

# 岩盤の初期応力の一測定法について

## A METHOD DETERMINING INITIAL STRESS IN ROCK MASS

川本 眺 万\*・高橋 由 行\*\*

By Toshikazu Kawamoto and Yoshiyuki Takahashi

### 1. 緒 言

岩盤の力学的挙動は岩盤内の初期応力（処女応力ともいわれ、重力による応力と潜在応力に分けて考えられ、地殻構造の状態によって局部的に存在している応力すなわち残存応力も含まれている）に影響され、岩盤がどのような応力状態にあるかによって、きれつや節理等のいわゆるひびわれおよび断層などの影響は非常に異なってくる。したがって、ダム基礎岩盤内やトンネルを開削する地山における初期応力の状態を知ることは、岩盤の変形性や強度等の力学的特性を明らかにし、岩盤の安定性を推定するために必要なことである。岩盤の初期応力を測定することはかなり以前より、鉱山やダム サイトで行なわれてきており、いわゆる応力解放法<sup>1)</sup>、flat jack<sup>2)</sup>あるいは curved jack<sup>3)</sup>を用いて応力の回復を利用する方法<sup>2)</sup>、Hydraulic fracturing 法<sup>4)</sup>など、多くの方法が考えられている。またその他の測定法<sup>5),6)</sup>および測定計器の改良<sup>7)</sup>、開発が現在もさかに行なわれており、またそれに併行して、初期応力の解析法、測定法の実験室における検討も行なわれている<sup>8)</sup>。

これら各種測定法の適用は、いずれも岩盤の特性に応じて考えられねばならない。坑道表面での応力解放法は坑道掘削による岩盤のゆるみに影響されることが多いため、ボーリング孔を用いて、岩盤内部の深い位置において初期応力を測定しようとする傾向が大きい。このためには測定法も種々の制約をうけ、また測定計器の開発も必要になってくる。

応力解放法では、ひずみや変形の測定から初期応力を算定する場合、岩盤の弾性係数およびポアソン比を用いる必要がある、これらの見積りが結果に大きく影響するものと思われる。これに対して、flat jack 法あるいは curved jack 法では応力解放による結果をうると同時に、解放前までにひずみを回復するに必要なジャッキの荷重強度から、ジャッキ面に垂直な方向の初期応力値が求められる。したがって測定値から初期応力を算定するのに岩盤の弾性係数を必要としないので、岩盤試験によ

る弾性係数の実測値の不確かさの影響は入ってこない。しかしこの場合にも岩盤の除荷時と載荷時の変形性状の相違による影響が考えられねばならない。

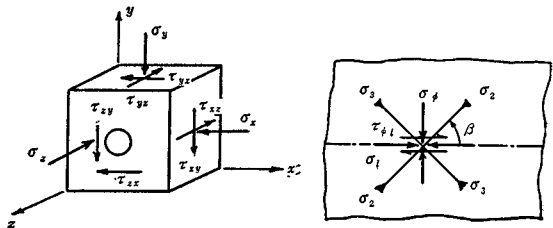
従来の応力解放法では、単一のボアホールあるいは同心円のオーバーコアリング、スリットなどによって応力の解放が行なわれている。これに対して既設のボアホールを測定側にして、それに隣接して第2のボアホールを開削することにより、初期応力の部分的な解放†を行なうことができる。この方法は接近した2円孔の相互干渉による応力集中を利用して、岩盤の初期応力を測定しようとする一種の応力再分布（解放）法であり、試験坑道表面においても、またボアホールを利用して、岩盤内部の深い位置においても適用される。

### 2. 測定応力と初期応力との関係

いま、試験坑道の壁面で応力解放を行なう場合を考える。その場合、坑道壁面のひずみの測定値より、その位置の応力値を求めても、それはただちに岩盤の初期応力を与えるものではない。それは坑道の存在によって、それらの壁面にすでに応力集中を生じているからである。しかしこれらの応力集中は岩盤の初期応力によって生ずるものであり、それらの間に適当な関係があるから、ひずみあるいは応力の実測値を解析することによって初期応力を求めることができる。坑道壁面上の応力から坑道の影響のない応力を求める方法については、等方等質の弾性岩盤内の3次元応力状態のもとでの坑道のまわりの応力および変位に対する厳密解を用いて、平松および岡<sup>9)</sup>により説明されている。

