

(42) 神岡鉱山における電中研式初期地圧測定結果

応用地質株式会社 田中 達 吉
 横山 幸 也

Results of In-Situ Stress Measurements by the CRIEPI Method at the Kamioka Mine

OYO Corporation Tatsukichi TANAKA
 Tatsuya YOKOYAMA

ABSTRACT

Tokyo University is planning the construction of the world's largest nucleon decay experiment facility at a depth of approximately 1,000 meters, in the Kamioka Mine. This plan calls for underground excavation of a dome to house the facility, consisting of a cylinder 43m high, with a diameter of 40m and a revolving ellipsoid 12m high, with a bottom diameter of 40m. In-situ stress measurements were conducted to provide basic information for design of the dome. The following four methods were used: the Kumamoto University method, the CRIEPI method, the hydraulic fracturing method and the SPR method. These measurements determined that the maximum principle stress is 378kgf/cm^2 and minimum principle stress is 50kgf/cm^2 at this site. This paper describes the procedure and the results of the CRIEPI method used in these measurements as an example of an in-situ stress measurement in a situation of large depth and high stress field.

1. はじめに

東京大学宇宙線研究所では、神岡鉱山の地下約一千メートルに世界最大規模の素粒子観測施設を建設する計画がある。この計画では、5万トンの純水をタンク内に蓄え、光電子倍增管を約一万一千本設置することになっており、その格納施設として、直径40m、高さ43mの円筒と、下底の直径が40mで、高さ12mの半楕円回転形ドームからなる空洞を開削することになる。

空洞設計の基礎資料のひとつとして、初期地圧の測定を行い建設予定地の岩盤の応力状態を把握した。ここでは、熊本大学式応力解放法、電力中央研究所式応力解放法（以下電中研法と呼ぶ）、水圧破碎法、SPR法の4種類で測定が行われ、さらに補助的データとしてAE法も実施された。本報では、これらの測定のうち、筆者らが実施した電中研法について、その実施方法、解析方法、および解析結果をまとめ、1,000mの深部における電中研法の実施例として紹介するものである。

2. 電中研法の概要

電中研法オーバーコアリングは、小口径のボーリング孔内に多成分のひずみ計を埋設し、同心円の大口徑ボーリングにより岩石コアの応力解放を行い、その時のひずみを測定して地圧を算出する方法である。測定手順を図-1に示す。この方法の特徴は、ひずみ計の感度係数を回収したコアの三軸感度試験により外圧に対するひずみ計の出力として求めることにより、埋設充填材の不均質性や岩石の異方性が解放ひずみに

与える影響を除去できるところにある。岩盤内部に埋設する多成分ひずみ計は、5成分ゲージが長年使用されていたが、金川¹⁾により図-2に示す8成分ゲージが開発され、これによって1方向のボアホール測定で、三次元の応力場を決定することができるようになった。

本測定において最も注意すべき点は、オーバーコアリング時に岩石コアが破断しない位置にゲージを埋設すること、およびセメントペーストによるゲージ埋設を確実にすることである。前者に対しては、埋設点の手前のボーリングコアの破断面を十分に観察し、破断の条件を抽出しておくこと、後者に対しては、透明なアクリルパイプ内でセメントペーストの注入予備実験を原位置で行い、セメントペーストの配合や注入速度を十分に検討しておく必要がある。

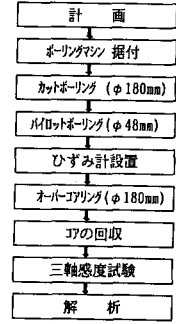


図-1 オーバーコアリング測定手順

3. 測定概要

調査地は富山県の神岡鉱山茂住鉱内で、池の山三角点(海拔1,368.7m)の直下、約1,000mの地点である。図-3にその位置を示す。測定地点付近の岩盤は角閃石・黒雲母片麻岩で、一軸圧縮強度は1,000~1,500kgf/cm²の堅硬な岩石からなる。割れ目は少ない。

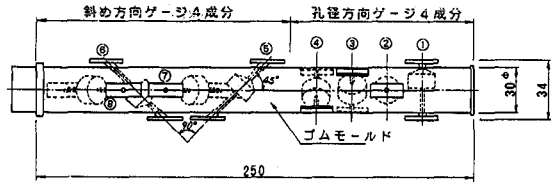


図-2 埋設型8成分ゲージのゲージ配列

測定地点においてボーリング作業に必要な鉱道の拡幅を行い、コンクリートベースを打設してボーリング機械を設置した。ボーリングの口径は180mm、掘進方向はE40°S、水平に対して5°上向きである。

