

トンネル覆工の簡易安定性評価法とその現場適用

久武勝保*・村上譲二**・土岐晃生**
村上敏夫***

既設あるいは建設中のトンネル覆工に発生している応力、ひずみ、変位を A 計測変位から現場で直ちに求めて覆工の安定性を評価する簡易安定性評価法を提案した。本手法では、側壁の一点に単位の鉛直・水平の強制変位を与えた場合の覆工の応力等の基本解をあらかじめ求めておき、その結果に現場計測変位を乗じて応力、ひずみ、変位が算定される。手法の精度・妥当性については模型実験により、また実際への適用性については現場計測により検討し、いずれも満足いく結果を得ている。

Key Words: back analysis, tunnel lining, non-destructive assessment, convergence, model tests, field measurements

1. 緒 論

近年、既設トンネルに近接して構造物を建設する場合だけでなく、トンネルの本体工事においても、施工済みの覆工の状況の評価しつつ工事を合理的に進める趨勢にある。しかし、その際トンネルは建設延長距離が長いために、計測は容易でその数も少ないことが施工現場から要求され、また少ない計測結果から覆工の力学量を十分な精度で解析しなければならないという厳しい条件が付加されることになる。

上記の諸条件を満足させて覆工の安定性を評価するために著者らは、トンネル内壁で得られる A 計測程度の少ない変位から、覆工の応力・ひずみ・変位・外力を逆解析する手法を開発し、その妥当性を数値解析により確認した¹⁾。そこで用いられる有限要素法 (FEM) での要素は覆工のみでよいために、逆解析に要する計算容量・時間・費用は大変少なく、従ってパソコンレベルの計算で解が得られ、また相対変位が利用できるという長所が認められた。しかしこの場合でも計測値ごとに逆解析をする必要があるため、計測時刻から評価結果の下されるまでには時間遅れが生じるのは否めないのが実状である。すなわち、覆工の現状および将来を評価した結果、緊急に対策を講じなければならない場合を想定すれば、上記手法の現場適用性をさらに高める必要が認められる。

そこで本論文では上記の要求を満たして覆工の安定性を評価するために、著者らの提案した逆解析手法を発展させ、簡単な四則演算により現場でただちに覆工の力学量を算出する手法を提案すると共に、本手法の精度・妥

当性を模型実験により、またその適用性を現場計測によって検証することを目的とする。なお、現場計測では吹き付けコンクリート覆工の力学特性が経時的に変化する場合についても、本手法では繰り返して逆解析する必要のない利便性を示すこととする。本手法は連続体力学に沿って導かれるものであり、クラックなどの損傷発生後の覆工評価についてはおのずと適用に限界がある。また実施工では覆工の厚さや強度変形特性は必ずしも設計通りではないことから、これら不確定性に合理的に対処する必要がある。そこで上記手法を補うために、損傷発生の時期とその位置を評価する手法についても模型実験結果を考察することにより示すこととする。

2. 覆工の力学量の簡易推定法

(1) 従来の逆解析法の概説

著者らが提案している覆工の逆解析法¹⁾は (A) 外力自乗和最小化法と、(B) エネルギー最小化法である。すなわち、覆工の計測変位の数が覆工外面に作用している未知外力の数に比べて非常に少ない通常の場合においては、その計測変位を発生させる外力の組み合わせは無数にあることから、上記手法では制約条件を与えることにより、力学量の唯一解を算定するものである。

(2) 簡易推定法

上記逆解析法では、工学的に満足する解を得るために必要な計測変位数は、以前に比べて格段に減少したが、変位計測を行ったトンネル横断面ごとに FEM 解析を行う必要があるため、覆工の安定性を評価するには、少なからず時間を要することになる。そこで、この点を改良するために単位の仮想変位を上記の手法に入力して覆工の基本力学量をあらかじめ解析しておき、その結果を現場計測変位に適用することにより、現場でただちに覆工の応力、ひずみなどの力学量を求める手法を示す。

上記の (A)、(B) の手法では、覆工内壁での 3 測点

* 正会員 工博 近畿大学助教授 理工学部土木工学科
(〒577 東大阪市小若江 3-4-1)

