

(53) 関東・東海地域における地殻応力測定と 測定法の比較

地質調査所	○小出 仁
東京大学工学部	西松 裕一
同	小泉 昇三
地質調査所	星野 一男
電力中央研究所	金川 忠
日本ハロリックエシマニアリング	中山芳樹
同	井上 朗
東北大学理学部	山本 清彦
日本国土開発	菊地 慎二

1. はじめに

地殻の応力の測定法は、様々な測定原理および機構のものが考案されて、用いられている。しかし、測定データの信頼性については、必ずしも十分とはいえない。測定データの信頼性は、測定装置や技術のみの問題ではなく、周囲の岩盤や地殻内部の応力の伝播状態に大きく影響される。したがって、最終的には測定結果を相互に比較したり、地質・測地・地震等の現象と比較し判断する他はない。

地質調査所は、東京大学工学部西松研究室と協力して、1977年頃から、地震予知研究を目的とした地殻応力測定を関東・東海地域で実施してきた。国立防災科学技術センターや大学の東日本及び西日本の両グループも同じ頃から地震予知を目的とした地殻応力測定の研究を実施している。特に、関東・東海地域では、国立防災科学技術センターが100 m～800 mの深いボーリングを行ない、水圧破砕法による地殻応力測定を多数実施した(塚原・池田、1984)。また、東京大学地震研究所はAE法による応力測定を行っている(吉川、茂木、1983)地震予知以外の目的でも、トンネル・鉱山・地下発電所などの工事に伴って初期応力測定が実施されている。

地質調査所は、主として地殻から鉛直に10～20m程度の浅いボーリングをして、応力解放法による応力測定を行なっているが、適宜水圧破砕法等の他測定法を併用し、比較研究を行なった。また、前述のように、他機関においても各種方法による測定が行なわれ、関東・東海地区はかなりの密度で測定が行われている。ここで、異なる応力測定方法による結果を比較する。ただし、これはまだ予備的な比較である。

2. 測定結果

地質調査所による応力測定の結果は表1に要約される。応力解放法も各種の方法があるが、ほとんどは、東大式孔径変位計を用いた孔径変化法を用いた。本方式は、1本のボーリング孔では2次元の応力測定しかできないが、簡便で精度がよい。ごく浅い深度での測定が多いので、鉛直方向の応力の測定意義が少なく、また、地震予知では水平方向の地殻応力が主に問題になるので、鉛直ボーリングにより水平方向の応力を精度よく求めることに主眼をおいている。

丹沢において何回も測定しているのは、測定法自体の開発・改良のためと、丹沢地区が応力値

が高いことが、測定の結果判明したためである。東大式孔径変化法では、水平最大圧縮の方向が $N 7^{\circ} \sim 30^{\circ} E$ 、水平最大圧縮応力 $6.9 \sim 12.3 \text{ MPa}$ 、水平最小圧縮応力 $1.8 \sim 4.5 \text{ MPa}$ とかなりのばらつきを示した。丹沢地区は、第三紀末から大きな地殻変動を受けつつけている場所で、多くの断層・割れ目があり、風化・変質がはげしいためであろう。丹沢D点では、応力解放法のうち、電研式埋設法を実施した。本方法は、原理的には孔径変化法の変種といてよいが、センターボーリング孔内に変化計をモルタルで埋設し、孔壁と一体化して測定する。結果は、やや応力値が低めであるが、東大式孔径変化法の変動幅の範囲に十分入っている。

1977年、応力解放法測定を実施する前に、予備測定として地表採取試料を用いて行なったX線法による残留応力測定では、応力解放法測定位置のやや北の石英閃緑岩中で、水平最大応力方向 $N 14^{\circ} E$ 、水平最大応力 9.8 MPa 、水平最小応力 3.0 MPa 、南の足柄層砂岩中で水平最大応力方向 $N 24^{\circ} E$ 、水平最大応力 26 MPa 、水平最小応力 1.2 MPa という値を得た。足柄層砂岩中の残留応力がやや極端すぎる点を除けば、応力解放法の結果と合う。また、山本(1985)は、石英閃緑岩中のX線測定点とほぼ同じ位置の深度69mのコアから、変形率変化法より、水平最大圧縮方向 $N S$ 、水平最大応力 8.9 MPa 、水平最小応力 4.0 MPa と、ごく近い結果を得ている。

