

岡山市万成における地殻応力の深度勾配の測定

田中 豊

MEASUREMENTS OF CRUSTAL STRESS GRADIENT WITH DEPTH AT MANNARI SITE, OKAYAMA CITY

By Yutaka TANAKA

Synopsis

In order to confirm the stress state of the region where seismic activities are low, the stress measurement by the hydrofracturing method was performed in Okayama city drilling a 200 m deep vertical borehole.

The measuring site consists of the homogeneous rock bed of the Mannari granite of the Late Cretaceous. The boring core looks almost homogenous for all 200 m long, however, cracks and Aplite dyke are observed at places. Especially, deeper than 175 m were seen discing phenomena. There are old fault or fracture zone-like signs, too.

The azimuth of the maximum principal stress is $N45^{\circ}W-S45^{\circ}E$ and this corresponds well with the result of the geodetic survey of the region. Magnitude of the maximum and the minimum principal stresses in the horizontal plane show approximately the equal increasing rate with that of the West Japan standard stress gradient up to 90 m deep, however, between 90 m to 170 m deep, the stresses decrease to show almost lithostatic state, and then, from 175 m below, they increase very rapidly.

The maximum shear stress value is, at every depth, unusually low. Within a granite block, a stress relaxation takes place in a homogeneous rock bed, on the contrary, a stress concentration seems to develop in the hard structure, as expected from discing phenomena.

1. 緒 言

地殻応力の深度分布の測定は、地震の発生危険度の推定のため極めて重要である。応力測定の結果、ある深さにおいて地殻応力値が高くても応力の深さによる増加率が低くければ、地震の発生する深度でも応力値は破壊限界までにほど遠いことになる。一方破壊の危険度は差応力の大小によって決まる。深度を変えて3次元応力測定を行うことは、応力解放法によっても、水圧破碎法によっても困難である¹⁾。しかし(1)地形影響のない深度においては、鉛直応力が主応力軸の一つと見なせることが多く、また(2)鉛直応力がほぼかぶり圧 ρgh に等しいことが、実測でも求められている。応力の深さ増加率(深度勾配)を水圧破碎法で求める場合、(1)、(2)を仮定し、鉛直ボーリングを実施することにより、深度の異なる多数点で水平面内の2つの主応力、最大 σ_{h1} 、最小 σ_{h2} を求めるのが現在行なわれている方法である。これにより、応力が深さと共にほぼ直線的に増加している場合には、地殻上層部の応力状態を推定することができる^{1),2)}。

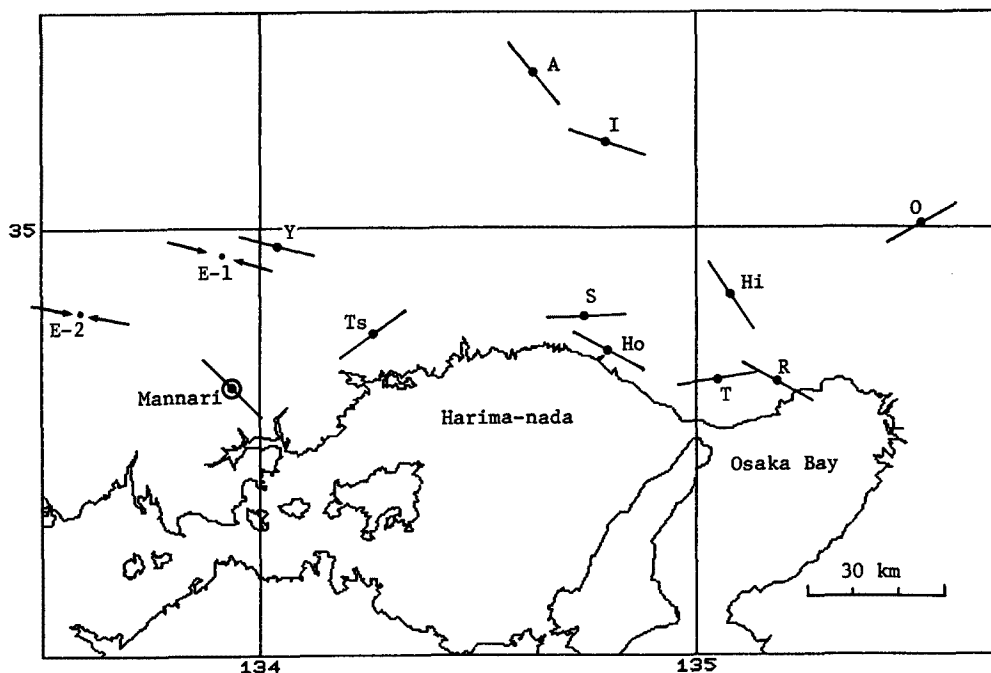


Fig. 1. Location of Mannari measuring site (●) in Okayama city. Short lines show the azimuths of principal stress by in situ measurement. Stress measurements except at Mannari were made from 1977 to 1990. Arrows indicate the maximum pressure axes obtained from earthquake mechanisms by Nishida (E-1) and Takeuchi (E-2).

