

CCD変位計測を利用した三軸試験による 不連続面を含んだ供試体の変形の局所化

CCD Measurement in Triaxial Test for Localized Deformation within a Specimen Including a Discontinuity

武元欣弘*・谷 和夫**

Yoshihiro TAKEMOTO and Kazuo TANI

A triaxial compression test was conducted on an artificial specimen including a plane of discontinuity. In the test, a CCD scanning system was employed to measure both axial and radial strains on the lateral side of the specimen. Strain increment distributions within the specimen are analyzed for different stages of shearing. The analytical result demonstrates highly localized shear deformations from the beginning of shear process.

Key Words: triaxial test, measurement, displacement, strain distribution, discontinuity

1. はじめに

原位置で岩盤の力学特性を調べる孔底三軸試験^{1,2)}の問題点である中央小孔を省略するために、円柱形状の試験体の側面でひずみを求めることができる新しい計測方法を考案した。この計測方法の特徴は、CCDにより円柱の側面に設けたマーカーの位置を三角測量した結果から、軸ひずみと側方ひずみの分布を得られる点である。岸(2002)³⁾は、この CCD 変位計測を利用した室内三軸試験装置を開発し、供試体のひずみ分布が得られることを実証した。

(1) CCD 変位計測を利用した三軸試験の概要

CCD 変位計測は図-1 に示す三角測量の原理を利用している。基線上の 2 つの測点 1&2 より、供試体の側面に設置したマーカーを視準して、基線の長さ (z_2-z_1) と測点 1&2 からの視準角度 θ_1 & θ_2 よりマーカーの座標 (x, z) を特定する。CCD 変位計測の実施態様では、視準角度が一定 $\theta=45^\circ$ になるように線状の CCD (Charged Coupled Device) と RAL (Rod Array Lens) が一体となった CCD センサーを供試体軸に平行に縦状配置する。そして、この CCD センサーが供試体の周方向に移動 (スキャン) して、マーカーを検出したときのセンサーの位置を測定する。2 方向に視準した 1 組の CCD センサーのスキャン結果より、三角測量の原理を利用してマーカーの位置を空間座標 (半径方向、周方向、軸方向) として求める。

供試体の側面に格子状にマーカーを密に配置すれば、供試体の形状を正確に計測ができる。載荷段階の前後における供試体形状の変化より、供試体内の軸ひずみも側方ひずみの分布も求めることができる。

なお、CCD 変位計測の詳細については、岸(2002)³⁾を参照されたい。

(2) 供試体の不連続性や不均質性が三軸圧縮試験の結果に及ぼす影響

* 横浜国立大学 工学部 建設学科 シビルエンジニアリングコース

** Ph. D. 横浜国立大学大学院 工学研究院

岩石供試体を用いた三軸圧縮試験では、試験の結果のばらつきが大きく、強度・変形特性に関する設計パラメータを決定することが困難な場合が多い。ばらつきの主な原因として、岩石が節理や亀裂などの不連続面を含むことや、礫岩や風化・変質のように不均質な構造を有することが挙げられる。連続性や均質性に関して完全に同一な供試体を数多く用意することは難しく、また、試験の結果は供試体の不連続性や不均質性に強く依存するので、ばらつきを完全に排除することは極めて困難である。

一方、三軸圧縮試験では、側面を一樣な応力境界に、上下端面を理想的に平行かつ平滑であれば一樣な変位境界としている。応力とひずみが、供試体内で一樣となる要素試験の条件を実現するためである。しかし、たとえ供試体が連続で均質であっても、多くの場合に破壊状態に近づくにつれ変形が局所的に集中し、破壊と共にせん断帯が形成されることが知られている。供試体が初生的に不連続や不均質な構造を有するような場合には、この変形の局所化がせん断の初期から生じ、また供試体が連続で均質な場合に比較して著しいことは容易に察することができる。逆に、供試体の不連続性や不均質性は、この変形の局所化の生じ方に反映されているとも言うことができる。

三軸圧縮試験の結果がばらついた場合に、対象とする岩石の挙動から極端に乖離していると考えられるデータを除いて設計パラメータを評価する場合がある。このような工学的判断を行う際には、判断者の恣意的な解釈を極力除外して、試験の結果がばらつく理由を合理的に説明できることが望ましい。供試体の不連続性や不均質性がばらつきの主な理由であることを考慮すると、これらが三軸圧縮試験の結果に与える影響を判断できる客観的な情報が得られれば便利である。供試体内における変形の局所化の生じ方は、このような情報の1つとして有望である。

