

分岐解析結果に基づいた分岐荷重近傍における力学的状態量の評価

Estimation of stress states near the bifurcation stress ratio using bifurcation analysis

志比利秀 Toshihide SHIBI (島根大学総合理工学部)
 亀井健史 Takeshi KAMEI (島根大学総合理工学部)
 松森将樹 Masaki MATSUMORI ((有)ムラタ地質技術)

正規圧密粘性土の分岐荷重近傍における力学的状態量を評価するために、本研究では平面ひずみ非排水圧縮条件下の供試体を対象に分岐解析を行った。その結果、分岐荷重近傍における一般化された偏差応力、間隙水圧、平均有効主応力、および、応力比といった供試体内の力学的状態量の分布性状を示し、共軸モデルと非共軸モデルの違いが力学的状態量にどのような影響を及ぼすのかを解析的に明らかにした。また、力学的状態量の分布に基づいた供試体に生じるすべり面の初期発生位置およびその形状が、最大せん断ひずみの分布から推定されるそれと非常によく類似していることを示唆した。

キーワード：圧密非排水せん断、応力分布、間隙水圧、すべり面、分岐、平面ひずみ (IGC : D06)

1. はじめに

近年、地盤力学の進展に伴い、分岐解析を用いることにより正規圧密粘性土供試体の変形挙動、さらにはすべり面の発生位置およびその形状を説明できることが徐々に明らかになってきている。例えば、有限変形非共軸 Cam-clay モデル¹⁾を用いた分岐解析では、円柱供試体を対象とした解析^{2), 3)}や、平面ひずみ条件下における解析結果^{4) ~ 5)}などが報告されている。それら既往の研究におけるすべり面の発生位置およびその形状の推定は、主にせん断変形の進展に伴う分岐時の変形概形と最大せん断ひずみ分布の遷移とに着目することによって考察されてきた。

一方、地盤材料においては、一般化された偏差応力 q 、間隙水圧 u 、平均有効主応力 p' 、さらに応力比 η といった力学的状態量が材料のせん断強さと密接な関係にあることはよく知られている。しかしながら、分岐時における上記の状態量の分布とすべり面の発生位置およびその形状との関係に関する報告事例は見当たらない。したがって、それらの状態量の分布とすべり面の発生位置およびその形状との関係を明らかにすることは、土の破壊現象を評価する上で極めて重要な問題となる。

本研究ではまず、構成式として共軸あるいは非共軸 Cam-clay モデルを用いた直方体供試体（断面においては長方形）を、平面ひずみ条件下において、側方圧力（流体圧）一定条件の下で非排水圧縮せん断した場合に観察される均一および様々な非均一な変形挙動を、分岐という概念に基づいて解析的に表すことを試みる。つぎに力学的状態量の分布を検討し、1) 各変形モードにおける力学的状態量の分布、2) 共軸および非共軸モデルによる力学的状態量の分布の違い、3) 力学的状態量から推定されるすべり面の発生位置およびその形状の計3点に

関して考察することとする。

2. 有限変形 Cam-clay モデル

Cam-clay モデルは、Roscoe *et al.*⁶⁾ によって提案された微小変形理論に基づいた土の代表的なモデルの一つであり、必要とされる土質定数は4種類と比較的少ないモデルにもかかわらず、粘性土の圧密・せん断挙動を統一的に表現することができる。

有限変形 Cam-clay モデルは、上記の Cam-clay モデルを微小変形理論から有限変形理論に拡張したモデルである。Yatomi *et al.*¹⁾ は、せん断変形をより発生し易くするため、形式的に Rudnicki and Rice⁷⁾ の理論に従い、非共軸 Cam-clay モデルを提案した。

本研究では、有限変形理論を用いることから、正規圧密粘土の構成式として、有限変形に拡張された Cam-clay モデルを用いることとする。

まず、全コーシー応力 T 、有効コーシー応力 T' と間隙水圧 u の間には、次式で与えられるような有効応力の原理が成立する。

$$T' = T + uI \quad (1)$$

このとき、Cam-clay モデルに用いられたパラメータ、平均有効主応力 p' と一般化された偏差応力 q は、それぞれ次式によって定義される。

$$p' = -\frac{1}{3} \text{tr} T', \quad q = \sqrt{\frac{3}{2} S \cdot S} \quad (2)$$

ここで、 S は有効コーシー応力 T' の偏差成分である。なお、全応力 σ 、平均有効応力 p' 、間隙水圧 u および体

積ひずみ v は、土質力学の慣例に従い圧縮側および収縮側を正とするが、それら以外の物理量は、一般の有限変形理論で定義されているように、引張り側および伸張側を正とする。

物体の運動 $x=\chi(X,t)$ を考えると、物質点 X での変形勾配は、 $F=\partial x/\partial X$ ($\det F>0$) と表される。このとき、 $L=\dot{F}F^{-1}=\partial \dot{x}/\partial x$ は速度勾配であり、上付きの“ \cdot ”は、物質時間微分を表す。また、 $D=(L+L^T)/2$ は変形速度、 $W=(L-L^T)/2$ はスピンである。

