

# 地殻応力測定手法に関する調査報告書

昭和 52 年

建設省国土地理院

# 目 次

は し が き

I	報告書の構成 .....	3
II	地山応力の測定方法 .....	4
II-1	応力解放法 .....	5
II-1-1	孔底歪法 .....	6
II-1-2	孔径変化法 .....	9
II-1-3	孔壁歪法 .....	11
II-2	Hydraulic Fracturing 法 .....	11
II-3	Acoustic Emission 法 (AE法) .....	15
III	各種測定法の検討 .....	18
III-1	測定方法の検討 .....	18
(1)	応力解放法 .....	18
(2)	Hydraulic Fracturing 法 .....	19
(3)	Acoustic Emission 法 .....	20
(4)	Flatjack 法 .....	21
(5)	X線による方法 .....	21
(6)	その他 .....	21
III-2	応力測定と地震予知 .....	21
IV	国内における地山応力の測定例 .....	23
V	地山応力測定に関する各国の事情 .....	28
V-1	中 国 .....	28
V-2	アメリカ .....	32

VI	ま と め	36
	(a) 応力の測定に関して	36
	(b) 応力測定 of 地震予知における意義	37
VII	委員会の構成	39
VIII	文献リスト ( 附 録 )	40

## は し が き

地震予知の研究において、地殻応力の測定は重要な課題となつている。一般に弾性体は外力によつて変形を受けると、その内部に外力に抗する応力が生じる。地下の岩石は、自重による圧力、すなわち静水圧の他に、地殻変動を生じさせる造構力を受けているので、地殻内の岩石には、この造構力に対応して造構応力が生じている。この応力が地殻応力と呼ばれるものである。

地震は地殻内に蓄積された応力が限界を超えたとき大きな破壊が生じ、地殻内に断層が形成される現象であるから、地殻内の応力状態を知ることは、予知研究の上で基本的な事柄であるが、現実的に地殻応力を直接測定することには大きな困難があり、我が国では、地震予知研究のために地殻応力の測定が行なわれたことはなかつた。

国土地理院では、全国の三角点（二等三角点以上）をレーザー測距儀で定期的に測量する精密測地網の計画を推進しており、この成果は地震予知研究において重要な意味を持つものと期待されている。この精密測地網の測量で得られるものは、地殻の水平歪であり、地殻歪と地殻応力の間には一定の対応があるから、精密測地網の結果によつて、我々は地殻の応力状態についての知見を得ることができるが、測量で得られるのは歪の変化分（または応力の変化）であつて、現実的に地殻歪の絶対値については、特別の場合を除いて、知ることができない。地震の長期的予測には地殻の歪や応力がその限界値に近づきつゝあるかどうかを知ることが必要であるが、内陸の大地震では地震の発生間隔は、短くても500～1,000年とされており、地殻の歪、応力はそれらの永い期間に亘つて徐々に蓄積されていると考えられる。従つて、測地測量が始まつて100年程度にしかならない現在では、最近100年間の変化が分るだけで測量開始時における歪が分らないので、現在の歪が限界値に近いか遠いかを知ることが一般にはできない。

ところで応力は、歪量に対して比例関係にあるから、もし地殻の応力が正確に測定できると、地殻の弾性定数を媒介として歪の絶対量を知ることができる。このため地殻調査部では、昭和51年度に、「地殻応力の測定手法」についての調査を行った。

この調査は、従来各種の目的で行なわれている地山応力の測定手法について検討し、それらの手法を地殻応力の研究に用いる場合の技術的問題、内外における研究の動向、測定例、文献リストの作成等について、社団法人日本測量協会に委託して後記の研究委員会により実施したものである。

## I 報告書の構成

地震予知は、地殻の中を反映する地表の複雑な諸現象から、地震に関する情報を引き出して行うものであるから、極めて複雑で、その方法は多岐に渡っている。本調査は、地震予知の目的のためにはまだ日本で行なわれていない地殻応力の測定方法について調査し、地震予知と地殻応力との関連を検討することを目的として行なわれた。第Ⅱ項にいろいろな地山応力の測定方法の中で地震予知の目的の為に可能と思われるものの概略を紹介した。第Ⅲ項では応力測定の方法、及び地震予知との関係について検討を加えた。第Ⅳ項では日本における地山応力の測定例を測定場所と深さについて調査した。第Ⅴ項は地震予知と関連した地山応力の測定について中国及びアメリカの例を簡単に紹介した。最後の項は、地山応力の測定及び造構力に関係した主要文献のリストである。

## II 地山応力の測定方法

普通の状態では、地殻内の応力は岩石自身の強度と平衡を保つて一応の安定状態にあるが、そこに坑道や隧道等が掘削されると初めの応力場が乱されて坑道や隧道の周辺に局部的に歪のエネルギーが集中し、亀裂を生じたり落盤等の災害を引き起こすことがある。このため地中の変化量や絶対応力を求めて、災害を予知したり対策を立てたりすることは重要な課題となっている。

地中の応力を求めるためには、昔からいろいろな方法が行われてきた。例えば岩盤表面に歪計を設置し、その周辺にスリットを入れて応力を解放して、歪の変化量から応力を求める方法とか、後述するように応力を解放した状態から逆に元の状態に復させて応力を知る方法等である。いづれも比較的限られた条件での応力しか求めることができない。最近ボアホールを穿孔して山地の絶対応力を測定する方法が開発され、坑道、隧道或いは地下発電所建設のための掘削における岩盤力学的諸問題の解決に用いられている。

ボアホールによつて地山応力を測定する方法は、大別して次の三種に分類できる。

### 応力解放法

#### Hydraulic Fracturing 法

#### Acoustic Emission 法

この他にも、ディスクング現象を利用して地山応力を推定する試み等が行なわれている。しかしこれは応力解放法によつて応力を測定する場合のいわば、裏付けの意味合いで行なわれるものであるからこゝでは触れない。

応力解放法は我国において最もよく行なわれている方法で、すぐれた研究がいろいろ発表されている。

Hydraulic Fracturing 法も有効な方法であるが、まだ日本で行われた事例を見ない。

Acoustic Emission 法は最近開発された方法である。比較的簡単に地殻の応力を測ることが出来るので有力な方法となろう。

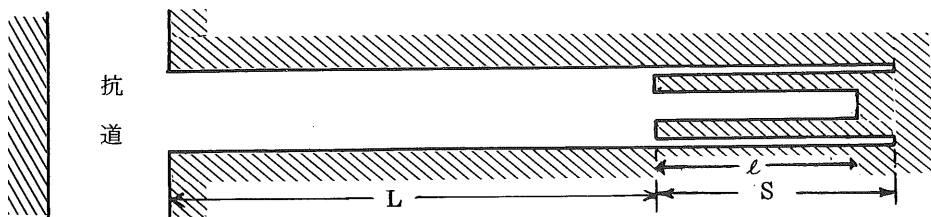
これらの他にも応力補償法などがあるが上述の方法に比較すると条件が限られるので現在は、あまり用いられていない。従つてこゝでも簡単に触れられることにな

ろう。

X線によつて岩石の残留応力を測定する方法もあるが、岩盤応力とは趣を異にするので対象としない。

## II - 1 応力解放法

応力解放法とは、応力によつて歪んだ状態にある地中の岩石から試料を切り出して歪を解放することにより、切り出し前後の岩石歪の変化量を測定して、それから地山の応力を求める方法である。多くの場合、坑道やトンネルを利用し、その坑壁にボアホールを穿孔して測定が行なわれる。坑道を掘削すると掘削前の応力場が乱されて坑道のまわりに応力が集中する。この乱された応力場は、坑道の形、或いは坑道掘削によつて生じるかもしれない坑壁の亀裂などの影響によつて極めて複雑な様相を示す。試料を切り出すには、このような応力場の乱れの影響をできる限り避けなければならない。このため先づ坑道幅の3～4倍の深さ迄ボーリングを行う。このボーリングの径は通常15～20cm程度に取られる(第1図にLで示した部分)。次にこのボアホール底の中心から更にボアホール $\ell$ を穿孔して歪計を設置する。このボアホールの径は普通56mm程度にとられる。



第1図 応力解放法

歪計が完全に岩盤に固定されたら第1図のようにボアホール $\ell$ の外周にスリットSを入れて歪計が設置されている岩石の部分の応力を解放し、コアを取り出す。応力解放によつて歪計は歪の変化を示すから、その値を測定し計算によつて初期応力を求める。計算に必要な諸量(ヤング率, ポアソン比等)は持ち帰つた試料を用いて実験室で求める。

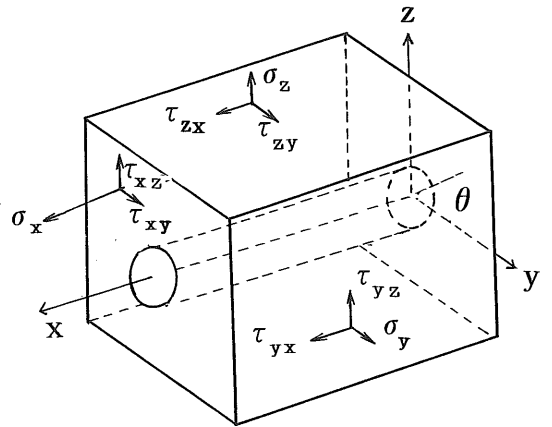
歪の測定方法及びボアホール中での歪計設置位置により



孔底歪法  
 孔径変化法  
 孔壁歪法

に大別される。

本項では座標系及び応力と歪を第2図のように選ぶことにする。すなわちボアホールの軸に沿ってX軸をとり、Y軸とZ軸はそれぞれ互に直交し且つ右手系をなすように選ぶ。また引張(または圧縮)応力を $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ で、せん断応力を $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ であらわす。これに対応して伸縮歪を $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ で、せん断歪を $\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$ であらわすことにする。



第2図

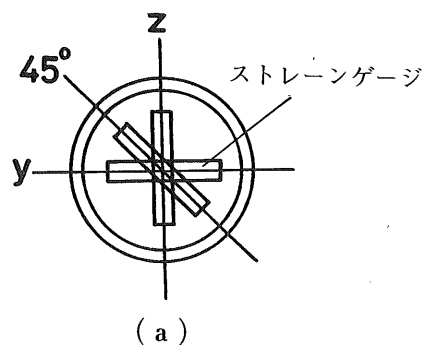
### II-1-1 孔底歪法

孔底変化法においては、応力解放前後におけるボアホール底の歪の変化が観測される。従つて測定用歪計はボアホール底の中心に接着剤で接着される。

ボアホールを穿孔することによつて、特に孔底には応力が集中し孔底中心の応力に較べて孔底縁の応力は1.5倍程にも達するので、歪計の長さは孔底の径に較べて充分短いものでなければならない。通常は5mm程度のものが用いられる。これ以上になると歪集中の影響があらわれて解析が困難となる。

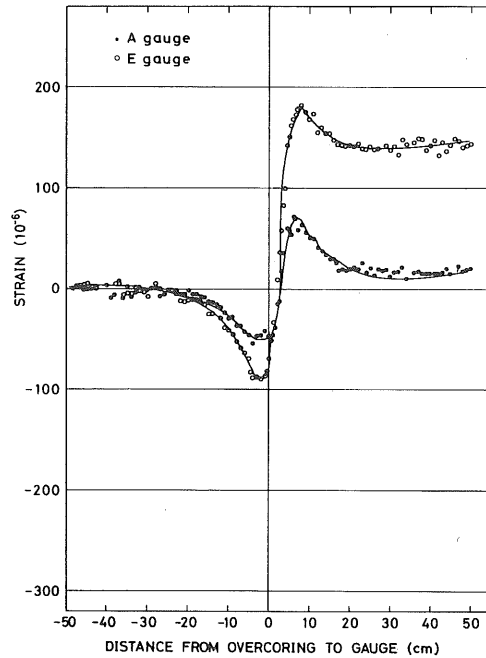
歪計には、従来第3図に示すように、三方向の歪を測定できるようにゲージを配置したものが用いられてきた。孔底面を注意深く仕上げた後、水洗乾燥を行い、歪計取付器具を用いて孔底に接着せしめる。

歪計取付器具には方向付けを正しく行なえるようなモニター機構が装備されている。孔底は応力集中により歪計がはがれ易くなつているので注意が必要である。



第3図

歪計が接着されたら、ストレンメーターを読み、次にオーバーコアリングを行う。オーバーコアリング進行に伴ってストレンメーターの読みが第4図のように変化するので、その読みが安定し歪計を接着した岩石の応力が十分に解放される迄オーバーコアリングを行う。次にストレンメーターの読みを読みとつて歪の変化量を測る。これで一連の測定が終る。



