

砂の三軸試験供試体の分岐変形モードと寸法・形状効果

山川 優樹¹・池田 清宏²・須藤 良清³・寺井 信夫⁴・鳥居 邦夫⁵

¹正会員 工修 長岡技術科学大学助手 環境・建設系 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

²正会員 Ph.D. 東北大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 06)

³正会員 東北大学技官 工学部土木工学科 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 06)

⁴香川県庁 (〒760-8570 香川県高松市番町 4-1-10)

⁵正会員 工博 長岡技術科学大学教授 環境・建設系 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

三軸圧縮試験を種々の直径・高さの豊浦砂の供試体に対して行い、応力・変形特性、変形モード、せん断帯形成に対する寸法・形状効果を、現象学的な視点と分岐という視点を併用して調べた。供試体寸法の増大に伴って強度が増加する「正の寸法効果」を確認し、境界条件や変形局所化の影響を排除した砂の強度は、要素試験で得られるよりも高い可能性があることを示した。形状の変化に伴って発現する分岐モードが変わることにより、変形モードが変動していることを明らかにした。例えば形状比 1.0 の供試体では、ダイヤモンドパターンが発現するのに対し、形状比 2.0 の供試体では、縦方向に太いせん断線が形成され、変形の局所化が顕著であった。また、寸法・形状の変化に伴う、せん断帯形成における周期性の変動やダイレイタンシー特性の変動を調べた。

Key Words : triaxial compression test, size/shape effect, variations of strength and dilatancy, localization of deformation, shear band

1. はじめに

三軸圧縮試験は土のせん断挙動を調べるために幅広く行われており、試験結果の解釈法や試験に及ぼす各種因子の影響を統括的に検討した研究がこれまでなされている^{1),2),3),4)}。土の三軸供試体の寸法の変化に伴いせん断挙動が変化する、いわゆる寸法・形状効果が存在することが、一連の実験^{3),5)}により明らかになってきており、供試体寸法の増加に伴い、供試体の強度が増加する例が報告されている。この正の寸法効果は、破壊力学的な考えによる、供試体寸法の増加に伴って供試体の強度が低下するという負の寸法効果⁶⁾と全く逆の傾向となっている。Ikeda and Goto⁷⁾は、分岐による土の正の寸法効果のメカニズムを示し、せん断挙動が分岐により支配され、供試体全体で一様な応力・変形場が保たれないために、要素試験としての解釈においては注意を要するという問題提起をしている。

Hill and Hutchinson⁸⁾は金属の引張り試験において均質状態から塑性分岐によりくびれやせん断帯が形成されるメカニズムを明らかにしている。Yatomi et al.^{9),10),11)}、志比ら¹²⁾は、有限変形場に拡張した非共軸 Cam-clay モデルを提案し、供試体の一様変形場からの分岐荷重と分岐モードに関する研究を行っている。Asaoka and Noda¹³⁾は、粘性土の水～土骨格連成解析によって時間依存性を考慮した変形分岐シミュレーションを行っている。小林ら^{14),15)}は、このような粘土の局所変形の発生を一種の分岐現象として捉え、各種モードの初期不整を導入した土/水連成有限要素解析を行い、

せん断帯(群)の発生から次第にいくつかの顕在化したすべり線へと漸次的に遷移していく様子をシミュレートしている。Tatsuoka et al.¹⁶⁾は、砂の平面ひずみ供試体のせん断帯について検討し、局所ひずみの定量化を行っている。吉田ら¹⁷⁾は、砂供試体に発生したせん断帯の内・外における変形挙動の計測実験を行っている。最近では、Otani et al.¹⁸⁾が供試体内部の3次元的な破壊状況を可視化する手法を開発している。円柱供試体にはダイヤモンドパターンと呼ばれる周期的なすべり線が発生することが観察・報告されており^{14),19),20),21)}、その分岐シミュレーションも行われる段階になってきている^{14),15),22)}。また、群論的分岐理論^{21),23),24)}により、円柱供試体にはダイヤモンドパターンやストライブパターンのような高周波分岐モードが先行し、その後に供試体の変形を引き起こす低周波の分岐モードが発現することが明らかにされている。

こうした変形の局所化挙動は、初期不整や供試体寸法・形状の影響を受けて複雑にモードが変動するため、要素試験において障害となるものである。従って、こうした局所化モードの変動挙動を明らかにすることは、要素試験の合理的な評価を行う上で不可欠である。そこで本研究では、供試体寸法・形状の変化に伴い、変形に対して支配的な分岐モードが変動し、この変動が供試体の強度や破壊挙動に影響を及ぼしているという視点に基づいて、砂の要素試験における寸法・形状効果を調べた。そのために豊浦砂の三軸圧縮試験を供試体の直径あるいは高さを各々変化させて行った。ここから得られた各供試体のピーク強度や残留強度特性、体

表-1 供試体の寸法 H , D および形状比 H/D

高さ H (cm)	直径 D (cm)	形状比 H/D
5.0	3.5	1.43
10.0	3.5	2.86
5.0	5.0	1.00
7.5	5.0	1.50
10.0	5.0	2.00
15.0	5.0	3.00
10.0	6.0	1.67
10.0	7.0	1.43
10.0	8.0	1.25

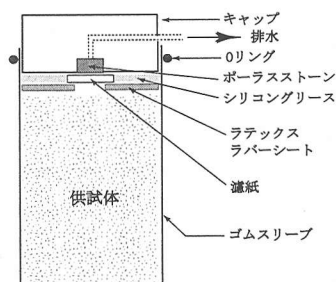


図-1 供試体上下端面の摩擦低減層²⁵⁾(lubrication layer)

積ひずみ特性, せん断帯の数と周期, 供試体寸法・形状といった各種要因の相互の関係について検討を行い, 供試体強度の寸法・形状依存性, せん断帯発生による供試体の体積ひずみ挙動について考察を行った。また各供試体のスケッチをとり, 供試体形状によるせん断帯の発生状況やその周期性についての考察も行った。また, ダイヤモンドパターンに代表される, 供試体に発生する分岐モードの観察と考察には力点を置いた。

2. 豊浦砂の三軸圧縮試験

豊浦砂を用いた圧密排水 (CD) 三軸圧縮試験を, 供試体の高さ H および直径 D を変化させて行った。表-1 に示す 9 種類の寸法・形状の供試体について, それぞれ 8 ケースの実験を同一条件で実施した。試料は水で洗浄し細粒分を取り除いた後に炉乾燥したものを用いて, 気中落下法により供試体を作製する。相対密度が $D_r = 85 \pm 3\%$ になるように落下高さを 62 cm とし, 供試体完成後の重量を計測し, 相対密度がこの範囲から外れているものはサンプルから除外した。高さ方向についてもできるだけ均質な供試体とするために, 試料重量を予め 10 分割して計測しておき, 各層で落下高さが一定となるよう 10 層に分けてモールドに詰めた。小高ら¹⁹⁾は, 様々な層数で作製した砂供試体の排水三軸試験を行い, 層毎に密度が不均一となることから, 層数により破壊形態が異なることを報告している。本研究では層数の影響は検討しないが, 10 層に細かく

分けたこと, 全ケースを通じ同じ層数としたことから, ケース毎の破壊形態の違いは, 層数の影響よりもむしろ供試体寸法・形状に依存した結果と考えられる。

キャップ・ペDESTALは, 本研究では供試体直径と同径のものを用いた。この場合, 端面変位の拘束により, せん断開始当初からタル型モードが誘発される。この影響を軽減するには, 供試体より大きな径のキャップ・ペDESTALを用いることが必要であり, せん断初期の比較的均一な変形時には特に有効である。しかし小高ら¹⁹⁾の実験では, この方法を用いているものの, 試験終了時には様々な形状の破壊形態となっている。後に示す本実験の破壊形態も, 必ずしも全ケースが同様なタル型モードではなく, 供試体形状ごとに様々なモードを呈している。すなわち, 本研究のような試験条件の下では, 端面拘束の影響を受けつつも, 破壊モードは供試体形状に強く依存しているものと考えられる。

また, 供試体上下端面におけるキャップ・ペDESTALとの摩擦の影響を低減するため, 図-1 に示すようなシリコングリスとラテックスラバーシートを用いた摩擦低減層^{25),26)}を設置した。澁谷ら²⁷⁾は, 端面摩擦の影響と摩擦低減層の効果を検討し, 摩擦低減処理を行うか否かによって試験で得られる砂の破壊時の内部摩擦角に数度程度の差が出ること, 適切な端面処理により寸法・形状の影響が低減されること等を報告している。端面の変位拘束と摩擦の影響を十分に排除するためには, 供試体より大きな径のキャップ・ペDESTALを用いた上で, 摩擦低減層を設置する必要がある。これらは, 実験上の問題点として今後解決する必要がある。