このとき、変形速度 D が弾性部分 D^e と塑性部分 D^p の和で表されると考え、その弾性部分に対して次式で示されるフックの法則が仮定される。

$$\dot{T}'_{ij} = \left\{ \left(\bar{K} - \frac{2}{3} \bar{G} \right) \delta_{ij} \delta_{kl} + \bar{G} (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) \right\} D^e_{kl} \quad (3)$$

ここで、 $\dot{T}'_{ij} = \dot{T}_{ij} - W_{ik} T'_{kj} + T'_{ik} W_{kj}$ は有効コーシー応力の共回転速度であり、 δ_{ij} はクロネッカーのデルタを表す。また、 \bar{K} と \bar{G} は、それぞれ体積弾性係数とせん断弾性係数を表しており、次式のように表される。

$$\bar{K} = \bar{K}_0 p', \quad \bar{G} = \bar{G}_0 p' \quad (4)$$

ここで、 $\bar{K}_0 = (1+e)/\kappa$ 、 $\bar{G}_0 = \{3(1-2\nu)\bar{K}_0\}/\{2(1+\nu)\}$ であり、 κ は自然体数表示による膨潤指数、 ν はポアソン比を表している。

次に変形速度の塑性部分について考える。微小変形における Cam-clay モデルの降伏関数⁶⁾と同様に、有限変形 Cam-clay モデルの降伏関数 f は次式のように表される。

$$f = \frac{\lambda - \kappa}{1+e} \ln \frac{p'}{p'_0} + D \frac{q}{p'} - v^p \quad (5)$$

ここで、 λ は自然体数表示による圧縮指数、 p'_0 は先行圧密応力、 v^p は塑性体積ひずみを表す。また、ダイレイタンス係数 D は、限界状態における応力比 M と関係があり、 $D = (\lambda - \kappa)/\{M(1+e)\}$ ⁸⁾ と表される。この降伏関数 f に関連流れ則を適用すると変形速度の塑性部分として次式が得られる。

$$D^p_{ij} = A \frac{\partial f}{\partial T'_{ij}} \quad (6)$$

ここで、 A は比例定数である。最終的に負荷状態における有限変形共軸 Cam-clay モデルの構成式は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \dot{T}'_{ij} = & \left\{ \left(\bar{K} - \frac{2}{3} \bar{G} \right) \delta_{ij} \delta_{kl} + \bar{G} (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) \right\} \\ & - \frac{1}{\bar{G} + \bar{K} \beta^2 + h} \left(\frac{\bar{G}}{\bar{\tau}} S_{ij} - \bar{K} \bar{\beta} \delta_{ij} \right) \left(\frac{\bar{G}}{\bar{\tau}} S_{kl} - \bar{K} \bar{\beta} \delta_{kl} \right) \right\} D_{kl} \end{aligned} \quad (7)$$

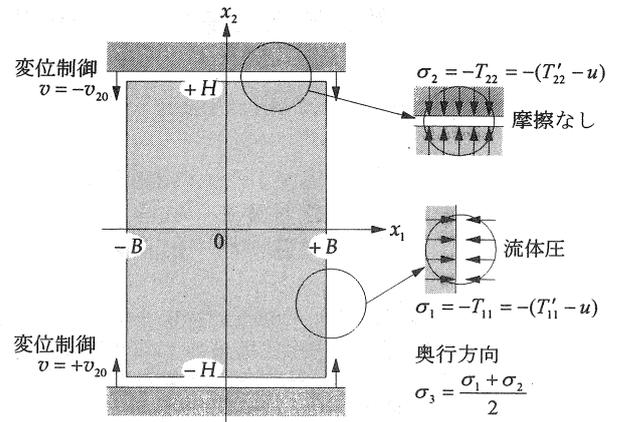


図-1 分岐時の供試体概形

ここで、 $\bar{\beta} = \beta/\sqrt{3}$ 、 $\beta = M - q/p'$ 、 $\bar{\tau} = \sqrt{S_{ij}S_{ij}/2}$ である。また、 h は硬化係数を表しており、次式によって表される。

$$h = \frac{\bar{\beta}}{\sqrt{3D}} p' \quad (8)$$

上記の構成式で表される Cam-clay モデルが共軸モデルと呼ばれる理由は、塑性変形テンソルの偏差成分の主軸方向と有効コーシー応力の偏差成分の主軸方向が一致する（共軸）からである。

有限変形非共軸 Cam-clay モデルは Rudnicki and Rice⁷⁾ の理論に従い、偏差塑性ひずみに非共軸項を付加することにより導かれる。その結果、有効コーシー応力の偏差成分の主軸方向と塑性変形速度テンソルの偏差成分の主軸方向が一致しなくなる（非共軸）。最終的に、有限変形非共軸 Cam-clay モデルの構成式は、式 (7) において物質パラメータを以下のように置きかえることによって与えられる。

$$\begin{aligned} \bar{G} & \rightarrow \frac{h_1 \bar{G}}{h_1 + \bar{G}}, & \bar{K} & \rightarrow \frac{(h_1 - h) \bar{K}}{h_1 - h - \bar{\beta}^2 \bar{K}}, \\ \bar{\beta} & \rightarrow \frac{h_1 \bar{\beta}}{h_1 - h}, & h & \rightarrow \frac{h_1 h}{h_1 - h} \end{aligned} \quad (9)$$

