

(20) 地下発電所における岩盤応力測定

熊本大学工学部	菅原 勝彦
熊本大学工学部	尾原 祐三
電源開発(株)	有賀 義明
電源開発(株)	石村 豊

1. 緒言

地下発電所の建設は、昭和45年以降、水力電源開発の主流がピーク電力の需要に対処する揚水式に移行するとともに増加し、スケールメリットを追求した発電機の大形化に伴い空洞規模も大型化した。これらの空洞の合理的な設計・施工法の確立を目的として、また、最終的な安定性評価のために、各種の岩盤試験、岩盤計測がシステム工法に実施され、同時に各種の数値解析が試みられてきたことは周知の通りである。しかし、現在まで、岩盤応力測定に立脚した安定性評価の可能性は十分に議論されなかったように思われる。とくに、硬岩中に建設される地下発電所を対象とするとき、岩盤応力測定は1つの有力な評価方法であると考えられるので、筆者らは、応力測定法を分析するとともに、応力測定に基づく安定性評価の可能性を検討した。その結果を以下に報告する。

2. 3次元初期応力測定とその問題点

3次元初期応力は主として応力解放法によって測定されてきた。実用段階にある応力解放法のうちで、1本のボアホールを用いた計測から3次元初期応力状態を完全に決定できる方法は孔径変化法¹⁾、孔底ひずみ法²⁾および球面孔底ひずみ法³⁾の3つである。孔壁および孔底のひずみを測定する方法に関する精度比較によると、球面孔底ひずみ法が最も精度が高い³⁾。また、わが国で採用されてきた応力解放法が孔径変化法と球面孔底ひずみ法であることを考慮し、両者の特徴を簡単に比較しておくことにする。

孔径変化法としては、埋設型8成分ゲージ⁴⁾による方法が多用されている。これは4つの直径方向ゲージと4つの斜め方向ゲージとからなり、孔径42～46mmのパイロット孔内にセメントペーストによって埋設され、応力解放は孔径167～218mmのオーバーコアリングによる。計器長が25cm(両端のバッカー部を含めると40cm余り)と長いので、亀裂間隔が50cm以上の良質岩盤を対象とする方法である。問題点は、セメントペーストの固化に1週間程度の養生期間を要し、短時間に結果を得ることができない点にある。

球面孔底ひずみ法は、直径75mmのパイロット孔の孔底を半球状に加工し、ここに8つの回転方向ひずみゲージと8つの天頂角方向ひずみゲージとを、天頂角50度の同心円上に貼付する方法であり、応力解放は孔径145～218mmのオーバーコアリングによる。合計16箇のひずみゲージを所定の配置で孔底に直接貼付するために、16素子モールドゲージ(アラルダイト製)が開発されている。これは全長が7cmと小型である。このため、10～20cmの亀裂間隔の岩盤中でも測定が可能という長所をもつが、測定値がゲージ長5～8mmの局所ひずみであるために、原理的に均質緻密な岩盤だけを対象とする方法である。モールドゲージは短時間に固化する市販の接着剤で貼付できるので、パイロット孔の作孔からオーバーコアリング完了までの一連の操作は2～3時間で終わられる。

どちらの方法においても、オーバーコアリング中の孔径変化あるいは孔底ひずみ変化が連続的に計測されるので、応力解放による弾性回復の評価は極めて正確であると言える。したがって、誤差の大半は測定された弾性変形あるいは弾性ひずみからパイロットボーリングをする以前に存在した3次元応力を弾性理論に基づいて算定する過程で生じると考えられる。

さて、空洞配置、とくに地下発電所空洞の長軸の方向を決定する際に3次元初期応力測定は重要な役割を荷っている。図1はある事例に基づいて、空洞長軸の方向と代表断面(C断面)における壁面の最大接線応力

