

膨張性地山トンネルの鋼アーチ支保工の ひずみ計測と工法に関する研究

FIELD MEASUREMENT AND STUDY OF STRAINS IN STEEL
ARCH SUPPORTS FOR A TUNNEL IN SWELLING ROCK

佐久間七郎左衛門*
By Shichirōzaemon Sakuma

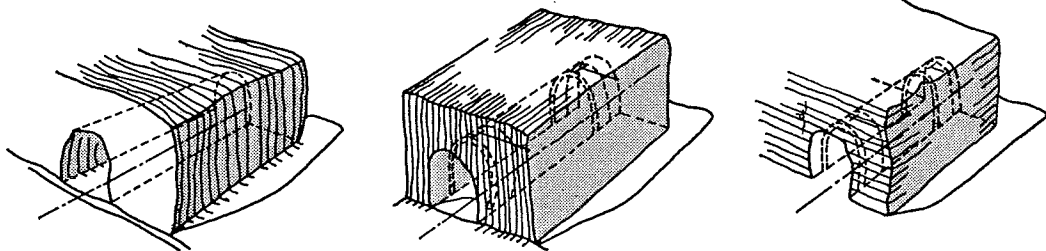
1. 緒 言

トンネルの地質は一般に個々のトンネルによって異なり、また同一の長大トンネルにあっても掘削の進行につれてつぎつぎに異なる地質状態に遭遇するのを常としている。したがってトンネルの掘削に当っては、地質の調査と地圧の観察はきわめて重要なことであり、これらは省略することのできないものである。過去の多数のトンネル工事において引き起こされた事故と失敗の記録は、その工事の施工者たと監督者たとを問わず、これらトンネル掘削上の根本問題について科学的に十分解明することの欠如によるものと思われる場合が多い。この研究は、著者が国鉄新幹線の新丹那トンネルにおける温泉余土区間に使用された H 形鋼アーチ支保工の地圧によるひずみを計測する機会を得て、昭和 37 年 8 月から 38 年 8 月に至る間、トンネル東口（来宮方）の工事現場にあって鋼支保工のひずみを計測し、その資料にもとづいて地圧の実態を把握するとともに、膨張性地山トンネルの掘削工法について考察し、あわせて鋼支保工の使用と掘削工法との関係について検討した結果を述べたものである。

2. 膨張性地山トンネルの様相

トンネルを掘削する際、あるいは覆工後に、トンネルに作用する力すなわち地圧は、本来つぎの諸原因にもとづくものであるということができよう。

図-1 トンネル軸に鉛直な走行があり、しかも鉛直な裂目のある場合 図-2 トンネル軸に平行な走行があり、しかも鉛直な裂目のある場合 図-3 トンネル軸に平行な走行があり、しかも水平方向の成層のある場合



- (1) 地山のゆるみ
- (2) a) トンネル頂部の土かぶり
b) 地殻構造からの力
- (3) 化学的あるいは物理的原因からの地山の体積膨張——膨張性地圧

(1) 地圧のゆるみによる地圧

その主なものはトンネルの頂部に作用する鉛直荷重であって、地質に応じていくぶん水平圧力も加わる。トンネルの掘り方の良否は地山のゆるみの大小、したがって地圧特に鉛直荷重の大小に影響を与える。支保工にあっては矢板と地山との間げきが地山をゆるめる原因となり、特に縫地の場合に多い。また地山のゆるみによってトンネルの頂部にできるアーチ状崩壊面の高さ h は時間とともに増大して最後に $h_{\max} = b/2 \sin \varphi$ となる。ここに φ は内部摩擦角、 b はトンネルのゆるみの幅である。つぎに地山は多くの場合、成層と変質破碎の状態に応じてそのゆるみ方が異なってくる。成層についていえば、トンネルの長さの方向の軸に関する可能な山の走向は無数に考えられ、たとえば Rabcewicz¹⁾ はトンネル軸に対する成層の関係をつぎの代表的な 3 つの主方向に類別している。

- (a) トンネル軸に鉛直に地層の走向があり、しかも鉛直な裂目のある場合：図-1
- (b) トンネル軸に平行な走向があり、しかも鉛直な裂目のある場合：図-2
- (c) トンネル軸に平行な走向があり、しかも水平な成層のある場合：図-3

* 正会員 工博 広島大学教授 工学部土木工学科教室

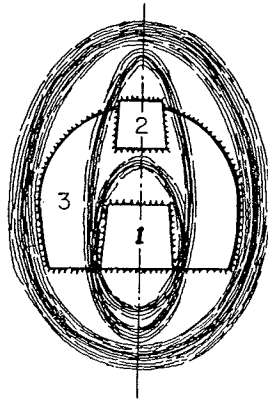
トンネル掘削上最も都合のよい成層は、上記のうちの(a)のようにトンネル軸に鉛直なものである。この場合は地山を特にささえなくてもおのおのの岩石層はそれぞれ自身だけで自然のドームを形成しており、しかもそのスパン長はトンネルの掘削幅に等しいと考えてよいからである。しかし鉛直な裂目があっても走向がトンネル軸に平行な(b)の場合は、(a)にくらべて本質的に不利である。すなわち、この場合はトンネルの横方向のドーム作用は考えられず、ただ各層が摩擦かせん断に強い物質で相互に結合されている時のみドーム作用を発揮できるものである。つぎに水平方向の成層の場合は、事情は一層不利である。この時は、各層は曲げの作用を受けるので、トンネル全幅をスパンとして考えなければならない。

(2) 地表面下深いところにあるトンネルの地圧

これは a) 地表からの深さに相当する地山の重量、および b) 地殻構造上からの自然固有な力によって生ずる力のことをいう。この地圧の大きさは地表面からの深さに比例し、地下数 100 m 以上の深部においては、地圧はあたかも水圧のようにトンネルの周囲から圧力を加えてくる。ただ水圧と異なる点は、地圧は方向によってその大きさを異にし、かつその伸張による変位は方向によって時間の経過を異にするのである。非常に深い地下において何故に覆工が比較的薄い巻厚で支障がないかの問題

について Wiesmann²⁾ は保護被帯の仮説を用いて説明している。すなわちトンネルは開削直後、地山岩石がある程度の物理的強度と弾性をもっておれば、トンネル周辺に岩石自体で抵抗する輪環状の保護被帯を形成して周辺からの地圧に抗するといわれる。トンネル掘削後に保護被帯が生成して、周囲からの地圧に対抗しうるようになるまでには多少の時間が必要であり、掘削時にはげしく押出してくる地質の場合は、掘削後およそ7日間ぐらいの経過を待って覆工を施工するのが実際的と思われる。またトンネル全断面が一度に爆破されずに、

