



東濃鉱山周辺地域の岩盤応力測定

大石 清隆 佐藤 稔紀 杉原 弘造

東濃地科学センター

資料番号: 92-14

Rock Stress Measurements in the Tono Mine Area

Kiyotaka Ohishi Toshinori Sato Kozo Sugihara
(Tono Geoscience Center)

東濃鉱山において、堆積岩を対象とした坑道掘削に伴う周辺岩盤への影響の研究を実施している。その一環として、力学的影響の解析・評価に必要な深度別の応力状態の把握および応力測定手法の比較・検討を目的として、岩盤の初期応力測定を行った。この結果、東濃鉱山における応力状態は広域的な応力場より地形や断層の存在の影響等を強く受けていること、初期応力測定は、複数の手法で行い、各手法の特徴等を考慮して結果を総合的に検討することが望ましいこと、等が明らかになった。

1. はじめに

岩盤の初期応力（自然状態の岩盤内に作用している応力）は、外力として地下空洞に作用して変形等を生じさせるため、地下空洞の設計や安全評価を行ううえで重要なデータのひとつである。またその測定手法については、種々の方法が提案されているが、各々の手法の原理等を考慮したうえで、深度や岩相に応じた手法を用いる必要があると言われている。

東濃地科学センターでは地層科学研究の一環として、東濃鉱山（岐阜県土岐市）において、新第三系の堆積岩を対象とした坑道掘削に伴う周辺岩盤への影響の研究を実施している。そのひとつとして力学的影響を解析・評価するため、坑道周辺岩盤の初期応力の測定を実施し、ボーリング孔を用いて深度別の初期応力測定を実施した。また応力測定手法の適用性を検討するため、各種の既存の応力測定手法により同じ位置で応力測定を実施した。

ここでは、これらの初期応力測定に係わる研究の結果について報告する。

2. 内容

東濃鉱山において応力測定を実施した位置は、北延NATM（New Austrian Tunnelling Method：ロックボルトと吹付コンクリートを支保部材として、

地山がもっている支保能力を活用する工法）坑道（深度約135m）、第2立坑第1計測坑道（深度約45m）およびTM-1号孔（第2立坑から西約20mに掘削されたボーリング孔、深度約200m）である（図1）。地質は、基盤をなす中世代～古第三紀の花崗岩、およびその花崗岩を被覆する堆積岩からなり、この堆積岩は新第三紀の瑞浪層群と鮮新世の瀬戸層群からなる。この地域には月吉断層と呼ばれる、ほぼ東西走向で60°南傾斜の逆断層がある。月吉断層はTM-1号孔と深度130m付近で交差している。

北延NATM坑道における初期応力測定は、坑道周辺岩盤の三次元応力状態を把握する目的で実施した。第2立坑第1計測坑道での初期応力測定は、既存の応力測定手法の適用性の検討を主目的として、またTM-1号孔での初期応力測定は、深度別の応力状態を把握する目的で実施した。

