

III-133 青函トンネル本州方水平坑の土圧測定結果について

日本鉄道建設公団 青函建設局 正会員 工藤 明

1. 目的

青函トンネルの本坑の設計の資料とするために、支保工に作用する土圧、覆工に作用する土圧を推定する目的で、側壁導坑式で掘削していた本州方水平調査坑の65^mから87^m附近に(図-1)、計測支保工2基、ひずみ計、鉄筋計を設置した。

図-1のように設置した理由は、本州方水平調査坑では、切裂の多い岩盤であるために、湧水が多く、止水注入をして、湧水を止め、次に掘削をして、止水注入と掘削を交互にやって前進しているのが実状であるので、注入の影響と切羽の進行による土圧の増加を知るためである。

2. 測定計器の設置

a) 計測支保工

支保工には間接的に土圧を測定する方法、すなわち京大村山教授が昭和43年3月土木学会誌に発表した「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」によった。しかし、ゲージの貼る位置、剪断力を求めるゲージの貼り方は、図-4のようにし、前記論文とは異なる。すなわち坑内は高温で、湧水もあり、覆工後は支保工は覆工内に埋め込まれるので長期の安定性のある4ゲージ法を採用した。又支保工の表裏のひずみが一致しないことも考え、表裏のひずみを測定して、その平均を測定できるようにした。従って測定値はすべて2倍に測定され、温度補償、コード長の影響、スイッチボックスへの結線による影響は取り除かれる。計測支保工はこの掘削部分のNO24(79.6^m)と切羽に近いNO32(84.4^m)に建て込んだ。

b) カールソン型ひずみ計、及び鉄筋計

ひずみ計(CS-25F)は無応力計を含めて35個、鉄筋と鉄筋の間に番線を渡し、それに結束線で固定した。設置位置は68^mである。

鉄筋計(RF-16C)は直径16^{mm}の鉄筋に突合セ溶接を坑外でして、合計24個、84^mの位置に取り付けた。ひずみ計と同じようにトンネル軸方向にも設置した。

図-1. 計器設置図

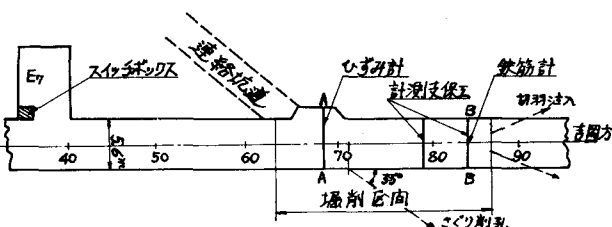


図-2. A-A断面(ひずみ計)

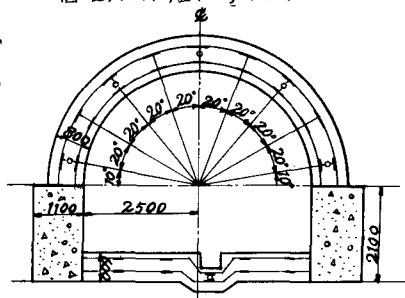


図-3. B-B断面(計測支保工及び鉄筋計)

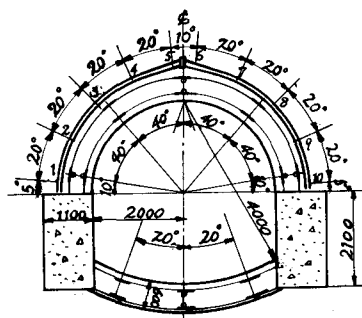
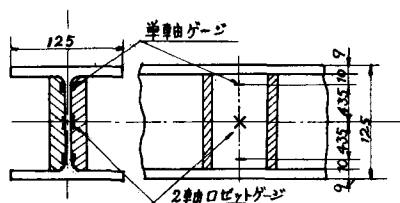


図-4.



