

6. トンネル覆工応力逆解析法に関する実験的研究

村上 譲二

要 旨

近年、多くのトンネル工事現場ではトンネル壁面の挙動を知るために、一般にA計測が行われているが、この計測結果を使って覆工応力を簡単にしかも精度よく推定する逆解析手法がこれまで確立されていないため、計測結果が有効に活用されているとは言えない。

本研究は、A計測変位から覆工応力、ひずみ量等の力学量を逆解析し、トンネルの安全性を評価する手法を確立するため行ったものであるが、数値シミュレーションおよびトンネル模型実験を行った結果、その解析結果に高い精度が得られ、本解析手法が妥当であることが実証された。

キーワード

トンネル／NATM／逆解析／覆工応力

目 次

- | | |
|-----------------|--------------------|
| 1. はじめに | 4. 解析手法の数値シミュレーション |
| 2. 逆解析に関する既往の研究 | 5. トンネル模型実験 |
| 3. 解析手法の概要 | 6. まとめ |

6. EXPERIMENTAL RESEARCH ON TUNNEL LINING STRESSES BACK ANALYSIS METHOD

Joji Murakami

Abstract

In recent years, the movement of tunnel walls has usually been determined by taking tunnel convergence data. However, the stress of the tunnel lining could not be accurately determined using these measurements as a back-analysis method had yet to be established.

This paper describes a method for analyzing such things as lining stress and strain through back analysis for the purpose of evaluating tunnel safety. After conducting parametric study and a tunnel model test, it was concluded that the analysis results were indeed accurate and that the analysis method is valid.

1. はじめに

一般に、構造物の設計に当たっては、まず構造物に作用する外力、材料特性などの設計条件を設定してから応力解析を行って、構造物の安全性を評価している。

これに対し、トンネルのような地下構造物の場合は、不確定要素が多く構造物に作用する荷重を正しく推定することが困難であり、また地質調査にも限界があることから、地山を構成する材料の力学的特性を正確に求めることは難しく、したがって、最初からトンネル全長にわたって的確な設計を行うことは不可能に近いといつてよい。

この現況をふまえ、近年、施工中のトンネルの挙動を計測し、その計測結果から地山の初期応力及び材料定数を逆解析によって求め、それらの値を用いてFEM解析を行い、実際のトンネルの挙動と解析結果による値を比較して、以後の設計、施工を合理的に行おうとする、いわゆる逆解析手法に関する研究が行われている。

トンネルの安全は、地山及び覆工の安定によって保たれているといつてよく、トンネル工事を安全に建設していくためには、地山と覆工の挙動を観測し、安定性を確認しながら施工を行っていくことが重要とされる。しかし、覆工施工後において、トンネルの安全性を確保することに主眼をおけば、覆工自身の安定性のみを確認するだけでよい。というのは、仮に地山が限界状態に達していたとしても、覆工に十分余力があれば、トンネルは安定を保つと考えられるし、逆に、地山が限界状態に達していなくても、覆工の耐力が不足していれば、トンネルは安定しているとは考えられないからである。すなわち、トンネルの安全性を確認するためには、覆工の安定性を評価することが不可欠といつてよい。

本研究は、以上述べた理由から、トンネル覆工の内面変位から覆工の変位、ひずみ、応力を逆解析してトンネルの安全性を評価する新しい逆解析手法を開発しようとするものであるが、本手法を用いて、数値シミュレーションを行い、またトンネルの模型を作り実験を行った結果、その妥当性を検証することができたので、ここにその結果を述べる。

なお、本研究についてはその一部を土木学会第47回年次学術講演会において発表している。

2. 覆工応力逆解析に関する既往の研究

トンネル覆工の力学量の逆解析手法としては、Kovariのアーチ状支保工の外荷重算定法¹⁾、及びスプライン関数を用いたHisatake・Ito²⁾の2次元及び3次元の覆工応力推定法がある。しかし、覆工外面に作用する未知外力の数は通常、トンネル内壁での計測変位数に比べてはるかに多いため、必要な逆解析精度を確保するには計測変位数を多くとらざるを得なく、従って時間的・経済的理由から、これら手法が日常的な計測ルーチンとして採用されていない。

上記の欠点を考慮し、A計測のような少ない変位計測数を使って覆工の変位・応力・ひずみ状態を精度よく推定する逆解析手法として、Hisataskeの研究³⁾⁴⁾があげられるが、実際の現場へ適応させるためにはなお改良の余地があるといわねばならない。

