

# グラウト注入による圧力トンネル巻立のプレスト レッシングについての研究

## THE THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDIES FOR PRESTRESSING TUNNEL LINING BY GROUT INJECTION

丸 山 二 郎\*

By Jiro Maruyama

**要 旨** 黒部川第四発電所の圧力トンネルでは15 kg/cm<sup>2</sup>という高い内圧を受けるため、コンクリート巻立にプレストレスを与えて置いて内圧に抵抗させることとした。プレストレスを与える方法として、巻立の外周辺にグラウトの高圧注入を行なうのが技術的に最も実現性があると考えられた。そこで高圧注入に起因する部分的な外圧を受けたときの巻立応力の解析を行ない、また実施のためには不明な点が多々あったので、直接現場で各種の実験を行なって確かめることとした。本文はこれら研究について述べたものである。

### 1. ま え が き

超高内圧を受ける大径の圧力トンネルの巻立設計に当たり、従来のように内圧によって設計すると、鉄筋コンクリート構造としただけでは巻立に許容しにくい引張応力を生じ、その上温度変化、収縮、湧水など付加的条件を考慮すると、ますます水密性と強度を保持することは困難である。よってなんらか特別な方法を構建しなければならない。ぼう大な鉄筋をそう入したり、内張鉄管を使用したりするのはきわめて不経済である。

そこで巻立背後の空げきはもとより周辺岩盤のきれつに、セメントミルクを高圧注入して巻立にプレストレスを与えることによって、内圧に抵抗させることが技術的・経済的に可能であるならば有効適切な実用的方法といえよう。

しかしながら、このようなプレストレッシングを行なうにあたっては、つきに述べるような設計、施工上の問題が存在しており、まずこれらを解決しなくてはならない。

(1) プレストレスを巻立に残留させるためには、巻立背後にかなり高圧のセメントミルクを注入しなくてはならない。巻立コンクリートはこの高圧によって破壊しないことが条件となる。しかもこの圧力は巻立全背面に一樣に働くことはまれであって、部分的に加わって偏圧状態となり曲げ応力が発生して従来のように単純に考えた膜理論によって得られる応力よりも大きくなることを考えられる。

(2) 巻立背面と岩盤との間の空げき、所定の岩盤の

きれつへの高圧注入を行なうためには、注入量の推定・注入孔の間隔決定・注入圧の決定などのため、岩盤の透水係数と空げき率を明らかにすることが必要である。

(3) 高圧注入によって与えられたプレストレスは種々の原因によって弛緩するが、その中で重要であり、地点や地質によって様相を異にする岩盤のクリープひずみの値を知ることが必要である。

(4) このような高圧注入工事の前例がとほしく、多くの不明な点があるので、これらを解明するため試験坑を掘って実際にグラウト注入を施し、後で坑内に充水して水圧試験を行ない、ろう水量や巻立に生ずるプレストレスなどを測定して、実態を把握しなければならぬ。

本論文は、黒部川第四発電所(以下黒四と称す)の圧力トンネル(内径4.8m、巻厚60cm、延長10km、内圧の最大15kg/cm<sup>2</sup>)の設計のため行なったこれら問題点解明のための研究を記したものである。

### 2. グラウト注入による部分的な外圧を受ける大径圧力トンネル巻立設計の理論的研究

#### (1) 内圧による巻立の応力計算結果の検討

黒四の圧力トンネルを例にとり、従来行なわれてきたOtto Frey-Baer<sup>1)</sup>の式によって、岩盤の弾性係数、巻厚、鉄筋の割合を種々に変えて計算を行なった結果を表一に示した。この数表からつぎのことがわかる。

a) 岩盤の弾性係数が非常に良好であっても、巻立コンクリートに発生する引張応力はかなり高いものとなる。まして収縮・温度変化などの付加的条件を加味すると、コンクリートの厚さをもっと厚くしたとしても、また鉄筋を多くそう入しても、引張応力度を14kg/cm<sup>2</sup>以下におさえることは非常に困難であること。

b) 鉄筋量が多い上に、湧水その他施工上の困難性を考えると、高い引張応力にたえ水密性を保持できる程度のコンクリートの施工は至難であること。

要するに超高内圧を受ける大径の圧力トンネルでは、もはや内圧の面からの設計では不合理であることが明らかである。

#### (2) 部分的な外圧を受ける大径圧力トンネルの応力解析

超高内圧を受けるトンネルの巻立に、グラウト注入プ

\* 正会員 K K 新日本技術コンサルタント常務取締役

表一 内圧による黒四トンネル巻立の応力度計算値

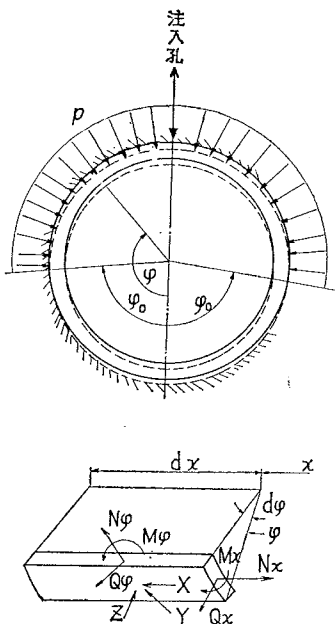
(単位 kg/cm<sup>2</sup>, -は圧応力)

| 巻厚    | E <sub>R</sub> | 鉄筋量<br>(cm <sup>2</sup> /cm) | コンクリートにキレットなしと考えた時の<br>接線方向応力度 |               |       |     | キレットが生じたと考えた時の<br>応力度 |               |               |
|-------|----------------|------------------------------|--------------------------------|---------------|-------|-----|-----------------------|---------------|---------------|
|       |                |                              | コンクリート<br>内 壁                  | コンクリート<br>外 壁 | 岩 盤   | 鉄 筋 | コンクリート<br>(半径方向)      | 岩 盤<br>(接線方向) | 鉄 筋<br>(接線方向) |
| 40 cm | 200 000        | 0                            | 15.00                          | 11.02         | 11.02 | —   | —                     | —             | —             |
|       |                | 0.2                          | 14.85                          | 10.91         | 10.91 | 182 | -14.83                | 12.71         | 205           |
|       |                | 0.5                          | 14.63                          | 10.75         | 10.75 | 179 | -14.58                | 12.50         | 202           |
|       |                | 1.0                          | 14.27                          | 10.48         | 10.48 | 175 | -14.18                | 12.16         | 197           |
|       |                | 1.5                          | 13.93                          | 10.24         | 10.24 | 171 | -13.80                | 11.83         | 192           |
|       | 100 000        | 0                            | 26.13                          | 20.67         | 9.54  | —   | —                     | —             | —             |
|       |                | 0.2                          | 25.49                          | 20.12         | 9.39  | 294 | -14.68                | 12.58         | 384           |
|       |                | 0.5                          | 25.09                          | 19.85         | 9.16  | 289 | -14.23                | 12.19         | 372           |
|       |                | 1.0                          | 24.12                          | 19.09         | 8.81  | 273 | -13.53                | 11.60         | 353           |
|       |                | 1.5                          | 23.24                          | 18.38         | 8.48  | 267 | -12.90                | 11.05         | 337           |
|       | 66 666         | 0                            | —                              | —             | —     | —   | —                     | —             | —             |
|       |                | 0.2                          | 33.90                          | 27.46         | 8.24  | 382 | -14.54                | 12.46         | 558           |
|       |                | 0.5                          | 32.85                          | 26.61         | 7.98  | 370 | -13.89                | 11.91         | 533           |
|       |                | 1.0                          | 31.25                          | 25.31         | 7.59  | 352 | -12.93                | 11.08         | 496           |
|       |                | 1.5                          | 29.80                          | 24.14         | 7.24  | 335 | -12.10                | 10.37         | 464           |
| 60 cm | 200 000        | 0                            | 15.00                          | 9.60          | 9.60  | —   | —                     | —             | —             |
|       |                | 0.2                          | 14.85                          | 0.50          | 9.50  | 182 | -14.82                | 11.86         | 217           |
|       |                | 0.5                          | 14.62                          | 9.36          | 9.36  | 179 | -14.56                | 11.65         | 213           |
|       |                | 1.0                          | 14.27                          | 9.13          | 9.13  | 175 | -14.14                | 11.31         | 206           |
|       |                | 1.5                          | 13.93                          | 8.92          | 8.92  | 171 | -13.75                | 11.00         | 201           |
|       | 100 000        | 0                            | 24.25                          | 17.19         | 7.93  | —   | —                     | —             | —             |
|       |                | 0.2                          | 23.89                          | 16.93         | 7.81  | 277 | -14.67                | 11.74         | 395           |
|       |                | 0.5                          | 23.35                          | 16.54         | 7.64  | 270 | -14.21                | 11.36         | 382           |
|       |                | 1.0                          | 22.50                          | 15.95         | 7.36  | 261 | -13.49                | 10.79         | 362           |
|       |                | 1.5                          | 21.72                          | 15.39         | 7.10  | 252 | -12.85                | 10.28         | 345           |
|       | 66 666         | 0                            | —                              | —             | —     | —   | —                     | —             | —             |
|       |                | 0.2                          | 30.19                          | 22.11         | 6.63  | 343 | -14.53                | 11.62         | 569           |
|       |                | 0.5                          | 29.35                          | 21.49         | 6.45  | 333 | -13.87                | 11.10         | 542           |
|       |                | 1.0                          | 28.05                          | 20.54         | 6.16  | 318 | -12.90                | 10.32         | 504           |
|       |                | 1.5                          | 26.86                          | 19.67         | 5.90  | 305 | -12.06                | 9.64          | 471           |

