

## トンネルの支保工と覆工に関する研究

ON THE FUNCTIONS OF TUNNELING'S STEEL SUPPORT  
AND CONCRETE LINING

山本 元\*・高木 薫\*\*

By Hajime Yamamoto and Kaoru Takagi

**要 旨** 従来わが国のトンネル工事においては、支保工は外力を一時的にささえる仮設構造物とし、コンクリート覆工こそが主要な外力を永久的にささえる本構造物であるとし、現在でも一般にはこのような考え方が通用している。ところが近年になって鋼支保工が普及発達しコンクリート覆工の中に埋め込まれるのがトンネル工事の常態となってきた。このようなトンネル工事の実態から見れば、鋼支保工こそが、主要な外力を一時的にも永久的にもささえていく重要な本構造物となっており、コンクリート覆工は、大きい地山の外圧などを直接ささえるものではなく、主として内張りや保護補強の役割りをうけもつ補助的な構造物に転化したと見るのが論旨である。この論文の前半では、上述の趣旨を、トンネル工事の歴史的発展から導きだし、現在のトンネル施工の実態を詳細に考察してこのように考えなければならぬことを理論的に主張した。

つぎに論文の後半では、鋼支保工とコンクリート覆工とが掘削と相互に関連してどのような働きをしているかを、実際のトンネル施工現場（栗子国道中野第1トンネル工事）において、工事中はもちろんのこと完成後も長期にわたって、総合的な観察と考察、変位測量、ひずみ測定などの現場実験実測調査によっ追跡解析して、このような新しい考え方が、この一つの実例では基本的に正しいことを証明した。

最後に現在一般に行なわれているトンネルの設計施工の欠陥と不利を指摘し、上述の新しい考え方に立つことが合理的であり災害事故も少なくし安全有利であることを証明した。ここに述べた実測はある一実例についてであるから、今後いろいろな場合の実測調査を数多く集積して研究を深めていくなれば、トンネル工事の実態と原則にますます正確に近づいていけるであろう。

## 1. はしがき

トンネル構造物を正しく設計し、施工するには、トンネルがどのようにして掘られ、トンネルにかかる外力（土圧）がどのようにして発生し、どのように変化していくものか、またどのくらいの大きさのものであるかを知らなければならない。特にトンネルが破壊するときの

状態を究めることは、トンネルの荷重と構造物との直接の関係を知る上にも大事な手がかりである。

さらに現在のトンネルの技術水準が、建設力の発達にもなつてどのような変せん発達を示して今日に至ったか、その歴史的発展の跡とトンネルに関する考え方の変化の跡をたどって見ることも重要である。

トンネルについて弾性力学的にもっとも理論的実験的に研究した最初のものとしては、故山口昇教授の「On the stresses around a horizontal circular hole in gravitating elastic solid」<sup>1)</sup>がある。この論文は、重力弾性体の中の水平円形孔のまわりの応力について、弾性力学的に解明し、さらに寒天による模型実験により大体の傾向を示したものである。その後これに刺戟されていくつも重力応力の論文が表われたが、それらの先駆をなして、重力応力の領域では世界的に著名なものであり、いまもなお、トンネル周辺の土圧と応力分布の基本的な解明<sup>2)</sup>をすすめる上で、もっとも原則的な見とおしを与えている。

ただし、この論文を実際の設計に直接役立てることはできない。それは、この論文の仮定となっている岩目のない重力弾性体とか、水平無限の頂面とか、比較的深い土かぶりなどの条件が、実在の地山やトンネルの性質と相当かけはなれているからである。

いまもっとも広く一般に実用されているのは、「Rock tunneling with steel supports」<sup>3)</sup> (Proctor & white, 1946) に紹介されている設計方法である。これには土岩の分類や荷重の取り方などについて Karl Terzaghi が提案した経験式や表をふくんでいる。これらは全く理論的とはいえないが、その当時までのいろいろな提案や実用式などをうまくまとめて、比較的実際に近い状態を反映しているように思われる。そのために鋼支保工が普及した今日でも実用的な価値を失わない古典となっている。なお、わが国におけるトンネル技術の公認された見解を示すものとしては、土木学会編の「トンネルと掘削工法」<sup>4)</sup> (1959)、「第1回トンネル工学シンポジウム」<sup>5)</sup> (1962) および日本道路協会「トンネル工事における鋼製支保工の利用について」<sup>6)</sup> (第7回日本道路会議, 1963) などがある。

いずれにしてもこれらを通観するに、トンネル構造物に対する従来および現在のわが国にもっとも広く通って

\* 正会員 建設省東北地建福島工事事務所長

\*\* 正会員 日本建設技術社常務取締役

いる通常一般の定見としては、

「トンネル工事における支保工は、トンネル掘削後覆工をほどこす前に、地山の崩落を防ぎ、一時的に地山の外圧をささえる仮設構造物である。コンクリート覆工は地山の全外力を最終的に、また永久的に支えていく主要な永久構造物である<sup>3)</sup>」。

としている。このような基本的な考え方にもとづいて、設計および施工が行なわれているのが現在の実情である。

ところが、近年建設力が急激に発達し、特に支保工に強力な鋼材が使用されコンクリート覆工の中に埋め込まれることが常態となってきた最近のトンネル工事に対しては、これらの考え方がなんらの変更や補正もなく適用されてよいものかどうか疑問を持つ技術者も現われてきた。トンネルの長大化、施工の高速化、鋼支保工の導入、コンクリート覆工の機械化施工など、今日の施工法と構築材料の急激な進歩発達に見合った新しい考え方が求められるようになってきた。近来、土木学会の学会誌や論文集や講習会などに、またその他の技術雑誌などに、この方向に沿った進歩的な提案や研究<sup>5),9),14),15)</sup>(熊谷組 加納俊二、国鉄 工博 坂本貞雄、東大 工博 岡本舜三氏ほか等)が見られるようになってきた。

われわれはこの数年来、主としてトンネル工法の発達の研究から入って、いくつかの代表的なトンネル工事の工事報告と諸文献を調査検討し、各地で施工進行中のトンネル工事現場を見学調査し、その結果、トンネルの支保工と覆工の機能に関して、後に述べるような新しい考え方を持つようになった。そして当時計画中であった国道 13 号線の中野第 2 トンネルと高平トンネルの支保工覆工の設計に際して、この新しい考え方を試みに一部適用してみた。

つぎに実際のトンネルがわれわれの考えているようになっているかどうかを、トンネル構築の始めから完成まで観察測定してその正否を吟味するため、これから着工する中野第 1 トンネルにて現場実測調査を行なった。すなわち、掘削の初め 37 年 9 月 22 日より覆工完成の 38 年 2 月 1 日までおよび完成後の 38 年 12 月 24 日まで長期にわたって、掘削の進行、鋼支保工の立込み、コンクリート覆工の打込みなどの相互の関連とそれぞれの実態とを観察し、変状調査、変位測量、ひずみ測定などの結果を解析し総合判断することによって、つぎのような新しい考え方に確信をもつに至った。

ただし、この考え方は、トンネル掘削の後に最終的に鋼支保工を使用して内空を保持し、これをとりはずすことなくコンクリート覆工の中に埋め込んでしまうような最近の普通のトンネルについて適用する<sup>12),13)</sup>ものである。無支保または木製支保などの場合にはもちろん関係しないものである。

「鋼アーチ支保工は、トンネル掘削後、地山の崩落を防ぎ外圧をささえて、一時トンネルを保持する仮設物としての働きをするばかりでなく、コンクリート覆工を完成した後も長期にわたって、すべての外力をひきついで恒久的にささえていく主要構造物である。

コンクリート覆工は、地山の大きい外圧をささえる主要な構造物ではなく、主としてトンネルの内張りとなり、落石ろう水を防ぎ、岩盤および鋼支保工の保護補強と風化防止などの役割りをうけもつ補助的構造物となった<sup>12),13)</sup>。」

以上のような新しい考え方が、トンネルの発達史からも、トンネル工事の実際からも、また現場実測調査の結果からも基本的に正しいことが証明されたのである。

## 2. 鋼支保工とコンクリート覆工の働きについて<sup>12),13)</sup>

最近のトンネル施工は高速化と機械化が極度に要求されて、大断面トンネルでも全断面掘削または上部半断面掘削の場合が多く、また軟弱地質のため先進導坑式またはリング工法などをよぎなくされる場合でも、結局しまいは大きい空間を何らかの方法で一応保持しなければならなくなってきた。このような事情から強力な支保工

写真-1 底設導坑より上部半断面切抜けに進み、アーチ鋼支保工を順次立込む局面を示したもの



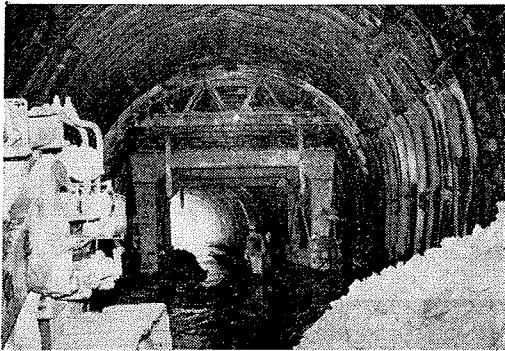
写真-2 アーチ鋼支保工を立込んだ後、隣接した正面切端の発破をかけた直後の状態を点検している所、手前にずりがおしだされ、支保工の上にも荷がかかっている



写真—3 上部半断面のアーチ鋼支保工を完了し、脚部の土手が残っている状況を示す、奥の方は鋼支保工が全部完了している所を示している



写真—4 鋼支保工にていったん全断面を保持し、コンクリートフォームにてつぎつぎにコンクリートを打ち込んで手前に行進する状況を示している



が望まれるようになったが、V型鋼やH型鋼はまさにこの要求にこたえたものであり、鋼支保工の出現によってトンネル工法の様相は大きく変化したのである。鋼支保工は始めは木製支保工に代るものとして使用されたが、最近ではコンクリート覆工施工の前にとりはずすことができなくてむしろそのまま覆工の中に埋め込んでおさしかねない支保工として使用されることが多くなってきた。このように支保工に鋼支保を用い、これを埋め込んでコンクリート覆工を打ち込むような普通一般の場合について、両者の働きがどのようになっているかを考えて見よう(写真—1, 2, 3, 4 参照)。

従来トンネル工事において、支保工はトンネル掘削後に覆工を施すまで地山の崩落を防ぎ地山の外圧を一時的にささえる仮設物とみなされ、地山の外圧を永久的にまた最終的にささえてゆくのは永久構造物であるコンクリート覆工であるとしていた。長い間このような考え方にもとづいて設計および施工が行なわれてきた。トンネル断面も小さく施工速度も早くなく機械化もされていない時代では、支保工には主として丸太などの木製支保が使用されて施工中の土圧を一時ささえ、覆工にとりかかる際には腐朽する木製支保はできるだけとりはずすことを原則とし、どうしてもとりはずすことができない場合だ

けなるべく短く切ってコンクリート覆工の中に埋め込むこともやむを得ないこととして認めたのであった。したがって支保工は一時的な仮設物であり、コンクリート覆工が永久的な本構造物である<sup>9)</sup>とするのも、支保工に木材を使用している限りでは正しい考え方であったといえる。

ところがわが国にも数年前よりV型鋼やH型鋼の鋼支保がトンネル支保工に導入され従来の木支保にとってかわり、トンネル施工に大きな変革をもたらした。鋼支保も現われた始めは木支保にくらべてはるかに値段が高いので回収して数回使用しなければ経済的にひきあわないという中途半端な考え方があって、せっかくの強力で便利で腐らないという鋼の長所が十分に活かされないで普及を妨げていた。実際の状況は、始めは土圧が大きいため木支保では使用に耐えない箇所鋼支保工を使用したもので、これをとりはずして何回も使用するということはほとんどなかった。実際にも地山の荷重がかかっている支保工をとりはずすことは非常に危険がともなうことでほとんど不可能であり、そのままコンクリート覆工の中に埋め込んでしまうことが多くなってきた。最近の道路、鉄道などの大断面トンネルでは、覆工にとりかかる直前の形はちょうど肋骨のように鋼支保工が平行して立て込んでいるのが最も通常の形となってきている。このように施工の実際は非常に変わってきているにもかかわらず、やはり木支保工のときの考え方がそのまま受けつがれてきている。このような場合にも鋼支保工は本構造物であるコンクリート覆工が完成するまでの一時的なささえとなる仮構造物であり、鋼支保工は耐腐食および剛性の点でコンクリートに劣ると考えられ、鋼支保工は本構造物とは認められないとするのが、従来および現在でも普通一般に持たれている常識である。

