

種々の測定手法による原位置岩盤強度の評価 Evaluation of rock mass strength by means of various measuring methods

石黒幸文*・上田 稔**・西村 均***・菅原勝彦****
Yukifumi ISHIGURO, Minoru UEDA, Hitoshi NISHIMURA and Katsuhiko SUGAWARA

In the present paper, the results obtained by in situ rock shear tests are analyzed and compared to the uniaxial compressive strength of large diameter core specimen, having 29.3cm in diameter, measured under the condition of frictionless between the edge surface of specimen and the loading plate. Subsequently, these strength data are compared with the stress distribution around a highly stressed tunnel, which has been measured by means of the conical-ended compact overcoring method. From these comparison and analysis, it will be shown that the uniaxial compressive strength of large specimen well agrees with the in situ shear strength, and also with that estimated from the peak stress around the tunnel.

1. まえがき

岩盤内に地下発電所などの大規模空洞を構築する際には、空洞周辺岩盤の安定性検討のために初期地圧状態や、強度・変形特性を的確に評価することが必要である。岩盤の強度については、原位置の試掘坑内において4点程度の異なる拘束圧（初期鉛直荷重）のもとでロックせん断試験を行い、破壊時の鉛直応力とせん断応力の関係から破壊基準を定める方法が一般的に用いられている¹⁾。強度を表す指標としては、岩石供試体を用いた一軸圧縮試験もあるが、ここで得られる強度は岩石としての強度であり、原位置岩盤の強度として直接評価することは困難である。しかし、節理の少ないマッシュな岩盤に対しては、寸法効果の影響を考慮すればコアと岩盤の強度比較は有意義なものであると考えられる。一方、「岩盤の強度」を「岩盤が受け持つことが可能な荷重（応力）」として考えれば、岩盤が破壊することなく負担している地山応力の内、可能な限り大きな値を測定することができれば、岩盤の強度、即ち破壊基準はその応力状態を上回るものと考えられる。本論文では、種々の測定手法による原位置岩盤の強度評価の可能性を検討することを目的として、大口径（直径 29.3cm）のボーリングコア供試体で端面拘束の影響を受けないようにテフロンシートを用いた一軸圧縮試験結果、およびトンネル周辺の応力集中領域で実施したコンパクトオーバーコアリング法^{2), 3)}による二次地圧測定結果について、同じサイトで実施された原位置岩盤せん断試験結果との比較を行う。

2. 試験の概要

-
- * 正会員 中部電力(株)土木建築部
 - ** 正会員 工博 中部電力(株)電力技術研究所
 - *** 正会員 中部電力(株)電力技術研究所
 - **** 正会員 工博 熊本大学教授 工学部環境システム工学科

2.1 サイトの概要

対象としたサイトは大規模地下空洞の計画地点であり、地表面からの被り約 550m の地下深部において、空洞計画位置の地質および岩盤物性などを調べるために試掘坑（幅×高さ：2.3m×2.3m）が掘削されている。また、試掘坑より 36m 下部には、地下空洞へのアプローチトンネル（幅×高さ：6.6m×6.0m）が掘削されている。試掘坑およびアプローチトンネルの配置および今回報告する各種原位置試験などの実施場所を、図-1 の原位置試験概要図に示す。

地質は中生代白亜紀後期から新生代古第三紀の中粒花崗岩を主体としている。試掘坑内で確認された節理頻度は 2m に 1 本程度と少ない。また、空洞予定位置に対して穿孔された地質調査ボーリングでは、RQD の値が 90% 以上を示しており、き裂の非常に少ない岩盤である。岩質については、部分的に熱水変質の影響で弱変質を受けているところもあるが、全体的に新鮮で堅硬緻密な岩盤が分布している。

このサイトにおける初期地圧調査結果によれば、3次元主応力の大きさおよび作用方向は、最大主応力が 25.4~28.1MPa で概ね東西の水平方向、中間主応力が 11.4~14.9MPa で概ね南北の水平方向、最小主応力が 7.1~7.9MPa で概ね鉛直方向であり、東西方向の偏圧傾向が強い高地圧状態である⁴⁾。

