



1,000m試錐孔における岩盤の 初期応力測定 —東濃地域における測定例—

佐藤 稔紀 前田 信行 松井 裕哉

東濃地科学センター

資料番号 : 5 - 12

Rock Stress Measurement in 1,000m -Deep Boreholes around Tono Area-

Toshinori SATO Nobuyuki MAEDA Hiroya MATSUI
Tono Geoscience Center

超深地層研究所予定地における岩盤の初期応力状態を把握するために、地表から掘削した1,000m試錐孔において水圧破砕法による初期応力測定を行った。これより、水平面内の主応力を算出するとともに、三角測量の結果などから推定される広域応力場との比較や地質構造との関係について検討した。その結果、水平面内の最小主応力の値は深度とともに土破り圧との大小関係が変化し、逆断層から横ずれ断層型へと応力状態が変わる。水平面内の最大主応力の値は最小主応力の値の2倍程度であり、深度500mまでは深度の増加とともに大きくなるものの、位深では応力値の増加はほとんど認められない。

水平面内の最大主応力の方向は地表から深度200mないし250mまでは南北方向を示し、それ位深は北西-南東方向を示し、広域応力場の最大圧縮ひずみの方向と一致することがわかった。

Rock stress measurements have been performed at the MIU (Mizunami Underground Laboratory) site to understand in-situ stress states. The hydraulic fracturing method has been applied in 1,000m-deep boreholes. The results show that the stress state varied with depth from reverse fault type to strike-slip fault type. The ratio of maximum and minimum horizontal stresses is about two and is independent of depth. The orientation of maximum horizontal stress deeper than 200m~250m coincides with the direction of the regional stress state.

キーワード

岩盤、初期応力、地質構造、断層

Rock Mass, In-situ Stress, Geological Structure, Fault

1. はじめに

坑道や地下発電所などの地下空洞の設計・施工の際には、岩盤の初期応力や物性値などの力学的な性状に関する調査が行われる。岩盤の力学的な性状に関するデータは、地下空洞の形状や寸法、掘削工法、支保形態などの個別の要素を決定する際に必要になる。例えばカナダ原子力公社(Atomic Energy of Canada Limited: AECL)の地下研究施設(Underground Research Laboratory: URL)では最大主応力の値及び主応力の比が大きいため坑道周辺に岩盤が破壊する領域が生じている¹⁾。このため、坑道掘削の方向や坑道の形状が制限される。また、地下発電所などの地下空洞の掘削に際しては、このような条件では、空洞の長軸方向を

最大主応力の方向と一致させることが通例となっている。このように、地下空洞の設計・施工において初期応力のデータは極めて重要である。

東濃地科学センターでは、地下深部の地質環境データを取得すること、地質環境中で生じる現象及びそのメカニズムを理解すること、並びに、そのために必要な調査機器及びモデル化・解析手法(予測と検証を含む)を開発することを目的として地層科学研究を実施している²⁾。地層科学研究を行う主要な施設の一つとして、岐阜県瑞浪市に計画している超深地層研究所がある。この研究所は、地下1,000m程度の花崗岩中に建設する予定であり、現在は数本の深さ1,000mの試錐孔を利用した地表からの調査を主体とした研究を行って

いる³⁾。岩盤の力学的な性状は、地下水の流動機構や地球化学的な性状とともに地質環境の特性を理解する上で主要な条件の一つとして、また、地下施設の設計において必要不可欠なデータと位置付け、調査・研究を実施している。本報告では、超深地層研究所計画の1,000m試錐孔における岩盤の初期応力測定の結果について報告する。

2. 測定概要

2.1 測定位置

初期応力測定を行った場所は岐阜県瑞浪市の超深地層研究所予定地であり、東濃鉱山に隣接している(図1)。この地域の地質は基盤をなす中世代~古第三紀の花崗岩(土岐花崗岩)及びその花崗岩を不整合に被覆する堆積岩からなる。堆積岩は第三紀中新世の瑞浪層群と第三紀鮮新世の瀬戸層群からなる。