測定手順を図-4

に従って説明する。

まず、深度5mまで

カットボーリングを

行った(a)。これは坑

道掘削による周辺岩

盤の緩みや応力集中

の影響を避けた岩盤

領域で地圧測定を実

施するためのもの

である。5m~7.60m間

では、熊本大学方式

の応力解放法が実施

された。その後、(b)

に示すように、セン

タリングガイドを用

いて孔奥の中心に小

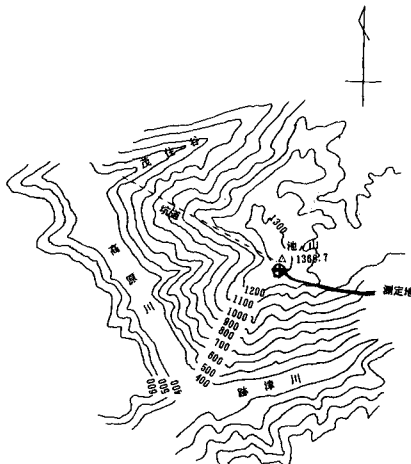
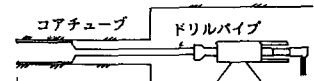


図-3 調査位置図

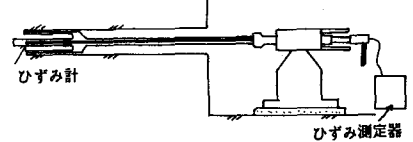
(a) カットボーリング



(b) パイロットボーリング



(c) オーバーコアリング



(d) 三軸応度試験

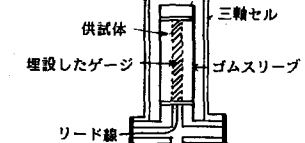


図-4 測定の概要

口径（ $\phi 48\text{mm}$ ）のパイロットボーリングを行った。このボーリング孔内に 8 成分のひずみ計を挿入し、エアパッカーで口元をシールした上でセメントペーストによって埋設した。セメントペーストの硬化養生を行った後、口径180mm のオーバーコアリングによりひずみ計周辺の岩盤の応力解放を行い、応力解放に伴う解放ひずみの測定を行った (c)。そして解放ひずみを測定した岩石コアを回収し、直ちに三軸感度試験に供した (d)。

4. 測定結果および解析結果

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データを図-5 に示す。横軸は掘進深度を表しており、ボーリングビットの先端の位置と解放ひずみの関係が示されている。これらのひずみ変化は、ボーリング孔の掘進方向に対して 90° のもの (図のNo.1,2,3,4) と斜め 45° のもの (図のNo.5,6,7,8) で傾向が異っている。 90° 方向についてみると、ビット先端がゲージ位置に到達する20cm手前からひずみ変化が起り始め、ゲージ位置近傍で極値を示し、その後圧縮側あるいは引張側に大きく変化して一定値となる。 45° 方向のものは、ビット先端がゲージ位置に到達する 7~8cm 手前からひずみ変化が始まり、ゲージ位置通過後 7~8cm の位置にビット先端が到達したところで一定値となる。これらの挙動は金川¹⁾ による FEM 計算結果 (図-6) と同様な傾向を示しており、オーバーコアリングによるビット先端の切欠き部の応力集中と判断される。

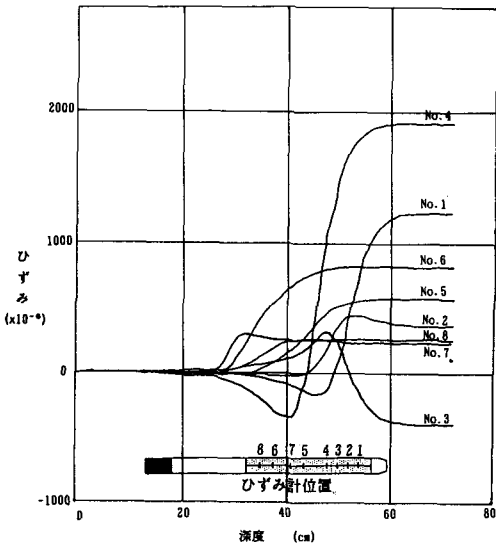


図-5 オーバーコアリングの掘進に伴う埋設ゲージのひずみ変化

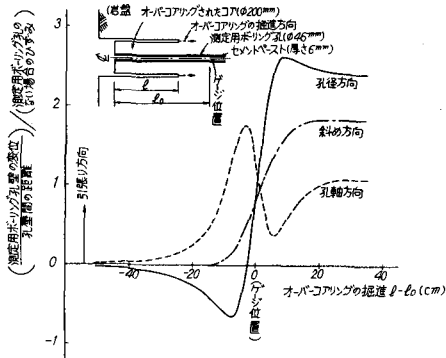


図-6 オーバーコアリング中の各方向のひずみ変化 (回転体モデルによる FEM 解析結果) 金川¹⁾より引用

4-2. みかけひずみ

オーバーコアリングによって回収したコアを三軸セル内に入れて三軸感度試験を行なった。外圧に対するひずみゲージの出力を図-7 に示す。ボーリング孔の掘進方向に対して 90° のもの (図のNo.1,2,3,4) と斜め 45° のもの (図のNo.5,6,7,8) では、ひずみ感度が異なり、斜め 45° のものは 90° の約1.3 倍となっている。この感度の違いは、金川¹⁾ による FEM 計算結果 (図-6) と同様な傾向を示している。

