

# 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

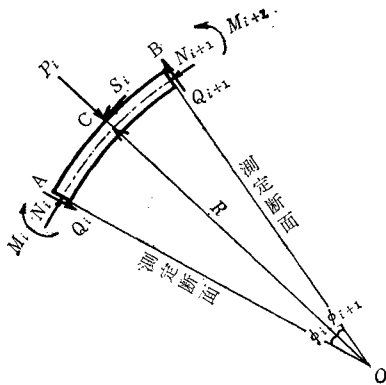
村山 朔 郎\*  
松 岡 元\*\*

## 1. 概 説

トンネル土圧の測定方法には、現在のところ、土圧計やロードセルを用いて地山が押しこめる圧力を直接的に測定する方法と、土圧の作用によって支保工内に発生したひずみを測定して、その測定値から土圧を逆算する間接的な方法とがある。トンネル土圧は、一般に、受圧体の変位によって大きさが変わる性質があるので、土圧計などを用いて土圧を測定する前者の方法は直接的に土圧を測定できる長所はあるが、それが鋼アーチ支保工にかかる土圧を真に代表しているかどうか不明確な欠点がある。そのため、後者の間接的な測定法が用いられることが多いようであるが、現在用いられている方法にはなお測定方法に不十分な点があって、正確な土圧を逆算する上に困難がある。その改善のため、ここでは後者の場合について一つの方法を提案してみた。

鋼アーチ支保工のひずみ測定からトンネル土圧を推定する方法の根本原理は、ある断面のある点で発生して

図-1 円弧状アーチ支保工の外力と断面力の関係



る鋼材のひずみを測定することによってその点での応力を計算し、応力を断面力に変換して力の関係に導入することにより、外力すなわちトンネル土圧を求めようとするものである。断面力と外力（トンネル土圧）との関係は、鋼アーチ軸が半径  $R$  の円弧をなす部分に対してはつぎのようになる。図-1 に示すように、鋼アーチ支保工の一部分を取り出して、測定断面 A, B での断面力をそれぞれ曲げモーメント  $M_i, M_{i+1}$ , 軸力  $N_i, N_{i+1}$ , せん断力  $Q_i, Q_{i+1}$  とし、外力が測定断面間のくさび点 C に任意方向に一つ作用するものとして外力の半径方向成分を  $P_i$ , 接線方向成分を  $S_i$  とすれば、独立な 3 個のつりあい式は点 O のモーメントのつりあいより、

$$S_i \cdot (R+h/2) - N_i \cdot R + N_{i+1} \cdot R - M_i + M_{i+1} = 0$$

ここに、 $h$  は支保工のけた高で、 $h/2$  が  $R$  に比して無視できるときは、上式より

$$S_i = N_i - N_{i+1} + (1/R)(M_i - M_{i+1}) \dots\dots\dots(1)$$

点 C の半径方向の力のつりあいより、

$$P_i + Q_i \cdot \cos \phi_i - Q_{i+1} \cdot \cos \phi_{i+1} - N_i \cdot \sin \phi_i - N_{i+1} \cdot \sin \phi_{i+1} = 0 \dots\dots\dots(2)$$

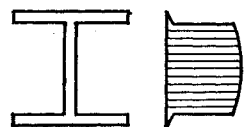
点 C の接線方向の力のつりあいより、

$$S_i - Q_i \cdot \sin \phi_i - Q_{i+1} \cdot \sin \phi_{i+1} - N_i \cdot \cos \phi_i + N_{i+1} \cdot \cos \phi_{i+1} = 0 \dots\dots\dots(3)$$

