

トンネル

高橋彦治*

1. まえがき

近年、トンネル工事の施工面における進歩は特にいちじるしい。たしかに断面および延長の長大化は日常的になり、鋼アーチ支保工が普及し、その結果重大災害はいちじるしく減少し、また強大な土圧は力で克服されている。掘削、ずり出し、コンクリート等の施工面では機械力を大幅に取り入れて、施工速度は早くなっている。しかし工事量の消化ということとは別に、掘削から覆工までの間に存在するところの本質的な問題についても、果たして合理的な考慮が払われているかということになると、はなはだ悲観的である。トンネルの掘削後、覆工が施工される時期までに支保工のみで土圧を支持している期間を通して、坑道周辺の地山がいかなる変形挙動を示し、その変形を阻止するものにいかなる力を作用せしめているのか、そのような挙動は坑道の維持にいかなる意味をもっているのか、支保工と覆工に働く力の相違はいかなるメカニズムに支配されているか、といった、いわば岩盤力学的要素に対する考慮が全く欠けているように見受けられるのである。いうなればロックボルト工法、コンクリート吹付工法、あるいは各種のトンネルボーリングマシンにおいて、わずかにこの方向への努力が認められるに過ぎない。計測技術の進歩は、トンネル工事に際してある種の測定を可能にしている。個々の現場においては、いろいろ測定が行なわれているようであるが、まだ定着した測定方法をもっているわけではないので、現場的立場において一般性のあるトンネル土圧のイメージを組立てるところまでには行っていない。またトンネルという環境下にある計器の適性、特性等に対して当事者がもっている知識の差、岩盤力学的あるいはトンネル工学的判断を必要とする測定要素の抽出の仕方に差があるなどが、さらに個々ばらばらな印象を与えている。このような現状から脱却して、トンネル工事を本質的な意味合いにおいて合理的であるという方向に向けるためには、少なくとも最小限必要な測定要素を選定し、測定方法を

* 正会員 理博 国鉄鉄道技術研究所

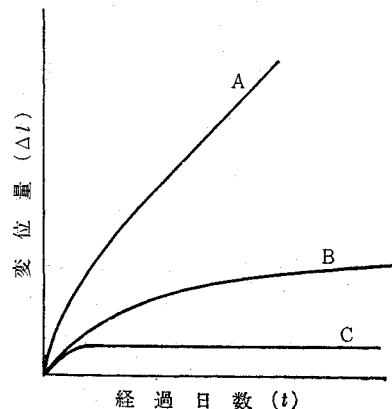
統一することが必要であると考えられている。土木学会の中に「トンネル工学委員会」(委員長・藤井松太郎)という常置委員会があるが、その中の「トンネル土圧調査小委員会」(主査・村山朔郎)は、その主要テーマの一つに測定法の統一をあげている。しかしその案はまだ提起されていない。以下に述べることは、小委員会の見解を代表するものでなく、一個人の私見に属するものであることをお断りしておく。

2. トンネル掘削にともなう坑道周囲の挙動と支柱に作用する荷重

トンネルにおける測定の要素を分類するに先立って、トンネル掘削後に現われる坑道周囲の地山の変形について考えて見たい。掘削前には3軸応力状態の下に見掛上バランスを保っていた地山が、掘削による空洞の出現とともに2軸応力状態となって変形しやすい状態に変わる。変形の方法はいうまでもなく、トンネルの内空へ向う。通常、岩石または岩盤にあってはポアソン比が1/3~1/8の範囲にあるから、弾性論の解で示されるように、掘削直後の円形トンネルの周壁では、天盤には $\sigma_\theta = +0.5 p_0 \sim (-p_0)$ の圧縮力または引張応力が、側壁には $\sigma_\theta = +2.5 \sim (+3 p_0)$ の圧縮応力が作用する。ここに σ_θ は壁面における円周方向の応力、 p_0 は円の中心に作用する平均鉛直応力である。すなわち掘削によって生ずる高い応力は、壁面付近の地山の変位をより助長するはずである。地山の岩盤力学的性質によって異なるであろうが、掘削後のトンネル周壁の地山(素掘面と呼んでおく)は内空側に伸長してくる要素をもっている。

