

(43)トンネル覆工の安定性評価法と模型実験

近畿大学理工学部 久武 勝保
(株) 浅沼組 土岐 晃生
(株) 浅沼組 村上 譲二
(株) 地崎工業 村上 敏夫

Assessment Method of Tunnel Lining Stability and Model Experiments

Masayasu HISATAKE , Kinki University
Teruo TOKI , Asanuma Corporation
Joji MURAKAMI , Asanuma Corporation
Toshio MURAKAMI , Chizaki-Kogyo Co., Ltd.

Abstract

Back analysis method of tunnel lining stresses and strains with a small number of displacement measured has been already proposed by the authors , and results of numerical experiments by FEM have shown high accuracy and good applicability of the method.

In this study, some model experiments by using 1/20 scaled tunnel lining were conducted and the lining strains measured were compared with back-analyzed ones. Results of this show the adequacy of the proposed method.

1. はじめに

トンネル建設では、地山の支持能力を有効に発揮させると共に、トンネルを安全に建設することに留意すべきであり、観測施工はそのための有効な手段である。しかし、現在多くのトンネル工事現場では、日常的にA計測が行われているが、その結果からトンネル覆工の応力やひずみが推定されるのはまれであり、計測に要する時間、費用が有効に活かされているとは言い難い。その原因は、A計測のような少ない計測結果から覆工の応力やひずみを簡単に精度よく推定する逆解析手法が開発されていないことに起因している。現在、A計測が工事現場に十分浸透している実状や、その計測頻度、時間、費用の多さから考えると、早急に研究すべき課題である。筆者らは、このような認識にたち、A計測程度の少ない変位数から、覆工の応力、ひずみ、変位、外力を推定する新しい逆解析手法^{1)・2)}を既に提案し、同時に行った有限要素法による数値シミュレーション結果から覆工の応力やひずみが工学的に十分な精度で逆解析できることを確認している。

本研究は、トンネル覆工の模型実験を行い、これで得られた計測変位を提案手法に適用して求まる覆工のひずみと実測ひずみを比較検討し、本手法の妥当性を検証した。

2. 提案手法の概要

覆工内壁の計測既知変位の成分数は、覆工外壁に作用する未知外力の成分数よりはるかに少ないのが一般的である。このような条件下では、計測変位値を生じさせる外力の組み合わせは、無数に考えられる。本手法は、それらの外力組み合わせのうち外力の自乗和を最小とする拘束条件を与えることで唯一解すなわち一組の外力組み合わせを理論的に見つけだし、覆工の応力やひずみを推定している。本手法は、覆工外力のモードを仮定する必要がなく、また計測変位数の制限もないうえ、相対計測変位が利用でき、さらに繰り返し計算を必要としないなど、現場適用にふさわしい特長を有する。

2. 1 FEM定式化

いま、有限要素法において、 u 、 f 、 K を節点変位、節点力、剛性マトリックスとして、覆工の剛性方程式を以下のように表しておく。

$$\begin{Bmatrix} f_* \\ f_i \\ f_o \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_* \\ u_i \\ u_o \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ここに、添字*、i、oは以下の通りである。

：覆工内面節点の内、計測節点を表す ($f_ = 0$)

i：外力の作用しない節点（上記節点を含まない）を表す ($f_i = 0$)

o：外力が作用する節点を表す ($f_o \neq 0$)

式(1)において、 u_i を消去し、また $f_* = 0$ 、 $f_i = 0$ を考慮すれば、

$$0 = H_{13} u_o + F_{1*} \quad (2)$$

$$f_o = H_{33} u_o + F_{3*} \quad (3)$$

ここで、

$$H_{13} = [K_{13} - K_{12} K_{22}^{-1} K_{23}]、F_{1*} = [K_{11} - K_{12} K_{22}^{-1} K_{21}] u_*$$

$$H_{33} = [K_{33} - K_{32} K_{22}^{-1} K_{23}]、F_{3*} = [K_{31} - K_{32} K_{22}^{-1} K_{21}] u_*$$

式(2)を満足させる u_o の組み合わせのうち、外力の自乗和が最小になる組み合わせを求めるには、変数 u_o 、 λ （未定係数）に関する次式の P を最小にすればよい。

