

招待論文

**INVITED
PAPER**

招待論文

大断面道路トンネルと山岳トンネル工法の現状と課題

ENGINEERING PROBLEMS OF ROAD TUNNELS WITH LARGE SCALE CROSS SECTION

三浦 克

Katsushi MIURA

正会員 工修 日本道路公団技術部調査役
(〒100 千代田区霞が関3-3-2 新霞が関ビル)*Key Words*: expressway, tunnel, large scale cross section, auxiliary method

1. はじめに

21世紀に向けて社会資本の整備が重視され、10年間に630兆円の公共投資が計画されている。地下空間は社会資本、特に交通、通信、エネルギー等のインフラ整備場所として注目され、多くのトンネルや地下工事が行われている。またそれに対応する技術が開発されている。この論文では、それらの内、道路トンネルについて述べるものである。道路トンネルでは、数量の増加もさることながら、大断面化が進み、第二東名・名神高速道路のように、掘削断面積が200m²を越えるトンネルが計画されるとともに、周辺環境との調和など多くの技術的課題を抱えている。

2. 道路トンネルの現状と課題

(1) トンネル数の増加

道路にとってトンネルは、①建設費が多額であり、②照明や換気等に要する維持管理費が大きいこと、③いったん事故が発生すると大事故につながる可能性があることなどのハンディキャップがある。このため極力トンネル構造を避けて路線が計画されてきた。高速自動車国道についてみると、現在の東名・名神高速道路では道路の延長に対するトンネルの比率は3%程度であるのに対し、第二東名・名神高速道路では20%を越える予定(整備計画区間)である。高速自動車国道全体で見れば、1980年頃までは2~3%程度であったが、年々増加し、1994年4月には8.5%に達し、将来は10%を越える見込みである。その原因としては次のようなものがあげられる。

① 建設する路線が山岳地帯にかかったり、列島を横断する路線が建設されるようになったこと、

② 設計規格が高く設定されるようになり、線形上トンネルを避けられないケースが多くなったこと、

③ 環境対策や都市計画上、市街地や人家密集地を避けるため、トンネルを計画しなければならない場合が多くなったこと、

また国道や地方道でも同様にトンネルが増える傾向であり、さらに首都高速道路中央環状新宿線¹⁾や、ポストン市地下高速道路²⁾などに見られるように、大都市の地下に幹線道路を整備する計画も見られる。

(2) 大断面化

道路にとってトンネルは他の構造に比べて建設費が大きく、特に大断面トンネルは技術的にも困難が多かったことから、極力断面を小さくせざるを得なかった。道路構造令³⁾でもトンネル部では他の構造の区間に比べて、路肩の幅員を縮小できるように規定されている。しかし最近では道路に対するニーズが多様化し、より断面の大きなトンネルが計画されるようになってきている。

a) 3車線トンネル

従来、都市内街路を除けば多車線道路は少なく、特に山岳トンネルが建設されるような場所で6車線道路が計画されることはまれであった。交通需要が増えて、6車線道路の建設や既存の4車線道路の拡幅工事が行われるようになり、3車線断面のトンネルが多く作られるようになってきている。

b) 歩道や付加車線の付いたトンネル

市街地や都市近郊の道路では、歩道が確保された断面のトンネルが建設されており、また右折レーンをトンネル内に設置する例、高規格な道路での登坂車線や加減速車線をトンネル内に設置する例などが出てきている。

c) 第二東名・名神高速道路のトンネル計画⁴⁾

第二東名・名神高速道路は、21世紀における我が国の基幹交通軸となるものであり、ゆとりある空間と一部では140 km/hの高速走行を想定した道路計画となっている。トンネルは幅員が従来の2車線トンネルの2倍程度あり、掘削断面積が200 m²を越える大断面トンネルとなる。

このように道路トンネルは大断面化する傾向にあり、上記a), b)に対応する掘削断面積130 m²程度のトンネルは多くの実績ができています。第二東名・名神高速道路の大断面トンネルについては、ほとんど経験がなく、技術的に未解明で、今後の研究を待たなければならない点も多く残されている。

(3) 高度化する制約条件

都市化した地域で道路を整備する場合に、都市計画や環境対策上トンネル構造が選択されることが多くなってきている。また土被りの小さい場所では、従来掘削構造や、開削工法のトンネルとされていたものが、用地取得や家屋移転、施工時の環境対策、掘削土処分等の困難な条件があり、非開削のトンネルの方が有利となる場合が出てきている。土被りの小さい場所では固結度が低いことや、地下水の影響もあって、切羽の自立性や地山の強度の不足によって、トンネルの施工が困難な場合がある。さらに地表の建物や地下埋設物に悪影響を与えないよう、地表沈下を抑制しなければならないこともある。また双設トンネルで相互の隔離をとらず、眼鏡型に近接する計画や、既存のトンネルを拡幅改築する計画も現れている。こうした厳しい制約条件に対して、最近では補助工法を活用して解決している例が多くなっている。

3. 大断面道路トンネルの技術的課題

(1) 大断面道路トンネルの実績と計画

大断面の地下構造物としては、地下発電所や石油備蓄基地等、第二東名・名神高速道路で計画しているトンネルをはるかに越える大断面の実績がある⁵⁾。これらの地下構造物が比較的地山条件の良い場所を選んで立地し、土被りも十分な場所に建設されるのに対して、道路トンネルは線状構造物であり、土被りが小さい坑口部が必ず有り、断層等の状況によっては十分な強度がない地山も考えられる。自立性のない場合や、強度が小さい場合は、2車線トンネルでも難工事となる事例は多くあり、大断面トンネルでは十分な検討と、対応する技術が必要である。

最近では東名高速道路大井松田一御殿場間の6車線への改築や、横浜横須賀道路、横浜新道拡幅改築事業などで、掘削断面積130 m²程度の3車線断面のトンネルが建

表-1 第二東名・名神高速道路延長別トンネル本数

トンネル延長	本数		
	上り線	下り線	合計
1,000 m未満	30	29	59
1,000 m以上2,000 m未満	11	12	23
2,000 m以上3,000 m未満	6	6	12
3,000 m以上4,000 m未満	4	4	8
4,000 m以上	1	1	2
合計	52	52	104

沼津～豊田間、亀山～城陽間のトンネル
ただし連絡路は除く

設されている。大きな土圧が発生するようなトンネルの経験は少ないが、土被りが小さく切羽の安定が悪い場合や、トンネル上に家屋があって地表沈下を制限されるようなケースもあるが、新しい補助工法の出現もあって克服されている。

今後は第二東名・名神高速道路では掘削断面積200 m²を越す従来ほとんど経験のない大断面トンネルになること、地質も新しい堆積層から、火成岩、変成岩等幅広く分布し、中央構造線や糸魚川・静岡構造線等の大規模な構造線の影響を受けた場所を通過する等、従来の3車線トンネルの経験をはるかに越えるものとなる。また道路建設費に占めるトンネル建設費の比重は大きく、より経済的な建設技術が求められている。このため大断面トンネル設計施工技術の課題を十分検討するとともに、対応する新技術、新工法を開発していかなければならない。

(2) 扁平、大断面トンネルの力学的問題

道路トンネルの場合、車線数や幅員が広がっても必要な高さは変わらないため、建築限界は横長の断面となる。この建築限界を収容し、掘削断面積ができるだけ小さいアーチ状の断面を計画するため、道路の場合大断面トンネルは同時に扁平断面トンネルとなる。

