

(23) トンネルのコンクリートセグメントに作用する 土圧の推定法に関する研究

神戸大学工学部 桜井 春輔

1. まえがき

トンネル覆工の変形から、そこに作用する土圧を推定することが可能である。¹⁾²⁾ この基本的な考え方は、通常の構造解析の手順の逆を行うものである。すなわち、構造解析においては、荷重に対して、覆工のある断面の断面力は積分を行うことによって決定され、さらにそれを積分することによって変位が求められる。しかし、ここで取扱われる方法は、最初に変位が計測され、そして それを用いて断面力が決定される。この方法では、荷重は数値微分によって求めることになる。ここで注意しなければならないことは、数値微分は数値積分より、誤差に対して敏感である。したがって、この逆解析(back analysis)においては、変位の測定の際に高い精度が要求される。

精度の高い変位の測定はひずみゲージによって行うことができるが、長期にわたる計測には問題が多いし、またトンネル内の条件は必ずしもひずみゲージの使用に適していない。このような欠点を克服するためには、機械的計測によるのがよい。そのための測定器機がすでに開発されている。²⁾

Kovari らは機械的計測のためのひずみ測定器を開発し、土圧推定までの一連の技術を "Integrated Measuring Technique" として提案し、良い結果を得ている。しかし、その適用例は主に鋼製のアーチ支保工に限られており、そのコンクリート覆工への適用性は明らかでない。本研究は Integrated Measuring Technique のコンクリート覆工への適用性を明らかにすることを目的として、コンクリートセグメントの室内破壊実験を行い、種々の検討を加えたものである。ひずみの測定はすべて機械的に行った。なお、本研究はスイス工科大学(ETH)において Integrated Measuring Technique に関する研究の一環として行われたものである。実験はすべてスイス国立試験所(EMPA)で行った。

2. 基礎式

測定点 A, B, C をもつアーチの一部を図-1 に示す。アーチの軸からの距離 e は計測ボルトのヘッドの高さによって定められる。弦 AB の長さを L 、それに直交する C と L の間の距離をアーチの高さ F とする。計測される量は長さ F と L の変化である。

$$f = F - \bar{F}, \quad l = L - \bar{L} \quad (1)$$

アーチの曲率の変化 κ と軸ひずみ ε は f と l によって次のように求められる。ただし、これらの値は長さ L にわたって一定であると仮定する。

$$\kappa = \frac{8}{L^2} f, \quad \varepsilon = \frac{l}{L} + \frac{8e}{L^2} f \quad (2)$$

セグメントの厚さ方向の任意の繊維 i におけるひずみ ε_i は、アーチ断面が変形中も平面を保っていると仮定すれば、次のように表わされる。(図-2)

$$\varepsilon_i = \varepsilon + \kappa y_i \quad (3)$$

アーチ断面に作用する軸力と曲げモーメントは、それぞれ次のように与えられる。

$$N = \int_A \sigma dA, \quad M = \int_A y \sigma dA \quad (4)$$

いま、材料の応力-ひずみ関係が図-3 のように与えられるな

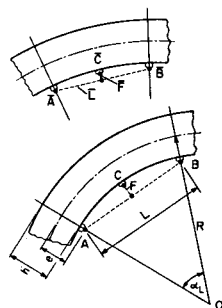


図-1

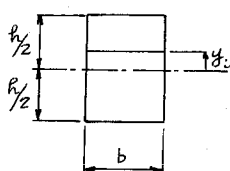


図-2

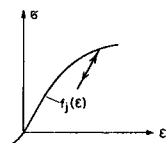


図-3

らば、式(4)は次のようになる。

$$N = \int_A f(\varepsilon_i) dA, \quad M = \int_A f(\varepsilon_i) y dA \quad (5)$$

アーチの外周に作用する土圧は、アーチの軸方向 S に沿った連続函数であると仮定すると、その半径方向及び接線方向の成分 $P(s)$ と $t(s)$ との間には、図-4 を参照して、次の関係が成立する。

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

いま、アーチの軸方向に沿った連続する測定点 $0, 1, 2, \dots, i, \dots, n$ において、軸力と曲げモーメントが求められると、各測定点に対応する土圧 P と t は次式によって計算できる。

$$\left. \begin{aligned} P_i &= \frac{N_i}{R} - \frac{1}{L^2} (M_{i-1} - 2M_i + M_{i+1}), \quad 1 \leq i \leq n-1 \\ t_i &= \frac{1}{2L} \left\{ N_{i+1} - N_{i-1} + \frac{1}{R} (M_{i+1} - M_{i-1}) \right\}, \quad 1 \leq i \leq n-1 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