$$P = f_o^T f_o - \lambda^T \{H_{13} u_o + F_{1*}\} \quad (4)$$

すなわち、式(3)の f_o を上式に代入した後、これを u_o 、 λ で偏微分して0と置くと、

$$2 A_{33} u_o + 2 b_3 - H_{13}^T \lambda = 0 \quad (5)$$

$$H_{13} u_o + F_{1*} = 0 \quad (6)$$

ここで、

$$A_{33} = H_{33}^T H_{33}$$

$$b_3 = H_{33}^T F_{3*}$$

式(5)、(6)を解けば

$$u_o = -A_{33}^{-1} b_3 + A_{33}^{-1} H_{13}^T [H_{13} A_{33}^{-1} H_{13}^T]^{-1} \{H_{13} A_{33}^{-1} b_3 - F_{1*}\} \quad (7)$$

$$\lambda = 2 [H_{13} A_{33}^{-1} H_{13}^T]^{-1} \{H_{13} A_{33}^{-1} b_3 - F_{1*}\} \quad (8)$$

式(7)を式(3)に代入することにより覆工に作用する節点外力が求められる。また、式(1)の第2式を変形して得られる次式

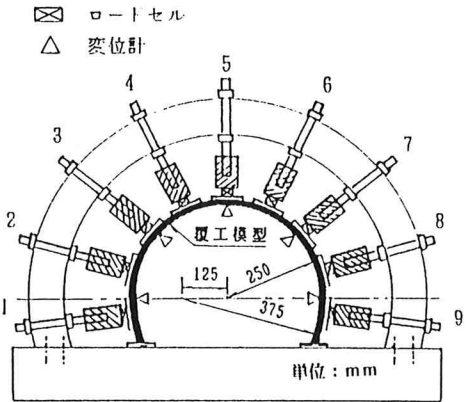
$$u_i = -K_{22}^{-1} [K_{21} u_* + K_{23} u_o] \quad (9)$$

に式(7)を代入して u_i が得られる。以上より、全ての変位が既知となったので、ひずみ－変位関係式、応力－ひずみ関係式から、覆工のひずみ、応力が算出される。

3. 模型実験

3. 1 実験装置

実験装置は、鉄道トンネル複線断面を想定した縮尺1/20の模型実験装置である（図－1、写真－1）。切羽に近接した位置での覆工応力は、三次元的に分布するが、切羽から離れたトンネル横断面内の覆工応力はその横断面を平面歪み状態と仮定した二次元解析により求められる³⁾。よってここでは二次元模型について実験を行った（写真－2）。実験装置には、載荷板を横断面方向に9ヶ所取り付け、各載荷板には反力フレームに設置したボルトにより円筒形ゴムを介して覆工モデルに荷重を与えるようにした。また覆工材料は普通モルタルとポリマーモルタルの2種類のセメント用いた。配合と力学定数を表－1に示す。なお、この実験は、鉄道総合技術研究所が行った複線トンネルの模型実験⁴⁾を参考にした。



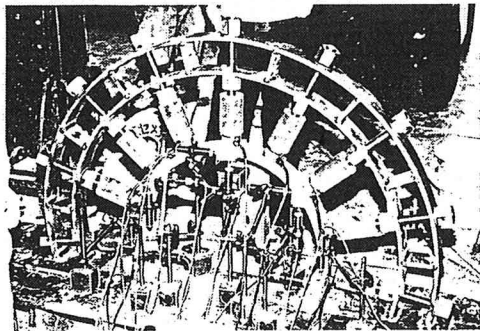
図－1 模型実験装置

表－1 配合と力学定数

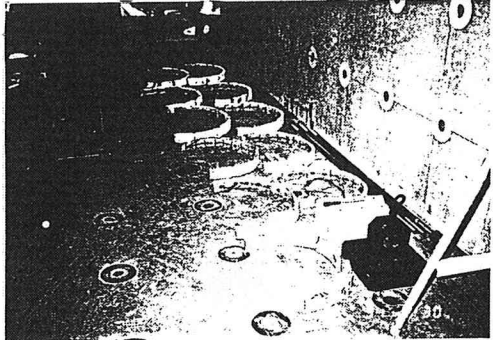
	ポリマーセメント比 (%)	単位セメント量 (kg/m ³)	単位ラテックス量 (kg/m ³)	単位水量 (kg/m ³)	水セメント比 (%)	単位細骨材量 (kg/m ³)	配合強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)
普通モルタル	－	550	－	272	49.5	1275	485	251000
ポリマーモルタル	10	550	55	206	37.5	1293	406	208000

