

# 非共軸 Cam-clay モデルを用いた盛土基礎地盤の 非排水変形挙動の評価

亀井 健史, 志比 利秀

高根大学総合理工学部 地球資源環境学科

## Evaluation of Undrained Deformation Behavior of Clay Foundation under Embankment Using Non-coaxial Cam-clay Model

Takeshi KAMEI and Toshihide SHIBI

*Department of Geoscience, Interdisciplinary Faculty of Science and Engineering, Shimane University*

### Abstract

Evaluating the magnitude of vertical and horizontal deformations of foundation plays an important part in many geotechnical engineering projects. Deformation analysis becomes increasingly important when embankments are constructed on soft grounds. The incorporation of a non-coaxial term into a constitutive equation has no effect on the instantaneous shear modulus for the normal stress difference, but makes the instantaneous shear modulus for the shear stress smaller. This paper examines the influence of incorporation of a non-coaxial term on the results of deformation analysis. As a result, strain localization was clearly formed in the ground using the non-coaxial model at an embankment height lower than that using the coaxial model.

### 1. はじめに

盛土を軟弱粘性土地盤上に築造する際には、盛土築造に伴う基礎地盤の変形挙動に留意する必要がある。すなわち、盛土高さが低く、基礎地盤に作用する盛土荷重が小さな盛立て開始直後には、地盤の鉛直方向変位はその水平方向変位と比較して大きくなっている。このような基礎地盤の変形挙動は圧密沈下現象が卓越した状態であり、地盤は安定な状態にあるものと考えられる。その後、盛土高さが高くなり基礎地盤に作用する盛土荷重が増加するに伴って、地盤内では圧密沈下現象より側方流動現象が卓越し、地盤は安定な状態から不安定な状態へと移行していくことになる。さらに盛土高さが増加すると、地盤内に変形の局所化が生じ、地盤はすべり面を伴って破壊に至る。したがって、地盤の変形挙動を早期に把握することは、盛土築造において重要な役割をなす。とくに軟弱粘性土地盤上に盛土を築造する場合には、軟弱地盤の変形挙動を早期に察知することが盛土築造の安全性を考える上で非常に有意となる。

有限要素法を用いた地盤の変形解析は、近年の計算機の高速度化や土の構成方程式の発達に伴って、構成方程式に用いる土質定数が精度よく得られれば、地盤の変状を工学的に十分な精度と時間で予測することができるよう

になってきた<sup>1), 2)</sup>。このような変形解析は、軟弱粘性土地盤上への盛土築造の施工管理などにおいて、極めて重要な情報となる。

粘性土の構成方程式の一つとしてCam-clayモデル<sup>3)</sup>がある。このモデルは、用いられる土質定数が他の構成方程式の場合と比較して4つと少ないこと、また粘性土の圧密・せん断挙動を工学的に十分な精度で表現できることなどから、地盤の変形解析に世界的によく用いられている。なお、このモデルは、土の限界状態の考えに基づいた弾塑性モデルであり、降伏関数の存在や流れ則等の仮定の上に構築されている。すなわち、このモデルは、塑性ひずみ増分の主軸と現在の応力の主軸が一致しており、いわゆる共軸性を有している。

一方、ひずみ速度の不連続に基づいたせん断帯形成に関する解析が行われており、せん断帯が形成されるときの応力状態やせん断帯の傾きなどについてこれまで議論されている<sup>4)~6)</sup>。その中で、共軸性を仮定した構成方程式を用いた場合には、せん断帯の傾きに関する解析結果と実験結果との間に違いが認められることが報告されている<sup>6)</sup>。また、塑性ひずみ増分に応力速度の影響を付加することによって生じる非共軸性は、せん断帯が形成される応力状態やその傾きに大きな影響を及ぼすことが明らかにされており、せん断帯形成に関する解析では非

共軸性を考慮した構成方程式を用いることの有意性が示唆されている<sup>4)~6)</sup>。

上記の点に着目し、本研究では、盛土築造に伴う基礎地盤の変形解析を実施し、構成方程式への非共軸性の導入が基礎地盤の変状予測に及ぼす影響について検討している。

## 2. 構成方程式

本研究では、粘性土の構成式としてCam-clayモデル<sup>3)</sup>とそのモデルに非共軸項を付加した非共軸Cam-clayモデル<sup>5)</sup>を用いる。なお、前者を、後者と比較して、共軸Cam-clayモデルと呼ぶこととする。

まず、Cam-clayモデルの降伏関数 $f$ は、次式で表される。

$$f = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \ln \frac{p'}{p'_0} + D\eta - v^p = 0 \quad (1)$$