3. 解析手法の概要

本手法は、覆工計測変化を生じさせる無数の外力組合わせの中から、覆工外面に作用する外力の自乗和が最小である外力組合わせを見つけ出そうとするものである。

3.1 概説

覆工内面節点での測定変位成分数 N_u と覆工に作用する成分数 N_f が、 $N_u \geq N_f$ という条件下では外力及び未知節点変位の解を一意的に求めることができる。しかしこの条件を満足し、しかも十分な精度を得ることは現実的でない。以下、この条件が満足できなくとも、工学的には十分満足できる精度を得るための定式化を提案する。

3.2 手法の定式化

トンネルA計測では、 $N_u < N_f$ という条件下であるがこのような場合でも、理論的な拘束条件を与えることにより解を得ることができる。

今、 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様に表しておく。

$$\begin{Bmatrix} f_s \\ f_i \\ f_o \\ f_c \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & K_{14} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & K_{24} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & K_{34} \\ K_{41} & K_{42} & K_{43} & K_{44} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_s \\ u_i \\ u_o \\ u_c \end{Bmatrix} \quad \dots(1)$$

ここに、添字 $*$, i , o , c は以下の通りである。

$*$: 覆工内面節点の内、計測節点を表す。($f_* \neq 0$)

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 : 外力の作用する節点を表す。($f_o \neq 0$)

c : 変位を拘束する節点を表すが、必ずしも完全変位拘束ではないとする。($f_c \neq 0$)

また、式(1)は、以下の様に表すことができる。

$$\begin{Bmatrix} f_* - K_{14} u_c \\ f_i - K_{24} u_c \\ f_o - K_{34} u_c \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_* \\ u_i \\ u_o \end{Bmatrix} \quad \cdots(2)$$

これより、変位は

$$\begin{Bmatrix} u_* \\ u_i \\ u_o \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & L_{13} \\ L_{21} & L_{22} & L_{23} \\ L_{31} & L_{32} & L_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ f_o \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & L_{13} \\ L_{21} & L_{22} & L_{23} \\ L_{31} & L_{32} & L_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} K_{14} & u_c \\ K_{24} & u_c \\ K_{34} & u_c \end{Bmatrix} \quad \cdots(3)$$

ここに f_o 、 λ は、柔性マトリックスである。式(3)より、

$$u_* = L_{13} f_o - U_*$$

$$u_i = L_{23} f_o - U_i \quad \cdots(4)$$

$$u_o = L_{33} f_o - U_o$$

ただし、

$$U_* = [L_{11} \cdot K_{14}, K_{12} \cdot K_{24}, L_{13} \cdot K_{34}] u_c \quad \cdots(5)$$

$$U_i = [L_{21} \cdot K_{14}, L_{22} \cdot K_{24}, L_{23} \cdot K_{34}] u_c \quad \cdots(6)$$

$$U_o = [L_{31} \cdot K_{14}, L_{32} \cdot K_{24}, L_{33} \cdot K_{34}] u_c \quad \cdots(7)$$

式(5)を満足し、 f_o の自乗和 P を最小にする f_o は、ラグランジェの未定常数 λ を用いて P を表し、

$$P = f_o^T f_o - \lambda^T (L_{13} f_o - U_* - u_*) \quad \cdots(8)$$

P を最小にする f_o 、 λ を求めれば良い。そこで f_o 、 λ による P の偏微分をそれぞれ求めて0と置くと、

$$2 f_o - L_{13}^T \lambda = 0 \quad \cdots(9)$$

$$-L_{13} f_o + U_* + u_* = 0 \quad \cdots(10)$$

式(9)、(10)より f_o が求められる。

$$\lambda = 2 [L_{13} \quad L_{13}^T]^{-1} \{U_* + u_*\} \quad \cdots(11)$$

$$f_o = L_{13}^T \{L_{13} \quad L_{13}^T\}^{-1} \{U_* + u_*\} \quad \cdots(12)$$

式(3)に式(12)を代入することにより、全ての変位量が既知のものとなり、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。

4. 解析手法の数値シミュレーション

本解析手法を用いて数値シミュレーションを行い、逆解析結果と真値とを比較し解析手法が妥当であることを検証した。ここで真値とは、ある荷重条件についてFEM順解析により得られた応力、変位のことをいう。

解析順序は、あらかじめ順解析を行い真値を求める。次にこの順解析で得た変位のうち、計測される点の変位(X,Yの2方向)を本逆解析の入力変位として逆解析を行い、得られた応力、変位と真値とを比較するものとする。

