採掘変形計測による広域応力と地盤ヤング率の評価*

西山 えるむ¹ 宮本 高 充² 児玉 淳 一³
川 崎 了⁴ 金子 勝 比 古⁵

Estimation of Regional Stress State and Young's Modulus by Measurement of Mining Induced Deformation

by Erumu NISHIYAMA^a, Takamitsu MIYAMOTO^b, Jun-ichi KODAMA^b,
Satoru KAWASAKI^b and Katsuhiko KANEKO^b

- a. Resources Development Dept., Nittetsu Mining Co., Ltd., Marunouchi2-3-2, Chiyoda-ku,
Tokyo, 100-8377, Japan (Corresponding author E-mail: nisyama@nittetsukou.co.jp)
b. Graduate School of Engineering, Hokkaido University, N13W8, Sapporo, 060-8628, Japan

A method to evaluate the regional stresses and the Young's modulus by analyzing mining induced deformation of the ground is proposed.

Mining induced deformation is interpreted as the deformation due to the geometrical change of the ground surface caused by mine activity and it is classified in two types, i.e., the displacement increment induced by gravity and that by the horizontal regional strain. It is pointed out that both the regional strain and Young's modulus can be estimated by analyzing the mining induced deformation, because the displacement induced by the regional strain is independent of the Young's modulus and the displacement induced by the gravity is inversely proportional to the Young's modulus.

The relative displacement due to mine excavation in Torigatayama mine were measured by GPS (Global Positioning System) and the regional stress state and Young's modulus were estimated by a back-analysis using three dimensional finite element method. It is shown that the maximum principal direction of regional stresses is almost NE-SW and Young's modulus of the ground is 3 to 6GPa in the present field.

KEY WORDS: Regional Stress, Regional Strain, Young's modulus, Mining Induced Deformation, GPS, Back-Analysis

1. は じ め に

岩盤斜面の安定性を監視するために採掘に伴う岩盤の変形挙動を計測・解析する試みがなされてきている¹⁻⁶⁾。ここで、採掘に伴う岩盤の変形挙動は地形や採掘形状とともに岩盤の初期応力状態や弾性定数と密接に関係することから、岩盤変形挙動の理解のためにはこれらの定量的評価が重要であると考えられる⁷⁾。特に、露天掘り鉱山の採掘域は広大であり、複雑な周辺地形のもとに採掘され、長大斜面が計画されていることを考慮すると、採掘域全域を対象とした広域的な応力場と弾性定数の評価が重要であると考えられる⁸⁾。すなわち、広域的な応力状態と弾性定数の評価、それに基づく斜面管理が望まれている。

本論文では、採掘などの地形改変により生じる地盤の広域変形から、対象領域の地盤ヤング率と応力状態を同時評価する方法を提案するとともに、提案する手法により鳥形山鉱山におけるGPS変位計測結果を解析し、本手法の有用性を検証する。具体的には、まず、採掘に伴って生じる岩盤変形と広域ひずみ場および弾性定数との関係を定式化するとともに、広域変形計測によりこれらを逆解析する方法を提案する。次に、鳥形山鉱山におけるGPS変位計測の概要と当該山地形の数値モデル化の方法について述べる。そして、これらの結果に基づいて当該地域の広域ひずみと地盤ヤング率を同定するとともに、これらから広域応力状態を推定し、それらの特徴について考察する。

2. 変位計測による広域応力場の評価法

広域場の応力状態を表現する方法としては、初期条件に相当する広域応力状態を仮定する方法⁸⁾と境界条件に相当する広域ひずみ状態もしくは変位分布を仮定する方法^{9, 10)}が提案されている。ここでは後者の方法、特に一様広域ひずみを仮定する方法⁹⁾を採用する。

まず、以下の議論の前提として、広域ひずみの考えに基づいた応力場の表現法を示す。すなわち、この仮定のもとでは、領域内任意点 x の応力 $\sigma(x)$ は、重力による応力と広域ひずみによる応

