

複数の手法を用いた初期応力測定結果の比較

Comparison of the rock stress results determined various methods

中村直昭*・秋山眞介**・松井裕哉***・佐藤稔紀***

Naoaki NAKAMURA, Shinsuke AKIYAMA, Hiroya MATSUI, Toshinori SATO

To determine in-situ rock stress, various methods have been suggested. In this paper, we tried to compare with the rock stress results determined stress relief methods, hydraulic fracturing method, acoustic emission method, deformation rate method and differential strain curve method, and examined the applicability of each method in Kamaishi mine. The main conclusions are, 1) the direction of maximum stress determined various methods is approximately N-S and it agrees with the result of earthquake mechanism around the south-east Kitakami district including test site, 2) the ratio of average horizontal stress to the vertical stress is relatively higher than other results measured in Japan.

1. はじめに

近年、地下空間の有効利用を目的として、地下発電所、石油地下備蓄空洞等の大規模地下空洞の建設が進められてきている。また、将来にわたる地下空洞の利用法として、原子力発電所、超電導エネルギー貯蔵施設、産業廃棄物の地層処分施設等の問題が検討されている。これらの大規模・重要構造物においては、合理的で安全な設計・施工を行うために初期応力の情報は必要不可欠なものであり、そこでは初期応力の測定結果をもとにして、空洞周辺の応力・変位の解析と空洞配置の適否、掘削手順、ロックアンカーを始めとした支保工等が詳細に検討される。

初期応力の測定法には、現在まで、数多くの研究者により種々の方法が提案されているが¹⁾、試験サイトの初期応力を決定するためには、各々の測定方法の原理等を考慮した上で、測定深度や岩種に応じた測定方法を選択する必要があると言われている。

本報では、岩手県にある釜石鉱山内の既存坑道において周辺岩盤の初期応力測定を複数の手法を用いて実施した結果に基づき各応力測定方法の適用性を検討するとともに、地質構造、地震学等のデータを含めて釜石鉱山における初期応力状態を総合的に評価した結果について報告する。

2. 測定箇所の概要

釜石鉱山の位置する北上山地は、古生代、中生代の堆積岩とこれを貫く火成岩とから成り、石灰岩の卓越する南部北上山地とチャートが卓越する北部北上山地に大きく二分されており、両者を境にして早池峰―五葉山構造帯が存在する。釜石鉱山は南部北上山地と北部北上山地の漸移帯付近に位置し、鉱山付近における古生層は概ね早池峰―五葉山構造帯と同様に南北の走向である。

本調査は図-1に示すように、釜石鉱山内の海拔550mに位置する550mレベル坑道（地表下約260m）および海拔250mに位置する250mレベル坑道（地表下約720m）で実施したものである。なお、いずれの測定箇所も栗橋花崗閃緑岩体中に位置する。地表のリニアメントおよび坑道における割れ目調査

* 正会員 日鉄鉱業株式会社 資源開発部

** 日鉄鉱業株式会社 資源開発部

*** 正会員 動力炉・核燃料開発事業団 東濃地科学センター

によると、測定位置を包含するエリアでは、走向が概ね東西、傾斜 $80\sim 85^{\circ}$ の比較的急傾斜の割れ目が卓越している。

3. 測定方法の概要

現在実用化されている初期応力測定法を原位置での測定法と室内試験による測定法に大別すると、前者では応力解放法、水圧破碎法、スリーブフラクチャリング法等が挙げられる。一方、室内試験による測定法では AE (Acoustic Emission) 法、変形率変化 (DRA: Deformation Rate Analysis) 法、DSCA (Differential Strain Curve Analysis) 法、ASR (Anelastic Strain Recovery) 法等が挙げられる。本調査においては、原位置での測定法の中で孔径変化法、円錐孔底ひずみ法、水圧破碎法を採用し、室内試験による測定法の中で AE 法、DRA 法、DSCA 法を採用した。すなわち、合計 6 種類の手法を用いて初期応力の測定を実施した。