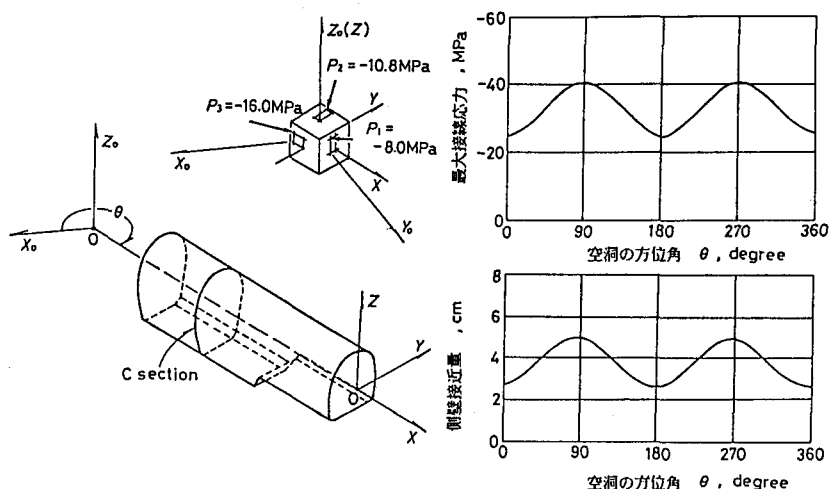


図1 空腔方位による最大接線応力および側壁接近量の変化

および側壁間接近量の関係を3次元BEMによって解析した結果である。この例からわかるように、壁面の応力集中と側壁間接近量は最大圧縮主応力を含む鉛直断面内に空腔長軸を選ぶとき最小化される。この原理に従って、最大圧縮主応力を含む鉛直断面内に空腔の長軸を配して成功した最初の例は新高瀨川発電所(東京電力)である。中間主応力の方向に空腔の長軸を選んだ例としては保野川発電所(中国電力)などが挙げられる。初期応力は、上述したように、空腔配置など地下発電所の基本設計に係わる最重要因子であるために、その測定には高い精度が要求されている。しかし、応力解放法が原理的に局所応力測定であるために、測定結果がグローバルな初期応力として妥当であるか否かははっきりしない。

3. 空腔まわりの岩盤応力測定

BEMによって地下発電所空腔まわりの接線応力分布を解析した例を図2に示す⁵⁾。初期応力の最大圧縮主応力 P_3 を含む鉛直断面内に空腔の長軸を配しているので、空腔まわりの応力状態は、長軸方向には変化は少ないが、天井から側壁、床の方向にみると複雑に変化している。このような数値解析では、グローバルな初期応力の一様性を仮定せざるを得ないが、岩質の変化や地質不連続面の存在によって、どの程度の擾乱があるかははっきりしない。

初期応力の一様性を検討する方法としては、壁面近傍の応力を多数の点で測定し、これらを弾性解と比較する方法が、変形を用いる方法よりも有望であると考えられる。なぜならば、巨視的変形から3次元初期応力を逆解析するには、ゆるみ域の非弾性挙動の評価という難解な問題を解決しなければならないからである。

図3に壁面近傍の岩盤応力測定例を示す⁵⁾。最大圧縮主応力 σ_3 は壁面から遠ざかるとともに増加し、7.5 m以奥で一定値をとり、5 m以浅がゆるみ域であることを示している。7.5 m以奥の σ_3 の方向と大きさは3次元BEM解析 (CaseA) に一致するが、中間主応力 σ_2 および最小主応力 σ_1 の大きさは解析 (CaseA) より小さい。しかし、初期応力を表1のCaseBのように P_1 および P_2 を25%小さく補正すると σ_2 の大きさについても解析と測定が似てくる。この1例だけから初期応力の一様性を定量的に論じるのは早計であるが、図3のようにゆるみ域の奥部で岩盤応力を測定し、空腔全体の応力場を確認できれば、地下発電所の安定性と品質を保障する上で有力な方法となることは疑いない。上例において、壁面から7.5 m～12.5 mの区間平均応力を求め、岩盤せん断試験から評価した岩盤強度条件を比較すると、図4のようである⁶⁾。実測された応力のモデル円は岩盤強度条件より下にあり、両者の中間に3次元BEMの解析結果が位置している。このような岩盤強度と実応力の比較は硬岩中の地下空腔の安定性を検討する上で不可欠な手続と考えられる。