大断面で扁平なトンネルを掘削断面積80 m²程度で、真円に近い2車線トンネルと比較すると次のような特徴があり、設計施工上特別な配慮を行わなければならない。

a) 掘削再配分応力

円形トンネルでは地山を等質、等方の弾性体とし、等方圧力をかけた場合、掘削面周辺の最大主応力は、初期地山応力の2倍となる。地山の一軸圧縮強度がこの再配分応力より小さい場合にはトンネル周辺の地山は塑性化するため、変形を止めるため大きな支保構造物を必要とする。このことから、地山強度比 $q_u/\gamma H=2$ がトンネル設計における地山評価の尺度として使われている⁶⁾。

ここで q_u ：地山の一軸圧縮強度、 γ ：地山の単位体積重量、 H ：土被り高さ。

第二東名・名神高速道路の扁平大断面トンネルに対して行った有限要素法解析⁷⁾では、掘削再配分後の最大主応力は、側圧係数 $K=1$ の場合初期応力の約3倍、 $K=0.7$ の場合には約4倍となった。従って従来の2車線トンネルの場合より、大きな強度を持っていても塑性化に伴う土圧や変形が生じる可能性を示すもので、地山を評価する上で注意しておかなければならない。

松本らは楕円トンネルの安定解析を形状弾性ひずみエネルギーを用いて行っている⁹⁾。側圧係数が1より小さい場合、扁平度が大きくなれば無支保で自立するためには大きな地山強度比を必要とするようになること、また扁平度が増すに従って大きな支保工を必要とすることを明らかにしている。なお側圧係数が1より大きい場合には逆の傾向を示している。

b) トンネル脚部に集中する応力

扁平な形状であるためにa)で述べたように側壁部での再配分応力が大きくなるとともに、掘削幅が大きく、支保部材の伝達する軸力が大きくなる。特に側圧係数が小さい場合の3車線断面トンネルでは、水平内空変位は小さく時には内空幅が拡大する場合もあり⁹⁾、脚部の支持力が重要となる。

c) 大きなゆるみ土圧

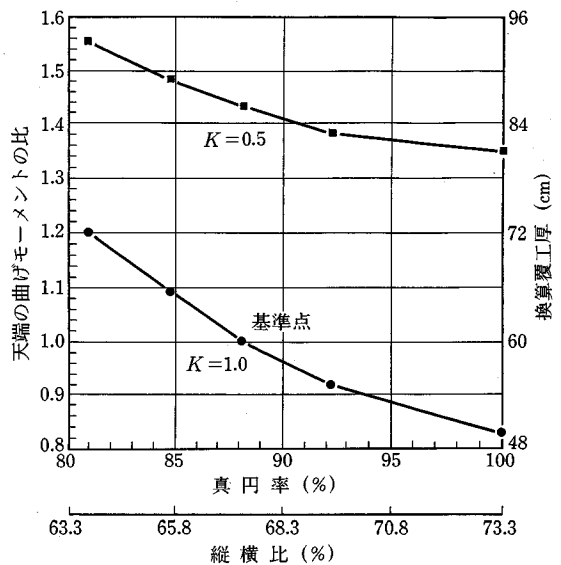
掘削幅および掘削高さが大きく、アーチ作用が発生する土被りは大きくなる。土被りが小さくアーチ作用が働かない区間では、全土被り荷重が作用する可能性があるが、大断面トンネルでは大きな荷重を想定しなければならないことになる。

d) 天端の不安定

トンネルの力学的解析では連続体を仮定した有限要素法解析がよく用いられ、第二東名・名神高速道路の大断面トンネルの設計検討でも有限要素法解析を多用している。有限要素法解析ではトンネル掘削面周辺の塑性領域の推定には適しているが、岩塊の崩落の可能性は直接解析できない。地下発電所など硬岩の大規模地下空洞の設計では、節理等の不連続面の分布を調査して、キープロック理論で解析される例が多くなっている¹⁰⁾。

1994年の冬季オリンピック(リレハンメル)のアイスホッケー会場は地下岩盤中に掘削され幅62m、高さ24m、長さ91mの極めて大断面かつ扁平な地下空洞の中に作られている。地質は先カンブリア紀の片麻岩で、多くのジョイントを持っており、入念な調査に基づいて、Q値法、RMR法による設計と、個別要素法による解析を用いて設計を行っている¹¹⁾。個別要素法解析では初期地山応力の側圧係数 $K=0.5, 1, 3$ の3ケースについて解析しているが、 K の値によって主応力、変位ベクトル、ジョイントでのせん断力が大きく変化しているのが興味深い。

従来の道路トンネルでは地山等級に応じた設計パター



図一 天端に発生する曲げモーメントの比⁷⁾
($K=1.0$ 、真円率88.2%の場合を1とする)

ンを適用するか、連続体を仮定した解析に基づいて設計されてきた。これは地山の条件とトンネルの規模から、こうして設計された支保構造物が、キープロック理論等で検討される岩塊の崩落を止めるに十分であったことよると思われる。掘削幅が2倍近く、扁平な大断面トンネルでこの仮定が成立するか、またキープロック等の理論を導入して経済的な設計の可能性はないのか、検討しておく必要がある。

e) 支保構造物の耐荷力

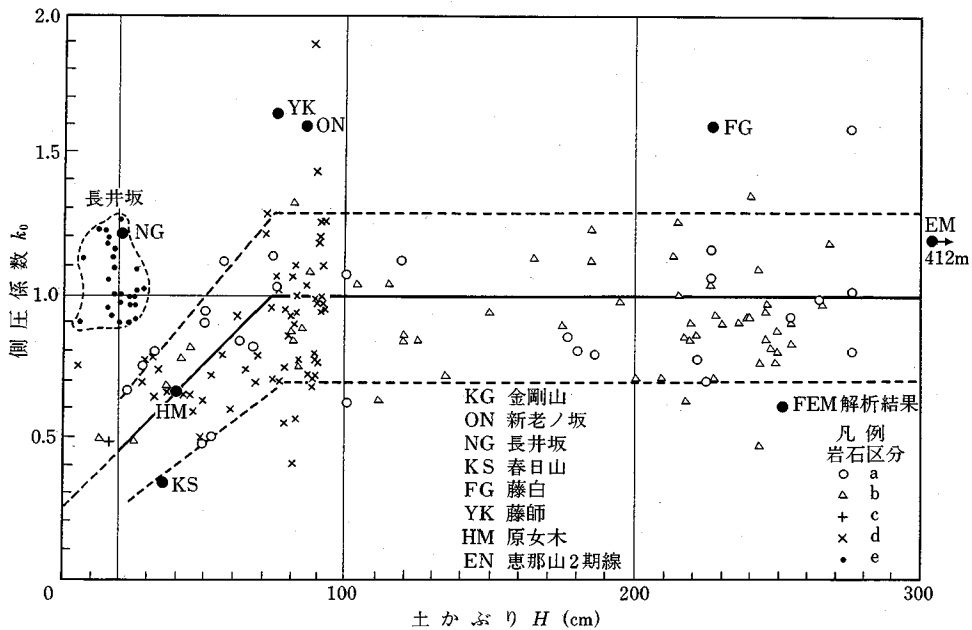
スパンが大きく相対的にライズの小さいアーチ形状であり、支保構造物の耐荷力は小さい。

