



解説

応力測定と掘削による応力再配分過程

ザウアー博士 NATM 講演会報告

*G. Sauer & C. Tanimoto*G・ザウアー**
谷本 親伯*

1. はじめに

日本における NATM の適用現場も 50 か所近くに上り、経験も日ごとに豊富になりつつある。オーストリアにおいては、すでに二十数年の歴史を持っているが、欧州でも NATM が注目され始めたのは、1975 年代に入ってからである。日本でも 1975 年（昭和 50 年）以降非常に高い関心を持たれ、その有利な点が認識されようとしている。施工技術の面では、大きな問題はないようであるが、具体的な設計方法や現場計測データの施工へのフィードバックについては、試行錯誤の状態にある。一方、トンネルの対象となる地盤は、おのおの力学的特性や施工環境などの条件が異なり、一律に論ずることはきわめて困難であることも周知の事実で、オーストリアにおいてさえも標準的な方法は存在していない。過去の経験の蓄積や現場計測、優秀なコンサルタントの活躍に負うところが大きいようである。決定的な方法を持ちえないのが、トンネル工事の難しさでもあり、また面白さでもあるといえ、諸先輩からお叱りを受けるかもしれない。

このたび、オーストリアよりザウアー博士 (Dr. Gerhard Sauer) が財団法人大阪土質試験所の短期研究員として来日され、現場視察とともに、日本トンネル技術協会のお世話で、去る 1980 年 7 月 10 日午後、東京において、「ザウアー博士特別講演会」が開催された。ここに、博士の講演内容と若干の補足説明を報告するものである。

博士は、1944 年生まれで、西独カールスルーエ大学にてレオポルド・ミュラー教授の指導下で「トンネル掘削による周辺地盤内の応力再配分と地表面沈下」というテーマで学位を取得され、同大学の講師を経て、1977 年より今年 1 月まで、パッハー博士のコンサルタント事務所で、NATM の設計と施工管理の実務に従事し、この間フランクフルト、ポッフム、ミュンヘンの地下鉄工事

やガンツシュタイン、タウエルン、アールベルグ、フェンダーなどの山岳トンネル工事に関係するとともに 19 編の論文を発表している。また、今年 1 月より I TA のオーストリア国内委員会事務局を担当し、自分自身の事務所を設けるなど、若手ながら学理面から実践面まで豊富な経験を背景に NATM に関して、もっとも活躍している技術者の 1 人である。

講演会の参加者は、130 名で酷暑にもかかわらず盛況であった。講演時間 3 時間のうち、約 1 時間は博士自身の担当したフランクフルト地下鉄およびガンツシュタイントンネルの工事記録映画が上演された。

2. NATM 概説

2-1 NATM の定義

I TA・オーストリア国内委員会の公式見解として、NATM を次のように定義している。

新オーストリア式トンネル工法 (NATM) は、岩盤または土質地盤でのトンネル掘削に際し、トンネル周辺の地盤内に中空円筒状の支持リングを発生させることを目的とするものである。そのためには、次のような原則に従わねばならない。

- (1) 地盤の力学的特性を考慮する。
- (2) 適切な時期に、適当な支保を設置することにより地盤内に発生する好ましくない応力・ひずみ状態を避ける。
- (3) 特に、中空円筒として力学的に十分安定した構造とするためには、完全な円形断面となるようにリングを閉合しなければならない。
- (4) 現場計測により地山の挙動を監視し、変形許容量に従って、支保の最適化をはかる。

