

(63) 逆解析を用いた地下空洞側壁部の挙動推定について

機関 組 技術研究所 正会員 ○蓮井 昭則
同 上 正会員 山下 亮
同 上 正会員 世一 英俊

1. まえがき

トンネルや地下発電所などの地下構造物の施工において、周辺岩盤の現状を把握し、掘削の進行に伴う将来の変化を予測することによって施工管理を行うことは安全性や経済性の面から重要である。計測結果（特に変位）から施工へフィードバックさせる方法については、いくつかの提案がなされており、最近では、現場での計測結果を用いて逆解析を実施し、その結果を破壊ひずみと比較する方法も提案されている。

本報告では、桜井らによって提案されている直接逆解析法に若干の手を加え、変位計測結果の掘削を考慮した逆解析手法を述べ、本手法を用いたある地下空洞の側壁部における挙動予測結果について述べるものである。なお、計測は空洞の側壁より一方向に、しかも一測線で得られた変位量のみを採用しており、逆解析にとっては厳しい条件を想定したものとなっている。しかし、このような状況は、実際の施工において、経済的な問題や計測技術の問題から決して少なくはないと思われる。

2. 掘削過程を考慮した逆解析法

逆解析の対象とする弾性連続体の解析モデル内の初期地圧（初期応力）を $\{\sigma_0\} = \{\sigma_{x0}, \sigma_{y0}, \tau_{xy0}\}$ とする。ここに、 σ_{x0} 、 σ_{y0} 、 τ_{xy0} は初期応力成分（図-1参照）である。この状態で掘削によって生じる解析モデル内の節点変位 $\{u\}$ は次式のようにおける。

$$\{u\} = \{u_x\} + \{u_y\} + \{u_{xy}\} \quad (1)$$

ここに $\{u_x\}$ 、 $\{u_y\}$ 、 $\{u_{xy}\}$ はそれぞれ σ_{x0} 、 σ_{y0} 、 τ_{xy0} のみによって生じる節点変位である。

いま、モデル（地山）の弾性係数を E 、桜井らが提案している初期応力パラメータを $\{C\} = \{\sigma_{x0}/E, \sigma_{y0}/E, \tau_{xy0}/E\}$ とすると $\{u_x\}$ 、 $\{u_y\}$ 、 $\{u_{xy}\}$ はそれぞれ、次式で表現される。

$$\{u_x\} = [Q_x] \sigma_{x0}/E, \{u_y\} = [Q_y] \sigma_{y0}/E, \{u_{xy}\} = [Q_{xy}] \tau_{xy0}/E \quad (2)$$

ここに、 $[Q_x] ; \sigma_{x0}/E=1, \sigma_{y0}=\tau_{xy0}=0$ のとき掘削によって生じる節点変位

$[Q_y] ; \sigma_{y0}/E=1, \sigma_{x0}=\tau_{xy0}=0$ のとき

$[Q_{xy}] ; \tau_{xy0}/E=1, \sigma_{x0}=\sigma_{y0}=0$ のとき

これら $[Q_x]$ 、 $[Q_y]$ 、 $[Q_{xy}]$ は初期応力が掘削によって変位に及ぼす影響を示すもので、以後影響マトリックスと呼ぶことにする。②式を①式に代入して次式を得る。

$$\{u\} = ([Q_x] [Q_y] [Q_{xy}]) \{C\} \quad (3)$$

③式より、直接逆解析法の手法を用いて、計測変位より初期応力パラメータが求められる。

つぎに、地山が掘削過程（図-1）においても弾性連続体として挙動すると、 i 段階の掘削によって生じる節点変位増分 $\{u_i\}$ は次式となる。

$$\{u_i\} = \{u_{xi}\} + \{u_{yi}\} + \{u_{xyi}\} \quad (4)$$

ここに $\{u_{xi}\}$ 、 $\{u_{yi}\}$ 、 $\{u_{xyi}\}$ は、それぞれ σ_{x0} 、 σ_{y0} 、 τ_{xy0} により生じる i 段階掘削時の節点変位増分であり、②、③式と同様に考え影響マトリックスで置き替えると、

$$\{u_i\} = ([Q_{xi}] [Q_{yi}] [Q_{xyi}]) \{C\} \quad (5)$$

$[Q_{xi}]$ は初期応力 $\sigma_{x0}=E, \sigma_{y0}=\tau_{xy0}=0$ のとき掘削過程

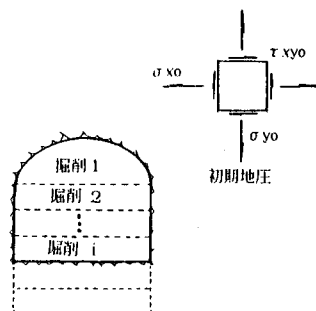


図-1 解析モデル

の*i*段階目において生じる節点変位増分であり、 $[Q_y]$ 、 $[Q_{xy}]$ についても同様である。

以上、掘削過程においても影響マトリックスが得られれば、逆解析が可能である。たとえば、掘削の*j*から*n*段階までの計測に対する逆解析であれば、その間の節点変位増分 $\{u'\}$ として、つぎのように表現できる。

$$\{u'\} = (\sum [Q_{xi}] \quad \sum [Q_{yi}] \quad \sum [Q_{xyi}]) \{C\} \quad ; \quad (i = j, n) \quad \textcircled{6}$$

