8 素子ゲージ法による地殻応力測定法の 精度とその改良

京都大学理学部 小 笠 原 宏

(昭和 58 年 12 月 22 日受理)

The Accuracy of *In Situ* Stress Measurements by “8-Element-Gauge” Method and its Improvement

Hiroshi OGASAWARA

Faculty of Science, Kyoto University

(Received December 22, 1983)

In situ stress measurements have been carried out by an “8-element-gauge” method which is one of the stress releasing methods. Several problems remain unsolved in the techniques of measurement and analysis. Their causes are exactly investigated and the accuracy of the stress value estimated is discussed in the present article.

Data employed for estimating the stress value involve systematic errors. Among them, errors in strain sensitivity matrices and those in rotational angles which determine the angles between each strain gauge and boreholes are predominant.

In order to reduce the systematic errors, the strain sensitivity matrix is recalculated and the rotational angle is corrected. Results obtained are compared with ones previously determined. The following conclusions are obtained as for the eight sites where the Research Group for Crustal Stress in Western Japan measured *in situ* stresses.

(1) Vertical stresses at a few sites previously determined are significantly underestimated, whereas the present ones can be explained by the gravity loading and topographic effect.

(2) Average horizontal stresses as well as maximum horizontal shear stresses vary by their corrections and are propotional to the depth from the ground surface, except for those at Ohtani mine.

The accuracy of the stress values obtained by the “8-element-gauge” method is several MPa for the measurements using two boreholes and a few MPa for ones using three boreholes, if the conditions of the measurements are the same as those at eight sites described above.

§1. はじめに

1974 年以来, 8 素子ゲージ法によつて日本各地で地殻応力測定が行われている [例えば岡・他(1979)]. しかし, これらの測定の際に生じた問題点のうちのいくつかは, 未だにはつきりと解決されていない. 例えば, 石田・他(1982) は, 同一地点における 8 素子ゲージ法と電力中央研究所式埋設法の測定結果が系統的に異なつたと報告している. また, 中竜鉱山および大

谷鉦山で測定された鉛直応力は、山体の自重と地形効果から予想されるものと比べると小さすぎ、その原因も不明であつた【中島・他 (1981)；小笠原・他 (1982)】

これらの問題点が、もしも 8 素子ゲージ法固有の系統誤差により生じていたとすれば、結果の解釈の際に大きな影響を及ぼすであろう。8 素子ゲージ法は、開発以後、方法に関する厳密な事後検討が十分なされていないので、今回、現場測定技法および解析システムを全面的に見直し、系統誤差の有無をチェックした。

その結果、従来の解析システムには大きな系統誤差を生じさせる原因があることがわかり、また現場で測定すべきもののなかで測定精度が不十分なものがあるのがわかつた。これらの測定精度を高め、修正された解析システムを用いるならば、8 素子ゲージ法による応力測定精度がかなり向上することがわかつた。

本論文では、まず 8 素子ゲージ法について解説し、次に系統誤差の原因とその影響度を検討する。さらに、系統誤差を除去した測定結果について議論し、最後に 8 素子ゲージ法の精度について触れる。

§2. 8 素子ゲージ法

8 素子ゲージ法は、京都大学工学部資源工学教室において開発された現場応力測定法であり【亀岡(1978)】、応力解放法の 1 つである。原理的には、応力解放の間の歪変化量を測定し、これと 3 次元応力各成分が単位量作用する時に等方均質弾性体モデルに生ずべき歪量とを比較して、作用している応力を見積る方法である。手法としては、8 枚の歪ゲージを組込んだ 8 素子ゲージセル (Fig. 1) を平面孔底に貼付け、オーバーコアリングにより応力を解放する間の歪変化量を測定し (Fig. 2)、この測定値から最小二乗法により応力成分の最確値を求める。8 枚の歪ゲージは、1 回の応力解放で得たデータだけからでも 3 次元応力 6 成分の最確値を算出できるように、その位置・方向が設定されている。

1 回の応力解放から得たデータによつて、3 次元応力 6 成分の最確値を求める場合の回帰モデル (観測方程式) は、

$$\{\Delta \epsilon\} = \frac{1}{E} [M][T]\{\sigma\} + \{e\}. \quad (1)$$

Fig. 1. Schematic view of adherent gauge cell, in which eight wire strain gauges are assembled. The gauges with ID#1, 3, 5 and 7 are called θ -gauges, and those with ID#2, 4, 6 and 8 are called r -gauges. The coordinate system O-XYZ is defined for the gauge cell.

