

軟弱地盤における地下鉄トンネル建設工事

わた なべ たけし
渡 辺 健*

本講演は1979年7月25日8時30分より10時まで行われた。シンガポールではちょうど地下鉄建設の検討中で、前日の開会式での Teh 建設大臣の挨拶にも地下鉄に最大関心を払っている旨の発言があり、このような情勢下での時宜を得たテーマであった。講演は78葉のスライドフィルムを中心にして行ったが、参加者は非常に熱心に聴講され、講演後も熱心に質疑応答がなされ盛会であった。以下はその講演の概要である。

題目「軟弱地盤における地下鉄トンネル建設工事」

1. まえがき

大都市における都市交通機関の主役として地下鉄を利用することが今日の世界的な傾向になりつつある。アジアにおいても、主要都市で地下鉄が営業又は建設工事中であり、もしくは建設計画が検討されている。

このような情勢下で世界主要都市の地下鉄トンネル建設工事をみると、技術的に高度な作業がなされ、特に土質工学的にも新技術が実用に供されている。これらの技術は軟弱地盤でその真価を発揮する機会が多い。以下、軟弱地盤における地下鉄トンネル工事について、日本における実状を探ってみたい。

2. 日本各都市の地下鉄現況

図一1のように、現在日本では8都市で地下鉄の建設工事もしくは営業が行われており、仙台では工事準備中で、広島が建設計画を有している。1978年8月現在で営業を行っている都市は6都市で、8都市が表一1のように工事中で、その総延長は110kmである。このうち93kmがトンネル区間で、その約80%が開削工法を主とした垂直掘削



図一1 日本の地下鉄

方式であり、あとの20%がシールド工法を主体とした水平掘削工法（トンネル工法）である。札幌、京都等の各都市では全区間開削工法が用いられ、シールド工法は東京で多く用いられている。

これら各都市の地質は、大部分が洪積土層と沖積土層からなり、岩石層はわずかに神戸と福岡の一部に見られるにすぎない。これら各都市は、河川の扇状地とか、河口のデルタ地帯に位置しているのが多く、一般的に欧米の諸都市に比べて地盤が軟弱で地下水も豊富である。したがって日本における地下鉄トンネル工事は、大部分が軟弱地盤での悪条件下における施工を強いられている。

表一1 日本の各都市における地下鉄の工事中路線延長

都市名	企業体名	路線延長				施 工 法														
		合計	地下部分	地表面 又は 高架部分	親杭横矢板	垂 直 掘 削 工 法					水 平 掘 進 工 法									
						鋼 矢 板	柱列式地下連続壁	地下連続壁	潜 函	沈 埋	シールド	山 岳 トンネル								
札幌	札幌市交通局	7.4	7.4	-	7.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-					
東京	帝都高速度交通営団	16.9	16.9	-	8.1	-	1.4	0.1	-	-	-	7.3	-	-						
	東京都交通局	14.1	13.4	0.7	12.9	2.2	12.1	0.5	0.5	4.6	6.0	0.4	1.5	0.1	0.2	0.2	5.4	12.7	-	-
	京王帝都電鉄	15.0	2.8	12.2	1.8	-	-	1.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
横浜	横浜市交通局	3.5	3.1	0.4	0.3	-	0.4	-	-	-	-	0.2	2.2	-	-					
名古屋	名古屋市交通局	8.6	8.6	-	4.6	0.2	-	1.8	-	-	-	2.0	-	-						
京都	京都市交通局	12.0	11.2	0.8	10.8	-	-	-	0.4	-	-	-	-	-						
大阪	大阪市交通局	14.1	14.1	-	9.1	-	3.9	0.5	-	-	-	0.6	-	-						
神戸	神戸市交通局	1.6	1.6	-	1.4	-	0.2	-	-	-	-	-	-	-						
福岡	福岡市交通局	17.2	14.2	3.0	0.3	0.2	8.2	3.6	0.1	-	-	0.7	1.1							
合計		110.4	93.3	17.1	46.0	0.9	18.7	7.4	0.6	0.2	16.2	3.3								