解析モデルは馬蹄形覆工(図-1)を用いた。

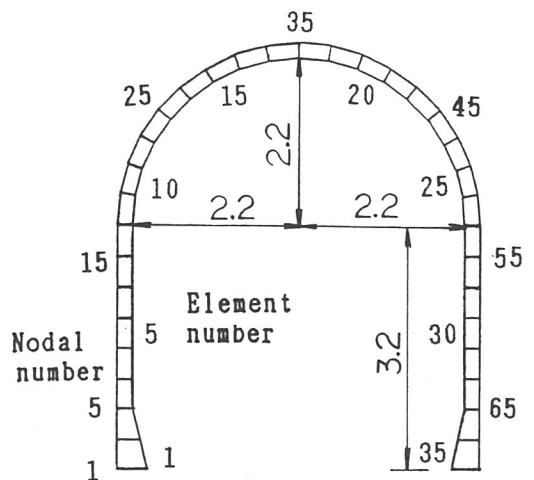


図-1 解析モデル (馬蹄形覆工)

覆工外面にかかる外力は図-2のような荷重条件とした。

逆解析に入力する変位計測点数は3点とし、計測位置は図-1に示す。

覆工の弾性係数 $E=1.0 \times 10^6 \text{ tf/m}^2$ 、ポアソン比 $\nu=0.15$ とする。

また、実際の現場では、覆工脚下端は水平方向への移動、地盤へのめり込みなど考えられるため、脚下端内側の節点変位を完全に拘束した場合[Backanalysis (fix)]と、これらを完全に無視した場合[Backanalysis (free)]の両逆解析法を行った。

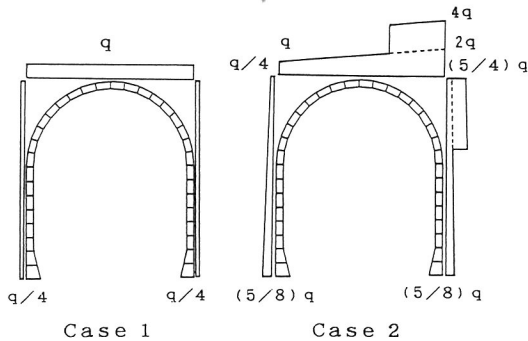


図-2 荷重Case

4.1 結果および考察

図-3、図-4に荷重条件Case 1で、それぞれ水平方向変位、鉛直方向変位の逆解析結果の値と真値との比較を示す。また図-5、図-6に荷重条件Case 2における最大せん断応力の逆解析結果と真値との比較を示す。

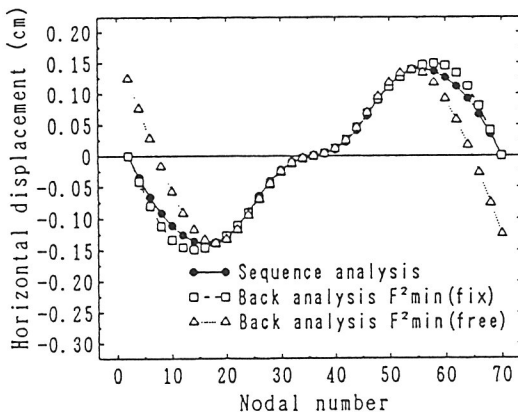


図-3 水平変位の逆解析値と真値の比較

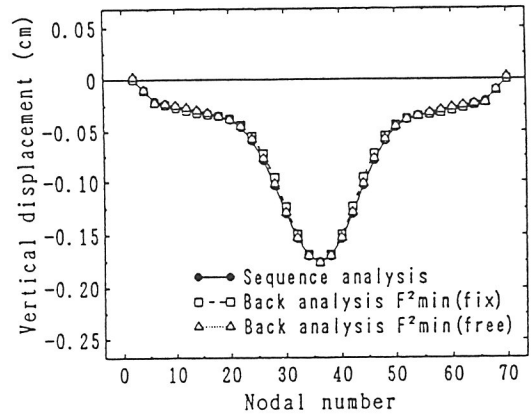


図-4 鉛直変位の逆解析値と真値の比較

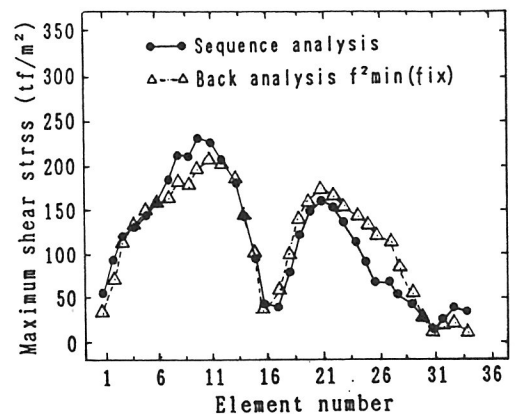


図-5 最大せん断応力の逆解析値と真値の比較(覆工下端を拘束)

