

応力解放法測定結果に基づくわが国の地下深部 岩盤応力状態の検討

長 秋雄^{1*}・国松 直²・金川 忠³・藤井 真希³・横山 幸也⁴・小川 浩司⁴

¹産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門（〒305-8567 茨城県つくば市東1-1-1中央7）

²産業技術総合研究所 活断層研究センター（〒305-8567 茨城県つくば市東1-1-1中央7）

³日特建設株式会社 技術本部我孫子研究室（〒270-1153 千葉県我孫子市緑1-1-3）

⁴応用地質株式会社 エネルギー事業部（〒336-0015 埼玉県さいたま市南区大田窪2-2-19）

*E-mail: akio.cho@aist.go.jp

わが国でこれまでに応力解放法により測定された岩盤初期応力データの文献調査を行った。被り深さ100m以深のものを対象とし、収集数は埋設法21例・孔底法41例であった。収集データに基づき応力値・傾斜角・側圧比等の被り深さ分布を、岩種別に検討した。また、水平最大主応力と日本の地殻水平歪変化（1994-1985）との相関を検討した。その結果、(1)火成岩・堆積岩・変成岩では最大主応力の被り深さ分布が異なること、(2)火成岩での最大側圧比の上限値は、被り深さの増加にともない低下する傾向が認められること、(3)水平最大主応力は地殻水平歪速度（1994-1984）と必ずしも良い相関を示さないこと、などが明らかになった。

Key Words : *in-situ stress, stress state, stress relief method, crustal strain*

1. はじめに

地下空洞の設計・掘削において岩盤初期応力状態の測定と評価は必要不可欠である。これまでに埋設法や孔底法による岩盤初期応力の測定が行われてきた。Kanagawa et al. (1986)¹⁾は、埋設法による測定結果23例に基づき、岩盤初期応力状態の評価と構造地質学的な検討を行った。斎藤ほか（1988）²⁾は、孔底法による測定結果18例を加えた計41例から、同様の検討を行うとともに、岩盤の粘弾性的性質が応力状態に及ぼす影響を検討した。1999年の核燃料サイクル開発機構報告「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 - 地層処分研究開発第2次取りまとめ」³⁾では、斎藤ほか（1988）の収録データと同機構が行った測定例に基づき、地下深部岩盤での応力状態の評価が行われている。Yokoyama et al. (2003)⁴⁾は、さらに応力解放法による測定結果33例とAE-DRA法による測定結果35例を加えた計109例から、岩盤初期応力状態の評価と構造地質学的な検討を行った。Tanaka (1986)⁵⁾は、地震予知関連研究で実施した孔底法での測定結果14例と京都大学工学部資源工学科が行った孔底法での測定結果10例に基づき、応力値の標準的な深度勾配を求め、それから求められる深さ300mでの推定応力値を用いて応力値の地域性を検討した。

我々は、今後の地下空間利用・地下岩盤利用を念頭に、より詳細なデータセットを作成することを目的として、文献調査を行った。文献調査の対象は、信頼性に優れ、三次元応力場を測定できる応力解放法に限定した。このデータセットには、被り深さ100m以深で実施された全62例（埋設法21例、孔底法41例）の測定結果について、三次元主応力・水平主応力・6応力成分、測定点の位置情報、地質・岩盤情報などを収録した。このデータセットは近々公開する予定である。

本論文では、このデータセットに基づき検討したわが国の地下深部岩盤での初期応力状態を報告する。また、これまでは定性的な評価しかされなかった応力値と地球科学的な造構運動との相関について、国土地理院が公表した地殻水平歪変化（1994-1985）⁶⁾を造構運動の指標として水平最大主応力との相関を検討した。

2. 収集した応力測定データ

文献収集できた応力測定点の位置を図-1に示す。▲，○，●はそれぞれ測定点の岩種（火成岩，堆積岩，変成岩）を示す。同一サイトで被り深さが異なる事例や測定点が近接した事例があり、図-1に示された総数は62点に

