

立坑掘削後約10年間の周辺岩盤の変形特性

Deformation behavior of rock mass around a shaft for about 10 years

羽柴公博¹・中間茂雄²・佐藤稔紀³

Kimihiko Hashiba, Shigeo Nakama and Toshinori Sato

¹工博 日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門 結晶質岩地質環境研究グループ
(〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内1-64)

E-mail: hashiba.kimihiko@jaea.go.jp

²正会員 工修 日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門 結晶質岩地質環境研究グループ
(同上)

³正会員 工博 日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門 結晶質岩工学技術開発グループ
(同上)

Deformation behavior of rock mass around a shaft was examined using published data obtained by in-situ measurements for a period of about 10 years. Firstly, the effect of rock stress on long-term behavior of homogeneous rock mass was analyzed. It was found that the maximum principal strain direction around a shaft has been almost constant for about 10 years, and that the direction well coincided with the maximum principal stress direction. The relation between long-term behavior and heterogeneity was examined with the aid of simple mechanical model. It was found that displacement and stress should be measured to understand deformation behavior of heterogeneous rock mass.

Key Words: Shaft, Rock mass, Long-term behavior, Rock stress, Heterogeneity

1. はじめに

地下 300 m 以深に建設される高レベル放射性廃棄物の地層処分施設において、立坑はアクセス坑道や換気施設として重要な役割を果たす。しかし、このような大深度立坑は水平坑道やトンネルなどに比べて建設実績が少なく、周辺岩盤の変形挙動を原位置で観察、計測した研究も少ない^{1,2)}。また、地層処分施設の立坑については、建設・操業中の数十年間にわたって安定性を確保する必要がある。しかし、長期間にわたる立坑周辺岩盤の変形挙動に関する知見は、ほとんど得られていないのが現状である。

このような状況の中で、日本原子力研究開発機構の前身の動力炉・核燃料開発事業団および核燃料サイクル開発機構は、岐阜県土岐市の東濃鉱山第2立坑において、立坑掘削中およびその後の約10年間にわたって、原位置での変位計測を実施した^{3,4)}。機器の維持・管理が困難な中で、約10年間という長期にわたって計測を継続した意義は大

きく、立坑周辺岩盤の長期変形挙動を予測・評価する上で数少ない貴重なデータであるといえる。

本研究では、ここで取得した変位計測結果を整理・解析し、立坑周辺岩盤の長期変形特性について検討した。まず、比較的均質な地層で得られた変位計測結果を用いて、長期にわたって生じた変形の方角と初期応力との関係を比較検討した。次いで、不均質な地層での変位計測結果については、長期挙動に及ぼす岩盤の不均質性の影響を考察した。さらに、断層近傍で得られた変位計測結果を用いて、立坑周辺岩盤の長期挙動に及ぼす断層の影響を調べた。

日本原子力研究開発機構では、現在、地層処分技術に関する研究開発のうちの深地層の科学的研究の一環として、岐阜県瑞浪市と北海道幌延町で深地層の研究施設の建設を進めている。大深度立坑での原位置計測結果は少なく、これらの施設における研究計画の策定に資する情報を提供することも、本研究の目的の一つである。

2. 立坑での変位計測の概要

変位計測は、1990年から2001年にかけて、図-1に示す東濃鉱山第2立坑で行われた^{3,4)}。東濃鉱山周辺では基盤岩として後期白亜紀の土岐花崗岩が分布し、それを新第三紀中新世の瑞浪層群が覆う。さらにその上位には、新第三紀中新世以降に堆積した瀬戸層群が不整合に覆う。立坑周辺に分布する瑞浪層群は、下位より、土岐夾炭累層、明世累層から構成されている。

立坑は掘削径6.8m、仕上がり内径6.0mで、覆工コンクリートの厚さは0.4mである。掘削には、全断面の発破と覆工コンクリートの打設を交互に繰り返すショートステップ工法が用いられた。