初期応力測定は地表から掘削された2本の鉛直試錐孔(AN-1孔とMIU-2孔; 離間約300m)において実施した。これらの試錐孔の深度は約1,000mである。岩盤は電力中央研究所式の分類によるB級とC_H~C_M級が主体の花崗岩であり、深度300m付近と800m付近にき裂頻度が高い部分が出現している。

初期応力測定を実施した土岐花崗岩の物性値を表1に示す。力学試験の標準試料とされる稲田花崗岩などと比較して、物性値はそれほど差がないことが分かった。

2.2 測定方法及び解析方法

初期応力測定の方法はこれまでに種々提案され

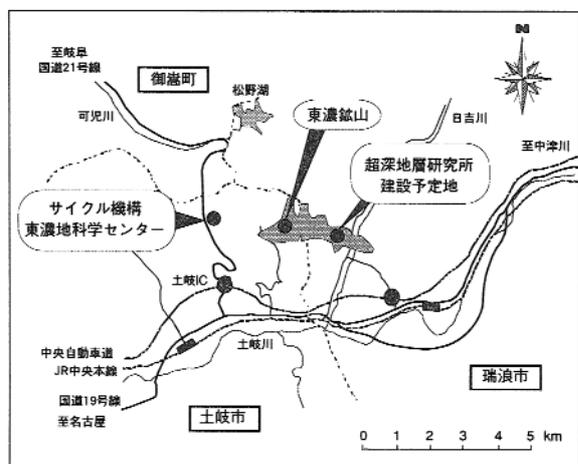


図1 超深地層研究所の位置図

表1 土岐花崗岩の物性値

物性	土岐花崗岩			稲田花崗岩
	データ数	平均値	標準偏差	平均値
有効空隙率 (%)	40	1.3	0.4	0.64
自然密度 (t/m ³)	40	2.61	0.02	2.65
P波速度 (km/s)	40	4.88	0.56	4.95
一軸圧縮強度 (MPa)	40	182.4	38.7	204.4
ヤング率 (GPa)	40	49.6	7.2	64.8
ポアソン比 (-)	39	0.34	0.03	0.30
圧裂引張強度 (MPa)	39	7.9	1.8	11.2
せん断強度 (MPa)	21	29.4	10.3	28.8
内部摩擦角 (°)	21	56.1	3.1	58.7

ているが^{4),5)}、今回用いた方法は、試錐孔を利用する水圧破砕法である。水圧破砕法によって水平面内の初期応力分布を求めることが可能であり、今回のような大深度の試錐孔における測定では実績も多く、信頼性も高いとされている。

水圧破砕法の測定システムを図2に示す。水圧破砕法は、試錐孔内にパッカーを設置し、閉鎖された区間に水圧を加えて孔壁を破壊し、水圧-時間曲線から特徴的な圧力点を得て、円孔まわりの弾性解を用いて水平面内の主応力値を求める方法である。また、水圧破砕の前後に孔壁の型取りを行い、破砕き裂の同定とその方向を求めることにより、主応力の方向を算出する。

