解析手法の検討

2) 平成15年度：

平面ひずみ場における中間主応力の異なる条件化での砂供試体の繰返変形特性の評価。

二次元効果を考慮した盛土、構造物地盤系モデルの遠心模型振動実験の実施。

上記の実験結果に対して、ハイブリッド要素法と通常の等方応力要素を用いた数値解析結果の比較検討の実施。

FEMのテストプログラムとDEMによる数値解析用パイロットプログラムの作成

3)平成16年度：

液状化を伴う盛土、構造物地盤系モデルの遠心模型実験。

二次元のハイブリッド要素モデルの有効応力モデルへの応用とこれを用いた数値解析事例の検討。

異方応力状態の三主応力場での砂供試体の繰返変形特性の評価。

FEMとDEMによる数値解析用のプログラムの作成

4)平成17年度：

三次元異方応力場を表現できるハイブリッド応力ひずみ関係モデルの提案。

要素試験結果を用いた上記モデルの妥当性の検証。

等方応力モデルと提案した異方応力モデルの三次元FEM解析による比較。

FEMとDEMによる数値解析プログラムの実験との比較による検証と改良

5)平成18年度：

三次元応力場での振動実験の解析

上記の実験結果に提案モデルの妥当性の検証。

総合評価・改良を行う。

全体のまとめを行う。

(e) 平成14年度業務目的

中間主応力の異なる軸対称砂供試体の繰返し変形特性試験を実施し、主応力場の異なる異方応力場での砂の繰返し変形特性を明らかにする。

応力場の異方性を表現できる二次元ハイブリッド要素モデルを提案する。

FEM用のパイロットプログラムの開発と、構成則としてのDEMによる数値解析手法の検討

(2)平成14年度の成果

(a) 業務の要約

平成14年度は次の各項目を実施した。

- 1) 繰返し三軸試験装置を用いて、中間主応力の異なる場合の繰返し変形試験を行い、繰返し変形に与える中間主応力の影響を評価した。この結果、a)異方主応力場での繰返し変形試験における主応力方向の剛性はその方向の主応力に強く依存し、平均有効主応力では表現できない。b)繰返し変形に伴う砂供試体のせん断剛性のひずみ依存性は、平均有効主応力に依存する。ということが明らかになった。
- 2) 二つの等方要素を組み合わせることによって直交異方性を表現することのできる二次元ハイブリッド要素による応力ひずみ関係モデルを提案した。このモデルは、現実の地盤のように鉛直・水平の応力場が異なる場合に対して、合理的に対象となる主応力方向の剛性の違いを表現できることが明らかになった。

- 3) FEMに基づく三次元有効応力解析用のパイロットプログラムを作成した。また、DEM理論によるパイロットプログラムを試作し、複雑な粒子形状を取り扱えるDEM数値解析理論を取り纏めた。

(b) 業務の実施方法

1) 中間主応力の異なる場合の繰返し変形試験

a) 試験装置

試験に用いる装置は、繰返三軸試験装置である。繰返三軸試験装置は、円筒状の供試体に軸対象条件で拘束応力を加えられるもので、鉛直方向および側方から載荷できる機構を有する(図1)土質試験装置で、土質供試体の内部、鉛直および水平方向に対して独立に応力を加えることが可能なものを用いる。計測は、供試体の鉛直方向の軸ひずみと軸応力、供試体の水平方向の応力、供試体内の間隙水圧を独立に測定する。これらのパラメータを拘束条件として任意の方向に繰返し軸力を載荷することができる。

b) 実験材料

基本的な材料の応力 - ひずみデータを得ることを目的として、豊浦標準砂を用いる。

c) 供試体の作成と準備

三軸セル内で、方形のゴムメンブレンを供試体作成装置にセットし、真空で引くことによって方形を保つ。この状態で、50mm × 100mm の円筒形の土質供試体を所定の密度になるように空中落下法を用いて供試体を作成する。この後所定の値まで拘束圧を加え、供試体を自立させた後、供試体内の空隙をCO₂置換した後、脱気水を通水し飽和させる。

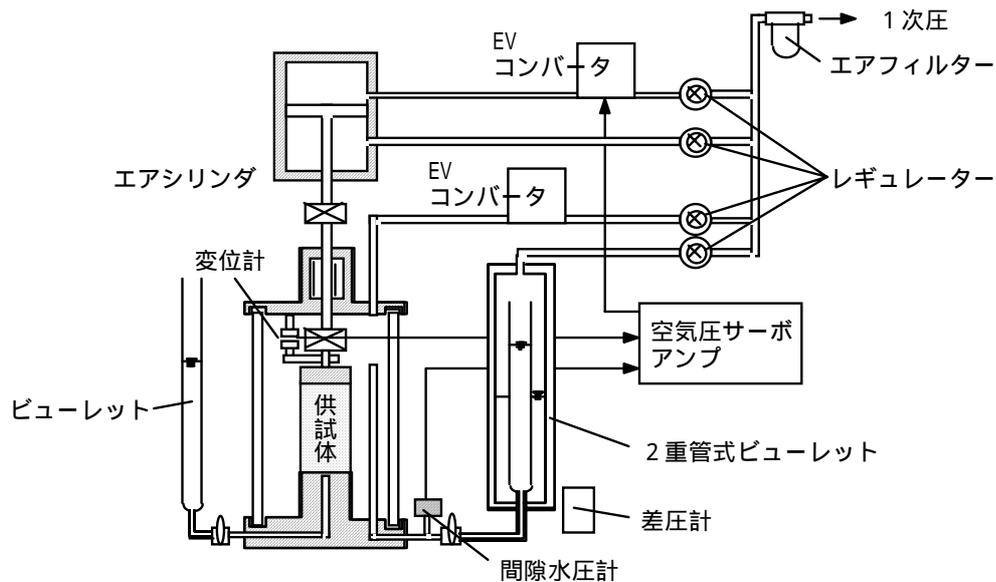
d) 試験方法

e)の各ケースに対応する拘束条件で1時間以上圧密し、供試体の圧密が終了していることを確認した後に、所定の繰返し応力で、繰返し軸応力を5回繰返す。繰返し応力を徐々に8～10段階増加させこれを繰り返す。繰返しの周期は100秒とする。

e)試験ケース

試験は以下に示す条件で、6ケース実施する。

ケース	試料	1(kPa)	3(kPa)	m(kPa)
Case3-1	豊浦砂	60	60	60
Case3-2		100	100	100
Case3-3		180	180	180
Case3-4		180	60	100
Case3-5		140	80	100
Case3-6		50	125	100



システム系統図(概念図)

図1 空気圧サーボ型繰返三軸試験装置システム系統図

2) 二次元ハイブリッド要素モデルの提案

土の変形特性は、載荷された方向の主応力の値に強く依存する誘導異方性を有している。しかしながら土の応力ひずみ関係をモデル化する場合、a)異方体としての特性が十分に明らかにされていない。B)モデルとして異方性を考慮できたとしても、現実の地盤に即したパラメータを設定することが困難、c)異方体のモデルを取り入れた一般性のある解析手法がないなどの理由から、等方体の応力ひずみ関係モデルを用いて数値解析を行うことが多い。そこで、剛性とポアソン比が異なる二つの等方弾性体を水平方向に重ね合わせ、鉛直方向のひずみが同一になり、水平方向のひずみが組み合わせた弾性体に分担させるように仮定することで、直交異方性を表現できる応力ひずみ関係モデルの解析解を導く。この解析解に基づいて土の応力ひずみ関係を表わす異方体モデルを提案する（詳細な内容は、業務の成果で述べる。）