伊豆半島の下田地区では、孔径変化法による3回の測定で、水平最大圧縮応力方向は $N 18 \sim 22^{\circ} W$ 、水平最大応力は $3.43 \sim 4.77 \text{ MPa}$ 、水平最小応力は $1.38 \sim 2.44 \text{ MPa}$ の間にあった。山本清彦(1985)の考案による変形率変化法では、水平最大応力方向は $N 22^{\circ} W$ 、水平最大応力 3.9 MPa 、水平最小応力 2.1 MPa で応力解放法と完全に一致する。また、伊豆下田および筑波では、付近で国立防災科学技術センターが水圧破砕法による応力測定を行ない(塚原・池田1984)、応力方向はごく近い結果が出ている(図1)。

伊豆半島土肥町では、地表から350 mの深さの清越鉱山(金)の坑道で、3本のボーリング孔により、応力解放法および水圧破砕法による応力測定を行なった。結果は、鉛直応力の絶対値が大きく異なったが、両者共ほぼ東西方向の極端な伸張応力状態を示した。この結果はプレートテクトニクスや鉱脈系からの推定と調和する。

静岡県芝川町では、孔径変化法・水圧破砕法・変形率変化法および世良田式チューブ法の四方法を併用した。その結果、水平最大応力方向は $N 8^{\circ} \sim 31^{\circ} W$ の間に入り、水平最大応力は $1.9 \sim 2.3 \text{ MPa}$ と、よく一致したが、水平最小応力は $0.0 \sim 1.35 \text{ MPa}$ と大きなばらつきがあった。

3. 考察

岩盤が良好であった伊豆下田では、孔径変化法による水平最大圧縮方向は角度幅 4° の中に入っているが、岩盤の悪い丹沢地区では同じ孔径変化法でも最大 23° の方位差がある。同一地点で孔径変化法と水圧破砕法を実施した静岡県芝川では、約 13° の方位差があった。土肥では、水平最大応力方向は一致しているが、三次元的な応力方位はかなり大きな違いがある(小泉他、1984)。近接した場所で測定された国立防災科学技術センターの水圧破砕法による応力測定結果(塚原・池田、1984)、と比較すると水平最大圧縮応力軸の方位は、約5 km離れた伊豆下田で 15° 、約7 km離れた茨城県筑波で 22° 、約18 km離れた丹沢と都留で約 80° の差があった。下田と筑波の応力方位は良く一致しているというべきであろう。丹沢と都留は、位置が多少離れており、地質構造からも複雑な地域であるので、測定方位の差は地殻の応力状態の差を反映していると考えられる。

水平最大圧縮応力の方位は $20^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 程度の範囲内で、測定方法が異なっても一致した測定結果が得られている。応力の絶対値については、芝川における水平最大応力はほぼ一致したが、他

