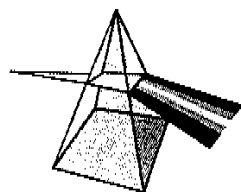


【技術報告】



掘削工法の相違が周辺岩盤の変形挙動に与える影響について

佐藤 稔紀 菊地 正 杉原 弘造

東濃地科学センター

資料番号：105-3

Effect of Excavation Method on Rock Mass Displacement

Toshinori SATO Tadashi KIKUCHI Kozo SUGIHARA
Tono Geoscience Center

東濃地科学センターにおいて、発破と機械により坑道を掘削し、その際に、岩盤変位計測を実施した。また、この計測データを基に、掘削工法の相違が周辺岩盤の変形挙動に与える影響について検討した。坑道掘削によって生じた岩盤変位は、坑道壁面から約 1 m の位置（発破掘削：0.33D、機械掘削：0.42D、D：坑道径）において、発破掘削で1.46mm、機械掘削で0.67mmであった。坑道径が若干異なるため、直接的には比較できないものの、約 2 倍の相違が生じることが明らかになった。有限要素法による弾塑性解析を行い、発破掘削の場合、掘削影響領域を考慮したモデルを用いることで、それに伴う周辺岩盤の変形挙動を表現できることがわかった。また、機械掘削の場合、掘削影響領域は、発破と比較して十分に小さいことが解析的にも確認できた。

Rock mass displacement measurements have been performed to understand rock mass behavior and its dependence on excavation method during drift excavation at the Tono mine. Rock mass displacements of 1.46 mm and 0.67 mm have been measured at one meter (0.33D : blasting, 0.42D : machine, D : width of drift) from the walls of drifts excavated by the drill and blasting method and machine, respectively. Numerical analysis of rock mass displacements with Finite Element Method has been performed assuming an excavation disturbed zone. Measured and analysed rock mass displacements are consistent with each other for the drift excavation by the drill and blasting method. The excavation disturbed zone was narrower for the drift excavated by machine than for the drift excavated by the drill and blasting method.

キーワード

掘削影響、掘削工法、岩盤変位

Excavation Disturbance, Excavation Method, Rock Mass Displacement

1. はじめに

地下の岩盤中に坑道などの空洞を掘削した場合、空洞周辺の岩盤や地下水はその影響を受けることが知られている。影響の原因としては、発破などの掘削作業によって生じるき裂の発生、空洞が出来ることにより生じる岩盤の応力状態の変化、あるいは、排水に伴う地下水の水圧の変化などの現象があげられる。さらにこれらの現象に伴って、岩盤の強度・変形性や透水性などの物性、あるいは地下水の酸化還元電位といったものが変化すると考えられる。

東濃地科学センターでは、地層科学研究の一環として、これらの掘削の影響を受ける範囲（掘削

影響領域）の把握及びその発生メカニズムの解明を進めている。そのために、東濃鉱山と釜石鉱山において掘削影響試験を実施し¹⁾、岩盤変位の計測などを実施している。

掘削影響領域の物性やその範囲は、岩種や応力状態などの岩盤条件や、掘削工法などの施工方法により変化するものと考えられる。岩盤条件に関しては、深度が深くなるにつれて、地山強度比（岩盤の強度／初期応力）が小さくなる。このことにより、掘削に伴う応力変化による影響が大きくなり、場合によっては岩盤の破壊が生じる。

東濃鉱山で研究対象としている岩種は、力学的には軟岩に分類される新第三紀の堆積岩である。

しかし、深度が約130mと浅く、応力値が小さいために、応力再配分によって生じる破壊領域は観察されない。そのため、坑道掘削に伴って発生する掘削影響は主に発破などの衝撃によって生じるものと考えられる。したがって、掘削影響領域は掘削工法に大きく依存すると想定される。

一方、カナダのURL (Underground Research Laboratory) では、深度420mの花崗岩において研究が行われており、岩盤の初期応力が大きい。このため、ロックスプリッタを用いた工法（水圧を利用した静的破壊工法）など、発破よりは岩盤に与える影響が小さいと考えられる工法を用いて坑道を掘削した場合であっても、掘削に伴う応力状態の変化によって坑道周辺には岩盤が破壊する領域が発生している²⁾。