2-2 対象となる地質

NATM の適用範囲は広く、硬岩から低固結度の砂岩、マイロナイト化作用を受けた破碎帯 (圧碎帯)、あるいは軟弱な粘土に対しても適用することが可能である。崖

* コンサルタント、オーストリア・ザルツブルグ市

** 京都大学工学部土木工学教室講師、工博

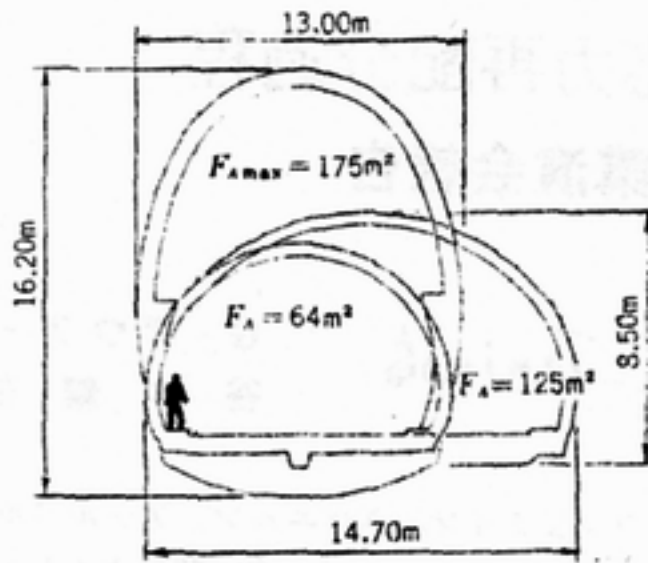


図-1 NATMを適用した道路トンネルの例（2車線，3車線，4車線）

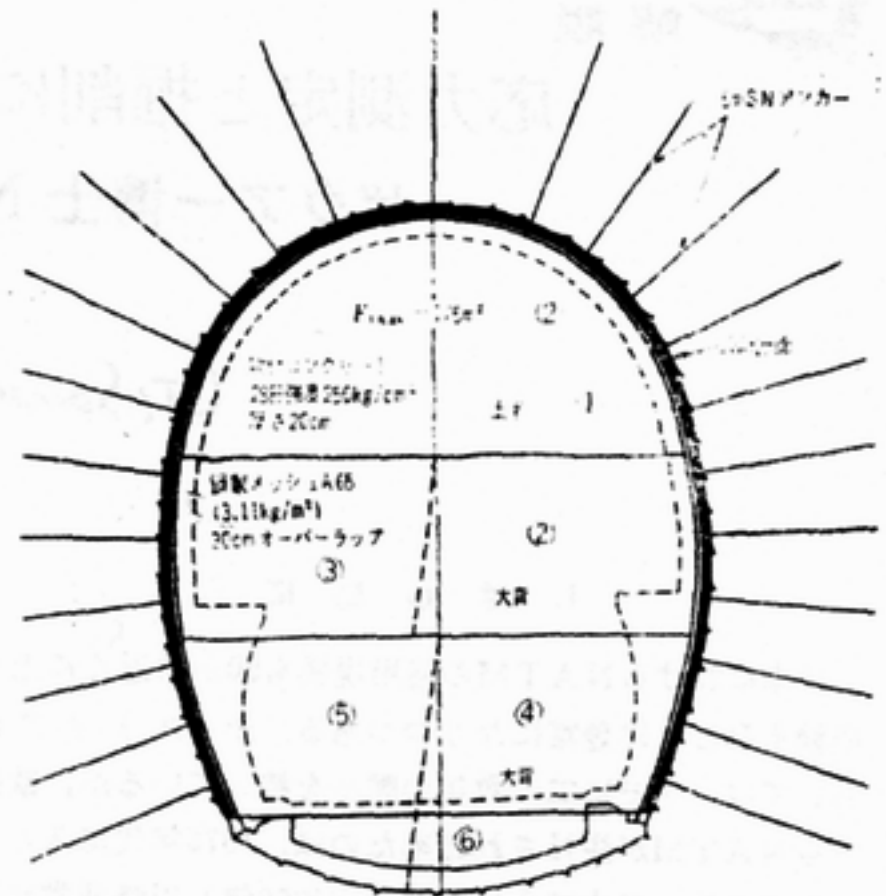


図-3 6段階に分割した2階構造のギガラットトンネル

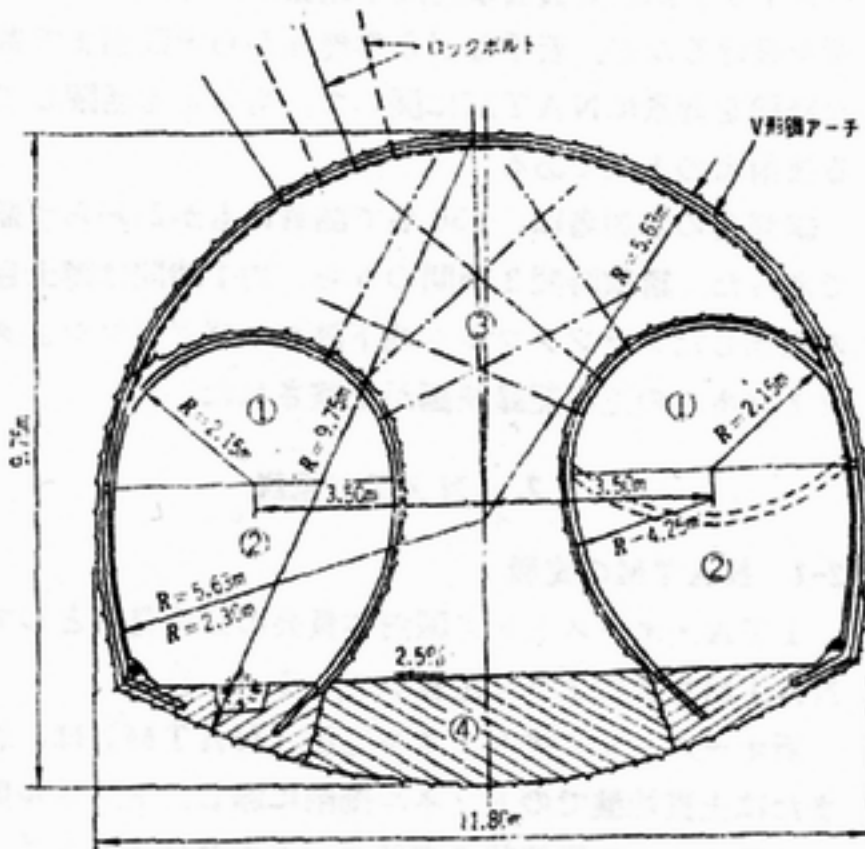


図-2 ガンツシュタイントンネル掘削次第図（側壁導坑を2段階に分割して掘削，全体を4段階に分割している）

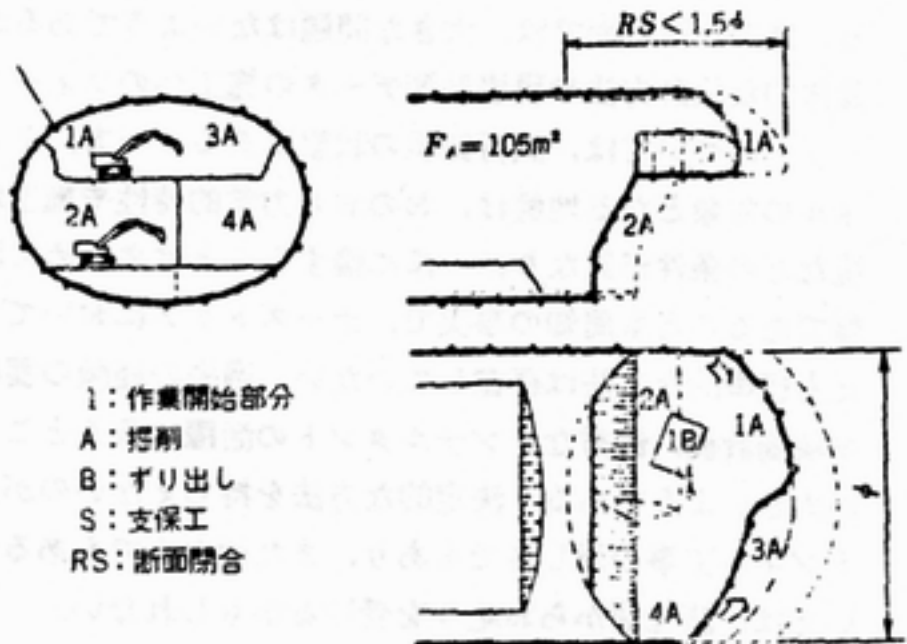


図-4 硬質粘土中のトンネルを4段階に分割した例

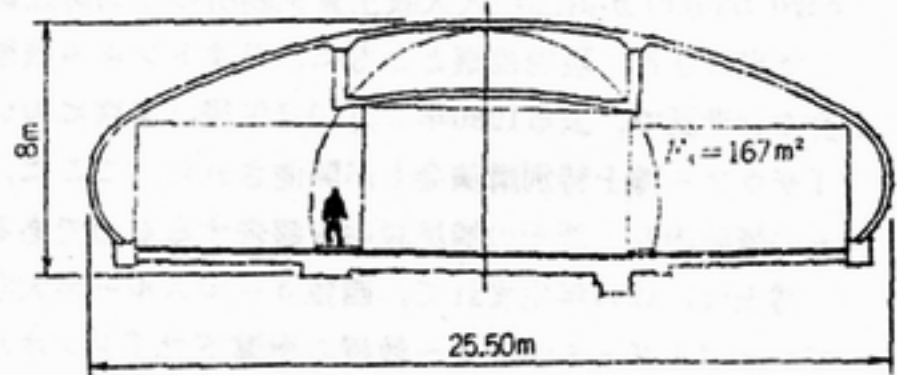


図-5 道路トンネル内のUターン用拡幅部進部分をリングとして閉合することにより，自由に進めることができる。

従来の工法で使用していた機械類はすべて使用でき，適正な配置により良好な進行を上げることができる。

一方，誤って応用した場合，次のようなことが生ずる。つねに安価な支保工で可能とは限らず，地山の評価を誤った場合は，高価につくことがある。強大な地圧下にある軟岩トンネルでは，多量の長いボルトや鉄筋網を併用