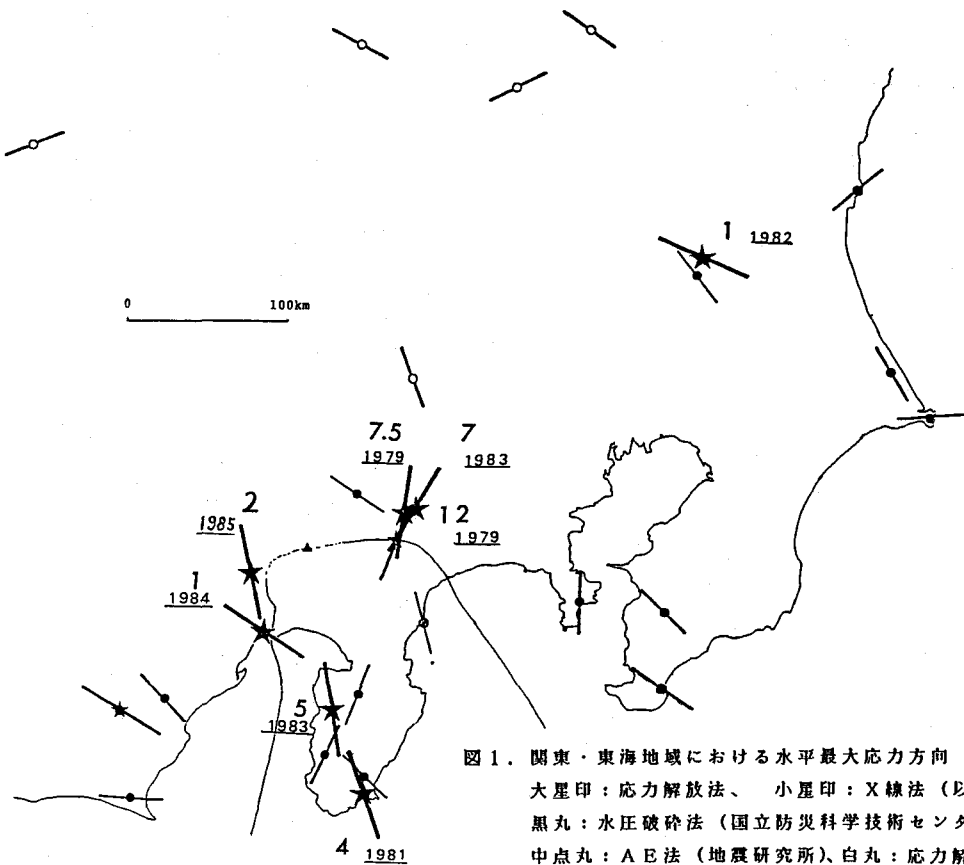


図1. 関東・東海地域における水平最大応力方向
 大星印：応力解放法、 小星印：X線法（以上地質調査所）
 黒丸：水圧破砕法（国立防災科学技術センター）、
 中点丸：AE法（地震研究所）、白丸：応力解放法（その他）

表1. 関東・東海地域における地殻応力測定結果（地質調査所）

測定点名	緯度	経度	標高 (m)	測定深度 (m)	水平最大応力 (MPa)	水平最小応力 (MPa)	水平最大応力 の方向	岩質	測定時期	測定法
丹沢A点	35°28'N	139°4'E	500	5.73	11.7	3.2	N 7° E	石英閃緑岩	1978.11	孔徑変化法
丹沢D点	35°28'N	139°4'E	500	14.89	7.5	2.6	N 9° E	石英閃緑岩	1979.12	埋設法
丹沢E点	35°28.5'N	139°5.5'E	900	11.25	12.3	4.5	N 27° E	石英閃緑岩	1979.11	孔徑変化法
下田	34°40.5'E	138°56.5'E	12	19.0	4.0	2.0	N 20° W	矽分岩	1981.3	孔徑変化法
筑波	36°11'N	140°5.5'E	40	16.26	1.0	0.0	N 66.5° W	花崗岩	1982.3	孔徑変化法
丹沢F点	35°28'N	139°4'E	500	12.78	6.9	1.8	N 30° E	石英閃緑岩	1983.2	孔徑変化法
土肥	34°54'N	138°50'E	12.50	350	4.7	2.1	N 8° W	閃緑岩	1983.12	孔徑変化法 鉛直応力 16.2MPa
				350	7.6	5.1	N 8° W			水圧破砕法 鉛直応力 9.3MPa
菅原	35°07'N	138°36'E	20	14.25	1.1	0.0	N 65° W	安山岩	1984.3	孔徑変化法
芝川	35°17'N	138°33'E	299	10.93	2.3	0.0	N 21° W	安山岩	1985.3	孔徑変化法
				16	—	0.4	N 8° W			水圧破砕法
				31.85	1.9	1.35	N 27° W			チューブ法
				19.0	2.0	0.8	N 31° W			変形率変化法

の場合はかなり大きな違いがある。しかし、水平応力がきわめて大きいとか、逆に垂直応力より小さいといった、相対的応力状態については測定法がことなっても一致している。

変形率変化法は原位置測定法ではないが、孔径変化法の結果とよく一致しており、有望な測定法と考えられる。世良田式チューブ法 (Serata and Bellman, 1983) は、芝川で試行したが、最初の測定としては良好な結果が得られた。ただし、測定経験がもっと必要であり、AEを同時に測ったり、インプレッション・パッカーを用いる等して、さらに測定精度を上げることが期待される。しかし、深部測定が可能であり、水圧破砕法でやっかいな問題である間隙水圧の問題がない。また、岩盤の変形特性や破壊強度に関するデータも得られるという利点もある。水圧破砕法と併用すれば相互の信頼性を高めることができるであろう。

