

三軸試験におけるCCDセンサーを利用した 軸ひずみと側方ひずみの分布を計測する方法の開発

Development of measuring method for axial and lateral strain distribution
using CCD sensor in triaxial test

岸雅文[※]・谷和夫^{※※}

Masafumi Kishi, Kazuo Tani

An in-situ triaxial test was proposed to measure stress-strain relationship on a hollow cylindrical specimen prepared at the bottom of a borehole. This test is more advantageous than conventional field tests on rock masses such as plate loading tests and rock shear tests. Because both strength and deformation characteristics can be obtained by the proposed test. This study proposes a simpler test method introducing a solid cylindrical specimen without a center small borehole together with a novel instrumentation technique to measure distribution of axial and radial strains using CCD sensors.

Key Words: in-situ test, rock mass, triaxial test, measurement, triangular surveying, strain distribution

1. はじめに

現在、岩盤の力学特性（強度特性、変形特性）を求めるために行われる原位置岩盤試験の主流は平板載荷試験、プレッシャーメータ試験、岩盤せん断試験などである。これらは強度特性と変形特性を別々に求めている点や、境界値問題であるために応力～ひずみ関係が直接に計測できないこと、ベディングエラーの影響が避けられないなど、数々の問題を抱えている。これに対して、原位置岩盤試験法の一つとして、原位置孔底三軸試験法（図1）が提案されている^{1)&2)}。この試験法はボーリング孔底において中空円筒形状の試験体を成形し、三軸試験を行う岩盤試験である。中央の小孔と外周溝（スリット）に油圧または水圧にて側圧を作用させ、軸方向に載荷し、軸方向と半径方向（または周方向）の変位挙動を計測する。従来の岩盤試験に比べて、強度特性と変形特性を一つの試験法で求められ、応力～ひずみ関係を直接計測することができる、などの点で優れている。しかし、ひずみの計測が容易ではないし、室内の三軸試験と比べて中央の小孔を必要とするので供試体の成形が困難であるという欠点がある。そこで、これらの問題点を克服した、新しいひずみ計測方法を提案し、実際に試験装置を開発した。以下に、開発した装置の特徴と検証実験の結果を紹介する。

2. 開発した装置の特徴

(1) 計測システムの特徴

※ 正会員 東京ガス（株）

※※ Ph.D. 横浜国立大学大学院 工学研究院

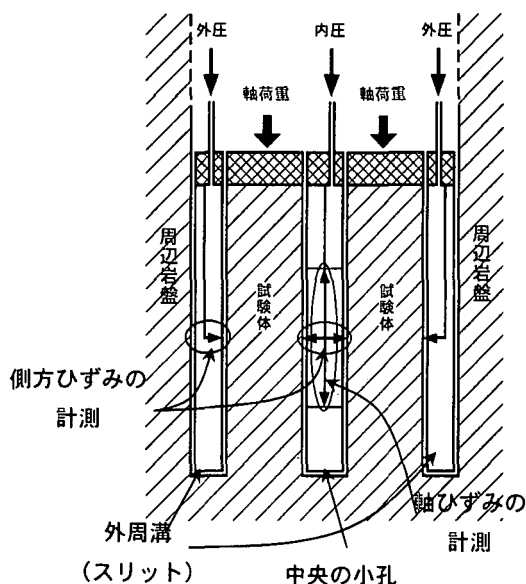


図1 原位置孔底三軸試験の概略図

筆者らは、原位置孔底三軸試験における、新しいひずみ計測方法を提案した^{3)&4)}。中実円柱形状の試験体（原位置試験）ないし供試体（室内試験）の側面に多数のマーカーを配置し、異なる視準角度で設置した2つのCCDセンサーを用いて、マーカーをスキャンする。スキャンしたデータを三角測量の原理を利用することにより、マーカーの三次元座標を計測する方法である。一つの計測システムで、軸ひずみと側方ひずみを計測できるだけでなく、局所的なひずみ分布を求めることができる。ひずみの算出方法は岸、谷（2002）⁵⁾に詳しい。