第4図 応力解法による歪の変化

三素子の歪計で地山応力の六成分を求めるためには方向の異なる三

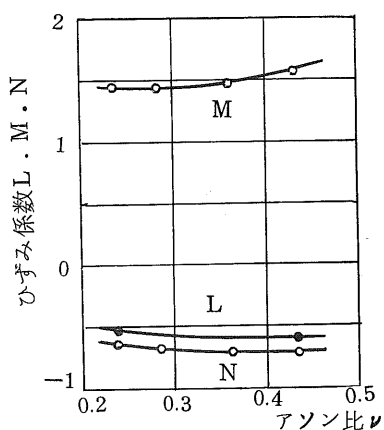
本のボアホールで測定しなければならない。最近岡氏等は八素子の歪計を開発し、これによつて一本のボアホールから三次元応力が決定できるようになった。

求められた歪の変化量から地山の応力を求めるためにはボアホール底の附近の応力状態が解明されねばならない。これ迄この問題は実験的に或いは光弾性的な方法で研究されて来た。

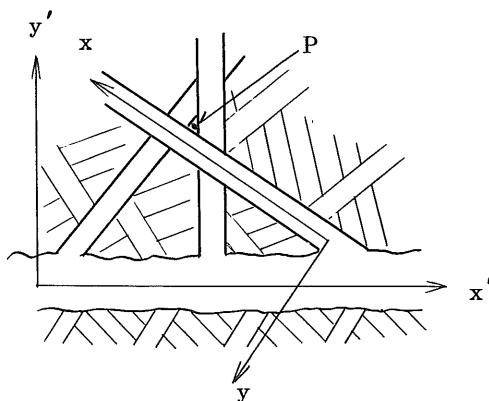
岡氏等は最近有限要素法を用いて、この関係を精密に明らかにした。いま座標系を第2図に示すように選ぶと、第3図のような歪計に対して、孔底中心附近の平均歪と岩盤応力（ボアホールを穿孔する以前にそこに存在した応力） $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  及び  $\tau_{yx}$  との関係は次式によつて与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_y &= (L\sigma_x + M\sigma_y + N\sigma_z) / E \\ \varepsilon_z &= (L\sigma_x + N\sigma_y + M\sigma_z) / E \\ \varepsilon_{45^\circ} &= \{ L\sigma_x + (M+N)\sigma_y / 2 + (M+N)\sigma_z / 2 + (M-N)\tau_{xy} \} / E \end{aligned} \right\} (1)$$

ここにEはヤング率である。またL, M及びNはポアソン比に関する歪係数で第5図のようになる。(1)式から明らかなように、ボアホール1本だけからは応力の



第5図 ボアホール底面のひずみ係数とポアソソ比



第6図

全要素を決めることができず、最小限3本以上のボアホールを例えば第6図に示すように穿孔する必要がある。この時、それぞれのボアホールに固定された座標系を共通の座標系(第6図  $x'z'$  系)に変換しなければならない。ボアホールに固定された座標系の各軸の共通座標系に関する方向がわかれば、変換は

$$x'_i = \sum_j l_{ij} x_j \quad (i, j = 1 \sim 3) \quad (2)$$

であらわされる。応力はテンソル量だから

$$\sigma_x = T_{11}, \sigma_y = T_{22}, \sigma_z = T_{33}, \tau_{xy} = T_{12}, \tau_{yz} = T_{23}, \tau_{zx} = T_{31},$$

$$\sigma'_x = T'_{11}, \sigma'_y = T'_{22} \dots \dots \text{etc} \quad \text{と置くと(2)の座標変換によつて応力は}$$

$$T_{ij} = \sum_k \sum_l l_{ik} l_{jl} T'_{kl} \quad (3)$$

という変換を受ける。これを(1)式に代入し、 $\sigma'_x, \sigma'_y$  等について解けば第6図のP点附近の応力が求められる。地震予知の立場からすれば、岩盤の自重による静水圧的圧力は重要ではなく、水平圧力が重要な意味を持つ。この場合は鉛直なボアホールを一本掘ることによつて次のように水平応力を求めることができる。

いま岩盤の単位体積当りの重量を  $\rho g$ 、地表から測点迄の深度を  $h$  とし、鉛直方向の応力  $\sigma_x$  を  $\rho gh$  と仮定すると(1)式から  $\sigma_y, \sigma_z$  及び  $\tau_{yz}$  は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_y &= \{M(E\varepsilon_y - L\rho gh) - N(E\varepsilon_z - L\rho gh)\} / (M^2 - N^2) \\ \sigma_z &= \{M(E\varepsilon_z - L\rho gh) - N(E\varepsilon_y - L\rho gh)\} / (M^2 - N^2) \\ \tau_{xy} &= E(2\varepsilon_{45^\circ} - \varepsilon_y - \varepsilon_z) / 2(M - N) \end{aligned} \right\} (4)$$

水平面内の見掛けの最大主応力  $\sigma_1$  と最小主応力  $\sigma_2$  は、次式に(4)式の  $\sigma_y, \sigma_z$  及び  $\tau_{yz}$  を代入して求めることができる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= (\sigma_y + \sigma_z) / 2 + \sqrt{(\sigma_y - \sigma_z)^2 / 4 + \tau_{yz}^2} \\ \sigma_2 &= (\sigma_y + \sigma_z) / 2 - \sqrt{(\sigma_y - \sigma_z)^2 / 4 + \tau_{yz}^2} \end{aligned} \right\} (5)$$

また、 $y$  軸から時計廻りに測つた  $\sigma_1$  の方向  $\phi$  は次式によつて決定できる。

$$\tan \phi = \tau_{yz} / (\sigma_1 - \sigma_2) \quad (6)$$

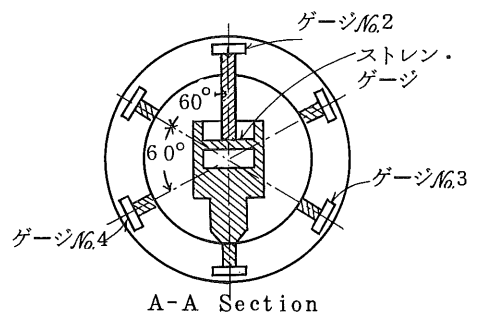
なお上式において、 $\phi$  は  $0^\circ$  から  $180^\circ$  の範囲にあるから、一意的に  $\phi$  を決定できる。

しかし、頁に述べたように8素子の歪計を用いれば一本のボアホールから応力の6成分を求めることができるので  $\sigma_x$  に対する仮定は必要としない。

## II-1-2 孔径変化法

この方法は応力解放前后におけるボアホール孔径の変化を検出して応力を求めようとするもので、歪計はボアホール底から20~30cm位の距離のところに取り付けられる。取り付け方にはスプリングを用いて孔壁に押しつける方法と、歪計をセメントミルクで固定する方法とがある。いずれもそれぞれ特徴があつて優劣を論じ難い。

歪測定計器の一例を第7図に示す。第7図は互に60度の角をなす三方向の孔径変化を測定できるように設計されたボアホールゲージである。地殻の応力の状態にもよるが孔径の変化量は普通数10 $\mu$ m程度の微量であ



第7図 ボアホール直径変化および軸方向変位を計る測定器の一例

る。従つてボアホール内壁面の仕上げの精確が測定に影響を与える。この方法では内壁面の仕上げを慎重に行い、また孔径は測定器の大きさに適合したものでなければならぬ。ボアホールを穿孔した附近の地殻応力は、穿孔以前には一様であると仮定すると、第2図または第3図に $\theta$ で示した方向の孔径の変化量 $\Delta d_i$ は、

$$\Delta d_i / d = \alpha + \beta \cos 2\theta_i + \gamma \sin 2\theta_i \quad (7)$$

$$i = 1, 2, \dots$$

であることが証明される。dはボアホールの孔径であり、 $\nu$ をポアソン比とすると

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= (-\nu\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) / E \\ \beta &= 2(1 - \nu^2)(\sigma_y - \sigma_z) / E \\ \gamma &= 4(1 - \nu^2)\tau_{yz} / E \end{aligned} \right\} (8)$$

である。 $\theta_i$ はY軸から歪計迄の角度であり、第7図の場合は

$$\theta_1 = 30^\circ, \theta_2 = 90^\circ, \theta_3 = 150^\circ$$

となる。(7)式から明らかなように、この場合も1本のボアホールから3次元的な応力を決めることはできない。従つて例えば第6図のように異なる方向のボアホールを3本以上穿孔する必要がある。

一本だけのボアホールから三次元応力を求めることが出来なくても孔軸に直交する面内での応力成分は求めることができるから、もし水平応力のみが重要であるなら、前述と同じように鉛直なボアホールを一本穿孔して孔径の変化を測定すればよい。今孔軸に垂直な断面、即ち水平面内における最大応力と最小応力をそれぞれ $\sigma_1$ と $\sigma_2$ とし、それぞれ $60^\circ$ の角をなす方向の孔径の変化を $\Delta d_1, \Delta d_2$ 及び $\Delta d_3$ とする。また $\Delta d$ が正の量の時、径が増加する方向であるとする。すると(7)式から

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= (\Delta d_1 + \Delta d_2 + \Delta d_3) / 3d \\ \beta &= (\Delta d_1 - 2\Delta d_2 + \Delta d_3) / 3d \\ \gamma &= (\Delta d_1 - \Delta d_3) / \sqrt{3}d \end{aligned} \right\} (9)$$

を得る。いま $\sigma_x = \rho gh$ と仮定すると(8)から $\sigma_x, \sigma_y$ 及び $\tau_{yz}$ は次式のように

になる。

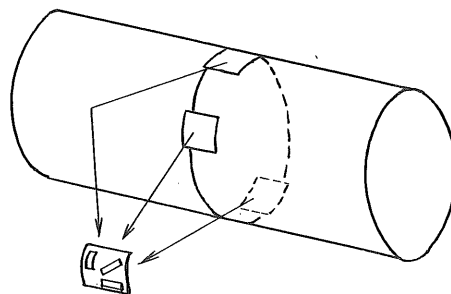
$$\left. \begin{aligned} \sigma_y &= \alpha E / 2 + \beta E / 4 (1 - \nu^2) + \nu \rho g h / 2 \\ \sigma_z &= \alpha E / 2 - \beta E / 4 (1 - \nu^2) + \nu \rho g h / 2 \\ \tau_{yz} &= \alpha E / 4 (1 - \nu^2) \end{aligned} \right\} (10)$$

したがって、(10)式に(9)式を代入し  $\sigma_y$ 、 $\sigma_z$ 、 $\tau_{yz}$  を測定値から求めることができる。また水平面内における見掛けの最大主応力  $\sigma_1$  と最小主応力  $\sigma_2$  は(10)式の  $\sigma_y$ 、 $\sigma_z$  及び  $\tau_{yz}$  を(5)式に代入することによつて、さらに  $\sigma_1$  の方向をY軸から反時計廻りに測つた角  $\phi$  は、いま求めた  $\sigma_1$  と(10)式の  $\sigma_z$  と  $\tau_{yz}$  (6)式に代入することによつて決定することができる。

### II-1-3 孔壁歪法

この方法は孔壁の変形を測定して地山応力を求める方法である。ボアホールを穿孔し壁面の仕上げ、水洗乾燥を行つてから第3図のようなロゼット歪計を壁面に接着させる。設置する位置は、例えば第8図に示すように孔軸に直交する面内で互に  $120^\circ$  の角をなす位置である。

すべての他の応力解放法と同じように、応力解放前後の歪の変化を測定し、解析によつて応力が求められる。この方法によると1本のボアホールによる測定で地山応力の6成分を決定することができるが、



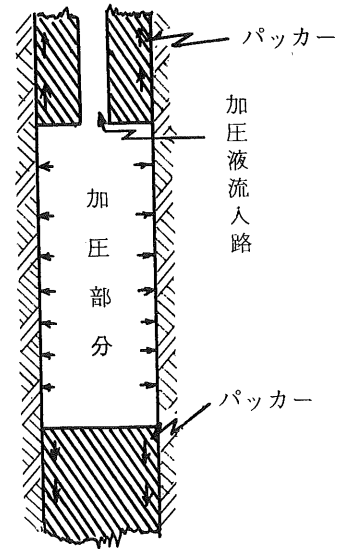
ロゼットゲージ  
第8図

歪計を孔壁に取り付けるのに技術的な困難さがあり、実用的ではない。

### II-2 Hydraulic Fracturing 法

この方法はもともと石油採掘会社が潤渇した油井を刺激して石油を取り出す目的のために1948年頃から始めた方法である。後に Scheidegger はこの方法を利用して地殻応力を測定できることを示唆した。

測定方法は概略次の通りである。先づ直径が40～60mm程度のボアホールを穿孔する。次に地殻応力を求めようとするボアホールの部分にパッカー（一種の栓）を設置して、ボアホールの一部を第9図のように“密封”し、この部分に加圧用の液体を流入させる。この密封部分の長さは通常1m程度である。この加圧によつて移動することのないようにパッカーはボアホール壁との摩擦力によつてしっかりと固定される。