3. 測定結果及び考察

水圧破砕法はAN-1孔とMIU-2孔でそれぞれ

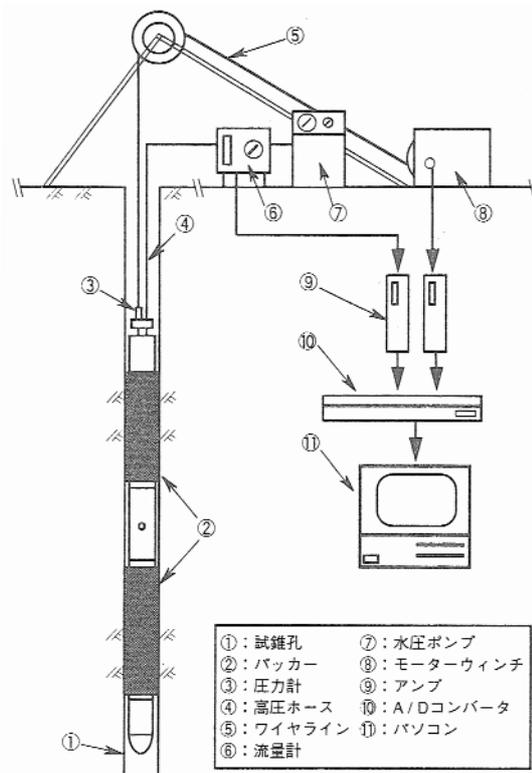


図2 水圧破砕法による初期応力測定システム

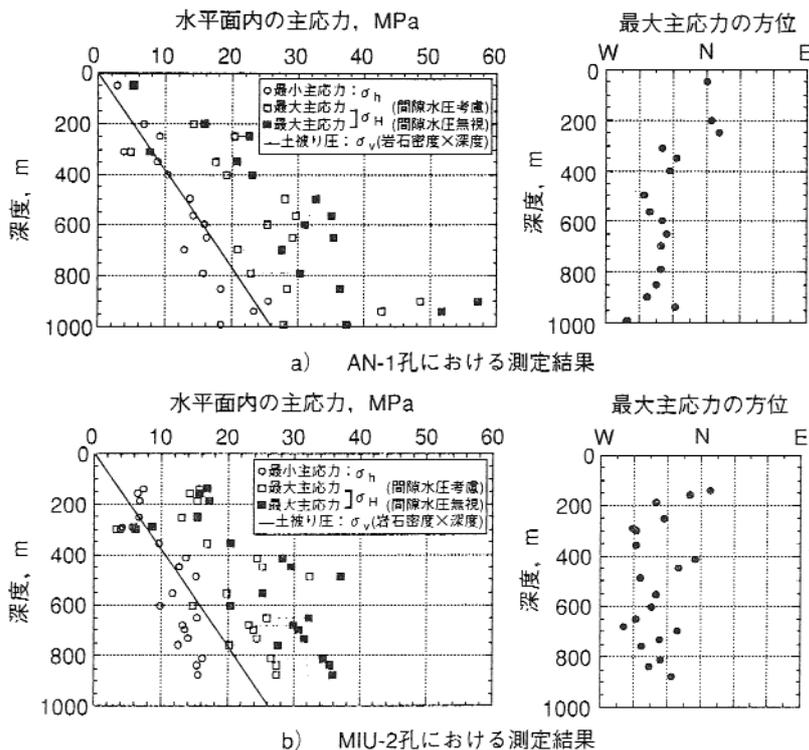


図3 水圧破砕法による初期応力測定の結果

上図はAN - 1孔、下図はMIU - 2孔における結果を示す。左図は水平面内の主応力の値、右図は最大主応力の方位を示す。左図中、最大主応力は解析上で間隙水圧を考慮した場合と無視した場合の両方を示した。真の最大主応力はこれらの範囲にあることを示している。直線は岩石の密度 (2.6g/cm³) を勾配とした土被り圧を示している。

20点ずつ実施した。このうち、AN - 1孔の4点では解析に使用できない横き裂が発生したが、その他の測定点では良好なデータが得られた。水圧破砕法による初期応力測定の結果を図3に示す。

水平面内の最小主応力の値 (σ_h) は深度が増加するにつれて大きくなる傾向が認められ、それは岩石の密度 (2.6t/m³) から推定される土被り圧 (σ_v) とおおよそ同じ値を示すが、詳細にみると深度勾配は土被り圧のそれより小さい。水平面内の最大主応力の値 (σ_H) は、深度500mまでは深度の増加とともに大きくなるものの、それ以降ではほぼ一定の値を示す。水平面内の主応力の比は2程度であり、それほど異方的ではない。深度300mでは応力値が小さくなっているが、いずれの試錐孔もき裂密度が大きい区間であり、応力が緩和されていると推定される。地表から深度200m ~ 300mまでは $\sigma_v < \sigma_h < \sigma_H$ 、深度200m ~ 300mから深度550m ~ 700mでは $\sigma_v = \sigma_h < \sigma_H$ 、それ以降では $\sigma_h < \sigma_v < \sigma_H$ となり、図4で示されるような⁶⁾逆断層型から横ずれ断層型へと応力状態が変化する。