ここで、 $p'$ と $p'_0$ はそれぞれ平均有効主応力と先行圧密圧力であり、 $\eta$ は $p'$ と一般化された偏差応力 $q$ の比を、 $v^p$ は塑性体積ひずみを表している。また、 $\lambda$ と $\kappa$ はそれぞれ自然対数表示による圧縮指数と膨潤指数であり、 $e_0$ は初期間隙比を表す。 $D$ はダイレイタンスー係数であり、限界状態での応力比 $M$ を用いて $D = (\lambda - \kappa) / \{M(1 + e_0)\}$ <sup>7)</sup>と表現できる。なお、 $p'$ と $q$ はそれぞれ次式で定義される。

$$p' = \frac{1}{3} \sigma'_{ii}, \quad q = \sqrt{\frac{3}{2} S_{ij} S_{ij}} \quad (2)$$

ここで、 $\sigma'_{ij}$ は有効応力であり、 $S_{ij}$ は $\sigma'_{ij}$ の偏差成分を表している。

共軸Cam-clayモデルの場合には、ひずみ増分 $d\varepsilon_{ij}$ の塑性成分 $d\varepsilon^p_{ij}$ は、この降伏関数 $f$ に対して、関連流れ則を適用することにより得られる。なお、 $d\varepsilon^p_{ij}$ は $d\varepsilon^p_{ij}$ の偏差成分を表している。

$$2d\varepsilon^p_{ij} = \frac{1}{h} \frac{S_{ij}}{\bar{\tau}} \left( \frac{S_{kl}}{2\bar{\tau}} d\sigma'_{kl} + \frac{1}{3} \bar{\beta} d\sigma'_{kk} \right) \quad (3)$$

$$d\varepsilon^p_{kk} = \frac{\bar{\beta}}{h} \left( \frac{S_{kl}}{2\bar{\tau}} d\sigma'_{kl} + \frac{1}{3} \bar{\beta} d\sigma'_{kk} \right) \quad (4)$$

ここで、 $d\sigma'_{ij}$ は有効応力の増分を表しており、 $\bar{\tau} = \sqrt{S_{ij} S_{ij}} / 2$ である。 $\bar{\beta} = (M - \eta) / \sqrt{3}$ は限界状態への隣接度を表す関数であり、 $h = (\bar{\beta} / \sqrt{3} D) p'$ は硬化係数を表す。このとき、共軸Cam-clayモデルの構成式は次式で与えられる。

$$d\sigma'_{ij} = \left\{ \left( \tilde{K} - \frac{2}{3} \tilde{G} \right) \delta_{ij} \delta_{kl} + \tilde{G} (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) - \frac{1}{G+h} \left( \frac{\tilde{G}}{\bar{\tau}} S_{ij} + \tilde{K} \bar{\beta} \delta_{ij} \right) \left( \frac{\tilde{G}}{\bar{\tau}} S_{kl} + \tilde{K} \bar{\beta} \delta_{kl} \right) \right\} d\varepsilon_{kl} \quad (5)$$

ここで、 $\tilde{K} = (1 + e) p' / \kappa$ と $\tilde{G} = 3(1 - 2\nu) \tilde{K} / \{2(1 + \nu)\}$ は、

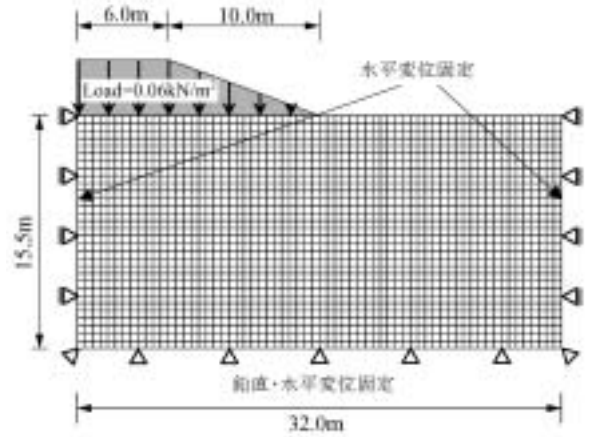


図-1 解析条件

それぞれ体積弾性係数とせん断弾性係数を表しており、 $\tilde{K} \bar{\beta}^2 + h$ を $\tilde{h}$ と置いた。

一方、非共軸Cam-clayモデルの塑性ひずみ増分は、共軸Cam-clayモデルの場合の塑性ひずみ増分に応力速度の影響を考慮した項（非共軸項）を付加することにより得られる。この場合、 $d\varepsilon^p_{kk}$ は共軸モデルと同様の式となるが、 $d\varepsilon^p_{ij}$ は次式によって表現される。

$$2d\varepsilon^p_{ij} = \frac{1}{h} \frac{S_{ij}}{\bar{\tau}} \left( \frac{S_{kl}}{2\bar{\tau}} d\sigma'_{kl} + \frac{1}{3} \bar{\beta} d\sigma'_{kk} \right) + \frac{1}{h_1} \left( dS_{ij} - \frac{S_{ij} S_{kl}}{2\bar{\tau}^2} dS_{kl} \right) \quad (6)$$