(2) 装置の形態

開発した、室内三軸試験装置の形態を図2に示す。CCDユニットを供試体の軸方向に対して平行に連続して配置（縦型配置）する方式を採用した。CCDセンサーが軸方向に連続的に配置されており、マーカーを検出したCCDセンサーの高さによりマーカーの軸方向の位置を計測する。4つの棒状のCCDユニット（AとA'、BとB'）は、供試体の側面に沿って周方向に回転する。CCDユニットが供試体の側面を円周方向に走査（スキャン）することによってマーカーの位置を検出し、検出した時のCCDユニットの周方向の位置は回転角計（エンコーダ）を用いて計測する。

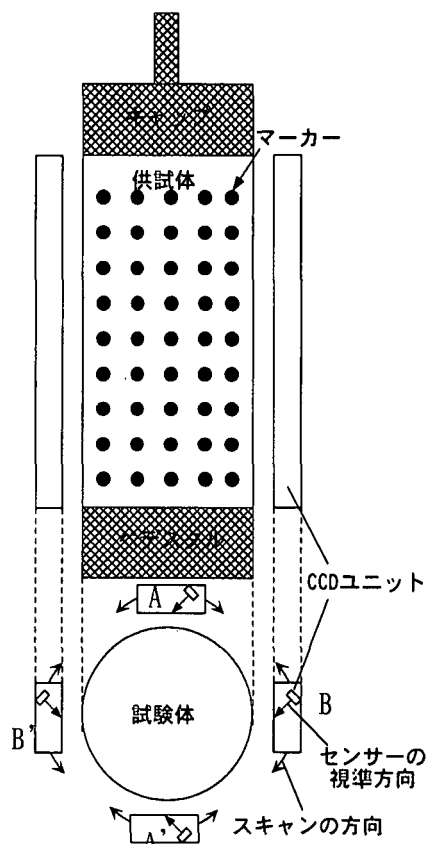


図2 装置の形態（縦型配置）

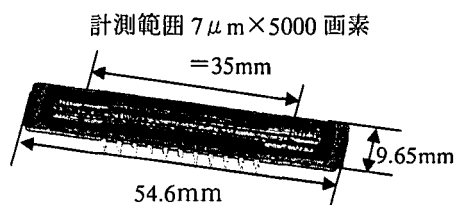


写真1 CCDラインセンサー

3. 装置の詳細⁶⁾

(1) CCDユニット

CCDユニットは、表1に示す3つの構成部品を図3に示すような位置関係で配置したものである。写真1に示

表 1 CCD ユニットの構成

	メーカー	仕様
CCD ラインセンサー	東芝 TCD1501D	モノクロ, 5000 画素, 画素サイズ $7\mu\text{m}$
ロッドアレイレレンズ	日本板硝子 SLA-4D	対象物とセンサーの距離 = 49mm , 深度 $\pm 1.3\text{mm}$
LED (発光ダイオード)		緑色