Hi: Hiraki, Ho: Hoden, Ts: Tsuchihashi, R: Rokko-Suwayama,
I: Ikuno, A: Akenobe, S: Shiromidai, T: Takatsukayama,
Y: Yanahara, O: Otani

一方地震予知や地殻活動の研究のために必要なことは、地震活動が低い地域での基準となる地殻応力状態の推定であるが、特に重要なのは、この地域での各応力成分の深度勾配の測定である。地震活動が低いということは地殻が安定な状態にあり、同様にまた応力変化も小さいということであろう。日本列島内では、このような地域はきわめて少ないが、岡山県はそのような地域の代表であり、ここにおける応力状態は一つの基準としておさえておく必要がある。

Fig. 1 に 1978 年～1990 年間に実施した現場応力測定点と測定された水平面内主応力方向を示す。現場測定から求められた応力方向は多少分散するが、東西ないし北西—南東方向が主である。測定精度は、古い測定で $\pm 20^\circ$ 、最近では $\pm 5^\circ$ 程度であるが、この図中の分散は測定精度というより地域的特殊性を示しているものと考えられる。

この地域の地震発震機構解析から得られている主応力方向はほぼ東西であるが、この地図の範囲内においても数 10° のバラツキがある。また国土地理院の三角測量、辺長測量の結果も全般的に東西圧縮とみてよいが、一等三角点、一等三角補点、二等三角点間の 10 km 程度の網内の主圧縮歪軸の方向にも地域的に大きな乱れがあり、その乱れは応力測定から求められた Fig. 1 のバラツキより大きい。

2. 応力測定地と測定方法

今回の測定の目的は、西南日本において最も地震活動度の低い、従ってまた応力変化が小さいと考えられる岡山県とくに岡山市付近において応力測定を行い、基準となる応力の深度勾配を決定することであった。応力測定の精度を上げるためには、岩盤が均質であり、亀裂、破碎や異方性の少ない大きな岩体が望ましく、近畿北西部から中国地方にかけて広く分布する白亜紀後期の流紋岩ないし熔結凝灰岩か、あるいは基盤の花崗岩が望ましいと考え、測定地を選定した。

決定した測定地の位置は、東経 $133^{\circ}54'27''$ 、北緯 $34^{\circ}40'35''$ 、海拔 16 m の地点（岡山市伊島 3 丁目 738-1、岡山商科大学第 2 施設用地内）（Fig. 1 参照）で、白亜紀後期の花崗岩から成る標高 30 m の小丘の北側斜面にあり、Fig. 2 に示すように、丘陵北側の平地との比高は約 12 m である。またこの丘陵地帯の最高点は、測定点の南 300 m にあり、標高 80 m 程度であるから、この丘陵地帯による地形影響は小さいものと考えられる。Fig. 2 下の NW-SE 断面図でわかるように、南東方向へ約 500 m 位は標高約 10 m 前後の基盤が続くが、そのさらに南東は海拔 2～3 m の市街地となる。測定点から南南東約 5 km の旭川右岸近くでのボーリング結果によると沖積層の厚さは 70 m で、基盤の花崗岩があらわれている。また測

