

弾性解析結果を有効に利用した非線形問題における 逆解析の一例

Incorporation of elastic strain distribution for improvement of back analysis in nonlinear problems

芥川真一¹・長谷川明子²・李在浩²
S. Akutagawa, A. Hasegawa and J. H. Lee

¹正会員 Ph.D. 神戸大学助教授 工学部建設学科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)
cadax@kobe-u.ac.jp

²学生会員 神戸大学大学院自然科学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

A useful technique for improvement of back analysis for nonlinear problems is introduced. A series of algorithms developed for linear and nonlinear problems for underground excavation work quite well to certain satisfaction level. However, as long as a set of nonlinear problems are concerned, the quality of back analysis obtained by existing methods is not necessarily good enough. The objective of the work presented in this paper is to improve the quality of back analysis for nonlinear problems.

Key Words : back analysis, nonlinear problem, elastic solution, displacement field

1. はじめに

非線形問題に於ける変位場の同定は非常に重要な問題である。NATM トンネルの建設に当たっても、そのような場面に遭遇することが多い。土被り高さがトンネル径と同程度、あるいは2倍程度までのトンネルにおいては掘削によってトンネル周辺から地表面に向かってせん断帯が形成されることがある¹⁾。このような問題において、著者らはこれまでに幾つかの逆解析手法が開発され実際の問題において適用してきた^{2), 3), 4), 5)}。これらの手法においては様々な理由で発生する非線形挙動による不均一な変形挙動を非弾性ひずみの逆解析という方法で再現することにより現場周辺のひずみ分布を求める手法であった。ただ、この手法では計測変位が行われた場所の周辺だけで極端に集中したひずみ場、従って応力場、が得られるという不都合な点があり、これが懸案事項となっていた。

この点を克服するために、本論文では弾性順解析を仮に実施し、その時に得られるひずみ分布の情報を利用して非線形問題における逆解析の解の精度向上を試みたので、それを報告する。

2. 逆解析の基本概念

図-1 に概念図を示す。仮の弾性変形挙動を実際に遭遇する非線形な変形挙動に重ね合わせると図のようになることが多い。

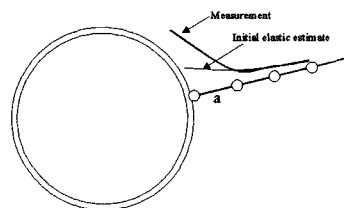


図-1 線形な変形挙動と非線形なそれの比較

これまでに著者らが開発した非線形問題における逆解析手法では、弾性挙動とずれが生じている部分の変形挙動を調整するために、非弾性ひずみを発生させ、ある意味で強引に変位場を合わせる手法（以後、旧手法と呼ぶ）を取っていた。

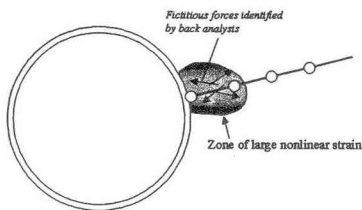


図-2 非弾性ひずみの集中的発生

図-2 にその特徴を示す。非弾性ひずみの発生については、計測された場所での変形挙動を再現するために、最も効率のよい（具体的には未知数ベクトルのノルムが最小になることを意味する）状態でそれらが発生するメカニズムを採用していた。従って極端にひずみが変位計周辺に集中し応力場を乱す傾向があった。しかし、実際の問題においては自然に発生する応力場に従い、トンネル周辺にひずみが発生するため、たとえば図-3 に示すように「理にかなった」ひずみ場が発生するのが常識である。

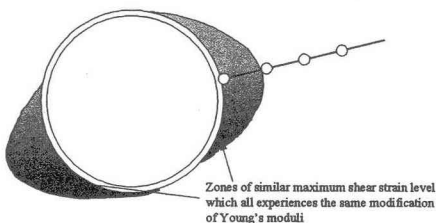


図-3 通常のひずみ分布

このような分布が期待されることがある程度分かっているならば、非弾性ひずみの「局所的変位再生能力」に期待せず、むしろ「同程度のひずみが発生しているゾーンにおいて同じように弾性係数を下げる」ような方法のほうが結果的に合理的なひずみ分布、ならびに応力分布を求めることができる可能性があることが分かる。

