

# 小断面シールドの現場実測\*

—都営地下鉄ケーブルトンネルの場合—

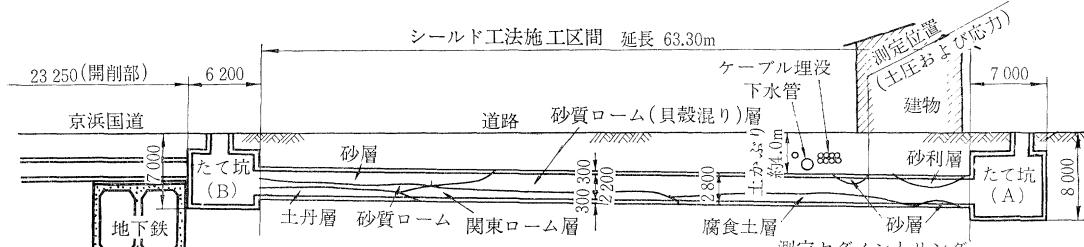
山本 稔\*\*  
遠藤 浩三\*\*\*  
宮崎 恒\*\*\*\*

## 1. まえがき

人口の集中化とともに、東京都内の交通事情は深刻な様相を呈しているが、これを抜本的に打開する一方策として、地下鉄道の建設が急速に進められている。しかし、錯った路面交通の中で地下鉄道を開削工法で施工する場合、路面交通の処理方法、周辺地盤の沈下、その他施工時の騒音など種々の問題がからまり、工事それ自体がその制約を受ける時点に立ち至っている。このような状況から、東京都交通局では、都営地下鉄大門変電所ケーブルトンネルの建設に際して、試験的な意味も含めてシールド工法を採用し注)、その実測を1年有余にわたって行ない、シールド工法によるトンネル建設上の問題点の解明の一助に資することとした。

測定現場は、都営地下鉄新橋～大門間の開通とともに電気設備として変電所が設置され、この変電所と地下鉄道間約80mにシールド工法によって施工された所で、仕上り内径2.2mのケーブルトンネルに関する工事である。図-1に当工事区間の地質、ならびに地層の概略を示す。

図-1 大門変電所ケーブルトンネル工事縦断面



自然含水比	97.1%	自然密度	1.42 g/cm³	飽和度	93.7%	粘着力	0.68 kg/cm²	砂分	54.0%	粘土分	2.0%
土粒子の比重	2.84%	自然間隙比	2.94%	内部摩擦角	28°56'	礫分	1.0%	シルト分	43.0%		

注) 工事報告は土木施工 1964年9月号参照

\* 第20回年次学術講演会にて発表

\*\*\* 正会員 東京都交通局高速電車建設本部設計課長

\*\* 正会員 工博 都立大学助教授

\*\*\*\* 正会員 東京都交通局高速電車建設本部設計課

は 4.0 m、地質は 図-1 に示したとおりである。なお、施工前における地下水位は、トンネル断面の中央付近にあった。

## 2. シールド テールの応力

### (1) 測定概要

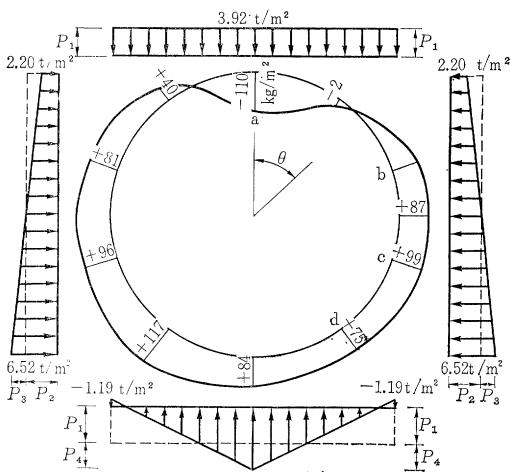
シールドを推進した後には、セグメント覆工の外周と地上との間に、シールド テールの板厚に施工上の余裕を加えた空げきが生ずる。この空げきは、推進後ただちに裏込注入により充填されるが、これが覆工に作用する土圧や、土かぶりの浅いトンネルの場合の地表面への影響に密接な関係を持つものと考えられる。したがって、空げきは、できるだけ小さい方が望ましい。そこで、シールドの設計上重要な位置を占めるテールについても、その応力状態を調査し、かつ応力分布からシールド テールに作用する土圧についても逆算を試みた。テール単位長さ当たりに作用する土圧が、構造と外力の対称性を考慮して 図-3 に示すごとき種々の土圧分布形式の組合せからなると仮定すれば、テールの曲げモーメント  $M$ 、および軸力  $N$  は、 $P_i$  を土圧分布形式の大きさを表わす係数として、