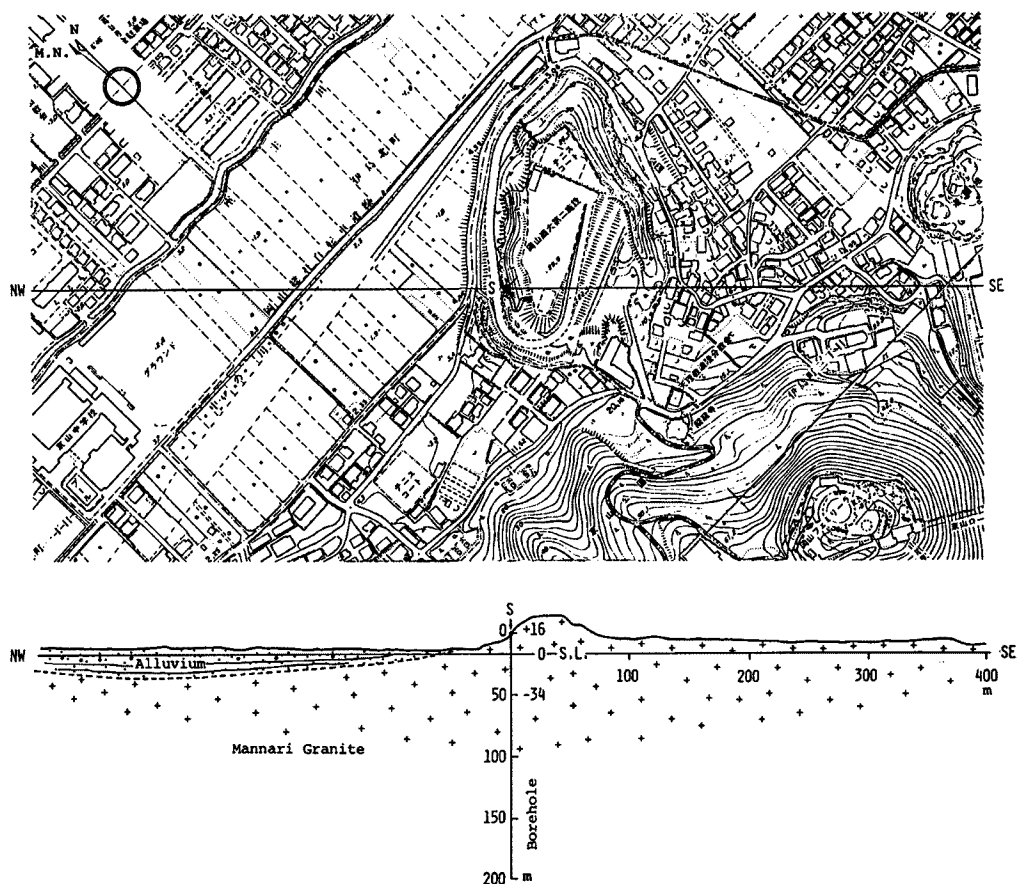


Fig. 2. Topography of Mannari and its vicinity, and NW-SE cross section through the measuring site (S).

定点の北側 500 m には同じ白亜紀後期の花崗岩の丘陵があるために、これから推定すると北側の沖積層の厚さは 50 m 以下であると考えられる。

この地域の花崗岩は桃色中粒で、岡山県、広島県に多く見られ、万成みかげ、万成花崗岩として装飾用石材に用いられるもので（岩石試験にも使用する）、測定点周辺には採石場も多い。

ボーリング工事は 1990 年 10 月中旬から行い、同 11 月中旬から水圧破碎法による応力測定を実施した。裸孔部分は孔径 60 mm、孔内水位は孔口の下 12 m である。ボアホール掘削後、ボーリングコアの状態やリークテストの結果から、深度 35.5 m から 183.5 m までの間の 11 点を選び、水圧破碎法による応力測定を実施し、同年 12 月 3 日に測定を完了した。

3. ボーリング結果

200 m の鉛直ボーリングによると、地表から約 2 m は埋立土および玉石と土砂で覆われており、その下 2 m 近くは風化花崗岩が現れるが、深さを増すと共に中硬岩となる。そのため地表より 6 m まではケーシングを行ったが、以深は 60 mm 径の裸孔である。裸孔部分は硬質の万成花崗岩であり、ところどころ Aplite 岩脈や亀裂があるがほぼ均質で、深さ 91 m 付近で幅 10 cm の破碎帯が現われるが、深度 189 m まではコアの摂取率はほぼ 100% であった。しかし 169 m を越えた深度でコアのディスクキング現象が発生し、173 m、174.5 m 前後で亀裂部、185.5 m で再びディスクキング現象が見られ、189.5 m を越えた所で幅約 30 cm の破碎部、さらに 191.0 ~ 192.2 m 間に破碎部とディスクキング現象が現れた。しかし 192.6 ~ 198.5 m 間は硬岩で、100% のコアが摂取された。198.5 m から再びディスクキング現象が 201 m まで続き 201.1 m でボーリングを中止した。ディスクキング現象は大きな亀裂または破碎部の数 m 上から発生しているが、この破碎部は固結した古い断層であると思われる。

ディスクキング現象³⁾は、深部坑道からボーリングした場合に坑道周辺で発生することが多く、コアが幅 3 mm ~ 1 cm 位のほぼ等間隔で円板状に割れる現象を言い、一般には深い坑道周辺で起こるが、石炭層や石灰層では比較的浅い（200 m）場所でも発生する。岩石の引張強度に関係があるが、ディスクキング現象は高応力状態下で起こるものと一般には考えられている。Fig. 3 左にボーリングの柱状図を、また参考までに深さ 179 m から最深の 201.1 m までのボーリング・コアの写真を Photo. 1 に示した。この写真には、190 m 以深のコアディスクキングの状況が明瞭に見られる。

4. 応力測定結果

応力測定結果を Table 1 に示す。115.0 m の測定では水圧破碎で横亀裂が発生し、その測定値は今回採用していない。また 35.5 m では測定された Secondary break down pressure, P_{sb} （亀裂再開口圧）が大きすぎるので、 σ_{h1} （最大主応力値）は不正確であり記載していない。おそらく最小主応力値とほぼ等しいであろう。

4.1 水平面内最大主応力方向

Fig. 3 の左には亀裂(C)、断層と考えられる破碎部(F)、ディスクキング発生場所(D)と硬質部(H)、比較的軟質部分(S)、風化部(W)の位置を、右に亀裂方向から求めた最大主応力軸の方位の深さ分布を示す。Fig. 3 の中の図は、各測定深度における水平面内応力の主軸である。

今回の測定では宝殿や平木⁴⁾に比べて主応力方向の分散が大きい。この理由の一つとして、最大、最小主応力値の差が比較的小さかったことが考えられる。水圧破碎に際して、亀裂の発生が困難な場合が多かったのは、そのためであろう。また後に述べるように硬質部分で応力集中が生じており、そのため主応