(3) トンネル断面、構造の検討

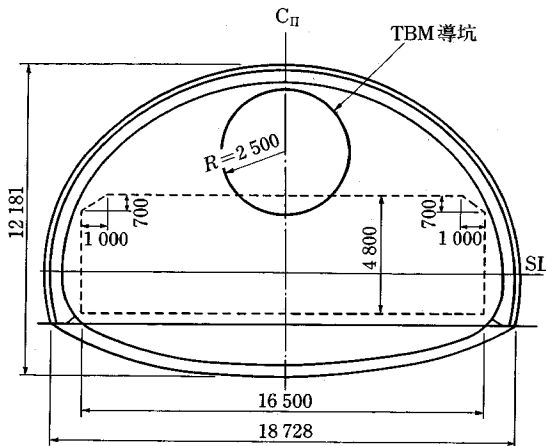
扁平大断面トンネルにおける上記の特性を踏まえ、過去の大断面トンネルの実績を参考に第二東名・名神高速道路のトンネルについて設計案を作成している。

a) トンネル断面の検討

扁平率については覆工の天端部に発生する曲げモーメントの大きさを検討するため、骨組み解析を行った⁷⁾。図一に示すように扁平にすることによって曲げモーメントが大きくなる。同時に側圧係数によっても大きく影響される。図二に示すように土被りの小さいトンネルでは K は1より小さいことが多く¹²⁾、トンネルの安定にとって不利な要素である。扁平にして掘削断面を減少させる効果と、不安定さを増し、支保工や覆工が大規模になることのバランスを考慮し、最近の東名改築等の3車線トンネルで実績のある扁平率(=トンネル高さ/トンネル幅)0.65、真円率(=上半の高さ/0.5トンネル幅)にして88%程度を用いることとした(図一3参照)。



図一 土被りと側圧係数の関係¹²⁾



図一 清水第三トンネル計画断面

また側壁部や覆工脚部に集中する応力が大きいことを考慮して、インバート半径を上半半径の2倍程度（通常の2車線トンネル標準設計では2.6~2.7倍程度）とし、側壁部とインバートをつなぐ曲線の半径を2.5 m（同じく1 m）とし、応力の集中を避けるように配慮した。また地山が良好な場合にもインバートを設置することとしたが、硬岩部まで必要か、今後検討する必要がある。

b) 支保工の検討

支保構造は最近の3車線トンネルの実績に基づいて、地山分類毎のパターン案を設定し（表一2参照）、有限要素法解析を用いた検討を加えた⁷⁾。解析のモデルおよび力学定数は日本道路公団の2車線や3車線のトンネルで

表一 第二東名・名神高速道路トンネル標準支保パターン（案）

地山等級	ロックボルト			鋼アーチ支保工	吹付けコンクリート (cm)
	長さ (m)	間隔 (m)			
		周方向	延長方向		
B	4.0	1.5	1.5	H 150 (上半のみ)	15
C I	6.0	1.2	1.5	H 200	20
C II	6.0	1.2	1.2	H 200	25
D I	6.0	1.0	1.0	H 200	30
D II	6.0	1.0	1.0	H 200	30

変形余裕量，先受け工については別途検討

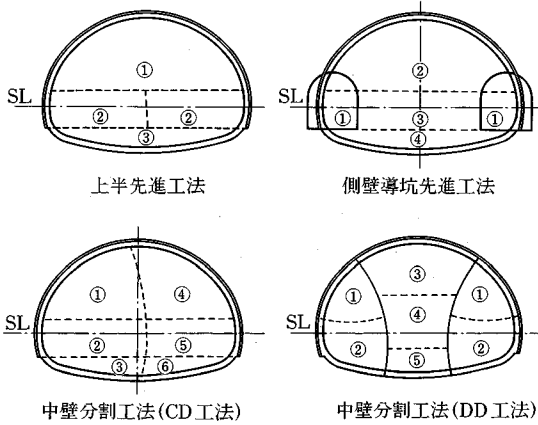
多くの実績があるものを用いている。解析結果の評価は、①日本道路公団における有限要素法解析結果と施工時の変状や対策工の必要性等の実績とを対比したデータベースから、標準設計の範囲内にとどまると想定される解析値の範囲を設定し¹³⁾、それを大断面用に変換した評価基準に当てはめる方法、②土屋による模型実験等に基づいて設定された許容値による評価¹⁴⁾、③桜井によって提唱された限界ひずみによる評価¹⁵⁾を加えた。

c) 覆工の検討

覆工については、標準設計の範囲内では一次支保で地山の安定を確保するものとするが、経験のない扁平大断面トンネルであり、長期安定性を確保する上でも、二次覆工の力学的安定性を検討している⁷⁾。覆工に作用する荷重は確定した設計法がないため、①有限要素法解析結果のゆるみ領域に相当する土荷重に対して、許容応力度

表一3 第二東名・名神高速道路トンネル覆工標準設計(案)

地山等級	アーチ厚	インバート厚	構造
B~C II	50 cm	50 cm	無筋
D I	60 cm	80 cm	単鉄筋
D II	60 cm	80 cm	複鉄筋



図一4 大断面道路トンネルの掘削工法

による検討を行い、②昭和39年の土木学会標準示方書¹⁶⁾に示されている荷重高さに相当する土荷重に対しては、軸力による極限耐力で検討を行った。

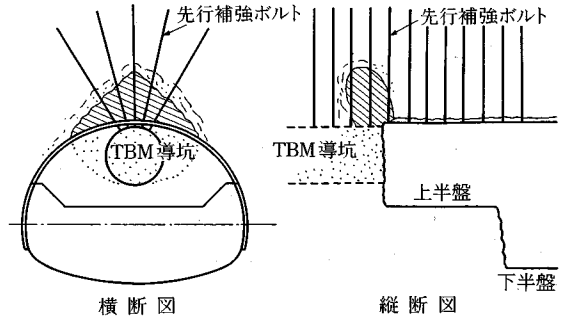
許容応力度での照査によれば、地山等級 B, C_I, C_{II} と D_I の側圧係数 1 の場合に許容応力度を満足するが、D_{II} の側圧係数 0.5 のケースと、D_{II} については引っ張りによって許容応力度を越える結果となっている。なお軸力による検討では十分最終耐力以下という結果が出た。想定される範囲のゆるみ荷重に対して、クラックは入るものの、覆工の破壊に至るまでには余裕があることがわかる。これらの検討結果を踏まえて表一3に示す標準設計(案)を設定している。

(4) 施工法の検討

a) 基本的掘削工法

130 m²クラスの3車線トンネルの施工法は図一4のようなものが選定されている。上半先進工法が最も多く、大部分の地山条件のトンネルで採用されている。地耐力の不足する坑口部では側壁導坑先進工法が採用されている。切羽の安定の悪い鳥手山トンネル¹⁷⁾(第三紀の泥岩優勢泥岩砂岩互層)と舞子トンネル北工区¹⁸⁾(大阪層群)で中壁分割工法(CD工法)が採用され、港南トンネル¹⁹⁾(洪積層砂層およびシルト層が主体)では中壁分割工法(DD工法)が採用されている。

第二東名・名神高速道路のトンネルでも基本的には同じような施工法が検討の対象になる。延長あたりの施工



図一5 TBM導坑先進工法概念図

数量が大きくなるので、施工速度を落とさないためにも、従来以上に大きな加背を確保し、大型の機械設備を投入することを検討する必要がある。

b) TBM導坑先進工法

調査坑を兼ねて高速掘進が可能なTBM(トンネルボーリングマシン)による導坑先進工法の採用を検討し、東北横断自動車道湯田第二トンネルでこの工法の試験施工を行っている²⁰⁾。ここでは直径3.5mのTBMを上半断面上部に施工している。この場合導坑に期待される効果は次のようなものである。