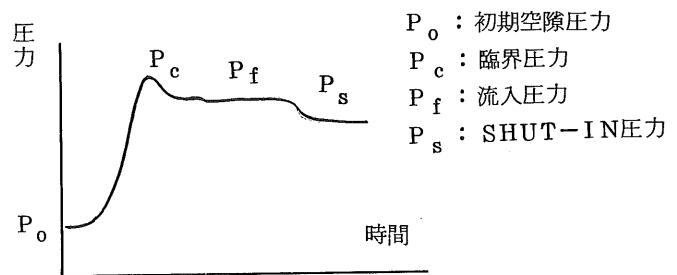


第9図 水圧破さい法

加圧時間と圧力変化の関係を記録しながら圧力を増加して行くと遂にボアホール壁にひびが入り、この時圧力は最高値に達する。

更に液体の流入を続けて行くとひびは孔壁から奥深く拡がり、流入圧力は安定してくる。最後に加圧を止めると、圧力は急速に減少して孔底圧力に拡がったひびをやつと開いておくに足るだけの圧力に落ちつく。

この時第10図のような時間圧力曲線が得られる。圧力はすべて孔底圧力であり、もし表面圧力が測られたような時は補正を加えねばならない。第10図は時間圧力曲線のモデル化された例である。



第10図 水圧破さい法における流入圧の変化

この測定結果から地山応力を求めるには若干の仮定を必要とする。岩盤は一般にもろくて必ずしも一様ではなく、空隙などもあつて完全な意味での弾性体としては振舞わない。Hydraulic Fracturing 法では、岩石はこわれ易い弾性体で一様且つ等方性を有し、空隙があるものとして取り扱われる。また、一次の取扱い（重ね合わせが出来る）ができるものと仮定される。

地殻中の主応力を  $S_1, S_2, S_3$  とあらわすことにする。この内で  $S_3$  は鉛直方向に作用しているものと仮定する。この仮定は大概の場合には正しい。すると  $S_1$  と  $S_2$  は水平応力をあらわすことになる。また引張応力を正に、圧縮圧力を負に取って  $S_2 > S_1$  とする。

Hydraulic Fracturing における地殻応力は3つの応力を重ね合わせたものとしてあらわすことができる。一つは地殻中にボアホールを穿孔することによって初めの構造的な応力が変化させられたものである。この問題は Kirsh が無限の広がりを持つプレートの中に孔をあけ、その面内で直交する方向に  $S_1$  と  $S_2$  の応力を加えた場合の解として求めている。

次にボアホール中に加圧液を圧入すると新たに2つの応力が生じる。一つはボアホール壁に作用する液体の圧力であり、他は液体が地層の空隙に浸透することによって生じるものである。後者は非定常な熱弾性の式を用いて計算できる。

結局、ボアホールの半径方向、切線方向、孔軸方向の応力はこれら3つの解を重ね合わせて得られるが、理論と実際との間の多少の相異のため  $S_1, S_2, S_3$  の代りに実効応力  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  を用いる。こゝに

$$\sigma_i = S_i + \kappa P$$

である。 $\kappa$  はほぼ1に近い値である。この値については色々と提唱されているが、こゝでは  $\kappa = 1$  とする。 $P$  は間隙水圧で、ボアホール壁では、不透水性の岩の場合、液体圧に等しく、ボアホールから十分に遠いところでは間隙水圧のまゝである。

するとボアホールの切線方向の最大応力  $\sigma_\theta$  はボアホール壁上で

$$\sigma_\theta = 3\sigma_3 - \sigma_1 + \left(2 - \alpha \frac{1-2\nu}{1-\nu}\right) (P - P_0)$$

となる。 $\alpha$  は Biot によつて定義された岩石の間隙弾性係数で

$$1 \leq 2 - \alpha \frac{1-2\nu}{1-\nu} \leq 2$$

である。もし岩石が不透水性の時は

$$\alpha \frac{1-2\nu}{1-\nu} = 1$$



となる。また  $P_0$  は初期の間隙水圧である。

液体圧  $P$  を徐々に増加させて行くとやがて切線方向の実効応力が水平面内における岩石の引張応力 ( $\sigma_t$ ) を越える点に到達し、 $S_1$  の方向に縦のひびが入る。この時の臨界液体圧を  $P_c$  とすると上式から

$$P_c - P_0 = \frac{\sigma_t - 3\sigma_2 + \sigma_1}{2 - \alpha \frac{1 - 2\nu}{1 - \nu}} \quad (11)$$

である。この式に於て、 $\sigma_t$  は試料を採取して、測定時におけると同じ Hydraulic Fracturing 条件を作つて実験室で推定することが出来る。

孔壁にひびが入り始めると、圧入液圧によつてひびは奥の方に拡がって行くが、最小仕事の原理に従つて、ひびはそれを拡げるに要する仕事は最小である方向つまり最小圧縮応力方向に直交する向きに拡がって行く。またこの原理から次のことが言える。ボアホールの一部をパッカーで“密封”したまゝ液の流入を止めた時、孔底圧は間隙圧を示し、このいわゆる Shut-in 圧力は最小圧縮圧力  $\sigma_2$  に等しい。この結論はいろいろな研究者によつてチェックされてきたけれどももまだはつきりした結論が出ていないようである。しかし実用的には充分な近似であるらしい。かくして(11)式から  $\sigma_1$  も求められる。

以上は縦ひびが入る場合の問題であるが条件によつては水平なひびが入ることがある。例えば平均の水平実効応力が  $\sigma_3$  よりはるかに大きいような場合であるが、実際にはこのようなことは殆んどない。またボアホールに初めから水平のひびが入っていたような場合にも水平のひびが入る。

Kehle はモデル計算を行つて液体の加圧により生じた実効孔軸方向応力が垂直方向の実効負荷より小さい時は水平ひびが生じないこと、及び実効負荷より大きい時、切線方向実効応力  $\sigma_\theta$  が臨界値に達したら縦ひびが入り、孔軸方向応力が臨界値に達したら水平ひびが入ることを示している。そして2つの水平主応力の値が近づくにつれて水平ひびが入る率が多くなるとしている。しかし彼のモデルは固いパッカーを仮定し、パッカーとボアホールの接触面は、第9図に示すように剪断応力だけが働くとしているけれども、実際のパッカーはゴム製であるからパッカーとボアホール壁との接触面において多少の圧力も加わり、水平のひびが入る可能性は

彼の結論より少くなる。ひびが水平の時は鉛直方向応力  $S_3$  のみが決る。そして  $S_3$  はこの時最小の圧縮応力である。

まれに初めに縦ひびが入って、続けて水平ひびが拡がって行くこともある。

問題はひびの方向を検知することであり、このためにボアホールテレヴィューアとかゴムロビングなどの方法が試みられている。しかし、ひびは加圧を止めると再び閉じるので加圧状態のままひび割れの方向を知ることが出来ない。こゝにこの方法の困難性があり、まだ具体的方法が確立されたと言える段階迄にいたっていない。

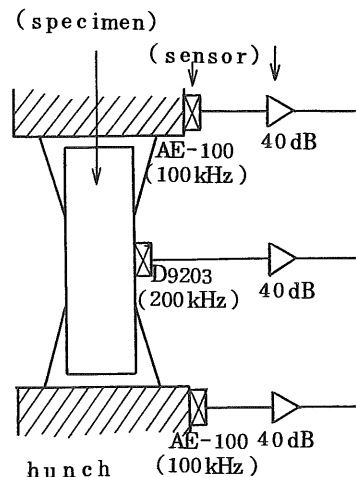
### II-3 Acoustic Emission 法 (AE法)

Acoustic Emission の Kaiser 効果を利用して地殻応力を求めようとする方法が試みられている。Acoustic Emission とは固体が塑性変形または破壊する時に発生する雑音である。固体に圧力を加える時 AE が発生するが、過去に受けた最大応力迄は比較的安定していて AE の発生が少く、加える圧力がそれ以上になると微少破壊が生じやすくなつて AE の発生が急に増える。このような現象を Kaiser 効果という。この現象を利用すれば、サンプリングコアを持ち帰り、実験室内で加圧しながら AE 発生異常点を見つけて、過去の最大応力を求めることができる。

測定の方法は次の通りである。地山応力を求める地点から試料を取り出す。この時地殻中における試料の方向が正しく保存されることが重要である。試料を実験室に持ち帰り方位を正しく定めてから長方形の供試体をそこから切り取る。供試体の寸法は  $4 \times 4 \times 10 \text{ cm}$  程度のものであるから岩石中から取り出す試料は径が  $50 \sim 100 \text{ mm}$ 、長さが  $50 \sim 100 \text{ cm}$  程度のものでよい。この供試体の長軸の両端部及び中央部にセンサーを取りつけて長軸方向から圧力を加えながら発生する AE をカウントする。圧力を加える時、供試体の両端は応力集中のため局所的な AE 発生の異常を生じる恐れがあるので第 11 図に示すようなハンチをつけて加圧する。ハンチはアラルダイトとセメントの混合物など、それ自身が AE を発生せず、剛性も供試体と同程度のものを用いる。AE の発生は供試体に取りつけられたセンサーでとらえられ、電子装置でカウントされる。

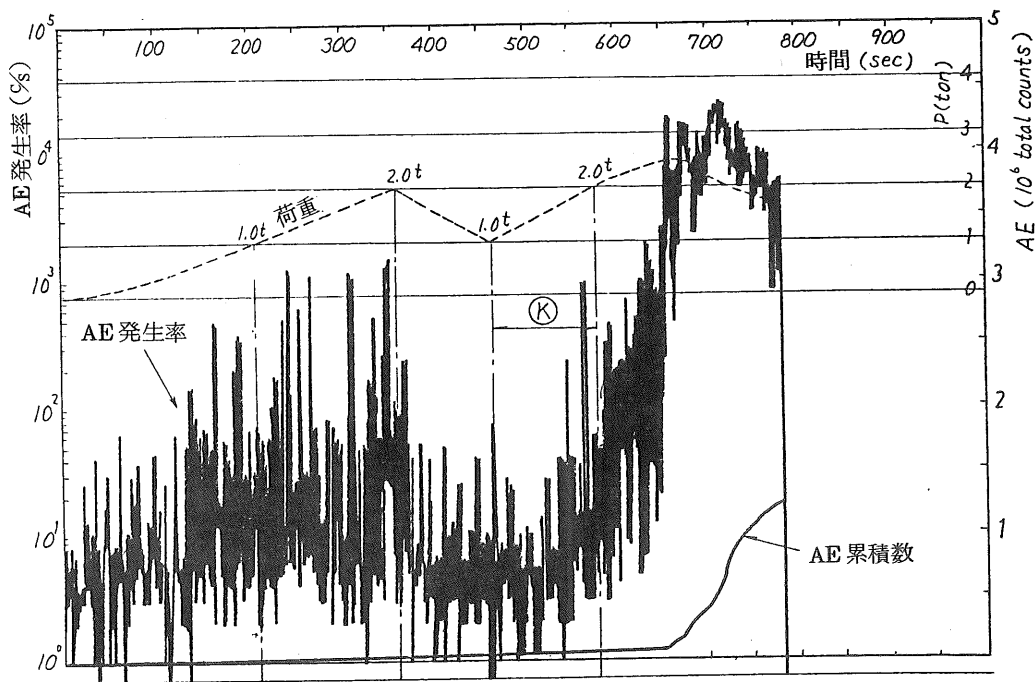
この方法により地圧を推定するのは次のように行なわれる。第 11 図のような方

法によつて供試体に荷重を加えながらA Eの発生を調べると、初めの内は、荷重が増加してもA Eの発生率はほぼ一定であるような状態が続くが、供試体の破壊限界に近づいてくると急にA Eの発生が多くなり遂に破壊に至る。このようなA Eの発生状況の例を第13図に示す。また、発生したA Eの累積数と荷重、時間との関係を第14図に示す。この例によると荷重が2トンのところでA E累積数の勾配が変化しており、この変化点に対応する荷重をもつて推定地圧とするのである。

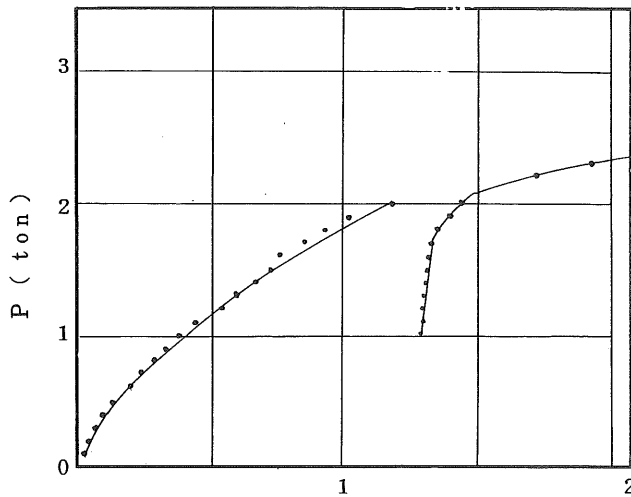


第11図 AE法  
(金井、林、仲佐による)