3) FEMとDEMによる数値解析手法の検討

FEM用による三次元有効応力解析用のパイロットプログラム作成とDEMによる複雑な粒子形状を取り扱う数値解析理論の検討

(c) 業務の成果

1) 中間主応力の異なる場合の繰返し変形試験

図2は、今回実施した等方応力場における繰返しせん断試験の結果より求めたせん断ひずみと投下せん断剛性 G_{eq} の関係を示したものである。この図から明らかのように、拘束圧が増加するにしたがって初期せん断剛性（ひずみの小さい場合のせん断剛性）は増加することが分かる。図3は、等価せん断剛性を初期せん断剛性で除した剛性低下率とせん断ひずみの関係を示

したものである。拘束圧が低下するにつれて、剛性低下のひずみ依存性が顕著になっている。このことは砂の繰返し変形特性に対して、剛性低下率が 1/2 となるひずみ（規準せん断ひずみ）は拘束圧の平方根に比例するという従来の指摘と対応している。

図 4 は、平均主応力が 100kPa と同一で軸方向の応力が 60～180kPa に変化した場合の等価せん断剛性とせん断ひずみの関係を示したものである。平均主応力が一定であるにも関わらず、初期せん断剛性は、繰返し変形を与えた方向の軸力が大きいほど大きく、軸応力が 60kPa の場合に比べると軸応力が 180kPa の場合は 70%程大きな値を示している。このことは、静止土圧係数が 0.5 程度の軟弱地盤においては、鉛直と水平で無視できない程度の剛性の違いが生じていることを示している。図 5 は、図 3 と同様に剛性低下率とせん断ひずみの関係を示したものである。この図から明らかなように、平均主応力が一定ならば、剛性低下率のひずみ依存性は載荷方向の応力の大きさが異なっても同一である。したがって、異方応力場の繰返し変形特性を表現する場合、主応力方向の初期剛性の違いだけを考慮すればよく、剛性低下のひずみ依存性は、主応力の違いによらず、要素の繰返しせん断ひずみによって決定すれば良いことになる。

