

(34) 球状孔底ひずみに対する応力解放法

熊本大学工学部 菅原 勝彦
岡村 宏
尾原 祐三
同和工管(株) 加藤 春実

1. 結 言

地下発電所など大空洞の設計施工において、空洞の変形ばかりでなく、空洞周辺岩盤の強度とこれに作用する応力の実態を知る事は極めて重要である。通常の施工は各種変形計測結果と有限要素法による空洞安定解析結果とを対比しつつ行われ、安定解析では初期応力状態と岩盤強度特性が仮定される。これらの仮定の検証には、空洞周辺の応力分布の直接測定が望ましいことは言うまでもない。しかし、従来の応力解放法では精度的にみてこの要求に答えることが難しい。このために変形計測による施工管理法が採用されてきたと考えられるが十分とは言えない。このような現状を考慮し、筆者らは、応力解放法のうちで測定操作が簡単な孔底歪法を發展させることにより、高精度応力測定法の開発を行なつた。

ここに提案する球状孔底歪法は1つのボアホールにおける唯1回の測定から3次元岩盤応力を完全に決定できるだけの精度をもっている。したがつて、ボアホール中で測定をくり返すことにより空洞周辺の応力分布を求めることも可能であり、応力測定に基づいた施工管理の実現に資するものと考えられる。

以下では、球状孔底歪法の理論と応力測定精度を中心に論じる。

2. 球状孔底のひずみと岩盤応力の関係

直角座標系 x, y, z 、円筒座標系 r, θ, z および球座標系 ρ, θ, ϕ を図1のように定める。このとき、円筒座標系の変位成分 u_r, u_θ, u_z と球座標系の変位成分 u_ρ, u_θ, u_ϕ の関係は(1)式で与えられる。

ボアホール底面は球状で、 $\rho=R, \pi/2 \leq \phi \leq \pi$ で示され、 z 軸は孔口を向いているものとする。このとき、直角座標系の岩盤応力 $\{\sigma\} = \{\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{yz}, \tau_{zx}, \tau_{xy}\}$ と孔底変位成分 u_r, u_θ, u_z の関係は(2)式で与えられる。ここに、 E はヤング率、 $S_0, S_2, \dots, V_1$ の10個の係数はポアソン比 ν および ϕ の関数であり、岩盤応力 $\{\sigma\}$ は作孔前に岩盤に作用していた応力である。

球座標系の孔底歪成分 $\epsilon_\theta, \epsilon_\phi$ は(3)式で与えられるから、(1)、(2) および(3)式により、孔底歪と岩盤応力の関係は(4)式で表わせる。ここに、 $A_{11}, A_{12}, \dots, D_2$ は ν および ϕ の関数である。 $\nu=0.25$ の場合について、 ϵ_θ に関する4つの係数 A_{11}, A_{12}, C_1, D_1 と ϕ の関係を示すと図2のようであり、 ϵ_ϕ に関する4つの係数 A_{21}, A_{22}, C_2, D_2 と ϕ の関係を示すと図3のようである。これらの関係は回転体非軸対称荷重問題として有限要素法により解析されたものである。¹⁾ ϵ_θ に関する係数は ϕ によつて変化せず、ほぼ一定とみなせる。