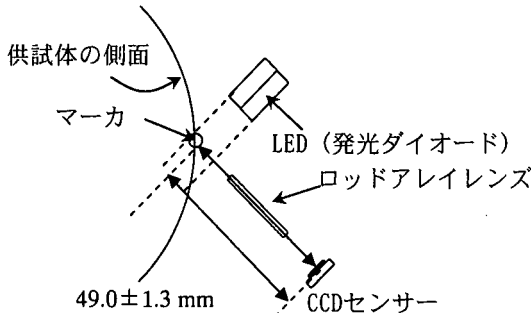


図 3 CCD センサーと LED, ロッドアレイレレンズの位置関係

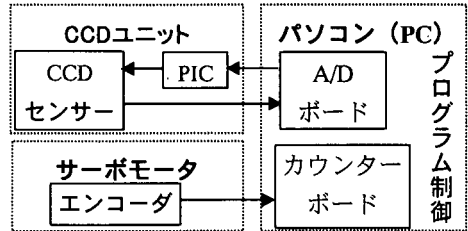


図 4 CCD 計測のシステム

す CCD ラインセンサーは、画素が連続的に直線状に配置されているもので、複写機やスキャナーなどに広く用いられている。レンズも複写機やスキャナーなどに広く用いられている、ロッドアレイレレンズを選択した。光源として LED を用いた。CCD センサーと LED は、マーカーに対して入射角と反射角が 45° の位置関係である。供試体高さ 200mm 全面をカバーするために、計測範囲 35mm の CCD センサーが 6 組必要なため、2 方向 1 組で計 12 個の CCD ラインセンサーを使用した。1 つの CCD ユニットには 3 つの CCD センサーを搭載しているので、計 4 つの CCD ユニットが供試体と取り囲むように配置されている (図 2)。

表 2 装置の仕様

供試体の寸法	直径 10cm × 高さ 20cm
最大軸圧縮力	20kN
最大拘束圧	98kPa (負圧による载荷)
スキャン速度	4.5 時間
変位の計測精度	0.007mm
計測パソコン	CPU : 1.5GHz , RAM : 512MB

(2) 計測システム

図 4 に示すように、CCD 計測は PC を用いて VB (visual Basic) によるプログラム制御で行った。A/D ボードからスキャン開始信号を PIC (マイコンチップ) に送り、PIC が CCD センサーの駆動に必要な規定のパルスを CCD センサーに転送する。CCD センサーからの出力は A/D ボードを介して、CCD ユニットの周方向の位置はサーボモーターに内蔵されているエンコーダからの出力をカウンタードボードを介してパソコンに取り込んだ。

(3) 装置の仕様

装置の仕様を表 2 に示す。粘性土から弱い軟岩まで対応できる。CCD ユニットは耐水性、耐圧性を考慮しなかったため、拘束圧は負圧により载荷する。

軸方向の変位計測精度が CCD センサーの画素サイズの $7\mu\text{m}$ であるため、周方向も $7\mu\text{m}$ 間隔でスキャンする。

(4) メンブレンとマーカー

原位試験では黒のメンブレンを用いるため、室内試験の装置でも同様に黒の天然ゴムのメンブレンを用いた。マーカーは材質、色などを検討した結果、CCD 計測による感度が一番高かった鏡面性のあるアルミ製シールを使

用した。このアルミ製シールを直径1mmの円形状にパンチを用いて打ち抜いて、メンブレンの表面に1cm間隔の格子点位置に設置した（計651個）。マーカ―を設置したメンブレンを写真2に示す。

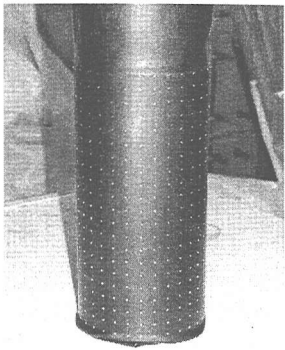


写真2 マーカ―を配置したメンブレン

(5) 計測精度について

1つのマーカ―をスキャンした結果を図5及び図6に示す。鉛直方向の精度はCCDセンサーの画素サイズに依存する（1画素=7μm）。一方、周方向の精度はエンコーダの分解能に依存する（1カウント値=0.31μm）。よって、マーカ―の座標値は重心を算出することにより求めるため、鉛直方向の精度に依存し、1画素のサイズである7μm程度の精度でマーカ―の位置を特定することが可能である。