となる。以上の 3 式から、 $P_i, S_i$  が算出できれば、トンネル土圧の大きさとその作用方向が求まる。

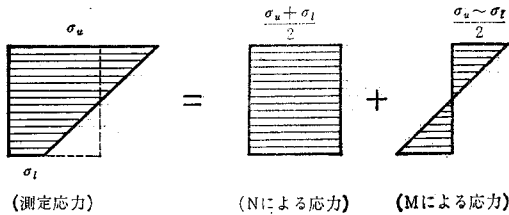
従来の鋼アーチ支保工のひずみ測定では、H型鋼アーチ支保工の上部フランジと下部フランジに設置されたひずみ計の測定値から、上、下部フランジに発生している応力を求め、上下部フランジではせん断応力の発生が小さいことからこれを無視して(図-2 参照)、次式によって測定断面の断面力、曲げモーメント  $M$  および軸力  $N$  を求めた。

図-2 H型断面内のせん断応力分布



\* 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所  
\*\* 学生会員 京都大学大学院工学研究科 土木工学専攻 修士課程

図一三 フランジにおける測定応力の  $M, N$  への分離



$$M = \frac{\sigma_u - \sigma_l}{2} \cdot W \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$N = \frac{\sigma_u + \sigma_l}{2} \cdot A \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 $\sigma_u, \sigma_l$  はそれぞれ上部フランジおよび下部フランジの測定応力、 $A, W$  はそれぞれH型支保工の断面積および断面係数である。従来行なわれている方法は、式(4)、(5)によって各測定断面の  $M, N$  を計算し、トンネル土圧を推定するのであるが、3断面力のうちせん断力  $Q$  が未知であるため、なんらかの仮定をもうけなければトンネル土圧を逆算することが不可能である。この仮定の一つに、支保工の構造型を仮定する手段がある。たとえば、支保工を3ヒンジアーチ<sup>1)</sup>とか2ヒンジアーチ、あるいは特殊な条件をもつ単純支持のアーチ(一端移動支点、他端回転支点の支点条件をもつアーチと、この支点条件を左右いれかえたアーチとの平均的な変形特性をもつと考えている<sup>2)</sup>)に仮定して、影響線の考えを導入して解析する方法が行なわれている。これらの方法は、支保工の構造型が決定されれば、支保工の任意点に単位荷重が作用した場合の各点の応力(あるいはたわみ)が計算できるので、支保工の各点に未知荷重が作用した場合の各点の応力(あるいはたわみ)を重ね合わせによって、未知荷重を未知数として含んだままの形であらわし、これらを測定応力と結びつけて連立方程式を立て(あるいはたわみの平衡条件式を立て)未知数を解いてトンネル土圧を求めようとするものである。しかしながら、これらはいずれも計算が繁雑であり、また支保工のような施工条件や外力の大きさなどによって部材継手部や支点、くさび点の力学特性が種々に変化する複雑な構造物に対して、単純な構造型を仮定すること自体に問題があるように思われる。他の仮定手段として、トンネル土圧の作用点が測定断面のみに限られ、測定断面以外には外力が作用しないものと仮定してトンネル土圧を推定する方法がある。これは式(4)、(5)から計算された  $M, N$  によって各測定断面における中立軸からの偏心距離  $e = M/N$  を求め、これらの偏心位置に作用する力のつりあいより、トンネル土圧を計算するものである<sup>3)</sup>。

以上に述べたように、測定ひずみからトンネル土圧を算定することを困難にしている最大の原因は、第3の断

面力、すなわちせん断力  $Q$  が未知のまま放置されていることと考えられるので、 $Q$  を求める方法を考察してみた。もしも、図一1の測定断面間の弧  $AB$  が非常に小さければ、

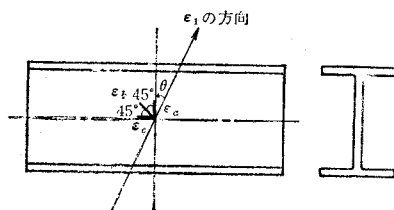
$$Q_i = \frac{dM}{dX} = \frac{1}{AB} (M_{i+1} - M_i)$$

