

(109)CSIRO法による初期地圧測定

応用地質学会 正会員○船戸 明雄 正会員 横山 幸也
三井金属学会 竹村 友之 平林 豊

Initial stress measurements in the Kamioka Mine by Over-coring Method Using Hollow Inclusion Cells

Akio FUNATO, OYO Corporation
Tatsuya YOKOYAMA, OYO Corporation
Tomoyuki TAKEMURA, Mitsui Mining & Smelting Co., LTD.
Yutaka HIRABAYASHI, Mitsui Mining & Smelting Co., LTD.

Abstract

Initial stress is one of the most essential information for underground excavation. There are many methods for initial stress measurement. Among them, in Japan, over-coring methods using 8 element embedding gauges or spherical 16 element mold gauges have been mainly applied at many sites, since such methods are effective in reliability.

At a depth of approximately 1,000 meters, in the Kamioka Mine, the authors conducted initial stress measurements, using 8-element embedding gauges, 16-element sphere bottom gauges and hollow inclusion (HI) cells. HI cells were firstly used for initial stress measurement in Japan by the authors. These over-coring methods were performed successfully and typical released strain curves were obtained.

These measurements determined that the principle stresses were similar in each measurement.

1. はじめに

地下空間の開発において、合理的で安全な設計・施工を行うためには初期地圧を把握することが不可欠である。初期地圧を測定する方法は、古くから多くの研究者によって考案、実施されてきた。その中で、応力解放法は最も歴史が古く、測定法も多様であり、現在までに最も実績の多い手法である。応力解放法の大きな特徴は、弾性論を基礎として、岩石の応力～ひずみ関係から地圧を算定するところにあり、理論的に明解で、1回の測定で二次元または三次元の初期地圧を求めることができることである。

筆者らは、これまでに、電力中央研究所式8成分ひずみ計を用いた応力解放法¹⁾(以下埋設法と呼ぶ)に関し数多くの測定を行うとともに、測定結果の信頼性向上のために数々の検討を重ねてきた²⁾。この方法は精度的にも確実性からも優れた方法であり、国内では適用実績が最も多い。

最近では、埋設法の他に熊本大学式16素子球面孔底ゲージを用いた応力解放法(以下熊大法と呼ぶ)の適用例が増加している。この方法は菅原³⁾によって開発されたもので、球面に研磨したボーリンク孔底にひずみゲージを貼りつけてオーバーコアリングをする方法である。

一方、国外ではオーストラリアのCSIRO(Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization)で開発されたHollow Inclusion(HI)セルを用いた応力解放法(以下CSIRO法と呼ぶ)に関する報告が多い⁴⁾。CSIRO法の国内での適用例はないと思われるが、ISRM(International Society for Rock Mechanics)のSuggested Methodにも採用されており、海外では標準的な測定法となっているようである。

筆者らはこれら3種類の地圧測定法を神岡鉱山茂住鉱内での初期地圧測定に適用した。ここでは国内での実施

例がほとんどないCSIRO法について、その測定結果を述べる。

2. 測定の概要

測定場所は図-1に示す神岡鉱山茂住鉱内の地下約1000mの地点である。同地内では現在東京大学宇宙線研究所の素粒子観測施設“スーパー神岡”の建設が行われており、直径40m 高さ58mの円筒ドーム空間の開削が進められている。本測定はこの開削工事に先立ち、図-2の位置で実施したものである。

測定地点の地質は、飛騨変成帯の黒雲母角閃石片麻岩を主体としている。この片麻岩は片理構造を有しているものの極めて堅硬な岩石である。

初期地圧測定は坑道の側壁から水平方向に掘削したボーリング孔内で実施した。各手法のゲージ設置位置は図-3の通りである。なお、KU-2とCS-2の測定では、オーバーコアリングの途中でコアが破断したため、解放ひずみを求めることができなかった。

3. CSIRO法によるオーバーコアリングの概要

CSIRO法は、小口径(φ38mm)のパイロット孔壁にHIセルを貼りつけ、大口径でオーバーコアリングを実施した際の解放ひずみから初期地圧を算出する方法である。HIセルは図-4に示すようにエポキシ製の薄肉中空同筒パイプにロゼット型のひずみゲージを装着したもので、9成分のものと12成分のものがある。HIセルの設置手順は以下の通りである。

- ①パイロット孔を洗浄する。
- ②HIセルの中にエポキシ系接着剤を装填する。
- ③ピストンロッドの長さを調節して、HIセルを組み立てる。
- ④HIセルをパイロット孔の所定の位置に挿入し、水銀スイッチをみながら定方位にセットする。
- ⑤挿入ロッドを介してピストンを押し込み(約6cm)、HIセルと孔壁の間を接着剤で充填する。