錐帯についても良好な結果を得ているし，数時間程度しか切羽の自立しない地山や粘着力のきわめて低い地山に対しても，特殊な工法を併用することなく適用できる。

2-3 断面形状

NATMは，どのような種類の空洞をも取り扱うことができ，断面形状が頻繁に変化しても適用できることが，大きな利点である。主なる応用例としては，大断面の道路トンネル（図-1～5），断面形状の変化が多い地下鉄とその駅部，分岐部，引込線部，および地下発電所，備蓄空洞，地下工場などの空洞があげられる。

2-4 施工法

支保工用の鋼枠を建て込んだり，覆工用の型枠を組み立てることがないため，掘進作業のために大きな自由空間を得ることができる。上半・側壁・底設導坑先進工法，ベンチ工法いずれに対しても適用でき，必要に応じて先



写真-1 フランクフルト地下鉄工事現場での吹付コンクリート作業

写真-2 吹付コンクリート覆工の詳細

した吹付コンクリートあるいは鋼製支保が必要となることがある。吹付コンクリートに縦断面方向のスリットを入れた場合、頻りにクラウン部を補強する必要が生ずる。

鋭角的な隅部をもった上半断面を進めすぎると、応力集中により剪断面が発生し、コンバージェンスが一様でなくなり、大きな変形を生じて、不安定となる。また都市トンネルでは、大きな地表面沈下を生ずることになる。

切羽の前進に際し、切羽の後方、トンネル直径の1.5倍以内の範囲で下半を閉合することが重要である。これにより、コンバージェンスを少量に、また一様にする事ができ、岩盤の緩みを抑え、支保工の費用を低減することができる。都市トンネルでは、地表面沈下を少なくし、上部の既設構造物の損傷を最小限に抑えることができよう。不良岩盤においても、できるだけ早急にリングとして閉合することにより、余計な支保を必要としないことが多い。

大規模な機械を用いて大断面もしくは全断面を掘削しようとする場合は、切羽は、十分に安定していなければならず、稼働能率を高めるため広いフラットな足場またはベンチを必要とし、不安定な断面形状となることが多い。また、重機の使用により各作業が分断されるため、導坑先進工法よりも進行が遅くなってしまうことがある。施工計画を吟味し、余計な待ち時間の発生を防ぎ、各作業の流れや組合せが円滑に行われるよう配慮すべきである。

NATMによる分割掘削工法の利点は、導坑自体をリングとして安定した構造にすることにより、かなり強大な地圧下においても特別な支保を必要とすることがなく、崩落などの危険を予知して、これを避けることが可能である。また、地質調査や排水処理、換気などにも役立つ

であろう。反面、比較的進行が遅く、各導坑断面の保持のため使用した支保は仮設となる。また、超小型の掘削機が必要となることもある。

場合により、次のような特殊工法が併用されることがある。

圧気工法、泥水シールド工法、薬液注入工法、凍結工法、パイプルーフ工法、鋼矢板・鋼管矢板推進工法などである。

NATMの施工手順の一例として、フランクフルト地下鉄の例をあげることができる。まず、掘削作業の進行とともに、鉄筋網と鋼製支保を設置し、次にロックボルトを挿入し、その後に吹付コンクリートを打設する(写真-1, 2)。また、他の例では、作業員の安全のため、最初に薄い吹付コンクリートか、短いロックボルトを設置することも多い。

計算や予測を確かめるために、いろいろな現場計測をする。これは、NATMの必要不可欠な部分である。現場計測の内容は、大体次のとおりである。

計算や予測を確かめるために、いろいろな現場計測をする。これは、NATMの必要不可欠な部分である。現場計測の内容は、大体次のとおりである。

- (1) 変形測定(コンバージェンス, 岩盤内ひずみ)
- (2) 応力測定(半径方向, 接線方向)
- (3) 荷重測定(ロックボルト張力, 鋼製支保反力)

2-5 NATMの実例

(1) ミルヒバクトンネル

チューリッヒ市街地下に建設された3車線道路トンネルで、風化した氷成堆積層とマールや砂岩の砕屑物を主とした第三紀層を買いたものである。凍結工法により、殻を造り全断面掘削にて施工した。支保は、吹付コンクリート、ワイヤメッシュ、鋼製支保により、リングの閉合は、油圧ブームに取り付けたケージによる足場を利用し、トンネルの直径より短い距離内で行った。

(2) ガンツシュタイントンネル

幅200mの極度に圧砕された石英の微粒集合体を側壁導坑先進工法で突破した2車線道路トンネルの例である。全長2km、断面積100~110m²、主なる地質は石灰岩で、1976~80年に施工された。問題となった圧砕帯は、かぶり25mで、200mを掘進するのに5か月を要した。圧砕部の石英の粒径は0.02~0.07mmで、ほぼ一様であった。当初、変形が著しいため、頂設導坑先進で木製支保工を使用し、クリスマス休暇のため2週間切羽を止め、作業を再開したところ崩落した。対策を検討した結果、側壁導坑先進工法を採用し、7時間以上切羽を静止させないことが指示された。側壁導坑は2段階のベンチ掘削とし、進行を速くし全断面を切り広げたところ大した問題もな