ひずみゲージの感度係数 E_i を次式により求めた。

$$E_i = (1-2\nu) \cdot \sigma_{ci} / \varepsilon_{pi} \quad \cdots \cdots (1)$$

ここに、 ε_{pi} : 解放ひずみ、 ν : ポアソン比、 σ_{ci} : 三軸等方応力である。

次に任意の弾性係数 E_0 を設定し、 E_0 、 ν という物性を持つ等方等質な弾性体が応力解放された時に生じるひずみとして ε_i を次式により求めた。みかけひずみの値を表-1に示す。

$$\varepsilon_i = E_i / E_0 \cdot \varepsilon_{pi} \quad \cdots \cdots (2)$$

8個のみかけひずみから最小自乗法によりひずみ分布図を作成し図-8に示す。測定されたみかけひずみを同図にプロットすると測定値のばらつきが小さいことがわかる。なお、ひずみ分布の座標系を同図中に示した。

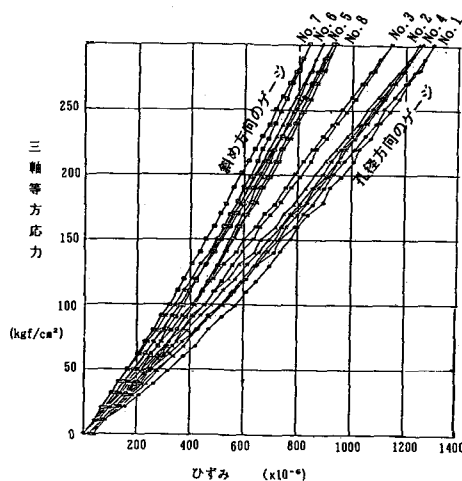


図-7 三軸感度試験による三軸等方応力と埋設ゲージのひずみ変化

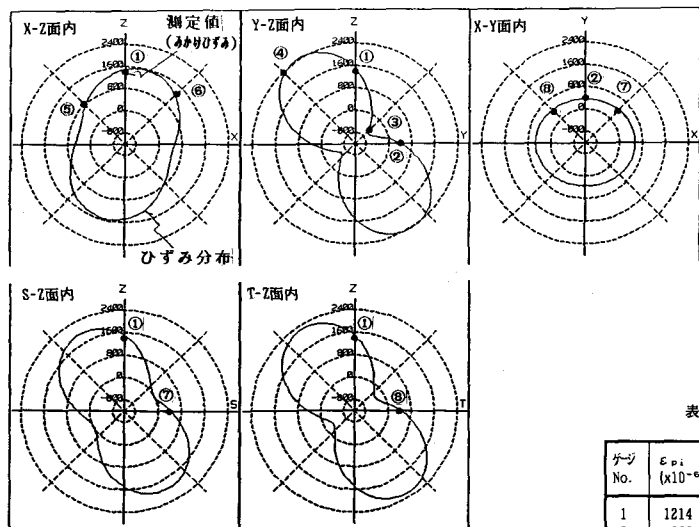


図-8 みかけひずみの面内分布と最小自乗法で求めたひずみ分布との関係

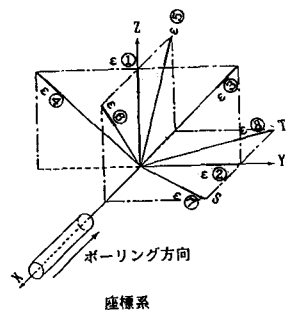


表-1 みかけひずみ一覧表

ゲージ No.	ε_{pi} ($\times 10^{-5}$)	σ_{ci} (kgf/cm ²)	E_i (kgf/cm ²)	ε_i ($\times 10^{-5}$)
1	1214	274.70	0.113×10^6	1374
2	360	78.29	0.109×10^6	391
3	-390	-95.54	0.122×10^6	-478
4	1904	473.00	0.124×10^6	2365
5	564	165.06	0.146×10^6	825
6	806	265.99	0.165×10^6	1330
7	232	71.08	0.153×10^6	355
8	252	73.65	0.146×10^6	368

