

地盤の弾性定数と広域応力場の評価

吉崎 貴哉¹・川崎 了²・金子 勝比古²

¹北海道大学大学院 工学研究科 (〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目)

E-mail:takaya@geo-cr.eng.hokudai.ac.jp

²正会員 北海道大学大学院 工学研究科 (〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目)

地盤の力学挙動を評価・予測するためには、その場の弾性定数と広域ひずみ(広域応力)を同定する必要がある。そこで、弾性定数と広域ひずみを同時に評価する手法を提案する。まず、領域内におけるある物理量(応力、ひずみなど)を考える。これらの物理量は重力の影響項と広域ひずみの影響項の和として表現される。これらの項には弾性定数に依存するものもある。よって、弾性定数をパラメータとして広域ひずみを逆解析し、これらから解析値と計測値の絶対誤差不偏分散が最小となるパラメータを求めることで、弾性定数と広域ひずみが同時に評価できる。ここでは、水圧破碎法による局所応力測定結果とGPS変形計測結果を個々に用いた同定手法と適用例を示すが、多様な計測量を複合して解析することも可能である。

Key Words : global stress, global strain, elastic constant, back analysis

1. 緒言

地盤中に高レベル放射性廃棄物処分場や地下発電所、あるいは地下石油備蓄基地等といった大規模地下構造物を建設する場合は、その設計及び施工の最適化あるいは安全性確保のために、広域的かつ長期的な地盤の安定性が要求される。そこで必要不可欠となるのが、広域的な場の特徴と性質の評価である。広域的な場の特徴としては広域ひずみ(広域応力)、性質としては弾性定数があげられる。本報告では、弾性定数と広域ひずみを同時に評価する手法を提案するとともに、その適用例を示す。

2. 評価原理

領域内の任意の座標点 $\mathbf{x}$ におけるある物理量 $F_k^L(\mathbf{x})$ (ただし、 $k=1\sim K$ であり、 K は成分数を示す)とする。ここで、 $F_k^L(\mathbf{x})$ は具体的には応力、ひずみ、掘削に伴う相対変位等である。 $F_k^L(\mathbf{x})$ は重力の影響項と広域ひずみの影響項の和として次式で表現されるものと仮定する。

$$F_k^L(\mathbf{x}) = F_k^0(\mathbf{x}; \rho g) + F_k^X(\mathbf{x}; \varepsilon_{xx}^G) + F_k^Y(\mathbf{x}; \varepsilon_{yy}^G) + F_k^{XY}(\mathbf{x}; \gamma_{xy}^G) \quad (1)$$

ただし、 $F_k^0(\mathbf{x}; \rho g)$ は岩石の自重に起因する重力の影響項であり、 $F_k^X(\mathbf{x}; \varepsilon_{xx}^G)$ 、 $F_k^Y(\mathbf{x}; \varepsilon_{yy}^G)$ および $F_k^{XY}(\mathbf{x}; \gamma_{xy}^G)$ は周囲境界

に直ひずみ ε_{xx}^G 、 ε_{yy}^G およびせん断ひずみ γ_{xy}^G に起因する広域ひずみの影響項である。測定点 $\mathbf{x}_n$ (ただし、 $n=1\sim N$ であり、 N は測定点数である)において測定された物理量を $F_k^M(\mathbf{x}_n)$ と表すと、解析値を測定値に一致させる条件は次のようになる。

$$F_k^M(\mathbf{x}_n) = F_k^L(\mathbf{x}_n) \quad : n=1\sim N \quad (2)$$

すなわち、解析においては境界条件となる広域ひずみがある一定の値に仮定して測定点における物理量を評価しておけば、測定値に対応する物理量の値が算定されることになる。また、 F_k^X 、 F_k^Y 、 F_k^{XY} は対応する広域ひずみに関する一次関数となる。さらに、これらを含む4つの項には弾性定数(ヤング率、ポアソン比)に依存するものとしがないものがある。したがって、弾性定数をパラメータとして広域ひずみを逆解析し、これらから解析値と計測値の絶対誤差不偏分散が最小となるパラメータを求めれば、弾性定数と広域ひずみが同時に評価される。ここでは、例として F_k が局所絶対応力、および掘削に伴う基点間相対変位の場合における同定手法と適用例を示す。

3. 局所絶対応力による同定法と適用例

F_k が局所応力 σ_j である場合の広域ひずみ ε_j^G 、ヤング率 E 、ポアソン比 ν と $F_k^0, F_k^X, F_k^Y, F_k^{XY}$ との関係を表-1に示す。ただし、解析においては境界条件として広域ひずみがある一定の値に仮定していることに注意されたい。 F_k^0 が E, ε_j^G に依存しないのに対して、 F_k^X, F_k^Y, F_k^{XY} が E, ε_j^G の値に比例するため、広域ひずみとヤング率を独立に評価することができない。ゆえに、対象領域が均質な場合にはヤング率が不定となる。しかし、層構造の場合はヤング率の比率が同定可能となる。

