

粘性土のせん断挙動に関する要素シミュレーション

柴田 健司 西林 清茂
上野 孝之

Simulation of Element Test for Shear Behavior of Cohesive Soil

Kenji Shibata Kiyoshige Nishibayashi
Takayuki Ueno

Abstract

Various elasto-plastic models are suggested for deformation analysis of cohesive soils. The modified Cam-clay model is one of the most representative models. There are three input constants used for this model, and these can be determined readily from soil tests normally performed.

The authors therefore used a modified Cam-clay model for the elasto-plastic model and verified the model on analyzing the results of undrained triaxial compression tests. Next, using the same sample, the results of torsional shear tests were examined three-dimensionally, and the applicability of the modified Cam-clay model to three-dimensional analysis was studied. These analysis results simulate well the results of both of the element tests and it was succeeded in verifying that the model is very effective in three-dimensional analysis.

概 要

軟弱粘性土地盤の応力変形解析に対しては、様々な弾塑性構成モデルが提案されている。その中でも粘性土に対する修正 Cam-clay モデルは代表的なモデルの 1 つである。このモデルに用いる入力定数は 3 個であり、通常行なわれる土質試験から容易に求めることができる。

そこで、土の弾塑性構成モデルに修正 Cam-clay モデルを用いて、非排水三軸圧縮試験結果の検証を軸対称で行ない、モデルの検証を実施した。つづいて、同一試料を用いて行なった中空ねじりせん断試験結果の検証を三次元で実施し、修正 Cam-clay モデルの三次元解析への適用性を検討した。これらの解析結果は、両要素試験結果をよくシミュレートしており、三次元解析に非常に有効であることを検証することができた。

1. はじめに

土は土粒子構造骨格とその間隙を水や空気を満たされている 3 相混合体である。水や空気などの間隙流体が力学的に土粒子構造骨格と全く独立に運動する場合には、間隙流体の運動は土粒子構造骨格の運動を支配する外力系と独立であるから、土粒子構造骨格の応力-ひずみ関係を用いて土の応力変形解析を行なうことができる。しかし、間隙流体の運動が土粒子構造骨格の運動と独立ではなく、相互作用がある場合には間隙流体の存在により、土粒子構造骨格の力学挙動が拘束を受けることになる。従って、不飽和土のように間隙流体が水と空気の 2 相からなる場合には、実際取り扱いがきわめて困難なものとなるが、地盤が地下水面下の場合には、間隙流体が水のみである飽和土の問題となるため、2 相混合体の問題となる。この問題では支配方程式が最終的に多孔質な固体相と液相の連立となり、連成解析が必要となる。

粘性土地盤の応力変形解析に対しては、様々な弾塑性構成モデルが提案されている。その中でも粘性土に対し、Roscoe, Schofield 等を中心にして築き上げられた Cambridge 学派の修正 Cam-clay モデルは代表的なモデルの 1 つである。このモデルと間隙水の流れを連立させることにより、土と水の 2 相地盤の弾塑性連成解析を行なうことができる。従来、地盤の弾塑性連成解析は二次元平面ひずみ問題としてとらえてきたが、最近では実際問題に即した三次元解析の必要性が増加している。

この報告では土と水の 2 相系地盤への修正 Cam-clay モデルの適用性を検討するために、FEM 弾塑性有効応力解析により、非排水三軸圧縮試験結果の検証を軸対称で、つぎに修正 Cam-clay モデルの三次元解析への適用性を検討するために、中空ねじりせん断試験結果の検証を三次元で行ない、解析結果と試験結果を比較検討した結果について述べる。

2. 解析モデルおよび方法

2.1 修正 Cam-clay モデルの概念

三軸圧縮応力下の土の状態は図-1 に示す三次元空間 (p' , q , e) で表現できると考えられる。ここで、 p' は平均有効主応力 ($=(\sigma_a + 2\sigma_r)/3$, σ_a : 軸応力, σ_r : 側圧), q は軸差応力 ($=\sigma_a - \sigma_r$), e は間隙比である。図中の NCL は正規圧密曲線, OCL は膨潤曲線であり, 両曲線とも (e , p') 平面上にある。CSL は限界状態線と呼ばれ, 土の応力履歴, 排水条件, 試験方法のいかんにかかわらず, せん断ひずみが非常に大きくなった時点で p' , q , e は必ずこの線上に到達すると考えられている。