3. 2 実験手順

実験は、載荷位置、覆工材料をパラメーターとして種々行った。実験手順は、厚さ20mmの覆工モルタルを実験装置にセットし、その後、それぞれの計器を配置し、全周の載荷板に初期荷重を載荷し、荷重、変位、ひずみの初期値を計測した。次に載荷ヶ所を決め、反力フレームに設置したボルトにより荷重を一定量ごとに載荷し、その時点の荷重、変位（水平変位、鉛直変位）、ひずみを計測した。載荷は、覆工が終局的な破壊に至るまで行った。



写真－1 模型実験装置



写真－2 覆工模型

4. 実験結果と解析値の比較

図-2は本解析で用いた覆工の2次元有限要素分割図である。解析は、★印で示される3節点の変位が計測されるものと仮定し、模型実験で測定された同位置の水平および鉛直変位を本逆解析手法に入力する。解析結果のうち、覆工内壁の節点変位と円周方向のひずみについて整理した。

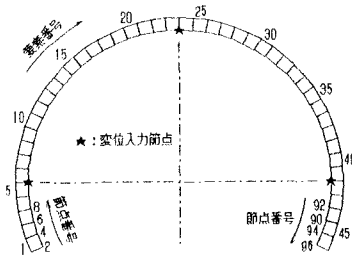
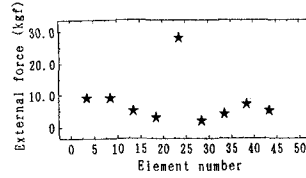


図-2 有限要素分割図

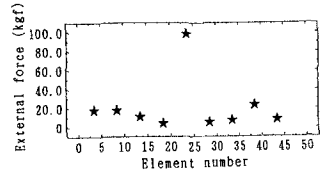
普通モルタルで作成された覆工模型について、載荷位置1～9に加えられる外力がほぼ左右対称である場合の逆解析値と計測値を比較する。なお、主な載荷は載荷位置5のボルトによって行い、覆工が破壊するまで継続した。

図-3 (A) は、破壊時荷重の30%を載荷したときの覆工に作用する外力分布であり、図-3 (B)、(C) および (D) はそれぞれ、このときの水平変位、鉛直変位および円周方向ひずみの計測値と解析値の比較図である。図中の★印と▲印は計測値であり、このうち水平および鉛直変位図の★印は、逆解析の入力値であることを意味する。逆解析値は□印でプロットしている。図-4 (A) ～ (D) は、破壊時荷重の90%を載荷したときの上記図-3に相当するものである。

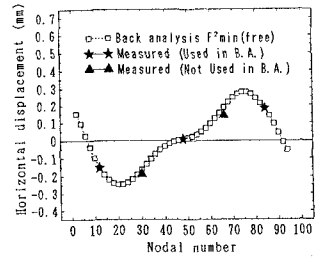
図-3、4から覆工が変形する初期の段階から破壊直前に至る全ての期間を通じて、A計測程度の少ない入力変位数でも、覆工のひずみが工学上十分な精度で推定できることが



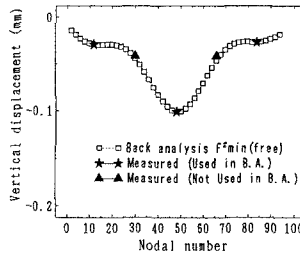
(A) 外力分布



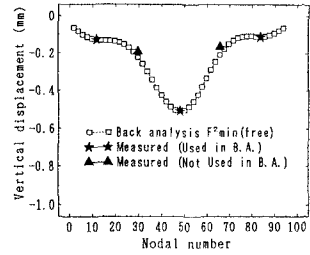
(B) 水平変位



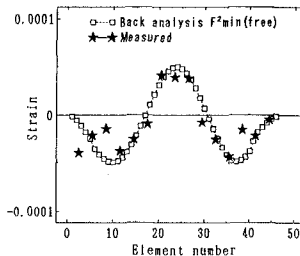
(C) 鉛直変位



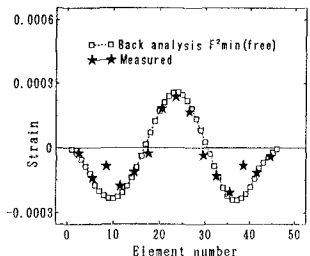
(D) 円周方向ひずみ



(E) 水平変位



(F) 鉛直変位



(G) 円周方向ひずみ

図-3 解析値と実測値の比較

(普通モルタル、荷重位置5、
破壊時荷重の30%)

図-4 解析値と実測値の比較

(普通モルタル、荷重位置5、
破壊時荷重の90%)