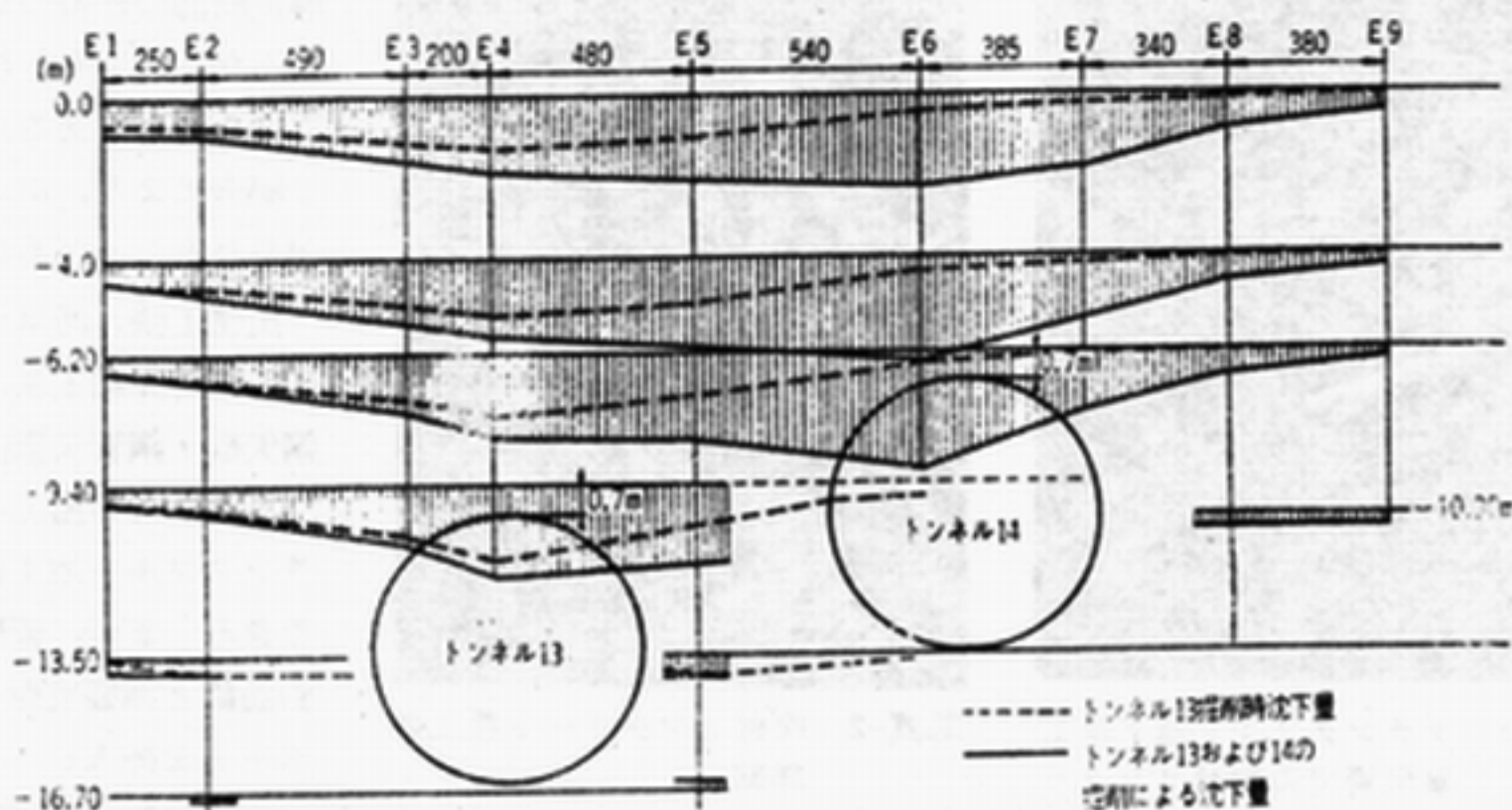


図-6 フランクフルト地下鉄における双設トンネルの掘削による表面沈下および地中内変位



写真-3 ガンツシュタイントンネルでの側壁導坑先進工法によるNATM

く突破できた(図-2, 写真-3),

この成功の原因は、大きな変形を許さず、切羽にできるだけ接近して支保工を設置するという方針を貫いたことである。ちなみに、崩落前のコンバージェンスは10~30cmで、側壁導坑採用後は5cm以内であった。

(3) 崖壁中のトンネル

内部摩擦角 36° 、粘着力はほぼ0に近い3車線道路トンネルの例である。かぶりは3~20m、パッハー博士の提案で片サイロット工法により施工されたが、かぶりが薄すぎたため崩落した。薄いかぶりによる避けえない崩落が容認されたため、請負業者の責任で頂設導坑に変更された。かぶり圧が小さかったことと、高い内部摩擦角を持っていたため、鉛直方向のみの移動を許すことにより成功している(片サイロットでは、地盤の不規則な側面への移動が発生したため、応力集中が著しかった)。

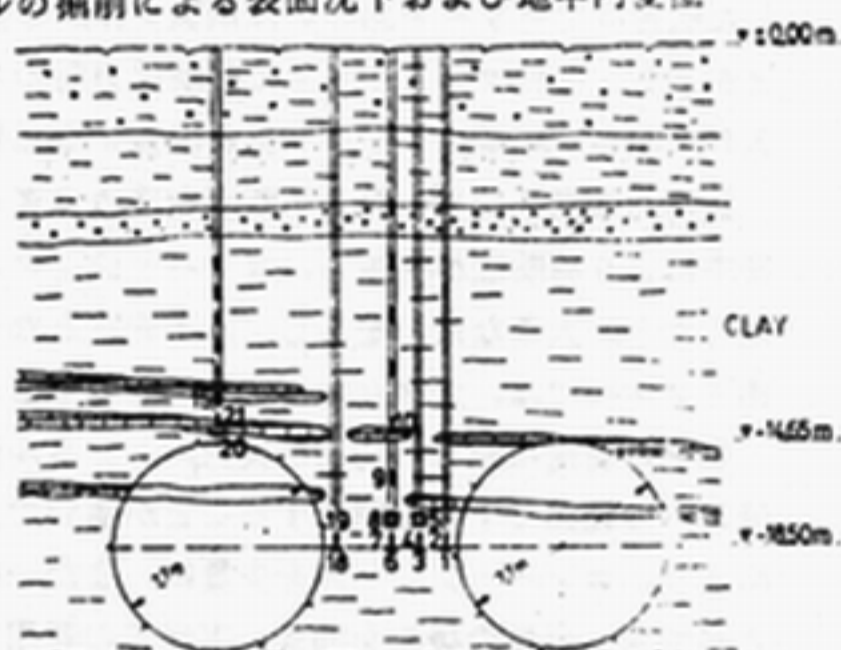


図-7 フランクフルト地下鉄における掘削計画配置

(4) フランクフルト地下鉄駅部

フランクフルト粘土中に、ごく薄いかぶり下で地下鉄駅が建設された例である。フランクフルト粘土は、粘着力が 0.2kg/cm^2 で内部摩擦角は 20° である。市街地下での地表沈下を防止するため、薬液注入が実施された。この場合にも、ミューラー教授の指示により、大きな変形を許さず、大断面の各分割掘削部分ごとにリングとして閉合することを忠実に実行し、きわめて小さな地表沈下に止まった。

(5) フランクフルト地下鉄での近接した双設トンネル

前例と同様な地質下で、レベルの異なる双設トンネルの施工が数多く施工されている。たとえば、図-6に示す位置関係にあるトンネルの場合には、上載荷重の関係から上部のトンネルを最初に掘削し、2次覆工で補強した後、下方のトンネルの掘削を開始した。切羽の掘削に先立ち、 $\phi 20\text{mm}$ 、長さ3mのボルトが30cm間隔で放射状にハンマーでたたき込まれ、切羽付近の安定をはかっている。リング閉合は掘削直後に、切羽よりつねに4m以内で行われた。地表面沈下は最大4cmで、現場測定によ