供試体の材質が弱く局部破壊が進行している時などは Kaiser 効果が明瞭でないことがあり、応力の推定ができない。



第13図 (金川、林、仲佐による)

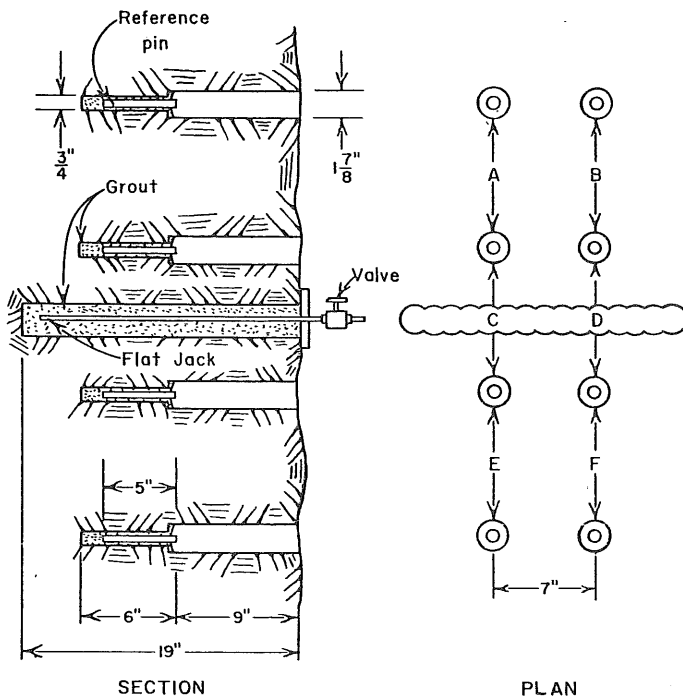


第14図 岩石試料のカイザー効果

### II-1-4 応力補償法

フラットジャック法は初めフランスに於て用いられた方法である。第15図に示すように岩盤中にボアホールをあけ、その中に基準標を固定する。それから標間の距離を伸張計で測る。次に岩盤中に図のようにスリットを入れ、再び標間の距離を測定する。

次に板状のジャッキをスリットに入れセメントミルクで固定し、安定したら加圧する前に第15図にA, B, C……Fで示した標間距離を測定する。次にジャッキに少しづつ圧力を加えながら標間距離を測定し初めの距離、つまり標の偏位が零になる迄加圧を続けるという方法で応力を求める手法である。



第15図 Plan and Section of Reference Pins and Flatjack (Robert H. Merrill 他による)

## Ⅲ 各種測定法の検討

### Ⅲ-1 測定方法の検討

#### (1) 応力解放法

応力解放法とはボアホールを利用して地山応力を測定する方法である。一本のボアホールを利用して、地表から300m程度、鉛直方向にボアホールを掘削し、3次元的地殻応力を定量的に決定できる方法としては

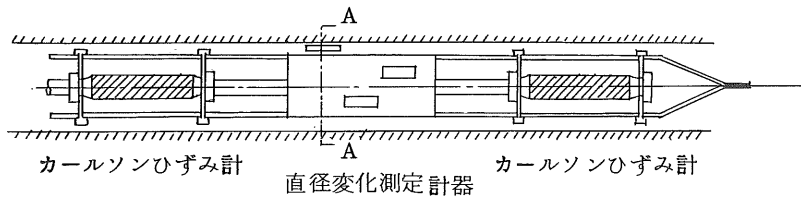
- (a) 応力解放前後のボアホール壁面ひずみ変化を1断面上で3ヶ所以上、しかも1ヶ所で3方向測定する方法
- (b) 応力解放前後のボアホール底面の歪を底面上の場所及び方向を変えて6ヶ所以上測定する方法

とがある。(a)の方法は感度の点では(b)の方法より高いが歪計を接着させるのが困難であまり利用されていない。(b)の方法は岡氏等が開発した8ゲージ素子ストレンセルを用いて、これまで我が国の五つの地点で地殻応力測定に利用されてきた。ただし、これ等の測定は殆んど地下発電所や鉱山の坑道から、水平方向に15m迄の深さに掘削したボアホールを利用して実施されたものであるので、今後鉛直方向に深いボアホールを掘削して地殻応力を測定するには次の2点に関する技術開発が問題点となるであろう。即ち孔底面にストレンセルを接着させる際に

- (a) 孔底面に溜るくり粉をどのようにして排除するかということ
- (b) 深いボアホールを掘る時、地下水が存在すると考えておかねばならないので、水中でストレンセルを接着できるような接着剤の選定または開発することである。

3次元的地殻応力の決定は難しいので、水平面内での地殻応力の測定ということに限れば、

- (c) 応力解放前後のボアホール直径変化を1断面で3方向以上測定する方法。この方法は更にこれに孔軸方向の変位測定を加える方法(第16図)が電力中研で開発され多くの地下発電所で実用化されているが、この方法でも1本のボアホールでは3次元的地殻応力は決定できない。



第16図 直径変化測定計器(御牧による)

## (2) Hydraulic Fracturing 法

Hydraulic Fracturing 法は米国等で盛んに地殻応力の決定に使用されている方法で、比較的深いボアホールでも技術的困難が少ないので実用化が早い技術と思われる。地山応力を測定する他のすべての方法が歪を測定して応力を求めるのに対し、この方法では直接に応力が求まるのが特徴である。ただし、岩石強度の等方性を仮定したり、最小主応力が Shut-in 圧力から求められるなどの仮定が解析の中に入ってくる。また解析の上で岩石の割れ目の方向を検知しなければならないという問題があり、尚検討の要があろう。

測定可能な深さに関しては理論的には制限がない。深くなればなる程、パッカーを正しく設置して、水圧に堪えられるようにするのが難しくなるが、パッカーの技術が上ればそれに応じて深く測れるようになろう。地震予知の目的のためには更に精能のよいパッカーを開発する必要がある。尚、セメントのパッカーを用いれば 200 m 位迄測定が可能であるという報告もあるようである。

日本ではまだこの方法によつて地殻応力を測定したという例を聞かないが、岩盤中にセメント等の化学材料を圧入する時、孔壁の耐圧性をモニターするために類似の方法は用いられている。この場合は Hydraulic Fracturing を行うことを目的としているのではないので、パッカーの能力も 50 気圧程度迄であるが、このノウハウを地殻応力測定の目的に用いることはできよう。しかし、200 m 以上深いところで Hydraulic Fracturing 法により応力測定を行うには更にパッカーの精能を上げねばならない。

とも角精度の点を別にすればこの方法は世界中で、深いところを測定している唯一の方法である。

### (3) Acoustic Emission 法

この方法の長所は次の通りである。

1. 深いところのデータがとれそうなこと。
2. クラックの影響に比較的わづらわされない。
3. ボーリングコアが使えるので比較的情報量が多い。
4. 立体的に方向による応力の差を検知できる。

また短所及びまだ未知の部分は次の通りである。

1. 数例であるが応力解放法と比較したところでは、応力解放法で  $90 \text{ Kg/cm}^2$  と出たところで、AE法では  $120 \sim 140 \text{ Kg/cm}^2$ 、応力解放法で  $15 \text{ Kg/cm}^2$  と出たところで、AE法では  $20 \sim 25 \text{ Kg/cm}^2$  と大きく出る例が多い。これ等の調査で用いた岩石は凝灰岩、結晶片岩、砂岩などである。
2. 試験の方法として、三軸応力状態で、つまり現地の In-Situ の状態を再現させてはまだ行われた例がなく、室内での一軸試験にとどまっているが、 $100 \sim 300 \text{ m}$ の深さになると三軸的な方法で変曲点を検知するというところ迄向上させなければ基本的に問題があろう。
3. まだ新しい技術であるので間隙水圧の状態を再現しなければならないということが未解決の問題として残っている。
4. 破壊に近いところでは、破壊によるAEと潜在的な地圧によるAEが混在していて、分離できないので材料自身は強い方が良い。
5. まだ深いところで行った例を見ない。
6. ボアホール中の方位と傾斜を確定することは難しくはないが、そのままの状態でもコアを引き出して、方位づけをするということに問題がある。このような技術は石油関係の方向にあるようであるが、とに角立体的な拘束状態を再現するということが必要であらう。
7. 地殻には静水圧的圧力があるから、それを除いてこの方法により差応力をしかも三方向求めるということはこれから解決しなければならない問題であらう。
8. サンプルを取ってきて実験室で試験できるということが利点である。

#### (4) Flatjack 法

Flatjack 法は現在応力解放法に圧倒されて既に歴史的使命を終つたと言つてもよい。この方法では或る一定の方向の応力しか測れないし、人間が入つていけるような空間でしか測定できないので地震予知には適さないであろう。しかし岩盤の変形係数が介入しないという利点がある。

#### (5) X線による方法

残留応力のない標準の合成された結晶の格子間隔をあらかじめ決めておき、実際に取つて来たコアの結晶の中の格子間隔をX線で測定して差引きで歪を出すという方法である。岩石は局部的には非常に高い応力がかゝつているのでそれから巨視的な応力を出すことはむづかしい。ミクロンのオーダーの測定から数kmのオーダーの地域の応力を推定するのは危険である。

#### (6) その他

地圧が極めて強いところでボーリングを行うとコアが板状に割れることがある。このディスクング現象からもおよそその応力が推定できる。ただしいつでもというわけにはいかない。

尚日本は地形が複雑なので、あまり浅いところで応力測定を行うと、地形に影響されて測定された応力が必ずしも造構的な応力をあらわしてるとは限らないという可能性がある。地表面の状況などに注意を払つて測定を行う必要があろう。

### III-2 応力測定と地震予知

応力解放法を行うためのボアホールの深さは通常は10m程度であるから地殻の深いところの応力を測定するということになると鉱山などの坑道を利用して、深部の坑壁にボーリングを行つてから歪の測定を行うより他はない。我国では別子鉱山の坑道を利用して地下2,200mの深さで測定したのが最も深い測定の例としてある。残念ながら弛みのゾーンがひどくて測定には成功しなかつたが、これを除くと日本で利用できる鉱山の深さは1,000m位迄であろう。Hydraulic Fracturing 法によれば可成り深いところ迄応力を測定できるが、いづれにせよ測



定の範囲は2～3 km程度である。一方、地震が地下2～3 kmより浅いところで発生するということは殆んどないから、地山応力測定方法により測定された結果を、地震予知の目的に利用するには、このあたりの考慮が必要である。

我々が測地的な手段等によつて求める地殻の歪は、歪の変化量を測定しているのに対して、鉞山などで用いられている応力測定法は応力の絶対値を与える。このことから、後者は前者によつて得られた結果を解釈する上で重要な意味を持つことになろう。例えば、変形は進行しているけれども応力エネルギーが蓄積されているのか、解放されているのか、歪の測定だけからはわからないというような場合に、応力を測るということは、応力の絶対値のレベルを知ることと、エネルギーが貯つているかどうかの方向を判定する上で有意義である。歪の変化量が大きくても、応力の絶対量が小さければ、その変形は塑性的なものであるという推論ができる。

また、地震が発生する深さでの応力測定値が得られなくても、数多く測定を行つて応力分布図を作ることが出来れば、これは地震予知の上で有用である。

ただし、変化量の測定は高感度で且つ安定して行なえるのに対し、絶対量の測定は困難で且つ精度も悪い。また歪の変化は、地震予知に関して、前兆という意味で決定的な情報を含んでいる可能性があるが、絶対値の方は、岩石の破壊強度が一定なものではなく、バラついているという点で、得られた結果の解釈に限界がある。地震予知では前兆現象ということが本質的なものであつて、予知のためには、相対量の測定の方が有効であろう。絶対値の測定は相対値の解釈のための補いとしての意味を持ち過大評価は危険である。

尚地震予知の目的のためには、地殻応力中の水平成分が重要である。この水平成分の鉛直分布を、地質構造的に均質でなるべく平坦な場所を選んで測定しておけば、いろいろな手法で行なわれた各地の測定結果を比較する上で意味があろう。

#### IV 国内における地山応力の測定例

国内においていろいろな方法で測定した地山応力の測定結果を委員の方々の御好意により集めることが出来た。これを次に示す。これ等はすべて地震予知を目的として行なわれたものではない。またこの表の終りに Hydraulic Fracturing 法で行なわれた沢山の外国の例の内の数例を掲げた。