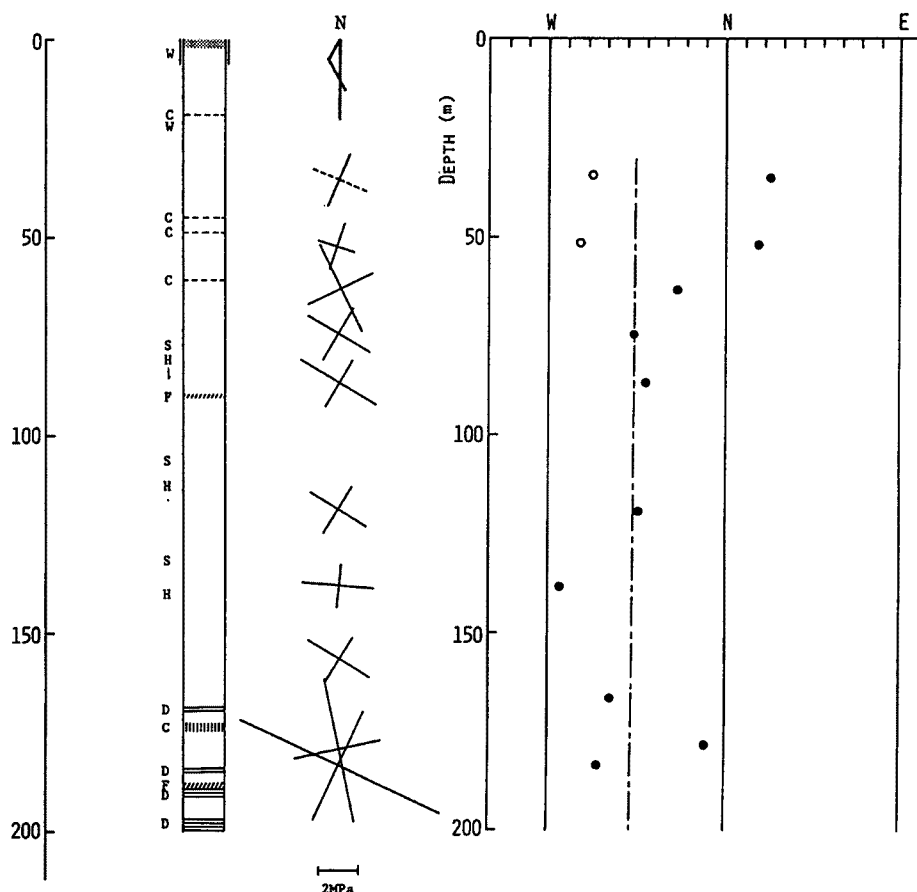


Fig. 3. Left: columnar section of borehole.
 C: crack, F: fracture, D: discing, S: soft, H: hard, W: weathered
 Middle: principal stress axes in horizontal plane at each depth.
 Right: azimuths of maximum principal stress at each depth.
 ○: estimated maximum stress azimuth after excluding topographical effects.

力方向が部分的に偏倚している可能性もある。

この図の中で、52 m以浅の2つの測定では $N 15 \sim 20^\circ E$ の方位を示しているが、これは一つには最大主応力と最小主応力の差が非常に小さいこと、第二に、Fig. 2の地形および地形断面図から推定されるように、この測定深度ではなお地形影響が残っているためと考えられる。つまり $N 20^\circ E$ の方向はこの小丘の北西斜面の走向に近く、そのためNW-SE地形断面の中で、実際の最大主応力軸は北西に傾いているものと考えられる。浅部ではとくに最大最小主応力値の差が小さいので、水平面内においては本来の最小主応力方向に亀裂が生じたものと解される。このように考えれば地形影響を除いた地殻の主応力方向は測定されたものと直交方向の $N 70 \sim 80^\circ W$ 方向と考えることができる。この推定方向はFig. 3右図に白丸で示した。以上のようなことを考慮すると、最大主応力方向は $N 45^\circ W - S 45^\circ E$ か、さらに反時計まわりに東西に近いと考えるのが妥当であろう。これはFig. 3中図の深度別主応力軸を見ても推定できるように、東西に近い深度138 m、北北西に近い63 mと179 mの測定を除けば、主軸方向はほぼ西北西方向に揃っているように見えることから推定できる。