上述の状況を勘案し、掘削影響の工法による違いを検討するために、坑道を発破と機械で掘削し、岩盤変位を計測した。これらの計測結果を比較することにより、掘削工法の違いが岩盤の変形挙動に与える影響について考察した。

2. 計測概要

2.1 計測位置及び地質概要

岩盤変位計測を実施したのは東濃鉱山の北延NATM坑道と呼ばれる水平坑道である（図1）。北延NATM坑道は、土盛り約130mに位置している。計測位置付近の地質は、基盤が白亜紀末の花崗岩であり、新第三紀中新世の瑞浪層群と未固結の瀬戸層群がその上位に存在する。瑞浪層群は下位より土岐夾炭累層（下部及び上部）と明世累層から構成される。北延NATM坑道は砂岩・泥岩の互層及び礫岩から構成される土岐夾炭累層中に掘削されている。

岩盤変位計測を行った試錐孔のコア（試錐孔から採取された岩芯）観察結果によると、泥岩・細粒砂岩ないし粗粒砂岩・レキ岩が連続的に分布し

ている。発破掘削部分では細粒砂岩が、機械掘削部分ではレキ岩が卓越している。また、ボアホールテレビによる孔壁観察によると、観察されるき裂のほとんどはヘアークラックであり、1～3本/m程度の頻度である。

コアを用いた室内試験によると、土岐夾炭累層の物性値の平均は、単位体積重量は18.1kN/m³、有効間隙率は47%、一軸圧縮強度は6.4MPa、P波速度は2.1km/sである。応力解放法による初期地圧計測結果によると、北延NATM坑道における応力状態は、最大主応力

は2MPa以下であり、最大主応力と最小主応力の比は1.2～2.0、鉛直応力は1.4～1.7MPa（土盛り圧2.4MPaの0.6～0.7倍程度）である。最大主応力の方向は東西方向で傾斜は約40°Sである。

2.2 計測方法

岩盤変位計測は、計測用の坑道（計測坑道）から掘削した試錐孔に岩盤内変位計を設置し、試験坑道の掘削終了まで実施した。試験坑道は、全断面発破工法と機械（ブームヘッダ：三井三池製作所社製ミニロードヘッダ）工法によって掘削され、この坑道を掘削する際に各種の影響を計測し評価した。坑道及び試錐孔のレイアウトを図2に示す。

坑道の形状は馬蹄形で、幅及び高さは発破掘削で3.0m、機械掘削で2.4mである。支保は吹き付けコンクリートとロックボルトで行った。

計測に用いた岩盤変位計は東亜測器社製の多点

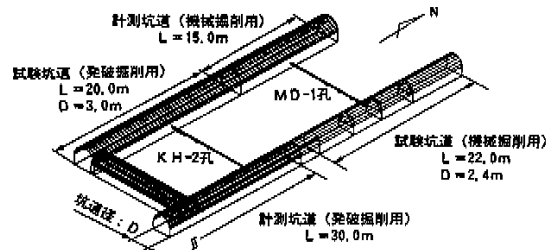


図2 坑道及び試錐孔のレイアウト

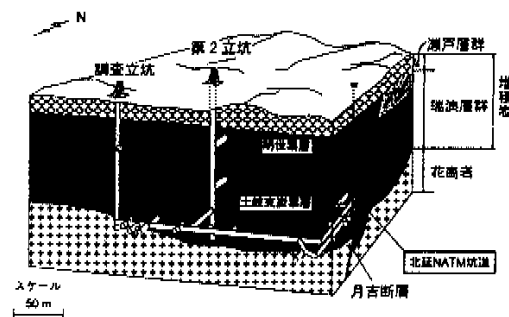


図1 東濃鉱山地質図・坑道配置

表1 多点式地中変位計の仕様

項目	仕様	メーカー
本体部	変位計 適用孔径: 66.76mm 固定方法: 加圧式 点数: 最大6点 接続方法: 鋼製ワイヤ (φ5mm)	東亜測器 (EM-150-6M)
計測部	ノギス デジマチックノギス 読取精度: 1/100mm	東亜測器 (DM-15)