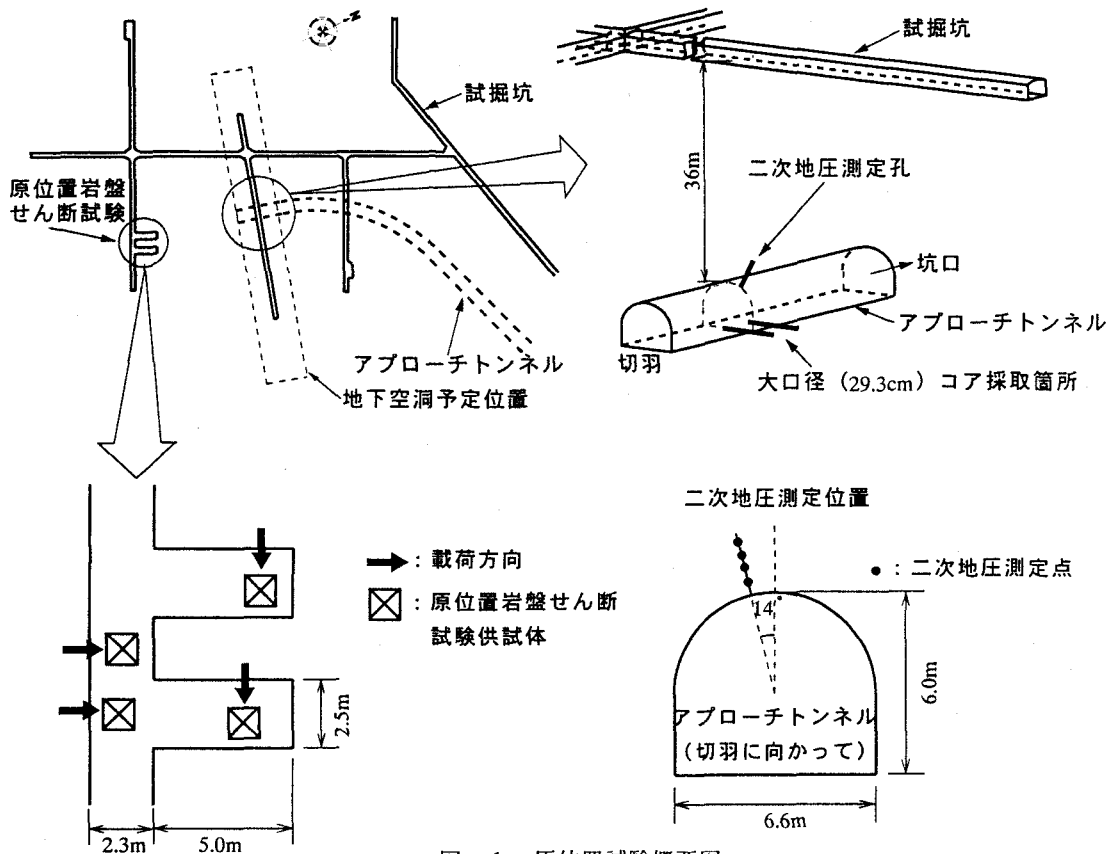


図-1 原位置試験概要図

2.2 原位置岩盤せん断試験

対象サイトの岩盤のせん断強度を求めるために、試掘坑内において原位置岩盤せん断試験を 4 供試体について実施した。対象とした岩盤は、サイトを代表すると考えられる新鮮な花崗岩であり、サイト全般で節理が少ないことから、節理を含まない状態で供試体の位置を選定した。供試体の寸法については、岩盤がかなり堅硬なことから、土木学会の指針に記載されている 60cm×60cm ではジャッキの能力上破壊にまで至らな

い恐れがあったため 50cm×50cm として、高さについては 15~20cm 程度とした。供試体の作成は、当初ディスクカッターによる切り出しを試みたが、カッターの刃が岩盤に挟まってしまうなどの現象が見られた。結果として、コアカッターおよびハンドカッターにより、困難を伴いながらも 4 体の供試体を作成できた。このように、これまでにあまり例を見ない、高地圧条件の下での岩盤せん断試験となったため、後述するような他の試験方法との比較を試みた。供試体の基盤で超音波により測定した V_p の値は 4.7~5.3km/s の範囲にあり、概ね 5km/s 前後の値を示している。