測定された水平最大圧縮応力軸の方向分布はかなりのばらつきがあるが(図1)、 $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 程度の誤差がありうることを考慮して大まかに見れば、北関東付近は、全体として東西方向に圧縮軸があると推定される。南関東・東海地域は、伊豆・丹沢を除くと北西-南東方向の圧縮軸を示す。ところが、丹沢地区から伊豆半島西部にかけて南北方向に近い圧縮軸が見られる。これは、フィリピン海プレートが、伊豆半島を核としてユーラシア・北アメリカ両プレートの間に割り込んだ特異な形態をしている影響で、応力場が大きく乱れていることを示すと考えられる。

丹沢地区では、ほぼ南北方向にきわめて大きな圧縮応力が測定されているが、これは丹沢地塊が伊豆半島の衝突によって押されていることを示す。また、伊豆半島西岸の土肥町での東西方向への強い伸張応力場は、フィリピン海プレートが駿河トラフにもぐりこんでいるための地殻浅部の曲げによる伸張を示す。しかし、三プレート境界域の応力場は、地震予知のためにもさらに詳細に測定する必要がある。

4. 結論

水平最大圧縮応力の方位については、測定法が異なっても、 $20^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 程度の角度内で一致し、この程度の信頼性が確かめられた。応力状態は相対的には一致した傾向となるが、異なる測定法間の絶対値の比較はまだ困難である。現段階では複数の原理の異なる測定法を併用して、信頼度を高めることが望ましい。測定結果はプレートの相互作用とほぼ調和するが、三プレート境界域の地殻応力場をさらに詳細に測定する必要がある。

(参考文献)

- (1) 塚原弘昭・池田隆司：水圧破壊法による地殻応力測定、第6回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、367-37、1984。
- (2) 吉川澄夫・茂木清夫：岩石のAE活動度の応力履歴効果による応力推定法-第6報、地震学会講演予稿集N0.1、232、1983
- (3) 山本清彦(代表者)：岩石試料内応力場の微細構造と先行応力記憶機構、科研費研究成果報告書、1985。
- (4) 小泉昇三・西松裕一・小出仁・三宅克行：2種類の方法による岩盤応力の測定、第6回岩の力学シンポジウム講演論文集、379-384、1984。
- (5) Serata, S. and Bellman, R. A.: Development of the Serata Stress-Measuring System for Application to both Hard-Brittle and Soft-Ductile Grounds, Proc. 24th U.S. Symp. Rock Mechanics. 343-358, 1983.

(53) Comparison among Several Methods for Stress Measurement in the Kanto-Tokai District, Japan

Hitoshi KOIDE (Geological Survey of Japan)
Yuichi NISHIMATSU (The University of Tokyo)
Shozo KOIZUMI (The University of Tokyo)
Kazuo HOSHINO (Geological Survey of Japan)
Tadashi KANAGAWA (Central Research Institute
of Electric Power Industry)
Yoshiki NAKAYAMA (Nihon Public Engineering Co.)
Akira INOUE (Nihon Public Engineering Co.)
Kiyohiko YAMAMOTO (Tohoku University)
Shinji KIKUCHI (Japan Development
and Construction Co.)

ABSTRACT

The Geological Survey of Japan and the University of Tokyo collaborated to measure the state of stress with the purpose of application for the earthquake prediction research in the Kanto-Tokai District, Japan. The stress measurements were made mainly with the overcoring technique, in which a three component borehole deformation gage was inserted, and overcored in a shallow borehole drilled vertically from the ground surface. In some cases, hydraulic fracturing technique, overcoring with an inclusion stress meter, Serata's tube method and deformation rate method are also used for comparison with the results by the stress relief method with a borehole deformation gage. The National Research Center for Disaster Prevention also made in-situ stress measurements with the hydraulic fracturing technique in deep boreholes up to 800m depth for the earthquake prediction research. Thus, these measurements, combined with several other stress measurements, made the Kanto-Tokai District one of the most densely stress measured areas in the world.

Although the difference of 20~25° is observed among the measured directions of the greatest horizontal principal compressive stress in the same area, the measured stress directions coincide within this error range even if the methods for stress measurements are different. The relative figures of state of stress, measured with different methods, are similar, but the comparison of absolute values of stress is difficult among different methods.

The direction of maximum horizontal compression is generally east-west in the northern part and northwest-southeast in the southern part of the Kanto-Tokai District. But the direction of maximum horizontal compression is disturbed greatly in the south-central part where three plates interact each others.