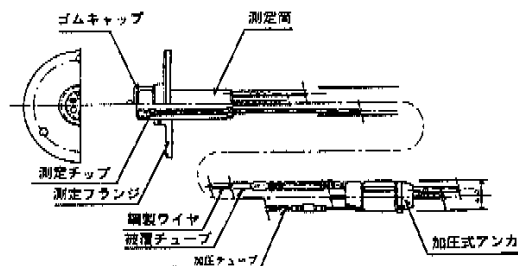


図3 多点式地中変位計の外観図

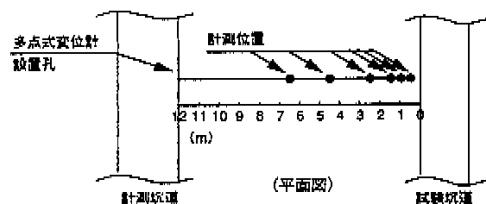


図4 岩盤変位計測のレイアウト（機械掘削の場合）

式地中変位計 (EM-150-M型) である。その仕様と概念図を表1と図3に示す。計測は、試験孔内の計測位置に加圧式アンカを設置し、アンカと坑道壁面との相対距離を計測することにより行われる。各計測点の変位量は、アンカに接続されている鋼製ワイヤを通じて測定チップの変位量となり、これがデジマチックノギスで計測される。一つの計測点に対して数回計測し、3回以上値が一定であった場合にその値を計測値として採用した。

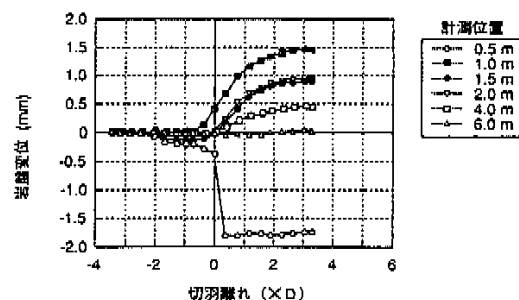
計測位置は、それぞれの試験坑道壁面からの距離で、以下のとおりである（図4）。

- ・発破掘削：0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 4.0, 6.0 (m)
- ・機械掘削：0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 4.5, 6.5 (m)

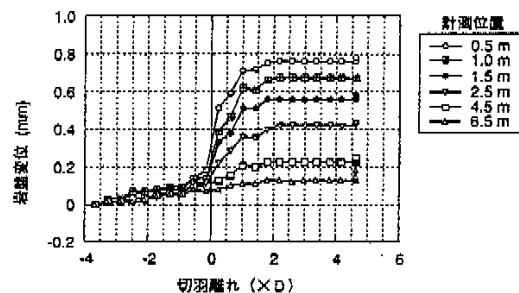
計測は、発破、機械掘削ともに、掘削が約1m進むごとに実施した。

3. 計測結果

岩盤変位は、時間経過に伴う発生がほとんど認められなかったため、掘削進行（切羽離れ）との関係で整理した。岩盤変位計測結果と切羽離れとの関係を図5に示す。切羽離れとは、計測断面と掘削切羽との坑道軸方向での距離を坑道寸法(D)で除した値である（図6）。坑道寸法は、発破掘削で $D=3.0\text{m}$ 、機械掘削で $D=2.4\text{m}$ である。岩盤変位は、試験坑道に向かう側を正、計測坑道の壁面を不動点と考え、この不動点と各計測点（アンカの位置）との相対変位で示している。発破掘



a) 発破掘削



b) 機械掘削

図5 岩盤変位の計測結果

削、機械掘削ともに、試験坑道の掘削開始時を初期値としている。

図5によると、坑道切羽が計測断面に近づくにつれて、ほとんどの計測点で正（伸び）の岩盤変位が生じ、坑道切羽の通過時に急激に変位が増加する。その後、坑道切羽が遠ざかるにつれて岩盤変位の増加が少なくなり、2D程度通過すると、岩盤変位はほぼ収束する。発破掘削の場合、切羽通過前までは、発破の衝撃により坑道半径方向の変位（負の変位）が生じることはあるが、切羽通過後にはこのような変位が生じることはない。このため、試験坑道から0.5mの位置での計測値が