2.3 コアの一軸圧縮試験

コアの一軸圧縮試験は、地質調査のために試掘坑内で穿孔されたボーリングコア（コア径 5cm）、電中研式埋設法による初期地圧測定のために穿孔された大口径ボーリングコア（コア径 19.8cm）、および一軸圧縮試験のために穿孔された大口径ボーリングコア（コア径 29.3cm）の 3 種類に対して行った。一軸圧縮試験に用いる供試体の高さは、コア径の 2 倍程度とした。一軸圧縮試験の際には、加圧板と供試体端面との間にテフロンシートを配置して端面拘束の影響を無くし、一軸状態での载荷となるようにした。供試体は新鮮な花崗岩から採取し、超音波により測定したコアの V_p の値が原位置岩盤せん断試験の供試体で測定された値（4.7~5.3km/s）の範囲内のもを採用することとした。その結果、コア径 29.3cm で 3 個、19.8cm で 7 個、5cm で 5 個の供試体が得られた。

2.4 コンパクトオーバーコアリング法による二次地圧測定

二次地圧の測定はトンネル断面に作用する初期地圧が大きく、なおかつ掘削に伴う応力集中の影響が最も大きいと考えられる、南北方向に掘削されたアプローチトンネルのアーチ部で行うこととした。二次地圧測定位置の決定に際しては、サイトの初期地圧を考慮したアプローチトンネル断面の掘削解析を行い、アーチ部付近で発生する応力が最大となる場所を選定した。その結果、トンネル断面において中心線に対して鉛直上向きから 14° 東よりへ傾斜した方向で、壁面からの深度は 30~120cm の範囲で 4 点の測定を行うこととした。この測定用ボーリング孔については、コアの超音波速度測定を実施し、測定点付近の V_p の値が 5.0~5.3km/s の範囲にあることを確認している。

地圧の測定手法としては、種々の方法が提案されているが、今回は掘削されたトンネルの壁面付近で可能な限り多くの点数の測定を短期間で行う必要があったことから、応力解放法の一つであるコンパクトオーバーコアリング法を採用した。この方法は、掘削径 76mm のボーリング孔の孔底面を円錐形状に仕上げ、円周方向およびその直交方向に各 8 成分、合計 16 成分のひずみゲージを組み込んだモールドゲージを接着剤にて貼り付け、数時間の養生の後同じく掘削径 76mm でオーバーコアリングを行い、解法ひずみを測定する。解法ひずみの値は、概ね 10cm 程度のオーバーコアリングで安定する。この解法ひずみの値を用いて、弾性理論に基づき、応力状態を算出することができる。

3. 試験結果と考察

3.1 コアの一軸圧縮試験結果

コア径 29.3cm の供試体については、3 供試体とも試験機の能力の上限（5,000kN）まで载荷しても破壊に至らなかった。5,000kN 载荷時でも、応力-ひずみ関係は概ね線形性を保っていた。従って、一軸圧縮強度としては 74.1MPa 以上を有していると考えられる。コア径 19.8cm の供試体については、一軸圧縮強度は 58.0~75.9MPa の範囲に分布しており、平均値は 68.3MPa であった。コア径 5cm の供試体については、一軸圧縮強度は 68.7~91.6MPa の範囲に分布しており、平均値は 81.2MPa であった。コア径 5cm と 19.8cm の平均値の間には 10MPa 程度の差があるものの、コア径 29.3cm の供試体の一軸圧縮強度はコア径 5cm の

供試体の平均値程度あると考えられる。これら3種類の供試体の試験結果からは、通常言われるような、コア径が大きくなるにつれて強度が低下するという寸法効果は顕著に見られない。今回の試験で対象としている花崗岩については、堅硬緻密であるため元々岩石内部に存在するマイクロクラックがほとんど無く、岩石コアの寸法効果の影響は現れにくいものと考えられる。以上より、原位置岩盤せん断試験結果との比較を行う大口径コア(29.3cm)供試体の一軸圧縮強度を80MPaとする。