計測は図-1に示したM1～M4断面で行われた。M4断面だけは一時無覆工で掘削されたため、本研究では、条件が等しいM1～M3断面での計測結果を整理・解析した。いずれの計測断面でも、切羽から1m程度離れた地点に多点式中変位計(読取精度0.01mm)が設置された。設置の際には、ま

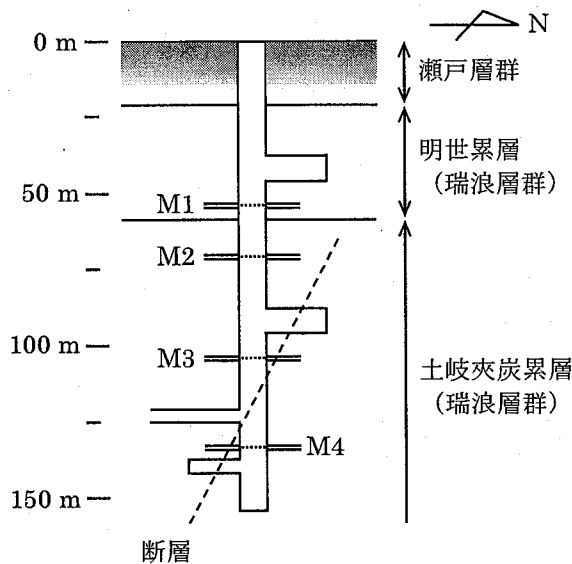


図-1 東濃鉱山第2立坑の概要と計測位置

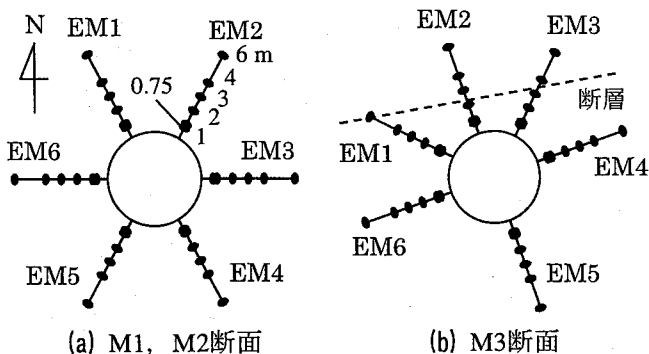


図-2 地中変位計の設置状況

ず、立坑の半径方向に切羽面と平行にボーリング孔が掘削された。ボーリング孔内に変位計を挿入し、水圧式アンカーで固定した後、モルタルが注入された。覆工コンクリートの打設後、掘削が再開された。

図-2には各計測断面での変位計の設置状況を示した。黒丸で示したように、各変位計には坑壁から0.75, 1, 2, 3, 4, 6m離れた位置に、合計6個のアンカーが組み込まれている。M3断面ではEM1～EM3の変位計が断層と交差している。計測では、各アンカーに連結された鋼製ワイヤーの変位が、坑壁に固定されたポテンシオメーターにより検出された。すなわち、各アンカーと坑壁との相対変位が記録された。

3. 計測結果の整理・解析および考察

(1) M1 断面

M1断面が位置する明世累層は、物性値が比較的均一な砂岩や泥岩で構成されている⁵⁾。そこで、岩盤を等方均質と仮定して、大久保他⁶⁾がトンネル変形の巨視的指標として提案した周辺岩盤の主歪とその方向の計算手法を適用することとした。なお、原位置での計測結果を整理・解析する手法が種々提案されている⁷⁾が、この手法は、長期間の変位計測結果の解析に適している。