粘性土のせん断中の p' , q , e の値は, 図-2 に示す (e , p') 平面, Roscoe 面, Hvorslev 面で囲まれた空間内にあり, 空間より外にでることはできない。Roscoe 面は, 異なる圧密圧力の下で圧密された正規圧密粘土の非排水せん断試験を行なったとき得られる NCL と CSL を結ぶ曲面である。Hvorslev 面は, 過圧密粘土の非排水せん断試験を行なったとき得られる最大強度時の間隙比 e が等しい点を連ねた最大強度線により表される面である。この Hvorslev 面に, 限界状態線, Roscoe 面をつなぐことにより得られる曲面を限界状態面と呼ぶ。

修正 Cam-clay モデルでは OCL が弾性変形を支配するものと考え, OCL に立てた壁 (弾性壁) と Roscoe 面との交線を降伏曲線とみなしている。この降伏曲線を求めるために 3 つの仮定がなされ, それらを数式で表すと次式のようなになる。

$$\delta\varepsilon_v = \delta\varepsilon_v^e + \delta\varepsilon_v^p : \delta\varepsilon_s = \delta\varepsilon_s^p \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$p' \delta\varepsilon_v^p + q \delta\varepsilon_s^p = Mp' \delta\varepsilon_s^p \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\frac{\delta\varepsilon_s^p}{\delta\varepsilon_v^p} \cdot \frac{\partial q}{\partial p} = -1 \quad \dots\dots\dots(3)$$

これらの仮定より導かれる修正 Cam-clay モデルの降伏曲線は次式のような楕円となる。式(4)で用いられる未知の定数は λ , κ , M の 3 個であり, λ , κ , M は各々, NCL, OCL, CSL の傾きである。

$$\frac{p_0}{p} = \frac{M^2 + \eta^2}{M^2} \quad \dots\dots\dots(4)$$

2.2 解析方法

2.2.1 非排水三軸圧縮試験 解析はせん断ひずみ速度の異なる 2 種類について行なった。表-1 に入力定数を示す。試験では応力-ひずみ曲線, 有効応力経路の双方に顕著なひずみ速度依存性がみられる。従って最終強度を表す M は, 各々の非排水三軸圧縮試験結果より決定した。また, 弾性挙動を表す κ は, 圧密試験の除荷時, および再載荷時の OCL の勾配より決定した。

図-3 に非排水三軸圧縮試験の解析に用いた有限要素メッシュを示す。モデルの初期応力は等方応力状態とし, 側圧として 4.0 kgf/cm^2 の等分布荷重を与えた。せん断はモデル上部の鉛直方向に強制変位を与えた。

2.2.2 中空ねじりせん断試験 三次元解析の対象とした供試体は外径 7.0 cm , 内径 3.0 cm , 高さ 7.0 cm の中

空円筒形である。入力定数は表-1 中の解析ケース 1 の値を用いた。

図-4 に中空ねじりせん断試験の解析に用いた有限要素メッシュを示す。モデルの初期応力状態は等方応力状態とし, 内外圧として 1.0 kgf/cm^2 の等分布荷重を与えた。せん断はモデル上面の Z 方向の変位を拘束し, θ 方向に強制変位を与えた。