なっていない．測定点は本州中央部の山岳地帯に多かった．3章以降の検討や図では，同一サイトの測定であっても各文献データを独立に扱った．

応力測定が行われた原位置岩盤の岩種は，火成岩30例，堆積岩16例，変成岩13例，不明3例であった．岩級区分は， $C_M \sim C_L$ 級1例， $C_M \sim C_H$ 級3例， C_H 級9例， $C_H \sim B$ 級8例，B級5例， $B \sim A$ 級3例，不明33例であった．測定法別の岩種と岩級の事例数を表-1と表-2に示す．孔底法で岩級の記載がない場合が多かった．

被り深さは，600m以浅が52例であった．600mより深いものは10例であり，うち8例の原位置岩盤は変成岩（片麻岩，片岩，ホルンフェルス）であった．

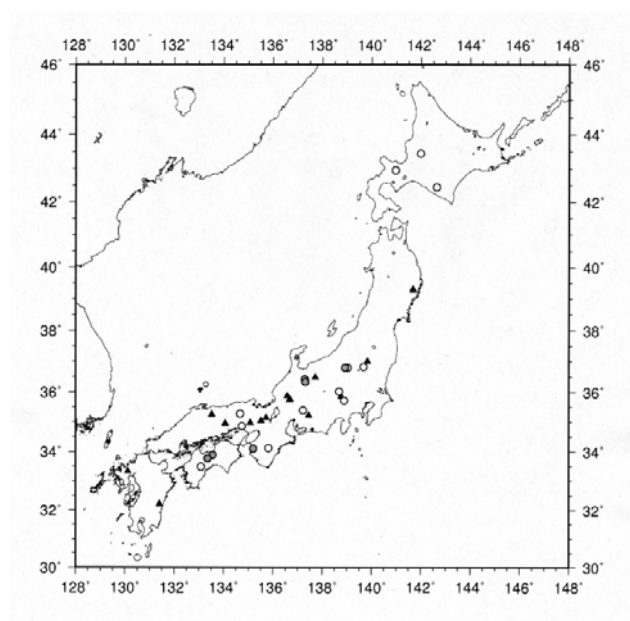


図-1 文献収集できた応力測定点の位置

表-1 埋設法での岩種と岩級

岩種	火成岩	堆積岩	変成岩
$C_M \sim C_L$		1	
$C_M \sim C_H$	1	1	
C_H	4	4	
$C_H \sim B$	2	3	1
B	1		
$B \sim A$			2
不明		1	

表-2 孔底法での岩種と岩級

岩種	火成岩	堆積岩	変成岩
$C_M \sim C_L$			
$C_M \sim C_H$	1		
C_H		1	
$C_H \sim B$	1		1
B	4		
$B \sim A$			1
不明	16	5	8

3. 三次元主応力

三次元主応力のそれぞれの大きさの被り深さ分布を図-2a, 3, 4に示す．後述するように，応力状態は岩種により異なっており岩種別にシンボルを変えて表示した．収集事例での平均的な岩盤密度は 26kN/m^3 であったので，この密度での被り圧を破線で示す．

(1) 三次元最大主応力

三次元最大主応力の大きさは，火成岩・堆積岩・変成岩ではそれぞれ，被り圧の約1～4倍・1～1.5倍・1～2倍の範囲にあった．堆積岩・変成岩と比べて，火成岩では三次元最大主応力が大きい事例が多かった．

三次元最大主応力の水平からの傾斜角を被り深さ分布との関係で図-2bに示す．火成岩では，三次元最大主応力の傾斜角が 30° 以下のものが多かった（30例中23例）．