$$\left. \begin{array}{l} M = \sum_i m_i P_i \\ N = \sum_i n_i P_i \end{array} \right\} \dots \dots \dots \quad (1)$$

ここに、 $m_i n_i$  は、 $P_i = 1$  とした場合の断面力で、 $Q$  の関係である。

かくして、テール内周の縁応力度  $\sigma$  は、

図-3 テールの内縁応力度および略算土圧分布



9.03 t/m<sup>2</sup>

計算に利用した仮定土圧分布は4種類。  
a～dは土圧の逆算に利用した資料位置  
点線は仮定土圧

この  $\sigma$  は、 $\theta$  を与えると式(1)から  $P_i$  の 1 次関数として求められる。したがって、 $\theta$  に関する係数  $P_i$  の数だけテーブル内周の縁応力度を実測し、その値を等値すれば、係数  $P_i$  を定めるに必要な条件式が得られるから、これを解いて土圧分布を決定することができる。

テールのひずみ測定は、その内縁において円周にそった横断方向と、それに直交した縦断方向において行なった。これらの測定に電気抵抗線ひずみ計を利用するには種々の困難が予測されたので、ここでは純機械的測定方法として、コンタクト ストレイン メーターを試用した。測定箇所は 図-2 に示すように、横断方向ではテールの自由端より 50 cm, および 60 cm の 2 横断面において各 12 点ずつ計 24 点、縦断方向では横断方向の測定と同じ断面位置で 4 点、さらに リング ガーダー付近で 5 点、計 9 点とした。

ひずみ測定用の鋼球間隔は 20 cm とし、鋼球は、シールド推進開始前に所定の箇所に打込み、無荷重状態の鋼球間隔を測って標点間距離とした。測定位置にシールドが達したとき、この鋼球間隔を測定して、原長との差から応力を求めることができた。

## (2) 測定結果とその考察

測定したひずみから計算されたシールド テール 内縁の応力は、表-1 に示したが、これらの資料は、シールドの静止状態において測定された応力である。表-1 から、テールの応力は全般的にかなり小さいと判断されるから、本シールドにおいては、すべての条件を考慮してもまだ十分な余裕があると考えられよう。縦断方向の応力は表示しなかったが、テールの頂点付近でリング ガーダーの影響が認められた。このことは、テールの応力にリング ガーダーの影響が避けられないことを示している。しかし、横断方向の応力は円筒のそれに近いはずであるから、実測値のもつ誤差と方法の簡便さを考慮

表-1 シールド テールの内縁応力度表

測定断面		横断方向		
測定 (角度)		50 cm	60 cm	平均
1 (0°)		-122 kg/cm <sup>2</sup>	-98 kg/cm <sup>2</sup>	-110 kg/cm <sup>2</sup>
2 (36)	-	6	2	2
3 (72)		57	92	75
4 (90)		87	87	87
5(108)		84	113	99
6(144)		98	52	75
7(180)		84		84
8(216)	117		117	117
9(252)			96	96
10(270)				
11(288)	94		68	81
12(384)	40			40

注：+は圧縮

し、測定値の処理に当っては実測応力をそのまま円筒の応力に対比させることで満足することにした。

表-1 を用いてえがいた横断方向の平均内縫応力度分布は、図-3 に示すとおりであるが、ここに注目すべきことは、引張応力がテールの頂点付近に存在するにすぎないことがある。この応力分布の発生は、上方から作用する土圧によってテール上部に引張応力が生ずることによるが、シールドは下方に押付けられる結果になるから、その底部および側部においては変形が地山によって拘束され、曲げモーメントが減じて軸力状態に近づくことで説明ができる。