レストレッシングを行なうこと  
によって合理的な設計、すなわ  
ち巻立の接線方向応力を適正な  
範囲に収めることができよう。  
しかし注入されるグラウトは、  
集中荷重としてかかるとは考え  
られず、さりとてまた一様に巻  
立背面に加わるとも考えられ  
ず、やや広い範囲に分布する偏  
圧として作用するはずである。  
よって部分的な外圧を受ける巻立  
応力の解析が必要となる。解析  
に当りつぎのとおり仮定する  
(図-1 参照)。

巻立コンクリートと岩盤との  
間のすき間は低圧グラウト注入  
によって填充されているものと  
し、そのため岩盤は巻立コンク  
リートの変形に対し弾性支持の  
状態であると考ええる。ついで高  
圧グラウト注入によって偏圧の  
かかる範囲は、半径方向の変位  
 $\omega$  が内側に動く範囲とする。変  
位することは巻立と岩盤との接  
触面が離れることであって、十  
分流動性をもっているミルクが  
容易にこの部分にまわりうるの  
である。

図-1



記号

- $\varphi_0$  : 偏圧のかかる範囲を示す角度
- $\omega$  : 半径方向変位
- $v$  : 接線方向変位
- $\mu$  : 地盤係数
- $Z$  : 半径方向外力 =  $\mu\omega$
- $Y$  : 接線方向外力…コンクリート自重の影響を無視すると  $Y=0$
- $E$  : 巻立コンクリートの弾性係数
- $I$  : 巻立コンクリートの断面二次率 =  $\frac{t^3}{12}$
- $t$  : 巻立コンクリートの巻厚
- $\nu$  : 巻立コンクリートのポアソン比
- $C = \frac{EI}{(1-\nu^2)}$
- $D = \frac{Et}{(1-\nu^2)}$
- $N_\varphi$  : 軸方向力
- $Q_\varphi$  : せん断力
- $M_\varphi$  : 面内に働く曲げモーメント
- $N_x$  : トンネルの軸方向に働く軸方向力

$M_x$ : 面に直角に働く曲げモーメント

a)  $0 \leq \varphi \leq \varphi_0$  の間の解

円筒の殻理論によると基礎方程式は

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 v}{d\varphi^2} + \frac{d\omega}{d\varphi} + \frac{Yr^2}{D} &= 0 \\ \frac{dv}{d\varphi} + \omega + \frac{C}{Dr^2} \left( \omega + 2 \frac{d^2 \omega}{d\varphi^2} + \frac{d^4 \omega}{d\varphi^4} \right) + \frac{Zr^2}{D} &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(2.1)$$

すなわち,

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 v}{d\varphi^2} + \frac{d\omega}{d\varphi} &= 0 \\ \frac{dv}{d\varphi} + \omega + \frac{C}{Dr^2} \left( \eta^2 \omega + 2 \frac{d^2 \omega}{d\varphi^2} + \frac{d^4 \omega}{d\varphi^4} \right) &= 0 \end{aligned} \right\} (2.2)$$

ただし  $\eta = 1 + r^4 \frac{\mu}{EI}$

$$\left. \begin{aligned} \text{また } N_x &= \frac{D}{r} \nu \cdot \left( \frac{dv}{d\varphi} + \omega \right) \\ N_\varphi &= \frac{D}{r} \left( \frac{dv}{d\varphi} + \omega \right) + \frac{C}{r^3} \left( \omega + \frac{d^2 \omega}{d\varphi^2} \right) \\ Q_\varphi &= \frac{C}{r^2} \left( \frac{d\omega}{d\varphi} + \frac{d^3 \omega}{d\varphi^3} \right) \\ M_x &= \frac{C}{r^2} \nu \left( \frac{d^2 \omega}{d\varphi^2} - \frac{dv}{d\varphi} \right) \\ M_\varphi &= \frac{C}{r^2} \left( \omega + \frac{d^2 \omega}{d\varphi^2} \right) \end{aligned} \right\} \dots\dots(2.3)$$

である。

式(2.2)の第2式を  $\varphi$  に関して微分して第1式に代入する。

$$\frac{d^5 \omega}{d\varphi^5} + 2 \frac{d^3 \omega}{d\varphi^3} + \eta^2 \frac{d\omega}{d\varphi} = 0 \dots\dots\dots(2.4)$$

$\eta \neq 1$  すなわち  $\mu \neq 0$  とし

$$\alpha^2 = \frac{\eta - 1}{2}, \quad \beta^2 = \frac{\eta + 1}{2}$$

とおき、かつ  $\omega$  は  $\varphi$  に関して対称であることを考慮し、式(2.4)の一般解は  $B_i$  を任意定数として、

$$\omega = B_1 + B_3 \operatorname{ch} \alpha \varphi \cos \beta \varphi + B_4 \operatorname{sh} \alpha \varphi \sin \beta \varphi \dots\dots\dots(2.5)$$

式(2.3)に代入して

$$\left. \begin{aligned} N_\varphi &= \frac{C}{r^3} \left[ \sqrt{\eta^2 - 1} \{ B_4 \operatorname{ch} \alpha \varphi \cos \beta \varphi - B_3 \operatorname{sh} \alpha \varphi \sin \beta \varphi \} + B_1 (1 - \eta^2) \right] \\ Q_\varphi &= \frac{C}{r^3} \sqrt{\eta^2 - 1} \{ B_4 (\alpha \operatorname{sh} \alpha \varphi \cos \beta \varphi - \beta \operatorname{ch} \alpha \varphi \sin \beta \varphi) - B_3 (\alpha \operatorname{ch} \alpha \varphi \sin \beta \varphi + \beta \operatorname{sh} \alpha \varphi \cos \beta \varphi) \} \\ M_\varphi &= \frac{C}{r^2} \left[ B_1 + \sqrt{\eta^2 - 1} \{ B_4 \operatorname{ch} \alpha \varphi \cos \beta \varphi - B_3 \operatorname{sh} \alpha \varphi \sin \beta \varphi \} \right] \end{aligned} \right\} (2.6)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\omega}{d\varphi} &= B_3 (\alpha \operatorname{sh} \alpha \varphi \cos \beta \varphi - \beta \operatorname{ch} \alpha \varphi \sin \beta \varphi) \\ &+ B_4 (\alpha \operatorname{ch} \alpha \varphi \sin \beta \varphi + \beta \operatorname{sh} \alpha \varphi \cos \beta \varphi) \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{dv}{d\varphi} &= -\frac{C \eta^2}{Dr^2} B_1 - \omega \\ -v &= \left( \frac{C \eta^2}{Dr^2} + 1 \right) B_1 \varphi \\ &+ \frac{B_2}{\alpha^2 + \beta^2} (\alpha \operatorname{sh} \alpha \varphi \cos \beta \varphi + \beta \operatorname{ch} \alpha \varphi \sin \beta \varphi) \\ &+ \frac{B_4}{\alpha^2 + \beta^2} (\alpha \operatorname{ch} \alpha \varphi \sin \beta \varphi - \beta \operatorname{sh} \alpha \varphi \cos \beta \varphi) + B_5 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(2.7)$$

$B_5$  は  $v$  に関する積分定数であるが、 $\varphi=0$  にて  $v=0$  であるから  $B_5=0$  となる。

b)  $\varphi_0 \leq \varphi \leq \pi$  の間の解 この間にあつては、外圧としてグラウト注入圧  $p$  が働らくから式(2.1)において  $Z=p$  とおくと、

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 v}{d\varphi^2} + \frac{d\omega}{d\varphi} &= 0 \\ \frac{dv}{d\varphi} + \omega + \frac{C}{Dr^2} \left( \omega + 2 \frac{d^2 \omega}{d\varphi^2} + \frac{d^4 \omega}{d\varphi^4} \right) + \frac{pr^2}{D} &= 0 \end{aligned} \right\}$$

この両式から  $v$  を消去すると、

$$\frac{d^5 \omega}{d\varphi^5} + 2 \frac{d^3 \omega}{d\varphi^3} + \frac{d\omega}{d\varphi} = 0 \dots\dots\dots(2.8)$$

この式の一般解は  $A_i$  を任意定数として、

$$\omega = A_1 + A_2 \sin \varphi + A_3 \cos \varphi + A_4 \varphi \sin \varphi + A_5 \varphi \cos \varphi$$

$\omega$  は  $\varphi$  と  $(2\pi - \varphi)$  での値が等しいことから  $A_5=0$ 、

$A_2 = -\pi A_4$  となり一般解は

$$\omega = A_1 + A_3 \cos \varphi + A_4 (\varphi - \pi) \sin \varphi \dots\dots\dots(2.9)$$

式(2.3)から

$$\left. \begin{aligned} M_\varphi &= \frac{C}{r^2} (A_1 + 2 A_4 \cos \varphi) \\ N_\varphi &= -pr + \frac{2 A_4}{r^3} \cdot C \cdot \cos \varphi \\ Q_\varphi &= -\frac{2C}{r^3} A_4 \sin \varphi \end{aligned} \right\} \dots\dots(2.10)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\omega}{d\varphi} &= -A_3 \sin \varphi + A_4 \{ \sin \varphi + (\varphi - \pi) \cos \varphi \} \\ \frac{dv}{d\varphi} &= -\frac{A_1 C}{Dr^2} - \frac{pr^2}{D} - \omega \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(2.11)$$

$$\begin{aligned} -v &= \left\{ A_1 \left( \frac{C}{Dr^2} + 1 \right) + \frac{pr^2}{D} \right\} \cdot \varphi + A_3 \sin \varphi \\ &+ A_4 \{ \sin \varphi - (\varphi - \pi) \cos \varphi \} + A_6 \end{aligned}$$