3. 実験方法

実験に用いたコンクリートセグメントは内径 5.35 m 、厚さ 0.3 m 、巾 1.0 m の RC 構造である。載荷は破壊を容易に生じさせるために二点載荷で内側から行われた。測定点はセグメントの外側及び内側の両方に間隔 50 cm で取られた。各測定点の中央点を図-5 に番号を付して示す。 f と ℓ の測定には、それぞれ、ETH で開発された CURVOMETER と DEFORMETER が用いられた。測定値の精度は現場において、それぞれ $\pm 0.002\text{ mm}$ 及び $\pm 0.005\text{ mm}$ より小さいとされている。

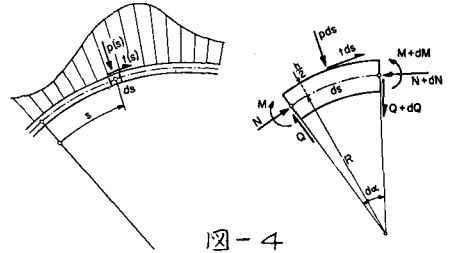


図-4

4. 実験結果とその考察

セグメントの内側及び外側で測定した ℓ の値をそれぞれ図-7 及び 8 に示す。

また、図-9 及び 10 に f の測定値を示す。この図には、内側と外側で測定された ℓ の値から、次式によって求められた f の値も合せて示してある。

$$f = L(\ell_e - \ell_i) / S(y_e + y_i) \quad (8)$$

ここで、 ℓ_e 及び ℓ_i はそれぞれ外側及び内側の ℓ の値、 y_e 及び y_i はそれぞれの側の測定ボルトのヘッドと中立軸の距離である。なお、これらすべての図には測定値 f 及び ℓ をアーチの軸方向になめらかにした曲線も合せて示してある。このように測定値をなめらかな曲線で表わすことは、逆解析において良い結果を得るために重要なことである。

測定値 f は理論的にはセグメントの内側と外側で求めた値がそれぞれ等しく

なければならない。また、式(8)で求めた f も当然等しくなるはずである。しかし、図-9 及び 10 から明らかに、荷重が $P=40\text{ kN}$ 以上になるとこれらの間に差が生ずる。この実験では $P=35\text{ kN}$ でセグメント中央の外側にクラックが発生したことを考えれば、この差は明らかにこのクラックの影響であると言える。なお、 $P=30\text{ kN}$ までは、これら三者の値はほぼ等しいことから、測定の精度そのものは非常に高いことがわかる。