ここで、 $h_1 = (\bar{\beta} / \sqrt{3} A) p'$ は第2硬化係数を表す。また、 $A$ は非共軸パラメータと呼ばれ、非共軸性の程度を表している。 $A$ の増加に伴い非共軸性の程度が大きくなる。一方、 $A$ の減少に伴い非共軸性の程度も減少し、 $A = 0$ の場合には、非共軸Cam-clayモデルは共軸Cam-clayモデルと一致する。最終的に非共軸Cam-clayモデルの構成式は、式(5)において以下のように置き換えを行うことにより表現できる。

$$\tilde{G} \rightarrow \frac{h_1 \tilde{G}}{h_1 + \tilde{G}}, \quad \tilde{K} \rightarrow \frac{(h_1 - h) \tilde{K}}{h_1 - h - \bar{\beta}^2 \tilde{K}}, \quad (7)$$

$$h \rightarrow \frac{h_1 h}{h_1 - h}, \quad \bar{\beta} \rightarrow \frac{h_1 \bar{\beta}}{h_1 - h}$$

## 3. 解析条件

盛土築造に伴う粘性土地盤の変状予測を評価するために、図-1に示すような解析条件を設定した。本研究では盛土载荷に伴う粘性土地盤の短期安定問題、すなわち急速载荷試験を対象とした。軟弱粘性土層が深度0.5mから深度15.5mまでを占め、その下に基礎が存在するモデル地盤を考えた。なお、地表面から深度0.5mの範囲には砂層を弾性体 ( $E = 700 \text{ kN/m}^2$ ,  $\nu = 0.333$ )として設定するとともに、地盤を飽和状態と仮定した。軟弱粘性土地

盤の土質定数は梅田粘土の結果<sup>8)</sup>を用い(表-1)、透水係数 $k$ は塑性指数から決定した<sup>9)</sup>。また、現在までのところ、非共軸性の程度を表すために用いられる非共軸パラメータ $A$ に関する精度の良い実験結果は、ほとんど報告されていない。そこで、非共軸Cam-clayモデルに用いる非共軸パラメータ $A$ の値は、せん断帯形成理論<sup>5)</sup>、および分岐解析による数値実験結果<sup>10)</sup>に基づいて決定した。盛土築造過程は、1ステップ当り  $0.06\text{kN/m}^2$ の载荷速度で1080ステップまでとし、最終の盛土形状を盛土幅32m、盛土高さ3.6mに設定して解析を行った。

有限要素法は、微小変形理論のもとSandhu and Wilson<sup>11)</sup>の方法に従って定式化された。軟弱粘性土地盤は、土骨格の変形に関して8節点アイソパラメトリック要素を、間隙水圧に関して4節点のアイソパラメトリック要素を用いて、要素分割した。全要素数は1984個で、全節点数は6143個である。モデル地盤として、図-1に示すような盛土中央で左右対称となる地盤を対象とした。変形に関する境界条件は、盛土の中央と右側遠方境界において水平変位を固定とし、底面境界において鉛直・水平変位固定と仮定した。一方、水理境界条件は、盛土中

表-1 本解析に用いた土質定数<sup>5), 8), 9)</sup>

$\lambda$	=	0.231
$\kappa$	=	0.042
$\nu$	=	0.333
$e_0$	=	1.5
$M$	=	1.43
$A$	=	0.01 (0)*
$k$	=	$1.0 \times 10^{-9}$ (m/s)

\*共軸モデルの場合は $A=0$ , 非共軸モデルの場合は $A=0.01$ .

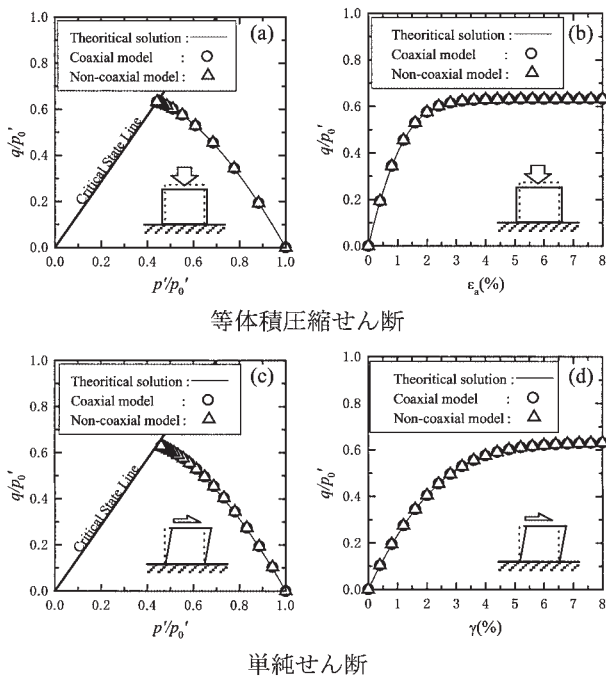


図-2 有限要素解析結果と理論解との比較

央で非排水とし、地表面、底面と右側遠方境界において排水とした。本解析で用いた有限要素プログラムの精度を検証するために、1要素による等体積圧縮せん断と単純せん断条件におけるの有効応力径路と応力-ひずみ関係を計算し、その理論解と比較した(図-2)。図より、本解析から得られる結果は十分な精度で理論解と一致していることがわかる。