3次元の初期応力状態  $p_1, p_2, p_3$  は図-1に示すよ

図-1 岩盤内の初期応力成分と坑道壁面における2次主応力



† 攪乱による応力の再分布と考えた方が適當であるが、ここでは部分的応力解放と呼ぶことにする。

\* 正会員 工博 名古屋大学助教授 土木工学科

\*\* 正会員 工修 日本道路公団（執筆当時名古屋大学大学院修士課程）

うな応力成分に分解され、 $\sigma_\phi, \sigma_l$  及び  $\tau_{\phi l}$  によって、それぞれ坑道壁面の 1 点における断面内円周方向及び坑道軸方向直応力とそれらの間のせん断応力を表わすと、

$$\left. \begin{aligned} \sigma_\phi &= a_x \sigma_x + a_y \sigma_y + (2 a_{xy} - a_x - a_y) \tau_{xy} \\ \sigma_l &= \sigma_z + \frac{a_x - 1}{m} \sigma_x + \frac{a_y - 1}{m} \sigma_y + \frac{2 a_{xy} - a_x - a_y}{m} \tau_{xy} \\ \tau_{\phi l} &= 2 a_{yz} \tau_{yz} + 2 a_{zx} \tau_{zx} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(1)$$

上式で  $a_x, a_y, \dots, a_{zx}$  などは応力係数で、坑道の断面形および壁面上の位置によって異なり、2, 3 の断面形に対して光弾性実験を用いてこれらの係数が求められている<sup>9)</sup>。いま測定が円形坑道断面で行なわれるときには、近似的に次式を用いることができる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_\phi &= \sigma_x + \sigma_y - 2(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\phi + 4 \tau_{xy} \sin 2\phi \\ \sigma_l &= \sigma_z + \nu(\sigma_x + \sigma_y) \\ \tau_{\phi l} &= 2(\tau_{yz} \cos \phi - \tau_{zx} \sin \phi) \cos 2\phi \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(2)$$

壁面上の応力の表示としては、 $\sigma_\phi, \sigma_l, \tau_{\phi l}$  の代りに主応力  $\sigma_2, \sigma_3$  とそれらの  $\beta$  方向を用いてもよい(図-1 参照)。いま坑道の断面上の 3 点でこの方法を用いて応力解放を行ない、それらの位置での  $\sigma_\phi, \sigma_l, \tau_{\phi l}$  を求めると、それらの値を式(1)あるいは式(2)を用いて、坑道の測定位置における初期応力成分  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$  が求められ、さらに岩盤の初期応力  $p_1, p_2, p_3$  を知ることができる。

現在行なわれている種々の初期応力の測定法のうち、坑道の壁面で測定を行なった場合には、上記のようにして 3 次元的な初期応力状態が求められるが、ボアホールの深い位置(坑道壁面における応力集中の影響をうけない領域まで入った位置)で測定が行なわれる場合には、一点の測定によって一般にボアホールの軸に垂直な断面内の初期応力の 2 次主応力が直接に与えられる。

3. 応力解放の方法および 2 次応力の測定原理

坑道壁面上の 1 点あるいはボアホール軸に垂直な断面における 2 次主応力はつぎのように測定される。いま坑道壁面における測定について考えれば、まず直径 10~15 cm のボアホールを岩盤表面に垂直に深さ 20~30 cm 程度開削し、坑道壁面より 2~3 cm 奥に入ったボアホール内面の任意の 3 点(通常、水平、鉛直およびそれらと 45° の位置にとられる)で、ボアホール軸に垂直な断面内で電気抵抗線ひずみゲージ(SR4 ゲージ)が貼付される。つぎにさきのボアホールに近接して同径のボアホールを開削し、その開削の進むに応じて隣接の第 1 ボアホール周辺のひずみの変化が測定される。これら 2 つのボアホールの中心を等レベルにおくようにすれば主応力算定における基準線がとりやすい。第 2 のボアホールの開削長さにより応力解放の程度は異なるが、ひずみ