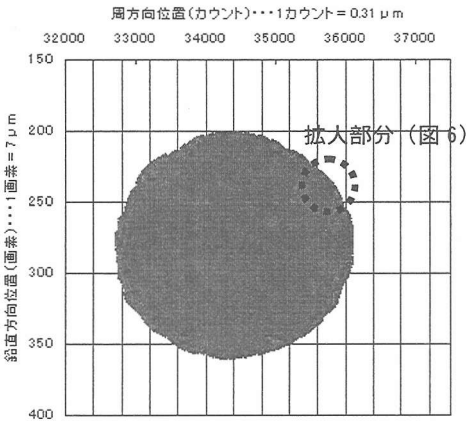


図5 1つのマーカ―をスキャンしたデータ

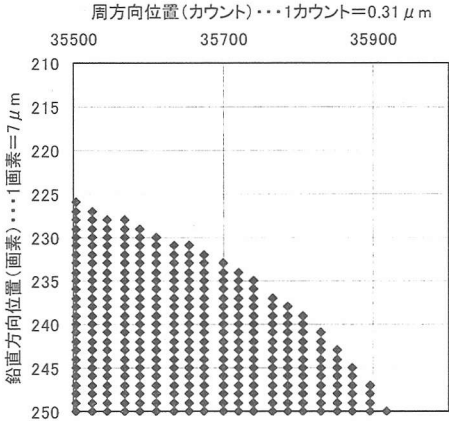


図6 マーカ―をスキャンしたデータの拡大図

3. 検証実験⁶⁾

開発した装置の検証実験は、表3に示す3種類の供試体に対して行った。人工軟岩は表4に示す配合で作製した。各供試体に対して、段階的に変位制御で載荷し、変位量と応力の変化がなくなるまでクリープさせた後にCCD計測を行った。

(1) ウレタンゴム

応力～ひずみ関係を図7に示す。3つの変位段階（軸ひずみ0,2,5,5,0%）でCCD計測を行なった。ひずみの算出は、供試体の高さ39mmと157mmで90°間隔に配置された合計8つのマーカ―の位置をCCD計測により求め、中央高さの118mm間隔の4測線に沿う軸ひずみと2断面の側方ひずみを算出した。結果を表5に示す。応力ひずみ関係は、ほぼ

表3 検証に用いた供試体

試料	目的（検討項目）
ウレタンゴム（弾性体）	計測の妥当性
均質な人工軟岩	計測の妥当性
不連続面を含む人工軟岩	実際の岩盤への適応性

表4 人工軟岩の配合（重量比）

石膏	川砂	水	石膏/砂	w（水/（石膏+砂））
1	1.93	1.22	0.52	0.42

線形弾性で、軸ひずみ ε_a は CCD と外部変位計による計測値とほぼ一致しており、ヤング率に関しても、同様な値を得ることができた。側方ひずみ ε_l は CCD 計測しれないが、ポアソン比は 0.5 程度であり、ウレタンゴムの力学特性と調和的である。これにより、1 つの計測システムで 2 方向のひずみを同時に計測できることが確認できた。

(2) 均質な人工軟岩

ひずみゲージは供試体の中央高さの対角位置に軸方向と周方向 2 つずつ、計 4 つ設置した。図 8 に CCD 計測を行なった変位段階の外部変位計とひずみゲージで測定した応力～ひずみ関係を示す。ひずみゲージは 2 つの平均値とした。初期状態から破壊後まで計 11 の変位段階で CCD 計測を行った。ひずみの算出方法はウレタンの場合と同様である。CCD 計測により、供試体の変形挙動を外部変位計、ひずみゲージと同様に計測できていることがわかる。

軸ひずみ ε_a について、図 9 に CCD と外部変位計、ひずみゲージによる値とを比較した。载荷の初期段階 ($\varepsilon_a < 0.5\%$) では、 $\varepsilon_a(\text{external})$ の方が $\varepsilon_a(\text{CCD})$ や $\varepsilon_a(\text{gage})$ に比べて大きく計測されている。 $\varepsilon_a(\text{external})$ の計測値にベディングエラーが含まれているためと考えられる。大変形時 ($\varepsilon_a > 0.5\%$) は、 $\varepsilon_a(\text{CCD})$ と $\varepsilon_a(\text{external})$ はよく合致している。 $\varepsilon_a(\text{CCD})$ と $\varepsilon_a(\text{gage})$ は、初期段階は合致しているが、ひずみが進行して変形の局所化が進むと、中央高さの平均的なひずみを表す $\varepsilon_a(\text{CCD})$ と、ゲージを貼付した位置 (ゲージ長 30mm) の局所的なひずみを計測し