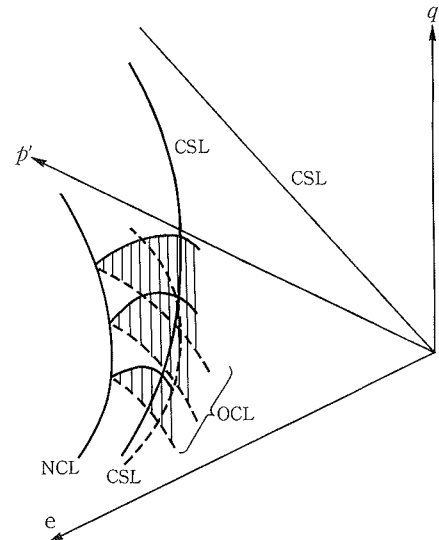


図-1 (p , q , e) 空間

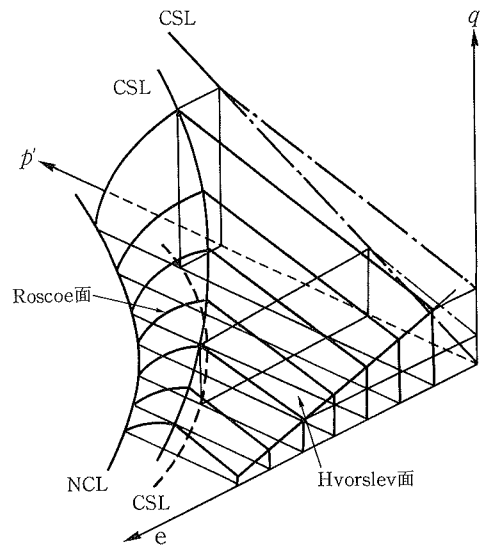


図-2 限界状態面

表-1 入力定数

解析ケース	λ	κ	M
1	0.0804	0.0081	1.45
2	0.0804	0.0101	1.2

3. 解析結果および考察

3.1 非排水三軸圧縮試験解析結果

図一五に応力～ひずみ関係、図一六に有効応力経路の解析結果と試験結果を示す。

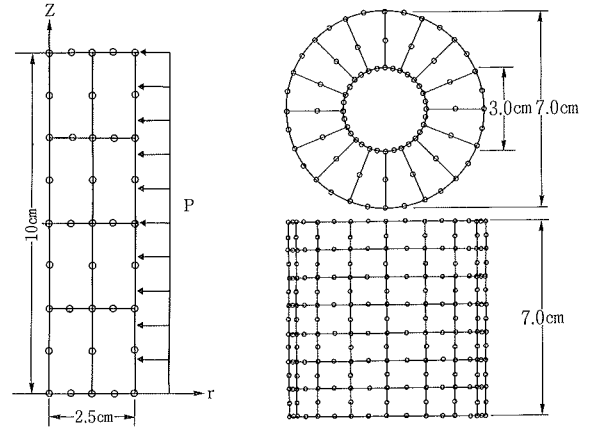
解析結果の応力～ひずみ関係、および有効応力経路は試験結果をよくシミュレートしている。しかし、修正 Cam-clay モデルでは土が限界状態に達した後、土は破壊して摩擦流体のように流れるという仮定を行なっているため、限界状態に達した後の応力～ひずみ曲線におけるひずみ硬化、および軟化を表現することはできない。試験結果の有効応力経路は CSL 付近で変曲点を持ち、変曲点以後の有効応力経路は軸差応力の増加とともに、平均有効主応力も増加する傾向がある。しかし、修正 Cam-clay モデルはせん断による体積減少を表すモデルであるため、このような有効応力経路の変曲点を表すことはできない。

解析結果の応力～ひずみ曲線は、 x の小さいほうが初期勾配が急で、 M の大きいほうが最終強度は大きくなっている。 x は粘性土の弾性変形を支配する OCL の傾きを表す定数であり、 M は粘性土の限界状態を表す定数であることから、この初期勾配、および最終強度に現れる差異はこれらの定数の大小によって生じていることがわかる。また、有効応力経路は発生する過剰間隙水圧に密接に関係しており、有効応力経路は全応力経路から発生する過剰間隙水圧だけ左方に移動した点の軌跡として得られるため、平均有効主応力が小さいということは、発生する過剰間隙水圧が大きいことを意味する。