ただし、 h_1 は第 2 硬化係数と呼ばれ、式 (8) の硬化係数と同様の形で次式のように仮定される。

$$h_1 = \frac{\bar{\beta}}{\sqrt{3A}} p' \quad (10)$$

ここで、 A は非共軸パラメータと呼ばれ、非共軸 Cam-clay モデルの場合には、 $A > 0$ となる。また、 $A = 0$ のときには、非共軸 Cam-clay モデルは共軸 Cam-clay モデルに一致する。

とくに平面ひずみ条件下で、かつ非排水変形を対象と

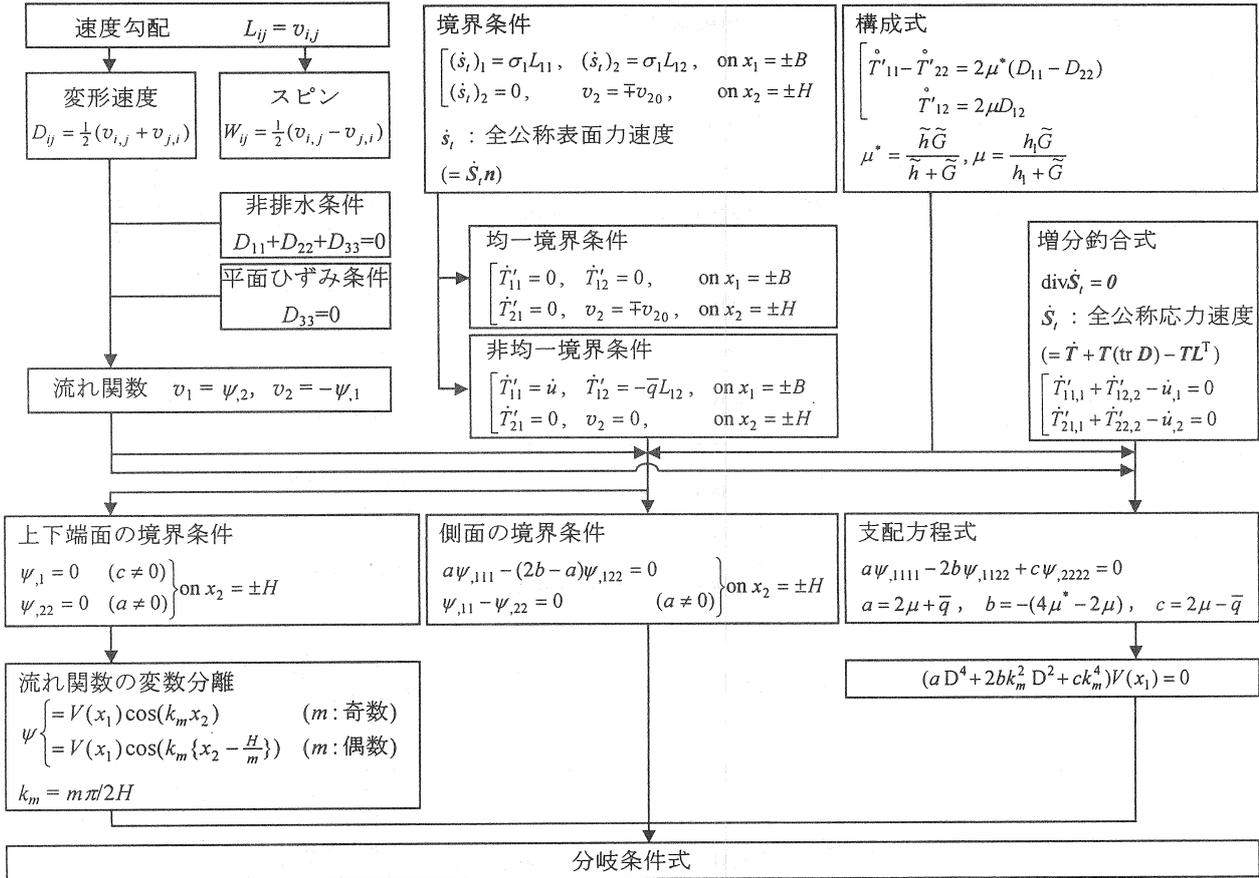


図-2 分岐条件式の誘導フローチャート

する場合には、有限変形 Cam-clay モデルの構成式は次式のように書き換えることができる。

$$\begin{aligned} \dot{T}'_{11} - \dot{T}'_{22} &= 2\mu^*(D_{11} - D_{22}) \\ \dot{T}'_{12} &= 2\mu D_{12} \end{aligned} \quad (11)$$

ここで、 $\mu^* = \tilde{h}\tilde{G}/(\tilde{h} + \tilde{G})$ ； $\mu = h_1\tilde{G}/(h_1 + \tilde{G})$ である。