① 金属ブロック、② ワイヤフレーム、③ 接続パイプ、④ ⑤ 受圧計、⑥ 粘土、⑦ ゲージ、⑧ ケーシングパイプ、⑨ 砂、⑩ 粘土の円筒

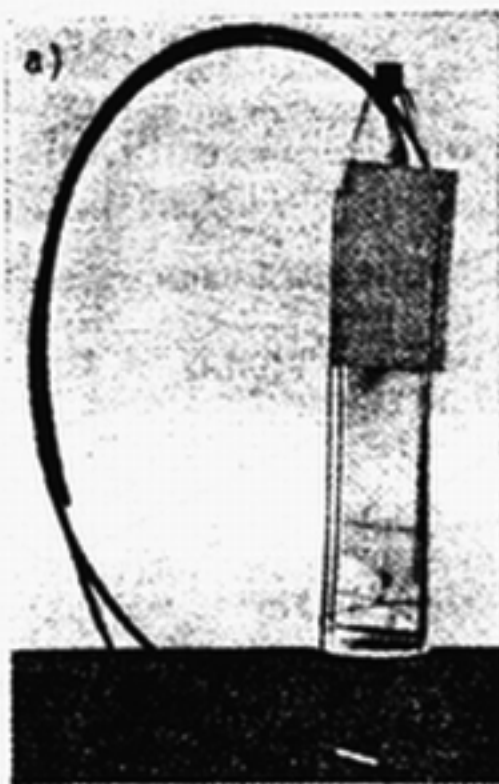


図-8 ボアホール内に設置されるグレーツェル形受圧計の設置方法



図-9 トンネル内より周辺地山に直接押込んだ平形受圧計

る地中の変位状況は図-8に示すとおりである。実際の現場でのコンサルテーションとともに、現場計測やモデルテストにより、ザウアー博士は、次節に示すような掘削に伴う応力の再配分過程を説明している。

3. トンネル掘削に伴う地中の応力再配分

フランクフルト地下鉄に関連して、接近した双設トンネルの掘削による地盤の変形挙動や地表面沈下の調査とともに現場での応力測定が実施され、さらにモデル実験により、現場で得られた知見を確認した。

まず、現場測定においては、たとえば図-7に示すような配置でφ20cmのボーリング孔を利用してグレーツェル形受圧計を設置した。受圧計は図-8に示すように、直交する水平方向および鉛直方向の合計3方向が同時に測定できるよう太い針金にて、受圧方向を固定し(a図)、その周辺を原位置と同じ粘土で充填し、外径17cmとなる粘土の円筒を作製し(b図)、ケーシングパイプを徐々に引き抜きながら所定の位置に設置してからボーリング孔壁との間を砂で埋め(c図)、地中の応力を直接測定できるように工夫した。また、図-9に示す受圧計をトンネル壁面から50cmの位置に放射状に設置することにより、ボアホール中に設置した受圧計の校正を行った。

なお、参考までに、グレーツェル形受圧計を使用した

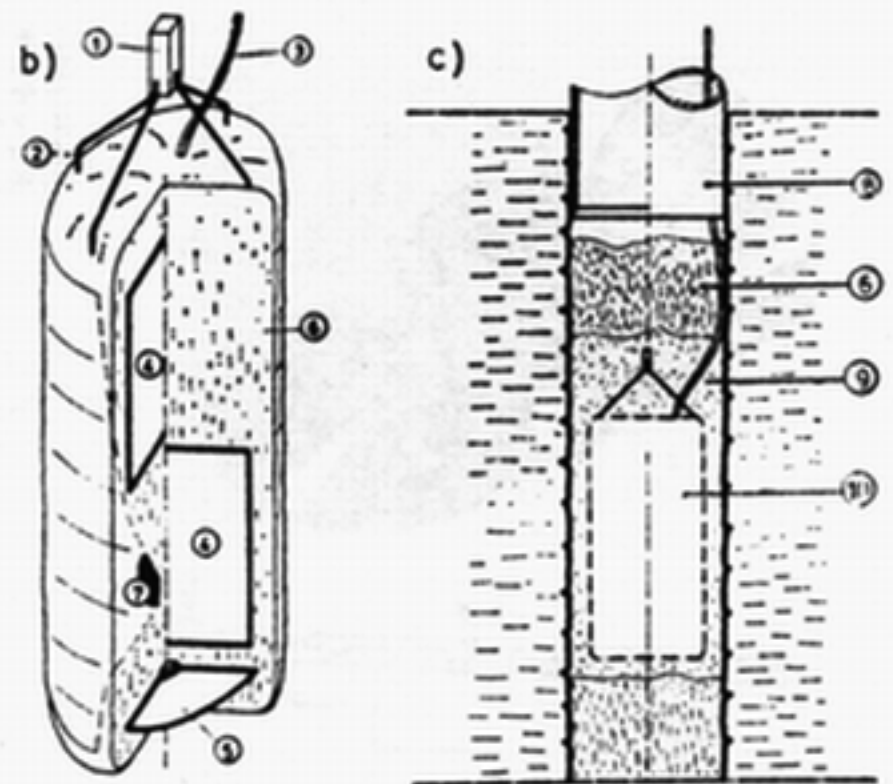


図-10 グレーツェル形受圧計による測定原理

応力測定の原理は次のようである。図-10に、グレーツェル形受圧計の測定機構を示す。a部が厚さに比べ十分広い面積を持つフラットな受圧板で、内部にオイルが封入されている。受圧板の剛性は、測定の対象となる地盤の剛性と比較し、十分高いもので適切な応力測定を可能にしている。この受圧板内部に発生する圧力がb部に設けられた圧力平衡弁を介してc部のパイプから与えられる圧力流体(空気又はオイル)と接している。c部から与えられた圧力が受圧板内部の圧力と等しくなった時点でb部の平衡弁が開き、d部のパイプを通して外部に戻される。定常的にd部より流体が戻ってくる時のc部に与えた圧力を圧力計で読みとることにより地盤中に生じた応力を測定するもので、直接的な、機械的測定方法である(したがって、オイルを送り込んでいる時に、間違っても空気の泡が混入しても、圧力平衡弁が開いた状態が一定時間続けば、その時の圧力計は、地中の応力を正しく表示していることになる)。また、吹付コンクリート内に埋設して応力を測定する場合、コンクリートの硬化に伴い受圧板とコンクリートの間に関隙を生ずることがあるが、受圧板内部の圧力を上げることにより密着させることができ、さらに圧力が減少して引張り側に変化する場合に対しても、原位置に設置してから、受圧板の圧力を最初に高めておき、受圧板内部をつねに圧縮状態に保ってお