図-1は、素掘面に現われた変位曲線の一例を示したものである。曲線Aは新丹那トンネルの温泉余土や神居トンネルの葉片状蛇紋岩の中で測定されたもので、初期の急上昇曲線に続いて次第にある勾配をもった直線に移

図-1 素掘面の変位曲線のタイプ



行していくように見える。この曲線は一般に指数関数曲線で示される。曲線Bは親不知トンネルの弱破碎帯の変位が水平に近い(きわめて緩勾配)直線に移行しているが、しかしまだ全く水平になったわけではない。すなわち、変形が停止してはいない。曲線Cは地山が完全弾性体であって、掘削直後に現われる高応力よりも地山の強度が大きい場合に示すであろう、弾性変形の解放のみによる変位曲線を示したものである。大部分の地山が完全弾性体ではなくて、いくぶんでも塑性をもつものと考えられるならば、大部分のトンネルに現われる素掘面の変位曲線はA~Bの型で代表されるものと考えられることができる。その形や、変位量などは、岩盤の物理的性質、トンネルの断面の大きさ、形状、深さ等によって異なるものであろう。

素掘面の変位は、地山の崩落または断面の縮小となって現われるから、これを阻止しなければならない。図-2は鋼管柱の弾性変位だけを許した剛性支柱と、松板の可縮性を利用した可縮性支柱に作用する荷重がそれぞれ異なることを示したものである。剛性支柱には建込み後185日で20tの荷重が作用したが、可縮性支柱には終始ほぼ4~5tの荷重が作用したに過ぎない。その間可縮性支柱の変位は34mmに達した。このように支柱に作用する荷重(土圧)は、地山の伸長を許す程度によって異なるという性質をもっている。支保工または覆工は地山の変位を阻止する目的の工作物であるから変位が阻止される結果、これに土圧が作用する。すなわち支保工や覆工に作用する荷重(土圧)と地山の変位との間には強い相関性があることがわかる。したがって、トンネル

土圧の測定は、素掘面の変位特性と、支保工または覆工の剛性または可縮性、覆工背面の間げき等の地山支持方式または現場の実状に関連して行なわれなければならない。

3. 測定要素の分類と測定法

(1) 素掘面の変位

素掘面の変位は、坑内では不動点をとりにくい関係で相対変位が求められることが多い。トンネル断面測定器には台車に搭載して測定尺によって器械中心から壁面までの距離を測るもの、光学的方法として反射光を利用した写真測定によって形状を求めるもの等があるが、素掘面の微量の変化を求めるためには精度が不足である。工事中のトンネルでは標点間をスチールテープで直接測定するとか、これと類似の方法が用いられる。図-3は変位測定用のバーニヤスケールを示す。3×3cmの等辺山形の軽合金を用いたもので、主尺と遊尺(バーニヤスケール)からなり、スケールは普通a尺とb尺に分離できる。a尺とb尺を重ね合わせて、測点間隔に応じて擲動できるようにしたものである。a尺およびb尺は、それぞれ1.5mで、測長の長いときはb尺に継尺cを固定して用いる。a尺およびb尺の先端に45°の角度をもった円錐形の接点を取付け、これを測定点に設けたピンのポンチ孔に押当てて長さを測定する。b尺(1mm読み)のスチールテープが張りつけてある)とa尺(9mmを10等分した目盛のバーニヤスケールになっている)によって1/10mmまで読みとることができる。主尺として山形鋼の代りに軽合金のパイプ類を用いると操作が容易である。

測定用のピンは、表面変位用と内部変位用とは多少機構を異にする。表面変位用ピンは、測定中、脱落しない程度の深さまで打込むだけの長さがあれば、ボルトのようなものでもよい。内部変位用ピンは、表面からの深さが、たとえば30cm、または60cmの位置にピンを固定するために、小円板に3本の足をつけたものが適当である。これを案内用の棒の先端に仮設したまま、あらかじめ所定の深さに掘られた孔に打込んだ後案内棒を抜き取ってセット

