

(90) トンネル掘削時の内空変位の計測結果による解析パラメータの同定

東京大学 学生員 吉田秀典 学生員 林 明華 ○正 員 堀井秀之

Determination of Analytical Parameters from Measured Displacement during Tunnel Excavation

University of Tokyo Hidenori YOSHIDA Min-Wha Lin Hideyuki HORII

For a numerical method on the mechanical behaviors of rock masses to be used in the design and construction of, for example, a large-scale cavern, the input data must be determined from geological survey and in-situ tests objectively. The present article proposes a method to determine the input parameters for the MBC model from measured displacement during tunnel excavation. The tunnel excavation preceding, for example, a large-scale cavern excavation is regarded as an in-situ stress relaxation test. It is shown that the estimated dip angle agrees with the reported value. Parameters which cannot be measured, such as the effective size of joints are determined by the proposed method.

1 はじめに

不連続性岩盤に対する解析手法を確立することは岩盤力学の重要な課題の一つであるが、その際のポイントの一つは入力パラメータの決定方法である。地質調査や原位置試験の結果より入力パラメータを客観的に決定できる解析手法でなければ、それを実際の設計や施工管理に用いることは出来ない。

著者らが提案している MBC モデル (Micromechanics-Based Continuum Model) [1] は空洞掘削により生ずるジョイントのせん断すべり・開口を岩盤挙動の支配的メカニズムと捉え、その影響を考慮に入れた節理性岩盤の力学的挙動に対する連続体理論である。定式化にあたっては個々のジョイントの挙動をモデル化し、その挙動に基づき平均化操作を行うことにより等価な連続体としての挙動、すなわちジョイントを含む岩盤の構成式が導かれている。

この解析手法の特徴としては、個々のジョイントの挙動を捉えた連続体解析手法であり、卓越するジョイントセットの走向・傾斜やジョイントの平均間隔等の情報を直接入力データとして解析に反映することが出来るということと、解析結果として、その卓越するジョイントの開口・せん断変位の空間分布が得られるということである。MBC モデルを用いて東京電力塩原発電所の地下空洞掘削解析が行われているが、解析結果は計測値と比較して妥当なものとなっている [1] [2]。

しかしながら、この解析手法が利用可能となるためには、その入力データを地質調査結果や原位置試験の結果から客観的に決定できなくてはならない。この解析手法においては、卓越ジョイントセットの走向・傾斜、平均間隔など従来の調査・計測から定められる入力データが多いが、ジョイントの有効寸法、起伏角度など、実測し難いものや、連続体として取り扱われる基質岩盤の弾性定数のように物性値の解釈が必要なもの、さらに、初期地圧が入力データに含まれている。

そこで本研究では、例えば地下発電所空洞掘削に先行して行われるトンネルの掘削を原位置応力解放試験と捉え、それらの掘削時に計測される内空変位の結果から、地下発電所空洞掘削解析に必要な入力データを同定するという、新しい解析パラメータの同定方法を提案する。

2 計測結果と解析パラメータ

解析対象の地下発電所建設に先行するトンネルの断面形状は馬蹄形で、規模は高さが 6.2m、幅が 7.6m である (図 1 参照)。トンネルは土被りが 100m から 300m の地下に位置している。岩盤は、急傾斜で走向がトンネルの抗軸とはほぼ平行である節理が卓越している。

ある断面で計測された内空変位は、スプリットライン(図1のACに相当)でおよそ24.42 mm、天端と右側壁(図のABに相当)の間でおよそ10.70 mm、天端と左側壁(図のBCに相当)の間でおよそ3.8 mmであり、岩盤の挙動はかなり異方的である。これは、卓越するジョイントに大きく影響されているものと考えられる。様々な地点における内空変位の計測結果を図2に示した。横軸には土被りをとっており、生じる内空変位は土被りが大きくなるにしたがって変位が大きくなる、という傾向がみられるものの、そのバラツキは大きい。本解析では、これらより等方的、あるいは連続体的の変形成分と土被りの影響を除去するために、それぞれの比を取り、図3の様に整理をした。これより、土被りの影響が取り除かれていることが分かる。さらに、それぞれの比について平均値を計算し、それを代表値として、解析パラメータの同定に用いた。図3には、その値を網かけにして示している。