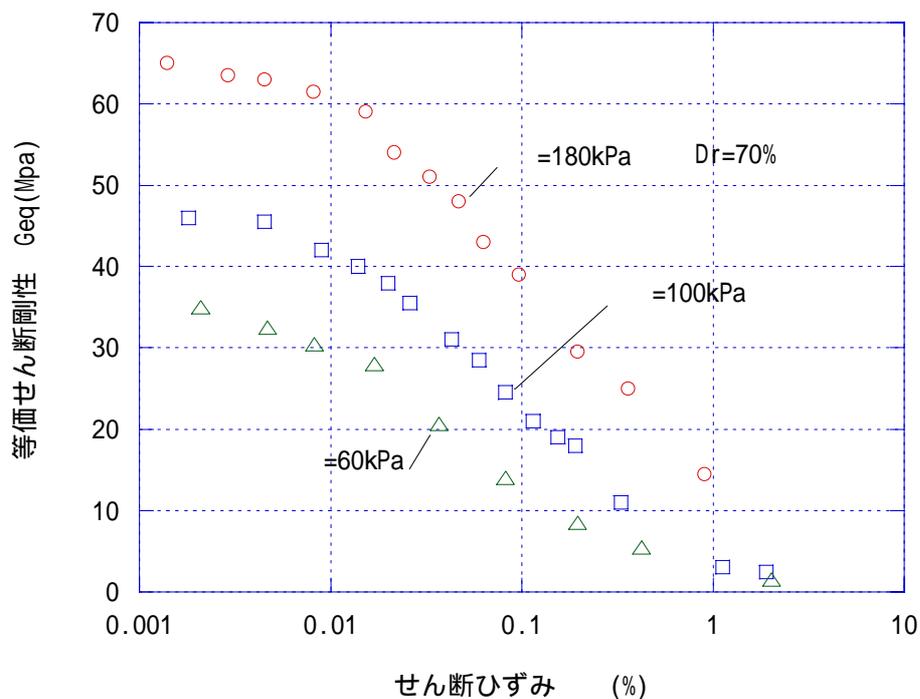


図 2 拘束圧の異なる攪乱攪乱砂の繰返し変形特性

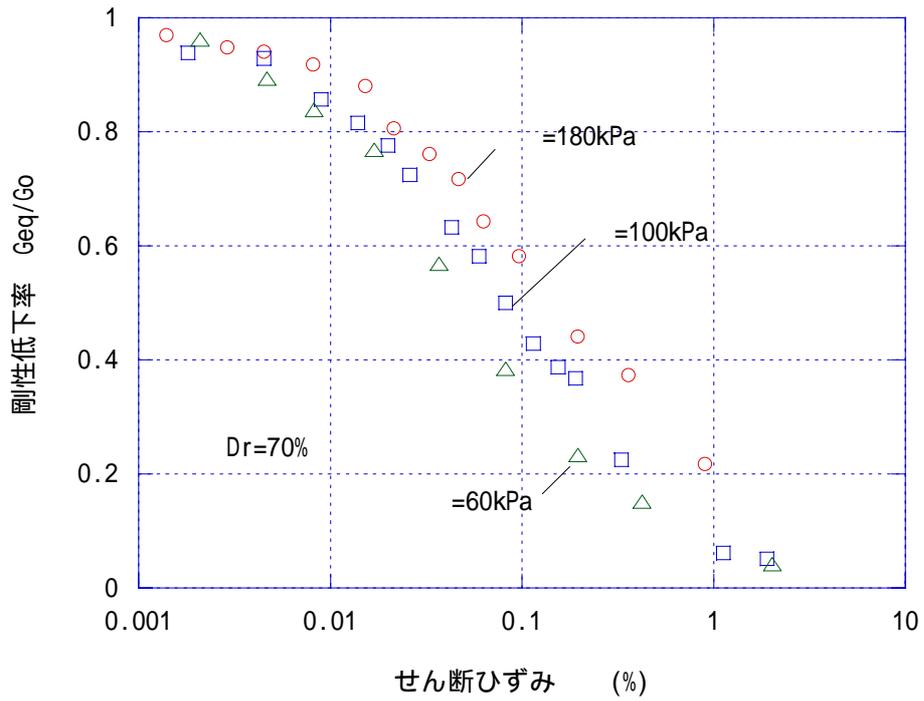


図3 拘束圧の異なる攪乱攪乱砂の剛性低下率とせん断ひずみの関係

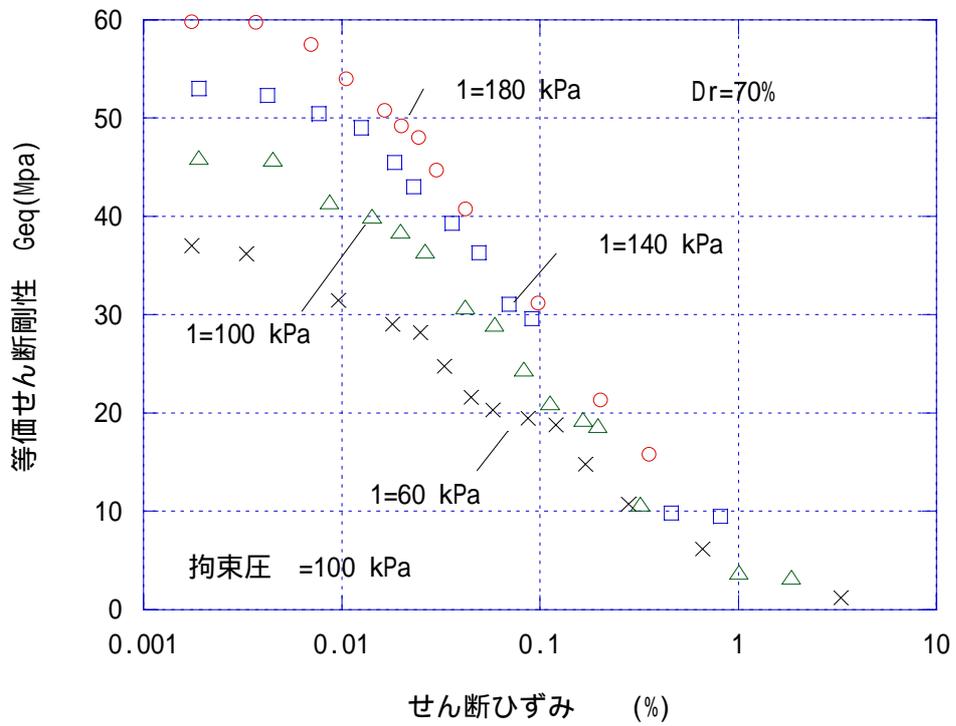


図4 異方応力場での砂供試体の繰返変形特性

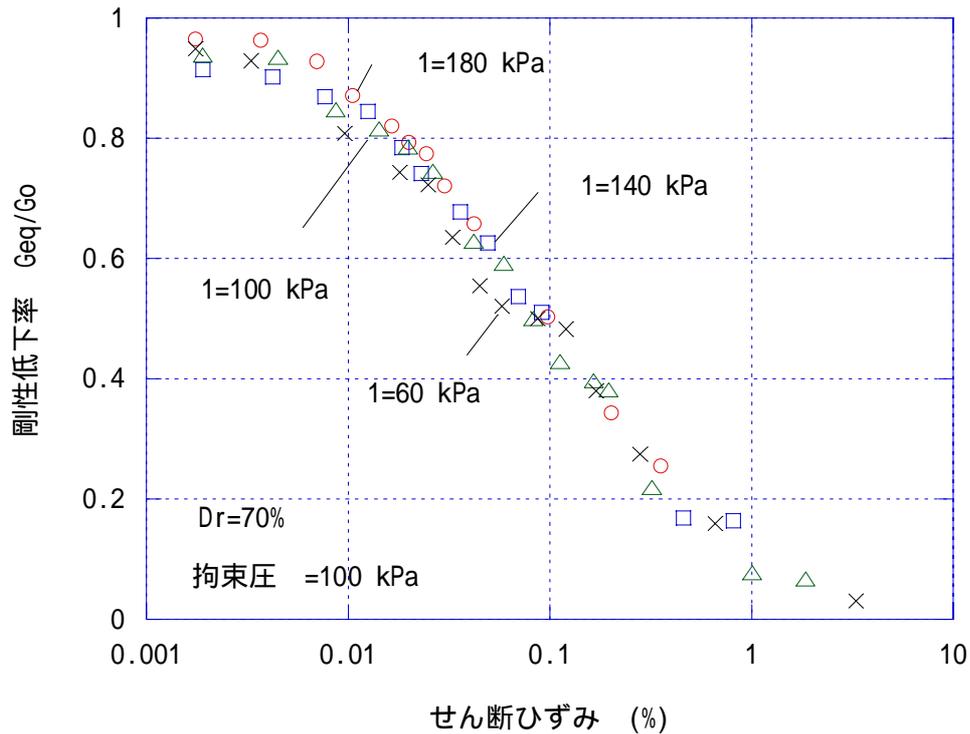


図5 異方応力場での砂供試体の剛性低下率とせん断ひずみの関係

図6は、図2、4の载荷方向の軸力と初期せん断剛性の関係を示したものである。図から明らかのように、等方応力場での供試体の初期せん断剛性と载荷方向の軸力(=拘束圧)の関係は、両対数軸上で直線関係である。平均主応力が一定の異方応力場の結果は、平均拘束圧が一定であるにも関わらず軸力に対応して剛性は増加し、両者の関係は両対数軸上で直線関係があることが分かる。

図7は、等方応力場の繰返し変形試験から得られた等価減衰定数 heq とせん断ひずみの関係を示したものである。従来の研究で私的されているように、拘束圧が低下するほどひずみが小さい状態で大きな履歴減衰が生じている。せん断ひずみみが0.3%をこえると等価減衰低下する傾向が見られるが、これはせん断に伴う砂のダイレイタンスの影響で、供試体内の過剰間隙水圧が低下し、応力ひずみ関係が逆S字のループを描く、サイクリックモビリティ現象が生じていることを示しているためである。

図8は、平均拘束圧が同一で载荷方向の軸力が異なる場合の繰返しせん断試験における等価減衰定数とせん断ひずみの関係を示したものである。異方応力場の繰返しせん断試験では、等方応力場と異なり、応力ひずみ関係のヒステリシスループが厳密に閉じないこともあって、等価減衰の評価が難しいためデータのばらつきが大きい。しかし、 heq と の関係は、载荷した方向の軸力の大きさによらずほぼ同一の値を示している。