*工博 帝都高速度交通営団 理事

現況報告

3. 地下鉄建設工法

地下鉄建設工法は、各都市の地質に最も合致した方法をとるべきことは当然のことで、この意味から、日本では路面覆工方式を伴った親杭横矢板の開削工法が最も標準的な工法として多用されている。これは砂又は粘土の比較的軟弱な土層を基本とした浅部式地下鉄工法として最も合理的な地下鉄建設工法だからである。

しかし、地下鉄路線がふえるにつれ、地下立体交差の関係でトンネルは深層化を余儀なくされ、また、道路交通のふくそう、沿道住民の環境対策への要望等からも、地下鉄建設工法は開削工法からトンネル工法へ移行されていく。かくして、東京、大阪、名古屋等では開削工法からシールド工法への移行傾向が大きくあらわれている。

開削工法は最も標準的な親杭横矢板工法を基本とし、地質、立地条件などから、シートパイル工法、柱列式地下連続壁工法、地下連続壁工法などの土留め工法へと拡大され、また支保工面からは切ばり方式のほかにアースアンカー方式が最近実用の範囲を拡大しつつある。

一方、シールド工法は、技術の進歩と平行して、トンネルの深層化、道路面使用の制約、環境問題等の外的要因により、その需要をますます拡大しつつある。

このほか、ケーソン工法、沈埋工法、凍結工法及び山岳トンネル工法などが適時適所に採用されている。

4. 地下連続壁工法の多用化

1965年ごろより建設公害問題が厳しくなり、土留め工法でも、特に軟弱地盤におけるシートパイル土留めに代わるものとして、地下連続壁工法が脚光を浴びるに至った。

地下連続壁工法のなかでも柱列式地下連続壁工法が先行的に多用され、開発努力の結果、1970年ころには地下鉄工事の標準工法の一つとして定着するに至った。一方、地下連続壁工法は1961年の試験的採用（日本へは1959年導入）以来途絶えていたが、1968年以来脚光を浴び、柱列式地下連続壁工法の普及とともに、仮設、本設兼用の点からクローズアップされた。更に、1975年にはプレキャストコンクリート板による地下連続壁工法も福岡で本格的に採用され、成功をおさめている。

現在日本では地下鉄工事に地下連続壁工法が一般工法なみに採用されている。使用範囲は深層掘削区域と建造物近接施工区域及び軟弱地盤地帯で、柱列式地下連続壁工法と地下連続壁工法とを使用目的と適用範囲に応じて併用している。

地下連続壁の特長は、剛性の大きい止水壁を形成することにより周辺地盤に沈下等の悪影響を与えずに安全掘削を可能にすることにある。ただ、この工法は施工上及び構造上若干の未解決の問題点を有している。これらの問題点は今後の研究の進展とともに解決されなければならない。

5. 軟弱地盤開削工法の実例

東京都荒川区町屋付近は、地表面下約30mまでN値0程度の極めて軟弱なシルト層で、典型的な下町の地質である。ここに開削工法により深さ18mの掘削を行い、上下型地下鉄トンネルを築造した。

土留め工は柱列式地下連続壁で施工したが、掘削が13mまで進んだ時点で土圧が急増し、土留め支保工に座屈の徴候があらわれ、掘削底面下の地盤が膨張の危険にさらされた。そこで生石灰杭工法を採用し、掘削底面下の地盤強度を増強し、土留め壁に対する受働土圧とヒービング防止の対策を講じた（図-2）。この地盤改良工法が成功し、掘削も安全に行うことができ、大きな成果をあげることができた。

この工事（1968年）がテストケースとなり、以後は軟弱地盤地帯でも地下連続壁と生石灰による大規模開削工事が方々で採用されるようになり、ケーソン工法の利用度が激減する結果となった。

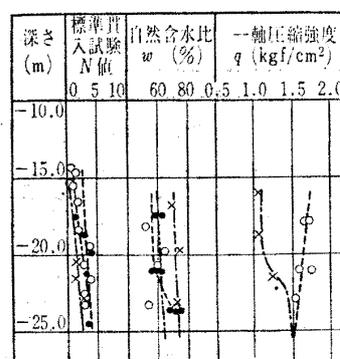
6. シールド工法の工事例

日本各都市の地質は変化に富んだ構成からなり、しかも豊富な地下水を含んでいる。このような地盤中にシールド工法でトンネルを掘進する場合には、それぞれの地質に最も適応したシールド掘進方式と補助工法とを選定することが肝要である。