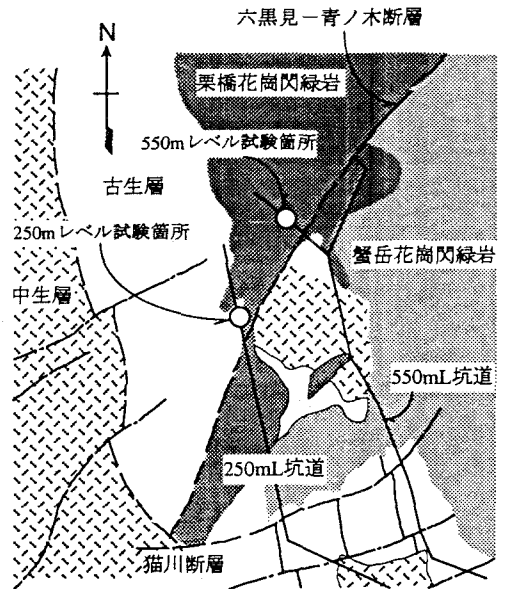


図-1 釜石鉱山周辺の地質と初期応力測定位置

4. 測定結果と考察

4.1 各測定方法により決定された応力値の比較

図-1に示した各測定箇所において測定に用いた試験孔のレイアウトを描いたものを図-2に示す。250mレベル坑道では、図-2に示したKM-2孔において円錐孔底ひずみ法、AE法、DRA法、DSCA法による測定を各々3～4点、水圧破碎法による測定を9点実施した。これに対して、550mレベル坑道では、図-2に示したKS-1～KS-5孔において孔径変化法による測定を実施した他、KM-0、KM-1孔において円錐孔底ひずみ法、AE法、DRA法、

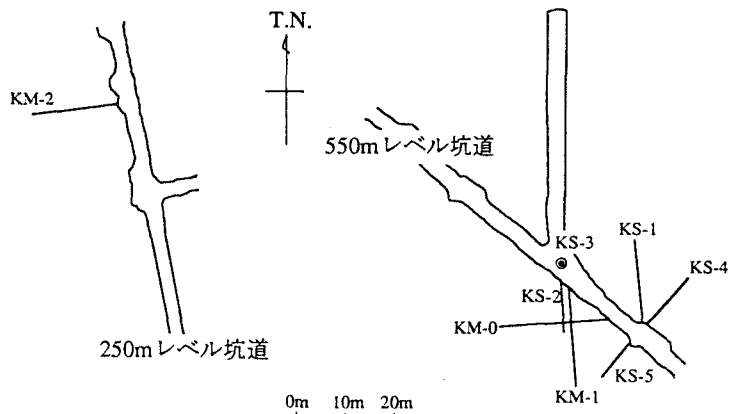


図-2 初期応力測定位置を実施した試験孔のレイアウト

DSCA法による測定をそれぞれ3～5点、水圧破碎法による測定を10点実施した。

各測定方法により決定された主応力の値を実施深度毎に示したものを表-1および表-2に示す。なお、これらの値は上述した数点の測定結果を平均したものである。さらに、各測定方法により決定された主応力の方向を実施深度毎に下半球ステレオ投影したものを図-3および図-4に示す。ここで、各主応力の後に示した()内の数字は、表-1および表-2に示した各測定方法の番号に対応する。また、原位置での測定法により決定された各主応力の方向を黒塗りで示し、室内試験

により決定された各主応力の方向を白抜きで示した。結果の概要を以下に示す。

(a)孔径変化法および円錐孔底ひずみ法

孔径変化法および円錐孔底ひずみ法では、決定された最大主応力 σ_1 の方向は、いずれも概ね南北方向である。550mレベルの測定結果において各主応力の値を比較すると、円錐孔底ひずみ法では偏差的な応力状態を示し、鉛直方向の応力成分 σ_v も推定破り圧と比較して低めの値となっている。

(b)水圧破砕法

水圧破砕法により決定された最大主応力 σ_1 の方向は、孔径変化法および円錐孔底ひずみ法と同様に概ね南北方向である。550mレベルの各主応力の値については、どちらかと言えば、孔径変化法に近い値を示している。