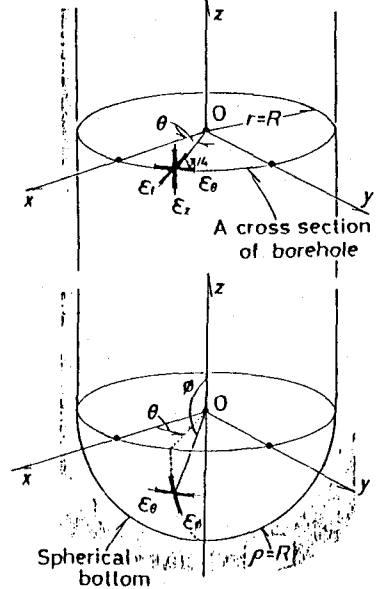


図1 座標系と球状孔底の関係

$$\begin{Bmatrix} u_\rho \\ u_\theta \\ u_\phi \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\phi & 0 & \cos\phi \\ 0 & 1 & 0 \\ \cos\phi & 0 & -\sin\phi \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} u_r \\ u_\theta \\ u_z \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{Bmatrix} u_r \\ u_\theta \\ u_z \end{Bmatrix} = \frac{R}{E} \begin{bmatrix} S_0 + S_2 \cos 2\theta & S_0 - S_2 \cos 2\theta & P_0 \\ T_2 \sin 2\theta & -T_2 \sin 2\theta & 0 \\ U_0 + U_2 \cos 2\theta & U_0 - U_2 \cos 2\theta & W_0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \end{Bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \epsilon_\theta &= \frac{1}{R} \frac{\partial u_\theta}{\partial \phi} + \frac{u_\rho}{R} + \frac{u_\phi}{R} \cot \phi \\ \epsilon_\phi &= \frac{1}{R} \frac{\partial u_\phi}{\partial \phi} + \frac{u_\rho}{R} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_\theta \\ \epsilon_\phi \end{Bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} A_{11} + A_{12} \cos 2\theta & A_{11} - A_{12} \cos 2\theta & C_1 & D_1 \sin \theta & D_1 \cos \theta & 2A_{12} \sin 2\theta \\ A_{21} + A_{22} \cos 2\theta & A_{21} - A_{22} \cos 2\theta & C_2 & D_2 \sin \theta & D_2 \cos \theta & 2A_{22} \sin 2\theta \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \end{Bmatrix} \quad (4)$$

したがって、岩盤応力測定の見地からみると、 $\epsilon\theta$ の測定位置は ϕ に関して任意に選んでも応力の測定精度に影響が小さいと考えられる。一方、 $\epsilon\phi$ に関する係数は ϕ によってそれぞれ相当に変化する。これは応力の測定精度が $\epsilon\phi$ の測定位置、とくに、 ϕ に依存することを示している。

3. 観測方程式と応力測定精度の関係

n 個の孔底歪測定値 $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ と岩盤応力 $\{\sigma\}$ の関係は(5)式の観測方程式にまとめられる。式中の係数マトリックス $[A]$ の要素は(4)により与えられる。(5)式を正規化し、(6)式を得る。ここで、 $[B]$ および $\{\bar{\beta}\}$ は(7)式で与えられる。 $[B]$ の逆マトリックスを $[C]$ とし、その要素を c_{ij} とすると、岩盤応力の最確値は(8)式で与えられる。また、6つの応力成分の標準偏差 $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_6$ は測定歪の標準偏差 η を用いて(9)式のように書ける。²⁾ η は真の歪測定誤差ばかりでなく、岩石固有の変形性のバラツキに依存する量である。この点の検討は6.で行なう。

$$\frac{1}{E}[A]\{\sigma\} = \{\beta\} \quad (5)$$

$$\frac{1}{E}[B]\{\sigma\} = \{\bar{\beta}\} \quad (6)$$

$$[B] = [A]^T[A], \quad \{\bar{\beta}\} = [A]^T\{\beta\} \quad (7)$$

$$\{\sigma\} = E \cdot [C] \cdot \{\bar{\beta}\} \quad (8)$$

$$\xi_i = E \sqrt{c_{ii}} \cdot \eta \quad (9)$$

結局、応力測定精度は c_{ii} に比例するから、孔底の歪測定点は c_{ii} が共に小さくなるように配置すればよく、各種の応力測定法の精度の比較は c_{ii} の最大値によって行なえると考えられる。

4. 最適測点配置の検討

従来の8素子モールドゲージを用いた平面孔底歪法にならつて、図4のような8つのゲージによる測定法における最適測点配置を検討する。ここで、 $\epsilon\theta$ を測定するゲージを θ ゲージ、 $\epsilon\phi$ を測定するゲージを ϕ ゲージと呼ぶことにする。そして、 θ ゲージ位置を示す天頂角 ϕ は解析精度に影響が少ないので、 $\phi = 130$ 度に固定して検討する。

