

坑道掘削に伴う周辺岩盤のひずみ測定

In-situ strain measurement around an underground opening during excavation

菊地 正*・佐藤 稔紀*・杉原 弘造*・板本 昌治**

Tadashi KIKUCHI, Toshinori SATO, Kozo SUGIHARA, Masaharu ITAMOTO

Excavation disturbance experiments are being conducted at the Tono Mine and the Kamaishi Mine.

As a part of these experiments, we have measured rock strain variation around a drift during excavation by the stress relief method developed by Central Research of Electric Power Industry. The width and height of the drift are 2.4 m and the drift is horseshoe-shaped. The distances between the drift wall and strain gages are 0.5, 1.0, and 1.5m.

Strain changes began before the face of the drift reached the $-2D$ (D = diameter of the drift) point and ceased after $+2D$. Especially remarkable strain changes were recorded from $-1D$ to $+1D$. The strain change decreased in proportion to the distance from the drift wall up to about 2m from the drift wall.

1. はじめに

岩盤中に坑道などの空洞を掘削すると、周辺岩盤が力学的・水理学的に影響を受ける。これらの掘削影響を把握・評価することは、地下構造物の設計・建設や安全性の評価において重要である。動力炉・核燃料開発事業団では、岐阜県の東濃鉱山において、新第三紀の堆積岩を対象とした坑道掘削に伴う岩盤への影響研究を実施している。昭和62年度から平成4年度まで発破工法による掘削影響試験を行い、平成5年度からは機械による掘削影響試験に着手して、掘削工法の違いが周辺岩盤に与える影響の違いを研究している。今まで坑道掘削に伴う周辺岩盤のひずみ変化や岩盤応力の変化過程の研究は、硬岩での発破掘削工法の事例が多い^{1) 2)}が、軟岩での機械掘削の事例は少ない。今回、ブームヘッダーにより水平坑道を掘削し、坑道周辺岩盤のひずみを連続的に測定することによる、応力再配分現象の進行過程の把握を試みたのでその結果を報告する。

2. 試験位置の概要

東濃鉱山の地質、坑道配置を図-1に示す。基盤は花崗岩で、その上に瑞浪層群、瀬戸層群が堆積している。瑞浪層群は下位より土岐夾炭累層、明世累層と呼ばれる新第三紀の堆積岩である。このうち試験位置の地層である土岐夾炭累層は主に凝灰質砂岩～泥岩で部分的に礫岩が挟まれる、土岐夾炭累層の平均的な物性は、単位体積重量が約 18.5 kN/m^3 、有効間隙率は約 47%、一軸圧縮強度は約 6 MPa、弾性係数は約 2.7 GPa、ポアソン比は約 0.3 である。この位置での初期応力測定結果はばらつきがみられるが、最大主応力は 2 MPa 以下であり最大主応力と最小主応力の比は 1.2～2 倍である。また、鉛直方向の応力成分は、土被り圧 (約 2.4 MPa) に

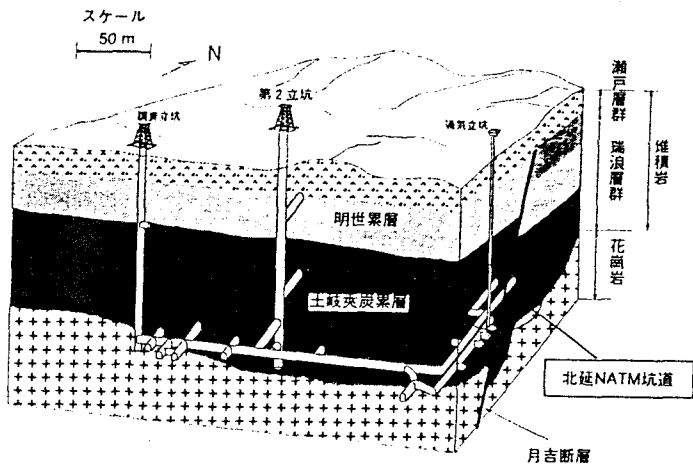
* 正会員 動力炉・核燃料開発事業団 東濃地科学センター

** (株) 日本パブリック 関東支社

比べて小さく土被り圧の0.6~0.7倍程度である。最大主応力は東西方向で傾斜は約40°である。

試験位置の水平坑道は「北延 NATM坑道」と呼ばれ地表下約130 mに位置する。また、試験位置の南側35 m付近には、月吉断層と呼ばれる逆断層（走向N80° E、傾斜60° S、約30 m変位）が交差している。

試験坑道の断面は直径および高さが2.4 mの馬蹄形で掘削は25 m行った。このうち、最初の3 mは発破掘削により実施し、残りの22 mはブームヘッダー（ミニ・ロードヘッダー）により掘削した。支保は坑道1 mの掘削が終了する毎に1.5 mのロックボルトを3本と、吹付けコンクリートを施した。



