

円錐孔底ひずみ法による地表からの深部地圧測定装置の開発

Development of the equipment for the rock stress measurement at great depth by compact conical-ended borehole overcoring technique

坂口清敏* 松本浩二* 鈴木康正** 原 雅人** 南 将行***

Kiyotoshi Sakaguchi Koji Matsuki Yasumasa Suzuki Masato Hara Masayuki Minami

Accurate determination of rock stress at great depth has become one of the most important subjects for design of the underground structures. To estimate three dimensional in-situ rock stress, Compact Conical Borehole Overcoring (CCBO) technique, which is one of stress relief methods, has been applied and it is verified that CCBO technique enables in-situ measurements to be made accurately and economically. If CCBO technique, which has been used mainly for horizontal boring from an adit, could be used for a vertical and deep borehole, deep rock stress measurements would be possible with high accuracy. We developed Downward Compact Conical-ended Borehole Overcoring (DCCBO) technique and conducted shallow in-situ test to verify its applicability. Consequently it was confirmed that the DCCBO technique was applicable for measurements in a water-filled vertical borehole.

Key Words: rock stress, downward drilling hole, conical-ended borehole overcoring technique, measurement equipment of rock stress

1. 概要

地下発電所、液化石油ガスの地下備蓄、高レベル放射性廃棄物の地層処分等、地下深部に設置される大規模な施設を合理的かつ安全に設計するために、空洞掘削時の岩盤挙動を精度良く評価することが重要である。岩盤挙動に影響を与える要素としては、①地質特性、②岩盤特性、③外力特性が挙げられるが、これらのうち外力特性を得るために、地山の初期地圧を測定することは不可欠である。

地圧測定法のうち、円錐孔底ひずみ法は、応力解放法の一つであり、高精度で経済的な原位置測定手法として、適用実績が多い。しかしながら従来の円錐孔底ひずみ法は、既設の坑道等から削孔された水平ボーリング孔を利用した測定方法であり、この方法を用いて地山深部の地圧測定を実施するためには、測定箇所、測定深度等に制約があった。このため、坑道等を掘削する以前の地点選定段階においては、円錐孔底ひずみ法を用いて地下深部に計画される施設設置予定箇所の正確な初期地圧測定を実施することは困難であり、地表からのボーリング孔を用いた測定方法の開発が望まれている。

そこで、円錐孔底ひずみ法の地表からの深部地圧測定への適用拡大を目的として、下向きボーリング孔にて測定可能な地圧測定装置を開発し、原位置において実証試験を実施した。

* 工学博士 東北大学大学院環境科学研究科環境科学専攻
** 東電設計（株）第一土木本部地下環境技術部
*** 東京電力（株）建設部土木・建築技術センター

2. 深部地圧測定装置の概要

(1) 測定装置への要求性能

地圧測定装置の開発にあたり、開発のコンセプトを以下のように設定した。

- ① 諸外国の開発状況、今後計画される地下施設の深度等を考慮し、大深度（深度 1,000m）に対応できる装置とする。
- ② パイロット孔と同じ孔径でオーバーコアリングが可能となるようにする。
- ③ 地下水により水没した孔においても測定が可能となるようにする。
- ④ 確実に 3 次元の地圧を測定するため、1 回の測定で多方向のひずみの測定が可能となるようにする。

測定装置開発の基となる手法として、コンパクトオーバーコアリング法¹⁾(CCBO 法: Compact Conical-ended Borehole Overcoring Method)を採用した²⁾。当手法は孔底ひずみ法に属するものであり、パイロット孔と同じ孔径でオーバーコアリングを行うため、開発のコンセプト②を満たすものである。また測定されるひずみも 16 方向あり、コンセプト④も満足するものである。装置の開発に向け、コンセプト①、③の要求を満たすため、新たに次の環境への対応および機能の追加が必要となった。

- 使用環境：高水圧、高い地熱、削孔屑の堆積
- 追加機能：装置の貼付機能、方位・傾斜の測定機能、データの取得機能

(2) 装置概要

要求性能を満足した装置の概要を図 1 に示す。装置は、ひずみ測定部であるストレインセルユニット、データ蓄積部であるデータロガー部、方位・傾斜測定部および貼付装置（外管、内管、分離部）から構成される。

接着剤が塗布されたひずみゲージは、内管内に蓄えられた空気により、孔底に達するまで孔内水から保護される。

装置が孔底に到達すると内管は徐々に外管内挿入され、ひずみ測定部先端が露出し、先端棒が押し込まれる。これをトリガーに窒素ガスがひずみゲージ周辺から噴出することにより、孔底の削孔屑を排除する。