(c)AE法およびDRA法

250mレベルの測定結果では、それぞれ単独の測定方法による評価が困難であったことから、両者を併用して初期応力を決定した。250mレベルの測定結果では、最大主応力 σ_1 の方向は、概ね東西方向である。これに対して、550mレベルの測定結果では、最大主応力 σ_1 の方向はAE法、DRA法いずれも概ね南北方向である。また、550mレベルの各主応力の値については、水圧破砕法と同様な傾向を示している。

(d)DSCA法

250mレベルの測定結果では、最大主応力 σ_1 の方向は、概ね東西方向である。これに対して、550mレベルの測定結果では、最大主応力 σ_1 の方向は概ね南北方向である。

表－1 250mレベル坑道での初期応力測定結果

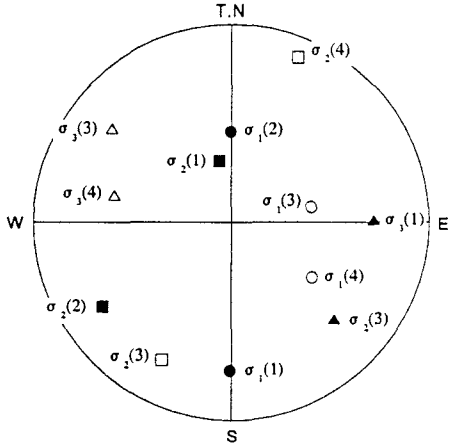
測定手法	主応力値 (MPa)			鉛直応力 (σ_z) (MPa)
	最大 (σ_1)	中間 (σ_2)	最小 (σ_3)	
(1) 円錐孔底ひずみ法	43.8 (1.00)	26.8 (0.61)	17.8 (0.41)	29.9
(2) 水圧破砕法	26.0 (1.00)	15.1 (0.58)	11.4 (0.44)	21.0
(3) AE/DRA法	21.2 (1.00)	16.6 (0.78)	5.8 (0.27)	18.0
(4) DSCA法	(1.00)	(0.69)	(0.45)	

* : () 内の数字は最大主応力を1とした場合の比に対応する。(推定破り圧19.7MPa)

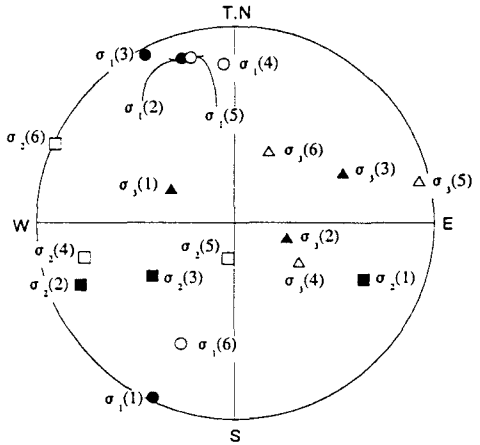
表－2 550mレベル坑道での初期応力測定結果

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)	
(1) 孔径変化法	19.2 (1.00)	17.1 (0.89)	6.0 (0.31)	8.9
(2) 円錐孔底ひずみ法	29.3 (1.00)	7.6 (0.26)	2.9 (0.10)	4.7
(3) 水圧破砕法	17.4 (1.00)	8.7 (0.50)	4.5 (0.26)	7.0
(4) AE法	15.6 (1.00)	7.5 (0.48)	5.6 (0.36)	7.0
(5) DRA法	15.5 (1.00)	7.7 (0.50)	6.3 (0.41)	8.1
(6) DSCA法	(1.00)	(0.77)	(0.52)	

* : () 内の数字は最大主応力を1とした場合の比に対応する。(推定破り圧7.0MPa)



図－3 主応力の方向 (250mレベル)



図－4 主応力の方向 (550mレベル)

野口ら²¹⁾によれば、釜石鉱山内の複数の地点において円錐孔底ひずみ法を用いて実施した初期応力測定の結果では、いずれの測定箇所においても最大主応力の方向は概ね南北方向であることが報告されている。これらの結果を考え合わせると、250mレベルで実施したAE/DRA法およびDSCA法の測