供試体完成後, 二酸化炭素と脱気水をそれぞれ約 1 時間循環させて飽和させ, 等方圧 98 kPa で約 30 分間等方圧密を行った。間隙圧係数が $B \geq 0.95$ 以上で供試体が十分に飽和していることを確認できたら, せん断を開始する。拘束圧は $\sigma_3 = 98$ kPa (セル圧 196 kPa, 背圧 98 kPa) とした。载荷は, 軸ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_a = 0.5\%/min$ の変位制御で行い, せん断帯などの局所変形の様子が目視でも顕著に観察されるようになる軸ひずみ $\epsilon_a = 25 \sim 35\%$ までせん断を行った。軸変位の測定は, キャップ・ペDESTAL間隔を計測する最も簡便な方法を用いた。LDT (Local Deformation Transducer)^{28),29)}など, 供試体上下端のベッディングエラーを排除する高精度の測定法が開発されている⁴⁾。微小ひずみ域の材料定数を求める上では, これらの方法を用いるか否かにより試験結果に大きな差が生じる。しかし本研究では, 均一変形あるいは局所変形領域を高精度で計測することよりも, 境界値問題としての供試体の変形挙動を捉えることに主眼を置いているため, 簡便な計測法で十分と判断した。せん断中は, 軸ひずみ 2% 毎に変形の様子を供試体正面から写真撮影した。せん断終了後, セル室を分解し, 透明フィルムとトレーシング・ペーパーを用いて供試体表面に目視で観察できるせん断帯のトレースを行った。

3. 応力・変形特性に対する寸法・形状効果

本章では、応力やひずみといった定量的な計測量を対象とし、寸法・形状効果を調べる。供試体の変形モードやせん断帯の形成については、第4章で考察する。

(1) 軸ひずみ～軸差応力関係

実験で得られた軸ひずみ ϵ_a と軸差応力 $\sigma := \sigma_1 - \sigma_3$ との関係、および軸ひずみ ϵ_a と体積ひずみ ϵ_v との関係を各供試体寸法ごとに図-2, 3に示す。軸ひずみ、体積ひずみ共に圧縮を正と定義している。軸差応力の算出は、均一変形を仮定して ϵ_a, ϵ_v により断面変化の影響を考慮・補正する一般的な方法を用いた。実際はせん断過程の後半では、タル型変形やせん断帯形成などにより応力の一様性は失われており、供試体全体の「見掛けの」応力であるが、本研究の検討事項にはこの方法で十分と判断した。また各図の右側に、試験前の供試体の初期状態と試験終了時（軸ひずみ $\epsilon_a = 25 \sim 35\%$ 時）の変形状態の一例を示す。これらの図から分かるように、形状比 H/D が小さい供試体ほど、高さ方向ほぼ全体でせん断変形が進行し、供試体全体が膨らんだ形状となっている。一方、形状比 H/D が大きな供試体では、高さ方向のうちのある一部領域でだけせん断変形が進行し、その部分のみ提灯型に膨張している。これは供試体の上側、中央付近、下側を問わず発生しており、必ずしも自重の影響を受けたものではない。

また、軸ひずみ～軸差応力曲線における残留強度付近の挙動に着目すると、形状比 H/D が比較的小さな供試体では各8回の実験において安定した結果が得られているが、 $H/D = 10.0/3.5, 10.0/5.0, 15.0/5.0$ など形状比 H/D が比較的大きな（細長）供試体では、ばらつきが大きかったり、類似した挙動を示すもの同士で複数のグループに分かれていたり、また途中から別グループの曲線に切り替わるような挙動を示すなど、モードが安定しておらず不安定な挙動となっていることが分かる。これらのケースでは、荷重ピーク後の体積ひずみ挙動のばらつきも大きく、変形局所化のモード変動が激しいことを示唆している。以上のことは、供試体の寸法・形状の違いにより異なる分岐モードが発現すること、すなわち寸法・形状効果の一端を示している。

(2) ピーク強度

ピーク強度に対する供試体の寸法・形状の影響について考察する。その前に、材料的な因子による影響を調べるため、全種類の供試体寸法について相対密度 D_r と最大軸差応力 σ_{\max} との関係を図-4に示す。同図から分かるように、相対密度を $D_r = 85 \pm 3\%$ と厳しく管理したにも関わらず σ_{\max} は $442 \text{ kPa} \sim 558 \text{ kPa}$ （平均 488 kPa ）の範囲で変動している。しかしながら、相対密度 D_r とピーク強度 σ_{\max} との間には、少なくともこの狭い範囲の相対密度においては明瞭な相関は

認められず、むしろ供試体寸法・形状ごとにある傾向で偏って分布している。このことから、供試体の強度は材料的要因よりも、供試体寸法・形状とそれによる変形モードの変動に強く影響されていると考えられる。

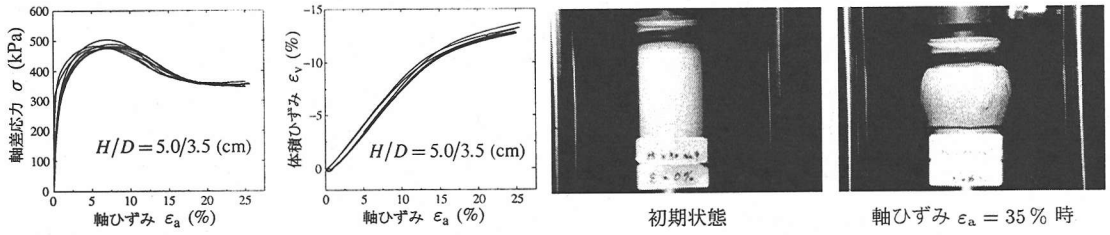
最初に、供試体寸法 H, D と σ_{\max} との関係について考えてみる。図-5(a)に、高さ $H = 10.0 \text{ cm}$ 一定として直径 D を変化させた場合の σ_{\max} を示す。図中の実線は各寸法ごとに8ケースの σ_{\max} の平均値を結んだものであり、直径 D が大きいほど σ_{\max} は大きくなっている。また図-5(b)に、直径 $D = 5.0 \text{ cm}$ 一定として高さ H を変化させた場合の σ_{\max} を示す。同図より、 $H = 7.5 \text{ cm}$ で σ_{\max} が僅かに極小となっているが、それ以上 H が大きいと、 H が大きいほど σ_{\max} は大きくなっている。しかし σ_{\max} の変化の割合は、高さ H よりも直径 D の変化による影響が大きい。

次に、寸法効果について調べる。図-5の関係では形状比 H/D の影響も含まれるが、ここでは同一形状比で寸法の影響を調べるため、供試体寸法を表すパラメータとして初期体積 $V_0 = \pi D^2 H / 4$ を取り、これと σ_{\max} との関係を図-6に示す。形状比 H/D が近いもの同士で比較するため、3グループ $H/D = 1.00 \sim 1.25$ ($5.0/5.0, 10.0/8.0$), $H/D = 1.43 \sim 1.50$ ($5.0/3.5, 7.5/5.0, 10.0/7.0$), $H/D = 2.86 \sim 3.00$ ($10.0/3.5, 15.0/5.0$) に分け、各ケースの σ_{\max} の平均値をそれぞれ実線、破線、点線で結んだ。標準的な $H/D = 2.00$ 前後のものは、 $H/D = 10.0/5.0$ の1ケースしかないため、ここでは検討しなかった。 V_0 が 150 cm^3 より小さい範囲では傾向がやや異なっているが、それ以外の範囲では「正の寸法効果」が認められる。なお、寸法効果の傾向が変わる閾値 $V_0 = 150 \text{ cm}^3$ は、本実験に限って得られた値であり、一般的に当てはまる値ではない。

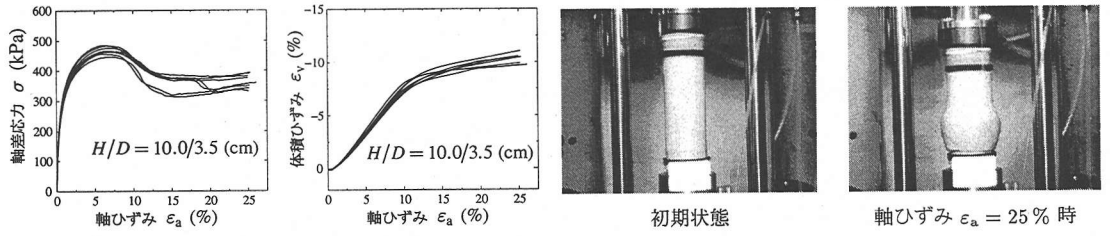
次に、形状効果について調べるため、形状比 H/D と σ_{\max} との関係を、図-7に示す。先に図-6で示した寸法効果の影響もあるため、図-7では明瞭な相関が無いように見える。そこで寸法効果の影響を除いて考慮するため、図-6での考察に従い、供試体の初期体積 V_0 が 150 cm^3 未満 ($H/D = 5.0/3.5, 10.0/3.5, 5.0/5.0, 7.5/5.0$) と、 150 cm^3 以上 ($H/D = 10.0/5.0, 15.0/5.0, 10.0/6.0, 10.0/7.0, 10.0/8.0$) に分けて、各ケースの σ_{\max} の平均値をそれぞれ実線、破線で結ぶ。前者では明瞭な相関は認められないが、後者では、特に $H/D = 1.25 \sim 2.00$ 付近で形状比 H/D が大きい（細長供試体）ほど σ_{\max} は小さくなっており、形状効果が認められる。以上より、ピーク強度は寸法効果と形状効果の双方の影響を受けていることが分かる。