図-4 トンネル爆破の各段階における保護被帯の形成



底設、頂設、切抜げの順序に掘削されていくときは、それぞれの段階ごとに保護被帯の形が変化してゆくことは図-4 に示したとおりである。地表面下深いところにあるトンネルの受ける地圧は、大部分地山の構造に関係し、したがって地圧が常に地表面とトンネルとの間の鉛直高さであるとするの

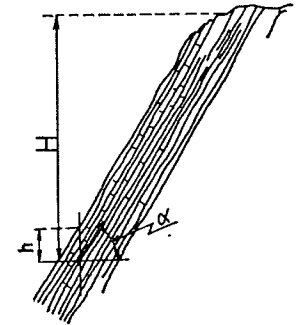


図-5 急傾斜地層におけるトンネルの土かぶり高さの決定

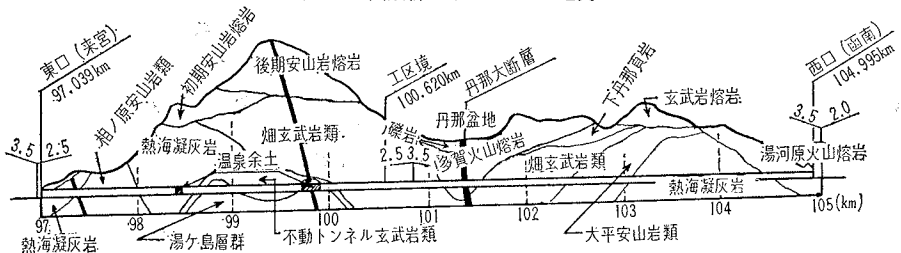
は正しいといえない。たとえば図-5において見るように、トンネル上の鉛直高さ h は小であっても、たまたま急傾斜の地層に位置しているトンネルには、図中 H で表わされる山の傾斜からの強圧を受けることになる。

(3) 地山の体積膨張による地圧

たとえば泥灰岩や温泉余土は水や空気に触れると容積が増大して、トンネルの周辺または側方から、時には底盤からも上方に向けて膨張してくる。ここに温泉余土というのは、岩石の生成後に、硫気孔または温泉溶液の通路の周囲にある岩石が熱蒸水の上騰に遭って変化して粘土化したものの称呼である。温泉余土は見たところは堅く、掘削には通常爆薬を必要とする。掘削直後は切りっ放しで崩れることはないが、いったん膨張しはじめるとこれをとめる支保工や覆工に強大な圧力をおよぼす。温泉余土には短期間に強大な膨張力を発揮するものと、数年間にわたってゆっくりと膨張作用を続けて、結局は非常に大きな圧力をおよぼすものがある。膨張する岩石がトンネルに与える圧力は、実地にトンネルについて行なう観察によって、はじめてその様相を知ることができる。

伊豆半島北部は第3紀中頃以後、火山活動が連続して起こったところといわれる。したがって新丹那トンネルも時代を異にするいろいろな岩質の火山噴出物のなかを掘り抜かねばならない。丹那トンネルの地質³⁾の概略は図-6 に示すとおりであって、丹那盆地はトンネルのほぼ中央に位し、トンネルを直角に横切る丹那断層を境に

図-6 国鉄新丹那トンネルの地質

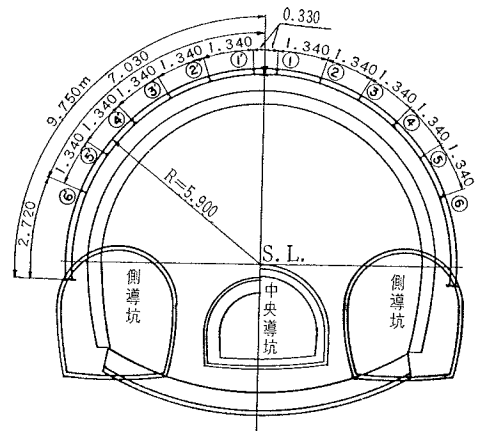


して地層の傾斜が反対になっている。この丹那トンネルにおける工事の難易は、断層の有無、湧水の多少、温泉余土の存在などによって、その進行が支配されてくる。丹那トンネルの温泉余土は、安山岩質溶岩と集塊岩が温泉作用をうけて、緑色粘土化したものであり、トンネルの東口方のみ発達している。トンネル掘進のとき、初め東口から1400m付近で遭遇し、ついで同じく東口から2800m付近に存在することがわかった。ことに、2800m付近のものはその延長が190mにわたっており、この位置は旧丹那トンネルの工事⁴⁾においても、東口方で最も困難とされた場所である。

3. 国鉄新丹那トンネルの膨張性地質区間の鋼支保工のひずみ計測

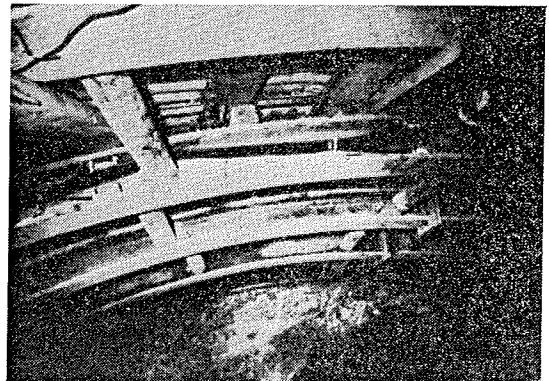
国鉄新幹線新丹那トンネルは標準軌間1.435mの複線型断面でその内空断面積は63.83m²であり、トンネルの延長は7956mで、旧丹那トンネルにくらべて内空断面積で26%大きく、延長で152mだけ長い。旧丹那トンネルの北側に50m離れて平行して掘進され、施工基面は旧トンネルより0.75~0.95mだけ高い。新丹那トンネルにおける掘削方式は、一般に底設導坑を先進させる上部半断面掘削工法が採られ、覆工コンクリートは厚さ50cmと70cmを標準とした逆巻工法である。この半断面には圧延H形鋼アーチ支保工(50kg/m)が用いられた。ただ温泉余土区間に限って、先進底設導坑と並んで左右に側導坑を掘進したのち上部半断面におよぶ工法がとられた。温泉余土地質区間には、特にこの目的のために製造された溶接H形鋼アーチ支保工(95kg/m)が用いられた。これらの鋼支保工はそのままの位置で、アーチコンクリートを打設し、もって覆工の一部を構成するものである。トンネル坑内における鋼支保工への地圧の作用については、Proctor and Whiteの著書⁵⁾記載の方法を参考にして、新丹那トンネルにおいて温泉余土の地圧力による鋼支保工への影響を坑内の現場において計測した。すなわち、トンネルの東口から2800m付近にある温泉余土地質区間で、昭和38年1月から38年8月に至る間、鋼支保工のうちから6基を選び、これにカールソンひずみ計を装着して、計測を継続した。使用したカールソン計器は計器長10cm、筒の直径2cmである。計器に内蔵された一対の抵抗線の抵抗比を測れば、その時に計器が受けているひずみにしたがって応力を求めることができ、またその抵抗値の和を測れば温度をも知ることができる。したがってひずみの変化はこの計器ではすべて抵抗比の変化のかたちで測定されるので、たとえ温度変化があってもひずみの測定値には影響しないことはよく知られているところである。溶接H形鋼支保工はあらかじめ曲げ加工したものを2部材を坑内へ搬入して現場に建て込み、アーチ頂部でパット