北方向から反時計回りに α 傾いた測線で、アンカー間の初期長さを L_0 、変形後の長さを L とすると、垂直歪 $\varepsilon(\alpha)$ は $(L-L_0)/L_0$ と計算される。次に、周辺岩盤が一様歪状態と仮定すると、N-S方向とE-W方向の垂直歪 ε_N 、 ε_E およびせん断歪 γ_{NE} は次式で計算される。

$$[A]\{x\} = \{y\} \quad (1)$$

$$[A] = \begin{bmatrix} 0.5(1+\cos 2\alpha_1) & 0.5(1-\cos 2\alpha_1) & 0.5\sin 2\alpha_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0.5(1+\cos 2\alpha_k) & 0.5(1-\cos 2\alpha_k) & 0.5\sin 2\alpha_k \end{bmatrix}$$

$$\{x\}^t = \{\varepsilon_N \quad \varepsilon_E \quad \gamma_{NE}\}$$

$$\{y\}^t = \{\varepsilon_1 \quad \dots \quad \varepsilon_k\}$$

計測結果と同数の方程式がたてられるが、方程式の数が未知数の数(3個)よりも多いので、ここでは、最小二乗解を求めることにする。最小二乗

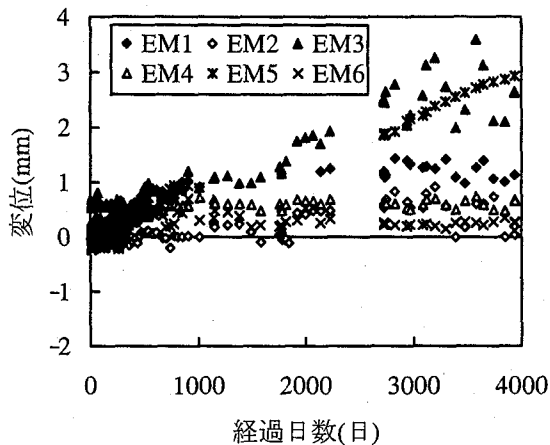


図-3 M1断面における変位計先端と坑壁との相対変位の経時変化

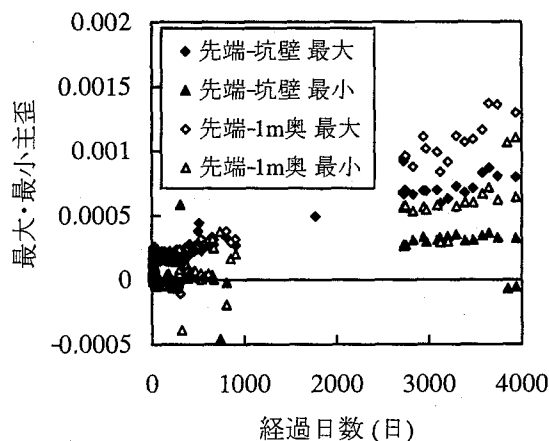


図-4 M1断面周辺岩盤の最大・最小主歪の経時変化

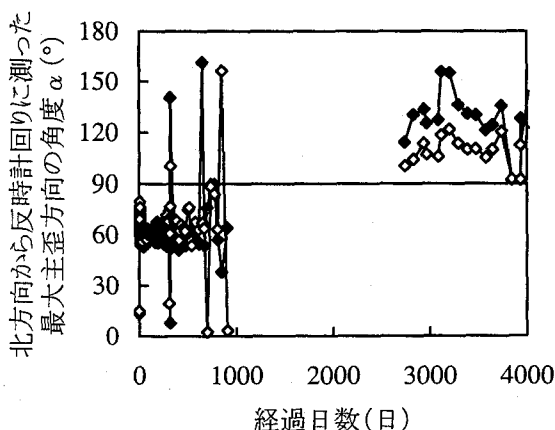


図-5 M1断面周辺岩盤の最大主歪方向の経時変化
◆：変位計先端から坑壁までの区間
◇：変位計先端から1m奥のアンカーまでの区間

解は以下の正規方程式の解として求まる。

$$[A]^t [A] \{x\} = [A]^t \{y\} \quad (2)$$

さらに、算出した ε_N 、 ε_E および γ_{NE} から周辺岩盤に生じた最大・最小主歪が計算される。

まず、M1断面での変位計測結果の一例として、変位計先端（坑壁から6 m奥）と坑壁との相対変位の経時変化を図-3に示した。なお、以下の図ではすべて伸びを正として示している。計測開始後1000～2200日の間でデータがいくつか抜け落ちている。また、2200～2700日の間はすべてのデータが抜け落ちている。この原因は変位計から出力された信号を中継する機器（スイッチボックスなど）の不具合であることがわかっている⁴⁾。その間、変位計は正常に動作しており、抜け落ちた区間の前後のデータの連続性は良い。当然ながら、データの抜け落ちがある場合は、主歪は計算できない。

