

(64) 坑道と交差する断層の周辺岩盤の変形挙動について

DEFORMATION BEHAVIOR OF A ROCK MASS AROUND A FAULT CROSSING A DRIFT

山本 卓也* 杉原 弘造** 佐藤 稔紀**

Takuya Yamamoto, Kozo Sugihara, Toshinori Sato

Excavation of a drift induces stress redistribution, and a rock mass around a drift is probably fractured due to the increase of shear stress and blasting. Within the rock mass around a drift, deformation occurs and mechanical and hydraulic properties are changed due to excavation. Displacements of a rock mass and changes of the rock properties are probably enlarged by the presence of a fault. Hence, it is important to understand the influence of a fault for the design and the stability of underground openings. Measurement of displacements and seismic survey have been carried out during excavation of a shaft and a drift at the Tono Mine. Large displacements of a rock mass have been measured near the fault. The displacements estimated based on the elastic wave velocity and the measured displacements are consistent with each other.

1. はじめに

岩盤内に空洞を掘削することによる、岩盤の応力状態、含水状態および亀裂の状態の変化に伴い、岩盤の力学・水理学的特性が変化する領域（以下、掘削影響領域と称する）が発生する。この領域では、変位の増加や弾性波速度の低下などの変化が起こるものと考えられる。空洞が断層と交差する場合には、断層の影響により掘削影響領域が拡大したり、変化の程度が進んだりすることが予想される。このような断層の影響を正確に把握することは支保の設計など空洞の安定性を考える上で重要である。

岐阜県土岐市にある東濃鉱山では、立坑および横坑の掘削が岩盤に与える影響を評価することを目的とした掘削影響試験が実施されている。この掘削影響試験の一部として、断層と交差する立坑および横坑において、発破掘削に伴う断層周辺の岩盤の変位測定が行われた。また、断層を含む岩盤領域を対象として弾性波トモグラフィー調査および屈折法による弾性波探査が実施された。ここでは、これらの測定結果に基づき、掘削に伴う断層の周辺岩盤の変形挙動について考察した。

2. 計測地点の地質状況と計測方法

2・1 計測地点の地質状況

東濃鉱山の地質概要を図-1に示す。基盤は花崗岩で、新第三紀の堆積岩がその上位に存在する。東濃鉱山周辺に分布する主な堆積岩は明世果層および土岐夾炭果層である。明世果層は比較的均質な凝灰質の砂岩・泥岩で構成される。土岐夾炭果層は、砂岩・泥岩の互層および礫岩から構成され、亜炭などを含む不均質な層である。図中に示す断層は走向N80° E、傾斜70° S、落差約30mの逆断層で、月吉断層と呼ばれる。断層は立坑および第2計測坑道と交差する。第2計測坑道での壁面観察結果によれば、月吉断層は断层面とその

* 正会員 大成建設(株)エンジニアリング本部エネルギー部

** 正会員 動力炉・核燃料開発事業団 東濃地科学センター

両側に存在する破砕帯から成る。断層は薄い粘土をはさみ、他の不連続面とは明瞭に識別できる。断層面から上盤側に約50cm、下盤側に約50cmまでの幅約1mの領域では、岩盤がせん断を受けて多数の亀裂が発達した状態にある。

2・2 計測方法

第2立坑は仕上り内径6m、深さ150mで、1日1回の発破により1.2m掘削された後、厚さ40cmの覆工コンクリートが打設されるショートステップ工法にて施工された。図-2に示す第2計測坑道は高さ4.5m、幅4.5m、延長20mで、発破により1日に1mまたは2mずつ掘削された後、鋼製支保工と木製矢板による支保が施された。

立坑および第2計測坑道の掘削に伴い、図-2に示すSP1、SP2、M4断面では内空変位が、SP2、M3、M4断面では岩盤内変位が測定された。これらの計測断面では、切羽が計測位置に到達した時点で内空変位測定用のピンおよび多点式変位計が設置され、立坑および第2計測坑道の掘削に伴って発生する岩盤変位が測定された。

断層と第2計測坑道が交差する部分では、図-3に示すF1およびF2地点において断層変位計と呼ばれる測定機器（測定精度0.1mm）が第2計測坑道の掘削終了後に設置され、断層の上盤と下盤の相対変位が3方向について測定された。3方向とは、断層の傾斜方向（H）、断層面に垂直な方向（V）、および断層面の走向方向（Z）である。測定は第2計測坑道の底盤位置からの立坑の発破の直前および直後に行われた。