第 I 表

発注機関	実施会社	目的	場所
古河鉱業足尾鉱業所	同所及び東大・工・資源・鈴木(現西松)研	山はね予知と防止	足尾鉱山坑内
東京電力	京大、電力中研、鹿島建設	地下発電所掘削	新高瀬川発電所
土木学会青函トンネル土圧委員会	京大、鹿島建設	青函トンネル掘削	青函トンネル竜飛方先進導坑
中部電力	京大、開発エンジニアリング	地下発電所掘削	奥矢作第2地下発電所
京大・奥村組	京大・奥村組	〃	奥吉野地下発電所
京大	京大	地山応力測定	小坂鉱山上向鉱床第2鉱体
京大	京大	〃	柵原鉱山下部鉱体
北海道電力	電力中研、日本特殊土木	地下発電所掘削	北海道日高新冠地下発電所
東北電力	電力中研・前田建設	〃	福島県第2沼沢沼地下発電所
鉄道建設公団	電力中研(京大・鹿島)	トンネルの土圧	青函トンネル竜飛岬
東京電力	電力中研	地下発電所掘削	群馬県水上玉原地下発電所
中部電力	京大・電力中研	〃	愛知県奥矢作黒田地下発電所
東京電力	電力中研・ダイヤコンサル	発電所基礎	新潟県発電所予定地点
関西電力	京大(丹羽)	地下発電所掘削	京都府宇治喜撰山地下発電所
関西電力	電力中研	〃	京都府豊岡奥多々良木地下発電所
関西電力	京大・電力中研	〃	奈良県奥吉野地下発電所

方 法	深 さ	可 否	備 考
孔径変化法	970m	可	日鉱誌 86. 1970
〃	250	可	第8回岩盤力学シンポジウム 1973
8素子孔底歪法	244	可	
〃	280	可	
〃	175	可	
〃	312		
〃	375		
オーバーコアリング法	120	可	電中研報告 №70544
〃	150	否	
(オーバーコアリング) A E 法	200	可	土士学会論文集 1977
オーバーコアリング	300	可	第9回岩盤力学シンポジウム 1975
〃	200	否	
〃	40	否	
光 弾 性	180	可	喜撰山発電所工事誌
オーバーコアリング法	180	可	電中研報告 №71525
〃	220	否	

発注機関	実施会社	目的	場所
中国電力	電力中研	地下発電所掘削	広島県広島 南原地下発電所
中国電力	電力中研・大成建設	〃	鳥取県 俣野地下発電所
四国電力	電力中研・鹿島建設	〃	高知県 本川地下発電所
四国電力	電力中研・応用地質	発電所基礎	愛媛県 発電所予定地点
九州電力	電力中研・西日本技術	地下発電所の掘削	熊本県 大平地下発電所
九州電力	〃 〃	〃	佐賀県 天山地下発電所
MISSOURI RIVER DIV. U.S. A.C.E	WISCONSIN大学 MINNESOTA大学		アメリカ Ohio
〃	〃		アメリカ Illinois
	Ruhr大学	中央ヨーロッパの地 殻応力を求めるため	ドイツ Hohenzollen- Graben
	Godbey と Hodges による		アメリカ Oklahoma
	〃 〃		アメリカ Oklahoma
	Vanbey と Hodges による		ベネゼーラ
	Fraser と Pottitt による		西テキサス
	North Dover Field		北オクラホマ
	Wisconsin 大学		コロラド

註； 第7欄の可否とは報告書入手の可否を示す。第8欄 日鉱誌； 日本鉱業会誌

電中研報告； 電力中央研究所

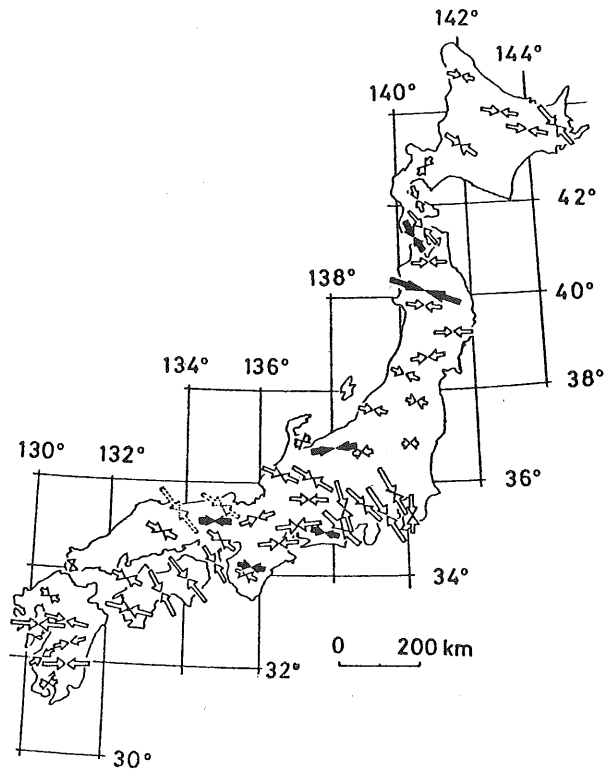
方 法	深 さ	可 否	備 考
オーバーコアリング法	170m	可	電中研報告 №74520
〃	150	否	
〃	180	否	
オーバーコアリング法 A E 法	50	否	
オーバーコアリング法	150	可	電中研報告 №375505
〃	180	否	
Hydro-Fracture	約 2,650Ft	可	Rock Mechanics
〃	約 310Ft	可	〃
〃	30m	可	Pageoph. 113 1975
〃	1,005	可	Trans AIME 213 1958
〃	885	可	〃 〃
〃	565	可	2nd Ann Mtg. AIME 1957
〃	485	可	J. Petrol Tech 14 1962
〃	2,135	否	J.G.R. 69 1964
〃	3,700	可	I.S.R.M. 1972

報告

## V 地山応力測定に関する各国の事情

我国における地山応力の測定は、専ら、坑道における災害防止のような工学的目的のために行なわれ成果を挙げてきたが、地質構造や地震との関連において論じたもの、或いは調査を行つたものは極めて少い。例えば、新高瀨川地下発電所において孔径変化法により測定した地山応力が、断層解析から求めた主応力の方向や測地学的な手段により求めた平均主歪の方向、または浅発地震の起震力の方向などとよい一致を示すことが述べられた報告、或いは第17図に示すように、全国数箇所の鉱山や、地下発電所で測定された地山応力と測地的な方法により得られた歪の方向がよい一致を示すことについての報告の例を散見する。しかし、我国の複雑な地質構造を論ずるには尚資料の数が充分ではないようである。

地震や地質構造との関係において地殻の応力を測定した例は、外国においてはいくつか見られる。ここにその数例を示す。



第17図 (岡氏による)

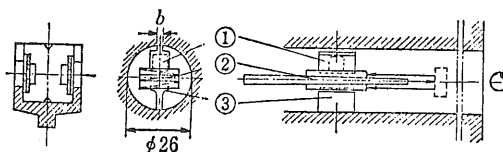
### V-1 中国

中国の地震研究については、資料が少く詳しいことは明らかではない。しかし我国の新聞でも報ぜられた通り、いくつかの地震の予知に成功しているようであり、入手された僅かな資料によるだけでも、地震予知に対する研究は熱心で各種の観測

を積極的に行っている。この中には応力の測定も勿論含まれている。

中国が行っている地山応力の測定は、彼等自身が開発した歪計を用いて行なわれている。方法は、応力解放法で、孔底歪法、或いは孔径変化法の一つである孔径変化荷重法が用いられている。孔径

変化荷重法というのはボアホールの孔径方向に荷重計を設置し、応力解放前後における孔径の変化により荷重計にかゝる荷重変化を測定して応力を求める方法である。

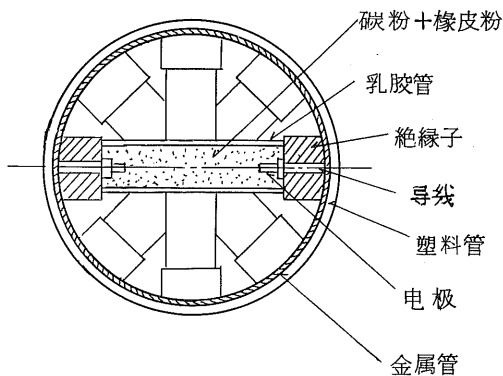


第18図 N. HAST の磁歪式地圧計

荷重計には例えば HAST が考案

した第18図のような磁歪式測定器がある。これは鉄とニッケルの合金をコイルで巻き、外側をパーマロイのスクリーンで覆つたものでできていて、これを孔壁に強く押しつけて固定し、応力解放前後の荷重変化を磁歪効果を利用して電気信号の変化に変えて検出するものである。中国

は HAST の磁歪効果を利用した検出器の他に、第19図に示すような検出器を用いて測定しているようである。この後者の装置は、炭素粉とフォームラバーからなる検出部を有し、土圧による接触抵抗の変化を電流にかえて測定するようになっている。

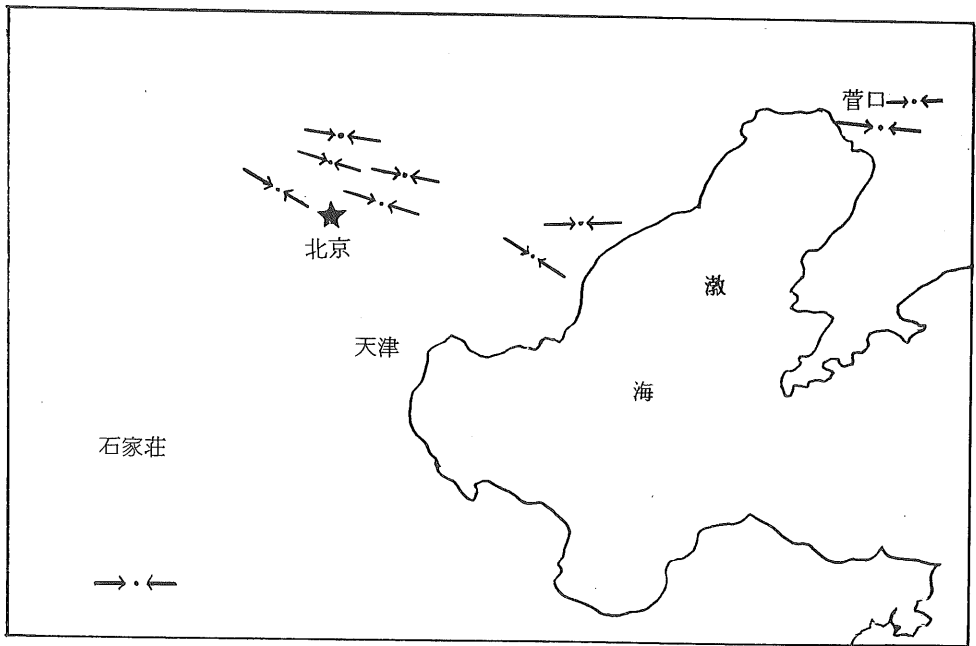


第19図 地応力探頭示意图

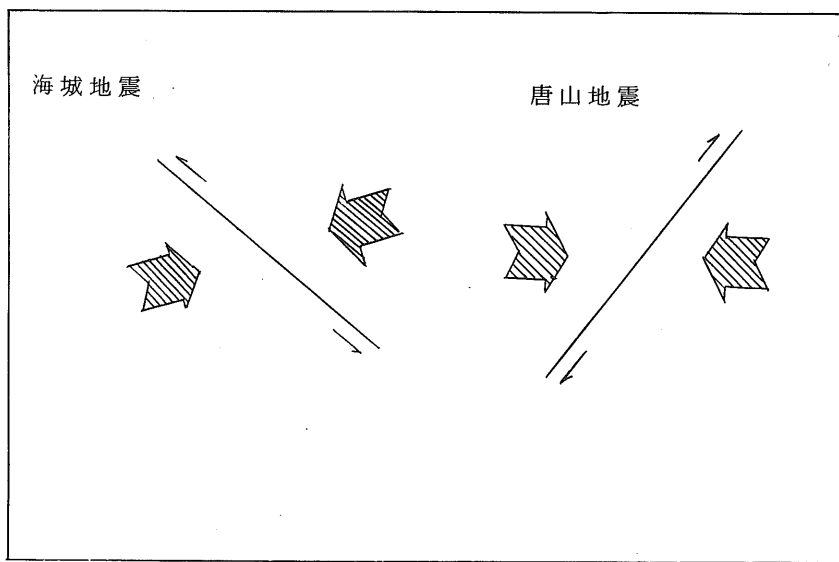
これ等の方法によつて行なわれ

た応力測定結果の例を第20図に示す。同じ地域について地震の発震機構から求めた主応力方向を第21図に示す。中国ではまた応力調査のみならず、現場のモデルを作り、ナイフで切れ目を入れて断層を再現し光弾性実験を行つて応力集中の様子を調査しているようである。第22図にその一例を示す。同図の流線は光弾性実験による主応力方向線であり、丸印をはさむ矢印は現場における実測例である。また太い矢印は実験の際の圧縮方向である。

