

(57) 土被りが非常に小さい地山における逆解析手法によるトンネル掘削時の安定性の評価

応用地質株式会社 正会員 ○進士 正人
 応用地質株式会社 正会員 近藤 達敏
 応用地質株式会社 正会員 吉田 真一

1. まえがき

トンネルに代表される地下空洞の設計に当たっては、原位置試験、室内試験などを行い、その結果に基づいて地山をモデル化するとともに数値解析を実施し、トンネルを掘削した際の地山並びに支保部材の挙動を予測する必要がある。しかし、土被りが非常に小さくかつ脆弱な地盤にトンネルを施工する場合、先に述べた試験結果を用いて数値解析を実施し、挙動予測を行なっても、実際にトンネル掘削を行った場合の挙動と異なることが多い。この原因は、地盤中に潜在する不連続性ならびに不均質性並びにトンネル掘削に伴って惹起される地盤の異方性が顕在化することにある。それに加えて、構造物の寸法に対する地盤の不連続性を生じさせる寸法との相対的な関係を掘削前の試験結果から予測することが非常に困難であることなどにこの原因が考えられる。従って、より精度の高い設計を行うためには、試験の結果をこれまでの経験によって解釈し、その解釈結果に基づき地山のモデル化を行い数値解析を実施する必要がある。そして、その解釈結果の妥当性を検証するためにトンネル掘削に合わせて現場計測を実施して周辺地山と支保のトンネル掘削による挙動を明らかにし、計測結果が設計時に予測した挙動と著しく異なるときには、計測結果から地山のモデル化の修正を行い、その修正したモデルによる数値解析を実施し、必要であれば設計変更も行いながら安全かつ経済的な施工を行う必要がある。

櫻井は、計測結果から地山のモデル化をおこなうフィードバックシステムの一方法として、現場に設置できる程度のマイクロコンピュータを用いて計測結果を”逆解析”することによって、地山周辺のひずみ分布を推定し、地山材料の一軸圧縮強度と弾性係数との関係から得られる”限界ひずみ”と比較することによって安定性を評価する地下空洞掘削時の情報化施工システムを提案している¹⁾。以下、この逆解析で使用するモデルを”連続体モデル”と呼ぶ。また、土被りが小さい地山中にトンネルを掘削した場合に生じる不連続挙動を取り入れたモデル（以下、このモデルを”不連続体モデル”と呼ぶ。）も考案している²⁾。すなわち、このモデルでは、不連続・不均質性を表す領域に連続体力学における異方性の応力-ひずみ関係を導入することによりより精度の高い逆解析が可能となる。

本論文においては、土被りの小さいトンネルの実際の施工例に連続体並びに不連続体モデルを用いた逆解析を適用し、土被りが小さい場合における、ベンチ工法並びに中壁工法などの掘削方式の違いによる地山挙動の違い、すなわち地盤モデルの相違を明らかにする。