測定位置を通過するひずみの変化は減少し、さらに開削を続けると変化がほとんど認められなくなって、この場合の部分解放がほとんど完了したことがわかる。しかし実際には岩盤の変形挙動に粘弾性的要素があるため、開削を進める過程において解放の効果が徐々に現われ、ある深さで第 2 の孔の開削を止めても、時間とともに第 1 孔でのひずみ変化が認められる。

このような測定では、SR4 ゲージによるひずみ測定よりも、適当な変位計が用いられれば、一つのボアホールに対し深部の異なる何点かの位置において、また坑道壁面上のいくつかの位置にあらかじめ準備された第 1 のボアホールに対して、順次に測定を容易に続けて行なうことが可能であると考えられる。坑道壁面での測定では測られたひずみから応力を算定するのに平面応力状態が考慮され、一方ボアホールの深部では平面ひずみ状態として取り扱われねばならない。

図-2 応力状態およびひずみ測定位置

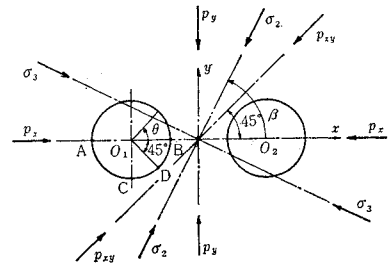
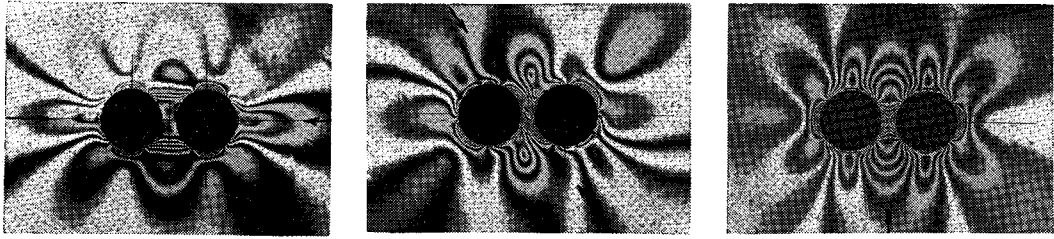


図-2 に示すような 2 次主応力状態 ( $\sigma_2, \sigma_3, \beta$ ) の位置で 2 円孔が開削された場合、円孔周辺における応力値がこの測定法に必要な係数と関係してくる。いま対称軸(x 軸あるいは y 軸)に平行に作用する等分布荷重をうける場合には、Chih-Bing Ling によって理論的に求められている 2 円孔を有する無限板の応力状態に対する解<sup>10)</sup>が用いられる。2 次主応力の方向が推定される場合には、それと平行に 2 円孔の中心線をとって測定すれば、結果の解析は Ling の解を用いて容易に行なえる。しかし一般には岩盤の初期応力の主方向は不明であり、その場合には容易に Ling の解を用いることはできない。図-2 のように、2 次主応力の方向が対称軸と傾斜しているときには、主応力 ( $\sigma_2, \sigma_3$ ) を分解して x 軸および y 軸の荷重と、それらと 45° 傾いた方向の荷重  $p_x, p_y, p_{xy}$  に置きかえることができる。この場合、つぎの関係式が存在する。

$$\left. \begin{aligned} p_x &= \frac{1}{2} \{ -(\sigma_2 - \sigma_3) + \sigma_2 \cot \beta + \sigma_3 \tan \beta \} \sin 2\beta \\ p_y &= \frac{1}{2} \{ -(\sigma_2 - \sigma_3) + \sigma_2 \tan \beta + \sigma_3 \cot \beta \} \sin 2\beta \\ p_{xy} &= \frac{1}{2} (\sigma_2 + \sigma_3) \sin 2\beta \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(3)$$

図-3 等色線縞写真



そうして円孔の周辺応力  $\sigma_\theta$  をつぎのように表わすことができる。

$$\sigma_\theta = ap_x + bp_y + cp_{xy} \dots\dots\dots(4)$$

ここで係数  $a, b, c$  は円孔周辺上の位置 ( $\theta$  の値) と 2 円孔の位置関係 ( $l/d$ ) によって定まる定数であり、応力係数と呼ぶことにする。これらの応力係数は、各方向から別々に単位荷重が作用したときのある位置での周辺応力を与える。これらの値を理論的に求めることは容易でないので、ここでは光弾性実験を用いて求められた。25.0×25.0×1.17 cm の光弾性樹脂板 (アラルライト B タイプ、光弾性感度  $K=0.958 \text{ mm/kg}$ ) の中央部に、