としてせん断力が求められるが、測定断面の間隔を小さくすることは測定作業が複雑となり、経費もかかるなどの点からみても実際上きわめて困難である。また  $M, N$  だけの測定値だけから各部に働くトンネル土圧を求めようとすると、測定値は一箇所のトンネル土圧の計算値だけでなく、他の箇所にも影響をおよぼすため、トンネル土圧の推定精度が低下する恐れがあり、またある測定箇所ではひずみ計の破損その他で測定値が得られないと、トンネル土圧の推定ができなくなるなどの問題点がある。ゆえに、ここでは  $M, N$  の測定と別個にせん断力  $Q$  を測定する方法について考察した。

## 2. せん断力 $Q$ の測定およびトンネル土圧の計算法

一点において3方向のひずみを測定することのできるロゼットゲージ(Rosette gauge)は、3方向のひずみの測定値から主応力の大きさとその方向、したがって主応力と任意の方向をなす面上の垂直応力、およびせん断応力を計算することができるから、ロゼットゲージを利用してせん断力  $Q$  を求めることを考えてみた。

図一四 直角型ロゼットゲージのひずみ



いま図一4に示すように、主ひずみ  $\epsilon_1$  の方向から反時計方向に  $\theta, \theta + 45^\circ, \theta + 90^\circ$  傾いた方向の垂直ひずみをそれぞれ  $\epsilon_a, \epsilon_b, \epsilon_c$  とすると、 $\epsilon_1, \epsilon_2$  を主ひずみとして、

$$\epsilon_a = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2} + \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{2} \cdot \cos 2\theta \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\begin{aligned} \epsilon_b &= \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2} + \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{2} \cdot \cos 2(\theta + 45^\circ) \\ &= \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2} - \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{2} \cdot \sin 2\theta \quad \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \epsilon_c &= \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2} + \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{2} \cdot \cos 2(\theta + 90^\circ) \\ &= \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2} - \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{2} \cdot \cos 2\theta \quad \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

ここで式(6)と式(8)を加えて、

$$\epsilon_a + \epsilon_c = \epsilon_1 + \epsilon_2$$

これを式(7)へ代入して、

$$\frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{2} \cdot \sin 2\theta = \frac{\epsilon_a + \epsilon_c}{2} - \epsilon_b$$

を得る。主ひずみ  $\epsilon_1$  の方向から反時計方向に  $\theta$  傾いた方向(図-4の垂直断面方向)のロゼットゲージ設置点におけるせん断ひずみを  $\tau$  とすれば、上式左辺は  $\tau/2$  に等しいから、

$$\tau = \epsilon_a + \epsilon_c - 2\epsilon_b \dots \dots \dots (9)$$

式(9)より、 $\tau$  は測定ひずみ  $\epsilon_a, \epsilon_b, \epsilon_c$  から簡単に算出できるので、この点の垂直断面方向のせん断応力は、 $\tau = G \cdot \tau$  ( $G$ : せん断弾性係数、 $G = E/2(1+\nu)$ )より求めることができる。また、ウェブ厚さがフランジ幅に比べてごく小さい場合には、ウェブ上のせん断応力は事実上等分布するものと考えてさしつかえなく、さらに図-2からもわかるように、フランジ部分のせん断応力はウェブ部分のせん断応力に比べてきわめて小さいので、ウェブ部分のせん断応力  $\tau$  にウェブの断面積  $A_w$  をかけることによって、その断面のせん断力  $Q$  に近似させることができる。

$$Q = \frac{E}{2(1+\nu)} \cdot A_w \cdot (\epsilon_a + \epsilon_c - 2\epsilon_b) \dots \dots \dots (10)$$

