

原位置三軸試験における変位計測システムの 改良と適用性の検討

EVALUATION OF THE IMPROVED SYSTEM FOR DISPLACEMENT MEASUREMENT IN IN-SITU TRIAXIAL TESTS

曾布川茂*・岡田哲実**・辻野敏文***・立川日出男****・谷和夫*****

Shigeru SOBUKAWA, Tetsuji OKADA, Toshihumi Tsujino, Hideo TACHIKAWA and Kazuo TANI

In-situ triaxial tests are conducted on hollow cylindrical specimen drilled in the ground. Instrumentation for cavity deformation with magnetic sensor are need to measure both axial and circumferential displacements. But, measurement precision is rather poor and sampling interval are long.

Then, significant improvements are made on the measurement system, and preparatory tests are carried out for performance check using mortar model ground. The test results demonstrate very precise measurement and very short sampling interval.

Key Words: rock mass, in-situ test, triaxial test, measurement, displacement

1. はじめに

谷ら(2001)が提案した原位置三軸試験は、岩盤中に作製した大型の試験体(直径 400mm, 高さ 1000mm)に対して行う三軸試験である。ボーリングによって図 1 に示すように中空円筒状の試験体を成形し、内セルと外セルをそれぞれ中央小孔と外周溝に挿入し、中央小孔で軸方向と円周方向の変位を計測し、外周溝で円周方向の変位を計測する(岡田ら, 2003)。計測システムは磁力センサーを用いて磁石の位置を検出して変位を求めるものであるが、計測精度や計測間隔(時間)に課題がある。そこで、この計測システムを改良して、精度の向上と計測間隔の短縮を図るために外周溝では軸方向の変位計測に差動トランス式変位計、円周方向の変位計測に渦電流式非接触型変位計を新たに採用し、中央小孔では磁力センサーを利用した円孔変位計測システム(ICD)を改良した。この新しい計測システムの適用性を検討するために、モルタルで作製した模型地盤を用いて試験を行った。

2. 改良の概要

従来の計測システムは、図 1 に示すように磁力センサーを用いて、中央小孔において軸方向 3 深度、円周方向 2 深度、外周溝において円周方向 2 深度で計測する。変位の計測精度は軸方向が 0.023mm、

* 学士(工学) 横浜国立大学大学院 工学府 社会空間システム学専攻
** 修士(工学) (財)電力中央研究所 地球工学研究所 バックエンドセンター
*** 修士(工学) (株)ダイヤコンサルタント ジオエンジニアリング事業部
**** 学士(工学) (株)立川機械製作所
***** Ph.D. 横浜国立大学大学院 工学研究院

円周方向が中央小孔で 0.234° 、外周溝で 0.039° であり、それぞれ軸ひずみ $3.3 \times 10^{-3}\%$ 、円周方向ひずみ $2.8 \times 10^{-4}\%$ である。一方、計測時間については、内セルと外セルの検出器のスキャンにそれぞれ 10 秒と 20 秒、データ処理に 10 秒、検出器がスキャン後戻ってくるのに 20 秒かかるため、1 回のデータ取得に約 60 秒程度かかっていた。なお、図 2 に示すように中央小孔における軸方向の変位については、構造上、検出器が 10mm しか移動できないため、8mm 間隔で 5 つの磁力センサーを並べて 40mm の範囲をカバーしていた。円周方向については、磁力センサーは内セルで 104.5° 、外セルで 47.4° の範囲をスキャンする構造であった。磁力センサーの数は軸方向で 15 個、円周方向で 4 個で合計 19 個用いていた。このような従来の計測システムに対する改良点を以下に示す。(図 3)

中央小孔において

- 1) 軸方向には 40mm スキャンするのに対し、円周方向には 60° スキャンする構造にした。
- 2) 軸方向の磁力センサーを 1 深度につき 1 つの磁力センサーにした。

外周溝において(図 4)

- 3) 円周方向の変位をゴム膜に固定した非接触型変位計によって 4 点で計測する。
- 4) 軸方向の変位をゴム膜に固定した差動トランス式変位計によって 2 点で計測する。