** 正会員 (株)浅沼組技術研究所

*** (株)地崎工業技術開発室

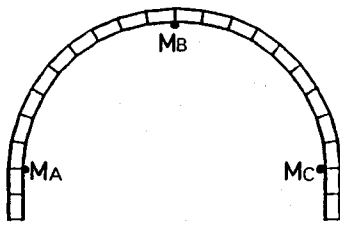


図-1 変位計測点位置

の変位から、覆工応力が十分な精度で推定されることが分かっているので、ここでは、変位計測点が図-1に示すMA、MB、MCの3点の場合について説明する。いま、計測から求められるMA、MB、MCでの絶対変位をそれぞれ(U₁, V₁), (U₂, V₂), (U₃, V₃)とする。ここに、U、Vはそれぞれ水平と鉛直の変位である。覆工の応力やひずみの推定では相対変位が利用でき、また工事現場では絶対変位に比べ相対変位の計測が容易であることより、計測点MBを基準にした実測相対変位は、

$$\begin{aligned} &M_A \text{点} : (\delta^*_1, \delta^*_2) \\ &M_B \text{点} : (0, 0) \dots\dots\dots (1) \\ &M_C \text{点} : (\delta^*_3, \delta^*_4) \end{aligned}$$

ここに、

$$\begin{aligned} \delta^*_1 &= U_1 - U_2, \quad \delta^*_2 = V_1 - V_2, \\ \delta^*_3 &= U_3 - U_2, \quad \delta^*_4 = V_3 - V_2 \end{aligned}$$

弾性覆工に対しては、重ね合わせの原理が利用できる。まず水平、鉛直方向に単位の仮想相対変位がMA、MCで計測されたとして、表-1に示すように、四つの基本パターンについてあらかじめ逆解析を行っておく。

上記の基本逆解析パターンkの結果から得られる覆工任意点qの応力、ひずみ、変位の成分の基本解をそれぞれσ_{ij}(q, k), ε_{ij}(q, k), u_i(q, k)とすれば、これらの結果に現場実測された式(1)の相対変位を乗じて足し合わせることにより、qにおける応力、ひずみ、変位の成分σ_{ij}(q), ε_{ij}(q), u_i(q)は、以下で算出される。

$$\sigma_{ij}(q) = \sum_{k=1}^4 \sigma_{ij}(q, k) \cdot \delta^*_k \dots\dots\dots (2)$$

$$\epsilon_{ij}(q) = \sum_{k=1}^4 \epsilon_{ij}(q, k) \cdot \delta^*_k \dots\dots\dots (3)$$

$$u_i(q) = \sum_{k=1}^4 u_i(q, k) \cdot \delta^*_k \dots\dots\dots (4)$$

すなわち、表-1に示す単位の仮想相対変位に対する逆解析をあらかじめ行って基本解を算出しておけば、現場で計測された相対変位を上式に適用することにより、ただちに応力、ひずみ、変位の現状を把握することができるわけである。

ところで、変位とひずみの基本解は覆工の弾性係数Eの影響を受けないが、応力の基本解はEの影響を受け、以下の関係がある。

表-1 基本逆解析パターンと単位の仮想相対変位

パターン	仮想相対変位		
	M _A 点	M _B 点	M _C 点
1	(1, 0)	(0, 0)	(0, 0)
2	(0, 1)	(0, 0)	(0, 0)
3	(0, 0)	(0, 0)	(1, 0)
4	(0, 0)	(0, 0)	(0, 1)

$$\sigma_{ij}^B(q, k) = \frac{E_B}{E_A} \sigma_{ij}^A(q, k) \dots\dots\dots (5)$$

ここにσ_{ij}^A(q, k), σ_{ij}^B(q, k)は覆工の弾性係数がそれぞれE_A, E_Bの場合の応力の基本解である。したがって、経時的に弾性係数の値が変化する吹き付けコンクリートを施工する場合においても、上式を利用すれば応力の基本解は一度求めておけばよいことになる。

3. 模型実験

上記手法の精度・妥当性を模型実験により検証する。また、覆工にクラックなどの損傷が発生した場合には、ここで述べた手法の適用には限界があるので、模型実験による変位計測結果を現象論的に分析することより、損傷の発生時期とその位置を評価する手法について示すこととする。

(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2次元模型²⁾であり、写真-1と図-2に実験装置を、また写真-2に覆工模型を示す。