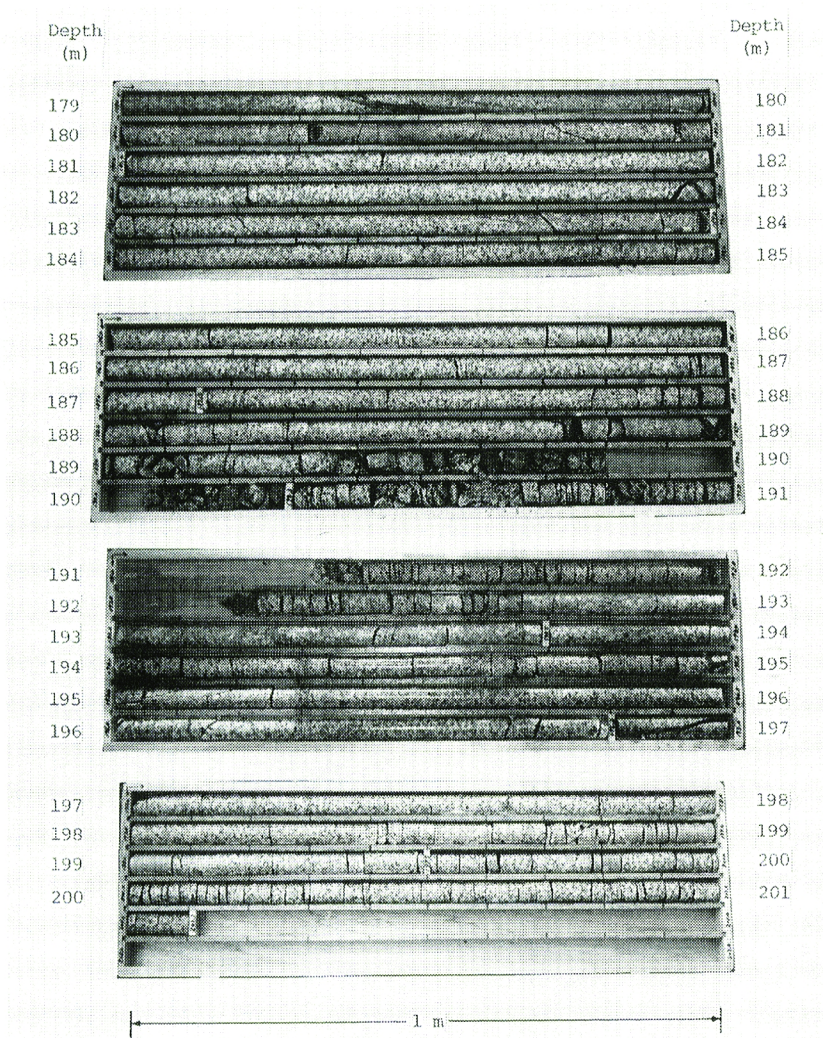


Photo. 1. Boring core taken at Mannari measuring site (Depth: 179~201.1m).
Discing phenomena are clearly seen on cores deeper than 190m.

Table 1. Horizontal stress values and azimuths at different depths obtained by hydrofracturing measurements at Mannari site

Depth(m)	σ_{h1} (MPa)	σ_{h2} (MPa)	Azimuth of σ_{h1}	σ_h	τ_h
35.5	—	2.90	N 21.9° E	—	—
52.0	2.45	1.82	N 16.4° E	2.14	0.32
63.0	4.80	3.78	N 22.2° W	4.29	0.51
74.7	3.42	3.03	N 46.7° W	3.23	0.20
86.5	4.49	2.83	N 40.2° W	3.66	0.83
119.0	3.26	2.74	N 43.5° W	3.00	0.26
138.0	3.65	2.42	N 84.2° W	3.04	0.62
157.0	3.75	2.89	N 58.5° W	3.32	0.43
179.0	7.18	4.57	N 10.2° W	5.88	1.31
183.5	11.12	6.08	N 64.8° W	8.60	2.52

4.2 水平面内最大主応力と最小主応力

Fig. 4 に水平面内最大主応力(σ_{h1}) と最小主応力(σ_{h2}) の深さ分布を示した。図中の実線は西日本標準深度勾配^{1),2)}で、1978 年～1983 年間に中部地方西部から近畿地方北部における、主として金属鉱山の坑道内の各種深度で、応力解放法により求められた平均的な応力勾配である。測定値にはかなり分散が見られるが、深度 90 m までは、最大主応力値は西日本標準応力勾配よりやや小さく、最小主応力値はやや大きい。しかし、90 m の破碎部より以深では最大主応力値、最小主応力値共に極端に小さくなり最小主応力の標準応力勾配よりも低い値となる。ところがディスクング現象が起こった 169 m 以深になると再び応力値は上昇して標準応力勾配とほぼ等しくなり、最深の 185 m では標準を上回る値となる。つまり、破碎帯のある 90 m から、ディスクングを起こした 169 m 間は、ボーリング結果からもきわめて均質で亀裂もほとんど見られないが、一様に応力値が下がっている。また、最大、最小主応力値の差がきわめて小さく、この間は静岩圧的 (lithostatic) な状態にあるものと推定できる。今回は中間深度に応力値の低い部分が 70 m にわたって存在するため応力深度勾配は決定できなかった。