(3) 体積ひずみ

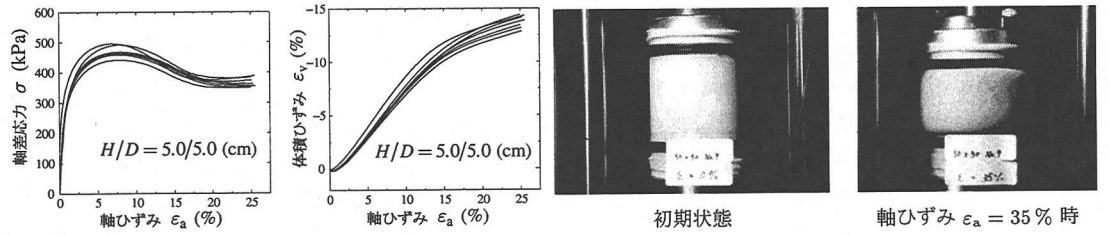
形状比 H/D と体積ひずみ ϵ_v との関係を軸ひずみ $\epsilon_a = 10\%$ 時および 25% 時について図-8に示す。同図より、荷重ピーク直後の軸ひずみ 10% 時には形状比



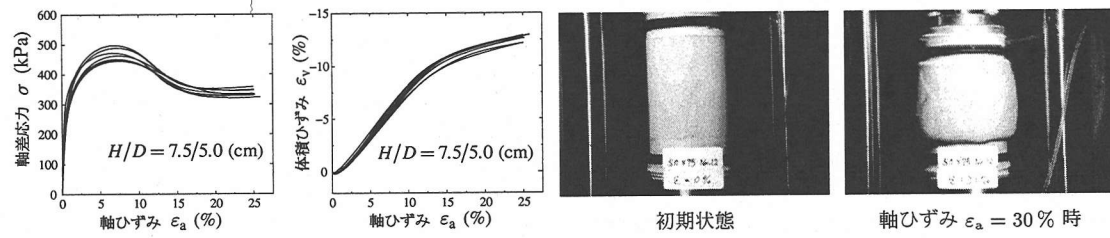
(a) $H = 5.0 \text{ cm}, D = 3.5 \text{ cm}, H/D = 1.43$



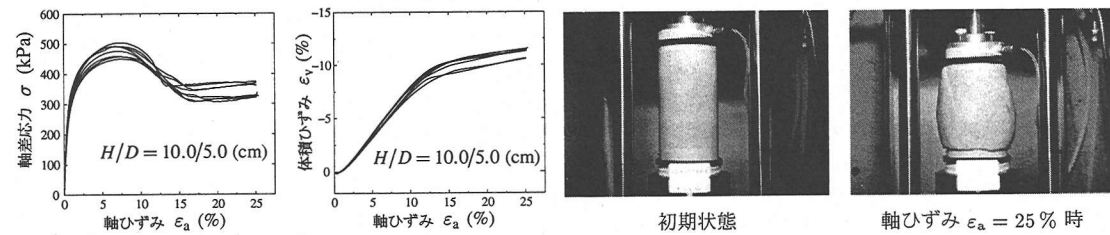
(b) $H = 10.0 \text{ cm}, D = 3.5 \text{ cm}, H/D = 2.86$



(c) $H = 5.0 \text{ cm}, D = 5.0 \text{ cm}, H/D = 1.00$

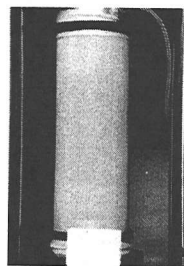
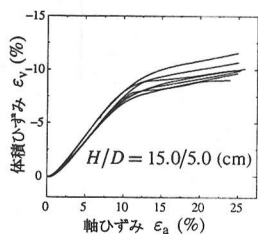
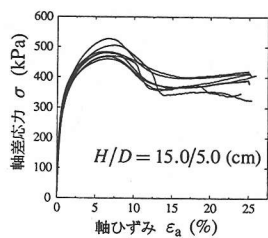


(d) $H = 7.5 \text{ cm}, D = 5.0 \text{ cm}, H/D = 1.50$

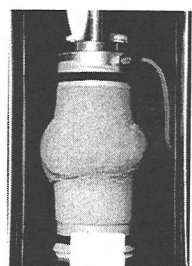


(e) $H = 10.0 \text{ cm}, D = 5.0 \text{ cm}, H/D = 2.00$

図-2 各寸法の供試体における軸ひずみ～軸差応力曲線, 軸ひずみ～体積ひずみ曲線, 初期形状と変形後の形状 (その1)

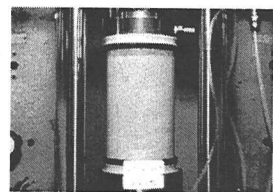
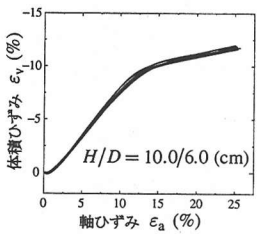
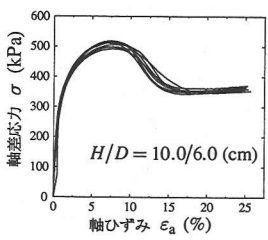


初期状態



軸ひずみ $\epsilon_a = 25\%$ 時

(a) $H = 15.0\text{ cm}, D = 5.0\text{ cm}, H/D = 3.00$

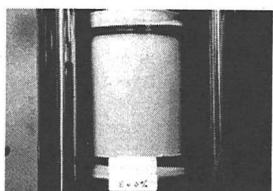
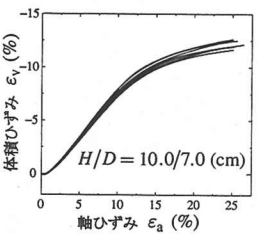
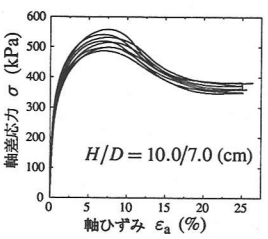


初期状態

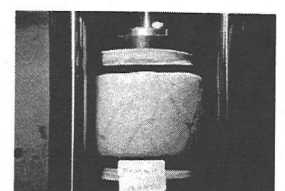


軸ひずみ $\epsilon_a = 25\%$ 時

(b) $H = 10.0\text{ cm}, D = 6.0\text{ cm}, H/D = 1.67$

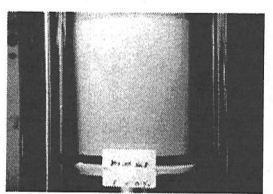
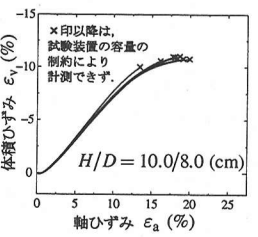
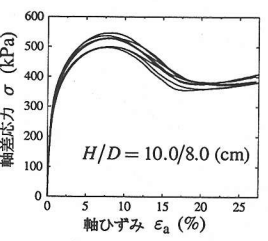


初期状態

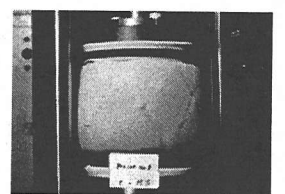


軸ひずみ $\epsilon_a = 30\%$ 時

(c) $H = 10.0\text{ cm}, D = 7.0\text{ cm}, H/D = 1.43$



初期状態



軸ひずみ $\epsilon_a = 35\%$ 時

(d) $H = 10.0\text{ cm}, D = 8.0\text{ cm}, H/D = 1.25$

図-3 各寸法の供試体における軸ひずみ～軸差応力曲線, 軸ひずみ～体積ひずみ曲線, 初期形状と変形後の形状 (その 2)

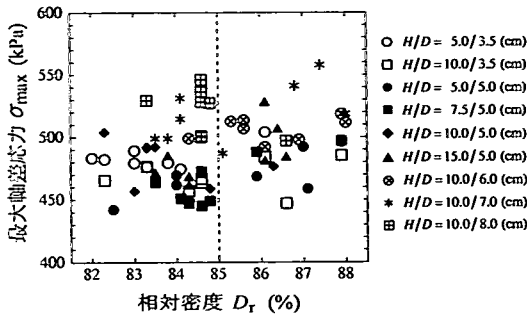


図-4 相対密度 D_r と最大軸差応力 σ_{max} との関係

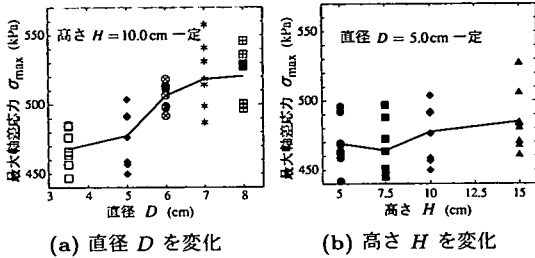


図-5 直径 D 、高さ H による σ_{max} の変化

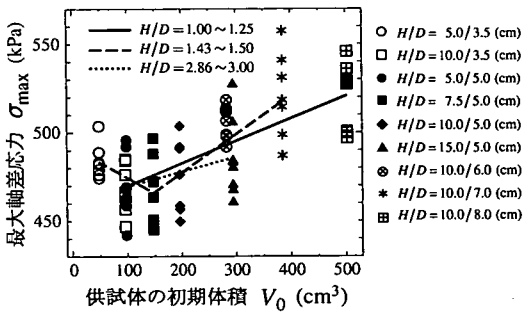


図-6 供試体の初期体積 V_0 による σ_{max} の変化

H/D ごとの体積ひずみの差は小さいが、さらに変形が進行して残留強度となる軸ひずみ 25% 時にはその差が大きくなっている。このことは、変形が進行するにつれて、形状比 H/D ごとに異なるモードの変形が顕在化していくことと結びつく結果である。また、形状比 H/D が大きいほど体積ひずみが小さくなっているが、これは第 3.(1) 節で述べた、形状比が大きい(細長の)供試体ほど高さ方向の一部の領域に変形が局所化するという結果と対応する結果である。