測定用と内部変位用とは多少機構を異にする。表面変位用ピンは、測定中、脱落しない程度の深さまで打込むだけの長さがあれば、ボルトのようなものでもよい。内部変位用ピンは、表面からの深さが、たとえば30cm、または60cmの位置にピンを固定するために、小円板に3本の足をつけたものが適当である。これを案内用の棒の先端に仮設したまま、あらかじめ所定の深さに掘られた孔に打込んだ後案内棒を抜き取ってセット

図-2 支柱に作用する荷重
(新丹那トンネル試験坑, 高橋・飯塚・高木)

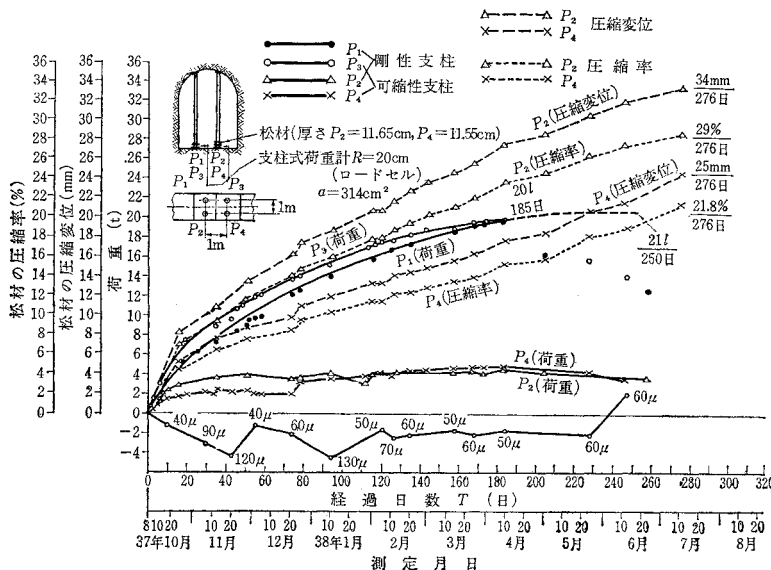
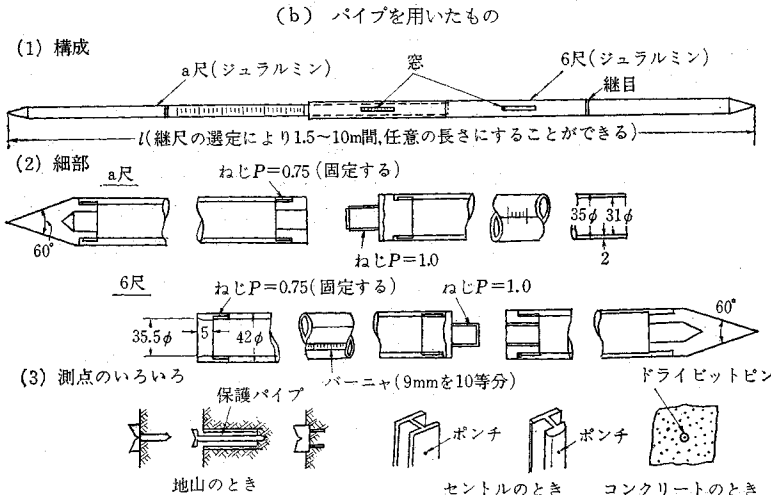
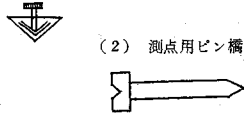
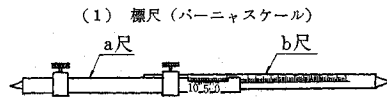


図-3 バーニヤスケール
(a) 等辺山形鋼を用いたもの



から、導坑のときにできるだけ多くの地点で測定することが望ましい。これは設計施工に役立つはずである。

(2) 地山の支持力

(省略)

(3) 地表変位

地表変位は、地すべり用の表面変位計や傾斜計のようなものを用いて測定することもできる。またトンネル周辺の岩盤のゆるみを知る目的で、掘削直後の坑内で直接波による弾性波速度や岩盤の反撓係数(シュミットハンマーテスト)を測定し、その経日変化から素掘面の変位や土圧との関連を調べる方法も試みられている。

(4) 試料の物理的性質

(省略)