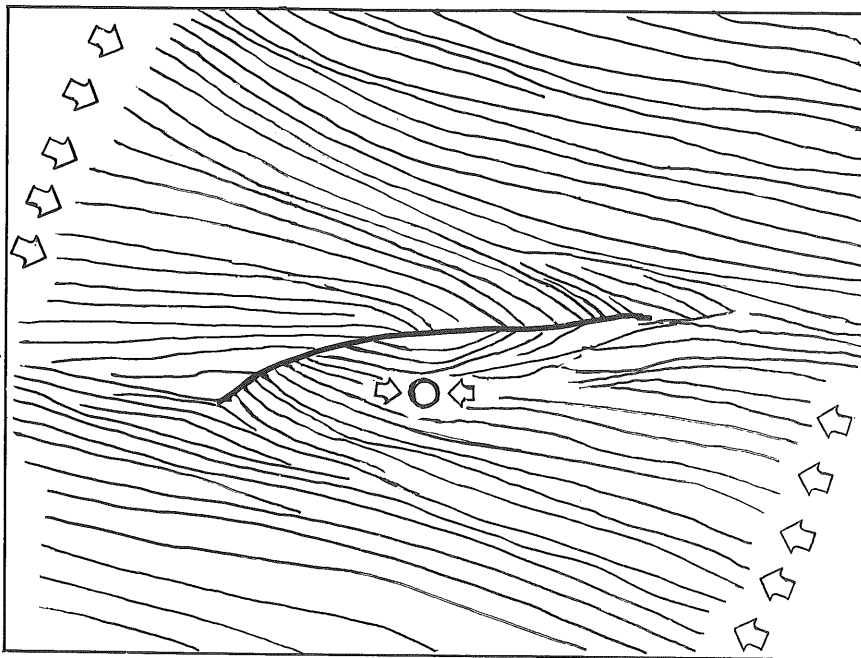




第 20 图

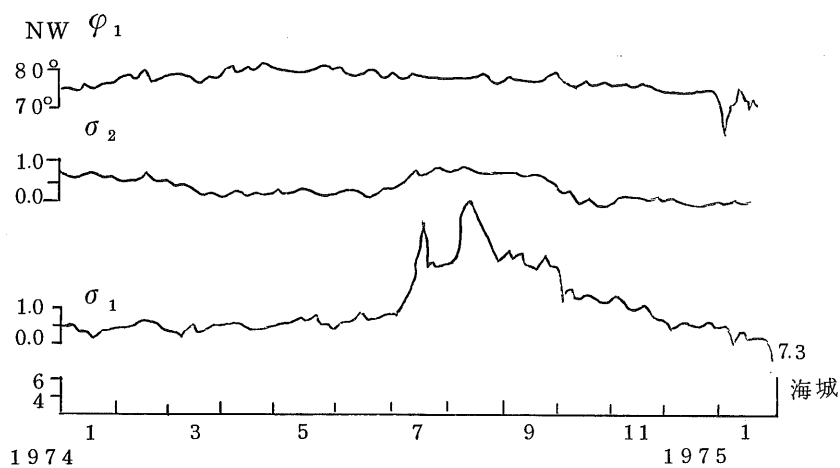


第 21 图



第22図

絶対応力ばかりではなく、応力の変化の観測もまた行なわれている。計器は磁歪式のもので、昆明では深さ83mのところセットされ観測を記録しているという。第23図にその一例を示す。图中、 $\sigma$ は主応力であり $\varphi_1$ は主応力方向の変化を示している。



海城地震前地应力曲线图

中国ではまた、アマチュアによる応力観測も盛んで短期予報を目的とし、数百ヶ所で観測が行なわれているようである。方法は第19図に示すような計器を2～3mの深さに埋め込んで導線を地上に引き出し電流の変化を電流計で読み取る、いわゆる土法である。

中国で行っている地震予知の観測はすべて日本でも行なわれているものであるが、応力測定も含めてその方法は組織的総合的である。

## V-2 アメリカ

アメリカにおける地殻応力調査については豊富に資料を入手できる。それによると、調査はいろいろなところで、いろいろな方法により行なわれているようである。本報告ではそれらの中から主要なもの1～2の例を取り出して報告する。

アメリカの Denver 市郊外で、或る軍需工場が廃液を深井戸に圧入したために地震を誘発した事件は有名である。このためにいろいろな調査がなされたが、同じ Colorado 州の Rangely 油田においても Denver の例に刺激されていろいろな詳しい調査が行なわれた。この油田は長さ19km、幅約8kmのWeber砂岩の背斜構造地帯にあり、油田地帯を横切つて右横ずれ断層が走っている。

もともとの調査目的は、この地域に掘られた深井戸に水を圧入する時の水圧と地震発生の関係をしらべることであったが、更に進んで、圧力とその圧力によつて生じる断層に沿つてのズレ（これが地震誘発に関係する）の関係を量的に調べるための応力測定も行なわれた。測定深は約3.7kmであるので Hydraulic Fracturing 法が用いられている。この時の測定の特徴はパッカーに自記記録計（Amerada ゲージ）をつけて孔底圧と時間との関係を記録させ後からそれを引き出して読み取っていることである。しかし、これだけでは水を圧入している時に孔内壁にどのようなことが進行しているか分からないので別にもう一つの計器をモニター用に取り付け地上で記録させている。一連の測定が終つた後、Amerada ゲージを引き上げて地上の記録と比較し解析を行つている。この時の圧力時間曲線を第26図に示す。もう一つの特徴は孔内に生じたひびの様子をしらべるためにインプレッションパッカーを用いていることである。測定の後で、ひびが入つた部分をきれいに掃除してから長いインプレッションパッカーをその部分に挿入し、パッカーをふくらま

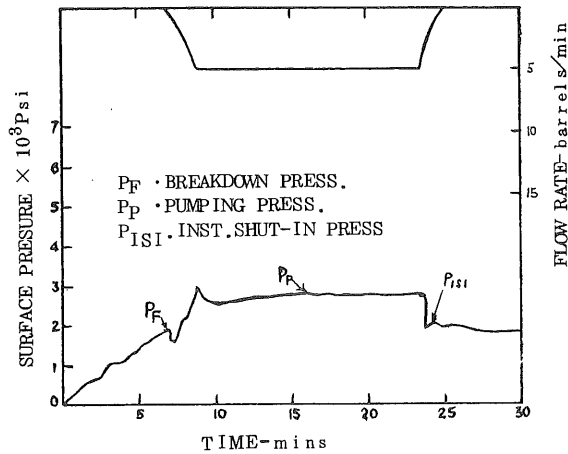
せる。パッカーは孔壁に強く押しつけられてひび割れの跡を残すから、これを引き上げてしらべればよいわけである。

この測定から得られた歪の方向は、後述するように地表面で6種類のいろいろな方法で測定した歪の方向の平均とよく一致している。(第28図)

またこの地域には、井戸に圧入された水の水圧と地震の発生との関係をしらべるモニター計器が取り付けられている。第27図はこれらの関係を示した図である。この測定から求められた(地震が生じる)臨界孔内圧と Hydraulic Fracturing 法で求めた圧力(この圧力によって断層に沿うズレが生じる)とは良く一致した。

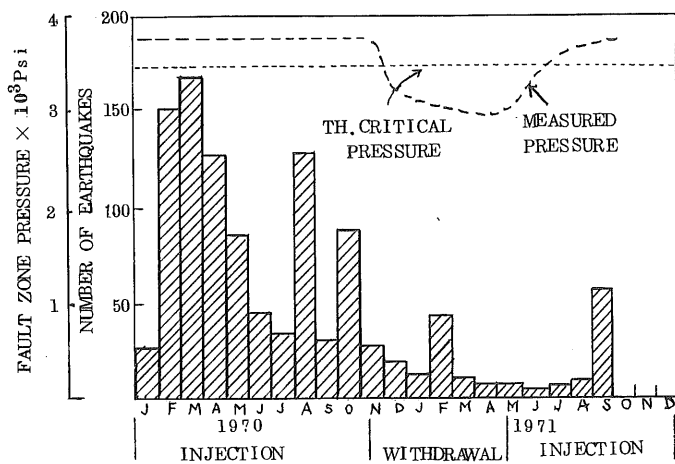
この調査は地震と地殻応力との関係をしらべるために、Hydraulic Fracturing 法を深い部分の応力測定に適用した一番初めの例として興味深い。

Hydraulic Fracturing はアメリカにおいて最もよく行なわれている方法であるが、この他にも応力解放法や地震の発震機構を利用する方法などによつて



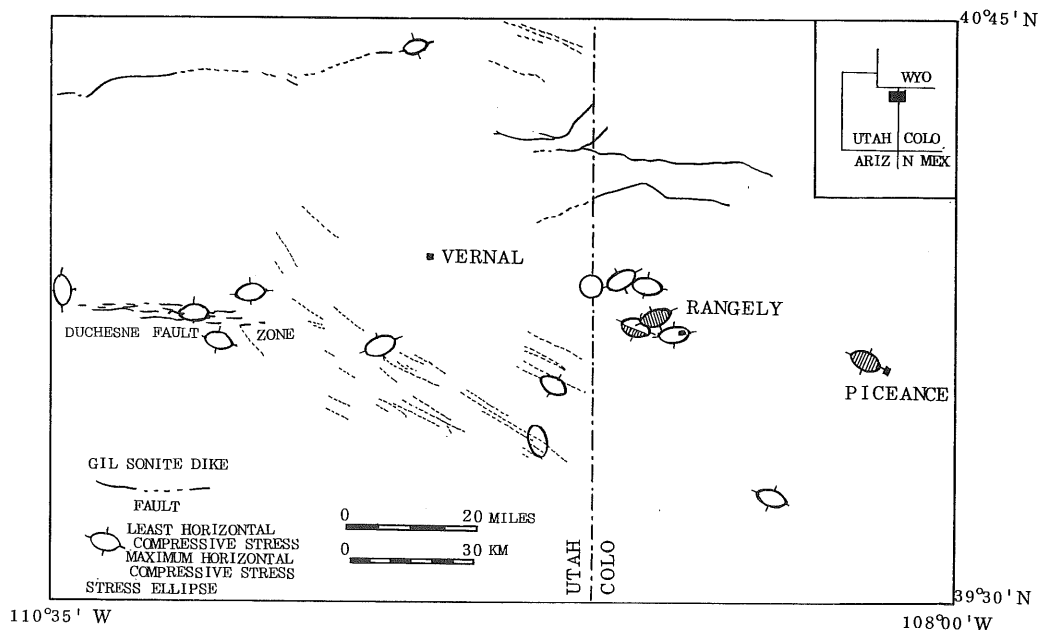
第26図

SURFACE PRESSURE AND FLOW RATE VERSUS TIME AS RECORDED DURING THE TEST. (Haimsonによる)



第27図

FREQUENCY OF EARTHQUAKES AT RANGELY, BOTTOM-HOLE PRESSURE IN MONITORING WELLS, AND CRITICAL PORE PRESSURE AS PREDICTED BY THE TEST.

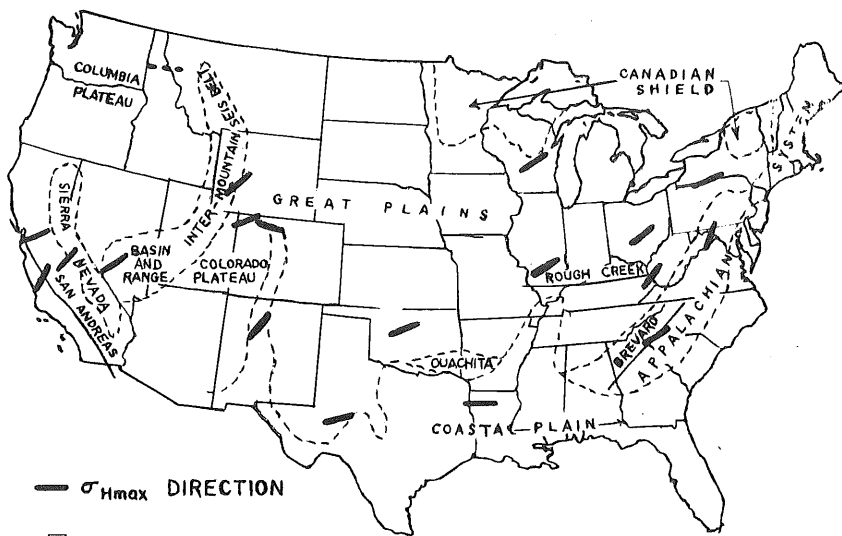


第28図 Map of Uinta Basin region showing orientations of principal horizontal stresses, major faults, and tensile fractures filled with gilsonite.