図-4には、算出した最大・最小主歪の経時変化を示した。変位計先端から坑壁までのすべての変位計測結果を用いて計算した主歪を黒塗り記号で、坑壁近傍を除いた、変位計先端から1 m奥のアンカーまでの結果を用いて計算した主歪を白抜き記号で示した。データの抜け落ちのため主歪が計算できなかった区間もあったが、時間の経過とともに、周辺岩盤の主歪は徐々に増加していることがわかる。変位計先端から1 m奥までの区間での最大主歪の変化が大きく、約4000日間で0.0013程度まで増加している。原位置で採取した岩石の一軸圧縮試験での破壊歪が0.003～0.005⁸⁾であることから、周辺岩盤に生じた変形は比較的大きいことがわかる。岩盤内部に比べて、変位計先端から坑壁までの区間での最大・最小主歪は若干小さいが、覆工コンクリートによって、坑壁近傍の変形がある程度抑えられている可能性がある。

図-5には、周辺岩盤の最大主歪方向の経時変化を示した。縦軸は北方向から反時計回りに測った最大主歪方向の角度である。若干ばらつきがあるものの、最大主歪方向は、計測開始から約1000日経過後まではN60～90°W、約2700日経過後以降はN90～150°Wである。図-6には、第2立坑の西方約20 mの位置に掘削したボーリング孔での、水压破碎法で得られた最大主応力方向を◇で示した⁴⁾。また同図には、M1断面での、掘削中の変位計測結果を逆解析して得られた最大主応力方向を◆で示した⁹⁾。M1断面が位置する深度では、最大