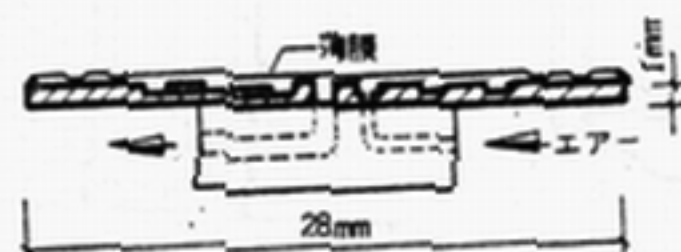


図-11 低応力レベル用グレーツェル形小型受圧計

けば、圧縮・引張り両方の応力測定が可能である。取り扱いがきわめて簡単で、得られる結果も実用上十分な精度を有し、欧州のNATMの現場で多数使用されている。

モデル実験では、種々の材料から成る200個を超える試料を用いて、フランクフルト粘土とはほぼ同様の力学的特性を持つ材料を開発し、さらにグレーツェル形の小型の受圧計を新たに開発した。この小型受圧計は、図-11に示すように、厚さ対直径の比が1:28となるもので、空気式を採用し、 $0 \sim 3 \text{ kg/cm}^2$ の範囲の応力を対象としている。測定誤差は5%以内である。これを外径3mmの送気管に接続し、各点への加圧を電気式の自動バルブで行い、90点の測定を一度に行えるようにした。実験の要領は、図-12に示すとおりである。

このような方法で、現場計測およびモデル実験を行った結果と G. Möller (1976), G. Greiner (1976), D. Jagsh (1974) らが行った現場測定結果を総括すると、次のような一般的な傾向を認めることができる。

まず、実際の地盤内の切羽付近の応力状態は、主応力の方向で示せば図-13に示すようになり、切羽を球状に包み込むような応力状態が発生している。さらに、ある横断面について、切羽の進行および時間経過とともに周辺の応力状態の変化を表わしてみると、図-14のように、 σ_r および σ_θ とともに同様の傾向を持ち、ほぼ直径 D に相当する間隔で、二重、三重に圧縮帯のシェルが発生していることが分かる。このような多重のシェルの発生は、今までの解析や計算では求められていない。また、トンネルの直径を D とし、壁面より少し奥の地点の縦断面内の接線方向の応力状態 (σ_θ) の変化を示せば、図-13

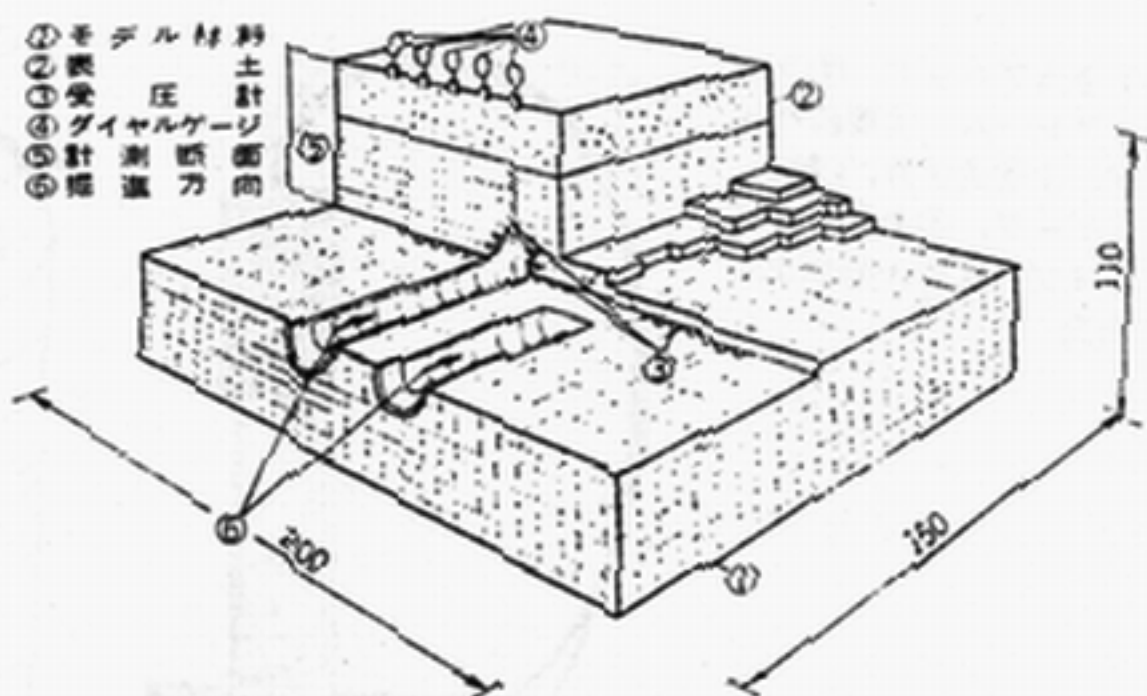


図-12 モデル実験

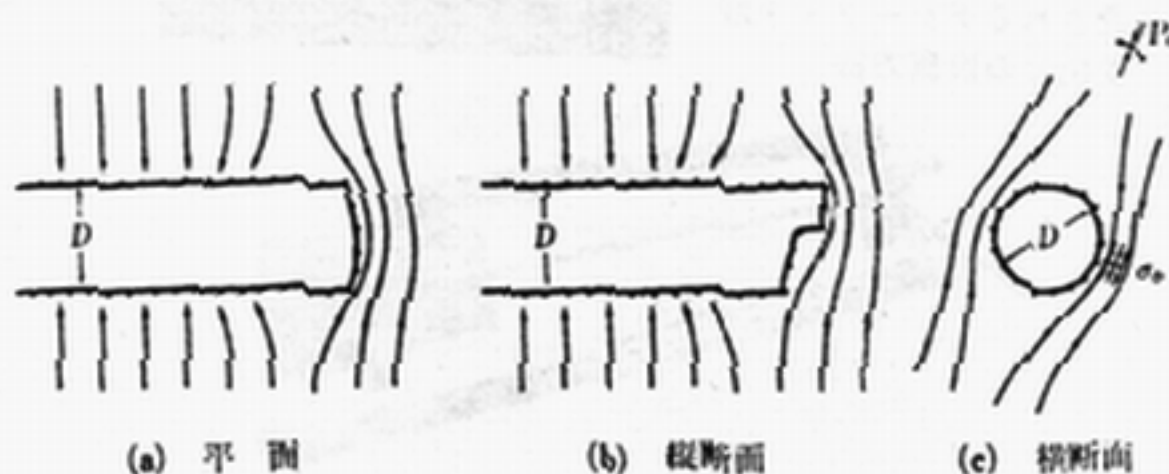


図-13 トンネル掘削に伴う地中応力の変化状態

となり、切羽から D 以内の範囲では応力が減少し、 $1.5 \sim 2.0D$ の範囲で応力集中を生じていることが分かる。切羽の前方では、 $1.0 \sim 2.0D$ の範囲で初期応力状態 P_0 が変化し、 $0.3D$ の地点で1つのピークを示し、切羽付近で減少する状態を示す。この傾向は、不連続面の少ない岩盤ほど顕著でなくなる。このような圧縮帯・免圧帯を現場計測により確認すれば、ロックボルトの最適長さを決定することができる。岩盤状態が不良になればなるほど、このような圧縮帯と免圧帯の形成過程を考慮に入れるべきで、圧縮帯の形成を乱すようなことがあってはならない。