ϕ ゲージ位置を $\phi = 90$ 度から 180 度まで変化した場合、(9)式の c_{ii} の値は図5のように変化する。同図は片対数グラフであり、 τ_{xy} の解析精度は ϕ に依存しないこと、 σ_x および σ_y の解析精度は $\phi = 150$ 度のとき最も良く、 τ_{yz} および τ_{zx} のそれは 135 度のとき最も良く、 σ_z のそれは ϕ を小さくするほど向上することが読みとれる。このような解析から、 ϕ ゲージも $\phi = 130$ 度の位置に配するのが最も良い解析精度を与えることが見出された。

図4のような配置では、 $\phi = 130$ 度の位置にすべてのゲージを配置する場合が最も精度が高くなる。このとき、(4)式の歪感度係数 $a_{11}, \dots$ 、図5 ϕ ゲージ位置を示す天頂角 ϕ と c_{ii} の関係 $\dots$ 、 a_{22} は図6のようにポアソン比に依存する。

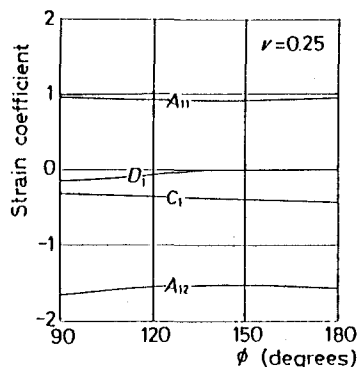


図2 $\epsilon\theta$ に関する係数と ϕ の関係

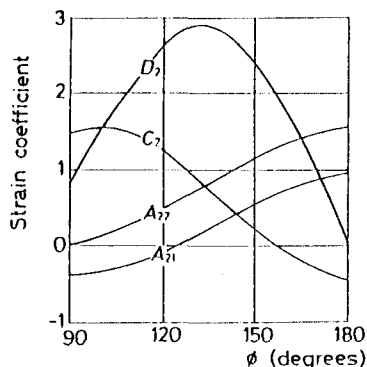


図3 $\epsilon\phi$ に関する係数と ϕ の関係

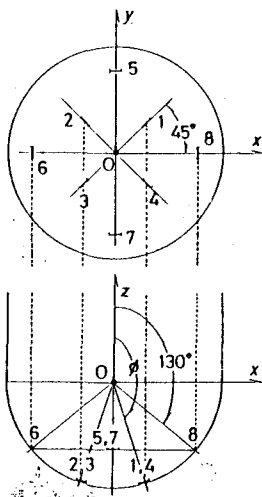
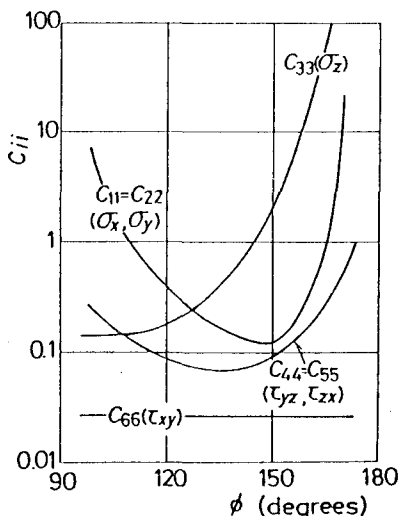