4. せん断帯の発生と供試体形状・体積ひずみ

ここでは、供試体表面に発生したせん断帯と供試体形状および体積ひずみ挙動との関連を考察する。本来、三軸圧縮試験は 3 次元問題として扱うべきであり³⁰⁾、ここで用いたせん断帯の 2 次元的な分析方法は、平面

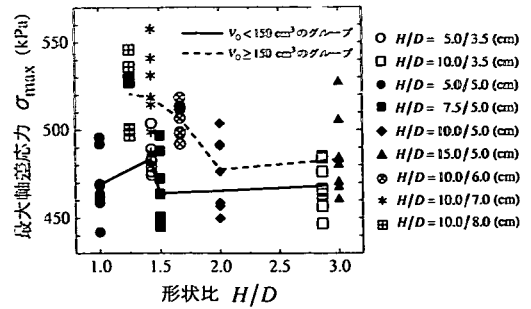


図-7 形状比 H/D による σ_{max} の変化

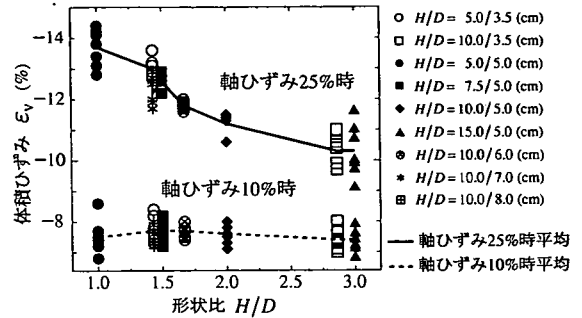


図-8 軸ひずみ $\epsilon_a = 10\%$ 、25% における形状比 H/D と体積ひずみ ϵ_v との関係

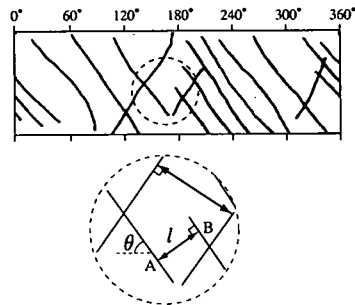


図-9 せん断帯のトレース結果(例)とせん断帯間隔の定義

ひずみ試験に対して適用するのが妥当である。しかし、円柱供試体における 3 次元的なせん断帯の取扱い¹¹⁾は煩雑であるため、ここでは供試体表面に発生した目視で確認できるせん断帯のみを対象とする。

一般に、せん断帯は共役 2 方向かつ各々ほぼ平行に発生する²⁰⁾ことから、2 つの隣り合うせん断帯を垂直に結ぶ線分(図-9 中の線分 AB) の長さ l を「せん断帯の間隔」と定義し¹⁴⁾、試験終了時において供試体表面に観察されるせん断帯のトレースからせん断帯の発生数 N および間隔 l を求めた。なお、せん断帯が供試体上下端に渡って発生していない場合も、簡単のため、ひとつのせん断帯としてカウントした。

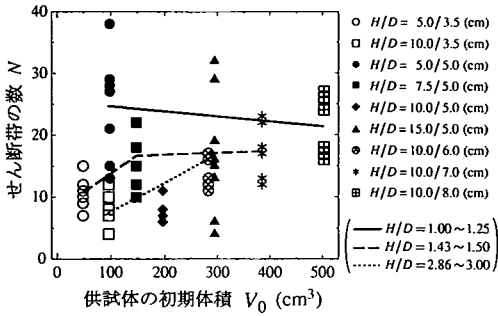


図-10 供試体の初期体積 V_0 とせん断帯の数 N との関係

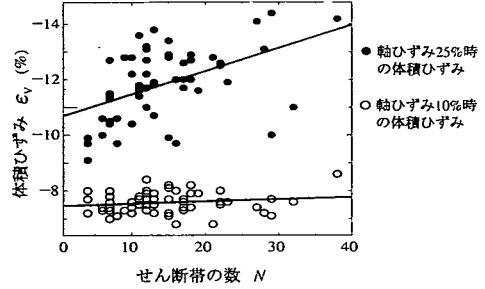


図-12 せん断帯数 N と体積ひずみ ϵ_v との関係

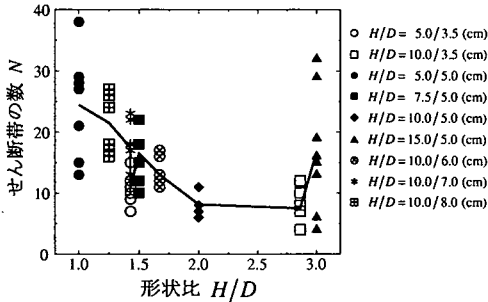


図-11 形状比 H/D とせん断帯の数 N との関係

(1) 寸法・形状とせん断帯の発生との関連

はじめに、せん断帯の発生に対する寸法効果を調べるために、供試体の初期体積 V_0 とせん断帯の数 N との関係を 図-10 に示す。ここで N は試験終了時の値である。形状比 H/D が近いもの同士で比較するため、図-6 のときと同様に 3 グループに分け、各ケースの N の平均値をそれぞれ実線、破線、点線で結んだ。供試体寸法（初期体積 V_0 ）に伴うせん断帯の数 N の変化には、一定の傾向は認められない。次に、形状効果について調べるため、形状比 H/D とせん断帯の数 N との関係を 図-11 に示す。同図より、 $H/D = 1.0 \sim 2.0$ の範囲では、形状比 H/D が大きいほど N が少なくなり、 $H/D = 3.0$ 付近ではこれと逆の傾向となることが分かる。すなわち、 $H/D = 2.0$ 付近で N が極小となっている。このことは、供試体を横切る数本の大きなせん断帯が発生して、比較的低次のモードで破壊していることを意味する。詳細な破壊モードの考察は第 5 章で行うが、 $H/D < 1.5$ 程度の供試体では供試体全体に短い周期で規則的にせん断帯が発生する。一方、 $H/D > 2.5$ 程度では高さ方向の一部領域でのみせん断変形が進行し、この領域でのみ短い周期のせん断帯が発生しており、このことが N が大きくなっている要因と考えられる。以上より、前章で述べたピーク強度に対する寸法・形状効果とは異なり、せん断帯の発生には寸法効果の影響は少なく、形状効果が支配的である。

(2) せん断帯の発生と体積ひずみとの関連

せん断帯数 N と体積ひずみ ϵ_v との関係を 図-12 に示す。ここで N は試験終了時の値である。体積ひずみは、 $\epsilon_a = 10\%$ 時 (○)、および 25% 時 (●) の値を全ケース示してある。軸ひずみ 10% の段階では、最終的に発生するせん断帯数 N に関わらず、サンプル毎の体積ひずみの差は少ない。なお、軸ひずみ 10% 時には、目視で観察できる明瞭なせん断帯がまだ発生していない。しかし軸ひずみ 25% 時になると、体積ひずみのばらつきが大きくなり、また、せん断帯数 N が多いほど膨張量が大きくなっていることが分かる。このことは、せん断帯内部での吸水膨張を考慮すると、軸ひずみ 10% 以降の軸ひずみレベルにおいて急速にせん断帯が発生・進展し、その発生の仕方によって体積ひずみ挙動に大きな影響を及ぼしていることを示している。

(3) せん断帯の周期

先に 図-9 に例示したせん断帯のトレースから分かるように、供試体表面のせん断帯は周期性を持って発生する。そこで、ここではせん断帯の周期（間隔 l ）について考察する。せん断帯の周期について、例として $H/D = 5.0/5.0, 15.0/5.0$ のケースを示すと、それぞれ 図-13(a), (b) のようになる。横軸は供試体初期周長 πD で割って無次元化したせん断帯の周期 $L := l/(\pi D)$ 、縦軸は 8 ケースのせん断帯数 N の合計である。両ケース共に、無次元化周期 $L = 0.05 \sim 0.1$ 付近で最頻値となっているが、 $H/D = 15.0/5.0$ の方が周期にばらつきが多い。そこで、供試体の直径 D あるいは高さ H と、無次元化周期 L の標準偏差との関係を、高さ $H = 10.0\text{ cm}$ 一定の場合、直径 $D = 5.0\text{ cm}$ 一定の場合それぞれについて、図-14(a), (b) に示す。図-14(a) より、直径 D が大きいほど標準偏差が小さくなっており、せん断帯の周期が安定していることが分かる。また 図-14(b) より、高さ H が高いほど標準偏差が大きくなる傾向があり、せん断帯の周期はばらつくことが分かる。すなわち、形状比 H/D が小さいほど変形モードが安定しており、逆に、形状比 H/D が大きな供試体では様々な変形モードで破壊する傾向がある。このことは、第 3.(1) 節で述べた結果と一致している。