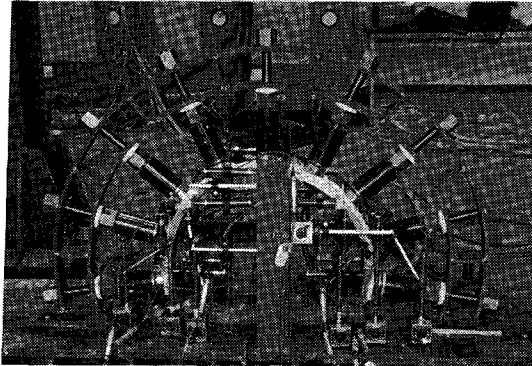
実験装置には、ロードセルをセットした9本のロッドが覆工横断面内に取り付けられており、各ロッドは反力フレームに設置したボルトにより、円筒形ゴムを介して、模型覆工外面に荷重を与えるようになっている。また、強度-変形特性の異なる覆工材料に対して、本手法が妥当な解を与えるかを検討するために、普通モルタルとポリマーモルタルで作成された2種類の覆工を用いた。それらの配合と力学定数を表-2に示す。

(2) 実験手順

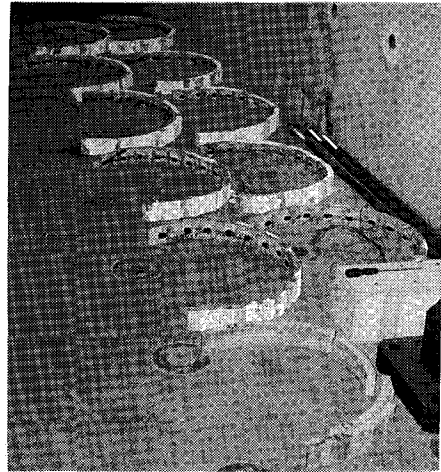
まず、ひずみゲージを貼った厚さ20mmの覆工を実験装置にセットし、すべてのロッドで微小な初期荷重を載荷して荷重、変位、ひずみの初期値を計測しておく。次に載荷箇所を決め、反力フレームに設置したボルトにより荷重を段階的に載荷し、各載荷段階での荷重、覆工内面の水平・鉛直変位、および内面の円周方向ひずみを

表—2 配合と力学定数

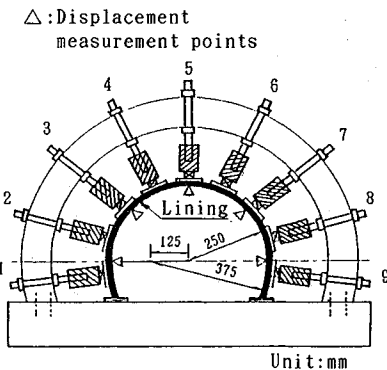
	ポリマーセメント比 (%)	単位セメント量 (kg/m ³)	単位ラテックス量 (kg/m ³)	単位水量 (kg/m ³)	水セメント比 (%)	単位加骨材量 (kg/m ³)	配合強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)
普通モルタル	-	550	-	272	49.5	1275	485	251000
ポリマーモルタル	10	550	55	206	37.5	1293	406	208000



写真—1 模型実験状況



写真—2 覆工模型



図—2 模型実験装置と荷重載荷位置番号

計測する。なお、以上の実験を使用覆工材料および載荷方向を変えて、覆工が終局的な破壊に至るまで行った。

(3) 実験と解析の結果の比較・検討

図—3は本解析で用いた2次元有限要素である。現場の計測状況を考慮して、図—3の★で計測した3箇所絶対変位を、式(1)で示した相対変位に変換し、これを本手法に適用している。そして、覆工内面の節点変位と円周方向ひずみについて、2.(1)の(A)の手法による解析と、実験から求められる結果を比較検討する。

図—4は、普通モルタルで作成した覆工に、図—2の5番ロッドで対称載荷した場合について、覆工破壊時の最大ロッド荷重の30%が載荷された時点の結果である。また、図—5は同じく90%載荷時点の結果である。

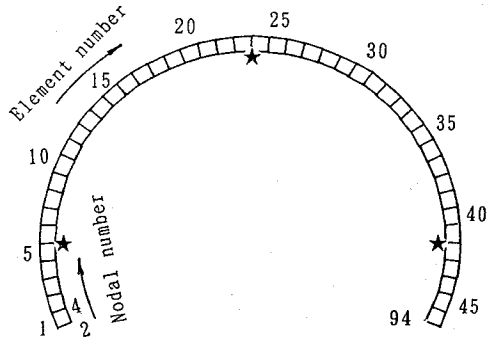
図—4, 5の(a)は外力分布である。覆工は5番ロッド

により鉛直上方から載荷されるため、左右に変形しようとするが、外周ロッドにより変位拘束されるので、これから受働荷重を受けることになる。

図—4, 5の(b), (c)は、解析で得られた水平と鉛直の変位を実験結果と比較したものである。ただし、図中の★と▲の値は共に実測値であり、このうち★の変位のみが解析の入力値として用いられている。なお、比較の便のため、解析結果は絶対変位に直している。★の値は解析に入力した実測変位であるので、これと解析結果が一致するのは当然であり、▲の実測値と解析値を比較することにより、解析精度が検出出来る。図—4は載荷重が小さいので、計測誤差の影響を受けやすいことから、(b)に示す水平変位の比較において、解析と実測に若干の差が生じているが、(c)の鉛直変位、および載荷重が大きい図—5の(b)と(c)の結果からすると、解析結果の精度が相当高いことが理解できる。