*2008年2月28日受付 6月27日受理 平成19年度資源・素材学会秋季大会にて一部発表

1. 普通会員 日鉄鉱業(株) 資源開発部

2. 学生会員 北海道大学大学院修士課程学生 工学研究科 環境フィールド工学専攻

3. 普通会員 工博 北海道大学准教授 工学研究科 環境循環システム専攻

4. 普通会員 工博 北海道大学准教授 工学研究科 環境フィールド工学専攻

5. 普通会員 工博 北海道大学教授 工学研究科 環境フィールド工学専攻
[著者連絡先] FAX: 03-3215-8480

E-mail: nisyama@nittetsukou.co.jp

キーワード: 広域応力, 広域ひずみ, 地盤ヤング率, 採掘変形, GPS, 逆解析

力の和として次式で与えられる。

$$\sigma(x) = \sigma^0(x, \rho g) + \sigma^X(x, \varepsilon_{xx}^G) + \sigma^Y(x, \varepsilon_{yy}^G) + \sigma^{XY}(x, \gamma_{xy}^G) \dots \dots (1)$$

ここで、 $\sigma^0(x, \rho g)$ は重力に起因する応力であり、十分に広い領域に対して、領域周囲境界面の面直交方向変位を拘束した状態で、岩石の自重 ρg (ρ : 密度, g : 重力加速度) のみを作用させた解析により評価される。 $\sigma^X(x, \varepsilon_{xx}^G)$, $\sigma^Y(x, \varepsilon_{yy}^G)$ および $\sigma^{XY}(x, \gamma_{xy}^G)$ は広域水平ひずみ ε_{xx}^G , ε_{yy}^G , γ_{xy}^G に起因する応力であり、プレート運動などによる地殻の水平方向の動きに起因する応力と解釈される。これら広域ひずみの影響項は、同様に対象とする領域が十分に広ければ、その領域周囲に広域ひずみに相当する水平方向変位を作用させた解析により評価される。そして、対象領域内での応力の実測結果を (1) 式により逆解析すれば、広域ひずみが同定され、これにより領域内の応力状態が推定される⁹⁾。なお、当然のことながら、 $\sigma^X(x, \varepsilon_{xx}^G)$, $\sigma^Y(x, \varepsilon_{yy}^G)$ および $\sigma^{XY}(x, \gamma_{xy}^G)$ の値はヤング率に比例するため、逆解析で求められる広域ひずみの値はヤング率に逆比例する。したがって、広域ひずみを同定するためにはヤング率の値を仮定する必要がある。ただし、ヤング率と広域ひずみの積の値が一定であれば応力の値は同じであるから、応力状態を推定する場合には、ヤング率と広域ひずみがそれぞれ独立に評価されなくても問題はない。なお、いずれの項もポアソン比に依存するため、ポアソン比もパラメータとして解析を行う必要がある。

広域ひずみと領域内応力場との関係は以上のようなものであるが、次に、広域ひずみと領域内変位場との関係について考えてみよう。特に、以上の議論では応力の絶対量を議論の対象としたが、計測可能な変位は相対量である点に注意されたい。すなわち、計測開始後に対象領域内で何らかの変化（例えば、地形・構造、弾性的性質、広域ひずみなどの変化）がない限り計測可能な変形は生じない。そこで、ここでは、地形のみが変化し、他は不変である場合に生じる変形、すなわち、地形改変に伴う変形を考えることとする。地形改変としては種々考えられるが、以下では、露天掘り鉱山における採掘に伴う弾性変形・変位を対象として議論を進めることとする。

ここで対象とする採掘変位は、時間的にはある期間の採掘に伴う変位増分であり、さらに、空間的にはある基準点を原点とした座標上で定義される相対変位である。すなわち、相対変位増分に対応するが、以下では、簡略化のため「増分」の表記は省略する。ここで、上記 (1) 式の前提のもとに、ある計測期間において採掘が実施され、さらに、この期間内での広域ひずみの変化が無視できると仮定される場合を考えると、この計測期間において岩盤内の任意点 x に生じる相対変位は次のように与えられる。

$$u(x) = u^0(x, \rho g, E^G) + u^X(x, \varepsilon_{xx}^G) + u^Y(x, \varepsilon_{yy}^G) + u^{XY}(x, \gamma_{xy}^G) \dots (2)$$