水平面内の最大主応力の方向は、地表から深度

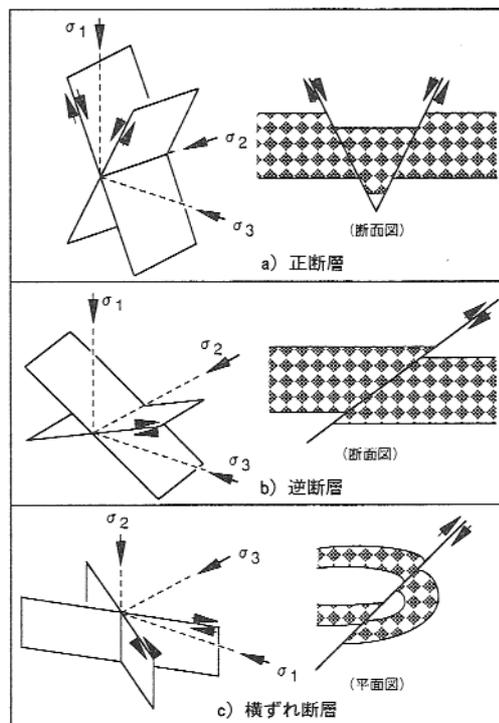


図4 初期応力の作用方向と形成される断層

左図は初期応力の作用方向を示す。1は最大主応力、2は中間主応力、3は最小主応力を示す〔文献6)より〕。

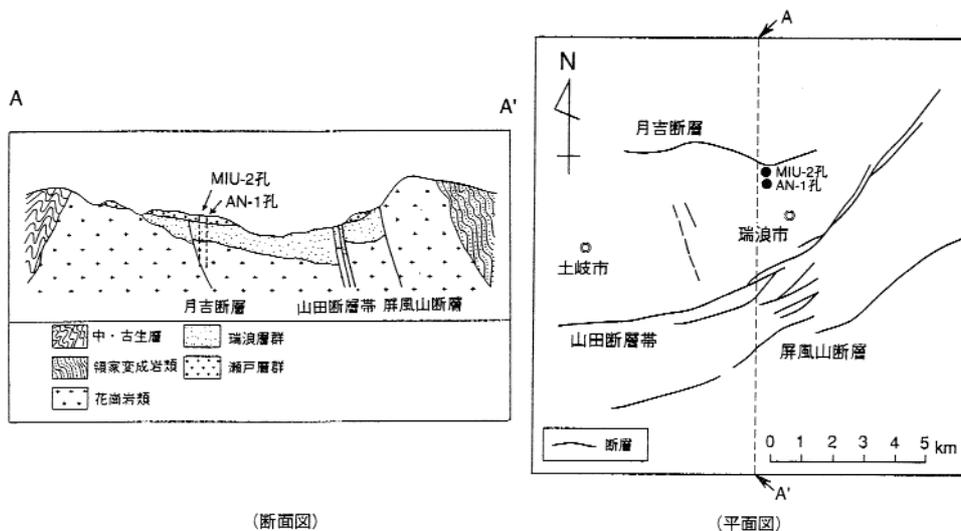


図5 東濃周辺の地質構造と断層の分布

東濃周辺には、山田断層帯と屏風山断層という活断層が分布している。これらの断層はいずれも逆断層であり⁹⁾、走行が北東 - 南西方向であるため、断層形成時の最大圧縮応力の方向は走行に直交する北西 - 南東方向であったと推察される。

200mないし250mまでは南北方向、それ以深は北西 - 南東方向を示す。三角測量の結果から推定される東濃地域の広域的な応力場は北西 - 南東方向が最大圧縮ひずみの方向である⁷⁾。また、断層の種類と走向からも北西 - 南東方向が最大主応力の方向と考えられる(図5)。したがって、水圧破砕法から推定された深度200m ~ 250m以深の主応力方向は広域応力場を反映したものと推定される。

