

神戸大学工学部 正会員 芥川 真一

神戸大学大学院 学生員 ○山下 涼

1. はじめに

トンネルにおける現場計測結果を評価する際に用いる逆解析について、ノルム最小化法により解を同定する場合に生じる問題点を挙げ、その解決法として、岩盤の強度定数を求めるための逆解析手法を提案する。そして、数値解析により、この手法の有用性を考察する。

2. ノルム最小化法に基づき解を同定する場合に生じる問題点

トンネルにおける現場計測結果を評価する際、地山を線形弾性体と仮定する逆解析手法においては、求める未知パラメーターが少ないため、計測変位から最小二乗法などの手法により安定解を求め得ることが知られている¹⁾。しかし、塑性挙動を示す地山においては弾性論に基づく逆解析を適用することには限界がある。そこで、ノルム最小化法により解を同定する非弾性ひずみを考慮した逆解析手法²⁾が開発された。この手法の特徴は、弾性ひずみをベースとし、計測変位に適合させるために必要な過不足分を非弾性ひずみとして足し合わせることで、一般に未知数が方程式数より多くなり、解の二乗和を最小とするというノルム最小化法により最適解を求めるものである。したがって、解は計測変位の局所性に影響を受ける。つまり、ノルム最小化法を適用すると、計測変位データが解析する領域全体に渡って均等に得られる場合は真のものに近い解を得られるが、位置的に偏ったデータを使用すると、変位計測点の近くでは解の値は大きくなり、遠くなるほど小さくなってしまふのである。実際のトンネルの掘削において得られるデータは高々地中変位計数本分であり、解析領域全体にむら無く得られることは難しい。そこで、ノルム最小化法を使わずにモール・クーロンの破壊基準を考慮した上で、非弾性な挙動を等価節点力に置き換えて適切な解を得る方法を提案する。

3. 解析モデルおよび解析の手順

本研究で用いる二次元モデルの有限要素メッシュを図-1に、計測変位の位置、地中変位計の番号を図-2に示す。図-2の斜線で囲まれた範囲は、ノルム最小化法に基づく非弾性ひずみの逆解析を行う場合の、非弾性ひずみの予想発生領域である。なお、人工的に計測データを計算するために行った順解析に用いた物性値を表-1に示す。

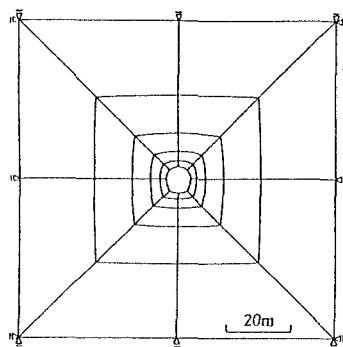


図-1 有限要素メッシュ

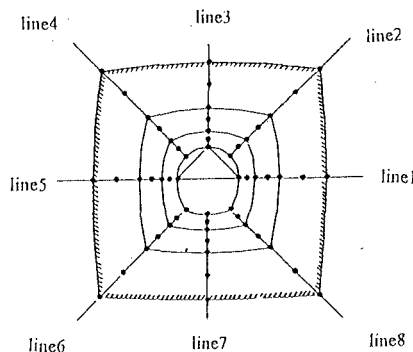


図-2 計測変位の位置および地中変位計の番号

表-1 解析に用いた物性値

パラメーター	数値
ヤング率	10000Mpa
ポアソン比	0.3
粘着力	1.0Mpa
内部摩擦角	30°

以下の要領で岩盤の強度定数を求めるための逆解析を行う。

- 1) 現場計測変位より、地山が弾性な挙動をしていると見なせる領域で得られたデータを抽出する。
- 2) 抽出したデータを用いて地山を弾性体と仮定した逆解析を行う。これにより、地山の初期応力および弾性係数の推定値を求め、各ガウスポイントの応力状態を求める。
- 3) 岩盤の粘着力 C 、内部摩擦角 ϕ の値を仮定する。

Shinichi AKUTAGAWA and Ryo YAMASHITA

4) 主応力面から $45^\circ + \phi/2$ の方向で定義された共役なすべり面でのせん断力 τ_i が, $\tau_{\max} = C + \sigma_i \tan \phi$ で表されるクーロンの破壊基準を越えていれば, そのガウスポイントは弾塑性状態にあり, $\Delta\sigma_L = \tau_{\max} - \tau_i$ の大きさの応力差が発生している. 越えていなければ弾性状態にあると判断する.