表-1 各項と広域ひずみおよび弾性定数の関係

	F_k^0	F_k^X	F_k^Y	F_k^{XY}
ε_j^G	×	◎	◎	◎
E	×	◎	◎	◎
ν	○	○	○	○

(◎:正比例, ○:依存性あり, ×:依存性なし)

次に、層構造である場合の適用例を示す。解析対象となる地域は、岐阜県南部の土岐市・瑞浪市に渡る東濃鉱山、正馬様用地、およびその周辺である。応力測定は水圧破碎法により試錐孔 8 本の計 90 測定点で行なわれた。解析領域は $2.0 \times 2.0 \times 1.0 \text{ km}$ であり、その 3 次元有限要素モデル(図-1)は節点数 265226、要素数 250000 である。ここでは、対象地域の地質構造の分析に基づいて図-2 の様な地盤モデルを作成し、地層ごとの力学的性質により

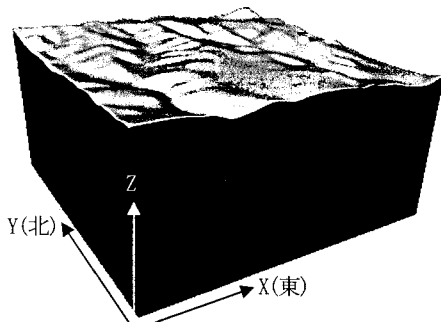


図-1 解析モデルの全体図

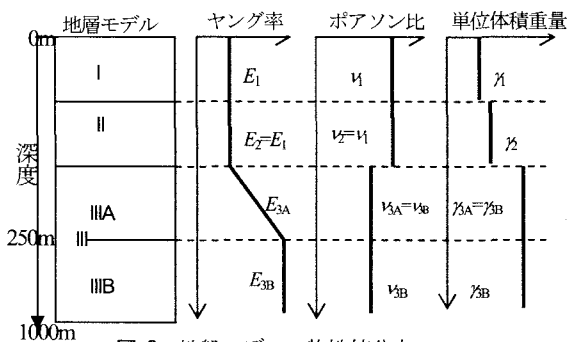


図-2 地盤モデルの物性値分布

各地層を 3 領域に分割した。すなわち、浅部から順に、堆積性地層(第 I 層)、風化花崗岩層と夾炭累層(第 II 層)、花崗岩層(第 III 層)とした。そして、各々の層にヤング率、ポアソン比、単位体積重量という 3 つの力学物性値を与える。

さらに、花崗岩層(第 III 層)は亀裂密度と開口・閉合状態によるヤング率への影響を考慮するために、花崗岩層上部と下部の間でヤング率の変化させることにする。崗岩体で亀裂密度の高い領域が花崗岩境界面から深さ 250m までの範囲にあることから花崗岩層を上部 250m の領域とそれ以深の領域の 2 層に分け、前者を花崗岩上部(IIIA)、後者を花崗岩下部(IIIB)とした。そして、ヤング率を IIIA 層において深度とともに一次関数で比例的に増加させ、IIIB 層の値に収束させることとした。

単位体積重量は岩石コアのそれで近似できることから、上述した解析条件について弾性定数 E_1/E_{3B} 、 ν_1 、 ν_{3B} の 3 つをパラメータとして解析を行なった。まず、 ν_{3B} を 0.2, 0.3, 0.4 に固定し、 E_1/E_{3B} 、 ν_1 をパラメータとしてそれぞれ解析した結果、 $\nu_{3B}=0.3$ の場合のみ絶対誤差不偏分散の極小値が存在した。 $\nu_{3B}=0.3$ の場合の解析結果を図-3 に示す。この結果、 $E_1/E_{3B}=2/20$ 、 $\nu_1=0.4$ において絶対誤差不偏分散が最小となることから、 $E_1/E_{3B}=1/10$ 、 $\nu_1=0.4$ 、 $\nu_{3B}=0.3$ と同定できる。この同定された弾性定数を用いた逆解析により求めた広域応力を図-4 に示す。