ひずみ測定部とデータロガーは、ひずみゲージ貼付後、分離部を境に貼付装置から切り離され、孔底に残置される。

データロガーに記録されたデータは、オーバーコアリング後、ひずみ測定部、岩石コアとともに回収され、ひずみデータ等をパソコンに取り込み、地圧に変換する。貼付装置上部にはコンパスと小型カメラからなる方位・傾斜測定部があり、貼付後のひずみゲージ

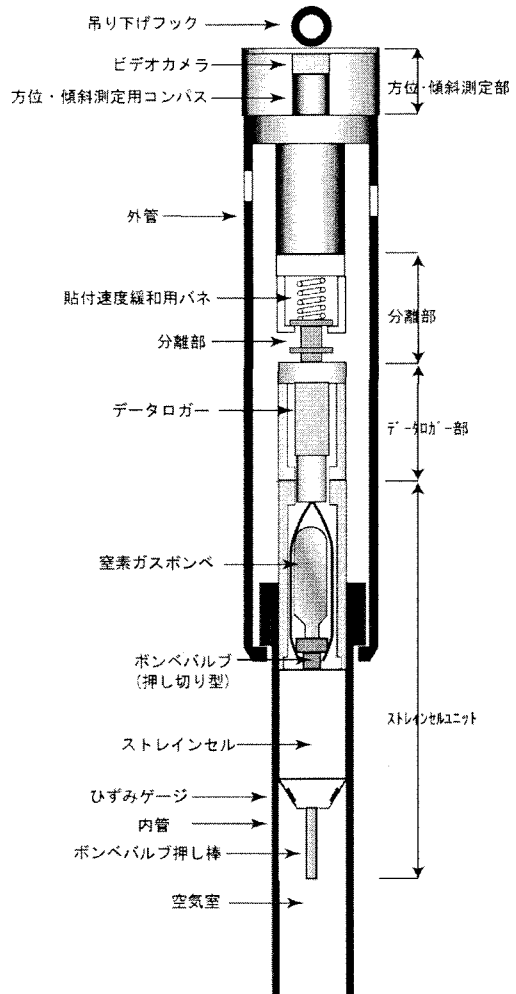


図 1 測定装置の概要

の方位・傾斜が測定される。

試作した装置の外観を図 2 に示す。外管は径 100mm、長さ 1,350mm、内管は径 52.7mm、長さ 1,400mm、ひずみ測定部+データロガーは径 50mm、長さ 1,060mm である。なお、寸法は 1,000m クラスのワイヤーライン工法のボーリングで孔径 123mm (PQ サイズ) を想定して設定したものであり、測定深度によっては外管径および外管・内管長は変更可能である。

室内試験により、ストレインセル、データロガー容器 (図 1 参照) の耐圧性能は 100 気圧まで、耐熱性能は 100℃ (ロガーは 60℃) まで確認している。

オーバーコアリング中の温度変化に対する補正が可能なように、16 方向のひずみに加えひずみゲージ部の温度もデータロガーに記録されるようにした。データロガーの作動時間は最大 10 時間であり、記録間隔は 5 ～ 300 秒の間で任意に設定 (最大 5000 組の記憶容量) できるようにした。