定結果は信頼性が低いと考えられる。この原因としては、主として、AE/DRA法では種々の文献で指摘されているように、ボーリングコア採取時からの時間経過に伴って評価される応力値が小さくなるという時間依存性の問題が挙げられる。ちなみに、250mレベルの測定はボーリングコア採取後から60日程度経過してから測定を実施した。これに対して、550mレベルでの測定結果はボーリングコア採取後から約5日以内に測定を実施したものである。一方、DSCA法で決定される初期応力値の精度は、初期応力解放以前に存在するクラック量ならびに引張強度の関係で初期応力の解放に伴ってどの程度の新たなクラックが発生するかに依存している。250mレベルの測定結果において決定された最大主応力の方向が、円錐孔底ひずみ法および水压破碎法と異なった原因としては、主として、応力解放以前に存在しているマイクロクラックの影響が考えられる。一般的に、ボーリングコアを用いた測定は原理的に未解明点が多く、工学的に十分な信頼性を有しているとは言い難いが、本調査の測定結果から考えると、各測定方法の前提条件が満足される下ではその適用性は十分高いものであると推測される。

4.2 深度と鉛直応力および深度と平均側圧係数の関係

初期応力測定によって決定された鉛直応力 σ_v (MPa) と深度 Z (km) の一般的な関係³⁾を示すと、図-5 のようである。図中の黒丸は海外10ヶ国における測定結果であり、白丸はわが国の測定結果である。両者の平均的な関係は、 $\sigma_v = 26.5 \cdot Z$ で与えられる。前述した6種類の測定方法により決定された鉛直応力 σ_v を野口ら²⁾の測定結果と併せてプロットすると、図-6 のようである。円錐孔底ひずみ法の測定結果で若干 $\sigma_v = 26.5 \cdot Z$ の実線からはずれる測定箇所があるが、図-5 に示

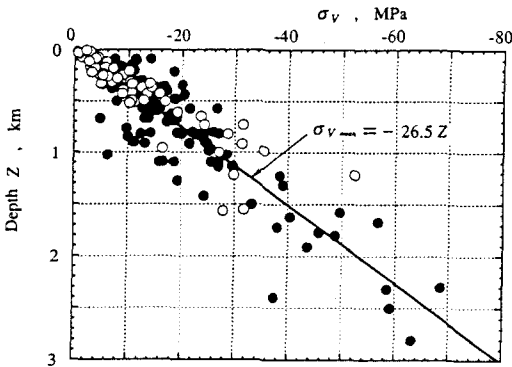


図-5 鉛直応力と深度との関係

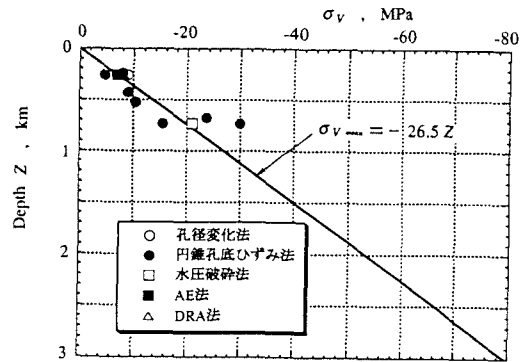


図-6 鉛直応力と深度との関係 (測定結果)

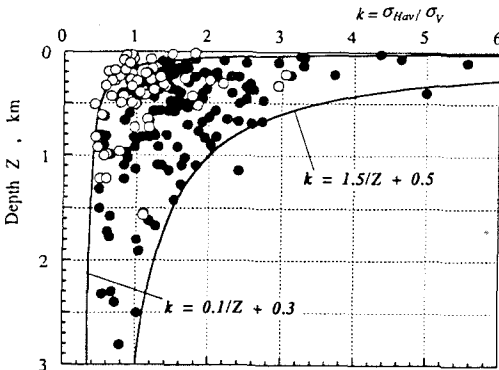


図-7 側圧係数と深度との関係

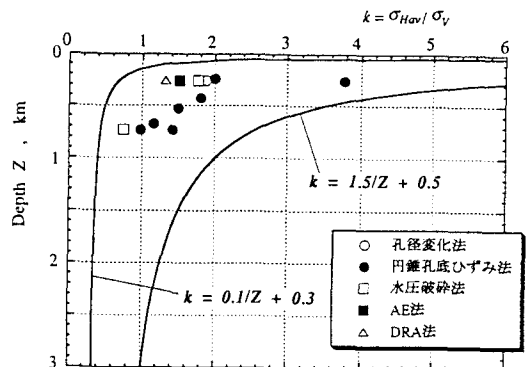


図-8 側圧係数と深度との関係 (測定結果)

