

技術展望

大深度地下利用に関する技術的課題

THE TECHNICAL SUBJECTS OF UNDERGROUND SPACE UTILIZATION

小泉淳¹

Atsushi KOIZUMI

¹正会員 工博 早稲田大学教授 理工学部土木工学科
(〒169 東京都新宿区大久保3-4-1)

Key Words : deep underground, tunnel, vertical shaft,
waterproof, inclined shaft, enlargement

1. はじめに

人類の地下利用の歴史は古く、旧石器時代にはすでに住居として自然洞窟を使用していた。新石器時代には地面を掘って竪穴式の住居を作ったほかに、もう鉱山の経営も始まっている。歴史時代に入るとエジプトやメソポタミアなど文明の発祥の地では石室、地下室、主に軍事目的のトンネル、上下水道溝などが見られ、紀元前後から中世にかけては地下サイロ、水道、水路トンネル、地下室、地下牢、墳墓、地下の住居、地下神殿、地下寺院などが作られ、鉱山の経営も活発に行われた。また同時に築城の技術が、中世の都市建設技術に大きな貢献をなし、それが上下水道などの近代的な都市インフラの建設技術へと継ながっていると思われる。

現在、都市部の地下には地下街を始めとして、上下水道、鉄道、道路、電力施設、通信施設、エネルギー関連施設などが作られ、また都市部以外の平野部、山間部には、各種の交通施設、エネルギー施設、生産施設、貯蔵施設、研究施設、実験施設などが作られて、それぞれの特長を生かして地下が有效地に利用されている。もちろん地下資源の採掘も活発に行われ、最近では地熱などの地下エネルギーを手に入れるための研究も盛んに進められている。このように地下は人類にとって利用すべき対象として常に身近な存在であった。しかしその地下もわが国の都市部に限って言えばほとんどが道路下の利用であって、大部分は50m程度以浅の利用に限られており、すでに計画されているものまで含めると、都市部の中浅部地下は相当に輻輳しており、ほぼ満杯に近い状況

にあると思われる。今後、都市機能の向上や環境問題の解決を図り、また大地震などの災害に対しても安全度の高い都市づくりを目指して、質、量、ともにかなりの地下インフラ施設の建設が必要となることはまちがいないが、前述のとおり中浅深度の地下にそのスペースを確保するのは困難であり、大規模なインフラは地下50m以深のいわゆる大深度地下インフラとならざるを得ない。しかし大深度地下も利用可能な深さは種々の要因から見て、特殊な場合を除き、当面は地下100m程度までと想像される。この50m程度から100m程度までの深さは残された貴重な空間であり、この有効利用には十分に検討されたグランドデザインが必要である。

本文はわが国の大都市において深さ100m程度までを対象として地下利用を進める場合にどのような技術的な課題があるか、またそれを解決するためにどのような開発や研究を行っていくべきかを展望したものである。

以下にまず大深度地下利用に関するこれまでの流れと現状を述べ、次に土木技術的な課題に焦点を絞って、地下に作られる施設の部位ごとに検討を加えてゆくこととする。

2. 大深度地下利用に関する動き

大深度地下空間の利用に関する各種の構想や提言は、1980年代後半のいわゆるバブル期に大々的に発表され、華やかな議論がくりひろげられた。

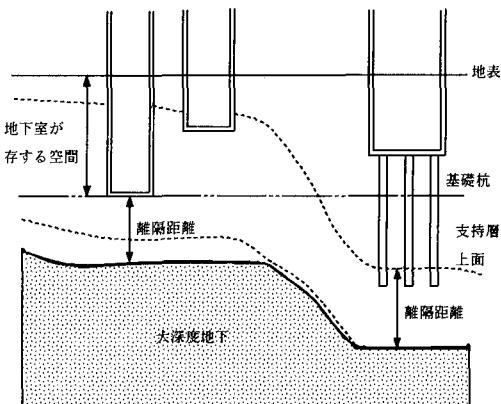


図-1 大深度地下の概念図

これらのうちのいくつかはバブルの崩壊前に着手された結果、若干の修正が加えられたものの現在すでに一部完成したものや工事中のものもある。

しかし大部分の構想はバブルの崩壊とともに夢物語として現実性を失ってしまった。これは経済性の追求や効率性の追求にあまりにも偏ったため、人間性に根差した都市環境、社会環境の整備という観点からの深い洞察が欠けていたことが原因の一つとさえられる。このような現況から、1995年8月には「臨時大深度地下利用調査会設置法」が施行され、現在国土庁大都市圈整備局大深度地下利用企画室を中心となって調査が進められている。昨年(1997年)6月にこの中間取りまとめが公表されたが、これは「大深度の定義」、「技術・安全・環境面の課題」、「法制面の課題」の三章から成っている。

大深度の定義では大深度地下空間を「建築物の地下室の存する深さ+離隔距離、または高層ビルに相当する荷重を支持することのできる地層上面の深さ+離隔距離のいずれか深い方より下の空間」と定義している。この場合の離隔距離は10mを一つの目安としている。図-1はその概念図を示したものである。この考え方は規制する深度を一律50m以深などとするよりははるかに合理的と思われる。

技術分野の課題では高い地下水圧に注意を喚起するとともに、現行の施工方法を適切に用いれば深さ100m程度までの地下施設は建設可能だとしている。また地震の影響については大深度の方が地表や浅深度の地下よりもその影響は受けにくいと思われるが、一方で地表等と接続する部分には慎重な対応が必要であると述べている。

安全分野の課題では、安全確保の観点から火災対策が重要であり、特に火災の発生防止や初期段階での対策の実施を強く求めている。避難および消防活

動については、これまでの長大トンネルや超高層ビルの安全対策と同様な考え方で対応が可能であるとし、また地震に対しても構造的な耐震性の確保は地表に比べて容易であるとしている。このほかに快適で安心できる内部環境を維持するとともに、弱者にも配慮した施設の建設の必要性をうたっている。

環境分野では地下施設が周辺の自然環境へ与える影響を検討しており、懸念される事項として特に地下水の変化、地盤変化、地下水の水質変化を挙げ、計画、設計、供用、維持の各段階で十分に検討を行い必要に応じて対策を実施することが重要であると指摘している。また環境への影響が不明の事項については、類似の地層での事例調査や供用後のモニタリングの実施などが必要であるとも述べている。

最後に法制面の課題であるが、大深度地下には井戸や温水などの利用益があり、大深度地下に土地所有権が及んでいないとは言えないが、公共公益性を有する事業については、私権に優先して大深度地下を使用する制度を構築することが可能であると結論している。この制度を適用する地域は、当面東京、大阪、名古屋などの大都市とその周辺とし、公共公益性を有する事業としては、鉄道、道路、河川、電気、ガス、通信、水道などの事業を挙げている。また地下権を制限する場合の補償については、井戸、温泉井などの既存物件に対するものを除いて、基本的には考えなくてもよいとしている。このほかに手続きのあり方についても述べているがここでは省略する。

3. 地下構造物の種類とアクセス構造物に関する課題

(1) 地下構造物の種類

大深度地下に構築される構造物は図-2に示すように、面的構造物、球状構造物、ドーム状構造物、トンネル状構造物および線状構造物に大別できる。またこれらの構造物への地上からのアクセスとしては図-3に示すような立坑、斜坑、らせん状坑などが考えられる。

まず面的構造物であるが、これは地中に平面上に広がる構造物であり、矩形形状を基本とすることから比較的浅い地下に構築される構造物である。地下水位下では大きな浮力が働くためそれに抵抗するに十分な土被りが必要となる。いま地下水位下に100m×100mで、高さ20mの面的構造物を作ったとすると、それに働く浮力は20万tf(2GN)となる。これをコンクリートの重量で対応するとすれば鉄筋コ

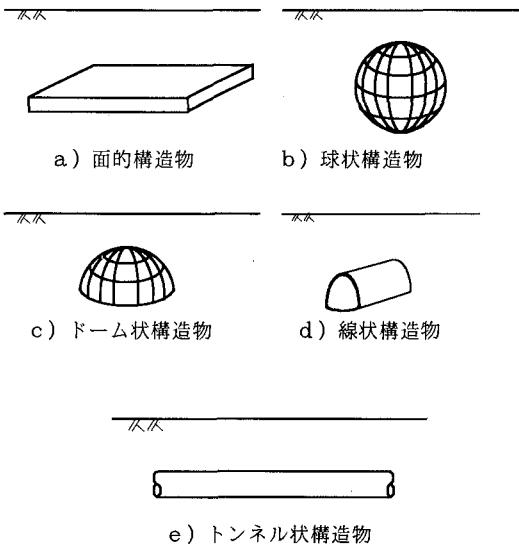


図-2 地下構造物の種類

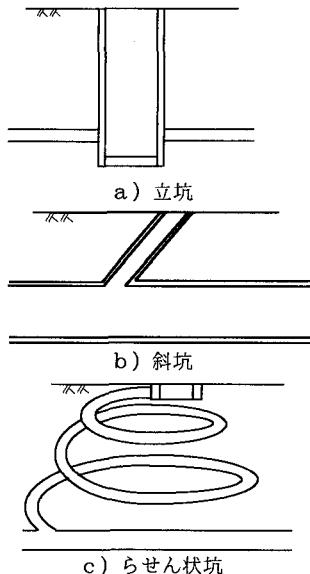


図-3 アクセス構造物

コンクリートの単位体積重量を $2.5\text{tf}/\text{m}^3$ ($25\text{KN}/\text{m}^3$)として、地下空間の容積の実に40%をコンクリートが占める結果となる。すなわちコンクリートの固まりを地下に作るようなもので、使用できる空間はその60%と非常に効率の悪いものとなってしまう。したがって浮力を抵抗できるように十分な土被りをとるかまたは地下の掘削と並行して地上にも構造物を作つてゆき、その構造物の重さで浮力に対抗させる

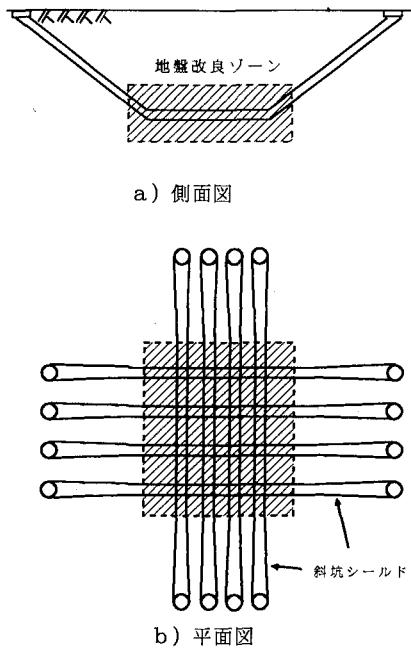


図-4 斜坑シールドを用いた面的構造物の構築

ようなことを考える必要がある。またこの面的構造物を深い地下に作るとその壁面には土圧はともかくも確実に水圧が作用するため大きな曲げモーメントが発生し、その壁厚や底版の厚さは構造物の深さが増すにつれ厚くせざるを得ない。このようなことから面的な構造物は大深度地下ではなく中浅深度の地下に構築されるべき構造物と考えるのが妥当と思われる。またその構築には開削工法の適用がもっとも有力と考えられるが、工事中の浮力対策として地下水位低下工法などの併用が不可欠であり、地下水環境や地盤沈下などへの配慮が特に今後は必要となる。このため立坑のところで後述するような水中掘削工法の開発なども重要なテーマと思われる。また複数本の斜坑シールドトンネルを掘り、そこから地盤改良を行い空間を切り抜けて面的構造物を作る方法も選択肢の一つと考えられる（図-4参照）。