図-3中に示すGT2-GT3断面では、第2計測坑道の掘削終了後に、第2計測坑道の周辺岩盤の弾性波速度の構造を把握するため弾性波トモグラフィー調査が実施された。同時に、弾性波トモグラフィー調査との比較のため、図-3中に示すように、第2計測坑道の東側壁面において屈折法による弾性波探査が実施された。

3. 断層周辺岩盤の変形挙動

3・1 断層と第2計測坑道の交差部分の変位測定結果

断層と第2計測坑道の交差部分の変位は、SP1およびSP2断面で測定された。図-4に示すように、SP1断面では内空変位が、SP2断面では内空変位および岩盤内変位が測定された。

SP1およびSP2断面での測定結果のうち、両者に共通した水平方向の変位測定結果を図-5に示す。図中のSP2断面EM2-6は、岩盤内変位のうちEM2およびEM6の坑道壁面での値を合計したもので、内空変位に相当する

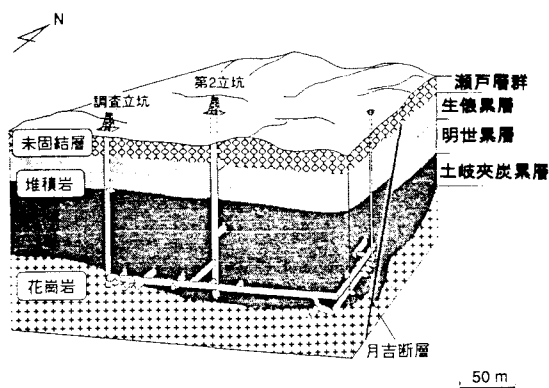


図-1 東濃鉱山の地質概要

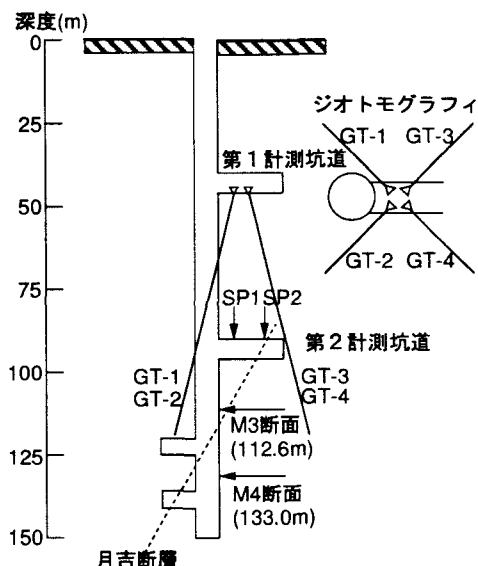


図-2 計測断面

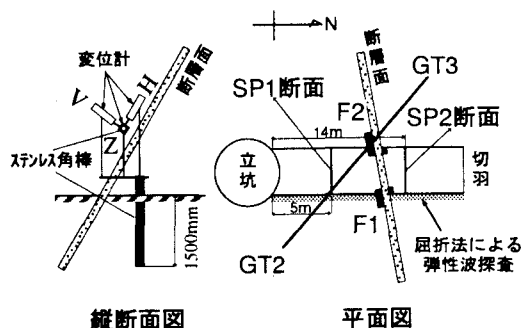


図-3 断層変位計と第2計測坑道での計測位置

変位を意味する。図には、SP1断面での測定を開始した後の第2計測坑道における切羽進行を示す。

図-5によれば、SP2断面での内空変位量はSP1断面での内空変位量よりも大きい。SP2断面のSP1断面に対する変位の比は、CM3測線で約7.6倍、CM4測線で約2.6倍である。また、第2計測坑道の掘削終了後は、SP2断面の変位の増加率はSP1断面よりも大きい。

図-6に立坑の掘削が終了した時点でのSP2断面での岩盤内変位分布を示す。断層に近いEM4およびEM5の測線での岩盤内変位は最大約30mmで、断層から離れた測線EM1、EM2およびEM3では10mm以下である。これより、断層と交差する測線では断層から離れた測線よりも大きな変位が発生していることが分かる。また、断層と交差する測線では、第2計測坑道壁面から離れた位置でも変位が大きい。

3・2 第2計測坑道での弾性波による調査結果

図-2および図-3に示すGT2-GT3断面での弾性波トモグラフィー調査結果を図-7に示す。また、図-3に示す第2計測坑道の東側壁面において実施された屈折法による弾性波探査の結果を図-8に示す。