した他の地域の測定結果と概ね同様な傾向が認められる。

次に、平均側圧係数、すなわち水平面内の2つの直応力の平均値 σ_{Hav} と鉛直応力 σ_v の比 $k = \sigma_{Hav} / \sigma_v$ と深度 Z (km)の関係³⁾を図-7に示す。図-5と同様に、海外の測定値は黒丸で、わが国の測定値は白丸で示している。海外の測定値は図中に実線で示す下限曲線($k = 0.1/Z + 0.3$)と上限曲線($k = 1.5/Z + 0.5$)の間に分布している。すなわち、深部において k の値は1より小さく、測定点が地表に近づくほど k の値が増加する傾向にある。これに対し、白丸で示したわが国の測定結果の多くは前述の下限曲線の前後に分布しており、下限曲線より小さい側の測定結果もかなりの数ある。この結果と図-8に示した釜石鉱山内で複数の手法を用いて測定された結果を比較すると、いずれの測定方法においても他のわが国の測定例より平均側圧係数が高い位置にプロットされる。

4.3 地震学的造構応力および地質構造との関係

造構応力の推定には、地震観測から有用な情報が与えられている。これは、初動の押し引きの関係から地震を発生させた応力の方向(P軸)を推定するものである。それによれば、東北地方で観測された浅発地震の多くは概ね東西圧縮が卓越しているが、岩手県沿岸周辺では南北方向にP軸が振れている浅発地震が珍しくない⁴⁾。前述した、初期応力測定により決定された最大主応力の方向は概ね南北方向であり、地震学的造構応力と整合的である。また、最大主応力の方向は、鉄および銅の鉱床の並びや栗橋花崗閃緑岩と古生層との間にみられるような岩種の境界に沿う方向である。

5. まとめ

6種類の手法を用いた初期応力測定を深度の異なる2箇所で実施し、以下の知見が得られた。

- 1) 各測定方法により決定された初期応力を比較すると、最大主応力の方向は概ね南北方向で一致する傾向が認められたが、大きさに関しては測定方法によっては異なる傾向を示すものも存在した。
- 2) 250mレベルで実施したAE法、DRA法、DSCA法では他の手法による測定結果と異なる傾向を示したが、この原因としては、AE法、DRA法ではボーリングコアを採取してから経過時間の問題があるものと考えられる。また、DSCA法では応力解放以前に存在しているマイクロクラックの影響が考えられる。
- 3) わが国の他の測定例と比較して、原位置試験場の位置する釜石鉱山周辺では平均側圧係数が高い状態にあると考えられる。
- 4) 各測定方法で決定された最大主応力の方向は、地震学的造構応力と整合的である。

謝辞

本稿で用いたデータは、動燃事業団が釜石鉱山で実施している「深部地質環境特性調査」の成果の一部である。また、ボーリングコアを用いた測定では東北大学松本教授に御指導頂き、水圧破壊法の測定は同和工営(株)に実施して頂いた。貴重なデータを御提供頂いた同事業団とともに、ここに記して深く謝意を表する。

6. 参考文献

- 1) 例えば、初期地圧測定法の現状と課題、土木学会、1992。
- 2) 野口義文・張鉉國・高原弘幸・尾原祐三：釜石鉱山における初期応力状態に関する研究(第1報)、第26回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.181~185, 1995.1。
- 3) 日本材料力学編：岩の力学 基礎から応用まで, pp.357~361, 丸善, 1993。
- 4) 菅原勝彦・尾原祐三：地殻応力の一般的傾向、資源・素材'96, pp.65~70, 1996.10。