

差動トランス式変位計測装置を利用した 新しい原位置三軸試験装置の開発

池野谷尚史¹・鶴 俊太郎²・金子 進³・立川日出男⁴・谷 和夫⁵

¹横浜国立大学大学院 工学府 (〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)
E-mail: d04gc104@ynu.ac.jp

²㈱サンキ産業 (〒251-0042 神奈川県藤沢市辻堂新町3-10-33)

³㈱基礎地盤コンサルタント 事業本部 酒井研究室 (〒263-0001 千葉県千葉市稲毛区長沼原51)

⁴㈱立川機械製作所 (〒262-0012 千葉県千葉市花見川千種町133)

⁵横浜国立大学大学院 工学研究院 (〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)

現在、岩盤の力学特性を把握するために実施される原位置岩盤試験として、中空円筒形状の試験体を利用した原位置岩盤三軸試験法の普及が始まっている。しかし、試験体が大きく作製手順が複雑で、計測システムも複雑であるなどの理由から、試験費用が高価なものとなっている。そこで、差動トランスの原理を利用した新しい変位計測装置を提案し、これを利用した小型の原位置三軸試験装置を開発した。

開発した装置は、ボーリング孔底に成形した円柱形状の試験体に対し、ゴム膜を介して拘束圧を作用させ、軸方向に載荷したときの試験体の軸方向および半径方向の変形挙動を計測できる。これにより、試験体寸法の小型化、形状の単純化が可能となり、従来の試験法に比べて格段に低コストになると予想される。

Key Words : rock mass, in-situ test, triaxial test, test equipment, site investigation

1. はじめに

岩盤の力学特性を把握する際には、試料の乱れなどが大きな問題となるため、サンプリングした試料を用いて室内で力学試験を実施するよりも、原位置において力学試験、特に三軸試験を実施することが望ましい。

これを実現する手段として、原位置岩盤三軸試験(図-1)が開発された¹⁾。この試験はボーリングの孔底に中空円筒形状の試験体を掘削し、中央の小孔と外周溝(スリット)に側圧を作用させると共に、上面を軸方向に載荷したときの試験体の変形を計測するものである。岩盤の平均的な応力～ひずみ関係(変形特性と強度特性)を、乱れやゆるみの影響をほとんど受けずに直接に計測できることが特長である。この試験は、すでに実用化されているものの、以下のような理由から、その試験費用は高価である。

- ①試験体の形状が中空円筒であるために、その作製手順が複雑である。
- ②試験体の寸法($\phi 400\text{mm} \times H1000\text{mm}$)が大きい。

③採用されている円孔変位計測システムが機械的に複雑で、小型化が難しい。

また、上記①～③の制約は試験深度が深くなるほど厳しくなる。そのため、この試験は露頭や試掘坑などの浅部(深度1～2m)において実施する試験として利用され、地下深部における適用は実現していない。

そこで、これらの問題を克服した、低コストで、地下深部においても適用可能な試験法の開発が必要である。

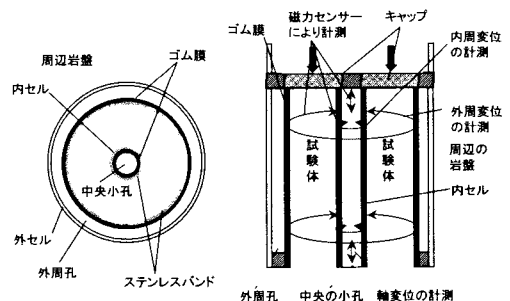


図-1 原位置岩盤三軸試験の概要

2. 差動トランスの原理を利用した変位計測装置

現在採用されている円孔変位計測システム（ICD：Instrumentation for Cavity Deformation）は、磁力センサーでターゲットである磁石の移動を随時スキャンニングする方式である。軸方向変位の計測を中心軸上で行うので中央の小孔が必要であり、機械的に複雑で小型化も難しい。そこで、原位置岩盤三軸試験を簡便で低コストなものにするために、次のような条件を満足する新しい変位計測装置を考案した。