図—4, 5の(d)は内壁の円周方向ひずみの実測と解析の結果を比較したものである。ただし、側壁部の変位入力点より脚端側の領域は、計測点で挟まれていないので、本解析の適用外領域となり、精度の保証は出来ない¹⁾。脚部測点付近を除けば、解析と実測の結果は十分な精度で一致している。

図—6はポリマーモルタルの覆工を用いて、上記と同様の実験を行った結果である。ただし、覆工破壊時の最



★: Nodes that input displacements are given

図-3 覆工の有限要素分割

大ロード荷重の60%が載荷された時点の結果である。この場合においても、図-4, 5とほぼ同様の結果が認められる。

図-7は、2番ロードで普通モルタル覆工側面に非対称な載荷を行った場合について、覆工破壊時の最大ロード荷重の90%が載荷された時点の結果である。側壁部載荷のため、最大水平変位は図-5の実験結果に比べてはるかに多く発生しており、また変位のモードも大きく異なっているが、解析における変位の精度は前記の結果同様非常に高い。一方解析ひずみの精度は、覆工上半では十分な精度を保っているが、脚部測点付近で低下しているのが認められる。脚部計測点の位置を脚端側に移動して解析対象領域を拡大するとか、あるいは新たな計測点を脚端付近に設けることによって解析精度を高めることが可能である¹⁾。

(4) 損傷の発生時期と位置

過大な荷重が作用すれば、覆工にはクラックなどの損傷が発生し、またこれにともなって変位やひずみの分布は大きく変化することになる。覆工の安定性を評価する場合、このような損傷部の発生をいち早くキャッチするのは極めて重要であるが、本提案手法は弾性解析であるため、損傷発生以前には十分適用できても、その発生後の挙動については適用範囲を越えるため、当然使用できない。しかし、本手法により、損傷発生以前の解析応力と材料強度、あるいは解析ひずみと材料の破壊時ひずみの比較³⁾により危険な状況のある程度推定できるし、また以下で示すように現場計測変位を分析することにより、損傷の発生時期と位置を推定することも可能である。

図-8は覆工上部から載荷した場合について、図中のL₁からL₄の4測線のひずみが、載荷重と共に変化する様子を示したものである。これよりクラックの発生する110 kgfの載荷重に達する以前までは、ひずみに大きな変動はなかったがクラックの発生にともなってひずみが急激に変動しているのがわかる。クラックの発生と共に

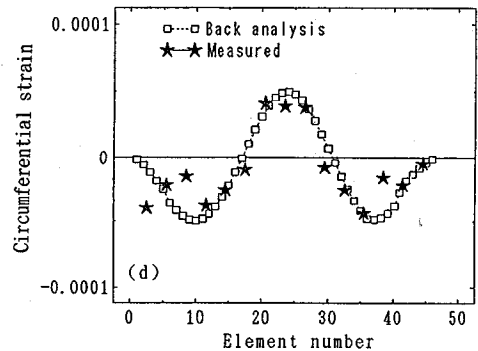
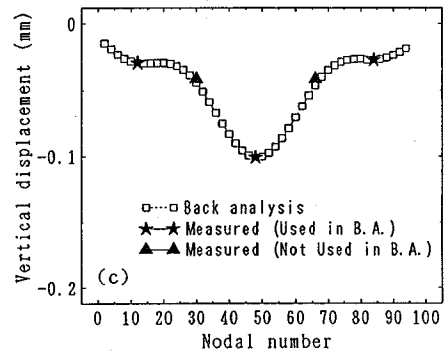
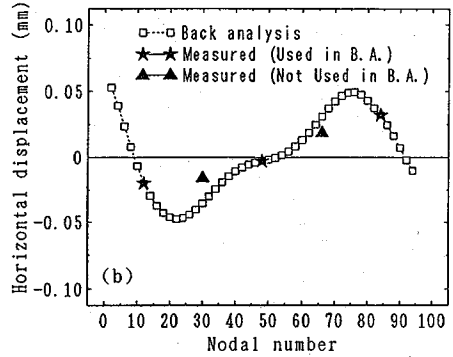
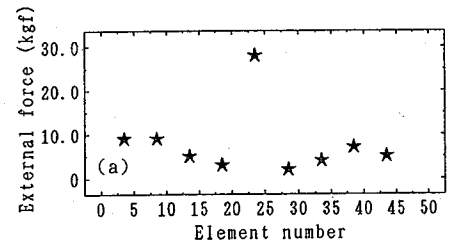