(5) 支保工

a) 支保工応力

支保工に H 鋼を用いた場合の支保工応力の測定は、たとえばつぎのように行なう。H 鋼を支保工として用いる場合には、両フランジをトンネルの掘削面に平行に、ウェブをトンネルの横断面に一致させるのが普通であ

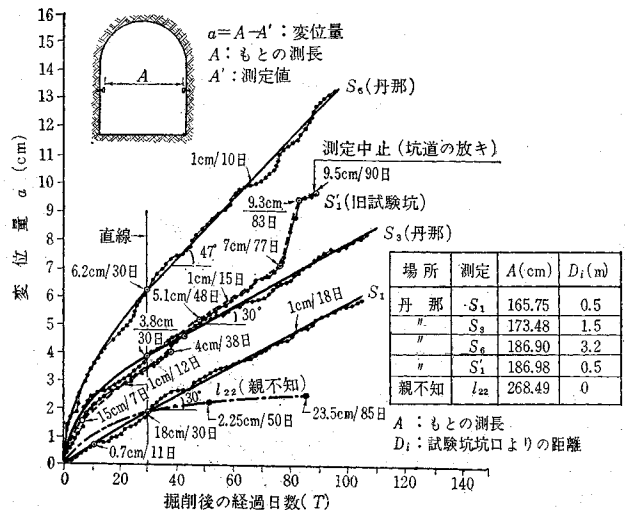
る。必要があれば孔壁保護用パイプを挿入して置く。このとき、パイプの先端とピンの間には数 cm の余裕をとっておく必要がある。

変位量 ($4l$) の計算は式 (1) による。

$$4l = l - l' \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 l はもとの測長、 l' はそのつどの測長である。 $4l$ は、トンネルの相対する素掘面間の長さの相対変位量である。側壁の表面に相当と思われる 1 点 (または数点) をとり表面変位用の測点とし、表面からある深さにある 3 点の変位、すなわち内部変位用の測点を設ける等、地質や施工方式に応じたような測点配置を考えなければならない。これらは水平変位として示されるが、天盤と底盤との間の垂直変位をとることもできる。図-4 は新丹那トンネル温泉余土区間の測定結果である¹⁾。よほどの堅岩の場合は別であるが、変質帯や、破碎帯、軟岩の場合は、目視では認識されないような変位が長時間にわたって現われるケースが多いと考えられる。前述のように、このような変位が覆工コンクリートの施工によって阻止される結果、覆工に土圧が作用することになる。特に地質が悪いというところでなくとも、きわめて小さいが、素掘面の変位は生じていると思われる

図-4 素掘面変位の実測例
(丹那および親不知トンネル, 高橋・飯塚・高木)



る。この場合は4片のゲージを両フランジ内側にX軸方向に取付けて、その点における応力を測定する(図-5)。この場合、できれば温度補償がとれるようにしておく方がよい。カールソン型ひずみ計のようなものには、温度補償機構が内蔵されている。図-5においては1と2のゲージまたは3と4のゲージの読みから軸力とY軸方向の曲げモーメント、1と3のゲージまたは2と4のゲージの読みから縁応力の平均値とX軸方向の曲げモーメントを求めることができる。

図-5 ゲージの取付位置

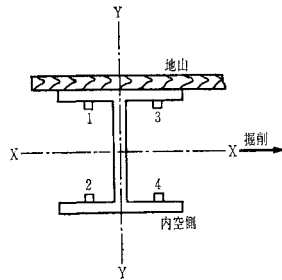
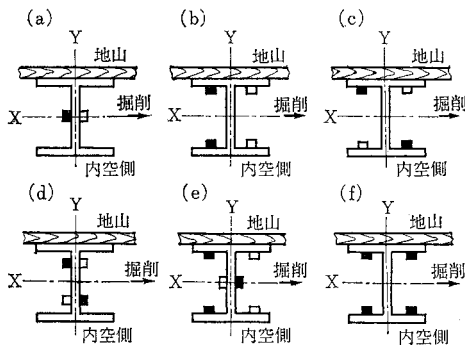