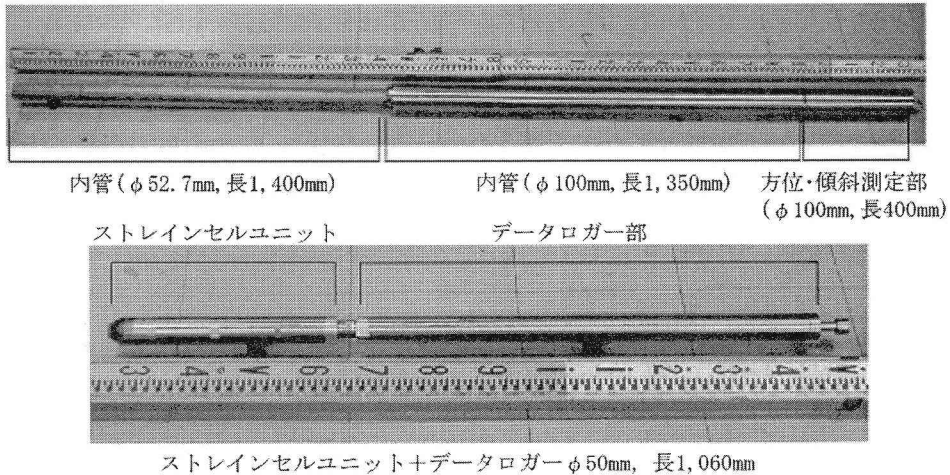


図 2 地圧測定装置の外観

(3) 測定手順の概要

測定手順の概要を図 3 に示す。

- 1) ワイヤーライン工法で所定の位置までボーリング・・・図 3 (a)
- 2) 特殊円錐ビットで孔底を加工・・・図 3 (b)
- 3) ワイヤーラインコアバレル用ビットをアウターチューブと共に孔内に投入・・・図 3 (c)
- 4) 清水循環で孔底・孔内を洗浄。
- 5) 接着剤をひずみゲージに塗布し、装置全体を孔内に投入する。孔底に到達する寸前に窒素ガスが噴出し、削孔屑を排除する・・・図 3 (d～h)
- 6) ストレインセルユニット、デー

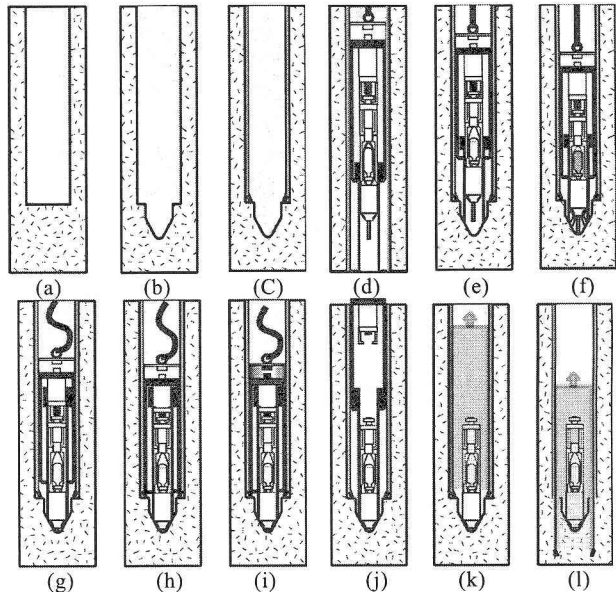


図 3 測定手順の概要

タロガー部を接着中．この間に方位・傾斜を測定する．．．．図 3 (i)

7) 貼付装置の回収．．．．図 3 (j)

8) インナーチューブの投入．．．．図 3 (k)

9) オーバーコアリング (30～50cm)．．．．図 3 (l)

10) コアパレルにより岩石コアとひずみ測定部＋データロガーを回収．

11) データロガーのデータをパソコンに収納．また岩石コアを用いて弾性係数，熱膨張係数を室内にて測定．

12) 測定されたひずみを地圧に変換．

3. 現場実証試験

試作した装置の性能を確認するために，実証試験を実施した．実証試験は，土被り約 500m の地山深部における坑道内で実施した．試験位置の地質は，細粒砂岩基質の混在岩（砂岩，チャート，塩基性火山岩類，石灰岩等の礫が不規則に混入する）であり，平均的な一軸圧縮強度は，150MPa 程度と非常に硬質な岩盤である．

実証試験は坑道の二次地圧の影響が排除できる箇所で行うこととし，坑道より鉛直下向きに 15m(=3d, d:坑道径)以深で実施した．採取したコアの一例を，図 4 に示す．

実証試験では，削孔長が短いこと，坑道内であるため，スペースが限られることから，ボーリングはワイヤーラインではなく，当工法を模擬した普通工法とした．試験位置の岩盤温度は 16℃程度であり，湧水は少ないものの，削孔した鉛直孔内は削孔水・清水循環水により常に水で満たされた状態である．

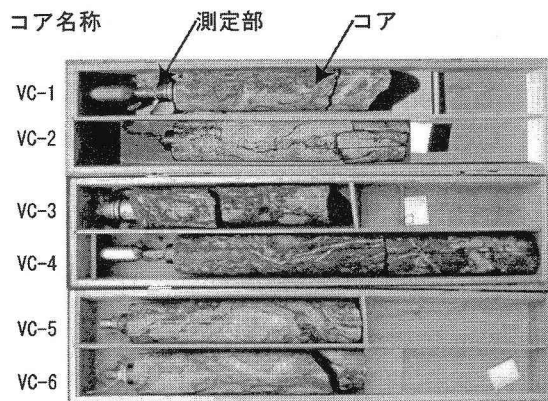


図 4 採取されたコア（例）

4. 試験結果

(1) 測定状況

本試験は，計 15 回実施した．このうち当初の 2 回については，装置の取り扱いに不慣れのため，測定不可の状況が発生したが，装置の取り扱いに慣れるに従い，その後は全ての試験でデータ取得できた．1 回の測定に要した時間は，パイロット孔の削孔を除くと 7～8 時間であり，装置投入から回収まで（手順 5～10）は 6 時間程度要した．なお，接着剤硬化待ち時間は，実証試験時の水温における接着剤の硬化時間を考慮し，2 時間とした．