図-4 解析と実験結果の比較(30%荷重, 普通モルタル)

その発生位置付近の覆工が他に比べて大きく動くものと思われるが、これはクラック発生位置を計測対象領域に含む測線L₂が、またクラック発生の影響を強く受ける測点Bをその端点に有する測線L₃が、他に比べて大きく変動していることから理解できる。また、図-9は覆工側面から載荷した場合の結果であり、クラックは覆工

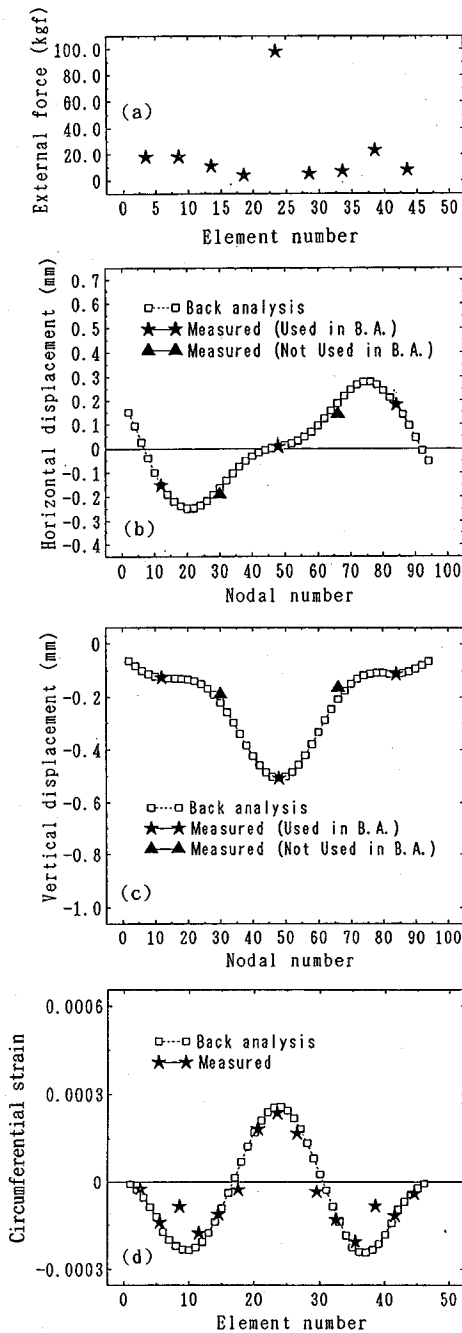


図-5 解析と実験結果の比較(90%荷重, 普通モルタル)

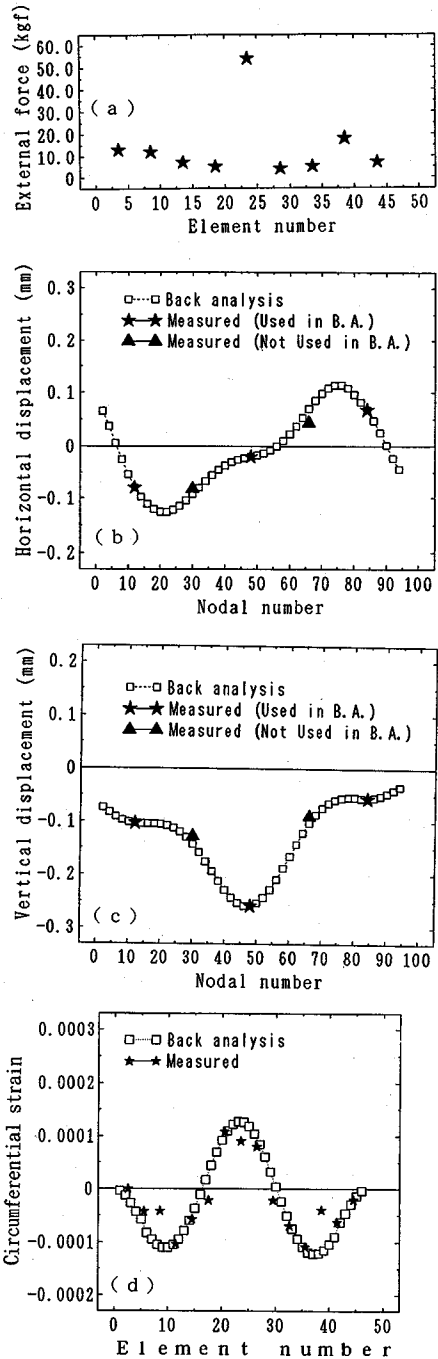


図-6 解析と実験結果の比較(60%荷重, ポリマーモルタル)