4.3 平均応力と最大剪断応力

前節で述べた通り最大主応力値と最小主応力値の差が小さいので、最大剪断応力、 $(\sigma_{h1} - \sigma_{h2})/2$ 、は従

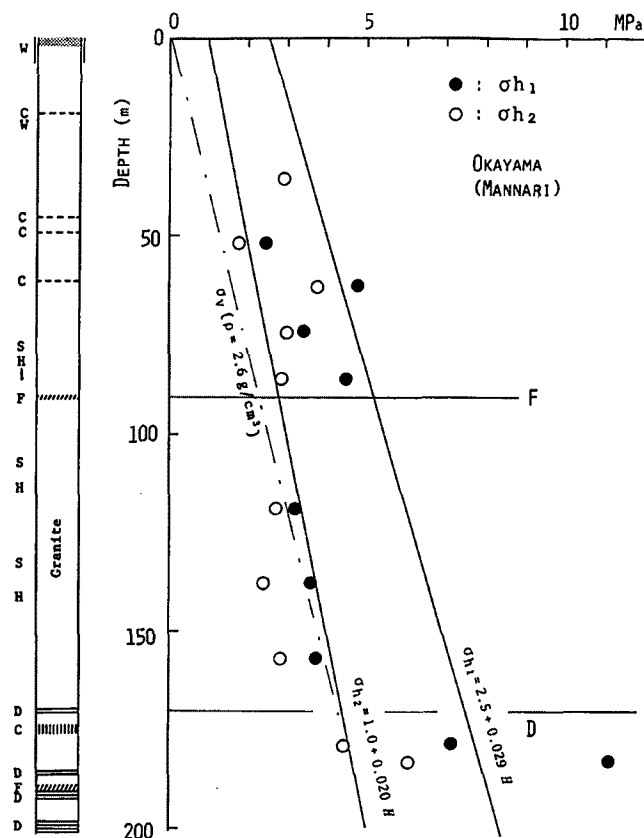


Fig. 4. Depth distribution of maximum (σ_{h1}) and minimum (σ_{h2}) principal stresses in horizontal plane. Solid lines indicate West Japan standard depth gradients. Chain line shows theoretical overburden pressure ($\rho = 2.6 \text{ g/cm}^3$).

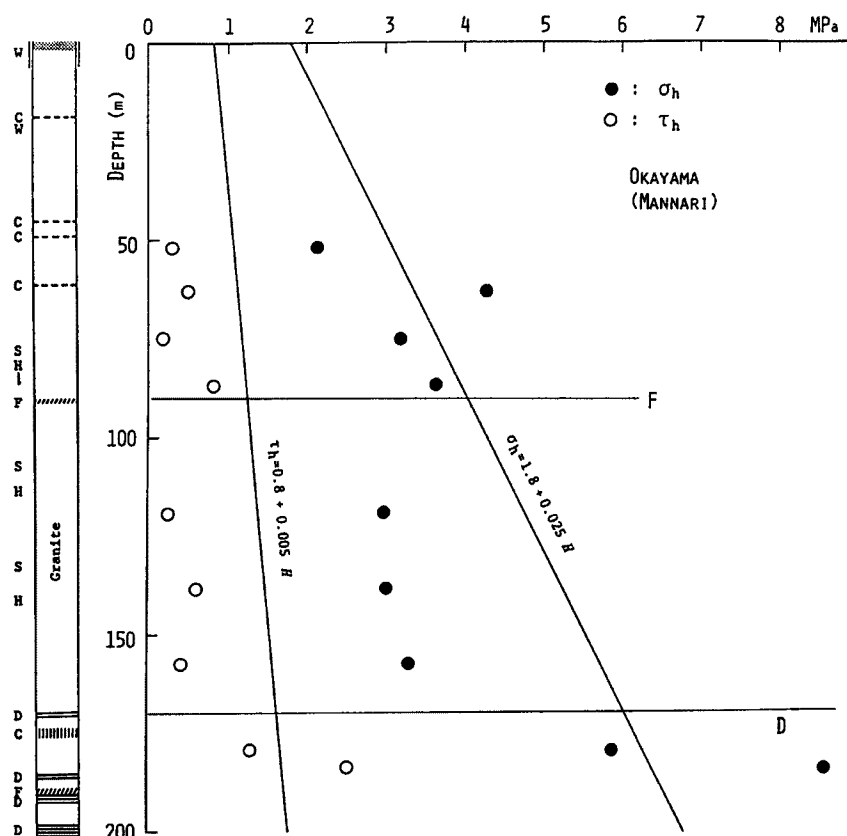


Fig. 5. Depth distribution of mean stress (σ_h) and maximum shear stress (τ_h) in horizontal plane. Solid lines indicate West Japan standard depth gradients.

来の測定では経験のない位に小さな値をとる。しかし平均応力、 $(\sigma_{h1} + \sigma_{h2})/2$ 、は先に述べた 90 ~ 169 m 間を除けば、標準応力勾配 (Fig. 5 中の実線) を保ち、最深部ではこれを上回る値をとる。Fig. 5 でも明らかに深さ 90 m にある固結した古い断層と考えられる破碎部とボーリング中にディスクングが発生し始めた 169 m 間で異常に応力値が低いことは明確である。深度勾配もこの段階では決定できない。