従来の考え方からは、地山の軟弱な所や土圧の大きくかかってくる所では、コンクリートの巻厚を厚くして対抗し、地山の良い所では巻厚を薄くするのが現在一般に認められている設計法である。土圧の程度はあらかじめ地質調査ボーリングなどにより推定し、つぎに導坑掘削により直接地山の状況を見て、さらに最終的には支保工に対する荷のかかりぐあいを観察し、従来の例を参照してコンクリート覆工の巻厚をきめるというのが通常の手順であった。そのため大断面トンネルでは、コンクリート覆工の巻厚は薄い場合でも40~50cm、普通60~70cm程度、厚いものでは80~100cmとなり、はなはだしい場合は120cmまたは二重巻きなどの特殊な実例も見られた<sup>9), 6), 7), 8), 9)</sup>。

従来の設計法では、鋼支保工の有無にかかわらず、また埋め込む場合も取りはずす場合も、同じ巻厚のコンクリート覆工が必要であることになっている。これはいかにも不合理である。鋼支保工を埋め込む場合には、コン

クリートの巻厚を節減してもよいのではないか、という考えが始め一部の人々から出てきて今は一般にもひろまってきた。しかし、どれだけ節減してよいのか、どのように計算に入れるべきかについてはまだ定説がない。鉄道などの実例では、鋼支保工を埋め込む場合には、コンクリートの巻厚を1~2割を節減しているが、確かな根拠はないようである。このような推移から、数年前に鋼支保工にもいくらか恒久的な荷重の負担をさせてもよいのではないかという考え方<sup>13)</sup>の芽が出てきたのであった。第7回日本道路会議(1963. 10. 5)の特定課題「トンネル工事における鋼製支保工の利用について」の結論の一つとして「鋼製支保工はコンクリート覆工打設後も荷重を分担支持するものと考えられるので、そのことを考慮してコンクリート覆工の設計について検討する必要がある<sup>15)</sup>」と述べられた。これは支保工と覆工の機能の認識についてある程度の前進を示したものといえよう。

ここでコンクリート覆工そのものについて改めて考えて見よう。鋼支保工が外圧をささえた状態のままこれを覆工の中に埋め込むようにコンクリートを打ち込めば、そのときはコンクリート覆工にはなんら外圧はかからないはずで、覆工にかかるものは主としてその自重と温度伸縮に対するまわりからの拘束状態による影響などを見てよいであろう。その後に地山から加わってくる外力がなんらか、たとえば地震などで生じた場合には、始めて鋼支保工とコンクリート覆工とが一体の構造物となって荷重をうけ、この追加荷重に対して両者が適当な比率をもって分担支持するものと考えてよかろう。

コンクリート覆工の通常行なわれている機械施工の場合を考えて見ると、コンクリートを打ち込んでから型わくをとりはずすまで15~16時間ぐらいで、このときのコンクリートの圧縮強度は4~6 kg/cm<sup>2</sup>程度<sup>9)</sup>、引張強度はほとんど0と考えられるので、設計の際に仮定するような地山の外圧が外力としてかかっているとすれば、コンクリート覆工はとうてい形を保つこともできないはずである。多くの場合、打ちたてのコンクリート覆工がこわれないうちに形を保っているという事実は、実際には設計のような荷重はコンクリート覆工にかかっていないことを如実に示しているのではないか。

土圧がどんどん加わってきて支保工がまだ落ち着かないような場合に、今までどこ現場でもよくやったことだが、本構造物としているコンクリート覆工を早く打上げて安心したいという考えから、あわててコンクリートを打つことがしばしば見られたが、この試みは成功しないことが多い。そのような希望を持ってコンクリートを打ち込み型わくを取りはずしたときに、コンクリート覆工にクラックを生じていたり、パッチ状にはげ落ちたり、数日後にその他の変状を来たしたなどの実例は少なくない。これをしのぐため、コンクリート覆工の一次巻

とか二次巻とか、あげごしにより覆工厚を厚くするとか、鋼支保工の増補を余儀なくされたというような実例はたくさんあるが、こんな工法が果たして適当であるか研究の要があろう。地山が動いていたり、鋼支保工が沈下変形などの変状を示している間は、あわててコンクリート覆工を打ち込んでもあまり効果がないのは当然である。たまには結果的に覆工がうまくできたと見える場合でも、コンクリート打込みの直前には鋼支保工が一応安定した状態になり山もおちついていたと考えるのが自然である。地山が動いているのにコンクリート覆工によって安定させたと考えることは無理である。トンネル地山の外圧が設計計算のように高さ一定の等布荷重として働いてくることはほとんどなく、大部分の場合は偏荷重や集中荷重となって作用してくると考えるのが妥当でなかるか。その場合、硬化の十分でないコンクリート覆工がアーチとして地山の大きい外圧に耐えることは實際上に不可能なことである(日振トンネル、北陸トンネル、新宇津谷トンネル、天王山・梶原トンネル、新幹線各トンネル)。このようにコンクリート覆工にはほとんど外からの荷重はかかっていないし、またかけられない構造となっているにもかかわらず、コンクリート覆工を主要な本構造物としてあらゆる外力を永久的にささえるように設計することは正しくない。またそのような機能を果たし得るものと期待して施工することも無理ではなかるか。「施工の実際を科学的に検討すれば、従来は工事中の外力を一時ささえる仮設構造物として見られていた鋼支保工が、実際はコンクリート覆工を打設してから後もひきつづいてすべての外力をささえている永久的な主要構造物としての機能を持ち続けていると見るのが当然である<sup>13)</sup>」ことがわかる。したがってコンクリート覆工の方には多くの期待はできないで、力学的な構造物としては主要な役割りから補助的な役割りに転化してしまつたと考えなければならぬ。

工事の一般常識では、仮設構造物は一時の用に供するだけだからできるだけ節約して安上りにしようとし、永久構造物は強度と耐久性と安全を重視して多少高くついてもやむを得ないとしている。この常識にもとづいてトンネルの支保工と覆工を従来の考え方によって設計すれば、仮設物の鋼支保はできるだけ節約してこわれる寸前まで使ってもよいこととなり、永久的な本構造物であるコンクリート覆工は強度と安全を考慮して十分な厚さをとることとなり、山が悪ければそれに応じて巻厚も90~100~120 cmと厚くしなければならなくなる。山の悪い所や土圧の大きくかかる所は巻厚を厚くするために、掘削断面も大きくなり、危険な所をさらに危険を増す結果に陥る。そのうえ悪いことには、頼りにならないコンクリート覆工の巻厚をいたずらに厚くしてコンクリートを浪費するばかりでなく、コンクリート覆工厚を完全にと

る必要から支保工などに極度の制限を加えなければならなくなり、ますます施工上の困難を増す結果となっている。金と手間をかけて危険を招く結果となる。

トンネル断面がある程度以上に大きくなると、コンクリートアーチの厚さによってトンネルをささえるにはあまりにも厚さが厚くなって、構造物としての経済限度を越えてしまい、コンクリートアーチにより覆工することは無意味とさえ思われる。

鋼支保工を仮設として軽視しなるべく節約することは不慮の災害を招くことになり、また仮設として取りはずしたり、もりかえたりする際に災害事故を誘発することが多い。鋼支保工に仮設の役割を受け持つばかりでなく、永久的な主要構造と考えなければならぬということがわかれば、鋼支保材はそれだけ安全に堅固に十分に使用することができて、災害事故を大いに減らすことができるし、コンクリート覆工の巻厚の無意味な増大を防ぎ、掘削断面もできるだけ小さくすることができる。

「Rock tunneling with steel supports」の中でも第6章トンネル支保工の設計に関係する因子という題目で支保工と覆工の関係をつぎのように論じている。

「木材が支保工として利用できる唯一の構築材料であった昔は、木支保は単に一時的な支保工としてみられたばかりではなく、また同時に恒久的な覆工構造物としての役割も果たしてきた。後にコンクリートが利用されるようになってから、木材は仮設支保工としてコンクリートは永久覆工として機能がわかってきた。つぎに鋼材が導入されるようになって、支保工と覆工との概念も変わりつつある。多くの場合に、支保工は恒久的な覆工と同様な荷重をささえなければならない。そうとすれば、もしも、支保工が終局の荷重をささえるに十分な強さを持たなければならないとすれば、支保工は恒久的な覆工と一体となってその一部を構成するものと考えられるように設計をすることが合理的であるように思われる。このような使い方のできるのは鋼支保工だけである。木支保工はコンクリートの中にあるか外にあるかにかかわらず腐朽し、コンクリート覆工の裏側に残った木材の腐朽は面白くない沈下の原因となる。もし鋼支保工が設計されたコンクリートと一体になるならば、コンクリートは鋼を保持し、永久構造物として必要な安全率を増すことに役立つ<sup>2)</sup>」。

これを要約すれば、1946年当時でも以上のように考えられていたことがわかる。さらに一歩を進めるならば、「コンクリート覆工の役割が主要なものから補助的なものに転化してし

まった」ことにも気づくはずである。以上の考察と推論から明らかになったように、トンネルの施工法と構築材料の急激な発達から、鋼支保工とコンクリート覆工についての従来の考え方と設計方法は今日ではもはや実態にそわなくなっており、つぎのような新しい考え方に根本的に改変しなければならなくなってきたといえることができる。

「鋼支保工はトンネルの施工中も完成後も地山の外圧をささえてトンネルを保持する主要構造物である。

コンクリート覆工はトンネルの内張りとして、落石、ろう水、風化を防止し、岩盤および鋼支保工を保護補強する補助的構造物である<sup>12),13)</sup>」。

今後はこのような新しい考え方にもとづいて、トンネルの支保工と覆工の設計および施工を行なわなければならない。またこれからの改良および研究もこの方向に沿って方針を立てるべきである。

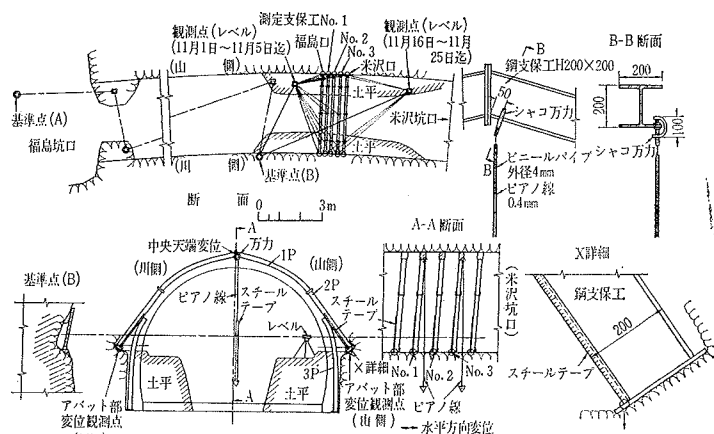
### 3. 支保工覆工の現場実測調査の計画と実際<sup>13)</sup>

トンネル工事における鋼支保工の利用についての研究は、この数年來非常に進んできて、実験室またはトンネル坑外などで実物による破壊試験<sup>9),10)</sup>などが各所で行なわれてきたが、実際のトンネル施工現場での支保工覆工の挙動の実態を総合的に調査した例は1962年頃までは発表されていなかった。そこでわれわれは1962年4月につぎのような調査計画<sup>14)</sup>を立てた。

