

# 平面ひずみ圧縮試験における砂のせん断形態

東北大学大学院 工学研究科 正会員 ○ 池田 清宏  
 東北大学工学部 土木工学科 櫻庭 嗣大  
 長岡技術科学大学 環境・建設系 正会員 山川 優樹  
 東北大学大学院 工学研究科 正会員 須藤 良清

## 1. はじめに

材料の変形・破壊に関しては、様々なモデルや理論が展開されている。その多くが、応力-ひずみ関係などの力学的性質に力点を置いたものである。しかし、せん断帯の幾何学的多様さ・複雑さは、その力学特性に多大な影響を及ぼすものである。そこで本研究では、砂の平面ひずみ圧縮試験を行い、供試体寸法、端面摩擦の有無、載荷速度などを变化させた場合の砂のせん断挙動の発現形態を観察することにより、せん断帯形成には、多段階の対称性喪失が関わっていることを検証する。また、有限要素法による分岐解析結果との比較を行うことにより、分岐の介在を検証する。

## 2. 実験条件

豊浦砂の平面ひずみ圧縮試験における試験装置の概略を図-1に示す。相対密度は  $D_r = 85 \pm 2\%$  の比較的密な供試体である。水圧を用いて側圧  $\sigma_3 = 73.5 \text{ kPa}$  を与え、軸ひずみ速度は  $\dot{\epsilon}_a = 0.50\%/\text{min}$ ,  $0.25\%/\text{min}$  の2種類に設定した。供試体寸法は、幅 50mm、厚さ 20mm を一定とし、高さを 72.5 ~ 152.5mm と变化させた。境界条件としては、端面摩擦「あり」と「なし」との2種類を用いた。端面摩擦なしの条件は lubrication layer を設置することで、供試体上下の端面摩擦の低減を図った。端面摩擦ありの条件は、サンドペーパーを敷き摩擦境界とした。まず、凍結法により作成した供試体をセットし、アクリル板を固定して厚さ方向の変位を拘束することにより、平面ひずみ条件とする。次に、供試体に 29.4 ~ 49 kPa の等方圧を作用させ、供試体が十分に解凍した後、側圧を 73.5 kPa に設定し、軸圧縮（せん断）を開始した。軸ひずみ 20%までは 1%間隔で、それ以降 30%までは 2%間隔で、変形状態を写真撮影した。

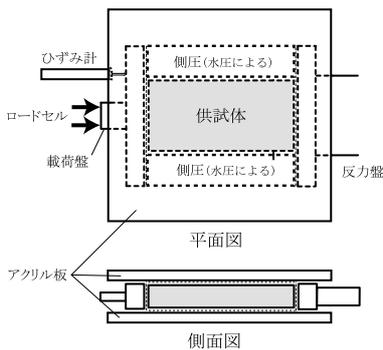


図-1 実験装置

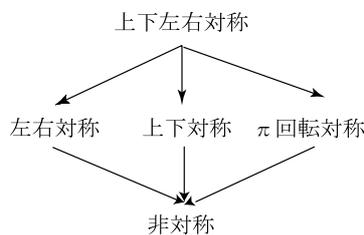
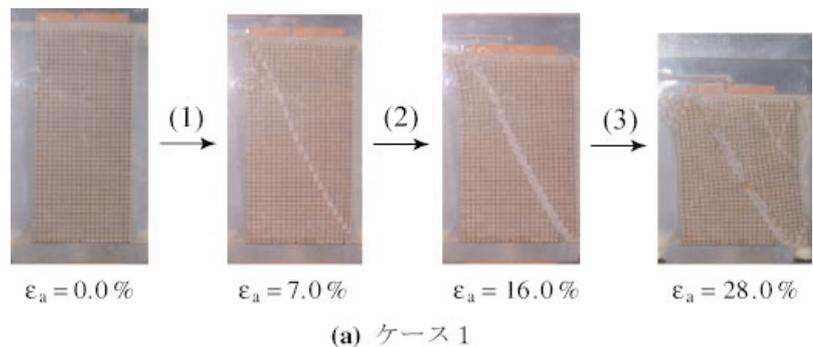
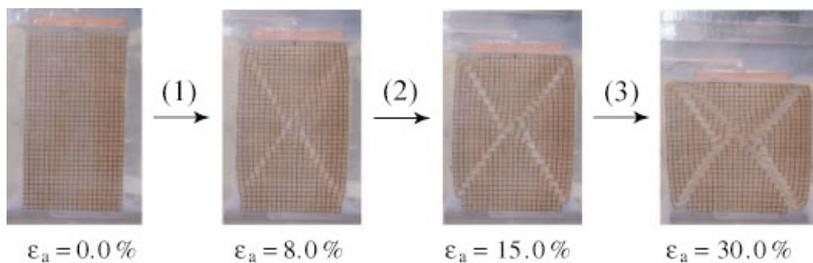