図-7 鋼アーチ支保工のひずみ計測点



ジョイントして支保工1基を形成し、支保工の両端脚部は、すでに打設されてある側壁コンクリート上に定着させる。ひずみ計は図-7に示すように、支保工1基につき12ヵ所に、各箇所とも内外フランジのいずれもH断面のウェブ側に装着した。すなわち支保工1基当たり24個の計器を配置した。各計器ともまず設置直後に最初の抵抗比と抵抗値とを測定し、以後毎日定時刻にこのような計測を続行した。カールソン計器から直接読み取るデータは抵抗比と抵抗値のみであるから、これらをデータシートに記入して、あとから坑外で必要な最終値に換算した。図-8は現場における計器の装着状態を示す。図-9、図-10は支保工6基についての計測結果のうちそれぞれ支保工No. IとNo. IIIの2例を示したもので、これによってこれらの支保工の各側点における経日による応力の推移を知ることができる。つぎに図-11は支保工No. VIのカールソン計器による温度計測の結果を示したものである。

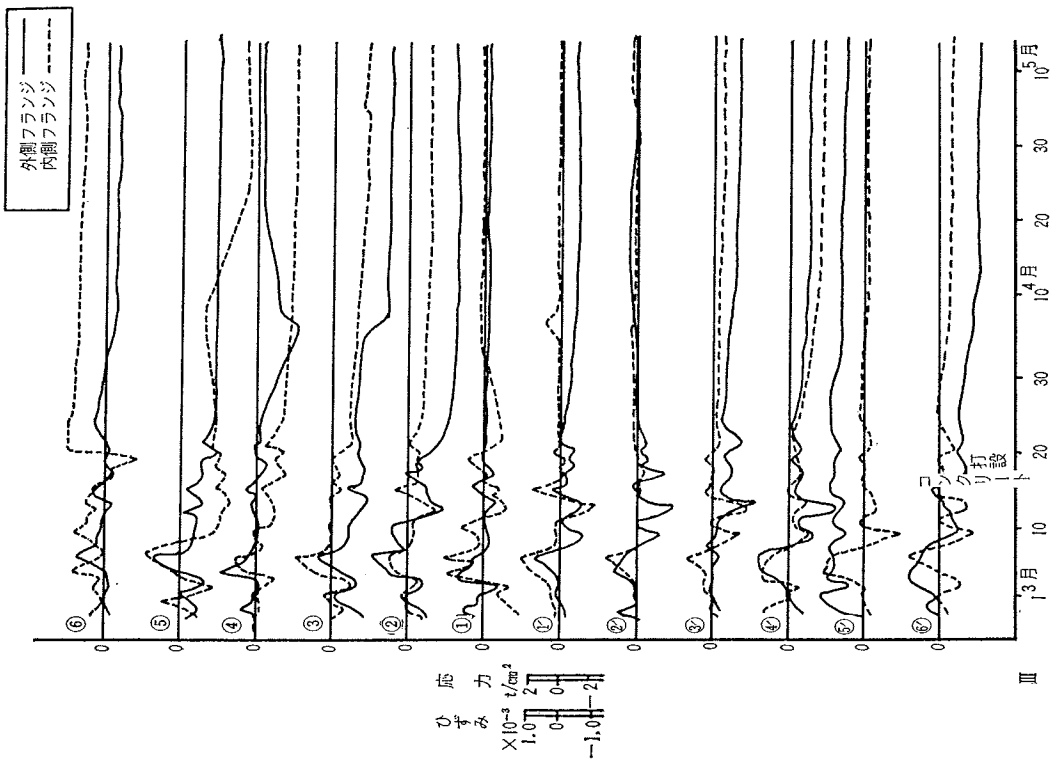
図-8 トンネル坑内における鋼支保工とカールソン計器



4. トンネル坑外における鋼支保工の載荷試験

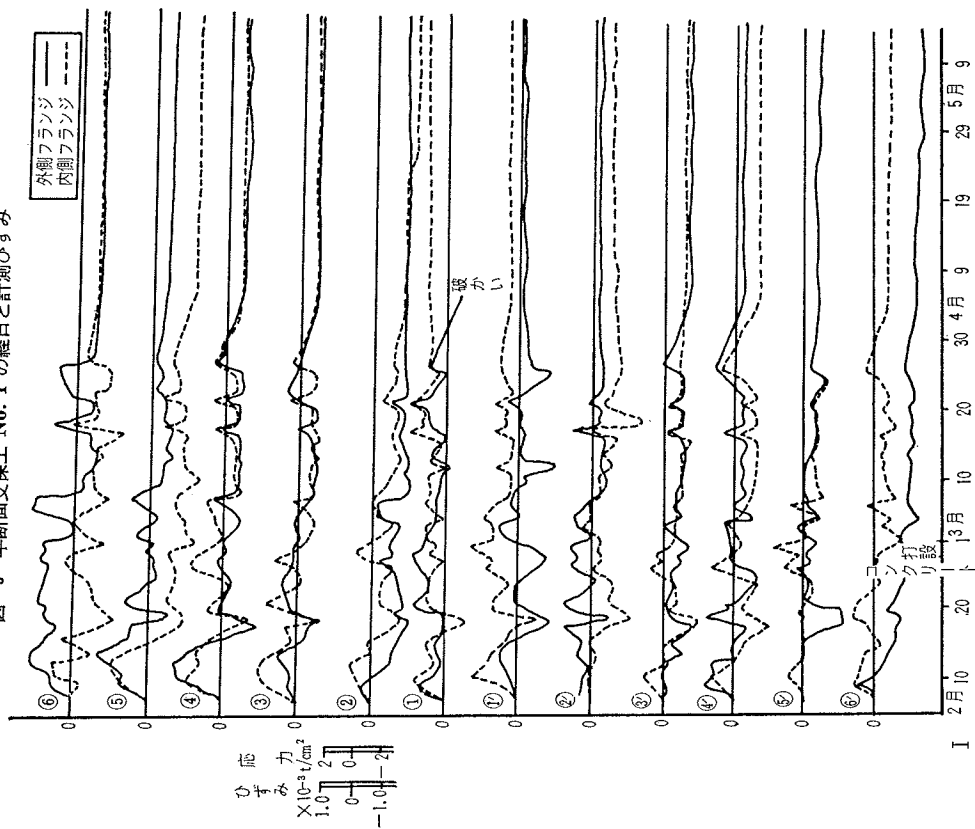
新丹那トンネルにおいて用いられた鋼支保工はこれをそのままコンクリート覆工に埋め込むので、これら支