まず、内空変位の比のデータを用いて、初期最大圧縮応力の方向、ジョイントの傾斜角、ジョイントの起伏角、ジョイントの密度(ジョイントの有効寸法や平均間隔)の同定を行う。次に、内空変位の絶対値のデータを用いて基質岩盤の弾性定数の推定を行う。

トンネルの掘削解析においては、卓越するジョイントを除いた、連続体として取り扱われる基質岩盤の弾性定数 E を 50000kgf/cm^2 、 100000kgf/cm^2 、 200000kgf/cm^2 、そしてポアソン比を 0.25 とした。

また、岩盤の単位体積重量を 2.5g/cm^3 と仮定し、それに土被りを乗じた値を初期最大圧縮応力とした。初期最小圧縮応力と初期最大圧縮応力の比は、本来、様々な値に対して検討すべきであるが、ここでは 0.7 の場合のみを取り扱った。初期最大圧縮応力の方向は、水平方向に対して反時計回りに 60 度から 120 度の範囲とした(図1参照)。解析は2次元平面ひずみの条件下で行い、その解析領域を図1に示す通りである。

掘削したトンネルの周辺では、急傾斜のジョイントが卓越していることから、これを解析上の卓越ジョイントセットとし、右落ち 70 度から左落ち 80 度までの範囲で解析を行った。その他のジョイントの物性パラメータは、ジョイント面の摩擦角を 25 度、起伏角度を 5 、 10 、 15 、 20 、 25 度とし、種々の有効寸法、平均間隔について解析を行った。

3 解析パラメータの同定

まず、種々のジョイントの傾斜角、及び初期応力方向について、ジョイントの平均間隔(d)を有効寸法($\bar{L}$)で割って無次元化したもの($d/\bar{L}$)と内空変位の比との関係を求めた。ここでは、ジョイントの起伏角度は 15 度、基質岩盤の弾性定数は 50000kgf/cm^2 のケースのみを示した。なお、内空変位の比は初期応力の大きさ、基質岩盤の弾性定数に依存しないことを確認している。

ここでの関心は、本解析手法により、計測された内空変位の比を一致させることが出来るのか、また、出来るとすればどのようなパラメータの組合せのときか、そして、その値が現場の状況と比較して妥当なものかどうか、という点にある。これらのことを明らかにし、地下空洞掘削解析のための入力パラメータを決定する