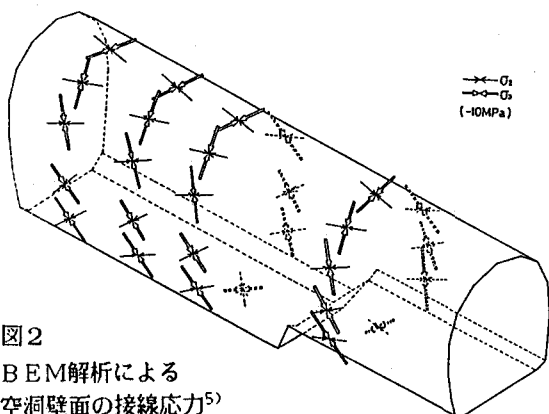


図2
BEM解析による
空洞壁面の接線応力⁵⁾

表1 解析に用いた初期応力状態

P_i , MPa	CaseA	CaseB
P_1	-7.8	-5.9
P_2	-8.7	-6.5
P_3	-12.3	-12.3

CaseAは初期応力測定結果

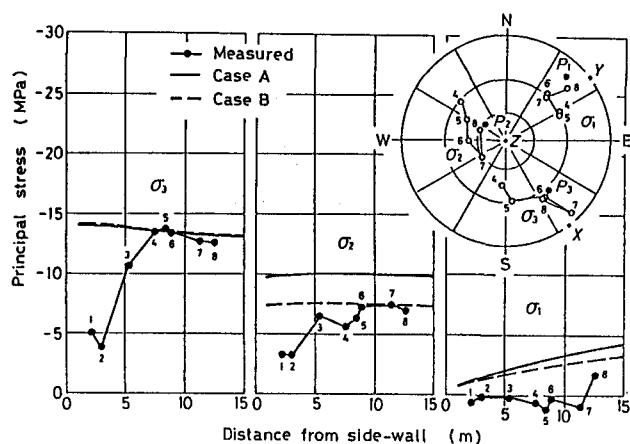


図3 空洞まわりの岩盤応力分布測定結果⁶⁾

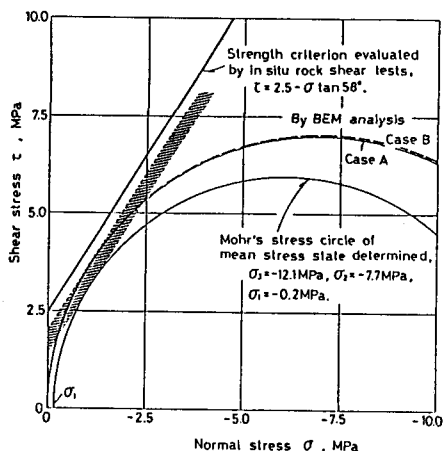


図4 岩盤強度特性の評価⁶⁾

4. 水圧破碎法の利用

応力解放法以外で、空洞まわりの岩盤応力を簡便に測る方法としては水圧破碎法が有望であると考えられるので、その適用性と問題点を検討しておく。

水圧破碎法は円孔に水圧を作用させるときに生じる引張亀裂の応力依存性を利用して、岩盤応力の方向と大きさを決定しようとする方法であるが、通常の水圧破碎法では、被圧水を発生した亀裂内に圧入させる必要があり、構造物の近傍で採用するには難がある。この問題を解決するために、円筒スリーブを介して内圧を作用させる方法（スリーブフラクチャリング法）が提案されている^{7), 8)}。

スリーブフラクチャリング法では、原理的に孔軸が主応力軸に一致する必要があるが、図3の例から明らかなように、壁面に垂直に作孔すればこの条件がほぼ満たされる。このような条件下で内圧を増加させると、図5に示すように、孔軸と直交する最大圧縮主応力の方向に第1の放射亀裂（亀裂長さ a ）が発生し、さらに内圧を高めると、これと直行する第2の放射亀裂（亀裂長さ b ）が発生することが証明されている。