図-3 の土圧分布は、同図の応力分布から逆算した土圧分布である。テール上部に作用する鉛直土圧は、図-3 より約  $3.9 \text{ t/m}^2$  と読みとられ、これを土かぶり深さに換算すると  $3.9/1.6 = 2.5 \text{ m}$  と計算されるが、これは測定位置の全土かぶり深さ  $4 \text{ m}$  の約 60 % にすぎない。したがって、この計算値が種々の要因により誤差をもつにしても、これが全土かぶり深さに達することは考えられない。このように土圧が軽減されることは、テールの変形と切羽における地山の搅乱から生ずる地山のゆるみの影響であると考えられる。この事実から、シールドにかかる土圧はゆるみ土圧と解してよく、設計においても荷重を軽減できることがわかる。一方、図-3 の計算値は、底部および下側部に大きい土圧が作用することを示しているが、これはシールドが地山に押付けられて生ずる受働土圧的な土圧によると解釈される。このような立場にたてば、土圧の逆算結果の解釈は、先の応力分布から考察した結果にも符合する。

### 3. トンネル覆工に作用する土圧および間げき水圧

#### (1) 測定概要

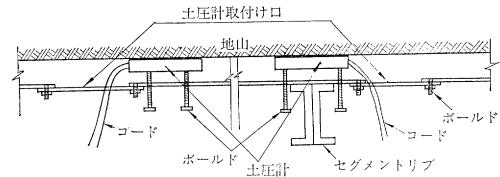
トンネル覆工に作用する土圧状態を明確にすることは、トンネルの設計における最も重要な問題であるが、土圧は、土かぶり、土質、地下水、覆工の剛性および施工法など種々の要因に支配される。このような事情を考慮に入れて土圧および間げき水圧の実測を行なった。

使用計器は、摺動型土圧計および間げき水圧計を用い、その使用数は、土圧計 16 個、間げき水圧計 4 個である。なお、記録は、自記記録計によりシールド通過後の土圧変化が激しい時期には 3 時間ごと、その後は 6 時間ごとに計測された。計器の取付け位置は図-2 のとおりであるが、土圧計 No. 1～No. 16 のうち、No. 1～No. 4 は、セグメントのスキンプレート上に、No. 5～No. 16 は、セグメントのリブ上に配置された。一方、

間げき水圧計 No. 16～No. 20 は、土圧計の中間に置かれた。

覆工にかかる土圧はトンネル周辺の土のゆるみ現象によって発生するから、土圧計の設置法それ自体が測定結果に微妙な影響を与えるおそれがある。そこで、ここにはつぎの操作にしたがって土圧計を埋設した。すなはち、計器の取付け位置に当るセグメントがシールドを出した直後、セグメントに加工された土圧計取付口を通じて地山をならし、そこに土圧計の受圧面を土圧 0 で密着させ、図-4 のごとくボルトで土圧計の背面を軽く留める。そして、土圧計背面とセグメント外面との空げきに現場で採取した土を填充するとともに、土圧計取付口を封する。これらの操作が終ったとき、自記記録計は作動を開始する。この後豆砂注入の完了をまって土圧計背面を押えているボルトも取り除いた。また、間げき水圧計の設置も土圧計に準じて行なった。この後豆砂利に引続いてモルタル注入を行なったが、測定断面の前後の各 4 リング間はこれを省略し、計器の受圧面にモルタルのまわるのを避けた。

