

委員会報告  
**Committee Report**

## 委員会報告

# NATM とシールド工法の境界領域に関するシンポジウム

## SYMPOSIUM ON NATM AND SHIELD TUNNELLING METHOD IN URBAN AREA

トンネル工学委員会 技術小委員会 都市トンネル設計検討部会  
*The Committee on Tunnel Engineering*

トンネル工学委員会（委員長：吉村 恒）技術小委員会都市トンネル設計検討部会ではかねてから、都市トンネルの設計施工技術に関する調査・検討を進めておりますが、今般標題のシンポジウムを開催しましたのでご報告します。

当日は多くの会員に参加頂き、活発な討議をありがとうございました。なお、会場が狭く（土木学会図書館）、入場できなかった会員もおられたことをお詫び申し上げます。

### 1. プログラム

会期：平成2年12月6日（木）

- (1) 開会挨拶 吉村 恒 委員長
- (2) 13:30~14:00 基調講演「都市トンネルにおける NATM の可能性」 桜井春輔（神戸大学）
- (3) ケースヒストリー（14:00~15:50）
  - ① 土丹層における NATM とシールド工法（横浜市営地下鉄3号線）
  - ② 都心部における NATM とシールド工法（京葉線）
  - ③ 成田砂層における NATM（東葉高速線）
  - ④ 洪積層におけるシールド工法（菅団地下鉄有楽町線）
  - ⑤ 洪積層におけるシールド工法（都営地下鉄12号線）
- (4) パネルディスカッション（16:00~18:00）  
 [パネリスト] 五十音順・敬称略  
 秋元泰輔（首都高速道路公団・工務部設計技術課長）  
 氏原完典（大成建設・土木本部土木技術部部长）  
 小泉 淳（東洋大学・工学部土木工学科助教授）  
 桜井春輔（神戸大学・工学部土木工学科教授）

滝沢正道（鉄道建設公団・工務部工務第2課長）  
 千野 彰（横浜市交通局高速鉄道建設部計画課長）  
 松本正敏（東京都交通局高速電車建設本部参事）  
 山本 弘（熊谷組・技術研究所副所長）  
 司会 河田博之（都市トンネル設計検討部会主査）  
 (5) 閉会挨拶 吉川恵也 技術小委員長

### 2. 概 要

開会にあたり吉村トンネル工学委員会委員長から「トンネル工学委員会は初代藤井松太郎委員長のもと昭和36年12月に発足し、昭和39年に最初の『トンネル標準示方書』（現在の山岳編）を制定し、以来数度にわたる改訂を経るとともに、新たに「開削編」および「シールド編」を追加制定し、現在は数年後を目指して「山岳編」、「開削編」、「シールド編」の改訂準備にとりかかっている。

この間、土質工学会や昭和50年に発足したトンネル技術協会においても、トンネル技術のさまざまな分野における調査・研究等がなされるようになってきている。これらの学協会にはそれぞれ役割があるが、最も歴史を有する当学会としては、今後ともトンネル技術に関してリーダーシップを発揮できることを願っている。

近年、国内におけるトンネル技術も NATM の導入や密閉シールド工法の発展等、眼を見張るものがあり、さらに新しい多断面シールドや ECL の技術等の開発も盛んになりつつあることはまことに喜ばしいことである。欧米からの技術導入から脱皮して、独自の理論や技術開発に向けて関係各位のなご一層の研鑽をお願いしたい。

本日はそうした背景を踏まえ、今後の議論の出発点とできればと考えている。是非、このシンポジウムをエン

ジョイして頂ければと願っている]

との挨拶があった。

続いて、神戸大学の桜井教授から「都市トンネルにおける NATM の可能性」と題して基調講演がなされた。

次に、パネルディスカッションのための基礎的な知識を出席者に提供する意味もあって、東京周辺での代表的な境界領域における「NATM とシールド工法」のケースヒストリーを5例紹介した。発表者はいずれも当検討部会の委員である。

当日は基調講演およびケースヒストリーについての講演要旨をテキストとして、参加者に配付した。また、東京周辺における NATM とシールド工法の境界領域の事例について収集したデータを整理した一覧表をテキストの中に綴じ込んだ。

ついで、基調講演者の桜井教授を囲んで、8人のパネリストによる討論が行われた。司会は都市トンネル設計検討部会の河田主査で、適宜、会場からの質疑をまじえながら進められたが、終始、熱気に溢れる活発な議論がなされた。

最後に、吉川技術小委員長が閉会の挨拶をして、当日のシンポジウムを締め括った。

### 3. 基調講演の要旨

桜井教授は基調講演でおおむね次のような展望を紹介された。

昭和50年代の中頃に鉄道トンネルに NATM 技術が導入されてから、今日に至るまで多くの工事経験を経て、山岳トンネルの一般工法として定着してきており、さらにこの頃では都市あるいは都市周辺の、土被りの少ない、より軟らかい地盤にも適用されるようになってきている。

国内における都市域の NATM の施工例を整理すると

① 地質的には洪積層までが一応の適用の目安である。

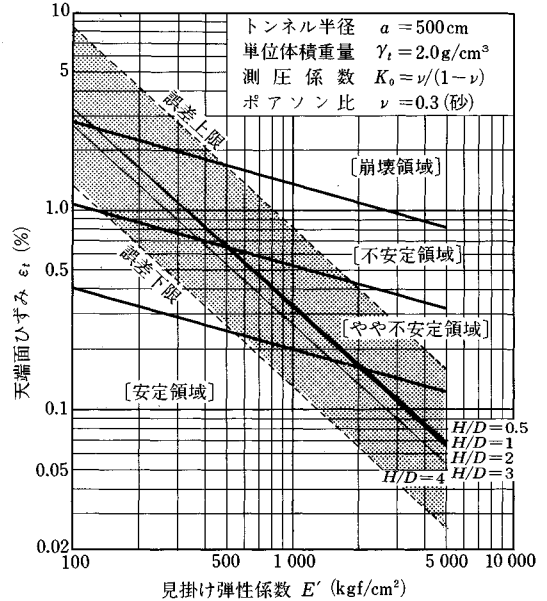
② 近接して重要な構造物が存在しても、適切な補助工法を採用することにより有害な影響を与えることなく施工されているトンネルがかなりある。

③ 地山の物性値として NATM の適用限界は  $q_u = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $E_s = 100 \text{ kgf/cm}^2$  程度と考えられる。

④ NATM にとって、地下水の処理はきわめて重要であり、トンネル全体の湧水量がおおむね 50 l/分を越えたと何らかの補助工法が必要である。

⑤ 切羽の自立性の目安として細粒分の含有率で判断し、砂質地盤と粘土質地盤に分けるのがよい。10%以下の含有率では切羽の自立性が悪い。

⑥ トンネル掘削に伴う地盤変位の傾向は粘性土地盤と砂質地盤で異なり、砂質地盤では土被り比 ( $H/D$ ) が



図一 トンネル壁面ひずみ ( $\epsilon_t$ ) と見掛け弾性係数 ( $E'$ ) の関係による定性的切羽の自立性の判定 (砂質地盤)



写真一 パネルディスカッション

小さいとき天端ひずみは大きくなり、側壁ひずみは逆に小さくなる。粘土質地盤では土被り比にかかわりなくほぼ一定である。

⑦ 細粒分の含有率が大きいほど見掛けの側圧係数は大きくなる傾向にある。

つづいて、支保パターンへの設計に対する試案が紹介された。これは過去の施工実績を踏まえて、評価点法により標準支保と補助工法を決定するものである。その方法の基本は、地山のひずみを許容ひずみ以内にとどめようとするものである。いま、実績結果および弾性解に基づき、地山のひずみと見掛けの弾性係数との関係を両対数グラフに表わすと、図一に示すように土被りとほぼ無関係に直線で表わされる。図から、砂質地盤においては地山の見掛けの弾性係数が  $500 \text{ kgf/cm}^2$  以下になれば、

地山は非常に不安定となることがわかる。いま、もし、地山の変形係数が  $250 \text{ kgf/cm}^2$  であると、見掛けの弾性係数を支保によって少なくとも  $500 \text{ kgf/cm}^2$  以上にする必要がある。その場合、提案された評点法によると全支保量として評価点は約 60 点以上必要となる。標準支保は一般に 20~30 点程度であるので、補助工としては 30~40 点のものを選定しなければならない。なお、それぞれの補助工には評点が与えられているので、過去の実績を参考にして、その中から 30~40 点になるよう、適当なものを組み合わせて選定すればよい。なお、ここで提案した設計法の中心となる評点については、今後さらにデータを蓄積して、より信頼度の高いものにしていかなければならない。

4. ケースヒストリー (要約)

① 土丹層における NATM とシールド工法 (横浜市営地下鉄 3 号線)

横浜市交通局高速鉄道建設部 萩野幸男

本トンネルは被圧滞水砂層を有する土丹層における地下鉄の NATM とシールド工法によるトンネルであり、都市部における NATM としては初期のものである。

NATM の事例として、掘削断面積  $146 \text{ m}^2$  の偏平な駅部の三ツ沢上町トンネルおよび複線から単線並列に移行する篠原トンネルと、シールド工法の事例として新幹線と交差する単線並列の新横浜トンネルを比較して紹介した。

工法選定条件を、①トンネル諸元、②自然条件、③都市的条件、④環境的条件、に分類したうえで、各トンネルについて考察した。この事例では、地下水の排水による地盤沈下と新幹線との交差の有無が主な工法選定条件となっている。

三ツ沢上町トンネルは国道 1 号下の偏平な大断面であるが、地表沈下を小さく抑えることができ、篠原トンネルでは断面変化に対応できる NATM の特長が現われていた。

NATM の二次覆工はゆるみ荷重を想定した従来の設計手法によって行っており、NATM とシールド工法の接続点での設計について比較した。

② 都心部における NATM とシールド工法 (京葉線)