岩盤は等方均質弾性体であり、残留応力は存在しないと仮定されている。(1)式において、 $\{\Delta \epsilon\}$ は、応力解放の間の歪変化量で 8 個の成分からなる列ベクトルであり、 E はヤング率である。 $[M]$ は、 8×6 の歪感度マトリクスで、3 次元応力 6 成分がそれぞれ単位量作用しているときの等方均質弾性体モデルの孔底面上の変位状態から計算され、ポアソン比によつて異なる：これをヤング率で除したもの $[M]/E$ は、ゲージセルに準拠する座標系 O-XYZ (Fig. 1)

における 3 次元応力 6 成分 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{yz}, \tau_{zx}, \tau_{xy}$ と、孔底面上の各位置の歪ゲージに生ずる歪との関係を示す。

$[T]$ は 6×6 の座標変換マトリクス、 $\{\sigma\}$ は求めるべき北・西・鉛直上向き座標系における 3 次元応力 6 成分 $\sigma_N, \sigma_W, \sigma_V, \tau_{WV}, \tau_{VN}, \tau_{NW}$ であり、したがって次式を満たす：

$$\{\sigma_x \sigma_y \sigma_z \tau_{yz} \tau_{zx} \tau_{xy}\}^T = [T] \{\sigma_N \sigma_W \sigma_V \tau_{WV} \tau_{VN} \tau_{NW}\}^T. \quad (2)$$

また $[T]$ は、測定孔の方位・仰角、ゲージセル回転角（測定孔軸を回転軸とするゲージセル貼付時の回転角度、Fig. 3 参照）によつて決まる。 $\{e\}$ は歪変化量の測定誤差である。同一地点において、 n 回の応力解放を行つて得たデータから応力の最確値を求める場合の回帰モデルは、(1) 式を n 回分書き連ねたものであり、

$$\begin{Bmatrix} \{\Delta \epsilon_1\} \\ \{\Delta \epsilon_2\} \\ \vdots \\ \{\Delta \epsilon_n\} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} [M_1] [T_1] \\ \frac{1}{E_2} [M_2] [T_2] \\ \vdots \\ \frac{1}{E_n} [M_n] [T_n] \end{bmatrix} \{\sigma\} + \begin{Bmatrix} \{e_1\} \\ \{e_2\} \\ \vdots \\ \{e_n\} \end{Bmatrix}. \quad (3)$$

添字は、応力解放回数番号である。(1) 式または (3) 式を、簡単に、

$$\{\Delta \epsilon\} = [X] \{\sigma\} + \{e\} \quad (4)$$

Fig. 3. Parameters to define the matrix which transforms coordinates.
 ϕ : azimuth of borehole, ψ : elevation angle, θ : rotational angle of gauge cell.

Fig. 2. Schematic illustrations of measuring process on the "8-element-gauge" method. Four sequential steps are shown from the top to the bottom: (a) boring the borehole of ϕ 76 mm, (b) flattening the bottom of the borehole of ϕ 76 mm, (c) gluing the "8-element-gauge" cell, (d) overcoring, when the change in strain is measured [after KAMEOKA (1978)].

と書くことにする。欠測がない場合、1回の応力解放につき8個、 n 回ではデータ総数 k は $8n$ 個であり、(4) 式中の $\{\Delta e\}$ 、 $\{e\}$ は $8n$ 行の列ベクトル、 $[X]$ は $8n \times 6$ のマトリクスである。誤差 e_i 、 $i=1, 2, \dots, k$ は互いに独立で、それぞれ分散が等しい正規分布をしていると仮定した場合、最小二乗法による3次元応力6成分の最確値 $\{\sigma^*\}$ 、残差 $\{r\}$ 、その標準偏差 SD は次式の通りである：

$$\{\sigma^*\} = [[X]^T[X]]^{-1}[X]^T\{\Delta e\}, \quad (5)$$

$$\{r\} = \{\Delta e\} - [X]\{\sigma^*\}, \quad (6)$$

$$SD^2 = \{r\}^T\{r\}/(k-6). \quad (7)$$

§ 3. 歪感度マトリクスの修正

3.1. 孔底面上の変位状態の再解析

亀岡 (1978) は、種々の応力状態における孔底面上の変位状態を有限要素法によつて求め、これをもとに歪感度マトリクスを計算した。有限要素解析では、要素分割が粗すぎる場合や形状が不正確な場合は解も不正確になる。特に、応力集中部または急変部ではその影響が大きい。亀岡の有限要素モデルは、応力集中および急変部である孔底周縁部において、要素分割が粗くまた実際の測定孔の形状と大きく異なる (Fig. 4)。したがって、従来の歪感度マトリクスには、大きな誤差が存在する可能性がある。そこで、今回は、より正確な歪感度マトリクスの計算と