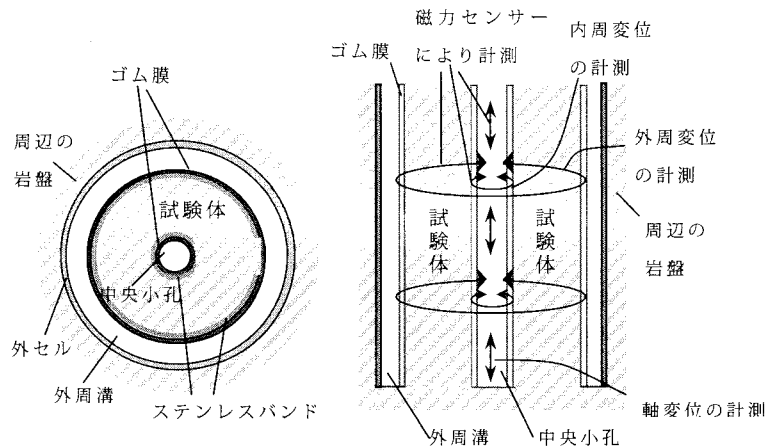


図 1: 従来の計測システム(左: 平面図, 右: 断面図)

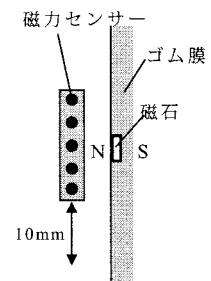


図 2: 内セルにおける従来の軸変位の検出方法

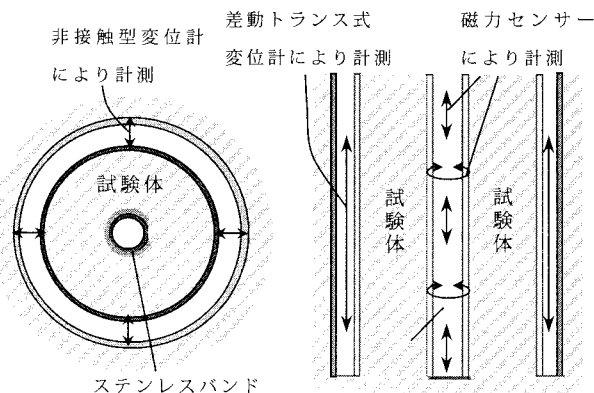


図 3: 改良した計測システム(左: 平面図, 右: 断面図)

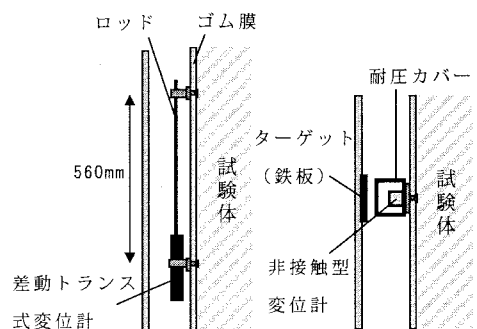


図 4: 外セル計測器の設置

3. 計測精度の検討

改良した磁力センサーの精度を検討するため、磁石の位置を固定し、磁力センサーを10回スキャンさせた時のエンコーダのカウントの値のばらつきを調べた(曾布川ら, 2004)。従来のものは、磁力センサーの出力が図5のa点のように極大値となるときのエンコーダのカウントを検出し変位に換算していた。しかし、ピークがシャープではないため、極大値となるカウントの検出精度に30カウント程度のばらつきがあった。そこで図6のようにターゲットとなる磁石を極性が異なるように並べて配置し、図5のb点のように出力値0のラインと交差する点のカウントを検出することとした。なお、リミットスイッチの精度の問題で検出器のスタート点に100カウント程度のずれが生じる傾向があったので、同様に磁石を配列した基準点を最下部に設けて、変位を計算することとした。その結果、軸方向に関してはカウントのばらつきを7カウントまで抑えることができた。軸方向のスキャンの範囲40mmに対してエンコーダの出力は22000カウントであるので、変位の精度は0.012mmである。円周方向に関しては、図7のようにステンレスバンドに磁石を配列し、図8のc点とd点の2点間の差より変位を計算することとした。カウントのばらつきは15カウントであった。円周方向のスキャンの範囲60°に対してエンコーダの出力は22000カウントであるので、精度は0.041°である。外セルについては、差動トランス式変位計と非接触型変位計を用いており、それぞれ0.010mmと0.0012mmの精度を有する。