ここに、 $E, \nu$ : 鋼の弾性係数およびポアソン比

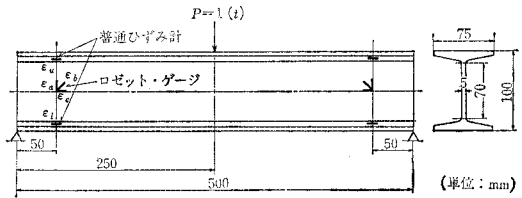
$A_w$ : 支保工ウェブ部分の断面積

$\epsilon_a, \epsilon_b, \epsilon_c$ : ロゼットゲージの3方向の測定ひずみ(45°間隔)

式(4)、(5)および(10)より測定断面における  $M, N, Q$  が計算できれば、ある2つの測定断面間のトンネル土圧の大きさとその方向は、式(1)、(2)、(3)のようになり、つりあい式を立てることにより簡単に求めることができる。なお、くさび点が測定断面間に1個で図-1の  $\phi_i$  と  $\phi_{i+1}$  が既知である場合は、未知数が  $P_i, S_i$  の2個に対してつりあい式は3式あるので、1式は検証のために用いることができ、くさび点が測定断面間に数多くある場合は、 $\phi_i$  と  $\phi_{i+1}$  の和は既知であるから、3個のつりあい式より  $\phi_i, \phi_{i+1}$  も求めてその測定断面間のトンネル土圧の合力の作用位置を決定することができる。また式(1)、(2)、(3)は鋼アーチが円弧をなす場合に対して立てたが、つりあい式であるので一般に任意の形状寸法の支保工に対して同様に立てることができる。

つぎに、H型鋼の代りに、けた高10cmのI型鋼(I-100×75×5、重量12.9kg/m)に対して、図-5に示すように、上、下部フランジ内面とウェブ中央にそれぞれひずみ計をはり、単純支持としてけたの中心に鉛直集中荷重  $P=1t$  を作用させた場合の室内実験結果の一例を示す。上、下部フランジのひずみをそれぞれ  $\epsilon_u, \epsilon_l$

図-5 ロゼットゲージのI型断面単純ばりへの適用



とし、ロゼットゲージのひずみを  $\epsilon_a, \epsilon_b, \epsilon_c$  とすれば、

$$\begin{aligned} \epsilon_u &= -21 \times 10^{-6}, \\ \epsilon_l &= 21 \times 10^{-6}, \\ \epsilon_a &= 76 \times 10^{-6}, \\ \epsilon_b &= -58 \times 10^{-6}, \\ \epsilon_c &= -14 \times 10^{-6} \end{aligned}$$

(引張ひずみ: 正, 圧縮ひずみ: 負)であった。

これらの測定ひずみから、曲げモーメント  $M$  を式(4)によって計算すれば、

$$\begin{aligned} M &= \frac{\sigma_u - \sigma_l}{2} \cdot W \\ &= \frac{2.1 \times 10^6 \times (21 + 21) \times 10^{-6}}{2} \times 57 = 2514 \text{ (kg} \cdot \text{cm)} \end{aligned}$$

ただし、 $\sigma_u = E \cdot \epsilon_u, \sigma_l = E \cdot \epsilon_l, W = 57 \text{ (cm}^3), E = 2.1 \times 10^6 \text{ (kg/cm}^2)$

せん断力  $Q$  を式(10)によって計算すれば、 $\nu = 0.3$  として、

$$\begin{aligned} Q &= \frac{E}{2(1+\nu)} \cdot A_w \cdot (\epsilon_a + \epsilon_c - 2\epsilon_b) \\ &= \frac{2.1 \times 10^6}{2(1+0.3)} \times 3.5 \times (76 - 14 + 2 \times 58) \times 10^{-6} \\ &= 503 \text{ (kg)} \end{aligned}$$