図ー1 東濃鉾山の地質と坑道配置

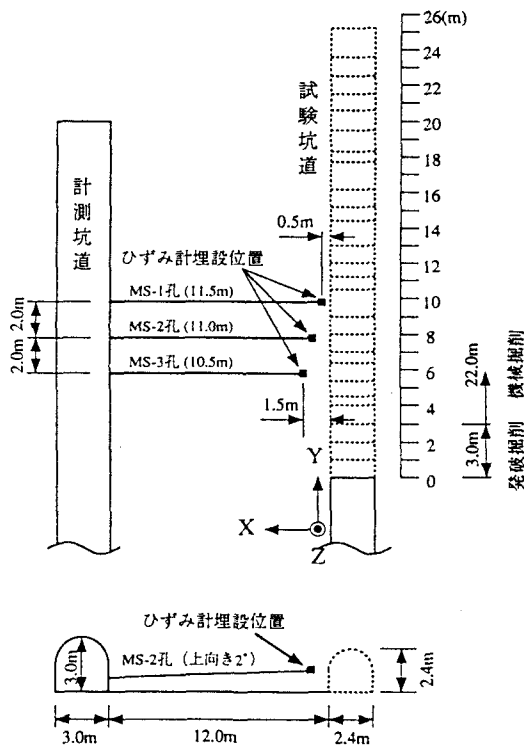
3. 計測方法

坑道掘削に伴う応力再配分現象は、掘削前・中・後に周辺岩盤のひずみを連続測定し、切羽位置とひずみ変化量の関係から応力再配分現象の進行過程やその範囲の把握を試みた。応力再配分現象の検証は、原位置計測結果（例えば、岩盤内変位計の実測値）と比較しやすいように応力ではなく、岩盤ひずみで行った。

岩盤のひずみ測定は電力中央研究所で開発された埋設型8成分ゲージのひずみ計（以下ひずみ計と言う）を用いた応力解放法により実施した。ひずみ計は試験坑道と平行に先行掘削した計測坑道から上向き2°の方向にφ46mmのセンターボーリングを3本行い、各孔に1点ずつの計3点を埋設した。この時、ひずみ計と岩盤との密着をはかるため、センターボーリングのコア観察結果から、ひずみ計埋設予定位置がオーバーコアリング時に開口しそうな亀裂を含まないことを確認してセメントペーストを充填した。

ひずみ計の埋設位置は、試験坑道側壁面から水平距離で0.5 m、1.0 m、1.5 mとし、この順番に測定番号をMS-1、MS-2、MS-3とした。

掘削はひずみ計設置後12日目から発破掘削を1週間に1 mずつ行い、機械掘削はひずみ計設置後53



図ー1 東濃鉾山の地質と坑道配置

日目以降から1日1m平均で行った。ひずみ計埋設位置と試験坑道位置および掘削ステップとの関係を図-2に示す。

岩盤ひずみの計測は坑道掘削前、掘削中および掘削終了後約2ヶ月後までの期間を連続的に行った。

4. 解析方法

埋設したひずみ計より直接得られた計測データは、ひずみゲージや充填材などの複合部材としてのひずみであり、実際の岩盤ひずみではない。また、その値はボーリング孔による応力集中やポアソン効果などの影響により、実際の岩盤ひずみと比べて大きめの値となる³⁾。そこで、坑道掘削に伴う実際の岩盤ひずみと応力を以下の方法により求めた。

- 1) 坑道掘削に伴うひずみ変化を測定する。
- 2) 坑道掘削に伴う測定終了後、オーバーコアリングにより解放ひずみを測定する。
- 3) ひずみ計が埋設されたままのオーバーコア供試体を用いて三軸等方圧縮試験を行い、各ゲージのひずみ感度係数（解放ひずみと三軸等方応力の関係づけの係数で、埋設されたひずみ計の外圧に対する感度を表す）を算定する。
- 4) 上記 1) ~3) に対する測定値の信頼性を検討し、重みの判定をする。
- 5) 測定方向毎に測定方程式を立てる。
- 6) 求める応力成分（6個の未知量）より多いひずみ成分（8個の測定値）が計測されているので測定方程式を最小二乗法により正規化する。
- 7) 正規方程式を解き、最確値としての6応力成分を求める。さらにこの応力値から岩盤ひずみを逆算して算定する。この値が実際の岩盤ひずみとなる。