- ① 地山の調査
- ② 水抜き効果による地山改良
- ③ 不安定箇所での事前補強
- ④ 切り掘り掘削時の心抜き効果
- ⑤ 工事中換気の風道

現在導坑が完成し、両坑口から全断面への拡幅工事中である。水抜き効果や、導坑の存在による切羽の安定効果があることから、1回あたりの掘進長を標準設計より長くして、経済性を追求している。また導坑を使って、片方の切羽からもう一方の切羽に向けて、風を流すことにより、両切羽の換気を行っている。さらに導坑を使った地山の調査によって本坑の設計を合理的にできる可能性がある。ここでは観察による判定とマシンデータ等の定量的判定基準に基づき本坑の設計を行い、メーグリッパ係数と簡易弾性波速度、シュミットハンマー反発値、RQDとの相関関係等を調査しており、マシンデータによる定量的判定手法について研究している。

第二東名・名神高速道路でトンネルの試験施工場所となる清水第三トンネルでは、上半断面に直径5mのTBM導坑を計画している。ここでは湯田第二トンネルで検討した目的に加えて、図一5に示すように上半断面の掘削に先立ち、導坑内でロックボルトやアンカーを打設する工法の試験を行う計画である。これによって扁平大断面トンネルで問題となるアーチ部の不安定性に対し事前に対応することにより効果を上げ、さらに上半断面での仕事を減らし、全体的により効率的な施工計画が

立案できる可能性があり、実施工によって確認をめざすものである。

c) 不安定な地山での施工法

坑口部、未固結地山、断層破碎帯等不安定な地山の区間が想定されている。特に扁平大断面トンネルでは、①切羽は幅、高さともに大きく、不安定となりやすい、②支保工や覆工の耐荷力についても天端の曲げモーメントや、脚部に集中する応力などの問題があり、ゆるみは極力抑制しなければならない。このため切羽の安定対策が重要である。切羽の安定対策には、①切羽の分割、あるいは1回あたりの掘進長の短縮による方法と、②補助工法を活用する方法がある。

切羽を分割する工法ではCD工法が考えられる。補助工法は最近、従来にない規模も効果も大きいものが開発され、大断面道路トンネルにも適用されている。補助工法の現状については4章で述べることとする。切羽を分割するか補助工法を活用するかは、トンネルの規模、不安定な区間の長さ、その程度等によって適する方法を検討することとなる。

d) 施工技術上の課題

大断面トンネルを安全に、かつ効率的に施工するためには施工技術的にも技術開発が必要で、次のような技術の検討を行っており、実地の適用に向けた研究開発が必要である。

- ① 爆破工法では地山を痛めないスムーズプラスティング、人手を要する装薬作業の省力化等が必要である。また最近では能力の大きい掘削機械が普及しつつあり、従来に比べて堅い岩まで高効率で掘削できるようになっている。大断面トンネルでは作業スペースが大きくとれるところから、機械掘削による能率の高い工法の可能性がある。特に下半断面やインパートの部分の比率が大きいため、これらの部分を大規模に掘削する工法の開発も必要である。
- ② 長尺のロックボルトが必要で、特に孔壁が自立しないような地山に対して、長いボルトが必要である。自立性の悪い地山で能率良く施工できる技術、長いボルトを効率的に打設する技術の開発が必要である。
- ③ 吹付けコンクリートの設計厚さ、面積ともに大きく、能率の高い施工法、例えば大容量の機械の採用や、高強度コンクリートや補強コンクリートを採用して厚さを抑える等の改善が必要である。
- ④ 大量の掘削土量となるため、大型機械によるズリ処理や連続ズリ処理システム等の開発が必要である。
- ⑤ 大型機械を投入した施工となり、排ガスの換気にも工夫が必要で、TBM導坑を使った坑道式換気等を研究する必要がある。
- ⑥ TBMを導坑掘削用に採用を検討しているが、将来

表-4 清水第三トンネル概要

路線名	第二東海自動車道
位置	静岡県清水市
延長	上り 1123 m 下り 1120 m
地質	新第三期中新世～鮮新世の砂岩及び砂岩泥岩互層
土被り	29 m～186 m
掘削工法	TBM 導坑先進工法

さらに進んだ機械化による、合理的な新工法の可能性を検討している。可能性のある技術については実現に向けて研究を行う予定である。

(5) 第二東名・名神高速道路トンネル試験施工計画

第二東名・名神高速道路の大断面トンネルの設計施工については前述のように検討してきた。しかし、従来の2車線トンネルや3車線トンネルでの経験を踏まえた延長線上での判断であること、解析も連続体を仮定した有限要素法解析にとどまっていることなどの限界がある。また想定されていない現象も考えられ、実施工で確認しなければならないことが多い。このため清水第三トンネルを先行して施工し、ここで各種試験を行い、その結果を検討して、第二東名・名神高速道路トンネルの設計施工の方針を定める計画である。

清水第三トンネルでは次のような検討事項について試験を行い課題を解決していく予定である。

- ① 支保構造物の作用効果を確認し、最適な支保パターンを検討する。
- ② 覆工に作用する荷重を検討し、補強の必要性を検討する。
- ③ 扁平大断面トンネルでは脚部の集中応力が大きくインパートは重要であるが、省略できる地山条件を検討する。
- ④ 上下線併設に伴う影響を調査し、補強の必要性やさらに近接することの可能性を検討する。
- ⑤ TBM導坑の効果を確認するとともに、導坑を利用した先行補強を試行し、合理的な施工法を検討する。また導坑を利用した調査手法について検討する。
- ⑥ 不安定な地山における適切な対処法、補助工法を検討する。
- ⑦ 可能性のある新技術、新工法についての試験施工を行い、開発を行っていく。

4. 最新の補助工法と大断面トンネルへの適用

(1) 補助工法の現状

山岳トンネル工法は、掘削と支保を繰り返してトンネルを掘進するが、掘削後支保工が効果を発揮するまでの

表-5 先受け工法一覧表

名	称	効 果	補 強 の 範 囲
フォアポーリング	鉄矢木 充填式フォアポーリング 注入式フォアポーリング モルタルフォアポーリング	天端の安定	5 m 未満
フォアパイリング	充填式鋼管フォアパイリング 注入式鋼管フォアパイリング 高圧噴射式フォアパイリング 高圧噴射式鋼管フォアパイリング	地表沈下抑制 切羽の安定	通常～15 m 充填式鋼管フォアパイリング及び 高圧噴射式鋼管フォアパイリング のうちメトロジェットは長いもの の実績あり
プレライニング		地表沈下抑制 切羽の安定	2～3 m
注 入		地表沈下抑制 切羽の安定	
垂直縫地工法		地表沈下抑制 切羽の安定	

間、地山が自立することが前提であり、自立しない場合には補助工法が採用される。また地山の变形やトンネルの沈下を防ぐために補助工法を用いる場合もある。

大断面トンネルでは、3章で述べたようにトンネルの安定にとって不利な要素があり、また安定のためには地山のゆるみを極力抑制する必要があるなど、従来以上に補助工法が重要になると考えられる。大断面トンネルを合理的に施工するためには、補助工法および補助工法を活用した施工法の技術を発展させておく必要がある。

補助工法の現状について、以下に述べる。

a) 先受け工

先受け工はトンネル周辺地山の崩落を防止したり、変形を小さくどめるために、切羽前方の地山に対して施工するものである。最近の先受け工を表-5に示す。フォアポーリングはNATMが定着した時期より鉄筋^{21),22)}や単管パイプ等があり、特別の設備がなくても施工できるものが多く、もっとも汎用性のある工法である。先受け長は短く、天端の崩落防止が主目的である。

