

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

Development of Apparatus for New *In-situ* Rock Test using Downhole Hollow Cylindrical Specimen

谷 和夫*・立川日出男**・金子 進***・豊岡義則***

Kazuo TANI, Hideo TACHIKAWA, Susum KANEKO and Yoshihiro TOYOOKA

Apparatus for a new *In-situ* test method for rock mass is developed. The proposed test method is characterized as a kind of loading tests on a hollow cylindrical specimen prepared downhole to evaluate mechanical behavior of rock mass in depth. The equipment is comprised of a pair of inner and outer cells for lateral pressures and a rigid cap for axial loading. A novel technique for deformation measurement is invented, which is denoted as ICD, Instrumentation for Cavity Deformation.

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

1. 孔底の中空円筒試験体を利用した新しい岩盤試験

不均質だったり不連続面が含まれたりする岩盤の力学特性は、寸法効果や採取した試料の品質が問題となるので、原位置で行う大規模な載荷試験、例えば平板載荷試験、プレッシャーメータ試験あるいは岩盤せん断試験によって調査するのが一般的である。しかし、これらの原位置岩盤試験には様々な問題点があるので、深部岩盤の力学特性を精度良く調査することができる新しい原位置試験法（電中研式）を考案した^{1&2)}。

提案する試験は、ロータリー・ドリリングによってボーリング孔底に中空円筒形状の試験体を掘削・成形し、その中央の小孔と外周溝（スリット）にゴム膜を介して試験体の側面に圧力（内圧と外圧）を作用させると共に、上面を軸方向に載荷した時の試験体の軸方向と半径（または円周）方向の変位挙動を計測するものである。以下に、この新しい岩盤試験のために開発した装置の特徴、特に変位計測システム（ICD）について紹介する。

2. 装置の開発に関する要諦

（1）試験体の作製

試験体を作製する上での要件は、①掘削に伴う損傷（乱れ）がわずかなこと、②形状が正確なこと、かつ③表面が滑らかなこと、の3つである。ダイヤモンド・ビットを用いたロータリー・ドリリングが最も有効であるが、特に、掘削手順、掘削機材の選定、装置の据え付け、振動の防止などに留意しなければならない。また、節理性岩盤などにおいて、岩片の剥落によって側面が欠損した場合の対処法も検討する必要がある。

（2）載荷装置（図-1参照）

孔底における組み立て作業は制約が多いため、極力ユニット化を進める必要がある。基本的には、中央の小孔と外周溝（スリット）に挿入してそれぞれ内圧と外圧を試験体の側面に作用させる内セルと外セル、さらに試験体の上面に載せて軸荷重を作用させるキャップ・ジャッキ類の合計3ユニットから構成されよう。

内セルと外セルは、所定の狭い空間に挿入し、かつ変位計測システムを保持するため、型枠が必要である。内セ

* 正会員 Ph.D. 横浜国立大学 工学部 建設学科
** (株)立川機械製作所
*** 基礎地盤コンサルタンツ(株)

ルはプレッシャーメータのように円筒ボディーの表面をゴム膜で覆い、外セルは薄肉円筒の内外面にゴム膜を張りつける構造が考えられる。また、試験体の側面に圧着するゴム膜の両端を一定の高さで固定すると、試験体の軸方向変形に伴ってゴム膜に過大な張力が発生する可能性がある。そこで、内セル外側および外セル内側に取り付けのゴム膜の上端は、軸方向にスライドする摺動リングに固定しなければならない。

外セルの圧力の反力は周辺岩盤に期待するが、地圧と引っ張り強度が低い場合には放射状に引っ張り亀裂が発生する可能性がある。そこで、外セルの外周面のゴム膜は厚くかつ補強して破損しにくい構造としなければならない。一方、軸荷重の反力は、ボーリング孔の壁面（ケーシングを含む）ないし地上（調査坑の天場を含む）に取るのが一般的であろう。

（３）計測システム（図－１参照）

応力／荷重場の計測項目は、内セルと外セルに供給する圧力と、キャップに作用する軸荷重の３成分である。

変形場の計測項目は軸対称条件を仮定すると、軸方向、半径（または円周）方向の変位またはひずみとなる。試験体の上面を剛な載荷板（キャップ）で拘束するので、試験体の軸方向の伸び縮みは半径方向にほぼ一様に分布すると考えられる。そして、その平均的な値は試験体の中心軸、すなわち中央の小孔で計測する方が有利である。なお、キャップの軸変位計測は、試験体下部が地盤に連続しているので試験状況の単なるモニタリング用に過ぎない。