5. 坑道掘削に伴う岩盤ひずみの変化

坑道掘削に伴う岩盤ひずみと坑道切羽との関係を、ひずみ計が坑道壁面に近い順番

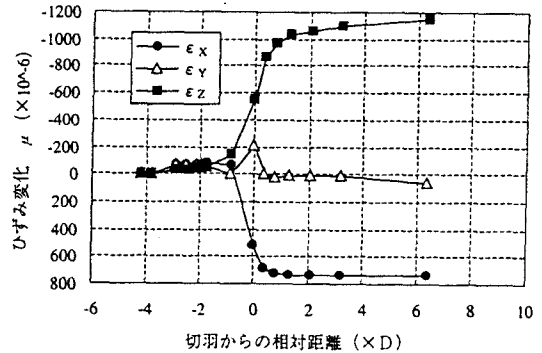


図-3 坑道掘削に伴う岩盤ひずみ (MS-1)

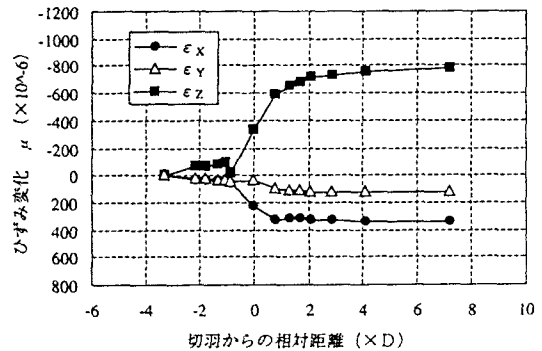


図-4 坑道掘削に伴う岩盤ひずみ (MS-2)

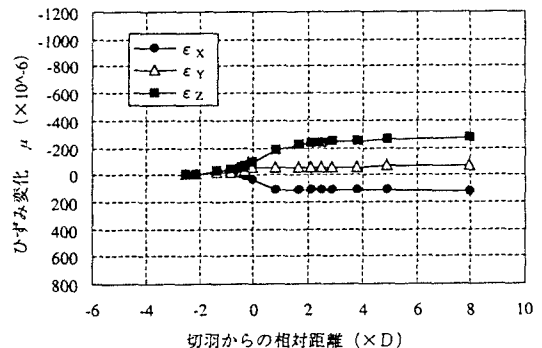


図-5 坑道掘削に伴う岩盤ひずみ (MS-3)

に図-3～5に示す。縦軸のひずみ変化 ϵ は掘削開始直前をゼロ(0)とし、引張り側を正、圧縮側を負で表している。ひずみの成分はわかりやすくするため鉛直方向のひずみを ϵ_z 、試験坑道軸方向を ϵ_y 、試験坑道半径(ボーリング軸)方向を ϵ_x とした。

横軸の切羽からの相対距離($\times D$)は、ひずみ計埋設位置を基準とし、この基準位置と坑道切羽位置との離れを掘削径 D (2.4 m)で表したものである。したがって、負の符号は坑道の切羽がひずみ計埋設位置より手前に位置することを意味する。

3断面のひずみ変化のモードは良く似ており、 ϵ_z は圧縮側に、 ϵ_x は引張り側に変化し、 ϵ_y は両者に比べ変化が少ない。このことは応力再配分される応力成分は鉛直方向と、坑道半径方向が支配的であることを示している。この結果は圧縮応力を受けているものに、円筒状の穴をあけると円周方向(z方向に対応)に圧縮ひずみが、半径方向(x方向に対応)に引張りひずみが生じ、軸方向のひずみは変化が少ないという理論的挙動に調和的である⁴⁾。

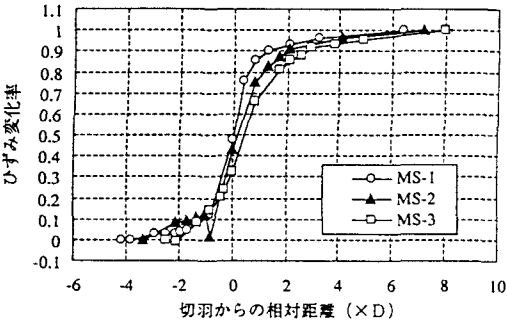


図-6 ひずみ変化率と切羽からの距離

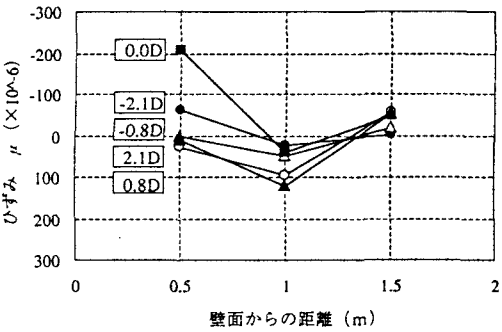


図-8 壁面からの距離とひずみの関係 (Y方向)