次に球状、ドーム状、およびトンネル状構造物であるが、大深度地下になると構造物には土圧はほとんど作用せずにほぼ水圧のみが作用するという計測結果があり、この観点からするとこれらの構造物は大深度地下に適した形状の構造物と考えられる。ただしドーム状の構造物やトンネル状の構造物は、その底面に強固なインバートが必要となることは明らかであり、水圧の大きさ、すなわち地下の深さにもよるが、インバートは曲率の大きな弧状とならざるを得ないものと思われる。構造物が大きくなれば軸

表-1 連続地中壁工法による立坑の実績

No.	工事名	掘削深さ	連壁諸元			用途	備考
			厚さ	内径	長さ		
1	建設省外郭放水路第3立坑	73.7	2.1	36.6	140.0	立坑(32角形)	
2	北海道建設局白鳥大橋3P	76.0	1.5	34.0	107.0	基礎(24角形)	
3	北海道建設局白鳥大橋4P	60.0	1.5	34.0	70.0	基礎	
4	本四公団明石海峡大橋1A	58.0	2.2	80.6	75.5	基礎	
5	東京湾横断道路川崎人工島	74.7	2.8	98.0	119.0	立坑(56角形)	
6	神田川環状七号線地下調整池立坑(その3)	56.0	1.2	—	108.0	立坑	
7	東京都東糀谷ポンプ場	63.0	1.2	20.0	99.0	立坑	
8	東京都和田弥生町幹線 その1立坑	62.0	1.5	—	110.0	立坑	
9	横浜市神奈川処理区川島支線	52.0	1.0	8.5	60.0	立坑	
10	関西電力かもめ共同シールド(発進)	50.6	1.0	16.3	82.7	立坑(24角形)	
11	関西電力谷町筋管路 上二立坑	59.5	1.3	22.4	87.5	立坑	
12	建設省外郭放水路第1立坑	72.1	2.1	36.6	130.0	立坑(32角形)	
13	建設省外郭放水路第2立坑	71.0	2.1	36.6	129.0	立坑(32角形)	
14	建設省外郭放水路第4立坑	69.0	1.7	—	122.0	立坑(32角形)	
15	横浜市末広支線下水道整備工事	72.5	1.2	12.5	96.8	立坑	
16	横浜市元宮支線下水道整備工事	72.4	1.2	16.0	85.0	立坑	
17	横浜市新羽末広幹線樽町立坑	約67.0	約1.6	約20.0	—	立坑	
18	横浜市北部処理場第二ポンプ施設築造工事	82.0	1.6	40.0	110.0	立坑	
19	川崎市沢川雨水貯留槽	67.5	1.5	30.2	94.1	立坑	
20	東京ガス扇島工場受入配管シールド立坑工事	74.7	0.8	21.4	82.7	立坑(14角形)	
21	帷子川分水路工事	59.0	0.9	—	62.0	立坑	
22	港北変電所管路新設工事(発進)	53.0	1.0	10.5	56.0	立坑	
23	森ヶ崎処理場送水管	63.0	1.2	20.0	100.0	立坑	
24	溜池幹線立坑工事	50.6	1.0	16.3	80.9	立坑	
25	横浜市今井川地下調整池	62.0	1.2	26.2	93.1	立坑	
26	東京ガス扇島工場地下LNGタンク	70.2	1.5	79.6	77.8	LNGタンク	
27	知多LNG地下式貯槽土木工事	53.0	1.6	—	118.0	LNGタンク	
28	大阪ガス 北港北発進立坑	61.1	0.7	9.9	91.8	立坑	

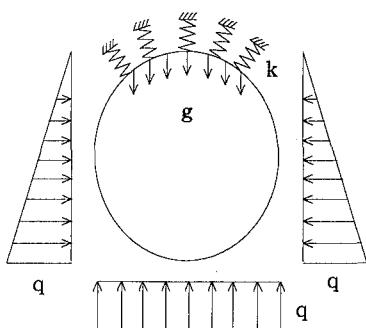


図-5 浮力に有利な構造物の断面形状の検討モデル

力のほかに水深の差によって相当に大きな曲げモーメントが発生するため、球状構造物が最も有利であるとは必ずしも言えなくなる。この場合の最適形状は土圧を無視すれば比較的容易に求まるはずである。図-5はその計算モデルを示した図である。大きな構造物であれば内部にはりや柱、床や壁も設けられるはずであり、詳細にはそれらの構造物の力学的特性や重量、また施工過程なども考慮して検討する必要があると思われる。

線状構造物はいわゆるランニングトンネルでありこれについては後で詳述する。

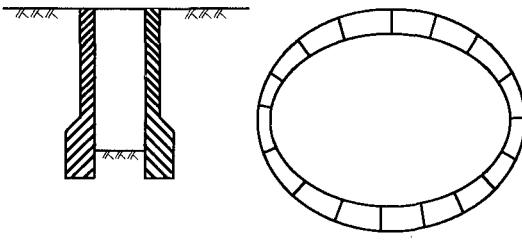
(2) アクセス構造物に関する課題

a) 立坑

地下構造物へのアクセスとして最も一般的なものは立坑である。表-1は都市部またはその周辺部における大深度立坑の実績を示したものである。大深度立坑はその構造力学的観点から円形立坑が合理的であり、表-1に示した立坑もすべてが円形形状(多角形形状)の立坑となっている。

100 mを越えるような立坑を構築するには一般に連続地中壁工法が用いられるが、その構築に要する費用は相当に大きなものとなる。立坑用地の確保や掘削土の処理の問題を別にしても、まず連続地中壁(以下連壁と略称する)の適正な壁厚と根入れの問題を解決する必要がある。根入れ長は作られた連壁の安定性の問題と、掘削された立坑底面のヒーピングやボイリング、パイピングなどの問題と関連する。しかし大深度の安定した地盤を考えると、中浅部を対象とした従来の考え方をそのまま適用することは、安全側と思われるが必ずしも合理的とは言えない。適切な掘削とリングビームなどの適切な配置を考えれば、地盤にもよるが根入れ長はもっと短くできるはずである。

また連壁を本体として利用する場合でもその壁厚が1mから2m程度必要となるなどというのも、中浅深度の地下を対象とした考え方に基づくものであり、



a) 縦断方向の拡幅 b) 横断方向の拡幅
図-6 壁厚を変化させることができる連壁工法

ある程度の地盤強度が期待できる大深度立坑では、かなりのオーバーデザインになっているものと考えられる。現に地下50m程度の壁厚1m以上の立坑から覆工厚20cm程度のシールドトンネルが発進している。要は荷重のバランスの問題であり、立坑の掘削過程で偏圧がなるべく作用しないような施工を行えば、円形の立坑に発生する曲げモーメントはさほど大きくはならないはずである。正確には多角形ではあるがほぼ円形とみなせ、しかも閉合した形状であるという利点を十分に評価できるような構造モデルが必要と思われる。一方、立坑に作用する土圧は中浅深度の自立性に乏しい地山では静水圧形の分布をなすものと推定されるが、ある程度の自立性が期待できる大深度の地山では土圧は比較的小さな値となり、地山によってはほぼ無視できる程度となることが予想される。水圧と異なり土圧の計測は容易ではないが、対象となるような地盤での土圧計測を積み重ねる必要がある。また、連壁の壁厚を深さ方向に変化させることができる技術が開発されればより合理的な立坑が構築でき、横断面方向に変化させることができれば、楕円形状の立坑も可能になると思われる（図-6参照）。

連壁に関してはもう一つの課題がある。それは連壁のジョイントの問題である。最近各種のジョイントが考案され実用されているようであるが、立坑の水没事故も時々耳にする。多くは連壁からの漏水か立坑底面からの出水の結果、より大きな崩壊を防ぐために立坑に注水するケースと思われる。このうち連壁からの漏水は主にそのジョイント部からのものであり、連壁の掘削精度の向上とともに、ジョイント部の止水方法には一層の工夫が必要である。特に円形の立坑の場合は周辺からの均等な圧力により継手部は圧縮されるはずであるから、止水に重点を置いたジョイントの開発が重要と思われる。

次に立坑の掘削に関してであるが、立坑の掘削で問題となるのは連壁に作用する土水圧と掘削下面のボイリング、バイピング、ヒーピングなどである。

これらの影響を最小限に押さえドライな状態で掘削を行う目的で地下水位低下工法が現在多く使用されており、環境への配慮から復水工法が併用されるケースも出てきている。しかし復水工法は今のところ目詰まりの問題などがあり、適用には充分な検討を必要とする。今後環境問題は社会的にさらに厳しい規制下におかれるものと予想されることから、大深度立坑の掘削の際に地下水位低下工法および復水工法が適用できるケースは限られてくるものと思われ、立坑の水中掘削技術が是非とも必要となる。すでに泥水中の掘削技術はケーソンの施工においては開発済みであり（SOCS工法），その第一号が実用化されたが、連壁による立坑の水中掘削ではこれと異なる方式が必要となる。地盤を先行削孔してゆるめておいた上でクラムシェル掘削機などで掘削を行うか、無人または有人の完全防水型ブルドーザなどを使用する方法などが最も一般的と考えられるが、それには泥水中での掘削の出来形を計測する技術などが不可欠でありその開発は思うほど容易ではない。連壁の内壁を定規にするか円の中心となる軸を定規として、自動化された新しい掘削方式などを考える必要があると思われる。また立坑の掘削が完了した後で泥水を排除する前に立坑の底版コンクリートを打設する必要がある。水中コンクリートの打設は現状の方法でも特に問題はないと考えられるが、既設の連壁と底版コンクリートとの接合部には付着力を期待できる何らかの工夫が必要となる。このように立坑の水中掘削には解決すべき課題が多く残されている。一方、浮力の問題は残るが、立坑の掘削に先行して立坑底面にあらかじめ信頼性の高い床版を構築する技術が開発され、連壁とこの床版とが十分に接合できればドライ掘削が可能になる。深層混合処理工法や置換工法などがこれにあたると思われるが、大深度地下における高い施工精度の確保や十分な強度および止水性の確保など信頼性の向上に向けた今後の開発有待ところも大きい。

このほかにケーソンを用いた立坑やシールド工法による立坑の構築が考えられる。ケーソンを用いた立坑に関しては50～60m程度までの実績があり、すでに述べたように水中掘削の実績もある。またニューマチックケーソンでも完全無人化施工の実績がいくつか見られるようである。ニューマチックケーソンでは深海潜水技術を応用して、大気中のちっ素をヘリウムで置き換えた混合ガスを用い掘削機などの点検や修理を有人で行う技術なども開発されている。しかしこれも今のところ 6kgf/cm^2 (0.6N/mm^2) 程度の圧力までが実用上の限度のようである。このためもっと深い地下での点検や修理を行う際には掘削

表-3 急勾配シールドトンネルの実績例

単位:m

企業者	工事件名	シールド機種	シールド外径	延長	土被り	地質	勾配(%)	勾配区間長
東京電力	川崎臨海地区管路新設工事	土圧式	ø3.33				29.0	22
阪神水道企業団	甲東送水路2工区シールド工事	手掘式	ø2.45	455	5.0~15.0	礫、砂礫、砂	27.3	77
水資源開発公団	愛知用水二期幹線水路	土圧式	ø4.20	913	4.0~50.0	砂礫	27.0	
東京電力	港北変電所付近管路新設工事	泥水式	ø5.24	2,395	1.4~41.0	砂、泥岩	27.0	130
東京電力	新宿御苑(共)関連管路新設工事	泥水式	ø4.70				27.0	51
東京電力	内幸町付近管路新設工事	土圧式	ø4.03	151	8.8~26.7	シルト、砂質土	23.0	80
関西電力	西梅田付近管路新設工事(第2工区)	泥水式	ø8.18	1,498	66.3	粘性土、砂質土	20.1	
東京電力	赤坂4丁目付近管路新設工事	土圧式	ø2.68	591	3.2~16.0	粘性土、砂質土	20.0	140
東京電力	塩浜橋付近管路新設工事	土圧式	ø3.63	1,027	12.7~29.7	粘土、砂	20.0	88
東京電力	新宿1丁目付近管路新設工事(その2)	土圧式	ø4.13	438	12.0~27.3	粘土、砂礫	20.0	78

