

大阪大学工学部 正員 ○久 武 勝 保

大阪大学工学部 正員 伊 藤 冨 雄

京 都 府 正員 仲久保 忠 伴

1 はじめに

地山の力学特性や初期応力を、トンネルの設計時において精度良く推定することは非常に困難であり、これらが精度良く求められていない状況では、たとえ厳密な解析を行っても得られる結果の精度は低い。

したがって、トンネルが予想よりも劣悪な地山に遭遇し、設計変更を余儀なくされることはまれではなく、施工現場では当面の地山に対して覆工が十分であるか否かを判断し、不十分であれば早急に善後策をとることが非常に重要となる。しかし、三次元的に広がっている覆工の施工管理のために、覆工の変位計測結果を定量的に評価する手法は現在のところ確立されておらず、したがって吹付コンクリートやロックボルトを増打ちする場所や時期が合理的に決められているとは言い難い。本研究では、たとえ地山が破壊しても覆工が破壊しない限りトンネル構造物は安定するという立場から、覆工内面の変位計測結果を利用して覆工の応力及び地圧を算出し、それに基づいて施工管理を行う手法を提案する¹⁾。この手法では、指定の困難な地山の初期応力や力学定数は使用せず、力学特性の明らかな覆工のみを取り扱うという特徴があり、NATMはもとより、隣接施工の影響を受ける既設構造物の施工管理に対しても適用できるものである。

2 提案手法の概略

図-1に示すように覆工のみを取り出し、節点変位 U と覆工外面に作用する節点外力 $\bar{F}_0$ との関係を、有限要素法(FEM)で示せば次式のようなになる。

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_i \\ \bar{U}_c \\ \bar{U}_o \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \bar{F}_0 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ここに、 U_i は現場計測により既知となる覆工内面の変位、 $\bar{U}_c$ 、 $\bar{U}_o$ は覆工の内部及び外面の未知変位、 K_{ij} は部分剛性マトリックスである。通常のFEM解析では、 $\bar{F}_0$ を既知として U を求めるが、上式では U_i のみが既知である。上式のはじめの二つの式を取り出して変形すると

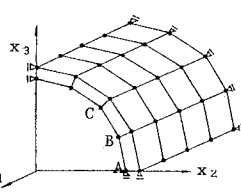
$$\begin{Bmatrix} \bar{U}_c \\ \bar{U}_o \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} K_{12} & K_{13} \\ K_{22} & K_{23} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} K_{11} \\ K_{21} \end{bmatrix} \{U_i\} \quad (2)$$

図-1のように、覆工の内・外面の節点数を同一の m とし、覆工内部の節点数を n とす。図-1 トンネル覆工
れば、未知変位の数は $3(m+n)$ となるが、式(2)の数も $3(m+n)$ となるので、式(2)を解くことにより、全ての未知の節点変位を求めることができる。また、以上で得られた変位を、式(1)の第3式に代入することにより、外力 $\bar{F}_0$ が求まり、さらに、全節点変位が既知なのでこれを、ひずみ～変位式、応力～ひずみ式に適用することにより、覆工応力が容易に算出される。すなわち、覆工内面の計測変位から、覆工の応力、地圧が一義的に決定されるわけである。以後、この手法をLSEM(Lining Stress Estimation Method)とよぶ。

3 本手法の検証及び考察

実際の施工では、切端のすぐ手前で1次覆工が施工され、その後切端が前進する。そこで、3次元FEMにより、掘削と覆工の施工をくり返す解析(以後、Sequence Analysis(SA)という。)を行い、定常状態時の1掘削に起因する覆工の応力、変位をあらかじめ求めておき、次に、この様にして得られた変位のうち、覆工内

面変位のみを本手法に適用して覆工応力を逆算し、これと上記SAによる応力とを比較する。なお、図-2はここで用いた覆工の要素分割であり、トンネル半径(a)は4 m, 覆工の厚さ20 cm, 弾性係数 $2 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$, ポアソン比0.15とし, SAで必要となる地山の初期応力は水



平 $\sigma_h = 5 \text{ kg/cm}^2$, 鉛直 $\sigma_v = 2\sigma_h$, 地山は弾性体とし, 又 図-2 覆工の要素分割の弾性係数 10^5 kg/cm^2 , ポアソン比0.3, トンネルの掘削長は $0.5a$ とする。