(3) 研究の目的

CCD 変位計測を利用した三軸圧縮試験は、供試体内における軸ひずみや側方ひずみの分布を計測することが可能である。したがって、せん断と共に供試体の変形がどのように局所化していくかを計測することができるはずである。しかし、試験装置が開発されて間もないので、せん断過程を通じて変形の局所化の生じ方を分析した例はない。そこで本研究では、供試体内における変形の局所化の生じ方を試験の結果のばらつきを合理的に判断するための有力な情報とすることを目的として、せん断過程を3つの区間に分割し、CCD 変位計測によって各区間のひずみ分布が得られるかどうかを検討する。

2. 不連続面を含んだ供試体を用いた三軸圧縮試験

(1) 供試体と試験方法

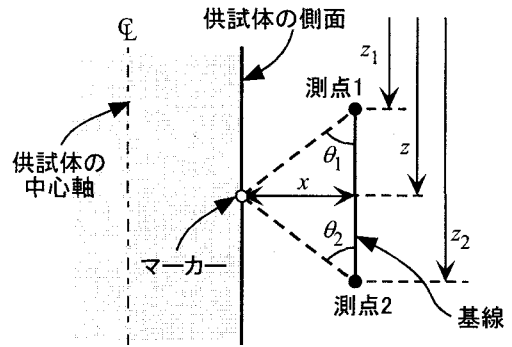


図-1 CCD 変位計測で利用する三角測量の原理

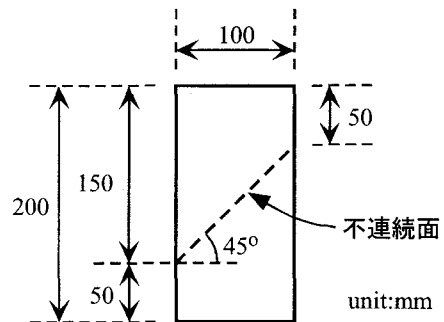


図-2 供試体の構造（不連続面の挿入位置）

不連続面が変形の局所化に与える影響が検討できるように、不連続面を含んだ供試体を用いた三軸圧縮試験の結果³⁾を分析した。図-2に供試体(直径 100mm、高さ 200mm)の構造を示す。重量比で石膏：川砂：水道水=1.00：1.93：1.22 の配合で作製した人工軟岩で、端面に対して 45° 傾斜させて中央高さに不連続面を模擬した印刷紙(厚さ約 0.1mm)を挿入して打設した。

負圧を利用して 0.1MPa の拘束圧を作用させ、非排水状態で段階的に変位制御で軸圧縮した。軸圧縮の開始前(ステップ A)も含めて 18 段階(ステップ R まで)において軸圧縮を中止し、応力緩和による軸変位と軸荷重に変化が見られなくなるまで放置した後に CCD 変位計測を行った。

(2) 試験結果の概要

軸差応力 $q (= \sigma_1 - \sigma_3)$ と軸ひずみ ε_a の関係を図-3 に示す。軸ひずみは外部変位計による計測であるため、ベッディング・エラーの影響でせん断初期の下に凸のカーブを描いている。破壊(ピーク荷重)時の軸差応力 $q_f=1900\text{kPa}$ 、破壊ひずみ $\varepsilon_{af}=0.61\%$ 、 $q=q_f/2$ 時の割線ヤング率 $E_{50,s}=330\text{MPa}$ 、残留時の軸差応力は破壊(ピーク荷重)時の 3 割減で脆性的な挙動を示した。

試験後の供試体の様子を写真-1 に示す。中央高さに挿入した不連続面に沿って明瞭なせん断帯が発達していたが、他の部分には目立った損傷は見られない。

軸載荷前(ステップ A)と残留状態(ステップ P)における CCD 変位計測の結果を図-4&5 に示す。図-4 は、供試体の側面に間隔 2cm の格子状に配置したマーカーの座標よりステップ A&P における供試体の形態をメッシュ

