

(112) トンネル覆工の健全度の簡易評価法

近畿大学 久武勝保
(株)浅沼組 村上譲二
(株)浅沼組 土岐晃生
(株)地崎工業 村上敏夫

Assessment of tunnel lining stability

M. Hisatake Kinki University
J. Murakami Asanuma-gumi Co., Ltd
T. Toki Asanuma-gumi Co., Ltd
T. Murakami Chizaki-Kogyo Co., Ltd

Abstract

In order to estimate stresses, strains and displacements of a tunnel lining and to assess the stability of the lining, a simple method has been proposed here. Relative displacements at three points on the inner lining boundary (crown and side walls) can be fed into the method.

Appropriateness of the method has been shown through numerical and experimental results.

1. 諸 論

覆工の健全度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示し、その有効性を数値実験により確認した¹⁾。そこで用いられる有限要素解析(FEM)では地山要素を必要とせず、覆工要素のみでよいために、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トンネルの各計測横断面ごとにFEM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考えた場合、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健全度を評価するために、著者らの提案した逆解析手法をさらに発展させ、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。本手法では計測変位が変化したり、あるいは吹き付けコンクリートの弾性係数が時間と共に増加することにFEM解析をする必要はない。あらかじめ基本解析を工事着手前に行っておき、その結果に現場計測変位を乗じることにより覆工の力学量が求められる。本手法の精度・妥当性を模型実験により検証した。

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、これら不確定な特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変位計測結果のみから推定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) 従来の推定法

著者らが提案している覆工の力学量の推定法¹⁾は(A)外力自乗和最小化法(ノルム最小化に対応)と、(B)エネルギー最小化法である。すなわち、上記手法では制約条件を与えることにより、覆工の計測変位の数に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も、力学量の唯一解を算定する事が可能である。

(2) 簡易推定法

上記逆解析法では、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。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ことができる。

上記の(A)、(B)の手法では、覆工内壁での3測点の変位から、覆工応力が工学的に十分な精度で推定されることが分かっている¹⁾ので、ここでは、変位計測点为天端(M_B)、左右の側壁(M_A、M_C)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M_A、M_B、M_C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(δ*)の計測が容易であることより、計測点M_Bを基準にした実測相対変位は、

表-1 基本逆解析パターンと単位の仮想相対変位

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

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M_A、M_C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 $\sigma_{ij}(q, k)^*$ 、 $\varepsilon_{ij}(q, k)^*$ 、 $u_i(q, k)^*$ 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により、qにおける応力、ひずみ、変位の成分 $\sigma_{ij}(q)$ 、 $\varepsilon_{ij}(q)$ 、 $u_i(q)$ は、以下で算出される。

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

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。

$$\sigma_{ij}^B(q,k)^* = \frac{E_B}{E_A} \sigma_{ij}^A(q,k)^* \tag{3}$$

ここに $\sigma_{ij}^A(q,k)^*$ 、 $\sigma_{ij}^B(q,k)^*$ 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推定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、図-1に実験装置を示す。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。

(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計測する。なお、以上の実験を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-2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-2の★で計測した3箇所の絶対変位を、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-3は、普通モルタルで作成した覆工に、図-1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90%が載荷された時点の結果である。図-3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-3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

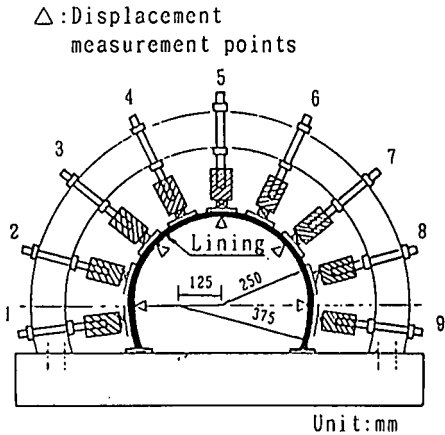
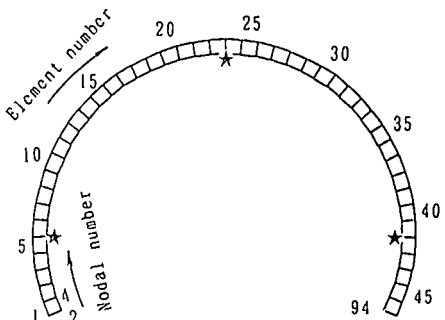


図-1 模型実験装置と荷重載荷位置番号



★:Nodes that input displacements are given

図-2 覆工の有限要素分割

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、解析精度が検討出来る。図-3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-3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。