ただし、 $u^0(x, \rho g, E^G)$ は重力により点 x に生ずる相対変位であり、 E^G は地盤のヤング率である。また、 $u^X(x, \varepsilon_{xx}^G)$, $u^Y(x, \varepsilon_{yy}^G)$ および $u^{XY}(x, \gamma_{xy}^G)$ はそれぞれ周囲境界に直ひずみ ε_{xx}^G , ε_{yy}^G およびせん断ひずみ γ_{xy}^G に相当する変位が与えられた場合の岩盤内の点 x における相対変位であり、広域ひずみの影響関数としての意味をもつ。なお、 γ_{xy}^G に相当する変位は純粋せん断に相当する変位である。そして、以上の相対変位は、(1) 式の場合と同様に、対象領域の数値応力解析により算定される。

ここで、重力による相対変位 $u^0(x, \rho g, E^G)$ は単位体積重量 ρg に比例し、ヤング率 E^G に逆比例する。また、広域ひずみによる相対変位 $u^X(x, \varepsilon_{xx}^G)$, $u^Y(x, \varepsilon_{yy}^G)$ および $u^{XY}(x, \gamma_{xy}^G)$ は、それぞれ ε_{xx}^G , ε_{yy}^G および γ_{xy}^G に比例するがヤング率には依存しない（いずれもポアソン比に依存するがその程度は地形などの幾何形状に関

係する）。そこで、ヤング率および広域ひずみの参照値をそれぞれ E^0 , ε_{xx}^0 , ε_{yy}^0 および γ_{xy}^0 と表すと、線形関係から次式となる。

$$u(x) = c_E u^0(x, \rho g, E^0) + c_X u^X(x, \varepsilon_{xx}^0) + c_Y u^Y(x, \varepsilon_{yy}^0) + c_{XY} u^{XY}(x, \gamma_{xy}^0) \dots \dots (3)$$

ただし、 $c_E = E^0/E^G$, $c_X = \varepsilon_{xx}^G/\varepsilon_{xx}^0$, $c_Y = \varepsilon_{yy}^G/\varepsilon_{yy}^0$, $c_{XY} = \gamma_{xy}^G/\gamma_{xy}^0$ である。すなわち、ヤング率と広域ひずみの参照値をある一定の値に仮定して測点における相対変位を評価すれば、(3) 式は c_E , c_X , c_Y , c_{XY} を未知数とする一次式となる。したがって、測定値を満足するようにこれら未知数を求めればよい。

ここで、変位計測として GPS が用いられる場合を考えると、GPS により測定される相対変位成分は 3 成分である。しかし、周知のように GPS 計測では水平方向成分に比較して鉛直方向成分の計測精度が著しく低い¹¹⁾ こと、また、鉛直方向成分は対象地域の深部地下構造の影響を強く受けるが、数値解析においてこれを的確に表現することは困難であること、などから水平方向 2 成分を解析対象とするのが合理的であると考えられる。そこで、水平方向 2 成分を解析対象とすると、測点数（基準点含む）が N の場合、(3) 式は $2(N-1)$ 行の式を与えることになる。また、前述のように (3) 式の連立方程式の未知数は c_E , c_X , c_Y , c_{XY} の 4 つであるから、測点数 N は 3 以上の必要がある。そして、 $N > 3$ の条件では最小二乗法を適用すればよい。なお、上記の影響関数はポアソン比に依存するから、ポアソン比を変化させて解析を行って最適解を求める必要があると考える。

以上は、採掘変位の変位ベクトルを解析対象とする場合であるが、次に、光波測距や伸縮計などのように 2 点間の伸縮量が計測される場合を考えてみよう。この場合、二つの測点 m および n を考え、それらの座標を $x^{(m)}$ および $x^{(n)}$ と表すと、測点 m および n を両端とする測線の伸縮量 $s(x^{(m)}, x^{(n)})$ は次のように与えられる。

$$s(x^{(m)}, x^{(n)}) = r^{(mn)} \cdot \{u(x^{(m)}) - u(x^{(n)})\} \dots \dots (4)$$