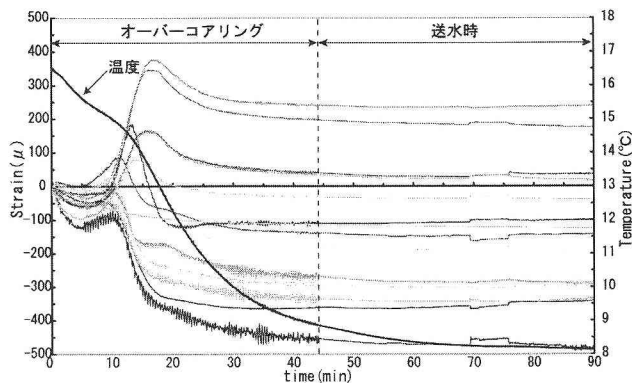


図 5 測定結果の一例

(2) 測定結果

測定は、前述のとおり 13 回実施したが、そのうち地圧に変換できたものは 11 回であった。

地圧に変換できなかった測定の一つは、測定装置の接着不良に起因してデータが不良であったためで、残りは方位・傾斜の測定ミスが認められたものである。

ひずみ・温度の測定結果の一例を図 5 に示す。削孔水と岩盤の温度に差がある場合、この事例のように試験中測定ひずみには、微振動が計測されているが、これはオーバーコアリング時のボーリングによる削孔振動を受けたためである。削孔水と岩盤の温度に差がある場合、図のように試験中に水温は変化するため、地圧を精度良く求めるためには、温度によるひずみを考慮して測定されたひずみを補正する必要がある。当試験では、オーバーコアリング後、温度がほぼ一定になるまで送水を続け、その時の温度から地圧を求めることにした。

(3) 地圧解析結果

孔底部の座標を図 6 のように取った場合、測定されるひずみ (ε_θ : 周方向, ε_ρ : 稜線方向) と応力の関係は、式 1³⁾により与えられる。

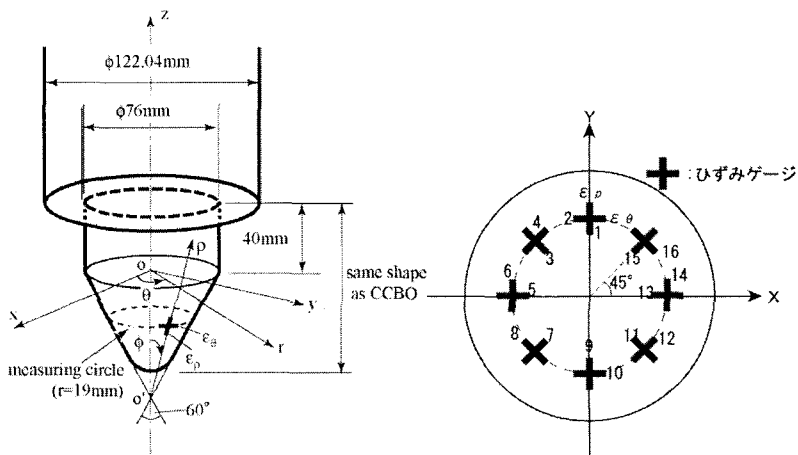


図 6 孔底の円錐部と座標系

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_\theta \\ \varepsilon_\rho \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} + A_{12} \cos 2\theta & A_{11} - A_{12} \cos 2\theta & C_1 & D_1 \sin \theta & D_1 \cos \theta & 2A_{12} \sin 2\theta \\ A_{21} + A_{22} \cos 2\theta & A_{21} - A_{22} \cos 2\theta & C_2 & D_2 \sin \theta & D_2 \cos \theta & 2A_{22} \sin 2\theta \end{bmatrix} \cdot \frac{\{\sigma\}}{E} \quad \dots \text{式 1}$$

式中の A_{11} , A_{12} , $\dots$, D_2 は、ひずみ感度と呼ばれ、ポアソン比 ν を求め、測定したひずみより式 1 により応力 $\{\sigma\}$ を求めることができる。3 次元の地圧を求めるには独立した 6 方向のひずみが必要であるが、本装置では図 6 に示す 16 方向のひずみが測定できるため、一部のひずみゲージに不良が生じて地圧測定に問題はない。

回収した岩石コアの室内試験の結果、 $E=23 \sim 82 \text{ GPa}$, $\nu=0.09 \sim 0.17$, 線膨張係数 $=6 \sim 14 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ であった。当地点の地質は不均質であり、コアによりバラツキがあるため、地圧を求める際はコア毎の物性を用いることにした。