表 5 ウレタンゴムにおける CCD 計測による結果

	$\varepsilon_a(\%)$	$\varepsilon_l(\%)$	ν	$E_{\text{external}}(\text{kPa})$	$E_{\text{CCD}}(\text{kPa})$
AB 間	2.62	1.28	0.491	4090	3940
AC 間	5.18	2.78	0.537	4100	3890

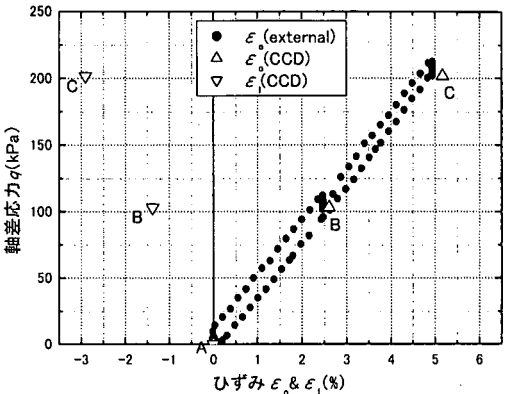


図 7 ウレタンゴムの応力～ひずみ関係

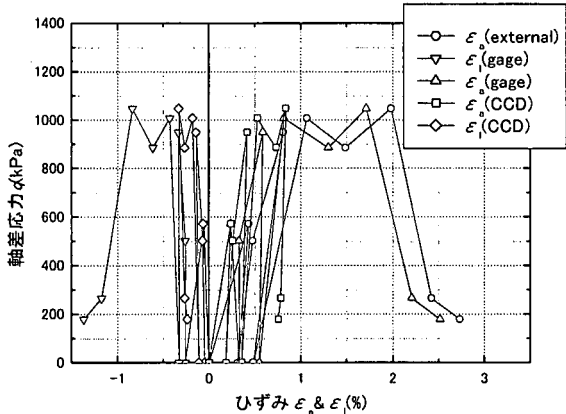


図 8 CCD 計測と外部変位計、ひずみゲージの比較その 1

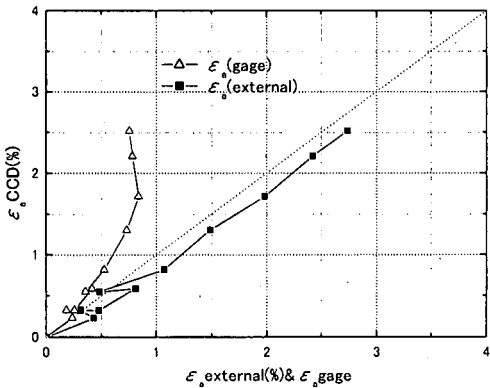


図 9 CCD 計測と外部変位計、ひずみゲージの比較その 2

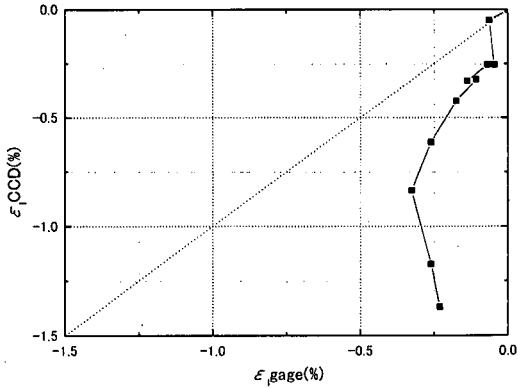


図 10 CCD 計測とひずみゲージの比較その 3

ている $\varepsilon_a(\text{gage})$ とは合致していない。破壊後の弾性除荷により、 $\varepsilon_a(\text{gage})$ が減少していることも原因と考えられる。

側方ひずみ ε_l について、図 10 に CCD とひずみゲージについて比較した。初期段階 ($|\varepsilon_l| < 0.1\%$) では一致しているが、供試体の変形が進行するにつれて $\varepsilon_l(\text{CCD})$ のみが大きくなっている。変形に伴う局所化の影響が原因と考えられる。CCD の方がひずみゲージに比べて、供試体の平均的な挙動をとらえられることや、大変形まで追従できることで優れている。