2.1 北延NATM坑道における初期応力測定

(1) 測定方法

北延NATM坑道では、水平坑道を掘削し、周辺岩盤への影響を評価する掘削影響試験の一環として、岩盤の三次元応力状態を把握するため、初期応力の測定を実施した。

用いた測定手法は、応力解放法（8成分ひずみ計埋設法）およびAE（Acoustic Emission：固体が

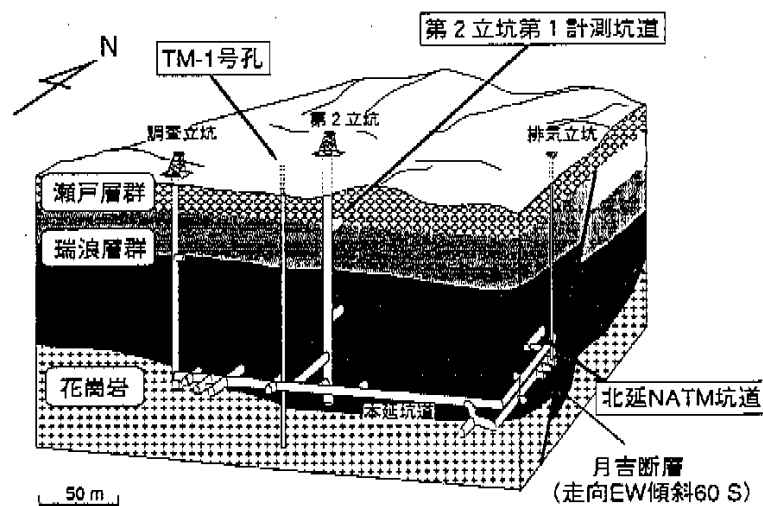


図1 東濃鉱山地質・坑道概要図

破壊するとき、蓄積されたエネルギーが急激に解放されることにより発生する音波)法である。応力解放法は、岩盤中にひずみ計を埋設し、ひずみ計を含めたコアを大孔径のボーリングによって岩盤から切り離すことにより応力を解放し、この時のひずみ変化から初期応力を算定する方法である。8成分ひずみ計を用いることで1点の測定で三次元応力状態が把握できる。

またAE法は、固体が破壊する際に発生するAEを測定する方法で、固体材料に荷重を加える時、過去に受けた最大の荷重に達するまでAEがほとんど発生しないという現象(カイザー効果という)を利用して、岩石コアの室内載荷試験で初期応力を求める方法である。AE法では、1供試体で1方向の応力のみが測定できるので、異なる6方向の供試体を測定することにより三次元の応力を算定することができる。

今回の応力解放法による測定では、既存の計測坑道から水平ボーリング(φ218mm)を3本削孔し、

各孔に1点、合計3点で測定を行った。AE法では応力解放法で削孔されたボーリングコアを用いて、1点で測定を行った。

(2) 測定結果

応力解放法およびAE法で測定された主応力の値および方向を表1および図2に示す。結果の概要を以下に示す。

① 主応力の値にばらつきが見られる。応力解放法での最大主応力値は2MPa以下である。AE法での最大主応力値は3.5MPaで、応力解放法での値

表1 北延NATM坑道での初期応力測定結果(主応力値)

測定点	主応力値(MPa)			σ_1/σ_3	鉛直応力 σ_z (MPa)
	最大(σ_1)	中間(σ_2)	最小(σ_3)		
応力解放法	1	1.52	1.34	1.28	1.2
	2	1.76	1.53	1.25	1.4
	3	1.69	1.09	0.87	1.9
AE法	3.49	2.23	1.54	2.3	1.9

(土被り圧: 2.4MPa)

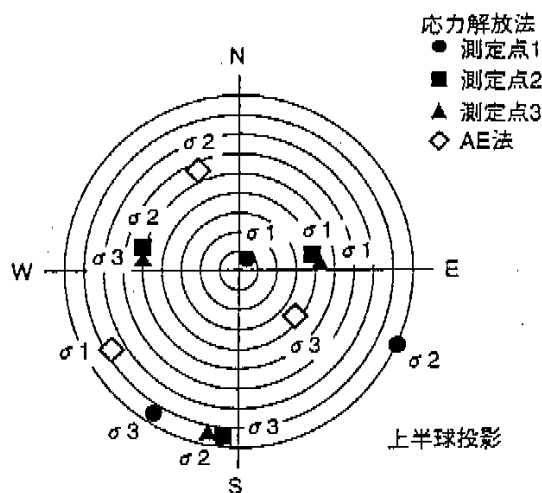


図2 北延NATM坑道での初期応力測定結果(主応力の方向)