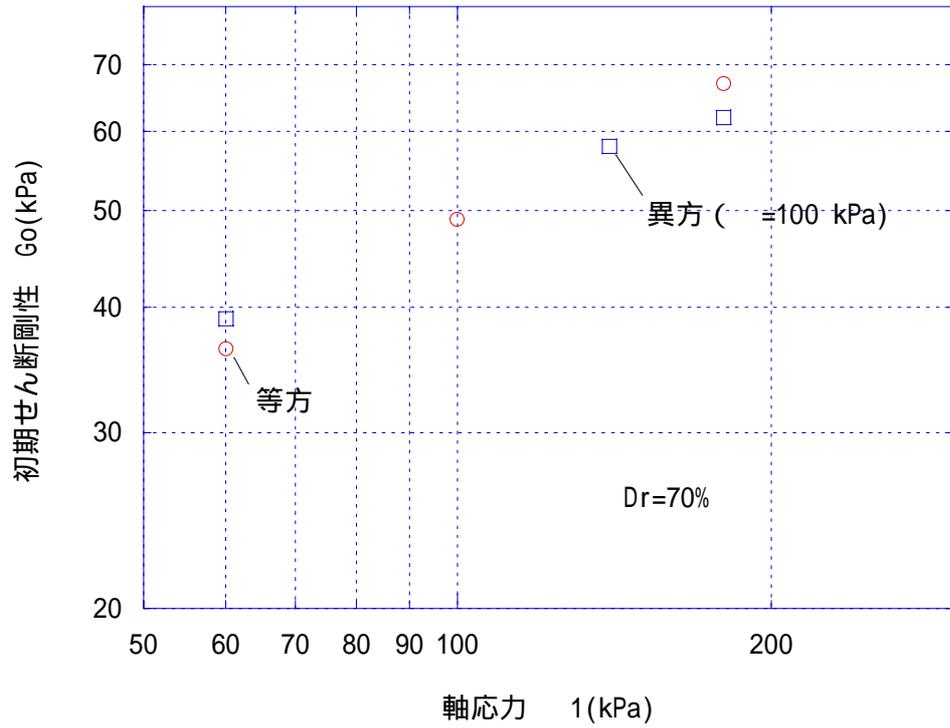


図6 異方・等方応力場での砂供試体の初期剛性と軸応力の関係

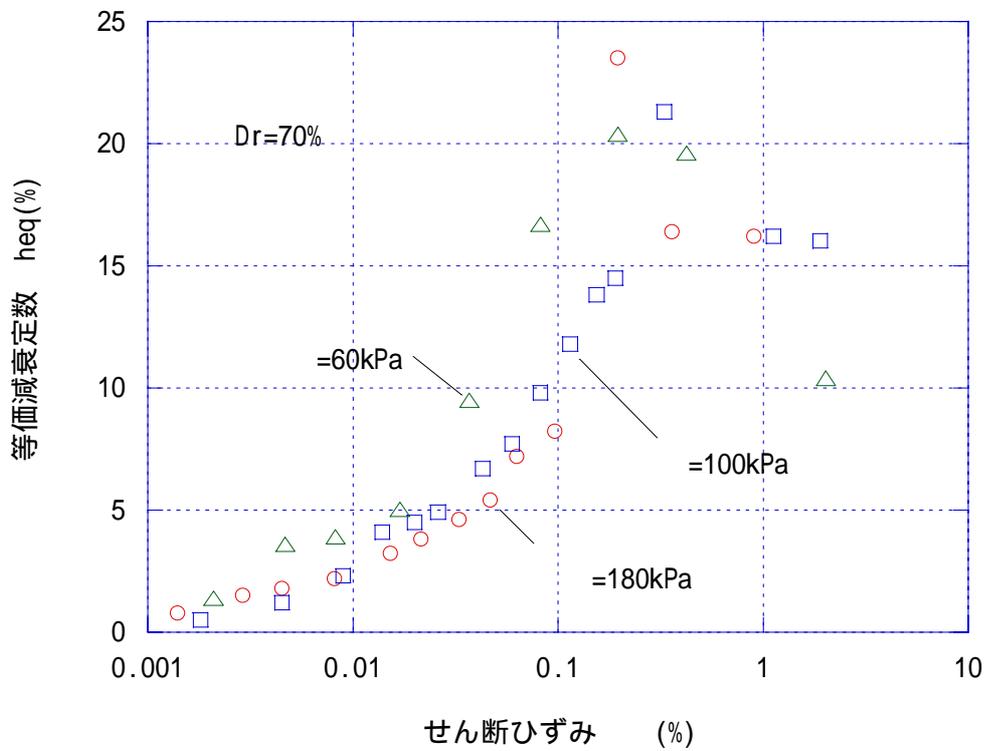


図7 等方応力場での砂供試体の等価減衰定数と軸応力の関係

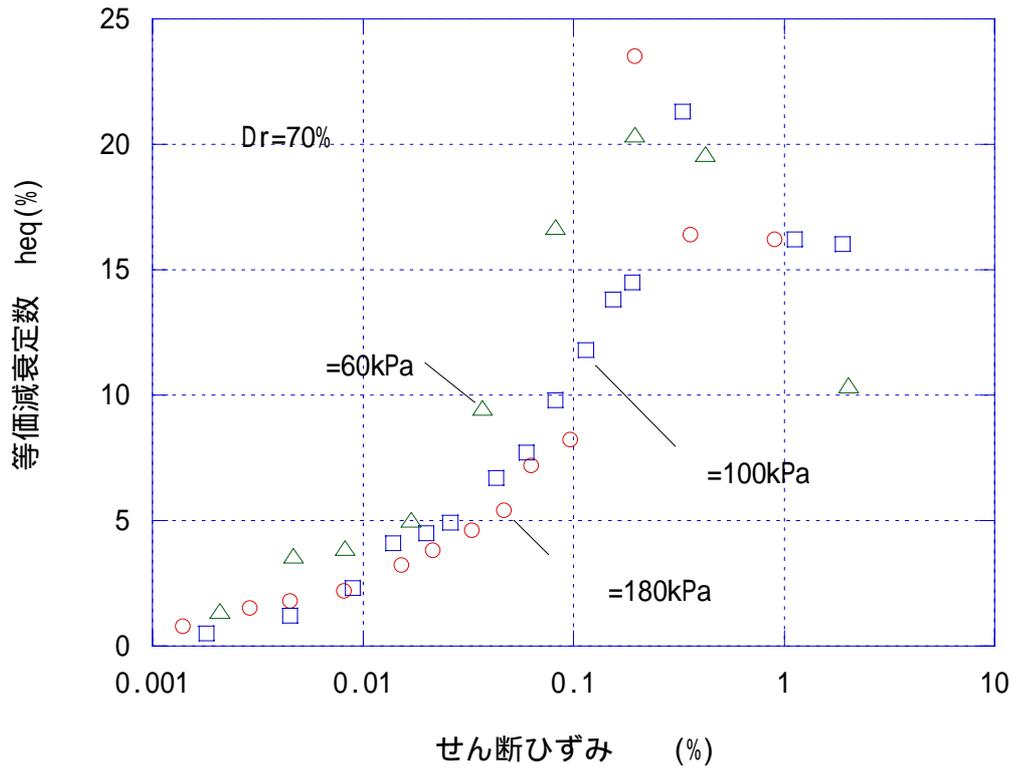


図8 異方応力場での砂供試体の等価減衰定数と軸応力の関係

2) 二次元ハイブリッド要素モデルの提案

a) ハイブリッド要素モデルの考え方

図1のような等方弾性体を考え面外方向の応力が一定（平面応力場）であるとすると、応力ひずみ関係は以下のように表わすことができる。

$$\varepsilon_{1a} = \frac{1}{E_a} (\sigma_{1a} - \nu_{1a} \cdot \sigma_{2a}) \quad (1)$$

$$\varepsilon_{2a} = \frac{1}{E_a} (-\nu_{1a} \cdot \sigma_{1a} + \sigma_{2a}) \quad (2)$$

$$\varepsilon_{1b} = \frac{1}{E_b} (\sigma_{1b} - \nu_{1b} \cdot \sigma_{2b}) \quad (3)$$

$$\varepsilon_{2b} = \frac{1}{E_b} (-\nu_{1b} \cdot \sigma_{1b} + \sigma_{2b}) \quad (4)$$

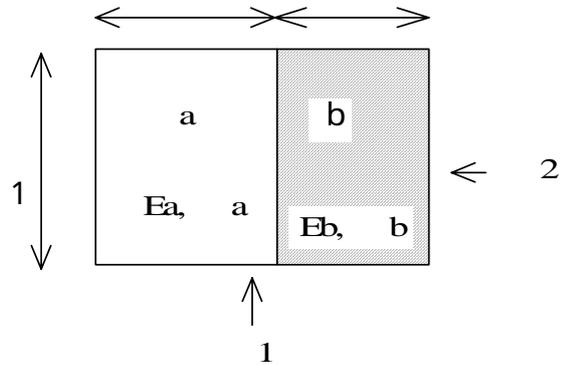


図9 ハイブリッド要素

ここで、 E_a 、 E_b はそれぞれの要素の弾性定数、 ν_a 、 ν_b はポアソン比である。図1の二つの要素を一つの要素と見なして鉛直および水平のひずみをそれぞれ ε_1 、 ε_2 とすると、次式のように表わすことができる。