3. 分岐条件式

正規圧密粘性土では、非排水せん断強度が排水せん断強度より小さいことや、透水係数の低い粘性土地盤においては極めてゆっくり载荷を行わないかぎり地盤内の間隙水は流れないと考えられる。したがって、本研究では、平面ひずみ条件下において正規圧密粘土供試体を非排水圧縮せん断する場合を考える。境界条件は、供試体の両側面には一定水圧を与え（その際、側面に働く全応力を $\sigma_1 : \sigma_1 = \sigma'_1 + u$ とする）、上下方向に変位制御により圧縮するものとする（その際、両端面に働く全応力を $\sigma_2 : \sigma_2 = \sigma'_2 + u$ とする）。なお、このとき供試体の上下端面には、摩擦は働かないものとし、分岐が発生する瞬間 $t = t_m$ まで供試体は均一な変形を続けるものとする。そのとき、長方形供試体の寸法は、幅 $2B$ 、高さ $2H$ と変化しているものと仮定する（図-1）。したがって、分岐の生じる瞬間までは、供試体内の力学的状態量は均一な状

態を保持する。

均一変形状態にある供試体の変形は、軸方向载荷に対して、常に均一変形を続けることが可能である。したがって、ある瞬間に供試体の変形が非均一変形へと移行できる場合には、供試体は均一変形、あるいは非均一変形という異なる2種類の変形挙動をとること（変形挙動の分岐）が可能となる。非均一変形状態へと移行すると、局部的にひずみや応力が集中し、材料は破壊しやすくなる。したがって、均一変形状態から非均一変形状態へと移行する点を把握することは材料のせん断強さを発揮させるためには重要である。

分岐条件式とは、分岐が生じるとき、すなわち供試体の変形が均一変形状態から非均一変形状態へと移行するときの条件式のことである。その条件式より、非均一変形状態へと移行するときの応力比 $q/p' (= \eta)$ が得られる。なお、分岐条件式の誘導フローチャートを図-2に、その結果得られる分岐条件式を表-1に示す。

粘土のような摩擦性材料の場合、平均有効主応力が大きいほど、せん断強さが大きくなるので、本研究のような均一多軸条件下での分岐荷重は、軸応力や主応力差ではなく、応力比 η が物理的に最も合理的な分岐荷重の定義であると考えられる。したがって、本研究では、分岐時の応力比 $\eta = \eta_b$ を「分岐荷重」と呼ぶこととする。

表-1 各領域の判別条件, $V(x_1)$ の一般解, および分岐条件式 (A_1, A_2 : 未定定数, $a = 2\mu + \bar{q}$, $b = -(4\mu^* - 2\mu)$, $c = 2\mu - \bar{q}$)

	判別条件	P, Q と a, b, c の関係		$V(x_1)$ の一般解	分岐条件式
EC領域	$b^2 - ac < 0$	$P^2 - Q^2 = \frac{b}{a}$	対称モード	$* \Re[(A_1 + iA_2) \sin\{(P + iQ)k_m x_1\}]$	$\frac{Q \sin(2Pk_m B)}{P \sinh(2Qk_m B)} = \frac{(a-c)\sqrt{a} - 2(a-b)\sqrt{c}}{(a-c)\sqrt{a} + 2(a-b)\sqrt{c}}$
		$P^2 + Q^2 = \sqrt{\frac{c}{a}}$	非対称モード	$* \Re[(A_1 + iA_2) \cos\{(P + iQ)k_m x_1\}]$	$\frac{Q \sin(2Pk_m B)}{P \sinh(2Qk_m B)} = -\frac{(a-c)\sqrt{a} - 2(a-b)\sqrt{c}}{(a-c)\sqrt{a} + 2(a-b)\sqrt{c}}$
EI領域	$b^2 - ac > 0, \frac{b}{a} < 0, 2\mu > \bar{q} $	$P^2 - Q^2 = \frac{2\sqrt{b^2 - ac}}{a}$	対称モード	$A_1 \sin(Pk_m x_1) + A_2 \sin(Qk_m x_1)$	$\frac{P \tanh(Qk_m B)}{Q \tanh(Pk_m B)} = \frac{(1 + P^2)^2}{(1 + Q^2)^2}$
		$P^2 + Q^2 = -\frac{2b}{a}$	非対称モード	$A_1 \cos(Pk_m x_1) + A_2 \cos(Qk_m x_1)$	$\frac{P \tanh(Pk_m B)}{Q \tanh(Qk_m B)} = \frac{(1 + P^2)^2}{(1 + Q^2)^2}$
H領域	$b^2 - ac > 0, \frac{b}{a} > 0, 2\mu > \bar{q} $	$P^2 - Q^2 = \frac{2\sqrt{b^2 - ac}}{a}$	対称モード	$A_1 \sinh(Pk_m x_1) + A_2 \sinh(Qk_m x_1)$	$\frac{P \tan(Qk_m B)}{Q \tan(Pk_m B)} = \frac{(1 - P^2)^2}{(1 - Q^2)^2}$
		$P^2 + Q^2 = \frac{2b}{a}$	非対称モード	$A_1 \cosh(Pk_m x_1) + A_2 \cosh(Qk_m x_1)$	$\frac{P \tan(Pk_m B)}{Q \tan(Qk_m B)} = \frac{(1 - P^2)^2}{(1 - Q^2)^2}$
P領域	$2\mu < \bar{q} $	$P^2 - Q^2 = \frac{2b}{a}$	対称モード	$A_1 \sin(Pk_m x_1) + A_2 \sinh(Qk_m x_1)$	$\frac{P \tanh(Qk_m B)}{Q \tan(Pk_m B)} = \frac{(1 - P^2)^2}{(1 + Q^2)^2}$
		$P^2 + Q^2 = \frac{2\sqrt{b^2 - ac}}{a}$	非対称モード	$A_1 \cos(Pk_m x_1) + A_2 \cosh(Qk_m x_1)$	$\frac{P \tan(Pk_m B)}{Q \tanh(Qk_m B)} = \frac{(1 - P^2)^2}{(1 + Q^2)^2}$

* $\Re[\dots]$ は $[\dots]$ の実数部分を表わす.