また、初期応力パラメータが求まれば、③、⑥式より解析モデル全体の変位が簡単に求められる。

現場における解析システムとして、ここでは、事前に掘削解析を行い影響マトリックスを求め、それを現場の施工管理用パーソナルコンピュータに基本データとして入力する。このシステムによれば、パーソナルコンピュータ内ではFEMなどによる掘削計算をする必要がなく、容易に解析モデル全体の変位解を得ることができる。このため、計算容量の小さいパーソナルコンピュータでも迅速に計算ができる。

3. 計測

本解析の対象とした地下空洞は、図-2に示す馬蹄形で土被り厚は約200mである。空洞周辺岩盤は、花崗岩よりなり、計測地点付近では電中研による岩盤等級B～CH級に属する新鮮かつ堅硬な岩盤である。アーチ切上げ(1ステップ)、その後の本体盤下げ(9ステップ)の合計10ステップによって表現、モデル化した。地中変位計は、アクセストンネルより空洞側壁中央部に向けてアーチ掘削時(ステップ1)に水平に設置された。計測された変位は側壁面より1、3、5、11、19mの地点と36mの固定点との相対変位である。

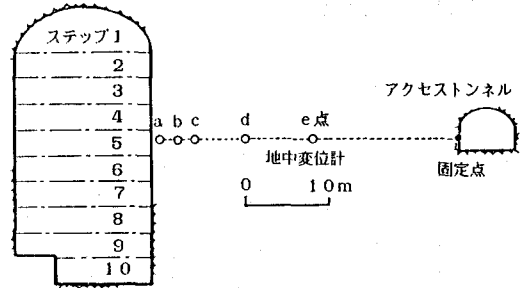


図-2 空洞断面および計測位置

4. 解析条件および解析方法

地中変位の計測結果を図-3に示す。変位は掘削当初(ステップ1)より生じはじめ、地中変位計が設置されている最近傍(ステップ4からステップ5にかけて)において大きく増加しているのがわかる。トンネルで言えば、これは切羽の通過を表現するものである。

さて、今回の地中変位計測は、水平方向(X方向)の一測線に限られており逆解析において、鉛直方向応力(σ_{yo})ならびにせん断方向応力(τ_{xyo})を正確に評価することは難しい。

過去の土被り200m以上の地下空洞などで計測された地山の初期応力測定結果によれば、鉛直応力(σ_{yo})と水平応力(σ_{xo})の比は1:1、あるいは水平応力のほうが大きくなっている例が多い。したがって、本解析においては、初期状態として静水圧状態であると仮定することで近似的に解くことができると考えた。すなわち、この仮定条件は $\sigma_{xo} = \sigma_{yo}$ 、 $\tau_{xyo} = 0$ で表現できる。

解析として、ステップ2、ステップ5、ステップ8、ステップ10における各掘削段階の計測変位からの逆解析ならびにその後の掘削による変位予測を行った。さらに、ステップ5時点で地中変位計が設置され、その後の変位が計測されたと仮定した場合の計測変位から計器設置以前に生じていた、いわゆる先行変位を推定した。なお、使用した解析モデルは133要素、390節点のFEMモデルで、吹付けやロックボルト等の支保は考慮していない。また、ポアソン比については $\nu = 0.3$ と仮定した。

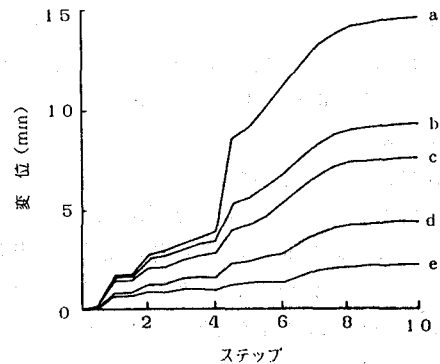


図-3 計測変位の経時変化

5. 解析結果および考察

ステップ2、5、8、10の各掘削段階における計測変位とそれを用いた逆解析により得られた変位結果の比較を表-1に示す。逆解析の結果から⑥式を用いて各ステップにおける変位を予測した例を図-4、5に示す。