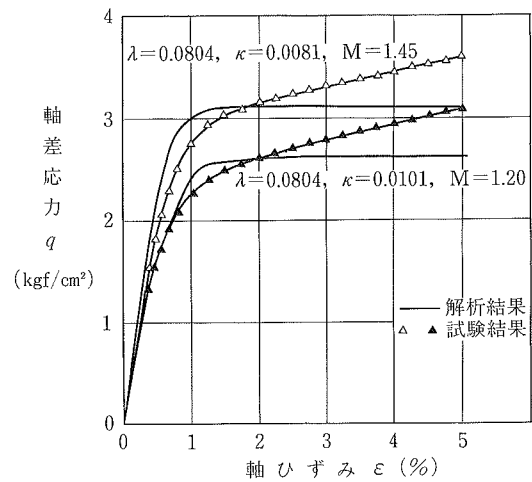
3.2 中空ねじりせん断試験解析結果

図一七は、モデル上部に与えた強制変位によって生じるモデル円筒外縁の変位分布 $r\delta\theta$ を中心軸に平行な面に投影したものである。解析による変位分布はねじりせん断試験で予想される下部から上部に向かうなめらかな変位分布をよくシミュレートしている。図一八は、図一七の各変形状態に対応する要素のせん断ひずみ分布を示したものである。両図から明らかなように、モデル上部に与えた強制変位が小さい領域では、変位は下部から上部に向かって直線的に増加し、発生したせん断ひずみも与えたせん断ひずみにほぼ等しい。しかし、モデル上部に与える強制変位が大きくなるに従って、発生するせん断ひずみ分布に乱れが生じ、モデル中央部で大きくなり、中央部からしだいに破壊が進行していくことがわかる。なお、破壊が進行するに従って、最上部要素と次の要素間で発生するせん断ひずみに変曲点がみられるが、その原因としては最上部要素が荷重による拘束を受け、解析上の理由によって、その下部要素よりも早く限界状態に達し、応力集中が起こったためと考えられる。

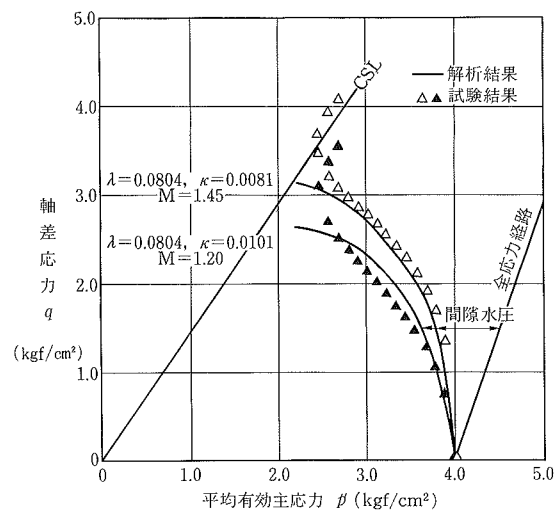
図一九は試験、および解析結果のせん断ひずみ γ と θ 方向のせん断応力 τ 、および過剰間隙水圧 Δu の関係を示したものである。せん断応力は、解析結果のほうが試験結果と比較して初期勾配は緩やかに立ち上がり、終局にお



図一三 有限要素メッシュ 図一四 有限要素メッシュ (中空ねじり)



図一五 応力～ひずみ関係 (三軸圧縮試験)



図一六 有効応力経路 (三軸圧縮試験)