図-7では、第2計測坑道の底盤部分に速度が低下した領域が存在する。この領域での速度は1.0~1.2km/secで、坑道の左側（東側）の速度の高い領域では3.2~3.4km/secである。図-3によれば、低速度部分はSP2断面に、高速度部分はSP1断面に対応する。

図-8に示す第2計測坑道の周辺岩盤の速度構造のうち、坑道に近い層を第1層、その奥の層を第2層とすれば、断層が存在する領域では第1層の層厚が周辺に比べ大きくなっている。また、第1層の速度の第2層の速度に対する比は立坑側から0.55、0.64、0.28であり、断層が存在する領域では、周辺に比べ大きな低下率となっている。

図-8から、断層部分の弾性波速度を1.4km/secとし、立坑に近い部分（花崗岩の巨礫が存在する部分）の速度を3.3km/secとすれば、P波速度の2乗が弾性係数に比例するという関係から、断層部分の弾性係数は立坑に近い部分の弾性係数の約20%となり、断層部分では立坑に近い部分の約6倍の変位が発生するものと推定できる。図-5によれば、SP2断面（断層部分）ではSP1断面（立坑に近い部分）の約2.6~7.6倍の内空変位が発生している。以上のことから、断層部分とその周辺部分の弾性波速度の相違から求めた弾性係数の違いは、それぞれの地点で測定した変位の大きさとよく対応している。

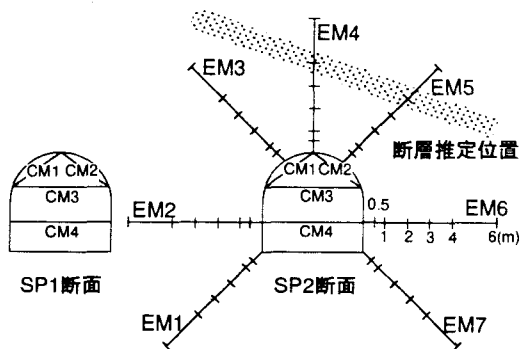


図-4 SP1およびSP2断面での計測位置

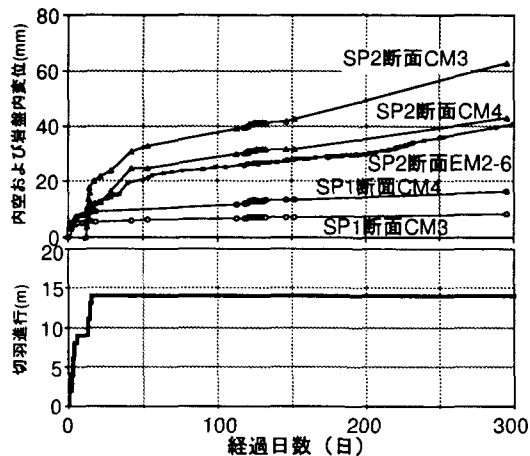


図-5 SP1およびSP2断面での計測結果

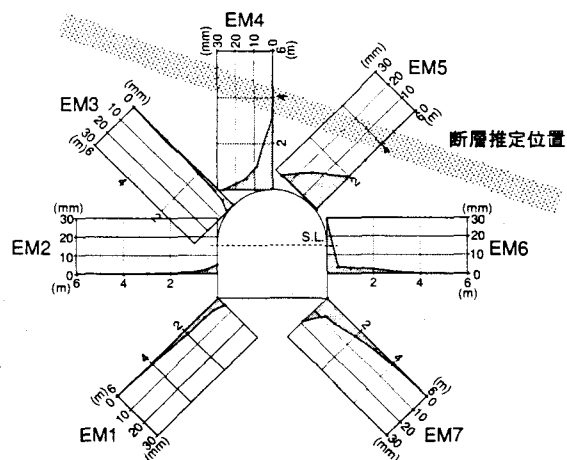


図-6 SP2断面での岩盤内変位分布

3・3 断層の変位測定結果

断層変位計による測定結果を図-9に示す。すべて下盤に対し、H方向では上盤が断層面に平行にずり落ちる方向、Z方向では上盤が走向方向に坑道壁面から岩盤の深部に向かって押し戻される方向、およびV方向では上盤が断層面に垂直に近づく方向が正の方向である。検討の対象としたのは、発破の直前および直後に変位測定を行い発破に伴う増分変位を測定した約20日の期間で、立坑の掘削深度はGL-96mからGL-111.6mの区間である。