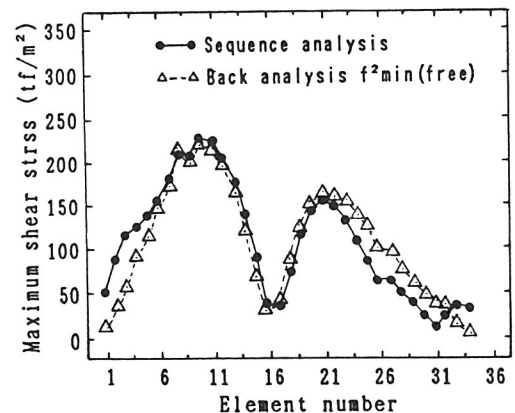


図-6 最大せん断応力の逆解析値と真値の比較(覆工下端が自由端)

以上より、入力計測点数が3点（通常行われるA計測の計測点数）あれば、逆解析値は変位、応力共真値とほぼ一致したものが得られることが理解できる。

また、覆工下端を拘束していない場合においては、計測点で決められていない覆工下端を含む領域の精度が若干低下する傾向があることが分かる。

5. トンネル模型実験

本解析手法の妥当性をトンネル模型実験を行うことにより検証した。

5.1 実験装置

実験装置は、鉄道トンネル複線断面を想定した模型実験装置（縮尺1/20）である（図-7）。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、トンネル横断面内の覆工応力はその横断面を平面歪状態と仮定した二次元逆解析により工学上十分な精度で求められることが示されている²⁾。よってここでは二次元模型について行った。

実験装置には、載荷板を断面方向に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。

側壁底面は、水平方向に可動となるようにした。また覆工材料は普通モルタルとポリマーモルタルの2種類を用いた。

普通モルタル： $\sigma_c = 485 \text{ kgf/cm}^2$, $E = 251000 \text{ kgf/cm}^2$

ポリマーモルタル： $\sigma_c = 406 \text{ kgf/cm}^2$, $E = 208000 \text{ kgf/cm}^2$

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⁵⁾を参考にした。

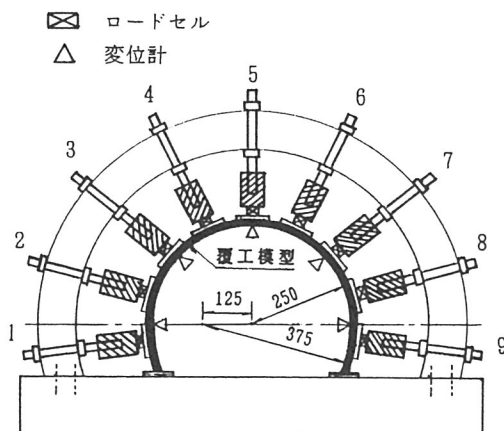


図-7 模型実験装置

5.2 実験ケース及び実験手順

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が、本稿では覆工材料が普通モルタルで載荷位置が2番、5番（図-7）のケースについて整理した。

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、垂直変位）、ひずみを計測し、載荷は覆工が終局的な破壊に至るまで行った。

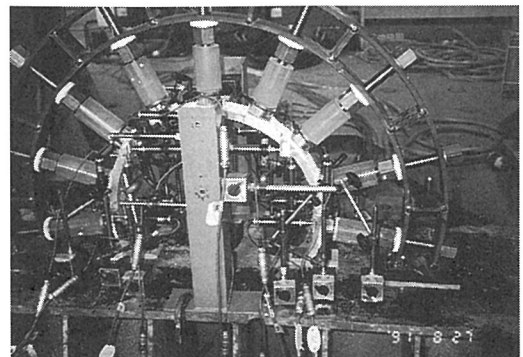


写真 トンネル模型実験

5.3 実験結果による解析手法の検証

図-8は本解析で用いた覆工の二次元有限要素分割図である。

トンネル覆工模型実験において得られた計測結果（実測値）と、その計測変位を本逆解析法に入力し、得た結果（解析値）とを比較することにより、本手法の妥当性を検証することとした。