ここに、 $A_w$  は図-5 のようにとれば、 $A_w = 7.0 \times 0.5 = 3.5 \text{ (cm}^2)$ 、もちろん軸力  $N$  は式(5)より、

$$N = \frac{\sigma_u + \sigma_l}{2} \cdot A = 0$$

である。

そしてこの場合は、左右対称性より鉛直方向の力のつりあい式から外力  $P$  は、 $2Q$  より鋼材の自重 ( $\gamma_g = 6.45 \text{ kg}$ ) を差し引けば、

$$P = 2 \times 503 - 5.16 \text{ (kg)} \approx 1 \text{ (t)}$$

となつて載荷荷重が推定できる。

ここに検証の意味で、載荷荷重、支点条件、測定断面の位置が既知であるから自重を考慮して、計算によって  $M, Q$  を求めると、

$$M \approx 2515 \text{ (kg} \cdot \text{cm)}, Q \approx 503 \text{ (kg)}$$

となり、測定ひずみから求めた値とよく一致する。

以上のことより、式(4)、式(5)から求めた曲げモーメント  $M$ 、軸力  $N$  に、ロゼットゲージを使用して式(10)より求めたせん断力  $Q$  をあわせ、つりあい式を立ててトンネル土圧を近似的に計算する方法は十分実用にたえる精度で行なえるものとする。

### 3. 結 言

ここに提案した鋼アーチ支保工のひずみ測定からトンネル土圧を計算する方法は、従来のような不確定な支保工の構造型の仮定や測定断面以外には外力が作用しないなどのような場合によっては妥当性を欠く仮定をいっさいもけず、支保工に普通ひずみ計およびロゼットゲージをはってその測定値から直接、測定断面の3断面力(曲げモーメント、軸力、せん断力)を算出し、測定断面間でつりあい式を立てることによって、外力すなわちトンネル土圧を推定しようとするものである。この方法によれば、測定断面間に支保工拱頂継手部などがあっても同様に計算することができるし、万一ある箇所のひずみ計が故障しても、つぎの測定断面との間でつりあい式を立てれば外力の推定は可能である。測定断面の数が

多いほど推定精度が上がることはいうまでもない。

以上、ここで述べたことは非常に単純な考え方にもとづくものであるが、今まで行なわれてきた方法とくらべて種々の利点を有し、また合理的であると思われるので、現場で広く利用せられることを期して提案した次第である。終りに、京都大学白石成人助教授より懇切なるご助言をいただいたことを記しここに感謝の意を表する次第である。

#### 参 考 文 献

- 1) 藤田正和・飾森敏二・山田昌昭：東山トンネルにおける地圧測定について、土木学会関西支部，1965，pp. 155~156
- 2) 坂本貞雄・伊吹山四郎：トンネル用鋼アーチ支保工の強度について，第3回トンネル工学シンポジウム 1966，pp. 37~42 (岡 行俊：鋼アーチ支保工の変形および応力計算法の引用)
- 3) 佐久間七郎左衛門：膨張性地山トンネルの鋼アーチ支保工のひずみ計測と工法に関する研究，土木学会論文集，第121号，1965，p. 22 (1967. 9. 11. 受付)

## 定評ある技報堂の土木工学書

### 改訂 新版 土木工学通論

八十島義之助／奥村敏恵他共著

A 5・900円

〔主要目次〕緒論／鋼および鋼構造／コンクリートおよび鉄筋コンクリート／橋／土と基礎工／トンネル／河川／ダム／発電／砂防／海岸／港湾／鉄道／交通／道路／空港／都市計画／上水道／下水道／大気汚染・水質汚染

### 薄肉弾性ばりの理論

ウラソーフ著 奥村敏恵訳

B 5・1,800円

### 改訂 新版 鋼橋(III) 土木工学叢書

平井敦 他著

B 5・5,500円

### 鉄 道 軌 道

八十島義之助著

A 5・1,500円

### 曲線げたの理論と計算

渡辺昇著

B 5・4,500円

### 土木空間の造形

中村良夫著

A 4変・1,500円

### コンクリート検査便覧

ACI-611委員会編 監修日本コンクリート会議

B 6・650円

技 報 堂 東京都港区赤坂1-3-6 / TEL. (584) 4784-6 振替東京10