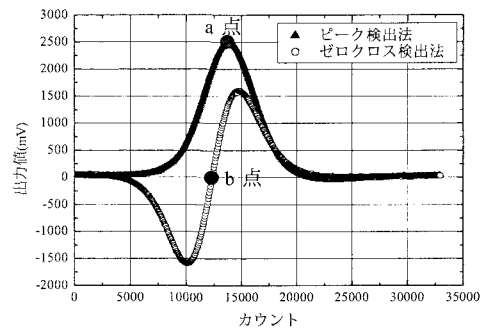


図5：ピーク検出とゼロクロス検出

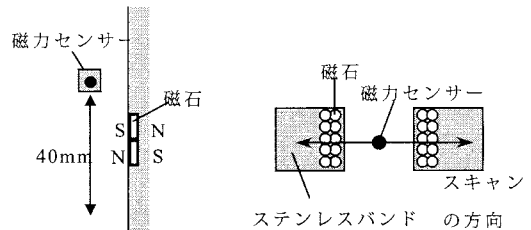


図6：軸方向変位の検出方法

図7：円周方向変位の検出方法

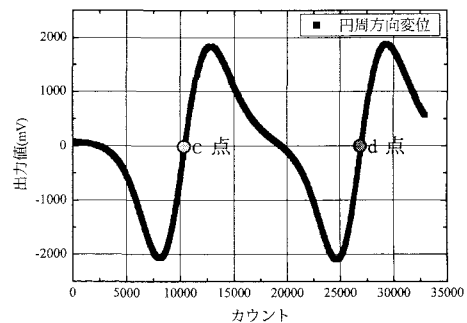


図8：円周方向変位の計測

4. 計測スピードの検討

従来のものは内セルと外セルの両方で磁力センサーを用いており、同時に動かすことができなかった。また磁力センサーの数が多いとパソコンの負担が増大して、処理に時間を有する欠点があった。そこで今回は以下に示すような改良を行った。

- 1) 内セルの磁力センサーの数を計17個から計5個に減らして、処理時間を短縮した。
- 2) 外セルの磁力センサーを差動トランス式変位計と非接触型変位計に変えて、スキャン時間と処理時間を省略した。
- 3) 既往の試験結果から必要なスキャン範囲(軸方向:29.2mm, 円周方向:37.4°)を検討し、無駄を省いた。
- 4) 磁力センサーを動かすモーターのスピードを速くした。

5) 処理速度の速いパソコンに変えた。(CPU2.6GHz)

以上の改良により、検出器のスキャン 2.5 秒、戻り時間 2.5 秒、データ処理 1 秒となり 1 回のデータ取得にかかる合計時間を 60 秒から 6 秒にまで短縮することができた。またこの 6 秒という値は内セルにおける計測に必要な時間であり、外セルでのみ計測する場合には時間の制約はほとんど無い。改良前後の計測精度と計測間隔を表 1 に示す。

表 1： 改良結果

	計測精度				計測 間隔 (秒)
	内セル		外セル		
	軸方向 変位(mm) (ひずみ)	円周方向 変位(°) (ひずみ)	軸方向 変位(mm) (ひずみ)	円周方向 変位 (ひずみ)	
改良前	0.023 (3.3×10^{-5})	0.234 (1.1×10^{-4})	なし	0.039° (2.8×10^{-6})	60
改良後	0.012 (1.7×10^{-5})	0.041 (2.0×10^{-5})	0.01 (2.2×10^{-5})	0.01mm (5.0×10^{-5})	6

5. 予備実験について

改良した試験機の適用性を検討するため、予備的な载荷試験を行った。鋼管に流し込んだ配合(セメント：砂＝1：4)のモルタル($q_u=23.4\text{MPa}$)を模型地盤とし、試験体をボーリングにより成形した。そして载荷試験を行った。図 9 に試験時の写真を示す。载荷は図 10 に示すとおり载荷、除荷の単調载荷とした。拘束圧は 0.2MPa、軸差応力は 8MPa までとし破壊はさせなかった。