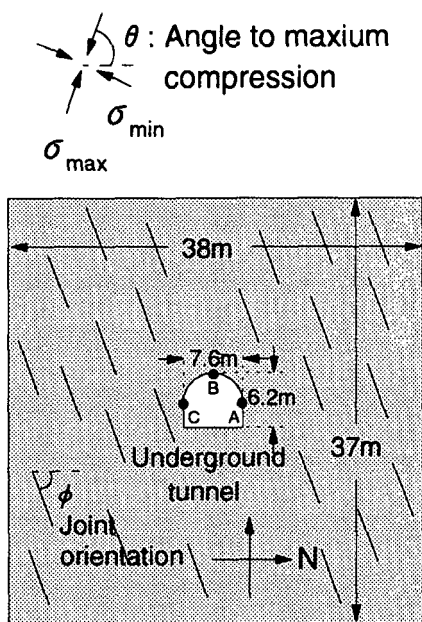


図1: トンネル形状・規模と解析条件

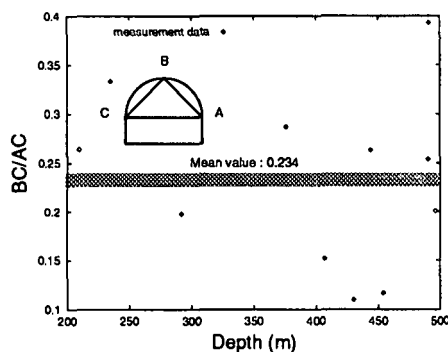
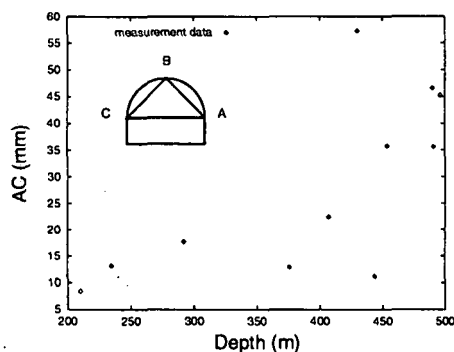
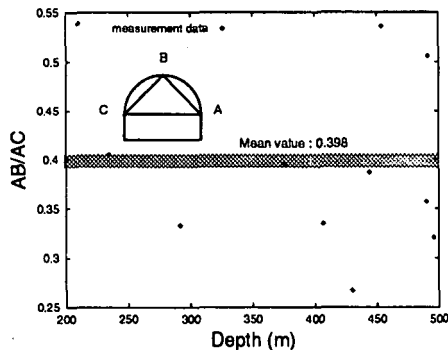
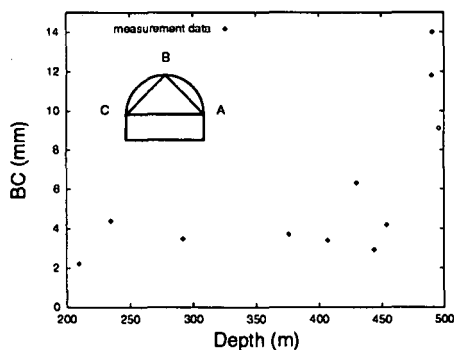


図 2: ケーブル抗計測結果・内空変位 (その 2)

図 3: ケーブル抗計測結果・内空変位の比

ために、次のような操作をする。

種々のジョイント密度 ($d/\bar{L}$)、ジョイントの起伏角度、ジョイントの傾斜角、初期最大圧縮応力の方向のもとで解析を行い、解析から求まる内空変位比 AB/AC 、 BC/AC と計測から得られた両者の誤差の二乗和をとる。つまり、

$$ERROR = \left(\frac{AB/AC}{0.398} - 1 \right)^2 + \left(\frac{BC/AC}{0.234} - 1 \right)^2 \quad (1)$$

という操作をする。この値は解析値が計測値に近ければ小さくなり、逆に解析値が計測値と離れていけば大きくなる。

図 4、図 5 はジョイントの起伏角度が 15 度で、ジョイントの平均間隔 (d) と有効寸法 ($\bar{L}$) の比 ($d/\bar{L}$) が 0.05、0.1 の場合について、また、図 6、図 7 はジョイントの起伏角度が 10 度で、ジョイントの平均間隔 (d) と有効寸法 ($\bar{L}$) の比 ($d/\bar{L}$) が 0.005、0.01 の場合について、さらに、図 8、図 9 はジョイントの起伏角度が 5 度で、ジョイントの平均間隔 (d) と有効寸法 ($\bar{L}$) の比 ($d/\bar{L}$) が 0.05、0.1 の場合について、解析値と測定値の誤差の二乗和を等高線としてプロットしたものである。図の横軸は初期最大圧縮応力の方向を、縦軸はジョイントの傾斜角 (右落ちの角度) をそれぞれ表しており、色が濃い程、誤差が大きくて解析値が測定値と離れており、逆に色が薄い程、誤差が小さくて解析値が測定値に近いことを示している。

いずれの場合も、ジョイントの傾斜角が右落ち 80 度、初期最大圧縮応力の方向が水平より 110 度方向付近で、解析値が測定値に近いことを表している。これらの値は、現場の調査試験で報告されている値と比較的に妥当であると言える。

次に、ジョイントの傾斜角を右落ち 80 度、初期最大圧縮応力の方向を水平より 110 度方向とし、解析値と測定値の誤差の二乗和をジョイントの密度 (平均間隔と有効寸法の比) とジョイントの起伏角度の関数として図