(4) A計測結果から損傷の発生時期と位置の推定

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により危険な状況をある程度推

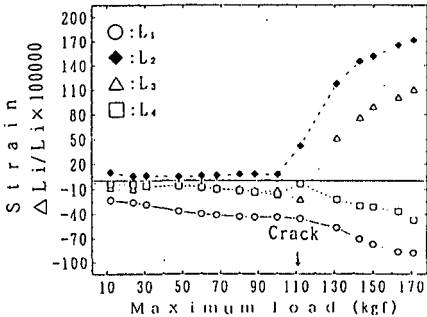
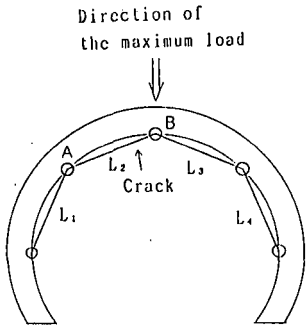
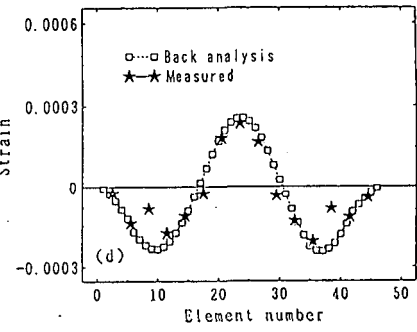
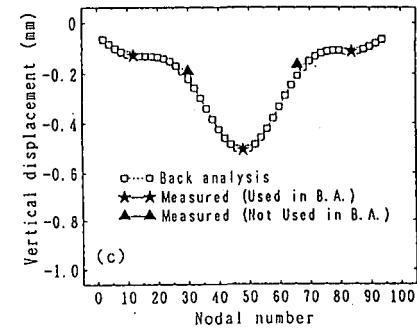
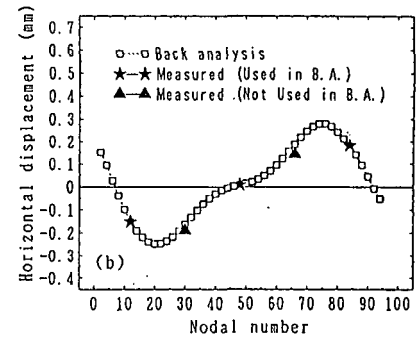
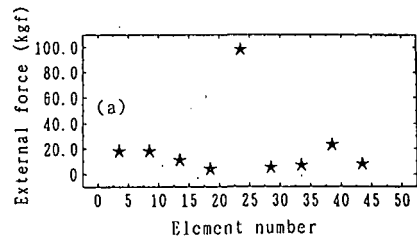


図-4 外力増加に伴う実測ひずみの変化

図-3 解析と実測の結果の比較(終局荷重の90%載荷)

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-4は覆工上部から载荷した場合について、図中の L_1 から L_4 の4測線のひずみが、载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の载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 L_2 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 L_3 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-5は覆工側面から载荷した場合の結果であり、クラックは覆工内・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-4、5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認められる。

5. 結 言

(1) 本論文では覆工の健全度を評価するために、あらかじめFEM解析により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検討し、工学的に満足のいく結果を得ることができた。

(2) 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示した。

(3) 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。

参考文献

- 1) 久武勝保・村上敏夫：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：土木学会第45回年次学術講演概要集、第Ⅲ部門、pp. 562-563, 1990

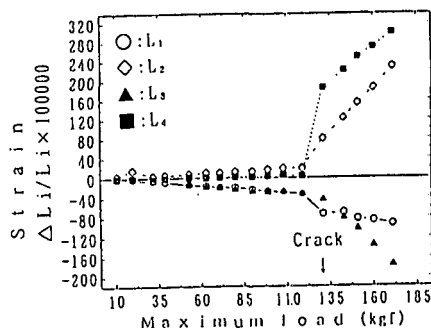
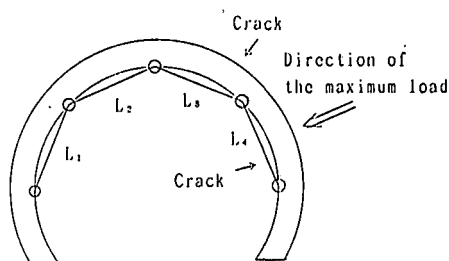


図-5 外力増加に伴う実測ひずみの変化