ただし、(4) 式右辺の「 $\cdot$ 」は内積を表し、 $r^{(mn)}$ は測線 mn の単位ベクトルであり、 $r^{(mn)} = (x^{(m)} - x^{(n)}) / |x^{(m)} - x^{(n)}|$ と与えられる。(3) 式を用いて (4) 式を書き換えると次式となる。

$$s(x^{(m)}, x^{(n)}) = c_E r^{(mn)} \cdot \{u^0(x^{(m)}, \rho g, E^0) - u^0(x^{(n)}, \rho g, E^0)\} + c_X r^{(mn)} \cdot \{u^X(x^{(m)}, \varepsilon_{xx}^0) - u^X(x^{(n)}, \varepsilon_{xx}^0)\} + c_Y r^{(mn)} \cdot \{u^Y(x^{(m)}, \varepsilon_{yy}^0) - u^Y(x^{(n)}, \varepsilon_{yy}^0)\} + c_{XY} r^{(mn)} \cdot \{u^{XY}(x^{(m)}, \gamma_{xy}^0) - u^{XY}(x^{(n)}, \gamma_{xy}^0)\} \quad (5)$$

したがって、(3) 式の場合と同様に、ヤング率と広域ひずみをある一定の値に仮定して各座標点の採掘変位を求めておけば、(5) 式は c_E , c_X , c_Y , c_{XY} を未知数とする線形式となる。したがって、これに測定値を適用すれば、ヤング率と広域ひずみの値が算定されることになる。なお、伸縮量は光波測距や伸縮計などによる計測量に対応するが、以上の逆解析のためには測線数は 4 以上である必要がある。また、GPS による水平変位 2 成分の計測結果から水平面内伸縮量を評価することも考えられる。この場合、GPS 測点数を N とすると設定可能な測線数は $N C_2 = N(N-1)/2$ となるから、 N を 4 以上とする必要がある。なお、前述と同様に (5) 式の係数項はポアソン比に依存するから、ポアソン比をパラメータとした解析が必要である。

以上、広域ひずみとヤング率の評価法を示したが、これらが確定すると広域応力は次のように推定される。特に、ここでは広域

Fig.1 A photograph of Mt. Torigata and Torigatayama Mine.

Fig.2 A plan of Torigatayama mine and locations of GPS station.

応力 σ_{xx}^G , σ_{yy}^G および σ_{xy}^G を, 地表面が平坦な均質地盤 (ヤング率 E^G , ポアソン比 ν^G) に広域ひずみ ε_{xx}^G , ε_{yy}^G および γ_{xy}^G がそれぞれ作用する場合に生じる水平応力と定義すると, 広域応力は次式で与えられる⁹⁾.

$$\begin{aligned}\sigma_{xx}^G &= c_1 [(1-\nu^G)\varepsilon_{xx}^G + \nu^G\varepsilon_{yy}^G] \\ \sigma_{yy}^G &= c_1 [\nu^G\varepsilon_{xx}^G + (1-\nu^G)\varepsilon_{yy}^G] \dots\dots\dots (6) \\ \sigma_{xy}^G &= c_2 \varepsilon_{xy}^G\end{aligned}$$

ただし, $c_1 = \frac{E^G}{(1+\nu^G)(1-2\nu^G)}$, $c_2 = \frac{E^G}{2(1+\nu^G)}$ である。

3. 対象現場と計測の概要

鳥形山は四国の背梁山脈の一角に位置し, 鳥形山鉱山の位置する山頂部付近の地層は主として石灰岩からなる上位層と粘板岩および輝緑凝灰岩が卓越する下位層に区分される。石灰岩は秩父古生層に属し, その分布は, 平面的に見て鉱床分布地域の南半分まで極めて卓越し, 西部に粘板岩, 北部に輝緑凝灰岩の介在が顕著となっている。鳥形山鉱山 (日鉄鉱業株) は, 東西方向に約 2.5km, 南北方向に約 1.0km にも及ぶ広大な採掘切羽を展開し, 年間一千万トンを超える生産量をあげている我国最大級の石灰石露天掘り鉱山である (Fig. 1)。また, 埋蔵鉱量は約 16 億トンにもおよび, 今後約 100 年間の採掘が計画されている。このように, 鳥形山鉱山は広大な採掘域を有し長期間の採掘が計画されていること, さらに, 採掘終了時の残壁高さが 400m 以上となる計画であることなどから, 広域的かつ長期的な残壁管理が望まれている。そのため, 変形挙動監視を目的とした GPS 計測, 初期局所応力