図-9によれば、F1では断層面に平行に上盤がずり上がる方向に最大約2.2mmの変位が発生し、F2では断層面に平行に上盤がずり落ちる方向に最大約0.9mmの変位が発生した。これより、断層の位置によって変位の値および方向は異なることが分かった。また、発破による増分変位の累計の全変位に対するZ,H,V方向の比率は、F1では0.51,0.84,0.62、F2では0.50,0.45,0.90となり、全変位の45～90%が発破時に発生したことが分かった。

3・4 断層と立坑の交差部の岩盤内変位測定結果

断層と立坑の交差部分の岩盤内変位測定が、図-2に示すM3およびM4断面において実施された。M3断面では断層の存在が岩盤の変形に与える影響を把握することを目的とした。M4断面ではM3断面での目的に加え、覆工を施工しない区間を設けて覆工の効果を検討することを目的とした。計測位置からの切羽離れが3D (Dは立坑の掘削径6.8m) 時点でのM3断面での岩盤内変位分布を図-10に、M4断面での岩盤内変位分布を図-11に示す。

これらの図によれば、両断面ともに断層と交差する測線では、断層と交差しない測線に比べ大きな変位が発生している。また、断層と交差する測線では、立坑壁面から離れた位置でも変位が大きい。

M3およびM4断面では、特に立坑壁面で変位分布が異なる結果となった。この原因として、M3およびM4断面の施工過程の違いが考えられる。すなわち、M3断面では厚さ40cmの覆工コンクリートを掘削後に設置して変位測定を行ったのに対し、M4断面の上下6mの区間では覆工コンクリートを設置しない期間を設け、変位測定を行った。したがって、覆工コンクリートは壁面付近の変位を抑制する効果があると考えられる。