2. 土被りが小さいトンネルにおける適用例

2. 1 適用例-1³⁾

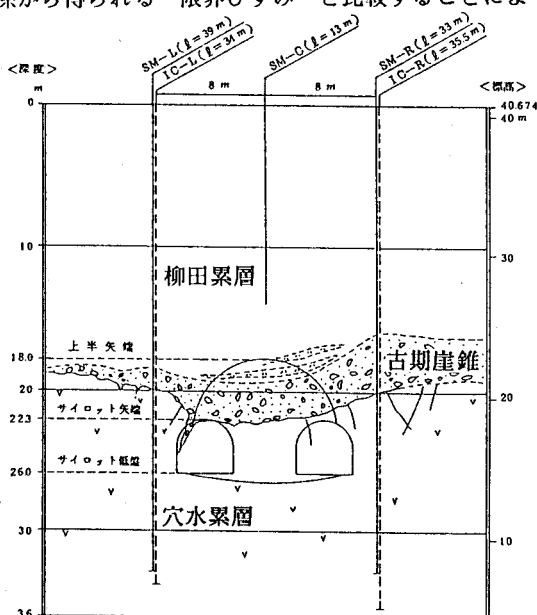


図-1 トンネルと計測機器との位置関係

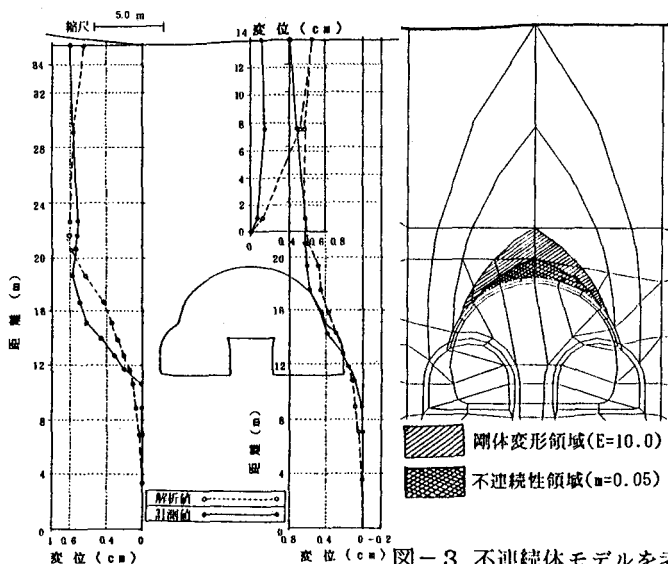


図-2 連続体モデルを使った時の計測値と逆解析結果の比較

このトンネルは、国道の改良を目的として計画された2車線道路トンネルである。トンネル坑口から240m付近には地表部に民家が密集しており、土被りが14m前後と浅いためトンネル掘削にともなう地表面沈下あるいは切羽崩壊にともなう陥没並びにトンネル切羽の自立性、掘削に伴うトンネル周辺地山の塑性化などが懸念された。そこで、できるだけ地表沈下を抑制することを目的として側壁導坑先進、側壁コンクリートの仮巻を行った後、上半部の掘削を行いキーストンプレートによる仮巻コンクリートの打設を実施したベンチ工法を採用した。このような工法の適非を検討するために、図-1に示すような現場変位計測を行った。図中、SMは、1/1000mmの精度で鉛直方向の変位を計測することが可能なスライディングマイクロメーターを示し、ICは、1/100mmの精度で水平方向の変位を計測する傾斜計の設置位置を示す。

まず、連続体モデルを用いて逆解析を行った。計測値と逆解析によって得られた計算変位の比較図を図-2に示す。なお、紙面の都合上ここでは、スライディングマイクロメーターの計測結果と解析結果の比較のみ示した。図中、●印実線は計測値を、○印点線は、逆解析によって得られた計算値を示す。逆解析によって得られた結果を表-1に示す。図から明らかなように左右のスライディングマイクロメーターの計測値並びに左右の傾斜計の計測値は、計算値と充分良く一致しているが、トンネル天端のスライディングマイクロメーターの計算値は、計測値

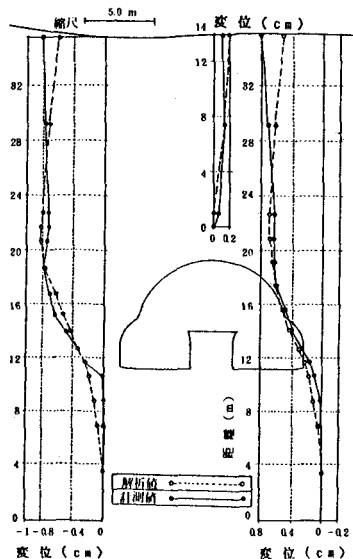


図-4 不連続体モデルを使った時の計測値と逆解析結果の比較

表-1 逆解析結果 (適用例-1)

	通常の逆解析結果	不連続挙動を考慮した逆解析結果
σ_{zg}/E	-0.4546×10^{-2}	-0.2945×10^{-2}
σ_{yg}/E	-0.2482×10^{-2}	-0.2037×10^{-2}
τ_{xyg}/E	-0.1618×10^{-4}	-0.6095×10^{-4}
σ_{yg}	$2300\text{cm} \times 2.0\text{gf/cm}^3 = -4.60\text{kgf/cm}^2$	
E	1853 kgf/cm^2	2259 kgf/cm^2
σ_{xg}	-8.43 kgf/cm^2	-6.65 kgf/cm^2
τ_{xyg}	-0.03 kgf/cm^2	-0.137kgf/cm^2

