

吹き付けコンクリート覆工に作用する土圧の推定法

神戸大学大学院 学員 ○進 士 正 人
神戸大学工学部 正員 桜 井 春 輔

1. まえがき

本文は、スイス工科大学で開発された Integrated Measuring Technique¹⁾ を吹き付けコンクリート覆工の土圧推定に用い得る可能性について述べたものである。従来、この方法の適用は、鋼製アーチ支保工²⁾及び、コンクリートセグメント覆工³⁾の場合に限られていた。その理由は、吹き付けコンクリート覆工の断面が、鋼製アーチ支保工等と異なり、凹凸を含んだ形状をしていること、及び、吹き付けコンクリートの材料特性が複雑であり、測定したひずみから応力を推定することがむずかしいことによる。ここでは、まず数値計算によるシミュレーションで断面形状の凹凸の取り扱い、及び推定される土圧の精度を検討し、次に、吹き付けコンクリートの材料特性、特に時間依存性の応力-ひずみ関係を原位で求める方法論について述べる。

2. 計測機器

Integrated Measuring Technique の基本的な考え方は、通常の構造解析の手順を逆に行なうものである。すなわち、この方法は、変位を計測し、その微分によりひずみを求め、ひずみより断面力を求め、最終的に荷重を断面力の微分形として決定する方法である。この方法では、微分を行なうために変位の測定においては非常に高精度が要求される。スイス工科大学で開発された、DEFORMETER、CURVOMETER²⁾ の2つの計器は非常に精度が高く、この方法の現場への適用を可能にしている。なおこの器械による測定値の精度は、現場において、それぞれ $\pm 0.005\text{mm}$ 及び $\pm 0.002\text{mm}$ より小さいことが確かめられている。

3. 基礎式

図-1に、測定点A、B、Cを含む吹き付けコンクリート覆工の一部を示す。弧ABの距離を L 、 L とアーチの中央C点との距離を F 、トンネルの中心線からの設計半径を R 、設計吹き付け厚を h 、設計吹き付け中心線から、測定点までの距離を e とする。

変形後の F と L を、それぞれ $\bar{F}$ 、 $\bar{L}$ とし、変形前の値 F 、 L との差を取ってそれぞれ f 、 l のように定義する。

$$f = F - \bar{F}$$

$$l = L - \bar{L}$$

(1)

図-1

この f と l は、仮想仕事の原理を用いて(図-2参照)以下のように書ける。

$$f = \kappa \int_0^L \bar{M}_1(s) ds + \epsilon \int_0^L \bar{N}_1(s) ds$$

$$l = \kappa \int_0^L \bar{M}_2(s) ds + \epsilon \int_0^L \bar{N}_2(s) ds$$

(2)

図-2

ここで、 κ 及び ϵ は、それぞれ吹き付けコンクリート覆工の曲率と垂直ひずみを表わす。また、 $\bar{M}_i(s)$ 及び $\bar{N}_i(s)$ は、仮想系 i の曲げモーメント及び軸力である。式(2)の右辺の各項をそれぞれ、 F_1 、 F_2 、 L_1 、 L_2 とすれば

$$F_1 = R \left[\frac{L_0}{4} - R(1 - \cos \frac{\theta}{2}) \right]$$

$$F_2 = R(1 - \cos \frac{\theta}{2})$$

$$L_1 = -2R[R \sin \frac{\theta}{2} - (R - e) \frac{\theta}{2}]$$

$$L_2 = 2R \sin \frac{\theta}{2} \quad (3)$$

となる。図-3は、半径Rに対する F_1, F_2, L_1, L_2 の値を、種々の e [cm]に対して計算したものである。式(3)より、吹き付けコンクリート覆工の曲率 κ 、垂直ひずみ ϵ は、以下のように表せる。