直径 2.0 cm の円孔を種々の中心距離  $l/d=1.25, 1.5, 1.75, 2.0, 2.5$  および 3.0 の位置にあげ、中心線方向 ( $x$  軸) とそれに垂直方向 ( $y$  軸) および  $45^\circ$  の方向の 3 方向から別々に等分布荷重  $p_x, p_y$  あるいは  $p_{xy}$  を作用させて、等色線縞模様撮影された。光弾性写真の一例を示すと 図-3 のようである。これらの写真の円孔周辺における縞次数より、それぞれ  $p_x=1, p_y=1, P_{xy}=1$  が単独に作用したときの応力値を求めると、それらが式 (4) 中の応力係数を与える。さきにも述べたように、第 1 ポアホール内面でのひずみ測定位置とし、図-2 に示す A, B, C および D 点のように特別な位置をとれば、応力係数と 2 つのポアホール中心間隔  $l/d$  との関係を図表に容易に表わして便利である。光弾性実験の結果から得られたこれらの応力係数  $a_i, b_i, c_i (i=A, B, C, D)$  と  $l/d$  の関係を示すと 図-4, 5, 6 のようになる。

図-4  $p_x$  に対する応力係数  $a_i$

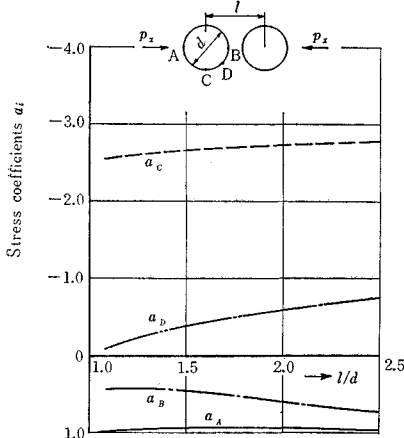


図-5  $p_y$  に対する応力係数  $b_i$

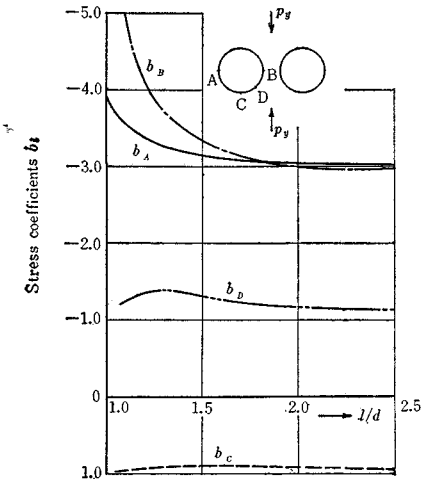


図-7 (a) に示されるように初期応力状態 ( $p_x, p_y, p_{xy}$ ) の坑道壁面上に第 1 のポアホールを開削すると、

図-6  $p_{xy}$  に対する応力係数  $c_i$

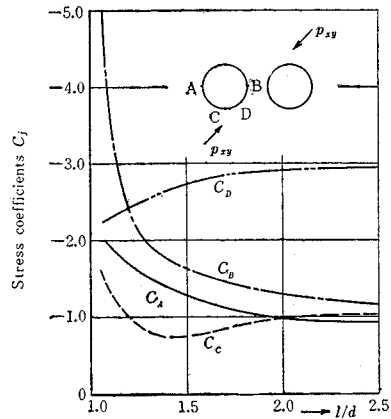
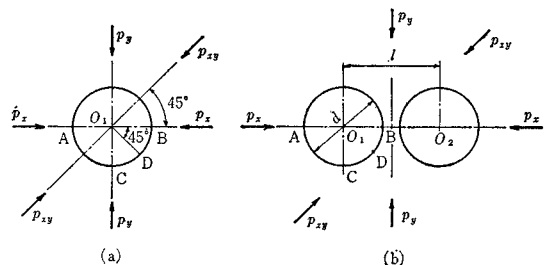