4. 供試体内の力学的状態量

土のせん断強さは、有効応力と密接な関係があり、有効応力が減少するとせん断強さは低下する。すなわち、供試体内に有効応力のばらつきが生じると、小さな有効応力の位置ではせん断強さが低下し、せん断破壊が生じ易くなる。このように供試体がすべり面を伴って破壊する現象は、せん断変形による進行性破壊によるものと考えられる。本研究では、このようなすべり面を伴った破壊現象をとらえるために、分岐解析の結果を用いる。

いま、供試体が均一変形状態から非均一変形状態へと移行するならば、供試体内の力学的状態量も非均一な状態へと移行する。したがって、分岐時における供試体内部の力学的状態量の分布から、すべり面の初期発生位置、およびその形状を予測することが可能となる。

まず、一般化された偏差応力 q 、間隙水圧 u 、平均有効主応力 p' 、応力比 η といった力学的状態量と土のせん断強さとの関係を検討する。

供試体内の平均有効主応力の分布から、平均有効主応力の小さな位置がわかれば、その位置ではせん断強さが小さくなるため、すべり面の初期発生位置となり易い。また、非排水条件下においては、有効応力の原理より、間隙水圧の上昇は有効応力の低下をまねく。したがって、間隙水圧の大きな位置においては、せん断強さが低下しており、初期すべり面が発生し易い位置となる。一方、

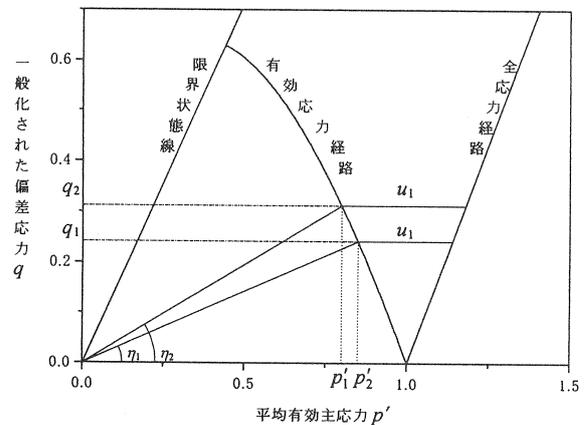


図-3 平面ひずみ非排水圧縮試験の全応力経路と有効応力経路

一般化された偏差応力が大きな位置は、より大きなせん断力が働いている位置であり、非排水試験の有効応力経路 (図-3) を考えると有効応力が小さな位置となることから、すべり面が発生しやすい位置となる。また、応力比が大きいうことは、平均有効主応力が小さい、もしくは一般化された偏差応力が大きいということを示している。したがって、応力比が大きいうことはすべり面が発生し易いということになる。

次に、分岐解析の結果から分岐時の力学的状態量を示す。まず、平均有効応力、一般化された偏差応力、応力

表-2 本解析に用いた土質定数^{1), 9)}

λ	=	0.231
κ	=	0.042
ν	=	0.333
e	=	1.5
M	=	1.43
A	=	0.01(0)*

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

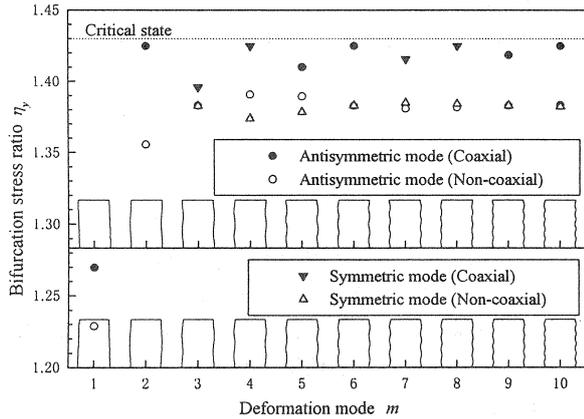


図-4 分岐荷重 η_y と変形モード m の関係
および変形モード概形 ($H/B=2$)⁵⁾

比の時間増分の分布は、次式のように与えられる⁵⁾。

$$\begin{aligned} \dot{p}' &= -\frac{\tilde{G}\tilde{K}\tilde{\beta}}{\tilde{G}+\tilde{h}}(D_{11}-D_{22}), \\ \dot{q} &= \frac{\sqrt{3}\tilde{G}\tilde{h}}{\tilde{G}+\tilde{h}}(D_{11}-D_{22}), \\ \dot{\eta} &= \frac{\sqrt{3}\tilde{h}+\eta\tilde{K}\tilde{\beta}}{\tilde{G}+\tilde{h}}\tilde{G}_0(D_{11}-D_{22}) \end{aligned} \quad (12)$$