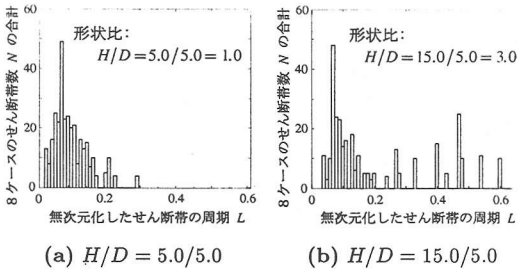


図-13 形状比 H/D による周期 L の分布の違い

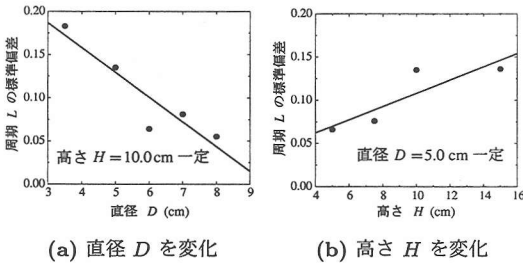


図-14 供試体形状 H, D と周期 L の標準偏差との関係

5. 変形モードの観察と分類

各寸法の供試体の変形モードの観察結果に基づき、典型的な変形モードを分類した結果、下記の6タイプに分類できた。各タイプの供試体の変形状態の写真と表面のせん断帯のトレース図を図-15に示し、表-2に各寸法における各タイプの発生数をまとめる。

- 高さ方向全体に太いせん断帯 (図-15(a))
軸ひずみ $\epsilon_a = 10\%$ 以降で、供試体の高さ方向全体に渡る1~4本の太いせん断帯が明瞭に確認されるようになる。これは、変形の初期段階から低次の分岐モードに移行し、そのモードのまま局所変形が進行したことを意味する。形状比 $H/D = 2.0 \sim 3.0$ の供試体で多く見られた。
- 上, 中, 下部のいずれかに太いせん断帯 (図-15(b))
上, 中, 下部のいずれかだけでせん断変形が進行して太いせん断帯が入り、それ以外のところでは変形が進まない。必ずしも下部に発生するのではないので、自重の影響ではないと考えられる。形状比 $H/D = 2.86, 3.00$ の供試体で見られた。
- せん断帯があまり交わらない (図-15(c))
せん断帯は少なく、共役2方向のせん断帯はあまり交わらずに接する程度で四辺形ブロックを多く形成する。これらブロック内では変形は進行せず、剛体的挙動をしているものと見られ、変形はせん断帯に局所化している。このパターンは形状比 $H/D = 1.00 \sim 1.67$ の供試体で見られ、特に形状比 1.25, 1.43 の供試体で多く見られた。

- 歪んだダイヤモンドパターン (図-15(d))
せん断帯による形がバラバラの四辺形ブロックが数多く形成される。形状比 $H/D = 1.25 \sim 2.00$ の供試体で見られ、特に形状比 1.50, 1.67 の供試体で多く見られた。
- ダイヤモンドパターン (図-15(e))
せん断帯が共役2方向に規則的・周期的に発生し、多くのひし形ブロックが形成される。形状比 $H/D = 1.25, 1.43$ の供試体で見られた。
- 細かいダイヤモンドパターン (図-15(f))
せん断帯による多くの細かいひし形ブロックが形成される。このパターンは形状比 $H/D = 1.0$ の供試体に観察された。また $H/D = 3.0$ の供試体においても、上, 中, 下部のいずれかだけにこのパターンが形成されたものもあるが、変形が集中してせん断帯が形成された領域だけを考えると、実質的に変形が進行している領域の形状比は1.0程度であると解釈することもできる。

図-16は、形状比 H/D ごとに典型的に見られる変形タイプとその模式図を整理したものである。低次モードで破壊することが多いのは $H/D = 2.0$ 付近であり、それよりも形状比が小さいほど、あるいは大きいほど、ダイヤモンドパターンを形成することが多いことが分かる。ただし $H/D = 3.0$ などの細長供試体では、上, 中, 下部のいずれかだけに変形が集中し、その領域内でダイヤモンドパターンを形成することが多い。

6. 分岐現象という視点による考察

第5章では、変形モードの観察結果に基づいて、現象論的な視点からモード分類を行った。本章ではこのモード分類をふまえて、供試体に観察された変形モードについて、分岐現象という視点に基づいて考察を行う。分岐による変形モード変化の記述に関しては、群論的分岐理論が有用であるが^{(21),(23),(24)}、ここでは読者の理解のために、その主要な結果を適宜参照しながら用いることとし、数学的な詳細には立ち入らない。

(1) 分岐モードの分類と分岐の規則

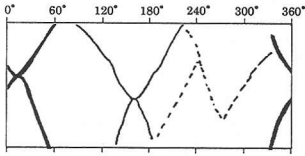
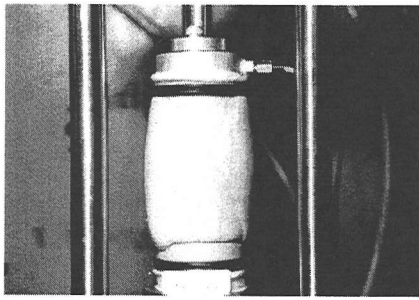
ここでは、円柱供試体に発生する高周波と低周波の分岐モードや分岐の仕組みについてまとめる。

a) 高周波の分岐モード

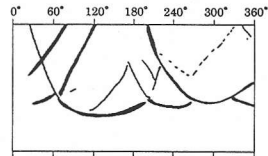
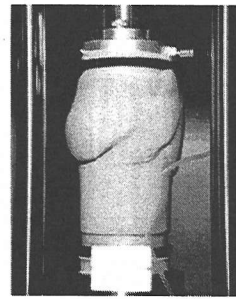
均質な円柱領域の分岐解として、ダイヤモンドパターンやストライプパターンのような高周波のモードが存在する。こうした周期的な変形パターンの発生は、供試体の初期状態の均質さの指標となるものである^{(21),(23)}。

b) 低周波の分岐モード

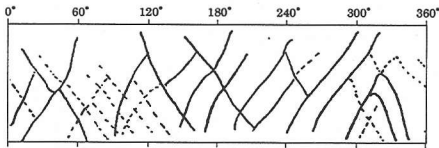
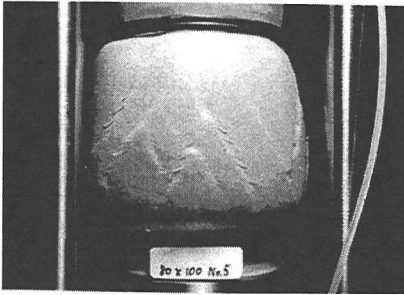
円柱形状の変形をもたらす低周波の分岐モードの典型例としては、図-17に示す4種類のモード $\pm e_i$ ($i = 1, 2, 3, 4$) があげられる。円柱から直接分岐する場合に



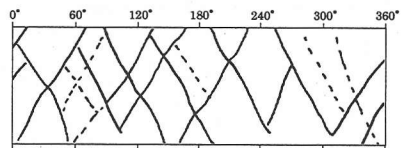
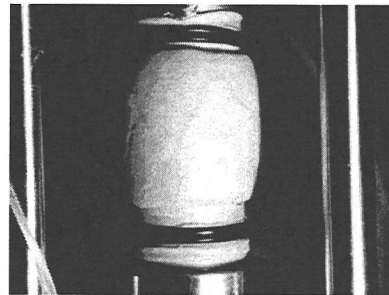
(a) 高さ方向全体に太いせん断帯



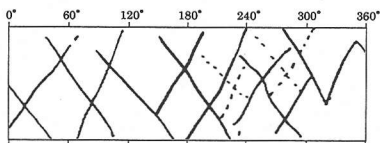
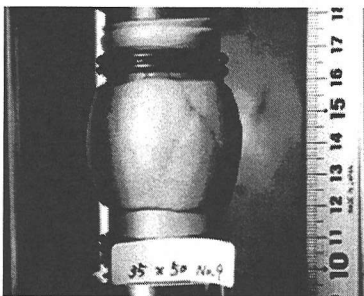
(b) 上, 中, 下部のいずれかのみ太いせん断帯



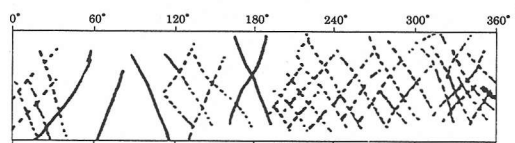
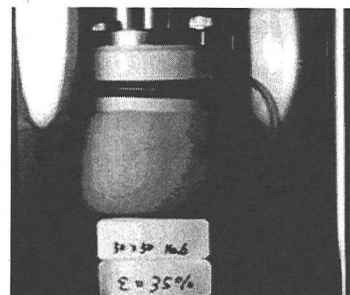
(c) せん断帯があまり交わらない



(d) 歪んだダイヤモンドパターン



(e) ダイヤモンドパターン

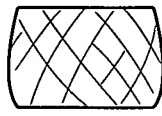

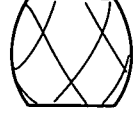

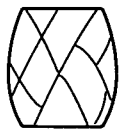


(f) 細かいダイヤモンドパターン

図-15 供試体に発生した変形モードの分類

表-2 供試体寸法ごとの変形モード発生の様子

供試体の寸法 (cm)			データ本数					
			高さ方向全体に 太いせん断帯	上部, 中部, 下部のみに 太いせん断帯	せん断帯が あまり 交わらない	歪んだ ダイヤモンド パターン	ダイヤモンド パターン	細かい ダイヤモンド パターン
H	D	H/D						
5.0	3.5	1.43	0	0	6	0	2	0
10.0	3.5	2.86	4	3	0	0	1	0
5.0	5.0	1.00	0	0	3	0	0	5
7.5	5.0	1.50	0	0	4	4	0	0
10.0	5.0	2.00	6	0	1	1	0	0
15.0	5.0	3.00	2	3	0	0	0	3
10.0	6.0	1.67	0	0	1	7	0	0
10.0	7.0	1.43	0	0	6	2	0	0
10.0	8.0	1.25	0	0	5	2	1	0