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{1a} = \varepsilon_{2a}, \quad \varepsilon_2 = \alpha \cdot \varepsilon_{2a} + \beta \cdot \varepsilon_{2b}, \quad \alpha + \beta = 1 \quad (5)$$

式(1)～(4)を式(5)へ代入し、整理すると次式のように表わすことができる。

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E_o} \{ \sigma_1 - \nu_o \cdot \sigma_2 \} \quad (6)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{E_o} \{ -\nu_o \cdot \sigma_1 + k \cdot \sigma_2 \} \quad (7)$$

$$E_o = \alpha \cdot E_a + \beta \cdot E_b \quad (8)$$

$$\nu_o = \alpha \cdot \nu_a + \beta \cdot \nu_b \quad (9)$$

$$k = \left\{ (\alpha - \beta)^2 + \alpha\beta \left(\sqrt{\frac{E_b}{E_a}(1-\nu_a)} + \sqrt{\frac{E_a}{E_b}(1+\nu_b)} \right) \left(\sqrt{\frac{E_b}{E_a}(1-\nu_b)} + \sqrt{\frac{E_a}{E_b}(1+\nu_a)} \right) \right\} \quad (10)$$

式(5)～(10)から明らかなように、このモデルでは、通常の弾性体のモデルに対して、水平方向の剛性が $1/k$ に低下することと等価になっている。また要素 a, b のポアソン比を同一にしてもモデル上の制約にはならないことがわかる。このような条件の場合、式(5)、(6)で示した E_o 、 ν_o 、 k から E_b/E_a を以下のように求めることができる。

$$\frac{E_b}{E_a} = \left(\frac{\sqrt{t} + \sqrt{t-4}}{2} \right)^2, \quad t = \frac{1}{\alpha\beta} \left(1 + \frac{k-1}{1-\nu_o^2} \right) \quad (11)$$

式(7)および(11)から、水平方向と鉛直方向の剛性比を任意に変化させた状態に対応する図9のハイブリッド要素の剛性を算定することができる。以上の検討は要素モデルを弾性体として検討したものであるが、文献^{1,2)}のような考え方を導入することでせん断に伴うダイレイタンスーを考慮した静的な応力ひずみ関係の表現が可能である。また初期条件として上記の考え方を導入することにより地盤の異方性の効果を等方仮定の応力ひずみ関係モデルを用いた地震応答解析に取り入れることができる。

b) 直交異方条件が数値解析結果に与える影響

図10は、式(6)～(11)を用いて、鉛直方向と水平方向の剛性比に対する E_b/E_a の値を求めたものである。両者の関係はポアソン比の違いによる大きな変化はない。静止土圧係数が0.5の沖積地盤を考えると、鉛直方向と水平方向の地盤の剛性比 E_h/E_z は、拘束圧の平方根にほぼ比例する¹⁾から約0.7である。この状態をハイブリッド要素で表現すると、図10からポアソン比を.3として $E_b/E_a=0.28$ となる。

図11は、 $E_b/E_a=0.28$ として水平方向に変位が生じないように鉛直荷重を増加させた場合の水平方向の応力の増加を示したものである。図中に等方体を用いた場合の結果を一点鎖線で示してあるが、異方性の効果を考慮しないと、側方の応力が約50%大きくなることがわかる。式(7)から明らかなように、変位を拘束しない場合、両者の変位は同一なので、等方仮定をすると鉛直変位が水平方向に過大な影響を与えることになる。図3の鎖線は、鉛直変位が異方体と同じ値になるように等方体のポアソン比を低減した場合の水平方向の応力を示したものである。この場合は、異方体の応力に近づくが、鉛直荷重による水平方向の変形も抑制されてしまい変形性状を妥当に評価できなくなる問題点を回避することができない。

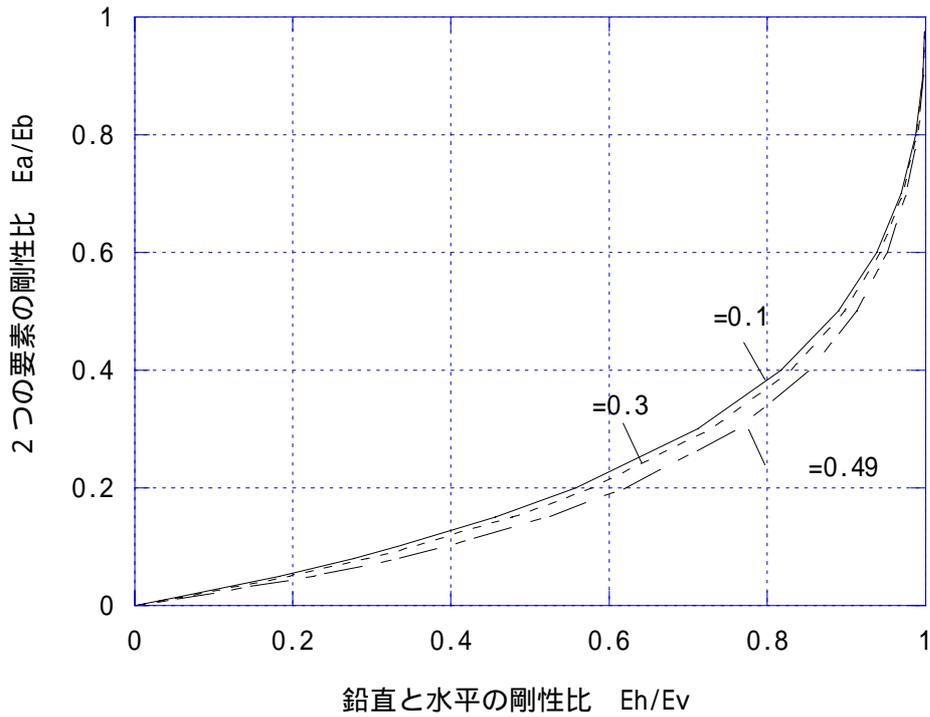


図 10 鉛直水平の剛性比とモデルの剛性比の関係

図 12 は、図 11 と同一の条件で E_b/E_a を変化させた場合の変化を示したものである。 $E_b/E_a=1.0$ は等方体と同一である。 E_b/E_a の値が 1 に近づくにしたがって等方体に近づく様子が伺える。図 2 を参照すると、 E_h/E_z が 0.8 以下の状況では等方体と仮定することで、側方応力に対する無視できない影響があることがわかる。