JR 東日本東京工事事務所 土井博己

京葉線東京地下駅の東端部 70 m 区間に NATM を採用した。地質は東京礫層下部の砂質土で安定した性状を示している。

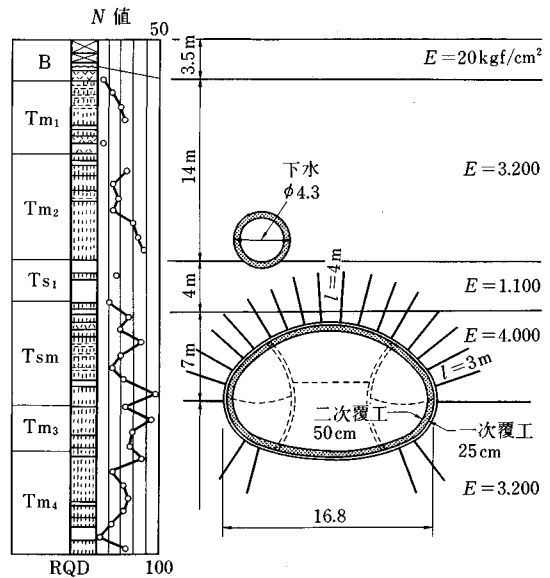


図-2 三ツ沢上町 (駅部-NATM) 断面図

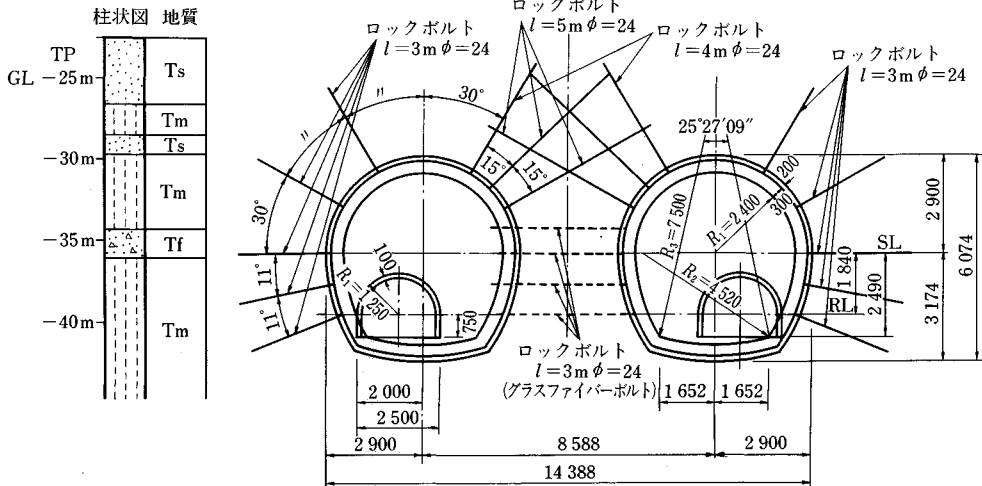


図-3 篠原トンネル (単線並列-NATM) 断面図

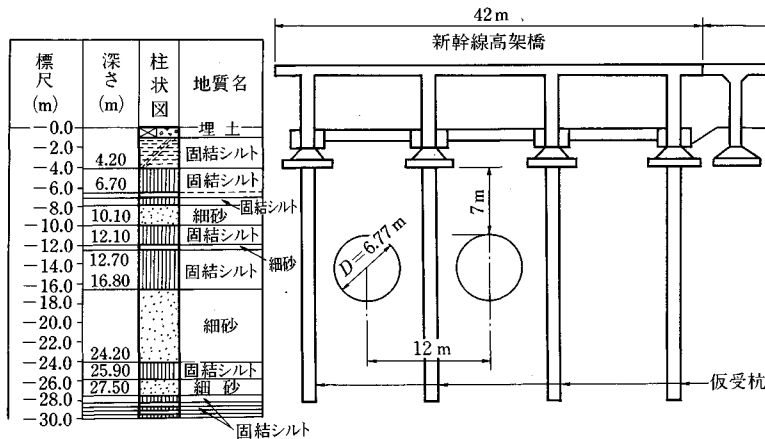


図-4 新横浜トンネル（単線並列-シールド工法）断面図

トンネルはすべて道路直下に位置しており、トンネル周辺の8~9階建てのビル群や道路交通への影響を最小限にとどめ、シールド工法や開削工法と同程度の施工時の安全性を確保すべく、多くの補助工法を採用した。トンネルの両側には厚さ50cmの遮断（遮水）壁を泥水固化工法により築造し、トンネル掘削区間全体にD32の垂直縫地ボルトを打設した。また、遮断壁内はディープウェルにより地下水位の低下を図った。NATM工区に隣接したシールド工法工区は、メガネ形断面のMFシールド工法により施工した。今回は世界で初めての特殊断面のシールドトンネルであったが、施工の結果はシールド掘進速度、蛇行量とも満足できるものであった。

東京駅の近くの、都心部での大断面NATMの採用と特殊断面泥水式シールドトンネルの施工であったが、特にNATMについてはこのような稠密な都市周辺環境での実施例が皆無であり、計画や設計の段階から、施工管理および最終仕上げまで関係者が入念に検討し、きわめて満足のできる結果を得ることができた。

③ 成田砂層におけるNATM（東葉高速線）

鉄道公団設計室 久保泰文

本トンネルは習志野洪積台地における成田砂層（N値：10~40）に施工する駅部を含む延長2.3kmの鉄道複線トンネルである。

周辺環境はトンネルルート上が交通量の多い主要地方道となっており、その周辺には商業ビルおよび住宅が密集している。なお、土被りは5~12mと少ない。

このような条件下で安全かつ経済的に施工を行うため、シールド工法、開削工法およびNATMの各工法を比較検討した結果、駅部の断面変化に対応が容易で、切羽安定のための補助工法としてディープウェルと薬液注入を併用しても経済的に有利であるNATMを採用することとした。

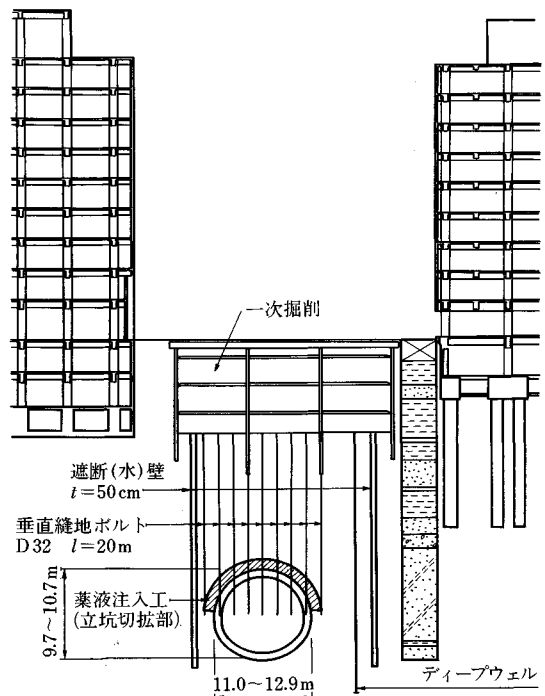


図-5 補助工法標準断面図（NATM）

また、掘削工法は加背割を6分割とするCRD工法を開発し、支保は150Hの鋼製支保工および吹付けコンクリート（ $t=25\text{cm}$ ）を主メンバーとし、鏡止め吹付けとフォアパイリングを併用することにより、地山を極力緩めないよう慎重に施工した。

その結果、地盤変位は初期の目標値以内に収まり、安全かつ経済的に施工を完了することができた。

④ 洪積層におけるシールド工法（営団地下鉄有楽町線） 営団建設本部計画部 入江健二

本トンネルは営団有楽町線・新富町~月島間におい

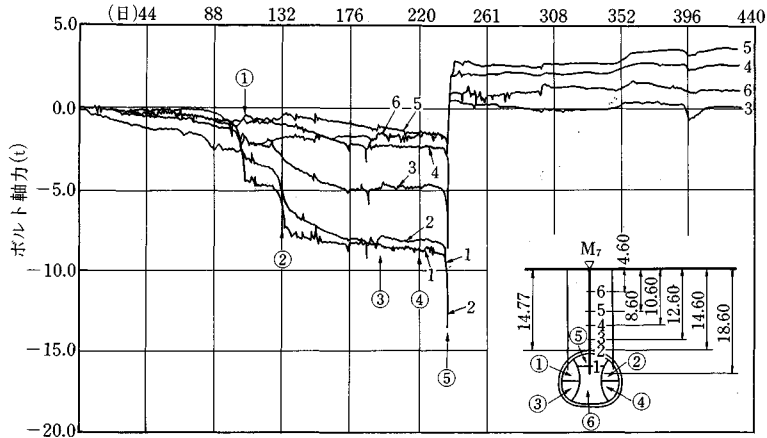
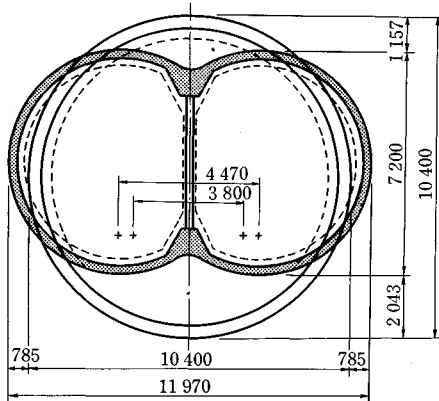


図-6 垂直縫地ボルトの軸力経時変化図



諸元比較

(単位：m 当たり)

項目	単位	円形	MF	比較
断面外径(縦)	m	10.40	7.20	0.69
断面内径(横)	m	10.40	11.97	1.15
掘削断面積	m <sup>2</sup>	87.9	76.1	0.87
一次覆工	m <sup>3</sup>	12.6	10.3	0.82
二次覆工	m <sup>3</sup>	6.3	5.6	0.89
裏込注入工	m <sup>3</sup>	4.4	5.5	1.25
インパットコンクリート	m <sup>3</sup>	9.7	1.8	0.19

図-7 MFシールドの断面

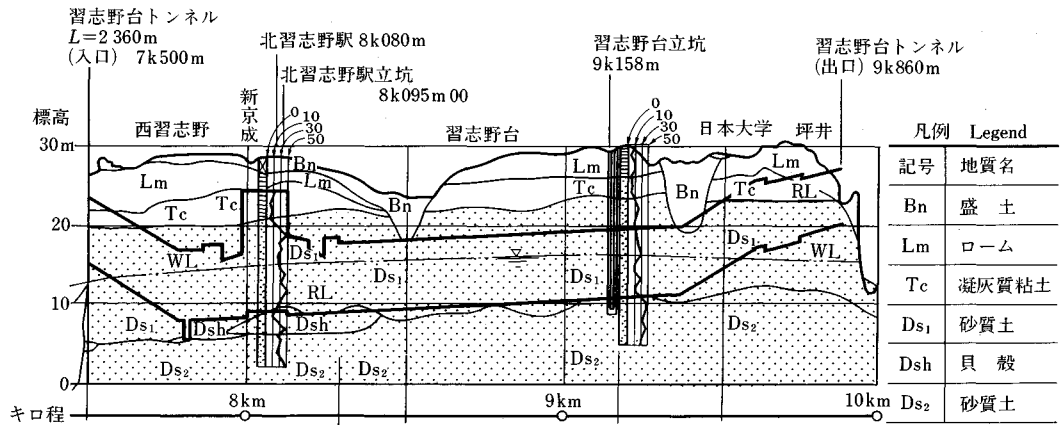


図-8 地質縦断面図

て、泥水式シールド工法により施工された延長 930 m、トンネル外径 9.8 m のトンネルである。地質は新富町方約 100 m 間が  $N$  値 0~2 のきわめて軟弱な有楽町粘土層が主体であり、その他は  $N$  値が 30~50 以上の東京砂層