一方、半径（または円周）方向の変位またはひずみは、試験体の内外両側面、すなわち中央の小孔と外周溝（スリット）で計測することが考えられる。「要素試験」法の場合は、その変位量は半径に比例する（ひずみ量は同じ値になる）はずである。なお、セルの軸移動の影響を考慮すると、半径方向変位よりも円周方向変位（円周長の伸び縮み）を、またはひずみ自体を直接に計測する方が有利である。

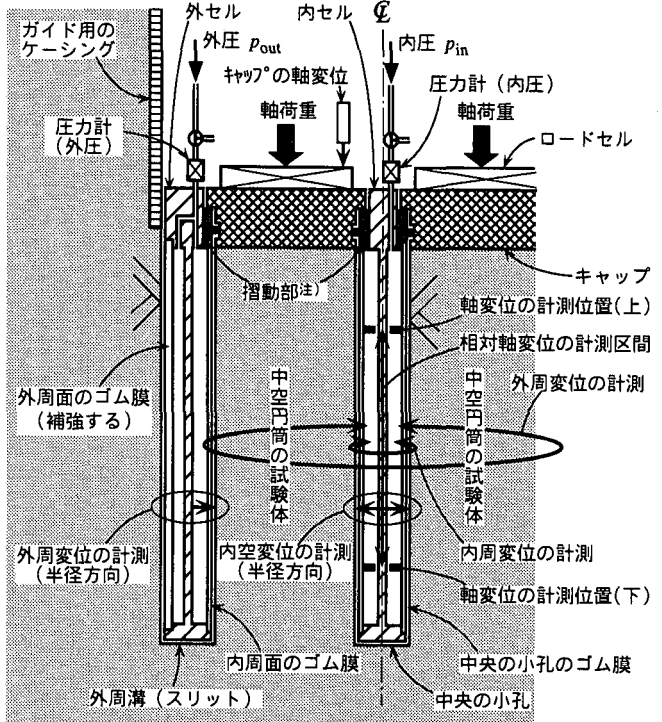
岩盤は不連続面や不均質性の影響で変形の局所化が生じやすく、試験体の変形を詳細に把握するためにはより多くの高さで計測を行うことが望ましい。しかし、スペースおよびコスト上の制約は非常に厳しい。特に、内セルは限られたスペースの中で軸方向と半径（または円周）方向の変形を同時に計測する耐圧かつ耐水仕様の計測システムを内蔵しなければならない。その一方で、「要素試験」法で試験体にせん断破壊面が発達すると内セルが損傷する虞があり、内セルは安価なものでなければならない。

（４）試験体の回収

試験の終了後に試験体を地表に回収して観察すれば、試験結果の解釈に資することは当然である。しかし、節理や破断面により試験体が一体でなく、複数の部分に分離した状態も考えられる。そこで、外セルと共に試験体も一緒に回収できることが望ましい。

３．試験装置の概要（仕様）

（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状部材が、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。