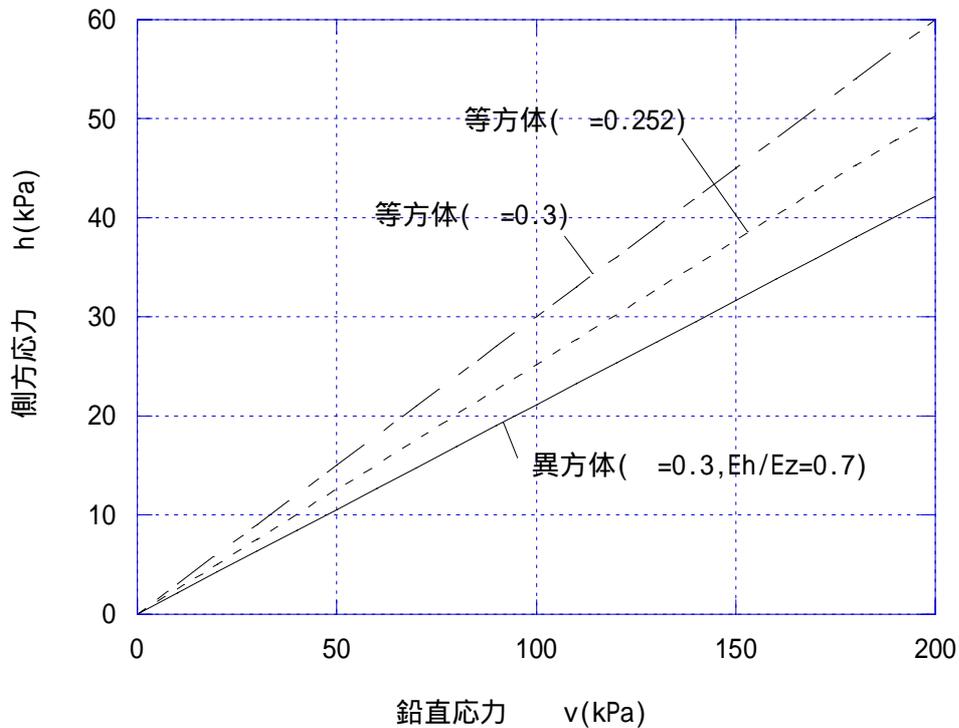


図 11 異方体と等方体の水平方向へ与える影響

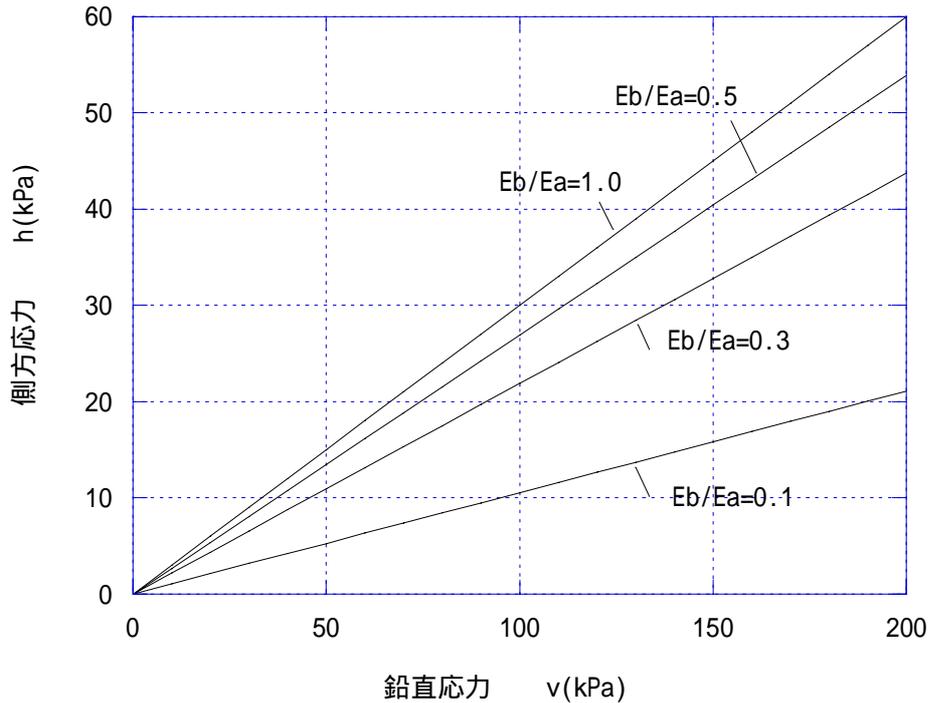


図 12 Eb/Ea の違いによる水平方向への影響度

3) FEMとDEMによる数値解析手法の検討

a) FEM 有効応力解析のためのパイロットプログラム開発

巨大地震が地盤や構造物に及ぼす影響を評価することを目的として、DEM を構成則として用いることのできる FEM をベースとした有効応力解析法の開発を始めた。この解析法の特徴は、破壊あるいは破壊に近い状態での地盤・構造物の地震応答を正しく評価するために、大変形・大歪理論を用い、大歪解析に適した DEM を構成則の一つのオプションとして用いることである。そこで、今年度は、DEM を構成則として用いることのできる、大変形・大歪を評価することのできる FEM 理論を整理し、それに基づくパイロットプログラムを試作した。

FEM 理論に基づくパイロットプログラムの作成にあたって、有効応力解析の基本関係式として以下を用いることにした。

基本関係式 - 1：応力勾配は作用する外力の変化によって生じる。

基本関係式 - 2：間隙水の流速は間隙水に作用する圧力勾配で表される。

基本関係式 - 3：間隙物体の体積変化は、土粒子構造の体積変化・土粒子自体の体積変化・間隙水および空気の体積変化の総和である。

これらの基本関係式を、例えば微小歪を仮定して表すと、以下の 3 式がえられる。

$$\mathbf{L}\boldsymbol{\sigma} + \rho\mathbf{g} = \rho\ddot{\mathbf{u}} + \rho_f\dot{\mathbf{w}} \quad (12)$$

$$\nabla p + \rho_f \mathbf{g} = \mathbf{k}^{-1} \dot{\mathbf{w}} + \rho_f \ddot{\mathbf{u}} + \frac{\rho_f}{n} \ddot{\mathbf{w}} \quad (13)$$

$$\nabla^T \dot{\mathbf{w}} = -\mathbf{m}^T \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} + \frac{1}{K_V} \dot{p} + \frac{1}{3K_S} \mathbf{m}^T \dot{\boldsymbol{\sigma}} \quad (14)$$

ただし、式(12) ~ (14)で用いた物理量の定義は以下のとおりである。

$$\boldsymbol{\sigma} = \bar{\boldsymbol{\sigma}} + \mathbf{m} p$$

$$\boldsymbol{\sigma}^T = (\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}) = \text{全応力ベクトル}$$

$$\bar{\boldsymbol{\sigma}}^T = (\bar{\sigma}_{xx}, \bar{\sigma}_{yy}, \bar{\sigma}_{zz}, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}) = \text{有効応力ベクトル}$$

$$\mathbf{m}^T = (1, 1, 1, 0, 0, 0)$$

p = 間隙圧

$$\boldsymbol{\varepsilon}^T = (\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}) = \text{歪ベクトル}$$

K_S, K_V = 土粒子、及び間隙物体の平均体積剛性係数

ρ, ρ_f = 土粒子、及び間隙物体の平均質量密度

\mathbf{u} = 土粒子の平均変位ベクトル

\mathbf{w}/n = 間隙物体の平均変位ベクトル

\mathbf{g} = 物体力

\mathbf{k} = 透水係数行列

\mathbf{L} = 偏微分係数行列

式 12)は間隙物体を含めた力の釣合式で、式 13)は Darcy の流れの法則を表している。式 14)は間隙物体の質量保存則である。式 12) ~ 14) で完全飽和状態を仮定し、間隙水の加速度 $\ddot{\mathbf{w}}$ を無視すれば、よく用いられている u - p 定式化が得られる。また、式 12) ~ 14) から $\ddot{\mathbf{w}}$ を無視せずに p を消去すれば、さらに厳密な u - w 定式化がえられる。

本研究開発では、大変形・大歪を用いた動的解析を行うことのできるパイロットプログラムの理論として、TL (Total Lagrangian) および UP (Updated Lagrangian) による定式化を用いた。基本的には、両者とも大変形・大歪を正しく評価することができる。したがって、用いる構成則が妥当であれば、同じ結果が得られる。両者の大きな違いは、TL 法では応力・歪を変形前の物体形状を基準として表すのに対して、UP 法では変形状態にあるその刻々での物体形状を用いて表す。数値計算効率では、普通 UP 法が優っている。今年度は、TL 法・UP 法を土粒子集合体のみ (即ち、間隙物体が空気のみの場合) の釣合式に適用しパイロットプログラムを試作した。つまり、式 12)を用いて間隙物体のない場合の大変形・大歪解析ができるプログラムを作成した。来年度に、間隙物体の