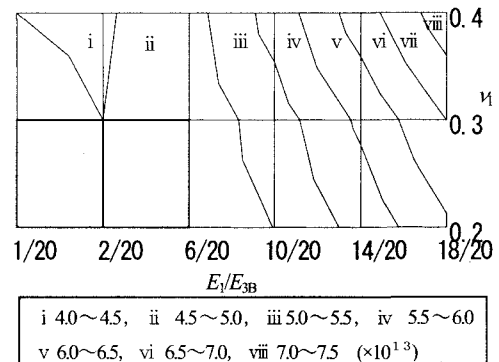


図-3 $\nu_{3B}=0.3$ における解析結果

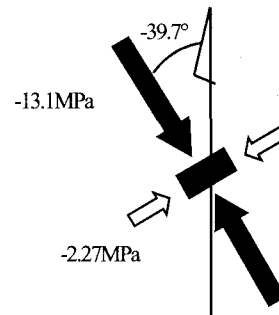


図-4 広域応力同定結果(xy平面)

また、図-5 は応力分布の解析結果と応力測定結果の一例である。 σ_{ij}^I が解析結果であり、 σ_{ij}^M が測定結果である。図から測定結果にはバラツキがあり、測定点によっては大きく全体の傾向から外れている点も見取れるが、計測値と解析値の全体傾向が一致していることがわかる。

4. 掘削に伴う相対変位による同定法と適用例

F_k が掘削に伴う相対変位である場合の広域ひずみ ε_{ij}^G 、ヤング率 E 、ポアソン比 ν と $F_k^0, F_k^X, F_k^Y, F_k^{XY}$ との関係を表-2に示す。ここでも、解析においては境界条件として広域ひずみをある一定の値に仮定していることに注意されたい。 F_k^0 は $1/E$ に比例し、 F_k^X, F_k^Y, F_k^{XY} は ε_{ij}^G と比例関係にあることから、広域ひずみとヤング率を独立に評価することが可能であることがわかる。

表-2 各項と広域ひずみおよび弾性定数の関係

	F_k^0	F_k^X	F_k^Y	F_k^{XY}
ε_{ij}^G	×	◎	◎	◎
$1/E$	◎	×	×	×
ν	○	○	○	○

(◎:正比例○:依存性あり×:依存性なし)

次に、適用例を示す。鳥形山鉱山における GPS 変形計測結果に適用した。鳥形山鉱山では、鉱区内に6つのGPS受信機を配置し、1999年から常時計測が行われた。今回は1999年から2003年までの4年間のデータを対象にした。この期間の採掘進行を考慮した3次元モデルを

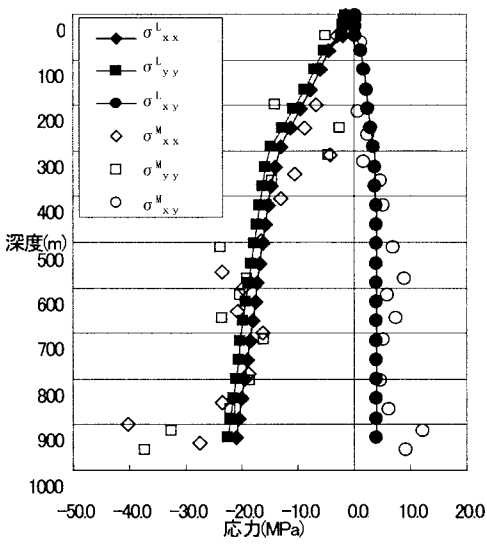


図-5 解析値と計測値の一例

作成した。解析領域は $4.1 \times 10.8 \times 3.0 \text{ km}$ であり、その3次元有限要素モデル(図-6)は節点数 224016、要素数 277061 である。ただし、GPS による計測では、鉛直方向変位の精度が水平方向に比べて劣ることから水平方向の変位成分のみを対象とする。また、計測点2点間の高低差が大きい場合には、誤差が大きくなることから、他の5点に比べてかなり低い場所に位置する GPS の計測結果は除外した。さらに、相対変位において、並進は相殺されるために考慮する必要はないが、回転はモデルで表現できないため除去する必要がある。そこで、相対変位については、回転成分を平面近似により除去した結果を用いた。上述の解析条件についてポアソン比をパラメータとして解析を行った。ただし、解析対象期間が長い方が現実的な広域応力と弾性定数が同定されたことから、ここでは、2003年までの4年間を解析対象期間とした解析結果を用いることとする。