形状比	1.00	~	1.25, 1.43	~	1.50, 1.67
変形 の 模式 図					
分類	細かいダイヤモンドパターン	せん断帯があまり交わらない	ダイヤモンドパターン	歪んだダイヤモンドパターン	

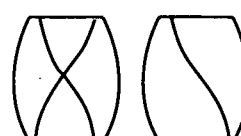

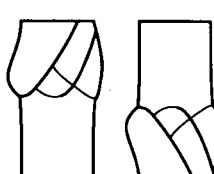


形状比	2.00	~	2.86	~	3.00
変形 の 模式 図					
分類	高さ方向全体に太いせん断帯		上, 中, 下部のいずれか のみに太いせん断帯		細かいダイヤモンドパターン (上, 中, 下部のいずれかだけ)

図-16 形状比 H/D ごとに典型的に見られる変形タイプの模式図

は、これらのモードは harmonic なモードである。分岐モード e_3 だけが軸対称性が崩れるモードであり、残りのモードは軸対称モードである。

図-17 の上段のモード e_i ($i = 1, 2, 3, 4$) の符号を変えたものが、同図の下段のモード $-e_i$ ($i = 1, 2, 3, 4$) に対応している。 e_i と $-e_i$ が物理的に同一である場合には対称分岐と呼び、同一でない場合には非対称分岐と呼ぶ。重力の影響を無視すると、分岐モード e_1, e_3, e_4 は対称分岐に対応する。一方、分岐モード e_2 と $-e_2$ は、供試体上下端面摩擦の大きさが異なるため物理的に異なるモードと考えられ、非対称分岐に対応する。対称分岐においては、 e_i と $-e_i$ の内いずれも発生し得るが、非対称分岐においては、 e_i と $-e_i$ の内いずれかが選択

的に発生することが多い。例えば、鋼材の引張り試験では $\pm e_2$ の内 $-e_2$ が発生し(拡散くびれ⁹⁾)、土の三軸圧縮試験では e_2 が発生する。以下、各モードの特性をまとめる。

- 分岐モード e_1 では縦方向に sine の 1 波の変形が発生し、供試体の上部が凹み、下部が膨らむ。一方、分岐モード $-e_1$ ではその逆となっている。
- 分岐モード e_2 では縦方向に cosine の 1 波の変形が発生し、供試体の端部が凹み、中央部が膨らむ、いわゆるピア樽型のモードである。一方、分岐モード $-e_2$ ではその逆となっている。
- e_3 は供試体が倒れるモードである(このモードは文献¹³⁾で報告されている)。

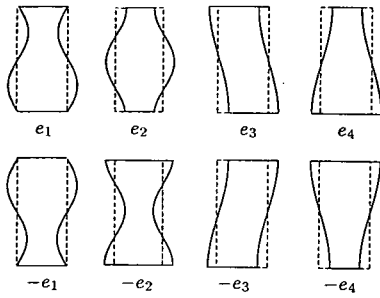


図-17 長方形領域の低周波 (harmonic) 分岐モードの例

- 分岐モード e_4 では、供試体の上部がすぼまり、下部が広がり、分岐モード $-e_4$ ではその逆である。

ちなみに、Vardoulakis and Sulem³¹⁾は、 e_3 を antisymmetric bifurcation mode (buckling) と、 e_4 を symmetric bifurcation mode (bulging) と呼んでいる。

c) 多段階の分岐の仕組み

群論的分岐理論³²⁾により、対称性を持つ系は、対称性破壊分岐を起こすことにより、対称性を段階的に喪失する可能性を持つことが明らかになっている。この理論を円柱供試体に適用すると^{21),23),24)}、対称性が高い高周波の分岐モードは、対称性が低い低周波の分岐モードより先に発生することになる。図-18 に円柱供試体の多段階の分岐の模式図を示す。図中の実線矢印で示すように、一番上の均質一様な状態、中間のダイヤモンドパターン、一番下の低周波の分岐モード e_i ($i = 1, 2, 3, 4$) の順に対称性が低下して行き、分岐もこの順に起こることになる。ただし、ダイヤモンドパターンが発生した時点において、パターンが肉眼で観測できるかどうかは別問題である。また、図中の破線矢印で示すように、均質一様な状態から直接に低周波の分岐モード e_i ($i = 1, 2, 3, 4$) が発生することも可能である。

d) 単位構造と平面充填性

図-19 に長方形平面ひずみ供試体が一軸圧縮を受けた場合に一様変形場から発生する拡散型の harmonic な分岐モードの例を示す。この分岐モードは、ある単位構造 (unit cell) を規則的に繰り返す周期構造となっている。図中の破線はこの単位構造を示している。このように、単位構造はそれ自身を重ね合わせることでより平面を埋め尽くすことができるような形状、すなわち平面充填図形となっている。単位構造の大きな特徴として、膨張部分と収縮部分が半分ずつ存在する反対称性があげられる。

(2) 実験での破壊形態における分岐モードの分類

前節で導入した、高周波・低周波の分岐モード、多段階の分岐、平面充填性という概念に基づき、形状比 $H/D = 1.0, 1.5, 2.0, 3.0$ という 4 種類の供試体の変形の進行を調べる。図-20 に各形状比の供試体の変形の

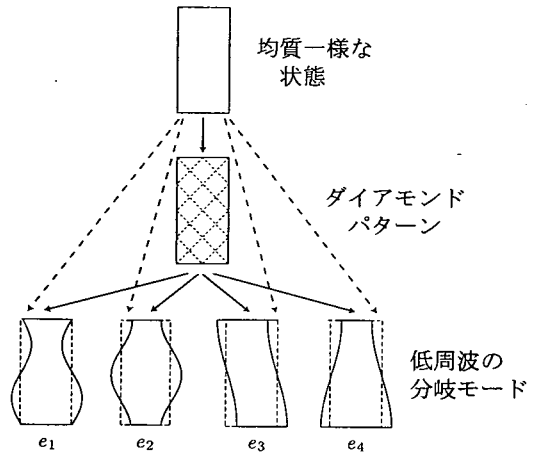


図-18 円柱供試体の多段階の分岐の模式図

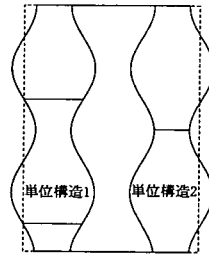


図-19 長方形領域の分岐モードの例と単位構造

進行の写真を示す。左から右に軸ひずみ $\epsilon_a = 10\%$ 時、 20% 時、試験終了時 (軸ひずみ $25 \sim 35\%$) に対応する。図-2 と 図-3 に示した軸ひずみ～軸差応力曲線において、軸ひずみ 10% は軸差応力のピークを少し過ぎた時点で、軸ひずみ 20% はピークを完全に過ぎて残留強度を示しはじめた時点で、最終時は残留強度を示している時点でそれぞれ対応する。

a) 形状比 $H/D = 1.0$

形状比 $H/D = 1.0$ の供試体では、軸ひずみ 35% 時において 図-16 と 図-20(a) に示すようなバルジ型に変形した細かいダイヤモンドパターンが 8 ケース中 5 ケースに観察された (表-2 参照)。しかし、軸ひずみ 10% 時においてバルジ型の変形が存在するかどうかは判然としない。また、軸対称性はどの時点でも保たれていた。この供試体の分岐による変形の進行として、下記の 2 通りが考えられる。

均質な状態 → ダイヤモンドパターン

という、1 段階の分岐によりダイヤモンドパターンが発生し、ダイヤモンドパターン状のせん断帯が進展しつつバルジ型に膨張し、ダイヤモンドパターンがより鮮明になった。または、

均質な状態 → ダイヤモンドパターン → e_4

という、2段階の分岐により、ダイヤモンドパターンとバルジ型の変形を起こした (e_4 は 図-17 に示すように、バルジ変形を引き起こす分岐モードである)。ダイヤモンドパターンは均質な状態からの分岐モードであるので、その発生はバルジ型の変形に先行する (図-18 参照)。この場合には、供試体は最後までパターンと軸対称性を保持することにより、供試体全体でせん断変形を受け持っていると考えられる。ただし、実験で用いたキャップ・ペDESTAL径が供試体直径よりも小さかったため、上下端面の変位拘束の影響があったことは実験上の問題点であった。

b) 形状比 $H/D = 1.5$

形状比 $H/D = 1.5$ の供試体では、軸ひずみ 30% 時において 図-16 と 図-20(b) に示すような歪んだダイヤモンドパターンが観察される場合とせん断帯があまり交わらない場合が 4 ケースずつであった (表-2 参照)。また、いずれの場合にも軸対称性は失われていた。この場合には、ダイヤモンドパターンを発生させる分岐と軸対称性を喪失させる分岐が起こったことが考えられる。例えば、