図-7 第 2 ポアホール開削前後の状態



このホール周辺の応力は特定の位置 A~D でつぎのようになる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_A^0 &= p_x - 3p_y - p_{xy} \\ \sigma_B^0 &= p_x - 3p_y - p_{xy} \\ \sigma_C^0 &= -3p_x + p_y - p_{xy} \\ \sigma_D^0 &= -p_x - p_y - 3p_{xy} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

つづいて第2のボアホールが図-7(b)に示すような位置に、第1ホールに接近して開削されると、第1ホールのさきの位置における応力はつぎのようになる。

$$\sigma_i = a_i p_x + b_i p_y + c_i p_{xy} \quad (i=A, B, C, D) \dots (6)$$

ここに  $a_i, b_i, c_i$  は応力係数であって、図-4, 5, 6 で求められる。したがって、第2ボアホール開削による部分応力解放の前後における応力の変化、すなわちこの方法で測定される応力値はつぎのように初期応力値と関係づけられる。

$$\left. \begin{aligned} \bar{\sigma}_A &= \sigma_A - \sigma_A^0 = (a_A - 1)p_x \\ &\quad + (b_A + 3)p_y + (c_A + 1)p_{xy} \\ \bar{\sigma}_B &= \sigma_B - \sigma_B^0 = (a_B - 1)p_x \\ &\quad + (b_B + 3)p_y + (c_B + 1)p_{xy} \\ \bar{\sigma}_C &= \sigma_C - \sigma_C^0 = (a_C + 3)p_x \\ &\quad + (b_C - 1)p_y + (c_C + 1)p_{xy} \\ \bar{\sigma}_D &= \sigma_D - \sigma_D^0 = (a_D + 1)p_x \\ &\quad + (b_D - 1)p_y + (c_D + 3)p_{xy} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

この場合、A~D 点のうちで3点の応力の変化値  $\bar{\sigma}_A \dots$  などが測定されると、式(7)より  $p_x, p_y, p_{xy}$  が求められ、さらに式(3)より2次主応力  $\sigma_2, \sigma_3$  およびその方向  $\beta$  を求めることができる。式(3)より  $\sigma_2, \sigma_3, \beta$  を求めるには、 $\tan \beta = \alpha$  とおいて式(3)をつぎのように変形し、

$$p_{xy} \alpha^2 + (p_x - p_y) \alpha - p_{xy} = 0 \dots\dots\dots (8)$$

式(8)より  $\alpha$  の求め、その値を用いて、次式

$$\sigma_3 = (\alpha p_x + p_y) / (1 + \alpha) \dots\dots\dots (9)$$

より  $\sigma_3$  を求め、さらに

$$\sigma_2 = (p_x - \alpha p_y) / (1 - \alpha) \dots\dots\dots (10)$$

より  $\sigma_2$  を求めればよい。坑道のある断面内の少なくとも3点において、2次主応力を上記のように求め、それらの値を式(2)に用いて、その位置における初期応力を求めることができる。また岩盤内部では互いに直交した3方向のボアホール内での2次主応力の大きさおよびその方向の測定値より、初期応力が算定される。

### 3. 実験室における予備試験

上記の方法を現場に適用するに先立ち、実験室において石膏ブロックを用いて、一軸圧縮荷重状態のもとで応力解放実験を行ない、解放によるひずみの変化値より荷重強度を算定し、載荷重の大きさと比較した。全厚(20cm)にわたって直径6cmの円孔をもつ大きさ35×35×20cmの方形ブロックの石膏模型を注型し、数週間養

生ののち、それらの模型の円孔周辺で模型表面から1~2cm奥の断面上の4点(A, B, C, D)(図-7参照)にSR-4ゲージが貼付された。石膏の弾性係数は  $E=3.66 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ 、圧縮強度  $\sigma_C=49.1 \text{ kg/cm}^2$  である。万能試験機で圧縮荷重をかけ、荷重を一定に保ったままで、第2の円孔を開削し、その前後における第1の円孔周辺の各点のSR-4ゲージの読みがとられ、ひずみの変化が測定された。第2孔の開削には簡単なオーガー様のドリルを用いたため、十分正しい開削をすることが困難であった。したがって各開削段階で第1孔との平行線よりいくぶんずれることがあったが、2円孔の中心間隔としては、ゲージ位置のものがとられた。