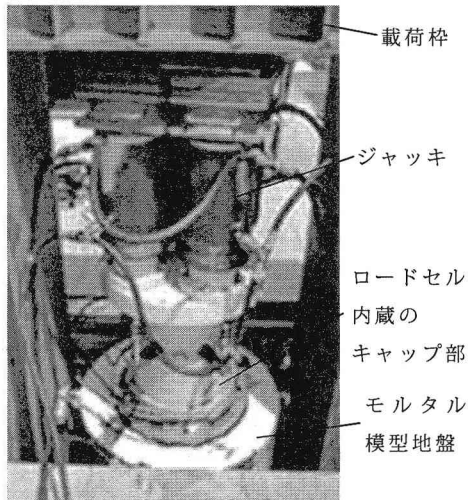


図 9：試験の様子

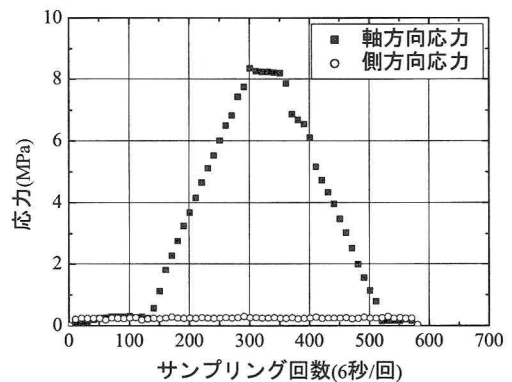


図 10：静的载荷試験の载荷パターン

6. 試験結果と考察

ひずみの計測は、内セルの磁力センサー(軸方向と円周方向)、外セルの差動トランス式変位計と非接触型変位計に加えて、ひずみゲージ、外部変位計を用いた。なお、ひずみゲージは試験体上面から 10cm 程度の側面に貼り付けており、中央小孔の軸方向に 1 点、外周溝の軸方向と円周方向に各 2 点貼り付けた。ただし、外周溝に貼り付けた軸方向 1 点は、载荷前に切れてしまい計測できなかった。外部変位計は、ロードセルを内蔵するキャップの鉛直変位を計測した。圧力を制御する

サーボコントローラーによるノイズが大きいという問題が生じたものの、載荷開始から終了まで連続的にデータを得ることができた。

軸差応力($\sigma_1 - \sigma_3$)と軸ひずみ(ϵ_a), 横ひずみ(ϵ_r)の関係を図 11 に示す。外セルで軸方向の変位を計測する差動トランス式変位計に関しては、圧縮しているにも関わらず、伸びる方向(逆方向)に動いてしまった。これは、図 4 左に示したようにゴム膜と差動トランス式変位計を 1 点のねじで固定していたために、図 12 に示すように固定部を中心に回転が生じたためと考えられる。内セルの磁力センサーによる軸方向の変位に関しては、ひずみゲージと比較して、ひずみが小さく求められた。これは、拘束圧が 0.2MPa と低く、ゴム膜と試験体の密着が不十分だったことと、キャップが内セルの摺動部^{注)}を適切に押せていなかったことなどが原因として考えられる。円周方向のひずみを計測している内セルの磁力センサーと外セルの非接触型変位計に関しては、ひずみゲージとほぼ等しい結果が得られていることから、正確に計測できたと考えられる。

注) 外セルの内側ゴム膜と内セルの外側ゴム膜の上端を保持するリング部材がキャップの軸変位に追従して軸方向にスライドする部位

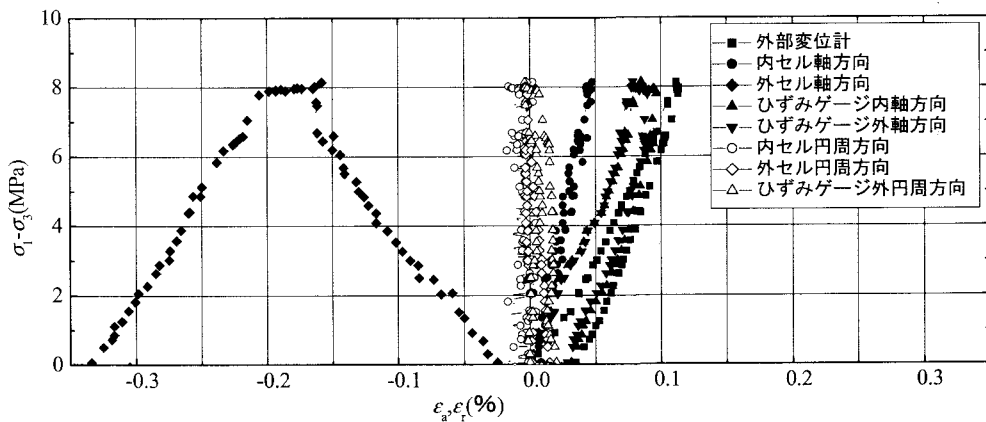


図 11：静的載荷試験の軸差応力-ひずみ関係

7. 予備実験を受けて

(1) 改良点

予備実験の結果から以下に示す改良をする必要があることが分かった。

- 1) 図 12 に示すように、ゴム膜と差動トランス式変位計のねじによる固定部を 1 点から 2 点に増やし、固定部の面積も大きくして、差動トランス式変位計の回転を抑える。
- 2) 内セルと外セルの摺動部が適切に動作するように調整を行う。
- 3) ゴム膜と試験体の密着を確実にする。
- 4) ノイズ対策を行う。