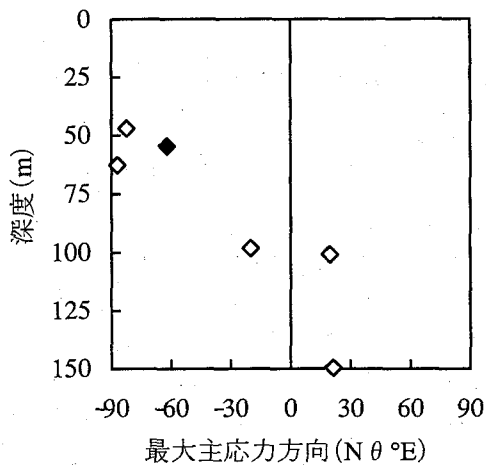


図-6 第2立坑周辺での初期応力測定結果

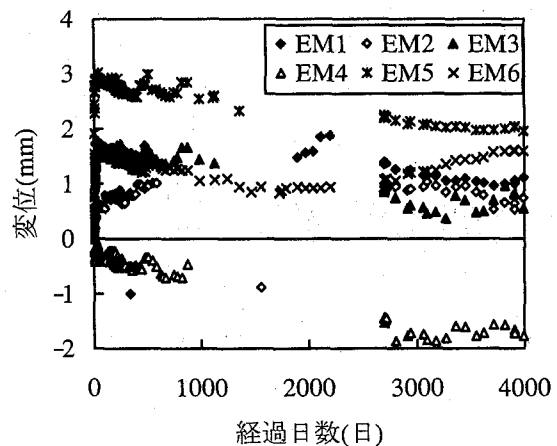
◇：立坑から約20 m離れたボーリング孔での水圧
破砕法による結果

◆：立坑掘削中に生じた変位の逆解析による結果

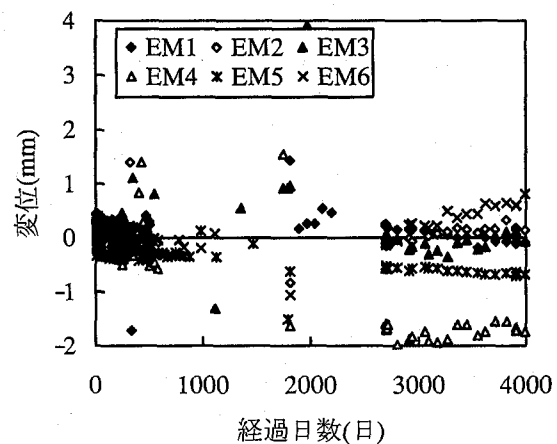
主応力方向は概ね東西方向である。興味深いことに、図-5に示した約10年間の最大主歪方向は、北西－南東～南西－北東へと若干変化しているものの、最大主応力方向の東西方向と大きくは変わらない。すなわち、トンネル変形の巨視的指標を適用することによって、比較的均質な明世累層に位置するM1断面では、初期応力とほぼ同じ方向に、長期にわたって徐々に変形が進行していることが確認された。

(2) M2 断面

M2断面での変位計測結果の一例として、変位計先端と坑壁との相対変位および変位計先端と坑壁から2 m奥のアンカーとの相対変位の経時変化を図-7に示した。図-7 (a) からわかるように、掘削中に生じた坑壁近傍の変形は大きく、最大で3 mm程度の変位が生じている。しかし、その後は多くの測線で変位が減少している。図-7 (b) に示した変位計先端と2 m奥のアンカーとの相対変位については、変位が増加している測線 (EM6)、ほとんど変化していない測線 (EM1, 2, 3)、変位が減少している測線 (EM4, 5) と、測線ごとに変形の様子はかなり異なっている。土岐炭累層は直径数mの巨礫から泥岩までを含み、明世累層に比べて、かなり不均質である⁵⁾。そのため、前節で用いたトンネル変形の巨視的指標の適用は難しい。ここでは、場所ごとに変形の傾向が異なる原因や、長期間にわたって変位が徐々に減少 (回復) する原因について、力学的な見地から定性的に考察してみる。



(a) 変位計先端と坑壁との相対変位



(b) 変位計先端と坑壁から2 m奥のアンカーとの
相対変位

図-7 M2断面における岩盤内変位の経時変化

まず、坑壁近傍で変位が徐々に減少する原因として、圧縮破壊の進行が考えられる。このような現象は、比較的軟弱な岩盤で観察されている⁶⁾。M2断面周辺でも、発破損傷によって緩んだ領域が、覆工コンクリートと比較的健全な岩盤にはさまれて、長期にわたって圧縮方向、すなわち、変位が減少する方向に徐々に変形している可能性がある。

一方、坑壁から2 m以上離れた岩盤内部には、発破損傷や支保の影響は及びにくいであろう。岩盤内部で変位が回復する現象に関して、考えられる原因の一つとして、岩盤の不均質性について考察してみる。