均質な状態 → ダイヤモンドパターン → 軸対称性の喪失

という分岐がこれに対応する。軸対称性を喪失させる分岐モードの例としては、図-17 に示す倒れるモード e_3 や断面を楕円化させるモードなど色々考えられるが、モードを特定することはできなかった。この場合には、ダイヤモンドパターンが発生した時点では、供試体は比較的均質であったが、軸対称性を喪失させる分岐に伴い、非対称の変形の進行と局所化を起こしたものと考えられる。

c) 形状比 $H/D = 2.0$

形状比 $H/D = 2.0$ の供試体では 図-16 と 図-20(c) に示すように、軸ひずみ 25% 時には高さ方向に太いせん断帯が観察される場合が 8 ケース中 6 ケースであった (表-2 参照)。この場合の供試体の形状はピア樽型であり、軸ひずみ 25% 時には軸対称性が失われている。この場合には、

均質な状態 → e_2 → 軸対称性の喪失

という分岐が起こったものと考えられる。ここに、 e_2 は 図-17 に示すように、ピア樽状の分岐モードである。この場合には、ダイヤモンドパターンが発生せず、非対称の変形の進行と局所化が最も顕著であった。

d) 形状比 $H/D = 3.0$

形状比 $H/D = 3.0$ の供試体では 図-16 と 図-20(d) に示すように、軸ひずみ 30% 時には供試体の一部に変形が局所化し、せん断帯またはダイヤモンドパターンが観察される場合が 8 ケース中 6 ケースであった (表-2 参照)。軸ひずみ 10% の時点で早くも局所化の兆候が観察されている。供試体の一部に変形が局所化するメカ

ニズムとしては、図-17 に示す分岐モード $\pm e_1, e_2$ のいずれかが発生することが考えられる。ちなみに、 $e_1, e_2, -e_1$ に対し変形はそれぞれ供試体の上部、中部、下部に集中することになる。このことから

均質な状態 → ダイヤモンドパターン → e_1
 $-e_1$
 e_2

という分岐が起こったものと考えられる。この場合には、軸対称性は保たれているが、高さ方向には変形の局所化が進行している。圧縮部と膨張部とに分けると、各部分は比較的一様に変形している。

e) 平面充填性

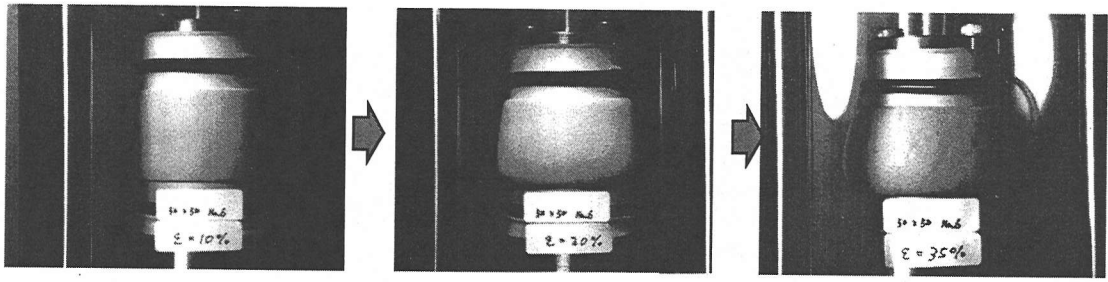
第 6.(1) d) 項で触れた平面充填性という視点で変形モードを見てみよう。地盤材料の要素試験の目的は、現位置からサンプリングした試料を用いて代表体積要素としての土の物性を評価することであるから、図-19 に示すような単位構造、あるいはその単位構造の集まりを切り出し、その特性を調べることが土の物性評価の上で合理的であると考えられる。形状比 $H/D = 1.0$ の供試体において発生する細かいダイヤモンドパターンは、ある種の単位集合の集まりと考えられる。

図-6 に示したように、寸法の大きい供試体ほど強度が高くなっている。この傾向は、供試体の境界部分に本来は土があるべきところを水による拘束圧で置き換えた影響が、寸法が小さい供試体になるほど大きくなるためであると考えられる。また、この影響は軸差応力の増加に伴い、さらに大きくなるものと思われる。図-20 に示すように、いずれの形状比の供試体も軸ひずみ 10% の時点では変形が比較的小さく、平面充填性は概ね保たれている。しかし、軸ひずみ 20% ~ 最終時では、いずれの形状比の供試体も平面充填性は失われており、荷重ピークを超えて軸ひずみ ~ 軸差応力曲線が残留強度を示しはじめる前に、要素試験としての役目を終えているようである。

形状比 $H/D = 1.0$ の供試体における変形モードは全域で膨張のみとなっており、単位構造としての特性が失われている。一方、形状比 $H/D = 3.0$ の場合には、変形の初期においては、図-19 の単位構造 1 に近い形となっており、膨張と収縮がキャンセルするために全体として体積膨張量は小さくなることが予測される。この傾向は、図-8 に示した、形状比 H/D と軸ひずみ $\epsilon_a = 10\%$ 、25% 時の体積ひずみ ϵ_v との関係にも表れている。軸ひずみ 10% 時は各形状比ごとの体積ひずみの差はあまりないが、さらに変形が進行して軸ひずみ 25% になると形状比ごとの体積ひずみの差が大きくなり、形状比が小さいほど膨張量が大きくなっており、前述の予測を裏付けている。

f) 考察

形状比 H/D の違いにより、異なる分岐モードが発生し、異なる最終変形状態へと至っていることが明らか



軸ひずみ $\epsilon_a = 10\%$ 時

軸ひずみ $\epsilon_a = 20\%$ 時

軸ひずみ $\epsilon_a = 35\%$ 時

(a) 形状比 $H/D = 1.0$

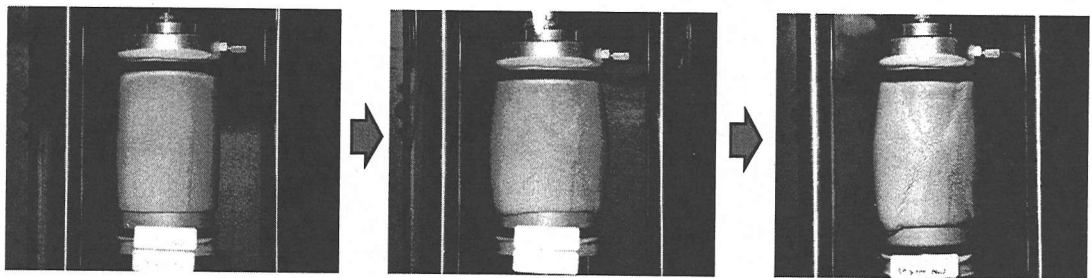


軸ひずみ $\epsilon_a = 10\%$ 時

軸ひずみ $\epsilon_a = 20\%$ 時

軸ひずみ $\epsilon_a = 30\%$ 時

(b) 形状比 $H/D = 1.5$

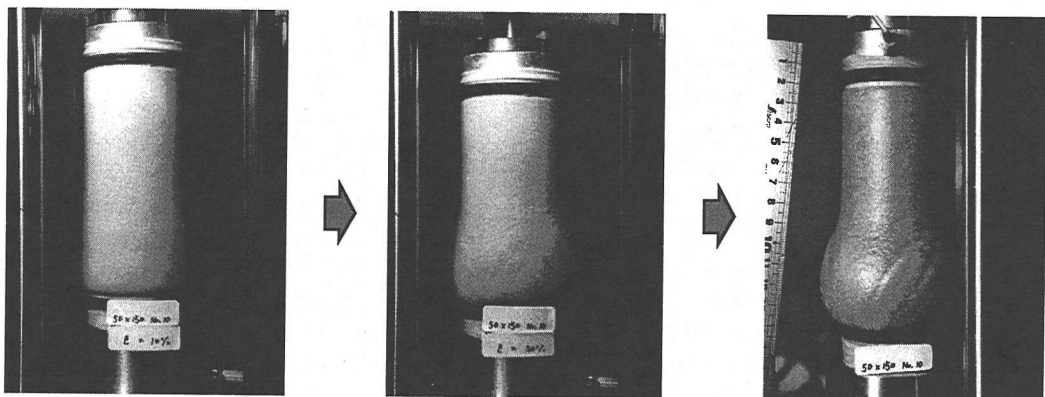


軸ひずみ $\epsilon_a = 10\%$ 時

軸ひずみ $\epsilon_a = 20\%$ 時

軸ひずみ $\epsilon_a = 25\%$ 時

(c) 形状比 $H/D = 2.0$



軸ひずみ $\epsilon_a = 10\%$ 時

軸ひずみ $\epsilon_a = 20\%$ 時

軸ひずみ $\epsilon_a = 30\%$ 時

(d) 形状比 $H/D = 3.0$

図-20 供試体の変形の進行

かになった。形状比 $H/D = 1.0$ 程度の供試体では、細かいダイヤモンドパターンという高周波の分岐モードが観察された。一方、形状比 $H/D = 3.0$ 程度の供試体では、供試体の上部、中部、下部のいずれかの方に膨張部をもたらす低周波の分岐モードが鮮明に観察され、そのうち膨張部のみにはダイヤモンドパターンが観察された。一般に広く用いられている形状比 $H/D = 2.0$ 前後の供試体では、低次の分岐モードが発生し、供試体全体を横切るような大きなせん断帯を形成することが多かった。このように、形状比ごとに特有の分岐モードと、それに対応した局所変形モードが進展することは、三軸圧縮試験を実施する際に注意すべきことである。