$\varphi = \pi$  で  $v=0$  であるから

$$\begin{aligned} A_6 &= - \left\{ A_1 \left( \frac{C}{Dr^2} + 1 \right) + \frac{pr^2}{D} \right\} \pi, \\ -v &= \left\{ A_1 \left( \frac{C}{Dr^2} + 1 \right) + \frac{pr^2}{D} \right\} (\varphi - \pi) + A_3 \sin \varphi \\ &+ A_4 \{ \sin \varphi - (\varphi - \pi) \cos \varphi \} \dots\dots\dots(2.12) \end{aligned}$$

c) 定数項の決定 仮定により、 $\varphi = \varphi_0$  で  $\omega=0$  であるから式(2.5)および式(2.9)から

$$\left. \begin{aligned} A_1 + A_3 \cos \varphi_0 + A_4 (\varphi_0 - \pi) \sin \varphi_0 &= 0 \\ B_1 + B_3 \operatorname{ch} \alpha \varphi_0 \cos \beta \varphi_0 + B_4 \operatorname{sh} \alpha \varphi_0 \sin \beta \varphi_0 &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(2.13)$$

$\varphi = \varphi_0$  で  $\frac{d\omega}{d\varphi}$  は連続でなければならぬから

$$(2.7) \varphi = \varphi_0 = (2.11)_{\varphi = \varphi_0} \text{ から} \\ -A_3 \sin \varphi_0 + A_4 \{ \sin \varphi_0 + (\varphi_0 - \pi) \cos \varphi_0 \} \\ = B_3 \{ \alpha \operatorname{sh} \alpha \varphi_0 \cos \beta \varphi_0 - \beta \operatorname{ch} \alpha \varphi_0 \sin \beta \varphi_0 \} \\ + B_4 \{ \alpha \operatorname{ch} \alpha \varphi_0 \sin \beta \varphi_0 + \beta \operatorname{sh} \alpha \varphi_0 \cos \beta \varphi_0 \} \\ \dots\dots\dots(2.14)$$

$\varphi = \varphi_0$  でモーメントの連続が成り立つから (2.6) $_{\varphi = \varphi_0}$  = (2.10) $_{\varphi = \varphi_0}$  から

$$A_1 + 2A_4 \cos \varphi_0 = B_1 + \sqrt{\eta^2 - 1} \{ B_4 \operatorname{ch} \alpha \varphi_0 \cos \beta \varphi_0 - B_3 \operatorname{sh} \alpha \varphi_0 \sin \beta \varphi_0 \} \dots\dots\dots(2.15)$$

$\varphi = \varphi_0$  で  $v$  は連続であるから (2.7) $_{\varphi = \varphi_0}$  = (2.12) $_{\varphi = \varphi_0}$  から

$$A_1 \left( \frac{C}{Dr^2} + 1 \right) (\varphi_0 - \pi) + A_3 \sin \varphi_0 + A_4 \{ \sin \varphi_0 - (\varphi_0 - \pi) \cos \varphi_0 \} + (\varphi_0 - \pi) \frac{pr^2}{D} \\ = \left( \frac{C\eta^2}{Dr^2} + 1 \right) B_1 \varphi_0 + \frac{B_3}{\alpha^2 + \beta^2} (\alpha \cos \beta \varphi_0 \operatorname{sh} \alpha \varphi_0 + \beta \sin \beta \varphi_0 \operatorname{ch} \alpha \varphi_0) + \frac{B_4}{\alpha^2 + \beta^2} (\alpha \sin \beta \varphi_0 \operatorname{ch} \alpha \varphi_0 - \beta \cos \beta \varphi_0 \operatorname{sh} \alpha \varphi_0) \dots\dots\dots(2.16)$$

$\varphi = \varphi_0$  で  $\frac{dv}{d\varphi}$  は等しいから (2.7) $_{\varphi = \varphi_0}$  = (2.11) $_{\varphi = \varphi_0}$  および  $(\omega)_{\varphi = \varphi_0} = 0$  の条件を加えて

$$A_1 + \frac{pr^4}{C} = \eta^2 B_1 \dots\dots\dots(2.17)$$

$\varphi = \varphi_0$  で  $Q_\varphi$  が等しいことから (2.6) $_{\varphi = \varphi_0}$  = (2.10) $_{\varphi = \varphi_0}$  から

$$2A_4 \sin \varphi_0 = \sqrt{\eta^2 - 1} \{ B_3 (\alpha \operatorname{ch} \alpha \varphi_0 \sin \beta \varphi_0 + \beta \operatorname{sh} \alpha \varphi_0 \cos \beta \varphi_0) - B_4 (\alpha \operatorname{sh} \alpha \varphi_0 \cos \beta \varphi_0 - \beta \operatorname{ch} \alpha \varphi_0 \sin \beta \varphi_0) \} \dots\dots\dots(2.18)$$

式 (2.13) から式 (2.18) までを使用して各定数を  $\varphi_0$  を用いて求めることができる。

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= \frac{m}{l} \left( \eta^2 \frac{Q_3}{Q_1} + l \right) \\ A_3 &= m \left[ \frac{Q_3}{Q_1} \left\{ \frac{\beta}{2} (\varphi_0 - \pi) - \frac{\eta^2}{l} \right\} - \frac{Q_2 \alpha (\varphi_0 - \pi)}{Q_1} - 1 \right] \\ A_4 &= \frac{m}{2 \sin \varphi_0 Q_1} (\beta Q_3 - \alpha Q_2) \\ B_1 &= -\frac{Q_3 \cdot m}{Q_1 \cdot l} \\ B_3 &= -\frac{1}{\operatorname{sh} \alpha \varphi_0} \cdot \frac{Q_2 \sin \beta \varphi_0 - Q_3 \cos \beta \varphi_0 \cdot m}{Q_1 \cdot l} \\ B_4 &= \frac{1}{\operatorname{sh} \alpha \varphi_0} \cdot \frac{Q_3 \sin \beta \varphi_0 + Q_2 \cos \beta \varphi_0 \cdot m}{Q_1 \cdot l} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(2.19)$$

ただし  $l = \sqrt{\eta^2 - 1} = 2\alpha\beta$

$$m = \frac{pr^4}{C}$$

$$n = 1 + \frac{C\eta^2}{Dr^2}$$

また  $\operatorname{sh} \alpha \varphi_0 = \operatorname{ch} \alpha \varphi_0$ ,  $\operatorname{sh} \alpha \varphi_0 \gg \cos \beta \varphi_0$ ,  $\sin \beta \varphi_0$  と考え、

$$Q_1 = [2(3 - \eta) \sin \varphi_0 \cos \varphi_0 - 2\{1 + (\eta - 1) \sin^2 \varphi_0\} + l \beta (\varphi_0 - \pi)] \cdot \eta$$

$$Q_2 = \{ \alpha (\eta + 3) \sin \varphi_0 \cos \varphi_0 + 2 \sin^2 \varphi_0 - \alpha \beta (\varphi_0 - \pi) \}$$

$$Q_3 = \{ \beta (\eta - 3) \sin \varphi_0 \cos \varphi_0 + 2l \sin^2 \varphi_0 \cos \varphi_0 - l \alpha (\varphi_0 - \pi) \}$$

$\varphi_0$  を求めるためには式 (2.16) を用い、これに式 (2.13), (2.17) の関係を用いて整理し、 $\operatorname{sh} \alpha \varphi_0 = \operatorname{ch} \alpha \varphi_0 \gg \cos \beta \varphi_0$ ,  $\sin \beta \varphi_0$  などの省略を行なえば

$$m(\varphi_0 - \pi) + B_3 \left\{ - \left( n\pi + \frac{\alpha l^2}{\eta} \right) \cos \beta \varphi_0 - \frac{\beta l^2}{\eta} \sin \beta \varphi_0 + l^2 (\varphi_0 - \pi) \cos \beta \varphi_0 \right\} \operatorname{sh} \alpha \varphi_0 + B_4 \left\{ \frac{\beta l^2}{\eta} \cos \beta \varphi_0 - \left( n\pi + \frac{\alpha l^2}{\eta} \right) \sin \beta \varphi_0 + l^2 (\varphi_0 - \pi) \sin \beta \varphi_0 \right\} \operatorname{sh} \alpha \varphi_0 = 0$$

となる。これに上に求めた  $B_3, B_4$  を代入して

$$l(\varphi_0 - \pi)(Q_1 + lQ_3) + \frac{l^2}{\eta} (\beta Q_2 - \alpha Q_3) - n\pi Q_3 = 0$$

さらにこれを整理すると

$$\left\{ \frac{3l^2}{\eta} - \frac{n\pi\beta}{l} (\eta - 3) + \alpha (\eta - 3) (\varphi_0 - \pi) \right\} \sin \varphi_0 \cos \varphi_0 + 2 \left\{ \frac{l\beta}{\eta} (2 - \eta) - n\pi + (\eta - 1) (\varphi_0 - \pi) \right\} \sin^2 \varphi_0 + \left\{ n\pi\alpha - \frac{l^2}{\eta} - 2\eta + l\beta (\varphi_0 - \pi) \right\} (\varphi_0 - \pi) = 0 \dots\dots\dots(2.20)$$