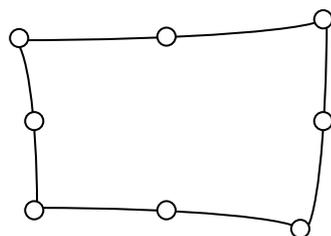
釣合式をもパイロットプログラムに導入する計画である。試作に当たっては、NONSAP を土台とした。

14 年度作成した大変形・大歪解析を行なえるパイロットプログラムは、二次元 (2-D) 及び三次元 (3-D) 解析が可能であるが、構成則は簡単なものに限られている。しかし、ユーザーが提供する構成則モデルが簡単に導入できるプログラム構造になっている。下表にパイロットプログラムの性能をまとめた。

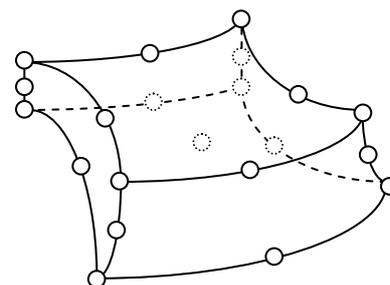
定式化	等方線形	von Mises 弾塑性	Drager-Prager 弾塑性	ユーザーモデル
微小歪	2-D、3-D	2-D	2-D	
TL 法	2-D、3-D	2-D		2-D、3-D
UL 法	2-D、3-D			2-D、3-D

二次元解析では、図 13 に示す 8 節点要素 (節点数は 4 ~ 8 の間が可) が使え、軸対称・平面歪・平面応力状態の静的及び動的解析ができるようになっている。また、三次元解析では、21 節点要素 (節点数は 8 ~ 21 の間が可) を用いた静的及び動的解析ができる。いずれの場合にも、解析モデルの振動特性を評価できるように固有値解析ができるようにした。

大変形・大歪解析の一例として von Mises 弾塑性モデルを用いて、土要素の平面歪状態での圧縮試験のシュミレーションを行った。



8 節点要素



21 節点要素

図 13 パイロットプログラムにおける要素モデル

図 14 は解析モデルの要素分割である。縦 0.4、横幅 0.2 であって、底面の三つの節点は固定とし、上面に更に二つの剛な要素を接合し、この剛な要素を介して鉛直下向きに載荷した。各要素の構成則である von Mises 弾塑性モデルの定数は以下の通りとした。

微小歪でのヤング係数 = 10000.0
 ポアソン比 = 0.35
 一軸圧縮強度 = 100.0
 降伏後のヤング係数 = 300.0

図 14 に、計算より得られた土要素に対する応力・歪を示した。当然のことながら、歪が比較的小さい時は、二つの定式化の結果はほぼ同じであるが、歪が大きくなるとかなり違った結果となっている。来年度に、いろんなケースについて比較検討をおこなう予定である。

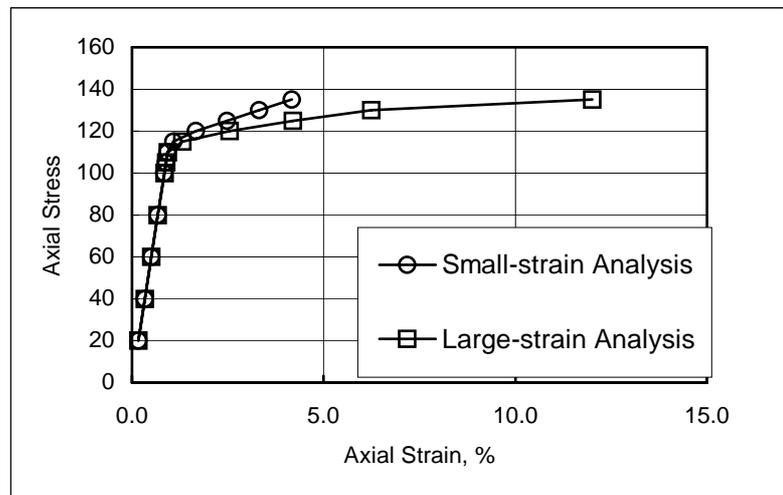
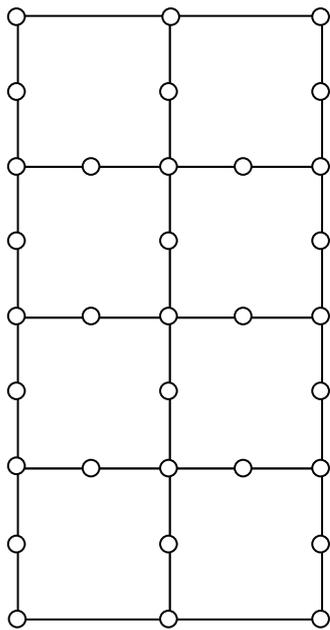


図 14 微小歪解析と非線形歪解析との比較の一例

b) DEM 理論による数値解析法の検討

地盤や構造物に与える影響を正しく評価するためには、地盤や構造物の動的破壊挙動について線形領域をはるかに越えた非線形・大歪領域で評価することが必要となる。そこで、大変形・大歪解析が可能な FEM のパイロットプログラムを作成した。このパイロットプログラムを用いて地盤 - 構造物の動的大变形・大歪解析をするためには、その定式化に適合した構成則が必要となる。土の構成則モデルは多くの研究者によって開発され、かなり複雑で高度なものがたくさん見られる。しかし、既存の土の構成則モデルは、基本的には微小歪を前提としている。そこで、大变形・大歪解析に適した DEM モデルを、土の構成則モデルの一つとして用いる可能性について検討することにした。少し簡単な一次元の地盤応答解析においては、既に DEM モデルを用いることに成功している (Tao 2000, Tao and Kagawa 2001)。下表に、DEM モデルを用いることの利点・問題点をまとめてみた。

DEM モデルの利点	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 数値計算過程が比較的簡単である ▪ 複雑な応力・歪履歴の影響を直接取り入れることができる ▪ 微小歪～大歪まで、同じ解法が使える ▪ ミクロ的なモデルであるので、粒子集合体のファブリックの変化等の情報が得られる ▪ 粒子表面の物理特性などを直接考慮することができる
------------	--

DEM モデルの問題点	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 粒子形状の単純なものしか現段階では使えない ▪ 接点での反力特性の単純なものしか現段階では使えない ▪ 実測データによるキャリブレーションがなされていない ▪ 計算時間がかかる
-------------	---

上表に見られるように、DEM モデルはミクロ的なモデルであるので、計算時間がかかる。また、構成則としてのモデル化の妥当性の検証が筆者達によって行われているのが現状である。しかし、DEM モデルは本質的に合理的なものであるため、今後、計算機性能の加速度的向上に伴って、頻繁に用いられるようになるであろう。本研究開発はその準備である。今年度は、DEM を構成則の一つとして、地震応答解析に用いる可能性を追求するために、DEM のパイロットプログラムを開発した。また、「複雑な粒子形状を扱うための手法」の検討を行った。