図-6 ゲージの取付位置のいろいろ

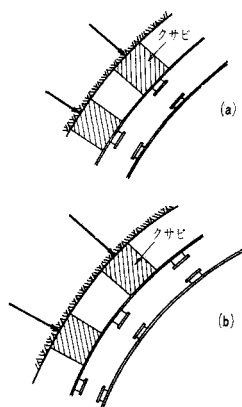


注 (a)~(e)については口の組合せもある
ゲージ: ■または□

現場の実情は、計器の数量が多くなることを嫌う傾向がある。そのためにいろいろと取付位置が考えられているが(図-6)、決定的なものはない。また縫い地のときは手前外側および前方内側のフランジは、矢板の打込みの際に損傷を受けてねじれを生じることが多い。直視ひずみ計(図-13)のようなものを用いるときは、見やすい位置に置く等の制限がある。

ゲージは、くさび位置に取付ける場合と、くさびとくさびの中間の位置に取付ける場合が考えられる(図-7)。荷重の方向が中心に向い支保工の軸力の変化が少ないと考えられる場合には、くさびのある位置に選

図-7 くさびとゲージとの関係



んでも不都合は少ないであろう。しかし、くさびの下でH鋼がたわむとか、くさびと支保工との間にある摩擦が無視できない場合には解析が困難になるなどのことがある。これを避けるため、ゲージはできるだけくさびとくさびとの中間の位置に取付けるのがよいと考えられる。いずれの場合でも、基礎反力を測定するか、軸力が確実に求まるような計器の配置を考えて、軸力をチェックすることが必要である。

b) 支保工の基礎反力(脚部の軸力)

鋼アーチ支保工は基礎地盤の支持力が不足すると、前述のように多くの場合沈下を起こし、その結果、くさびの締付力または荷重の受け方が変化して、いわゆる偏圧状荷重を受けることになり、支保工の耐荷力を低下させる。支保工の沈下は地山にゆるみを与え、これはさらに強大な地圧を招いて悪循環の原因となる。支保工脚部の軸力(反力)を直接測定することができれば、計測の経過によって荷重増加の傾向を把握し、基礎地盤の強度が不足する場合には補強を行なう等、支保工の強度を十分に活用する方策を実施することができる。また覆工コンクリート施工後も継続して測定すれば、支保工と覆工との荷重分担の状況を明らかにすることができよう。

反力の測定には、ロードセル(盤圧計)を用いる。ロードセルはその測定軸が

図-8 軸線とロードセル

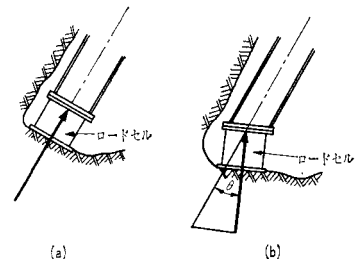
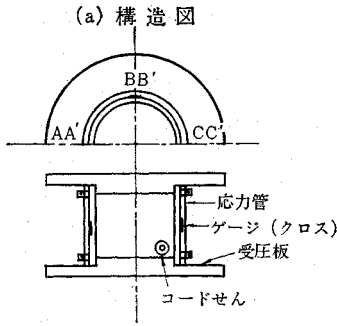


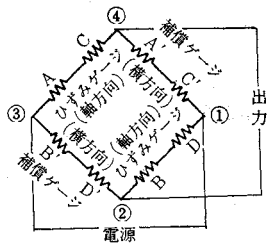
図-8 (a)のように鋼アーチ支保工の軸線の方に一致するようにセットされるのが望ましい。図-8 (b)のように支保工のフットプレート面をアーチ軸に直交させることができない場合には、基礎反力

は軸力の θ 方向の分力を示すことになる。ロードセルは鉾山方面では広く用いられているが、土木方面で用いられるようになったのは最近のことである。ロードセルには斜柱式擺動抵抗可変型、差動トランス型、カールソン型、油圧型、試験片型、ストレインゲージ型等種類が多い。精度およびセット時の安定性等の点を考慮して国鉄ではストレインゲージ型のロードセル(一名支柱式ロードセル)を用いている。この型のもは測定機構が簡単であり、荷重に対する変位を小さく制限することができる。支柱式ロードセルは、多片ゲージでブリッジ回路を構成することによって偏心偏圧に対する誤差を取除くとともに、自動的に温度補償されるようにしてある。これを鋼パイプに内封し、球座を用いない機構としてセット時の安定性を互り耐久性が十分考慮されている。その構