の約2倍であった。

- ② 最大主応力と最小主応力の比は、応力解放法では2以内であるが、AE法では2.3とやや異方的な応力状態を示した。
- ③ 鉛直方向の応力は、土被り圧（地盤中において、その岩盤の総重量によって生じる鉛直応力。この測定の場合、岩の密度を 1.8g/cm^3 とすると約 2.4MPa ）に比べて小さい。
- ④ 最大主応力の方向は、応力解放法では東の方向から傾斜 50° （傾斜は水平面からの角度を示す）、AE法では西南西の方向から傾斜 15° と異なっているが、水平面での最大主応力方向は、ほぼ東西方向から東北東～西南西の方向を示している。

(3) 考察

応力解放法で測定された主応力の値のばらつきの原因として、石田ら¹⁾が指摘している岩盤の不均質性の影響（岩盤の剛性が部分的に異なる場合、剛性が高い部分の応力が大きくなること）について検討を行った。検討方法は、石田らの研究に準拠して、岩盤の剛性を反映する値として、ひずみ感度係数（ひずみ計の測定ひずみを、それに対応する応力に換算する係数）を用いた。各測定点でのひずみ感度係数の平均値を算出して応力値とプロットした。

最大主応力とひずみ感度係数は良い正の相関性が見られ、岩盤の剛性が高い部分ほど大きな応力値となっている。このことより最大主応力値には、岩盤の剛性が影響すると考えられる。今回、測定された主応力の値のばらつきも岩盤の剛性の不均質性が原因と考えられる。

またAE法で測定された主応力値が大きいことについては、AE法の測定が比較的固結度が高く、剛性が高いと考えられる位置で行われたことから、上述した理由により主応力の値が大きくなったものと考えられる。

2.2 第2立坑第1計測坑道における初期応力測定²⁾

(1) 測定方法

東濃鉱山の第2立坑から深度45mに展開された水平坑道である第1計測坑道（図1参照）において、既存の応力測定手法の適用性の検討を目的として、4種類の異なる測定手法により初期応力測定を実施した。

実施した測定手法は、水圧破碎法、ダブルフラクチャー法、応力解放法（8成分ひずみ計埋設法）およびAE法である。水圧破碎法は、ボーリング孔内でバッカーで密閉された区間に水压を加えることで岩盤にき裂を生じさせ、その時の水压とき裂方向から応力を算定する方法である。ダブルフラクチャー

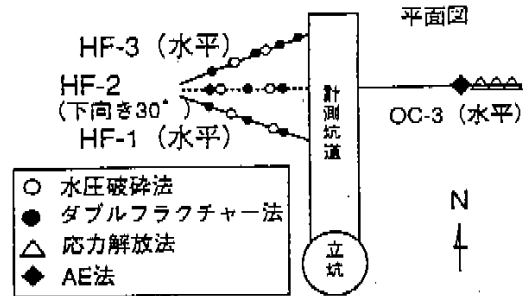


図3 第1計測坑道における測定位置と試錐レイアウト

法は、岩盤にスリーブを介して加圧し、2方向にき裂を生じさせ、各々のき裂が生じた時の水压とき裂の方向から応力を算出する方法である。水圧破碎法とダブルフラクチャー法とも測定に用いるボーリング孔に直交する面内の二次元の応力が測定できるので、三次元の応力を算定するためには異なる3方向の測定ボーリングが必要となる。

水圧破碎法とダブルフラクチャー法による測定は、水平坑道の西側に掘削された方向の異なる3本の試錐孔において実施した。応力解放法は、坑道の東側に試錐孔を掘削して実施した。AE法は、応力解放法による測定で得られた大口径のコアを用いて実施した。坑道と試錐孔のレイアウトと各手法の測定位置を図3に示す。

水圧破碎法による測定は、3本の試錐孔において、各々26点実施した。各測定点の結果の組み合わせのうち、誤差が最も小さい各方向の応力値を組み合わせで三次元の応力状態を算出した。ダブルフラクチャー法による測定は、水圧破碎法による測定と同様に、3本の試錐孔において各々3～5点、計11点実施した。これらのうち坑道の影響を受けないと考えられる各試錐孔の最深部でのデータを組み合わせで、三次元的主応力を算出した。応力解放法による測定は、試錐孔の深度12～15m間において3点実施し、平均値を求めた。AE法による測定は、大口径のコアから6方向に試験片を採取し、1点で実施した。