図-9(A), (B), (C)は載荷位置5に最大荷重をかけ、覆工模型が破壊した時の荷重の90%を載荷した場合について検証した結果である。

図-9(A)は、5点の計測点のうち3点の計測変位から、逆解析して求めた水平方向変位と実測値の比較を示す。図-9(B)は、5点の計測点のうち3点の計測変位から、逆解析して求めた鉛直方向変位と実測値の比較を示す。図-9(C)の上図には、載荷位置1から9までの荷重状態を示し、下図には、3点の計測変位

から逆解析して求めたひずみと、ひずみゲージから求められた実測値の比較を示す。図-10(A), (B), (C) は、載荷位置 2 に最大荷重をかけ、覆工模型が破壊した時の荷重の90%を載荷した場合について検証した結果である。

図-9、図-10から、少ない計測点数(3点)でも解析値は実測値と工学上十分な精度で一致していることが理解できる。

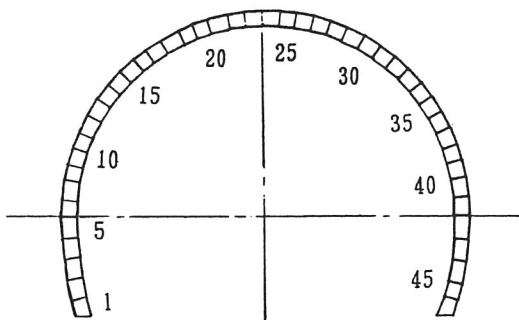


図-8 二次元有限分割図

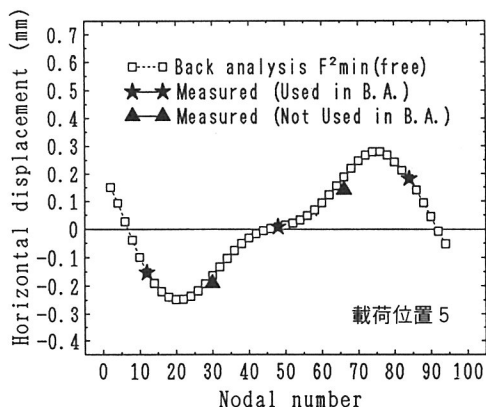


図-9(A) 水平変位の解析値と実験値の比較

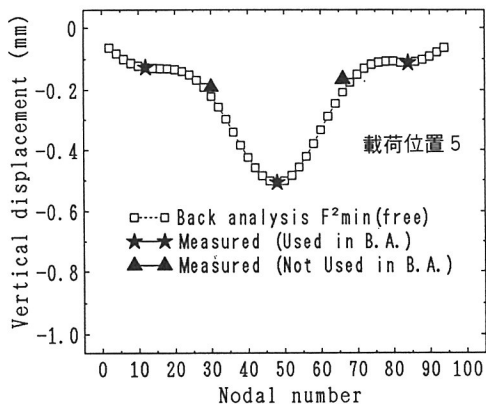


図-9(B) 鉛直変位の解析値と実験値の比較

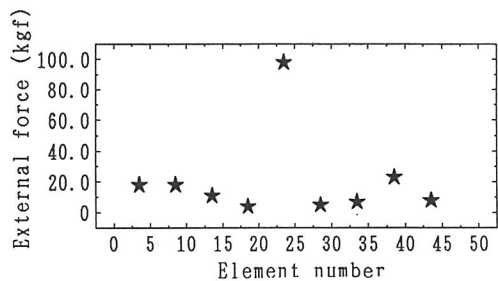


図-9(C) 内壁の円周方向ひずみの解析値と実測値の比較

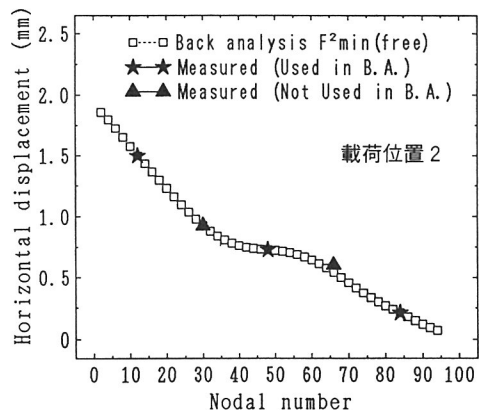
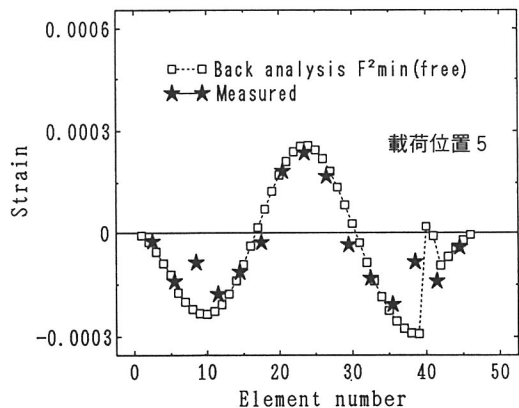