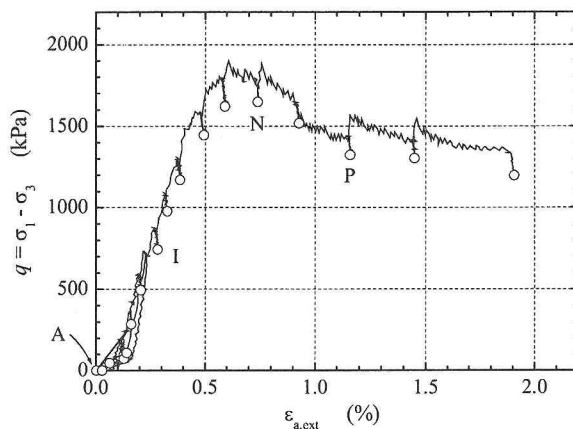


図-3 軸差応力と軸ひずみの関係³⁾

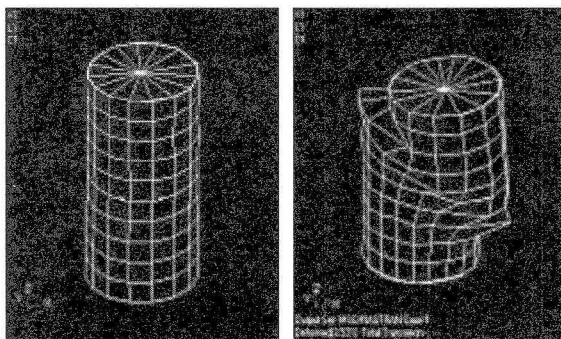
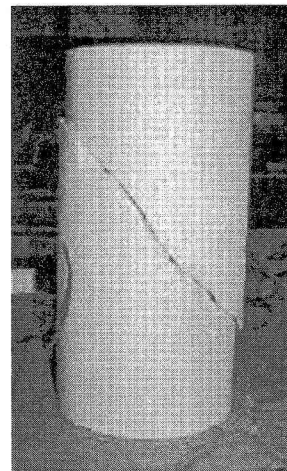


図-4 供試体の形態³⁾
(左：ステップ A、右：ステップ P)

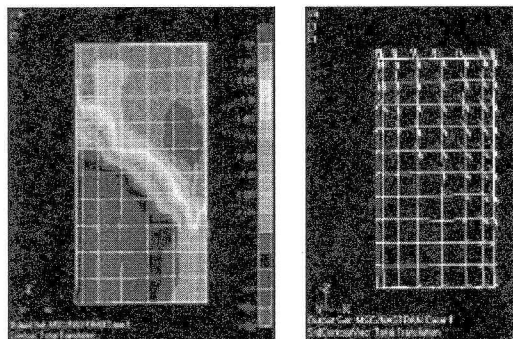


図-5 供試体内の変位量(ステップ A~P)³⁾
(左：コンター表示、右：ベクトル表示)

表示したものである。一方、図-5 は、残留状態までの全載荷区間（ステップ A～P）における各マーカーの変位量をコンター表示とベクトル表示したものである。載荷前に円柱状だった供試体に、残留時には中央高さにせん断帯が形成され、上部がせん断帯に沿って剛体的にずれた様子が明瞭に表現されている。試験後の供試体の様子（写真-1）と調和的であることより、CCD 変位計測によって供試体内の変位分布が計測できることが分かる。

(3) CCD 変位計測の解析の方針

上記の分析は軸圧縮過程の最初（ステップ A）から大変形時の残留状態（ステップ P）までの区間について行われており、供試体の不連続性が、変形が局所化する位置に強く影響することを客観的に示した。しかし、せん断に伴って供試体内の変形がどのように進展していくのか、つまり局所化の進行状況は把握されていない。

そこで、ステップ A～P の区間を 3 つに分割し、各段階における変形（変位量の増分）に注目して CCD 変位計測の結果を分析した（図-3 参照）。第 1 段階はピーク荷重前の前半変形段階で、軸載荷前（ステップ A： $\varepsilon_a=0.00\%$ 、 $q=0\text{kPa}$ 、 $q/q_f=0.00$ ）から軸差応力がピーク荷重時の約半分の時点（ステップ I： $\varepsilon_a=0.28\%$ 、 $q=740\text{kPa}$ 、 $q/q_f=0.39$ ）で、概ね応力とひずみの関係が線形な領域に対応している。第 2 段階はピーク荷重前の後半変形段階で、第 1 段階に続いてステップ I から軸差応力がピーク荷重時（ステップ N： $\varepsilon_a=0.74\%$ 、 $q=1650\text{kPa}$ 、 $q/q_f=0.87$ ）で、応力とひずみの関係の非線形性が顕著になる領域に対応している。さらに第 3 段階はピーク荷重後の残留変形段階で、第 2 段階に続いてステップ N から残留状態に至った時点（ステップ P： $\varepsilon_a=1.16\%$ 、 $q=1320\text{kPa}$ 、 $q/q_f=0.70$ ）で、破壊後の軟化領域に対応している。