Fig. 4. Schematic view of models for a finite element analysis and elements on the section including the borehole axis in the vicinity of the borehole bottom. Left: those analyzed by KAMEOKA (1978), right: those analyzed by the present author. The difference in shape between the right figure and the actual borehole is much smaller than that between the left figure and the actual one.

その精度（形状近似精度・要素分割の粗さの影響）の見積りとを行うために、形状または要素分割が少しずつ異なる 16 種類のモデルについて孔底面上の変位状態を解析し解を比較検討した。

Fig. 5 は、測定孔軸方向の垂直応力が作用している場合のいくつかのモデルの解（孔底面上半径方向変位分布）を示す。この図をもとに以下の議論を行う。

有限要素法は近似解法の 1 つであり、解について種々の議論をする前に、解の収束度（つまり要素分割が十分細かい）を検討せねばならない。モデル 2-2, 1-2, 0.5-2 は形状は等しいがその要素分割の細かさが異なる。2-2, 1-2, 0.5-2 の順に、要素分割が細かく（特に孔底周縁部）なっており、Fig. 4 の領域の要素数は、それぞれ亀岡モデルの約 4 倍、6 倍、7 倍である。歪感度計算に必要な区間（Fig. 5 参照：歪ゲージ貼付位置付近）において、3 つのモデルの解の差はほとんどなく（0.05% 以下）、モデル 0.5-2 の要素分割ならば、解は十分収束していると考えられる。

次に、最も確からしい解と、その形状近似誤差について議論する。モデル 0.5-2, 0.5-2.5, 0.5-3 は、形状（孔底周縁部の丸み）が少しずつ異なるが、要素分割の細かさが等しいのでそれぞれの解は十分に収束していると考えられる。これら 3 つのモデルのうち、形状が実際の測定孔に最も近いのはモデル 0.5-2.5 (Fig. 4 右) である。実際の測定孔の孔底周縁部の丸みは、掘削の度にバラつくが、モデル 0.5-3 よりは鋭く、0.5-2 よりはややかであると考えられる。歪感度計算に必要な区間では、モデル 0.5-2 と 0.5-3 の解の差は約 1% であるので、モデル 0.5-2.5 の解は $\pm 0.5\%$ の精度で実際の変位状態を表わしていると考えられる。

従来のモデル【亀岡 (1978)】の解は、モデル 0.5-2.5 の解と明らかに異なり、実際の変位状態を正確に表わしているとは言い難い。このことは、他の応力成分が作用している場合の解についても同様であった。

3.2. 修正された感度マトリクスとその精度

モデル 0.5-2.5 で再解析した孔底面上の変位状態をもとに、歪感度マトリクスを再計算した (Tables 1, 2)。測定孔の形状のバラつきによるマトリクス各成分の誤差は、有限要素解析解の誤差から考えて、1.5% 以下である。

従来の歪感度との差は有意でしかも大きい (Table 3)。例えばポアソン比 0.15 の場合の σ_z の歪感度の差は 45% に達し、最大である。したがって、従来の歪感度マトリクスを用いて求められた応力の最確値には、大きな系統誤差が含まれているはずであるが、今回求めたものを用いれば系統誤差はかなり小さくなるであろう。

Fig. 5. Displacement in radial direction on borehole bottom under the action of unit normal stress in axial direction.