- ①試験体中央の小孔を省略できる。
- ②計測装置が機械的に単純である。
- ③コンパクトである（スペースを必要としない）。

(I) 変位計測装置の原理

考案した計測装置は、従来技術である差動トランス変位計（LVDT）の原理を応用したものである。差動トランス変位計は、図-2に示すように1次コイルPおよび2次コイル S_1 と S_2 の2種類のコイルと、鉄などの磁性体を材料とするコア（core）で構成される。実際の形態は図-2(b)に示すように、1次コイルPの両側に2次コイル S_1 および S_2 が配置された円筒形状である。コアが円筒の軸方向の中央位置にあるとき、交流電圧をかけて励磁された1次コイルPと2次コイル S_1 および S_2 の両コイルとの磁気的結合の度合いは等しい。その後、コアが+xもしくは-xの方向に移動すると、コイル S_1 およびコイル S_2 とコイルPとの磁気的結合の度合いの差に起因するコイル S_1 と S_2 の誘導電圧の差 ΔV が生じ、これを出力とする。

一般のLVDTでは棒状のコアを用いているが、今回開発した装置では薄肉円筒形状（リング状）とした。これを、試験体の側面に巻きつけるように設置し、メンブレンと一体化させることにより、メンブレンにコアの機能を融合させた。さらに、コイルをセルの内側に設置することで、ある高さにおける試験体の変位を計測することができる。

(2) 変位計測装置の特長

考案したリング状コア型のLVDTは、原位置岩盤三軸試験に利用する上で以下の3つの特長を有する。

- ①中央の小孔がない：軸変位を円柱形状の試験体の側面で計測できるので、中央の小孔を掘削する手間が省ける。
- ②構造がシンプル：構成部品はコイル3つとコアのみで、駆動部分がない。
- ③コンパクトである：コイル部分の厚みは14mm程度、コアの厚みは2mm程度である。

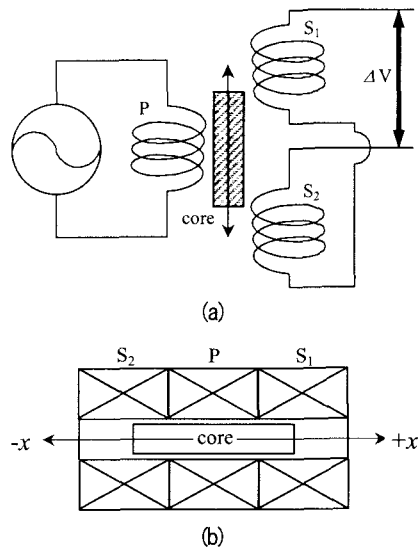


図-2 LVDTの原理



写真-1 試作品の概要（左：コア、右：コイルを内蔵したケース）

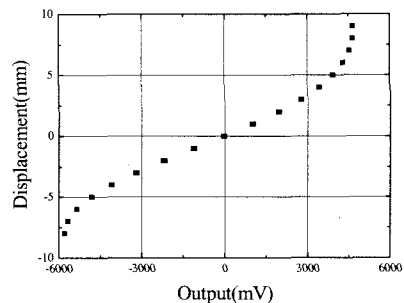


図-3 試作品の検定結果

(3) 変位計測装置の試作および検定

計測原理の妥当性と性能を確認するために、試作品を製作し、検定試験を実施した。写真-1に試作したリング状コア型のLVDTの概要を示す。

試作品は内径107mm、外径129mm、高さ30mmのコイルと、内径102mm、外径106mm、高さ12mmのコアから構成される。コイルを内蔵したケースの内側には市販の塩化ビニル管、外側ケースおよびコアには冷間圧延鋼板SPCC-1を使用した。