図4 8素子ゲージの配置パターン



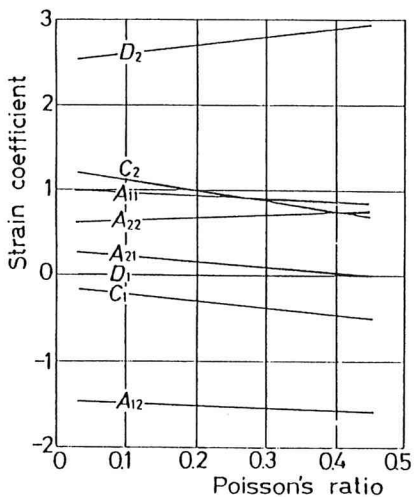


図6 $\phi=130$ 度の最適配置時の歪感度係数

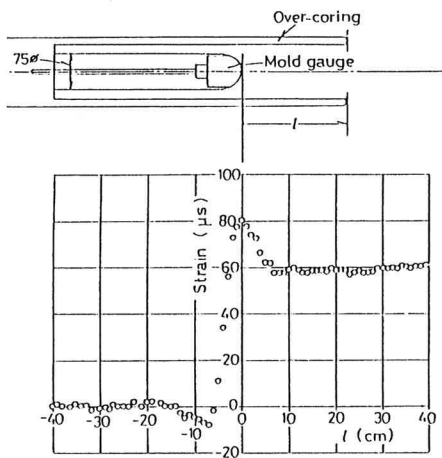


図8 応力解放時の歪変化測定例

5. 球状孔底歪測定用のモールドゲージ³⁾
 孔底歪を測定するために、図7のようなモールドゲージを試作した。歪ゲージの配置は4. の最適測点配置であり、 $\phi=130$ 度の同心円上に8つの θ ゲージと8つの ϕ ゲージを配したものである。ゲージ長は5mmであり、直径75mmのボアホールを対象としている。

実際には、図8のようにモールドゲージを孔底に貼付したのち、オーバーコアリングにより応力解放するときの歪変化を連続計測する。図8は1つの実測例であり、解放歪が $60\mu s$ である。このような歪変化を合計16個同時に求め、(4), (5), ..., (9)式に従って応力状態を解析することになる。

6. 応力測定精度の実験的検討

図7のモールドゲージと、図9に示す2種類の安山岩立方体試験片を用いて、1軸圧縮試験を実施し、球状孔底歪を測定し、モールドゲージの歪測定感度、歪測定誤差の原因さらに本方法による応力測定精度を実験的に検討した。⁴⁾

試験片の面に沿って直角座標系 X, Y, Z を、ボアホールに固定して直角座標系 x, y, z をそれぞれ定めている。試験片aは両座標系が一致している場合であり、試験片bでは y, z 軸が X 軸のまわりに 45 度回転している。載荷は X, Y および Z の方向

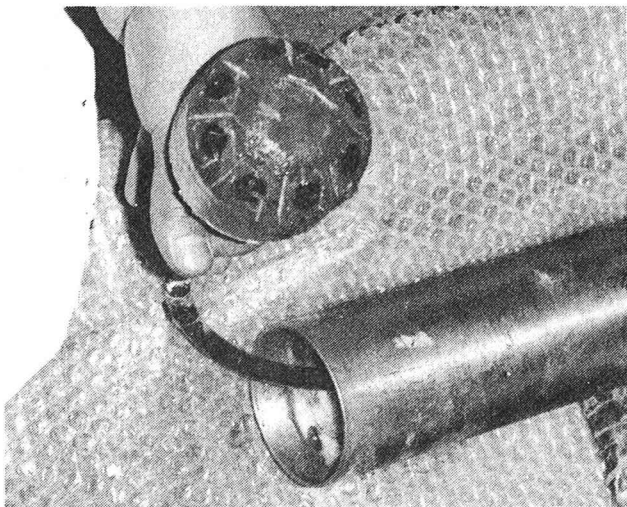


図7 16素子モールドゲージと歪ゲージの配置

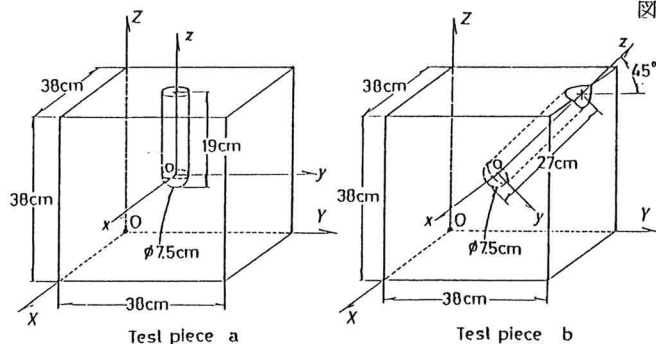
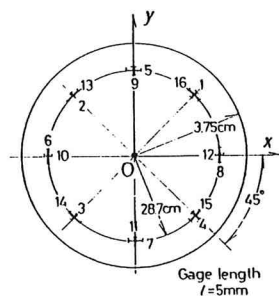