最近採用されて注目されているのが先受け長が長いフォアパイリングである。

注入式フォアパイリングは特殊なビットを使って鋼管を地山に打設し、鋼管の周囲に注入を施して地山を改良し、鋼管と一体となった補強ゾーンを作るものである。長尺のポーリングを正確に実施することが重要であり、専用の施工機械を使うものと、汎用の削岩機で施工可能なものがあるが、先受け長はいずれも15m程度までである。注入材料はセメント系とウレタン系のものがあり、地山条件や目的によって選定されている。

高圧噴射式フォアパイリングは、穿孔しロッドを引き抜く時にセメントミルクを高圧で噴射しながら回転することにより、地山内にモルタル杭を造成するものである。

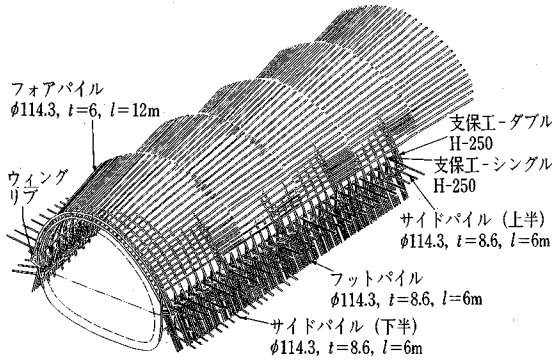
現在実績があるものは先受け長15m程度までで、直径60cm程度の杭を施工するものである。噴射改良中の地山内圧力を調整し、さらに長尺の施工が可能な工法が開発され(メトロジェット工法)第二神明道路小東山トンネルで、坑外から長さ39mのフォアパイリングを施工中²³⁾である。

注入式フォアパイリングや高圧噴射式フォアパイリングは切羽外周に沿って一定間隔に配置されるが、前方を少し開いたアンブレラ状に配置される。このため、これらの先受け工をこのように配置する工法を総称してアンブレラ工法と呼ぶことがある。ラップ長を残して予定の位置まで掘削が進むと、次のサイクルの先受け工が、この拡幅部を利用して施工される。

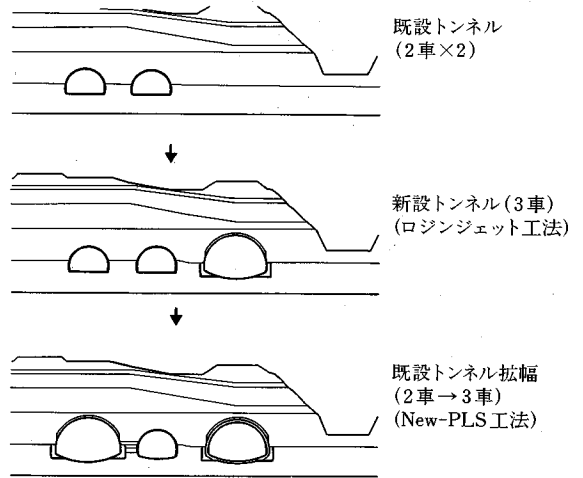
プレライニングは、切羽周辺の地山をトンネル掘削に先立って切削し、コンクリートを充填するもので、掘削時には既に硬化したコンクリートのシェルができており、沈下の抑制に効果のある工法である。

b) 鏡安定対策

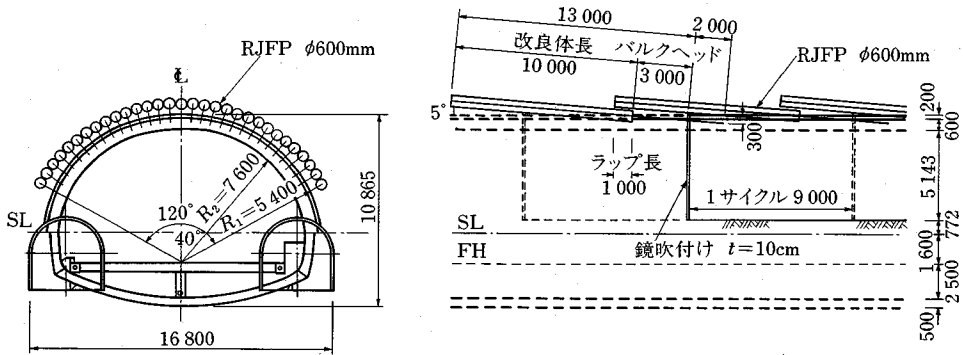
鏡安定対策は、切羽面の安定が得られない場合に採用されるもので、切羽面に吹付けコンクリートを施工する方法、ロックボルトを打設する方法等がある。ロックボルトは掘削のしやすさを考慮して、ファイバー製のものが使われることがある。切羽面が不安定となる場合は、固結度の低い地山の場合の他に、土圧が大きく切羽が押し出される場合がある。土圧が大きい場合には剛性の大きい支保工を採用し、仮インパートが採用されることがあるが、保護されていない切羽面が押し出される現象である。土圧の非常に大きな日暮山トンネル等²⁴⁾で採用された円形導坑は、鏡安定対策の役割も果たしていると考えられる。



図一六 舞子トンネルアンブレラ工法概念図²⁵⁾



図一七 保土ヶ谷トンネル改良計画



図一八 保土ヶ谷トンネル上り線(新設)断面図

c) 脚部補強工

脚部安定対策は、支保工脚部の沈下対策を行うもので、最近パイルを打ち込んで、パイル周辺の地山に注入する²⁵⁾ものや、ジェットグラウトによる工法²⁶⁾が開発されている。

d) 薬液注入工法

薬液注入工法は比較的古くから補助工法として使われており、止水を目的とするものと地山の強度増加を目的としたものがある。

e) 地下水位低下工法

山岳トンネル工法では、地下水がある場合、特に水圧を伴って流出するような場合には、吹付けコンクリートやロックボルト等の支保工が施工できなくなるばかりでなく、未固結地山や破碎された地山では切羽が安定しなくなり、何らかの対策が必要となる場合がある。地下水位低下がもっとも一般的な対策であるが、地下水位低下が地盤沈下を引き起こす場合等、この工法が採用できない場合もある。

f) その他

凍結工法、圧気工法などがあるが、山岳トンネルでは施工例が少なく、他に方法がないときに使われるような工法である。

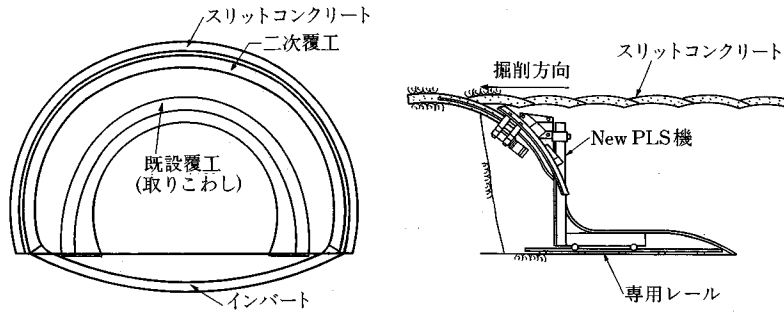
(2) 大断面トンネルへの適用例

a) 注入式フォアパイリング (AGF 工法)