Table 1. Strain sensitivity matrix

ID# of strain gauge	σ_x	σ_y	σ_z	τ_{yz}	τ_{zx}	τ_{xy}
1	e	e	$-f$	$-g$	g	h
2	$-a$	b	$-c$	d	0	0
3	e	e	$-f$	$-g$	$-g$	$-h$
4	b	$-a$	$-c$	0	d	0
5	e	e	$-f$	g	$-g$	h
6	$-a$	b	$-c$	$-d$	0	0
7	e	e	$-f$	g	g	$-h$
8	b	$-a$	$-c$	0	$-d$	0

a, b, c, d, e, f, g, h : Strain sensitivity coefficients

O-XYZ: Coordinate system referred to 8-element gauge cell

Table 2. Improved strain sensitivity coefficients

Poisson's ratio	r -gauge				θ -gauge			
	σ_x & σ_y	σ_z	τ_{yz} & τ_{zx}	σ_x & σ_y	σ_z	τ_{yz} & τ_{zx}	τ_{xy}	
	a	b	c	d	e	f	g	h
0.10	0.297	1.499	0.347	0.813	0.557	0.408	0.094	1.604
0.15	0.345	1.505	0.372	0.834	0.535	0.430	0.098	1.660
0.20	0.392	1.509	0.394	0.853	0.512	0.447	0.101	1.714
0.25	0.436	1.509	0.412	0.870	0.490	0.461	0.105	1.763
0.30	0.479	1.505	0.426	0.883	0.466	0.470	0.108	1.808

O-XYZ: Coordinate system referred to 8-element gauge cell

Table 3. Difference between improved and current strain sensitivity coefficients

	r -gauge				θ -gauge						
	σ_x & σ_y		σ_z	τ_{yz} & τ_{zx}	σ_x & σ_y		σ_z	τ_{yz} & τ_{zx}	τ_{xy}		
	a	b	c	d	e	f	g	h			
Poisson's ratio=0.15											
Current	1.694	0.386	0.257	1.159	0.555	0.396	0.090	1.732			
Improved	1.505	0.345	0.372	0.834	0.535	0.430	0.098	1.660			
Difference	-11%	-11%	+45%	-28%	-4%	+9%	+9%	-4%			
Poisson's ratio=0.25											
Current	1.680	0.452	0.317	1.205	0.511	0.438	0.095	1.814			
Improved	1.509	0.436	0.412	0.870	0.490	0.461	0.105	1.763			
Difference	-10%	-4%	+30%	-28%	-4%	+5%	+10%	-3%			

Difference=|| (Improved)-(Current) ||/(Current) $\times 100$

O-XYZ: Coordinate system referred to 8-element gauge cell

§ 4. 応力の最確値の誤差の要因とその影響度

何らかの要因によって (4) 式中の $[\mathbf{X}]$ に生じた誤差を $[\delta\mathbf{X}]$ と書くことにする。前節においては、有限要素解析誤差によって歪感度マトリクスに大きな誤差が生じ結果的に大きな $[\delta\mathbf{X}]$ が生じていることが明らかにされた。しかし他にも $[\delta\mathbf{X}]$ を生じさせる原因がある。ヤング率

・ポアソン比測定誤差 (約 $\pm 10\%$), ゲージセル貼付位置の不正確さ (約 $\pm 1\text{ mm}$), 測定孔の方位角・仰角測定誤差 (約 $\pm 1^\circ$), そしてゲージセル回転角測定誤差 (通常約 $\pm 2^\circ$, 時として約 $\pm 15^\circ$) 等である. 本節においては, まず応力の最確値 $\{\sigma^*\}$ の誤差と $[\delta X]$ との関係を明らかにし, 次に種々の要因が $\{\sigma^*\}$ に生じさせる誤差の大きさについて比較検討する.

測定された歪変化量 $\{\Delta \epsilon\}$ と真の応力 $\{\sigma\}$ との関係が, (4) 式ではなく次の式で表わされたとする:

$$\{\Delta \epsilon\} = [X + \delta X]\{\sigma\} + \{e\}. \quad (8)$$

この式は, 回帰モデル (4) 式が $[\delta X]\{\sigma\}$ だけ不正確な場合を意味する. そして, $[\delta X]\{\sigma\}$ を考慮せずに解析した場合, すなわち, (5), (6) 式の $\{\Delta \epsilon\}$ に (8) 式を代入する場合を考える. $[\delta X]\{\sigma\} \gg \{e\}$ として整理すると,

$$\{\sigma^*\} - \{\sigma\} = [[X]^T [X]]^{-1} [X]^T [\delta X]\{\sigma\}, \quad (9)$$

$$\{r\} = [[I] - [X][X]^T [X]]^{-1} [X]^T [\delta X]\{\sigma\}. \quad (10)$$

つまり, 応力の最確値 $\{\sigma^*\}$ は, (9) 式の右辺の分だけ真の応力 $\{\sigma\}$ と異なる.