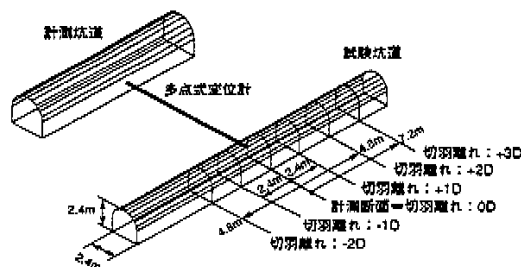


図6 切羽離れの概念（機械掘削の場合）

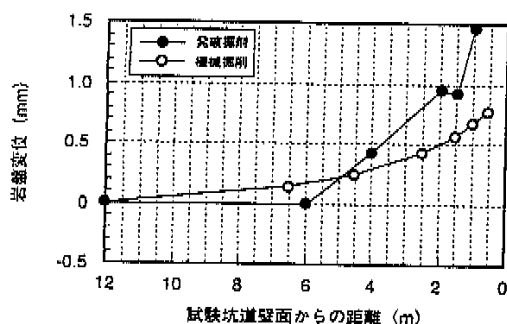


図7 掘削終了時の岩盤変位の計測結果

負(縮み)となっているのは、アンカが発破の衝撃のためずれてしまい、正確な岩盤変位を計測できなかったためと考えられる。

図7に試験坑道の掘削終了時の岩盤変位の分布図を示す。試験坑道壁面から1mの位置における岩盤変位は、発破掘削で1.46mm、機械掘削で0.67mmであり、約2倍の相違が生じた。岩盤変位の分布は、発破掘削では連続性が悪く、機械掘削では連続性が良い。試験坑道壁面から最も離れた計測点(発破掘削:6m、機械掘削:6.5m)では、発破掘削では岩盤変位は生じていないが、機械掘削では0.13mm程度の岩盤変位が生じている。

4. 考察

4.1 地山特性曲線

坑道掘削の進行に伴う周辺岩盤の変形挙動を解析するため、試験坑道から1m離れた位置において計測された変位量を用いて地山特性曲線(切羽離れと変位量を最終変位量で除して無次元化したものとの関係)を求めた。対象とした区間は、切羽離れが $-2D \sim +3D$ とした。

発破掘削と機械掘削のそれぞれの地山特性曲線を図8に示す。図8によると、切羽通過(0D)

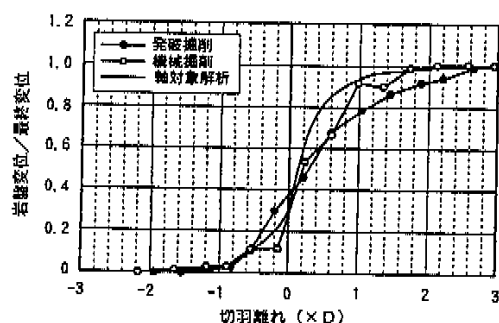


図8 地山特性曲線

直後までは両者に大きな相違は認められないが、切羽通過+1D以降は機械掘削よりも発破掘削の方が地山特性曲線の傾きは緩やかになっている。この原因としては、発破掘削では、発破の衝撃により坑道周辺に新たなき裂が発生し、岩盤変位が発生しやすい領域が生じたことによって、切羽通過に伴い発生する岩盤変位の収束が遅かったことが考えられる。一般的に、掘削に伴って塑性域が発生する場合、岩盤変位の発生が遠方にまで及ぶことが解析では明らかになっている。これにより、岩盤変位の収束が遅くなることが想定されるが、今回の計測においても同様な状況となったと考えられる。

図8には有限要素法による軸対象の完全弾性解析から算出した地山特性曲線を合わせて示している。発破掘削と機械掘削のそれぞれの地山特性曲線と比較すると、機械掘削の方が軸対象弾性解析から算出した結果と良く一致していることがわかる。これにより、機械掘削では周辺岩盤が弾性的な挙動をしたことがわかる。