10に示した。ジョイントの密度が0.05、ジョイントの起伏角度が18度のあたりで誤差は最小となっている。

さらに、これらのパラメータ(初期最大圧縮応力の方向が水平より110度方向、ジョイントの傾斜角・右落ち80度、ジョイントの密度0.05、ジョイントの起伏角度18度)のもとで、種々の弾性定数における土被りとトンネルの内空変位(AC)との関係を計算し、それをそれぞれ図11に計測結果と併せて示した。図より、卓越するジョイントを除いた、連続体として取り扱われる基質岩盤の弾性定数 E を約 200000 kgf/cm^2 とした時に、内空変位の解析値は計測値に近くなる。この結果は、例えば地下発電所空洞掘削の解析に用いるべき、卓越するジョイントを除いた、連続体として取り扱われる基質岩盤の弾性定数を与えていると考えられる。

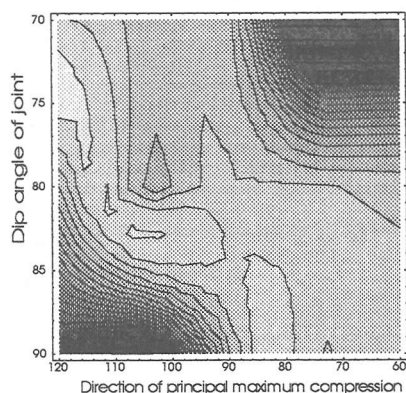


図 4: 誤差 (起伏 15 度、 $d/\bar{L}=0.05$)

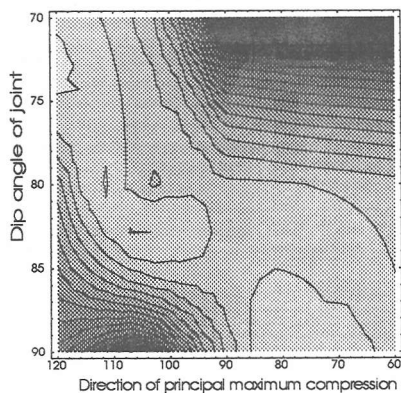


図 5: 誤差 (起伏 15 度、 $d/\bar{L}=0.1$)

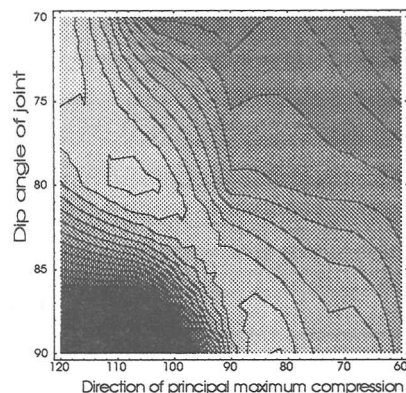


図 6: 誤差 (起伏 10 度、 $d/\bar{L}=0.005$)

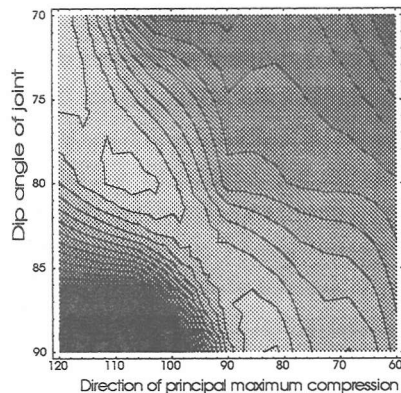


図 7: 誤差 (起伏 10 度、 $d/\bar{L}=0.01$)

4 まとめ

本研究では、例えば地下発電所空洞掘削に先行して行われるトンネルの掘削を原位置応力解放試験と捉え、トンネル掘削時に計測される内空変位の結果から、地下発電所空洞掘削解析に必要な入力パラメーターの同定を試みた。まず、内空変位の計測結果から、岩盤の等方的、あるいは連続体的変形成分と土被りの影響を除去するために、それぞれの内空変位の比をとり、解析値と比較した。内空変位の比に関して、計測値と一致させる解析パラメータを決定することができ、その時のジョイントの傾斜角は現場の調査結果と比較して妥当な