$$\|\{\sigma^*\} - \{\sigma\}\| \leq \|[[X]^T [X]]^{-1} [X]^T\| \cdot \mu_{max} \cdot \|\{\sigma\}\|. \quad (11)$$

であるから, $[\delta X]$ の最大特異値 μ_{max} を見れば, 最確値の誤差の上限がわかる. また (9),

Fig. 6. Maximum singular value of $[\delta X]$, μ_{max} , calculated from several sources of errors. Thick and thin lines represent μ_{max} as a function of error in rotational angle and that in Poisson's ratio, respectively. Thick chain level line shows the value of μ_{max} calculated from systematic error in strain sensitivity matrix. Thin chain level lines show the values of μ_{max} when the deviations of the gauge cell axis are 1 mm and 2 mm from the borehole axis.

(10) 式右辺のマトリクスの性質上, $[\delta X]\{\sigma\}$ がランダムならば, $\{r\}$ は大きい $\{\sigma^*\} - \{\sigma\}$ は小さい。したがって, $[\delta X]$ が応力の最確値に及ぼす影響度は, $[\delta X]$ の最大特異値 μ_{max} と $[\delta X]\{\sigma\}$ のランダム性からわかる。Fig. 6 は, $[\delta X]$ の要因(横軸)とそれによる μ_{max} (縦軸)とを示す。これは1回の応力解放によつて応力値を求める場合のものである。 μ_{max} が最も大きいのは, ゲージセル回転角測定誤差 (15° のとき約 2.2), 次は歪感度マトリクスの誤差(約 0.4)である(他の μ_{max} は 0.1 以下)。応力値は, 通常, 10 回前後の応力解放を行つて得たデータから求めるが, 歪感度マトリクスの誤差以外は, 各回の応力解放ごとにバラつくので, $[\delta X]\{\sigma\}$ にはランダム成分が卓越するであろう。

以上より, 応力の最確値に大きな影響を与えるおそれのあるものは, $[\delta X]\{\sigma\}$ にランダム成分が多いが μ_{max} が最も大きいゲージセル回転角測定誤差と, μ_{max} の大きさは 2 番目だが $[\delta X]\{\sigma\}$ にはランダム成分の少ない歪感度マトリクスの誤差である。

西日本地殻応力調査班が 8 地点で得た実際のデータを用いて応力の最確値に及ぼす影響度を比較した。歪感度マトリクスの誤差の影響は, 従来のものと今回得たものを使つて求めた応力値の差によつて, 他の要因については, 残差を大きくする性質が大きいので, 残差平方和が最小になるように反復補正し収束した時の値と最初のものとの差から調べた。その結果, 歪感度マトリクスの誤差の影響が最も大きく, 次いでゲージセル回転角測定誤差であつた。また他の要因の影響は識別できない程に小さかつた。ちなみに, ゲージセル回転角補正量は, 平均 -0.82° , 標準偏差 23.1° であり, 頻度分布はほぼ正規分布と考えられる(データ数は 65)。

§5. 改良された応力値

今回求めなおした歪感度マトリクスを使用し, ゲージセル回転角を補正することによつて, 前節で述べた 8 地点について, 従来よりも精度のよい 3 次元応力 6 成分の暫定的な最確値を求めた。ここで暫定的と言つたのは, 最小二乗法では一般に残差が極端に大きなデータ(異常値)も含めて解析した場合結果がゆがめられてしまうので, 残差が $2SD$ より大きなデータを取りあえず省いて計算したからである。異常値を扱う方法は数多くあり, 8 素子ゲージ法に最適なものを見つけていることが今後の課題であるが, 以下では暫定的な最確値を用いて議論する。

今回の改良によつて応力の最確値はかなり変化し, 変化量が当初の 90% の信頼区間を超えるものもかなりあつた。以下では, 鉛

Fig. 7. Overburden pressures and vertical stresses. Solid and open circles represent recalculated and current values, respectively. Error bars of confidence intervals of 90% are also shown on the figure.