地殻応力或いはその方向が求められている。第28図にその一例を示す。同図の右肩に示すように、これはアメリカ Colorado 州と Utah 州との境の附近での測定例である。同図中楕円形の長軸は最大応力の方向、短軸の方向は最小応力の方向である。Rangely の外側にある白抜き楕円は光弾性ゲージをいろいろな時代の堆積岩の露頭に貼り付けて応力解放法により測定したものである。Rangely のすぐ近くにある3つの白抜き楕円は、いろいろな測定者がそれぞれの位置で測定した10以上の測定例の平均である。北東部では応力解放法、光弾性ゲージ等いろいろな方法で測定が行なわれた。斜線をほどこした楕円は Hydraulic Fracturing 法によるもので、この内 Rangely のものは前述のものである。Piceance の測定は7本の井戸の測定の平均値である。7つの測定のバラつきは数度の程度で良い一致を示していた。半分斜線をほどこしたものは Rangely の油田に生じた地震の発震機構を利用する方法で求めた66例の平均である。第28図を見ると、数例を除き良い一致を見せている。地山応力測定法のような局

部応力を求める方法で、このように広い範囲に渡って一様な結果が得られたということは著しいことである。また、坑道や Hydraulic Fracturing 法などによつて行つた深い部分の測定によると、水平応力が垂直応力より大きくなっていることが多いということも興味ある事実として求められている。

第 29 図に Hydraulic Fracturing 法で求めたアメリカ国内の歪図の例を示す。



第 29 図

Map of the United States showing known hydrofracturing stress direction results  
[from Haimson, 1961]

(shoemaker による)

## VI ま と め

日本は環太平洋の地震帯上にある世界有数の地震多発国で、巨大な地震にも頻繁に見舞われ、その被害は歴史に残されたものだけを見ても莫大なものである。

このため、明治以降になつて日本に近代的な科学の方法が導入されてから、地震の科学的な解明が着実に進められ、多くの重要な現象が少しずつ明らかにされてきた。こうしたすぐれた成果に、近年地球科学の分野で明らかにされてきた地球の興味ある事実によつて物理的な解釈が与えられ、或いはそれ等の現象を統一的に説明するモデルなども提唱されるようになってきている。

地震は、造構的な力の作用によつて地殻内部に生じた歪がその限界に達した時、突然断層を生成して歪応力を解放する現象であるから、地殻内部の応力の状態を知るといふことはその研究に有用である。従来我国では傾斜計や歪計などを用いる方法、或いは測地的な方法等によつて地殻中の歪の調査が行なわれ、地山応力を測定する方法によつて地殻の歪を調査する研究は、僅かな例を除けば殆んど行なわれてこなかつた。

地震予知が社会的な緊急課題として大きくクローズアップされてきた今日、予知への一つのアプローチとして、応力を測ることが認識され、今回研究委員会が開かれて、応力測定の方法が検討されることになつた。この要約は次のとおりである。

### (a) 応力の測定に関して

- (1) 現在用いられている地山応力の測定方法には、応力解放法と Hydraulic Fracturing 法とがある。この他に、最近 Acoustic Emission を測る方法が試みられている。
- (2) 応力解放法の内、孔底の歪変化を測る方法は三次元的応力が求められるが、測定は孔径変化法が安定している。但しボアホール軸に直交する面内の応力しか測定できない。
- (3) Hydraulic Fracturing 法は応力解放法に較べてより深部の応力を測定できるが、応力の計算に仮定が入る上、精度の点で応力解放法より劣る。また三次元的な応力を求めることはできない。

- (4) 測定深に関して応力解放法は100 m位迄なら、現在の方法のままでも比較的簡単に行える。Hydraulic Fracturing 法は、理論的には制限がない。
- (5) しかし、地震予知の目的のためには水平面内の応力成分が重要であるから、これが求められれば三次元的な応力を求めるということはそれ程重要ではない。
- (6) Acoustic Emission 法は測定が比較的簡単で、岩石から試料を取り出せば、後は室内で実験が行なえる。しかしこの方法で求めた応力は、過去に加えられた岩石の最大応力であり、上の方法で求めた応力と意味を異にする。また過去にいろいろな方向から力が加わった場合には応力が定まり難い場合もある。

#### (b) 応力測定地震予知における意義

- (1) 地震波速度の変化がいわゆる6 km層といわれるところに生じるとされている。従つて6 km層程度の深さに達するボーリングを行つて応力測定を行うのが望ましいが、費用は莫大なものとなる。
- (2) 応力測定から得られるものは絶対応力であり、絶対量の測定は相対量の測定に較べて精度が悪い。多額の費用をかけて精度が悪くては価値が減ずる。
- (3) 従つて、100 m程度の深さでもよいから、広く面的に多数の点で測定を行うのが有効である。
- (4) このような目的に限れば、応力解放法が有効に使えらる。またパッカーの技術が改良されれば、Hydraulic Fracturing法により深いところでも測定ができる。後者は理論的な仮定が入るから両者を併用して行うのが有効であろう。
- (5) 先づ50 m程度の深さで試験的に調査を行つて、次第に深いところへ進めるように段階的に行うのが良い。
- (6) AE法による応力測定もまた異つた立場から有効である。応力解放法のような、測定時における地山応力を求める方法とAE法を併用して行えば、興味ある結果が得られるかもしれない。
- (7) 地震予知では前兆現象が本質的なものである。

この点では、測定精度の点でも、前兆に関する情報が多いという点でも歪の変化量を測る方が有利である。しかし歪の限界点を探るためには、絶対応力を測定する必要がある。このあたりを認識して測定結果を解釈すべきである。



歪計，伸縮計等，従来の方法による歪の測定については既に多くの資料の蓄積があり，それ等の資料を地震予知の立場からどのように解釈するかということについては十分な検討が行なわれてきた。しかし地山応力測定法による応力測定を地震予知の目的で行つた例は殆んどない。従つて資料を集め，そこから地震或いは予知のために有用な情報を引き出すことはこれからの問題と言える。地震予知はいろいろな分野の学問の総合科学であるから，このような資料から新しい事実が引き出せるなら，地震予知の問題を前進させる一つの力となるであろう。

## Ⅶ 委員会の構成

委員会は次のメンバーによつて構成された。この調査は本委員会の指導の下に行なわれたものである。

氏名	勤務先	役職
林正夫	電力中央研究所土木技術研究所	地盤耐震部長
平沢朋郎	東北大学地震予知観測センター	教授
岡行俊	京都大学工学部資源工学科	助教授
田中豊	京都大学地球物理学科	講師
西松裕一	東京大学工学部資源開発工学科	教授
茂木清夫	東京大学地震研究所	教授

## VIII 文献リスト（附録）

本項には、地山応力の測定に関する内外文献と地震及びテクトニクスに関する内外文献の主要なものを挙げた。

### VIII-1 国内文献リスト

◎は重要論文

#### (1) 地山応力の測定に関するもの

平松良雄, 岡 行俊, 伊藤英文, 田中 豊	◎岩盤内の地山応力と地学的に推定される地殻応力との関係	材料 Vol. 23, 248号, 1974
岡 行俊, 平松良雄	◎ひずみまたは変形測定値からの岩盤内応力の決定	日本鉱業会誌 Vol. 84 No. 957, 1968-1
金川 忠, 林 正夫, 日比野敏	◎初期地圧測定に関する二, 三の考察	第9回岩盤力学に関するシンポジウム 1975-1
石島洋二, 鈴木 光	◎ボアホールを利用する岩盤応力の測定に関する理論的考察	第3回岩の力学国内シンポジウム 1970
林 正夫, 日比野敏 金川 忠	◎地下発電所の掘削に関する弾性粘性解析と実測などの問題点	〃
御牧陽一	◎新高瀬川地下発電所地点における初期地圧の測定結果について	第8回岩盤力学に関するシンポジウム講演概要
岡 行俊, 平松良雄	◎ボアホール壁面の変位と地山応力との関係	日本鉱業会誌 Vol. 84 1968-7
平松良雄, 岡 行俊	◎円形立坑・斜坑・坑道のまわりの応力の一般解	〃 Vol. 78 No. 884, 1962-2
金川 忠, 林 正夫, 仲佐博裕	◎岩石供試体における地圧の立体3成分の Acoustic Emission による推定試み	電力中央研究所研究報告 335017
岡 行俊, 平松良雄, 亀岡美友	◎ボアホール底ひずみ解放法による岩盤応力測定法の改良とその測定結果	第5回岩の力学国内シンポジウム 1977-2

岡 行俊, 平松良雄, 斉藤敏明, 菅原勝彦	◎三次元応力解析による観測方程式の確立と応用	日本鉱業会誌 Vol.92 №1055 1976-1
平松良雄, 岡 行俊 亀岡美友	応力解放法による岩盤応力測定とその結果の利用	昭和51年度合同秋季大会分科研究会 C-8 '76
高多 明, 緒方義弘	絶対地圧測定用の機器の開発と基礎試験	昭和46年度日本鉱業会春季講演会要旨
鈴木 光, 石島洋二	美唄岩鉱における岩盤応力の測定結果とその解釈	"
平島, 古賀	異方性岩盤内の応力測定法に関する研究	第4回岩の力学国内シンポジウム 1973
鈴木 光, 石島洋二	孔径変化法による盤圧測定の理論と実際	材料 Vol.17, №181 1968-3
" "	応力解放法による地圧測定に関する1, 2の基礎的考察	日本鉱業会誌 Vol.86 №983 1970-3
石島洋二, 小出 仁, 鈴木 光	孔壁変形法による岩盤応力測定に関する理論的考察	" Vol.86 №993 1970-12
平松良雄, 岡 行俊, 菅原勝彦	応力解放法による地山応力測定結果処理について	日本鉱業会昭和47年秋季大会分科研究会資料
北原義浩, 金川 忠	(奥多々良木発電所の地山応力測定と検討に関する報告書)	電力中央研究所技術第2研究所報告 71525, '71
平松良雄, 岡 行俊, 荻野正三	三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解析	日本鉱業会誌 Vol.78 №885, 1962-3
平松良雄, 岡 行俊	応力解放法による岩盤内応力測定に関する研究	日本鉱業会誌 Vol.79 №906 1963-12
林 正夫, 日比野敏, 金川 忠	地下の掘削における初期地圧, 偏圧などに関する二, 三の問題点	第7回岩盤力学に関するシンポジウム講演要旨
川本眺万, 高橋由行	岩盤初期応力の一測定法について	土木学会論文集 №146 1967

富長勇作, 木下重教	多孔法による地圧測定法について	日本鉱業会誌 Vol.89 No.1025, 1973-7
丹羽義次, 小林, 福井, 柳谷, 大津	山はねに伴う Acoustic Emission に関する考察	第10回岩盤力学に関するシンポジウム講演要旨
高橋, 飯塚	新丹那ざい道における地圧測定と設計施工に対する貢献	岩の力学国内シンポジウム(第1回)講演習
高多 明	鉱山における岩盤計測の実例, 現場における岩盤計測と設計施工への応用	第2回岩の力学講演会講演集
小出 仁	地下応力を測る	地質ニュース No.267 1976
伊藤英文, 岡 行俊, 藤田一夫	縮みゆく日本列島	科学 Vol.46 No.12 1976-12
鈴木 光	岩盤力学と計測	内田老鶴園新社 1973
J. タロブル, 近藤一夫訳	岩盤力学	森北出版 1970
上田誠也	固体の流動	東海大学出版会 1974-5

## (2) 地震及び tectonics に関するもの

## (a) tectonics に関するもの

平野昌繁	側圧を受けた花崗岩層中に期待される断裂系	地質学雑誌 Vol.77 No.4 1971
横田修一郎	滋賀県 " 湖南アルプス " における花崗岩中の節理系	" Vol.80 No.5 1974
平山次郎, 垣見俊弘	地層中の応力場の解析法とその実例について	地球科学 No.78 1965-5

中村一明, 宇井忠英	岩脈群などによるテクトニック応力場復元の問題	GDP連絡紙: II-1-(1) 構造地質 No.3, '75
安藤雅孝, 松田時彦 阿部勝征	日本列島上部地殻の応力場	地震学会講演予稿集 No.1 1973
松田時彦	地質学的にみた地震と断層	土木学会 特別講演 1972-7
松田時彦	活断層と大地震	科学 Vol.39 No.8 1969
田中 豊	地殻変動連続観測—長期変動と地震前駆変動—	地震予知シンポジウム, 地震学会 1973-3
酒井 啓, 佐藤 裕 市原 満	関東南部の Earth Strain の精度	日本測地学会誌 Vol.19 No.1 1973
佐藤 裕, 広部正信	日本列島横断測量と地殻水平変動	科学 Vol.44 No.6 1974-1
中根勝見	日本における定常的な水平地殻歪(Ⅰ)及び(Ⅱ)	日本測地学会誌 Vol.19 No.4 1973
荻原幸男	地殻の限界歪と岩石破壊実験	日本測地学会誌 Vol.19 No.4 1973
原田健久, 井沢信男	日本の地殻の水平変動—多固定点法による解—	日本測地学会誌 Vol.14 No.2, 3 1969
丸山卓男	地震波源の断層模型	科学 Vol.40 No.3 1970
佐藤 裕	日本の破壊地震に関する地殻水平変動の研究(英文報告)	国土地理院報告 Vol.19 No.1 1973