(名神高速道路(改築) 梶原第二トンネル)²⁷⁾

梶原第二トンネル坑口部は、崖錐堆積物と強風化した丹波層群の砂岩、泥岩で土被りは最大 15 m である。フォアパイリングは穿孔後直径 101.6 mm の鋼管を残し低圧注入するもので、鋼管長 12.5 m、ラップ長 3.5 m とし、9 m のトンネルを掘進するものである。トンネル掘進に伴い、先受けの鋼管には曲げと切羽に向けて引張る軸ひずみが計測されている。またスパン全体で土圧を受け、一次支保に伝達されることが観察されている。

この工法は汎用の削岩機でも施工が可能であり、坑口部の崖錐や風化層で多くの施工実績を上げている。



図一 保土ヶ谷トンネル下り線 (拡幅) 断面図

b) 注入式フォアパイリング (トレビチューブ)

(本州四国連絡道路舞子トンネル)²⁸⁾

舞子トンネルの南工事区間は、大阪層群の砂礫、粘土層 (N 値 40 以上)、土被り 7~30 m、直上に家屋が建っている場所に 3 車線断面の上下線が近接したトンネルを建設するものである。許容沈下量はガス本管に対して 20 mm 以下、構造物に対して 30 mm 以下の厳しい条件となっており、先受け効果の高い注入式フォアパイリングによるアンブレラ工法を採用している。フォアパイリングは直径 114.3 mm、長さ 12 m の鋼管をアンブレラ状に打設し、早強セメントミルクを低圧注入した後、4 m ラップ区間を残して 8 m 区間のトンネル掘削を行うものである。フォアパイリングの施工は 2 ブーム搭載型の専用機により行っている。トンネル掘削工法は上半先進工法を採用し、脚部の沈下対策としてウイングリブ付き支保工の採用、支保工脚部の薬液注入等を行っている。

c) 高圧噴射式フォアパイリング (ロジンジェットフォアパイリング)

(東名高速道路 (改築) 所領第一トンネル)²⁹⁾

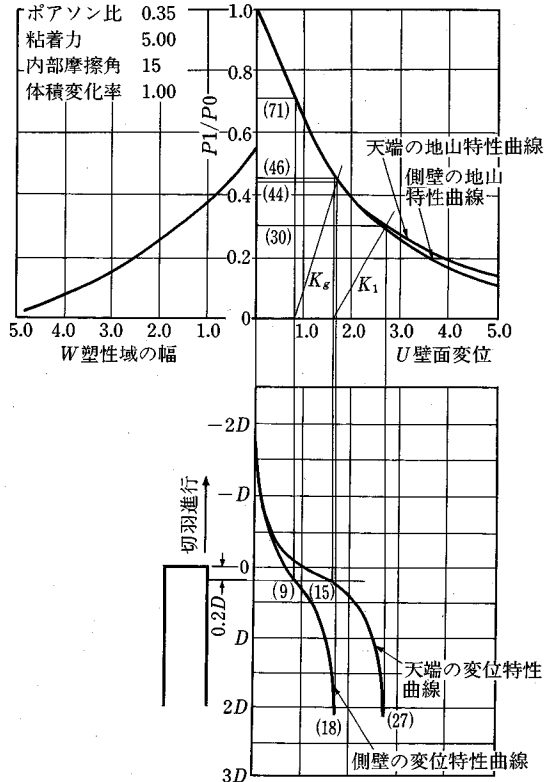
所領第一トンネルは最大土被り 17 m で、両坑口に広く分布する古富士ローム 2 層はスコリア、ローム、火山灰からなり、 N 値 3~20 程度である。前方の地山を改良し早期に支保すれば大きな断面のまま施工できるとの判断から、高圧噴射フォアパイリングが採用され、上半先進工法で施工されている。ここで採用されたロジンジェットフォアパイリングは穿孔後ロッド先端の特殊噴射装置から硬化剤を 400 kgf/cm² の高圧で噴射しながら回転、引き抜くもので、直径 50~70 cm のコラムを造成する。トンネル円周方向に 60 cm 間隔に配置し、穿孔長 13 m、改良長 10 m、ラップ長 1 m として 1 シフトのフォアパイリングで 9 m のトンネルを掘進している。

d) 高圧噴射式フォアパイリング (ロジンジェットフォアパイリング)、プレライニング (New PLS)

(横浜新道保土ヶ谷トンネル)⁹⁾

保土ヶ谷トンネルは渋滞対策のため 6 車線に拡幅工事中である。図一に示すように新設トンネルを完成し、

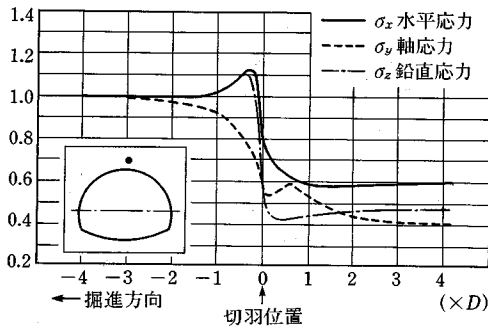
EGGER 完全弾塑性	支保反力比
外圧 26.0	$K_1 = \frac{410}{2.7-1.5} \times 26 \times 0.30 \approx 2700 \text{ kg/cm}^2$
トンネル半径 410	
変形係数 5000	$K_g = \frac{410}{1.8-0.9} \times 26 \times 0.44 \approx 5200 \text{ kg/cm}^2$
単位体積重量 0.0024	



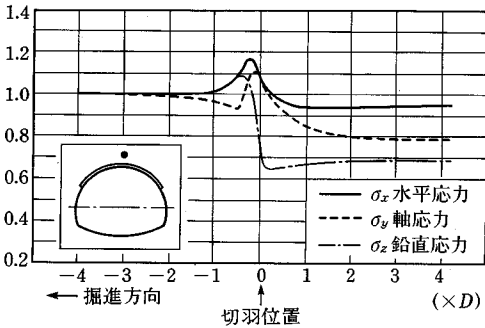
図一〇 理論解による特性曲線 (嵐山トンネル上半掘削時)³⁰⁾

交通を移した後、既設のトンネルを拡幅するが、日交通量 13 万台程度の重交通があるトンネルに近接した工事であること、土被り最大 17.5 m と薄い上に地表に家屋が存在すること、泥岩の上にローム層が分布し強度、安定性ともに不足する地山という厳しい条件下で 3 車線の大断面トンネルを施工するものである。

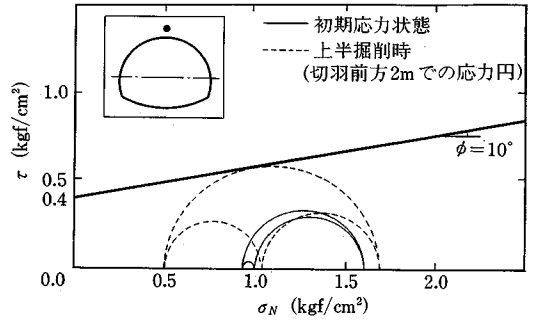
新設となる上り線トンネルの補助工法には高圧噴射フォアパイリングを採用し、側壁導坑先進工法で施工し



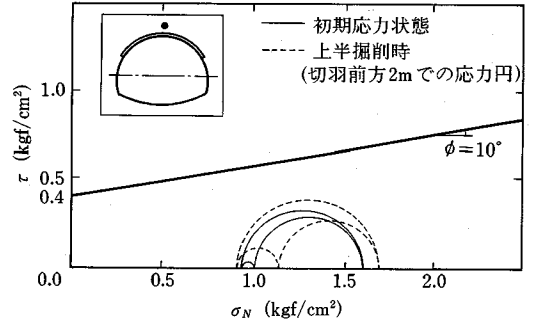
(a) 地山応力変化図(天端, 先受け工なし)