4-3. 応力解析結果

基準座標系におけるひずみゲージの方向余弦を (ℓ_i, m_i, n_i) とすると、ひずみと応力の関係は、

$$\varepsilon_i = 1/E_0 \cdot \{ \{ \ell_i^2 - \nu (1 - \ell_i^2) \} \sigma_x + \{ m_i^2 - \nu (1 - m_i^2) \} \sigma_y + \{ n_i^2 - \nu (1 - n_i^2) \} \sigma_z + 2(1+\nu) \ell_i m_i \tau_{xy} + 2(1+\nu) m_i n_i \tau_{yz} + 2(1+\nu) n_i \ell_i \tau_{zx} \} \quad \cdots \cdots (3)$$

となる。したがって測定された8個のゲージに対して、測定方程式は、

$$\{\varepsilon_i^*\} = [B] \{\sigma_i^*\} \quad \cdots (4) \quad \text{となる。ここで、}\{\varepsilon_i^*\}\text{はみかけひずみ、}\{\sigma_i^*\}\text{は6応力成分、}[B]\text{は測定}$$

方程式の係数マトリックスである。(4)式を最小自乗法で解いて初期地圧を求めた。その結果を図-9に示す。

5. 各種の方法による測定結果のまとめ²⁾

今回実施した各種の方法による初期地圧測定結果を表-2に示す。測定結果の特徴をまとめると、次のとおりである。

- ①地山荷重による土被り相当応力は、岩盤の密度を2.7g/cm³、被り厚さを950mとすると256kgf/cm²である。初期地圧測定結果による最大主応力は、応力解放法では土被り相当応力よりも大きく、水圧破碎法、SPR法では土被り相当応力よりも小さい。
- ②最大主応力の方向、傾斜はどの方法も類似している。しかし、中間・最小主応力については、熊本大学式と他の三つの方法では位置が逆になっている。傾斜は概略一致している。

これらの測定結果から調査地の最大主応力の方向が、垂直方向ではなく傾斜していることと、最大・最小主応力の比がかなり大きいことは確実と思われる。そこで、垂直応力を土被り相当応力とみなし、当地点の初期地圧を近似的に次のようにまとめた。

最大主応力 378kgf/cm² (N25° E, 50S)
中間主応力 100kgf/cm² (N146° E, 24N)
最小主応力 50kgf/cm² (N251° E, 30N)

6. おわりに

同一地点において、5種類もの初期地圧測定法が実施された例は少なく、それぞれの方法の特徴を検討するうえで大変貴重なデータになるものである。著者らは、電中研式初期地圧測定を担当し、今回その結果の報告する機会を得た。測定は一回のみであったが、測定上の問題も少なく、質の良いデータが取得できたものと考えている。

今回の測定に当たり、三井金属鉱業（株）の東後義孝氏、境大学氏及び（財）電力中央研究所の金川忠氏には大変にお世話になった。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

1) 金川忠他、『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 研究報告385033、1986.6
2) 東後義孝他、『神岡鉱山における各種の方法による岩盤応力の測定について』
昭和63年度資源・素材関係学協会合同秋季大会 1988.10

主 応 力 (kgf/cm ²)	方 向 余 弦		
	l	m	n
σ ₁ 291.4	-0.540	0.218	0.813
σ ₂ 135.7	0.509	0.854	0.110
σ ₃ 43.5	0.670	-0.473	0.572
6 応 力 成 分	σ _x =139.8 σ _y =122.4 σ _z =208.3 τ _{xy} =10.9 τ _{yz} =52.5 τ _{zx} =-103.8		

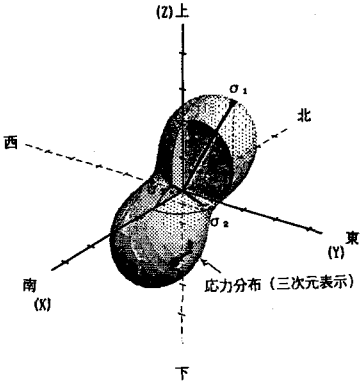


図-9 電中研法による初期地圧測定結果

表-2 初期地圧測定結果

東後²⁾より引用

測定法	熊本大学式	電中研法	水圧破碎法	SPR法	AE法
最大 主応力	367 N25° E 52° S	291 N22° E 54° S	186 N32° E 43° S	183 N30° E 52° S	280
中間 主応力	99 N234° E 34° N	139 N121° E 6° N	96 N155° E 31° N	133 N130° E 8° N	
最小 主応力	24 N134° E 14° N	43 N215° E 35° N	48 N267° E 32° N	112 N226° E 37° N	
垂直応力	262	208	129	156	

(注) 上段：応力 (kgf/cm²)、中段：応力の方位、下段：応力の傾斜