測定, 多段式伸縮計による岩盤内変位測定などが実施されている。

鳥形山鉱山における GPS 測点配置は Fig. 2 のようである。特に, 図中の測点 3, 測点 4 (残壁肩部) や測点 6 (事務所付近) は将来的にも採掘されずに残る可能性の高い領域に設置されている。また, 測点 1 および測点 2 に関しては, 当初設置場所が採掘計画域にあり, これら測点に切羽が接近してきた 2003 年 7 月に測点 (アンテナ) を移設している。そこで, これらの移設後の測点をそれぞれ測点 1' および 2' と表している。GPS 計測は 1999 年 3 月から開始され, 1 日 2 回, 1 回の計測につき 3 時間のデータ (計測周期 30 秒) を取得している。また, GPS の測位形態は相対測位であり, 搬送波位相を用いて計測を行う干渉測位法の一つであるスタティック測位を採用している。この測位法は, 衛星の時間的位置変化を利用して整数値バイアスを決定している。そのため, 長期的な微小変位計測に適しており, その精度は GPS 計測システムの中で最も高く, 1cm + 基線長 $\times$ 1ppm 以上の精度が得られる。長時間平均によってノイズを減らせばミリ単位の計測が可能であると言われている。しかし, 計測された変位は衛星数・配置や気象条件などにより変動し, 変動の振幅はアンテナ配置 (特に, 標高差) の影響を強く受ける¹¹⁾。したがって, アンテナ配置が固定された場合でも, 測定結果には計測対象変位以外の信号が混入されているため, これらを除去するために移動平均処理を施した。なお, 気象補正は行っていないが, 固定気象値として気圧 1,013hPa, 気温 18℃, 湿度 50% を使用している。しかし, 処理後のデータには年周期変動が明瞭に現れていたことから, その影響を極力除去するために, 毎年同一時期のデータ (ここでは 6 月 30 日) を比較することとした。一例として, 毎年 6 月 30 日のデータについて, 測点 3 ~ 5 の相対変位 (測点 6 を基準点) を図示すると Fig. 3 のようである。図より, 測定結果には連続性ととも測点ごとにある傾向が認められ, 上記処理により得られた結果は比較的高い精度を有していることがわかる。そこで, 採掘域全域の採掘変形を把握するために, 1999 年 6 月 ~ 2003 年 6 月および 2003 年 6 月 ~ 2006 年 6 月のそれぞれの期間における相対変位を図示すると Fig. 4 となる。ただし, 測点 6 を基準とし, 変位倍率 10000 倍で表示している。次に, 測点間伸縮量の一例として, 同様な期間における測点間伸縮量の結果を Fig. 5 に示す。ただし, 図では, 伸長を正, 収縮を負として表し, 測線の関係を見易くするために, 一部の測点は実際の位置から若干移動させて表示している。また, Fig. 6 に各時期における採掘切羽図を示す。図中の (a) が 1999 年 6 月, (b) が 2003 年 6 月, (c) が 2006 年 6 月の状態を表している。

4. 対象地域の有限要素モデル

鳥形山鉱山では, ペンチ高さ 15m を標準としてペンチカット

Fig.3 Relative displacements of GPS stations measured from 1999 to 2006, where the reference point is GPS6 and observation date is June 30 in every year.

Fig.4 Relative displacements of GPS stations, where the reference point is GPS6 and observation date is June 30 in each year. The magnification factor of displacement is 10000.

Fig.5 Change of Distance between GPS stations. Unit is mm and positive number is extension.

Fig.6 A plane view of the mining area on Torigatayama mine at each stage.

Fig.7 A three dimensional FEM model of the district including Torigatayama mine.

Fig.8 Finite Element model for the planning region at each excavation stage.

採掘が行われている。したがって、同鉱山の有限要素モデル化においては、その採掘形状を忠実に表現するために、採掘域および将来的に採掘される可能性のある領域（これらを計画領域と呼ぶ）は、要素高さをベンチ高さと同じ15mとして要素分割することとした。モデル化対象領域は、ほぼ中央に鳥形山を含むX方向約4.3km、Y方向約10.2km、Z方向約2.5kmであり、そのうちの計画領域はX方向約1.4km、Y方向約3.4km、Z方向900mである。ただし、解析座標のX軸はS29.7E、Y軸はN60.3Eであり、Z軸は鉛直上向きである。そして、当地域の地形図および採掘切羽平面図等から標高値を読み取りモデルの地表面形状を決定した。これらの設定に基づき作成したモデルの全景がFig. 7である。また、図中の点線で囲んだ領域が計画領域に相当する。計画領域は採掘の進行に伴って変更されるが、Fig. 6に対応する3つの時期の計画領域の地表面要素分割はFig. 8のようである。節点数および要素数はモデルにより異なるが、1999年6月のモデルで総節点数1,273,561、総要素数1,580,955であった。なお、要素分割には露天採掘用モデル作成ツール¹²⁾を使用しているため、具体的手順の詳細は文献¹²⁾を参照されたい。また、地盤を均質等方弾性体と仮定したが、これは広域岩盤を不連続面や地質構造の影響を含む等価弾性体で近似したこと相当している。