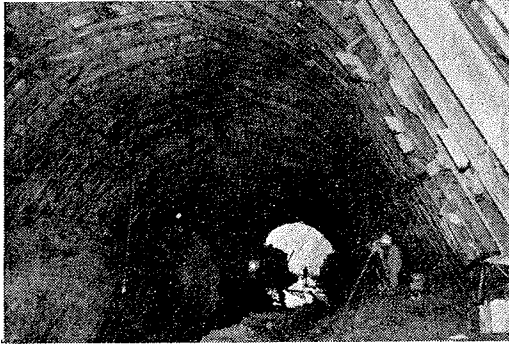
実際のトンネル工事において、岩盤掘削と鋼支保工の立て込みとコンクリート覆工の打込みとが、相互にからみあって実際にどのような働きをしているか、長期にわたってそれらの挙動を観測実測して、施工現場の実態を総合的に直接に知ろうというのがこの調査計画の目的であった。

前節で説明した新しい考え方にしたがえば、トンネル工事において鋼支保工が始めから終わりまで一貫して最も

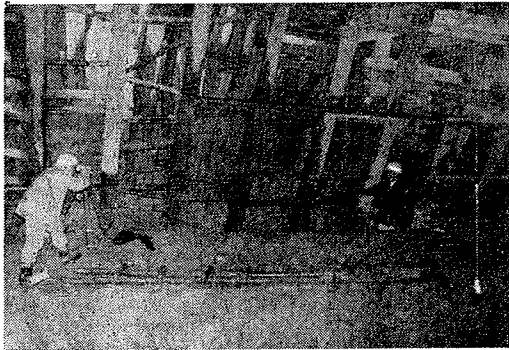
図-1 鋼支保工の変位測量  
変位測定(水準測量)



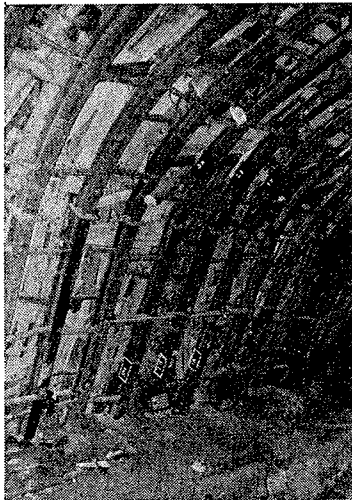
写真—5 鋼支保工アーチ クラウン部の沈下測量



写真—6 鋼支保工アーチ アバット部の沈下測量



写真—7 鋼支保工のカーボンひずみ計設置箇所 (左側)



重要な働きをしていることが理論的に指摘されているので<sup>12)</sup>、ここではこの鋼支保工を中心にして、その変化挙動を観察測定し、あわせてコンクリート覆工の変化も知り、それらと地山の状況および掘削の進行などの全体との関連において実態を明らかにするようつぎのように計画した。

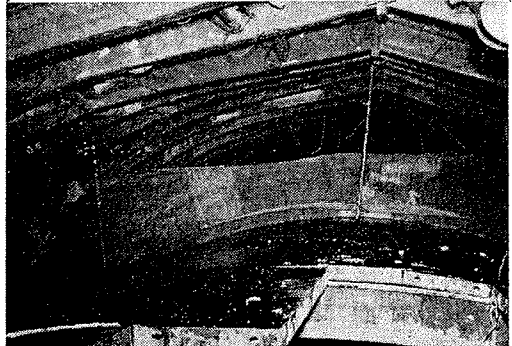
(1) 外に現われた大きい変状の観察計画

地山の岩盤の強弱の度合、湧水の程度、岩目の状況、落盤、落石、盤ぶくれの状況を観察し、さらに支保工と覆工の進行と変状、その他の必要事項を時間の経過にしたがって調査し、付近の事故などにも注目する。これらはすべて測定作業日報に記録し、必要に応じて要所要点を写真にとって残す。

写真—8 鋼支保工のカーボンひずみ計設置箇所 (左側アーチ部)



写真—9 コンクリート覆工に埋設するカーボンひずみ計のアーチ クラウン部のコンクリート打込前の図



写真—10 鋼支保工のひずみ度をワイヤ ストレン ゲージで測定している所 (コンクリート覆工打設前)



写真—11 鋼支保工とコンクリート覆工に設置したカーボンひずみ計のスイッチ ボックスよりひずみ度を測定している所 (コンクリート覆工打設後)

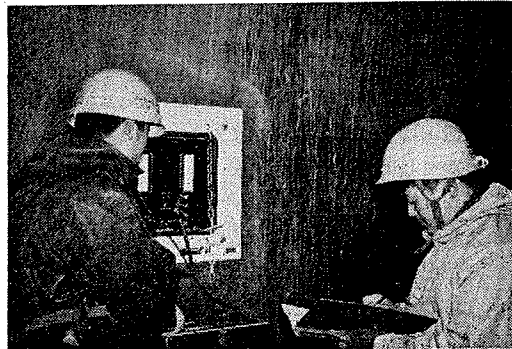


図-2 (a) 測定鋼支保工計器取付位置

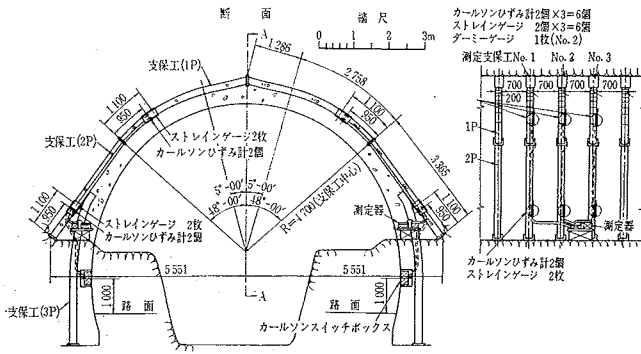


図-2 (b) 測定計器取付位置

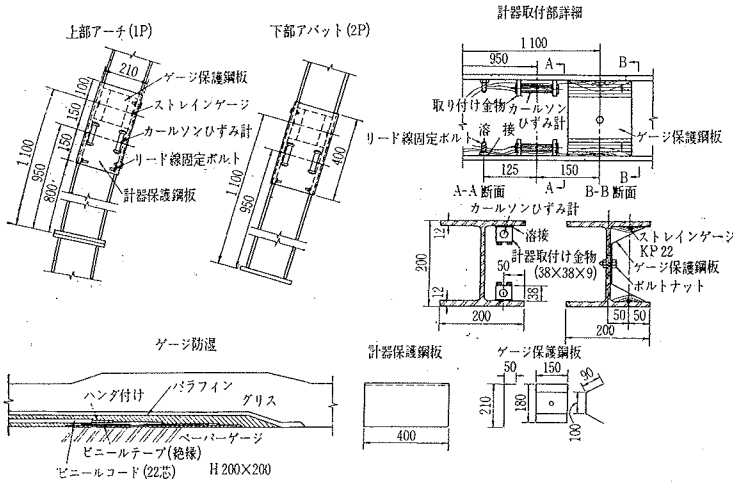
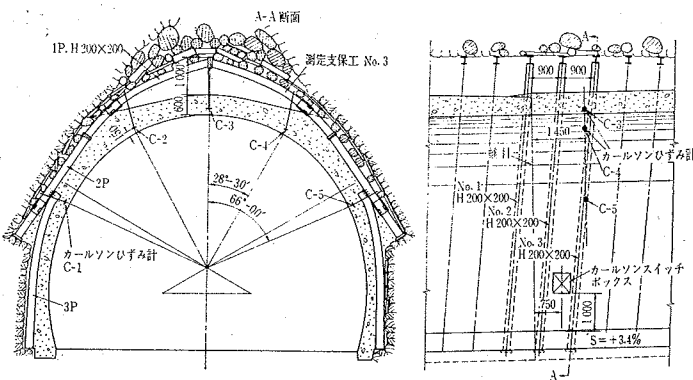


図-3 カールソンひずみ計埋設位置 (コンクリート)



(2) 測量機器による変位 (沈下) の測量計画

鋼支保工は支承箇所およびまわりの地山からのおさえがしっかりしていないと、つまりくさびが十分に利いて必要な反力を生ずるのに十分な地山の地耐力が出ないと、支保工の機能を発揮することができない。この支持固定状況の大略を知るために、鋼支保工の立込直後に要所 (坑わくのアーチ クラウン部およびアーチ アバット部) に印をつけ、坑外の岩盤上に設けた基準点に対す

るこれらの印点の変位 (主として沈下) 量をレベルまたはトランシットで測量する。掘削の進行およびこの変位測量とつきに述べる鋼支保工のひずみ測定との関係を吟味する (図-1, 写真-5, 6)。

(3) カールソンひずみ計による鋼支保工のひずみ測定計画

鋼支保工の要所にカールソンひずみ計を設置し、静ひずみ指示計によって適時にその点のひずみ度を実測し、同時にその点の温度も測定する。時間の経過にしたがって、ひずみ度と温度の測定から応力の変化を追跡し、これらの値から外力の変化と鋼支保工の働きを推察する。

カールソンひずみ計と同様にワイヤストレインゲージをチェック用として始めの間だけ併用した。これは湿気に対して弱いこととクリープが大きいために長期間の測定やトンネル用としてはこの場合適していない (図-2(a), (b), 写真-7, 8, 10)。

(4) カールソンひずみ計によるコンクリート覆工のひずみ測定計画

コンクリート覆工の要所 (覆工の横断面にて覆工内面より深さ 15 cm の線に沿ってその方向に 5 カ所) にカールソンひずみ計を埋設し、これらの点のひずみ度と温度変化を測定して、それから間接的に応力度の変化を計算する。これらからコンクリート覆工がアーチとして働いているかどうかを吟味する。また周囲の状況の変化および温度、ひずみ度、応力度の変化から間接的に覆工にかかってくる地山の外力の状況を推察する。測定時期は鋼支保工の場合に準じ、相互に対比できるように計画する (図-3, 写真-9, 11)。

以上のような現場実測調査計画を実際に始めて行なったのは、建設中であった国道 13 号線 栗子国道の中野第 1 トンネルの工事現場であった<sup>13)</sup>。測定対象とした鋼支保工は米沢口より約 45 m 入った破砕帯に設置され、4 本の H 鋼 200×200 にて一組の坑わくを構成した鋼支保工の連続した 3 組の挙動の観察を中心にすえて、そのまわりの掘削状況とコンクリート覆工との関係を追跡した。観察と測定は昭和 37 年 9 月 22 日より始め、昭和 38 年 2 月 1 日まで連続して調査した (図





図-4 (b) 中野第1トンネル、掘削一支保工一覆工、応力変化の総合チャート

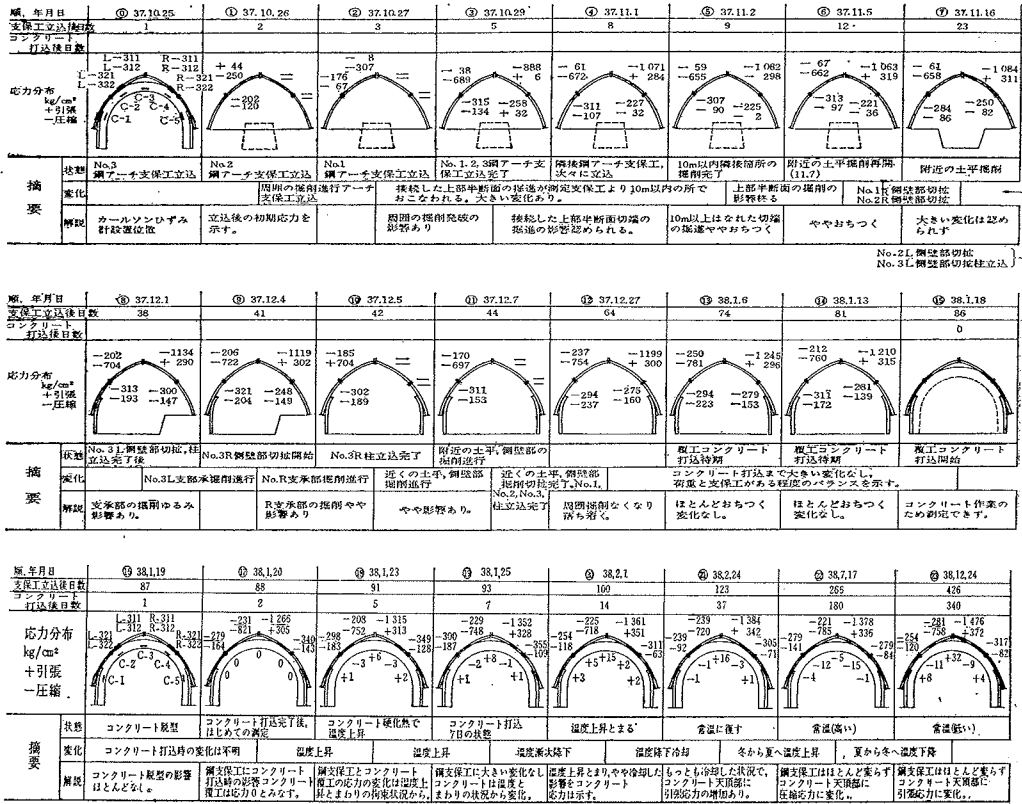
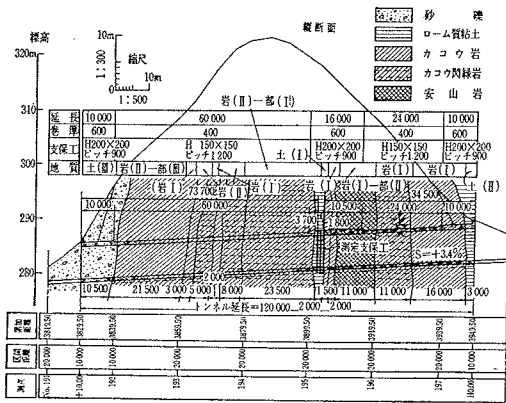