#### 4. 解析結果および考察

共軸 Cam-clay モデル (以下、共軸モデルと呼ぶ) と非共軸 Cam-clay モデル (以下、非共軸モデルと呼ぶ) を用いた場合における盛土基礎地盤の変形解析結果をそれぞれ図-3、図-4に示す。なお、地盤の変状を明瞭に示すために変形量を3倍に拡大して図示した。

まず、共軸モデルの結果に着目する。盛土高さ2.4mの段階において、盛土中央底部の地表面は14cm程度沈下しており、水平方向の変位はほとんど認められない。地表面の沈下量は、盛土法肩直下付近までは中央から外側へと向かうにつれて僅かに増加している。最大の沈下は盛土中央部から外側に5m程度離れた位置で認められ、その沈下量は16cm程度であった。沈下量は盛土法肩直下から盛土法尻へと向かうにつれて減少し、盛土法尻では8cm程度の隆起が認められる。地盤内に側方流動現象は、あまり顕著に認められていない。つぎに盛土高さ3.6mに達すると、盛土中央底部の地盤は、鉛直方向下向きの変位(26cm)が卓越するが、盛土高さ2.4mの場合と同様に水平方向の変位はほとんど認められない。しか

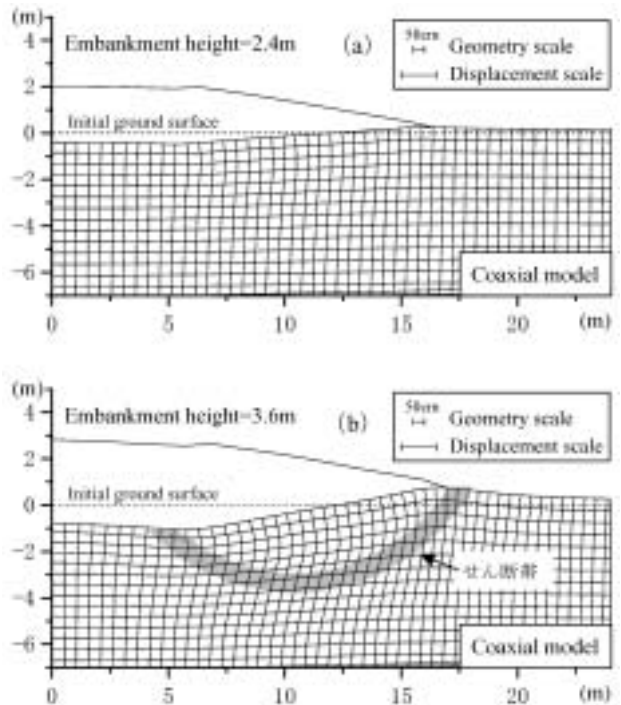


図-3 盛土基礎地盤の変形解析結果 (共軸 Cam-clay モデル)

しながら、盛土中央部から外側に 5m 程度離れた位置では、鉛直方向変位に加えて側方変位も発生していることがわかる。地表面の沈下量は、この付近において最大値 (35cm) となった。さらに基礎地盤の外側へと向かうのに伴って、鉛直方向の変位量は小さくなり、側方変位が卓越し始める。盛土中央から 12.5m 程度以上離れた盛土法尻付近では、鉛直方向変位は上向きに変化し、盛土法尻先端において最大の鉛直上向き変位 (25cm) が認められた。せん断変形が顕著に認められる領域 (正方形から平行四辺形に変形している要素が占める領域) は、盛土中央から 5m 程度離れた底部 (最大沈下量が認められる位置) から盛土外側に向かって下方に伸び、盛土中央から 10m 程度において深度 4m 程度に達している。さらにその領域は、盛土中央から遠ざかるのに伴って上方へと伸び、盛土法尻先端へと広がっている。すなわち、せん断変形が顕著な領域が円弧状に分布していることがわかる。この領域は、せん断帯と推察され、さらに载荷を続けると円弧状のすべり面を形成するものと考えられる。

非共軸モデルを用いた場合には、盛土高さ 2.4m の段階における盛土中央の沈下量 (14cm) や盛土法尻先端の隆起量 (8cm) は、共軸モデルの結果と比較して差が認められなかった。しかしながら、最大の鉛直方向変位が認められる盛土中央部から外側に 5m 程度離れた地表面の沈下量 (17cm) は、共軸モデルの結果と比較して僅かに大きな値になった。载荷が進行し盛土高さが 3.6m に達すると、非共軸モデルの結果においても沈下に加えて側方流動現象が顕著に認められており、得られた地盤の変状は共軸モデル用いた結果とほぼ一致している。その

結果、せん断変形が顕著に認められる領域が共軸モデルと同じ場所に円弧状に広がっている様子が確認できる。この領域に円弧状のすべり面が形成されるものと推察される。

ところで、土構造物の設計においては、地盤の変形量が大きい場合には安全側の評価を与えることになる。非共軸モデルを用いた場合には、共軸モデルを用いた場合と比較して、盛土高さ 2.4m での最大沈下量を大きめに評価しているが、この最大沈下量が発生する位置は、将来のすべり面の形成位置と近接していることから、その変形量は地盤の破壊現象と密接に関係している可能性が高い。したがって、非共軸モデルを用いた場合には、载荷の早い段階において、地盤に大きな変形量が認められることから、土構造物のより安全な設計へと繋がるものと考えられる。