コンクリートの応力-ひずみ関係を図-6 のように与える。ここで、 $E=3.0 \times 10^5\text{ kg/cm}^2$ である。

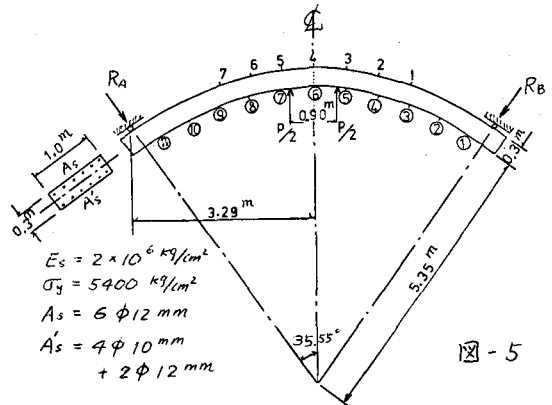


図-5

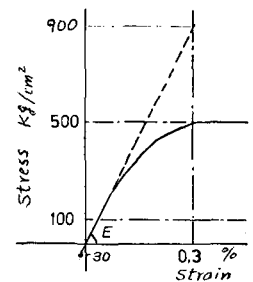


図-6

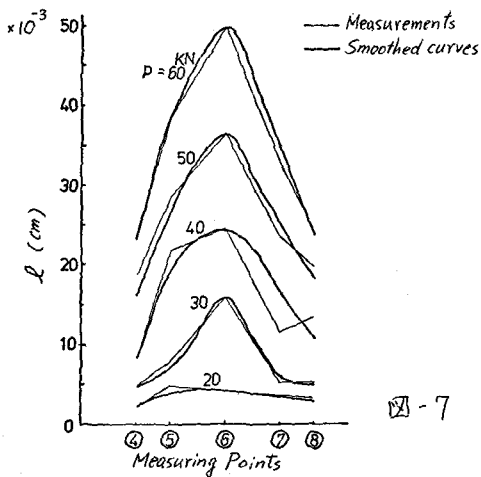


Fig - 7

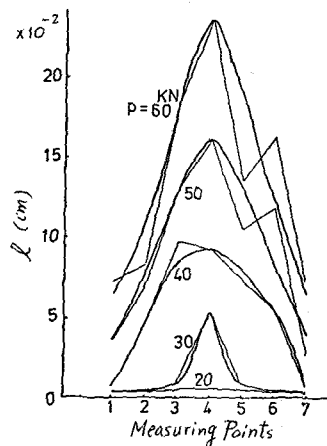


Fig - 8

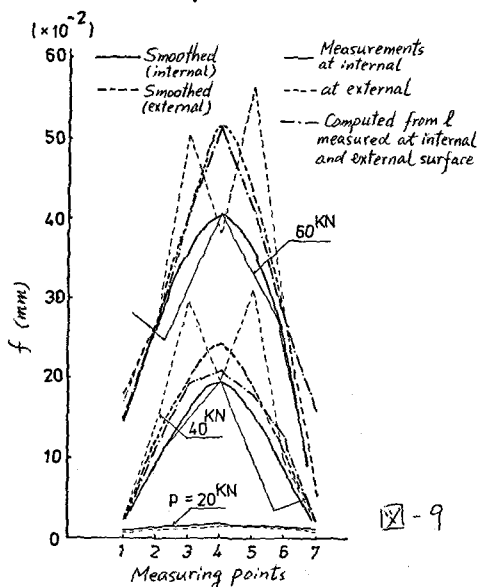


Fig - 9

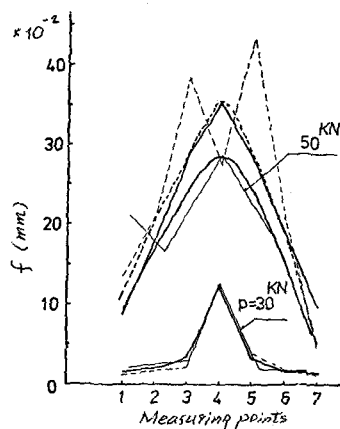


Fig - 10

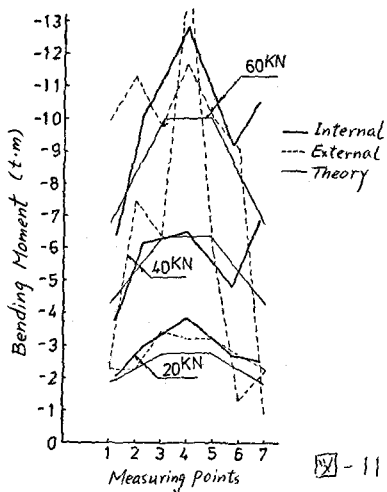


Fig - 11

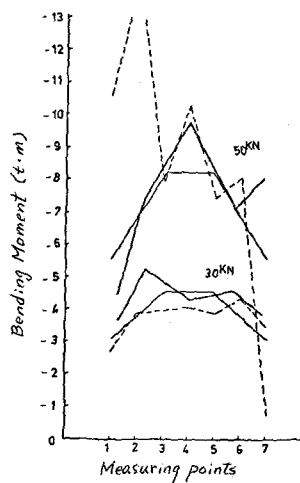


Fig - 12

セグメントに生ずる軸力及び曲げモーメントは上に与えた応力-ひずみ関係を用い、式(5)によって計算することができる。図-11及び12に曲げモーメントの分布を示す。ここで Internal 及び External とあるのは、それぞれ内側及び外側の測定点において求めた f と ℓ を用いて逆解析した値である。また、これらの図には理論値を合せて示してある。この結果から明らかなように、内側の値はほぼ理論値に一致している。しかし、外側の値にはかなりばらつきが含まれる。もち論、クラックが発生するまでは、両者の値はほぼ同じである。P=40 kN 以上ではクラックが発生しているが、それは外側であり、内側にクラックは発生しない。したがって、クラックの無い内側で測定した f と ℓ を用いて解析すると良い結果を得ることは納得できる。