- 5) 破壊面で発生する応力差をもとの座標に変換し, 仮想仕事の原理³⁾より, 等価節点力 f_p を求める.
- 6) 等価節点力 f_p を実際に存在する掘削相当外力に加えて, 弾性体の順解析を行い, 節点変位を求める.
- 7) 求めた節点変位と全計測変位との誤差を求める.
- 8) C, ϕ の組み合わせを変えてステップ 3) から 7) を繰り返し, 誤差が最小となるものを解とする.

4. 逆解析結果の評価と今後の課題について

この逆解析手法によって得られた粘着力は 0.1Mpa であり, 内部摩擦角は 30° であった. これは順解析に用いた物性値 (正解値) に近い値である. また, 各解析における最大せん断ひずみの分布図で, 解析モデルを順解析したものを図-3 に, ノルム最小化法を用いた逆解析で, 地中変位計が 8 本の場合のものを図-4 に, 4 本の場合のものを図-5 に, 岩盤の強度定数を求めるための逆解析で, 地中変位計が 8 本の場合のものを図-6 に, 4 本の場合のものを図-7 に示す. 4 本の場合適用した地中変位計番号は, line1,3,5,7 である. これらの図から, ノルム最小化法を用いた逆解析では解が計測変位の局所性に影響を受けているが, 岩盤の強度定数を求めるための逆解析ではその影響が少ないことがわかる. 以上の結果より, 本手法は, はじめに述べたノルム最小化法の弱点である変位の局所性による影響を克服できるものであるが, 今後は実測データの分析を通してその実用性を検証していく予定である.

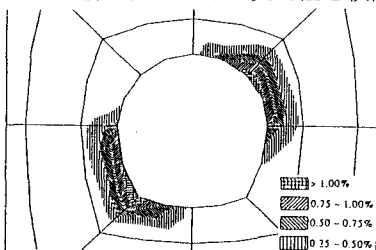


図-3 順解析

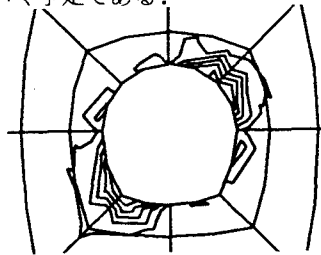


図-4 ノルム最小化法 (8 本)

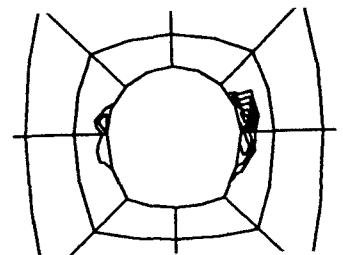


図-5 ノルム最小化法 (4 本)

図のひずみ分布は外側から
 $< 0.25\%$
 $0.25 \sim 0.50\%$
 $0.50 \sim 0.75\%$
 $0.75 \sim 1.00\%$
 $> 1.00\%$
 である.

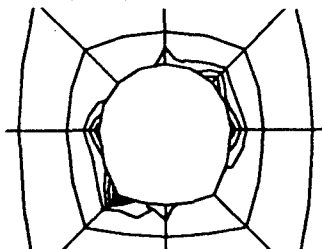


図-6 強度定数を求めたもの (8 本)

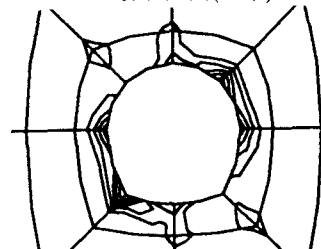


図-7 強度定数を求めたもの (4 本)

参考文献

- 1) 櫻井春輔, 武内邦文: トンネル掘削時における変位計測結果の逆解析法, 土木学会論文報告集, 第 317 号, pp.137-45, 1983
- 2) 櫻井春輔, 芥川真一, 徳留修: ノルム最小化法に基づく非弾性ひずみの逆解析, 土木学会論文報告集, No.517/III-31, pp.197-202, 1995
- 3) 三好俊郎: 有限要素法入門, 培風館, 1978