図-5 測定鋼支保工設置位置



一4)。その後は長期観測に入って、昭和38年2月23日、7月16日、17日、12月24日など約1年間にわたって測定記録がとられた。現在もなお清掃すれば十分測定に耐え得る状態となっている。

測定支保工は、90cm 間隔に並列した3組の坑わくにて、一坑わくを構成するH鋼は200×200mmのアーチ部4本、脚柱部2本の組み立てである。この測定支保工の前後数組の坑わくは同様の構造配置であるが、破砕帯をはなれるとH鋼150×150mmの120cm間隔となっている。コンクリート覆工の巻厚も従来の慣習にひかれて、破砕帯のある測定箇所および坑門の近くでは巻厚60cmとし、その他の岩盤のよい所では巻厚40cmに設計されていた(図-5)。

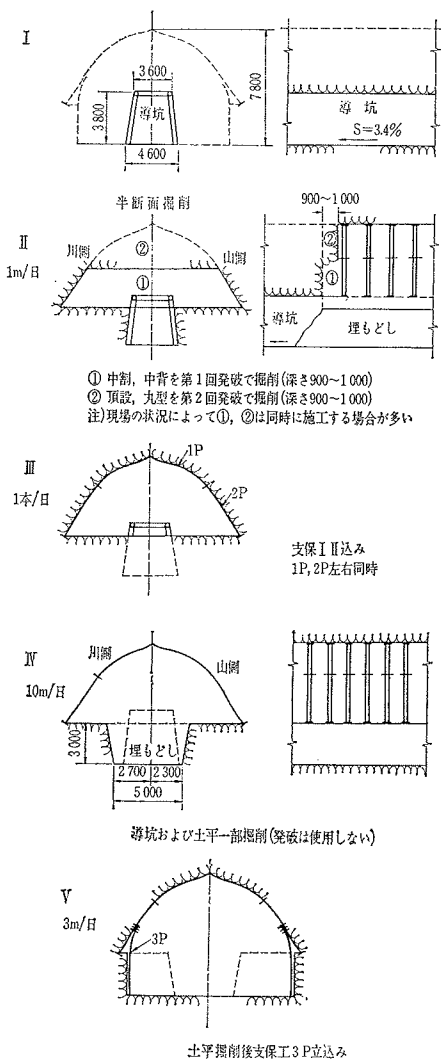
4. 現場実測調査の記録<sup>13)</sup>

前節の計画と実際にもとづいて記録されたものおよびその記録から導きだされた図表やチャートなどのうち重要なものをあげればつぎのとおりである。

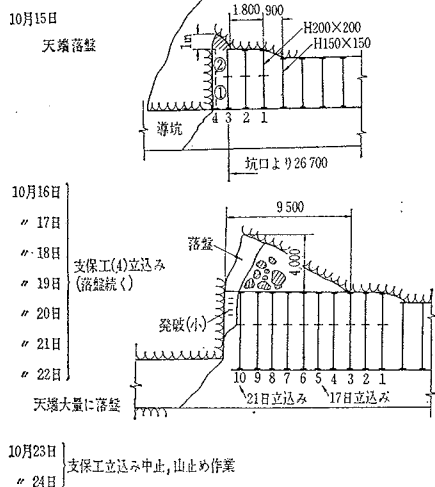
(1) 測定支保工の立込みおよび掘削の実際(図-6) トンネルが実際にどのような状態でどのような手順によって掘られたか、トンネルの荷重がどのようにして発生しどのように伝えられるか、また荷重を受けた支保工がどのような働きによってトンネルを保持していくの

図-6 測定支保工の立込みおよび掘削の実際

① 掘削および支保工立込みの順序

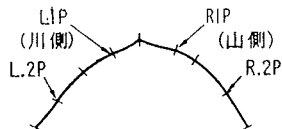


② 測定支保工立込みの前後



10月25日

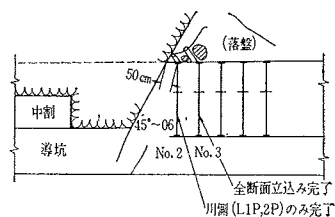
15.30 No. 3 測定支保工立込み開始  
 L. 1P, 2P, R 1P. 2P おのおのをブルで坑内に運搬後立込む(全断面)異常なし



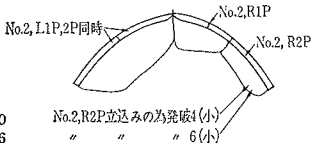
16.40 立込み完了  
 18.00 川側 No. 3 L.2P 中央部に発破4(小)→落盤なし  
 20.30 川側発破(小) ずり搬出

10月26日

2.00~4.00 川側, 発破, 2度一落盤なし  
 5.30 No. 2, 測定支保工, L 1P, L 2P 同時立込み開始  
 6.30 立込み完了



8.50 No. 2, R 1P 立込みのため山側発破3(小)  
 10.00 No. 2, R 1P 立込み開始(鋼材, 人夫運搬)  
 10.40 立込み完了



11.00 No. 2, R2P立込みのため発破4(小)  
 14.06 " " " 6(小)  
 落盤その他異常なし  
 15.30 No. 2, R 2P 立込み開始(鋼材ブル運搬)  
 16.15 立込み完了  
 No. 2, R 2P 中央部より湧水(計器 CR-221, 222)  
 20.30 No. 1 測定支保工立込みのため川側発破4(小)  
 22.00 " " " 3(小)  
 23.20 " " " 山側 4(小)  
 24.10 " " " 4(小)

10月27日

1.30 No. 1, L 1P, L 2P 立込み開始  
 2.00 立込み完了  
 2.30 No. 1, R 1P, 2P 立込みのため発破3(小)下部  
 3.15 No. 1, R 1P, R 2P 同時立込み開始  
 3.45 支保工立込み中横転(R 11I, 112)  
 5.30 立込み完了  
 全測定鋼支保工立込み完了  
 10.10 上部発破, 落盤

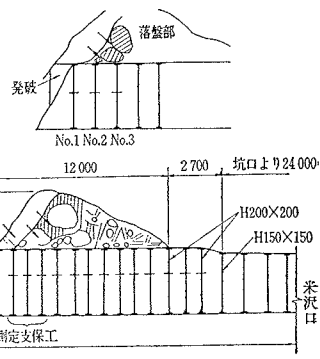


表-1 (a)~(f) 鋼支保工ひずみ計算表  
(a) カールソンひずみ計記録

測点 CR-311	計器番号 39787	埋込場所
0°Cにおける計器抵抗 ( $R_0$ ) 72.93 Ω		初めの較正係数 ( $f$ ) 抵抗比の変化 0.01% につき $6.30 \times 10^{-6}$
計器抵抗 0.01 Ω 当りの温度変化 ( $\beta$ ) $0.050 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$		結線後の較正係数 ( $f'$ ) " " $6.33 \times 10^{-6}$
計器の補正係数 ( $b$ ) $14.2 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$		無負荷時の抵抗比 101.94
鋼の温度膨張係数 ( $K$ ) $-12 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$		

年 月 日	時 間	全 抵 抗	計 器 抵 抗	温 度	温 度 差	抵 抗 比	抵 抗 比 の 変 化 分	見 か け の ひ ず み	温度補正ひずみ		第1種 の 補 正	第2種 の 補 正	第 補 正 を し た 種 の ひ ず み	第 補 正 を し た 種 の ひ ず み	縮 要 力 応 力 (kg/cm <sup>2</sup> )
									第1種	第2種					
									$L_1$	$L_2$					
37年															
10/ 9	13.30	80.10	79.80			100.70									
10	10.30	79.11	78.67			101.90									
18	12.50	79.44	79.01			101.85									
19	13.15	79.26	78.83			101.82									
20	7.40		74.61			101.92									
21	7.30		74.43			101.92									
22	8.35		75.41			101.90									
23	8.45		77.20			101.89									
"	13.45		76.82			101.88									
24	8.35		74.36			101.96									
25	9.30		77.93	25.1	0	101.85	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	8.10		—			—									
"	9.00		—			—									
27	5.15		—			—									
29	9.50		—			—									
"	13.10		75.76	14.2	-10.9	101.22	-63	-399	-155	+131	-554	-423	-888	-888	
30	9.50		96.02	15.5	-9.6	101.07	-78	-494	-136	+115	-630	-515	-1082	-1082	
31	12.45		75.47	12.7	-12.4	101.09	-76	-481	-176	+149	-657	-508	-1067	-1067	
11/ 1	7.50		75.28	11.8	-13.3	101.09	-76	-481	-189	+160	-670	-510	-1071	-1071	
2	11.00		75.37	12.2	-12.9	101.08	-77	-487	-183	+155	-670	-515	-1082	-1082	
3	10.50		75.15	11.1	-14.0	101.09	-76	-481	-199	+168	-680	-512	-1075	-1075	
4	9.30		75.09	10.8	-14.3	101.09	-76	-481	-203	+172	-674	-502	-1054	-1054	
5	7.30		75.06	10.7	-14.4	101.10	-75	-475	-204	+173	-679	-506	-1063	-1063	
16	11.10		74.75	9.1	-16.0	101.09	-76	-481	-227	+192	-708	-516	-1084	-1084	
17	13.15		74.79	9.3	-15.8	101.10	-75	-475	-224	+190	-699	-509	-1069	-1069	
18	11.05		73.97	5.2	-19.9	103.04									
19	12.30		74.70	8.9	-16.2	101.10	-75	-475	-230	+194	-705	-511	-1073	-1073	

(b) カールソンひずみ計記録

測点 C-1	計器番号 41000	埋込場所 コンクリート
0°Cにおける計器抵抗 ( $R_0$ ) 72.49 Ω		初めの較正係数 ( $f$ ) 抵抗比の変化 0.01% につき $6.41 \times 10^{-6}$
計器抵抗 0.01 Ω 当りの温度変化 ( $\beta$ ) $0.0505 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$		結線後の較正係数 ( $f'$ ) " " $6.43 \times 10^{-6}$
計器の補正係数 ( $b$ ) $14.2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$		無負荷時の抵抗比 100.58
コンクリートの温度膨張係数 ( $K$ ) $-10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$		