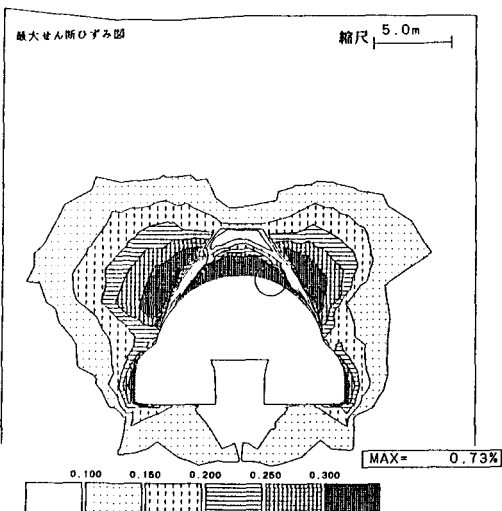


図-5 不連続体モデルを使った逆解析によって得られた最大せん断ひずみ分布

よりはるかに大きな変位を示している。これは、通常の連続体モデルでは、土被りが浅いトンネルを掘削した場合の特徴であるトンネル直上部分に局部的な緩み並びに剛体変形を表現することができないことを示している。

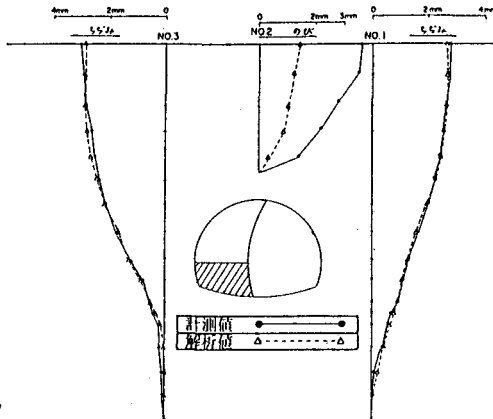


図-6 連続体モデルを使った時の計測値と逆解析結果の比較

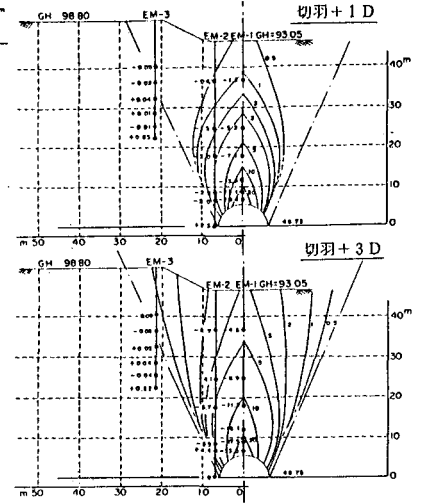


図-7 切羽の進行に伴う緩み領域進展⁵⁾

次に、不連続体モデルをもちいて逆解析を行った。図-3に不連続性を考慮した領域並びにその値を示す。図-4(a)、(b)にこの比較を示す。逆解析によって得られた結果を表-1に示す。図から明らかように逆解析結果は、工学的に十分な精度で計測変位を表現することができる。逆解析によって得られた柳田累層の弾性係数は、原位置試験結果よりも若干大きい値となったが、これは、逆解析が吹き付けコンクリート並びに側壁コンクリートの剛性を考慮せず見かけの弾性係数を推定しているためである。このときの最大せん断ひずみの分布を図-5に示す。図から明らかなようにトンネル直上に緩み領域並びにひずみ量の小さい剛体変位領域が生じていることが分かる。