粘性土は、その有効応力値が限界状態に達すると、摩擦性流体のごとく挙動する<sup>12)</sup>。そこで、盛土高さと図-3、図-4で示したせん断帯内の要素の有効応力値との関係に着目した。有効応力径路に着目した要素 (S1~S4) の位置を図-5に示す。図-6、図-7は、それぞれ共軸および非共軸モデルを用いた場合の各要素 (S1~S4) の有効応力径路を示している。なお、 $p'$ と $q$ は、 $p'_0$ を用いて正規化を行った。

共軸モデルの場合には、せん断変形が顕著となるS1~S4のいずれの要素も、盛土高さが増加するのに伴って $p'/p'_0$ が減少し、 $q/p'_0$ が増加しており、その有効応力径路はほぼ非排水径路上を辿っている。その後、有効応力値が限界状態に達すると、有効応力値は限界状態線に沿って上方へと遷移していることがわかる。盛土高さ 2.0m の場合に注目すると、要素S1, S2の応力状態は、要素S3, S4より限界状態に近づいていることがわかる。したがって、せん断変形は、载荷の初期には盛土直下において顕著に発生することが示唆される。その後、盛土高さが 2.4mにおいて、要素S1の有効応力値は限界状態に達するものの、要素S2~S4の有効応力値はまだ限界状態に達していないことがわかる。先述したように、土が摩擦性流体のごとく流れる状態を限界状態と呼ぶこと<sup>12)</sup>を考慮すると、盛土高さ 2.4mにおいても、せん断帯が形成されていないものと推察される。さらに盛土高さが増加し、盛

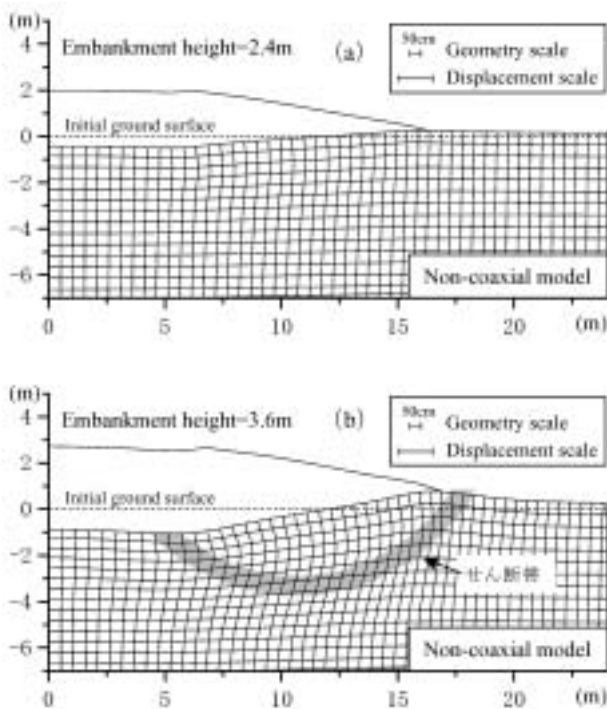


図-4 盛土基礎地盤の変形解析結果  
(非共軸 Cam-clay モデル)

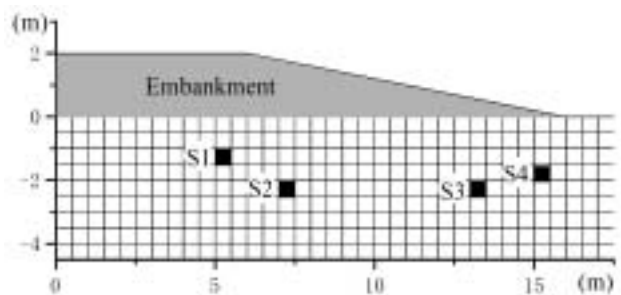


図-5 せん断帯内の代表要素の位置

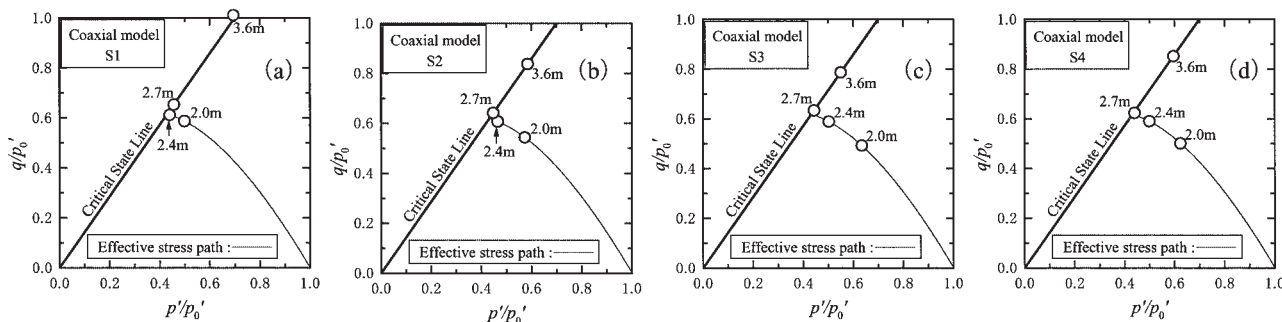


図-6 せん断帯内における代表要素の有効応力経路 (共軸 Cam-clay モデル)