および東京礫層が主体の硬い地盤であるが、この地層ではトンネル下部で約 2.5 kgf/cm<sup>2</sup> の高い被圧水頭を有し、かつ、粒度組成が悪く崩壊性の高い地層となっている。

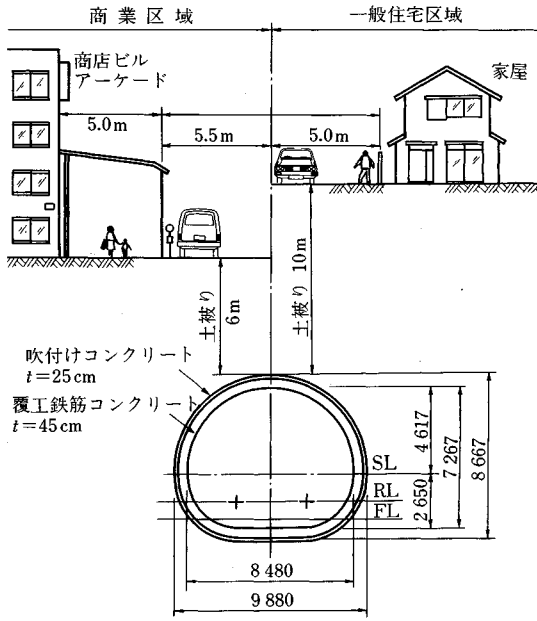


図-9 トンネル断面図

地上部はトンネル延長比で、道路部40%、民地部と河川部がそれぞれ30%となっており、さらに、都心部のトンネルであることから、数多くのビルや河川護岸基礎、橋台、下水道シールドトンネル等の施設と非常に近接した位置関係となっており、周辺地盤に極大影響を与えないことが最重要課題であった。一方、設計面では断面力解析に回転ばねを考慮した計算法を採用した。このことにより継手部の応力が低減し、平板形セグメントの継手金物を大幅に簡素化でき、セグメントのコストダウンが可能となった。

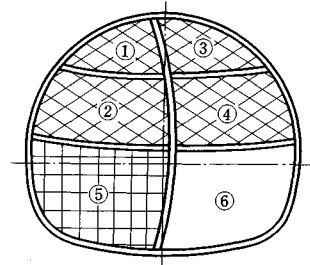
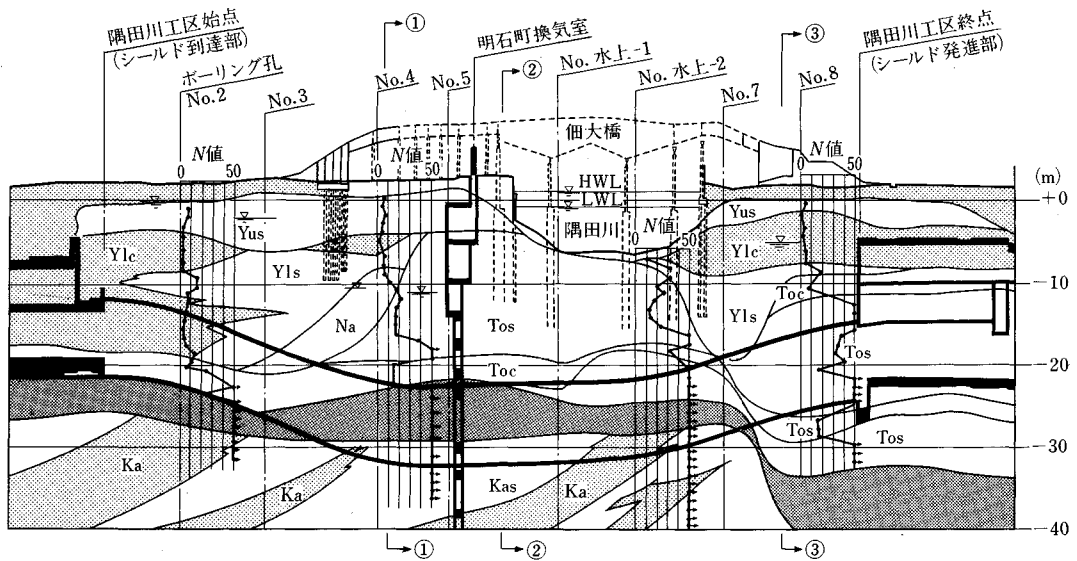


図-10 CRD工法施工順序図



時代	地層名	記号	土質
沖積世	有楽町層上部	Yu	砂質土主体 (Yus)
	有楽町層下部	Yl	粘性土主体 (Ylc)
洪積世	七号地層	Na	砂質土 (Nas)
	東京層	To	砂 (Tos), 粘土互層 (Toc)
	東京礫層	Tog	砂礫
新第三紀	上総層	Ka	砂 (Kas), 泥岩互層 (Ka)

図-11 地質縦断面図

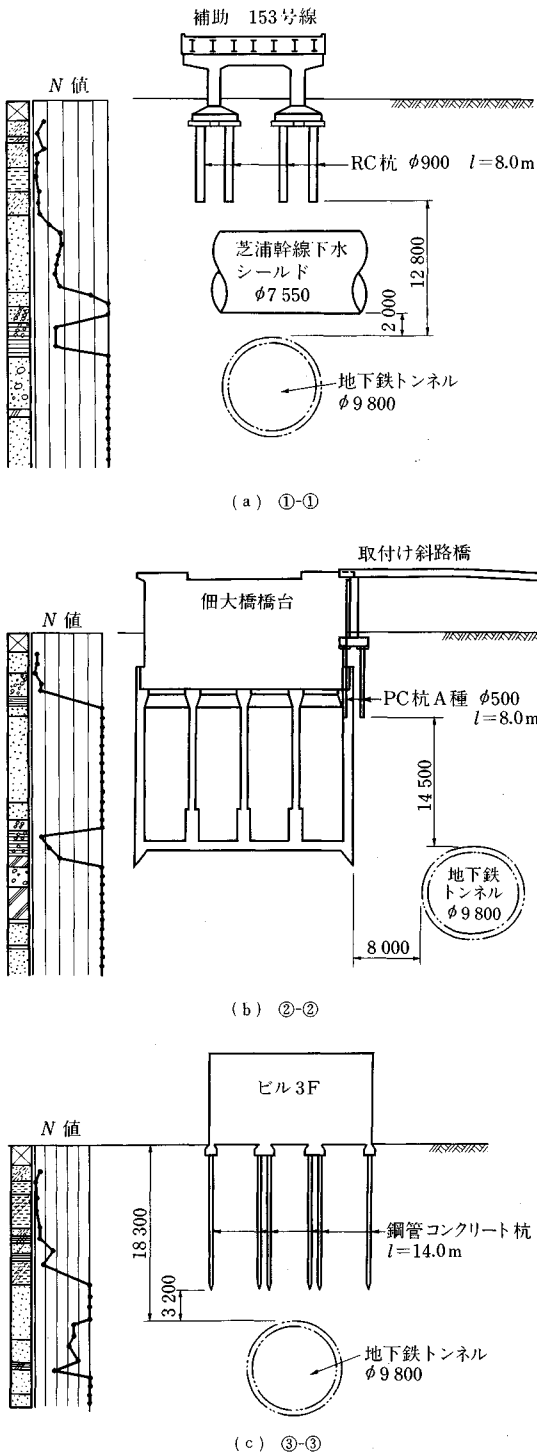


図-12 主要部横断面図

⑤ 洪積層におけるシールド工法（都営地下鉄12号線）東京都交通局高速電車建設本部 大野宏紀  
本トンネルは都営地下鉄12号線・練馬～光が丘間の

春日町から豊島園に至る、延長1240m（トンネル外径8.5m）を土圧式シールド（泥土圧）工法により施工した。

地層はトンネル延長の75%が東京層と江戸川層の砂礫層、25%が江戸川層の粘性土層からなっている。このうち東京礫層には300～350mmの大礫が点在し、また、地下水は非常に豊富で間隙水圧はトンネル中心部で1.5 kgf/cm<sup>2</sup>、透水係数は10<sup>-2</sup> cm/sである。

地表の条件は、発進部から600mが都市計画道路予定地の民地下、残り約600mは既設の道路下となっており、途中、石神井川、練馬下水幹線を横断する。したがって、土被りは14→24→14mと変化している。既成市街地での施工のため、地盤沈下を最小限に抑え、既設構造物への影響を極力少なくするため、切羽の安定管理（泥土圧管理）と裏込め注入には特に注意して施工した。

施工の結果は、砂礫層におけるビットの交換があったものの、地表沈下は数mm以下に抑えられ、ほぼ所期の目的を達成した。

セグメントは桁高を低くできる平板形RCを主体に、拡幅の必要なポンプ室付近ではダクティルセグメントを採用した。

### 5. パネルディスカッション

司会 それでは、最後のセッションになりましたが、ただ今よりパネルディスカッションを進めさせていただきます。なお、途中で会場からご質問や、ご意見を頂くチャンスを作っておりますので、よろしくお願いします。

まず最初に、本日いろいろな事例報告があり、また桜井先生には基調講演を頂きました。それらを総括する意味で、都市および都市周辺においてトンネルを建設する場合にNATMを採用するか、あるいはシールド工法を採用するかといった、その適用条件について、ごく大ざっぱにおさらいをしておきたいと思います。

まずNATMでございますが、この工法がどのへんまで都市トンネルの領域に適用が可能かといった視点から、あらためて桜井先生に……。

桜井 まず、NATMの限界について申し上げますと、テキストの図からもわかりますように、一軸圧縮強度で1 kgf/cm<sup>2</sup>以上、変形係数が100 kgf/cm<sup>2</sup>以上あれば、一応強度的には問題がないと考えられます。すなわち、この値以上あればNATMを検討するに値すると思われます。また、逆にこれ以下であれば、シールド工法になるかと思えます。なお、この限界の値は、理論的なものではなく、過去の実績によって得たものです。なお、図において、NATMの適用の範囲には、ばらつきがありますが、これは地下水や周辺環境の問題によるものと