いて若干小さくなっているが、ほぼ試験結果をシミュレートしている。また、過剰間隙水圧は、せん断ひずみ約 1% まで試験結果をほぼシミュレートしているが、せ

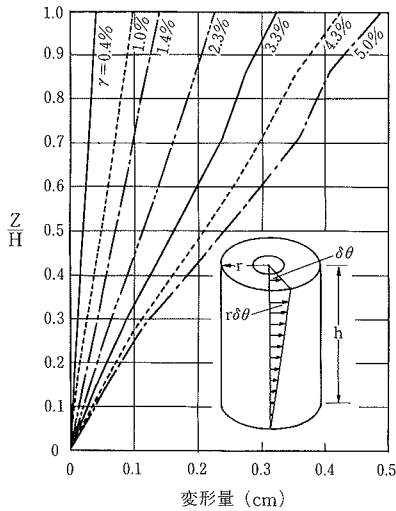


図-7 変位分布

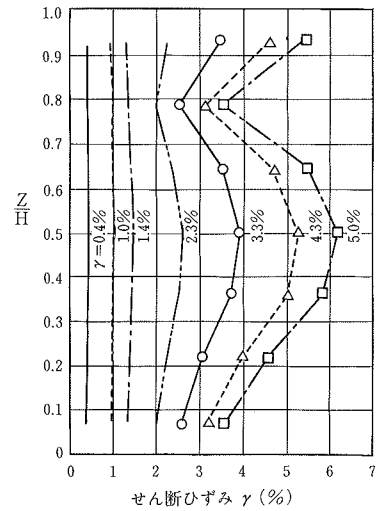


図-8 せん断ひずみ分布

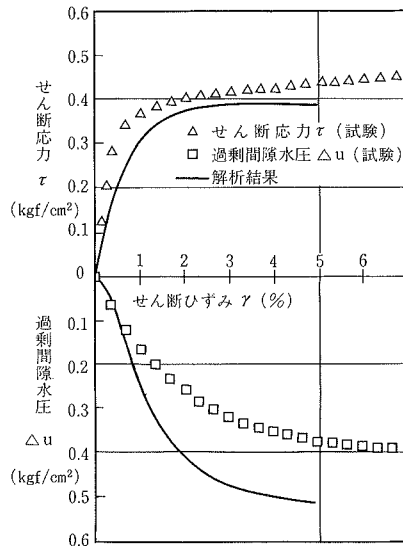


図-9 τ , Δu - γ 関係 (中空ねじりせん断試験)

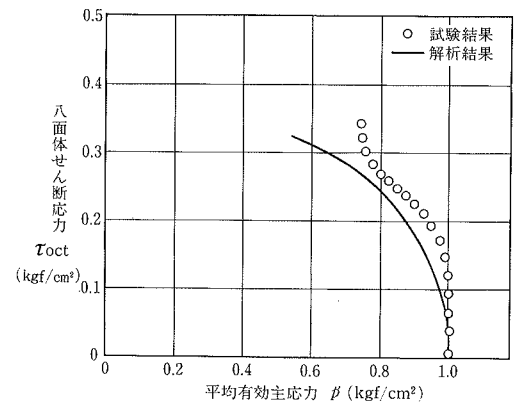


図-10 有効応力経路 (中空ねじりせん断試験)

せん断ひずみ 1% を越える領域から、解析結果のほうが試験結果よりも大きくなり始め、最終的な過剰間隙水圧は試験結果の約 1.3 倍と差が大きい。

図-10 は試験、および解析結果の平均有効主応力 p' と八面体せん断応力 τ_{oct} の関係を示したものである。解析結果の応力経路は試験結果と比較して初期勾配が緩やかであり、平均有効主応力に対する八面体せん断応力も若干小さくなっているが、平均有効主応力 0.75 kgf/cm^2 までは試験結果をほぼシミュレートしている。

このように、解析のせん断ひずみ分布、せん断応力、応力経路は試験結果をほぼシミュレートしていると考えられるが、過剰間隙水圧の最終的な値は試験結果よりも大きくなった。

4. まとめ

非排水三軸圧縮試験結果の検証を軸対称解析で、中空ねじりせん断試験結果の検証を三次元解析で試み、これ

らの解析結果は試験結果を比較的よくシミュレートできた。従って、二次元解析のみならず、三次元解析にも有効であることが検証された。

しかし、修正 Cam-clay モデルは限界状態に至るまでのひずみ硬化を、そして、せん断による体積減少を表すモデルであるので、限界状態に達した後のひずみ硬化、軟化、および限界状態付近のせん断による体積膨張を表すことはできない。

参考文献

- 1) 平間, 鳥井原, 山本: 三軸圧縮応力下における飽和粘性土の変形・強度特性について, 大林組技術研究所報, No. 31, p. 89~93, (1985)
- 2) 平間, 鳥井原, 山本: 各種応力状態における飽和粘性土のせん断強度特性について, 大林組技術研究所報, No. 32, p. 17~21, (1986)
- 3) 石原, 他: 土工学体系 8 土質力学, 彰国社