図-9 支柱式ロードセル



(b)ブリッジ回路



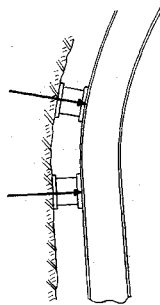
造の概略を図-9 に示す。

ロードセルの使用に際しては、支保工基礎の沈下量を同時に測定することが望ましい。

c) くさび点に作用する荷重 (各点荷重)

くさびを通して支保工に荷重を作用せしめる場合、くさびに代えてロードセルを図-10 のように挿入すれば、鋼アーチ支保工に作用する半径方向の荷重分布を求めることができる。これは支保工応力の解析に際して、アーチに作用する外力、基礎反力とともに支保工応力との関連を明らかにするのに役立つ。測定の要領は前項、基礎反力の場合と同様である。

図-10 くさび点におけるロードセル



d) 鋼アーチ支保工の変形、変位

この測定は素掘面の変位を測定する場合と全く同様の要領でよい。

(6) 覆工

a) 覆工応力

覆工応力の測定に際しては、軸力および曲げモーメントを計算できるように計器を配置しなければならないことは、支保工応力を求める場合と同様である。たとえば図-11 のように、覆工コンクリートの内外側の相対する位置にアーチ軸に平行に、かつ同一横断面内にあるように計器を固定する。固定の方法はいろいろあるが、普

通計器を鉄筋またはアンクルを腕木としてH鋼(支保工)に溶接し、この腕木に計器を糸または鉄線で緊定する。コンクリートの応力測定には一般にひずみ計が用いられる。したがって、測定ひずみから応力を換算する必要がある。

図-11 覆工応力測定におけるひずみ計の位置

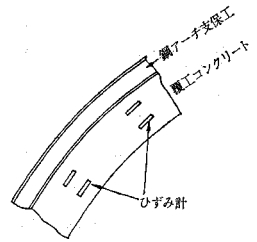


図-12 覆工コンクリート応力測定の実測例 (和南津トンネル, 長友・今田)

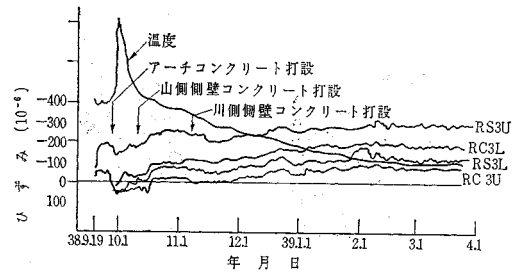


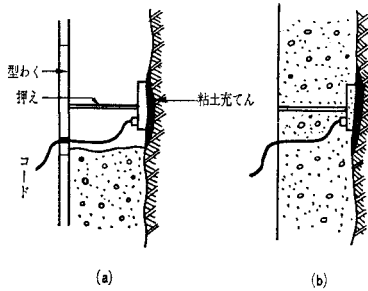
図-12 に覆工コンクリートにおける応力測定(ひずみ)の結果を示す²⁾。コンクリート硬化中は、未固結コンクリートの中の温度による影響や、その間にも作用したであろう外力等の影響が、コンクリートの自己成長、クリープ等と競合して現われるので、全く複雑な動きを示していることがわかる。同時に測定された温度の経日曲線は減衰曲線でもってある温度に移行している。この温度曲線がかなり安定した値を示す頃、たとえばコンクリートの施工後 15~30 日に原点をとって、その後の応力変化を見ると、覆工内に発生している応力が外力の性質または傾向を示していることが読みとられる。しかしこのようなデータ処理の要領によるときは、コンクリート硬化後の応力変化がわかっても、硬化中に作用したであろう外力による応力についてはわからない。この期間は伸長変位しつつある地山に対して、コンクリートによる最初の拘束力が加えられるときであり、重要な期間であると考えられる。他方ではコンクリートは、この間に外力を受けて一種の成形効果による可縮性の反応を示しているはずである。この間の事情を明らかにする方法は、今のところ全くないといってよい。問題は、ダムのような場合についても全く同様であると考えられる。

b) 覆工背面の土圧

覆工背面に作用する土圧を直接求めるには、境界型の土圧計を用いる。土圧計は種類が多く、ロードセルの場合と同様の原理にもとづいていると見なしてよい。覆工周辺の地山が一般的な粘土のような物質からなる場合には、覆工背面の土圧を受圧器に一樣に作用せしめることが可能であるから、土圧を比較的忠実に測定することが

