

## トンネルにおける三次元逆解析法

近畿大学大学院 学生会員 ○稗田 洋平  
近畿大学 正会員 久武 勝保

## 1. 結論

地下構造物の建設において、建設地域の調査は重要である。しかし、全域の詳細調査は技術的、経済的な理由から必ずしも十分行われていない現状である。そこで、施工時の実測変位などを用いて、地盤物性値などを逆解析することにより、事前調査で得た地山評価の修正などが行われている。そこで本研究では、実用的な逆解析法の開発を目的とし、三次元 FEM 解析とニュートン・ラフソン法による反復計算を組み合わせ、地盤の初期応力(6成分)と物性値(弾性係数とポアソン比)を三次元逆解析する方法を提案し、その妥当性について検討する。

## 2. 解析手法

**2.1 概要** 手順は図 1 に示す通りである。まず、未知の地盤定数(弾性係数, ポアソン比)を仮定して順解析を行う。つぎに、解析変位と実測変位が一致するまで繰り返し計算をおこない、初期応力 6 成分, 弾性係数, ポアソン比を推定する。

**2.2 初期応力の逆解析手法** 実地盤のトンネル掘削で生じた、ある点  $P$  の変位  $u_p$  が計測されているとする。また、FEM で実地盤をモデル化し、単位応力をそれぞれ作用させてトンネル掘削解析を行い、それにより点  $P$  の変位  $v_p$  が全て得られているとする。このとき、実地盤に作用する初期応力は  $u_p$  と  $v_p$  によるマトリックスを解いて求めることができる。すなわち、未知の初期応力 6 成分は、6 つの計測変位  $u_p$  と単位応力解析から求められる 36 成分の変位  $v_p$  から逆解析できることになる。

**2.3 弾性係数の逆解析手法** ある点  $P$  の実測変位を用いて初期応力 6 成分を 2.2 で求めることができるので、この応力を用いて  $P$  点以外の  $Q$  点の変位を求めることができる。その場合、仮定した弾性係数が真値と異なれば、解析変位  $v_q$  と実測変位  $u_q$  に誤差が生じる。そこで、その誤差が最小になる弾性係数をニュートン・ラフソン法を用いて求める。

**2.4 ポアソン比の逆解析手法** 初期応力 6 成分と弾性係数を 2.3 で求めることができるが、本手法ではあらかじめポアソン比を仮定して解析を行うため、計測点  $P$  および  $Q$  以外の計測点  $R$  において実測変位  $u_r$  と解析変位  $v_r$  に誤差が生じる。よって、ポアソン比の逆解析は弾性係数収束時における、計測点  $R$  の変位誤差と仮定ポアソン比の関係より、その誤差が 0 となるポアソン比を求めればよい。

## 3. 解析結果と考察

この手法を用い、図 2, 3 のようなトンネルに対して解析を行った。なお、この地盤は均一地盤で真の弾性係数は 150MPa, ポアソン比は 0.22 である。この地盤に対して表 1 の真の初期応力を与えて順解析をし、図 3 の領域Ⅲの掘削によって生じる変位量を実測変位量として求めておく。

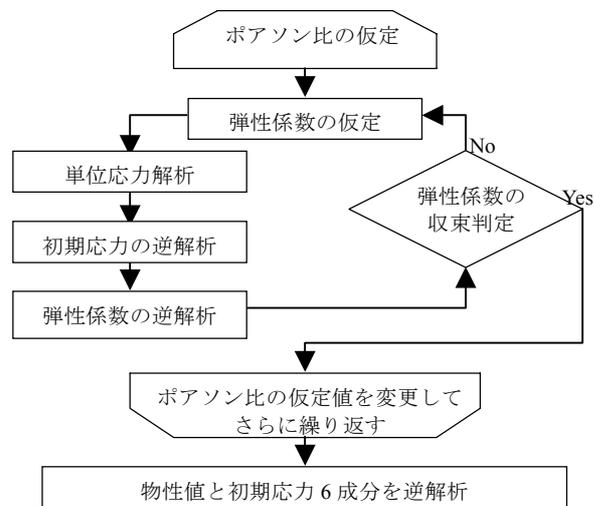


図 1 逆解析手順

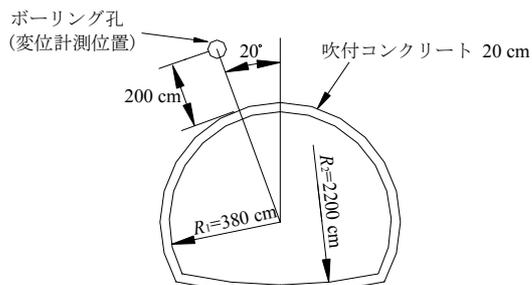


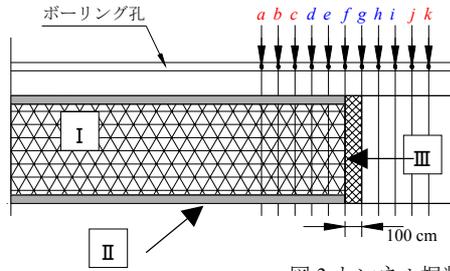
図 2 トンネル断面

キーワード 逆解析 有限要素法 ニュートン・ラフソン法 三次元

連絡先 : 〒577-8502 大阪府東大阪市小若江 3-4-1 tel 06-6721-2332

表1 初期応力

$\sigma_{11}$	-1.80 MPa
$\sigma_{22}$	-3.60 MPa
$\sigma_{33}$	-2.10 MPa
$\sigma_{12}$	-0.30 MPa
$\sigma_{23}$	-0.50 MPa
$\sigma_{31}$	-0.20 MPa