4.4 平均応力に対する最大剪断応力の比 μ_m

ここで述べる平均主応力、 $(\sigma_{h1} + \sigma_{h2})/2$ 、は内部摩擦角を 0 とした場合の法線応力である。これに対する最大剪断応力、 $(\sigma_{h1} - \sigma_{h2})/2$ 、の比 μ_m は単純に地下の応力状態が、すべり破壊の限界に近いか遠いかの目安となる。平均主応力の深度勾配に対する最大剪断応力の深度勾配の比は簡単に計算できるが、 σ_{h1} 、 σ_{h2} の応力深度勾配が今回の場合決定できないので、各測定点における平均応力に対する最大剪断応力の比 μ_m をとった。その結果を Fig. 6 に示すが、 μ_m の値はほとんどが 0.2 以下である。最近応力勾配の測定を実施した平木、宝殿 (Fig. 1 参照) の測定結果から求めた μ_m は、平木では 1985 年の測定で平均して $\mu_m = 0.3$ 、1989 年の測定では $\mu_m = 0.4$ 近くまで増加していた。宝殿では亀裂部で応力が落ちている部分があったが測点の半数で μ_m は 0.25 から 0.38 の間にあった⁴⁾。今回万成における測定結果は応力値が急増している最深部でやっと $\mu_m = 0.3$ に達する程度である。 $\mu_m < 0.3$ のような応力状態では、たとえ間隙水圧が静水圧以上に達しても、すべり破壊は発生しないであろう。

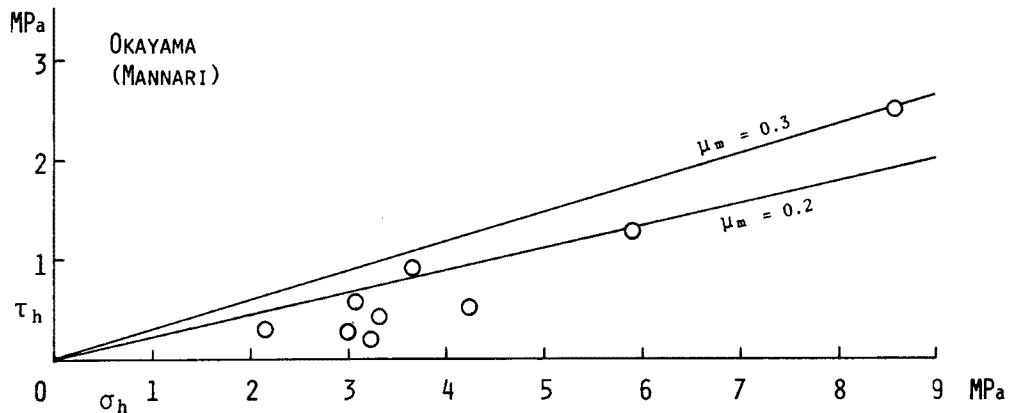


Fig. 6. The ratio (μ_m) of mean stress value and maximum shear stress value.

5. 岡山県下の地殻応力状態

5.1 応力測定結果による推定

4.2 に述べたように地表から 90 m までの応力状態は、西日本標準応力勾配に比べて最大主応力値はやや低く、最小主応力値がやや高く、従って平均主応力値は標準に比べて必ずしも低くないが、剪断応力は極端に低い。90 m にある破碎部よりディスクングを生じ大きな亀裂が認められた 165 m までの間は、岩盤は均質な花崗岩で亀裂もほとんどないが、最大主応力値がきわめて低く、 $\rho = 0.26 \text{ g/cm}^3$ とした時のかぶり圧に近く、静岩圧的状态となっている。大きな亀裂や破碎部があり連続してディスクングが発生した 169 m 以深では、応力値は急増して最深部では西日本標準応力勾配から推定される値を上回っている。ボーリングを 201.1 m で中止したのでそれ以深の状態はわからないが、応力値の高い部分と低い部分が交互に存在するように思われる。防災科学技術研究所が 1990 年に栃木県足尾町の古第三紀～白亜紀の花崗岩体で実施した水圧破碎測定でも破碎帯の直下に、高応力帯が見いだされその厚さは深度方向に 50 ～ 100 m くらいである。同様なことが山梨県芦川の花崗岩帯においても測定されている^{5), 6)}。岡山市万成における測定では、これと非常に似た傾向が現れている。この高応力部分是一种の Asperity かもしれない。

高応力部と低応力部が深部でも交互に存在する可能性はある。しかし、万成の場合顕著なことは、大きな亀裂が存在せずきわめて均質であった深度 90 ～ 169 m 間で応力値が低く、静岩圧的応力状態に達したものと考えられることである。これに対しその上部および下部では亀裂や破碎帯（固結した古い断層）や、やや固い Aplite の岩脈などを含み、応力集中を生じて高応力帯をなしているものと考えられる。とくに下部 170 ～ 200 m 間でボーリング中にディスクング現象を生じたのは、高応力状態を証明するものであろう。しかしこの比較的高応力の部分においても剪断応力はそれ程高くない。

5.2 地震活動, 地殻活動

岡山県下では歴史的な大地震の記録はない。1885 年以降も $M > 6.0$ 以上の地震は現在まで全く発生していない。岡山県下には微小地震の観測点がないが、京大鳥取微小地震観測所等の観測結果でも、岡山県北東部から南西部へかけて岡山県の中央を通る微小地震の帯状の配列が見える⁷⁾。日本の活断層（活断層研究会編）によれば、この付近に塩之間断層、畑ヶ鳴断層等北東—南西系の断層ないし、リニアメントが平行して走り、高梁市の南をかすめている。この付近には 1981 年 1 月 22 日、 $M = 4.2$ 、深さ 10 km の地震