実験結果の二、三の例を示すとつぎのようである。

試験 I: 解放時の圧縮荷重強度  $p=8.00 \text{ kg/cm}^2$

円孔の直径  $d=6.0 \text{ cm}$

2円孔の中心間隔  $l=6.62 \text{ cm}$

この場合、 $l/d=1.10$  となり、第1円孔周辺のA, B, Cの3点におけるひずみの変化を用いるものとして、この値に対する応力係数を求めると、

$$b_A = -3.52, \quad b_B = -4.03, \quad b_C = 0.95$$

応力解放によるひずみの変化は表-1のようである。

表-1

ひずみの変化	$\epsilon_A$	$\epsilon_B$	$\epsilon_C$	$\epsilon_D$
第2円孔の深さ(mm)	( $\times 10^{-6}$ )	( $\times 10^{-6}$ )	( $\times 10^{-6}$ )	( $\times 10^{-6}$ )
0	0	0	0	0
20	-12	-91	8	-5
30	-31	-276	10	-13
41	-74	-401	14	-23
55	-105	-451	13	-33
69	-110	-468	11	-35

上で求められた応力係数およびひずみの変化より得られる応力の変化値を式(7)に代入して荷重強度を算定するとつぎの値が得られる。ただしこの場合は荷重の主軸方向と2円孔の対称軸とを一致して測定しており、しかも一軸荷重状態であるから、第1円孔周辺の1点でのひずみの変化よりただちに荷重強度が算定される。したがってA, B, Cの3点での測定値より3つの荷重強度の値が求められる。すなわち、

A点の測定値より、 $p=7.75 \text{ kg/cm}^2$

B点の測定値より、 $p=8.27 \text{ kg/cm}^2$

C点の測定値より、 $p=8.04 \text{ kg/cm}^2$

試験 II: 解放時の圧縮荷重強度  $p=5.83 \text{ kg/cm}^2$

円孔の直径  $d=6.0 \text{ cm}$

2円孔の中心間隔  $l=7.50 \text{ cm}$

したがって  $l/d=1.25$  となり、応力係数は

$$b_A = -3.26, \quad b_B = -3.88, \quad b_C = 0.88$$

となる。応力解放による各点のひずみの変化は表-2のようである。さきの場合と同様に各点のひずみの変化より荷重強度を算定すると、

表-2

ひずみの変化 第2円孔の深さ(mm)	$\epsilon_A$ ( $\times 10^{-6}$ )	$\epsilon_B$ ( $\times 10^{-6}$ )	$\epsilon_C$ ( $\times 10^{-6}$ )
0	0	0	0
8	-12	-37	10
15	-22	-71	19
38	-39	-141	20
58	-37	-147	20

A点の測定値より,  $p=5.50 \text{ kg/cm}^2$   
 B点の測定値より,  $p=6.11 \text{ kg/cm}^2$   
 C点の測定値より,  $p=6.10 \text{ kg/cm}^2$

応力解放により求められた荷重強度の測定値と載荷重との間に相違が見られるが、いずれの場合も模型中央部の荷重強度が高くでている。これは厳密な等分布載荷が困難なことと第1孔と正しく平行にかつスムーズに第2円孔の開削が行なわれなかったことの影響も入ってきているものと思われる。しかし上記の結果に見られるように、おおむね満足した値が得られたものと思う。

4. 現場における2次主応力実測の一例

つぎに本法を現場で用いる際の技術上の諸事項を知ることを目的として、中部電力(株)高根ダムサイト(チャートとスレートの互層, かぶり 35.5 m,  $E=1.0 \sim 1.3 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ )の試験坑道と、中部地建 矢作川ダムサイト(両雲母花崗岩, かぶり 18~25 m,  $E=3.5 \sim 4.5 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ )で予備的な実験を行なった。矢作川ダムサイトでは左岸の試験坑道において、坑口より15~22 mの間の3箇所で行なったが、岩盤のきれつ程度が大きく、また土かぶりが小さかったため十分な測定結果が得られなかった。高根ダムサイトでの試験は、さきに中電および電研によって行なわれた現地せん断試験のために用意されたチャンパーの壁面を用いて行なわれた。測定箇所の概要図および応力解放位置の岩盤の成層状態を示すと、図-8 のようである。応力解放