3. 支保工に作用する土圧測定結果

前記したように4ゲージ法であるので、軸方向ひずみ(上部ひずみ ϵ_u^i , 下部ひずみ ϵ_l^i)と、剪断ひずみ γ_i は2倍に測定される。従って測定値から基準日の測定値を差し引いた値を2で割ったひずみが実ひずみである。すなわち結線は図-5 の如くなり

$$\epsilon_u^i = (\epsilon_{u2}^i + \epsilon_{u1}^i)/2, \quad \epsilon_l^i = (\epsilon_{l2}^i + \epsilon_{l1}^i)/2$$

$$\gamma_i = (\epsilon_{+45^\circ}^i - \epsilon_{-45^\circ}^i) = \{(\epsilon_{+45^\circ}^i - \epsilon_{-45^\circ}^i) + (\epsilon_{+45^\circ}^i - \epsilon_{-45^\circ}^i)\}/2$$

からひずみが求められる。

ひずみから軸力 N_i , 曲げモーメント M_i , 剪断力 Q_i は

$$N_i = \frac{\epsilon_u^i + \epsilon_l^i}{2} E \cdot A$$

$$M_i = \frac{\epsilon_u^i - \epsilon_l^i}{2} E \cdot \frac{I}{y_i}$$

$$Q_i = G \cdot \gamma_i \cdot A_w$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

で求まる。

上記した式から断面力 N_i , M_i , Q_i , が求められ、次の測点の断面力 N_{i+1} , M_{i+1} , Q_{i+1} , も同様にして求められるので、 i 点と $i+1$ 点の間では外力(土圧)が法線方向力 P_i と接線方向力 S_i が作用すると仮定して(図-6) , つり合いより求めると

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

$$P_i = \sqrt{A_i^2 + B_i^2 - S_i^2}$$

$$\theta_i = \tan^{-1} \frac{B_i P_i - A_i S_i}{A_i P_i + B_i S_i}$$

となる。

$$\text{但し } A_i = Q_i - Q_{i+1} \cos \theta_i - N_{i+1} \sin \theta_i$$

$$B_i = -N_i - Q_{i+1} \sin \theta_i + N_{i+1} \cos \theta_i \quad \text{である。}$$

さらに、支保工の crown の部分では円弧と考えるの無理であるので、図-7 のように crown の部分を剛結と考えると、左側、又は右側のみ外力が作用すると仮定して、つり合いより求めると、

左側のみ外力が作用する時

$$S_i = \frac{M_i}{r} - (N_i - N_{i+1}) - Q_{i+1} \sin \theta - N_{i+1} (1 - \cos \theta)$$

$$P_i = -\{S_i \cdot \frac{r}{2} + (N_i - N_{i+1}) \frac{r}{2} + Q_i + Q_{i+1}\}$$

$$\chi = \{- (Q_i + Q_{i+1}) b + M_i - M_{i+1} + S_i \cdot \frac{r}{2}\} / P_i \quad \text{となり}$$

右側のみ外力が作用する時

$$S_i = \frac{M_i}{r} + (N_i - N_{i+1}) + Q_i \sin \theta - N_i (1 - \cos \theta)$$

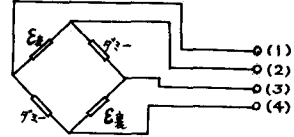
$$P_i = -S_i \cdot \frac{r}{2} + (N_i - N_{i+1}) \frac{r}{2} + Q_i + Q_{i+1}$$

$$\psi = \{(Q_i + Q_{i+1}) b - M_i + M_{i+1} + S_i \cdot \frac{r}{2}\} / P_i \quad \text{となる。}$$

以上の理論をプログラムして、小型電子計算機 FACOM 230-10 で計算した。支保工のひずみ測定値の基準値は建込直後の値を使用し、ひずみが比例限界を越えていると考えられる 1200×10^{-6} 以上のひずみにはヤング率 E を $2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ から $1.9 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ にして、断面力等を算出した。支保工の断面定

図-5.

(I) 軸力、曲げ測定用結線



(II) せん断力測定用結線

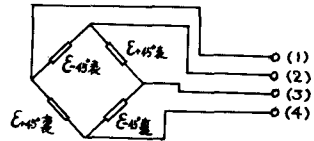


図-6.

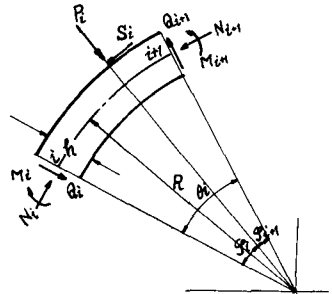
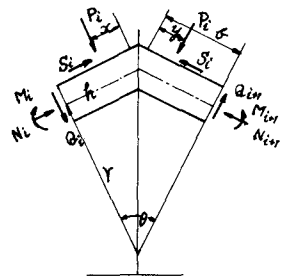


図-7.