値となっていることが示された。また、現場計測・観察からは決定の困難な解析パラメータである、ジョイントの密度(ジョイントの平均間隔/ジョイントの有効寸法)やジョイントの起伏角度が推定できた。ここで、ジョイントの平均間隔が計測されていれば、ジョイントの有効寸法の推定が可能となる。ここでは初期地圧の方向のみを同定したが、本研究で提案する手法により、初期地圧の最大圧縮応力と最小圧縮応力の比についても同定が可能であると考えられる。本研究で提案する解析パラメータの同定方法は客観的、かつシステマティックな方法であるだけでなく、有用性が高いものと思われる。

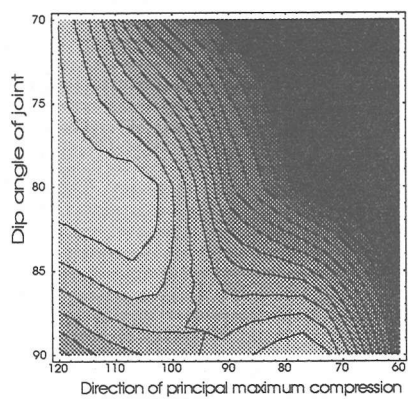


図 8: 誤差 (起伏 5 度、 $d/L=0.05$)

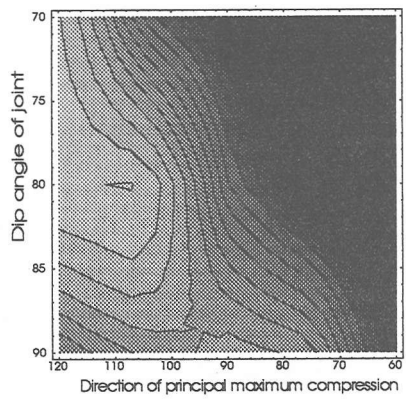


図 9: 誤差 (起伏 5 度、 $d/L=0.1$)

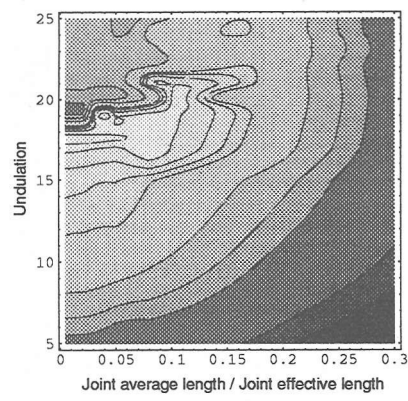


図 10: 誤差 (種々のジョイントの密度と起伏角度)

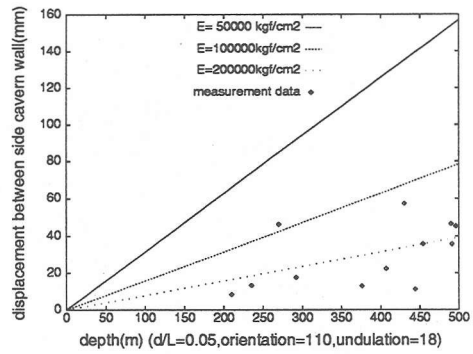


図 11: 土被りと内空変位の関係

参考文献

- [1] 吉田, 堀井. マイクロメカニクスに基づく岩盤の連続体モデルと大規模地下空洞掘削の解析, 土木学会論文集, 投稿中. (1995)
- [2] 吉田, 堀井, 宇野, 前島. マイクロメカニクスに基づく岩盤の連続体モデルと地下発電所空洞掘削の解析, 第 26 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集掲載予定, (1995)
- [3] Cai M. and Horii H. A Constitutive Model of Highly Jointed Rock Masses, *Mechanics of Materials*, 13, pp.217-246 (1992)