年 月 日	時 間	全 抵 抗  $RS$ (Ω)	計 器 抵 抗  $Rt$ (Ω)	温 度  $t$ (°C)	温 度 差  $\Delta t$ (°C)	抵 抗 比  $Z$ (%)	抵 抗 比 の 変 化 分  $\Delta Z$ 0.01%	見 か け の ひ ず み  $f \cdot \Delta Z$ $10^{-6}$	温度補正ひずみ		第 一 種 の 補 正 を  $\epsilon_1$ $10^{-6}$	第 二 種 の 補 正 を  $\epsilon_2$ $10^{-6}$	摘 要
									第1種 $L_1$	第2種 $L_2$			
									$b \cdot \Delta t$ $10^{-6}$	$K \cdot \Delta t$ $10^{-6}$			
38年													
1/16		73.31	73.08	3.0	0	100.27	0						
17													
18													
19													
20	11.30		74.66	11.0	+8.0 0	100.19	-8 0	-51.4 0	+113.6 0	-80.0 0	+62.2 0	-17.8 0	基準已
21	11.00		74.94	12.4	+1.4	100.19	0	0	+19.9	-14.0	+19.9	+5.9	
22	10.30		74.95	12.4	+1.4	100.19	0	0	+19.9	-14.0	+19.9	+5.9	
~	17.00	75.30	74.99	12.6	+1.6	100.19	0	0	+22.7	-16.0	+22.7	+6.7	
23	10.30	75.21	74.91	12.2	+1.2	100.19	0	0	+17.0	-12.0	+17.0	+5.0	
24	11.00		74.73	11.3	+0.3	100.20	+1	+6.4	+4.3	-3.0	+10.7	+7.7	
25	14.30		74.54	10.4	-0.6	100.20	+1	+6.4	-8.5	+6.0	-2.1	+3.9	
2/ 1			74.05	7.9	-3.1	100.23	+4	+26.0	-44.0	+31.0	-18.0	+13.0	
2/23			73.20	3.6	-7.4	100.22	+3	+19.0	-105.0	+74.0	-86.0	-12.0	
24			73.19	3.5	-7.5	100.23	+4	+26.0	-107.0	+75.0	-81.0	-6.0	
7/15			76.13	18.4	+7.4	100.12	-7	-45.0	+105.0	-74.0	+60.0	-14.0	
16			76.14	18.4	+7.4	100.11	-8	-51.0	+105.0	-74.0	+54.0	-20.0	
17			76.16	18.5	+7.5	100.11	-8	-51.0	+107.0	-75.0	+56.0	-19.0	
8/16			76.46	20.0	+9.0	100.13	-6	-39.0	+128.0	-90.0	+89.0	-1.0	
12/24			73.40	4.6	-6.4	100.29	+10	+64.0	-91.0	+64.0	-27.0	+37.0	

(c) カールソンひずみ計記録

測点 C-2	計器番号 40997	埋込場所 コンクリート
0°Cにおける計器抵抗 (R <sub>0</sub> ) 72.49°C		初めの較正係数 (f) 抵抗比の変化 0.01% につき 6.64×10 <sup>-6</sup>
計器抵抗 0.01Ω 当りの温度変化 (β) 0.0504×10 <sup>-6</sup> /°C		結線後の較正係数 (f') " " 6.68×10 <sup>-6</sup>
計器の補正係数 (b) 14.2×10 <sup>-6</sup> /°C		無負荷時の抵抗比 101.78
コンクリートの温度膨張係数 (K) -10×10 <sup>-6</sup> /°C		

年 月 日	時 間	全 抵 抗	計 器 抵 抗	温 度	温 度 差	抵 抗 比	抵 抗 比 の 変 化 分	見 か け の ひ ず み	温度補正ひずみ		第 一 種 の ひ ず み 補 正 を	第 二 種 の ひ ず み 補 正 を	摘 要
									第1種	第2種			
									L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>			
38年													
1/16		73.68	73.25	3.8	0	101.51	0						
17													
18													
19													
20			75.30	14.2	+10.4 0	101.47	-4 0	-26.7 0	+147.7 0	-104.0 0	+121.0	+17.0 0	
21			75.62	15.8	+1.6	101.44	-3	-20.0	+22.7	-16.0	+2.7	-13.3	
22			75.63	15.8	+1.6	101.45	-2	-13.4	+22.7	-16.0	+9.3	-6.7	
"		76.14	75.64	15.9	+1.7	101.44	-3	-20.0	+24.1	-17.0	+4.1	-12.9	
23		76.08	75.58	15.6	+1.4	101.44	-3	-20.0	+19.9	-14.0	-0.1	-14.1	
24			75.26	14.0	+0.2	101.46	-1	-6.7	-2.8	+2.0	-9.5	-7.5	
25			74.95	12.4	+1.8	101.47	0	0	-25.6	+18.0	-25.6	-7.6	
2/1			74.14	8.3	-5.8	101.54	+7	+46.8	-82.4	+58.0	-35.6	+22.4	
2/23			73.20	3.6	-10.6	101.53	+6	+40.0	-151.0	+106.0	-111.0	-5.0	
24			73.28	4.0	-10.2	101.53	+6	+40.0	-145.0	+102.0	-105.0	-3.0	
									-100.0				
7/15			76.11	18.2	+4.1	101.35	-12	-80.0	+58.0	-41.0	-22.0	-63.0	
16			76.11	18.2	+4.1	101.32	-15	-100.0	+58.0	-41.0	-42.0	-83.0	
17			76.12	18.3	+4.1	101.36	-11	-73.0	+58.0	-41.0	-15.0	-56.0	
8/16			76.41	19.8	+5.6	101.33	+4	-94.0	+80.0	-56.0	-14.0	-70.0	
12/24			73.47	4.9	-9.3	101.45	-2	-13.0	-132.0	+93.0	-145.0	-52.0	

(d) カールソンひずみ計記録

測点 C-3	計器番号 39724	埋込場所 コンクリート
0°Cにおける計器抵抗 ( $R_0$ ) 73.36°C		初めの校正係数 ( $f'$ ) 抵抗比の変化 0.01% につき $6.38 \times 10^{-6}$
計器抵抗 0.01 $\Omega$ 当りの温度変化 ( $\beta$ ) $0.0497 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$		結線後の校正係数 ( $f''$ ) " " $6.43 \times 10^{-6}$
計器の補正係数 ( $b$ ) $14.2 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$		無負荷時の抵抗比 100.60
コンクリートの温度膨張係数 ( $K$ ) $-10 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$		

年 月 日	時 間	全 抵 抗  $RS$ ( $\Omega$ )	計 器 抵 抗  $Rt$ ( $\Omega$ )	温 度  $t$ ( $^\circ\text{C}$ )	温 度 差  $\Delta t$ ( $^\circ\text{C}$ )	抵 抗 比  $Z$ (%)	抵 抗 比 の 変 化 分  $\Delta Z$ 0.01%	見 か け の ひ ず み  $f \cdot \Delta Z$ $10^{-6}$	温度補正ひずみ		第 一 種 の 補 正 を  $\epsilon_1$ $10^{-8}$	第 二 種 の 補 正 を  $\epsilon_2$ $10^{-6}$	摘 要
									第1種 $L_1$	第2種 $L_2$			
									$b \cdot \Delta t$ $10^{-6}$	$K \cdot \Delta t$ $10^{-6}$			
38年		74.73	74.17	4.0	0	100.43							
	1/16												
	17												
	18												
	19												
	20		77.21	19.0	+15.0 0	100.54	+11 0	+70.7	+213.0 0	-150.0 0	+283.7	+133.7 0	
	21		76.40	15.0	-4.0	100.58	+4	+25.7	-56.8	+40.0	-31.1	+8.9	
	22		75.94	12.7	-6.3	100.62	+8	+51.4	-89.5	+63.0	-38.1	+24.9	
	"	76.56	75.92	12.6	-6.4	100.62	+8	+51.4	-90.9	+64.0	-39.5	+24.5	
	23	76.41	75.76	11.9	-7.1	100.63	+9	+57.9	-100.8	+71.0	-42.9	+28.1	
	24		75.33	9.7	-9.3	100.66	+12	+77.2	-132.1	+93.0	-54.9	+38.1	
	25		75.10	8.6	-10.4	100.67	+13	+83.6	-147.7	+104.0	-64.1	+39.9	
	2/ 1		74.71	6.7	-12.3	100.73	+19	+122.2	-174.7	+123.0	-52.5	+70.5	
	2/23		74.07	3.5	-15.5	100.75	+21	+135.0	-220.0	+155.0	-85.0	+70.0	
	24		74.07	3.5	-15.5	100.76	+22	+141.0	-220.0	+155.0	-79.0	+76.0	
	7/15		76.96	17.8	-1.2	100.51	-3	-19.0	-17.0	+12.0	-36.0	-24.0	
	16		76.98	17.9	-1.1	100.47	-7	-45.0	-16.0	+11.0	-61.0	-5.0	
	17		76.97	17.8	-1.2	100.51	-3	-19.0	-17.0	+12.0	-36.0	-24.0	
	8/16		77.24	19.2	+0.2	100.49	-5	-32.0	+3.0	-2.0	-29.0	-31.0	
	12/24		74.33	4.9	-14.1	100.87	+33	+212.0	-200.0	+141.0	+12.0	+153.0	

(e) カールソンひずみ計記録

測点 C-4	計器番号 39830	埋込場所 コンクリート
0°Cにおける計器抵抗 ( $R_0$ ) 74.20°C		初めの較正係数 ( $f$ ) 抵抗比の変化 0.01% につき $6.30 \times 10^{-6}$
計器抵抗 0.01 $\Omega$ 当りの温度変化 ( $\beta$ ) $0.0494 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$		結線後の較正係数 ( $f'$ ) " " $6.33 \times 10^{-6}$
計器の補正係数 ( $b$ ) $14.2 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$		無負荷時の抵抗比 99.70
コンクリートの温度膨張係数 ( $K$ ) $-10 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$		

年 月 日	時 間	全 抵 抗	計 器 抵 抗	温 度	温 度 差	抵 抗 比	抵 抗 比 の 変 化 分	見 か け の ひ ず み	温度補正ひずみ		第 一 種 の 補 正	第 二 種 の 補 正	摘 要	
									第1種	第2種				
									$L_1$	$L_2$				
		$R_S$ ( $\Omega$ )	$R_t$ ( $\Omega$ )	$t$ ( $^\circ\text{C}$ )	$\Delta t$ ( $^\circ\text{C}$ )	$Z$ (%)	$\Delta Z$ 0.01%	$f \cdot \Delta Z$ $10^{-6}$	$b \cdot \Delta t$ $10^{-6}$	$K \cdot \Delta t$ $10^{-6}$	$\epsilon_1$ $10^{-6}$	$\epsilon_2$ $10^{-6}$		
38年	1/16	75.11	74.76	2.8	0	98.95								
	17													
	18													
	19													
	20		76.87	13.2	+10.4 0	99.14	+19 0	+120.3 0	+147.7 0	-104.0 0	+268.0	+164.0 0		
	21		77.10	14.3	+1.1	99.14	0	0	+15.6	-11.0	+15.6	+4.6		
	22		77.12	14.4	+1.2	99.15	+1	+6.3	+17.0	-12.0	+23.3	+11.3		
	〃	77.67	77.20	14.8	+1.6	99.12	-2	-12.7	+22.7	-16.0	+10.0	-6.0		
	23	77.64	77.19	14.8	+1.6	99.11	-3	-19.0	+22.7	-16.0	+3.7	-12.3		
	24		76.89	13.3	+0.1	99.13	-1	-6.3	+1.4	-1.0	-4.9	-5.9		
	25		76.63	12.0	-1.2	99.14	0	0	-17.0	+12.0	-17.0	-5.0		
	2/ 1		75.88	8.3	-4.9	99.19	+5	+31.7	-69.6	+49.0	-37.9	+11.1		
	2/23		74.96	3.8	-9.4	99.15	+1	+6.0	-13.3	+94.0	-12.7	-33.0		
	24		74.95	3.7	-9.5	99.18	+4	+25.0	-13.5	+95.0	-110.0	-15.0		
	7/15		—			—							測定不良	
	16		77.96	18.6	+5.4	98.98	-16	-101.0	+77.0	-54.0	-24.0	-78.0		
	17		77.96	18.6	+5.4	98.99	-15	-95.0	+77.0	-54.0	-18.0	-72.0		
	8/16		78.22	19.9	+6.7	98.90	-24	-152.0	+95.0	-67.0	-57.0	-124.0	(測定値) 不安定)	
	12/24		75.17	4.8	-8.4	99.13	-1	-6.0	-119.0	+84.0	-125.0	-41.0		