が得られる。この関係が  $\varphi_0$  を決定する条件であって、形は複雑なように見えるが試算によって容易に  $\varphi_0$  を求めることができる。式 (2.19) によって各定数が決定されるから、各断面力は  $0 < \varphi < \varphi_0$  にあっては式 (2.6) を、 $\varphi_0 < \varphi < \pi$  にあっては式 (2.10) を用いて計算され、任意点の応力度は

$$\sigma = \frac{N_\varphi}{t} \pm \frac{6M_\varphi}{t^2}$$

によって求められる。

(3) 数値計算例

- $r_1$ : トンネルの内径 = 2.4 m
- $r$ : コンクリート巻立の中心半径 = 2.7 m
- $t$ : コンクリート巻立の厚さ = 0.6 m
- $p$ : グラウト注入圧力度 = 30 kg/cm<sup>2</sup>
- $E_C$ : コンクリートの弾性係数 = 2 000 000 t/m<sup>2</sup>
- $E_R$ : 岩盤の弾性係数 = 1 000 000 t/m<sup>2</sup>
- $\nu_C$ : コンクリートのポアソン比 = 0.2
- $\nu_R$ : 岩盤のポアソン比 = 0.2
- $\mu$ : 地盤係数 =  $\frac{1}{1 + \nu_R} \cdot \frac{E_R}{r_1 + t}$

の場合について計算を行なうこととする。

$$\eta^2 = 1 + r^4 \frac{\mu}{E_C l} = 1 + \left( \frac{E_R}{E_C} \right) \left( \frac{r}{r_1 + t} \right) \left( \frac{r}{t} \right)^3 \cdot 12 \cdot \frac{1}{1 + \nu_R} \\ = 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{2.7}{3.0} \right) \left( \frac{2.7}{0.6} \right)^3 \cdot 12 \cdot \frac{1}{1.2} = 411.0626$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{\eta-1}{2}} = 3.10441$$

$$\beta = \sqrt{\frac{\eta+1}{2}} = 3.26149$$

$$l = \sqrt{\eta^2 - 1} = 20.25000$$

$$n = 1 + \frac{C\eta^2}{Dr^2} = 2.69162$$

$$\varphi_0 = 99^\circ - 44' - 31''$$

この値から

$$Q_1 = -2508.25223$$

$$Q_2 = 83.30891$$

$$Q_3 = 118.86236$$

定数は

$$A_1 = -0.03804$$

$$B_1 = 0.00234$$

$$A_3 = -0.00168$$

$$B_3 = -0.00003$$

$$A_5 = -0.02609$$

$$B_5 = -0.0000014$$

$\varphi_0$  の決定方程式は

$$\begin{aligned} & \{37.14917 + 53.62769(\varphi_0 - \pi)\} \sin \varphi_0 \cos \varphi_0 \\ & + 2\{-67.90571 + 19.27468(\varphi_0 - \pi)\} \sin^2 \varphi_0 \\ & + \{-34.52392 + 66.04517(\varphi_0 - \pi)\} (\varphi_0 - \pi) = 0 \end{aligned}$$

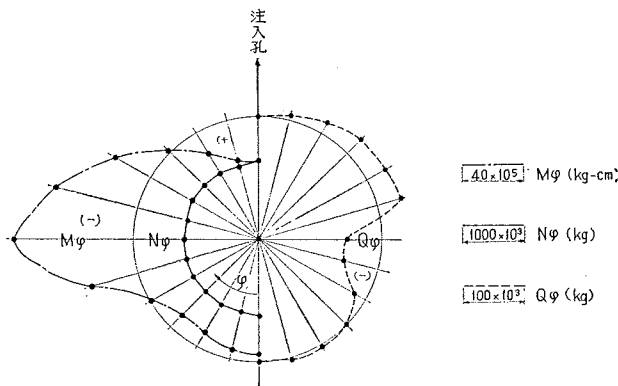
試算によって  $\varphi_0 = \pi$  をのぞいた他の解として

計算の結果は 図-2 および 表-2 のとおりであってつき  
のことがわかる。

表-2 グラウト注入 (注入圧 30 kg/cm<sup>2</sup>) による外圧を受けた巻立コンクリートの応力の数値例

| $\varphi$   | $\times 10^5$<br>$M_\varphi$ (kg/cm <sup>2</sup> ) | $\times 10^3$<br>$N_\varphi$ (kg) | $\times 10^3$<br>$Q_\varphi$ (kg) | $\sigma_{M_\varphi}$<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | $\sigma_{N_\varphi}$<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | $\tau_{\theta\varphi}$<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | $ \sigma_{M_\varphi}  + \sigma_{N_\varphi}$ | $- \sigma_{M_\varphi}  + \sigma_{N_\varphi}$ | $\sigma_\theta$ | $\frac{ \sigma_{M_\varphi}  + \sigma_{N_\varphi}}{\sigma_\theta}$ |
|-------------|--|-----------------------------------|-----------------------------------|---|---|---|---|--|-----------------|---|
| 0           | 5.07   | -777.27                           | 0                                 | 8.4   | 129.5   | 0   | 138.0                                       | 121.1  | 167             | 0.83  |
| 15          | 5.76   | -776.91                           | 2.55                              | 9.6   | 129.5   | 0.4   | 139.1                                       | 119.9  | "               | 0.83  |
| 30          | 8.31   | -776.04                           | 3.69                              | 13.9  | 129.3   | 0.6   | 143.2                                       | 115.5  | "               | 0.86  |
| 45          | 8.94   | -775.80                           | -2.22                             | 14.9  | 129.3   | -0.4  | 144.2                                       | 114.4  | "               | 0.86  |
| 60          | 1.26   | -778.65                           | -24.63                            | 2.1   | 129.8   | -4.1  | 131.9                                       | 127.7  | "               | 0.79  |
| 75          | -29.01   | -789.90                           | -61.26                            | -48.4   | 131.7   | -10.2   | 180.0                                       | 83.3   | "               | 1.08  |
| 90          | -76.38   | -807.42                           | -56.19                            | -127.3  | 134.6   | -9.4  | 261.9                                       | 7.3  | "               | 1.57  |
| $\varphi_0$ | -63.99   | -802.89                           | 41.67                             | -106.7  | 133.8   | 7.0   | 240.5                                       | 26.2   | "               | 1.44  |
| 105         | -53.67   | -799.05                           | 40.83                             | -89.3   | 133.2   | 6.8   | 222.5                                       | 43.9   | "               | 1.33  |
| 120         | -26.13   | -788.88                           | 36.60                             | -43.6   | 131.5   | 6.1   | 175.0                                       | 87.9   | "               | 1.05  |
| 135         | -2.49  | -780.12                           | 29.88                             | -41.6   | 130.2   | 5.0   | 134.4                                       | 129.0  | "               | 0.80  |
| 150         | 15.63  | -773.40                           | 21.12                             | 26.1  | 129.9   | 3.5   | 155.0                                       | 102.8  | "               | 0.93  |
| 165         | 27.03  | -769.17                           | 10.95                             | 45.1  | 128.2   | 1.8   | 173.3                                       | 83.1   | "               | 1.04  |
| 180         | 30.93  | -767.73                           | 0                                 | 51.5  | 128.0   | 0   | 179.5                                       | 76.4   | "               | 1.07  |

図-2 表-2 のモーメント、直応力、せん断力のダイヤグラム



1) グラウト注入点を中心として、左右ほぼ 80° の範囲にグラウトが分布する。

2) このときの巻立コンクリートの最大応力は、注入点より左右ほぼ 90° のところに生じ、その値は 261.9 kg/cm<sup>2</sup> で厚肉円筒公式により円周に一樣に外圧がかかった場合の式  $\sigma_\theta = -p \frac{2(r_1 + t)^2}{(r_1 + t)^2 - r_1^2}$  から算出した値 167 kg/cm<sup>2</sup> の約 1.57 倍である。

### 3. ボーリング孔注水試験による地山の透水性係数、空げき率および注入量の推定

#### (1) ボーリング孔注水試験の目的

グラウト高圧注入を行なって巻立に外圧を加えプレストレスを与えるには、まず地山を完全な支持環となるように改良する必要がある。そのためには巻立コンクリートを取り巻く地山のある領域内に存在するきれつを注入セメントによって完全に充填しなければならない。そこで地山の実際の透水性係数を知る必要が生じ、これを現場でボーリング孔を穿ち注水試験によって求めることとした。透水性係数から空げき率を算出し必要注入量を推定し、グラウト濃度、注入圧の決定などが判断せられる。

#### (2) ボーリング孔注水試験の方法

図-3 のボーリング孔から圧力水を注入した場合、水は近似的に球状に放射されてゆくものと考え、かつ地山の透水性係数  $k$  および注入量  $q$  が一定であると考え、流れは定常状態であって中心から任意の点 (半径  $x$ ) のところの圧力を  $p$  とおいて、ダルシーの法則から、

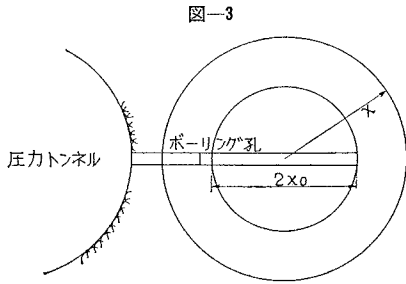


図-3

$$q + 4\pi kx^2 \frac{\partial p}{\partial x} = 0$$

$x = x_0$  で  $p = p_0$  とすると

$$p_0 - p = \frac{q}{4\pi k} \left( \frac{1}{x_0} - \frac{1}{x} \right)$$

$x \rightarrow \infty$  で  $p = 0$  であるから

$$p_0 = \frac{q}{4\pi kx_0}$$

すなわち

$$\frac{q}{kp_0} = 4\pi x_0 : \text{一定} \dots \dots \dots (3.1)$$

となる。

しかし、実際には圧力水が岩盤の目を開いたり、圧力水が圧縮を受けたりするので必ずしも一定とはならない。そこでこのような弾性透水層としての考え方を適用すれば、

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{2}{x} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{n\lambda}{k} \cdot \frac{\partial p}{\partial t}$$