図-4 土圧計取付詳細

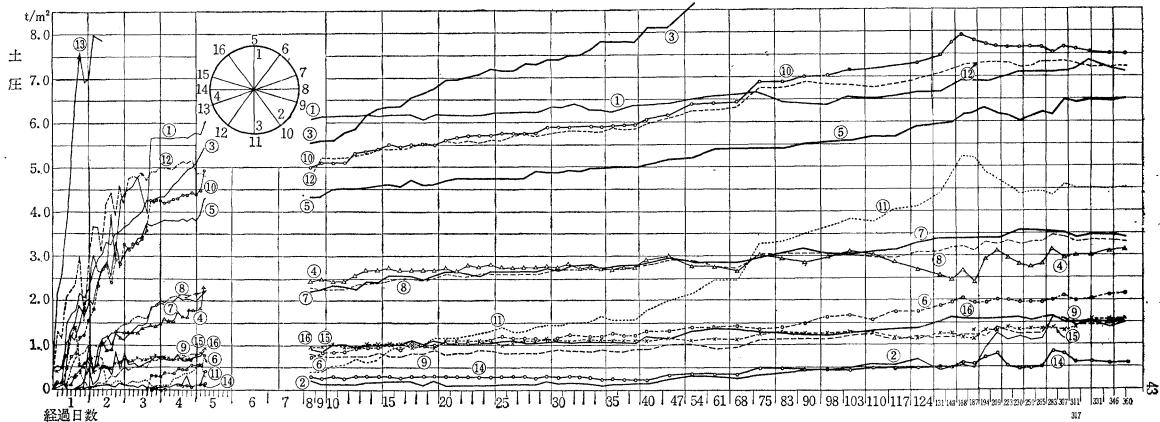


#### (2) 測定結果とその考察

##### a) 土圧の経時変化

図-5 は、シールド通過後約 1 年間にわたって測定された土圧の経時変化を表わすが、土圧は、全般的傾向としてシールド通過後の短時日のうちに急激に増加するが、その後はゆるやかな勾配にかわり、かなり長期にわたって漸増するようみえる。いまこの状況をさらに詳察するため、代表的な傾向を示すようにみえる土圧計 No. 5 および No. 1 の記録を例として記述してみよう。これらの土圧計が埋設されているトンネル頂点の土かぶりは  $4.0 \text{ m}$  であるが、最終的にはこの土かぶりすべてが土圧として有効に働くとすれば、土圧の最終値は、土の単位重量を  $1.6 \text{ t/m}^3$  として  $1.6 \times 4 = 6.4 \text{ t/m}^2$  と計算される。そこでこの値を土圧の基準にとれば、図-5 から土圧計 No. 5 では、シールド通過後 5 日目に土圧は最終値の約 60 %、1 カ月後には約 75 % になる。そして 48 日後の二次覆工コンクリート打設時には約 80 % に達する。その後も土圧は、継続してゆるやかな増加の傾向を示し、約 1 年で 100 % に達することがわかる。しかしこの事情は、土圧計 No. 1 においては多少異なる。

図-5 土 壓 の 經 時 變 化



ようによりえる。これらの考察からさらに全般的な傾向として、土圧はシールド通過後約1年ぐらいでその最終値に達すると判断できることがわかる。一方、上述の考察からややはざれていると考えられる記録に、土圧計No. 13とNo. 11のそれがあるが、これらは、ともにトンネルのインバート部に設置した土圧計にかかるもので、二次覆工コンクリートの打設による自重の増加の影響を受け、コンクリート打設後土圧が増大したために生じたものであると考えられる。また、図-5から明らかにように、スキンプレート部に設置した土圧計とリブ部に設置したそれらの観測結果は相違するが、資料の検討により、これが覆工の剛性の変化によるものではなく、むしろ土圧計の設置法など他の要因に支配されて生じたものと考えられる。なお、土圧計No. 13は測定開始後3日でスケールアウトし、他の土圧計とまったく違った挙動を示したので、原因不明のままこれを資料から除外することにする。

**b) 土圧分布状態**

図-6は、シールドが通過してから5日後、および1年後の土圧分布状態を例示したものである。なお、図中④印は、スキンプレート部に取付けられた土圧計による測定値を表わす。図-6から土圧分布が、トンネル頂部およびインバート両側部で比較的大きいことがわかるし、またインバート中央部ではすでに指摘したが、二次覆工コンクリート打設後に土圧の増大する傾向が認められる。ここに、インバート両側部において土圧が比較的大きくなる原因に、覆工背面への裏込注入と、施工中トンネル内で行な