図-8には、掘削による岩盤内部の応力状態の変化を模式的に示した。なお、図では掘削前の状態

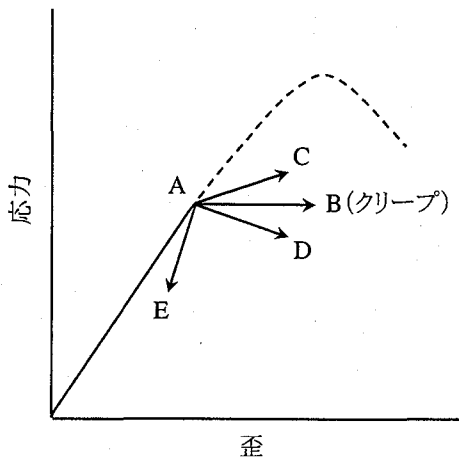


図-8 立坑掘削後の周辺岩盤の応力-歪状態を表した模式図

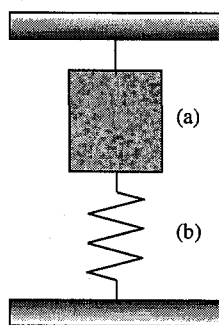


図-9 不均質性を考慮した岩盤のモデル¹⁰⁾

(a) 強度破壊点以前の岩石

(b) 強度破壊点以降の岩石で負のばね特性を示す

を原点としている。掘削によって応力と歪が増加するが、その状態は図中のA点で表される。その後の応力状態が一定（クリープ）であれば、A→Bのように歪が増加していく。実際の岩盤の物性値は一様ではなく、粘弾性の程度も構成岩石によって異なる。この場合、変形しやすい部分は図中のA→Dのように下り勾配に沿って変形し、変形にくい部分はA→Cのように上向きとなる¹⁰⁾。いずれの場合でも、時間の経過とともに変位が増加していくが、M1断面周辺岩盤はこれらの応力-歪状態に近いと考えられる。しかし、M2断面周辺で変位が回復する現象は説明できない。

そこで次に、図-9のように強度破壊点以前と以降の岩石が直列につながれているモデルを考えてみる¹⁰⁾。ここで、強度破壊点以降の岩石は、粘性を示さず、クラスⅠ特性を持ち、負のばね特性を示すとする。両端の変位が一定に保たれていると、強度破壊点以降の岩石は破壊が進行するため、変位が増加し、荷重が減少する。一方、強度破壊点以前の岩石では、荷重、変位ともに減少し、図

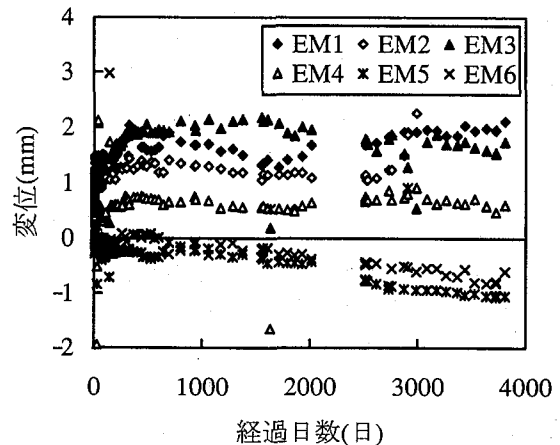


図-10 M3断面における変位計先端と坑壁から2 m奥のアンカーとの相対変位の経時変化

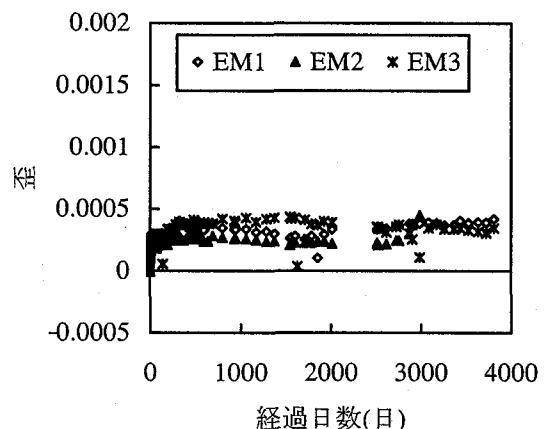


図-11 M3断面における変位計先端と坑壁から2 m奥のアンカー間に生じた歪の経時変化

-8のA→Eに沿って変形する。すなわち、図-9は比較的単純なモデルであるが、M2断面のように、時間の経過とともに岩盤内部で変位が徐々に回復する現象を、岩盤の不均質性でうまく説明することができる。

不均質な岩盤の内部では、粘弾性的性質の異なる部分が、応力-歪曲線上でそれぞれ異なった方向へと変形している可能性が大きい。原位置計測においては、変位だけではなく、応力状態の変化を測定することも重要といえよう。

(3) M3 断面

M3断面での変位計測結果の一例として、変位計先端と坑壁から2 m奥のアンカーとの相対変位の経時変化を図-10に示した。M3断面周辺では、坑壁から2 m以上離れた岩盤内部でも、掘削によって比較的大きな変形が生じている。特に、断層と交