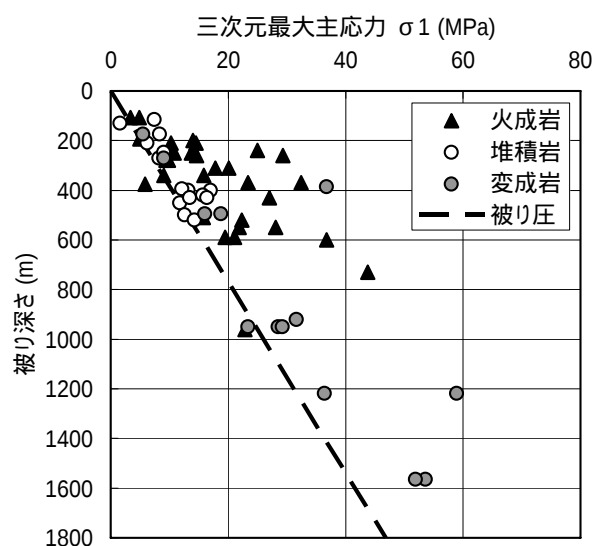


図-2a 三次元最大主応力の大きさ

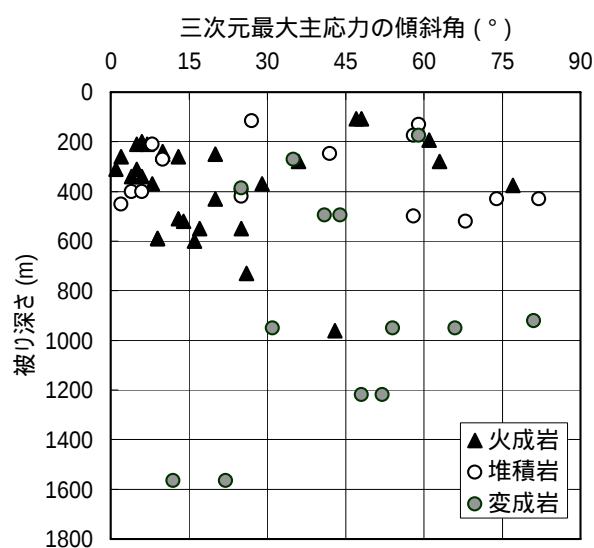


図-2b 三次元最大主応力の傾斜角

(2) 三次元中間主応力

三次元中間主応力の大きさは、岩種によらず、ほとんどが被り圧の約0.5～1.5倍の範囲にあった。

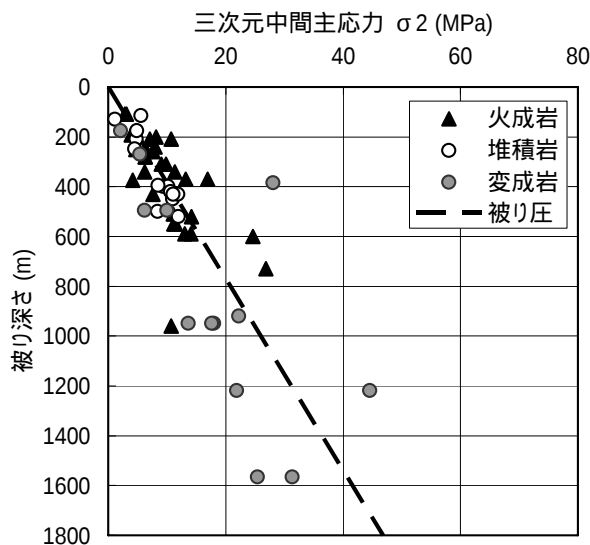


図-3 三次元中間主応力の大きさ

(3) 三次元最小主応力

三次元最小主応力の大きさは、岩種によらず、ほとんどが被り圧の約0.2～1倍の範囲にあった。

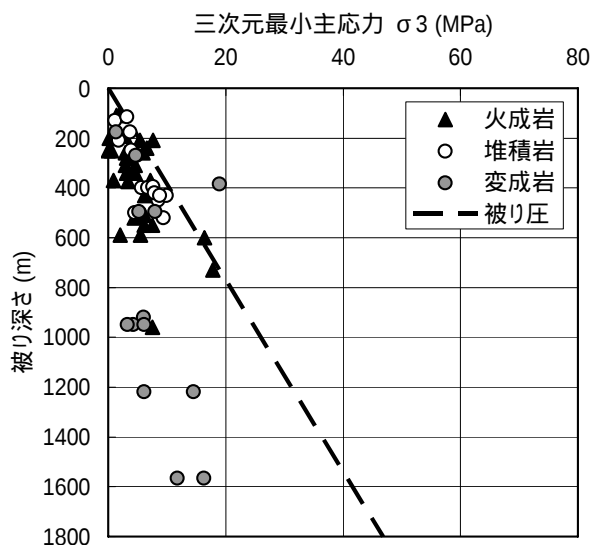


図-4 三次元最小主応力の大きさ

(4) 堆積岩の特徴