(2) 測定結果

各方法により算出した三次元の主応力の値と方向を表2と図4に示す。結果の概要を以下に示す。

- ① 4種類の方法で算定された主応力の値と方向は、各手法毎にすべて異なっている。例えば、最大主応力の値は $0.48 \sim 1.84\text{MPa}$ 、方向は南北から東西方向である。
- ② 応力解放法については、鉛直応力は土被り圧と等しい。水平面内での主応力は、最大主応力が

表2 第1計測坑道での初期応力測定結果(主応力値)

測定手法	主応力値(MPa)			鉛直応力 σ_z (MPa)
	最大(σ_1)	中間(σ_2)	最小(σ_3)	
水圧破砕法	1.84	1.49	0.91	1.44
ダブルフラクチャー法	1.40	1.05	0.78	1.07
応力解放法	0.96	0.85	0.76	0.89
AE法	0.48	0.37	0.29	0.35

(土被り圧: 0.9MPa)

ほぼ東西方向であった。

- ③ 水圧破砕法については、鉛直応力は土被り圧の約2倍の値であったのに対し、ダブルフラクチャー法では土被り圧に近い値が得られた。
- ④ AE法では、鉛直応力は土被り圧の約半分であった。また、水平面内での最大主応力の方向はほぼ西北西であった。

(3) 考察

各手法毎に結果の信頼性を検討すると、

- ① 水圧破砕法とダブルフラクチャー法は、坑道配置の制限から3本の試錐孔を1ヵ所に集まるように掘削することができず、測定点が離れてしまったために、主応力の方向は信頼性が低い。その反面、応力を直接測定しているので、各測定点での応力値については信頼性が高い。
- ② 応力解放法はこの逆で、1点で三次元主応力を評価できるので方向の信頼性は高いが、弾性理論に基づいて応力値を算定していることから応力値の信頼性はやや低い。
- ③ AE法は、この測定後に実施した試験により、試料採取後の時間経過に伴って評価される応力値が小さくなることが明らかになった³⁾ことから、応力値の信頼性が低い。

以上のことを考慮して測定結果を検討し、調査対象領域の三次元応力場を次のように評価した。

- ① 最小主応力は土被り圧(約0.8MPa)にほぼ等しく、その方向はほぼ南南西から傾斜20~30°である。
- ② 最大主応力と中間主応力の値は最小主応力の2倍以内であり、それらの方向が最小主応力の方向に直交する面内で、測定手法毎にばらついている。このことから、最大主応力と中間主応力の差は小さいと推定される。

通常、初期応力の測定は単一の手法により行われる場合が多い。しかし今回の結果が示すように、測定手法により算定される応力場が異なる場合がある。このため複数の手法で初期応力の測定を実施し、各手法の特徴や測点配置を考慮して、それらの結果を総合的に検討することにより三次元初期応力

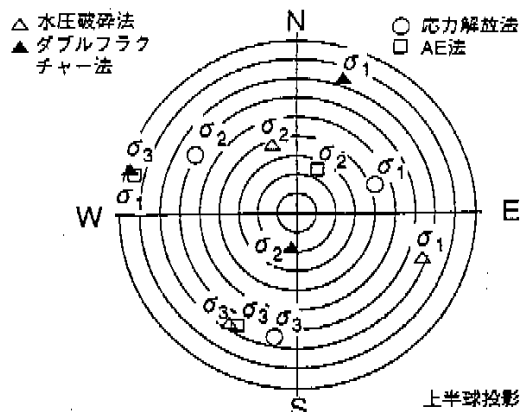


図4 第1計測坑道での初期応力測定結果(主応力の方向)