表-2 立坑および斜坑に関する課題のキーワード

種類	施工法	課題のキーワード
立坑	連続地中壁工法	壁厚、根入れ長、円形断面の特性 設計の合理化(土圧の推定、構造モデル、偏圧) 継手防水 掘削工法(水中掘削、圧気掘削)、掘削底面 立坑底版、底版と連壁との接合
	ケーソン工法	沈下荷重、摩擦低減
	シールド工法	大断面化
斜坑	シールド工法	上り勾配、切羽の安定、発進・到達、地盤の破壊 噴発

機ごと大気圧下へ引き出せるような機構が必要となる。また掘削土砂の搬出時のエアのロスは大きく、これを最小限に押さえる工夫なども必要である。さらにケーソン工法の場合には、大型のケーソンをしかも大深度の地下に沈設するために、地盤とケーソンとの摩擦をどのようにして低減するかが決定的な問題となる。ケーソンを沈下させるための荷重を確保する方法、地盤との摩擦力を十分に低減させる方法、ケーソンを精度良く均等に沈下させるための施工管理技術などがケーソン工法による大深度立坑の構築には欠かせない要素となっている。

一方、立坑の構築にシールド工法を用いる方法は有力な方法の一つであると思われる。一台のシールド機で立坑と横坑を掘削する縦横連続掘進シールド工法はすでに一例であるが実用された実績がある。この縦横連続掘進シールド工法ではある程度の深さまではシールドの推進反力をアースアンカーなどを用いて地盤からとる必要があつたため、シールド径が大きくなった場合にそれが十分可能であるかどうかは今後の検討課題である。中口径程度のシールドを用いて立坑を構築し、その後に立坑下部を所定の大きさに切り抜ける方法も考えられるが、この場合には立坑の上部が地下構造物へのアクセスとして十分に機能する大きさであるかどうかや、その下部を安全かつ経済的に切り抜げることが可能であるかどうかなど解決すべき問題がある。立坑が地上と地下とを結ぶ人間の通路として用いられる場合には、非常時における避難路として十分な機能を有するだけではなく、常時においても地下を利用する人々の心理的な

不安を取り除くためにできるだけ大きな断面を確保する必要がある。なお構造物の地中における切り抜けについては後で詳述する。また表-2には立坑に関する技術的課題のキーワードを示しておく。

b) 斜坑

地下構造物へのアクセスとして用いられる斜坑はシールド工法により構築されると考えるのが一般的である。表-3は急勾配シールドの実績を示したものである。現在のところシールド工法で作られたトンネルのうち最大の縦断勾配をもつトンネルは電力用の洞道であり、その勾配は29%となっている。斜坑に階段およびエスカレーターを設置するすればその勾配は最大で58%程度と考えられるが、実際にはその途中に踊り場などを設ける必要があるため、平均すればこれよりも若干小さくなるものと思われる。しかし現状よりもさらに大きな縦断勾配をもつ斜坑シールド工法が必要になることは確かである。山岳工法による実績をみると、道路、鉄道、鉱山、石油備蓄などのための作業坑や換気坑では最大31.5%の勾配となっているが、発電用の放水路トンネルでは45°(100%)以上の実績がある。またTBMによるものでは同じく放水路トンネルで掘削外径7m、勾配52.5°が最大である。資機材の搬入や掘削土の搬出に関しては若干の検討が必要となるものの、現状のこれらの技術の延長上で対処できるものと思われる。泥水式シールド工法を用いるのであれば掘削土の搬出はより容易である。しかしシールドの掘進に関しては、下り勾配は比較的問題が少ないと想われる一方で上り勾配の掘進には困難が伴なう。大深度の良好な地盤を掘進する際にはあまり問題ないが、軟弱な地盤を急な上り勾配で掘進すればシールド機の頭部はその自重により常に下がり気味となるため、縦断線形の確保が難しい上に切羽の泥水圧や泥土圧による地表面の隆起や破壊、泥水の噴発などが発生する可能性が高い。このため特に到達にはある程度の深さまで下げた到達用立坑が要求され、また到達位置周辺の地盤改良なども必要となる。

表-4 大深度シールドトンネルの実績（含高水圧）

企業者	工事件名	シールド機種	シールド外径(m)	延長(m)	土被り(m)	地質	水圧(kN/m)	備考
京都市	第2 穀水道路トンネル建設（その1-2）工事	泥水式	Φ4.43	1,193	169.0	砂礫	70	
宮城県	蔵王幹線管渠（シールド）工事	泥水式	Φ1.93	1,000	118.0	軟岩	60	
横浜市	今井川地下調整池建設工事	泥水式	Φ12.14	2,810	85.0	粘性土、砂質土	76	
関西電力	西梅田付近管路新設工事第2工区	泥水式	Φ8.18	1,498	66.3	粘性土、砂質土	72	施工中
下水道事業団	横浜市末広支線下水道整備工事	泥水式	Φ4.70	1,809	64.2	泥岩	63	運河横断
下水道事業団	横浜市新羽末広幹線元宮支線	泥水式	Φ6.15	842	59.9	泥岩	60	
東京ガス	受入配管シールドトンネル	泥水式	Φ9.10	523	59.5	シルト質粘土、細砂	66	海底トンネル
東京ガス	扇島シールドトンネル（陸上工区）	泥水式	Φ9.08	1,448	59.0	シルト質粘土、細砂	65	
大阪ガス	南港北～北港北シールド工事	泥水式	Φ3.05	2,192	55.5	粘性土、砂質土	60	施工中
東京湾横断道路	東京湾横断道路	泥水式	Φ14.14	-	16.0	粘性土、砂質土	60	海底トンネル
建設省	外郭放水路第2工区トンネル新設工事	泥水式	Φ12.14	1,920	50.0	洪積砂質土層		
建設省	外郭放水路第3工区トンネル新設工事	泥水式	Φ12.04	2,574	50.0	洪積砂質土層		
建設省	外郭放水路第1工区トンネル新設工事	泥水式	Φ12.04	1,396	50.0	洪積砂質土層		

表-5 ランニングトンネルに関する課題のキーワード

施工法	技術の種類	課題のキーワード
シールド工法	発進・到達	地盤改良工法（信頼性、工期短縮、コスト）、直接発進到達技術（NOMST、安価な素材、鋳鉄鉄筋）、エントランス構造（SPSS工法）
	大断面シールド	セグメント（厚さ、幅、弧長、重量、自動組立、継手構造、材質）、シールド機（テール部の強度、切羽の安定、掘削の均一性、方向制御、分割と運搬、組立て）、外殻先行シールド（小口径トンネルの連結、既連結形シールド）、裏込め注入、掘削土の処理、異形断面シールド
	長距離シールド	掘削土の搬出、セグメント・資機材の搬入、動力の中継、シールド機の劣化（ピット、軸受け、シール）、配管の劣化、油圧・電気系統の劣化、ピット交換、地中接合、セグメント組立の高速化（形状、材質、継手構造、自動化）、掘進と覆工の同時施工、自動化システムのスピードアップ、掘削土の坑内処理、作業員の安全衛生（人車、休憩所、食堂）
	セグメント	設計（土圧、材質、透水性、劣化、形状、継手構造、組立て）、自重の支持、リングの組み方、シール材
	二次覆工	二次覆工の省略、漏水、防水シート、セグメントの劣化、工期の短縮、構造部材としての評価、FRPM管
NATM		地盤改良工法、止水、地下水環境設計（支保工と覆工との役割分担）、防水シート、施工の高速化

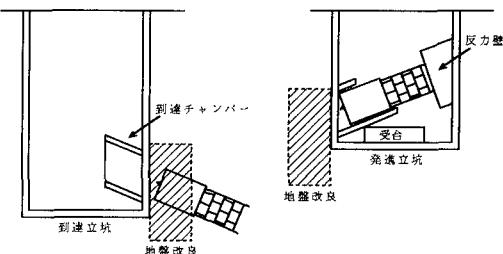


図-7 斜坑シールドの発進と到達

図-7は斜坑シールドの発進と到達のイメージを示した図である。地中の構造物へのアクセスは防災上の観点からもまた利用する人間の心理的な面からもできるだけ多く設ける必要があり、効率的で経済的な斜坑シールド工法の開発は欠かすことのできない課題であると考えている。なお表-2には斜坑に関する技術的課題のキーワードも併せて示した。

c) その他のアクセス

地中構造物へのその他のアクセスとしては急勾配曲線シールドを用いたらせん状坑が考えられる。

これは特に地上と地下の道路を結ぶ車両のアクセスとして用いられることが予想される。急勾配急曲線シールドトンネルに関しては建設省のいわゆる地下総プロでも検討され、道路として用いる程度の勾配や曲線半径であれば地上におけるらせん形状の橋梁に比べ問題は少なく、設計上もトンネルのねじれやシールドの推力による大きな曲げは発生しないことが確認されている。また施工面でもさほど大きな問題はなく現状の技術で十分対応できるものと思われる。

4. ランニングトンネルに関する課題

立坑や斜坑などを含めて地下構造物と地下構造物とを結ぶランニングトンネルは、一般にはシールド工法で構築されることになるものと想定される。地下水を十分に制御できるかまたは地下水がないなどの特殊な条件の場合には、経済性から考えてNATMを用いるのが最も有利である。ここではシールド工法

とNATMに焦点を絞ってそれらの課題を考えることにする。なお、表-4は大深度シールドトンネルの実績を示した表であり、表-5はランニングトンネルに関する課題のキーワードをまとめた表である。

(1) シールド工法

a) 発進および到達の技術

大深度地下からのシールドの発進と到達には特に高い水圧に対しての配慮が要求される。現在のところ最も信頼性の高い発進到達の防護方法としては凍結工法が挙げられる。凍結工法は地中に含まれる水を凍結させて凍土を作り、この強度と止水性によりシールドの発進部または到達部を大気圧下に開放できるようにするものである。しかし凍結工法の利用においては、コストの削減と工期の短縮を最優先に図る必要があると思われる。また地中における凍土の形成過程はある程度把握されているようであるが、効率的な凍結用パイプの配置や凍土の強度など、その設計方法の見直しも経済性や工期の短縮に直接繰ながることから重要な課題と思われる。特に大深度の洪積地盤や第三紀地盤などでは、凍結工法の実績があまり多くないようであるから、室内実験や現場測定などを通してその効果や挙動を把握するよう努める必要がある。

また薬液注入工法などの地盤改良工法は凍結工法に比べると安価であるため多用されることが予想されるが、今後特に高水圧に対する止水性に焦点を絞った材料および工法の開発が必要であると思われる。これについては後に詳述する。

これらの地盤改良工法に対して最近では立坑壁を直接切削してシールドの発進および到達を行う工法も実用化されている。NOMSTがこの代表的工法であるが何と言っても高価である。鉄筋の代替としてカーボンロッドなどを用いるが、引張強度を鉄筋のみに有しながら、切削ができ、シールドの面板やスパークに巻き付くことがなく、シールド内に排出できる大きさに切断される材質であればよいことから、もっと安価な材料に置き換えられるはずである。引張強度はあるが伸び能力が低い材質やせん断されやすい材料でも代替可能であり、このような性質を有する安価な新素材はもちろんのこと、例えば錆鉄鉄筋なども十分に考えてよい材料と思われる。またNOMSTではシールド発進口および到達口の立坑壁に高強度のコンクリートを用いているようであるが、必ずしもその必要はないようと思われる。特にシールドの発進においてその掘削の最初に高強度のコンクリートを切削する必要があるという点は、ピットの摩耗を考えると不安がある。高水圧が作用する大深