(b) 地山応力変化図(天端, 先受け工あり)



(c) モールの応力円(天端, 先受け工なし)



(d) モールの応力円(天端, 先受け工あり)

図-11 三次元有限要素解析による長尺先受け工の効果³¹⁾

たが、切羽安定と地表沈下抑制の目的を達している(図-8参照)。一部で高圧噴射のために、地表の隆起が認められ、排泥圧の管理を改善している。施工中の計測結果から推定すると、改良体の作るアーチと、鋼アーチ支保工、吹き付けコンクリートとでほぼ土被りに相当する荷重を受けているが、そのうち改良体のアーチが26~39%を分担している。また吹き付けコンクリートに比べて鋼アーチ支保工の分担率が高く、先受け工が受けた荷重が早期に支保工に受けられている様子がうかがえる。

既設トンネル拡幅工事となる下り線では、既設トンネルの覆工が存在することや、上り線での経験を生かして、プレライニングを採用し、全断面工法で掘削している(図-9参照)。ここで採用したプレライニングは、トンネル外周に沿って先受け長2m、厚さ40cmのスリットコンクリートを打設するものである。

(3) フォアパイリングの効果

トンネルは掘削に伴い、その内空断面を縮小するように変位するが、その変位は切羽が近づくに従って前方より始まる。これは理論的にも説明されているが、実際のトンネル現場でも、先行変位測定によって観察されている。特に地山の強度が再配分応力に比べて小さい場合には切羽到達以前に地山が塑性化する事もある。地表面の沈下を抑制したり、地山の強度を保全して切羽の安定を

保とうとすると、地山の力学的性質を改善するか、切羽の前方で何らかの対処をする必要を示している。道央自動車嵐山トンネルの蛇紋岩の区間で、地表からの延長110mの鉛直ボーリング孔を利用した先行変位測定³⁰⁾では、切羽到達時の変位量は、上半での最終変位量に対して、鉛直方向45%、水平方向35%に達していた。この結果を用いてFEM解析を利用した特性曲線法解析が行われているが、上半断面で変位が収束した段階では、初期地山応力の60~65%が再配分され、支保工は35~40%を分担している結果となった。なおこの地点での地山強度比は約0.4であった。

長尺先受け工の効果を検討するため切羽周辺の地山の挙動を3次元有限要素法で解析した研究³¹⁾があるが、図-11に示すように先受け工によって、地山内応力を三軸状態に保っていることがわかる。特に水平方向とともにトンネル軸方向の応力の変化を抑制している。上半脚部の地山応力は、先受け工を施工すると増加するため、先受け工を計画する場合、脚部の支持力が重要であることを示している。

被りの小さい土砂地山を対象にアルミ積層板を使った切羽周辺の地山挙動に関する研究³²⁾では、図-12に示すように、土被りが小さい場合には掘削に伴う切羽前方地山の変位は地表にまでおよぶが、土被りが大きくなると、グランドアーチが生じて、変位が地表にまでほとんど影

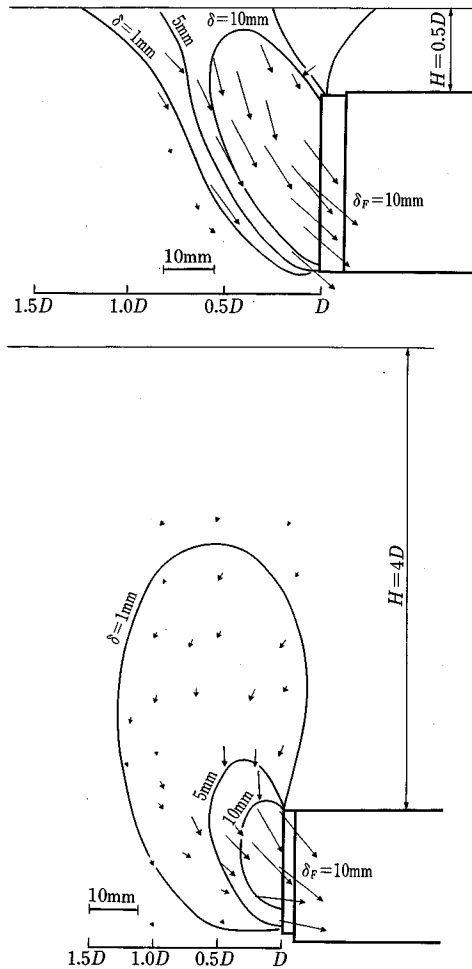


図-12 切羽前方の地山挙動に関する実験結果³³⁾
(D はトンネル直径)

響しなくなることが示されている。また切羽を小さくすると、地山内の変位が小さく押さえられることが示され、切羽分割の効果や、大断面トンネルでの安定の難しさを示している。この実験での切羽前方の等変位曲線によれば、変位の影響は前方0.5~1D (D はトンネル代表直径) におよんでいることがわかる。

(4) 補助工法の課題

山岳トンネル工法は補助工法の発達によって、その可能性を大きく広げている。従来、トンネル掘削にとって不都合な地山条件が出現した場合には、1回あたりの掘削断面積や掘進長を小さくして支保し、土圧を支持する構造物を作る方法が採られていた。最近では比較的簡易に施工でき、効果も大きい補助工法が出てきたことから、予期せぬ地山条件の変化による段取り替えやトラブルなどの苦労なく施工できるようになっている。すなわち、施工可能なように地山を改良し、掘削は安全かつ能率的

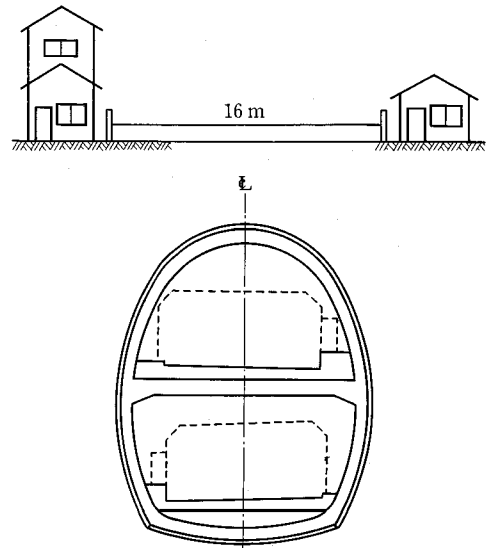


図-13 青梅トンネル計画断面図

に行う、能動的な施工が可能になっており、これは技術的に大きな課題を持つ大断面トンネルには極めて有利である。必要な場合には地山を改良し、地山の持つ能力を最大限有効に使うような考え方ができる。

現在の補助工法は大きく進歩しているとはいえ、まだ①費用の増加が大き、②補助工法を施工するために時間をとられる、③補助工法および補助工法を使ったトンネルの設計法が確立されておらず、判断に手間取る、などの課題が残されている。また、さらに使いやすく効果の大きい工法の開発も待たれる。大断面トンネルを効率よく建設するためには、今後の研究および技術開発によって、こうした課題が解決されることが必要である。

5. 大断面道路トンネルの将来

掘削断面積 200 m²以上の大断面トンネルについては、まもなく試験施工の段階となる。現地での試験および関連の研究によって課題を解決していかなければならない。さらにこれらの内、延長の長いトンネルでは、換気用トンネルと本トンネルとの分岐、合流部が出てくる。分岐、合流部ではさらに大スパンのトンネルとなることから、地山条件や換気用トンネルの大きさ等によって、分岐、合流部の計画が可能かどうか、またその場合の設計方法について研究しなければならない。