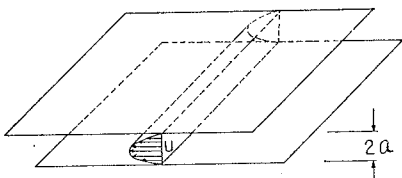
が成り立ち、この解を検討することによって<sup>2)</sup>、圧力を時間に関して直線的に上昇させる時に限り式(3.1)が成り立つことがわかり、式(3.1)から容易に  $k$  の値を求めることができる。

つぎに空げき率を求めるため、いま

- $n$  : 空げき率
- $\nu$  : グラウトの動粘性係数
- $a$  : 岩盤きれつの幅
- $b$  : 岩盤きれつの間隔
- $q$  : 単位幅当りの流量

とし、平行平板中を流れる流体を考えると (図-4)

図-4 平行平板中の流れ



$$q = \frac{2}{3} \frac{g}{\nu} \left( \frac{a}{2} \right)^3 \cdot \frac{4p}{l} \dots \dots \dots (3.2)$$

一方ダルシーの法則から

$$q = bk \frac{4p}{l} \dots \dots \dots (3.3)$$

式(3.2),(3.3)の両式から  $q \cdot l / 4p$  を消去して

$$k = \frac{a}{b} \frac{g}{3\nu} \left( \frac{a}{2} \right)^2 = \left( \frac{a}{b} \right)^3 \cdot \frac{b^2}{12\nu} \dots \dots \dots (3.4)$$

流れの方向だけのきれつであるならば、 $n = \frac{a}{b}$  で、直角

方向のきれつを考慮すると、 $n = 2 \frac{a}{b}$  であるから式(3.4)

より

$$k = \frac{b^2 n^3}{8 \cdot 12\nu} \dots \dots \dots (3.5)$$

このようにして  $k$  と  $n$  の関係をきれつの間隔  $b$  を媒体として得られる。

黒四の圧力トンネルにおいて巻立がすんでまだグラウト注入をしていないところで、無支保工部、支保工部など数種の地点を選んで、実際にボーリング孔注水試験を行なった。試験の要領を示すと

- 1) ボーリングマシンにより側壁において水平にせん孔し、着岩後の孔深を4~5mとする。
- 2) ボーリングコアの検査によって遭遇した岩盤きれつの位置と数を記録する。
- 3) ボーリング孔の入口に近い岩盤内にパッカーを設置し奥を密室とし、その長さを精密に測定する。
- 4) ボーリング孔に水を圧入し、圧力を時間に関して直線的に上昇させつつ、圧力と注水量を時々刻々に測定する。黒四では圧力上昇の速度を  $1 \text{ kg/cm}^2 / 10 \text{ min}$  とした。

(3) ボーリング孔注水試験の一例

黒四圧力トンネルで巻立コンクリート施工後に行なった No. 1 ボーリング孔のきれつの状態は図-5のとおりであって、きれつ間隔は平均 23.6 cm であった。注水試験は2回行ないその結果は図-6のとおりであった。 $q/p$  はほぼ一定と見られその値は 0.07~0.08 である。したがって、式(3.1)より透水係数を求めると

$$k = \frac{0.07 \sim 0.08}{4 \cdot \pi \cdot 173} = 3.2 \times 10^{-5} \sim 3.7 \times 10^{-5}$$

さて 3.(2) にて注水が球状に出てゆくものとしたが、ボーリング孔が細長いので、ボーリング孔の径と長さを短軸と長軸とする回転円体に似た形で流出してゆくものと考えの方が適当である。この場合 Talobre<sup>3)</sup>によれば球体と考えた時の値につぎの修正値を乗ずる必要がある。

$$\lambda = \frac{l}{2\sqrt{l^2 - r^2}} \cdot \ln \frac{l + \sqrt{l^2 - r^2}}{l - \sqrt{l^2 - r^2}}$$

ここに  $l$  : ボーリング孔長の 1/2 = 173 cm

$r$  : ボーリング孔半径 = 2.5 cm

$$\therefore \lambda = 4.75$$

よって透水係数は

$$k_0 = \lambda k = 1.5 \times 10^{-4} \sim 1.8 \times 10^{-4}$$

空げき率は式(3.5)において、 $b = 23.6 \text{ cm}$ 、 $\nu = 1.55 \cdot$

図-5 注水試験ボーリング孔きれつ位置

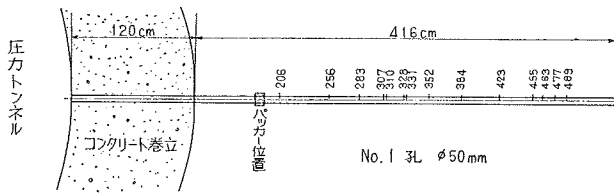
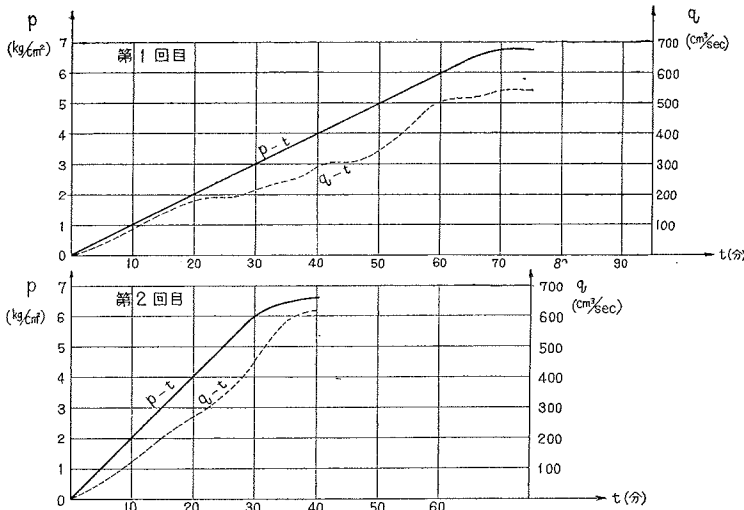


図-6 注入試験の結果



$10^{-5}$  と考えて

$$n = 0.75 \times 10^{-3}$$

を得るが、注入圧  $p$  kg/cm<sup>2</sup> がかかった時の空げき率  $n_1$  は当然大きくなり、 $p=0$  のときの空げき率を  $n$  とすれば次式から算出される。

$$n_1 = n \left\{ 1 + \frac{p}{E_R} \cdot \frac{1}{n} \right\} \dots\dots\dots (3.6)$$

(4) 注入容量の算出

黒四の圧力トンネルでは注入孔深を着岩後 3 m とした。したがって注入すべき岩盤の範囲は  $6^2 \pi - 3^2 \pi = 85$  (m<sup>3</sup>) である。注入圧  $p=30$  kg/cm<sup>2</sup>、岩盤の弾性係数  $E_R=100\,000$  kg/cm<sup>2</sup> とすると、空げき  $V_1$  は式 (3.6) を使用し、 $V_1=85 \times 0.75 \times 10^{-3} (1 + 30/75) = 0.085$  m<sup>3</sup> となる。

一方、注入圧  $p$  の作用によって巻立コンクリートが全体的に縮小して、巻立背後に空間を生ずるからこれも注入セメントによって填充されねばならない。巻立コンクリートの半径方向のちぢみは  $\epsilon = \frac{pr^2}{E_C t}$  であるから、生ずる空間  $V_2$  は

$$V_2 = 2\pi \cdot r' \cdot \epsilon = 2\pi \cdot 300 \cdot \frac{30 \cdot 270^2}{200\,000 \cdot 60} \cdot 100 = 0.033 \text{ m}^3$$

となる。ただし  $r, r'$  はそれぞれ巻立の中央および外側

の半径、 $E_C$  はコンクリートの弾性係数である。

注入圧  $p$  によって岩盤の方もまた圧縮を受ける。地山は無遠まで広がっているものとする、岩盤の半径方向変位  $u$  は

$$u = p \cdot r' \cdot \frac{m+1}{mE_R} \dots\dots (3.7)$$

ただし、 $m$  : 岩盤のポソアン数 = 6

とすると岩盤の圧縮によってできる空間  $V_3$  は

$$V_3 = 2\pi \cdot r' \cdot u = 2\pi \cdot 300 \cdot 30 \cdot 300 \cdot \frac{6+1}{6 \cdot 100\,000} \cdot 100 = 0.047 \text{ m}^3$$

よって注入を必要とする全空げき量はトンネル延長 1 m 当り

$$V = V_1 + V_2 + V_3 = 0.165 \text{ m}^3$$

である。トンネル 1 m 当り 4 本の割合で注入孔を配置するものとする、注入孔 1 本当り必要なセメント量は

$$V/4 = 0.041 \text{ m}^3/\text{hole} \dots \text{セメント } 120 \text{ kg}/\text{hole}$$