(b) 地震学的なもの

(1) 基礎的なもの

本多弘吉, 丸山卓男 平沢朋郎, 安芸敬一 市川政治	地震のメカニズム	日本の地震学の概観, 第2篇, 第3章, 地震2, 20
----------------------------------	----------	------------------------------

阿部勝征	地震断層の運動	科学 Vol.44 1974
Honda, H.	Earthquake mechanism and Seismic waves, (古いが基礎的報告)	J. Phys, Earth, Vol.10,1962
Sato, T. and T. Hirasawa	Body wave spectra from propagating shear cracks, (数学的に厳密な震源模型,地震のスケイリングに都合がよい)	J. Phys, Earth, vol.21,1973

(ロ) 日本の内陸及びその近傍の被害地震の震源過程に関するもの

Hirasawa, T.	Source mechanism of the Niigata earthquake of June 16,1964, as derived from body waves,	J. Phys. Earth, Vol.13, 1965
Kawasaki, I.	The focal processes of the Kita-Mino earthquake of August 19, 1961 and its relationship to a Quaternary fault, the Hatogayu-Koike fault,	J. Phys. Earth, Vol.23, 1975
Aki, K.	Generation and propagation of G waves from the Niigata earthquake of June 16, 1964,	Bull. Earthquake Res. Inst., Tokyo Univ., vol.44, 1966
Abe, K.	Re-examination of the fault model for the Niigata earthquake of 1964,	J. Phys. Earth, vol.23, 1975

Mikumo, T.	Faulting mechanism of the Gifu earthquake of September 9, 1969, and some related problems, J. Phys. Earth, vol.21, 1973	
長谷川武司, 堀修一郎, 長谷川昭, 笠原敬司, 堀内, 茂木, 小山順三	1970年秋田県南東部の地震の発震機構	地震2, 27, 1974
長谷川昭, 笠原敬司, 長谷川武司, 堀修一郎	1970年秋田県南東部の地震の発震機構(その2)	地震2, 28, 1975

(ハ) 多数の地震の発震機構

東北大学微小地震研究 グループ	東北地方の地震活動	自然災害資料解析, 2, 1975
三雲 健, 大塚道男, 尾池和夫	和歌山地方の地殻構造と微小地震の発震機構	地震2, 23, 1970
大井田徹, 伊藤 潔	近畿地方東部及び中部地方における浅発地震の発震機構	地震2, 27, 1974
Ichikawa, M.	Reanalysis of mechanism of earthquakes which occurred in and near Japan and statistical studies on the nodal plane solutions obtained, 1926-1968, Geophys. Mag., vol.35, 1972	
Shino, K.	Focal mechanism of small earthquakes in the Kii Peninsula, Kii Channel and Shikoku, Southwest Japan and some Problems related to the plate tectonics, J. Geosciences, Osaka City Univ., vol.16 Art.5, 1973	



Nishida, R.	Earthquake generating stress in eastern Chugoku and northern Kinki districts, Southwest Japan, Bull. Disast. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., vol.22 Part 3, 1973
-------------	--

(二) 微小地震の応力降下量の推定

Ishida, M.	Determination of fault parameters of small earthquakes in the Kii Peninsula, J. Phys., Earth, vol.22 1974
------------	--

VIII-2 外国文献リスト

◎は重要論文

(1) 地山応力の測定に関するもの

Crouch S.L., Fairhurst C.	A four-component borehole deformation gage for the determination of In-Situ Stresses in rock masses, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol.4, 1967
Fairhurst C.	Borehole method of stress determination, Int. Sympo. on Rock Mech., vol.10, Madrid, 1968
Hoskins E.R.	Strain rosetter relief measurements in hemi-spherically ended borehole, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., vol.5, 1968

Heerden W.L. Van	Stress concentration factors for the flat borehole end for use in rock stress measurements, Eng. Geo. vol.3, 1969
Coates D.F., Yu Y.S.	A note on the stress concentrations at the end of a cylindrical hole, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., vol.7, 1970
Gray W.M., Barron K.	Stress determination from strain relief measurements on the ends of boreholes, Int. Sympo. on the determination of stress in rock masses, vol.5, Lisbon, 1969
OKa Y., Bain Y.	A means of determining the complete state of stress in a single borehole, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., vol.7, 1970
Leeman E.R., Denkhaus H.G.	Determination of stress in rock with linear or non-linear elastic characteristic, Rock Mech. vol.1, 1969
Barla G., Wane M.T.	Stress relief method in anisotropic rocks by means of gages applied to the end of a borehole, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., vol.7, 1970

Skinner E.H., Waddell G.G., Conway J.P.	In situ determination of rock behavior by overcore stress relief method, physical property measurements, and initial deformation method, Bureau of Mines, Spokane, Wash, Spokane Mining Research Center, Dec. 1974
F. Rummel,	Experimental studies of tensile strength of webes sandstone in laboratory hydraulic fracturing test, USGS Report Menlo Park, 1974
A.E. Scheidegger,	Stress in the earth crust as determined from hydraulic fracturing data, Geologie und Bauwesen, vol.27 1962
A.E. Scheidegger,	On the connection between tectonic stresses on well fracturing data, Geophysica Pura et Applicata, vol.46, 1960
R.O. Kehle,	Determination of tectonic stresses through analysis of hydraulic well fracturing, J.G.R., vol.69, 1964
F. Rummel, R. Jung,	Hydraulic fracturing stress measurement near the Hohenzollen-Graben Structure SW Germany, Pure and Applied Geophysics, vol.113 No.1, 2 19

C. Fairhurst,	Measurement of in situ rock stresses with particular reference to hydraulic fracturing, Rock Mechanics and Engineering Geol. vol.2, 1964
Hubbert M.K., Willis D.G.,	Mechanics of hydraulic fracturing, Trans. AIME, vol.210, 1957
Haimson B., Fairhurst C.,	In-situ stress determination in rock mechanics - Theory and Practice, W.H. Somerton, ed., AIME N.Y., 1970
L.A. Panek,	Calculation of the average ground stress components from measurements of the diametrical deformation of a drill hole, R.I. 6732 U.S. Bureau of Mines, Washington 1966
E.R. Leeman,	©The measurement of stress in rock - Part 1, The principles of rock stress measurement, Jour. S.A.I.M.M., vol.65, No.2, 1964, Sept.
E.R. Leeman,	©The borehole deformation type of rock stress measurement instrument, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. vol.4, 1967, Jann.
Hast N.,	©Global measurements of absolute stress, Phil. Trans. R. Soc. Lond. A 274, 1973
N. Hast,	©The measurement of rock pressure in mines, Stockholm 1958

Stephenson B.R., K.J. Murray,	<p>Application of the strain Resette Relief method to measure principal stress throughout a mine;</p> <p style="text-align: right;">Int. Jour. of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1970</p>
Barla G., M.T.wane,	<p>Stress relief method in anisotropic rock by means of gauges applied the end of a borehole,</p> <p style="text-align: right;">Int. Jour. of Rock Mechanics and Mining Sciences 1970</p>
Kurlenya M.D.,	<p>Determining rock stress by strain relief in a core with a central borehole,</p> <p style="text-align: right;">Soviet Mining Sciences №1 1966-1, 2</p>
E.R. Leeman,	<p>©Experience throughout the world with the CSIR "Doorstopper" rock stress measuring equipment,</p> <p style="text-align: right;">Proc. 2nd Cong. of ISRM 1970</p>
E.R. Leeman,	<p>©The doorstopper and triaxial rock stress measuring instruments developed by the C.S.I.R.,</p> <p style="text-align: right;">J.S. Afr. Inst. Min. Metall. vol.69, 1969</p>
Wyllic D.C.,	<p>Application of the borehole deformation gauge at New Broken Hill Consolidated Limited,</p> <p style="text-align: right;">Proc. of Rock Mechanics Symposium at the Stephen Roberts Theatre, University of Sydney 1969</p>
G. Greiner,	<p>In-situ stress measurements in South West Germany, Approaches to Taphrogenesis,</p> <p style="text-align: right;">edited by H. Illies and K. Fuchs Stuttgart 1974</p>

C.B. Raleigh, J.H. Healy, J.D. Bredehaft,	Faulting and crustal stress at Rangely, Colorado, Flow and Fracture of Rock AGU. Monograph, vol.16, 1972
B.C. Haimson,	Earthquake related stresses at Rangely, Colorado, 14th Symposium Rock Mechanics 1972
Haimson B.C.,	The state of stress in the earth's crust, Rev. Geophys. Space Phy., vol.13, 1975
Raleigh C.B.,	Crustal stress and global tectonics in advance in rock mechanics, 1-A National Academy of Sciences, Washington D.C., 1974
Ranalli G., Chandler T.E.,	The stress field in the upper crust as determined from in situ measurement, Geologische Rundschau, vol.64, 1975
Robert M., Becker, Verne E., Hooker,	Method of determining in-situ stress in anisotropic rock, Transaction of the Society of Mining Engineers of AIME, vol. 244, No.4 1969-12
E. Hoek,	Analysis of the stress, strain and displacements in material surrounding a cylindrical hole in a semi-infinite body subjected to triaxial load, CSIR Contact Report, Pretoria, No.427, 1961

W.L. Van Heerderr, F. Grant,	A comparison of two methods for measuring stress in rock, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science 4-4 1967-10
R.H. Merrill, J.V. Williamson, D.M. Ropchan, G.H. Kruse,	Stress determinations by flatjack and borehole-determination methods, Bureau of Mines RI 6400 1964
Enener J.R., L.A. Dyson,	Flatjacks and the flatjack method of measuring rock stress, Proc. of Rock Mechanics Symposium at the Stephen Roberts Theatre, University of Sydney, 1969
L.P. Panek, John A., Stock,	Development of a rock stress monitoring station based on the flat slot method of measuring existing rock, Bureau of Mines RI 6537 1964
G.H. Eisbacher, H.U. Bielenstein,	Elastic strain recovery in proterozoic rocks near Eilliot Lake, Ontario, J.G.R. vol.76, No.8, 1971
N. Hast,	The state of stress in the upper part of the earth's crust, Tectonophysics, vol. 8, 1969

G.Ranalli,	Geotectonic Relevance of rock-stress determinations Tectonophysics, vol.29, 1975
N.C. Gay,	In-situ stress measurements in Southern Africa, Tectonophysics, vol.29, 1975
N.K. Bulin,	The present stress field in the upper of the crust, Geotectonics, 1971
Harsh K. Gupta, B.K. Rastogi,	Dams and earthquakes,                      Developments in Geotechnical Engineering 11, 1976, Elsevier
H.C. Haimson,	A simple method for estimating in situ stresses at great depths, Field testing and instrumentation of rock,                      A.S.T.M. STP vol.554, 1973
R.V. de la Cruz, C.B. Raleigh,	Absolute stress measurements at the Rangely Anticline, Northwestern Colorado,                      Int. J. Rock Mech. Min. Sci., vol.9, 1972
E.R. Hoskins, E.H. Oshier,	Development of a deep hole stress measurement device, New horizon in rock mechanics,                      A.S.C.E., 1973
Dane Blair,	Topographic effects on the tidal strain tensor, Geophys. J.R. astr. Soc., vol.46, 1976



(2) Tectonic に関するもの

地震学的なもの

(1) 基礎的なもの

Aki K.,	Scaling law of seismic spectrum, J.G.R., vol.72, 1967 (地震規模の scaling に関する基本的考察)
---------	--

(ロ) 日本の内陸及びその近傍の被害地震の震源過程に関するもの

Kanamori H.,	Determination of effective tectonic stress associated with earthquake faulting, the Tottori earthquake of 1943, Phys. Earth Planet. Interiors, vol.5, 1972
Kanamori H.,	Tectonic implications of the 1944 Tonankai and 1946 Nankaido earthquakes, Phys. Earth Planet. Interiors, vol.5, 1972
Abe K.	Determination of static and dynamic fault parameters, The Saitama earthquake of July 1, 1968, Tectonophysics, vol.27, 1975

(ハ) 微小地震の応力降下量の推定

Thatcher W., T. Hanks,	(日本の地震との比較のため) Source parameters of southern California earthquakes, J.G.R., vol.78, 1973
------------------------	---