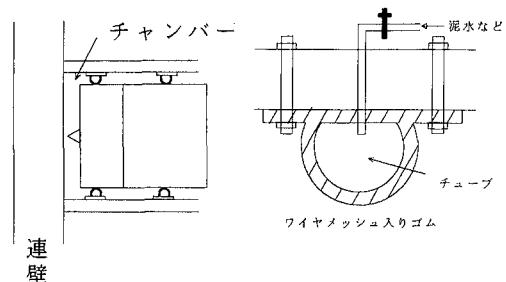


図-8 新しいエントランスパッキン (SPSS)

度地下ではピット交換も容易ではないので、高強度のコンクリートが必要であるかどうかについては再検討する必要があると思われる。

また $10\text{kgf/cm}^2(1\text{N/mm}^2)$ を越えるような地下水圧に対しては現在用いられているようなエントランスパッキンの止水効果では不足である。例えは図-8に示すように圧力に対しては圧力で対抗するエントランスなどが有効と思われる。これは日本電信電話会社が提案している「SPSS工法」に改良を加えたものであり、チューブ状のワイヤメッシュを入れたゴムチューブの中に泥水などを圧入し、その圧力で地盤内の水圧に抵抗しようとするものである。簡単な実験によればこのパッキンには自封効果もあり、相当な水圧まで対応できるものと予想される。チャンバーおよびパッキンは、チューブ内の圧力を自動的に管理するかまたはその中に適切な弾性材料を封入すれば永久構造として用いることができる。また大深度地下では地盤沈下は考えにくいが、地震時の立坑とランニングトンネルとの間の変位差を吸収する継手としてもこの構造は十分に機能することができる。シールドの到達部では到達誤差などを考えて若干の工夫が必要となるが、基本的な構造はそのまま到達部にも適用できるものと思われる。

b) 大断面シールドの技術

トンネルの用途によってはその断面が相當に大きくなることも考えておく必要がある。表-6は大断面シールドの実績を示した表である。

現在のところ帝都高速度交通営団の七号線南麻布工区で用いられたセグメント外径 13.94m 、シールド外径 14.18m の抱込み式親子泥水シールドが最大のものとなっている。また委員会などで検討が加えられたものとしては、外郭環状道路のトンネル外径 18.6m のものがある。このほかにも外径 26m の超大口径のシールドが話題に上ったことがある。大断面になると円形のトンネルでは無効断面が増大し、掘削土の処理の問題もあって、矩形、馬蹄型、橢円

表-6 大断面シールド実績

単位: m

企業者	工事件名	シールド機種	シールド外径	延長	土被り	地質	備考
帝都高速度交通営団	地下鉄7号線南麻布土木工事	泥水式	ø14.18	363.8	13.0	粘性土、砂礫、軟岩	
東京湾横断道路(株)	東京湾横断道路トンネル工事	泥水式	ø14.14	1,751~2,852	9~20	粘性土、砂質土	
東京都建設局	神田川環状七号線地下調整池工事	泥水式	ø13.94	1,991.0	38.0	砂、シルト、砂礫	
日本国有鉄道	東北新幹線下谷工区	手掘式	ø12.84	730.0	18.0	砂、シルト	圧気
建設省近畿地方建設局	大津放水路トンネル第一工区	泥水式	ø12.64	1,115.0	12.0~24.0	砂質土、粘性土、砂礫	
川崎市下水道局	波川雨水貯留管その3工事	泥水式	ø12.34	2,550.0	39.5~44.5	軟岩、砂質土	
横浜市下水道局	今井川地下調整池建設工事	泥水式	ø12.14	2,810.0	85.0	粘性土、砂質土	
大阪市土木局	平野川水系街区下調整池築造工事	泥水式	ø11.22	1,276.0	10~30	砂礫、砂、粘土	
大阪市建設局	平野川調整池築造工事(その4)	土圧式	ø11.52	1,690.0	35.8	粘性土、砂質土	
阪神電気鉄道(株)	福島付近地下化工事(第3工区)	土圧式	ø10.80	210.0	7.9~9.5	粘性土	
東京都交通局	地下鉄10号線九段上工区	手掘式	ø10.73	990.0	20.0	砂質土	圧気
東京都交通局	地下鉄新宿線南八幡工区	泥水式	ø10.58	1,053.0	15.0	砂	
名古屋市交通局	高速度鉄道6号線野並橋工区	土圧式	ø10.48	541.0	10~23	砂礫、粘性土	

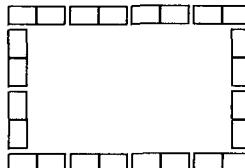
表-7 円形以外の断面を持つシールドの実績

単位: m

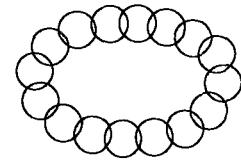
	発注者	工事件名	シールド機種	シールド外径	延長	土被り	地質	備考
2連形	東日本旅客鉄道	京葉線京橋シールド	泥水式	7.42 × 12.19	619	23.0~26.5	砂層、粘性土	MFシールド
	建設省中国地方建設局	広島新交通システム鶴城シールド工事	土圧式	6.09 × 10.69	530	5.0~8.3	シルト、粘土、砂	DOT
	日本下水道事業団	碧志野市菊田川2号幹線管渠築造その3	土圧式	4.45 × 7.65	585	2.2~9.0	細砂、粘性土、堆積土	DOT
	東京臨海副都心建設	有明北地区供給管共同溝建設その1	土圧式	9.36 × 15.86	249	13.5~17.5	粘性土、砂	DOT
3連形	大阪市交通局	地下鉄7号線大阪ビジネスパーク停留場工事	泥水式	7.80 × 17.3	107	27.0	砂、粘土	MFシールド
	東京都地下鉄建設	地下鉄12号線飯田橋駅工区	泥水式	8.846 × 17.44	275	27.0	砂層	MFシールド
4心円	東京都地下鉄建設	地下鉄12号線六本木駅工区	泥水式	7.06 × 13.18	118	28.38	細砂、砂礫	H&Vシールド
縦円形	東京都下水道局	新大森幹線工事(その4)	土圧式	3.16 × 4.66	565		粘性土、砂質土	自由断面シールド
円弧矩形	日本下水道事業団	碧志野市菊田川2号幹線管渠築造その18	土圧式	4.38 × 3.98	810	2.3~4.1	細砂	DPLEX
	東京都中央区	中央区銀座7-8丁目地下駐車場整備工事	泥水式	2.70 × 2.70	164 × 2			MMB工法
	首都高速道路公団	高速川崎延長KJ125工区(A)	泥水式	3.0 × 8.0 7.5 × 3.0	75.4	4.7~6.9	砂質土、粘性土	MMST工法
	首都高速道路公団	高速川崎延長KJ125工区(B)	土圧式	2.86 × 7.80 7.27 × 2.88	77.7	7.3~7.4	砂質土、粘性土	MMST工法
	首都高速道路公団	高速川崎延長KJ125工区(C)	泥水式	2.80 × 7.77 7.25 × 2.78	60	5.1~6.0	砂質土、粘性土	MMST工法
縦長太鼓形	建設省中部地方建設局	小田井山田共同溝工事	土圧式	7.95 × 5.42	530	9.3~12.0	粘性土、砂質土	異形断面シールド

形、多心円形、複円形、複楕円形など有利な断面形状を選択することも重要な検討課題となる。

掘削断面が一定であればシールド工法を用いてこのような断面形状のトンネルを構築することは技術的にはすでに可能であるが、その形状によっては大きな曲げモーメントが発生し、覆工の厚さも厚くなりその断面性能も相当に高める必要があることから、円形断面を採用する場合との総合的なコストの比較検討が必要となる。表-7は円形以外の断面をもつシールドの実績を示した表である。超大断面のトンネルについては、小さなシールドトンネルを数多く並べて、それらの相互を継ないでトンネルの外郭となる覆工部を先行して作り、覆工が閉合された後でその内部を掘削しトンネルを作る工法も提案され一部実用されている(図-9参照)。しかしこの工法には個々のトンネルの掘削精度の問題やそれらのトンネルの接合方法に関する問題など、まだ確立された技術とは言い難い部分もある。特に大深度地下の高水圧下における接合は、十分な地盤改良工法などの併用がなければ困難を伴うものと想像される。またシ



a) BOXシールド



b) マイクロシールド

図-9 マイクロシールド工法 (MMST)

ールド機が発進立坑と到達立坑との間を複数回往復することからその防護方法に十分な検討を加える必要があり、さらに施工に要する工期も長くなることが予想される。これに対してセグメントや資機材の搬入および掘削土の搬出のための中口径のシールドと、トンネルの外郭部を掘削するための推進工法に用いられる程度の口径をもつ多数のシールドとを連結し、一度にトンネルの外郭部を掘削し覆工を行いトンネルを構築する工法も提案されている(図-10参照)。この方法は現在のところまだ要素実験が終

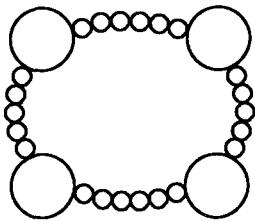


図-10 リングシールド工法

わった程度の開発段階にあるようであるが、高水圧下でトンネルどうしを接合する必要はなく、工期も比較的短いものと想像されることから有力な工法の一つと思われる。

大断面のトンネルを一つのシールド機で掘削する場合には断面内で地山が変化することも考えられるため、切羽の安定の確保に関しては詳細な検討が要求される。また地山を切削するピットの周速が外周部と中心部付近では相當に異なることから、地山を均一に掘削するためにはシールド頭部の掘削機構を図-11に示すように外周側を掘削する機構とそれより内側を掘削する機構とに分ける必要が出てくる。この場合には、この二つの掘削機構を同一面内におくのがよいか、内側を先行させるべきか（図-11-c）、先行させるとすればどのくらい先行させるのがよいか、チャンバーは共通でよいか分離すべきか、排土はうまく行えるかなど今後の検討が必要な課題である。平行リンク機構を採用したDEPLEX工法では基本的にこのような問題は発生しないが、現在のようなピット形状で軟岩までの地山が掘削できるかどうかなど、大深度下の大断面トンネルへの適用性については今後の検討課題である。

またトンネルの防水上の観点からセグメントはできるだけ弧長も幅も大きくして継手の接合線の総延長を減じることが望ましいが、幅は力学的な挙動に対する配慮やシールド機長の増加を押さえる観点から1.5m～2.0mが今のところ限度であるように思われ、また弧長はセグメントの厚さや幅とも関連するが、その取扱える重量から制約を受ける。現状ではセグメントの重量は運搬の効率性やエレクターの能力などからみて、10～15tf(100～150KN)程度が限界と思われる。セグメントの現場製作も検討すべき課題と思われるが、用地の確保やその品質および精度の確保など問題も多い。

大断面シールドでは重量の大きなセグメントのハンドリングを考えると、自動組立機構の採用は必須条件となるものと思われる。またトンネルの覆工に作用する外荷重のほとんどは水圧となることが予想されるため、セグメントの自重による曲げモーメン