その解析結果を図-7に示す。図より、ポアソン比が0.35のときに絶対誤差不偏分散が最小になることから、ポアソン比は0.35と同定できる。

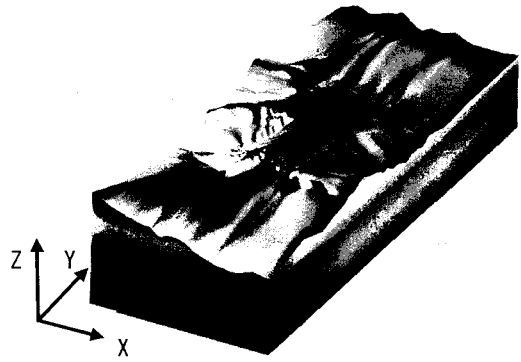


図-6 解析モデルの全体図

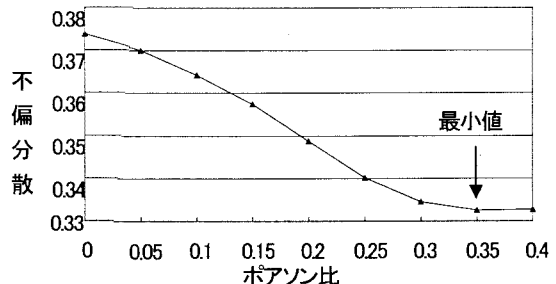


図-7 解析結果

これらの解析結果を用いた逆解析により求めた広域応力を図-8 に示す。ヤング率は 4.66GPa であった。また、図-9 は計測結果と算出された解析結果である。ただし、見やすくするために、相対変位については 10000 倍に拡大して表示している。4 年間の GPS 変形計測で計測された相対変位は非常に小さく、明確な変形とはいえないため、信頼性のある解析結果を得ることは難しい。信頼性を向上させるためには更なる長期計測が必要である。

また、相対変位増分としての計測結果に計測点と基準点とを結ぶ基線の距離の伸縮量を表す基線間伸縮量の考え方を用いても同様に弾性定数と広域応力の同定が可能である。そこで、相対変位の計測結果から基線間伸縮量を算出し、これをもとにポアソン比をパラメータとして逆解析を行った。その結果、広域応力が引張応力になる、ヤング率がマイナスの値をとるなどの非現実的な結果になる場合が多く、現実的な広域応力と弾性定数が算出されたのは $\nu=0.25$ のときのみであった。このため、絶対誤差不偏分散が最小となるパラメータを求めるという手法による、弾性定数と広域ひずみの同定には至らなかった。

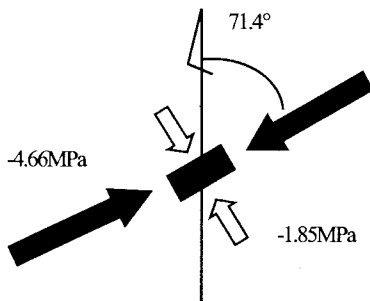


図-8 広域応力同定結果(xy平面)

5. 結言

領域内の物理量から弾性定数と広域ひずみを同時に評価する手法を提案した。そして、物理量として局所応力、掘削に伴う相対変位の場合における適用例を示した。ここでは、水圧破砕法による局所応力測定結果と GPS 変形計測結果を個々に用いたが、これらも含めて、多段式伸縮計、傾斜計、APS などの多様な計測量を複合して解析することも可能である。

謝辞：本研究に際しては、日鉄鉱業株式会社、独立行政法人日本原子力研究開発機構(旧核燃料サイクル開発機構)からデータをご提供いただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 金子勝比古, 中村直昭, 尾原祐三, 伊藤耕介, 米田哲朗, 加藤昌治: 鳥形山地域の広域的応力状態の推定, 資源と素材, Vol.116, pp. 572-576, 2000.

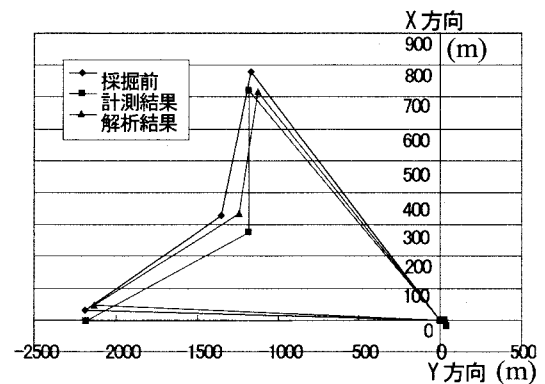


図-9 計測結果と解析結果

EVALUATION OF GLOBAL STRESS FIELD AND ELASTIC CONSTANTS OF ROCK MASS

Takaya YOSHIZAKI, Satoru KAWASAKI and Katsuhiko KANEKO

It is necessary to evaluate elastic constants as well as global stress state for design and construction of rock cavern. In this paper, a method to evaluate global stress and elastic constants simultaneously is proposed. Stress, strain or relative displacement in a field consists of terms of gravity and global strains influences. Moreover, these terms are often influenced elastic constants. Therefore, global strains are calculated by back-analysis. Elastic constants which minimize the difference between calculated values and measured ones are evaluated. In this paper, the proposed method is applied to the result of stress measurement obtained by the hydraulic fracturing method and the result of GPS measurement. Moreover, it is possible that the method will be applied to various measurements simultaneously.