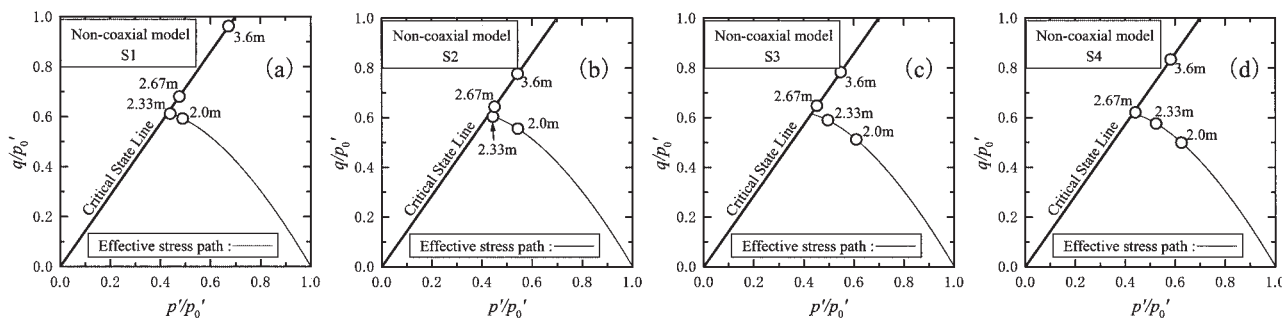


図-7 せん断帯内における代表要素の有効応力経路 (非共軸 Cam-clay モデル)

土高さ 2.7m に達するに至り、S1～S4 の全要素の応力状態が限界状態となった。したがって、盛土高さ 2.7m 程度において基礎地盤にせん断帯が形成され始めるものと考えられる。

非共軸モデルの場合にも、各要素の有効応力値は、盛土高さの増加に伴って、非排水径路に沿って限界状態へと近づき、その後限界状態に達すると限界状態線に沿って  $p'/p'_0$ 、 $q/p'_0$  ともに増加していく。また、非共軸モデルを用いた場合には、盛土高さ 2.33m 程度において、応力状態が限界状態に達する要素 (S1) が認められた。その後、盛土高さ 2.67m において S1～S4 の有効応力値が限界状態に達した。したがって、非共軸モデルを用いた場合には、せん断帯は、盛土高さ 2.67m 程度において形成され始めるものと考えられる。以上のことから、非共軸モデルを用いた変形解析結果から得られたせん断帯が形成され始める盛土高さは、共軸モデルを用いた結果と比較して僅かに低くなるのが明らかとなった。

構成方程式への非共軸性の考慮が地盤内のひずみの局所化に及ぼす影響を明らかにするために、共軸および非共軸モデルを用いた場合の盛土載荷に伴う地盤内の最大せん断ひずみ分布の遷移をそれぞれ図-8、図-9 に示す。

共軸モデルの場合に着目すると、盛土高さ 2.0m では、盛土中央から法肩直下の地表面付近において最大せん断ひずみの値が 2～4% となっており、地盤内の他の領域と比較して僅かに大きくなっていることが確認できる。盛土高さ 2.4m に達すると、2～4% の最大せん断ひずみの分布は、盛土法肩直下の地表面付近から右下に向かって伸びており、盛土中央から 10m 程度の位置で最も深い位置

(3m) に達し、さらに盛土中央から遠ざかるのに伴って徐々に浅くなり盛土法肩付近で表層に達するような下向きに凸な円弧状の領域を形成している。解析終了時の盛土高さ 3.6m においては、その円弧状の領域の最大せん断ひずみ値がさらに増大し、6～8% となって明瞭なひずみの局所化が観察されている。この領域はせん断帯と考えられ、地盤の破壊時にはすべり面を形成するものと推察される。

一方、非共軸モデルの場合には、盛土高さ 2m において、2～4% の最大せん断ひずみの領域は、共軸モデルでも認められた盛土中央から法肩直下の地表面付近に加えて、盛土法肩直下から下方に僅かに拡大している。盛土高さ 2.4m においても、非共軸モデルから得られた最大せん断ひずみ分布は、共軸モデルにおいて確認された 2～4% の最大せん断ひずみ分布とほぼ一致する結果となったが、盛土法肩直下において 4～6% を示す最大せん断ひずみの領域が認められる。さらに盛土高さ 3.6m に達すると、非共軸モデルを用いた場合においても最大せん断ひずみ分布は 6～8% の円弧状の領域を形成していることがわかる。その領域は共軸モデルの場合と比較して僅かに拡大しているが、その形成される位置はほぼ一致している。したがって、非共軸モデルと共軸モデルの違いに関わらず、最終的な最大せん断ひずみ分布は、ほぼ一致するものと考えられる。