図-8 実測位置の略図および成層状態  
(中部電力高根ダム サイト試験用チャンパー内)

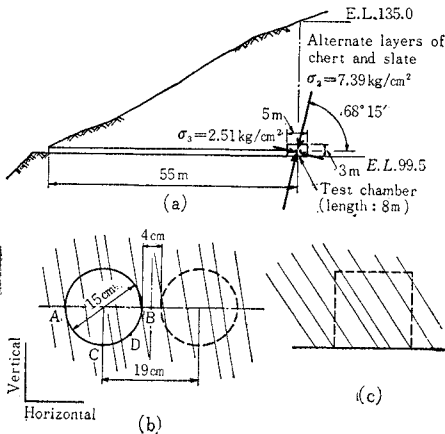


表-3

応力係数 位置	$a_i$	$b_i$	$c_i$
A 点	0.92	-3.25	-1.56
B 点	0.45	-3.82	-2.05
C 点	-2.58	0.90	-0.83
D 点	-0.25	-1.40	-2.55

後のひずみの変化としてつぎのような値が得られた。

$$\epsilon_A=9 \times 10^{-6}, \epsilon_B=-52 \times 10^{-6}, \epsilon_C=3 \times 10^{-6},$$

$$\epsilon_{C'}=8 \times 10^{-6}, \epsilon_D=-1 \times 10^{-6}$$

この場合の応力計算には  $E=1.3 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$  を用いた。 $l/d=1.267$  に対する応力係数は 表-3 のように与えられる。したがって、いま B, C, D の3点のひずみの変化値を用いるものとなれば、式(7)より、

$$-0.58 p_x - 0.83 p_y - 1.05 p_{xy} = -6.76$$

$$0.42 p_x - 0.10 p_y + 0.17 p_{xy} = 0.39$$

$$0.75 p_x - 0.40 p_y + 0.45 p_{xy} = -0.13$$

これより,  $p_x=1.50 \text{ kg/cm}^2, p_y=5.04 \text{ kg/cm}^2, p_{xy}=1.68 \text{ kg/cm}^2$  をうる。これらの値を式(8), (9), (10)に用いれば、

$$\alpha=2.506 \quad \therefore \beta=\tan^{-1}\alpha=68^\circ 15'$$

$$\sigma_2=7.39 \text{ kg/cm}^2, \sigma_3=2.51 \text{ kg/cm}^2$$

が得られる。測定壁面における2次主応力の状態を図示すると、図-8 のようになる。

最初現場測定箇所としてできるだけ岩の状態変化の少ないところを求めたが、十分な場所が得られず、結局矢作ダム サイトでは割れ目が多く、岩が少しゆるんだ状態であったため満足する結果が得られなかった。高根ダム サイトでもボーリング機械の設置の関係上、ポアホールを層理と平行または直角にすることができず、層理の傾斜による影響がかなり入ってきているのではないと思われる。しかしこの両サイトにおいては、いずれも2つのポアホールを13 mm から40 mm 程度の残壁を残すほどに接近させて掘削したが、残壁を痛めることなくスムーズに掘削することができた。

5. 本測定法の適用性およびあとがき

石膏模型による予備実験および2箇所の現場における測定を通じて、この測定法を適用する場合の原理上および測定技術上の問題点について、つぎのようなことが考えられる。

- (1) 本測定法では等方等質の弾性連続体の仮定を行なって初期応力の算定をしているため、ひびわれ性岩盤や異方性岩盤に対しては厳密には適用されない。
- (2) とくに測定箇所の岩盤にきれつが著しく発達しているときには、測定はほとんど不可能である。しかし高根ダム サイトの場合のように層理を含んでいても、岩質が比較的ち密な場合には測定が可能である。
- (3) 土かぶりの小さい地点での測定では、応力解放

に対するひずみの変化を大きくして、測定精度を高めるために、2つのボアホールの間隔を極度に接近させる必要がある。

(4) 初期応力(したがって2次主応力)の大きさおよび方向と2円孔の中心線の方向との相対的な関係によっては、応力係数の変化の小さい位置でのひずみの変化を計算に用いなければならない。その場合には2次主応力の計算に大きい誤差が入るおそれがあるので、中心線のとり方に注意をはらわねばならない。