2. 2 適用例-2⁴⁾

このトンネルは、土被りが17メートルから0.5メートルと非常に小さく、地上部には民家が密集しているといういわゆる”都市型”の2車線道路トンネルで南九州のシラス中に施工された。掘削方法は、できるだけ地表沈下を抑える目的で中壁式NATM工法が採用された。地質は、NATM区間225メートルの内、土被りが平均17メートル程度でN値30~50の一次シラス（地上部は住宅地）の中を掘削する場合がほとんどであったが、一部に、土被り5メートル程度のN値1~15の二次シラス、沖積層、盛土（地上部は道路・建設予定地）が局部的に分布する箇所もあった。計測断面は、図-6に示すように住宅地の近傍にスライディングマイクロメーターを3測線設置し、トンネル掘削時の一次シラスの地山挙動を計測し、トンネル掘削中の安定性を評価すると共に、当初設定した地山モデルの妥当性を検討するために逆解析を実施した。

前節と同様に、まず連続体モデルで逆解析を行った結果を図-6に示す。図中、●印実線は計測値を、○印点線は、逆解析によって得られた計算値を示す。また、この時の逆解析の結果を表-2に示す。図から明らかなように、左右のスライディングマイクロメーターによる計測変位と逆解析による計算変位は、非常に良く一致する。しかし、トンネル直上部の計測変位は、逆解析によって得られた計測変位の2倍程度の大きな相対変位がなければ一致しない。すなわち、トンネル直上にゆるみが生じ、弾性連続体では、その緩み量を表現することができないことが明らかとなった。別のシラストンネルにおける切羽の進行に伴う緩み領域の進展の状況を図-7に示す⁵⁾。図から明らかなようにトンネル直上にはほぼ卵形にゆるみ領域が生じ応力解放（切羽の進行）に伴い、その領域が進展し、村山、松岡が行った落し戸の実験⁶⁾と同様な緩み領域が生じていることが分かる。

次に、不連続体モデルを用いた逆解析を行った。図-8に不連続性を考慮した領域及びその値を示す。また、不連続性の方向は、卵に沿った方向で与えた。この逆解析によって得られた計算変位と計測変位との比

較図を図-9に示す。図から明らかなように、すべての計測線において、計測変位と逆解析による計算変位は、工学的な精度で充分良く一致する。同様に、この時の逆解析の結果を表-2に示す。表から明らかなように逆解析結果は不連続性を考慮した逆解析におけるせん断力が若干通常の逆解析結果より大きくなる以外は、充分な精度で一致していることが分かる。

不連続性を考慮した逆解析結果から得られた最大せん断ひずみ分布図を図-10に示す。図から明らかなように、トンネル直上にひずみが増加する領域が生じることがわかる。

3. 結論

本文では、櫻井の提案している土被りの浅いトンネルの特徴を考慮した逆解析法を、実際の現場計測結果に適用した。この結果、不連続体モデルを使った新しい逆解析手法では、計測変位を充分良く表現することができ、連続体力学を用いても地山の緩み、剛体変位を表現することができることを示した。また、逆解析を行うことによって地盤の力学モデルを決定することが可能となった。

参考文献

- 1) 櫻井春輔、進士正人、「マイクロコンピュータによる地下空洞掘削時の安定性の評価」、土木学会論文集、第358号/Ⅲ-3、pp.37-46、昭和60年6月。
- 2) 櫻井春輔、清水則一、井根健、「連続体力学による不連続性地盤の解析」、土木学会第41回年次学術講演会、pp.529-530、昭和61年11月。
- 3) 坂口皆栄、近藤達敏、進士正人、「新宇出津トンネルにおける計測と逆解析による地表面沈下の予測」、第19回岩盤力学に関するシンポジウム、pp.341-345、昭和62年2月。
- 4) 瀬戸口 忠臣、永倉 彰夫、吉田 真一、「一般国道3号鹿児島バイパス武岡トンネルの工事報告」、九州技報(第2号)、昭和62年。
- 5) 羽田 忠彦、徳永 康一、「住宅団地直下のシラス層をNATMで掘る」、トンネルと地下、第18巻12号、pp.33-42、昭和62年。
- 6) 村山 朗朗、松岡 元、「砂質土中のトンネル土圧に関する基礎的研究」、土木学会論文報告集第187号、pp.95-108、昭和46年3月。