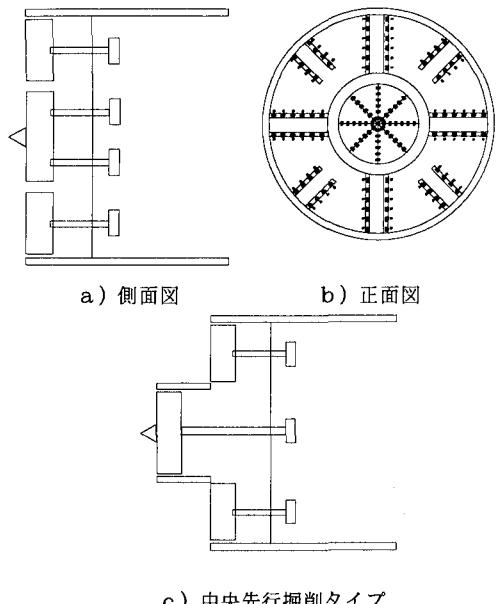


図-11 マルチ掘削機構をもつシールド

トは断面設計上の支配的な要因になる可能性が高い。このためセグメントリングがシールドテールを脱出し、その自重が地山で支えられるようになるまでの間は、自重による曲げモーメントが発生しないようにこれを支持しておく機構を設けることがセグメントを経済的に設計する上で特に重要な課題である。現状の真円保持装置はそれを用いることにより漠然とした安心感は得られるものの高水圧下での大断面シールドでは、その力学的な有効性に疑問があるようと思われる。セグメントの自重に関する問題はまた裏込め注入の時期とその材料の特性などとも深く関連する事項であるから、経済的で合理的な裏込め材料の開発と注入方法の検討も重要である。

円形以外の断面や大断面のシールドではテール部の強度が問題となる。シールドのテールクリアランスは地盤をゆるめる最大の原因となることから、これをできるだけ小さくすることが望ましい。しかし、シールド機も外部からの土水圧を受けることからテール部もそれに耐える構造でなければならない。テール部以外はシールドの外殻であるスキンプレートをリブで補強することにより十分な強度と剛性を与えることができるが、テール部はセグメントを組立てる空間を確保した上でこれをできるだけ小さくしたいことから一般に一枚のプレートで作られている。このため、テールプレートには相当の厚さのむくの鋼板が使われ、円形以外の断面や大断面のシールド

では、発生する断面力に応じて100mmかそれを越えるような厚さのテールプレートが必要になる。このような厚さの板はその曲げ加工が困難であるばかりでなく溶接性が悪く仕上がり精度も劣る。また力学的に見ても鋼材の使い方として合理的ではない。これらのことから、このような場合にはテール部をその他の部分と同様にリブで補強した桁構造として、そのクリアランスは裏込め注入で充填した方が合理的と思われる。筆者はクリアランスを逆に十分な大きさにとり、ECLの技術を利用することによってセグメントの外側に二次覆工（アウターライニング）を行う方法をかねてから提唱している。この場合セグメントは内型枠と考えるわけであるが、形成されたアウターライニングはその材質（例えばSFRC）や周辺の地盤によっては、トンネル覆工の永久構造の一部として評価することが可能となり、経済的にもメリットが生じるものと思われる。

大深度地下であり作用する荷重としては水圧が卓越することを考えると、シールド機に発生する断面力も曲げモーメントに比べて軸力が卓越する。このためシールド機の外殻部を鋼とコンクリートとの合成構造とすることも有力と考えられる。工場で鋼殻部を作り現場で高流動コンクリートなどをその中に打設すれば運搬も容易になる。シールド機自身の重量が増え必要な推力も増加するがその量はさほど大きくなないと予想され、また地盤がある程度以上の強度を有していればシールド掘進時の姿勢制御にも問題はないと思われる。シールド機に関するこのような基本構造の変更も総合的なコスト削減の観点から考えてゆく必要がある。

大断面のシールドトンネルでは中小断面のそれと比べるとシールド機の方向制御が容易ではない。急曲線や急勾配の施工が要求されることはあるまいと思われるが、所定の平面線形や縦断線形を確保して推進することは最低限必要となるため、シールド機の十分な方向制御技術が求められる。大断面になるとシールド推進用のジャッキの本数が増加し、シールド機に同じ偏心荷重を与えるために使用するジャッキの組合せは飛躍的に増大する。掘削に使用しているジャッキのパターンから所定の偏心モーメントを与える次のジャッキパターンにできるだけ速やかに移行するには、新たに伸縮するジャッキの本数を可能な限り少なくする必要がある。適正な線形を維持したままでシールドを掘進するためには、オペレーターの経験や勘を加味した上で最適なジャッキパターンをより早く効率よく選択するプログラムの開発が要求される。また計算結果が直ちにジャッキの作動に反映されるように、油圧の制御を速やか

に行うことのできるポンプの開発なども必要となる。

一般にシールド機は運搬可能な大きさに分割されて工場から現場に搬入される。このシールド機の分割の自由度は現在かなり高くなっているが、大型化に伴い分割数が多くなればシールド機を現場で組立てる工期も長くなりその組立精度の確保もむずかしくなる。通行上のネックとなる橋梁などは別としてもできるだけ大分割で運搬できるように、道路交通法など関連する法規の緩和措置も検討されかかるべきと思われる。また大断面シールドでは大容量の電気が要求されるため場合によってはかなりの受電設備が必要となる。外径18.6mの外郭環状道路の検討では工事のために小規模な変電所が必要となると予想されたが、このような場合にはそのための用地の確保などもあらかじめ考えておく必要がある。さらにシールド機の大型化は立坑の大型化に直接関係することから、立坑の用地の問題や立坑の断面形状の問題などを含めた総合的な検討が必要である。

c) 長距離シールドの技術

大深度地下にトンネルを構築するためには大深度の立坑が必要となり、立坑の全工事に占める構築コストの比率は相當に大きくなることが予想される。このため必要最小限の立坑を除いてできるだけその数を減らすことが望ましい。この結果トンネルは長くなりシールドは長距離掘進を余儀なくされる。

表-8はシールド工法による現在の長距離掘進の実績を示したものである。現状では4.4km程度が最長となっているが、今後5~6km程度を一つの目安として考える必要がある。いま10m級の大断面で5kmを掘削するとなると、シールド機の稼働日平均を日に10mとして500日を要する。シールド機の組立、発進到達、ビット交換、マシンの小さなトラブルおよびメンテナンスなどその他の作業を含めると2年半から3年が必要となる。この工期を少しでも短くするためには、各種作業の効率化に加えてシールド掘進の高速化を図らなければならない。シールドによる長距離施工の高速化には、シールド自体の掘削性能の向上、セグメントの組立の効率化、掘削土や資機材の搬入および搬出能力の向上などが必要となる。シールド機の掘削性能については現状の技術で十分に対応可能と思われるが、セグメントの組立の効率化を図るために、セグメントの形状や材質、縫手の構造、組立の自動化などがポイントとなる。掘進とセグメントの組立が同時に見えるようなシステムが最近いくつか提案されているが、これらのシステムはシールド掘進の高速化を図る上で有力な技術の一つであると思われる。また泥水式・土圧式を問わ

表-8 長距離シールドトンネルの実績

単位：m

	企業者	工事件名	シールド機種	シールド外径	延長	土被り	地質	備考
2連形	東日本旅客鉄道	京葉線京橋トンネル	泥水式	7.42 × 12.19	619	23.0~26.5	砂層、粘性土	MFシールド
	建設省中国地方建設局	広島新交通システム鶴城シールド工事	土圧式	6.09 × 10.69	530	5.0~8.3	シルト、粘土、砂	DOT
	日本下水道事業団	習志野市薺田川2号幹線管渠築造その3	土圧式	4.45 × 7.65	585	2.2~9.0	細砂、粘性土、腐植土	DOT
	東京臨海副都心建設	有明北地区供給管共同溝建設その1	土圧式	9.36 × 15.86	249	13.5~17.5	粘性土、礫	DOT
3連形	大阪市交通局	地下鉄7号線大阪ビジネスパーク停留場工事	泥水式	7.80 × 17.3	107	27.0	砂、粘土	MFシールド
	東京都地下鉄建設	地下鉄12号線飯田橋駅工区	泥水式	8.846 × 17.44	275	27.0	砂層	MFシールド
4心円	東京都地下鉄建設	地下鉄12号線六本木駅工区	泥水式	7.06 × 13.18	118	28、38	細砂、砂礫	H&Vシールド
	東京都下水道局	新大森幹線工事(その4)	土圧式	3.16 × 4.66	565		粘性土、砂質土	自由断面シールド
円弧矩形	日本下水道事業団	習志野市薺田川2号幹線管渠築造その18	土圧式	4.38 × 3.98	810	2.3~4.1	細砂	DPLEX
	東京都中央区	中央区銀座7-8丁目地下駐車場整備工事	泥水式	2.70 × 2.70	164 × 2			MMB工法
	首都高速道路公団	高速川崎総貯蔵KJ125工区(A)	泥水式	3.0 × 8.0 7.5 × 3.0	75.4	4.7~6.9	砂質土、粘性土	MMST工法
矩形	首都高速道路公団	高速川崎総貯蔵KJ125工区(B)	土圧式	2.86 × 7.80 7.27 × 2.88	77.7	7.3~7.4	砂質土、粘性土	MMST工法
	首都高速道路公団	高速川崎総貯蔵KJ125工区(C)	泥水式	2.80 × 7.77 7.25 × 2.78	60	5.1~6.0	砂質土、粘性土	MMST工法
縦長太鼓形	建設省中部地方建設局	小田井山共同溝工事	土圧式	7.95 × 5.42	530	9.3~12.0	粘性土、砂質土	異形断面シールド

ず、掘削土の搬出がまた一つの課題である。泥水式シールドでは掘削土は排泥管で搬出されるが、土圧式シールドの場合には台車を用いた搬出のほかに長距離のベルトコンベアによる搬出も考えられる。またトンネル断面がある程度以上大きないとセグメントなどの搬入と錯綜するため効率が落ちる可能性が高く、深い立坑からの掘削土の搬出にあたっても安全性への配慮が必要となる。ベルトコンベアによる排土は効率がよいがある程度以上のトンネル断面が必要となり、台車による場合と同じような問題が生じる。これらのこと加えて高水圧下のシールド工法であることを考えると、土圧式シールドの場合にも必然的にパイプ圧送が主流になるものと思われる。スクリューコンベアから排出された掘削土を一度大気圧下に解放するのは高水圧下であることを考えるとむずかしく連続圧送とせざるを得ないが、この場合には圧送圧と切羽圧とが相互に関連するので切羽の安定に対する十分な配慮が必要となる。どちらのシールド工法でも掘削土の搬出にはパイプを用いることになるので、長距離掘削になれば途中に置かれたポンプの数も増え、動力の中継基地が必要となる可能性も出てくる。このため中小口径のシールドの場合にはトンネルの途中で拡大シールド工法やNATMなどを用いて部分的に拡幅することが必要となるかもしれない。一方、セグメントの搬入にはすでに開発され徐々にその使用頻度が高くなりつつある自動化システムが有効である。このシステムは大別するとセグメントの立坑への自動搬入システム、トンネル内の自動搬送システム、切羽手前の自動送りシステムとエレクターへの自動供給システムからなる。トンネル内の自動搬送システムはレール上を走行するセグメント台車によるものが主流であるが、ゴルフ場のリモコンカートのように車を用い

たものも提案され実績もでてきている。この後の方は延長レールなどの資材の搬入作業がなくなることから、今後さらに改良すべき点はあるもののより合理的なシステムになる可能性が高い。しかし一般にこれらの自動化システムは人間が操作するのに比べて動作が遅く見ているとイライラすることが多い。安全性を侵さない範囲で一つ一つの動作のスピードアップを図ることも重要である。