図-10 半断面支保工 No. III の経日と計測ひずみ



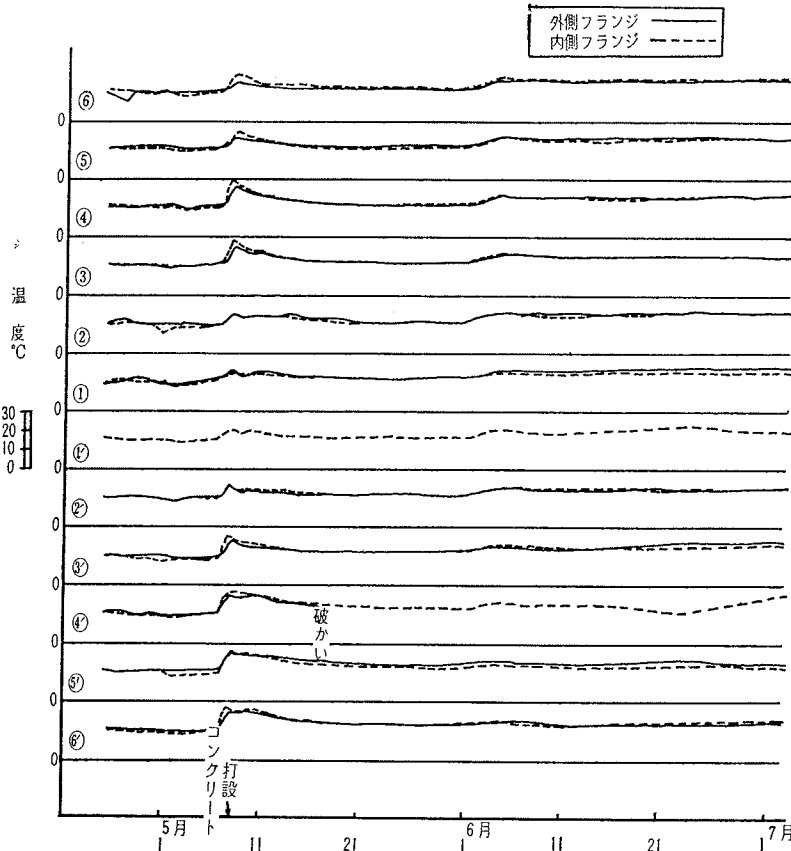
III

図-9 半断面支保工 No. I の経日と計測ひずみ



I

図-11 半断面支保工 No. VI の経日と計測温度

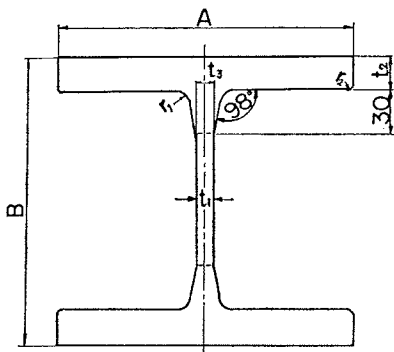


保工自身の強度を知ることは、トンネルに作用する地圧の推定にも役立つ、あわせて覆工の設計施工にも資する

表-1 鋼支保工の断面の性質

| 種別 | 重量 (kg/m) | 断面係数 (cm ³) | | W _x /W _y | 断面積 (cm ²) | 材質 | 引張強度 (kg/mm ²) | 降伏点 (kg/mm ²) (%) | 伸び (%) |
|----------|--------------|----------------------------|----------------|--------------------------------|---------------------------|-------|-------------------------------|----------------------------------|-----------|
| | | W _x | W _y | | | | | | |
| H200×200 | 94.9 | 816 | 334 | 2.45 | 120.8 | SS 41 | 41~50 | 23 | 以上21 |

図-12 鋼支保工の断面と寸法



寸法表 (mm)

| 種別 | A | B | t ₁ | t ₂ | t ₃ | r ₁ | r ₂ |
|-----------|-----|-----|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| H 200×200 | 200 | 200 | 12 | 25 | 12 | 8 | 3 |

ものと考えられる。トンネル工事に使用された各種断面の鋼支保工に関してはすでに坂本貞雄博士による貴重な研究業績⁶⁾がある。新丹那トンネルの温泉余土質区間に使用するため新たに製造された溶接鋼支保工について、トンネル西口坑外でその載荷試験を実施した。実験装置は鋼支保工を水平にして、かつ水平方向から載荷できるように、支保工の外周に沿って鉄筋コンクリートの壁体をつくった。供試支保工はトンネル坑外における実支保工と同様に1基当り12の測点を選び、各測点を通じて油圧ジャッキで鋼支保工へ載荷できる装置とした。各測点に順次1tの単位荷重を加え、これによって各測点の内外フランジに生ずるひずみを計測して応力の影響線を描いた。供試支保工は日本鋼管KKの製造によるもので、その断面と寸法は図-12

に示し、断面の性質は表-1に示すとおりである。

載荷実験台は支保工のいかなる箇所でも油圧ジャッキ

図-13 H 200 (95 kg/m) の応力の影響線 (内側フランジ)

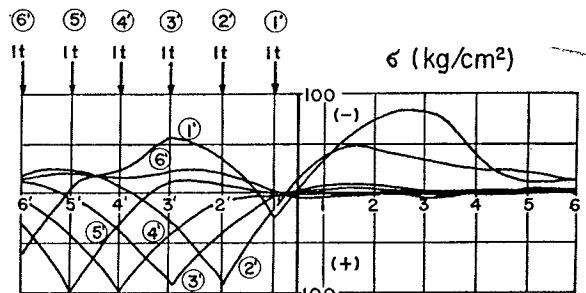
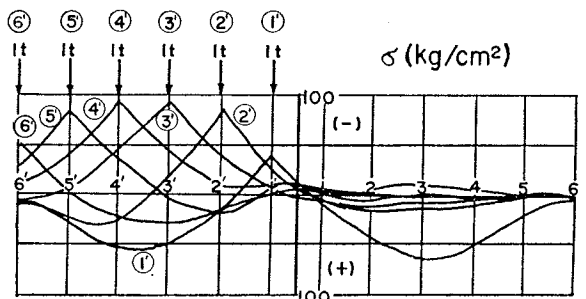


図-14 H 200 (95 kg/m) の応力の影響線 (外側フランジ)



を用いて載荷できるようなコンクリート構造物となっている。支保工のくさび点位置には弾性反力板と5tのスクリージャッキを組合せて支承条件をよくし、影響線図作製のための支保工荷重点には10tのオイルジャッキを用い、ブルーフィンリングをそう入した。支保工のくさび点の1カ所ずつに1tの単位荷重を加え、その時の各くさび点に生ずるひずみを、支保工の内外フランジに貼付したワイヤーストレインゲージで計測して、これから支保工の各くさび点に生ずるひずみ、したがって応力を求めた。図-13は内側の測点についての応力の影響線であり、図-14は同じく外側の測点について描いたものである。