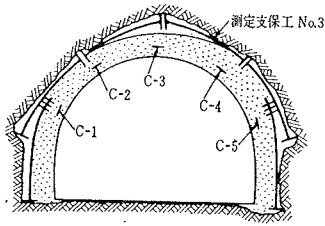
(f) カールソンひずみ計記録

測点 C-5	計器番号 39812	埋込場所 コンクリート
0°Cにおける計器抵抗 ( $R_0$ ) 73.72 $\Omega$		初めの校正係数 ( $f$ ) 抵抗比の変化 0.01% につき 6.36 $\times 10^{-6}/0.01\%$
計器抵抗 0.01 $\Omega$ 当りの温度変化 ( $\beta$ ) 0.0494 $\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$		結線後の校正係数 ( $f$ ) " " 6.38 $\times 10^{-6}$
計器の補正係数 ( $b$ ) 14.2 $\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$		無負荷時の抵抗比 102.57
コンクリートの温度膨張係数 ( $K$ ) $-10 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$		

年 月 日	時 間	全 抵 抗	計 器 抵 抗	温 度	温 度 差	抵 抗 比	抵 抗 比 の 変 化 分	見 か け の ひ ず み	温度補正ひずみ		第 一 種 の 補 正 を	第 二 種 の 補 正 を	摘 要
									第 1 種	第 2 種			
									$L_1$	$L_2$			
38年		74.30	74.11	1.9	0	102.39	0						
1/16													
17													
18													
19													
20	11.30		75.62	9.4	+7.5 0	102.36	-3 0	-19.1 0	+106.5 0	-75.0 0	+87.4	+12.4 0	
21	11.00		75.99	11.2	+1.8	102.35	-1	-6.4	+25.6	-18.0	+19.2	+1.2	
22	10.30		76.09	11.7	+2.3	102.35	-1	-6.4	+32.7	-23.0	+26.3	+3.3	
"	17.00	76.42	76.16	12.1	+2.7	102.35	-1	-6.4	+38.3	-27.0	+31.9	+4.9	
23	10.30	76.34	76.08	11.7	+2.3	102.36	0	0	+32.7	-23.0	+32.7	+9.7	
24	11.00		75.90	10.8	+1.4	102.37	+1	+6.4	+19.9	-14.0	+26.3	+12.3	
25	14.30		75.67	9.6	+0.2	102.37	+1	+6.4	+2.8	-2.0	+9.2	+7.2	
2/ 1			75.09	6.8	-2.6	102.39	+3	+19.1	-36.9	+26.0	+17.8	+8.2	
2/23			74.29	2.8	-6.6	102.40	+4	+26.0	-94.0	+66.0	-68.0	-2.0	
24			74.29	2.8	-6.6	102.41	+5	+32.0	-94.0	+66.0	-62.0	+4.0	
7/15			—			—							測定不良
16			77.33	17.8	+8.4	102.29	-7	-45.0	+119.0	-84.0	+74.0	-10.0	
17			77.33	17.8	+8.4	102.30	-6	-38.0	+119.0	-84.0	+81.0	-3.0	
8/16			77.58	19.1	+9.7	102.26	-10	-64.0	+138.0	-97.0	+74.0	-23.0	(測定値 不安定)
12/24			74.62	4.4	-5.0	102.42	+6	+38.0	-71.0	+50.0	-33.0	+17.0	



図-8 コンクリート覆工のひずみ測定記録



か、支保工がまわりの地山からどのように支承拘束されているのか、などの実際の機構と現象を正しくつかむ上に、この項はもっとも重要な時点である。これを作業日報と現場メモ帳から要点をとりだして紹介したものである。

- (2) 測定作業日報 (省略)
- (3) 現場写真 (写真-1~11)
- (4) 鋼支保工の変位測定記録と図表 (図-4 に一部掲出)
- (5) 鋼支保工のひずみ測定記録と計算表 (1葉掲出)  
鋼支保工のひずみグラフ (図-7)
- (6) コンクリート覆工のひずみ測定記録と計算表  
コンクリート覆工のひずみグラフ (図-8)
- (7) トンネルの掘削-支保工-覆工の総合チャート (図-4) (一部掲出)

## 5. 記録の解析と結論<sup>13)</sup>

「支保工と覆工とが実際にどのような荷重を受けてどのような働きをしているかを知るには、それらに影響のある地山の状態、発破掘進切抜きの順序、支保工の立込み、覆工コンクリートの打込みなどの相互関係を全体から見ること、それぞれを正しく深く観察すること、およびこれらの変化を時間的経過との関連において考察することが重要である<sup>13),14)</sup>」。

この考察の素材となるのは、観測者の現場メモ帳、測定作業日報、現場写真、鋼支保工の変位測定記録、鋼支保工のひずみ測定記録、コンクリート覆工のひずみ測定記録、トンネルの掘削-支保工-覆工の総合チャート、近接箇所事故その他の重要事項の記録、および工事現場の直接の観察などである。

これらの素材から直接または間接にひき出される原則的なものを拾い上げてみるとつぎのようないくつかの結論が得られる。この結論が導き出された過程については、簡単なものはここにそれぞれ理由も述べておき、くわしい解析を要するものはここでは詳述することをさけて、大略のすじみちだけを示すこととする。

(1) 「鋼支保工はトンネル施工中において地山の崩落を防ぎ、土圧をささえ、内空断面を保つ主要な構造物である。鋼支保工はまず所定の位置に設置され、支承部を拡幅強化し、地山との間に適当にくさびをきかせて、

拘束点をまわりから固めるようにする。このような形にして始めて鋼支保工はまわりからの反力または受働土圧の助けを借りて、地山からの当初の大きい荷重およびその後追加される荷重の増加に対して、一種のアーチ作用でもってささえることができるのである」。

(このような考えは Proctor & White 両氏の提案<sup>2)</sup>の中にすでに表われているが、実際にこの経路を明らかにしたのは、4. (1), (2), (7) である。)

(2) 「鋼支保工は通常の設計で考えられているようにしっかりと固定された不動の構造物ではなく、まわりの状況の変化にしたがって相当に大きく変動しながら新しい状態に適応してゆくものである。」

(測定支保工の隣接箇所の掘進または切り抜げのための発破掘削の際に、鋼支保工の立ち上っている支承部がゆるんでくるためと、そのゆるみによる鋼支保工の沈下から誘発される荷重の増加および付近の衝撃によりゆりこむ形となる上部荷重のわずかな増加などのために、新しい荷重が不断に追加されてゆく。このような支承部のゆるみと鋼支保工の沈下がなければ、当初の荷重はほとんど変化がないわけであるが、実際にはこの調査実測の場合にも 4. (4) のとおり相当の沈下が見られた。鋼支保工の沈下は1日最大のものはアーチクラウン部で10 cm、アーチアバット部で4 cmに達した。そのために鋼支保工の支持点および拘束点の位置も動き、それらの点における反力または受働土圧も変動しながら、新しい平衡の状態に移ってゆく。これらの現象は鋼支保工のトンネル横断面においておこるばかりでなく、しばしばトンネル縦断の方向にも傾きを変化する。支保工の変動が大きくなって限度をこせば、支保工が変形を起したり、倒れたり、崩れたりして、トンネルの崩壊を招くこともある。

以上の経路は 4. (2), (3), (4), (7) によって明らかにたどることができる。特に 図-4 によってまわりの状況のわずかな変化が荷重の変化をもたらす関係が明らかになる。まわりの状況が悪いときには、わずかの荷重の変化が結局は大きい荷重の変化をもたらすこともあった。なお、他の崩壊したトンネルの工事報告をも参考にして限度以上の場合の現象も考察した。

(3) 「鋼支保工の測定点のひずみ度は立込設置直後にくさびが利くにしたがって相当な値に達し、その後は近接箇所の発破掘削のある間は割合に大きく変化し、近くの工事がなくなるにしたがって変化が少なくなってくる」。

鋼支保工の応力度は直接測定することはできなかったが、ひずみ計で読んだひずみ度  $\epsilon_1$  から温度変化  $\Delta t$  によるひずみ度  $K \Delta t$  を差し引けば、その点に生じている応力度に対応したひずみ度  $\epsilon_2$  を知ることができる。この関係から応力度の変化を吟味して見ると、付近の掘削

が終った後はほとんど変化なく落ち着いたように思われる。計算された「応力度のわずかな変化は主として温度変化によって起こる鋼支保工の支持点および拘束点のわずかな変化によってもたらされたものである」。

鋼支保工を立て込んでからコンクリート覆工を打ち込み終るまで、鋼支保工のひずみ度とそれに対応する応力度は 4. (5) より

測定値	ひずみ度	応力度
最も多く表われた値 (圧縮)	$\times 10^{-6}$ -100~-200	$\text{kg/cm}^2$ -210~-420
絶対値の大きいもの (圧縮)	$\times 10^{-6}$ -593	-1 245
比較的少ない引張り値	$\times 10^{-6}$ +150	+315

などが測定された。これらの値は弾性限界内または許容応力度内であった。

同様に最大曲げモーメント 3.65 t-m, 最大軸力 (圧縮) 31.2 t などが計算される。

(以上は 4. (5) より直接みとめられる)。

(4) 「つぎにコンクリート覆工を打設するが、通常鋼支保工は地山とコンクリート覆工との間に半ばコンクリートに埋め込まれた形となってしまふ。コンクリート覆工を打ち始めてから後の鋼支保工のひずみ度の変化を見ると、主として温度変化にもとづく膨張収縮が観測されており、新しく応力の変化が表われているようには見えない」。

コンクリートの打込当初には鋼支保工の温度はその直前の常温  $1^{\circ}\sim 4^{\circ}\text{C}$  から  $5^{\circ}\sim 18^{\circ}\text{C}$  前後に上昇し、その後 2 週間ぐらいの間に徐々に常温の  $7^{\circ}\sim 8^{\circ}\text{C}$  に下がっている。これはコンクリートの硬化熱と凍結防止のための採暖保温の影響である。この間の変化を詳細に吟味すれば、温度-ひずみ度-応力度の関係を正しく知ることができる。この間に測定したひずみ度に適当な温度補正を施して得られたひずみ度 (応力度に対応したもの) はコンクリート打込みの前後で大きい変化はない。すなわち測定点はほとんど圧縮応力なることを示し、

測点値	応力度
最も多く出た値 (圧縮)	-200~300 $\text{kg/cm}^2$
最大値 (圧縮)	-1 361 $\text{kg/cm}^2$
” (引張り)	+351 $\text{kg/cm}^2$

などの値となっている。

鋼支保工のひずみ測定記録から測定点における軸力と曲げモーメントを計算すれば最大軸力 (圧縮) 32.4 t, 最大曲げモーメント 4.02 t-m の程度となっている。

要するに「コンクリート覆工が施工されたことによって鋼支保工のそれまでに持っていた応力度などにはほとんど変化がない」ということが明らかとなった。

(5) 「その後、鋼支保工のひずみ測定はコンクリート打設後 36 日, 180 日, 340 日など長期間をへたてて行なわれたが、温度の関係を考慮すれば応力度に対応し

たひずみ度にはほとんど変化がなく安定していることを示した」。

(以上の関係は 4. (5), (7) 特に 図-7 より直接認められる。)

(6) コンクリート覆工は 38 年 1 月 17 日に打込開始, 1 月 19 日に脱型した。コンクリート覆工のひずみ測定は 4. (6) のごとく 5 点 C-1, C-2, C-3, C-4, C-5 において行なわれた。図-8 によりつぎのことがわかる。

コンクリート覆工は支承部および外周からの支持や拘束が十分に堅固に造られているわけではないので、温度変化による伸縮などに対しては比較的にならなっていると思われる。観測されたひずみは、温度変化による伸縮ひずみ、コンクリート硬化収縮ひずみ、外力によるたわみひずみ、クリープによるひずみなどが一緒になった総合ひずみともいうべきものである。したがって純力学的に計算することはむずかしいが、適当な補正を考慮すれば実際とあまりかけはなれない応力度を推算することができる。

コンクリートのヤング係数は材令によって非常に変わってくるので、この場合には別に同様のコンクリートでつくったテストピースの弾性波実験によって測定されたヤング係数を参考にして応力度を考えることにした。その値はつぎのごとく材令によってだんだん上っている