切羽の後方 $1.0 \sim 2.0D$ の範囲で応力（測定で確認されているのは主に σ_θ であるが、図-14のように σ_r についてもほぼ同様と考えられる）が最大値を示すので、これを対象として覆工の程度を検討すればよい。

岩盤の強度が2次元的な横断面でのリング構造を保持するのに十分でない場合、あるいは円形の閉じた構造を形成できなかった場合、破壊を引き起こす。

継続して現場計測を実施すれば、応力の再配分は徐々にではなく突発的に生じている。拘束圧の増大による強度の増加とダイレイタンスの増大による脆性的な破壊が交互に発生するためであろう。

さて、もう一度切羽付近での接線方向の応力 σ_θ の変

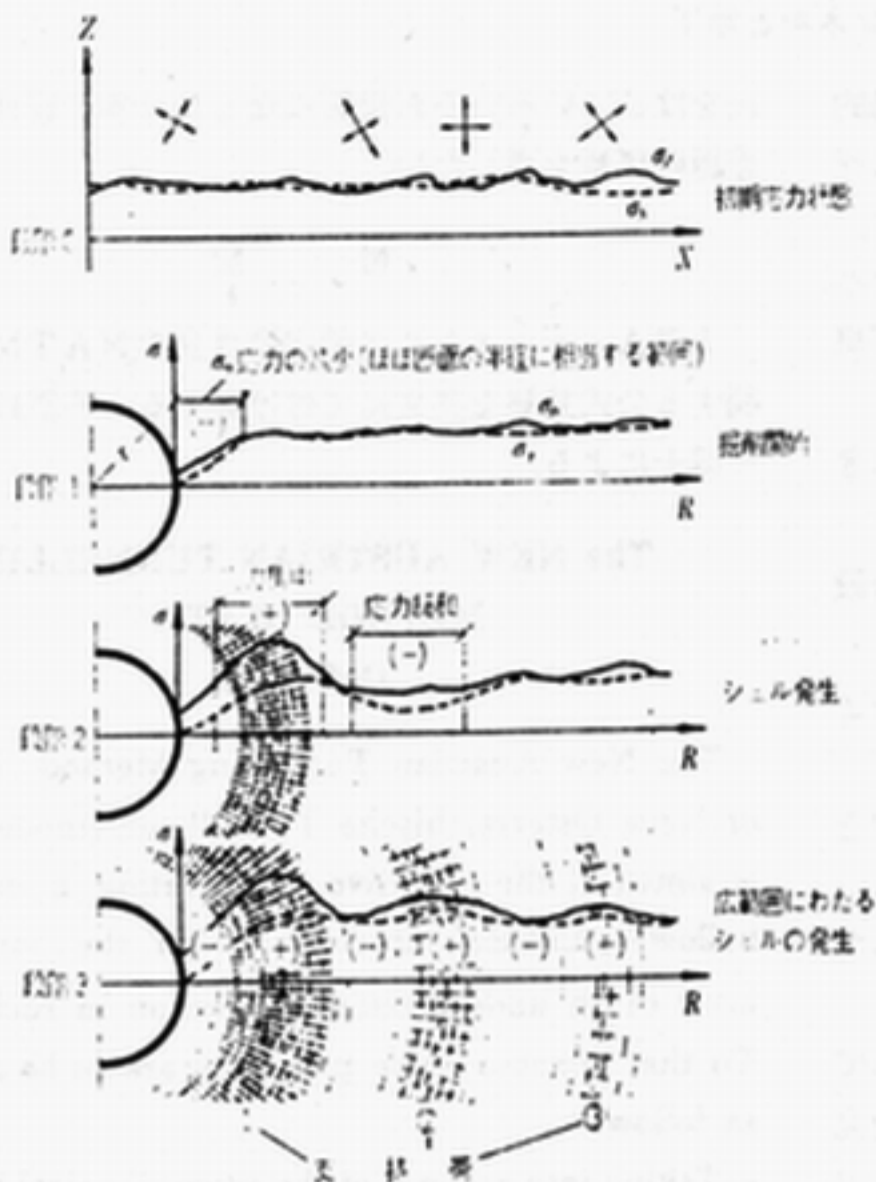


図-14 現場計測およびモデル実験による掘削の進行に伴う周辺地盤の応力再配分過程

化に着目し、支保の最適化を検討してみよう。切羽の前方 $0.5D$ の付近で初期応力 P_0 よりも増加し、ピークに達する。その後、切羽の後方 $1.0D$ の所まで減少する。そして再び増加して $1.5D$ の位置でピークに達し、また減少する。この傾向を、Fenner-Pacher 曲線と対比してみると、図-16のようになる。すなわち、Fenner-Pacher 曲線では切羽の後方 $4 \sim 5D$ の位置に支保工反力の極小点が示されているが、これとは別に切羽の後方 $1.0D$ の付近に、もう1つの支保工反力が極小となる点が存在することになる。したがって、軟弱な低強度の不安定な岩盤では、リングを形成させる場合に吹付コンクリートにスリットを入れたり、あるいは併用する鋼枠を可縮にするというようなことをして、リングの閉合を遅らせ、ある程度の変形を意図的に許容するよりも、むしろ掘削直後にまた切羽に極力接近して、リングの閉合を行った方が好ましい。

その場合の吹付コンクリートやその他の支保工に発生する反力は、Fenner-Pacher 曲線で指摘された極小点よりも、さらに小さいものであろう。この2つの極小点の存在は、岩盤の安定、自立時間、進行速度、支保工効果などを論ずるうえで重要な意味を持つてくる。