内・外面にほぼ同時に発生した。この場合についても、上記とほぼ同様の結果が認めらる。

以上の結果から、コンバージェンスの値が急激に変動する場合には覆工が損傷を受けた可能性が、また損傷位置は変動の激しい測線付近にある可能性が高いことが理解できる。本実験では図-8, 9からも理解できるように、

クラック発生以後においても覆工の耐力はまだ相当あるので、上記のような分析により覆工の損傷発生を早急に捉えて適切な対応策をとれば、大過なく工事を進めることも不可能ではない。

工事現場で施工される実際の覆工厚さ等は必ずしも設計通りではない。計測結果はこのような不確定な施工条

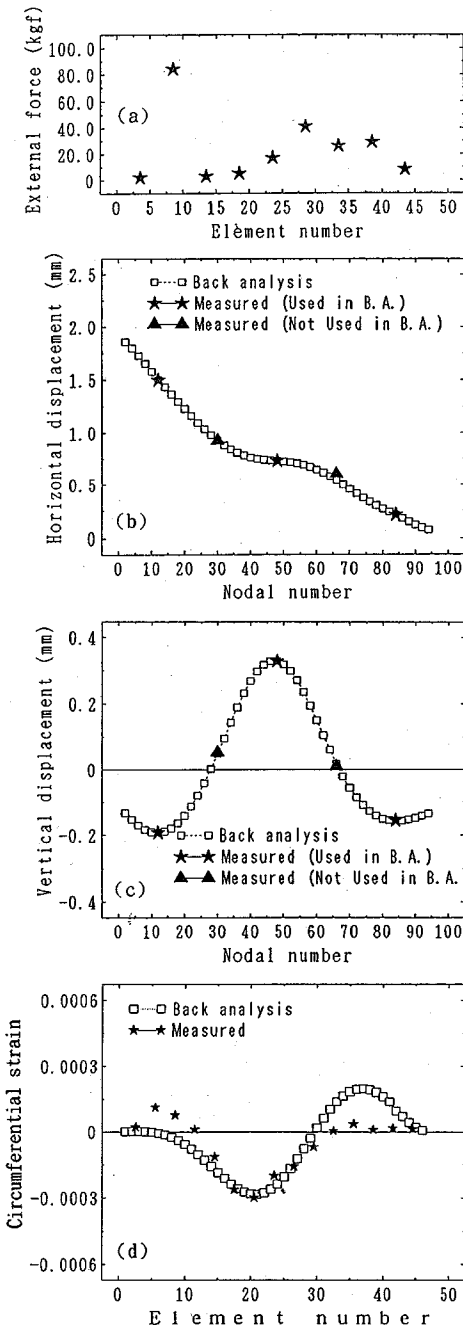


図-7 解析と実験結果の比較(90%荷重, 普通モルタル)

件や解析で取り扱えない複雑な覆工挙動を、実際の現象として数値により提示している。これは、仮定に基づいて得られる解析結果と本質的に異なるものである。従って、トンネル覆工の安定性の施工管理は計測値の分析結果と逆解析結果から総合的に評価する必要があると認められる。