つぎに鋼支保工の破壊試験をトンネル坑外のおなじ実験設備を使って実施した。破壊試験は上記の応力測定試験にくらべて荷重が大きいので、すべてのくさび点に、100tのオイルジャッキを用いて測点12カ所へ一斉に載荷した。試験は荷重と変形量との関係を記録しながら、支保工の破壊直前まで載荷してこの時の載荷量の総和を支保工の破壊荷重とした。供試支保工3基について実施した結果より1基当りの平均破壊荷重600tを得た。

5. 温泉余土の膨張性地圧

鋼アーチ支保工が地圧のために各くさび点において軸方向力 N と曲げモーメント M を生じたと考えると、それらの各測点断面のうける作用は、重心からの偏心距離 $e = M/N$ なる点に、断面に垂直な力 N が作用する場合に等しい。いま鋼支保工を現場に建て込んでただちにひずみ計を取り付けて計測を始めるとき、支保工の断面の中心を過ぎて中立軸をとり、外側フランジの測定応力度を σ_1 、内側のそれを σ_2 とすると、周知のとおり、

$$N = \frac{A}{2}(\sigma_1 + \sigma_2), M = \frac{W}{2}(\sigma_1 - \sigma_2), e = \frac{M}{N}$$

ここに A, W はそれぞれ鋼支保工の断面積と断面係数である。荷重点における断面の中立軸から距離 e の点を結ぶと圧力線が得られる。断面には垂直力 N と曲げモーメント M のほかになお地圧力によるせん断力が作用

図-15 支保工の測定点における地圧力の求め方

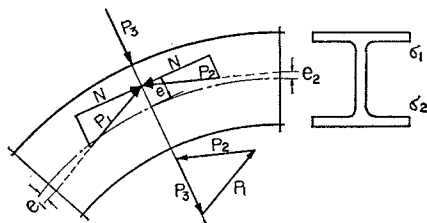
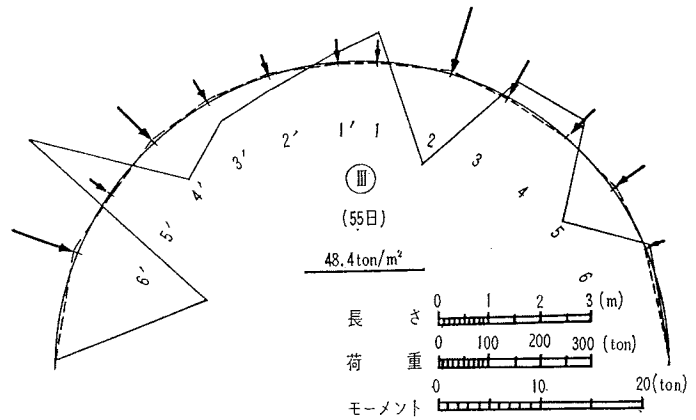


図-16 支保工 No. III の地圧力とモーメント分布



しているのです、このことは図-15において、 N を圧力線上に移した力 P_1 および P_2 が断面の両側から働き、なおせん断力に相当する地圧力 P_3 が働いているに等しいと考えてよい。したがってこの断面における力のつりあいから、外力 P_3 すなわちこの測定点に作用している地圧力を知ることができる。同様にしてこのような地圧力を半断面支保工のおのおのについて求めた。図-16は支保工 No. III の場合を例示したものである。図には支保工番号とともに計器取り付けから計測までの経過日数を併記し、圧力線を入れ、かつ荷重の大きさと曲げモーメントを示した。同図中矢印で表わしたものが作用地圧力である。

さて、坑内切羽において支保工を建て込むとき、くさび点に選んだ各測点間の外側フランジはその全幅にわたって均等に荷重がかからず、局部的なねじれや変形を生ずる可能性がある。したがって内外両フランジの測定応力から算出した地圧について、改めて考察を加えてみることにする。前掲の図-16の例において、しばらく外側フランジのひずみ測定値を除外して、内側フランジの計測値のみを用い、これとトンネル坑外での支保工強度試験の結果とあわせて作用地圧の推定を試みる。支保工 No. III の坑内におけるフランジの計測ひずみ、したがって応力は図-10に示されており、また坑外実験については図-13に示したように内側フランジの影響線が明らかに求められている。

図-17において、ある時期に坑内で計測された鋼支保工の内側フランジ応力が測定点 j で σ_j であり、坑外実験において、 i に1t荷重のかかったときの内側フラ