われる諸種の作業による影響が考えられる。また、ここで水平土圧と鉛直土圧の比を土圧計 No. 4, No. 8, No. 14 と No. 1, No. 5 の測定値から求めれば、0.1~0.55

図-6 土圧分布図

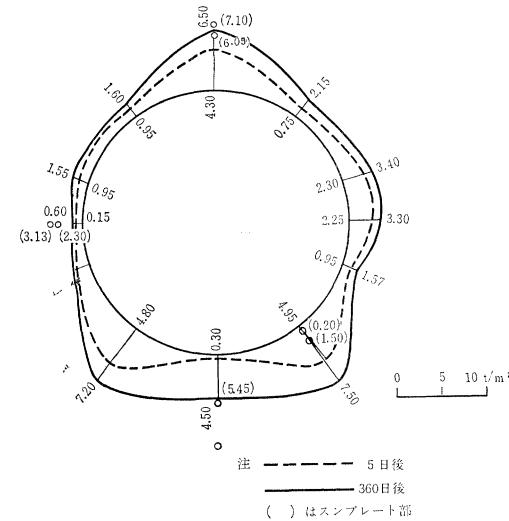
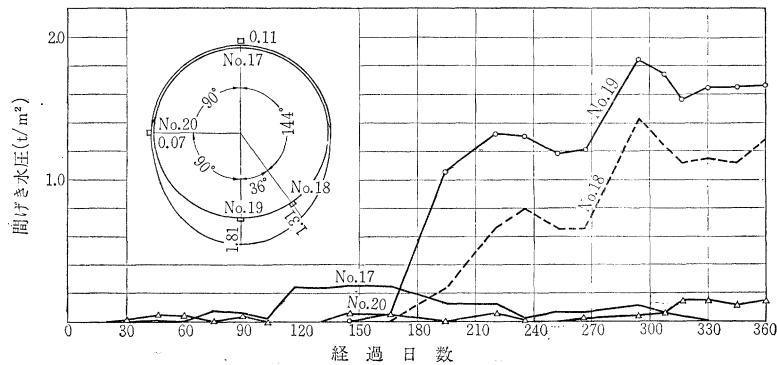


図-7 間げき水圧の経時変化



の内に入るが、傾向としては 0.55 の側に近い値をとるようみえる。

### c) 間げき水圧

測定された間げき水圧の経時変化は、図-7 に示したとおりである。また、図-7 には間げき水圧が最大値を記録したときの分布も示してある。シールド通過後約 160 日間においては、近傍にある下水管のろう水によると思われるわずかの間げき水圧が観測されたにすぎないが、その頃には付近の地下鉄が完成し、埋戻し完了とともに地下水が復元したので、それ以後インパート部分で間げき水圧が連続的に記録され、最大  $1.8 \text{ t/m}^2$  を示し、約半年を経過して施工前の水位に戻ったと判断される。

## 4. トンネル覆工の応力

### (1) 測定概要

トラス型セグメントからなる一次覆工に生ずる応力は、これを予測することが困難であるし、コンクリートで二次覆を行なう場合に生ずる一次覆工と二次覆工の土圧分担の問題も、また調査されるべき重要な項目である。