図-2a・図-3・図-4に示されるように、堆積岩での三次元主応力の被り深さ分布では、その分布幅は小さかった。また、火成岩と変成岩と比べ、堆積岩での主応力比が小さいという特徴が認められた。堆積岩では、最大主応力と中間主応力の比は1.1～2.0の範囲に、最大主応力と最小主応力の比は1.4～3.4の範囲にあった。

4. 鉛直応力と水平主応力

鉛直応力、水平最大主応力、水平最小主応力の被り深さ分布を、図-5, 6, 7に示す。図中の破線は、平均的な岩盤密度26kN/m³での被り圧を示す。

(1) 鉛直応力の大きさ

鉛直応力成分の大きさは、岩種によらず、被り圧の約0.5～1.7倍の範囲にあった。

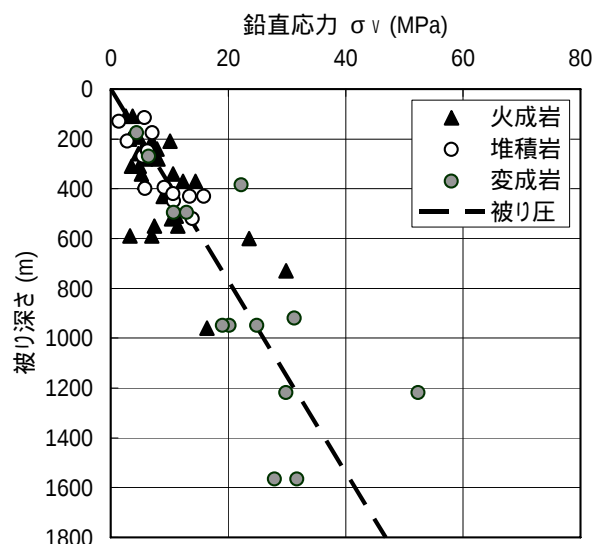


図-5 鉛直応力

(2) 水平最大主応力の大きさ

水平最大主応力の大きさは、火成岩・堆積岩・変成岩それぞれで、被り圧の約1～4倍・1～1.5倍・0.7～1.3倍の範囲にあった。堆積岩・変成岩と比べて、火成岩では水平最大主応力が大きい事例が多かった。