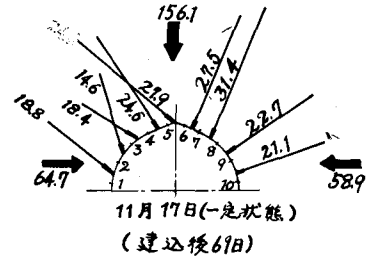
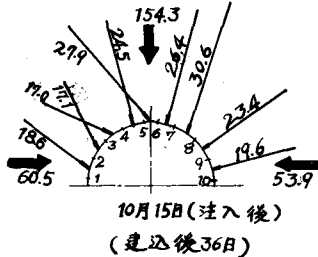
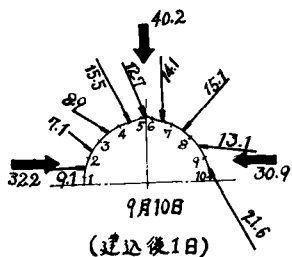
数 計算に使用した数値は次の如くである。

支保工断面2次モーメント	$I = 847 \text{ cm}^4$	半径	$R = 273.75 \text{ cm}$
支保工中立軸からゲージまでの距離	$y_1 = 4.35 \text{ cm}$	支保工高さ	$h = 12.5 \text{ cm}$
支保工の断面積	$A = 21.9 \text{ cm}^2$	crown部幅	$b = 24 \text{ cm}$
支保工web断面積	$A_w = 7.81 \text{ cm}^2$	crown部角度	$\theta = 30^\circ$

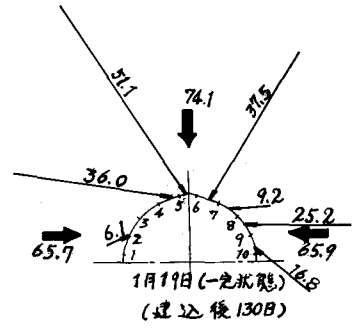
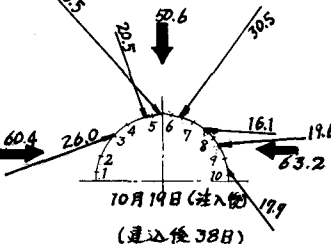
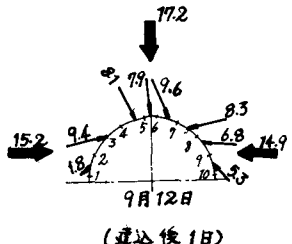
土圧の代表的な作用状態を示したのが図-8である。

図-8.

(I) 支保工 24

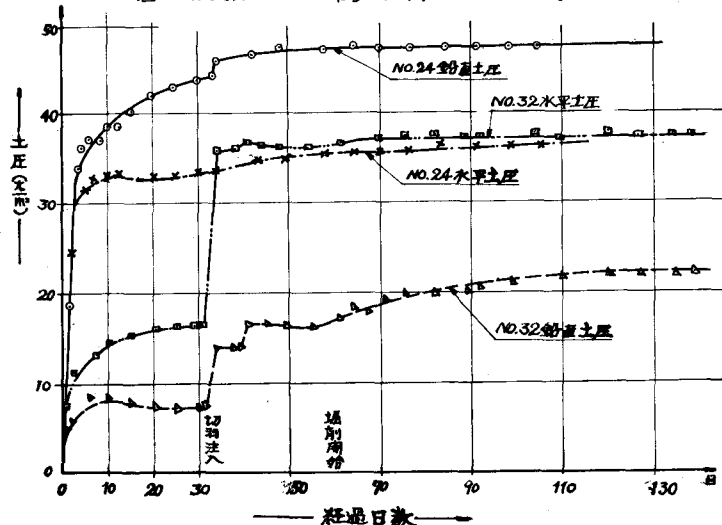


(II) 支保工 32



P_x と S_x の鉛直成分と水平成分をそれぞれ相加えて、合力を算出し土圧の経時変化を示したのが図-9である。N0.24では鉛直土圧が大きく、N0.32では水平土圧が大きくなっている。N0.24では注入の影響は少ないが、N0.32では切羽注入による土圧の増加が半分以上とて、切羽注入による土圧の増加が著しい。又 N0.24 と N0.32 支保工の最初の経過日数と土圧の状態から切羽に近い N0.32 では土圧が小さく、切羽の進行による土圧が増加することがわかる。さらに N0.32 だけからもそれがわかる。