3. CCD 変位計測の解析の結果

図-6 に第 1～3 段階における供試体内の変位増分のコンター表示を示す。

(1) 第 1 段階：ピーク荷重前の前半変形段階（ステップ A～I）

不連続面の位置を境に変位増分に多少の差を見ることができるので、軸圧縮の初期段階から不連続面への

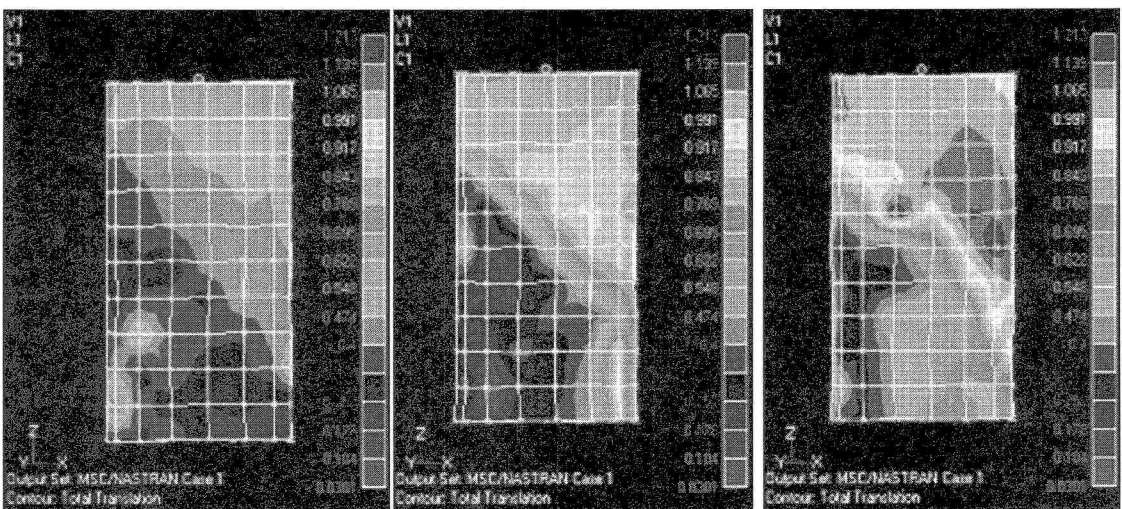


図-6 供試体内の変位増分のコンター表示（単位：mm）

（左：第 1 段階（ステップ A～I）、中：第 2 段階（ステップ I～N）、右：第 3 段階（ステップ N～P））

変形の局所化が生じていることが分かる。ただし、そのコントラストは図-5 に示すものから比べてはるかに不明瞭である。

(2) 第 2 段階：ピーク荷重前の後半変形段階（ステップ I～N）

第 1 段階に比べて、不連続面の位置を境に、上下の領域内における変位増分の大きさにより明瞭なコントラストが存在し、さらに不連続面の位置に変形が集中していることが分かる。

(3) 第 3 段階：ピーク荷重後の残留変形段階（ステップ N～P）

供試体の破壊が進展し、第 2 段階以上に不連続面の位置への変形の集中が顕著なものとなっている。

すなわち、初生構造として不連続面を含む供試体の場合、载荷の初期より不連続面に変形が集中する局所化現象が生じることが分かった。また、この変形の局所化の程度は、せん断（軸圧縮）の進行と共に著しくなり、特にピーク荷重を超えて軟化領域に入ると極めて顕在化することが示された。

4. 不連続面を含んだ供試体の変形の局所化

図-6 に示す変位増分の分布より、図-7 に例示するように、供試体の側面に設けた軸方向の 15 列の測線に沿って 20mm 区間毎に計算した軸ひずみ増分の分布を求めた。そして、せん断帯が発達する不連続面の領域（せん断帯領域）と、その上下 2 つの領域（上部領域、下部領域）の合計 3 つの領域に区分けして、各領域内の軸ひずみ増分の平均値を計算した。

このようにして求めた 3 領域内の平均軸ひずみ増分から、各領域内における軸差応力と軸ひずみの関係を計算し、図-8 に比較した。なお、比較のため図-3 に示す外部変位計で計測した軸ひずみと、3 領域の平均軸ひずみから計算した供試体全体の平均軸ひずみに対する関係も示してある。両者の差は、ベディング・エラーに対応している。

3 領域の関係を比較すると、せん断帯領域の剛性が上部・下部領域の剛性に比べて極端に低く、非常に大きな変形をしていることが分かる。（せん断帯領域の軸ひずみ増分／上部・下部領域の軸ひずみ増分）の比は、ピーク荷重までの中盤の第 1 段階（ステップ A～I）には約 10 倍、中盤からピーク荷重時まで第 2 段階と（ステップ I～N）には約 13 倍であるが、軟化時の第 3 段階（ステップ N～P）には約 20 倍であり、変形の局所化現象はせん断（軸圧縮）の進行に