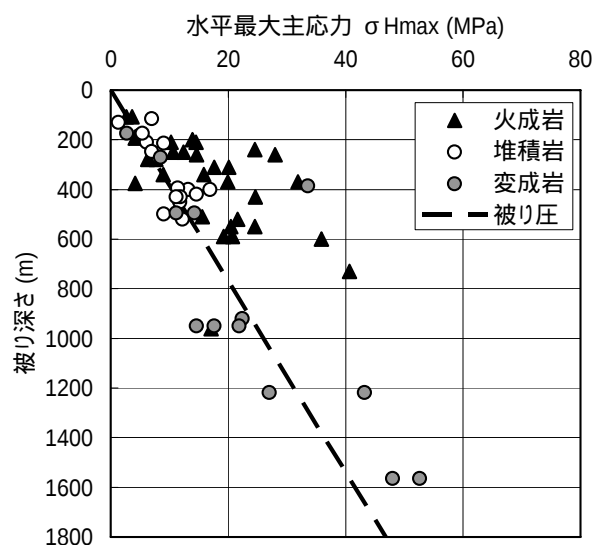


図-6 水平最大主応力

(3)水平最小主応力の大きさ

水平最小主応力の大きさは、岩種によらず、ほとんどが被り圧の約0.2～1倍の範囲にあった。

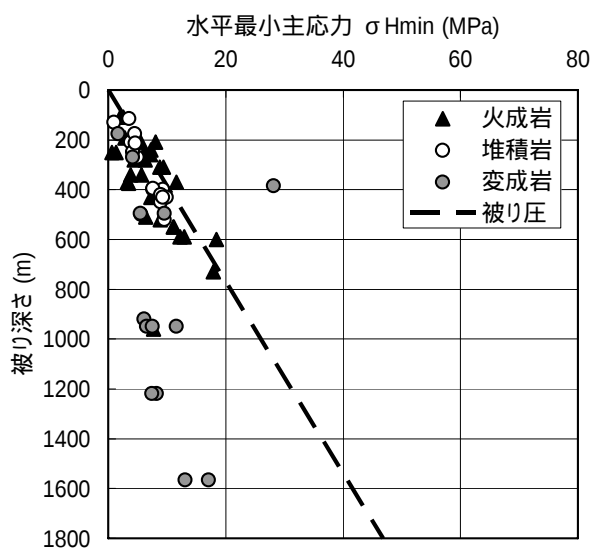


図-7 水平最小主応力

(4)最大側圧比

最大側圧比の被り深さ分布を、図-8に示す。火成岩での最大側圧比は0.7～6.3の範囲にあり、被り深さが深くなると上限値が小さくなる傾向が認められた。被り深さ600m以深では、測定点数は2点であるが、1前後の値であった。堆積岩での最大側圧比は0.7～2.3の範囲にあった。変成岩での最大側圧比は0.6～1.7の範囲にあった。

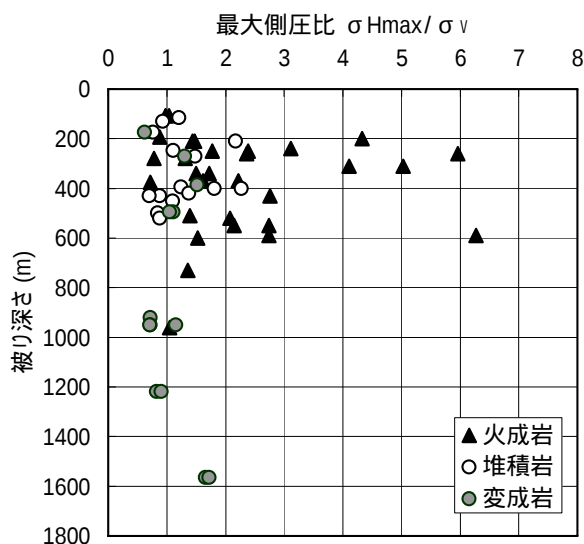


図-8 最大側圧比

5. 水平最大主応力と地殻水平歪変化

国土地理院が測定した三角網（一辺10km以上）での過去約100年間（1994-1983）と過去約10年間（1994-1985）の地殻水平歪が公表されている⁵⁾。数値データは国土地理院ホームページから入手できる。過去約100年間の歪変化にはその間に発生した地震や火山活動による地殻変動の影響が含まれているので、ここでは過去約10年間の地殻水平歪を用いて水平最大主応力と地殻水平最大主歪の関係を検討した。なお、国土地理院が測定した歪値はその期間の歪変化量であり、地殻歪の絶対量ではないことに留意しなければならない。

水平最大主応力の大きさと方位を図-9に示す。黒丸が測定点の位置を示し、直線が応力値の大きさと方位を示している。図の右下にある線の長さが10MPa相当である。同一サイトで異なる被り深さで測定されている事例や近接した事例では、一つの黒丸に複数の直線がついている。図-9に示されるように、同一サイトや近接した測定点でも水平最大主応力の方位が異なる事例があった。