(3) 不連続面を含む人工軟岩

図 11 に示すように、均質な人工軟岩に不連続面として楕円形状の紙を供試体の中央高さ 45° の傾斜で挿入した。応力～ひずみ関係を図 12 に示す。CCD 計測は図 12 の A～R の 18 点で行なった。今回は初期の A 点とせん断後の P 点について、マーカーの間隔 2cm のメッシュで解析を行なった。

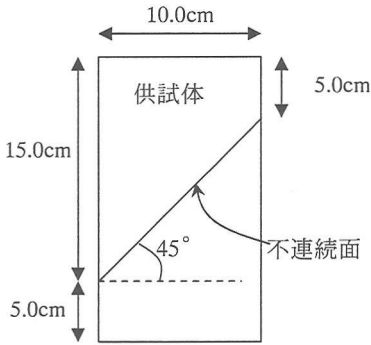


図 11 不連続面の挿入位置

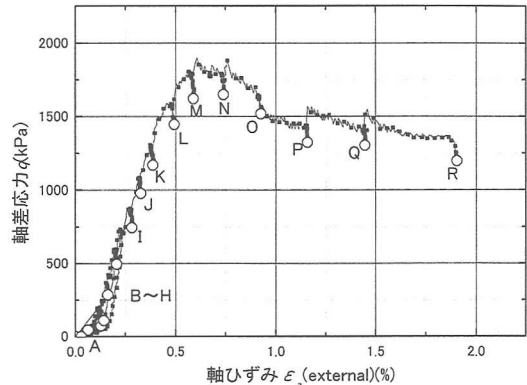


図 12 不連続面を含む人工軟岩の
応力ひずみ関係

図 13 に変形前の形状と変形後のメッシュ形状を示す。また、不連続面でせん断した写真 3 に示す破壊後の状況を示す。マーカーの 3 次元座標を計測し、変形前の円柱形状と変形後すべり面に沿ってせん断された形状を適切に計測することができた。図 14 に変位量のコンター図、図 15 に変位量のベクトル図を示す。不連続面を境にして、上部が不連続面に沿って滑っていることを的確に表現できている。また、ベクトルの方向もすべり線に沿っており、変形挙動を把握することができる。

試験体の不均質性や不連続性が試験結果に及ぼす影響を評価することが可能である。例えば、試験体の観察結果と照らし合わせることによって、以下のような解釈が可能となる。

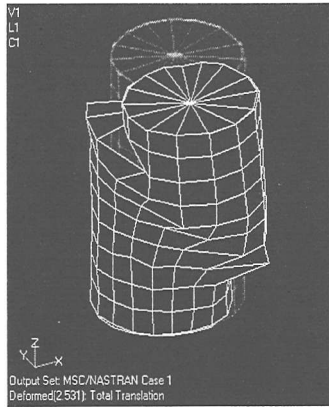
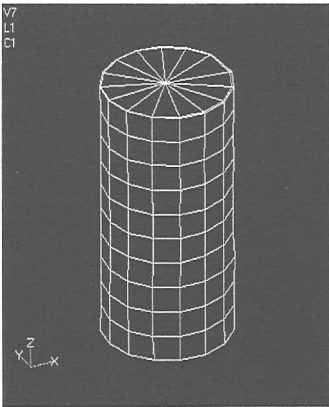