一方、間隙水圧の時間増分の分布は、増分釣合式より次式のように導くことができる。

$$\dot{u} = -\frac{1}{k_m} \left\{ \left(\frac{b}{2} - \frac{\bar{q}}{2} + \frac{2\tilde{G}\tilde{K}\tilde{\beta}}{\tilde{G}+\tilde{h}} \right) k_m^2 V_{,11} + \frac{a}{2} V_{,111} \right\} \sin(k_m x_2) \quad (13)$$

ただし、変形モード m が偶数の場合は、 $x_2 \rightarrow x_2 - \frac{H}{m}$ と変数変換する必要がある。

以上の結果より、いずれの力学的状態量も分岐時の応力比と位置の関数となる。したがって、分岐荷重 η_y が得られれば分岐時の力学的状態量の分布が得られる。

5. 解析結果および考察

本解析に用いた梅田層粘土の土質定数⁹⁾を表-2に示す。なお、非共軸モデルの場合には、非共軸パラメータ A の値は、せん断帯の生成条件から $A=0.01$ が適当であると報告されている¹⁾。また、既往の研究においても、 $A=0.01$

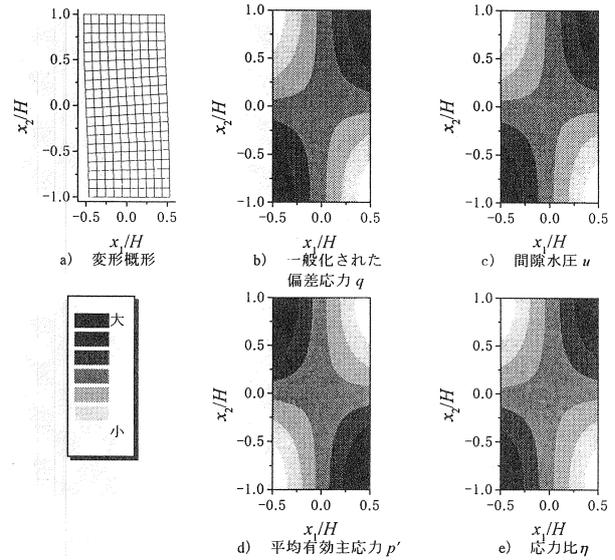


図-5 変形概形および力学的状態量の分布
(共軸 Cam-clay モデル・非対称 1 次変形モード)

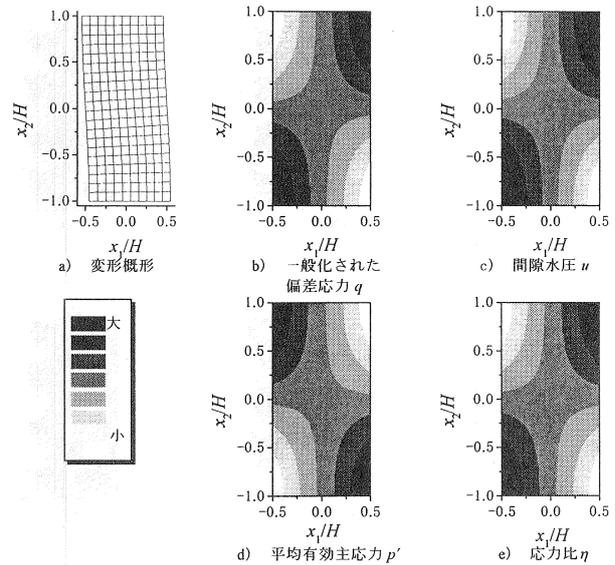


図-6 変形概形および力学的状態量の分布
(非共軸 Cam-clay モデル・非対称 1 次変形モード)

と仮定した分岐解析結果から、正規圧密粘土供試体の様々な変形挙動やすべり面の形状等が説明できることが認められている^{2)~5)}。よって、本解析においても $A=0.01$ を適用した。

有限変形共軸 Cam-clay モデルおよび有限変形非共軸 Cam-clay モデルを用いた長方形供試体に対して、平面ひずみ条件下で非排水圧縮せん断する場合の分岐解析結果を図-4に示す。結果は分岐時に供試体高さが幅の2倍 ($H/B=2$) の場合である¹⁰⁾。

共軸モデルと非共軸モデルとの違いを考察するために、図-4より双方のモデルに対して分岐荷重が存在する非対称 1 次変形モードと対称 8 次変形モードの二通りに対して、分岐時における変形概形、および平均有効主応力 p' 、一般化された偏差応力 q 、間隙水圧 u 、応力比 η の分布を示すこととする。なお、変形図は生じた変形を明瞭に表

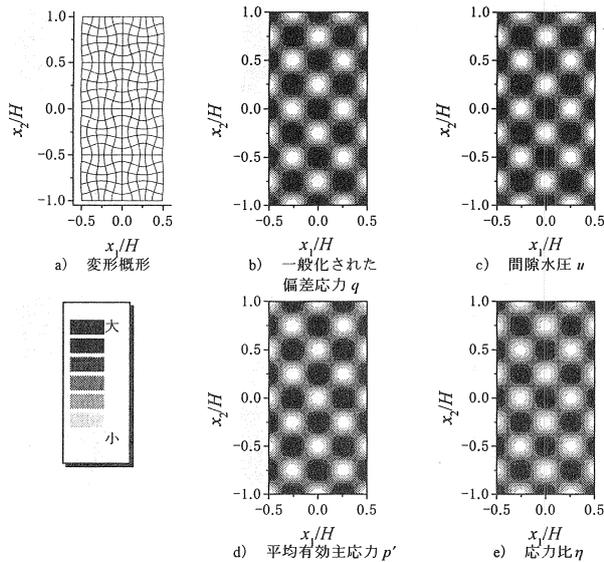


図-7 変形概形および力学的状態量の分布
(共軸 Cam-clay モデル・対称 8 次変形モード)