上記の3時期のモデルについて重力場および広域ひずみ場の解析を行い、これらの差から、それぞれの期間の採掘変位： $u^0(x, \rho g, E^0)$, $u^X(x, \varepsilon_{xx}^0)$, $u^Y(x, \varepsilon_{yy}^0)$ および $u^{XY}(x, \gamma_{xy}^0)$ を求めた。なお、単

Fig.9 Regional strains and Young's modulus obtained by the back-analysis of relative displacement vectors.

Fig.10 Regional strains and Young's modulus obtained by the back-analysis of extension between GPS stations.

位体積重量 ρg は当地域の石灰石の代表値 26.2 kN/m^3 と設定した。

5. 解析結果および考察

GPS 計測結果から上記 3 期間の各測点の水平相対変位ベクトルおよび各測点間の水平面内伸縮量を求め、これらを (3) および (5) 式に適用して逆解析を行った。特に、解析対象期間は 1999-2006 として、ポアソン比をパラメータとしてヤング率と広域ひずみを最小二乗法により求めた。なお、測点 4 ~ 5 は期間 1999-2006 について観測方程式を立てたが、測点 1 および 2 は期間 1999-2003 のみについて、測点 1' および 2' は期間 2003-2006 のみについて観測方程式を立て、それぞれの期間の重みを考慮して最小二乗解析を行っている。逆解析で求められた広域ひずみとヤング率の解析結果を Fig. 9 および Fig. 10 に示す。ただし、ひずみは伸張が正である。また、Fig. 9 の相対変位の場合は基準点の取り方により解析結果が若干異なるため、ここでは測点 3 を基準点とした場合の結果を示している。Fig. 9 より、解析したポアソン比の範囲では ϵ_{yy}^G の値が正（伸張）となり、ポアソン比の増大に伴ってその値が増大していることがわかる。ここで考えている広域ひずみは地盤を均質等方弾性体として取り扱った場合の弾性ひずみであるから、軸ひずみが有意に伸長となるようなひずみ場は非現実的であり、これらの解は物理的に信頼できる結果とは言いがたい。これに対して、伸縮量の逆解析結果である Fig. 10 では、ポアソン比 ν^G が小さい範囲で二つの軸ひずみがともに収縮となり、物理的に矛盾しない結果が得られていることが分かる。以上の解析では基本的には同じ計測結果と数値解析結果を用いているが、それらの逆解析結果は異なる。ここで、逆解析結果の誤差の要因としては、GPS 変位計測の誤差および有限要素解析の誤差（主として、モデル化に起因する誤差）とともに回転変位の影響が考えられる。特に、GPS 変位計測の誤差については、測点ごとの計測誤差が異なる場合には、同じ一組のデータであっても基準点の選び方により相対変位の誤差分布が異なり、結果として、逆解析結果もその影響を受けて異なることになる。しかし、伸縮量の場合には、全て二点間の線ひずみ対応量が解析対象とされるた

Fig.11 Magnitude and direction of the regional stress estimated. Rectangular in the figure represents the model used in the present analysis.

め、一組のデータからは唯一の解のみが求められる。また、相対変位を対象とする場合には、回転による剛体変位の影響を除外することができないが、伸縮量は、原理的に回転変位の影響を受けない。すなわち、領域全体が回転しているような場合には、両者の逆解析結果は異なり、伸縮量による逆解析結果の信頼性が高いと判断できる。