図-4はステップ2の計測変位から、図-5はステップ8の計測変位から逆解析ならびに掘削の考慮による変位予測した経時変化図である。

表-1 地中変位の計測と解析結果 (mm)

	ステップ2		ステップ5		ステップ8		ステップ10	
	計測	解析	計測	解析	計測	解析	計測	解析
a 点	2.81	2.64	9.12	7.63	14.22	12.15	14.68	12.26
b 点	2.58	2.36	5.58	6.55	9.01	10.73	9.30	10.89
c 点	2.15	1.95	4.30	5.38	7.35	9.01	6.17	9.35
d 点	1.29	0.96	2.46	3.00	4.20	5.08	4.39	5.49
e 点	0.60	0.15	1.38	0.26	2.18	0.67	2.25	0.83
初期応力パラメータ	0.002218 (無次元)		0.002251 (無次元)		0.001966 (無次元)		0.001890 (無次元)	

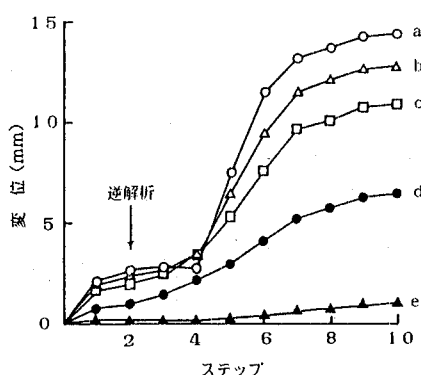


図-4 解析による計測変位
(ステップ2時点にて解析)

図-6はステップ5ならびにステップ10における計測値と解析値を空洞壁からの深さ別変位分布として比較したものである。

表-1で得られた計測値と逆解析結果との比較をみると、変位の最大誤差2.5mm(計測値に対して約17%)となっている。初期応力パラメータ{C}は、各ステップを通じて $1.9 \sim 2.2 \times 10^{-3}$ 程度とほぼ一定値に安定している。図-3、および図-4、5をみると掘削による変位の増分傾向が計測と解析とで一致しており、解析によって地山の挙動傾向をほぼ把握している。

つぎに、空洞側壁付近(a点)についてステップ2、5、8段階で実施した逆解析結果より求められた各変位増分を計測値に加算し、その後の変位を予測した結果を図-7に示す。同図によれば、ステップ2時点で予測した全掘削終了時(ステップ10)での変位は、14.6mm同様に、ステップ5時点の予測では16.1mmステップ8時点の予測では14.8mmとなっている。

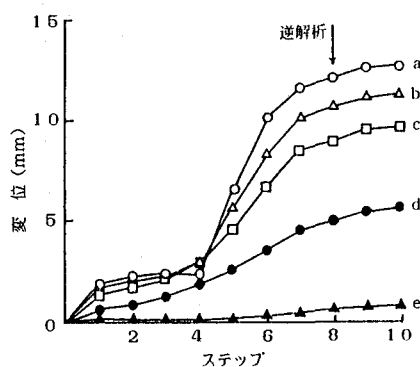


図-5 解析による計測変位
(ステップ8時点にて解析)

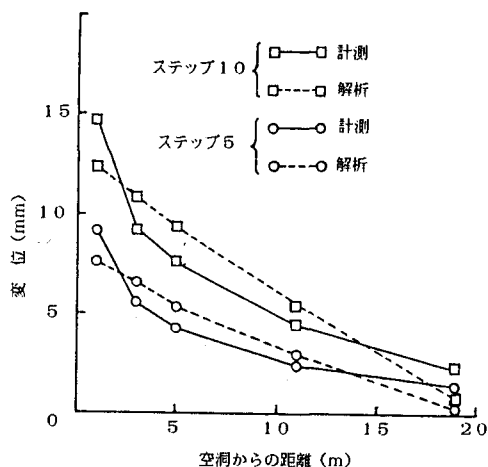


図-6 変位分布(ステップ5、10時点)

当然のことながら掘削がより進行した段階における変位予測の方が精度的に優れていることがわかる。しかしながら、工学的にはステップ2ですでに満足のいく予想ができています。

また、ステップ5時点で空洞から同一測線に計器を設置し計測を始めたとして、最終変位までに計測された変位増分を用いて逆解析した。その結果、ステップ5時点を基準としてプロットした例(b点について)を図-7に示す。解析によって再現、推定した先行変位は4.42mm(解析による全変位の50.6%)であり、計測値では同じく5.58mm(60.0%)となっており、掘削を考慮した逆解析によれば、計測を開始するまでの変位をも概略推定することができている。このことにより、たとえ計測の開始が掘削後若干の時間経過があってもさかのぼって評価することが可能であることもわかった。