亀裂の発生・成長などを分析するには、図6に例示した孔径変化計測が有望と考えられ、岩盤応力の大きさの決定には、放

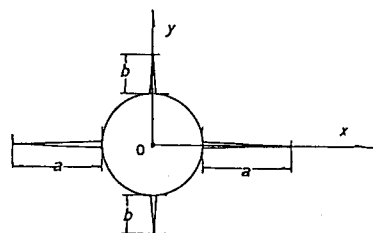


図5 スリーブフラクチャリング法
により発生する放射亀裂

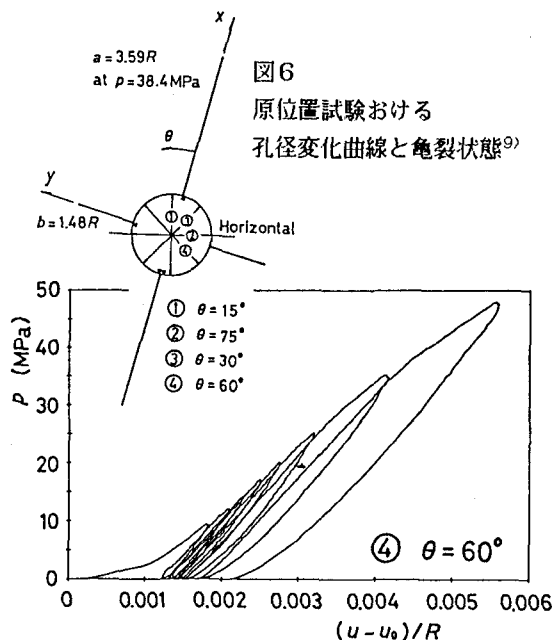


図6
原位置試験における
孔径変化曲線と亀裂状態⁹⁾

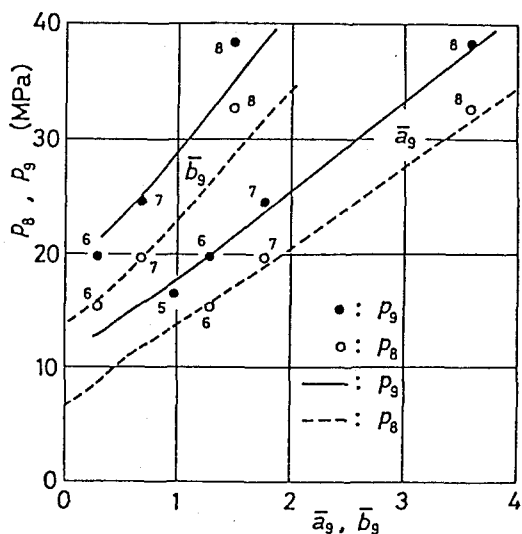


図7 内圧と亀裂長さの関係⁹⁾

射亀裂の発生条件、再負荷時の既存亀裂の開口開始条件、既存亀裂が先端まで開口した後再び亀裂が成長し始めるまでに期待される弾性応答、亀裂の進展条件などを利用する方法が提案されている^{7)・9)}。しかし、上記の多くの条件式が各時点の亀裂長さあるいは亀裂の開口長さに依存するため、また、亀裂の進展速度が負荷速度や環境に支配されやすいために生じてくる問題は未解決の状態にある。

亀裂を広範囲に成長させるという点では、スリーブフラクチャリング法は通常の水圧破砕法より不利な方法であるが、構造物近傍の応力測定法としてはこの点がかえって幸いすると思われる。図7はスリーブフラクチャリング法における内圧と亀裂長さの関係を解析した結果⁹⁾であるが、放射亀裂の長さは孔径の数倍の範囲にあり、亀裂間隔の比較的に狭い岩盤にも適用可能と予想される。

5. 結 言

地下発電所空洞まわりの3次元応力状態を実測によって確認できれば、空洞の安定性と品質を保障する上で有力な方法になることを論じ、測定法として応力解放法および水圧破砕法についてその適用性と問題点を検討した結果を報告した。現状では応力解放法が最も優れているが、簡便さにおいてスリーブフラクチャリング法の将来性が高いことを述べた。

参考文献

- 1) Hiramatsu Y. and Oka Y., Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 5(1968), 337-353.
- 2) Leeman E.R., Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 5(1968), 31-56.
- 3) Sugawara K. and Obara Y., Int. J. Min. Sci. & Tech., 3(1986), 287-300.
- 4) 金川忠、日比野敏、石田毅、電力中央研究所報告385033、昭和61年6月。
- 5) Sugawara K., Kaneko K. Obara Y. and Okamura H., Proc. of Int. Symp. on Large Rock Caverns, Helsinki(Finland), 2(1986), 1039-1050.
- 6) Sugawara K., Obara Y., Akimoto M. and Aoki T., Proc. of Int. Symp. on Eng. in Complex Rock Formations, Beijing(China), 1(1986), 135-141.
- 7) Serata S. and Kikuchi S., Int. J. Min. Geological and Eng., 4(1986), 15-38.
- 8) Detournay E. and Jeffrey R.G., Proc. of Int. Symp. on Rock Stress and Rock Stress Measurements, Stockholm(Sweden), (1986), 281-288.
- 9) 菅原勝彦、尾原祐三、荒木秀朗、有賀義明、第7回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、(1987)、181-186。

(20) Rock Stress Measurement for the Construction of Underground Power House

by Katsuhiko SUGAWARA, Yuzo OBARA,
Kumamoto University, Kumamoto,
Yoshiaki ARIGA and Yutaka ISHIMURA,
Electric Power Development Co., LTD., Tokyo.

Abstract:

Knowledge of in-situ rock stress is of fundamental importance for large cavern construction. Recent developments in relation to the prediction of structural stability of underground power house has indicated the need for systematic stress measurements in the field. The stress distribution around rock cavern is desired to be measured in practice as well as the absolute rock stress existing in the rock mass prior to the excavation.

In this paper, to realize such a systematic stress measurement, the stress relief technique and the hydro-fracturing technique have been reviewed and their applicability has been discussed including the time, effort and costs involved.

In order to determine the complete state of stress at a certain point within a rock mass, the deformation of a borehole, which is a function of the field stress, needs to be measured by applying the over-coring technique. A promising method is a new 8-element hollow inclusion gauge presented by T. Kanagawa and the co-workers. However, it has been pointed out that, to utilize this method, the difficulty of obtaining an intact core with a sufficient length needs to be effectively resolved. This problem can be settled by the hemispherical-ended borehole technique presented by K. Sugawara and the co-workers. This is based on the strain measurements on the bottom surface of a single borehole. From a successful application of hemispherical-ended borehole technique, it is discussed that this method can provide the adequate information to evaluate the practical peak-strength of the rock mass and the extent of the failure zone around the cavern.

Finally, as a promising method, the sleeve fracturing technique has been discussed. This is a technique of pressuring a jacketed borehole and the diametral deformation of a borehole is measured to examine the fracturing process, which is a function of the field stress.