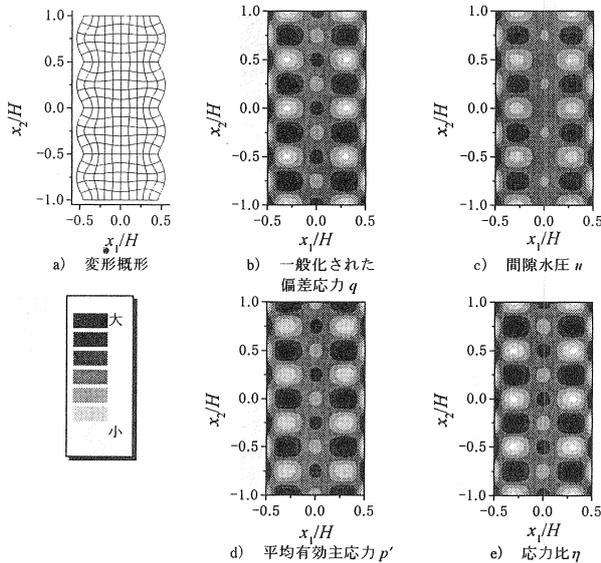


図-8 変形概形および力学的状態量の分布
(非共軸 Cam-clay モデル・対称 8 次変形モード)

すため、非均一変形の量を 1000 倍して描いている。また、各状態量の分布は、状態量の値が大きな位置には濃い色を、値が小さな位置には薄い色を用いて示している。さらに、各図において濃さを明瞭に表すため、各図において色の濃さが示す値の範囲は異なっている。

図-5、図-6 に低次変形モードの例として、非対称 1 次変形モードの結果を示す。図-5 は共軸 Cam-clay モデルの場合を、図-6 は非共軸モデルの場合を示している。両図より、非対称 1 次変形モードが生じる場合には、共軸モデルと非共軸モデルの違いにより、各状態量の分布に大きな違いは認められない。また、供試体表面が上端部左側、および下端部右側において張出すような変形をする非対称 1 次変形モードの場合には、 p' は供試体表面が張出す上端部左側、および下端部右側において大きくなっている。一方、供試体表面が内側へと変形しているよう

にみえる上端部右側、および下端部左側においては、 p' が小さくなっていることがわかる。また、その他の 3 つの状態量 (q , u , η) が大きくなる位置は、 p' が小さくなる位置に等しい。このことは、分岐解析結果から得られる力学的状態量の分布からすべり面の初期発生位置、およびその形状が推定可能となることを示唆している。

力学的状態量とせん断強さの関係を考えるならば、上端部左側、および下端部右側へと張出すように供試体に変形した場合には、供試体の上端部右側、および下端部左側からすべり面が発生し始めその 2 点を結ぶようにすべり面が進展すると推定できる。このような破壊形態は、実際の三軸圧縮試験等によく観察される破壊形態に対応するものと考えられる。

次に、対称 8 次変形モードの結果を図-7、図-8 に示す。図-7 は共軸モデルの場合を、図-8 は非共軸モデルの場合を示している。両図のように高次変形モードが生じる場合には、供試体は表面付近が周期的に波打つような変形¹¹⁾を示す。このような供試体の変形は、すべり面群を伴うような変形¹²⁾に対応しているものと考えられる。共軸モデルと非共軸モデルの違いによらず、その状態量の分布は、 p' が小さくなる位置において、その他の 3 つの状態量 (q , u , η) が大きくなっている。このことは非対称 1 次変形モードから得られた結果と一致している。

しかしながら、このような高次変形モードの分岐が生じる場合においては、共軸モデルと非共軸モデルの違いにより、各状態量の分布に違いが認められる。共軸モデルの場合、今回示したいずれの状態量も極めて大きな位置と極めて小さな位置が供試体内全体に周期的に分布している。すなわち、供試体内のいたる所に、せん断強さが低下している位置が分布していることを示す。したがって、一端、供試体に破壊が生じると、すべり面は急激に進展するものと考えられる。一方、非共軸モデルの場合は、各状態量が極めて大きくなる位置と極めて小さくなる位置は、供試体の表面近傍にのみ集中して周期的に表れている。すなわち、供試体表面近傍においてはせん断強さが大きく低下している位置が存在するが、供試体中央付近においては、せん断強さがそれほど低下していないことが認められる。したがって、供試体表面近傍より発生し始めたすべり面は、徐々に内部に向かって進展してゆき、進行性破壊の様相を呈する。