検定試験は、コイルを内蔵したケースの内径107mmよ

りやや小さい径（106mm）の円盤上に薄肉円筒のコアを載せ、円盤を上下させることでコアに変位を与えた。

図-3に試作品の検定結果を示す。与えた10mm程度の変位に対して出力電圧が6～5Vの範囲で変化している。±3Vの範囲で線形性かつ再現性が高く、本計測装置の原理が妥当であり、数mm程度の計測が可能であることが分かる。実用上は±3mmの範囲での計測を行うものとする、線形部分の傾きは0.000987(nm/mV)であるから、試作品の分解能は 10^3 nm程度である。

3. 原位置三軸試験装置

(1) 三軸装置の概要

製作した装置の概要を図-4に示す。本装置で対象としている円柱形状の試験体の寸法は、コイルを内蔵しているケースの内側に使用している市販の塩化ビニル管の内径（107mm）を考慮して、直径90mmとした。高さは、試験体底部が地盤に連続していることによる拘束効果を考慮して直径の2.5倍程度が望ましく、また、試験体下部に拘束圧の加わらない部分（高さ約20mm）が存在することから276mmとした。既存の原位置岩盤三軸試験に供する試験体（直径400mm、高さ1000mm）の約1/4であり、試験の大幅なコストダウンが期待できる。その一方で、試験体の小型化に伴う寸法効果の影響が懸念される。そこで、装置の最下部に試験体キャッチャーを設けることにより、寸法効果の影響を検討するために試験後に試験体を回収してその性状や破壊状態を観察することが可能となっている。

また、既存の原位置岩盤三軸試験では円筒セルの両側にメンブレンを設置して、セル圧载荷時の反力を周辺岩盤に期待している。一方、本装置では円筒セルの剛性に反力を期待している。これによっても、試験装置の小型化を図ることができる。

本装置の特長として、以下の2点が挙げられる。

- ①装置全体が一つのユニットである：試験体に装置を被せるだけで試験を開始できる。
- ②コンパクトな計測システムである：同じサイズの供試体を対象とした室内三軸試験に利用されるセルに比べてはるかに小さなセルである。

(2) 三軸装置と掘削装置の構成

a) 試験体の掘削装置

ボーリングマシン、ビット（図-5）などより構成される。

インブリグネーティッド・ダイヤモンドを先端に配置したビットの先端は階段状になっており、ボーリング孔底が三軸試験装置に合わせた形状となる。階段状にする

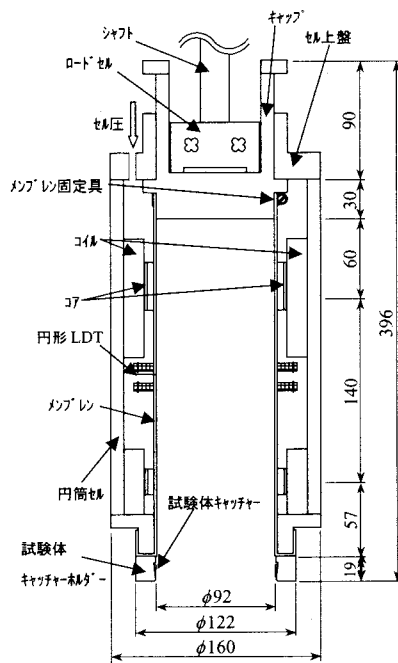


図-4 装置の概要

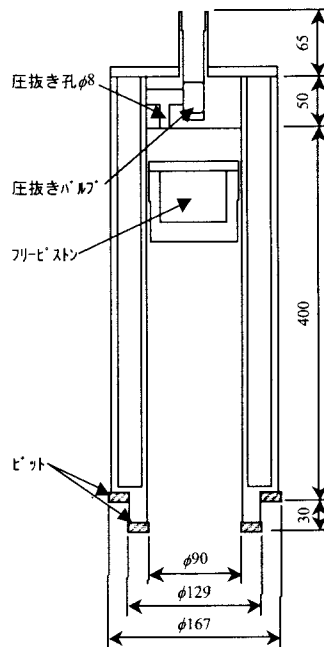


図-5 コアバレルの概要

ことで、掘削時のガイド効果とトルクを減らす効果が期待されるからである。

また、コアバレル内には水溶性ポリマーの濃厚溶液を予め封入しておく方法を採用した。ポリマーを用いることで、側面が非常に滑らかで乱れが少ない試料を得られることが既に報告^{2), 3)}されており、掘削に伴う乱れの影響を極力排除するためである。