図9 球状孔底を有する安山岩立方体試験片と座標系



Arrangement of 16 gages

に行ない、載荷圧力は 6.3MPa である。なお、安山岩のヤング率 E は 17.9 ～ 18.7GPa、ポアソン比 ν は 0.27 であった。

測定値と解析値とを比較してみると図 10 のようである。黒丸は測定値、実曲線は解析値であり、測定歪分布が弾性解に近く、モールドゲージの歪測定感度がほぼ 1 であることが読みとれる。

測定歪は載荷圧力に正比例している。したがって、測定歪と弾性解の差を歪測定誤差 $\Delta\epsilon$ とすると、 $\Delta\epsilon$ は載荷圧力の大きさに依存し、載荷圧力が高い程 $\Delta\epsilon$ は増大する。これは、 $\Delta\epsilon$ が測点ごとの変形性のバラツキによつて生じることを示している。図 10 に示した 128 個の測定歪について、載荷圧力 6.3MPa の場合の $\Delta\epsilon$ を求め、その分布を調べてみたところ、正規分布と見なせることが確認できた。そこで、 χ^2 分布を用いて標準偏差 η の上限推定値を求めると、信頼度 95% のもとで $\eta=30\mu\epsilon$ であった。これを(9)式に代入すると、各応力成分の標準偏差 ξ_i が求められる。その結果は表 1 のようである。 ξ_i が最大となるのは σ_z であり、載荷圧力の 3.4% に相当する。

安山岩を用いた上述の実験により、測定誤差は主として岩石の不均質性、異方性などにより発生することが明らかになり、比較的均質等方な岩盤を対象とすれば、本方法で十分所期の目的の達せられることが確認されたと考えられる。

表 1 応力測定精度 (安山岩)

応力成分	G_{ii} の値	標準偏差 ξ_i (MPa)	変動係数 (%)
σ_x, σ_y	0.0631	0.141	2.2
σ_z	0.1466	0.215	3.4
τ_{yz}, τ_{zx}	0.0328	0.102	1.6
τ_{xy}	0.0220	0.083	1.3

7. 結 言

新しい応力解放法として、球状孔底歪を測定する方法を提案した。この方法は、球状孔底面の $\phi=130$ 度の位置に、 θ ゲージおよび ϕ ゲージを 8 個づつリング状に配置する。このため、球状孔底の孔底中央にゲージを配する必要がないので、ゲージ接着など測定技術的観点からも優秀な方法と言える。

紙面の都合で、従来の測定法との比較、あるいは、球状孔底の研削、リング状モールドゲージの製作、モールドゲージの孔底への接着方法などの技術的問題、較正試験の方法、実際の歪測定精度、岩盤応力実測例については言及できなかつたが、これらについては当日口頭発表する予定である。

参考文献

- 菅原勝彦, 岡村宏, 西村幹雄: 応力解放法の研究, 昭和 57 年度鉱業会九州支部秋季例会資料, pp. 16 ～ 19, 1982.
- 近藤良夫, 舟阪渡共編: 技術者のための統計的方法, 共立出版, 昭和 42 年 11 月, pp. 578 ～ 588.
- 菅原勝彦, 岡村宏, 大格伸一郎: 球状孔底歪法による初期地圧測定, 昭和 58 年度日本鉱業会春季大会講演要旨集, pp. 251 ～ 252, 1983.
- 青木俊朗, 尾原祐三, 菅原勝彦, 岡村宏: 岩盤応力測定について—球状孔底歪に対する応力解放法の測定精度—, 昭和 58 年度鉱業会九州支部秋季例会資料, pp. 28 ～ 30, 1983.