力学的状態量の分布から推定したすべり面の発生位置およびその形状と最大せん断ひずみの分布から推定されるすべり面の発生位置およびその形状との比較を試みた。例えば、非共軸 Cam-clay モデルを用いた供試体に対して非排水圧縮せん断を行うことにより、非対称 1 次変形モードが生じた場合の結果⁵⁾を図-9 に示す。図より、供試体表面が内側へと微小に変形している上端右側および下端左側において、大きな最大せん断ひずみ発生していることがわかる。このことから、供試体の上端右側および下端左側より供試体内にすべり面が発生し始め、その 2 点を結ぶようにすべり面が進展していくと推定される。

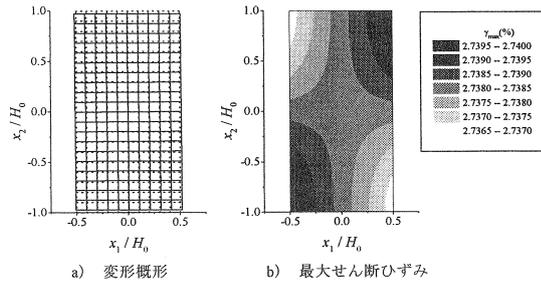


図-9 変形概形および最大せん断ひずみの分布⁵⁾
(非共軸 Cam-clay モデル・非対称 1 次変形モード)

したがって、力学的状態量の分布より推定したすべり面の発生位置およびその形状は、最大せん断ひずみの分布から推定されるそれと非常に類似したものであることがわかる。このことは、最大せん断ひずみの分布から推定されるすべり面の発生位置およびその形状が力学的状態量の分布からも説明できることを示している。

本解析で得られた知見より、間隙水圧、一般化された偏差応力、および応力比の分布は、最大せん断ひずみの分布と同様の傾向を、一方、平均有効主応力の分布は表裏一体の傾向を示すことが明らかとなった。したがって、力学的状態量の分布は実地盤のすべり面の発生位置およびその形状を推察する上で良い指標となるであろう。

6. 結論

本研究から得られた主要な結論を以下に列記する。

(1) 変形モードの違いによらず、平均有効主応力 p' が小さな位置では、他の力学的状態量（一般化された偏差応力 q 、間隙水圧 u 、応力比 η ）が大きくなることが解析的に示された。

(2) 低次変形モードの場合には、共軸モデルと非共軸モデルの違いによらず、力学的状態量の分布は同じ様相を示した。一方、高次変形モードにおいては、共軸モデルの場合には、力学的状態量は極めて大きな位置と極めて小さな位置が供試体内全体に周期的に分布しているのに対し、非共軸モデルの場合には、供試体側面近傍のみ集中して周期的に現れることが明らかとなった。

(3) 力学的状態量の分布よりすべり面の発生位置およびその形状を推定できることが解析的に明らかとなった。また、得られた結果は、最大せん断ひずみの分布から推定されるそれに非常に類似していることが示唆された。

参考文献

1) Yatomi, C., Yashima, A., Iizuka, A., and Sano, I.: General

theory of shear bands formation by a non-coaxial Cam-clay model, *Soils and Foundations*, Vol.29, No.3, pp.41-53, 1989.

- 2) 志比利秀, 矢富盟祥: 有限変形非共軸 Cam-clay モデルによる円柱供試体の軸対称分岐解析, 構造工学論文集, Vol.43A, pp.413-421, 1997.
- 3) Yatomi, C. and Shibi, T.: Antisymmetric bifurcation analysis in a circular cylinder of a non-coaxial Cam-clay model, *Proceedings of the International Symposium Deformation and Progressive Failure in Geomechanics*, pp.9-14, 1997.
- 4) 斎藤武久, 矢富盟祥, 石田啓, 志比利秀: 死荷重側方境界条件下における平面ひずみ非排水試験の分岐解析, 地盤の破壊とひずみの局所化に関するシンポジウム論文集, pp.105-110, 1994.
- 5) 志比利秀, 矢富盟祥, 亀井健史: 平面ひずみ非排水圧縮条件下における供試体寸法比の変化が正規圧密粘土の分岐荷重に及ぼす影響, 土木学会論文集, No.666/III-53, pp.181-192, 2000.
- 6) Roscoe, K. H., Schofield, A. N. and Thurairajah, A.: Yielding of clays in states wetter than critical, *Geotechnique*, Vol.13, pp.211-240, 1963.
- 7) Rudnicki, J. W. and Rice, J. R.: Conditions for the localization of deformation in pressure-sensitive dilatant materials, *Journal of the Mechanics and Physics Solids*, Vol.23, pp.371-394, 1975.
- 8) Ohta, H.: Analysis of deformations of soils based on the theory of plasticity and its application to settlement of embankments, *Doctor Engineering Thesis*, Kyoto Univ., 1971.
- 9) Sekiguchi, H.: Rheological characteristics of clays, *Proceedings of 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Tokyo, Vol.1, pp.289-292, 1977.
- 10) 例えば, 土質工学会編: 土の試験実習書(第二回改訂版), pp.133-158, 1991.
- 11) 例えば, 小高猛司, 浅岡顕, 鈴木健爾: 初期不整を有する砂供試体のせん断特性と破壊形態, 土木学会第49回年次学術講演会講演概要集第III部, pp.306-307, 1994.
- 12) 例えば, 地盤の破壊とひずみの局所化に関する研究委員会: 地盤の破壊とひずみの局所化, 社団法人 土質工学会(現地盤工学会), pp.21-30, 1994.