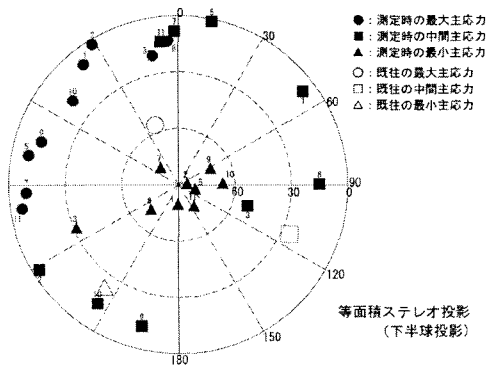


図 7 主応力の方向・傾斜

開発した装置で求めた地圧（以下、測定地圧）の主応力の方向と過去に実施された地圧測定結果（以下、既往地圧）を図 7 に示す。バラツキはあるものの測定地圧の方向は、既往地圧の方向と概ね一致している。ただし、既往地圧と測定地圧では第二主応力（ σ_2 ）、第三主応力（ σ_3 ）の方向が入れ変わっている。

主応力の大きさは既往地圧（圧縮を正）で $\sigma_1=12.8\text{MPa}$, $\sigma_2=8.6\text{MPa}$, $\sigma_3=4.6\text{MPa}$ であったのに対し、測定地圧は $\sigma_1=2.6\sim 6.5\text{MPa}$, $\sigma_2=0.7\sim 1.6\text{MPa}$, $\sigma_3=-7.7\sim 1.2\text{MPa}$ となり、全ての成分の値が既往地圧に比べ少なめに測定された（図 8 参照）。

測定された地圧にバラツキがあり、またその値が小さかったことの原因として以下が考えられた。

- 1) ボーリング箇所は、岩石結果から、極めて不均質（泥岩、砂岩、チャートの混在岩）であった。
- 2) ひずみゲージ近傍には耐圧性を高めるため、図 9 に示す真鍮製の管があるが、この管が測定されるひずみを拘束した可能性がある。
- 3) 今回の原位置試験で使用した接着剤が測定ひずみの感度を低下させていた可能性がある。

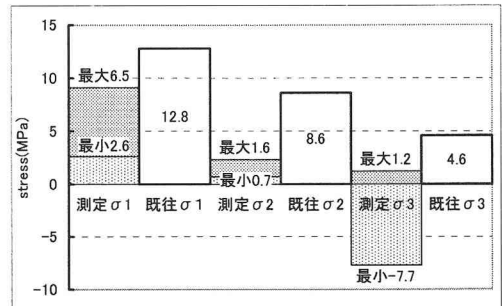


図 8 主応力の大きさ

以上より、開発した装置で水を満たされた鉛直孔での測定が可能であることが確認できたものの、測定されるひずみを拘束しないよう測定部先端の材質や形状を検討するとともに、測定に支障のない接着剤を使用する必要があることが明らかになった。

5. 今後の展開

これまでの検討成果を踏まえ、測定精度向上のため、開発した測定装置に対し、以下の検討を加え、装置の完成を目指している。

- 1) ひずみ測定の感度を向上させるため、ひずみ測定部先端の形状・材質を検討する。
- 2) 測定ひずみの感度を低下させない接着剤を選定する。
- 3) 磁場のある地点でも方位・傾斜が正しく測定できるように、磁石を用いた現状の方位・傾斜機構をオートジャイロに変更する。

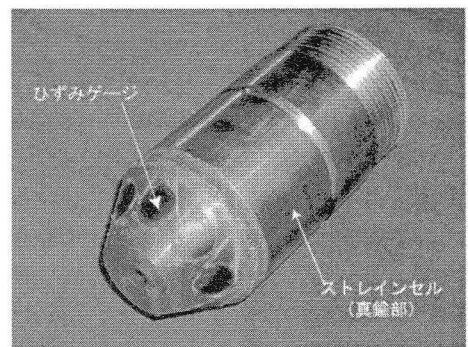


図 9 ひずみ測定部の先端

参考文献

- 1) 坂口ら：コンパクトオーバーコアリング法による岩盤応力の測定, 資源と素材, Vol.110, pp.331-336, 1994
- 2) 坂口ら：円錐孔底ひずみ法に基づく深部地圧計測装置の開発, 資源・素材 2002(春季大会), pp.81-82, 2002
- 3) 坂口ら：円錐孔底ひずみ法の応力測定精度, 資源・素材学会誌, 108(1992)No.6, pp.455-460, 1992