を評価することが望ましいと考えられる。

2.3 TM-1号孔における初期応力測定⁴⁾

(1) 測定方法

TM-1号孔において、深度別の応力状態を把握する目的で初期応力の測定を実施した。

実施した測定方法は、水圧破砕法およびAE法である。水圧破砕法による測定は、ボアホールスキャナによる孔壁観測とコアの観察結果をもとに、既存き裂の無い場所8点で実施した。AE法による測定は、TM-1号孔のコア(φ50mm)を用いて鉛直方向の応力測定を5点で実施した。

(2) 測定結果

水圧破砕法により算出した応力値と最大主応力の方向およびAE法より算出された鉛直応力を図5に示す。AE法については、瑞浪層群の岩石はカイザー効果に時間依存性があり、コア採取後、4日目以降にAE試験を実施した場合、評価される応力値は初期応力値より低く推定されることが明らかになっている³⁾。供試体のうち、コア採取後、3日以内に測定を終了したのは、154.0mから得られた試料のみであった。一方、コア採取後3日以内に測定が終了しているデータとして、TM-1号孔近傍の第2立坑(図1参照)の深度50m付近から採取されたコアによる測定データ⁵⁾が得られていた。図5にはこの2点の値を示す。結果の概要を以下に示す。

- ① AE法で測定された鉛直応力は、土被り圧(岩石の密度を1.8g/cm³と仮定)にほぼ等しい。
- ② 水圧破砕法で測定された水平面内の主応力の大きさは、最小主応力は土被り圧にほぼ等しく、最大主応力はその約2倍である。

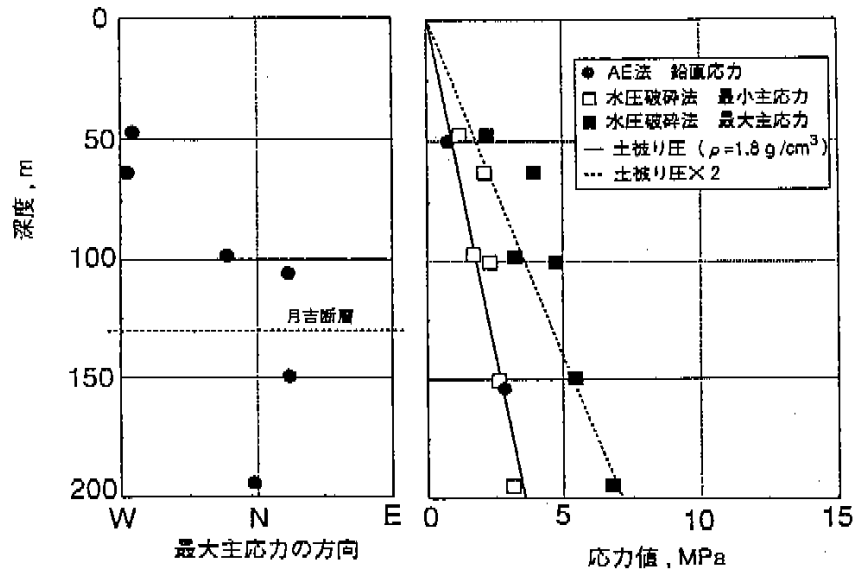


図5 TM-1号孔での初期応力測定結果

③水圧破砕によって発生したき裂の方向（水平面内の最大主応力方向）は、98m以深は南北、63m以浅は東西を示している。TM-1号孔は、月吉断層と130m付近で交差しており、98m以深では断層の走向（ほぼ東西方向）に垂直であるが、63m以浅は平行である。

(3) 考察

① 最大主応力の方向は深度により変化しているが、地質構造や地形の影響を受けている可能性が大きい。今回、測定を実施したTM-1号孔周辺の地形は西側に開いた沢地で、南北および東側の尾根に囲まれている。深度62.5m以浅での最大主応力の方向は、この沢の方向やこの沢の南北に位置する尾根が伸びる方向と一致する。一方、深度98.0m以深での最大主応力の方向はほぼ南北方向であり、東西走向（TM-1号孔周辺）の逆断層である月吉断層の生成時の応力状態と整合性がある。