その後、接着剤の硬化を待って翌日図-5の手順でオーバーコアリングを行い、回収したコアの感度試験を行う。

4. CSIRO法による測定結果

4. 1 解放ひずみ

オーバーコアリングに伴う解放ひずみの測定結果を図-6に示す。横軸はオーバーコアリングの掘進深度を表し

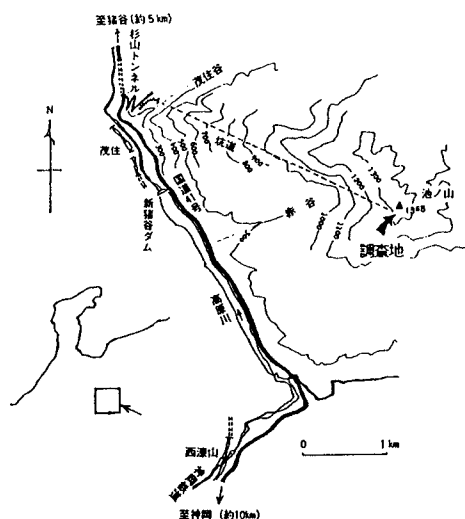


図-1 調査地案内図

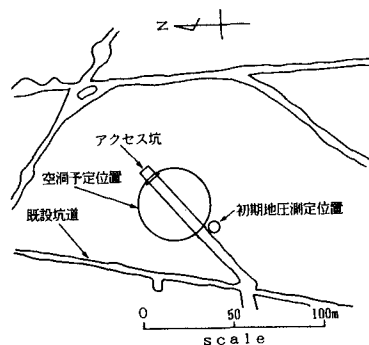


図-2 初期地圧測定地点位置図

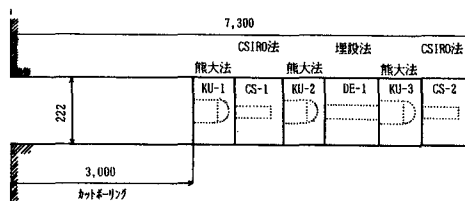


図-3 各ゲージの設置位置

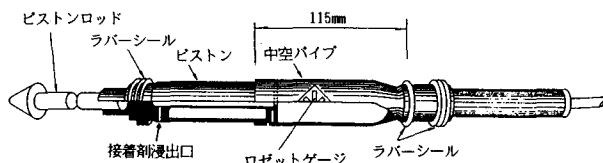


図-4 HIセルの概要

ており、ボーリングビットの先端の位置と掘進開始時からのひずみ変化の関係が示されている。いずれのゲージもビット先端がゲージ位置に達する10cm程手前からひずみ変化が起り始め、ゲージ位置を通過するところでひずみが大きく変化し、10cm～15cm通過したところで一定値に達している。解放ひずみはこのひずみが一定値に落ちついたところで読み取った。

4.2 感度試験

CSIRO法では、通常は回収したコアで二軸感度試験を行い、得られた弾性係数とポアソン比を用いて均質等方体として解析されている。今回は片理構造を有する片麻岩であることから異方性が懸念されたため、埋設法と同様の三軸感度試験を行って個々のゲージの感度を校正することとした。感度試験による応力～ひずみの関係を図-7に示す。この結果によると同一方向のゲージでも曲線の勾配はかなり異なっており、非線形な曲線を示すものもみられる。これらの現象を異方性だけでは説明することは困難であり、H Iセルの偏心、傾斜または接着剤層の厚さの不均一等もあわせて考えねばならない。そのために次に述べるみかけひずみの考え方を導入して解析を行った。

4.3 応力解析

三軸感度試験で得られた応力～ひずみ曲線から、各ゲージの解放ひずみ ϵ_{pi} に対応した三軸等方応力 σ_{ei} を求め、次式で各ゲージのひずみ感度係数 E_i を算出する。