図-17 支保工の荷重点とひずみ計測点

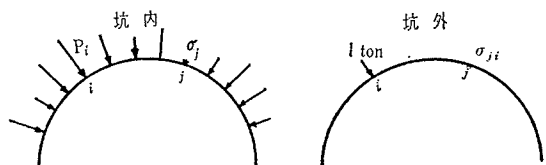


図-18 支保工 No. III の内側フランジのひずみからの地圧力分布

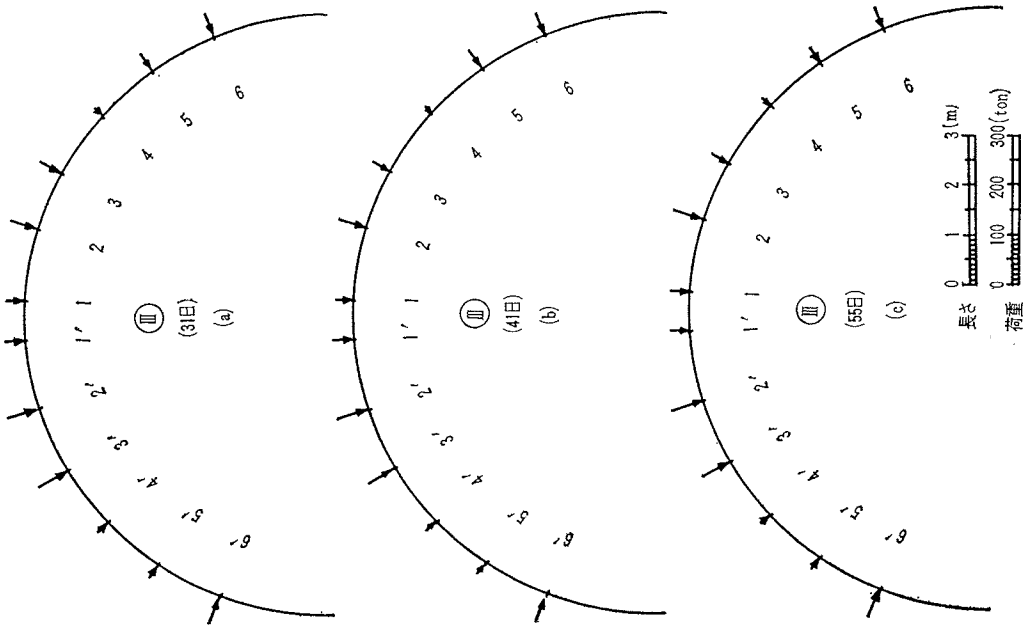


図-19 (a) 支保工 No. III の外側フランジにおける応力

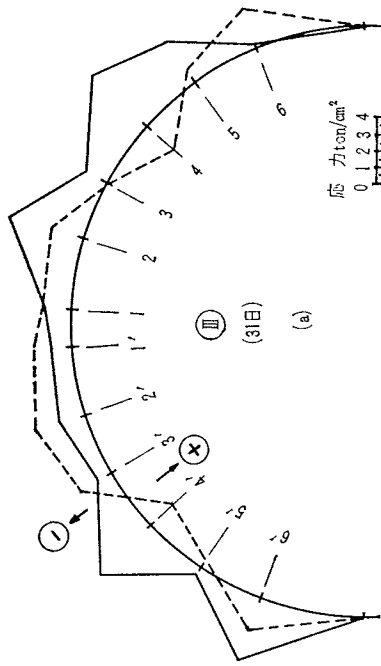
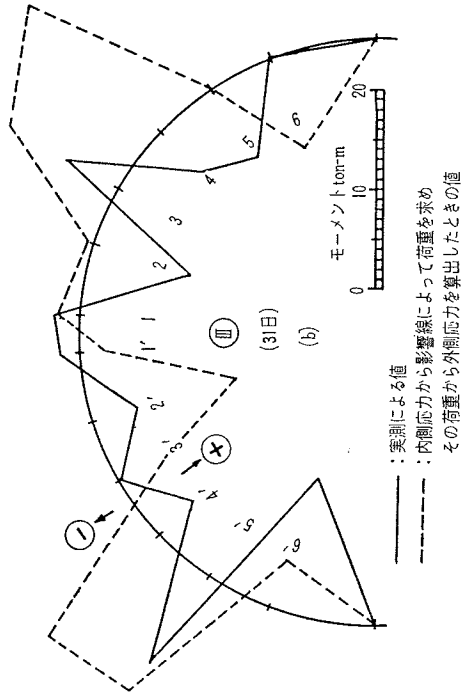


図-19 (b) 支保工 No. III の内外フランジ応力から求めた曲げモーメント



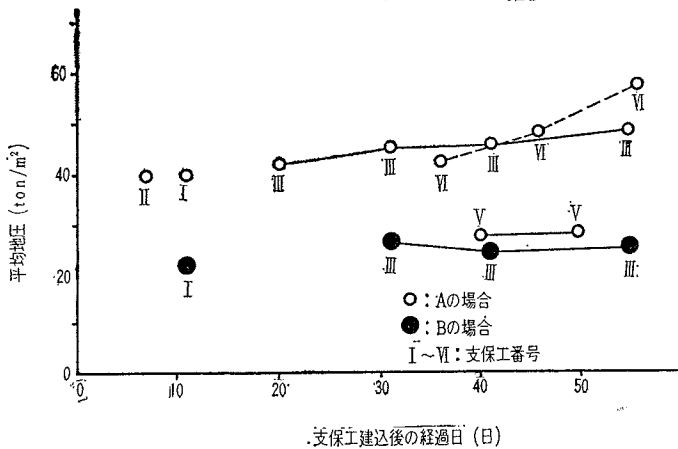
ンジ応力を σ_{ji} とする。これらはいずれも既知量であり、坑内において、 i に載荷された P_i が未知であって求めようとする直接地圧である。これらの間の関係は影響線の性質から次式で表わされる。

$$\sigma_j = \sum_{i=1}^6 (\sigma_{ji} \cdot P_i), \quad (i, j=6', 5', \dots, 1', 1 \dots 5, 6)$$

結局上式で表わされる 12 個の連立 1 次方程式を解いて 12 の P_i を求めることができる。図-18 は支保工 No. III の例においてこれらの地圧を算出して図示したものである。この値をさきに内外フランジ応力の測定値を用いて算出した 図-16 の場合にくらべると、荷重の最大値、平均値とも 1/2 程度となっている。このことは内側フランジ応力を両者の場合とも同じと考えると、外側フランジ応力が異なる値を示したことになる。すなわち実測値から、外側フランジへの応力を決定した場合 (A の場合とする) と、内側フランジの実測値と坑外実験から求めた影響線とから作用地圧力を 図-18 のように算出して、この地圧力を用いて外側フランジの応力を逆算した場合 (B の場合) とが若干相異なる結果を与えることになる。この両者の場合について外側フランジの応力と曲げモーメントをそれぞれ比較した一例が 図-19 (a),(b) である。図-20 はこのようにして得られた平均地圧を図示したもので、これから A, B の中間的な値として約 35 t/m² が得られる。

つぎにトンネル坑内における計測実験から求めた地圧力と、坑外における支保工の破壊実験から得た破壊荷重との関係について考察する。前述のように坑外における支保工の破壊荷重として 600 t を得た。この値は荷重が支保工上に均等に分布した場合におけるトンネル全幅にわたる合計値である。前に温泉余土区間における支保工のひずみ計測実験から平均地圧力 35 t/m² が得られ、ついで坑外における支保工の破壊実験によって知り得た破壊荷重 600 t を平均地圧力に換算すると $600 / (16.7 \times 0.9) = 40 \text{ (t/m}^2\text{)}$ を得る。しかも支保工は坑内において

図-20 経過日数による支保工への地圧の推移



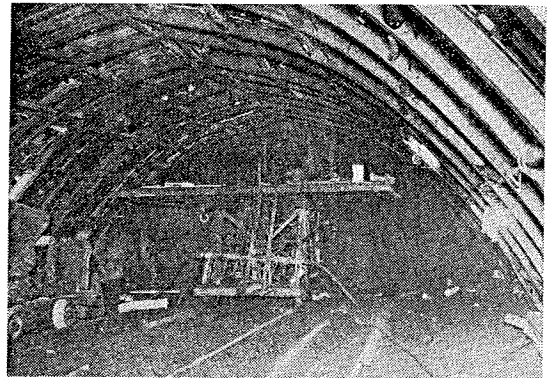
覆工コンクリートの施工によってこの値の 30~100% 程度の強度増加が期待できるので、結局覆工は平均強度において約 50~130% 程度の余裕を有しているものと見て大過ないことになる。