6. まとめ

本文では、掘削を考慮した逆解析システムとその適用例について報告した。本研究により以下の事項がわかった。

1) 一方向一測線のための計測値であっても、初期応力状態を静水圧と仮定することにより逆解析は工学的に可能であった。また、対象とした地山では、

2) 上記条件で掘削途中において実施した掘削進行に伴う挙動予測は工学的に十分満足できるものであった。

3) 計測が初期状態から開始されていなくても先行変位を推定することが可能であった。

7. あとがき

逆解析を用いて地山の挙動を把握する手法は、地山によってその適用性の良好な場合とそうでない場合があるように思われる。今後さらに掘削を考慮した逆解析システムを進め、その適用範囲に関するデータを収集していきたいと思っている。

参考文献

- 1) 桜井・武内：トンネル掘削時における変位計測結果の逆解析，土木学会論文報告集No.337，'83
- 2) 世一・蓮井：地下空洞における側壁部の変形管理基準について，第38回土木学会年次学術講演会，'83
- 3) 蓮井・山下：逆解析を用いた地下空洞掘削時の挙動予測についての一考察，第39回土木学会年次学術講演会，'84
- 4) 清水・桜井：掘削過程を考慮した現場計測結果の逆解析法，第38回土木学会年次学術講演会 '83
- 5) 清水・桜井：地下空洞における変位計測の最適位置について，第15回岩盤力学に関するシンポジウム，'83
- 6) 桜井・蓮井・清水：掘削手順を考慮したトンネルの有限要素解析，建設工学研究所報告第24号，'82

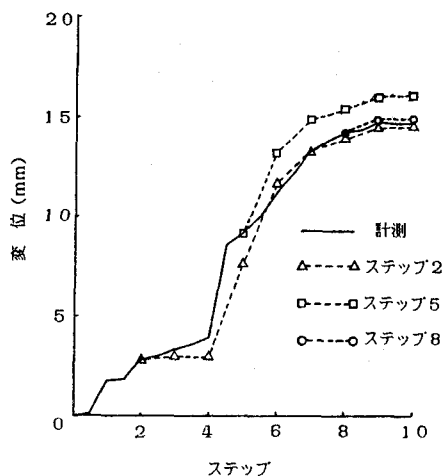


図-7 解析による予測変位と計測値との比較(a点)

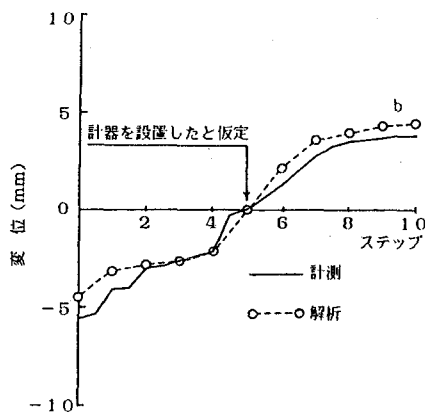


図-8 計器設置以前に発生した変位の推定(b点)

(63) Prediction of the behavior of a cavern
side wall due to excavation by using
the Back Analysis Method

Hazama-Gumi, Ltd.

Akinori Hasui

Ryo Yamashita

Hidetoshi Yoichi

ABSTRACT

During the construction of underground structures such as tunnels and caverns, it is important from the aspect of their safety and economy to predict the behavior of the rock around the cavern with the progress of the excavation as well as to examine the existing state.

The Direct Back Analysis method proposed by Sakurai et al. has been applied a number of underground openings to estimate the stability of them during excavation. This method evaluates the strain distributions in ground media near underground openings, which can be obtained from the observed(measured) displacement data.

Described in this paper are the modified Back Analysis Method by considering the progress of the excavation and its application to an underground rock cavern. In this study, the cavern was located in a sound granitic rock mass at a subsurface depth of 200 m. The displacement data adopted were only the values obtained by the extensometer which had been setted horizontally in one direction.

Though the above-mentioned condition were unfavorable to the analysis, the study was successfully performed by supposing that the horizontal stress would be equal to the vertical stress in the initial state, referred to a large number of stress measurement data obtained in the existing underground cavern sites.

As a result, the following items were confirmed.

- (1) Even in case that the measurements were carried out only in one direction, the Back Analysis Method has significant meanings from the engineering point of view by supposing the initial stress state.
- (2) Even in the above-mentioned situation, the prediction of the behavior with the progress of the excavation was confirmed to be practicable from the technical judgement.
- (3) Also, the displacements previous to begin measurements could be reproduced satisfactorily by the Back Analysis Method with considering the progress of the excavation.