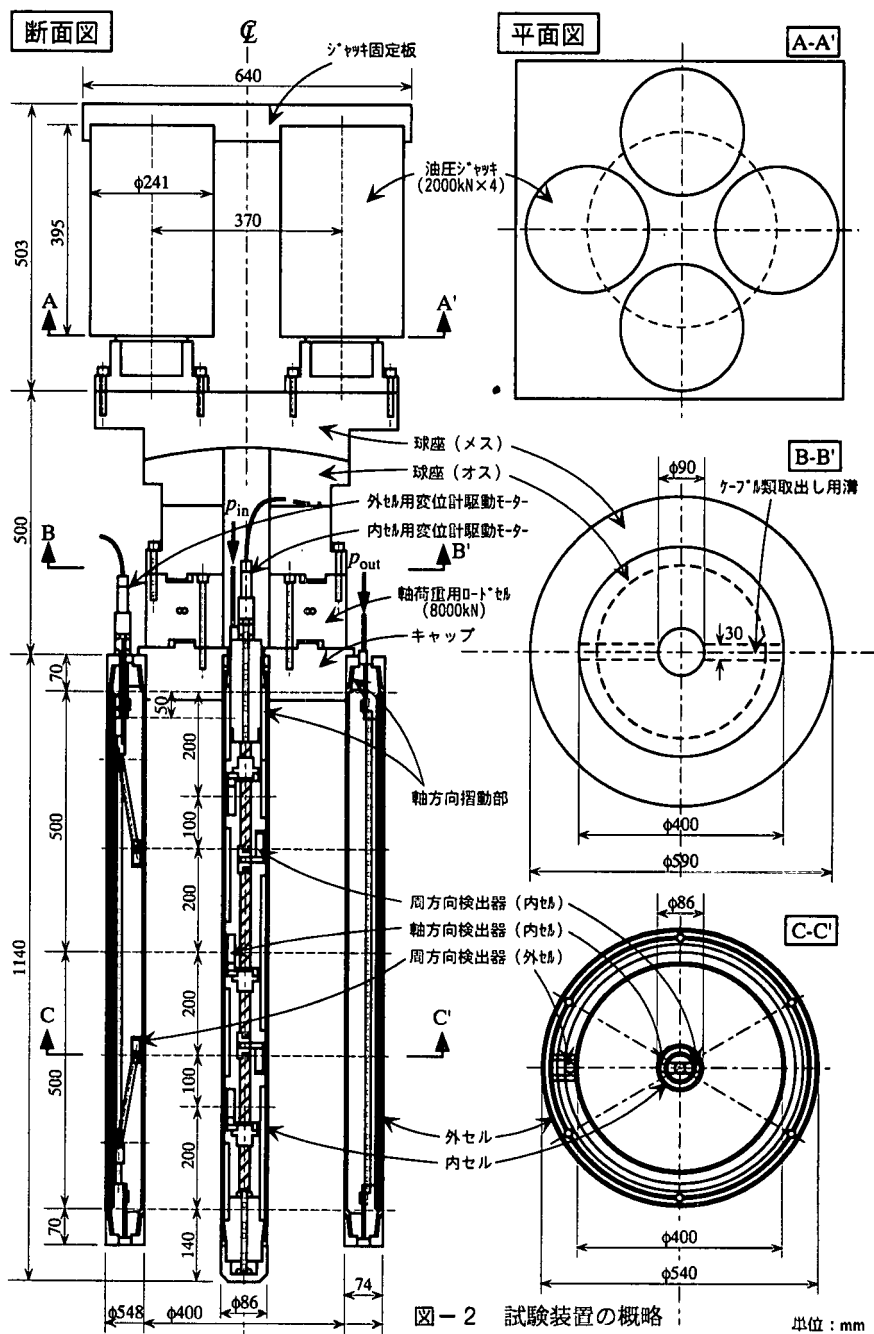
図－１ 載荷装置と計測システムの概念図

地下深部（ボーリング孔の底部）に精度良く試験体を掘削する技術が確立されていなかったため、露頭や調査坑内で試験を実施することができる装置一式を1998年末に製作した。

寸法効果を考慮すると試験体は大きい方が望ましいが、経済性も無視することができない。そこで、「要素試験」を行った際に形成されるせん断破壊面が、通常サイズの岩盤せん断試験におけるせん断面と等価な大きさであるように試験体の外径を400mmとした^{注1)}。室内試験の円柱供試体の（高さ h /直径 d ）比は2程度であるが、原位置では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側圧の載荷区間長（高さ）を1000mm（ $h/d=2.5$ ）とした。また中央の小孔の大きさは、内セルに格納する変位計測システム（ICD）の大きさと、掘削に用いるコアバーレルの規格を考慮して内径を86mmとした。なお最大許容軸圧縮量は、平均軸ひずみ5%まで載荷することを想定して50mm（摺動リングの可動範囲）とした。

側圧と軸荷重は、それぞれ最大で5.0MPaと8000kN（最大軸応力は約66MPa）とした。また、軸方向の変位は中央の小孔で3深度、円周方向の変位は試験体の内側面と外側面においてそれぞれ2深度で計測する。いずれも内セルのスペース上の制約による。

（注1）通常サイズの岩盤せん断試験におけるせん断面は50-60cm四方で、その面積は2500-3600cm²である。一方、直径40cmでせん断破壊面の傾斜が65°とすると、その面積は約3000cm²である。なお、評価対象岩盤の体積を検討すると、載荷板の直径が53cmの平板載荷試験、あるいはブロープの直径が12cmで長さが70cmのブレッシャメータ試験と同程度の規模と推定される²⁾。



単位：mm

の位置を磁力センサー（検出器）で感知する円孔変位計測システム（ICD：Instrumentation for Cavity Deformation）を採用した（図－４）。ICD の特徴には、① 1 個の回転角計によって軸方向変位と半径（または円周）方向変位を複数断面で計測が可能、② 回転角計はセルの外に設置できるので耐圧・耐水仕様である必要はなく、さらに③ 検出器として用いる磁力センサーは非常に小型（数 mm 角）かつ安価（数百円）である、の 3 点が挙げられる。