できる。しかし、実際には一様な粘土からなる場合はまれであって、岩盤であるとか、岩石片を混じているのが普通である。このような場合には、受圧器には局部的な集中荷重が作用し、受圧器の機構上、実際の荷重分布を反映しないことになる。少しでも、受圧機構にあったように土圧を受けさせるために、受圧器と地山との間に硬い粘土を充填して（図-13）、この種欠陥を補う必要があるが、このようなことをしても、拱頂裏に空げき等を残している場合は、測定土圧は単に局部的な意味しか持つことができない。

図-13 土圧計のセット状況



c) 無応力計⁴⁾

トンネルにおける測定は、一般に悪い環境のもとにおける長期測定である場合が多く、このような場合、長期間にわたって被測定体や計器の測定機構等を同じ条件に保つことがむずかしい。測定用計器と同一の計器を、力が作用しないようにして被測定体の中に設置されたものを無応力計と呼び、これを測定条件の変動を知る手掛りとして用いる。ワイヤーストレインゲージを用いる計器の長期測定に際しては、零点がいつの間にか移動するという大きな欠陥が残されている。零点の移動は、測定用計器にも同じように現われると考えられるので、測定に際しては無応力計を併設する必要があると思われる。

d) 変状トンネル

変状トンネルは、覆工にきれつが入るとか、線路の軌道狂いが異常である等の現象によって認識されるものであって、程度が進んだものにあっては、覆工材のはく離や、車両限界等の支障、崩壊にまで発展する。変状トンネルについては、変状発見後の処置は、その進行性を確認することが大事である。変状トンネル対策における調査測定法については他の機会に譲るが、きれつの進行性を調べるために用いられるモルタルパットについて一言触れておきたいことがある。

モルタルパットというのは、きれつをまたいでコンクリートの表面に貼付けられたモルタルの団子である。その付着をよくし、コンクリートと一体となった動きを示すように種々の注意が払われている。一通り周到な注意が払われたにもかかわらず、モルタルがコンクリートか

ら遊離してしまっているのを見受ける。遊離したモルタルパットは、コンクリートの動きを示さないのは当然であるが、これをよくよく考えると、コンクリートがきれつを通して動いた結果として遊離したのだと考えるのが妥当である。引張りに対しては、モルタルパットは十分に要請に応じられるが、圧縮に対しては、モルタルの付着力の方がはるかに小さいはずであるから、モルタルパットは圧縮きれつを生ずることなく片側がはく離してしまうと考えられるからである。圧縮に対してもきれつが入るようにするためには、付着面積を大きく、収縮きれつが入らない範囲で厚さをできるだけ薄くしたモルタルパットにしなければならないと思う。とにかく新しいモルタルパットがはく離していれば、トンネルの変状は進行性であると判断する必要があるということである。

4. 簡易測定器の紹介

ひずみ測定において、抵抗線ひずみ計を用いる方式のいわば電気的方法は、もっともオーソドックスなものであるが、これについては従来沢山の解説が行なわれている。ここにはトンネル土圧調査委員会で紹介された簡易測定器について、その概要を紹介しておくことにする。

(1) パーニヤスケール

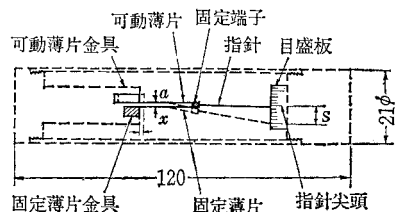
3.(1)において説明したとおりであるので、省略する。

(2) 直視ひずみ計（図-14）

鋼鉄製の固定薄片と可動薄片とは、間げき a をもって一端を固定端子で継ぎ合わされている平行薄片である。固定薄片金具を固定して、可動薄片金具を長さの方向に x だけ変化させると、2枚の薄片が点線のようにたわむ。固定端子には指針が取付けられており、指針尖頭は目盛板の目盛に沿って S だけ動く、目盛は基線長 l が120 mmの場合は 50μ 、200 mmの場合は 10μ であるから、その半分を読むとすれば、 25μ または 5μ の態度をもっている。これを取付け金具をもって被測定体にセットする。