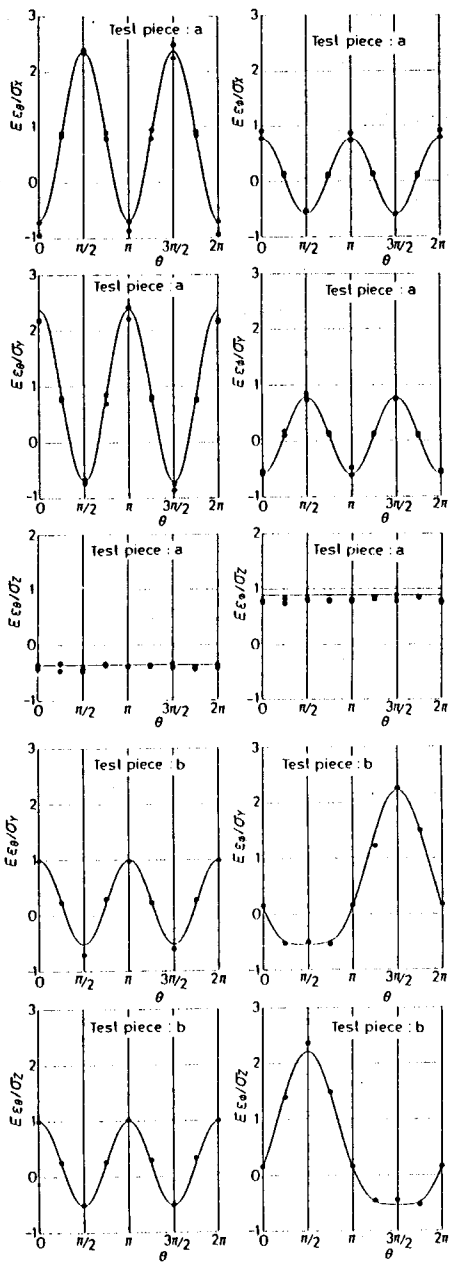


図 10 測定歪と有限要素法弾性解析値の比較

(34) Strain Relief Measurement in Hemi-Spherically Ended Borehole
for Determining the Stresses in Rock Masses

by Katsuhiko SUGAWARA, Hiroshi OKAMURA and Yuzo OBARA

Faculty of Engineering, Kumamoto University

Harumi KATO

Dowa-Koei Co. Ltd.

This paper presents a new experimental method to determine the complete state of stress, measuring the strains on the hemi-spherical bottom surface of a single borehole with the stress relief technique.

In this method, the accuracy in the stress determined depends on the number of points of strain measurement on the bottom surface and on those disposition. To get the high accuracy, the arrangement of strain gauges on the bottom surface has been examined theoretically, basing on the distribution of elastic strain on the bottom surface obtained by F.E.M. analysis. As an available arrangement of strain gauges a circular one is proposed, in which the points of strain measurement are arranged symmetrically on a circle, of which the zenithal angle is 50 degrees from the center of hemi-spherical bottom. It has been concluded that the complete state of stress is able to be determined with a high accuracy by the circular arrangement above mentioned.

The observation equation to be used in practice to determine the complete state of stress in rock masses has been presented, which is defined the relation between the stress tensor and the strains on the bottom surface, 8 latitudinal and 8 longitudinal, in the case of the circular arrangement. To measure the 16 components of strain a mold-gauge has been made of epoxy resin. The calibration test of this mold-gauge has been done in appropriately oriented borehole in two rock specimens under load, and it is confirmed that the measured values of strain agree with the theoretical results within the experimental errors.

The error in the stress determined has been estimated by analyzing the results of calibration test and it is clarified that the accuracy in the stress is higher than that expected in the conventional method, determining stress from variations in borehole diameter or the strain on the wall of a borehole.