$$\epsilon = \frac{1}{|A|} (F_1 l - L_1 f)$$

$$\kappa = \frac{1}{|A|} (L_2 l - F_2 f) \quad (4)$$

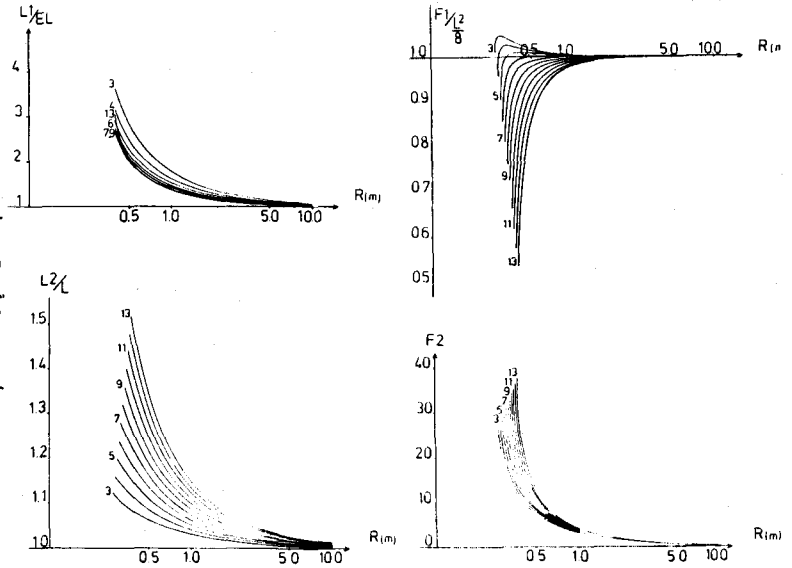


図-3

ここで、 $|A| = F_1 L_2 - F_2 L_1$ を表す。

次に、吹き付けコンクリートの応力-ひずみ関係が図-4のように与えられるならば、覆工断面の曲げモーメントと軸力は、それぞれ次のように表わせる。

$$N = \int_A f(\epsilon_i) dA$$

$$M = \int_A f(\epsilon_i) \cdot y_i dA \quad (5)$$

ここで $\epsilon_i = \epsilon + \kappa y_i$ (図-5)

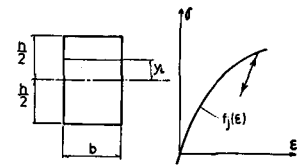


図-4

図-5

吹き付けコンクリートに作用する土圧の半径方向及び接線方向の成分 $P(r)$ と、

$t(r)$ は、図-6に示す微小要素の両端に作用する曲げモーメントと軸力から、以下の式によって関係づけられる。

$$P = \frac{N}{R} - \frac{d^2 M}{ds^2} \quad t = \frac{dN}{ds} + \frac{1}{R} \frac{dM}{ds} \quad (6)$$

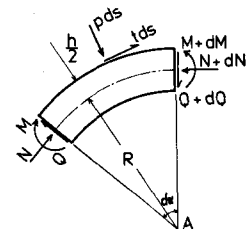


図-6

式(6)を差分表示すれば、計算値から求められた曲げモーメント、及び、軸力から、吹き付けコンクリートに作用する土圧の推定が可能になる。すなわち、

$$p_i = \frac{N_i}{R} - \frac{1}{L^2} (M_{i-1} - 2M_i + M_{i+1})$$

$$t_i = \frac{1}{2L} [N_{i+1} - N_{i-1} + \frac{1}{R} (M_{i+1} - M_{i-1})] \quad 2 \leq i \leq n-1 \quad (7)$$

3. 計算機を用いたシミュレーション

第2章で述べた計算手順は、厳密には、トンネルの覆工が滑らかなアーチから成る場合に成立するものである。しかし、吹き付けコンクリート覆工はかなりの凹凸を有するため、先に示した計算手法の適用性は明らかでない。従って、ここでは、有限要素法によるシミュレーションによって、本手法の吹き付けコンクリート覆工の土圧推定に対する適用性について検討する。

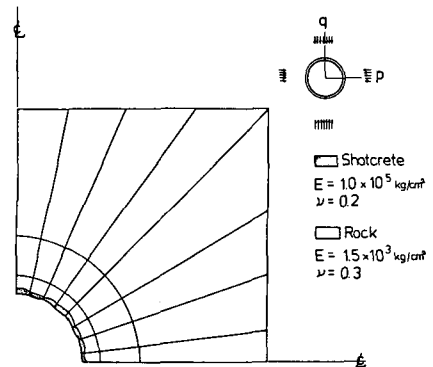


図-7

図-7にシミュレーションに用いるモデルを示す。トンネル半径は、2.5 m、吹き付けコンクリート覆工平均厚さは、15 cmである。トンネルの掘削断面をモデル化するために正規乱数を用いて凹凸を与えた。シミュレーションに用いたトンネル断面形状の一例を図9～図11に示す。これらは正規乱数の標準偏差、3.5cm、7.0cm、9.0cmに対するものである。なお、吹き付けコンクリート覆工の内側は、岩盤の形状を考慮して、できるだけ滑らかになるように若干の修正を施している。

シミュレーションの手順は、まず有限要素法によって、吹き付けコンクリートの変位を計算する。そして、その変位から、式(1)の σ と ϵ を求め、これを実測値とする。次に、式(3)により、各係数を決定し、式(4)、(5)によつて、曲げモーメント、及び軸力を求める。一例として、図-8に2つのケース(○印と△印の実線)の結果を示す。この図において、●印の点線は、吹き付けコンクリートを設計厚とした滑らかな覆工に対する結果である。これらの結果より明らか