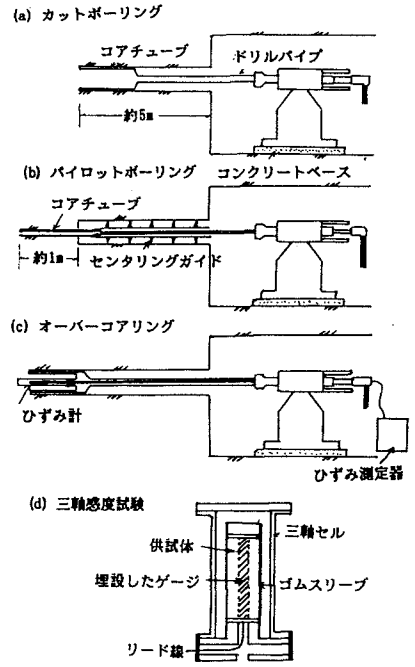


図-5 オーバーコアリングの手順

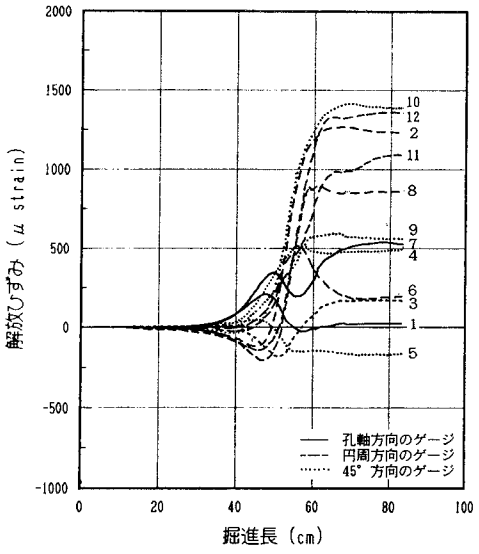


図-6 解放ひずみ曲線

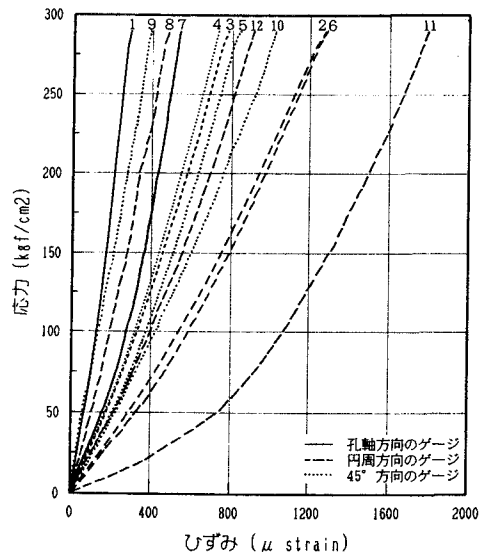


図-7 三軸感度試験結果

$$E_i = \begin{cases} (1-2\nu) \cdot \frac{\sigma_{ci}}{\varepsilon_{pi}} & \text{孔軸方向のゲージ} \\ (2-\nu) \cdot \frac{\sigma_{ci}}{\varepsilon_{pi}} & \text{円周方向のゲージ} \\ \frac{3}{2} (1-\nu) \cdot \frac{\sigma_{ci}}{\varepsilon_{pi}} & 45^\circ \text{ 方向のゲージ} \end{cases}$$

ここに、 ν はポアソン比である。次に、等方均質な岩盤の弾性係数 E を E_i の平均的な値として設定し、それに対応するみかけひずみ ε_i を次式で求める。

$$\varepsilon_i = \frac{E_i}{E_0} \cdot \varepsilon_{pi}$$

ここで得られたみかけひずみ ε_i は、岩石の弾性係数の異方性や微細なクラックが解放ひずみに与える影響、さらには、場所による充填材の不均一性などを包括的にキャンセルする量であり、みかけ上、等方均質な弾性体でのひずみ値として評価できるものである。

観測方程式は、

$$\{\varepsilon\} = [B]\{\sigma^*\}$$

となる。ここに $\{\varepsilon\}$ はみかけひずみ、 $\{\sigma^*\}$ は初期地圧の6応力成分で、 $\{\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}\}^T$ である。 $[B]$ は各ひずみゲージのひずみと応力の関係を表わす係数の行列である⁵⁾。

初期地圧は、

$$\{\sigma^*\} = ([B]^T [B])^{-1} [B]^T \{\varepsilon\}$$

の形で与えられる。ここに、 T は転置行列を、 $^{-1}$ は逆行列を示す。測定データが6個以上の場合は最小自乗法を用いて解く。

このようにして解析した結果を表-1、図-8に示す。

表-1 CSIRO法による初期地圧測定結果

主 応 力 (kgf/cm ²)	方 向 余 弦		
	ℓ	m	n
σ_1 306.2	-0.663	0.036	0.747
σ_2 203.5	0.702	0.375	0.604
σ_3 81.4	0.256	-0.925	0.274
6応力成分	$\sigma_x = 240.6$ $\tau_{xy} = 26.8$	$\sigma_y = 99.0$ $\tau_{yz} = 33.9$	$\sigma_z = 251.7$ $\tau_{zx} = -59.6$