と推定することができる。

黒四圧力トンネルの注入孔配置

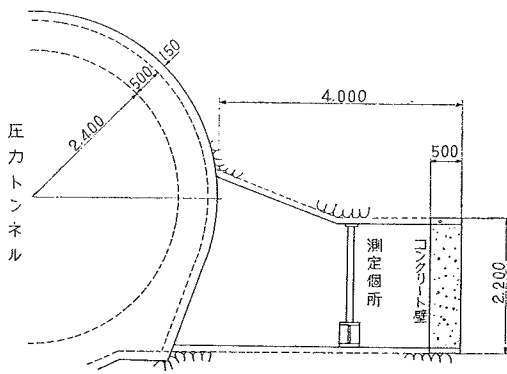
は 2 m 間隔で 8 本とし、実際の施工に当っては、まず 8 m 間隔で、ついでその中間に 4 m 間隔で、さらにその中間に 2 m 間隔で注入を行なった。この最終の 2 m 間隔の注入の平均注入量は約 100 kg/hole であった。このことから 2 m 間隔の配孔が必要かつ適当であったと判断される。

4. ジャッキ試験による岩盤のクリープに関する実験

高圧グラウト注入によって巻立に与えられたプレストレスは種々の原因によって弛緩する。その中で岩盤のクリープによるものが、特に重要な影響をもち地点・地質によって様相を異にする。黒四圧力トンネルでは小横坑を掘って(図-7)、ジャッキ試験によって岩盤のクリープの特殊性を調べることにした。

使用したジャッキは容量 60 t、揚程 150 mm、直径 20 ~ 40 cm の電研型油圧ジャッキであった。試験方法は測定箇所にてセメントペーストでフェーシングを行ない、これに機械を設置し、5~15 t の予備荷重を与えて岩盤と機械とのなじみをよくし、ついで荷重を 5 t/min の速度で 50 t まで加えそのまま 15~20 h 維持し、持続荷重下における変位からクリープひずみ度を測定した。6 カ所の測定の結果は表-3 に示したとおりであって、持続

図-7 試験坑縦断面図



場において試験坑を掘り実験を行なった。

(2) 試験坑の概要と第1次高压グラウト注入(図-8)

試験坑は黒部トンネル(水路トンネルと平行している運搬ルート)の終点に近い所で横坑を掘り、延長25mのうち深部11mを内径3mの水室としたものである。コンクリート巻厚は40cmとし、中央部で2分し、奥の方を鉄筋φ22 c.t.c. 200mm 1重とし、手前の方を4ブロック割り複鉄筋とした。4ブロック割りとした理由は7分巻コンクリートにおいて、果たしてプレストレスがろう水にどのように影響するかを知るためである。低圧グラウト注入はコンクリート巻立終了後2カ月において巻立背後に対して行なった。

表-3 ジャッキ試験による岩盤のクリープひずみ測定結果

| 試験坑番号 | 岩質 | (a) 長時間荷重持続後    |                     |                  |           | (b) 1時間荷重持続後   |                     |                       | 備考  |
|-------|----|-----------------|---------------------|------------------|-----------|----------------|---------------------|-----------------------|---|
|       |    | 全沈下量<br>1/100mm | クリープひずみ度<br>1/100mm | 残留変形量<br>1/100mm | 持続時間<br>h | 沈下量<br>1/100mm | クリープひずみ度<br>1/100mm | クリープひずみ度の比<br>(b)/(a) |   |
| 1-A   | A  | 248             | 16.0                | 129.2            | 17°49'    | 244            | 12.0                | 75%                   | 1) ジャッキ載荷板の直径は40cm<br>2) 持続荷重の大きさは50t<br>3) 岩質A,B,Cは堅硬の順を示す |
| 1-B   | B  | 92              | 4.2                 | 23.0             | 16°30'    | 92             | 3.8                 | 88                    |   |
| 1-C   | C  | 493             | 23.0                | 295.8            | 18°21'    | 492            | 21.8                | 95                    |   |
| 2-A   | A  | 106             | 10.3                | 34.0             | 17°46'    | 99             | 3.3                 | 29                    |   |
| 2-B   | B  | 78              | 2.0                 | 27.0             | 16°48'    | 77             | 1.5                 | 75                    |   |
| 2-C   | C  | 133             | 7.0                 | 48.8             | 18°12'    | 132            | 5.5                 | 78                    |   |

第1次高压グラウト注入は、低圧グラウト注入終了後1.5カ月に開始した。注入は2m間隔の6方向とし、孔深は2~2.3mでドリフターせん孔とし、最高注入圧力は30kg/cm<sup>2</sup>であった。低圧グラウ

荷重1h後と長時間持続後のクリープひずみ度の比は大半の所が75%以上であることがわかる。

このことから、グラウト注入時最高圧力到達後ほぼ1h最高圧力を持続すれば、岩盤の塑性変形をほとんど防止することができることがわかったので、黒四圧力トンネルのグラウト注入工事の実際に当っては最高圧力到達後2~3hその圧力を持続させておけば、岩盤のクリープによる巻立プレストレスの弛緩を防ぐことができると判断した。

5. 試験坑で行なった巻立プレストレスンググラウト注入に関する実験

(1) 実験の目的

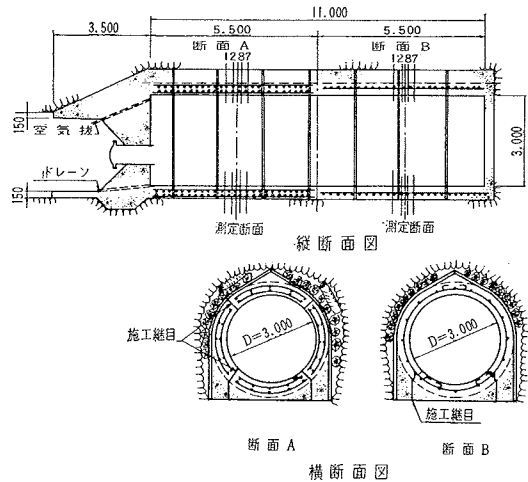
1) 果たしてグラウト注入による巻立プレストレスングが可能であるか、その具体的なグラウト注入工法の方針をいかに確立するか、

2) トンネル巻立を丸巻とせず、インバートを後で施工するいわゆる7分巻コンクリート打設法では、一般にその施工継手からろう水するなど弱点があると思われるが、この打設法を行なったトンネル巻立にプレストレスングを行なったときに、いかなる影響を与えるものか、

3) トンネル掘削のため木材保工を用い、コンクリート施工時に、これを埋込んだ場合にもプレストレスング・グラウトは有効かどうか、

などについての研究のため1.5年にわたり黒四建設現

図-8 試験坑



トおよび第1次高压グラウト注入工事の実績を示すと表-4のとおりである。

表-4 試験坑の低圧および第1次高压グラウト注入工事実績

|                | 低圧グラウト注入               | 第1次高压グラウト注入           |
|----------------|------------------------|-----------------------|
| 注入材料           | セメント, フライアッシュ, 砂       | セメント                  |
| 注入量            | 21.5t, 10.7t, 52.5t    | 89.3t                 |
| 注入最高圧力         | 4~5 kg/cm <sup>2</sup> | 30 kg/cm <sup>2</sup> |
| トンネルm<br>当り注入量 | 6.1 t/m                | 8.1 t/m               |



(3) 第1次水圧試験の考察

第1次高压注入終了後、水室に充水し水圧をかけた。

最高到達圧力 13 kg/cm<sup>2</sup>  
全ろう水量 400 l/min

水圧試験後の坑内検査により、インバート継目および閉塞部にきれつを発見したので、これをアイガスによって処理し再度充水したのであるが、ろう水量は前回と大差がなかった。

このようにろう水が非常に多く、したがって第1次高压グラウト注入は不十分と認められた。その原因と思われるものは、

- 1) 高压グラウト注入孔のせん孔をドリフターで行なったので岩粉が注入のじゃまをしたこと、
- 2) 孔深が浅過ぎて岩盤に対する改善が十分に行なわれなかったこと、
- 3) 低压グラウト注入が、支保工の間へ行き渡っていないため、高压グラウトが低压グラウト注入の補足となって単に巻立背後の間げき填充に使用されてしまったこと、などである。

(4) 第2次高压グラウト注入と水圧試験結果の考察

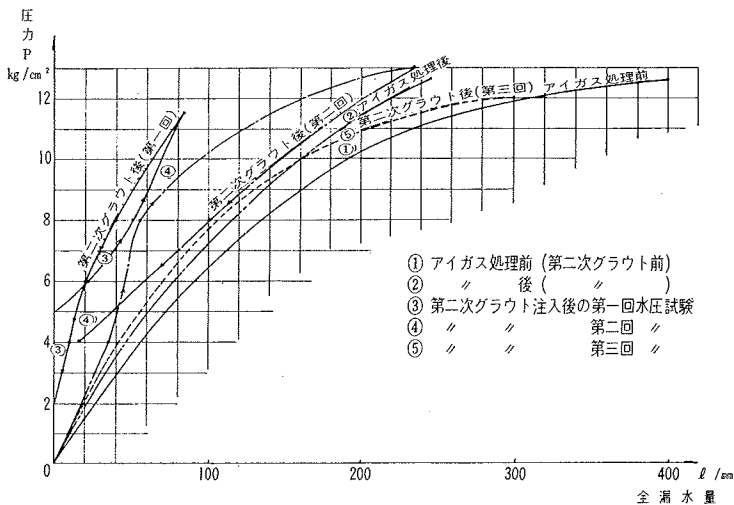
そこで第2次高压グラウト注入を行なうこととし、2 m間隔の断面で1断面当り8方向、孔深を着岩後3 mとし、ボーリング機を使用して慎重にせん孔した後、注入を行なった。巻立施工後ちょうど1年であった。注入の実績を表-5に示す。