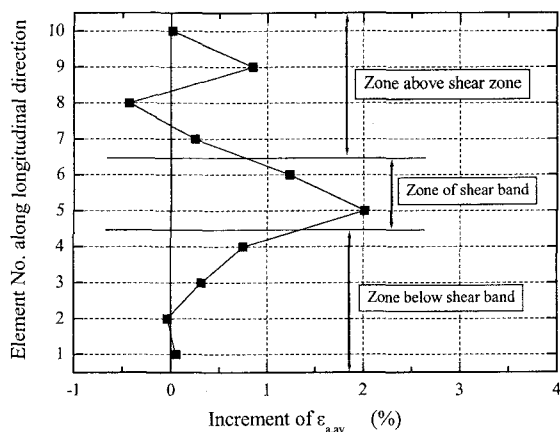


図-7 軸方向の測線に沿う軸ひずみの分布の例
(第 3 段階：ステップ N～P)

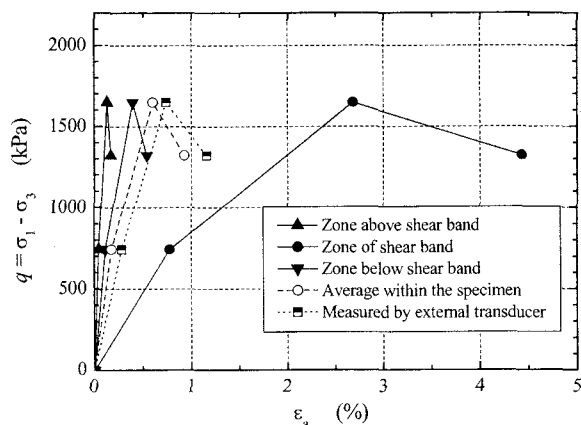


図-8 軸差応力と軸ひずみの関係の比較

伴って著しくなっている。なお、この比は図-7 に示す測点間の平均軸ひずみを計算する際の測点間距離に依存するので、物理的な意味はないことに留意する必要がある。

ピーク荷重後の残留変形段階（ステップ N～P）に注目してみると、荷重の減少と共に、せん断帯領域で非常に大きな塑性ひずみが生じるひずみ軟化が観察された。その一方で、せん断帯領域以外の上部・下部領域では、同じ荷重の減少と共にほとんどひずみが増加せず、部分的には弾性ひずみが減少する（軸ひずみ増分が負の）弾性除荷が見られる可能性も示唆されていた。

5. まとめ

不連続面を含む供試体を用いて三軸圧縮試験を行い、CCD 変位計測により供試体内の変位量を計測した。ピーク荷重前の前半・後半変形段階とピーク荷重後の残留変形段階の合計 3 つの段階において、変位量の増分の分布図を作成した。そして、せん断帯の部分とそれ以外の部分にゾーニングして、軸ひずみの進行状況を検討した。その結果、不連続面に沿う変形が卓越する変形の局所化は、せん断初期のピーク荷重前の前半変形段階から生じていることや、局所化の程度は変形の進行と共に顕著になることが分かった。また、ピーク荷重後の残留変形段階では、荷重の減少と共に、塑性変形が不連続面に沿って形成されたせん断帯に集中して生じるひずみ軟化が観察された。その一方で、せん断帯以外の部分では、荷重の減少と共に弾性ひずみが減少する弾性除荷の可能性も示唆された。

今後は、自然の岩石供試体で同様の観察を行い、供試体の不連続性や不均質性が三軸圧縮試験の結果に及ぼす影響を明らかにする必要がある。また、現状の CCD 変位計測システムは作業や解析が煩雑で時間が掛かるので、効率化を図る必要もある。

参考文献

- 1) 谷 和夫：岩盤の強度・変形特性を調査する 2 つの新しい原位置試験法の提案、第 42 回地盤工学シンポジウム、pp. 71-76、1998.
- 2) 谷 和夫、立川日出男、金子 進、豊岡義則：孔底の中空円筒試験体を利用した新しい岩盤試験装置の開発、第 31 回岩盤力学シンポジウム、pp. 82-86、2001.
- 3) 岸 雅文：原位置孔底三軸試験における CCD センサーを利用した新しいひずみ計測方法に関する基礎的検討、横浜国立大学修士論文、2002.