材 令	ヤング係数 (平均値)
2 日	$0.12 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$
3 日	$0.18 \times 10^6$ "
5 日	$0.21 \times 10^6$ "
7 日	$0.24 \times 10^6$ "
14 日	$0.29 \times 10^6$ "
28 日	$0.34 \times 10^6$ "

またコンクリートの温度膨張係数はコンクリートの種類によって異なり、大体  $7\sim 13 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  とされているので、ここではこの値を  $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  として計算した。

長期間にはコンクリートのクリープも考えられる。

これらを考慮に入れながらコンクリート覆工のひずみ測定表よりわかることは、「約 1 カ月の間に温度は  $9^{\circ}\sim 15^{\circ}\text{C}$  降下し、その補正を施せばコンクリート覆工に生じている応力度はいずれも非常に小さい値であることが推定される。なお、5 点についてややくわしく吟味すれば C-1, C-2, C-4, C-5 はコンクリート打込後 36, 37 日までは小さい圧縮ひずみ (測定誤差の範囲内とも考えられる) を示し、C-3 だけは打設後 14 日までは引張ひずみ、引張応力が徐々に増大し、引張ひずみ度  $71 \times 10^{-6}$ 、引張応力度  $15 \text{ kg/cm}^2$  に達し、以後 36, 37 日まで大きい変化はなく落ち着いたように見えた。」

以上の結果からみると、コンクリート覆工の天頂部 C-3 のひずみは主として温度変化によって生じたものであり、地山の土圧などに起因するものでないことが明らかとなった。図-3 から容易にわかるように、特に

「この場合コンクリート覆工はそのまわりの鋼支保工と地山に密着している程度、およびどうしても残る天頂部の空げきなどの関係から、コンクリート覆工の温度伸縮に対して上下の方向には比較的自由に動き得るが水平の方向にはいくぶん拘束される形となっているため、温度がだんだん降下していったこの期間では C-3 に引張応力が生じた」というように解釈される。

(7) コンクリート覆工の初期観測としては、コンクリート打設後 37 日目でもって一応打ち切り、それ以後長期観測に入り約 5 カ月を放置してコンクリート打設後の日数でいえば 178, 179, 180 日目に再び測定したが、この間の温度変化とひずみの関係は図-8 のとおりである。この図は 2 月 24 日を基準として 7 月 15, 16, 17 日への変化がどうなったかを示すものである。この期間この図からつぎのことがわかる。

C-1, C-5 については、測定したひずみ度  $\epsilon_t$  は温度上昇により生ずべき膨張ひずみ度  $K \Delta t$  とほとんど等量であって、温度変化による膨張収縮が比較的自由に行なわれ、したがって応力の変化もほとんどないと考えられる。圧縮方向に  $1 \sim 3 \text{ kg/cm}^2$  にて変化はほとんどない。

C-2, C-4 については、測定したひずみ度  $\epsilon_t$  は温度上昇による膨張ひずみ  $K \Delta t$  の約  $1/2$  に相当していて、後の  $1/2$  はまわりからの拘束と覆工の形によって圧縮方向に  $11 \sim 17 \text{ kg/cm}^2$  の応力を生じたものと考えられる。

C-3 については、測定したひずみ度  $\epsilon_t$  (伸び) は温度上昇による膨張ひずみ  $K \Delta t$  の約  $1/3$  に相当していて、残りの  $2/3$  はまわりからの拘束と覆工の形によって圧縮方向に  $20 \sim 26 \text{ kg/cm}^2$  の応力を生じたものと考えられる。

コンクリートはクリープ、硬化収縮、ヤング率の変化

図-7 (a) 中野第 1 トンネル No. 1 鋼支保工のひずみグラフ (左)

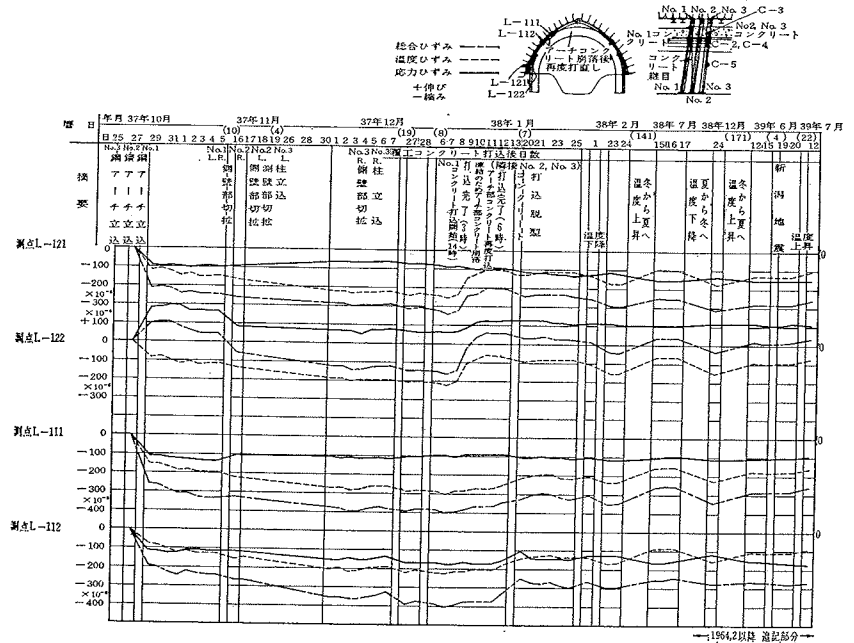


図-7 (b) 中野第 1 トンネル No. 3 鋼支保工のひずみグラフ (左)

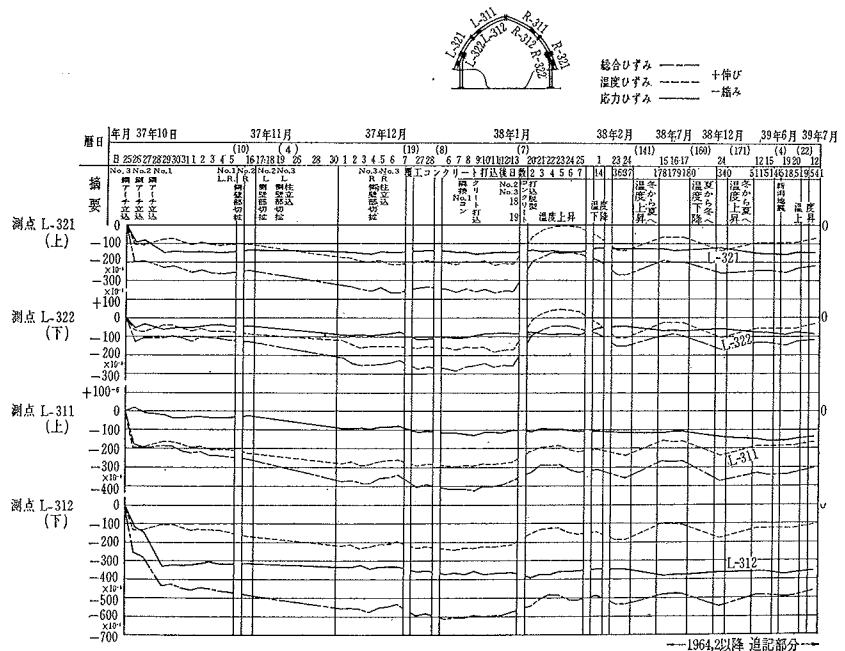


図-7 (c) 中野第1トンネル No. 3 鋼支保工のひずみグラフ (右)

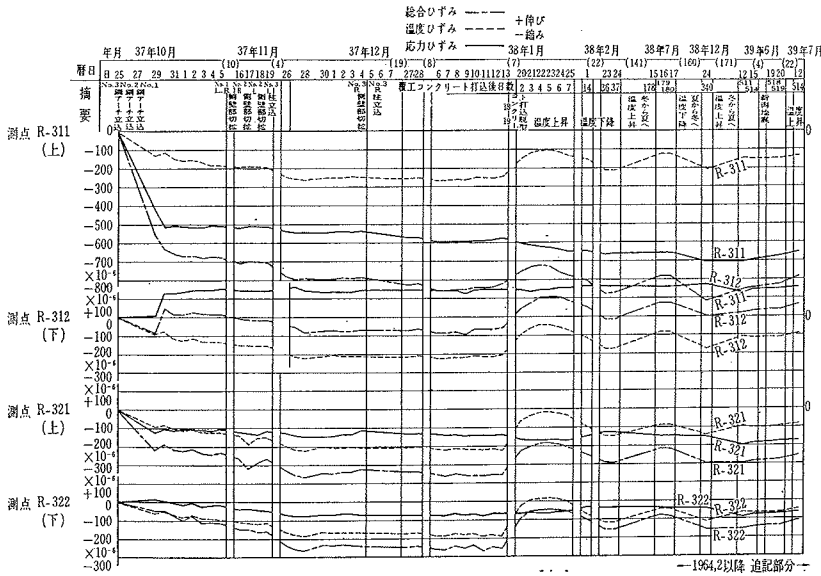
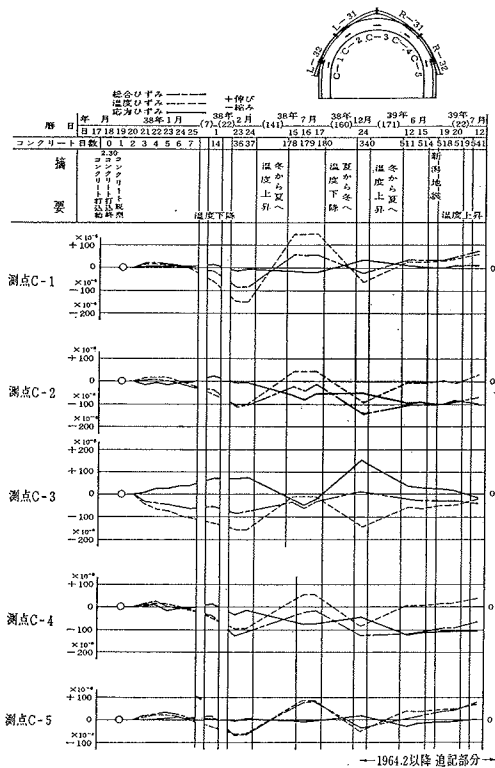


図-8 中野第1トンネル No. 3 コンクリート覆工のひずみグラフ



などがあって、純粋の弾性体として取り扱うことはできない。したがって測定したひずみ度と温度だけから応力を算出することは正しくないが、コンクリート覆工が上記のごとき形となっていることから、つぎのように考えることは相当の理由があることであり、また上記の観測

結果ともよく一致する。

コンクリート覆工の形とまわりの拘束支持の状態を考えると、「コンクリート覆工の天頂部の上が相当に大きい空洞となっているため、コンクリート覆工は垂直方向には伸縮が比較的自由であり、水平方向にはまわりの地山や鋼支保工に拘束されて伸縮しにくくなっている」ものと考えられる。これを5測点別に見ると、

- C-1, C-5 は垂直方向で拘束少なく、
- C-2, C-4 は斜方向でやや拘束をうけ、

C-3 は中央水平方向で最も拘束され、温度が上げば圧縮応力を生じ、下げれば引張応力を生ずる。ということになる。

「半年以上の長期観測からも、コンクリート覆工は地山の外圧などをアーチとしてささえているものではなく、ひずみや応力の変化の原因は温度変化が主要なるもので、覆工の形とまわりの拘束状態に注目しなければならぬ」ことが明らかとなった。

以上は 4. (6), (7) 特に図-8 および図-3 などより導かれた結論である。

(8) その後の覆工の長期観測としては、コンクリート打込み (38年1月18日) より約1年、最後の測定 (38年7月17日) より約5カ月を経過して、38年12月24日に再びひずみ観測が行なわれた。この夏から冬への間に周囲の状況やコンクリート自身がどのように変わったか、などを直接に知ることはできないが、図-8に追記したごとく温度変化と見かけのひずみ度の変化はカールソンひずみ計を通じて測定計算することができる。7月17日測定値を基準にして12月24日の測定値を対比して見ると別表の通り「変化の主要なるものは、温度変化とそれにもなる周囲の反応または拘束の状態によるものであることが推定される。これ以外の新しい外力の大きい変化が出てきたものとは認められない」。これを5点別に吟味すれば、