今後、都市部では用地上の制約が大きくなり、上下線の隔離をとらない眼鏡型のトンネルや、上下に二層構造となったトンネル等の要求が出てくるものと想定される。既に首都圏中央自動車道では、図-13に示すような4車線を収容する二階建てトンネルが計画されている

る³³⁾。6車線道路でこのような構造を検討するとすればさらに大断面となる。3車線断面のシールドトンネル技術についても建設省総合技術開発プロジェクトで研究されているが³⁴⁾、分岐・合流部や、延長の短いトンネル等では山岳工法が有利な場合も多く、今後ともさらに高度な技術の開発が必要である。

このように今後大断面に加えてさらに困難な条件のトンネルが必要になると考えられ、その場合にはより高度な技術が求められる。

6. おわりに

トンネル工事は古来、作業環境が厳しく危険を伴うものであった。閉鎖空間であり、地下水の関係で水をあびたり湿気があるなどの環境とともに、事前には地山条件が確実には把握できないため、突発的な出水や崩落等の危険があったのである。大断面トンネルではこうした事態はさらに深刻であり、従来の延長線では解決できない問題もある。地山を的確に把握し、適切な設計ができなければならない。そのためには、TBM導坑のように調査にも工夫が必要である。設計には有限要素法等の解析が有効に利用できるようになっており、これを活用することにより事態を予測するのに役立つものと考えられる。また、地山条件によって通常の方法では施工不可能な場合には補助工法を活用して解決しなければならない。これらの技術を駆使して大断面トンネルを自由自在に施工できるようになった時には、トンネルに対する従来の概念が大きく変わる可能性がある。

大断面トンネルの合理的な設計、施工法を確立するためには、多くの研究者や技術者の知見が必要であり、試験施工のデータや技術上のニーズについてはできるだけ公表するとともに、研究成果を注目しながら検討しなければならない。

参考文献

- 1) K. Komori and J. Yamada: Tokyo Expressway Goes Underground for Environmental Preservation, TUNNELLING ACTIVITIES IN JAPAN 1994, pp.17-18, Japan Tunnelling Association.
- 2) 植木 博: ポストN市の地下高速道路整備計画, トンネルと地下, 第26巻1号, pp.41-47, 1995.1.
- 3) 日本道路協会: 道路構造令の解説と運用, pp.11-12, 1983.2.
- 4) 荒牧英城: 第二東名・名神高速道路の計画と課題, 土木学会論文集, No.444/6-16, pp.1-9, 1992.3.
- 5) 天野, 長友: 新体系土木工学 70 トンネル(1)―山岳トンネル, pp.285-297, 技報堂出版, 1980.
- 6) 日本道路公団: 設計要領第3集トンネル, pp.34-35, 1985.9.
- 7) 日本トンネル技術協会: 大断面トンネルの設計・施工法

- に関する調査研究(その3)報告書<山岳部編>, 1994.3.
- 8) 松本, 西岡: トンネルの設計理論, pp.93-110, 構造計画研究所, 1992.
- 9) 高速道路技術センター: 横浜新道(拡幅)保土ヶ谷トンネル拡幅に伴う施工方法の検討(その2)報告書, 1995.3.
- 10) 川本・吉中・日比野: 新体系土木工学 20 岩盤力学, pp.244-254, 技報堂出版, 1985.3.
- 11) N. Barton: COMPARISON OF PREDICTION AND PERFORMANCE FOR A 62m SPAN SPORTSHALL IN JOINTED GNEISS, QUARTZITE CICLO DI CONFERENZE DI MECCANICA E INGEGNERIA DELLE ROCCE, pp.17-1~17-15, TORINO, 24-27, Novembre, 1992.
- 12) 日本道路公団試験所: 日本道路公団試験所技術資料第350号, トンネルの標準設計に関する研究報告書, p.18, 1986.2.
- 13) 同上, pp.213-226.
- 14) 土屋 敬: ロックボルト・吹き付けコンクリートトンネル工法の設計に関する研究, 1986.5.
- 15) 桜井春輔: トンネル掘削によるゆるみ領域(その評価と制御について), トンネル講習会テキスト, pp.63-71, 1983.
- 16) 土木学会: トンネル標準示方書解説, pp.52-53, 1964.
- 17) 益田他: 中壁工法による3車線トンネルの施工 東名改築の鳥手山トンネル, トンネルと地下, 第18巻10号, pp.15-19, 土木工学社, 1987.10.
- 18) K. Koshimura: Twin Tunnel to the Akashi Straits Bridge, TUNNELLING ACTIVITIES IN JAPAN 1994, pp.13-14, Japan Tunnelling Association.
- 19) 水落他: 住宅密集地で土被りの小さい大断面双設トンネルを掘る 横浜市環状2号線港南トンネル(仮称), トンネルと地下, 第24巻4号, pp.7-14, 土木工学社, 1993.4.
- 20) 長内他: TBM導坑による合理的トンネル施工 秋田自動車湯田第二トンネル, トンネルと地下, 第24巻7号, pp.27-35, 土木工学社, 1993.7.
- 21) 土木学会: トンネル標準示方書(山岳編)・同解説, pp.102, pp.185-191, 1986.
- 22) 日本道路協会: 道路トンネル技術基準(構造編)・同解説, p.195, 1989.
- 23) 高速道路技術センター: 第二神明道路(改築)小東山トンネル施工検討報告書, 1995.3.
- 24) 中村他: 超膨張性泥岩を克服 上信越自動車道日暮山トンネル, トンネルと地下, 第24巻1号, pp.7-16, 土木工学社, 1993.1.
- 25) 酒井他: マイクロパイルによる側壁の沈下抑制効果, 第29回土質工学研究発表会, pp.293-296, 1995.6.
- 26) 大谷他: 崩壊性斜面での補強RJFP工法の施工 名神高速道路(改築)梶原トンネル坑口部, トンネルと地下, 第24巻3号, pp.228-237, 土木工学社, 1993.3.
- 27) 保岡哲治: 長尺先受けの計測結果と作用効果について, 土木学会第40回年次学術講演会, pp.303-304, 1994.9.
- 28) 岡澤他: 大断面土砂トンネルに挑むテレビチューブ工法, 施工技術報告会(土木学会, 土質工学会, 建設機械化研究所), pp.101-108, 1994.
- 29) 小泉他: 土砂地山に土被りの薄い3車線トンネルを掘る

- (その2)東名改築所領トンネル, トンネルと地下, 第21巻6号, pp.43-51, 土木工学社, 1990.6.
- 30) 稲葉他: 山岳トンネルの新技术(35), トンネルと地下, 第21巻3号, pp.64-72, 土木工学社, 1990.3.
- 31) 中田他: 3次元有限要素法による超大断面トンネルの挙動検討, 第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.131-136, 1994.
- 32) 上野他: 砂質地山トンネル掘削に伴う切羽前方の地山挙動について, 第21回土質工学研究発表会講演集, Vol. 2, 1986.
- 33) 高速道路技術センター: 首都圏中央連絡自動車道青梅トンネルの施工に関する技術検討(その3)総括報告書, 1994.3.
- 34) 水谷敏則: 地下空間建設技術, 第40回道路講習会講義要旨, pp.107-116, 日本道路協会, 1993.

(1995.3.31 受付)