差しているEM1～EM3測線での変位の増加が大きい。EM5とEM6測線では変位が徐々に減少しているが、M2断面と同様に土岐夾炭累層の不均質性の影響が考えられる。

断層の影響を検討するため、図-10 に示したEM1～EM3 で生じた変位を、計測区間の初期長さで除して歪を計算した。図-11 に断層近傍の歪の経時変化を示した。3 測線とも、掘削中には変形が生じているものの、その後は徐々に変形速度が低下していき、計測開始から 1000 日以上経過すると、歪はほぼ一定になっている。地層が異なるため単純な比較は困難であるが、図-4 の M1 断面の結果と比較しても、特に断層の影響は認められない。M3 断面近傍に位置する断層に限っては、長期挙動に及ぼす影響は小さかったといえよう。

4. まとめ

本研究では、東濃鉱山第2立坑の約10年間の変位計測結果を整理・解析し、周辺岩盤の長期変形特性について論じた。

まず、比較的均質な岩盤では、変位計測結果を整理・解析する方法として、トンネル変形の巨視的指標が有効であることを示した。M1断面では、周辺岩盤の約10年間の最大主歪方向の変化はそれほど小さくなく、その方向が最大主応力方向とほぼ一致することを明らかにした。

不均質性の高い土岐夾炭累層中に位置するM2とM3断面では、坑壁から離れた岩盤内部でも、長期間にわたって変形が徐々に回復する現象がみられた。これを、岩盤の不均質性を考慮した力学モデルで定性的に説明した。さらに、不均質な岩盤内部の応力-歪状態は一様ではない可能性が高いため、岩盤の変形特性を理解するためには、応力と変位の両方を測定することが重要であることを指摘した。

現状では、大深度立坑での原位置計測結果の蓄積は極めて乏しい。本研究でも、検討に用いた計測結果は3断面であり、今後検討すべき課題は多い。本研究で得られた知見や課題は、日本原子力研究開発機構が建設中の大深度立坑における、原位置計測や原位置試験の計画立案などに反映していく予定である。

参考文献

1) 山田惇人, 山田文孝, 野村貢, 大西有三: 大深度山

岳立坑における接続部の設計・計測と地山挙動評価, 土木学会論文集, Vol.693, pp.61-72, 2001.

- 2) Martino J. B., Chandler N. A.: Excavation-induced damage studies at the Underground Research Laboratory, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol.41, 1413-1426, 2004.
- 3) 佐藤稔紀, 松井裕哉, 杉原弘造, 吉岡尚也: 立坑掘削影響試験-地中変位計測に基づく掘削影響評価-, 動燃技術資料, PNC TN7410 92-051, 1992.
- 4) 中間茂雄, 高倉望, 松井裕哉: 東濃鉱山における坑道周辺岩盤の長期変位計測, サイクル機構技術資料, JNC TN7410 2002-002, 2002.
- 5) 杉原弘造, 吉岡尚也, 松井裕哉, 佐藤稔紀, 山本卓也: 堆積軟岩での立坑掘削に伴う岩盤物性変化の現場計測による検討, 資源と素材, Vol.116, pp.821-830, 2000.
- 6) 大久保誠介, 福井勝則, 西松裕一: トンネル変形の巨視的指標の提案, トンネルと地下, Vol.35, pp.223-227, 2004.
- 7) 日本材料学会: 岩の力学, 第14章, 丸善, 1993.
- 8) 佐藤稔紀, 青木俊朗, 中間茂雄: 瑞浪層群の物理・力学特性に関するデータ集, サイクル機構技術資料, JNC TN7450 2003-002, 2004.
- 9) 羽柴公博, 佐藤稔紀, 中間茂雄: 東濃鉱山および瑞浪超深地層研究所における立坑周辺岩盤の変位計測とその評価, 資源・素材学会 2006 春季大会講演集(I) 資源編, pp.113-114, 2006.
- 10) 福井勝則, 大久保誠介, 西松裕一: 一軸圧縮荷重下での岩石の一般化した応力緩和特性, 資源と素材, Vol.108, pp.543-548.