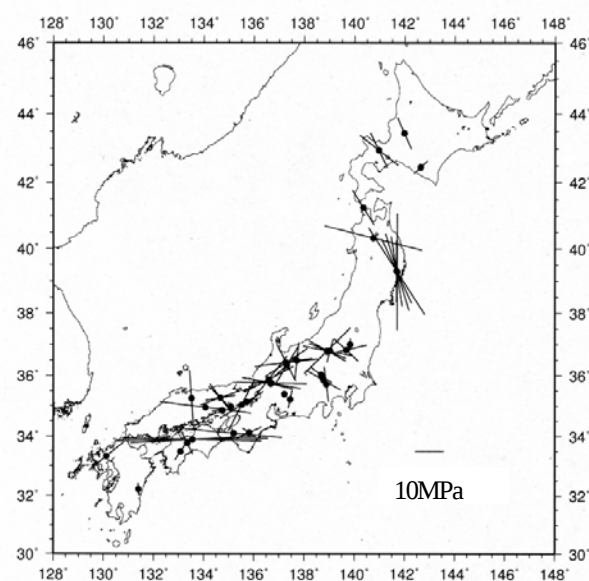


図-9 水平最大主応力の大きさと方位

応力測定点に対応する三角網として、応力測定点の緯度・経度と三角網の重心緯度・重心経度（三角網の3頂点の緯度・経度の平均）の差の二乗和が最小のものを選定し、その三角網での水平最大主歪(1994 - 1985)と水平最大主応力を比較した。

(1) 水平最大主応力方位と地殻水平歪変化方位の比較

両者の方位差を15°毎に区分し、その頻度を図-10に岩種別に示す。両者の方位差が30°以内のものは、59例中20例（火成岩では30例中4例、堆積岩では16例中7例、変成岩では13例中9例）であった。両者の方位は必ずしも一致しなかった。