表-5 第2次高压グラウト注入工事実績

|                     |                       |
|---------------------|-----------------------|
| 注 入 材 料             | セメント                  |
| 注 入 量               | 20 t                  |
| 注 入 最 高 圧 力         | 30 kg/cm <sup>2</sup> |
| トンネルm当り注入量          | 1.86 t/m              |
| 注 入 最 高 圧 力 持 続 時 間 | 3 h                   |

図-9 は第1次および第2次高压グラウト注入後に行

図-9 試験坑湧水曲線



なった水圧試験のおのおのについてろう水量と内水圧との関係を示したものである。第2次高压注入終了後の水圧試験は3回行なった。各回について図-9のカーブにより考察するとつぎのようである。

1) 第1回：第1回目の水圧試験では内圧 5 kg/cm<sup>2</sup>までは全ろう水がなかったことは注目に値する。第2次注入前にすでに巻立にきれつがあったが、これが第2次注入セメントで着したとしても、その引張り強度にたえる程度は少ないと考えられるから、この 5 kg/cm<sup>2</sup>というろう水量0の限度の水圧は、ちょうど巻立に与えられたプレストレスの最小値であると推量されるのである。すなわち 5 kg/cm<sup>2</sup>以上の内圧がかかっているからカーブを見ると 10 kg/cm<sup>2</sup>程度までの圧力下においては第1次注入後のろう水量増加の傾向より小さいのであって、このことは水圧によってきれつが開くという解釈は成り立たないで、むしろプレストレスは一樣に巻立周上に分布しているのではなく不規則であって、一部プレストレスのかかり方の弱いところにきれつが入ったが(5 kg/cm<sup>2</sup>の圧力下において)ただちに直応力が平衡し、さらにこれ以上の水圧の増加によって大きい直応力がきれつ発生部に徐々に加わり、逆にきれつが締ったと推量できる。それゆえプレストレスの最高は 10 kg/cm<sup>2</sup>であって、内圧が 10 kg/cm<sup>2</sup>を越えればろう水量一内圧のカーブは第1次注入後と同様の形となって水圧によって再びきれつが開いたものと思われる。

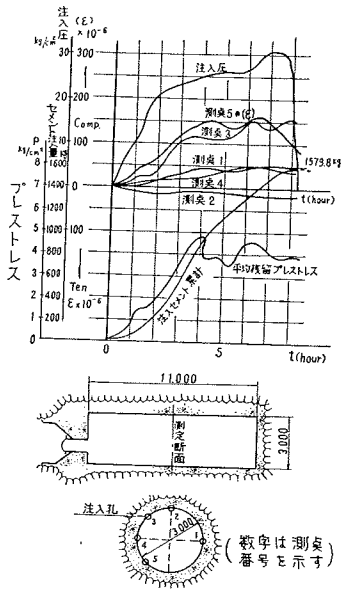
2) 第2回目：第2回目の水圧試験では、内圧 8 kg/cm<sup>2</sup>までは第1回目の 5 kg/cm<sup>2</sup>から 10 kg/cm<sup>2</sup>までの曲線と類似しており、したがって 8 kg/cm<sup>2</sup>まではプレストレスが残留したと考えられる。8 kg/cm<sup>2</sup>を越えると曲線は急変して第1次グラウト注入後アイガス処理前との傾向が一致する。この第2回目の 8 kg/cm<sup>2</sup>は第1回目の 10 kg/cm<sup>2</sup>という分岐点に相当すると見られるから、第1回目の水圧試験でプレストレスが2割弛緩したと考えることができる。

3) 第3回目：第3回目の試験における分岐点は 4 kg/cm<sup>2</sup>と認められるので、前2回の水圧試験によってプレストレスが6割も弛緩したことになる。これは第2回目の試験で 8 kg/cm<sup>2</sup>のプレストレスに対して内水圧を 13 kg/cm<sup>2</sup>と大幅に上昇させたことによるものと考えられる。

(5) 試験坑の巻立に与えられたプレストレスの測定

試験坑において、第2次高压グラウト注入開始当初から巻立プレストレスの測定を計画した。図-10に示すよ

図一10 No. 3 孔の注入による各種の数値

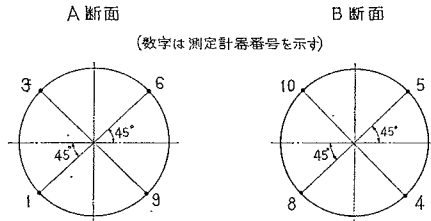


の時濃度を切り換えており、そのためセメントが注入孔に詰りその付近の応力が解放されたものと考えられる。このことから注入量が不連続的に減少するようなグラウト濃度の変更を行なってはならないことがわかる。このような場合にはこの付近で改めて再注入をする必要がある。

6. 黒四圧力トンネルにおけるプレストレスの実測

黒四圧力トンネルの棒小屋沢横坑付近において、巻立コンクリートの中にストレインメーターを埋め込み(図一11)、通水後プレストレスが残留するかどうかを確認のため実測を行なった。その結果は図一12のよう十分にプレストレスが残留していることが認められる。通水開始は昭35年10月であった。

図一11 測定計器埋込箇所図



表一6 No. 3 孔注入記録 (試験坑中央断面)

| 注入開始時刻 (時・分) | 注入時間 (分) | 累計時間 (時・分) | ミルク濃度 | 注入圧力 (kg/cm <sup>2</sup> ) | 注ミルク量 (l) | 注入セメント (kg) |
|--------------|----------|------------|-------|----------------------------|-----------|-------------|
| 9.50         | 20       | 0.20       | 1:6   | 5                          | 131       | 21.0        |
| 10.10        | 20       | 0.40       | "     | 10                         | 126       | 20.0        |
| 10.30        | 20       | 1.00       | "     | 15                         | 149       | 25.6        |
| 10.50        | 20       | 1.20       | "     | 20                         | 208       | 33.0        |
| 11.10        | 20       | 1.40       | "     | 25                         | 257       | 41.0        |
| 11.30        | 20       | 2.00       | "     | "                          | 226       | 36.0        |
| 11.50        | 20       | 2.20       | "     | 30                         | 325       | 52.7        |
| 12.10        | 20       | 2.40       | 1:3   | "                          | 332       | 99.0        |
| 12.30        | 20       | 3.00       | "     | "                          | "         | "           |
| 12.50        | 10       | 3.10       | "     | "                          | 166       | 50.0        |
| 13.00        | 20       | 3.30       | 1:2   | "                          | 298       | 128.1       |
| 13.20        | 20       | 3.50       | "     | "                          | 276       | 118.6       |
| 13.40        | 20       | 4.10       | "     | "                          | 296       | 127.3       |
| 14.00        | 20       | 4.30       | "     | "                          | 298       | 128.1       |
| 14.20        | 20       | 4.50       | "     | "                          | 188       | 80.7        |
| 14.40        | 20       | 5.10       | "     | "                          | 138       | 59.4        |
| 15.00        | 20       | 5.30       | "     | "                          | 146       | 62.8        |
| 15.20        | 20       | 5.50       | "     | "                          | 143       | 61.0        |
| 15.40        | 20       | 6.10       | "     | "                          | 134       | 58.0        |
| 16.00        | 20       | 6.30       | "     | "                          | 162       | 69.6        |
| 16.20        | 20       | 6.50       | "     | "                          | 106       | 45.6        |
| 16.40        | 20       | 7.10       | 1:1   | "                          | 130       | 98.3        |
| 17.00        | 20       | 7.30       | "     | "                          | 86        | 65.0        |
| 17.20        | 20       | 7.50       | "     | "                          | 0         | 0           |
| 17.40        | 40       | 8.30       | "     | "                          | 0         | 0           |
| 18.20        | 100      | 9.30       | "     | "                          | "         | "           |

うに試験坑中央断面において5カ所にワイヤーストレインメーターを貼り付けて測定した。

この時の注入量、注入圧力などの実績を表一6に示し図一10にはまた各測点のひずみを度示した。図の平均残留プレストレス曲線が注入開始後7時間後頃から下降線をたどっているのは、表一6でわかるようにちょうどそ