以上の考察から、伸縮量の逆解析結果、すなわち、Fig. 10 のポアソン比が小さい範囲で得られた結果が求めようとする広域場の解であると考え、これらの条件ではヤング率 E^G は 3 ~ 6 GPa でほぼ一軸的に近いひずみ状態となっていることがわかる。そこで、これら広域ひずみを広域応力に換算すると Fig. 11 のようである。なお、ここでは広域応力は、地表面が水平な地盤（ヤング率 E^G 、ポアソン比 ν^G ）に対して、広域ひずみ ϵ_{xx}^G , ϵ_{yy}^G , γ_{xy}^G が与えられた場合に生じる水平応力として (6) 式で算定される。Fig. 11 より、いずれの場合も一軸的な応力状態であり、最大圧縮主応力は最大 -6 MPa ~ -4 MPa 、主応力軸は N48E ~ N50E となっていることがわかる。

ここで一等三角点測量や最近の GPS 計測などの測地学的手法によれば、当地域のひずみ速度の主方向（最大収縮方向）は WNW-ESE から NNW-SSE となっている¹³⁾。これに対し、地震学的手法（地震メカニズム解）により推定された四国東部・中部の主応力方向は深度により異なり、23km 以浅の地震では最大圧縮主応力軸は E-W から ENE-WSW であると報告されている^{14,15)}。したがって、本解析で推定した主応力方向は地震学的手法により推定された主応力方向に近いことがわかる。ここで、本解析で評価された広域ひずみは主ひずみで 10^{-3} のオーダーであり、この値は当地域の浅所地殻のひずみ絶対値に相当する。これに対して、国土地理院の一等三角点測量や GPS による当地域の主ひずみ増分は $10^{-7}/\text{y}$ のオーダーである。言い換えれば、現在蓄えられているひずみ量は、現在のひずみ速度から考えた場合、大略一万年分の蓄積量に相当することを示している。これは、地殻ひずみの絶対量と増分量との関係を議論する上で重要な知見である。すなわち、測地学的手法で求められているひずみは最近（長くても百年程度）のひずみ変化の傾向を表すのに対し、地殻ひずみはさらに長期にわたる変形の蓄積であるから、両者の主方向が一致しなくても矛盾はないと考えることができる。

また、鳥形山地域に対しては、金子等⁹⁾は、同鉱山内で実施された応力解放法による初期応力測定結果を (1) 式に基づいて解析し、広域応力の最大圧縮主応力はポアソン比 0.05 ~ 0.15 の条件で -9.5 MPa ~ -8.8 MPa で N27E であることを報告している。ここで解析対象スケールと比較した場合、通常の応力測定は言わば点の測定であると考えられることができる。したがって、局所的な地質構造などにより応力測定点周囲の応力場に擾乱が生じている

場合には、それに基づいて逆解析された広域応力の信頼性は低下する。すなわち、限られた計測点における局所応力から評価された広域応力は信頼性が高いとは言えない。これに対し、本論文で提案した手法では、広域の変形を解析対象として広域ひずみを評価するため、上記のような局所的応力擾乱の影響を受けにくいと考えられる。ただし、地質構造や不連続面などの影響も含めて岩盤を等価弾性体として取り扱うこと、広域変形の測定精度や広域的な変形速度の影響など今後検討すべき問題が残されていることも事実である。

次に、本解析で地盤弾性定数は、ポアソン比 0.05 ～ 0.15 でヤング率 3 ～ 6GPa と評価されている。一例として、当地域の石灰石について室内試験で求められたコアの弾性定数はポアソン比 0.28、ヤング率 50 ～ 68GPa と報告されている¹⁶⁾。ここで、岩盤のヤング率は内部に存在する不連続面の影響により低下するが、その程度は不連続面の開口・閉合状態により異なり、閉合不連続面に比較して開口不連続面の場合が大きい。そして、ポアソン比は、閉合不連続面の場合は亀裂密度の増大に伴って増大するが、開口不連続面の場合は亀裂密度の増大に伴って低下することが知られている¹⁷⁾。したがって、本逆解析結果は、浅部地殻では開口不連続面の影響が大きいことを示唆している。

以上、本論文で提案した方法により、広域ひずみと地盤弾性定数が評価されると、対象地域の 3 次元数値モデルにおける境界条件と力学定数が同定される。したがって、この数値モデルを用いることにより、今後の採掘進行に伴う岩盤変形と岩盤内応力状態の予測が可能となる。そして、これらの予測計算結果は、残壁管理のための変形計測結果の解釈や残壁安定性の評価のための貴重な基礎資料となるものと期待される。ただし、提案する方法による逆解析結果の信頼性は計測・解析法に依存することから、今後は、計測精度の向上とともに計測精度が解析結果に及ぼす影響の評価など、同定結果の信頼性を向上させる方法について検討を続ける予定である。