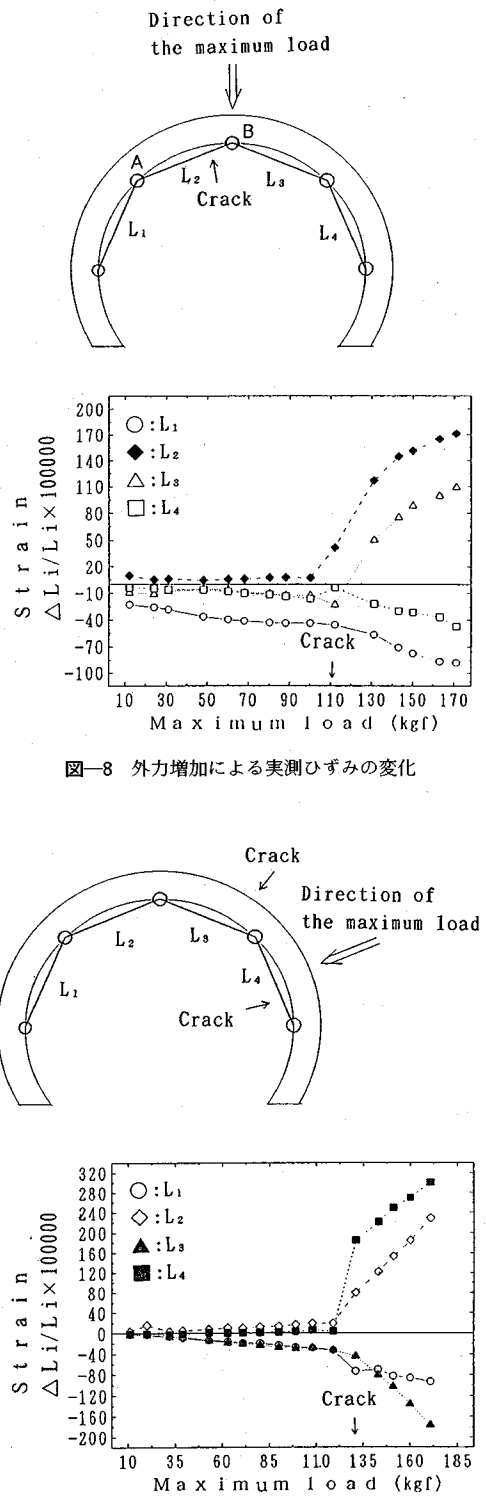


図-8 外力増加による実測ひずみの変化

図-9 外力増加による実測ひずみの変化

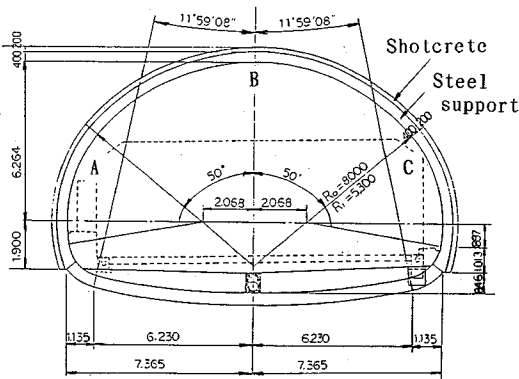


図-10 トンネル標準断面

表-3 トンネルと吹き付けコンクリート、鋼製支保工の施工条件

Tunnel height	8.56 m
Tunnel width	15.54 m
Interval of steel support(H-200)	1 m
E of steel support	21,000,000 tf/m ²
Thickness of shotcrete	20 cm

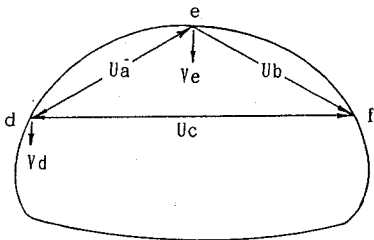


図-11 変位計測状況

4. 現場実測

提案手法の実際への適用性を検証するために現場計測を行い、一次覆工としての吹き付けコンクリートと鋼製支保工の応力と軸力をそれぞれ測定し、これらと解析結果を比較・検討する。

(1) トンネル概要

対象トンネルは仕上がり内空断面積約 131 m² の 3 車線大断面トンネルであり、図-10 に当トンネルの標準断面を示す。トンネル周辺地質は基盤岩が新生代第三紀の足柄層群であり、地質的には礫岩に区分され、固結度は低い。強風化部の縦波速度 V_p は 0.6 から 1.5 km/sec であり、基質の一部が風化粘土化し、粘土質砂礫状を呈し、 N 値は 7 から 39 と小さい。弱風化部の V_p は 2.3 から 2.8 km/sec であり、シルト、粘土はほとんど混入されず、 N 値は 70 以上で測定不能である。トンネルはベンチ工法で施工され、施工条件を表-3 に示す。