(i) ブラインド工法

地質が極めて軟弱な粘性土で、流動性が大きく、オープンタイプのシールドでは山留めが困難な地山条件のとき、ブラインドシールド工法が用いられる。1970年に施工された横浜の地下鉄工事がその一例で、約630mの並列単線トンネル工事に本工法が適用された。この工事中シールドの推進に伴って生ずる地表面の隆起、沈下を主体とした挙動調査を行い、先行沈下—先行隆起—後続沈下の典型的な一連の挙動を把握することができた。

(ii) パイロットトンネル工法



--- 打設前
— 打設後2週間経過
- · - 打設後1か月経過

図-2 生石灰杭打設前後の土性

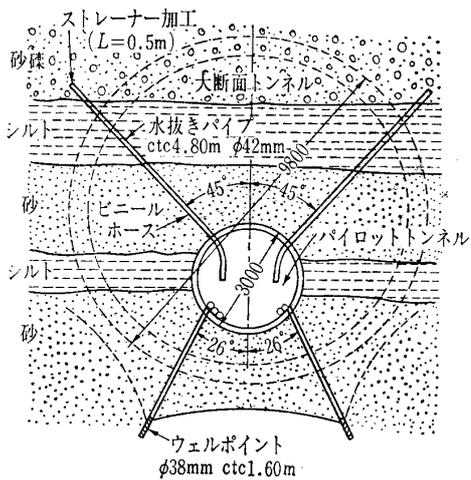


図-3 パイロットトンネルによる地下水位低下例

滞水砂層におけるシールド掘進には圧気工法だけではシールド切羽面における砂の流出を防ぐことが困難な場合が多く、この場合パイロットトンネル工法による水位低下が最も確実に効果をあげることができる。図-3は1973年に施工された東京の例である。複線トンネル断面内にパイロットトンネルを先行施工し、上部滞水層に対しては水抜きパイプ挿入による自然重力排水方式で、下部滞水層に対してはウェルポイントによる強制排水方式を採用した。

(iii) 泥水加圧式シールド工法と土圧式シールド工法

切羽面を泥水圧で押さえながら掘進する泥水加圧式シールド工法は日本で急速に普及した工法である。この工法は滞水砂層における圧気工法の欠点を補う形で開発され成果をあげているが、 $\phi 5\text{m}$ 以下の中小径の実例が多い。今回、交通営団の工事で $\phi 10\text{m}$ の複線シールドトンネルをこの工法で施工準備中で1980年1月発進予定である。これは世界最大規模の泥水シールドである。

次に土圧式シールド工法であるが、これはメカニカルシールドで、切削土をカッターフレーム内部に充てんし、更にスクリーコンベアーで土砂を充てん輸送することにより切削地山の崩壊を防ぎながら掘進する工法である。この掘削システムは、泥水加圧式シールド工法とブラインドシールド工法との中間に位置する工法といえる。本工法は名古屋の単線トンネル($\phi 7\text{m}$)工事に1979年秋発進の準備中で、大口径土圧式シールドの実例となる。

(iv) シールド駅の施工

地下鉄駅をシールド工法で築造するシールド駅の形態には種々のタイプがあるが、最も代表的で高度の技術を要する工法は、並列円形トンネルの中間部を掘削して結合し、めがね形駅を形成する方式である。このシールド切広げ工法は東京のような軟弱地盤では特に高度の技術が要求される。図-4は交通営団の例で施工順序を示す。

7. アンダーピニングの実施例

地下鉄トンネルは道路下を主体としてつくられるが、時には高層ビル下や既設トンネル下にトンネルを築造しな

ればならぬときがある。この時には既設の構造物の基礎をアンダーピニングして新しいトンネルをつくる場合が多い。図-5は1972年に施工された例で、9階建ての銀行ビル直下に地下鉄トンネルをつくった例である。この場合、ビル内の銀行業務には全然支障を与えずに、ビル下の地下に作業空間を設け、ビル基礎をアンダーピニングしてビル基礎を新規の基礎杭に受けかえて、地下鉄トンネルを築造した。