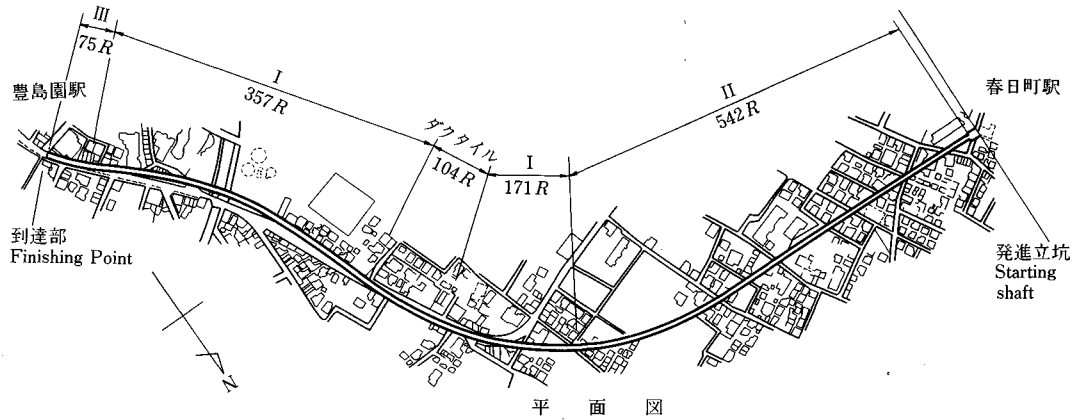


図-13 平面図

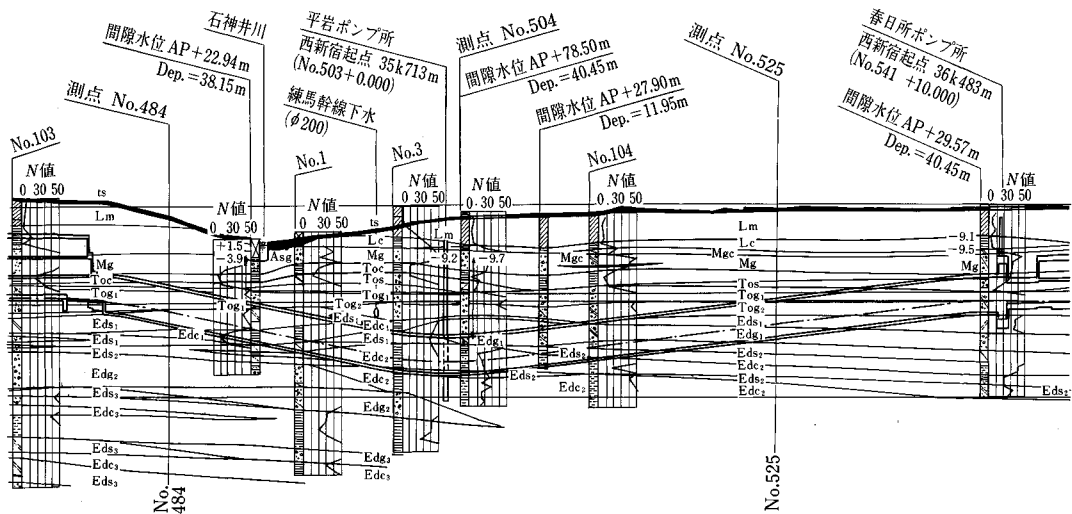


図-14 地質縦断面

思われます。また、バインダー分30%以上を粘性土地盤と定義しますと、その地山は大変安定してまいります。すなわち、NATMの適用の可能性が高くなるようです。

次に、地下水についてですが、過去の実績によりますと50 l/minが1つのポイントになるようです。すなわち、それ以上水が出る場合は、何らかの水抜工法、あるいは、薬注等による止水が必要になるものと思われます。地下水があるかないか、また、それを適切に処理できるかどうか、NATM適用のポイントであると思います。司会 確かに都市部においてもNATMの採用事例が増えていますが、相変わらず都市の中ではシールド工法の採用がまだ圧倒的に多いのも事実でございます。そこで、当面シールド工法を採用せざるを得ないような周辺の環境条件、あるいは地盤の条件といったことにつきまして東京都の松本さんいかがでしょうか。

松本 今、桜井先生の方から一軸圧縮強度が1 kgf/cm<sup>2</sup>

以上あって、地盤係数が100 kgf/cm<sup>2</sup>以上ある粘性土地盤であれば、都市でもNATMが可能じゃなかろうか、といったお話を頂いたわけですが、私ども東京になりますが、大阪でも名古屋でも似たようなところなんです。都市でトンネル工事をする場合には、民家とかいろいろな構造物が近接している所で工事をしなくては行けないので周辺環境への悪影響を極力避けなくてはならない。トンネル工事でいわゆる公害といわれるものには、騒音・振動、それから地盤沈下、水枯れ、さらには水質汚濁であるとか、あるいは地上・地下にある構造物への影響、この辺について、十分調査をして適切な対応ができるという工法を選んでいくということをやっているわけです。特にその中でも地盤沈下それから地中地下の構造物への影響というものについては、限りなくゼロに近づけるということが求められているということだと考えております。

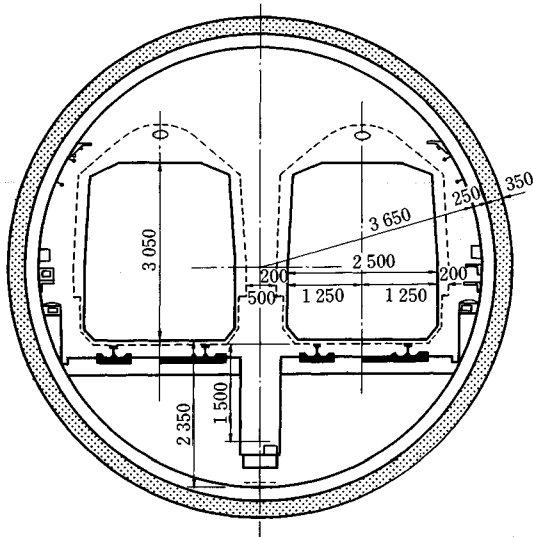


図-15 トンネル断面図

一方、東京の都市トンネルを掘っている地形地盤はどういう所か、東京の例でみますと、西部から東部へだいぶ山が流れております。台地から低地へと移りますけれども、いずれにしても沖積層あるいは洪積層の地山ということですが、いわゆる土丹層、上総層が出てくるという所は、確かに50mくらいの深さで、出てくる箇所も世田谷から大井町辺りにかけて見られるわけですが、全体でみると、現在までトンネルを掘っているところは下町では軟弱シルト層、それから台地部分では洪積砂礫層、さらには複雑な地盤がその中で見られている。こういうところで工事をしている、そういう土質、それから先ほど申しました条件の中ではシールド工法が非常に安定した工法ということで、今までのところ、これを使っているところと考えております。

司会 NATM とシールド工法の両面から、都市のトンネルをどう掘るか、ということについてご説明頂きましたけれども、横浜では同じような地盤でNATMとシールド工法を使い分けておられる。その辺の考え方や経緯等につきまして、横浜市の千野さんからお願いしたいと

表-1 主な東京周辺でのトンネル事例設計・施工条件総括表

工法種別	位置 トンネル名 (各番号は 位置平面図 に対応)	施 工 時 期 (月)	土 被 り (G)	土 被 り 比 (H/D)	容 積 率 (平均 値) (%)	地 質	切 羽 付 近 (N値)	切 羽 付 近 (qu kg/cm <sup>2</sup> )	切 羽 付 近 (E kg/cm <sup>2</sup> )	初 期 地 盤 (上下 高差) (m)	補 助 工 法 併 用 数	ト ン ネ ル 延 長 (m)	断 面 積 (X <sup>2</sup> ) (m <sup>2</sup> )	一 次 覆 工 厚 (cm)	二 次 覆 工 厚 (cm)	覆 工 厚 (一 次 + 二 次) (cm)	記 事
N A T M	①横浜市 二軒巻上町 二軒巻	'80.8	25.0 26.0	2.4 2.5	300	三浦層	50<	30 40	3000 4000	28.0	1	693	60	吹付厚 20	40	60	(カット+NATM)
	②横浜市 三軒巻上町 三軒巻	80.8	21.5 22.5	1.3	300	三浦層	50<	30 40	3000 4000	28.0	1	105	146	25	50	75	(カット+HATM)
	③横浜市 岸根	81.5	14.0 32.5	1.3 3.0	100	三浦層	50<	13 50	600 4000	12.0	1	1062	69	20	40	60	(カット+HATM)
	④横浜市 篠原	82.12	28.0 35.5	2.2 2.8	80	三浦層	50<	30 40	3000	12.0	1	70	88	20	50 30	70 50	(カット+HATM) (カット+HATM)
	⑤京葉線 東京区 京橋工区	87.11	15.0 25.4	1.2 2.3	890	江戸川層	50<		300	16.0	4	67.7	91 117	20	80	100	(中壁工法)
	⑥京葉高速鉄 道志野台T	87.3	2.7 12.7	0.6 1.0	200	成田砂層	20 50		500	10.0	2	678	72	25	45	70	(CRD工法)
	⑦北総開発鉄 道栗山T	84.3	5.0 14.0	0.4 1.1	200	成田砂層	20 50	0.4 1.0		8.6	3	1160	72 90	20	50	70	(CD工法)
シ ールド 工 法	⑧横浜市 新横浜	82.3	11.0 37.5	1.7 5.7	200	三浦層	50<	30<	1000 4000	9.6		382 ×2	36 ×2	セメント 30	20	50	新幹線高架橋との 連続掘削 (泥水式+MF)
	⑨宮田8号 水川台+MF	80.1	8.0 18.8	0.8 1.9	200	東京礫層	50<			21.7		884	79	40 55	20 0	60 55	(泥水式+MF)
	⑩宮田11号 九段上+MF	86.1	10.0 30.4	1.0 3.1	700	東京礫層	20 50			21.8		994	79	45	20	65	(泥水式+MF)
	⑪宮田8号 隅田川+MF	83.5	14.6 24.1	1.5 2.5	400	東京礫層	20 50<			25.8		930	79	40 55	20 0	60 55	(泥水式+MF)
	⑫都営12号 豊島園+MF	89.5	12.6 24.1	1.5 2.8	400	東京礫層	35 50<	5 18	950 1250	5.0		1240	57	35	25	60	(泥土圧+MF)
	⑬都営12号 春日町+MF	88.4	9.1 16.0	1.7 3.0	100	東京礫層	2 19 50	36 50	1250	4.0		1265 ×2	22 ×2	25	25	50	(泥土圧+MF)
	⑭京葉高速鉄 道蒲田T	89.3	4.8 21.0	0.5 2.1	300	成田砂層	10 50		180 260	25.8	1	496	79	40 50	20	60	(泥水式+MF)
	⑮京葉線 蒲田+MF	85.3	23.0 26.5	1.9 2.2	890	江戸川層	50<			18.0	1	619	76	30	20	50	(泥水式+MF)