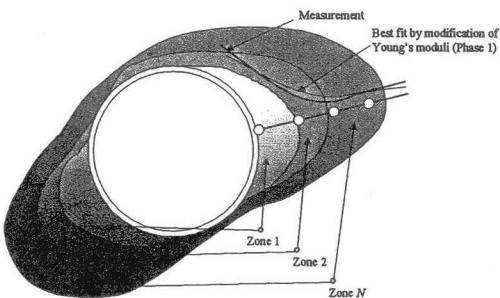


図-4 ひずみのレベルに応じたゾーニング

実際に生じている非線形問題のひずみ分布は原則的には未知であるものとするが、図-4 に示しているように、仮に弾性計算を実施したとして、そのときに得られるひずみ分布を利用して同程度のひずみが発生しているゾーンを複数認知したとする。このとき、厳密ではないが、そのようなゾーンごとに弾性係数を同程度ずつ下げる操作を行うことによって、変位場をすこしでも計測値に近づけることは可能である。このとき、あるゾーンの新しい弾性係数 E_{new} は、現在の弾性係数 $E_{current}$ と、その区間で計測されている変位と仮の弾性計算による変位の比から以下のように唆定義することができる

$$E_{new} = E_{current} * u_{computed} / u_{measured} \quad (1)$$

この弾性係数の操作は、与えられたゾーン内で最低 1 個でも計測変位があれば、それが属するゾーン全体に対して行えることがわかる。このオペレーションを繰り返し計算に持ち込むことによって、各ゾーンの最適な弾性係数を比較的簡単に求めることができる。一旦、繰り返し計算が収束すればそこで逆解析を終えてもよい。あるいは、わずかな変位の誤差が残っている場合にはその段階からノルム最小化法をもちいて変位のギャップをゼロにしてもよい。この流れ（以下、新手法と呼ぶ）を図-5 に示す。

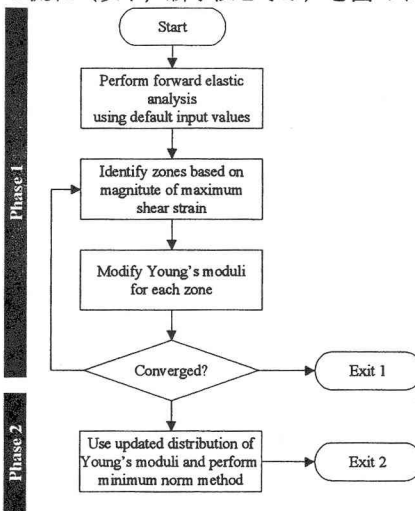


図-5 新手法のアルゴリズム

3. 数値実験の概要

図-6 に数値実験に用いた FEM メッシュを示す。直径 10m の模擬トンネルの掘削において図に示されているような変位計測がされたとする。

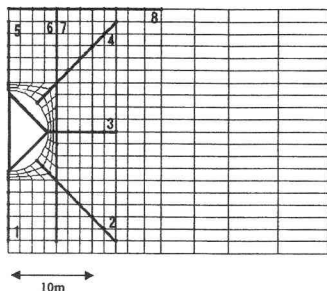


図-6 数値実験に用いたFEMメッシュ

メッシュの上端は自由端，鉛直境界は縦に移動でき，下端は左右に移動できる境界設定である．まず，弾性順解析を実施し，その結果のうち「3」の計測ラインに注目する（図-7）．この時に用いた材料定数などは表-1に示す．

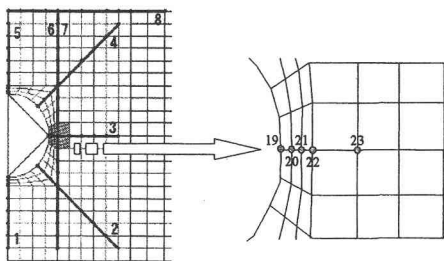


図-7 変位計測の詳細

表-1 テスト問題に用いた物性値

Parameters	Value
Young's modulus (MPa)	1000
Poisson's ratio	0.3
Cohesion (MPa)	0.1
Friction angle (degrees)	30
Unit weight (MN/m ³)	0.026

4. 逆解析結果

図-7 に示している変位計測セグメント（19 から 23 までの 4 つの区間）において逆解析の収束計算の結果，どのような変位が得られたかを図-8 に示す．

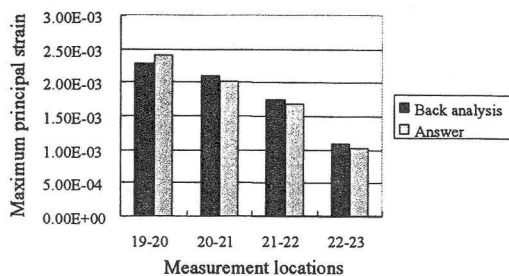


図-8 4つの変位計測区間の変位量の比較

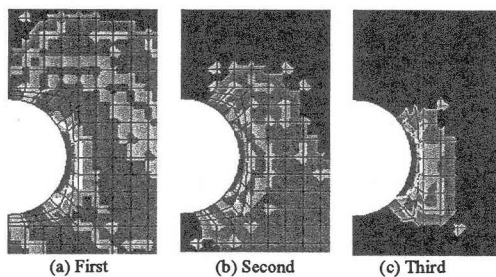


図-9 ひずみレベルごとに分けた 10 個のゾーン形状の繰り返し計算途中での変化の様子

図-9 は繰り返し計算途中でひずみレベルが同一レベルであるとみなされた 10 個のゾーンの形状がどのように変化していったかを示す．また，図-10 はその時にそれぞれのゾーンで弾性係数（単位は MPa）が推移した様子を示す．