シールド工法に用いられる資機材は主に切羽近傍で用いられる。長距離シールドでは各種中継用の資器材の搬入も距離が長くなるほど大変になる。泥水式シールド工法ではその長いトンネル坑内を利用して掘削土の処理を行うことを考えてもよい。これによって資機材の転用がある程度可能になり地上の処理用地が削減できる可能性もある。なお最近では用地の制約から地上の処理施設を多層化している例も見られる。

長距離シールドではシールド機の劣化が問題となる。ピットの摩耗や破損、軸受けの摩耗、軸部やテール部のシールの劣化、本体、面板、スパーク、配管などの摩耗、油圧系統、電力系統の劣化など考慮すべき課題が多い。交換が容易にできるものはよいが、そうではないものはあらかじめ十分な耐久性を持たせて設計することが必要となる。これらのうちピットに関しては一般に劣化が激しく、シールドの掘削に決定的な影響を与える上に交換も容易ではないことから検討すべき課題として早くから取り上げられ、いろいろな方法が提案されてきている。段差を設けてピットを配置したもの、ピット部分を多層構造にしたもの、乳歯と永久歯のように最初のピットが摩耗したらそれを落として内蔵されていた次のピットが押し出せるようにしたもの、シールドの前面を半球にして回転しすべてのピットをシールド機

内で交換できるようにしたものなどが提案され一部実用されている。最近ではドイツにおいて面板の裏側に人が出入りできる小さな部屋を設けて、シールド機内からこの部屋に入り所定のピットを大気圧下で交換できるものも開発されたようである。昨年の8月にはこの機械が現場で組立中であったことから、近いうちにその使用結果が示されるものと思われる。またピットの摩耗の検知にはそれが所定量摩耗すると電流が短絡するなどの機構を組込んだ検知用ピットが使われるが、そのピットのみが破損したのか、そのバス上のピットもほぼ同様に摩耗しているのかは判別が困難である。この検知用ピットによる方法も有力ではあるがより精度が高くそしてできれば個々のピットの摩耗状況を確実に把握できる検知方法の開発が必要である。もちろんピットの摩耗を機械的に検知し自動的に次のピットを送り出すような機構であってもよい。

長距離掘進においても地盤が多様に変化することが考えられるならば、切羽の安定やシールドの掘削、方向制御に関する検討を行う必要がある。

また超長距離のトンネルが要求される場合にその工期を短縮する必要があれば、2本のシールドの中接合技術が必要となる。シールドトンネルの長距離化に伴って地中接合の技術もいろいろと提案され、それらのいくつかはすでに実用されている。地中接合技術は大別すると二つの方法に分けられる。機械的な接合方法と地盤改良を用いた接合方法である。純粹に機械的な接合を行う方法は一方のシールドに貫入リングを設け、もう一方のシールドにはゴムなどの止水材を挟んだ受け側リングをあらかじめ設けておき、双方のシールドを十分に寄せた上で貫入リングを受け側リングに強く押し入れて接合するものである。二つのシールドが同口径を持つ場合の正面からの接合に用いられる。一方地盤改良工法を用いる方法は二つのシールドができる限り接近させた上で、その周辺地山を改良し、地盤の改良体を掘削して覆工を行いトンネルを接合するものである。東京湾横断道路トンネルのシールド接合にはこの方法が採用され地盤改良工法として凍結工法が用いられた。二つのシールドを可能な限り接近させるために、シールドの面板を後退させる機構を付加した半機械的接合方法もある。あらかじめ接合地点で地盤改良を行うことが可能であればよいが、一般には所定の位置にシールドが到着後にシールドの前面から地盤改良を行うため、これに要する工期を十分に見込んでおく必要がある。地盤改良工法を用いる方法では同口径の場合のほかに、二つのシールド径が異なる場合や既設のトンネルの側方にシールド機を近接さ

せ接合させた例もある。同一口径のシールドを正面から接合する場合には経済性や工期の短縮を考えると完全な機械接合を行う方法が合理的と思われるが、口径が異なる場合やトンネルの側方から接続する場合には今のところ地盤改良工法を用いる方法しかなく、短期間で確実性が高く、しかも経済性も向上させることができるよう地盤改良工法とそれに用いる材料の開発がこの場合に必要となる。なお曲線ボーリングを応用して薬液注入管や凍結管を合理的に配置し、必要最小限の範囲だけを改良することにより経済性を高め工期の短縮を図った工法も開発されている。

切羽で作業をする作業員の安全衛生上の問題も重要である。十分な換気や照明は当然としても、非常時の対策は最重要課題の一つであり、どのような事故が想定され、どのような対策が考えられるか、事前に詳細に検討が行われなければならない。また作業員の交替などの移動にも時間がかかるため状況に応じて休憩所や食堂、トイレなどの設備の設置も必要となる。このような作業環境についても今後の大事な検討項目である。

d) 覆工構造に関する課題

①セグメント

一次覆工であるセグメントは一般に永久構造として設計される。これはセグメントがシールドのテールを出た直後に、全土被り荷重と水圧が作用した実例がある上に、セグメントに作用する荷重の経時的な増加は地盤によって異なり、多種多様な地盤に対してこれを明確に推定するのが困難であることによる。しかし大深度地下のある程度一様な地盤であればこのような荷重の経時的な増加は少なく、主に水圧のみを対象とすればよいものと考えられるから、セグメントを二次覆工などと協同して外荷重に抵抗する部材として設計することも可能になる。

一方セグメントの材質はその経済性からみると鉄筋コンクリートが妥当と思われるが、高水圧下での耐久性は十分検討されねばならない。工場製作の高強度のコンクリート製品と言えども透水性があり鉄筋の腐食が考えられるからである。この点で合成セグメントやSRCセグメントも適用される可能性がある。またシールドが中小口径程度のものであればあらかじめコンクリートを中詰めした鋼製セグメントも使用可能である。なおこれらのハイブリッドセグメントは大きな曲げモーメントに対して有効であることから、円形以外のトンネル断面の場合には特に合理的である。

また一般に用いられるセグメントの平面形状は矩形のものがほとんどであるが、シールドの掘進とセ

グメントの組立を同時に行うことにより施工の高速化を図る目的には、六角形や台形などの平面形状のものも有効であると考えられる。

大深度地下の比較的良好な地盤でセグメントに発生する断面力も軸力が卓越する状況であるならば、セグメントの継手は相当に簡単なものでよい。セグメントの組立方法やシールドテール内でのその支持方法、トンネルの防水性などを別途考えることにすれば、継手面を単に突合させるだけのものや継手面を若干噛み合わせる程度のものでも十分使用可能である。リングを拡径して地盤に押し付ける方式も有効と思われるが、高い水圧下ではかなりの工夫が必要となりそうである。いずれにしろ継手構造はセグメントの組立の自動化に適し組立時間が縮減できるものがよい。セグメントを推進用のジャッキで押し込むだけで組立が可能ないわゆるワンパスジョイントなども有力な継手システムの一つと思われる。

セグメント継手部を簡素化して、しかも従前のように千鳥組にすれば添接効果に伴う付加的な曲げモーメントが発生するため、むしろ積極的にいも継ぎにして曲げモーメントの発生を押さえ、セグメントを主に軸力に対して設計するようにした方が合理的と考えられる。いも継ぎにすれば床版用のセグメントや天井板を支持するセグメントなど、あらかじめ用途に応じた機構をセグメントに付与することが可能になる。しかし一方で十字形の接合点が発生するため、継手部の防水性のより詳細な検討やトンネル全体の漏水対策に関する検討などが別途必要になる。

セグメント継手部の防水に現在一般に用いられているシール材は水膨張性シール材であり、これを用いれば $10\text{kgf}/\text{cm}^2$ ($1\text{N}/\text{mm}^2$) 程度までの防水は基本的に可能と思われる。リング継手部にはシールドのジャッキ推力による大きな圧縮力が作用し、またセグメント継手部には外水圧による大きな軸力がそれぞれ作用することから、継手部の防水は継手線が交差する部分（千鳥組の場合はT形に、いも継ぎの場合は十字になる）を特に慎重に検討すれば良いものと思われる。最近ほど付きセグメントの導入に伴ってヨーロッパで多く用いられているガスケットタイプのシール材も使われるようになった。ガスケットタイプのシール材はゴムの反発力のみによって防水を行うものであり、ゴムの耐久性は保証されている上に接触圧力を一定に保つことができるなどの利点もある。しかしこのタイプのシール材は一般に大型で、特にKセグメントの挿入時に相互に擦られて脱落したり切断されたりする可能性がある。また組立時の目開きなどがあれば十分な反発力が得られず、ゴムのクリープ現象などから長期にわたる反発力の

保持には若干の疑問がある。水膨張性シール材とは異なりひとたび漏水が発生すれば、シール材でこれを止めるような付加的な機能を有していない。ガスケットタイプのシール材を高水圧下で用いるにはこのような課題についてのより詳細な検討が必要になる。

②二次覆工とトンネルの防水

最近セグメントのシール材の改良による防水効果の向上に伴って工期の短縮や経済性の向上を図る目的で、電力や一部の鉄道を中心に二次覆工を省略するケースが増えてきている。技術の発達が二次覆工の省略を可能にし、それが結果として工期の短縮や経済性の向上に繰り返すならば誠に好ましいことであるが、後者の観点のみが強調され、二次覆工が有していた機能を一次覆工のみで完全に代替できるという保証を与えるのに十分な検討がなされているかどうか疑問なケースも多い。二次覆工を省略しようとする傾向は一つの方向性として妥当と思われるが、トンネルの用途によってどこまで必要な機能を代替できるかは十分検討されてしかるべきと思われる。二次覆工を省略する場合にはこれに加えてシール材の耐久性、セグメントの組立精度、継手部の処理方法などにも十分な検討が必要である。

前述したように大深度地下であればトンネルに作用する外荷重の経時的な変化は少なく、その把握もある程度可能と思われることから、二次覆工をトンネルの永久構造の一部として取り扱うことができる。さらに進めてセグメントを仮設部材と考え二次覆工のみを永久構造と考えることも可能である。これらの場合にはいかに早くまた安く二次覆工を構築するかが課題となる。この課題に対して二次覆工の構築にECL工法の技術を導入することが有効であると筆者は考えている。例えば二次覆工はシールドの推進と同時に切羽のある程度後方から切羽を追いかけるようにして行う。この場合には切羽へのセグメントや資機材の搬入および切羽からの掘削土の搬出などに支障とならないように、既設の一次覆工と既設の二次覆工との間の二次覆工の打設区間にこれらを連絡する大梁を設ける。この大梁にスライディングフォーム式の型枠を乗せ、これに連続的にコンクリートを打設して二次覆工を形成する。この打設にECL工法を応用する。すなわち大梁の自重に反力をとり、若干なりともコンクリートを加圧しながら型枠を連続的に前進させる方法である。必要に応じて大梁の自重を増すかブレーキがかかる構造とするなどの工夫を行う。このような施工が実際に可能であるか、また確実に発生する乾燥収縮のひび割れはどう評価するかなど検討すべき課題は多いと思わ

れるが筆者は有効な方法の一つと考えている。すでに述べたようにE C L技術を応用してアウターライニングを行う方法も有力である。この場合には二次覆工の構築は切羽の進行と同時であるから工期的な問題はない。裏込め注入の材料が相当に増加するが二次覆工の材料費を考えれば相対的に安価である。なお、これらの二次覆工のコンクリートに鋼纖維を混入すれば構造部材として評価する場合に力学的な取扱いが容易になるばかりでなく、予期しない曲げやせん断に対する補強効果も期待できると思われる。また両覆工間に防水シートなどの防水層を設けることによって、トンネルの耐久性は飛躍的に増大させることができる。