これまでに多くの研究者たちによって開発されてきた DEM は、簡単な粒子形状に基づいている。即ち、二次元解析では円・楕円が主であり、三次元解析の場合は球である。本研究で開発した DEM も球・楕円体をもちいた。これまでの研究で分かっていることは、球と楕円体（あるいは、円と楕円）を比べると、球は楕円体に比べて回転しやすく、せん断剛性やダイレイタンスが極度に小さくなる。我々の研究でも、球を用いる場合は回転をかなり拘束しないと、砂などのせん断特性に近い結果が得られないことが明らかとなっている。一般に、粒子形状が球に比べて歪になると、粒子の特定方向の回転抵抗が他方向のそれに比較して著しく大きくなり、粒子全体のせん断抵抗に大きく影響するものと考えられる。

砂などの複雑な形状をした粒子形状を数式である程度表すことは可能である。例えば、砂粒の重心から砂粒表面までの距離を二重フーリエ級数に展開するなどである。しかし、砂粒形状やその表面特性の詳しい測定データがまだない現状であるので、厳密な粒子形状の表現ではなく、もっと大雑把なモデル化の方が計算時間短縮の上からも妥当であると思われる。

球を用いた場合の最大のメリットは、球同士が接しているかどうか簡単に判定できることである。したがって、接点で働く力も簡単に求められる。そこで、本研究では、砂などの複雑な粒子形状を、球の集合体 (cluster) として近似する方法をとることにした。Cluster を用いることは本研究が初めてではなく、Thomas と Bray が 2 ~ 3 個の円が接合したモデルを二次元解析で用いている。本研究では、これを更に重なる球の集合体を用いた三次元解析に発展させた。図 15 は、そのモデル化の例であり、これらを用いるための基礎理論を検討した。これらの粒子形状をもちいた実際の数値計算は来年度以降に行う予定である。

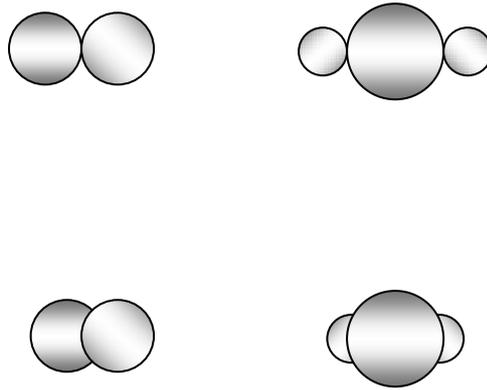


図 15 複雑な粒子形状のモデル化の例

(d) 結論ならびに今後の課題

- 1) 軸対称条件の異方応力場での繰返しせん断試験を実施した結果、以下の事実が明らかになった。
 - a) 繰返変形に伴う砂供試体の剛性は、平均主応力が同一の場合でも、載荷方向の主応力の大きさに強く依存する。
 - b) 繰返変形に伴う剛性低下のひずみ依存性は、異方応力場においても、平均主応力が同一であれば等しい。
- 2) 二つの等方体要素を組み合わせることで、直交異方性を示す異方体を表現することが可能であることを明らかにした。この考え方を導入することで、通常の等方体を用いた数値解析手法を用いて、異方体の効果を表現することができる。また鉛直および水平方向の応力の違いによる剛性の違いのために、沖積地盤では地盤変形の評価について、等方仮定を行うと無視し得ない影響がある。
- 3) 実際の地盤の変形予測のためには、この考え方に基づき、土の特性を考慮した非線形の応力ひずみ関係を構築する必要がある。また提案する考え方の妥当性および適用性を評価するために、要素レベルでは平面ひずみ条件での繰返しせん断試験、地盤全体での解析については模型実験との比較が必要である。
- 4) FEM 有効応力解析のベースとなる大変形・大歪解析が可能なパイロットプログラムを試作・開発した。また、構成則として使用可能な DEM 理論を纏め、球および楕円体を粒子として用いることのできるパイロットプログラムを試作・開発し、複雑な粒子形状を取り扱うための理論を検討した。

(e) 引用文献

- 1) 社本・浅香(1999)：せん断に伴う圧縮側のダイレイタンスーを考慮した簡易地盤変形モデル(その1) 応力～ひずみ関係モデルの提案、第34回地盤工学研究発表講演集、pp.1185-1186.
- 2) 浅香・社本・岩崎・時松(2001)：定ひずみ径路試験に基づく砂の応力ひずみ関係の

モデル化と排水三軸試験のシミュレーション、第 36 回地盤工学研究発表講演集、pp.465-466..

- 3) Tao, X. (2000). Numerical Simulation of Seismic Site Responses. Ph.D. dissertation, Civil Engineering, Wayne State University, Michigan.
- 4) Tao, X. and Kagawa, T. (2001). Numerical and Experimental Modeling of Seismic Site Responses, Proceedings, MiniSymposium on Geotechnical Earthquake Engineering, USNCCM, Michigan.
- 5) Thomas, P. A. and Bray, J. D. (1999). "Capturing Nonspherical Shape of Granular Media with Disk Clusters." Journal, Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 125, No. 3, 169-178.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

1) 論文発表

著者	題名	発表先	発表年月日
なし			

2) 口頭発表、その他

発表者	題名	発表先、主催、発表場所	発表年月日
佐藤正義 社本康広	ハイブリッドな有限要素を用いた異方応力ひずみ関係モデル	第 38 回地盤工学研究発表会、主催：地盤工学会 秋田	2003 年 7 月 (発表予定)

(g) 特許出願，ソフトウェア開発，仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2)ソフトウェア開発

名称	機能
なし	

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成 15 年度業務計画案

- (a) 平面ひずみ場における中間主応力の異なる条件化での砂供試体の繰返変形特性の評価
- 1) 繰返三主応力試験装置を用いて、中間主応力が異なる条件で平面ひずみ状態での繰返せん断試験を行う。
 - 2) 上記の結果を今年度実施した軸対象条件での実験結果と比較し、その特徴を分析する。
 - 3) 得られた試験結果に基づいて、ハイブリッド要素を用いた異方性を表現できる応力ひずみ関係モデルを構築し、要素試験結果との比較から提案モデルの妥当性を明らかにする。
- (b) 二次元効果を考慮した盛土、構造物地盤系モデルの遠心模型振動実験
- 1) 提案モデルの妥当性を評価するために、土の異方性の影響が見られると予想される盛土構造物および地下部に側壁を有する構造物の遠心模型振動実験を実施する。
 - 2) 上記の結果を(a)で提案した異方体および等方体の応力ひずみ関係モデルを用いた二次元 FEM による数値解析を実施し、上記の模型実験結果との比較を行う。
- (c) ハイブリッド要素法と通常の等方応力要素を用いた数値解析
- 1) (a)で提案した異方体および等方体の応力ひずみ関係モデルを用いた二次元 FEM による数値解析を実施し、(b)の模型実験結果との比較を行い、提案したモデルの適用性を確認する。
- (d) 土の三次元挙動を評価するための FEM と DEM による数値解析手法の開発
- 1) FEM のパイロットプログラムの作成・改良と検証を行う。15 年度は、大変形・大歪解析を動的有効応力解析のもとで行えるよう改良する。また、並列処理化のための準備と DEM を構成則として用いることが出来るように改良する。
 - 2) 平成 14 年度に作成した DEM による数値解析用パイロットプログラムを用いての数値実験を行う。また、複雑な形状をした粒子をもちいることの出来る DEM プログラムを作成・検証し、これを用いて数値実験を行う。