6. 膨張性地山トンネルの掘削方式

(1) 新丹那トンネルの温泉余土区間以外の一般区間の掘削方式

一般区間には変化のはげしい地質に適応できるものとして、底設導坑を先進させる上部半断面掘削方式が採られ、半断面には圧延鋼支保工 H 200×200 (50 kg/m) が使用された。すなわち底設導坑掘進ののち、上部半断面を切り抜けて鋼アーチ支保工を建て込みアーチコンクリートを打設する。ついで土平の部分掘削して、最後に側壁コンクリートを施工する。いわゆる逆巻工法である。半断面工法の利点は全断面工法にくらべて鋼アーチ支保工の部材が小さくてよいため、支保工費は経済的となる。新丹那トンネルで底設導坑先進の方式が採られたのは、これによってあらかじめ地質を確認することができ、また湧水を絞り抜くことができ、さらに半断面のずりをローで底設導坑へ落すことができることなどによるものである。半断面を核の部分を残してリング状に掘

図-21 一般区間における半断面支保工



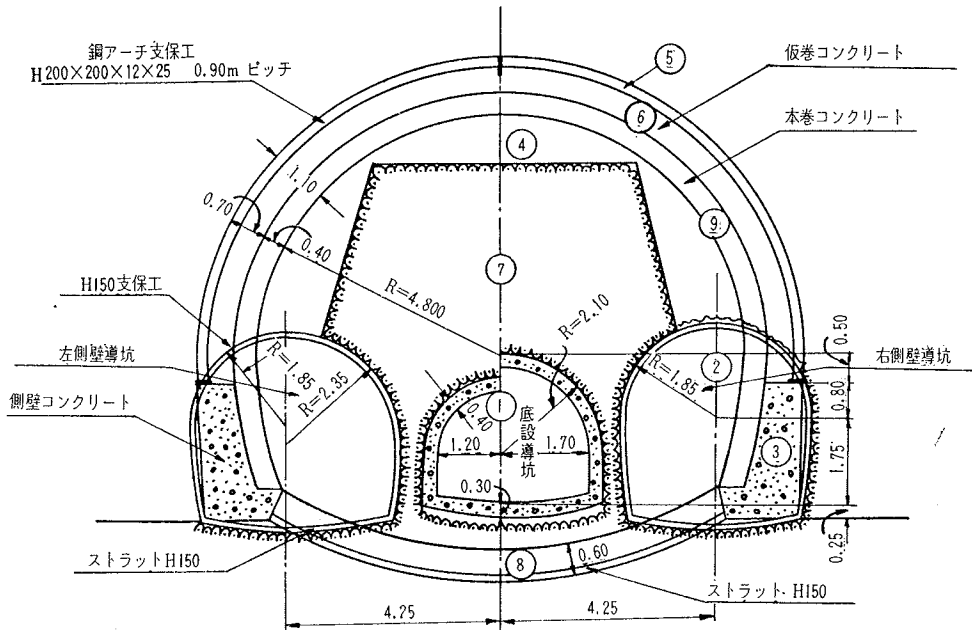
削したのち鋼支保工を建て込むので、急に予想外の地圧がかかることがあっても、これの補強対策がすみやかにでき、核部分を頼りに、山どめと支保工建て込みの足場を提供することができて有利である。支保工は圧延鋼 H 200×200×8×12 のもので支保工間隔は 0.9~1.2 m、覆工コンクリートの標準厚さは 50~70 cm である。

図-21 は一般区間における半断面支保工を示している。

(2) 新丹那トンネルの温泉余土区間の掘削方式

東口から 2800 m 付近にある温泉余土区間では、底設導坑を挟んで、左右に側導坑

図-22 温泉余土区間の施工順序



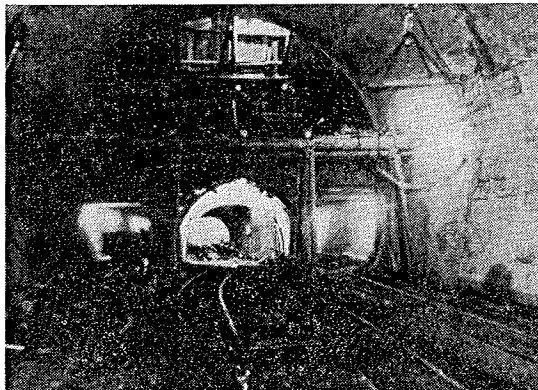
を掘進してのち上部半断面におよぶ掘削方式がとられた。ここに使用された支保工は溶接鋼 H 200×200×12×15 である。図-22 は温泉余土区間の施工順序を示したものである。底設導坑①に続いて側導坑②を掘進して側壁コンクリート③を施工する。ついで半断面④をリング掘りして鋼支保工⑤を建て込み、⑥のアーチ仮巻コンクリート厚さ 70 cm を施工する。つぎに核の部分⑦を掘削してずりを側導坑に落とし、インバートコンクリート⑧を打設して、最後に⑨のアーチおよび側壁の本巻コンクリート厚さ 40 cm を施工するのである。図-23 は底設と左右の側導坑を示している。

(3) 掘削方式の考察と近代工法

トンネルの掘削方式は、一般にその延長、地質、断面形、工期などから決定される。国鉄新幹線のトンネルは複線の大形断面である。大形トンネルもその地質の膨張

性の有無、断層、湧水の多少によっておのずからこれらの条件に適する掘削工法が決定されなければならない。わが国では地質が変化に富んでいて、長大トンネル掘削の場合いくつかの断層に遭遇するのが常である。このような複雑な地質に対しては、現在一般に半断面掘削工法がとられており、その覆工は原則として逆巻工法である。新丹那トンネル工事においても、一般区間にはこの半断面掘削の逆巻工法が行なわれ、底設導坑併進式がとられた。一方東坑口から 2800 m 付近は温泉余土に特有の大きな膨張性地圧を發揮し、両側方からも大きな横圧力が加わるので、もしここに一般区間におけると同様な掘削方式をとって逆巻工法を適用する時は、鋼支保工の建て込み後に、側壁コンクリートを打設して根継ぎをする前に、支保工の両端脚部が温泉余土の横圧力のためにトンネル内方へ向って変位する場合が起こって、つぎに打設される側壁コンクリートとの接合が適正に行なわれないおそれが生ずる。したがって温泉余土区間では、逆巻工法に代って、初めに中央の底設導坑を挟んで左右の側導坑を掘進して側壁コンクリートを打設後に、鋼支保工を建て込んでその両端脚部をこの側壁上に定着させるという方法がとられた。これによって鋼アーチ支保工は側壁コンクリートを土台として十分にその強度を發揮できる。温泉余土区間はその全長にわたってインバートコンクリートが施工され、この結果、トンネル断面の全周をコンクリート覆工で包囲することになる。これは膨張性地圧の存在するところではきわめて合理的な設計である。最近における膨張性地山トンネルの掘削で最も大きな特徴は、側導坑先進と半断面における鋼支保工の使