図-3は, 図-2に示す x_1-x_2 及び x_1-x_3 断面の覆工内面円周方向応力 σ_θ について, SA及び本手法による逆解析の結果を示したものであるが, これから本手法は覆工応力を精度良く算定できることがわかる。しかし現場では通常, トンネル軸方向変位は測定されないで, SAから得られた内面変位のうち, 軸方向変位を無視し, トンネル横断方向の変位のみを本手法に与えて応力を求め, これとSAによる応力とを比較したのが図-4であるが, これから本手法において, トンネル軸方向変位を無視して覆工応力を求めても良いことがわかる。以上に示す様に, トンネル軸方向変位は覆工応力にあまり影響を与えないので, 次に覆工の任意横断面を2次元平面歪状態と仮定し, SAで得られる横断方向内面変位を2次元の本手法に適用して覆工応力を求め, これとSAによる応力とを比較したのが図-5である。

これから, トンネル横断面内の覆工応力を本手法により2次元的に算定しても, 実用上問題はないと思われる。次に, 図-6は, 図-2に示すA, B, Cを通るトンネル縦断面内の覆工内面変位のみを3次元の本手法に与え(ただし, トンネル軸方向変位は無視する。), 他の覆工内面変位を無視して覆工応力を求め, これとSAの結果とを比較したものである。これから, 覆工の一部に着目し, その部分の覆工内面変位のみを与えることによって, その部分の覆工応力を十分な精度で算定できる事がわかる。したがって, 落盤に対する安全のために覆工の上半のみ計測を行ったり, あるいは, 一部分の覆工が特異な挙動を示せば, その部分のみの変位計測を行い, これから計測部分の覆工応力を算定することも可能である。

参考文献: (1) M. Hisatake, T. Ito and T. Nakakubo: Back Analysis Method to Tunnel Linings, Proc. Int. Symp. Field Measure. Geomechanics, Zurich, 1983.

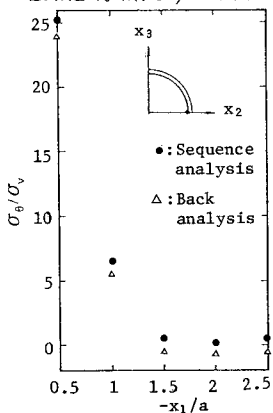


図-6 SAと一部変位による本手法の比較

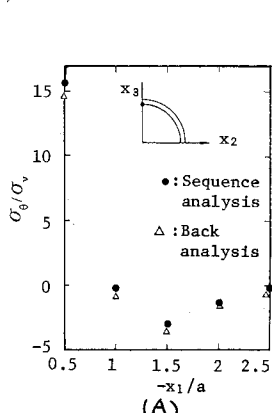
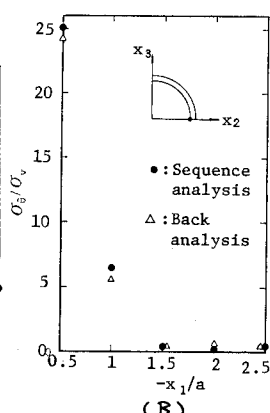
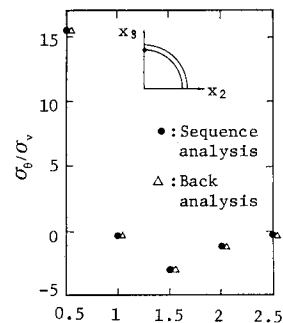


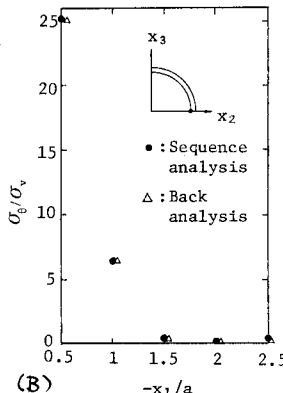
図-5 SAと2次元の本手法の比較 (A)



(B)

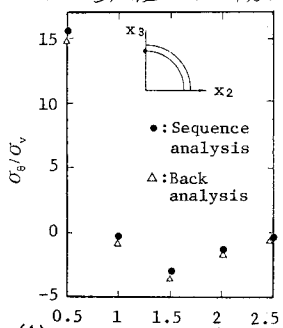


(A)

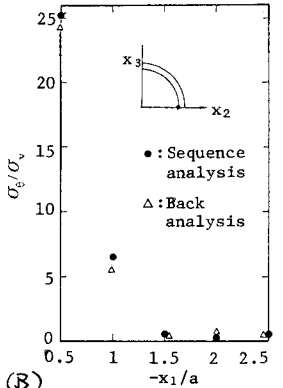


(B)

図-3 SAと本手法(B.A.)の比較



(A)



(B)

図-4 SAと軸方向変位無視の本手法の比較