軸方向変位は磁力センサーのスキャン幅（ストローク）が 10mm であるので、8mm 間隔で 5 つの検出器を並べ 40mm にわたって追跡することとした。また、計測の冗長性（redundancy）を考慮して、2 列のターゲットを 30mm の間隔でゴム膜に埋め込んだ。

また、キャップ上面の端部に 4 個の変位計を等間隔に設置し、その沈下量をモニタリングする。

（３－３）計測と記録

内セルと外セルの円孔変位計測システム（ICD）における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、待ち時間を含めて 1 回のデータ取得に約 60 秒かかる^{※2)}。スキャンした区間の中から磁力の最大位置を検出するデータ処理には Savitzky と Golay による平滑化微分法³⁾を用いた。

（注 2）この間の変位、荷重、応力の変動が無視できる程度に小さくなるように載荷速度を設定する必要がある。

（４）試験体の回収用治具（図－５参照）

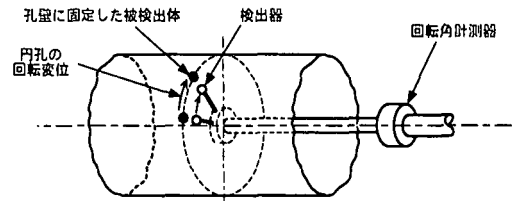
最初は、試験体の底部に平たがね形状の楔を水平に押し込むジャッキを外セルの底部に 4 個取り付けていた。しかし、試験体の底部に拘束圧が加わらない部分が存在してしまうため、装着していたジャッキ 4 個を鋼製リングに取り付けた治具に変更した。

5. まとめ

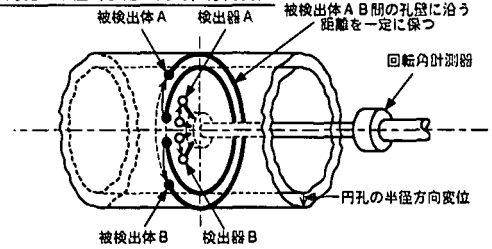
紹介した試験装置を用いて 1999 年に実証試験を実施し⁴⁾、現在、装置の改善を検討している。

参考文献：（１）谷（1998）“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、pp.71-76。（２）野崎、池見、谷（2000）“原位置岩盤試験法（電中研式）の開発”、電中研報告、（査読中）。（３）南編著（1986）“科学計測のための波形データ処理”、CQ 出版社、pp.111-121。（４）野崎、池見、岡田、谷（2001）“原位置岩盤試験法（電中研式）の実証試験”、電中研報告、（査読中）。

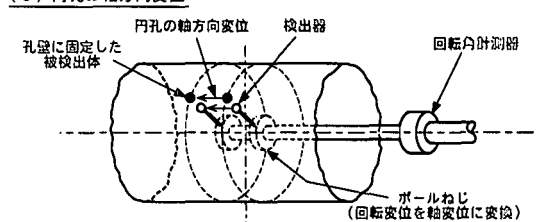
（a）円孔の回転変位



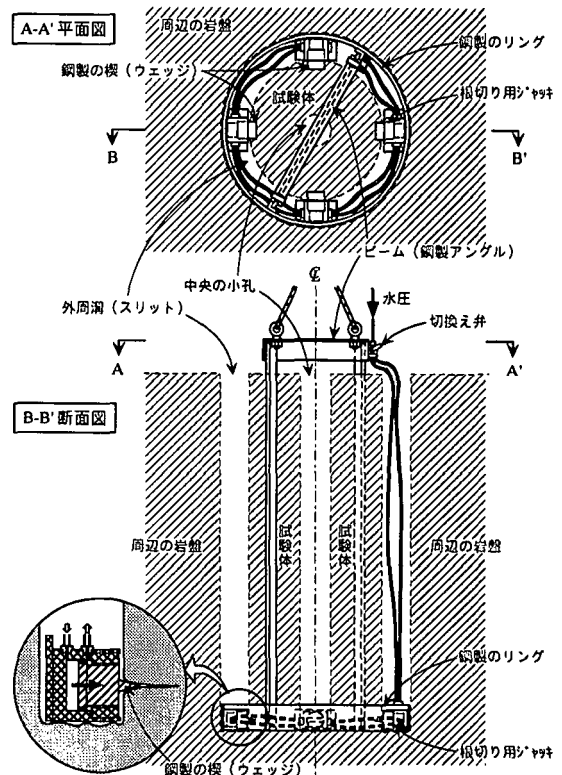
（b）円孔の半径（または円周）方向変位



（c）円孔の軸方向変位



図－４ 円孔変位計測システム（ICD）の原理



図－５ 試験体の回収用治具