図一12 (a) 黒四圧力トンネルのプレストレス (換算外圧) 測定値

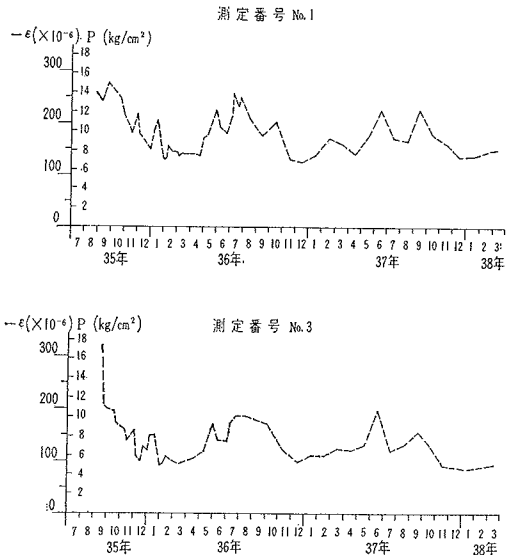


図-12 (b) 黒四圧力トンネルのプレストレス (換算外圧) 測定値

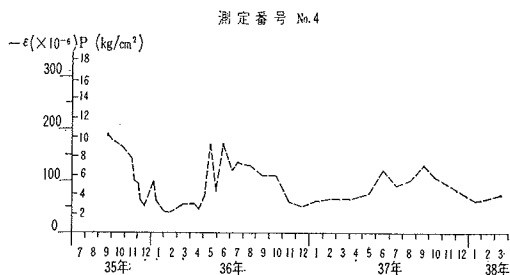


図-12 (c) 黒四圧力トンネルのプレストレス (換算外圧) 測定値

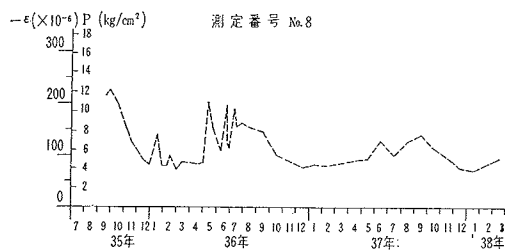
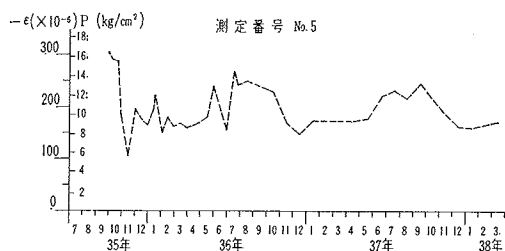
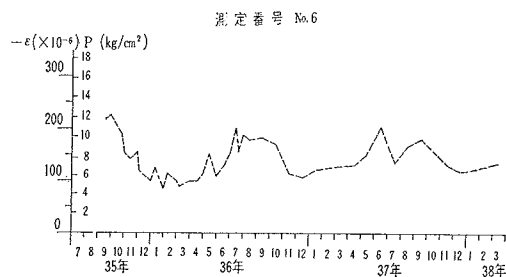
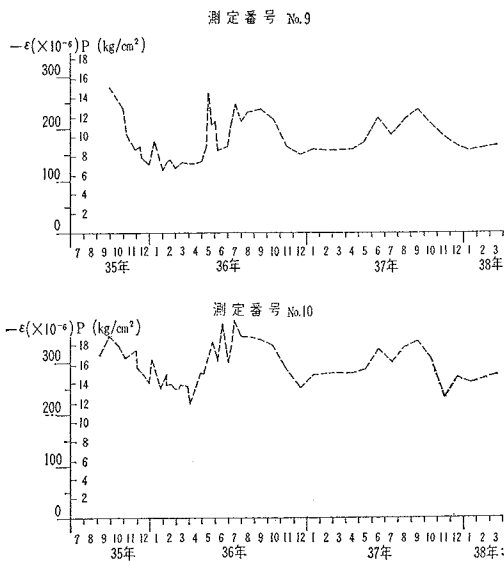


図-12 (d) 黒四圧力トンネルのプレストレス (換算外圧) 測定値



## 7. むすび

圧力トンネルにおいては従来内圧によって、コンクリート巻立を厚肉円筒と見たた設計を踏襲するの安易に止ってきた。著者はその建設に従事した黒四の圧力トンネルにおいて、内圧がきわめて高く従来の方法で設計することが困難となったのを契機として、グラウト注入によりプレストレスを巻立に残させることに着目し研究を行なったのである。その結果、設計面および施工面においてつぎのような諸事項が明らかにされたと考える。

(1) 超高圧、大径の圧力トンネル(黒四のような規模のもの……内圧最大  $15 \text{ kg/cm}^2$ 、内径  $4.8 \text{ m}$ 、延長  $10 \text{ km}$ )においては、従来の内圧の面からの設計方法では内圧に耐えかつ水密性を十分に保証するような設計を行なうことは困難である。たとえば黒四圧力トンネルでは周辺岩盤が良質で  $E_R=200\,000 \text{ kg/cm}^2$  のときでも、巻立コンクリートの引張応力度は  $14 \text{ kg/cm}^2$  をこえてきれつが発生することになる。このような場合、巻立周辺に高圧グラウト注入を施し、そのハイドロスタチックな力を巻立に残留せしめるプレストレスング工法が合理

的である。

(2) 高压グラウト注入を行なうと、その注入圧が巻立背面に一樣にかかるものとは限らない。そこで流体の広がりを考慮して部分的な外圧がかかった時、巻立に生ずる応力について解析した結果、巻立背面に一樣に外圧が分布したとして厚肉円筒公式で算出した値の1.5倍程度の最大応力が発生することがわかった。

(3) 巻立プレストレスングのためには、単に巻立コンクリートと周辺岩盤との間に注入するだけでなく、所定の岩盤内(黒四の場合は深さ約3m)への、高压グラウト注入が必要である。

(4) グラウト注入計画に当っては、ボーリング孔注水試験によって透水係数を求め、これから空げき率やプレストレスを与えるに必要な注入量を算出し、配孔その他諸般の設計をすればよい。

(5) プレストレスの弛緩は岩盤のクリープによるものがいちじるしいと思われ、これを避けるためにはグラウト注入を十分に行ない最高圧に達した後、そのままクリープの大半が失なわれるまで持続すればよい。持続時間はジャッキ試験によって知ることができる。

(6) 巻立に与えたプレストレスは、その値を越えるような内水圧を受けた場合、その大きさに応じて弛緩する。そのためグラウト注入圧は必ず設計内圧以上としなければならない。

(7) 木材支保工を埋込んだ巻立でも高压グラウト注入を行なうことによって十分にプレストレス効果が得られる。したがってあえて支保工を除去する必要はない。

(8) 7分巻コンクリート巻立工法のときも、十分プレストレスング効果が得られ、継手からろう水が生ずるようなことはない。

(9) グラウト注入施工中に、注入量が不連続的に減少するような場合には、プレストレスが特に注入孔付近で弛緩すると考えられるため、このようなことがないようにグラウト濃度の急激な変化をしないよう慎重に行なう必要がある。

以上のような諸結果にもとづいて黒四圧力トンネルでは、総計 53762 孔、総延長 148722 m におよぶグラウト注入によるプレストレスング工事を行なったのであるが、巻立にはプレストレスが与えられ、かつ現在(昭38.3)に至るもなお満足すべき値をもって残留していることを確認した。よって本工法は技術的、経済的に有効適切なものと信ずる。稿を終えるに当り、本研究が幾多先達の苦心の研究があって始めてなし得られたことに思いをいたし、この種問題に携わられた方々に対しここに厚く感謝の意を表する。

本文は東京大学審査学位論文の要約である。

#### 参考文献

- 1) Otto Frey-Baer: "Die Berechnung der Betonauskleidung von Druckstollen", Schweizerische Bauzeitung, 1944, Nr 14, 15
- 2) 丸山: グラウト入注によるトンネル巻立のプレストレスングに関する研究, 関西電力技術資料, 昭39別冊。
- 3) Talobre: "La Mécanique des Roches, 1957, Dunod.
- 4) 丸山・神月: 圧力トンネルの設計, 発電水力 No. 70.
- 5) Kozeny, J: "Hydraulik"
- 6) 電研報告: 黒部川第4発電所圧力トンネル岩盤弾性係数について, II地 1518, 12:34. 11

(1964.11.25・受付)

昭 和 4 0 年 度 土 木 学 会 論 文 集 編 集 委 員

|       |                 |         |               |     |                 |       |             |
|-------|-----------------|---------|---------------|-----|-----------------|-------|-------------|
| 委 員 長 | 村 上 永 一         | 副 委 員 長 | 栗 津 清 藏       | 委 員 | 野 和 夫           | 委 員   | 堀 口 孝 男     |
| 員     | 阿 山 英 政 敬       | 委 員     | 大 月 隆 士       | 員   | 堤 椿 東 一 郎       | 員     | 松 本 嘉 典     |
| 〃     | 秋 山 政 行         | 〃       | 神 田 德 直 夫     | 〃   | 椿 遠 山 井 啓 郎     | 〃     | 宮 原 上 博     |
| 〃     | 伊 藤 喜 研 而       | 〃       | 角 田 藤 和 一     | 〃   | 遠 永 永 倉 靖 正     | 〃     | 宮 村 森 淳     |
| 〃     | 石 板 原 倉 田 康 平   | 〃       | 工 小 々 木 武 正 雄 | 〃   | 永 永 永 倉 部 村 祥 一 | 〃     | 都 持 永 口 博   |
| 〃     | 池 田 井 康 彦 二     | 〃       | 佐 沢 武 口 昌 成   | 〃   | 南 中 西 沢 野 文 雄   | 〃     | 山 山 村 内 利 威 |
| 〃     | 岩 江 尾 崎 坂 一 芳 夫 | 〃       | 白 石 木 根 一 学   | 〃   | 西 野 文 雄 一       | 〃     | 山 山 村 内 利 威 |
| 〃     | 尾 尾 仲 章 光       | 〃       | 鈴 曾           | 〃   | 長 谷 川           | 委員兼幹事 | 西 脇 利 威     |
| 〃     | 大 橋 昭           | 〃       |               | 〃   |                 |       |             |

|  |                 |                   |
|--|-----------------|-------------------|
| 昭和 40 年 7 月 15 日 印刷  | 土木学会論文集 第 119 号 | 定価 150 円 (〒 20 円) |
| 昭和 40 年 7 月 20 日 発行  |                 |                   |
| 編集兼発行者 東京都新宿区四谷一丁目   | 社団法人 土木学会       | 羽 田 巖             |
| 印刷者 東京都港区赤坂溜池 5  | 株式会社 技報堂        | 大 沼 正 吉           |
| 発 行 所 社 団 法 人 土 木 学 会 振替東京 16828 番<br>東京都新宿郵便局区内 新宿区四谷一丁目 電話(351)代表 5138 番 |                 |                   |