直視ひずみ計はコンクリート用として開発されたが、

図-14 直視ひずみ計



鋼アーチ支保工の場合に用いられる。この場合にもゲージと被測定体との線膨張係数の違い等の理由によって、無応力計の併用が望ましい。精度は電氣的なものとはほぼ同等であるが、目視計器のため取付位置に制限がある。カールソン型ひずみ計と併用したところでは、十分実用に供し得るものである(図-15)。

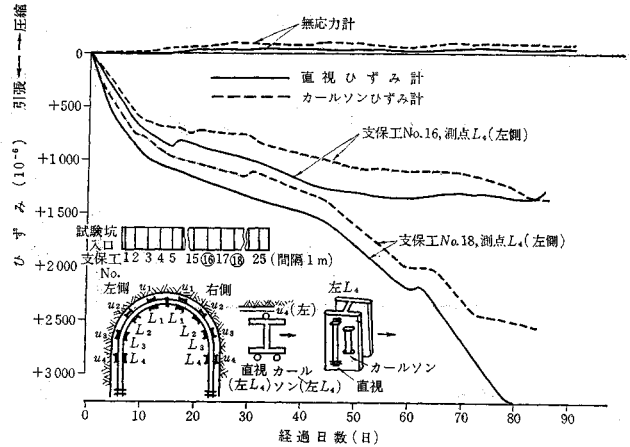
(3) その他の計器

直視ひずみ計の外簡易型のひずみ測定計器としては、押し当て式ひずみ計(直読式ひずみ計)の押し当て方式を改良した形式のコンタクトストレインゲージ(ドイツ製)、光弾性効果によるOppel式の一軸ゲージ、およびストレートコンパス、応力塗料等があるが、実用的な精度、耐久性等の点でまだ問題があるようである。

参考文献

- 1) 高橋彦治・飯塚 全ほか:新丹那トンネルにおける温泉余土の膨脹と岩石荷重

図-15 直視ひずみ計とカールソン型ひずみ計の測定値の比較例
(神居トンネル試験坑)



- 2) 小川哲夫・長友成樹ほか:和南津トンネルにおける鋼製支保工の歪測定について, 第8回道路会議, 1965
- 3) 君島博次:無応力計について, トンネル小委員会講演
- 4) 高橋彦治・飯塚 全:長期測定における無応力計の必要性, 土木学会誌, 1966-5

■建設機械施工技術検定受験者・土木関係技術者におくる■

建設機械と施工法

日本建設機械化協会編 編集委員長 工学博士 伊丹康夫

B5判 360頁 定価 1,800円

建設工事が大型化され、スピード化され、またその品質の確保や仕上りの経済性を要求され、その設計や施工にたづさわる現場技術者の責任は重くなり、現場で遭遇するいろいろな問題点に対して絶えず研究や努力が必要となります。本書は土木・建築の現場管理者として、初級技術者、建設機械施工技術検定試験の受験者に最適の書である。殊に多数の図版と図表土木・建築の用語集は読む人の理解を容易にするものである。

■主要目次 ■建設機械と施工法 機械化施工の基礎知識 機械化施工の運営管理 建設機械概論 施工法 付録

ボーリング用泥水

理学博士 沖野文吉 著

A5判・298頁 定価 1,200円 特価 1,000円 特価締切41年12月末

■主要目次 ■泥水概念とその歴史 泥水比重の諸問題 粘性、イールドバリュウ、ゲルストレングス 泥壁形成性 ソリッドコンテンツ 泥水試験法 崩壊および崩壊防止 抑留および抑留対策 逸泥防止対策 分散解こう剤 ベントナイト泥水 エマルジョン泥水 クロム泥水 塩水泥水 カルシウム系泥水 オイルベースマッド 鉱山探鉱ボーリング用泥水 付録 油井用セメント等々

技報堂新刊案内

東京都港区西久保桜川町七 電(591)二二七七