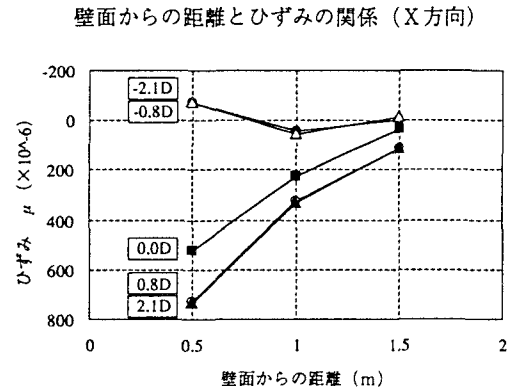


図-7 壁面からの距離とひずみの関係 (X方向)

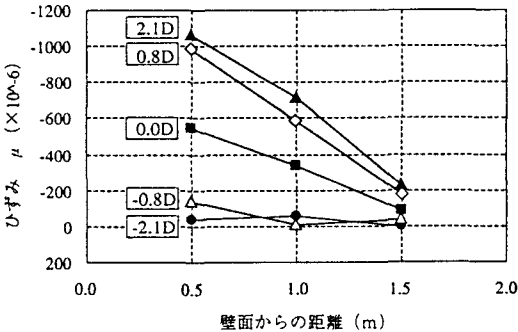


図-9 壁面からの距離とひずみの関係 (Z方向)

図-6にひずみ変化量が最も大きい ϵ_z に着目し、MS-1~3のひずみ変化率と切羽からの相対距離の関係を示す。ひずみ変化率とは、坑道掘削終了後の最終累積ひずみ量に対するその時点のひずみ累積変化量の比率である。この図より切羽進行に伴うひずみ変化は、概ね-2D位置から発生し始め、2D通過後はほぼ収束する。その中でも特に-1Dから+1D間での変化が著しい。これらの結果は吉岡ら⁵⁾が同じ土岐夾炭累層で行った発破工法による直径6mの立坑掘削に伴うひずみ計測結果と同じ挙動である。つまり、このことから切羽進行に伴うひずみの時間的変化は、掘削工法の違いおよび立坑と水平坑道による差が生じない結果を得た。

図-7~9は応力再配分の影響範囲を把握するため各ひずみ成分について、ひずみ累積変化量を掘削壁面からの距離との関係で示したものである。この図より、鉛直方向のひずみ ϵ_z と坑道半径方向のひずみ ϵ_x の累積変化量は壁面から離れるにしたがってほぼ直線的に減少していくことがわかる。この中でも、特に鉛直方向のひずみ ϵ_z の減少傾向は曲線的減少の理論と異なる。これは試験位置での応力場や岩盤強度との関係によるものと考えられる。切羽が計器位置を2D通過後のほぼ定常状態において3測点の結果から鉛直方向および坑道半径方向のひずみの変化範囲を単純に外挿すると坑道掘削壁面より1.7~1.8mの結果を得た。

また、坑道軸方向のひずみ ϵ_y の累積変化量は、壁面からの距離が離れるにしたがって単調減少していく単純な分布ではない。しかし、切羽が計器位置を通過後のほぼ定常状態でのひずみの累積変化量は鉛直方向、坑道半径方向に比べてかなり小さく、ほとんど変化していないといえる。

6. まとめ

新第三紀の堆積岩を対象に、ブームヘッダーにより水平坑道を掘削した際に、坑道周辺岩盤のひずみを連続的に測定し、応力再配分現象の進行過程を把握することを試みた。その結果、以下の知見を得た。

- 1) 坑道周辺の岩盤に生じるひずみの時間的変化は、切羽がひずみ計埋設位置の-2D(D:掘削径)から発生しはじめ、+2Dではほぼ終了する。その中でも特に-1Dから+1D間の変化が著しい。この挙動は、立坑の発破掘削の場合とほぼ同じである。
- 2) 応力再配分によって生じる岩盤の影響範囲は、坑道壁面から約2m以内(坑道径の8割程度)と推定される。

この研究は現在まだ進行中のものであり、今後得られてくる試験・調査および数値解析の結果と比較して総合的に検証していく予定である。

最後に本論文をまとめるにあたり、電力中央研究所金川忠様より有益な助言を戴いた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 石田毅、金川忠、他：空洞掘削時の応力再配置に着目した岩盤ゆるみ域測定法の提案，第23回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.227~231，(1991)
- 2) 菅原勝彦、尾原祐三、他：応力解放法による地圧計測，資源・素材学会秋季大会分科研究会資料，N1，pp.1~4，(1989)
- 3) 金川忠、日比野敏、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—，電力中央研究所報告，No.385033
- 4) E.Hoek，E.T.Brown：岩盤地下空洞の設計と施工(小野寺 透、他訳) 土木工学社。
- 5) 吉岡尚也、杉原弘造、他：堆積岩地山での立坑掘削に伴うひずみの原位置計測とその数値計測，材料，Vol.42，No.474，pp.324~328，(1993)