図-23 底設導坑と左右の側導坑



用をあげることができる。新丹那トンネルの場合、温泉余土区間で、時にインバートコンクリート打設以前に、横圧力のために側壁コンクリートにきれつを生じたり、またこれがはなはだしくトンネル内方へ押し出してくることがあった。このような観点からすれば、強大な膨張性地圧の存在するトンネル掘削に当っては、初めにインバートコンクリートを打設し、つづいて側壁コンクリートを施工して、インバートと側壁とを一体の構造物としたのち、上部半断面の掘削におよべば、鋼支保工の両脚部を側壁コンクリート上に適確に置くことができ、しかも地山の横圧力にも抵抗して大きな効果があるものと思われる。

新丹那トンネルの温泉余土地質区間の鋼支保工のうちから6基を選んで、カールソン計器によるひずみ計測を実施したのであるが、比較的長い計測期間にわたって得られた測定結果の中には、計測開始時には完全であった計器がその後不調になったと判断されるものがあり、また坑内作業の関係から、時に爆破の影響による計器の故障と思われるものもあって、支保工1基に装着された計器が最後まですべて完全であったものは少なく、ために地圧図は計測支保工のすべての場合にわたっては得られず、ここにはこれらの中からややまとまった計測値の得られたものについて考察した。

温泉余土区間における底設導坑を補強するためのコンクリート仮巻は、早く強大な膨張性地圧のために破壊し去ったが、この底設を改築して、導坑内空断面を回復したのち、左右の側導坑の掘進に取りかかった。しかしこの側導坑で使用した一時的な鋼支保工も、地圧の激増のためにやがてつぎつぎに座屈圧潰していった。しかし側導坑を掘進したために、それに続いて上部半断面の掘削にかかった時の地圧は大いに軽減されて、半断面の施工は支障なく行なわれたと見ることができる。こうしたことから見れば、膨張性地質たる温泉余土に対して、側導坑先進の半断面掘削工法はおおむね適切妥当な工法であるといえよう。

7. 結 論

この研究は国鉄新幹線の新丹那トンネルの温泉余土地質を例にとって膨張性地山トンネルの特性について記し、この区間に使用された鋼支保工の地圧によるひずみを計測してこれに考察を加え、あわせて膨張性地山トンネルの工法について検討したものである。

昭和34年に着工された新幹線では複線の大型断面をもつ長大トンネルが多数施工されたが、これらのトンネル工事では全般的に鋼支保工が使用された。従来のわが国のトンネル工事ではおおむね木材支保工が使用されてきたので、これに原因するトンネル工事の災害事故は避けることのできないものであった。このたびの新丹那

トンネルでは、木材支保工に代って、特に製作された鋼支保工を使用し、しかもこれはそのままコンクリート覆工に埋め込まれて覆工材の一部を構成するので、従来の木材支保工の場合の盛り換えなどに原因するトンネル事故はなくなった。たまたま著者が国鉄静岡幹線工事局の委嘱を受けて、新丹那トンネルの東口方に存在する膨張性地質区間の掘削に使用された鋼支保工の、地圧によるひずみを計測する機会を得たので、みずからトンネル現場にあって計測実験を行ない、これより得られた計測結果から、地山の作用地圧の推定を試みたものであり、あわせて膨張性地山トンネルの掘削工法についての著者の見解を述べた。

本研究の内容を総括し、得られた研究成果を要約するとつぎのとおりである。

(1) わが国におけるトンネル工事において、膨張性地山の区間がかなり難工事となる実情にかんがみ、かかる区間のトンネル工事には、土質力学的見地からも膨張性地質の様相を十分考慮して、鋼支保工などを用いた近代的な工法を適用すべきであるという著者の見解を明らかにした。

(2) 新丹那トンネルの温泉余土区間の工事途上における鋼支保工のひずみ分布を2,3ヵ月にわたって連続計測して、これから鋼支保工に生ずる実応力の推移を把握し、あわせて支保工にかかる地圧の推定に対する実測資料を提供することができた。

(3) 新丹那トンネルの温泉余土区間に使用した鋼支保工を実例にとりて、供試鋼支保工の力学的な性状を把握するために、トンネル坑外で実物載荷試験を行ない、これから得られた影響線を利用することによって、かかる鋼支保工の応力分布と破壊強度とを明らかにした。

(4) 坑内における支保工のひずみ分布から直接に、あるいは坑外実験の結果をもあわせて用いることによって、地山よりの作用地圧を推定する方法を提示するとともに、新丹那トンネルの鋼支保工の有する安全率は、約1.5~2.3程度であろうことを推察した。

(5) 長大トンネルの掘進に当っては鋼支保工を使用することの有利性を指摘し、新丹那トンネルの膨張性地質区間で採られた底設導坑と側導坑先進後、上部半断面を掘削して鋼支保工を用いるという工法のおおむね適切なことを、ひずみ計測の結果より裏付けることができた。

(6) 著者がかつて国鉄に在職中に経験した建設線トンネルの膨張性地質や今回の新丹那トンネルの実情から見て、著者はかかる膨張性地圧の強大な区間では、底設導坑掘進後、まずインバートと側壁部分とを一体の構造物としたトンネル下部のコンクリート覆工を施工したのち、上部断面の掘削を行ない、これに鋼支保工を用いるという工法が、より合理的であることを考察して、かか

る工法を推奨した。

著者は新丹那トンネルの温泉余土地質区間の事例について、鋼アーチ支保工のひずみ計測を中心として上述のような研究成果を取めることができた。かかる膨張性地山トンネルの様相は複雑であり、なお今後に残されている学術上技術上の問題点も少なくないが、従来多く経験に依存し勝ちであったトンネル工事に、本文の成果は科学的な研究結果にもとづいて設計施工をするという機運を育成する上に一つの有力な新しい資料を提供し得たものと信ずる。

この研究を取りまとめるに当っては、京都大学工学部の小西一郎教授、後藤尚男教授から終始御指導を仰いだ。また当時の国鉄静岡幹線工事局長 坂本貞雄博士からは、新丹那トンネルにおいてこの研究に関する実験を

実施する機会と援助を与えられた。さらに実験計測中は来宮幹線工事区、鉄道技術研究所、および間組熱海建設所の関係の方々から熱心な協力を得た。ここにこれら関係各位に対して衷心から感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) v. Rabcewicz : Gebirgsdruck und Tunnelbau, Wien, 1944.
- 2) Wiesmann : Ein Beitrag zur Frage der Gebirgs-und Gesteinsfestigkeit, Schweiz, Bauztg, 1909.
- 3) 久野 久 : 旧丹那トンネルと新丹那トンネルの地質, 科学, 1962年8月.
- 4) 国鉄熱海建設事務所 : 丹那トンネル工事誌, 昭和11年.
- 5) R.V. Proctor and T.L. White : Rock Tunneling with Steel Supports, Youngstown, Ohio, 1946.
- 6) 坂本貞雄 : トンネルの支保工と覆工に関する研究, 昭和36年9月.

(1965. 4. 5・受付)