3・2 コンパクトオーバーコアリング法による二次地圧測定結果

コンパクトオーバーコアリング法による地圧測定は、一回の測定で3次元の応力状態を求めることが可能であるが、今回の測定はトンネル掘削壁面近傍の測定であるため、トンネル掘削に伴う応力解放により、壁面に直交する方向の地圧成分は0と仮定して、円錐孔底面の周方向に配置された θ ゲージの解法ひずみのみを用いて、2次元の応力状態で地圧計算を行った。計算に用いた弾性係数の値は測定点(孔底面)の V_p の値に応じて定めた結果、56.8~59.8GPaである。

図-2に測定の結果得られた二次地圧の最大主応力 σ_1 および最小主応力 σ_2 を示す。これらは、二次地圧測定用ボーリング孔に直交する面内の応力である。最大主応力 σ_1 の作用方向は、壁面に最も近い深度0.327mの測定点を除いて概ねトンネル軸直交方向(概ね東西方向)を示している。

二次地圧の大きさの深度方向分布を見ると、トンネル壁面付近の掘削に伴う緩みなどの影響による強度低下およびそれより奥の緩んでいない領域での応力集中の影響を反映していると考えられる。特に、深度0.64mの最大主応力71.9MPaは、同じく東西方向に作用している初期地圧の最大主応力の2.6~2.8倍程度に相当しているが、必ずしも二次地圧のピーク値を示しているわけではない。この測定点では、コアと孔底面の V_p の値がいずれも5.1km/sであり、原位置岩盤せん断試験やコアの一軸圧縮試験供試体と同程度の値である。深度0.64mの最大主応力71.9MPaを二次地圧の代表値として、原位置岩盤せん断試験結果との比較を行う。

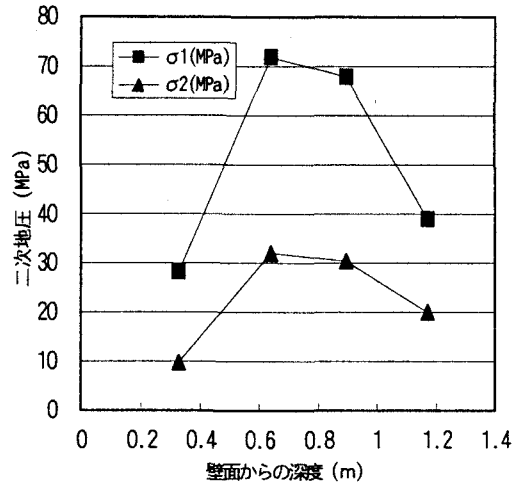


図-2 コンパクトオーバーコアリング法による二次地圧測定結果

3・3 各種の測定手法による原位置岩盤強度

図-3に、原位置岩盤せん断試験結果および大口径コア(29.3cm)の一軸圧縮試験結果、並びに応力集中領域におけるコンパクトオーバーコアリング法による二次地圧の測定結果(深度0.64m)を示す。大口径コアの一軸圧縮試験結果については、最小主応力は端面拘束の影響のない一軸載荷状態であるため0MPaとし、最大主応力は80MPaとしてモールの応力円を表示した。また、二次地圧の測定結果については、トンネル軸に直交する方向(トンネル横断面内)の応力状態を示すこととし、トンネル掘削に伴い壁面付近は一軸圧縮応力状態になるものと考えて、最小主応力は0MPaとし、最大主応力は71.9MPaとしてモールの応力円を表示した。また、図中には4点の岩盤せん断試験結果から定めた放物線形式の破壊基準をあわせて示す。

図-3より、大口径コアの一軸圧縮強度およびコンパクトオーバーコアリング法による二次地圧測定結果ともに、原位置岩盤せん断試験の結果得られた破壊時の応力状態とほぼ同程度の応力状態であることがわかる。応力集中領域における二次地圧については、岩盤が破壊することなく負担している地圧であるため、破壊基準は二次地圧の測定の結果得られる応力状態を上回ると考えられる。