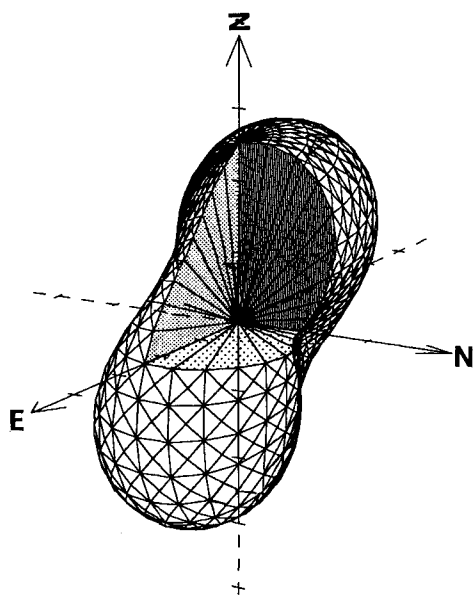


図-8 CSIRO法による初期地圧測定結果

5. 測定結果

CSIRO法、埋設法および熊大法の3種類の測定法による測定結果を表-2、図-9に示す。測定結果の特徴をまとめると、以下の通りである。

- ①鉛直方向の土被り応力は、直上の地表面までの距離を950m、岩石の密度を 2.7g/cm^3 とすると 256kgf/cm^2 となる。各測定による鉛直方向の応力は、ほぼこの土被り応力に等しくなっている。
- ②いずれの測定でも最大主応力 σ_1 と最小主応力 σ_3 の差が大きい。
- ③主応力の方向については、概ね一致した結果が得られている。

CSIRO法は、主応力の大きさおよび方向において埋設法と熊大法の間で埋設法に近い結果を示しており、このことからCSIRO法が埋設法や熊大法と同等の結果を与える地圧測定法であると判断できる。

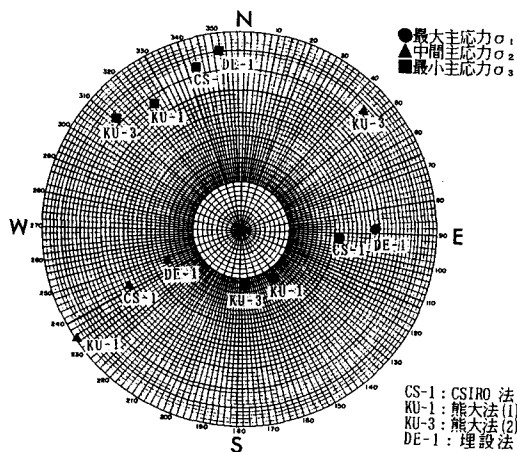


図-9 各手法による主応力の方向

表-2 初期地圧測定結果

測定法	CSIRO 法	熊大法-1	熊大法-2	埋設法
最大 主応力	306.2 N273E 48E	297.9 N323E 66S	403.5 N353E 67S	238.3 N268E 31E
中間 主応力	203.5 N 62E 37W	179.2 N 55E 1W	181.8 N225E 14N	183.2 N 66E 57W
最小 主応力	81.4 N164E 16N	33.0 N145E 24N	23.2 N130E 17W	62.4 N172E 10N
垂直応力	251.7	252.9	357.2	194.1

(注) 上段：応力 (kgf/cm²)
中段：応力の方位
下段：応力の傾斜

6. おわりに

神岡鉱山内の飛騨片麻岩を対象にCSIRO法による初期地圧測定を実施した。同じ箇所でも実施した埋設法、熊大法の測定結果と比較して満足できる結果が得られた。CSIRO法は、ボーリング孔径が他の手法に比べて小さく経済的である。反面HIセルの設置には細心の注意と熟練を必要とする。特にわが国に広く分布する軟岩を対象とする場合には、接着材の種類、セルの剛性の影響等、適用上検討を要する部分もあり、今後検討課題として取り組んでいきたい。

《 参考文献 》

- 1) 金川忠, 日比野敏, 石田毅 (1986): オーバーコアリング法による3次元地圧計測法—埋設型8成分ゲージの開発 電力中央研究所報告 研究報告: 385033
- 2) 横山幸也, 田中達吉, 船戸明雄 (1991): 埋設法による初期地圧測定の信頼性向上のための検討 応用地質年報 No.13, pp.43~72.
- 3) 菅原勝彦, 尾原祐三, 岡村宏, 王道南 (1985): 球面孔底ひずみ測定による3次元岩盤応力の決定 日本鉱業会誌 101巻 1167号, pp.277~282.
- 4) Amadei, B. (1985): Applicability of the theory of hollow inclusions for overcoring stress measurements in rock, Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol.18, pp.107~130.
- 5) 岡行俊, 平松良雄 (1968): ひずみまたは変形測定値からの岩盤内応力の決定 日本鉱業会誌 84巻 957号, pp.7~14.