異なる岩種が接している場合でそれらの物性が大きく異なる場合や、岩種は同じ場合でもき裂頻度が大きく異なるときには応力状態が変化すると指摘されている⁹⁾。主応力の値が異なることについては単純なモデルを用いた定性的な説明は可能である。すなわち、剛性の大きな岩盤は変位の発生を許さないため初期応力を受け持ち、剛性の小さい岩盤では初期応力を相対的に受け持たないことは容易に想像できる。実際の測定においても、そのような事例がいくつか報告されている^{1),10),11)}。しかし、これらの報告においても定量的あるいは理論的な説明はなされておらず、特に主応力の方向が大きく変化する場合については、測定結果の定量的な解釈が困難である。今回の測定でも、深度300m付近のき裂頻度が大きい区間を挟んで主応力方向が変化しており、既往の報告と同様にき裂頻度が大きいこと、あるいはこれに伴う物性の変化によって応力状態が変化していることが推察される。このような状態を説明するために、岩盤物性との詳細な対比やマイクロクラックの観察などの微視的な構造の検討を今後行う予定である。

4. おわりに

超深地層研究所が建設される土岐花崗岩の初期応力状態を把握するために、地表から掘削した深度1,000mの試錐孔において水圧破砕法により初期応力測定を行った。この測定で明らかになったことを以下に示す。

水平面内の最小主応力の値は深度とともに土被り圧との大小関係が変化し、逆断層型から横ずれ断層型へと応力状態が変わる。

水平面内の最大主応力の値は最小主応力の値の2倍程度であり、深度500mまでは深度の増加とともに大きくなるものの、以深では応力値の増加はほとんど認められない。

水平面内の最大主応力の方向は、地表から深度200mないし250mまでは南北方向を示す。それ以深は北西 - 南東方向を示し、広域応力場の最大圧縮ひずみの方向と一致する。

上記のような深度に伴う応力状態の変化は、岩盤物性やき裂頻度の違いの影響を受けているものと推察される。

初期応力測定結果と岩盤物性との詳細な対比やマイクロクラックの観察などの微視的な構造の検討を今後行う予定である。

参考文献

- 1) R.S.Read: "Characterizing Excavation Damage in Highly-Stressed Granite at AECL's Underground Research Laboratory", Proc. of the Excavation Disturbed Zone Workshop, Int. Conference on Deep Geological Disposal of

- Radioactive Waste, Winnipeg Canada, p.35-46 (1996).
- 2) 武田精悦：“放射性廃棄物の地層処分研究開発の現状と展望 - 地層科学研究について - ”, 資源 - 素材 96, 仙台, 企画発表(A)資料, 仙台, p.25-28 (1996).
 - 3) 三上哲司, 杉原弘造：“超深地層研究所計画 - 超大深度地下を科学する - ”, 土木学会誌, Vol.83, p.6-10, December (1998).
 - 4) 土木学会編：“初期地圧測定法の現状と課題”, 技報堂, 東京, (1992).
 - 5) 菅原勝彦：“岩盤応力測定に関する研究の動向”, 資源と素材, Vol.114, No.12, p.2-12 (1998).
 - 6) 日本材料学会編：“岩の力学 基礎から応力まで”, 丸善, p.381 (1993).
 - 7) 国土地理院編：“日本の地殻水平ひずみ (1983年～1985年)”, 国土地理院 (1990).
 - 8) 活断層研究会編：“新編日本の活断層 - 分布図と資料”, 東京大学出版会 (1991).
 - 9) 石田 毅, 金川 忠：“地殻応力測定結果にみられる岩盤の不均質性の影響”, 地震, Vol.40, No.2, p.329-339 (1987).
 - 10) 石田 毅, 金川 忠, 他：“地下発電所地山応力測定とその考察”, 電力中央研究所報告, 研究報告:382025 (1982).
 - 11) N.Maeda, T.Sato, et al.：“Estimation of applicability of stress measurement methods and three dimensional stress state in soft sedimentary rock”, Proc. of the '99 Japan-Korea Joint Symposium on Rock Engineering, Fukuoka Japan, p.277-284 (1999).