表一 地層層序対比表

地質時代	地学事典 (1964)		東京都市水研究所 (1977)							国鉄 (1979)
	南関東 東京近	房総半島	台地層	A	B	C	D	E	F	
現世	有楽町層	沼波 ツツジ層	黒色腐植土 黒土	神保層 (AI) 軟らかい粘土・泥炭	有楽町層 上部 (Yu) ゆるい砂・砂礫 下部 (Yi) 軟らかい粘土	有楽町層	有楽町層 上部 有楽町層 (YU) 下部 有楽町層 (YL)	有楽町層	有楽町層	有楽町層
更新世	立川ローム層	立川ローム層	立川ローム (Ta)	立川ローム (Ta)	立川ローム (Ta)	立川ローム (Ta)	立川ローム (Ta)	立川ローム (Ta)	立川ローム (Ta)	立川ローム層 (TAL)
更新世	武蔵野ローム層	武蔵野ローム層	武蔵野ローム (Mu)	武蔵野ローム (Mu)	武蔵野ローム (Mu)	武蔵野ローム (Mu)	武蔵野ローム (Mu)	武蔵野ローム (Mu)	武蔵野ローム (Mu)	武蔵野ローム層 (TML)
更新世	下米吉層	下米吉層	下米吉層 (Mg)	下米吉層 (Mg)	下米吉層 (Mg)	下米吉層 (Mg)	下米吉層 (Mg)	下米吉層 (Mg)	下米吉層 (Mg)	下米吉ローム層 (MGL)
更新世	下米吉層	下米吉層	下米吉層 (Mg)	下米吉層 (Mg)	下米吉層 (Mg)	下米吉層 (Mg)	下米吉層 (Mg)	下米吉層 (Mg)	下米吉層 (Mg)	下米吉層 (Mg)
更新世	成田層	成田層	成田層 (TO)	成田層 (TO)	成田層 (TO)	成田層 (TO)	成田層 (TO)	成田層 (TO)	成田層 (TO)	成田層 (TO)
更新世	江戸川層	江戸川層	江戸川層 (Ed)	江戸川層 (Ed)	江戸川層 (Ed)	江戸川層 (Ed)	江戸川層 (Ed)	江戸川層 (Ed)	江戸川層 (Ed)	江戸川層 (Ed)
更新世	上総層群	上総層群	上総層群 (Ka)	上総層群 (Ka)	上総層群 (Ka)	上総層群 (Ka)	上総層群 (Ka)	上総層群 (Ka)	上総層群 (Ka)	上総層群 (Ka)
更新世	三浦層群	三浦層群	三浦層群 (Mi)	三浦層群 (Mi)	三浦層群 (Mi)	三浦層群 (Mi)	三浦層群 (Mi)	三浦層群 (Mi)	三浦層群 (Mi)	三浦層群 (Mi)

思います。

千野 沈下を最小限に抑えるということであれば、シールド工法が一番いいと思います。さきほどのケースヒストリーの紹介の中で横浜-新横浜間の紹介をさせて頂いたわけですけれども、その中で NATM とシールド工法を使い分けております。シールド工法の採用工区は新幹線と横浜線の下を通ると言うことが1つ、それから地盤に沖積層があり、その水位を下げると沈下するというこの2つの理由でシールドを採用しました。

私どもの地下鉄では、昭和48年頃から山岳トンネルを掘っているわけですが、昭和54年くらいから計画したものについては、何となく NATM でできないかということで、いろいろと研究してきたわけです。NATM を採用した工区では第三紀層の土層の中に水を含んだ砂層が互層で存在していますがこの水を抜いても地表の沈下を与えないですむということで採用しました。施工の結果につきましては、ほとんど家屋に支障になるような沈下はみられなかったということでございます。

司会 ある程度 NATM とシールド工法の適用領域に関するイメージが整理頂けたかと思いますが、ここで都市

という領域にトンネルを掘ると言う、都市トンネルというイメージを描いて、都市トンネルが具備すべき条件というものを一度ここで整理して、それからそれに基づいて議論を進めたいと思います。それではわれわれの設計検討部会の委員でもあります小泉先生から、その辺を整理して頂きたいと思います。

小泉 都市トンネルの具備すべき条件というお話ですが、これは都市トンネルであっても山岳トンネルであっても基本的には全く同じであろうと思います。それでは都市トンネルと山岳トンネルでなにが違うかといいますと、都市は人が多い。人口が密集している。そして都市の機能がそこで十分に活用されている。それが最大の違いだろうと思います。したがって、山岳トンネルと比較すれば、よりシビアに具備すべき条件は何か、こういうことにならうかと思えます。

私は6つほど考えたんですが、まず第1に安全にトンネルが構築できること。これはトンネルが崩壊致しますと作業員の安全、それから地上、特に道路が多いわけですが、地上にいる人の問題それから都市施設・都市機能といったものが損傷を受けるわけですね。これが第1の問題であろうと思います。特に1回落としますと、土木に対するイメージというものが相当ダウンします。これは今後の工事を進めていくうえでいぶ影響が出る。そういうことにならうかと思えます。

第2は先ほど来、お話がいろいろございますように、環境の阻害という問題です。地上の交通、それから地表の構造物、地中の埋設物、こういうものへの影響、地盤沈下・地下水位低下などということに帰結するかと思えますが、基本的に山岳の NATM と違うということであれば、地盤をできる限りゆるめない。これはもう絶対条件ということがいえると思います。それから地下水位の方も、圧密沈下の問題とか井戸という話が先ほど出ましたが、それらの問題がございまして、やはり低下を無限にしていというものでないでしょう。それからもちろん補助工法を使えば水質汚濁という問題が出てくる。また騒音振動ですね。周辺住民の迷惑防止ということもあろうかと思えます。

それから3番目でございますが、出来上がりましたトンネルの品質という問題があります。所定の外力に対してトンネルがもつということは当然のことでございますが、橋などと違っていて、架け代えができない。トンネルを放棄して新しく掘ると言うことになれば、不要になったトンネルは埋め戻さなくてはならない、こんな問題が出てくるかと思えます。それから周辺で近接工事がされたりする問題がありますので、いろいろな条件に耐えられるような覆工構造であるということも必要だろうと思えます。また、都市部であれば地震の影響とか地盤

沈下などにも対応していかなくてはならないでしょう。

それから4つ目は工期でございます。やはり周辺環境に与える影響をなるべく少なくするためには、短期間に工事を終わらせなくてはならないわけですし、工事が長引きますと住民とのトラブル、というものが相当に多くなる、ということを考えておかななくてはいけないと思います。

それから、決定的に違いますのは5番目になります。土木のイメージということですね。これは山の中のトンネルと違まして都市は人の目がたくさんあります。先ほどの事故の問題もありますけれども、現場環境を整える問題が出てくると思います。たとえば作業員の教育の問題。現場をきれいにする。場合によっては、現場をきれいな塀で囲うとか、いろんな絵を描く。なんていうようなことも必要になってきませんかと思えます。それから、それに付随しまして住民に安心感を与える工法であるということも重要なことであろうと思えます。

最後はやはり工費が安いということだろうと思えます。都市特有の費用、沿道対策関係の金、残土の処理の問題なんていうのもこれからは相当な問題になってくるでしょう。

そんなところが、よりシビアに具備すべき条件であると考えております。

司会 具備すべき条件といいますか、都市トンネルだからよいシビアに考える条件をご提示いただきました。この中からいくつかテーマを絞りまして議論を進めたいと思います。まず最初に切羽の安定と環境保全をとりあげたいと思います。先ほど成田砂層でNATMを採用し非常にうまくいっているとの紹介がございました。ここで、鉄道公団の滝沢さんから、特に砂層における切羽の安定と環境保全対策にポイントを絞り、ご経験を踏まえ今後の方向づけ等をお話頂ければと思います。

滝沢 今後の方向づけと申しますと難しいのですが、方向づけについては、先ほど桜井先生のお話の中の評点をつけた考え方に尽きるかと思えます。私どもの基本的考え方は、地山がある程度の強度、つまり桜井先生の適用限界の中にあればその固有の強度を失わないよう、すなわち劣化させないように掘削するというのが基本です。次に、この適用限界から外れている地山に対しては地山の物性値が限界の中に入るように積極的に地盤改良などの補助工法で改善してやります。

今日、話題になっていますシールド工法かNATMかの選択が難しいような地山、たとえば未固結で土被りが少なく湧水があり、地表面での社会活動も非常に活発で、三重、四重もの制約条件をもっている習志野台トンネルのような場合は、いろいろな補助工法の組合せで地山の状態を適用限界の相当内側にまで改善して、掘削してゆ

こうということです。具体的にいいますと、たとえば早期閉合とか、加背を小さくするとかにより、地山が劣化する時間を与えないようにするとか、切羽が自立しやすいようにリングカット工法とか、切羽に吹付けをするなど施工方法のグレードを上げるとか、また、地盤注入などで地山の物性値を積極的に改善してやるとかしてやっています。もう1つ環境の問題ですが、沈下と湧水の問題があります。沈下については、成田砂層に限っての話ですが入念な施工さえすれば、シールドと同程度の沈下管理ができるのではないかと考えております。湧水については、いろいろその場の社会的条件が違って、水を抜いてもいい場合、復水を考えてやればいい場合、あるいは全く駄目な場合、この場合は圧気工法を使用するとか、これらについては勉強中です。

司会 次に、先ほど京葉線の例が出ておりましたけれども、都心でNATMを採用したということですので、この辺につきまして施工されました熊谷組の山本さんいかがですか。

山本 京葉線・東京駅のNATMに関しましては、先ほどからお話が出ています都市トンネルが備える条件を満足させるべく、非常に慎重な検討がなされました。地盤条件は一軸圧縮で10kgf/cm<sup>2</sup>程度、変形係数で300kgf/cm<sup>2</sup>程度ありましたが、周辺地下水位が高く挟在砂層の自立性が悪いので、SMWによる遮断壁、薬液注入、垂直縫地、地下水位低下等の補助工法を採用し、施工に際しては入念な計測管理を実施しました。都心部で初めてのNATMでございまして、発注者のJR東日本としても完璧を期されたことと思えます。施工の結果は十分に満足のいくものであったと思えます。