(5) SR-4 ゲージを使用するため、ゲージの水密性が必要となるが、現場での実験の結果、リゴラックセメントやハマタイトなどを用いて岩盤表面および接着されたゲージ表面を完全に防水することができる。

(6) 応力解放の前後においてゲージと指示計の結線を断ったことなく試験が行なえるため、接触抵抗の影響をうけない。

(7) ボアホールが比較的小さくすみ、試験が容易に行なえるとともに、ボアホールの開削時の熱の影響はないと考えられる。

現場における測定例がまだ少ないため、十分な結論を下すことはできないが、本測定法は完全弾性体と考えられる岩盤はもちろんひびわれ岩盤でもゆるみを生じておらず比較的ち密な岩質の場合にも十分適用されるものと思う。現場における測定技術としては、あまり大きいボアホールを必要としないから、ポータブルの適当なボーリングマシンが使用できれば、応力解放試験はさらに容易になり、その場合には、同一地点で多くの測定をとり、精度を上げることも可能である。さらにボアホール周辺のひずみの変化の測定だけでなく、ボアホールの変形状態を測定することも考えられ、そのための計算方法および計器の開発も考えている。異方性の大きい岩盤に対しては、著者の一人がすでに示した異方性岩盤中の2円孔の応力状態に対する考察<sup>9)</sup>より、ここで示した等方性に対する計算法を異方性係数によって修正することにより、測定結果の取り扱いが可能になるものと思われるので、現在検討を行なっている。

終りに現場試験にご協力いただいた電力中央研究所日

比野敏氏、中部地建矢作ダム工事事務所および中部電力高根水力建設所の関係者一同に感謝の意を表する次第である。

#### 参考文献

- 1) Merrill, R.H. : In Situ Determination of Stress by Relief Techniques, International Conference on State of Stress in Earth's Crust, Santa Monica (1963), 343.
- 2) たとえば土木学会: 土木技術者のための岩盤力学, 101ページ, あるいは J. Talobre : La Mecanique des Roches, Dunod Paris(1957), 58 に種々の方法が説明されている。
- 3) Jeager, J.C. and Cook, N.G.W. : Theory and Application of Curved Jacks for Measurement of Stress, International Conference on State of Stress in Earth's Crust, Santa Monica (1963), 381.
- 4) Fairhurst, C. : Measurement of In Situ Rock Stress, with Particular Reference to Hydraulic Fracturing, Felsmechanik II/3~4 (1964), 9.
- 5) 平松良雄・岡行俊 : ボアホールを利用する応力測定法に関する理論的検討, 水曜会誌, 15, 9 (昭和40年12月), 449.
- 6) Leeman, E.R. and Hayes, D.J. : A technique for determining the complete state of stress in rock using a single borehole, Proceedings of the First Congress of the International Society of Rock Mechanics, Vol. II, Lisbon (1966), 17.
- 7) Rocha, M., Lopes, J.B. and Silva, J.N. : A new technique for applying the method of the flat jack in the determination of stress inside rock masses, Proceedings of the First Congress of the International Society of Rock Mechanics, Vol. II, Lisbon (1966), 57.
- 8) The First Congress of the International Society of Rock Mechanics, Lisbon 1966年の第4課題10編中8編が測定計器および方法を取り扱っている。この課題の一般報告では、残存応力の測定法および計器の現状が要領よく説明されている。
- 9) 平松良雄・岡行俊・荻野正二 : 3次元応力状態にある岩盤中に作られた立坑・斜坑・坑道のまわりの応力, 日本鉱業会誌, 78, 885 (昭和37年3月), 14.
- 10) Ling, C.B. : On the Stresses in a Plate Containing Two Circular Holes, J. Appl. Phys, 19 (1948), 77.
- 11) Toshikazu Kawamoto : On the State of Stress and Deformation around Tunnel in Orthotropic, Elastic Ground, Memoirs of Faculty of Engineering, Kumamoto University X, 1 (1963), 1.

(1967.1.28・受付)