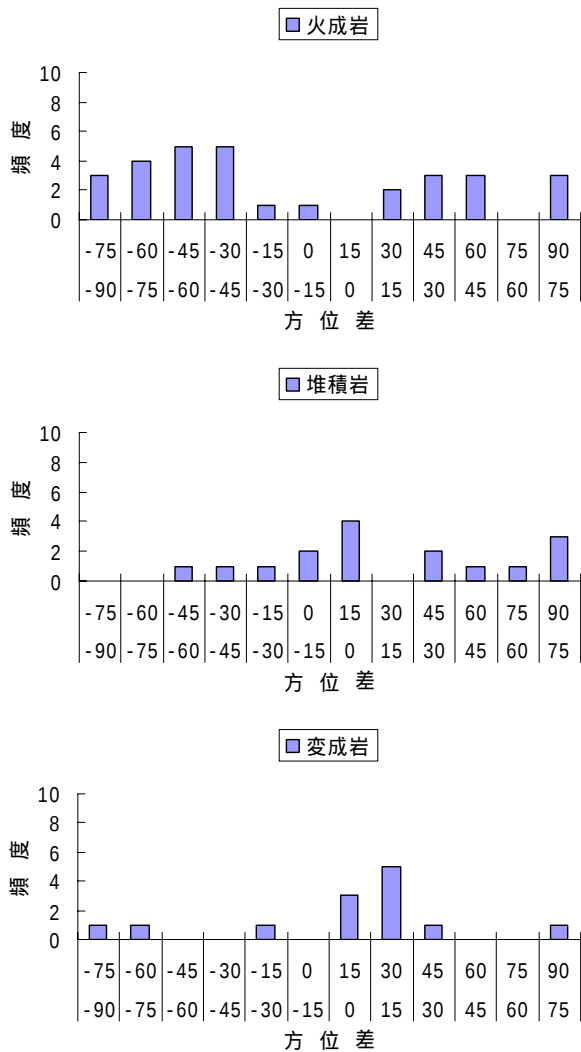


図-10 水平最大主応力方位と地殻水平最大主歪方位 (1994 - 1985)の方位差の頻度分布

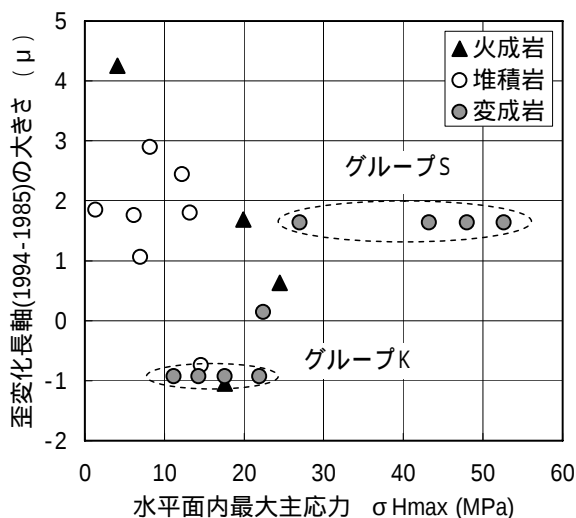


図-11 方位差が30°以内の水平最大主応力と地殻水平歪変化長軸(1994 - 1985)の大きさ

(2) 水平最大主応力値と地殻水平歪変化量の比較

水平最大主応力と水平最大主歪(1994 - 1985)の方位差が30°以内のものについて、両者の大きさの関係を図-11に示す。図では、圧縮歪を正としている。グループSとグループKは、それぞれ同一鉱山での測定例であった。水平最大主応力の大きさと水平最大主歪の大きさは、必ずしも良い相関を示さなかった。

6. 考 察

岩盤初期応力発生の大きな要因として、岩盤自体の自重(被り圧)がある。鉛直応力成分の大きさが、被り圧とおおむね等しいことは、このことを示している。しかし、必ずしも測定位置直上の被り圧と一致しているとは限らない。これは、地形や地質構造の影響を受けているためと考えられる。例えば、斜面下の測定では、直上の岩盤自重に加えて、斜面上部の岩盤自重が流れてきて上乗せされる場合がある。地質構造が不均質な岩盤では、相対的に硬質の岩盤が上部の岩盤自重をより多く負担し、鉛直応力は大きくなるであろう。逆に、相対的に軟質の岩盤では鉛直応力は小さくなるであろう。

三次元最大主応力や水平最大主応力の大きさが被り圧より大きいという測定結果は、水平方向の外力があることを示唆している。その原因として、地形や地質構造に起因する側方応力、地殻運動による造構応力、地表侵食後の残留応力などが考えられる。

我々は、地殻運動による造構応力方位の指標として地殻水平歪(1994-1985)を用い、水平最大主応力方位と水平最大主歪方位との比較を行った。その結果、両者は必ずしも一致しなかった。ただし、両者の方位が一致すべき必然性はない。三角網の一辺の大きさは10km以上であり、日本の地質構造を考えれば、三角網内部の地質構造は一樣とは考えられない。不均質な地質構造により、応力方位も不均一になると考えられる。

また、両者の大きさも必ずしもよい相関を示さなかった。測量により求められる歪は変化量であり歪の絶対量ではないので、両者が相関すべき必然性はない。過去約10年間の地殻歪変化は1 μ のオーダーである。岩盤の弾性定数を仮に10GPaとすると、地殻歪変化1 μ オーダーに対応する応力変化は10kPaオーダーである。この値は、実測されている岩盤初期応力の大きさ(数~数10MPa)の100分の1~1000分の1以下の大きさでしかない。

応力の被り深さ分布は、火成岩、堆積岩、変成岩により異なっていた。火成岩では、堆積岩や変成岩と比べ、大きな三次元最大主応力や大きな水平最大主応力が測定された事例が多い。一方、堆積岩では三次元主応力比が小さい。これらの特徴は、既に金川(1999)⁷⁾により指摘さ

れており、今回再確認できた。

わが国では、被り深さ600m以浅では多くの測定例がある。しかし、被り深さ600m以深の測定例は限られており、火成岩2例と変成岩8例の報告があるのみであった。しかも同一サイトでの測定が含まれており、実サイト数は3サイトでしかない。これまでに述べた深部岩盤での初期応力状態の特徴は、被り深さ600m以深では信頼性は低くなる。Yokoyama et al. (2003)³⁾に集録されている被り深さ600m～1600m付近までのAE-DRA法9例での水平最大主応力は被り圧の1～1.5倍の範囲にあり、今回の結果と類似する。

今回の結果では、水平最小応力が被り圧より小さく、横ズレ断層型の応力状態であった。一方、水压破碎法での測定結果では、水平最小応力は被り圧と同程度かそれより大きい⁸⁾。この違いの解明は今後の検討課題である。