施工過程  
 I：領域Ⅰの掘削  
 II：吹付コンクリート施工(Ⅱ)  
 III：領域Ⅲの掘削

図3 トンネル掘削図

3.1 図3中の計測点 a~k の沈下量を用いた場合 実測沈下量と解析沈下量の誤差が最小になるよう計測点 Q(a,b,c,j,k のうち1点)を用い繰り返しニュートン・ラフソン法で弾性係数を推定した過程を、ポアソン比の仮定値別に図4に示す。図5に仮定ポアソン比と収束弾性係数の関係を示す。図6に弾性係数収束時における計測点 R(Q で用いなかった1点)の変位誤差と仮定ポアソン比の関係を示す。これより、誤差が0になる場合のポアソン比を真のポアソン比として求めることができる。つぎに、図5の結果を用いれば、以上で求めたポアソン比に対応する収束弾性係数を得ることができるので、これらの値から計測点 P の6成分の沈下量を用いて初期応力6成分を求めることができる。あるいは、各ポアソン比を与えて収束した結果を図7のように示しておけば逆解析で得られたポアソン比を図7に適用して初期応力6成分の逆解析が可能となる。以上の結果を表2に(i)として示す。

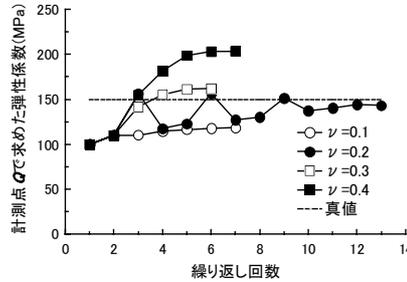


図4 弾性係数収束計算

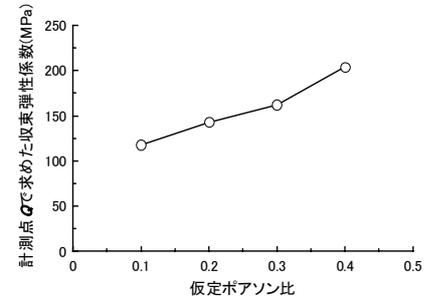


図5 収束弾性係数

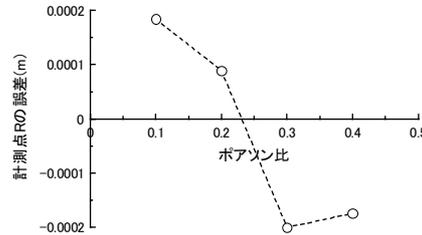


図6 ポアソン比の逆解析

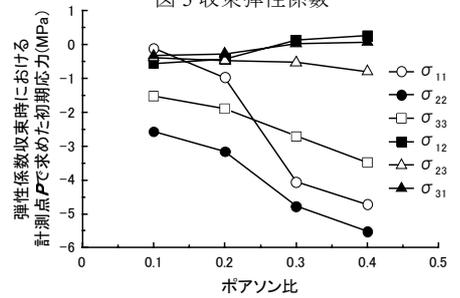


図7 初期応力の逆解析

たポアソン比に対応する収束弾性係数を得ることができるので、これらの値から計測点 P の6成分の沈下量を用いて初期応力6成分を求めることができる。あるいは、各ポアソン比を与えて収束した結果を図7のように示しておけば逆解析で得られたポアソン比を図7に適用して初期応力6成分の逆解析が可能となる。以上の結果を表2に(i)として示す。

3.2 変位量に誤差が含まれる場合 計測された沈下量に誤差が含まれていると想定し上記と同様の解析を行った。このときの誤差は、変位量の±2.5%の範囲内でランダムな値を算出して与えた。その結果は実用に耐え得るものではなかった。そこで、a~k点の変位量として3方向の変位成分を用いることにした。各点の変位成分の方向は次の通りである。計測点 P(d,g:鉛直 e,h:水平 f,i 軸), 計測点 QとR(a,b,c,j,k:鉛直(それぞれ1点))。この結果より3方向の変位成分を用いれば実用的な精度を確保できることが確認できた。その結果を表2に(ii)として示す。

表2 真値と逆解析値

逆解析した各値を真値と比較すると、表2(i)の場合は  $\sigma_{23}$  が最大の誤差を生じ約20%。その他は5%前後である。表2(ii)の場合は  $\sigma_{12}$ ,  $\sigma_{31}$  が最大で約20%、その他は5%前後に収まっている。

4. 結論

本逆解析手法で、実測変位量に誤差を含む場合も誤差を含まない場合と同程度の精度で地盤の初期応力、物性を求めることができた。

5. 参考文献

久武勝保・塹江譲・山崎康裕：地下空洞の三次元逆解析法の開発，トンネル工学研究論文・報告集，第12巻，p.1-8，2000。

	真値	変位量に誤差を含んでいるか？	
		含まない場合の解析値(i)	含む場合の解析値(ii)
ポアソン比	0.22	0.238	0.226
弾性係数(MPa)	150	161.6	139.4
$\sigma_{11}$	-1.80	-1.859	-1.802
$\sigma_{22}$	-3.60	-3.785	-3.532
$\sigma_{33}$	-2.10	-2.285	-2.126
$\sigma_{12}$	-0.30	-0.284	-0.245
$\sigma_{23}$	-0.50	-0.599	-0.452
$\sigma_{31}$	-0.20	-0.208	-0.151