C-1, C-2, C-4, C-5の4点はいずれも温度降下  $\Delta t^{\circ}\text{C}$  に応じて収縮したことを示し、 $\epsilon_t$  と  $K\Delta t$  はあまりはなれた値とはならないので、まわりのこの方向に対する拘束も比較的弱いと判断される。

C-3 だけはやはり特別の変化を示した。夏から冬へ向っての温度降下  $\Delta t^{\circ}\text{C}$  (約  $13^{\circ}\sim 14^{\circ}\text{C}$ ) にもかかわらず、

第1種補正をしたひずみ度  $\epsilon_1$  が  $+48 \times 10^{-6}$  となっていて逆に伸びひずみを示しており、第1, 2種補正をしたひずみ度  $\epsilon_2$  も  $+177 \times 10^{-6}$  となっていて明らかに引張方向に応力の変化 (約  $37 \text{ kg/cm}^2$ ) があつたことを示した。このことは水平方向の拘束がしっかりしているために温度収縮が自由にできないで、この方向へ引張りを生じたものと解釈される。

以上の現象を総括して考察すれば、原則的には(7)の結論と同様であることがわかる。

(9) 夏季(7月16, 17日)より冬季(12月24日)への5か月間の変化を鋼支保工の測点について測定計算すれば図-7のとおりである。この図よりわかることはこの期間に温度降下は約  $14^\circ\text{C}$  から  $7^\circ\text{C}$  に降下し、第1種補正をしたひずみ度  $\epsilon_1$  はすべて収縮方向に変化があつたことを示しており、第1, 2種補正をしたひずみ度  $\epsilon_2$  したがって応力度の変化は比較的小さい値の土の両方向に表われ、圧縮応力  $99 \text{ kg/cm}^2$  から引張応力  $50 \text{ kg/cm}^2$  の間に変動したことを示した。

このことは「長期間において変化の主要なるものは温度変化であつて、まわりの拘束状態から見て温度伸縮による応力度の変化は余り大きくなく、その他に大きい外力の変化が起きたようには見えない。」

鋼支保工の長期観測からも(5), (7), (8)の結論が基本的に正しいことがわかる。

以上の結論のうち主要なるものをまとめるつぎのとおりである。

① 鋼支保工およびコンクリート覆工の働きの区分については1. および2. で主張したように、現在のトンネル工事の実情には従来の考え方はあわなくなつてしまひ新しい考え方が正しいことが証明された。

② 鋼支保工の働き方については、その形ばかりでなくそのまわりの支持拘束の状態が強く関係する。

③ 鋼支保工のひずみと応力については、施工時の当初の荷重と構造物の設置されたまわりの状態とが最も重要な関係にあるが、その後は比較的に変化は小さい。これに対しては温度変化を考慮しなければならない。

④ トンネル荷重については、施工時の荷重が最も重要で主要なるものであり、トンネル完成後もほとんど変化なくそのままひきつがれていくものである。

⑤ 支保工の構造とそのまわりの支持拘束の状況が適切でない場合には、わずかな変化、わずかな荷重の増加が大きい変化、大きい荷重を誘発することがあり、このことが全面的な破壊をもたらす原因となることもある。

## 6. 新しい考え方による利益と今後の研究

支保工および覆工に対して1. および2. で主張したことが、3. および4. の現場実測調査によって実証され、5. の結論が得られた。いまこの新しい考え方(傍

線)に立って設計および施工をすすめることによってどのような利益が得られるであろうか。また今後の発達と研究の方向はどちらに向うべきか。これらについて述べる。

(1) 新しい考え方に立って始めてトンネルの正しい設計および施工が可能となる。トンネル荷重はどのような性質のものであり、どのようにして発生し、どのようにして受け止められるか。トンネル崩壊を防いで空間を保持している主要な構造物は何か。またどのようにしてささえられているか。これらについての正しい認識の手がかりがこの新しい考え方によって提供された。

(2) トンネル荷重の主要なものはすでに施工時の初期に発生して、その後に追加された外力は地震のほか大きいものではなく、したがって施工時の荷重をささえることが最も重要であることがわかつた。

従来は土圧計などにより直接土圧を測定しようとしたが、そのデータはそこだけのものでこれから原則的なものをひきだすことはできなかった。新しい考え方を導きとして今後の研究を正しい方向にむけることができる。

(3) 鋼支保工は仮設物としてだけではなく主要構造物として働いているという考え方から、鋼支保を十分に使用しなければならなくなつてくる。そのため工事中の事故を少なくすることができる。

従来のトンネル事故は主として鋼支保工の立て込みやもりかえの際に支保工の節約のためにひきおこされることが多い。新しい考え方によって設計と施工を進めるならば事故の誘発を未然に防ぐことができる。

(4) コンクリート覆工は大きい外圧をささえてもいないしささえられるものでもないということから、コンクリート覆工厚をできるだけ薄くして節約することができる。また従来の施工ではコンクリート覆工を完全に施工するために大変な努力をしたが、その必要が少なくなつた。

(5) コンクリート覆工の巻厚をできるだけ薄くして全線一定の厚さにすることもできる。そのため掘削断面も最小限に止め、むだな掘削や無意味な上げ越しをやめてトンネル崩落の危険を防ぐことができる。

従来は土質が悪くて土圧の大きい所では、コンクリート覆工の巻厚を厚くして対抗するという考え方であつたから、悪い所は勢い掘削断面も大きくなってさらに崩落の危険を増大するという悪い結果を招いていた。コンクリート覆工の巻厚が大きいことは地震時にかえって逆効果となることもある旨、岡本教授の論文<sup>14)</sup>にも述べられており、トンネル断面が大きくなればなるほど、決して安全ではない。従来は大変なむだをやっていたわけである。

(6) 新しい考え方にしたがえば、土圧の大小に応じて鋼支保工の坑わくのピッチを変えてゆくこととなるた

め、掘削断面と鋼支保工のわくの形と大きさを全線一定にすることができる。これは鋼支保工の成型加工を楽にし使用も簡単にすることができる。

従来は土圧の大小によりコンクリート覆工の巻厚が変わってゆくので、掘削断面も鋼支保工の坑わくも変わってきていく通りかのもを設計製作しなければならない不便があった。

(7) 鋼支保工を永久構造物として重視し、コンクリート覆工を内張りとして節約することは、トンネルの施工中にも完成後にも構造物の耐震性を増すことになる。

(8) トンネル崩壊と事故の原因を診断する有力な手がかりが、この新しい考え方によって提供される。

従来の文献や報告に出ているトンネル事故の解釈には不合理なもの不明なものが多く、とうていわれわれの満足できないものであったが、新しい考え方によって始めてうなずけるものが少なくない。国鉄日振トンネル、国道新宇津谷トンネル、国鉄北陸トンネル、国鉄新幹線各トンネル、名神高速道路天王山・梶原トンネルなども改めてこの考え方によって考察すると、いままでよくわからなかった崩壊や事故の原因について認識を深めることができるであろう。

(9) トンネル荷重の実際はほとんど偏心荷重、集中荷重であり、荷重の支持機構と支持状態も特殊である。コンクリート覆工アーチは施工中はもちろんのこと、完成後もこのような荷重に耐えることはむずかしい。これに対しては鋼アーチ支保工の方がはるかに有利である。このような新しい考え方に導かれて支保工および覆工の正しい設計方法を見出すこともできるであろう。

(10) 支保工と覆工の今後の発達に対し、この新しい考え方は合理的目的的な方向へ改良を促進することができる。

(11) トンネルの荷重と構造物と施工に関する正しい考え方は、現在の鋼支保工とコンクリート覆工と機械施工を徐々に部分的に改良するだけでなく、さらに飛躍して支保工覆工の機能に適した全く新しい手段と材料を導入し高速安全な施工法に移ることも可能になるであろう。たとえば鋼支保工の代りにグラスファイバーの適当な型を研究するとか、覆工の場所打ちコンクリートをやめてブロック積みにかえるか、または内張りの機能に適したプラスチックの波板などを使用することは面白いと思われる。木矢板などもPSコンクリート矢板その他の耐久性のものにかえることなど考えられる。また軟弱地質の場合にはトンネルマシン、シールドなどの施工機械を利用するとか、支保材料としてはライナー プレー

トの利用などもよいと思われる。地質によってはロックボルトが有効である。

直接には以上のような利益が考えられるが、この現場実測調査はある特定の場所で行なわれただけであるから、今後の研究の進め方としては、このような調査をいろいろ異なった地質や施工方法の場合に実施して、なお多くの実測値を集積することが必要である。それによって単に定性的な結論だけにとどまらず、設計計算に直接役立つ数値もえられ、しだいに工事の実態に近づいてゆくことができるであろう。

本研究は筆者山本 元がトンネル覆工の合理的設計を求め、日本建設技術社々長山本 格がこれに応じて、建設省福島工事事務所と同社の協力のもとにすすめられた。この調査研究の企画と結論は筆者高木 薫が担当し、現場実測と計算は同社安田種平その他があたり、力学的研究については信州大学教授 工博 谷本勉之助氏の援助をうけた。なお工事現場の関係諸氏の協力に感謝する。

#### 参考文献

- 1) 山口 昇：On the stresses around a horizontal circular hole in gravitating elastic solid., 土木学会誌, 1929. 4.
- 2) Proctor & White: Rock tunneling with steel supports., 1946.
- 3) 土木学会編：トンネルと掘削工法, 1959.
- 4) 土木学会トンネル工学委員会：第1回トンネル工学シンポジウム, 1962. 6.
- 5) 土木学会：第17回年次学術講演会, 1962. 5. 坂本貞雄：トンネル鋼アーチ支保工の実験的研究, 田中常三・御子柴光春・牧 豊：コンクリートのクリープおよび弾性係数について(試験結果報告) 長谷川・鈴木; トンネルコンクリートに関する2, 3の実験.
- 6) 粕谷逸男：日振隧道工事誌, 「土と基礎」3, 4, 5, 6号 1953, 1954.
- 7) 野沢太三：膨脹性地山におけるずい道の土圧と施工法について, 「土と基礎」41, 42, 43号, 1960, 1961.
- 8) 北野昭夫：国道大断面トンネルにおけるV型鋼について(宇津谷トンネル), 1958. 12.
- 9) 坂本貞雄：トンネル鋼アーチ支保工に関する研究, 土木学会論文集第88号, 1962. 12.
- 10) 小野諒兄：隧道の建設および設計
- 11) 日本石炭協会：Glückauf, 1961, 1962 各巻.
- 12) 建設省・日本建設技術社：中野第2および高平隧道の覆工および支保工設計書, 1962. 3. (未公表報告)
- 13) 建設省・日本建設技術社：トンネル支保工覆工の応力解析調査, 1963. 2. (未公表報告)
- 14) 岡本舜三・加藤勝行・伯野元彦：地中構造物に働く地震力に関する研究, 土木学会論文集第92号, 1963. 4.
- 15) 日本道路協会：トンネル工事における鋼製支保工の利用について, 第7回日本道路会議, 1963.
- 16) 日本建設技術社：支保工および覆工の現場実測調査計画, 1962. 4. (未発表)

(1964. 2. 22・受付)

昭和39年度土木学会論文集編集委員

委員 長	奥村敏恵	副委員 長	三木五	委員	曾根学	委員	藤田嘉	夫
員	阿部津英彦	委	尾坂芳夫	多田宏	田野和	堀田重	孝	臣
員	栗津清浩	員	岡田光男	津野正	肥川博	増嘉	重	司
員	伊藤藤喜	員	神山林一	土中瀨	川明	松宮博	克	典
員	伊藤研昌	員	小寺重一郎	中村貢	倉正	村良	博	智
員	石池元一	員	小佐武雄	西沢紀	倉正	森時	夫	九
員	江大植沼	員	杉木昭雄	長谷川	川正	山和	夫	夫
員	西脇威夫	員	鈴木典	林	正	横	夫	一
委員 兼 幹事								

昭和40年2月15日印刷  
 昭和40年2月20日発行

土木学会論文集 第114号 定価 150円(〒20円)

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  
 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