次に、外側及び内側の ℓ の値から計算した f の値を用いて求めた曲げモーメントの分布を図-13に示す。これらは理論値と良好一致を示している。このことから、 ℓ の測定値にはばらつき(測定誤差ではなく、クラックに起因するもの)があまり含まれていないことがわかる。すなわち、たとえクラックが生じてても、 ℓ の測定値は充分正しく評価されていると言える。なお、参考までに、この場合の軸力の分布を示すと図-14のようになる。この場合の軸力による応力は、曲げ応力に比較して小さく、無視し得る程度である。

5. 結論

Integrated Measuring Technique はコンクリートセグメントに対しても、充分適用できるものである。ETH で開発された機械的計測によって充分精度の高いひずみの測定が可能である。クラックが生ずると、 f の測定値に大きなばらつきが生ずるが、 ℓ は常に正しく評価されている。クラックが生じていない時は(たとえ外側にはクラックが発生していても)、断面力は精度よく推定できる。その推定の誤差は 20 % 以下である。一方、クラックの発生している側の f 、 ℓ を用いて推定する場合は、精度は悪くなる。ただし、その場合、逆解析で得られた断面力の分布に、なめらかな曲線と当てはめると、その推定の誤差は 60~80 % 程度となる。クラックの生じた側の f の測定値の評価方法については、今後さらに、研究を行わなければならない。

参考文献

- 1) 村山、松岡, "トンネル土圧算定のための鋼アーチ支保工における一測定法", 土木学会誌, vol. 53, No. 3, 1968, pp. 39~42.
- 2) K. Kovari, Ch. Amstad and P. Fritz, "Integrated Measuring Technique for Rock Pressure Determination", Proc. Int. Sympo. Field Measurements in Rock Mechanics, Zürich, 1977, pp. 289~316.

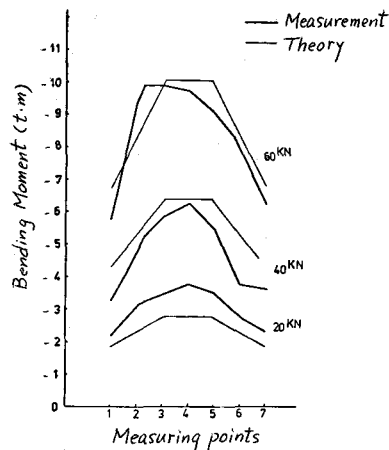


図-13

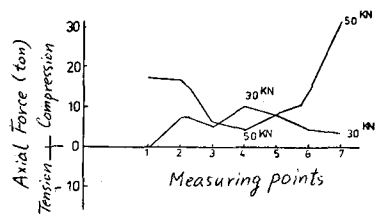
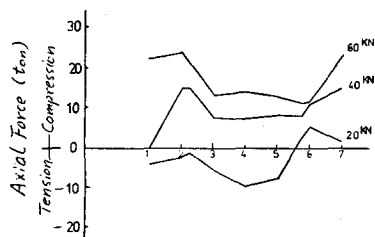


図-14

Earth Pressure Determination of Tunnel Lining Consisting of Concrete Segment

By S. Sakurai*

Summary

The axial force and bending moment acting in tunnel lining can be back-analyzed from the measured deformations of the lining. This technique has already been well established as "Integrated Measuring Technique" for steel support structures. However, an applicability of the technique to concrete lining has not yet been verified, because of complexity of the mechanical properties of concrete.

The objective of the work presented herein is to demonstrate an applicability of the integrated measuring technique to concrete tunnel lining.

A concrete segment of tunnel lining is tested in laboratory under concentrated loading conditions. It is concluded from the laboratory investigations that the integrated measuring technique is sufficiently applicable to concrete linings. An accuracy of determining the stress resultants is very high if there exist no cracks. When cracks appear, the stress resultants are scattered. Even in this scattering case, however, a fairly good evaluation on the stress resultants can be possible, if the measurements are taken at the surface where no cracks exist. The maximum errors involved in this case may be approximately less than 20%. If the measurements are taken at the cracked surface, then the errors increase to 60 - 80 %.

This work presented herein was performed at the Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, while the author stayed as an academic guest. The author wishes to express his gratitude to Dr. K. Kovari, the head of rock mechanics department, for drawing his attention to this problem. The laboratory tests were performed at EMPA, Duebendorf. The author also wishes to thank the staffs of EMPA for their cooperations for the laboratory tests.

* Dept. of Civil Engineering
Kobe University, Kobe 657