写真-1 計器取付状況

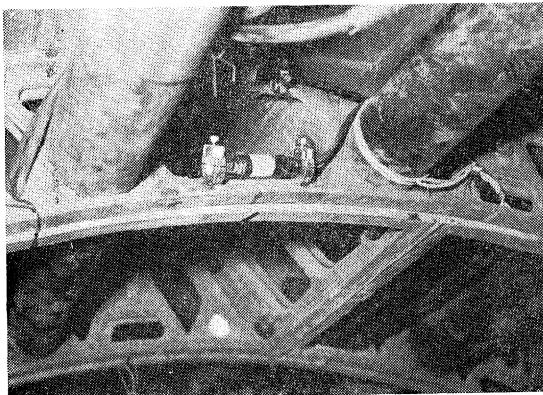
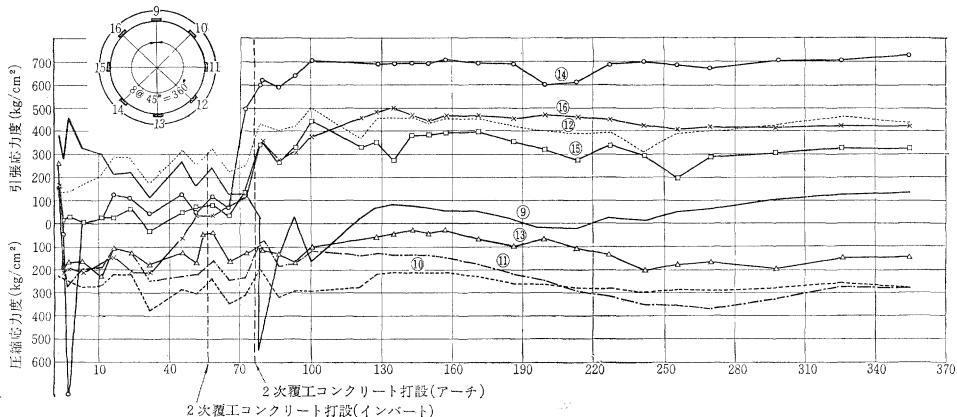


図-8 一次覆工における応力の経時変化



ると考えられるので、施工上の安全性の確認と同時に、設計施工上の参考資料としても利用すべく、一次覆工および二次覆工の応力測定を行なった。

一次覆工の測定に使用した計器は、カールソン型ひずみ計で、セグメントの寸法を考えてリブの上、下弦材に図-2 に示すように配置した。計器の取付けは、セグメントがテール内で組立てられたとき、写真-1 のように取付けを行ない、この状態をひずみ測定の基準として計測した。なお、二次覆工コンクリート打設時には、計器に布を巻いてコンクリートとの一体化を防いだ。

二次覆工におけるひずみの計測位置は図-2 に示されている。コンタクト ストレイン メーター用の標点の設置は、二次覆工コンクリート打設時に鋼板を埋込み、型わく除去後、この鋼板に標点距離 20 cm で鋼球を打込んで設けた。なお、これに平行して二次覆工用コンクリートの性質を調べるため、覆工用コンクリート打設時に、図-11 に示すように鋼板を埋込んだ標準供試体も採取し、二次覆工コンクリートに準じた処置を行なった。これらの標準供試体は、圧縮強度、ヤング率の測定、および無荷重状態におけるひずみの経時変化の測定に用いられた。

### (2) 測定結果とその考察

#### a) 一次覆工

一次覆工における応力の経時変化は、図-8 に示すとおりである。図-8 から一次覆工の応力は、一次覆工ならびに二次覆工の施工直後に急激に変化するが、以後は緩慢に変化するにすぎず、二次覆工施工後約 2 カ月を経て安定状態に達すること、および応力の絶対値は、一、二の例外はあるとはいえ  $700 \text{ kg/cm}^2$  を越えないことがわかる。

図-9 には、二次覆工施工前における一次覆工の内縁応力分布として、下弦材のそれが、セグメント組立後

30日を例として掲げられているが、覆工の頂部と下側部に生じている引張応力は、先に測定された土圧が、またこの部で大きいことに対応している。これは、覆工の土圧と応力が相関関係にあることを表わすから、シールドテールと同様に、これを用いて土圧を逆算することも考えられる。しかし、ここに示した一次覆工の応力