直応力 σ_v , 水平面内平均主応力 $\sigma_{ha} = (\sigma_{hmax} + \sigma_{hmin})/2$, 水平面内最大剪断応力 $\sigma_{hs} = (\sigma_{hmax} - \sigma_{hmin})/2$ について議論することにする。ただし, σ_{hmax} , σ_{hmin} は水平面内最大および最小主応力である。

一般に, σ_v は, 重力荷重によつて生ずると考えられ, かぶり圧 ρgz と比較検討される。ただし ρ は岩石の密度, g は重力加速度, z は直上の地表から応力測定点までの深さである。地

表が広範囲にわたり平坦な場合、 σ_v は $\rho g z$ にほぼ等しいだろうが、起状に富む場合は地形の影響で両者の間に差が生じることがある。しかし、中竜鉱山と大谷鉱山における従来の σ_v は、地形の影響を考慮しても $\rho g z$ より小さすぎ、その原因も不明であつた。Fig. 7 は、従来の歪感度マトリクスで得た σ_v 、今回改良された σ_v を $\rho g z$ に対してプロットしたものであるが $\rho g z$ との差は、従来の σ_v よりも改良された σ_v の方が小さい。また改良された σ_v と $\rho g z$ との差は、地形の影響でほぼ説明できる程度である。

Fig. 8, Fig. 9 は、改良された σ_{ha} , σ_{hs} 及び国立防災科学技術センターが水圧破壊法で測定した4地点における σ_{ha} , σ_{hs} [池田・他 (1981, 1982); 塚原・他 (1981a, 1981b)] を、測定点の深さに対してプロットしたものである。8 素子ゲージ法による σ_{ha} , σ_{hs} は、深さ数 100 m より浅い部分では、深さにほぼ正比例していることが図からわかる。ただし、大谷鉱山における σ_{ha} , σ_{hs} のみは、深さに比して大きすぎる (約 10 MPa)。TANAKA *et al.* (1981) は、8 素子ゲージ法 σ_{ha} は、国立防災科学技術センターが水圧破壊法によつて得たものより小さく、 σ_{hs} については逆に大きくであると指摘している。しかし、今回改良された8地点の σ_{ha} , σ_{hs} については、水圧破壊法との系統的な差は、エラーバーを考慮すれば見られない。

§ 6. 8 素子ゲージ法によつて得られる応力値の精度

今後の測定で得られる応力値の精度を予想しておくことは、測定計画をたてる際に参考になるであろう。8 地点の応力値を得た時の SD は $38 \sim 80 \mu\text{strain}$ であつたが、今後の測定でも仮にこの程度であるとする、測定条件 (測定孔の数・方位・仰角, ゲージセル回転角, 応力解放の回数) さえわかれば、精度を予想できる。例としてヤング率 0.05 TPa, ポアソン比 0.25 の岩盤において、3 種の条件で測定した場合の3次元応力6成分の 95% の信頼区間を Table 4 に示す。信頼区間は、データ個数の平方根にほぼ逆比例することを考慮すると、2 本のほぼ直交する測定孔における測定では数 MPa, 互いにほぼ直交する3本の測定孔の場合は 2~3 MPa である。

Fig. 8. Recalculated average horizontal stresses versus depths. $\triangle$ — $\triangle$: results obtained by hydrofracturing method [after IKEDA *et al.* (1981, 1982) and TSUKAHARA *et al.* (1981a, 1981b)]. Error bars of confidence intervals of 90% are also shown on the figure.

Fig. 9. Recalculated maximum horizontal shear stresses versus depths. $\triangle$ — $\triangle$ and error bars are the same as those in Fig. 8.

Table 4. Confidence intervals of 95% of stress components estimated from six sets of data [MPa]

	σ_N	σ_W	σ_V	τ_{WV}	τ_{VN}	τ_{NW}
1. One borehole	$\pm 20.4 \sim 42.9$	$\pm 7.4 \sim 15.5$	$\pm 7.4 \sim 15.5$	$\pm 0.7 \sim 1.6$	$\pm 2.2 \sim 4.6$	$\pm 2.2 \sim 4.6$
2. Two boreholes	$\pm 1.9 \sim 4.0$	$\pm 1.9 \sim 4.0$	$\pm 1.3 \sim 2.8$	$\pm 1.0 \sim 2.1$	$\pm 1.0 \sim 2.1$	$\pm 2.2 \sim 4.6$
3. Three boreholes	$\pm 1.6 \sim 3.3$	$\pm 1.6 \sim 3.3$	$\pm 1.6 \sim 3.3$	$\pm 1.2 \sim 2.4$	$\pm 1.2 \sim 2.4$	$\pm 1.2 \sim 2.4$

Common conditions:

Standard deviations of residual strains: $38 \sim 80 \times 10^{-6}$,

Young's modulus: 0.05 [TPa],

Poisson's ratio: 0.25.