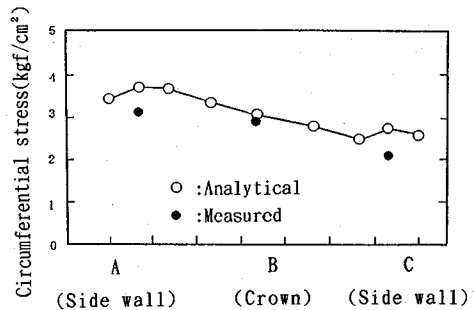


図-12 吹き付けコンクリートの実測と解析の比較

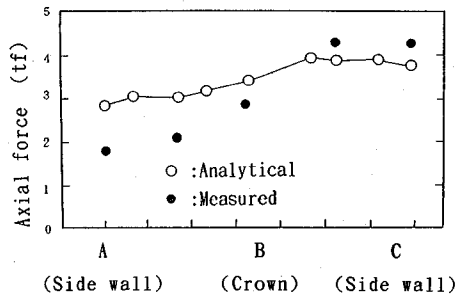


図-13 鋼製支保工の実測と解析の比較

(2) 解析条件と変位計測

解析対象領域は、ベンチ上半部の覆工とした。

吹き付けコンクリートの強度、弾性係数 E はその施工後の時間と共に増加するため、解析によって応力を求めるには E の経時変化をあらかじめ把握していなければならない。そこで一軸圧縮強度から E を間接的に算定し⁹⁾、これを使用した。

変位計測は、図-11 に示すように、3 測線 (U_a , U_b , U_c) の変化とクラウン e 点、側壁部 d 点の沈下とし、これより相対変位を算定した。

(3) 実測と解析結果の比較

図-12 は吹き付けコンクリート内壁の円周方向直応力について、また図-13 は上記と異なる断面での鋼製支保工の軸力について、2. で示した (B) の手法による解析と実測の結果を比較して示したものである。なお、これらの図は覆工施工 16 日後における結果であり、吹き付けコンクリートの解析応力は、その弾性係数が経時的に変化することを考慮して式 (2), (5) で算定し、各計測時刻ごとの増分応力の和として求めた。また図中の A, B, C の位置は図-10 に示されている。解析と実測の結果について、コンクリート応力はほぼ満足できるが、軸力結果に若干差が認められる。しかし 3. (4) で指摘した現場施工の不確定性の影響等を考慮すれば、工学的にはほぼ満足する解析結果が得られたものと思われる。また、本論文で提案した簡易手法は、吹き付けコンクリートの弾性係数が経時的に変化する現場において

特に有効であることが認められ、トンネルの安定性評価法として今後利用できるのではないかと考えられる。

5. 結 言

(1) 本論文では、先に提案した覆工に対する逆解析手法の実際への適用性を増すために、あらかじめ求めておいた基本解に現場計測変位を乗じることにより、現場でただちに覆工の力学量を算定する手法を提案した。また、その精度・妥当性については模型実験により、また実際への適用性については現場計測により検討し、いずれも工学的に満足のいく結果を得ることができた。

(2) 覆工にクラック等の損傷が発生した場合には、本手法の適用は制限されるが、しかしコンバージェンス結果から損傷発生の時期と位置を推定できることを、模型実験結果を考察することより示した。損傷発生後の覆工の力学挙動は複雑であり、それを解析により定量的に追跡するのは現在においても容易でない。しかしそのような複雑な覆工挙動や現場施工の不確定性を、計測変位は事実の現象として数値により提示していることを確認し、解析結果と現場計測結果の総合的な評価によって、覆工の施工管理を行うことの必要性を示した。

(3) 吹き付けコンクリートのように、覆工の弾性係数が時間的に変化しても、本手法ではFEM逆解析を繰り返して行う必要はなく、本手法が簡易に適用できることを現場計測により確認した。

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，pp. 79-86，1992. 12
- 2) 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)―複線トンネルの模型実験―，土木学会第45回年次学術講演会講演概要集，第Ⅲ部門，pp. 562-563，1990
- 3) 桜井春輔：トンネル工事における変位計測結果の評価法，土木学会論文報告集，第317号，pp. 93-100，1982
- 4) 朝倉俊弘・安東豊弘・小島芳之・伊東淳・山本晃司：トンネル覆工のひび割れ進展シミュレーション，第25回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp. 66-70，1993
- 5) 久武勝保・伊藤富雄・桜井春輔：時間依存性を示す膨張性軟岩トンネルの一次覆工挙動，土木学会論文集，第412号，pp. 153-160，1989

(1994. 4. 4 受付)

A SIMPLE METHOD TO ASSESS TUNNEL LINING STABILITY AND ITS APPLICATION

Masayasu HISATAKE, Joji MURAKAMI, Teruo TOKI and Toshio MURAKAMI

In order to assess tunnel lining stability with a small number of convergence data, a simple method has been proposed here. Stresses, strains and displacements of the lining are back-analyzed from relative displacements measured at 3 points on inner boundaries of crown and side walls. Model test results showed high accuracy of the method. The method was applied to a practical tunnel and good applicability of the method was demonstrated by comparing the analytical results and the actual records.