図-2 長方形領域の階層的分岐



(a) ケース 1



(b) ケース 2

図-3 供試体の変形の進行

## 3. 対称性破壊分岐理論

対称な系は、漸次対称性を失うという多段階の分岐を起こすことが知られている<sup>1)</sup>。平面ひずみ試験では、直方体供試体の厚み方向の鏡映に関する不変性は常に成り立っているものと考えられるから、この対称性を無視すると、図-2に示す長方形の対称性の喪失に関する分岐の仕組みにより直方体供試体の分岐は記述できる。この図-2は、「上下左右対称」な状態から「左右対称」、「上下対称」、「 $\pi$ 回転対称」の内いずれかの状態に移行し、さらに、もう一回の分岐により非対称になるという、対称性の低下の仕組みを表している。

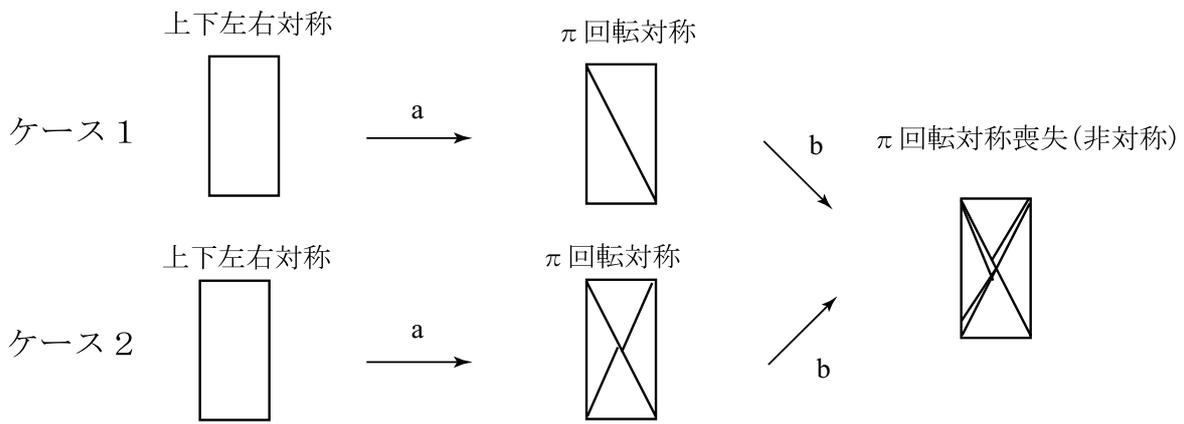


図-4 供試験体の対称性破壊分岐の模式図

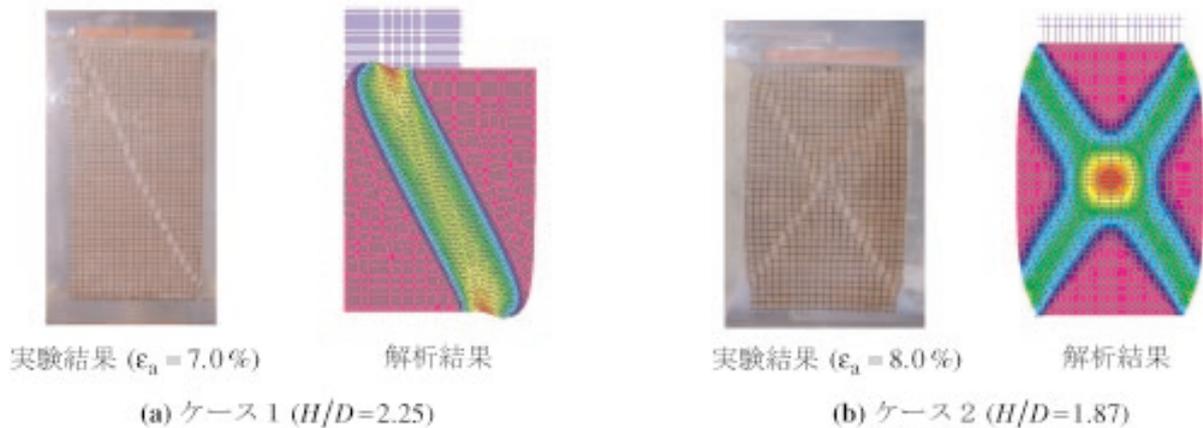


図-5 分岐モードの比較

4. 実験結果

変形状況の観察記録のうち、特徴的な2ケースを図-3に示す。同図(a)のケース1は、(1)の過程でせん断帯が対角線状に1本入り、(2)でそれが卓越し、(3)では周期パターン化している。一方、同図(b)のケース2は、(1)の過程でせん断帯が対角線状2本入り、その後、2本のせん断帯のうち1本の変形が卓越することにより、(2)でそれが徐々にずれてきて、(3)ではもはや対角線は崩れてしまっている。これ以外にも、多岐にわたるパターンのせん断帯形成が観察された。図-2の分岐の仕組みをもとに供試体の変形過程を分類することにより、図-4に示す供試体の分岐の進行の模式図を得た。例えば、ケース1は、図-3(a)の(1)の過程でπ回転対称となる。この変形段階はピーク応力付近であり、頂上分岐によるものと考えられる。