したがって、非共軸モデルを用いることによって、共軸モデルを用いた場合と比較して、盛土載荷の早期の段階において、より明瞭なひずみの局所化を確認できることから、地盤の変形・破壊挙動を早期に把握することが

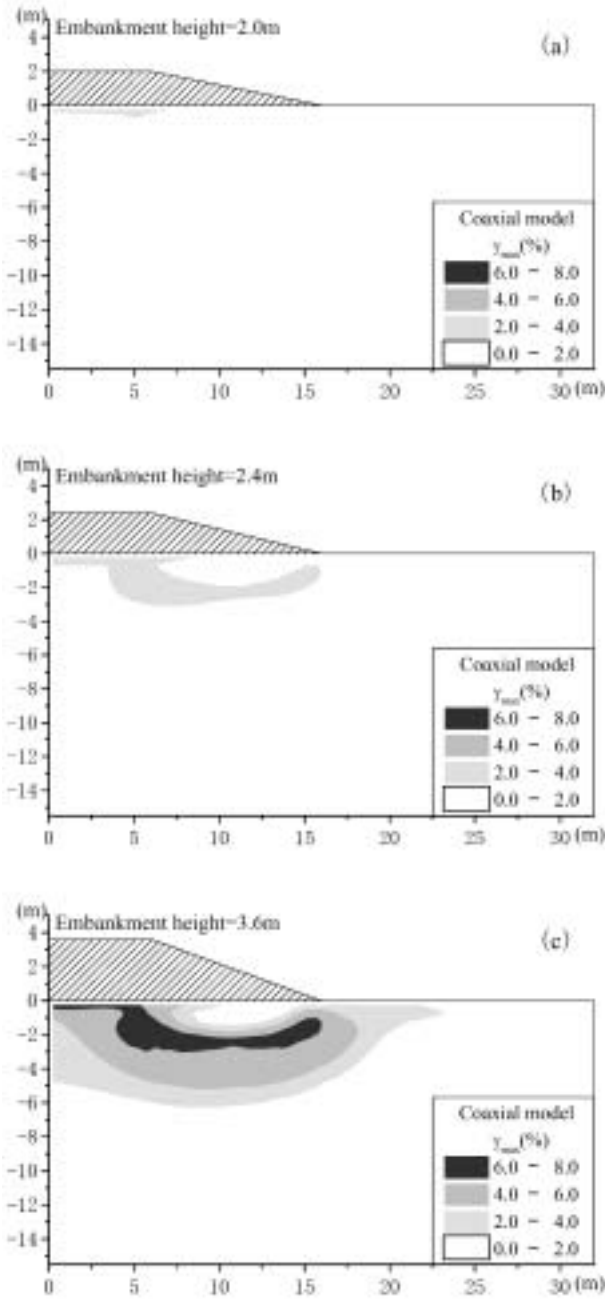


図-8 盛土基礎地盤内における最大せん断ひずみ分布の遷移 (共軸 Cam-clay モデル)

可能になるものと考えられる。また、非共軸モデルと共軸モデルの違いによらず、最終的に形成されるすべり面の位置は、ほぼ一致するものと推察される。本解析から推察されるすべり面の形状は、室内試験における盛土破壊実験の結果<sup>13)</sup>とも非常によく対応している。