図-10(A) 水平変位の解析値と実験値の比較

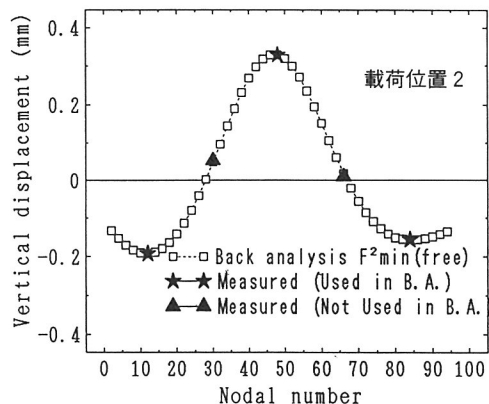


図-10(B) 鉛直変位の解析値と実験値の比較

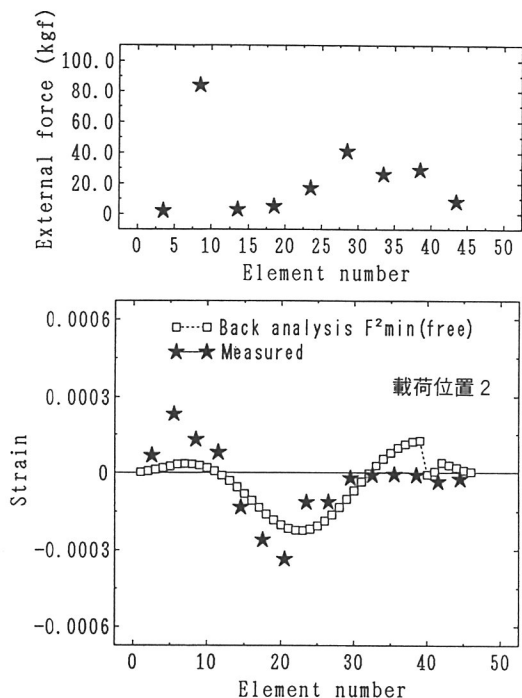


図-10(C) 内壁の円周方向ひずみの解析値と実測値の比較

6. まとめ

今回の解析と実験結果から、得られた結論を列挙すると、以下の通りである。

- ① 本手法は、現場計測結果から、直ちに覆工の応力やひずみ等の未知量を求めることができるという大きな特徴を有し、非常に便利な逆解析手法と言える。
- ② 本手法は、その適用において、入力変位数に制限されることなく覆工未知量の逆解析ができる点で従来になかった現場適応性を有する。
- ③ 計測点で挟まれた領域が狭いほど、その領域の逆解析精度は向上するので、応力、ひずみ等を求めようとする位置をあらかじめ決定してから、計測点の位置を決定する。

参考文献

- 1) Kovari, K., Amstad, ch. and Fritz, P. : Integrated Measuring Technique for Rock Pressure Determination, Proc. Int. Sympo. on Field Measurements In Rock Mech, pp 289-316, 1977.
- 2) Hisatake, M. and Ito, T.: Back Analysis Methods to Tunnel linings, Proc. Int. Symp. on Field Measurements in Rock Mech., pp.1047-1056, 1983.
- 3) Hisatake, M.: Back Analysis of Tunnel Lining Stresses, Proc. 7th Int. Conf. Computer Methods and Advances in Geomech., pp.1479-1484, 1991.
- 4) 久武 勝保 他：トンネル覆工応力の推定法に関する考察、第23回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.232-260, 1991.
- 5) 朝倉俊弘 他：トンネル覆工の力学挙動解析(Ⅰ)－複線トンネルの模型実験－、土木学会第45回年次学術講演会、pp.562-563, 1990.
- 6) 村上譲二 他：覆工応力逆解析法の実験的研究、土木学会第47回年次学術講演会、1992.