(Fig. 1 中 E-1 の地震), また 1987 年 6 月 15 日には $M = 4.3$, 深さ 21 km の地震 (E-2) が発生している。これらの地震の発震機構解析から圧縮軸が求められているが, いずれの地震も P 軸がほぼ水平で, それぞれ $N 15^\circ W-S 15^\circ E$ (鳥取大教養部, 西田良平による), $N 10^\circ W-S 10^\circ E$ (京大防災研, 竹内文朗による) である。一方国土地理院技術資料の日本の地殻水平歪 (1985 年～1983 年) によれば, 一等三角点, 一等三角補点, 二等三角点間の水平歪変化は東北東—西南西圧縮が大勢を占めており, 両者は完全には一致しない。もっとも辺長 10 km 程度の網では局所的なバラツキがかなりある。また歪変化量も他地域に比べてかなり小さい。

いずれにしる測定点近傍は地殻活動が静穏で, 微小地震は万成から 20 km 以内ではほとんど発生していない。万成の応力測定結果, 高応力部分はやや高い平均主応力値を保ちながら剪断応力が低く, 破壊が発生する可能性が全くない応力状態であることは, これと相通ずるものがあると思われる。高応力部分は Asperity と共通するものであろう。

6. 結 語

岡山万成の白亜紀後期の花崗岩体で 200 m の鉛直ボーリングを行い, 水圧破壊法により 11 点で応力測定を実施し, うち 10 点で測定値を得た。その結果深さ 90～165 m 間は大きな亀裂もなく均質でありながら応力値はきわめて低く, ほぼ静岩圧状態であることがわかった。その上部深度 50～90 m 間では平均応力はほぼ西日本標準応力値に等しいが, 剪断応力値がきわめて低い。また 169 m 以深で急激に応力値が増加するが, この部分では大きな亀裂や固結したと考えられる断層らしい破碎部があり, 高応力を示すものと考えられるディスクリング現象がボーリングの際発生している。しかし, この高応力部でもなお剪断応力値は高くはない。このように高応力と低応力部があるため, 万成における応力の深度勾配は決定できなかった。平均応力に対する剪断応力の比 μ_m は 0.2 以下であってこの付近が $M > 2$ 以上の地震がほとんど発生していないことと調和的である。下部の比較的高応力部の応力状態がそのまま深部まで続くのか, ある厚さをもって, 再び低応力部が現れるのか, これを Asperity の一種と見なすべきかどうか, さらに深いボーリングを行わないと判らない。また高応力部あるいは低応力部の存在が花崗岩体内部での特有な現象なのか, 地下深部では一般的な事なのかも現在では判らない。宝殿の場合は亀裂が存在すると考えられる 20 m 間隔で応力が低下している部分があった。また破碎部では一般に応力が低下していると考えられるのが常識であるが, 固結した古い断層破碎帯付近, あるいは固い Aplite 岩脈付近では応力集中を生じている可能性もある。一方均質で一見亀裂の少ない部分で長期にわたり流動し, 応力緩和を生じ, 静岩圧状態になっているらしいことも見いだされた。1991 年度にはこのボーリング孔をさらに深さ 300 m まで延長し, 測定を行う予定である。解析についてはこのデータからさらに別の解析方法を適用してみたい。同和工営加藤春実氏の私信によると最大主応力方位として平均的に $N 60 \sim 75^\circ W$ という結果を得たとのことである。

岡山商科大学用地内におけるボーリング工事と測定実施に御快諾を賜った井尻 裕学長ならびに藤原二郎事務局長, および事業の実施に御協力頂いた大学当局に対し感謝の意を表する次第である。またボーリング工事と測定は同和工営株式会社 落石雅宣, 鈴鹿 久, 加藤春実の諸氏を中心に実施された。とくに加藤氏は測定値の解析等についても種々新しい試みをされ, 御助言を頂いた。岡山理科大学奥田節夫教授には, 地元にあつて数々の御援助を賜った。併せて深く御礼申し上げたい。

参 考 文 献

- 1) 田中 豊: 日本における地殻応力測定—研究動向と問題点—地震予知研究シンポジウム, 1987,

- pp. 199 – 212.
- 2) Tanaka, Y.: State of crustal stress inferred from in situ stress measurements, J. Phys. Earth, Vol. 34, Suppl., 1986, pp. S 57 – S 70.
 - 3) 菅原勝彦・亀岡美友・斎藤敏明・岡 行俊・平松良雄：コアディスキング現象に関する研究，日本鉱業会誌，94 巻，1089 号，1978，pp. 106 – 112.
 - 4) 田中 豊・藤森邦夫・竹内智一：平木鉱山，宝殿採石場および土橋鉱山における地殻応力測定，京大防災研年報，第 33 号 B-1，1990，pp. 23 – 37.
 - 5) 池田隆司・塚原弘昭：花崗岩体中での水圧破壊地殻応力測定，第 8 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，1990，pp. 309 – 314.
 - 6) 塚原弘昭・池田隆司：震源に到達するボーリング調査— 2000 m，地質ニュース，436 号，1990，pp. 25 ~ 30.
 - 7) 高木章雄・松澤 暢：日本における微小地震活動，地震予知研究シンポジウム，1987，pp. 17 – 30.