② BaumgartnerとRummel⁶⁾は、水圧破砕法による応力測定において、異なる走向を有するいくつかのき裂の法線方向の応力の測定に加えて、き裂の再開口圧力を考慮して応力値を求める方法を提案している。地形の影響を受けていない深度98.0m以深の主応力の値と方向をBaumgartnerとRummelの方法⁶⁾で算出した。算出の際、既存の室内試験結果に基づき岩盤のポアソン比を0.26、密度を1.8g/cm³と仮定した。算出した結果を以下に示す。

水平面内（深度H：98.0m以深）

$$\text{最小主応力} = 0.013H + 0.56$$

$$\text{最大主応力} = 0.034H + 0.38, \text{方向} N4.7W$$

最小主応力の深度勾配は岩盤の密度とは若干異なるものの、深度200m付近までは、値はほぼ土被り圧に等しく、最大主応力はその約2倍であり、前述の結果と一致する。

③ 測地学や地震学から推定される東濃鉱山周辺の広域的な応力場としては、東濃鉱山周辺の三角測量の結果や地質構造から、東西ないし北西-南東が最大圧縮応力の方向と推定される。

水圧破砕法により求めた水平面内の最大主応力の方向はほぼ南北であり、広域的な応力場とは異なる。これらより、測定を実施したTM-1号孔周辺の応力場は、広域的な応力より、地形や月吉断層の存在の影響を強く受けていると考えられる。

3. おわりに

上述した東濃鉱山において実施した初期応力測定によって、東濃鉱山における応力状態が明らかになってきた。また、既存手法の適用性の検討結果等から多くの知見が得られた。主なものを以下に示す。

① 測地学や地震学から推定される東濃鉱山周辺の広域的な応力場としては、東西ないし北西-南東が最大圧縮応力の方向と推定される。しかし、TM-1号孔での測定結果から、広域的な応力より地形や月吉断層の存在の影響を強く受けていることが考えられる。

② 初期応力の測定は、単一の手法により行われる場合が多いが、各手法とも正確な評価を行うには前提条件があり、それを満たすか否かは測定位置の岩盤状況によって異なるため、複数の手法で初期応力の測定を実施し、各手法の特徴や測点配置を考慮して、それらの結果を総合的に検討することにより三次元初期応力を評価することが望ましい。

③ 岩盤の剛性が一様でない場合、剛性の高い部分には大きな応力が作用していると考えられる。

最後に、山口大学工学部水田義明教授ならびに石田毅助教授に、貴重なご助言とご指導を戴いた。また、各測定については株式会社大林組、株式会社日

本パブリック、同和工営株式会社に実施して戴いた。ここに記し、感謝の意を表わしたい。

参考文献

- 1) 石田毅、金川忠：地盤応力測定結果にみられる岩盤の不均質性の影響、地盤、Vol.40、No.2、pp329-339、(1987)。
- 2) 佐藤修紀、杉原弘造、他：複数の手法による三次元初期応力測定—東濃鉱山の軟岩における測定を例にして—、土木学会第49回年次学術講演会、(1994)。
- 3) 畑徳二、本梨秀雄、他：新第三紀地層帯におけるカイザー効果の時間依存性、第9回岩体力学国内シンポジウム講演論文集、pp235-240、(1994)。
- 4) 佐藤修紀、杉原弘造、他：水圧破砕法とAE法による深成岩初期応力測定—東濃鉱山の軟岩における測定を例にして—、資源・集積学会平成8年度春学大会、(1994)。
- 5) 畑徳二、本梨秀雄、他：AE法を利用した地層帯地山の初期地圧測定、第27回土質工学研究発表会、(1992)。
- 6) J.Baumgartner, F.Rummel: Experience with 'Fracture Pressuring test' as a stress measuring technique in a jointed rock mass, Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.26 No 6, (1989)。