現段階において都市NATMは京葉線の京橋工区の事例のように、①駅との取付け部のように断面が変化していく所、②距離が比較的短い所、③切羽の崩壊や地盤沈下、周辺の地下水位低下を十分抑制できる所、この3つぐらいの条件が揃う所では、適切な補助工法を併用し採用することにより、都心部でもNATMが可能かと考えております。

司会 都市NATMというところ、やはり先ほど来ています地盤安定処理が、どうも日本の都市の地盤では不可欠というのが結論のようです。これは補助工法というより先ほど桜井先生からもお話がございましたように、NATMと表裏一体のものであるということかと思えます。

一方、シールド工法では、最近泥水式とか土圧式の密閉シールドが多く採用されています。従来の圧気手掘り式等に比べると非常に切羽の安定が良いとのことですが、この密閉シールドにおいても、地盤安定処理の必要なケースもあろうかと思えます。この辺につきまして松

本さんいかがですか。

**松本** 今お話がありましたようにシールドは、最近密閉型を主に使っているわけですが、密閉型シールドというのは、そもそも軟弱地盤と特に滞水砂礫層の対応ということで開発されてきました。シールド工法でいろんな地盤を掘りたいけれども滞水砂礫層は、どうも圧気オープンでは掘りにくいということで、いろんな工夫をなされた結果出てきたもので、現在の都市地盤では、大体どんな地山にも使える形になっていると思います。

密閉型シールドは、隔壁をもっているわけでした切羽と隔壁の間のチャンバーに、土砂あるいは泥水を満たし、それに拘束力を加えて切羽の安定を図るようにしているわけで、基本的には補助工法なしで切羽の安定を保つことができますと思います。

最近の実績をみてみますと、密閉型シールド工法を使用し適切な裏込め注入の材料および施工法を採用し、併せてシールド材も良いものを使えば、地盤沈下および地下水の低下への影響は非常に小さくなっています。こういうことで補助工法となると、立坑発進の場合に発進部の防護というような地盤強化、近接構造物の防護など局部的に採用されていますが、基本的に補助工法なしで施工できると考えてよろしいのでないかと思っています。

**司会** シールド工法では技術が進歩してきていて、ごく特殊な箇所を除いて、ほとんど地盤安定処理という補助工法を使う必要がないということのようです。都市トンネルに NATM を採用するか、あるいはシールド工法を採用するかという、どちらかという都市 NATM に課せられた特有の課題というふうに思われるわけです。ここで会場から、こういった都市 NATM あるいはシールド工法を適用する場合のいろいろな問題、今後の方向等について、ご意見ご質問があれば頂きたいと思いますのでよろしくお願い致します。

**大塚** (清水建設) 最初に基調講演なされました桜井先生、支保効果を考慮した見掛けの弾性係数で都市 NATM の適用限界をというお話、非常に興味をもたせて頂いております。さらに、補助工法を定量的に評価するということができると大変良い指標ができそうに思っていますが、その辺のことがいつご発表して頂けるのか楽しみにしております。次に、評点のつけ方の中でスケールの効果というものについてどう考えるのかということ。と申しますのは、加背部の分割、たとえば、CRD 工法のように切羽を小さくすることによって評価も違ってくるのではないかと思います。

この加背割の工夫というスケールの問題を入れまして、都市での NATM がどこまで挑戦できるかという考えを是非お伺いしたいと思います。たとえば、簡単に申しますとショットクリートやロックボルトとも厚さや本

数ということがございますけれど、掘削断面に対する%とか全体の長さとかいうようなスケールの問題をどう考えたらよいか、伺えればと思います。

**桜井** 非常に難しいご質問を受けたわけですが、基本的にまず申し上げたいことは、今日お話しました評点法は、地山のひずみに着目し、補助工の効果も含めた見掛けの弾性係数を1つのパラメーターとして、支保工および補助工を評価する考え方を示したものです。したがって、実際に適用するには、スケールの効果を含めて、今後、さらに多くの問題を解決してゆかなければならないと思います。

加背割に関連して、CD 工法を CRD 工法との比較で申し上げますと、見掛けの弾性係数は  $200 \text{ kgf/cm}^2$  から  $500 \text{ kgf/cm}^2$  程度に上昇しています。しかし、それが加背割を小さくしたことによるスケール効果なのか、あるいは、ストラットを入れ、地山を緩めないようにしたことによるものなのか、今後、さらに勉強しなければならないと思っております。なお、評点法は、大阪ではすでに公表しておりますが、近々、土木学会誌などに発表したいと考えております。この方法における評価点のつけ方等につきましては、応用地質の岡部さんが非常にご苦労されましたので、岡部さん、もし何かあれば付け加えて頂ければと思います。

**岡部** (応用地質) 今あります点数付けというのは、基本的には設計する前段として、大雑把にどういう工法を選んで良いかということをもとに選定しようというためのもので、これで設計終わりというわけではありません。ですから、まず計算するにしても何か補助工法を入れて計算しなければならないときに、これとこれを組み合わせることで計算してみようとか、あるいは、他の条件を入れて考えてみようとか、そういうことで使用するもので、その辺ご注意願いたいと思います。それで大雑把にいきますと、今までやってきた実績の中から、パイプルーフまたはフォアパイプ等 (あるいはパイル) をやるとか、ストラットを入れるとか、あるいは切羽の閉合の距離を変えとかした場合、そうしなかった場合に比べ見掛け弾性係数がどれくらい変わるかということ、実績からのデータで決めております。そういう意味では、十分そういうことを参考にしながら設計が可能ですが、いろんな先ほどの環境条件だとか複雑な問題が全部絡んできますので、それだけで設計しますと大変なことになります。その点を付け加えさせて頂きたいということです。

ただ、考え方としてこういう方向でいけば補助工法の評価が、ある数値としてとらえることができるのでないかという、私達の願望ということでご理解願いたいと思います。

**司会** 確かに補助工法を具体的、定量的に評価するとい

うのはなかなか難しいと思いますが、新しい試みとしてデータ分析の結果からいろいろな補助工法について評点を与えるということ、桜井先生始め皆さんおやりになっておられるということでございますので大いに期待したいと思いますが、他にご意見をどうぞ。

木村(佐藤工業) 少々概念的な話になりますが、NATMとかシールド工法とか工法的に分けるのではなくて都市トンネルを造るという意味での、その設計概念がどういうことなのかということをお聞かせ願いたい。実は先ほどの横浜の設計でも、シールド工法とNATMでは荷重が違ってきてしまう。

たとえば、NATMでは、確かに地山を支保部材の一部と考えるという設計手法があるんでしょうが、そこにはやはり基本的な都市トンネルとしての設計概念があって、そこに都市トンネルで具備すべき条件が含まれ、これをクリアするときにNATMだところなり、シールド工法だところなり。というような基本的概念といふところがなかなかわかりにくい。NATMとシールド工法でなく都市トンネルとしてみたときの、必要条件なり設計概念的なことが、今後どういう方向に向かうかということをお聞かせ願えればと思います。

司会 実は、次のテーマとして設計手法ということを取り上げ、討論を進めたいと思っていますのでただ今の質問は保留させて頂きたいと思います。

今、ご質問に出ましたように、どうも設計のやり方が、NATMとシールド工法では違うらしいというのは、皆さんご存知のとおりでございます。これから少し設計計算法といえますか、設計手法というところを討論してみたいと思います。

最初にまた、桜井先生にお願いすることになります、今日最初にご挨拶頂きました吉村委員長がNATMの導入には大変ご尽力頂きまして、日本の山岳工法というと現在ほとんどNATMでございます。

そのNATMが導入された時点の経緯を踏まえて、現在NATMで造るトンネルというのは、どんな設計手法なり設計概念で造られてきているかというところで、特に都市トンネルというイメージを描きながら桜井先生にお話を頂ければと思います。

桜井 都市NATMということになりますと、非常に難しくなるわけですが、従来の山岳トンネルの設計は、ご存知のように、地山を分類し、あらかじめ用意した支保パターンから適当なものを選ぶ方法が基本です。日本におけるNATMは、今やわが国の独自の工法として発展してきております。その間の経験の積み重ねにより設計法が確立されてきたわけです。しかし、非常に変わったトンネルとか、複雑な地質条件となりますと、経験がないものですから、解析に頼らざるを得なくなるわけです。

解析については、最近は何々の方法が提案され、かなりの精度で計算できるようになってきました。

このように、山岳トンネルの設計には、1つのパターンができていくように思います。しかし、一方、都市域の土被りの浅い、特に砂質地盤となりますと、経験も浅く、また、解析方法も確立されていないため、設計法については、今後さらに研究をつづけていかなければならないと思います。

今日は、1つの試みとして、評価点による設計法をご紹介しました。これは、過去の実績結果を評点法によって積極的に設計に取り入れようとするものです。もちろん、この方法によって設計がすべて終わるわけではなく、計測によって当初設計の見直しを行う必要があります。都市NATMにおいては、計測による施工管理が重要になると思います。

また、設計における地下水の取扱いですが、理論的には、透水係数を用いて予測計算が可能です。しかし、実際には、予測は容易ではありません。結局、過去の実績とか、経験に基づく方法が重要になってくると思います。司会 実は私どもの検討部会も、NATMとシールド工法の設計法がどうも違う、工法が違うのだから当たり前といえば当たり前かもしれないが、どこか出発点が違っているから、設計法や計算法も違っているのではないかという議論がありまして、それをいまま少し詳細に詰めていこうということによってやっております。

ここで、大成建設の氏原さんから施工者の立場でその辺をどんなふうにお感じになっているか、ご意見を頂きたいと思います。

氏原 われわれの立場からですと、過去の施工事例をベースにするというのが一番親しみやすい方法ではないかと思います。特に都市NATMと称するいわゆる軟質地山、あるいは少ない土被りでのトンネルにおきましては、いろいろな解析、特にトンネル周辺の地山の挙動を解析するというところでFEMがよく使われるわけですが、どうもちょっと適切でない使い方もされているのではないかという気がします。

本来この手法自体は、予測とかシミュレーションとかいうような使い方が一番適していると思います。これをいわゆる支保の大きさの検討だとかにあてはめようとする方々もおられるようです。

もう1つは特にこういう軟質地山で、土被りの少ないところでのトンネルの二次覆工についてですが、かつてNATMが日本に導入されたときにトンネルの地山を一次支保ですべて安定させるんだという意見が非常に多くございました。そういった意味で二次覆工は化粧巻きだという意見もたくさん出たかと思いますが、都市NATMにおいては、これでは相当危険な要素があるの