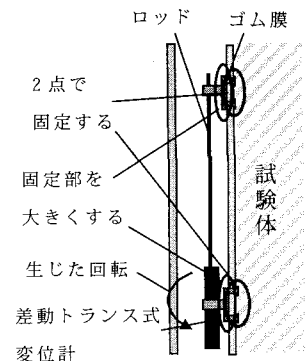


図 12：差動トランス式変位計の固定

(2) 差動トランス式変位計の動作チェック

差動トランス式変位計の取り付けを改良した試験機でアクリル円

筒(内径 394mm, 外径 400mm)を用いて、差動トランス式変位計の動作チェックのための実験を行った(図 13)。アクリル円筒を試験体に模して用い、側方向の反力に外セルの外周に鋼管円筒(内径 556mm, 外径 560mm)を挿入して拘束圧 0.05MPa をかけ、軸応力 0.1MPa まで 3 回繰返し载荷したときの差動トランス式変位計の動きをチェックした。変位の計測には差動トランス式変位計に加え、CAP 部分に外部変位計を 4 点で計測し、ひずみゲージをアクリル円筒内周中央部に差動トランス式変位計の位置と一致するように 2 点貼り付けて計測した。

サンプリング回数と軸ひずみ(ε_a)の関係を図 14 に示す。外部変位計はベッディングエラーの影響により、ひずみが大きく、除荷してもひずみが戻らない傾向を示している。差動トランス式変位計は改良前は圧縮時に伸びる方向(逆方向)に変位していたが、改良によって正常に動作しているのが確認できた。ひずみゲージと比較してもほぼ等しい動きをしていることが確認できた。

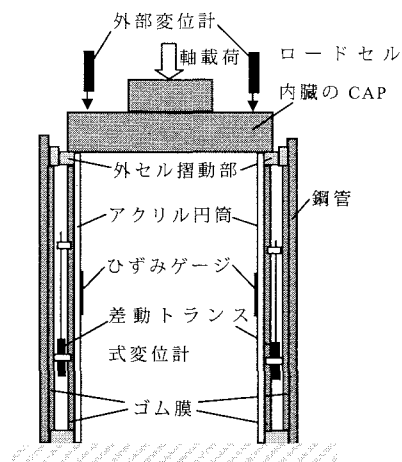


図 13：アクリル円筒実験の図

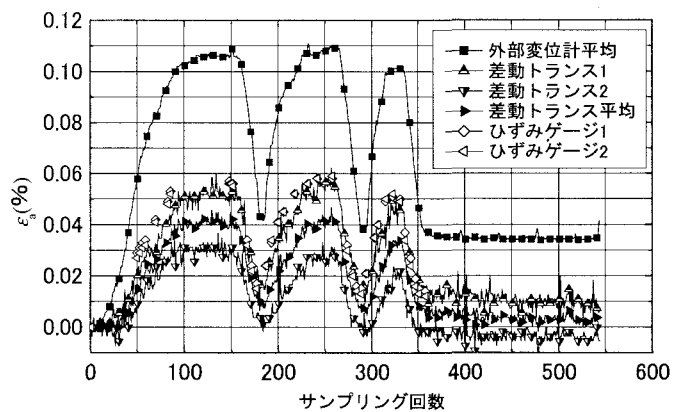


図 14：アクリル円筒実験のサンプリング回数-ひずみ関係

8. まとめ

- 1) 原位置三軸試験における変位計測システムの改良については計測精度と計測間隔に関して大幅に性能を向上させることができた。
- 2) 予備実験を行い、改良した変位計測システムの適用性を検討したところ、特に差動トランス式変位計の計測方法に問題があることが分かった。問題を変位計の固定部に特定し、再度、改良とチェックを行なったところ、正常に動作することを確認した。今後はさらに原位置での本計測システムの適用性を検討する予定である。

<参考文献>

- 1) 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の開発, 第 31 回岩盤力学に関するシンポジウム, pp. 82-86, 2001.
- 2) 岡田哲実・野崎隆司・池見元宣・谷和夫：電中研式原位置岩盤力学試験法の開発, 電力中央研究所報告, 研究報告 U02023, 2003.
- 3) 曾布川茂・岡田哲実・細野高康・立川日出男・谷和夫：原位置三軸試験における変位計測システムの改良, 第 39 回地盤工学研究発表会 pp. 119-120, 2004.