4.2 数値解析との比較

計測結果を理論的に評価するために、掘削に伴う岩盤挙動を数値解析により検討した。用いた解析手法は、2次元平面ひずみを仮定した有限要素法による弾塑性解析である。解析コードは電力中央研究所作成のNONSAC (NONlinear Static Analysis structure Change) である。コア観察や孔壁観察で認められたき裂は、解析の対象領域に対して非常に規模が小さいため、解析メッシュには考慮していない。モデル上では、これらのき裂を含む岩盤を一様均質とし弾性係数などの物性を与えている。境界条件となる初期地圧については、応力解放法により得られた値を用いた。弾性係数などの物性値については、コアを用いた室内試験の結果を用いた。解析ステップは、坑道掘削の実施工を反映するために、以下の3ステージとした。

- ①ステージ1: 初期応力の作用
(切羽位置 $-2D$)
- ②ステージ2: 坑道の掘削、掘削解放率の作用
(切羽位置 $\pm 0D$)
- ③ステージ3: 支保工の打設、全解放
(切羽位置 $+3D$)

掘削解放率は、図8に示した軸対象弾性解析の結果に基づき、計測位置(発破掘削: $+0.12D$ 、機械掘削: $+0.18D$)に切羽が到達した時点における地圧の応力解放の割合を用いた。ステージ2

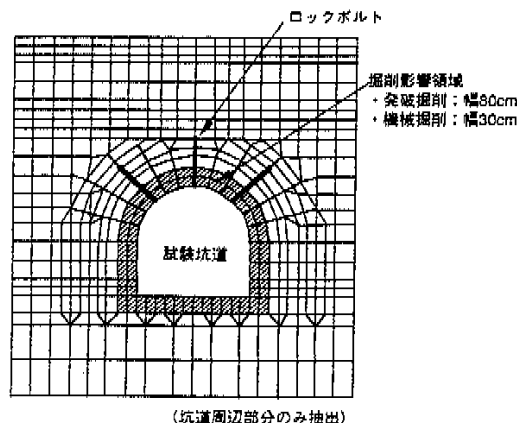


図9 有限要素法による弾塑性解析に用いたメッシュ図

表2 有限要素法による弾塑性解析に用いた入力物性

	入力物性	健岩部	掘削影響領域
発破掘削	弾性係数	2.5GPa	1.0GPa
	ポアソン比	0.4	0.4
	粘着力	2.94MPa	0.88MPa
	内部摩擦角	10°	10°
機械掘削	弾性係数	1.5GPa	0.4GPa
	ポアソン比	0.3	0.3
	粘着力	1.27MPa	0.34MPa
	内部摩擦角	25°	25°

における掘削解放率は、発破掘削で57%、機械掘削で65%である。

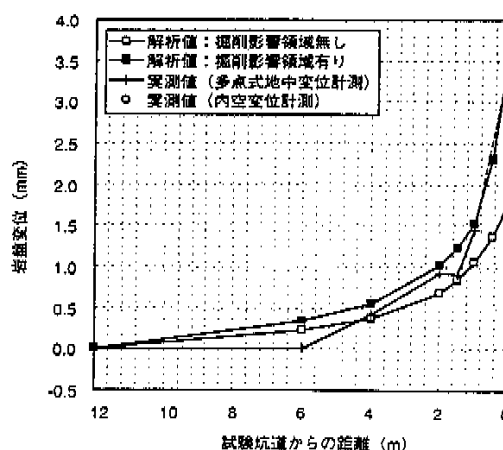
掘削影響領域の発生の影響を検討するために、掘削影響領域を考慮したモデルと考慮しないモデルを用いて解析を行い、比較した。掘削影響領域の幅については、弾性波屈折法による調査で得られた低速度帯の幅を用いてモデル化した。低速度帯の幅は、発破掘削で80cm、機械掘削で30cmである。解析に用いたメッシュ図を図9に、入力物性を表2に示す。掘削影響領域の岩盤物性については、弾性波屈折法による調査で得られた低速度帯の速度値の健岩部からの低下率に応じて弾性係数を低下させ、これを入力値とした。粘着力についても同程度に低下させた。ポアソン比と内部摩擦角は同じである。低下率の算定に当たっては、弾性係数が弾性波速度の2乗に比例するという関係を用いた。