ではないかと思えます。現実問題としまして、私どもが施工しましたこのような地山で、竣工時にはほとんど問題なかったのですが、1年もたつとあちこちにクラックが生じてきているという例もいくつかございます。二次覆工を施工するときにはほとんど地下水位は下がった状態になっており、水圧はない状態で施工しているわけです。特に NATM の場合は、裏面排水でシート等もやっておりますので、地下水位は上がらない建前になっているのですが、完成しますと徐々に水位が上がっているようです。そうすれば当初予想しなかった水圧も働くであろうし、あとは特にこういう地山ですと、地下水がないときと、地下水が回復したときとおそらく地山性状も相当違うのではないかと、土圧自体も相当変わったものになるのではないかという気がしております。

**司会** 山岳地域の NATM といいますと、吹付けとロックボルトというのがまず一次支保というか、NATM の主要支保材でございます。都市域になりますと、ロックボルトを打ちますと用地外にボルトが出るということになります。このようなことで、今後都市域の NATM ではこのロックボルトはどんなことになるかというようなことで千野さんからご意見を頂けたらと思えます。

**千野** ボルトがトンネルの外に出ますと用地問題とかさまざまな問題が生じ、一体どうするのかということですが、これにはいろいろな意見があると思えます。最近いろいろな文献をみますと、NATM はボルトと吹付けをするのが正しいのだという何か錯覚を起こしているようなところが見受けられます。具体的にいいますと、ボルトの軸力が1~2t程度でもボルトを相当入れていくというような現場も見受けられますが、作用効果の面でいかなるものでしょうか？

都市の場合には、できればボルトを打設しないで吹付けのみで何とかいけぬものだろうか？ これは地質にもよりますが、膨張性の地山だとボルトを打設しなくてはならないということにならうかと思えますが、一般的に都市ではそういう地質は比較的少ないことですし、横浜を例にとりますと、そういう膨張性の地山をこれから掘ろうというところにはないわけですし、洪積層あるいは第三紀層、それから先ほどちょっと申しましたが、何とか沖積層にも補助工法を適用して NATM を採用していけないかということも今後勉強したいと思っているわけです。その前提となる工法はボルトを打たないで、吹付けで加背を小さくすることによって、何とかできないだろうかということですが。

**司会** 先ほどの話にもありましたように、都市というのはどうしてもトンネルを掘った後に、また周辺にトンネルが掘られたり、あるいは市街地の再開発というような事柄が生じてくることを想定しなくてはならないと思

ます。都市 NATM におけるライニングの設計の考え方というものをやはり相当慎重に詰めておく必要があろうかと思えます。これにつきまして、滝沢さんから……。

**滝沢** シールド工法と NATM の考え方の違いの1つは、言葉のあやかもしれませんが、NATM には支保という言葉はあっても一次覆工という概念がないのではないかと？ 最近はシールド工法との関係で一次覆工、二次覆工といいますが、われわれはロックボルトあるいは吹付けが支保だと、要するに掘削をするときに NATM というのは、先ほどの桜井先生のお話にもありましたように、支保を地山の弾性係数の中に入れるぐらいまで、地山の強度を重視した工法という考え方をしております。ですから NATM では掘ればそれで支保の役目が終わってしまうというのが、少なくとも今まで山岳をやっていた側の考え方であったわけです。

今度は都市に出てくると、われわれが予想できない荷重の変動が出てきてしまう。これについてはやはり二次覆工というか、いわゆる覆工で対応しなくてはいけないのではないかと考えています。したがって、このような場合には、先ほどちょっとお話がありましたように、化粧巻きだ、あるいは安心料だという考え方ではまずい。

つまり、いわゆる社会条件、地表条件というかこれの変化で荷重が変動するような場合、これは水圧も含めてですが、吹付け、ロックボルトの支保材ではカバーしきれないケースも出てくるわけで、覆工に荷重の負担をしてもらうことになります。

この場合の計算の仕方ですが、これは掘削時の応力状態の計算よりははるかにわかりやすいのではないかと思います。現実には FEM などで検証するようにしています。

**司会** NATM の基本的なコンセプトというものと、都市に NATM を適用したときに、その永久ライニングをどう設計するかというのは少し差があるというか、概念の修正を要するようなどころがあるような気がします。大変恐縮ですが、吉村委員長、ディスカッションをエンジョイしたいというお話も先ほどありましたので、何かこのへんで NATM を導入された先輩として一言ありましたらお願いできますでしょうか。

**吉村** 今、滝沢さんが NATM 側の二次覆工と一次覆工の考え方をいわれたのですが、松本さん、シールド側の一次覆工と二次覆工の考え方はどのようにお考えでしょうか。

**松本** 今のところシールド工法では、一次覆工でもって荷重に対応するというのが基本的な考え方であると思えます。ただし、最近は二次覆工を巻くのであれば、それにも耐荷力をもたせた方が良くだろうということで、一体構造で考える方法、あるいは重ねばりとして考える方

法などについて、いくつかの検討がされ、実際にも設計されておりすけれども、これで良いというような最終的な形にはなっていないというのが私の感想です。今、滝沢さんからご説明頂いたNATMとシールド工法の違いというのが、シールド工法の方は、これで良いということではないのですが、一応ある程度地山がゆるむというのを1つの前提として、ゆるみ土圧が採用できる場合にはゆるみ土圧を、さもないときは全土圧をとということで設計する。それから側方の土圧についても、側方土圧係数の取り方という問題はありますが、そういう形で効いてくる、これを1つのかなり単純なモデルにして荷重として考えています。トンネル構造の方については、セグメントをボルト等で継いで組み立てていくというのが基本であり、この継手のところをどう扱うかというのが1つの大きな問題だと思います。便宜上、現在は、山本さん達を中心になって考案された慣用計算、これは継手を無視してセグメントリングを一応一体構造とみてしまう。ただし、継手があることによって、リングそのものの剛性低下をある程度考慮に入れておく、それから継手の入っている構造体の弱点をカバーするために、千鳥組というような形をとるということで、剛性一様なリングという考え方でモデル化された荷重で計算をしています。しかもそのときにもう1つモデル化している地盤モデルが、どちらかというところ上からの荷重の方が側方からの荷重よりも大きいというモデル化をしていますから、地盤反力が期待できる比較的堅い地山では、トンネルリングが変形すれば側方からの拘束が働いて地盤反力を期待できるということで、これを三角形分布というモデル化をしているということです。そこには相当安全側の考え方が入っているわけですが、これをもう少し詰めていけばさらに現実に近いというか、実際の挙動に近い計算法というところへもって行くためのいろいろな工夫ができると思います。とにかく基本的には荷重がかかり、それに対して、トンネル構造体でそれに抵抗する、しかも一次覆工で基本的にはそれに抵抗するという考え方をしています。それからもう1つ非常に大きな点は、このような考え方のもとに水圧に対しても対抗する、水位を下げていくというのではなくて、地下水に対してもこの構造体で一応耐えていくという設計法をとっていることが非常に大きな違いじゃないかと思っています。

司会 委員長よろしいでしょうか。

吉村 小泉先生、今のは、将来の方向としてもそうなるのでしょうか。

小泉 どのように変わっていくかはいろいろ難しいと思います。荷重の方と構造の方とモデル化は両方あると思うのですが、構造の方のモデル化を先に申しますと、トンネル横断方向では、簡単な荷重に対して、一次覆工あ

るいは、二次覆工を含めても対応ができるモデルはできています。それから縦断方向につきましても、これは山岳トンネルではあまり考えられないわけですが、都市トンネルでは十分に考えておかなければならない地震の問題がありますし、地盤沈下の問題もあります。その場合にも一次覆工のトンネル構造体のモデルはほぼ良く、二次覆工を巻いた場合は、2, 3モデルの提案がなされていますが、現在検討中というのが実状だろうと思います。

そうしますと、何が問題かといいますが、荷重系の問題に帰結すると思います。都市のトンネルの荷重系は、先ほど2倍3倍というような開きがありましたけれども、安全側の上にも安全側をみています。今までの条件の多くが、そういう地盤のところの対応だったからだという気がします。しかし、これからほんとうにNATMが大丈夫ですよというような山になったときに、同じことをやるのかというと、それはパカミたいな話でして、やはりNATMの方で計算された荷重と、シールド工法の方から出てくる荷重をどこかですりつけなくてはならないだろう、これがこの作業部会の1つのテーマというふうに考えています。

しかし、もしそうであるならば構造系の方も単に剛性一様な構造系で計算していただくだけではなくて、たとえばそういう良い山で千鳥組にする必要があるのか、イモ継ぎでいきなさいというような意識改革といいますが、設計概念を変えていくということにならざるを得ないと思います。イモ継ぎもその1つですし、それから二次覆工はしない、というのも1つの考え方だと思います。また先ほど、松本さんからございましたように、一次覆工と二次覆工が共同で働くような構造と考えるべきだというような場合もあります。逆にもう一次覆工は仮設だ、捨ててしまう、二次覆工が本設だ、というような考え方もできるかもしれません。いずれにしろその辺の荷重の評価の方法が重要であり、それによって構造系も柔軟に対応できるというような気がします。よろしゅうございましょうか。

司会 それでは、また後ほど委員長からはご講評があるかと思いますが。設計計算法については、今、小泉先生から紹介がありましたようにわれわれの検討部会のメインのテーマでございます。なかなか簡単には結論は出ないかと思いますが……。

それでは時間も迫っておりますので、次にNATMはどうもシールド工法より安いということが、NATMが都市域に入ってきた大きな要因だと思います。そこで、どうしてそんなにシールド工法が高いのかということについて、東京都の松本さんから、だいたいシールドはどのくらいのコスト、およびその構成割合になっているか



お話だけからと思います。

**松本** 条件によって工事費というのは大きく変わりますので、1つの例としてお聞きいただくということで話をさせていただきます。都営地下鉄12号線のトンネルを例にとって申し上げますと、単線シールドでは外径5.3mのトンネルを複線シールドの方は8.5mのトンネルでやっています。

単線の方が1本だいたいm当たり140~150万円、それから複線の方がm当たり320~330万円です。これはトンネルの延長が1km以上あります。これが500m以下になると機械の損料が非常に大きくなってしまいますので、全く変わってしまいます。一方、これを掘削 $m^3$ 当たりでみると、今のところだいたい5万5000円から6万円ぐらいです。 $m^3$ 当たりの単価がシールドの大小でどう違うかということについては、下水のトンネルを例にとって調査された結果をお聞きますと、径が大きくなるほど若干安くなるといわれているようです。