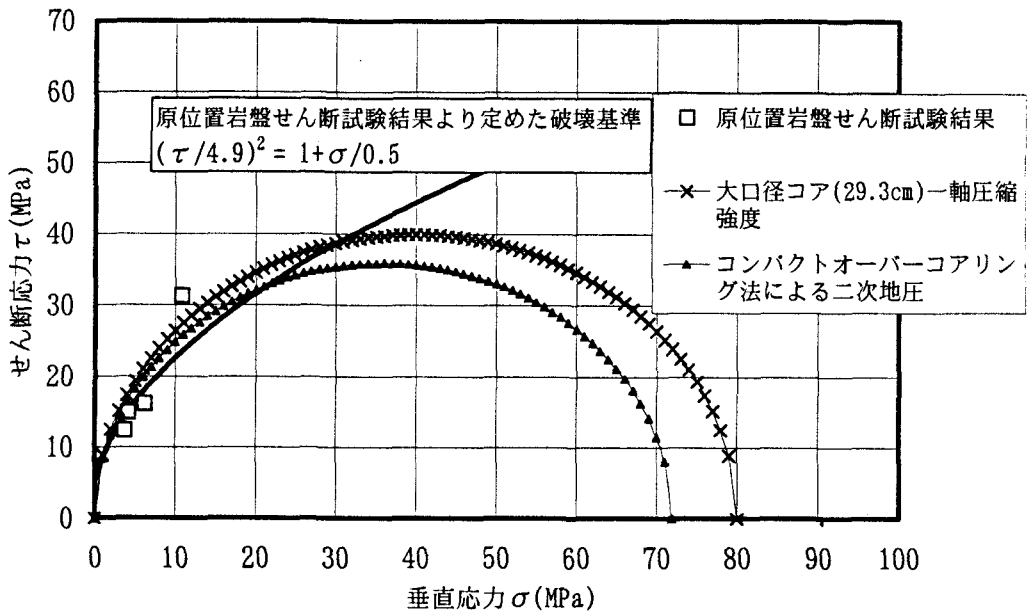


図-3 各種の測定手法による原位置岩盤強度

4. まとめ

き裂の少ない堅硬な、高地圧下の花崗岩について、超音波速度測定で同程度の V_p を示す箇所を対象に実施した原位置岩盤せん断試験結果、大口径コアの一軸圧縮試験結果、およびトンネル周辺の応力集中領域におけるコンパクトオーバーコアリング法による二次地圧測定結果を比較した結果、以下の知見が得られた。

- (1) 大口径 (29.3cm) のコアについて、端面拘束の影響を受けない一軸状態の載荷試験で求めた強度は、原位置岩盤せん断試験で得られた破壊基準とほぼ同程度である。
- (2) 応力集中領域において、コンパクトオーバーコアリング法による二次地圧測定の結果、原位置岩盤せん断試験で得られた破壊基準とほぼ同程度の地圧を測定することができた。岩盤は安定していることから、原位置岩盤の有する強度はこの地圧状態を上回ると考えられる。
- (3) 高地圧下における原位置岩盤せん断試験で得られた岩盤強度は、今回用いた大口径コアの端面拘束の影響を受けない一軸圧縮試験および応力集中領域のコンパクトオーバーコアリング法による二次地圧測定の結果から、その妥当性を確認することができた。これらの測定手法は、原位置岩盤強度評価のための有効な手段となり得ると考えられる。

5. 参考文献

- 1) 土木学会：原位置岩盤の変形およびせん断試験の指針、1983
- 2) Sugawara, K. and Obara, Y.: Draft ISRM suggested method for in situ stress measurement using the compact conical-ended borehole overcoring (CCBO), Int. J. of Rock Mech. Min. Sci., Vol.36, No.3, pp.307-322, 1999. 4.
- 3) 坂口清敏 他：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、110、4、pp.331-336,1994
- 4) Ishiguro, Y. et al. : In-situ initial rock stress measurement and design of deep underground powerhouse cavern. ISRM 9th congress proceeding vol2, pp.1155-1158, 1999. 8.