図-3(a)の(3)の過程では、周期パターンモードになっている。ケース2は、図-3(b)の(1)の過程で、きれいなπ回転対称となる。図-3(b)の(3)の過程では、軸ひずみがかなり進行し、非対称化している。しかし、この非対称化は、幾何学的な分岐が先行し、その後ひずみが局所化した結果であるか、或いは材料不安定により突如としてひずみ(或いは変位)の連続性を喪失し、せん断帯を形成したことによるものかは不明であった。

5. 実験結果と解析結果の比較

文献<sup>2)</sup>による弾塑性分岐解析結果と本実験結果を比較する。図-5(a), (b)には、それぞれ形状比  $H/D = 2.25, 1.87$  の供試体について、各々の左側に実験での変形状態を、右側に解析結果を示してある。同図(a)に示すように、反対称1次モードの分岐が発生した後、1本の斜めのひずみ局所化域を形成すると、実験で典型的に観察される破壊形態となる。一方、同図(b)に示すように、X型にせん断帯が入る変形は、対称2次モードの分岐によるものであることが分かる。

6. 結論

本研究により、多段階に対称性を喪失しながら、供試体の変形が進行していることが明らかになった。また、実験結果と分岐解析を比較した結果、供試体の変形形態の傾向が非常によく整合していることを確認できた。

参考文献

1) Ikeda, K. and Murota, K.: *Imperfect Bifurcation Phenomena in Structures and Materials—Engineering Use of Group-theoretic Bifurcation Theory*, AMS Series 149, Springer, 2002.  
 2) 佐藤 啓介: 各種境界条件を考慮した土供試体の分岐局所化現象の数値解析, 長岡技術科学大学修士論文, 2002.