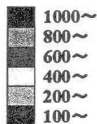
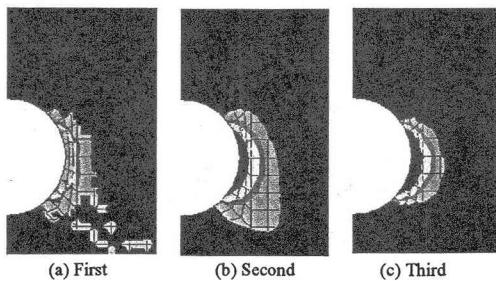


図-10 繰り返し計算途中での弾性係数の分布の変化

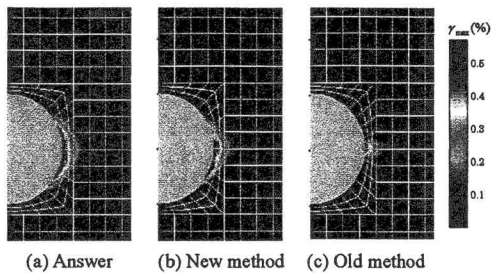


図-11 非線形問題における真の解と逆解析解の比較

収束計算で得られた弾性係数分布を用いて、フローチャートの Phase2 を実施し、最終的に得られたひずみ分布を図-11 に示す。真の解(a)と比較し、新手法が旧手法に比較して格段に精度良くひずみ分布を同定できていることが分かる。

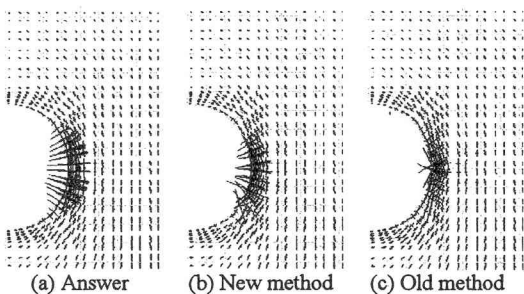


図-12 主ひずみ分布

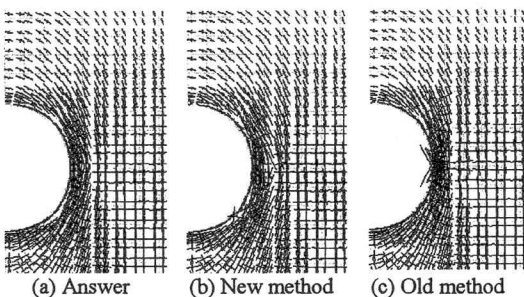


図-13 主応力分布

5. おわりに

非線形問題の逆解析となると、通常仮のインプットパラメータで実施した弾性順解析の情報は意味の

無いものとして特に注意を払われることも無かった。しかし、本論文では、弾性順解析の情報が「真の挙動」とは異なる場合でも、ある程度の「善良な逆解析のガイダンス情報」となり得ることを示した。ここで示した手法は地山内に変位計測結果があれば実施できる。また、同レベルのひずみが期待されるゾーン内で最低 1 個の変位計測があれば実施できるので、比較的変位計測数の少ない場合にも適用が可能である。今後は、実際の現場データにおいて実証を進める予定である。

参考文献

- 1) Hansmire, W. H. & Cording, E.J. 1985. *Soil tunnel test section: Case history summary. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol.111(11), 1301-1320.
- 2) Akutagawa, S., Takeuchi, K., Shimura, T. & Sakurai, S. 2000. *A comparative study on the performance of back analysis procedures for identification of nonlinear deformational behavior of a rock mass around a large underground powerhouse cavern. Proceedings of the 4th North American Rock Mechanics Symposium, Seattle*, 1035-1041.
- 3) Hojo, A., Nakamura, M., Sakurai, S. & Akutagawa, S. 1997. Characterization of non-elastic ground behavior of a large underground powerhouse cavern by back analysis. *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, Vol.34:3-4, Paper No008.
- 4) Sakurai, S., Akutagawa, S., Takeuchi, K., Shinji, M. & Shimizu, N. 2003. Back analysis for tunnel engineering as a modern observational method. *Tunnelling and underground space technology*, Vol.18, Nos.2-3, April-June 2003, 185-196.
- 5) Sakurai, S., Akutagawa, S. & Tokudome, O. 1995. *Back analysis of non-elastic strains based on the minimum norm solution. Journal of JSCE*, No517/III-31, 197-202.