6. ま と め

露天掘り鉱山の力学挙動の評価・予測法の確立を目的として、採掘により生じる広域変形を逆解析して、対象地域の広域的な応力状態と地盤ヤング率を同時評価する方法について検討した。本研究で得られた成果をまとめると以下のようである。

1) 採掘変形と広域ひずみとの関係を定式化し、採掘変形の計測結果から、広域ひずみと地盤ヤング率を逆解析する方法を提案した。特に、測点間の相対変位ベクトルを解析対象とする場合、測点間の伸縮量を解析対象とする場合のそれぞれについて定式化を行った。

2) 提案する手法を鳥形山鉱山における GPS 変位計測結果に適用し、当地域の広域ひずみ・応力場と岩盤弾性定数を推定した。特に、測点間の相対変位ベクトルを逆解析した場合には、合理的な結果は得られなかったが、測点間の伸縮量を逆解析した場合には、ポアソン比が比較的小さい場合に合理的な結果が得られた。その結果によると、当地域の広域応力場は、主ひずみの最大収縮方向（最大圧縮主応力の方向）がほぼ北東－南西で一軸的応力状態であると推定された。

本論文では、露天掘り鉱山の広域的応力状態の評価法について論じたが、本研究の成果は、今後の採掘進行に伴う岩盤挙動の予測とともに広域応力が残壁安定性に及ぼす影響を解明する上でも重要な基礎資料を提供すると考えている。

謝辞 本研究の遂行において多大なご協力を頂いた日鉄鉱業(株)鳥形山鉱業所ならびに同社資源開発部・生産技術部の関係各位に謝意を表する。

References

- 1) N. Shimizu, H. Ono, H. Kondo and Y. Mizuta: Journal of MMIJ, **112**(1996), 283-288.
- 2) K. Kaneko, Y. Noguchi, K. Soda and M. Hazuku: Journal of MMIJ, **112**(1996), 915-920.
- 3) K. Kawabata, T. Ito and M. Tonsho: Limestone, **297**(1999), 20-27.
- 4) N. Nakamura, R. Tsukayama, A. Hirata and K. Kaneko: Journal of MMIJ, **119**(2003), 547-552.
- 5) J. Kodama, K. Kaneko, M. Tsuzuki and E. Nishiyama: Journal of MMIJ, **120**(2004), 182-189.
- 6) Y. Obara, E. Nishiyama and S.S. Kang: Journal of MMIJ, **122**(2006), 582-588.
- 7) MMIJ : *Rock slope handbook for surface mines*, (Maruzen, Tokyo, 2005) .
- 8) B. Sulistianto, T. Kido and Y. Mizuta: Journal of MMIJ, **114**(1998), 461-466.
- 9) K. Kaneko, N. Nakamura, Y. Obara, K. Ito, T. Yoneda and M. Kato: Journal of MMIJ, **116**(2000), 572-576.
- 10) N. Kimura, K. Matsuki, S. Nakama and T. Sato: Journal of MMIJ, **119**(2003), 655-662.
- 11) H. Matsuda, N. Shimizu, I. Yoshitomi, K. Kawabata, T. Chiba and M. Tonsyo: Journal of MMIJ, **119**(2003), 389-395.
- 12) K. Kaneko, M. Kato and N. Nakamura: Limestone, **292**(1998), 15-21.
- 13) Geological Survey Institute: <http://mekira.gsi.go.jp/>, (2007)
- 14) Kochi Earthquake Observatory, Kochi University: Report of The Coordinating Committee for Earthquake Prediction (<http://cais.gsi.go.jp/KAIHOU/>), **36**(1986), 314-316.
- 15) Disaster Prevention Research Center, Kyoto University: Report of The Coordinating Committee for Earthquake Prediction (<http://cais.gsi.go.jp/KAIHOU/>), **48**(1992), 404-408.
- 16) Y. Obara, N. Nakamura, S.S. Kang and K. Kaneko: Int. J. Rock Mech. Min. Sci., **37**(2000), 1211-1221.
- 17) K. Kaneko, T. Shiba and M. Ohmi: Journal of MMIJ, **104**(1988), 863-870.