図 13 不連続面を含む人工軟岩の変形前と変形後

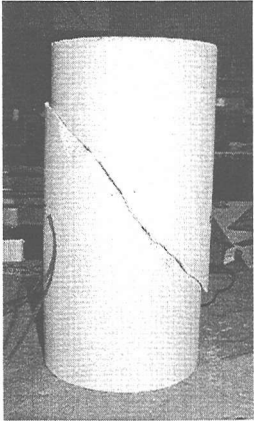


写真 3 不連続面を含む
人工軟岩の破壊状況

①試験体が一様に変形しているかどうか。

②非一様に変形している場合、局所的な変形が初生的な構造によるのか、それとも変形の局所化の所産であるのか。

③その試験結果が対象とする周辺岩盤の挙動を代表するものであるかどうか。

このように従来の試験法、計測方法では不可能であった評価が可能となり、非常に有用な計測方法であるといえる。

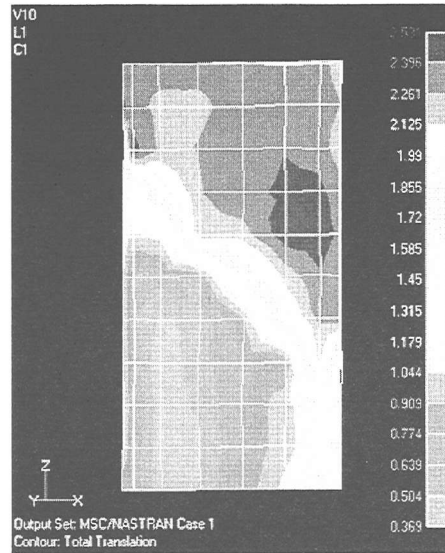


図 14 不連続面を含む人工軟岩の変位量のコンター図

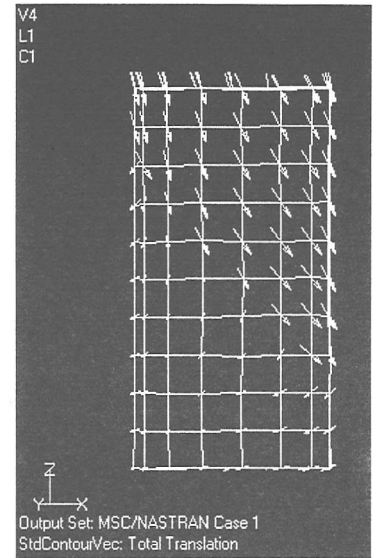


図 15 不連続面を含む人工軟岩の変位量のベクトル図

4. まとめ

- (1) 一つの計測ユニットで、試験体の軸ひずみと側方ひずみを計測でき、ひずみ分布も計測できる CCD センサーを利用した新しいひずみ計測システムを開発した。
- (2) この計測システムを組み込んだ三軸試験装置をつくり、以下のことを実証した。
 - a) 開発した計測システムにより、一つの計測方法で軸ひずみ、側方ひずみを計測することができる。
 - b) 考案した新しいひずみ計測システムは、従来の計測方法に比べて、機械的な構造が簡易で、円柱の試験体でひずみの計測が可能である。
 - c) 室内の三軸圧縮試験装置に提案する計測システムを適用することによって、供試体の側面の局所的な変形挙動とひずみ分布を求めることができた。よって、本計測システムを原位置孔底三軸試験に導入することができれば、試験体の不連続性、不均質性を評価できることが期待される。

5. 今後の予定

(1) 本計測装置を用いて

不連続面を含む人工軟岩について今回は、初期とせん断後について解析したが、多数の変位段階についても同様に解析し、局所化が進行していく変形挙動を把握できることを実証することが必要である。また、実際の軟岩を用いて、本計測方法の適用性を検証する必要性もある。

(2) 原位置導入へ向けて

以下の項目を検討し、早急に原位置への導入を進めていく。

- ① CCDユニットの耐水性や耐圧性の検討、② 計測時間の短縮、③ データ解析アルゴリズムの改良、④ CCDユニットの簡素化、⑤ 試験体寸法の決定

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，谷和夫：中空の小孔を省略した原位置孔底三軸試験におけるひずみ測定方法の提案，第56回土木学会年次学術講演会，pp.634-635,2001.
- 4)谷和夫，岸雅文：円柱供試体の軸歪み及び側方歪みの計測装置及び計測方法，特願2001-197869
- 5)岸雅文，谷和夫：原位置孔底三軸試験における新しいひずみ計測方法の提案，岩の国内力学シンポジウム，A11,2002.
- 6)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，横浜国立大学大学院修士論文，2002.