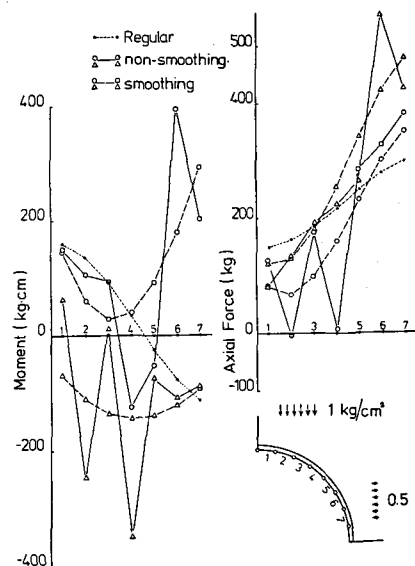


図-8

かなように、凹凸を有する吹き付けコンクリート覆工の曲げモーメント及び軸力は、設計厚さを有する理想的な覆工の場合と比べかなりばらつくことがわかる。そこで、 σ 、 ϵ をスムージングによつて滑らかにした後、曲げモーメント及び軸力を求め、さらに、その曲げモーメントと軸力を多項式近似式を用いて再びスムージングを行なつた。図-8に結果を示す。ここで○印と△印の破線は、先の2ケースに対するスムージングされた曲げモーメント及び軸力を示す。そして、式(6)により、吹き付けコンクリート覆工の外側に作用する土圧を計算する。このようにして求めた土圧の分布と、有限要素法によつて得られた土圧の分布(理論値とする)の一例を図9～11に示す。ここで述べた逆解析によつて得た土圧と理論値との比を測定位置との関係で示すと図-12のようになる。

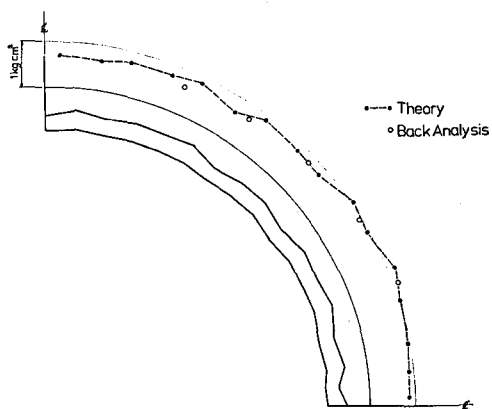


図-9 (標準偏差3.5cm)

この図から明らかかなように、いくつかの測定結果に対して求められた土圧の分布を平均すれば、 $\pm 40\%$ 程度の精度で真の土圧を推定し得る事がわかる。なお、図-12からも明らかであるが、逆解析の結果は真の土圧分布よりも静水圧分布に近づく傾向にある。これは

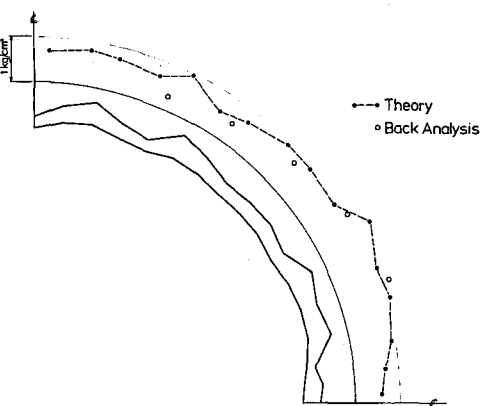


図-10 (標準偏差7.0cm)

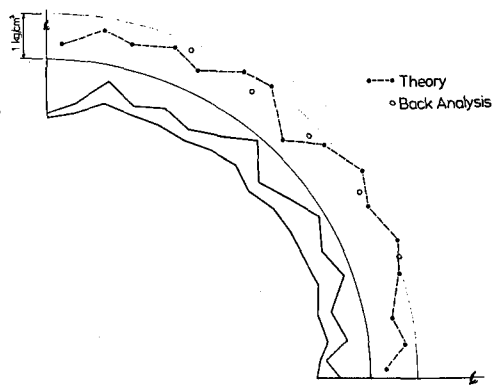


図-11 (標準偏差9.0cm)

データのスムージングに若干の問題があるかも知れない。今後の研究課題である。

4. 吹き付けコンクリートの材料特性の検討

Integrated Measuring Technique を吹き付けコンクリート覆工に適用する際の問題点の一つは、吹き付けコンクリートの応力-ひずみ関係を決定しなければならない事である。しかし、吹き付けコンクリートは、材料硬化、応力緩和、乾燥収縮等、複雑な力学挙動を示すため応力-ひずみ関係を求める事は、非常に困難である。従て、ここでは、簡便法としてリアルタイムによる室内実験によって、測定ひずみから応力を求める方法を提案する。