トンネル周辺の岩盤と支保とが一体化して一種のシェル構造を発生するわけであるが、支保が不十分であった

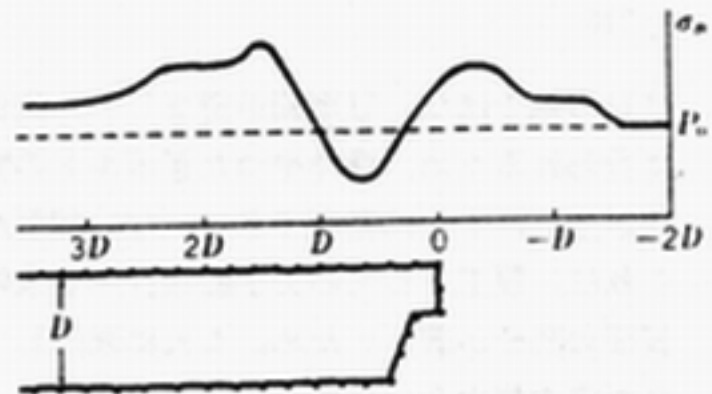


図-15 縦断面における接線方向応力 σ_θ の変化

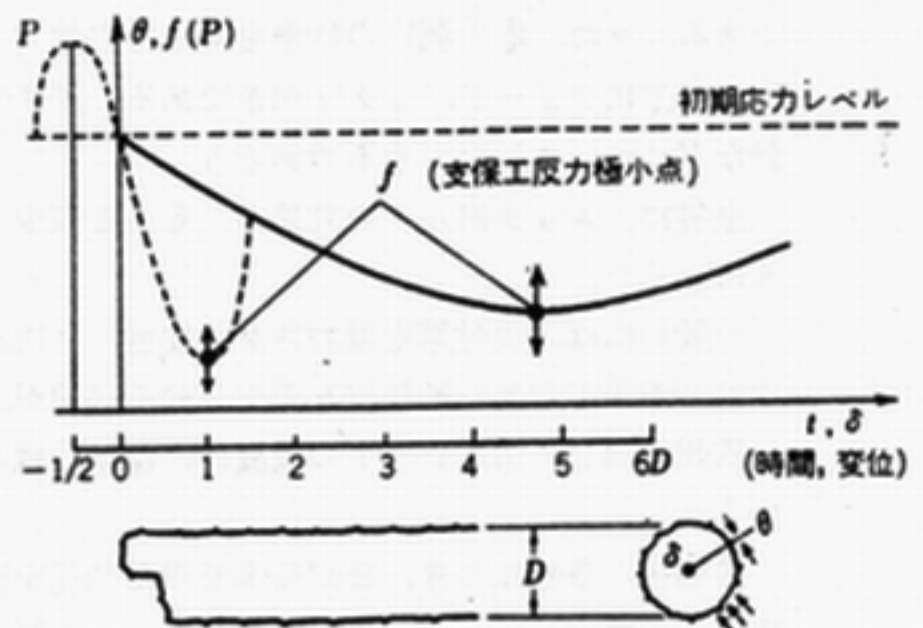


図-16 支保工反力の極小点(2か所に存在)

り、設置の時期が遅れると、岩盤内に応力の再配分が生じ、次々により大きなシェルを発生する。それだけ緩み部分も広範囲に発生することになって、誘起された応力がリングとしての強度を超えると崩落することになり、変形を抑えてできるだけ壁面に近く確実なシェルを発生させた方が有利であろう。

4. トンネル現場見学

博士は、日本に滞在中、藤白トンネル(道路公団)、鷲羽山トンネル(本四公団)、第1・第2名塩トンネル(国鉄)、恵那山トンネル(道路公団)、第1白坂トンネル(国鉄)、鍋立山トンネル(鉄道公団)、新榎トンネル(新潟県)、関越トンネル(道路公団)、玉原地下発電所(東京電力)、新字佐美トンネル(国鉄)、成田トンネル(鉄道公団)などを見学し、帰国後、日本のトンネル工事に関する感想を次のように伝えてきた。

NATMの応用例が急激に増加し、吹付コンクリートの製造が簡潔に行われている。また、吹付作業もロボットなどを用いて自動的に行っている点は、オーストリア以上に機械化されている。SEC式吹付コンクリートのリバウンド率が10%台というのは、きわめて優秀である。

一方、欧州においても同様であるが、切羽付近の3次元の応力の再配分過程が必ずしも理解されているとはいえない。吹付コンクリート中のスリットは、所々必要であると判断した。吹付コンクリートと併用する鋼枠

はH形鋼ではなくU形鋼が望ましい。吹付作業が自動的に行われるため、鋼棒やつなぎボルトの背面や周囲に死角が生じ、十分に充填できていない個所が認められた。これは、覆工としての力学的な作用を大幅に減少させる。表面の凹凸が著しいため、これに起因して局所的な不規則な応力集中を生じている部分があった。

現場での応力測定は、適切な計器を使用して行うべきである。また、応力測定の結果をもっと吹付コンクリートの施工にフィードバックすべきである。厚さや配合設計などについて改良できるであろう。

全般に、ロックボルトの数量は、もっと減少できるように感じた。

一般的には、吹付厚を増加させた場合、2次巻厚やその他の支保工を含む補強材を減少させる必要がある。

欧州の場合、防水シートの設置は、標準仕様になっている。

帰国後、多忙につき、まだ日本で得た知見を整理して吟味する機会がなかなかみつからないが、写真などを見直し、改めて自分の考え方を報告したい。また、日本のトンネル工事は、オーストリアに比べて、数が多いことに驚くとともに、いろいろな条件のトンネルが見学でき、今後の研究の面からも大いに参考となった。再び来日する機会を心待ちにしている。次回は、現場計測例を数多く紹介し、その結果を施工にどう反映させたかをもう少し詳しくお伝えできると思う。

最後に、日本のトンネル事情に触れる絶好の機会を与えて下さった日本鉄道建設公団理事吉村恒氏、前日本道路公団調査役長友成樹氏、日本トンネル技術協会専務理事北村市太郎氏、(財)大阪土質試験所所長代理岩崎好規

氏をはじめいろいろお世話になった日本の皆様方に深い感謝の気持ちを表したい。

付 記

ITA・オーストリア国内委員会のNATMの定義に関する公式見解を英文にて付け加える。英訳は、ザウアー博士による。

The NEW AUSTRIAN TUNNELLING METHOD (NATM)

Definition

The New Austrian Tunnelling Method (NATM) or Neue Österreichische Tunnelbaumethode (NÖT) is aimed at the objective of activating a supporting hollow-cylindrical structure within the surrounding mass of an underground excavation in rock or soil. To that purpose some principles are to be applied as follow:

- Taking into account of the geomechanical behaviour of the underground,
- Avoidance of notch effect (adverse states of stress and strain) by the application of suitable supports at the right moment,
- particularly by the closing of the ring in order to perform a statically efficient structure having the stability of a hollow-cylindrical support.
- Optimization of the means of supports in reference to the admissible deformations, by
- Monitoring through field measurement.

訂正とお詫び

本誌1980年10月号 (Vol. 11, No. 10) の「グラウトによるトンネル湧水量変化解析」中下記の誤りがありました。訂正してお詫びいたします。

- (1) P. 48, 図-4, 図中上部の折線

$(r_0/r) = t$ とあるのは $(r_0/r) = 2$ の誤りです。

- (2) P. 49, 左段下から12行目の式 (2.9)

$f(\lambda) = C_2 \left(\frac{1}{1-\lambda} \right)^2$; Zunker 他, とあるのは $f(\lambda) = C_2 \left(\frac{\lambda}{1-\lambda} \right)^2$; Zunker 他, の誤りです。

- (3) P. 50; 左段下から6行目の式

$\frac{(x-h)^2 + y^2}{(x+h)^2 + y^2} = e^{\frac{4\pi(\phi-C)}{Q}}$ とあるのは $\frac{(x-h)^2 + y^2}{(x+h)^2 + y^2} = e^{\frac{4\pi(\phi-C)}{Q}} = \alpha$ の誤りです。