図-9 一次覆工の内縁応力分布

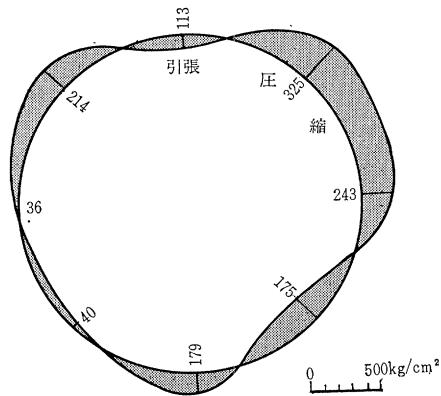


図-10 二次覆工におけるひずみの経時変化

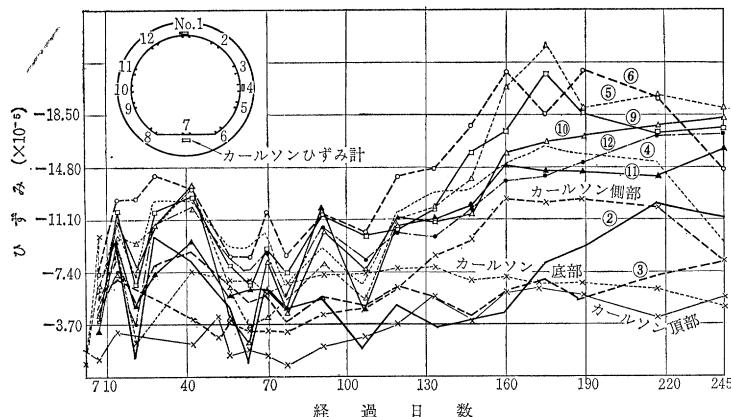
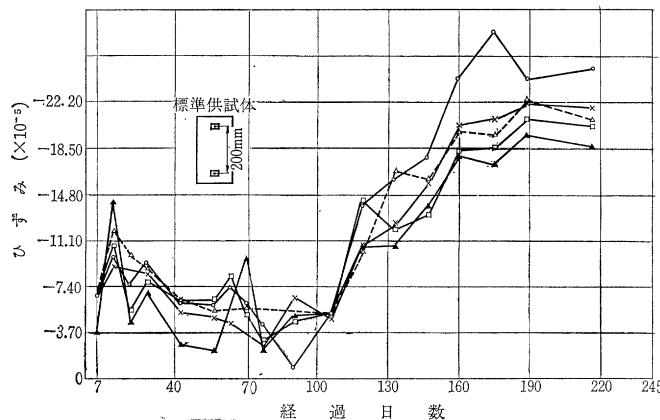


図-11 標準供試体におけるひずみ（無荷重）の経時変化



は、組立時の不整のためにシールドジャッキの反力の影響を受けて土圧による応力を正しく表現しているとは考えがたいように見えるし、またセグメント構造の複雑さから、応力の計算法それ自体にも問題があるので、ここでは応力分布から土圧を逆算することは断念した。

### b) 二次覆工

図-10および図-11は、二次覆工および標準供試体におけるひずみの経時変化である。これら両図を比較してわかるように、ひずみの経時変化の傾向はもとより、測定値それ自体にも大きい差異は認められない。これから二次覆工に発生するひずみは土圧によるものでなく、コンクリートそれ自体の性質にかかる乾燥収縮や、温度変化などに起因するものがその主要な部分を占めるものと判断できるように見える。しかし、図-8からわかるように、インパート部分のコンクリート打設後は、一次覆工におけるひずみがむしろ引張ひずみとして増大し、上の考察に対して逆現象を呈するように見えるが、これは、インパート部分のコンクリート打設による影響であると考えられ、二次覆工完成後は、コンクリートの収縮

に対応するひずみが発生している傾向が認められる。これらの考察から、二次覆工において分担される土圧は、一次覆工の分担量にくらべてかなり小さいものであることは確かであろう。これはまた、シールド工法における覆工のありかたに再考の余地があることを示すものと思われる。

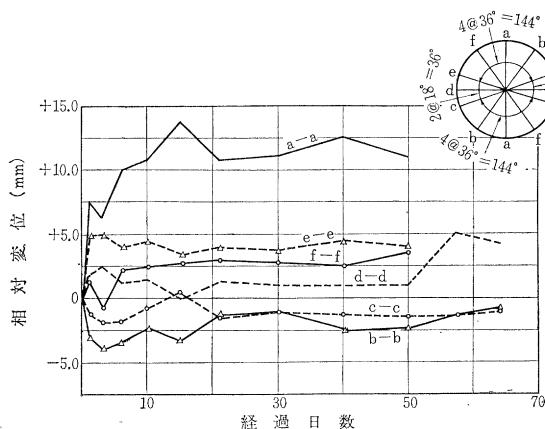
### 5. トンネル覆工の相対変位

トンネル覆工の相対変位は、土圧や応力の測定に比して簡単であり、トンネル施工中でも作業に支障を与えることなく測定できるから、これによってトンネルの挙動が推察できるならば、工事上の利用価値は大きいと思われる。この意味から、単に覆工の変位調査に止まらず、進んで土圧の逆算も試みることとし、ここにトンネル断面の直徑方向における相対変位が実測された。