この方法は、現場計測を行なう位置の吹き付けコンクリートと、同

じ材齢、同じ材齢の吹き付けコンクリートの供試体を出るだけその現場と同じ環境のもとで一軸試験を行なうものである。すなわち現場計測で得られた、 ϵ から、ひずみを計算し、そのひずみを供試体を与え、応力緩和試験を行なう。その時、供試体に作用している応力を求めると、それは現場の吹き付けコンクリートに作用している応力にほかならない。そしてその応力を積分すれば曲げモーメント、及び軸力を求めることができ、さらに最終的に土圧を推定する事ができる。この方法の適用性を検証するために室内一軸圧縮実験を行なった。使用した材料は早強セメントモルタルであり、供試体は $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ の円柱形である。実験結果の一例を図-13に示す。ここでは、まず吹き付けコンクリート覆工の経済的なひずみの増加をシミュレートするために、一定ひずみ速度の実験を行ない、その時の応力を測定した(図の●印実線)。

一、同じ材齢の供試体を用いて、30分間隔で現場計測のひずみ(ここでは、一定ひずみ実験で得られるもの)と一致させるようなひずみ増分を与える応力緩和試験を行なった(図の○印実線)。実験結果から、ここで提案する方法の現場への適用性は充分に期待できることがわかる。

5. まとめ

吹き付けコンクリート覆工の土圧推定に、Integrated Measuring Technique を適用する際、断面形状の凹凸による問題点は計測データのスムージングによって解決できることが明らかとなった。一、材料特性については、ここで提案した“リアルタイム”による室内実験によってひずみから応力を推定できる可能性のある事がわかった。

6. 参考文献

1. K. Kovari, Ch. Amerad, and P. Fritz: "Integrated Measuring Technique for Rock Pressure Determination", proc. Int. Sympo. Field Measurements in Rock Mechanics, Zürich, 1977, pp 289~316
2. 桜井 春輔: "トンネルのコンクリートセグメントに作用する土圧の推定方法に関する研究", 第13回岩石学に関するシンポジウム講演論文集, 1980, pp 111~115

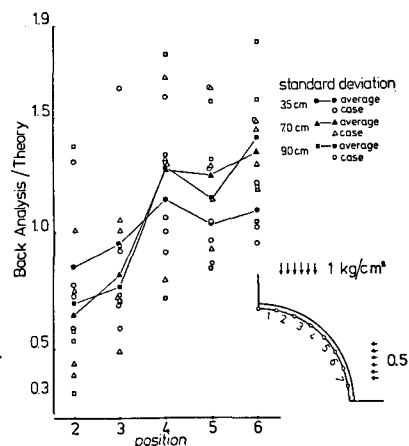


図-12

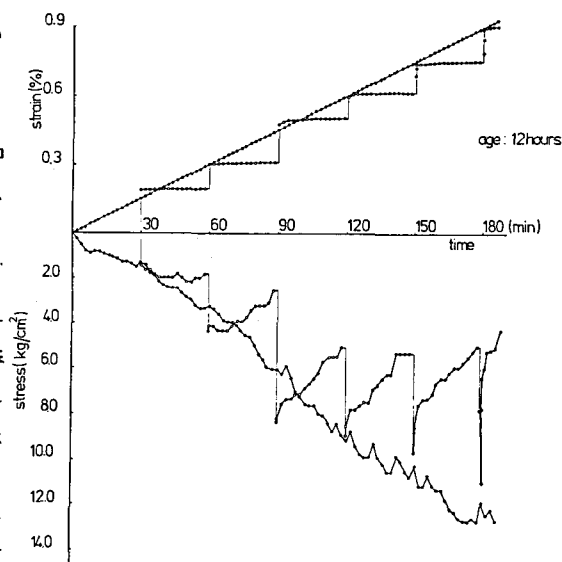


図-13

Earth Pressure Determination of Shotcrete Tunnel Lining

By M. Shinji*
S. Sakurai**

Summary

Earth pressures acting on a tunnel lining can be back-analyzed from the measured deformations of lining. This technique has already been well established as "Integrated Measuring Technique" for steel suport structures. An applicicability of the technique to shotcrete lining, however is still questionable, because of irregularity of the lining surfaces and complexity of the mechanical properties of shotcrete.

The objective of the present work is to verify an applicability of Integrated Measuring Technique to irregular shaped shotcrete tunnel linings.

It is concluded from computer simulations that the difficulties caused by the surface irregularity of shotcrete can be overcome by a smoothing method of the measuring data.

It is also shown that the realtime stress determination test proposed here has a good potential for determining stresses directly from strains without using any conventional stress-strain relationships stresses acting.

- * Graduate Student
- ** Professor
Department of Civil Engineering
Kobe University
Kobe 657, Japan