b) 載荷システム

試験体に拘束圧を作用させる円筒セル，軸荷重を作用させるキャップなどより構成される。

円筒セルはゴム膜を介して最大2MPaの圧力を試験体の側面に作用させることができる。ゴム膜の上端は専用の治具によりキャップに固定されている。一方，下端は円筒セルの底部と試験体キャッチャーホルダーで挟むことによって固定されている。

キャップには軸荷重用ロードセル，シャフトが取り付けられている。キャップの最大移動量は30mmで，試験体のひずみにすると約10.8%である。また，軸荷重の最大値は約200kNで，試験体に作用する最大軸応力は約30.8MPaである。

c) 計測システム

軸荷重はキャップとシャフトの間に挟んだロードセルによって，セル圧はセルに取り付けた圧力計によって計測する。

軸方向変位は今回開発した変位計測装置によって計測する。コア（内径101mm，外径105mm，高さ22，27mm）とメンブレン（厚さ2mmのネオプレンゴム）は厚さ4mm程度の樹脂製のスポンジ板を介して接着されている。拘束圧によって試験体に圧着されたメンブレンの軸方向の変位，つまりは試験体の軸変位に追従したコアの動きをコイルの電圧差によって計測する。また，スポンジ板を挟むことによって軸圧縮に伴う試験体の直径方向の膨張（ポアソン比 $\nu=0.5$ とした場合， $\epsilon_{\max}=10.8(\%)$ のとき4.86mm）を吸収することができる。装置は2深度（計測区間長140mm）において設置することで，コアの

相対変位からベディングエラーの影響を含まない試験体の平均的な軸ひずみを計測することができる。

側方変位はメンブレンの中央高さに取り付けた円形状のLDT（内径120mm，外径120.6mm，高さ8mm）によって計測する。また，直交する2方向の変位を計測することで，試験体の平均的な側方変位を計測することができる。

4. まとめ

今回，差動トランスの原理を利用した変位計測装置を考案し，これを組み込んだ新しい原位置三軸試験装置を開発した。

今後は，紹介した試験装置を用いて実証試験を検討中である。試験は，デルリンやモルタルなどのダミー試験体や模擬地盤などに対して実施する。装置の妥当性や精度の確認などを行い，実地盤へ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装置の開発，第 31 回岩盤力学に関するシンポジウム，pp.82-86，2001。
- 2) 金子 進，谷 和夫：水溶性ポリマーの濃厚溶液を利用したサンプリング方法の深部地盤への適用，第 40 回地盤工学研究発表会，pp.183-184，2005。
- 3) 池野谷尚史，山田眞一，金子 進，谷 和夫：水溶性ポリマーを用いたサンプリングにより採取された貝殻混じり砂の力学特性，第 50 回地盤工学シンポジウム，2005（投稿中）。

DEVELOPMENT OF A NEW APPARATUS FOR IN-SITU TRIAXIAL TEST USING LVDT

Takafumi IKENOYA, Syuntarou TSURU, Susumu KANEKO,
Hideo TACHIKAWA and Kazuo TANI

To measure the stress-strain relationship of rock mass, the in-situ triaxial test on a large downhole hollow cylindrical specimen is conducted. However, this test method is very expensive for its gigantic scale and complicated shape of specimens and difficult measurement system. To solve this problem, a new displacement measurement device using a principle of LVDT (Linear Variable Differential Transformer) is proposed, and a new apparatus for in-situ triaxial test is developed.

The new apparatus is designed to use a columnar specimen of diameter 90mm formed at the bottom of drillhole. Axial and radial deformations of the specimen can be measured by LVDT and LDT respectively. Since the specimen is downsized by a factor of four and its shape is made simpler eliminating the center hole, the cost of testing is expected to be reduced dramatically.