わかる。

図-5 (A) ~ (D) は、普通モルタルの覆工模型に対して、載荷位置2のボルトにより、非対称な荷重を載荷した場合の比較図である。荷重レベルは破壊時荷重の60%である。前述の対称な荷重が作用する場合に比較しひずみの逆解析精度が若干低下しているが、覆工脚端の変位を無視した解析であることを考慮すると工学的に満足できる精度である。実問題の適用においては、脚端変位を計測することで、精度の改善が期待できる。

図-6 は覆工材料をポリマーモルタルとした場合である。

5. まとめ

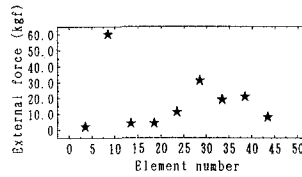
覆工に作用する荷重のレベルとモードおよび覆工材料が種々異なる模型実験をおこない、提案手法により求まる覆工ひずみの精度を検討した。

この結果A計測程度の少ない入力変位数でも、提案手法により工学的に十分な精度で覆工ひずみを推定できることが実験的に確認できた。

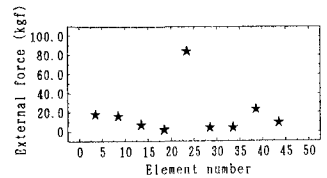
なお、本研究は元近畿大学生の中川真一君（地崎工業）、岡田充功君（住友林業緑化）、近畿大学生の合木健浩君の助力を得て行われたことを付記して心から感謝を表する。

参考文献

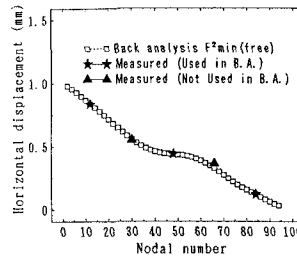
- 1) 久武勝保、村上敏夫：トンネルのA計測変位を用いた覆工応力推定法、土木学会論文集、NO. 457/III-21、PP. 79-86、1992. 12
- 2) Hisatake, M. and Murakami, T.: Non-destructive Evaluation of Tunnel Lining Stresses, 4th Int. Symp. on Numerical Models in Geomech., vol. 2, pp685-695, 1992
- 3) Hisatake, M. and Ito, T.: Back Analysis Methods to Tunnel Linings, Proc. Int. symp. Field Measurements in Geomech. pp. 1047-1056, 1983
- 4) 朝倉俊弘、小島芳之、川上義輝：トンネル覆工の力学挙動解析(1)ー複線トンネルの模型実験ー、土木学会第45回年次学術講演会、pp. 562~563, 1990



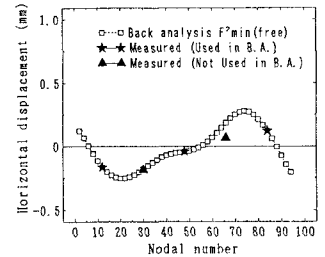
(A) 外力分布



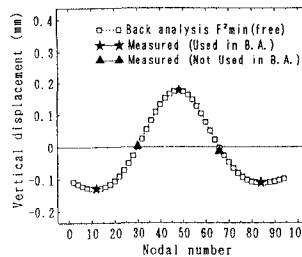
(A) 外力分布



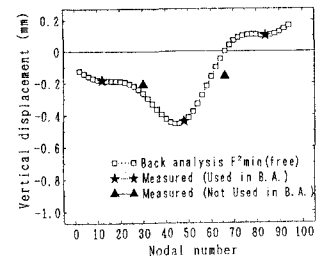
(B) 水平変位



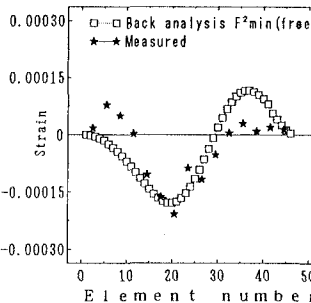
(B) 水平変位



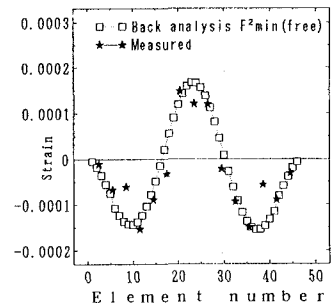
(C) 鉛直変位



(C) 鉛直変位



(D) 円周方向ひずみ



(D) 円周方向ひずみ

図-5 解析値と実測値の比較

(普通モルタル、荷重位置2、破壊時荷重の60%)

図-6 解析値と実測値の比較

(ポリマーモルタル、荷重位置5、破壊時荷重の90%)