3・5 断層周辺岩盤の変位の比較

これまでの測定結果によれば、SP2断面での岩盤内変位が断層変位計による変位および立坑での変位を大きく上回る結果となった。この原因として、SP2断面の断層

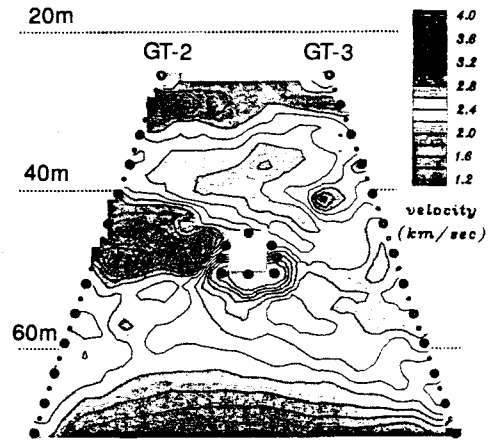


図-7 弾性波トモグラフィ調査結果

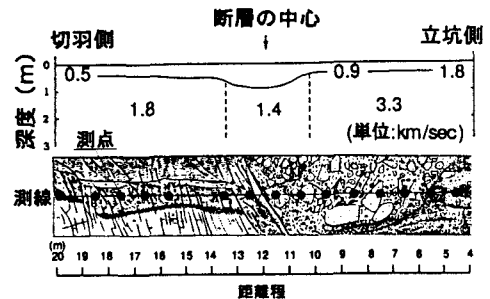


図-8 屈折法による弾性波探査結果

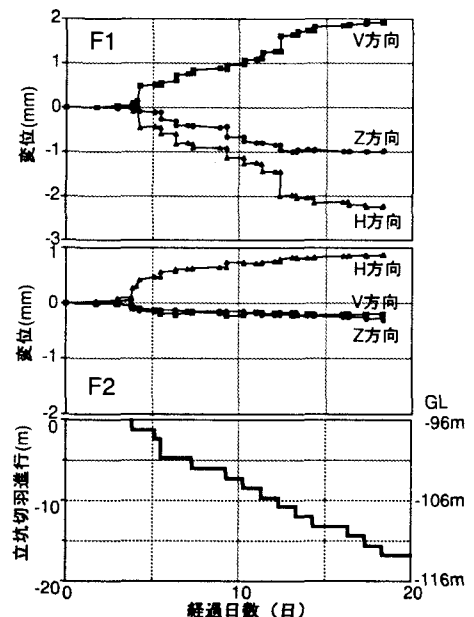


図-9 断層変位の測定結果

と交差する上向き多点式変位計の測線（EM4およびEM5）では、断層の下盤側の岩盤が重力の影響を受け、落下しやすい状況にあったことが考えられる。断層変位計は第2計測坑道の掘削終了の約100日後に設置されており、測定を開始するまでにほとんどの変位が発生してしまったことが考えられる。傾斜の急な断層と立坑が交差する場合は、流れ目状態で差し目状態で変位の差異が生じることが予想されるが、月吉断層のように傾斜が急であっても断層が流れ目状態（M3断面）および差し目状態（M4断面）で発生する変位の最大値に顕著な差はないと言える。

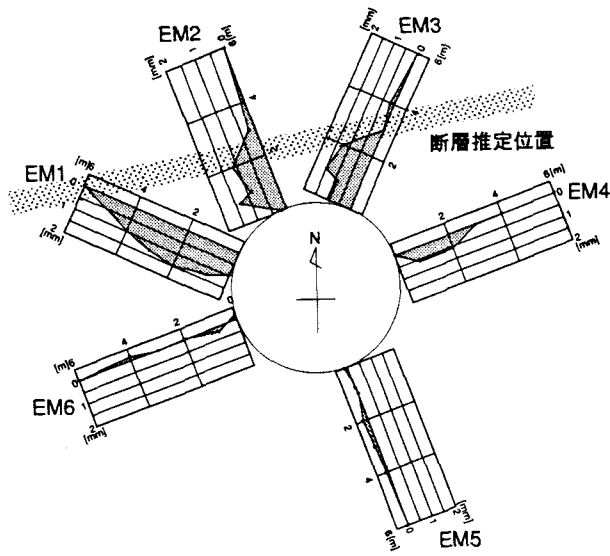


図-10 M3断面での岩盤内変位分布

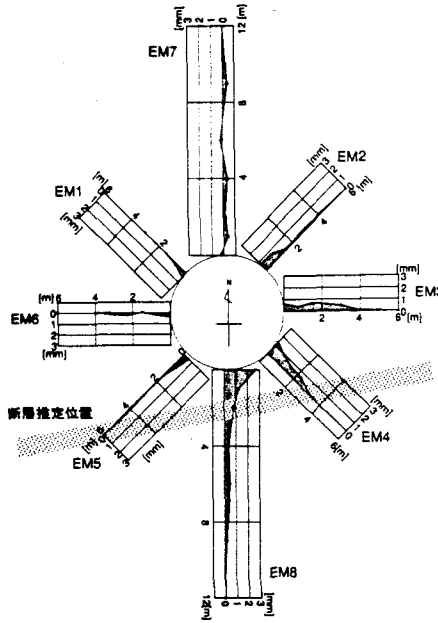


図-11 M4断面での岩盤内変位分布

4. まとめ
- 断層と交差する坑道周辺岩盤の変位測定および弾性波を用いた調査結果から得られた知見を以下に示す。
- (1)第2計測坑道のように傾斜の急な断層と横坑が交差する場合は、横坑の天端では断層の下盤側の岩盤が重力の影響を受け落下しやすい状況にあったため、断層と立坑が交差する場合に比べて大きな変位が発生したと考えられる。断層と立坑が交差する場合は、断層の傾斜が急であっても、断層が流れ目状態および差し目状態で発生する変位の最大値に顕著な差はない。
 - (2)断層変位計による測定結果により、変位の値および方向は断層の位置によって異なる。また、全変位の45～90%の変位が発破時に発生した。
 - (3)断層およびその周辺部は、弾性波を用いた調査により、健全な岩盤よりも弾性波速度の低い領域としてとらえられた。坑道と断層の交差部では、坑道壁面に近い部分の弾性波速度の、健全な岩盤の弾性波速度に対する低下率が大きく、速度が低下している部分の層厚も周辺と比べて大きい。
 - (4)断層部分とその周辺部分の弾性波速度から求めた弾性係数の違いは、それぞれの地点で測定した変位の違いとよく対応している。

5. 参考文献

- 1) 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―動力炉・核燃料開発事業団 中部事業所、公開資料、PNC TR/GE 92-7, 1992. 12.
- 2) 杉原弘造、吉岡尚也、森田隆三郎、川上 純：弾性波トモグラフィーによる地質構造調査―断層のある堆積岩盤への適用例―、第24回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 454～458, 1992.