7. 結論

応力解放法による岩盤初期応力測定結果（被り深さ100m以深、全62例）から評価した深部岩盤初期応力状態は次のとおりである。

1. 三次元最大主応力の大きさは、火成岩・堆積岩・変成岩それぞれで、被り圧の約1～4倍・1～1.5倍・1～2倍の範囲にあり、特に火成岩に大きい事例が多かった。三次元中間主応力の大きさは、岩種によらず、被り圧の約0.5～1.5倍の範囲にあった。三次元最小主応力の大きさは、岩種によらず、多くが被り圧の0.2～1倍の範囲にあった。
2. 火成岩での三次元最大主応力の傾斜角は30°以下、すなわち水平に近いものが多かった（30例中23例）。
3. 堆積岩では三次元での主応力比が小さいという特徴が認められた。
4. 鉛直応力の大きさは、岩種にかかわらず被り圧の約0.5～1.7倍であった。水平最大主応力の大きさは、

火成岩・堆積岩・変成岩それぞれで、被り圧の約1～4倍・1～1.5倍・0.7～1.3倍の範囲にあった。水平最小主応力の大きさは、岩種によらず、被り圧の約0.2～1倍の範囲にあった。

5. 火成岩での最大側圧比は0.7～6.3の範囲にあり、被り深さの増加にともない低下する傾向が認められた。堆積岩と変成岩での最大側圧比はそれぞれ、0.7～2.3、0.6～1.7の範囲にあった。
6. 地殻水平歪変化(1994 - 1985)を造構応力場の目安と考え水平最大主応力との関係を検討したところ、両者は必ずしも良い相関を示さなかった。

参考文献

今回とりまとめた応力測定データの原著論文、埋設法45文献と孔底法35文献については紙面の都合で割愛する。

- 1) Kanagawa, T., Hibino, S., Ishida, T., Hayashi, M. and Kitahara, Y.: In situ stress measurements in the Japanese islands: Over-coreing results from a multi-element gusge used at 23 sites, *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 23 (1), pp. 29-39, 1986.
- 2) 斎藤敏明, 石田毅, 寺田亨, 田中豊: 実測結果に基づく地下岩盤内の初期地圧状態の検討, 土木学会論文集, No.394/ -9, pp.71-78, 1988.
- 3) 核燃料サイクル開発機構: わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 - 地層処分研究開発第2次取りまとめ - 総論レポート, pp. -71- -74, 核燃料サイクル開発機構, 1999.
- 4) Yokoyama, T., Ogawa, K., Kanagawa, T., Tanaka, M. and Ishida, T.: Regional in-situ stress states in Japan based on measurements, *Proceedings of the third international symposium on rock stress*, RS Kumamoto, pp. 335-341, 2003.
- 5) Tanaka, Y.: State of crustal stress inferred from in situ stress measurements, *J. Phys. Earth*, 34 (suppl.), pp. S57-S70, 1986.
- 6) 建設省国土地理院編: 日本の地殻水平歪, 地震予知総合研究振興会, 1997.
- 7) 金川忠: 地下空洞建設における Acoustic Emission の利用技術に関する研究, 学位論文, 219p, 1999.
- 8) 長秋雄: 国内の深地層初期応力状態, 日本応用地質学会平成 12 年度研究発表会講演論文集, pp.129-132, 2000.

CHARACTERISTICS OF DEEP UNDERGROUND STRESS STATE IN JAPAN BASED ON STRESS RELIEF METHODS

Akio CHO, Sunao KUNIMATSU, Tadashi KANAGAWA, Maki FUJII,
Tatsuya YOKOYAMA and Koji OGAWA

We compiled 62 in-situ stress data (21 boreholes by deformation methods and 41 boreholes by bottom surface methods), measured to a depth over 100m in Japan. This data served as a basis to study the deep underground stress states in the country. Results indicate that the stress states in igneous, sedimentary, and metamorphic rocks were different from each other. Large horizontal stresses, which were twice larger than vertical stresses, were measured in many sites of igneous rocks. The directions of the maximum horizontal stresses did not always coincide with those of the maximum axes of crustal strain change obtained by geodetic triangle measurements between 1994 and 1985.