## 5. 結論

粘性土の構成方程式に非共軸性を考慮したモデルと考慮しないモデルを用いて、盛土築造に伴う盛土基礎地盤の変形解析を行った。その結果、地盤変形解析を行う際

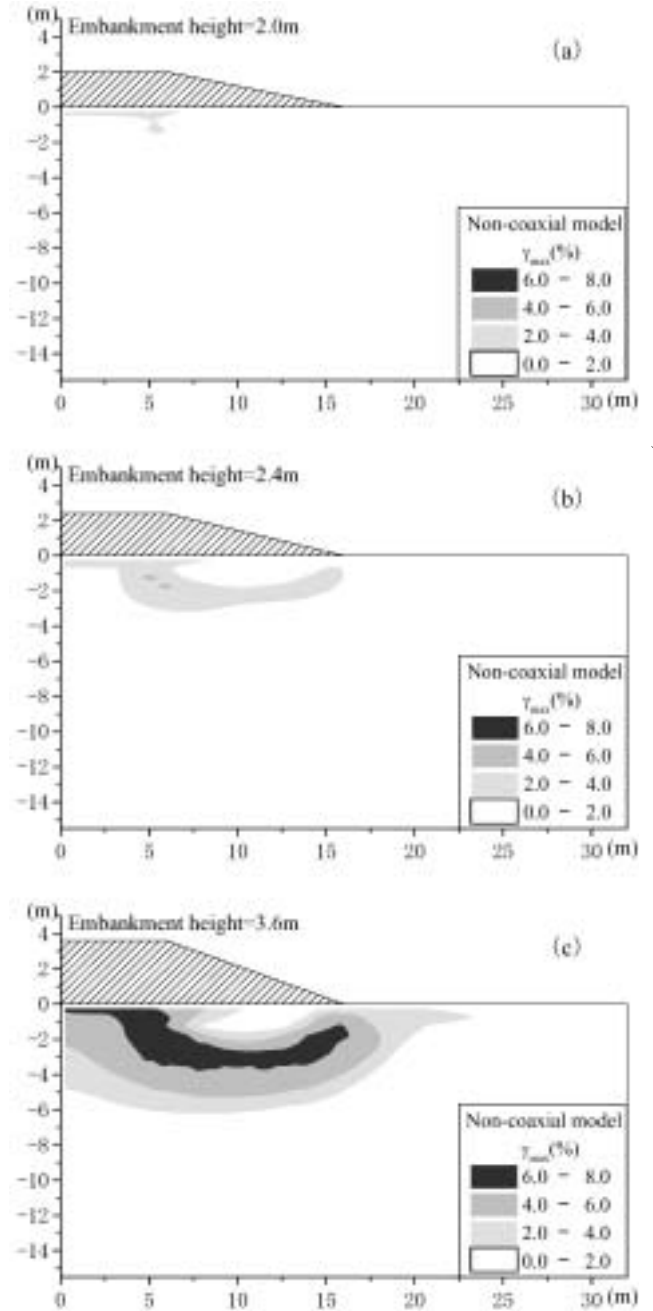


図-9 盛土基礎地盤内における最大せん断ひずみ分布の遷移 (非共軸 Cam-clay モデル)

に粘性土の構成方程式に非共軸性を考慮した場合には、考慮しない場合と比較して、载荷に伴う地盤の変形挙動を早期に予測でき、かつ地盤内部のひずみの局所化を明瞭に表現できることが明らかとなった。この結果は、構成方程式に非共軸性を導入することにより、せん断変形が発生しやすくなるためと考えられる。したがって、構成方程式に非共軸性を考慮した地盤変形解析結果から、载荷に伴う地盤の変形・破壊挙動を早期に把握できるという地盤工学的に非常に有益な情報が得られる可能性が示唆された。

## 謝辞

本研究を行うにあたり、坂本有実香（現、岐阜市役所）氏には、数値解析および結果の整理に多大なるご協力をいただいた。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) Sakajo, S. and Kamei, T. (1996): Simplified deformation analysis for embankment foundation using elasto-plastic model, *Soils and Foundations*, Vol.36, No.2, pp.1-11.
- 2) Kamei, T. and Sakajo, S. (1998): A deformation analysis of deep foundation under embankment using an elasto-viscoplastic model, *Journal of the Japan Society of Engineering Geology*, Vol.39, No.2, pp.183-192.
- 3) Roscoe, K. H., Schofield, A. N. and Thurairajah, A. (1963): Yielding of clays in states wetter than critical, *Geotechnique*, Vol.13, pp.211-240.
- 4) Rudnicki, J. W. and Rice, J. R. (1975): Conditions for the localization of deformation in pressure-sensitive dilatant materials, *Journal of the Mechanics and Physics Solids*, Vol.23, pp.371-394.
- 5) Yatomi, C., Yashima, A., Iizuka, A. and Sano, I. (1989): General theory of shear bands formation by a non-coaxial Cam-clay model, *Soils and Foundations*, Vol.29, No.3, pp.41-53.
- 6) Papamichos, E. and Vardoulakis, I. (1995): Shear band formation in sand according to non-coaxial plasticity model, *Geotechnique*, Vol.45, No.4, pp.649-661.
- 7) Ohta, H. (1971): Analysis of deformations of soils based on the theory of plasticity and its application to settlement of embankments, *Doctor Engineering Thesis*, Kyoto Univ.
- 8) Sekiguchi, H. (1977): Rheological characteristics of clays, *Proceedings of 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Tokyo, Vol.1, pp.289-292.
- 9) Kamei, T. (1985): A study on the mechanical behavior of normally consolidated cohesive soils, *thesis presented to the Tokyo Institute of Technology*, at Tokyo, Japan, in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor Engineering, 340p.
- 10) 志比利秀, 亀井健史, 東原聡子 (2000) : 非共軸パラメータの違いが分岐荷重に及ぼす影響, 土木構造・材料論文集, No.16, pp.159-167.
- 11) Sandhu, R. S. and Wilson, E. L. (1969): Finite element analysis of flow in saturated porous media, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, ASCE, Vol.95, EM3, pp.641-652.
- 12) 例えば, 石原研而, 木村 孟 (1980) : 土工学体系 8 土質力学, 317p.
- 13) 中瀬明男, 日下部治, 亀井健史, 鈴木弘之 (1984) : 粘性土の異方性と塑性指数, 土と基礎, Vol.32, No.11, pp.19-24.