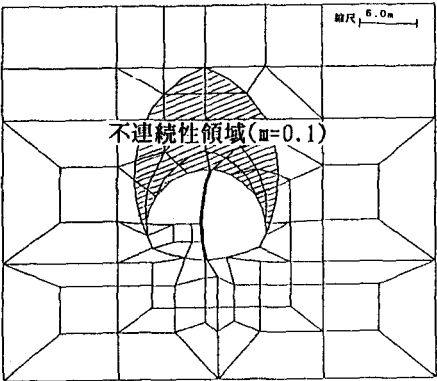


図-8 不連続体モデルを考慮した領域とその値

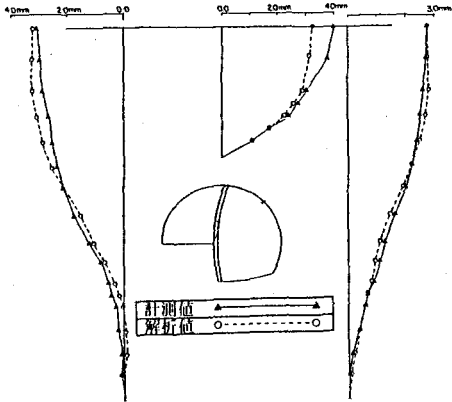


図-9 不連続体モデルを使った時の計測値と逆解析結果の比較

表-2 逆解析結果(適用例-2)

	通常の逆解析結果	不連続挙動を考慮した逆解析結果
$\sigma_{x\theta}/E$	-0.1562×10^{-3}	-0.1429×10^{-3}
$\sigma_{y\theta}/E$	-0.4492×10^{-3}	-0.4431×10^{-3}
$\tau_{xy\theta}/E$	-0.7042×10^{-4}	-0.1141×10^{-3}
$\sigma_{y\theta}$	$1530\text{cm} \times 2.0\text{gf/cm}^3 = -3.06\text{kgf/cm}^2$	
E	6878 kgf/cm ²	6905 kgf/cm ²
$\sigma_{x\theta}$	-1.075kgf/cm^2	-0.987kgf/cm^2
$\tau_{xy\theta}$	-0.484kgf/cm^2	-0.788kgf/cm^2

最大せん断ひずみ図

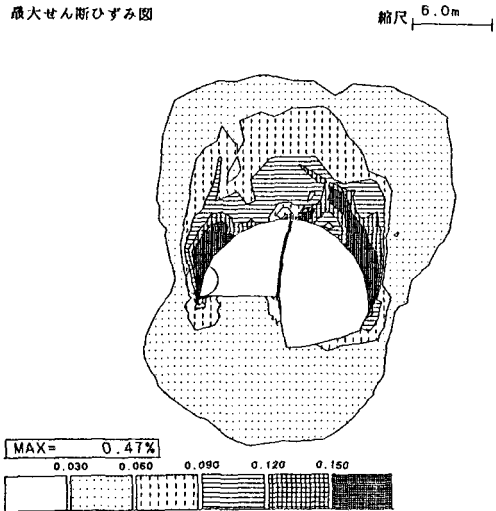


図-10 不連続体モデルを使った逆解析によって得られた最大せん断ひずみ分布

- (57) Stability assessment by means of back analysis procedure for the ground surrounding tunnel in the very shallow overburden

OYO Corporation	Masato	SHINJI
	Tatsutoshi	KONDOH
	Shinichi	YOSHIDA

summary

This paper deals with applications of back analysis procedure for monitoring a stability of a very shallow tunnel during a construction. In the case of very shallow tunnels, the ground behave as discontinuous materials. Especially, the discontinuity was limited from the surface to the crown of the tunnel.

However, the ordinary back analysis procedure proposed Sakurai et al. seems to be inapplicable to the case of a very shallow tunnel, because of this back analysis method assume a ground material to be a continuous body. Therefore Sakurai et al. improve the back analysis procedure to overcome this inapplicability. The new back analysis procedure adopts an unisotropic stress-strain relationship to express the discontinuity of the ground. By using this relationship, the area and status of the discontinuity were determined.

In this paper, displacement measurements of fields of very shallow tunnels were applied by using the new back analysis procedure. The area and status of the discontinuity that express as the ratio of the shear modulus to the modulus of elasticity is obtained by this new back analysis procedure. It was clear that this procedure is capable of assessing the mechanism of discontinuity of the ground.