解析結果を図10に示す。図10には計測結果も併せて示す。発破掘削では、掘削影響領域を考慮した場合としない場合では、坑道壁面における変位で2倍程度の差が生じた。実測結果と解析結果を

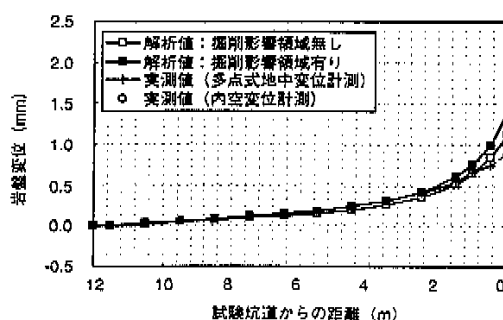
比較すると、坑道壁面の近傍における急激な岩盤変位の発生状況は、掘削影響領域を考慮したモデルを用いた解析結果とほぼ一致している。なお、図中の試験坑道壁面の計測点は内空変位計測結果から算出した岩盤変位である。機械掘削では、掘削影響領域を考慮した場合としない場合で実測値、解析値ともに大きな相違は認められず、今回設定した掘削影響領域の幅と物性の低下率では変形挙動に影響を及ぼさないことがわかった。したがって、発破掘削においては、掘削影響領域を考慮するモデルを用いることにより、掘削に伴う周辺岩盤の変形挙動を表現できること、また、機械掘削においては、解析上掘削影響領域を考慮する必要がないことがわかった。

5. おわりに

東濃鉱山において、発破と機械により坑道を掘削し、その際に岩盤変位計測を実施し、掘削工法



a) 発破掘削



b) 機械掘削

図10 有限要素法による弾塑性解析結果と実測値の比較

の相違が周辺岩盤の変形挙動に与える影響について検討した。計測結果並びに検討結果を以下に示す。

- ① 坑道掘削によって生じた岩盤変位は、坑道壁面から約 1 m の位置（発破掘削で 0.33 D、機械掘削で 0.42 D）において、発破掘削で 1.46 mm、機械掘削で 0.67 mm であり、約 2 倍の相違が生じた。また、岩盤変位の分布については、発破掘削では連続性が悪いが、機械掘削では連続性が良いという相違が生じた。
- ② 切羽通過に伴う岩盤挙動については、切羽通過 +1 D までは、発破掘削と機械掘削で大きな相違はないが、切羽通過 +1 D 以降は、機械掘削よりも発破掘削の方が地山特性曲線の傾きは緩やかになった。この原因としては、発破掘削の場合、掘削影響領域が生じたことによって、切羽通過に伴い発生する岩盤変位の収束が遅かったことが考えられる。
- ③ 2 次元平面ひずみを仮定した有限要素法によ

る弾塑性解析の結果、発破掘削では掘削影響領域を考慮したモデルを用いることによって、掘削に伴う周辺岩盤の変形挙動を表現できることがわかった。また、機械掘削では、今回設定した掘削影響領域の幅と物性の低下率では変形挙動に影響を及ぼさないため、掘削影響領域は考慮する必要のないことがわかった。

今後は、岩盤物性の変化に着目した調査・試験結果と比較することにより、掘削に伴う周辺岩盤の変形挙動と物性変化との関係を考察し、掘削影響のメカニズムを総合的に検討する。

参考文献

- 1) T. Sato, K. Sugihara, et al.: "Geoscientific Studies at the Tono Mine and the Kamaishi Mine in Japan", *Proc. 8th, ISRM Congress on Rock Mechanics*, Tokyo, pp.47-51 (1995).
- 2) R. S. READ, : "Characterizing Excavation Damage in Highly-Stressed Granite at AECL's Underground Research Laboratory", *Int. Conf. on EDZ Workshop*, pp.34-46 (1996).