今度は直接工事費の中で掘削あるいは一次覆工、それから二次覆工がどのくらいのウェイトを占めるのかというのをちょっとみてみますと、これはちょっとばらつきがありますが、掘削費というのが、これはシールド機械を損料ということで中に含めて考えまして、30~35%ぐらい。それからセグメントを使った一次覆工が組立てを含めまして50%前後、それから二次覆工が7%程度、裏込注入が3~4%ぐらいで100%にはなりません。90%をちょっと越えるぐらいですが、あといろんなものがかかるわけです。密閉型シールドでは、掘削に伴う人件費は非常に安くなっているわけですが、シールド機械は逆に大きなウェイトを占めている。どのくらいかということ、だいたい掘削費の半分程度とみれば良いのではないのでしょうか。

**司会** ここで、これから東京の都心部でいろんな種類のトンネルを掘る構想をおもちの首都高速道路公団の秋元さんの方から、これからの都市トンネルに、どんな期待をおもちかということをお聞きしたいと思います。

**秋本** 首都高速道路は今供用中の延長が約220kmありますが、その中でトンネルというのが8.6km、4%しかありません。ほとんどが高架橋だったんですが、今後、環状6号線沿いに中央環状線という高速道路を作ったり、都心新宿線とか、晴海線とか10号線とか計画されています。これらの路線はほとんどトンネル構造で、合計しますと数10kmになります。その中でまた非開削トンネルというのがやはり相当の部分占めております。その道路トンネルの構造は簡単にいいますと片側2車線の道路に対して、直径14m程度の断面が上り線と下り線2つ必要だということでありまして。そして、道路敷が広いときには横2つ並んだ形となりますが、狭いと

ころだと縦に2つ並ばせざるを得ないということになります。それから、道路線形が曲がって、曲線部に入りますと、どうしても自動車の運転手の視距の関係で、道路幅員が拡幅されますので、トンネル断面を途中で大きくしなければならない、あるいは非常駐車帯等を設ける場合にはそこを広げなくては行けない、それから地表道路と取り付けなければなりませんので、ランプでつなげるのですが、それに関係して土被りは全般的に浅い。場合によっては5~6mしかないようなところができます。そして、いろいろな線形のところにランプが取り付きますので、本線との分合流とか、そのほかに防災上の問題で避難路を設けなくてはならない場合があるとか、どのような断面形状に最終的になってくるかということ、今、検討している段階であります。このようなトンネル構造に対してのいろいろな工夫が、各機関で検討されていますが、いろいろ聞きますと、現在のような道路線形に対してすぐできる工法があるのか、逆に工法の方からみると、ある工法を使おうと思うと、今一般的に考えられている道路線形を変えなくてはならないのかということで、道路線形と工法との関係を今勉強しているところです。その中で、具体的に王子線の近くの飛鳥山の下のトンネルは延長100m区間についてNATMで施工しようということで、工事にはいっております。次に中央環状線は環状6号線の下にはいってくるのですが、当初は開削トンネルで大部分を計画していますが、残土の問題ですとかいろいろありまして、なるべく非開削に変えようということで、現在検討しております。それに続く品川線というのが、先ほど申しました上下の並設、あるいは縦8の字形状がほとんど全線となりますので、どのような工法を使えばできるのか、いろいろ過酷な線形条件に対してほんとうに施工できるかどうか、ということをいろんな角度から勉強しているのが現状であります。

**司会** トンネル屋にも難しい宿題が首都高さんからおりてくるようですが。さて、これからパネリストの方も大変お話になりにくい問題、具体的には工事費がどうかといった点について、お話頂ける範囲でお聞きしたいと思います。簡単に結構ですが、成田砂層でNATMを採用するにあたってシールド工法と比較されたと思いますが、そのあたりの概算のオーダーでもお話頂ければと思います。

**滝沢** 普通の鉄道の山岳トンネルですと、複線で月進120~150mぐらいで、だいたいm当たり150万円ぐらいの見当だと思います。それから習志野の北の方にある北総線と同じ成田砂層なんですけど、ここは野原で地上への影響にあまり神経を使わないでいいところですが、月進50~60mぐらいで、だいたいm当たり250万円くら

いの見当だと思います。そして習志野のほうですが、これがほぼ北総の2倍以上というような感じです。

もう少し詳しく話しますと、掘削ではCRD工法や補助工法、支保剛性も高いものを使っている関係で、通常山岳トンネルの2倍程度の掘削費をかけています。覆工は通常山岳トンネルより若干高い程度です。あとの最大の要素は、地盤改良でございます。だいたい、地盤改良に掘削と同じくらいの費用がかかっています。

シールド工法との比較をしてみますと、私どもの試算でそれも成田砂層に限っての話させていただきますが、掘削長さが1kmを超えるとたぶんシールド工法の方が安くなっていくと考えております。シールド工法の場合、地盤改良がどの程度必要とするかの議論もあると思いますが、地盤改良が全くいらず、発進基地や到達基地も山岳工法の場合と同程度と考えますと、だいたい800mを何10mか超えたところで、拮抗してくるのではないかと考えております。習志野台では、途中で非常に被りの薄いところがありまして、ここではシールド工法でも地盤改良が必要であると考えますとNATMの方が安いという結論になりました。

司会 横浜の例についてごく簡単に結構ですけど、千野さんお願いします。

千野 本日お話しした、私どものシールド工法は約300mくらいの泥水シールドで短い延長でしたが、m当たり1000万円くらいかかっています。それで、NATMでやっているところはだいたいm当たり200~250万ということで、もちろんシールドの延長にもよりますが土丹層ですと当時1/3くらいでNATMが安かったこととなります。

また、ランニングコストも無視できないわけですが、鉄道では金具とかレールに電蝕という問題があるわけで、これまでシールド工法ではシールド材でお金をかけて対応してきておりますが、今回のシールドトンネルでは二次覆工のクラック防止や漏水防止のため、シートを採用しました。シールド工法とNATMの境界についてはこれからいろいろ研究していく必要があると思いますが、これはうまくいった1つの事例であると考えております。

司会 コストの問題は大変興味あるテーマだと思いますが、なかなか情報を得にくいところもございまして、お話をいただきました。

工事費の話はこれくらいにしまして、最近シールド機に関して能力を十分に使っていないんじゃないかという素朴な疑問を私はもっておりまして、一般的に高いというイメージのシールドトンネルの工事費を下げていくにはどうしたらいいのか。工事期間だとか、残土処理の問題等いろいろからんでくるわけですが、施工業者の立場

で山本さんいかがですか。

山本 当社の全国における10年前と5年前、それから現在の3時点について、シールド工事の請負金額に対する工事費の比率、これを調べましたところ10年前に比べてまして、現在工事中のものは実に8.5%もアップしているわけです。たとえば、これまで1割の利益があがって工事費比率90%でやっていたものが、98.5%になっているということです。それから5年前と比べますと、実に6.0%アップしております。考えられる要素としては労務費における積算と実態との格差の拡大や立坑工事や二次覆工工事などの関連工事の赤字の度合い、それから非常に技術的に困難な場所の工事費が合わないといったことがあります。

コスト面についてはどうしてもセグメントをどう考えるかといった議論が必要になってくるのではないかと考えています。セグメントは、品質に対する信頼性も高く、急速施工もできて非常にいいものですが、まだまだ考え直さないといけない部分もあると思います。メーカーのコストダウンは期待するものとしまして、一般に洪積層については地質条件や施工条件によってはオーバーデザインになっているものもあるのではないかと考えています。また、マシーンにしましても現在密閉型がほとんどですが、距離だとか、施工条件だとかを考えた場合、余分な機能を追加してコスト高を招いている事例もあるかと思えます。特に距離の短い場合には都市NATMとの比較も含めて慎重な検討が必要だと思えます。

最後に1つだけ付け加えたいことは、先ほどからシールド工法と都市NATMとのコストの比較がなされて都市NATMが安いという話になっていますが、都市NATMを採用したことによって切羽の細分割が行われ、その結果機械化とか省力化が困難になり、施工スピードが低下することになるわけです。そうすると、諸経費が増加し実際のトータルコストは安くない事例が多いわけで、同じ地質だとか同じ環境条件といった同じ土俵で比較する必要があると思います。

司会 本当はもう少し議論をしたいと思いますが、予定時間を15分ほど超過しております。これまで議論いただいたこと、あるいは何でも結構ですが、都市NATMとシールド工法との境界領域などについて、ご意見なり、ご質問なりあれば出していただきたいと思えます。

関(前田建設) 先ほど都市トンネルの必要条件の中で出来上がったトンネルの品質についてふれておられましたが、特に耐久性という面で施工法が関与してくるものなのでしょうか。シールド工法が二次覆工するのであればどちらも変わらない気がしますし、セグメントのままですれば耐久性の面でどうなのか、ちょっとお考えを聞かせていただきたいと思えます。

**松本** 十分な答えになるかわかりませんが、一次覆工やセグメントだけで耐久性を議論するとすれば2つほど問題があると思います。

1つはボルト継手ですね。特に地下水に塩分が含まれているようなところについては何らかの配慮をしなければいけないでしょう。

もう1つは止水性の問題です。現在膨張性のシール材を用いており、これがかなり良い成果となっている。といってもこれが数十年後にどうなるといった保証がされていないということです。

最初のほうは何らかの対処方法はあるが、2番目については手の打ちようがない。しかし、問題がでてくるかどうかわからないといったところでしょうか。

**関** NATMの方が、耐久性とか漏水について処理がしやすく、仕上がりが良いということですか。

**千野** 非常に難しいご質問ですが、過去のシールドトンネルではかなり漏水があるのが現状です。そこで水を止めるには、二次覆工、しかもクラックの発生しないような施工が必要で、このあたりの研究が今後必要ではないでしょうか。

**司会** もう1つ、ご質問あるいはご意見をお受けしたいと思います。

**岡部** (応用地質) 私はNATMに関係する機会が多く、その意味でシールド工法について十分理解していなくて申し訳ありませんが、これまでの話を伺っていると沈下についてはNATMとそれほど変わらないのではないかと考えていますが、シールドを掘るとき地盤の挙動について明らかになっていけば設計におけるすり合わせといえますか、接点といったものが出てくるような気がします。

**司会** シールドも沈下の経時変化や周辺地質の挙動がかなりわかってきておりますし、今後われわれの部会の作業を進めるうえでのヒントにしたいと思います。岡部さんのご質問に対しての答えになっていないかもしれませんが、これから作業部会で委員としてどしどしご意見をいただいて整理をしていきたいと思っております。

だいぶ予定時間を超過しましたが、本日の「NATMとシールド工法の境界領域におけるパネルディスクション」をこれで終わりにしたいと思います。

(1991.2.9・受付)