図-9. 支保工に作用する平均土圧の経時変化

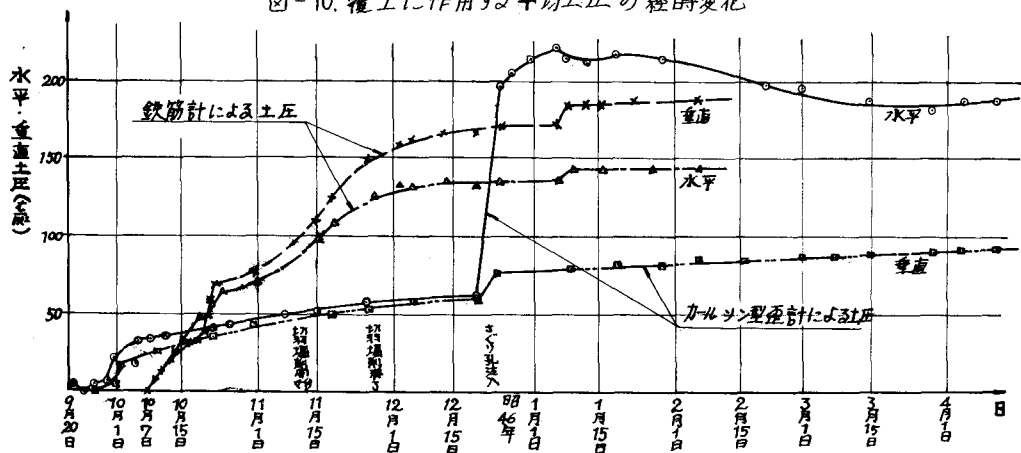


4. 覆工に作用する土圧測定結果

ひずみ計は基準測定値をコンクリート打設後14日の9月20日の測定値に取り、コンクリートの弾性係数を $E_c = 1.4 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ と仮定して、コンクリートの応力を求め断面力を算出した。

鉄筋計は基準測定値をコンクリート打設後20日の10月7日の測定値に取り、鉄筋と覆工コンクリートは同じひずみを生じると考え、ヤング係数比を15と仮定してコンクリートの応力を求め、断面力を算出した。鉄筋計、ひずみ計を設置した断面では剪断ひずみを測定していないので外力を求める時に、測点間の中央に外力が作用するとし、剪断力 $Q_i = Q_{di}$ と仮定して外力を算出し、合力を求めて覆工に作用する土圧の経時変化を示したのが図-10である。

図-10. 覆工に作用する平均土圧の経時変化



5. 考察

支保工に作用する土圧、覆工に作用する土圧をある仮定のもとに推定したのであるが、その数値的な絶対量に注目して支保工に作用する土圧は、NO.24 では鉛直土圧は40~50%, 水平土圧は30~40%, NO.32 ではそれぞれ20~25%, 35~40%の間にあると思われる。この値を支保工の設計に使用するのは早計のようだが、もっと基礎的な実験も併用して、測定支保工と関連づけて、検討の必要がある。いわゆる覆工に作用する土圧については応力を求める時点から、クリープ等の補正、打設コンクリートのヤング率の測定等も実施して検討する必要があるだろう。さらにひずみ計器自身に問題があり、傾向を把握するという段階から、実ひずみを測定できるような計器の開発が望まれる。さらに同様な試験を数多く実施してデータを集積する必要がある。

6. あとがき

最後に色々御指導たまわった土木学会「青函トンネル土圧研究委員会」の委員の皆様と、竜飛の現場の測定担当者、さらに最終の整理、図面の作成等で御世話になった青函建設局の大貴富夫君にお礼申し上げるとともに、感謝致します。なお測定は昭和45年9月初旬より昭和46年4月まで実施した。