二次覆工のいま一つの機能としてトンネルの劣化防止が挙げられる。トンネルの劣化は水によって引き起こされると言っても過言でない。ひび割れによる劣化はトンネル断面を貫通するひび割れでなければその幅を制御することにより防止できる。鉄筋の腐食やコンクリートの中性化はひび割れ内に入った水が動かなければ進行しないと考えられるからである。したがってトンネル断面の地山側はあまり問題とはならない。一方、トンネル内面側のひび割れは、それが乾湿を繰り返すような環境化に置かれる場合にはトンネルの耐久性に与える影響が大きく問題となる。二次覆工がトンネルの防水に直接寄与できるとは考えにくいが、このような場合には相当に有効であり、また外部からの漏水に対しても水みちを長くし、漏水量を若干なりとも低減させる効果がある。トンネルへの漏水は長い間にトンネル周辺の地山を劣化させるため、トンネルに作用する荷重系が変化する可能性も考えられる。二次覆工にはこのような場合に対しても一定の抑制効果があるものと思われる。

防水シートはトンネルの耐久性の確保に対して決定的と言って良いほどの大きな効果をもつ。防水シートの確実な施工ができれば、トンネルの覆工断面内の水の動きは完全にシャットアウトできるため、耐久性の高い完全防水トンネルができ上がる。この場合に二次覆工は防水シートの押さえとしての役割をもつ。二次覆工を無筋コンクリートで構築すればたとえトンネル内が乾湿を繰り返しても二次覆工の劣化は少ない。

シールドトンネルに防水シートを用いた例はまだ少なく、現在のところ防水シートの一次覆工への取付けは山岳トンネルの場合と同様な方法で行っている。しかしシールドトンネルは山岳トンネルとは異なり、一次覆工の内面が平滑である。このことを考えると防水シートのもっと合理的な取付方法がある

ように思われる。例えばパテグリスなどの安価な材料を接着剤として用いて、防水シートを一次覆工の内側に貼付することもできる。この場合、グリスの塗布は覆工内面の全体に行う必要はなくその一部で良い。防水シートは端部からは容易に剥離させることができると、その中央部を剥離させようとすれば裏面は負圧になることから少々の力でははがせない。したがって、その自重程度の荷重は何の問題もなく支える。なお、普通のグリスはパテグリスより安価であるが可燃性であることからパテグリスの方が良いと思われる。また、剛性の高い防水シートであればトンネルの大きさにもよるがその剛性を生かしてあらかじめリング状にしたものを作成内面に押し広げることにより設置することもできる。

ここに述べたのは一例であるが、防水シートは平滑な面に取付けられるという特性を十分に生かして、山岳トンネルの場合とは異なる方法を検討すべきであると思われる。

一般に鉄道トンネルや道路トンネルでは、二次覆工の局部的なひび割れによりコンクリートがはく落するのを防止する目的から二次覆工に配筋することが多い。しかしあく落防止程度であればラス金網で十分であり、若干の余剰強度を期待したいのであれば、鋼纖維補強コンクリートを使うのも有効である。なお道路トンネルでは火災も考えられるため、二次覆工は主体構造である一次覆工の防火層としての役割ももつ。また下水道や地下河川、地下調整池などのトンネルでは、程度の差はあるもののその中を流れる水の水質による腐食や摩耗などの防止に二次覆工が役立っているものと思われる。このほかに下水道トンネルを中心に二次覆工としてF R P M管などの内挿管を用い、これと一次覆工との間に間詰めコンクリートを打設注入する方法も使われ始めている。F R P M管は化学的な腐食に強く、ある程度の耐摩耗性が付与できまた防水性が保証されていることから、トンネルの劣化の抑制には高い効果が得られるものと期待される。しかし、この方法では一次覆工であるセグメントと内挿管との間に詰めるコンクリートの特性をどのようにするかが課題となる。セグメントの漏水などがこのコンクリート層を抜けて内挿管に水圧として作用すれば、内挿管には大きな軸圧縮力が発生して座屈破壊をするなどの問題も出てくる。これを防止するために内挿管にはあらかじめ十分な断面性能を与えておくことが必要になる。

二次覆工はトンネルの劣化を抑制する機能のほかにも、トンネルの用途に応じたいろいろな機能を有しているわけであるから、これを安易に省略してしまうのではなく、それらの機能について十分な検討

を加えた上で、二次覆工が必要でないかどうかを総合的に判断することが重要である。

(2) NATM

ランニングトンネルの構築にNATMが適用できれば、工期の問題はあるが経済性は格段に向上升る。NATMが適用できるかどうかは、地下水を制御できるかどうかで決まる。山岳トンネルのように地下水を抜くことが可能であればNATMの適用性は良いが、大深度の地下と言えども固結度が低い土質地盤や強度が低い土丹程度の軟岩では、水を抜くと同時に地山がゆるめられ、切羽が崩壊したりトンネルの一部が崩壊するなどの可能性もある。また環境問題から水を抜くことが不可能である場合も今後は増えるものと予想される。したがってトンネルの構築にNATMを使うためには、止水を主目的にした地盤改良工法の採用が不可欠である。この場合に改良された地盤が地下水環境に与える影響には十分配慮する必要があり、場合によってはある一定の期間のみ止水効果を有し、その後は時間の経過とともにそれが劣化してそう長くない時間が経過した後で現地盤とほぼ同等な状態に戻るような改良方法が必要となることも考えられる。経済的で信頼性が高く短時間で施工できるような地盤改良技術の開発がNATMを採用する必須条件となるものと予想される。切羽の進行と地盤改良とは同時並行では行えないことから、先行させる地盤改良の範囲をできるだけ長く取ることも必要となる。これに対して小口径のシールドトンネルを先行させて、その内部から本トンネルの掘削に要求される範囲の地盤改良を行う案も提案されている。この場合にはシールドトンネルを本トンネルの上に位置させるか、断面内に取り込むかも問題となる。今のところ信頼が置ける安価な上向きの地盤改良工法が見あたらないことから、本トンネルの上に位置させる方が合理的と思われる。なお透水係数が小さく湧水量が非常に少ないなど特殊な地盤条件下ではNATMの採用が可能であり、経済的にも好ましいことは言うまでもない。

NATMが適用できたとして次に問題になるのは覆工に関する考え方の整理である。現在のところ都市NATMによって作られたトンネルでは、覆工を鉄筋コンクリートで行っている場合が多い。この場合支保工は仮設と考えて覆工にはシールド工法で用いられるような土水圧を作用させて設計を行うのが一般的である。山岳トンネルとは異なり導水構造とするのは困難と思われることから、覆工にはその自重のほかに水圧が作用することはまちがいない。しかしNATMの考え方によれば、膨張性地山など特

殊な地山を除いて地山の変形は支保工の段階で収束しているはずであるから、覆工に土圧まで作用させるのは理屈に合わないように思われる。この点で支保工と覆工の役割分担は再検討してしかるべきと思われる。もっとも大深度地下の地盤であれば土圧はほとんど発生せず主荷重は水圧となることも予想されるので、問題が少ないかもしれない。

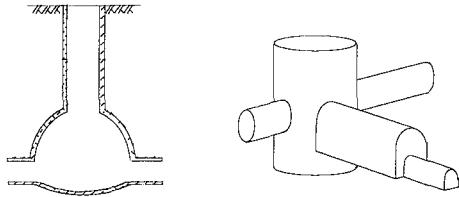
また大深度の都市トンネルでは特殊な場合を除いてトンネルを導水構造とすることができないため防水シートの役割は今まで以上に重要となる。吹付けコンクリートにより形成されたトンネルの内面は凹凸も激しく、特にトンネルのインバート付近では覆工コンクリートの自重が直接防水シートに作用することから、現在使われているようなシートの厚さではたとえ不織布を付けても破損して防水の役目を果たさない恐れが強い。トンネルの耐久性の観点からみて重要な検討項目と考えられる。防水シートの設置や覆工コンクリートの打設に関しては、シールドの二次覆工と同様に工期の短縮や経済性の向上を目指した施工方法の改良が望まれる。また、地盤によっては先受け工法の採用も予想されるが、一般に先受け工法はコストが高い上に切羽の進行が遅いことから、これらの課題を克服できるような新たな技術の開発が必要と思われる。NATMでは地下水の制御と施工のスピードアップが最大の課題であると考えている。

5. 地下空間の切り抜け工法に関する課題

球状構造物やドーム状構造物などの大規模地下構造物の構築には地盤改良工法などの補助工法、掘削工法、覆工および内部構築工法の検討が要求される。これらを総称して以下では切り抜け工法と呼ぶことにする。

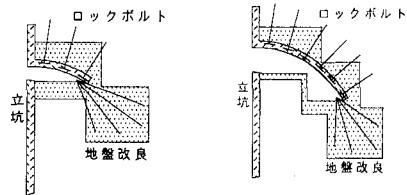
大規模な構造物を大深度地下に作るとすれば、それは地上とのアクセス部すなわち立坑や斜坑、らせん状坑などとランニングトンネルとの接合部に作られるを考えるのが一般的である。ランニングトンネルの途中に球状やドーム状の構造物を作ることも可能であるが、この場合には切り抜け工法に必要な機器材および資材の搬入や掘削した土砂の搬出などの問題が生じる。図-12は立坑の下部を切り抜げるイメージを示した図である。

切り抜け工法で最も重要なのは地盤改良工法である。すでに何度か述べたように、止水に重点を置いた経済的で信頼性が高く、また工期の短い工法の開発が是非とも必要となる。立坑などアクセス構

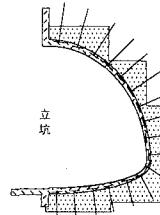


a) ドーム状構造 b) トンネル状構造の場合は
立坑下部の切り抜け

図-12 立坑下部の切り抜け



a) 第一段階の施工 b) 第二段階の施工



c) 最終状態

図-13 構造物の施工段階

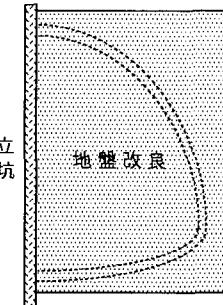


図-14 構造物全体を包含する地盤改良

造物の下部を切り抜ける場合には、地盤改良はまずその構造物内から水平または下向きに行われる。次に改良地盤内を掘削することになるが、これにはNATMが用いられるものと予想される。改良された地盤の上部から掘削し、必要に応じてロックboltを打設し、吹付けコンクリートで地山掘削面の劣化やだ落ちを防止する。改良される地山はせいぜいが軟岩程度と想定されるため、掘削にはバックホータイプの油圧ショベルやピックハンマを用いる程度で十分である。やや硬い地山であればロードヘッダやブームヘッダなどを用いることになる。図-13のa)に示す第一段階の施工はこれで終了する。次に第二段階の地盤改良をどの範囲までどのように行うかが問題となる(図-13のb))。

図-14に示すように構築される構造物全体をカバーできる範囲を改良すれば良いが、構造物が大きくなれば非常に不経済であり、またそれが可能かどうかも問題となる。したがって立坑に近い範囲では立坑から地盤改良を行い、立坑から遠くなればすでに掘削された部分からそれを行うことになる。掘削工および支保工と次の地盤改良工は時系列的に並び同時に進行とはならない。これはアーチ部だけでなくインバート部でも同じになる(図-13のc)参照)。このため工期が非常に長くなることが予想される。また施工途中段階にあるこのような構造を支保工だけで支えることは困難と思われ、本体構築を行なながら工事を進めるのか、仮設部材を建て込むだけこれに対応するのかが問題となる。断面が大きくなれば支保工に作用する荷重も飛躍的に増加すると思われる。掘削過程に応じた耐荷構造の検討は重要である。さらに掘削や支保などのそれぞれの工程を全周で同時に行うのか、それとも部分的に行うのかが問題となる。後者は山岳トンネルのイメージで言うと掘削工法として全断面工法を用いるか、ベンチカット工法を用いるか、また導坑先進工法を用いるかなどに対応する。掘削工法によっては地盤改良がよ