第 4.(1) 節で述べたように、形状比 $H/D = 2.0$ 前後の供試体はせん断帯の数が少なく、より明瞭な低次モードの局所化を起こす性質がある。均質様な領域にある種のパターンが発生するというパターン形成の性質から見ると、形状比 $H/D = 1.0, 3.0$ 程度の供試体の方が、一般に広く用いられている形状比 $H/D = 2.0$ 程度の供試体よりもより均質な状態が長く保たれていると言える。このことから、通常一般に用いられている形状比 $H/D = 2.0$ 前後の供試体は、土の代表的な材料物性を調べる要素試験に用いる際には、局所変形が顕著であるという点に注意を要すると言える。

7. 結論

本研究では三軸圧縮試験において、供試体の寸法・形状とピーク強度、体積ひずみ、変形モード、せん断帯の形成といった各種因子との関係について考察した。これまでの考察により、砂供試体の寸法・形状効果について以下のような結論が得られた。

1. 供試体寸法の増大に伴って強度が増加する「正の寸法効果」を確認した。しかし、供試体形状比とそれにより誘発される変形モードの変動も強く関与しているため、その挙動は複雑である。
2. 供試体の変形特性は、寸法・形状の影響を大きく受けており、様々な局所化モードを呈することが分かった。本研究ではこれらの変形タイプの分類を行い、供試体形状との関連について考察した。また、各種変形モードの発生・進展・遷移について、分岐現象という視点から考察を行った。変形の局所化の影響を排除した土の材料物性としての強度は、実際の要素試験により得られる値よりも高いものと推察される。今後いかにしてこの物性パラメータを求めるかという方法論の開発が必要である。
3. 土の三軸圧縮試験において、客観性のある試験結果を得るためには、局所変形の影響を可能な限り排除し、また供試体形状の平面充填性を保つような試験法の開発が望まれる。一般に広く用いられている形状比 2.0 前後の供試体は、他の形状比の

供試体と比較して、低次の分岐モードを最も発生し易く、局所的なせん断帯の形成が顕著であるため、土の代表的物性を調べる際には注意を要する。

謝辞：本研究では、平成 11 年度科学研究費補助金（特別研究員奨励費・研究代表者：山川優樹）、ならびに（社）地盤工学会東北支部・地盤研究委員会の平成 11 年度研究助成を用いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Tatsuoka, F.: Some recent developments in triaxial testing systems for cohesionless soils, *Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock*, ASTM STP 977, pp. 7-67, 1988.
- 2) Goto, S. and Tatsuoka, F.: Effect of end conditions on triaxial compressive strength for cohesionless soil, *Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock*, ASTM STP 977, pp. 692-705, 1988.
- 3) Goto, S.: Strength and deformation characteristics of granular materials in triaxial tests, Doctor thesis, University of Tokyo, 1986.
- 4) 龍岡 文夫, 澁谷 啓: 三軸試験と原位置試験法との関連 (変形特性について), 三軸試験方法に関するシンポジウム発表論文集, 土質工学会, pp. 39-84, 1991.
- 5) 福島 伸二, 望月 美登志, 香川 和夫, 石井 武美: 砂の低拘束圧領域における超大型三軸圧縮試験, 土質工学会論文報告集, Vol. 29, No. 1, pp. 187-194, 1989.
- 6) Bazant, Z. P. and Cedolin, L.: *Stability of Structures*, Oxford, New York, 1991.
- 7) Ikeda, K. and Goto, S.: Imperfection sensitivity for size effect of granular materials, *Soils and Foundations*, Vol. 33, No. 2, pp. 157-170, 1993.
- 8) Hill, R. and Hutchinson, J. W.: Bifurcation phenomena in the plane tension test, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 23, pp. 239-264, 1975.
- 9) 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.
- 10) Yatomi, C., Yashima, A., Iizuka, A. and Sano, I.: Shear bands formation numerically simulated by a non-coaxial Cam-clay model, *Soils and Foundations*, Vol. 29, No. 4, pp. 1-13, 1989.
- 11) Yatomi, C. and Shibi, T.: Antisymmetric bifurcation analysis in a circular cylinder of a non-coaxial Cam-clay model, in: Asaoka, A., Adachi, T. and Oka, F. (eds.), *Deformation and Progressive Failure in Geomechanics*, Proc. IS-Nagoya '97, pp. 9-14, 1997.
- 12) 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.
- 13) Asaoka, A. and Noda, T.: Imperfection-sensitive bifurcation of Cam-clay under plane strain compression with undrained boundaries, *Soils and Foundations*, Vol. 35, No. 1, pp. 83-100, 1995.
- 14) 小林 一三: 地盤材料の力学的安定性と破壊現象, 金沢大学博士学位論文, 1998.
- 15) 小林 一三, 飯塚 敦, 太田 秀樹: 正規粘土供試体せん断時における局所変形の遷移, 土木学会論文集, No. 617/III-46, pp. 1-18, 1993.
- 16) Tatsuoka, F., Nakamura, S., Huang, C.-C. and Tani, K.: Strength anisotropy and shear band direction in plane strain tests of sand, *Soils and Foundations*, Vol. 30, No.1, pp. 35-54, 1990.
- 17) 吉田 輝, 龍岡 文夫, 中村 慎一郎, 亀谷 泰久: 密詰め砂

- の平面ひずみ圧縮試験におけるせん断層内・外の変形特性, 土木学会第 49 回年次学術講演会講演概要集, III-170, pp. 334-335, 1994.
- 18) Otani, J., Mukunoki, T. and Obara Y.: Application of X-ray CT method for characterization of failure in soils, *Soils and Foundations*, Vol. 40, No. 2, pp. 111-118, 2000.
 - 19) 小高 猛司, 浅岡 顕, 鈴木 建爾: 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, III-156, pp. 306-307, 1994.
 - 20) 佐野 郁雄, 金岡 正信: 一軸圧縮による粘土の破壊形態の微視的観察, 第 28 回土質工学研究発表会発表講演集, pp. 777-778, 1993.
 - 21) Ikeda, K., Murota, K. and Nakano, M.: Echelon modes in uniform materials. *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 31, No. 19, pp. 2709-2733, 1994.
 - 22) 山川 優樹, 寺田 賢二郎, 池田 清宏, 鳥居 邦夫: 圧縮場における弾塑性体の分岐解析とパスジャンプ挙動, 土木学会論文集, 掲載予定, 2002.
 - 23) Ikeda, K. and Murota, K.: Recursive bifurcation as sources of complexity in soil shearing behavior, *Soils and Foundations*, Vol. 37, No. 3, pp. 17-29, 1997.
 - 24) Ikeda, K., Murota, K., Yamakawa, Y. and Yanagisawa, E.: Mode switching and recursive bifurcation in granular materials, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 45, No. 11-12, pp. 1929-1953, 1997.
 - 25) Tatsuoka, F., Molenkamp, F., Torii, T. and Hino, T.: Behavior of lubrication layers of platens in element tests, *Soils and Foundations*, Vol. 24, No. 1, pp. 113-128, 1984.
 - 26) Shibuya, S. and Hight, D. W.: A bounding surface for granular materials, *Soils and Foundations*, Vol. 27, No. 4, pp. 123-136, 1987.
 - 27) 澁谷 啓, Symes, M. J., Hight, D. W.: 砂の三軸強度に及ぼす端面摩擦の影響, 三軸試験方法に関するシンポジウム発表論文集, 土質工学会, pp. 105-112, 1991.
 - 28) 後藤 聡, 龍岡 文夫: 粒状体の三軸圧縮時の強度変形特性に与える試験条件の影響, 第 21 回土質工学研究発表会発表講演集, pp. 237-240, 1986.
 - 29) 佐藤 剛司, 澁谷 啓, 龍岡 文夫, 金 有性, スポット ティチャフォラシンスクン, 朴 春植, Presti, D. L.: 三軸および一軸供試体の微小ひずみでの変形係数の測定方法, 三軸試験方法に関するシンポジウム発表論文集, 土質工学会, pp. 173-112, 1991.
 - 30) 小高 猛司, 岡 二三生, 肥後 陽介, 田久 勉: 各種角柱供試体の三軸試験による粘土の分岐挙動の観察, 土木学会第 55 回年次学術講演会講演概要集, III-A54, 2000.
 - 31) Vardoulakis, I. and Sulem, J.: *Bifurcation Analysis in Geomechanics*, Blackie Academic & Professional, Glasgow, 1992.
 - 32) Golubitsky, M., Stewart, I. and Schaeffer, D. G.: *Singularities and Groups in Bifurcation Theory*, Vol. 2, Appl. Math. Sci. 69, Springer-Verlag, New York, 1988.

(2001.5.27 受付)

BIFURCATION DEFORMATION MODES AND SIZE/SHAPE EFFECTS OF TRIAXIAL SAND SPECIMENS

Yuki YAMAKAWA, Kiyohiro IKEDA, Yoshikiyo SUDO, Nobuo TERAII and Kunio TORII

A series of triaxial compression tests on various sizes/shapes of Toyoura-sand specimens is conducted to demonstrate the dependency of their shear and deformation properties on their size and shape. A positive size effect on the size of the specimens has been observed to indicate that the strength of sands interpreted as the representative material property could be much stronger than that observed during laboratory tests. Different shapes have led to different bifurcation modes and, in turn, to different shear and deformation properties. For example, diamond patterns are observed for specimens with the shape ratio of 1.0, while distinct shear bands are observed for those with the shape ratio of 2.0.