Conditions in individual cases:

	ϕ	N	N	N	N	N	N		ϕ	N	N	N	W	W	W	
Case 1:	ϕ	0°	0°	0°	0°	0°	0°	,	Case 2:	ϕ	0°	0°	0°	0°	0°	0°
	θ	0°	15°	30°	45°	60°	75°			θ	0°	30°	60°	15°	45°	75°
	ϕ	N	N	W	W	—	—									
Case 3:	ϕ	0°	0°	0°	0°	90°	90°	,								
	θ	0°	45°	15°	60°	30°	75°									

where ϕ : Azimuth of borehole, ψ : Dip of borehole, θ : Rotational angle of gauge cell.

§7. ま と め

(1) 8 素子ゲージ法による従来の応力値にはかなりの誤差があることがわかった。その主な原因は歪感度マトリクスの誤差とゲージセル回転角測定誤差である。

(2) 歪感度マトリクスの誤差は、有限要素解析の際に、形状が実際の測定孔とは異なり要素分割が粗いモデルを用いたために生じたものである。今回、形状がより現実近く要素分割が十分細かいモデルでの解析結果をもとに信頼性の高い精度で歪感度マトリクスを計算した (Figs. 4, 5; Tables 1, 2, 3)。

(3) ゲージセル回転角測定誤差は、測定精度が不十分なために生じたもので、今後の測定では精度向上が、既に測定されたものについては補正が必要ながわかった。

(4) 西日本地殻応力調査班が測定を行つた 8 地点について応力値を再計算した結果、 σ_V は重力荷重と地形効果でほぼ説明ができること、 σ_{ha} 及び σ_{hs} は大谷鉱山のみが深さに比して大きい以外はほぼ深さに比例していることがわかった (Figs. 7, 8, 9)。

(5) 現場の岩盤次第であるが、今後の測定において SD が $38 \sim 80 \mu\text{strain}$ であるとする、応力値の精度は、2 本のほぼ直交する測定孔における測定では数 MPa、互いにほぼ直交する 3 本の測定孔の場合は 2~3 MPa である。

謝 辞

今回の研究にあたり、終始指導を与えられた京都大学理学部・田中 豊講師に心から御礼申し上げます。また、同・戸時雄教授、京都大学工学部・斎藤敏明助手にも種々助言を賜りました。なお地殻物理学講座の院生諸兄には有益な議論をして頂きました。以上の諸氏に厚く御礼申し上げます。

なお、有限要素法の計算には京都大学大型計算機センターを利用した。

文 献

- 池田隆司・高橋 博, 1981, 千葉県富津市における水圧破壊法による地殻応力測定, 地震 2, **34**, 565-576.
- 池田隆司・塚原弘昭・高橋 博, 1982, 水圧破壊法による地殻応力の測定, 地震学会講演予稿集, No. 2, 207.
- 石田 毅・金川 忠・日比野敏, 1982, 応力解放法による地殻応力測定に関する二, 三の考察, 地震学会講演予稿集, No. 2, 207.
- 亀岡美友, 1978, ボアホール底面上の応力解放による岩盤応力測定に関する研究, 京郡大学工学部学位論文.
- 中島 健・田中 豊・玉井昭雄・斎藤敏明, 1981, 応力解放法による地殻応力の測定 (4), 地震学会講演予稿集, No. 1, 122.
- 小笠原宏・中島 健・田中 豊・玉井昭雄・斎藤敏明, 1982, 応力解放法による地殻応力の測定 (6), 地震学会講演予稿集, No. 1, 113.
- 岡 行俊・斎藤敏明・柳谷 俊・亀岡美友・石田 毅・田中 豊・行竹英雄・中島 健, 1979, 応力解放による地殻応力の確定, 地震学会講演予稿集, No. 1, 190.
- TANAKA, Y., T. NAKAJIMA and T. SAITO, 1981, The Crustal Stress Field in the Japanese Islands, J. Geod. Soc. Japan, **27**, 322-326.
- 塚原弘昭・池田隆司・佐竹 洋・高橋 博, 1981a, 銚子市犬吠崎における水圧破壊法による地殻応力測定, 地震 2, **34**, 13-20.
- 塚原弘昭・池田隆司・高橋 博, 1981b, 静岡県岡部町における水圧破壊法による地殻応力測定, 地震学会講演予稿集, No. 2, 19.