り効率的になる可能性がある。これらの工程はトンネルの場合には二次元的な思考で決定できるが、このような構造物では三次元的な思考が必要になる。以上述べたような問題はそう簡単に解決できる問題ではない。十分に時間をかけて検討すべきものと思われる。

一方、通産省が行ったジオドーム構造の実験では、まず立坑から下に向けてスパイラル状のトンネルを掘り、次にこのトンネルの内部からロックboltを打設して地盤を補強し、トンネルにコンクリートを充填していわばあら骨を形成した上で、最後に立坑から下に切り抜けドーム構造物を作り上げる方法を採用した。このケースでは地下水位低下工法を併用したようであるから、切り抜けはそれほどの困

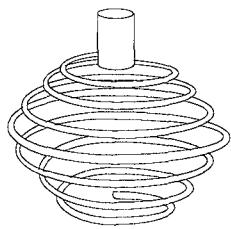


図-15 球状構造物の外殻となるスパイラルトンネル

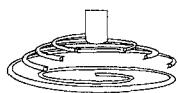


図-16 ドーム状構造物の外殻となるスパイラルトンネル

表-9 地下空間の切り抜け工法に関する課題
のキーワード

施工の種類	課題のキーワード
地盤改良工	工期、コスト、信頼性、施工手順、工程、スパイラルトンネル
掘削工および支保工	N A T M、軟岩程度の掘削
覆工および内部構築	施工順序

難を伴わずに行われたものと推定される。しかし地下水位低下工法が使用できない場合にはスパイラル状のトンネル内部からの地盤改良が必要となる。トンネルをあばら骨と考えてその内側にドームを作る代わりに、トンネル周辺を地盤改良した上で掘削し、トンネル自身をドームの一部に取り込んでその外殻を先行して構築する方がより効率的であると思われる。球状構造物では下部の半球はそのままでは構築できないことから、スパイラルトンネルの先端は図-15に示すように徐々に曲げ半径を絞ってゆき十分な底部の改良ができる範囲までそれを到達させる必要がある。

またドーム状構造物の場合にはその底部床板の一部となるトンネルは急曲線トンネルとなるものの勾配はほとんどなくてよい（図-16参照）。

ランニングトンネルなどの一部を拡幅する場合やトンネルの分岐または合流のために大断面であるが短いトンネルを作りようとする場合も、以上に述べた課題はまったく同じである。ランニングトンネルの下側を切り抜ける場合は良いが、上側にも切り抜ける必要がある場合は、これらの課題に加えて上向きの地盤改良工法も検討しておく必要がある。なお表-9には切り抜け工法に関する課題のキーワードを示す。

6. その他の課題

他の課題としては、完成した構造物の維持管理およびランニングコストに関する問題、防災や地下施設を利用する人々の心理面などに関する問題、大深度地下のゾーニング、プランニングなどのソフト面に関する問題、法制面の問題、掘削される土の処理に関する問題、補修、補強および更新に関する問題などが挙げられる。以下にはこれらの問題について簡単に述べる。

まず維持管理に関する問題であるが、地下構造物の維持管理はそれを利用する人々に常に快適な環境を用意し整えておくことはもちろんのこと、構造物としての十分な機能を少しでも長く保持しておくために重要である。快適な環境を維持するためには地下施設の用途に応じた換気、空調、照明、エレベーターやエスカレーターなどのアクセス手段などの十分な管理が要求される。また構造物の機能の維持はその構造物の長期にわたる耐久性の確保につながるものであり、特に漏水の防止を中心とした管理となる。これらの維持管理はランニングコストに直接反映される。地下は温度変化があまり顕著でないことから空調のコストはさほど大きくないと予想されるが、換気は重要であり十分な能力が要求されることから大きなコストとなる可能性がある。照明やアクセス手段などは地下施設の利用目的によって異なるが、商業施設、文化施設、生活施設、業務施設、生産施設、研究施設など主に人間が長時間にわたりそれらを利用する施設では心理的な要因も考えて十分な機能を確保する必要があり、ランニングコストも大きくなる。一方、交通施設や用排水施設、物流施設、エネルギー関連施設、通信施設、貯蔵施設などではこれらにかかるコストはさほど大きくないものと予想される。

次に防災や利用者の心理面に関する問題であるが、これらは相互に関連をもつ。火災に対しては現状の地下街などにおける対策で対応できるものと考えられるが、特に十分な防災区画の設定と避難誘導方法の徹底が望まれる。地下は地上と異なり視野も狭くなりがちで方向感覚が鈍る。自分のいる位置を常に視覚的に認知できる情報を今以上に増やすとともに、火災の発生位置とその規模、避難すべき方向や道筋などの情報を放送や映像によって遅滞なく認識できるようにすべきである。またこの際には視覚や聴覚などの弱者に対しても配慮できるような手段が必要となる。地震災害に対しては大深度地下はさほど大きな問題とはならない。問題となるのは地上とのア

クセス部においてである。地表と地下とでは地震による地盤変位が異なることから、アクセス部がこの地盤変位差に十分追従できるような柔構造であるか、またはアクセス部が剛な場合は地下構造物との接合部分が地盤変位差を十分吸収できるような構造となつてはいる必要がある。

地下利用者の心理面の問題は筆者の専門ではなくほかの多くの文献に譲るが、地上に勤務するものと地下に勤務するものとでは地下に対するイメージがかなり異なるようである。一般に地下は死を連想し、暗くじめじめしたイメージが持たれるが、地上ほどではないにしろ十分に照明されて明るく、空調も十分に行われていることから過ごしにくい環境ではないようである。むしろ暑い日差しや冷たい風もなく雨や雪も関係ないことから過ごしやすい環境であると考える地下勤務者が多い。これは慣れの問題かと思われる。

次は大深度地下のゾーニングやプランニングなどのソフト面に関する問題である。都市の地上部分は過去からの自然発生的なその形成過程を経て近年に至ったわけであるから、いわゆる都市計画は後手後手にまわり、強権の発動をもってしてもなかなか改善が困難な状況になっているように思われる。しかし大深度地下は今のところ白紙の状態に近く、地上の再整備と絡めてその利用計画を十分に検討すべきである。地下を利用する個人に対しては地上における用途地区や容積率、建坪率、高さ規制などの概念を地下に適用し、その私権を制限する必要がある。

筆者は昨年機会があつて19ヶ国を連続して回ってきたが、そのうち地下利用が進んでいるヨーロッパでも地下権を法律で制限しているという話は聞かなかつた。ほとんどが市など行政区の条例によっているようである。公共の福祉を最大限にすえ、既存の便益を損なう場合や工事に伴つて何らかの被害を被つた場合のみそれに相応する保証を行う。したがつて地下の開発が公共の福祉に合致するものであるか否か、自然環境に与える影響はないか、また各種の補償が必要か否か、その場合の補償額はいくらか、などに対しては中立機関においてかなり厳格に審議されるようである。このようなシステムの確立も法制面の整備に併せて十分に検討されるべきものと思われる。

掘削される土の処理の問題も大きな問題である。これを資源として再利用するとしてもその使用量はたいしたものではなく、大部分は埋め立てなどにより処分されることになると予想される。このような処分場所が都市近くに確保できるかどうかは、大規模な地下開発が可能であるかどうかを左右する。わ

表-10 その他の課題とキーワード

施工の種類	課題のキーワード
維持管理と ランニングコスト	換気、空調、照明、アクセス手段、 漏水防止
防災と心理	火災、防災区画、避難誘導、情報の徹底、 弱者への配慮、地震、立坑の耐震性、 接続部の耐震性
ゾーニング、 プランニング	用途地区、地下の容積率、建坪率、 深さ規制
法制	地下権、公共の福祉、補償の対象、 中立機関による裁定
掘削土の処理	処理方法、産業廃棄物
補償・補修と更新	初期投資、ランニングコスト

が国の大都市はほとんどが沖積平野に位置することから、海に近い低地のかさ上げや海の埋め立てに使用することになると思われるが、前者の場合には既設の建物や施設の一時的な移転などを考える必要があり大きなコストが必要になる。このためにも地上の再整備との兼ね合いが重要である。また後者の場合には特に環境の問題や漁業に従事する人々の補償の問題などが生じる。なかなか解決が困難な問題である。ヨーロッパを見ると掘削発生土はもとより、コンクリートの残さいなどわが国では産業廃棄物として規制を受けるものも平気で谷部などの埋め立てに用いている。ひどいところでは余剰となった泥水を直接川に流している。これはやりすぎとしても、彼らに言わせれば地中にあったものを地中に戻すのは当然という論理になる。セメントも鉄筋も骨材ももともとは地中にあったものだというわけである。彼らからは逆にコンクリートがだめだと言うならば畑にまく石灰や化学肥料はどうなのかと聞かれたのが印象的であった。その一方で地球の温暖化や国際河川の汚濁、大気汚染などに対してはかなり厳格に規制する方向に動いている。一国の問題ではなく多くの国々や地球規模の問題としての視点からこれをとらえているのであれば合理的である。環境問題は感情的な側面が強く表に出てくることが多いが、特に建設発生土やコンクリートの残さい、レンガや瓦などが産業廃棄物にあたるか否かは再度冷静に検討し直してみることが必要と思われる。

最後に補修、補強および更新の問題であるが、大深度地下に構築される構造物は現状では更新は不可能であると考えて良い。したがつて日常的な管理だけでは地下施設の機能の維持が困難であると判断された場合には補修や補強の必要が生じる。補修工事や補強工事は施設の維持管理コストと補修や補強にかかるコストとの相対的な比較の結果として行われるわけであるが、これらのコストは地下施設の建

設にかけた初期投資コストの大小にも無関係ではないことから、あらかじめこれらすべてのコストを十分に比較検討した上で地下開発を行う必要がある。これは地下施設の環境を維持するための諸設備についても同様である。しかし、それらの更新は構造物とは異なり比較的容易に行うことができる。「必要な発明の母」と言われるよう、地下空間の開発技術や補修、補強技術の水準はその必要に応じて飛躍的に高まる可能性があることも考えておくべき事項と思われる。なお、表-10にはその他の課題とキーワードを示しておく。

7. おわりに

都市部の地上空間を人間が社会生活を送る上で快適な環境に改善しこれを維持してゆくためには、地上にある必要がない施設を地下に移してゆくことが不可欠である。しかし新しい地下都市を一挙に作るなどというのは夢物語であり、現実には都市機能の一部を必要性の高いものから順に徐々に地下化してゆくことになると思われる。この場合に地上との関連を重視した地下のマスタープランに沿った調和

のとれた開発が行われなければならない。50年、100年という長いレンジの話である。自然環境への配慮などから平野部や山間部における地上空間の開発が困難であるならば、都市部の地下空間を有効に利用するしかない。月や火星などにコロニーを作る計画、海の中にいろいろな施設を作る計画なども見られるが、もっと身近で開発が容易な地下にその空間が残されている。大いにこの空間を有効利用したいものである。

当初このテーマを与えられたときには、要点のみをまとめてずっと簡潔に記述するつもりでいたが、書き始めるとあれもこれもで大変に長くなってしまった。冗長な部分も蛇足に等しい部分も多い。また浅学なことからの射ない表現や誤りもあると思われる。しかし少しでも次の技術開発につながるものがあれば幸いであると考えた。

最後にこの機会を与えていただいた土木学会論文編集委員会、第6小委員会と図表等の作成の手伝いをお願いした研究室の大学院生諸君に深く感謝申し上げる次第である。

(1998.1.30受付)