測定は、図-12に示すごとく、a～a'～f～f'の6方における直径を1mm目盛のスチールテープで、最小読み取り0.5mmまで測って行なわれた。

覆工の相対変位は、一次覆工がシールドテールから出て地山に直接触れ

図-12 一次覆工の相対変位経時変化



るが、いまだ豆砂利による裏込注入が行なわれない時期の測定値を基準とした変位で表わされ、かつ直径の減少を正としている。

図-12 は、一次覆工の相対変位の経時変化であるが、これから変位の大部分が初めの数日間に生じている。これはまた、土圧や応力の測定結果と傾向が一致する。

また二次覆工コンクリートの相対変位の経時変化も測定したが、その値は小さいばかりかすべての断面の縮小を示すから、この変位は、すでに指摘したようにコンクリートの収縮に起因すると判断された。

一方、一次覆工の鉛直直径方向の変位は、約 13 mm であったし、また、別に測定された地表面の沈下も同程度であった。しかし、この結果からただちにこれらの間に直接の関係があることは認められないと思われるが、土かぶりの浅いトンネルにおいては、地表面の沈下がトンネルの変形に無関係ではないだろうと考えられる。したがって、土かぶりの浅い大断面のトンネルでは、覆工の変形に関する配慮が望ましい。

## 6. 結 言

ここ数年来、シールド工法はその特長が再認識されるにつれ、トンネル施工法のすぐれた手段として各方面にさかんに採用されるようになった。しかし、本工法には設計および施工上いまだ改善を要するいくつかの問題点があるため、工事と平行して各種の実測が行なわれ、その成果が期待される段階にある。したがって、本報告もその流れにおけるひとこまであるが、ここにさりながら新しい試みもなされたので、資料を提出して参考に供するとともに関係方面的批判を仰ぐこととした。

ことにコンタクトストレインメーターの採用によってシールドテールの応力測定を比較的簡単に実施する可能性を例証し、かつその資料にもとづきシールドに働く土圧分布状態についても考察を与えることができたことは、本実測における一つの収穫として取り上げることができると思われる。また本実測においては、施工上の安全性と計画および設計における妥当性の裏付けを目指としたほかに、実測資料を用いてトンネル覆工に働く土圧分布の逆算も試みられ、その施工面における応用性の模索もなされた。しかし、結果においては、測定資料それ自体に誤差が混入して、十分なる成果をあげるまでは至らなかったが、トンネル覆工に作用する土圧の概略を推定する方法としては、手段の簡便さと相まって実用の可能性も十分に認められたので、今後この種の方法にさらに検討を加えていきたいと考えている。

終りに、この実測にご協力下さったシールドトンネル施工業者 飛島建設 KK、セグメント製作業者 久保田鉄工 KK、シールド製作業者 三菱重工業 KK、ならびにこの測定および資料の整理に当ってご援助下された関係者各位に厚くお礼申し上げる。

## コンクリート示方書土木学会規準ご希望の方へ

土木学会ではコンクリート標準示方書を制定し関係各位にご利用いただいておりますが、現在の示方書は、昭和 33 年に制定されたため、現状に合わない点が多くなりましたので、明年 3 月を目標に大改訂を行なうべく委員会で作業をすすめております。この間ご不便をおかけすると思いますので関連 JIS 等 60 点を収録した土木学会規準のみを別冊として取りあえず刊行しましたのでご希望の方は土木学会へお申込み下さい。

体裁：B6 判 234 ページ  
内容：コンクリート関係 JIS 等 60 点を収録  
定価：200 円  
送料：70 円