8. 地盤沈下の防止

トンネル掘進による地盤沈下の防止例として図-6を取りあげた。これは、掘進前にトンネル周辺地盤に注入を施工して地盤改良を行い、地盤の強度を増し、ビル基礎沈下を許容値内におさめようとするものである。

注入による地盤改良は図の2ケースを考え、それぞれの地盤条件に応じてFEMによる解析を行った。ビル基礎の沈下量は、無注入の場合5.02cmであるのに対し、ケース1で2.90cm、ケース2で2.15cmである。実際の施工はトンネル周辺地盤にアーチ形に厚さ3mの注入を行い、沈下量は最大2.5cmに押さえることができた。

9. 地下鉄トンネルの防振、防音対策

トンネル内電車走行による地盤振動に関して、営団の営業線で実測したのが図-7である。図はトンネルと地表面との関係について、地表面の振動レベルを実測したものである。これは営業線トンネル付近の地表面に発生している振動レベルの実態を示しており、地盤中の距離減衰を表している。これらのデータをもとにして具体的な防振、防音対策を施して大きな成果を挙げている。

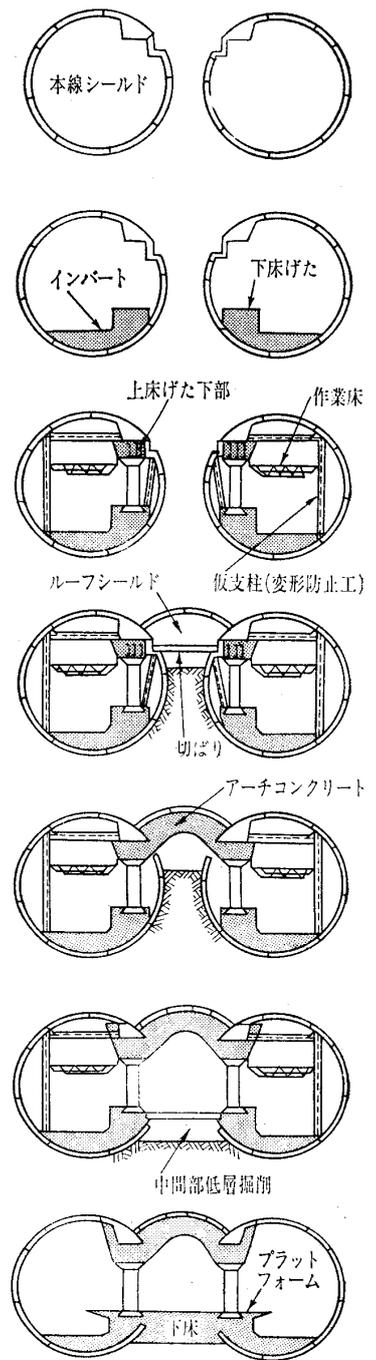


図-4 めがね型シールドトンネルの施工順序

現況報告

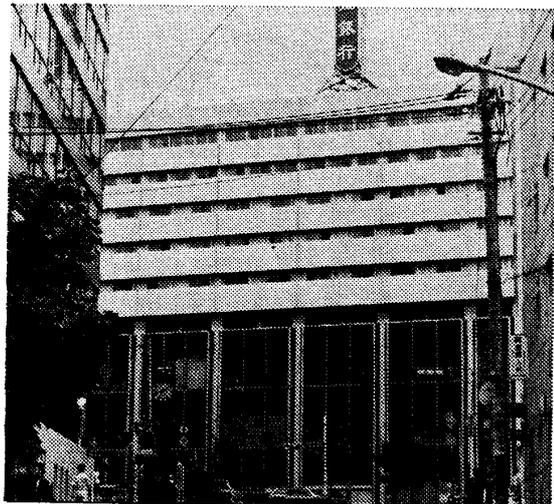
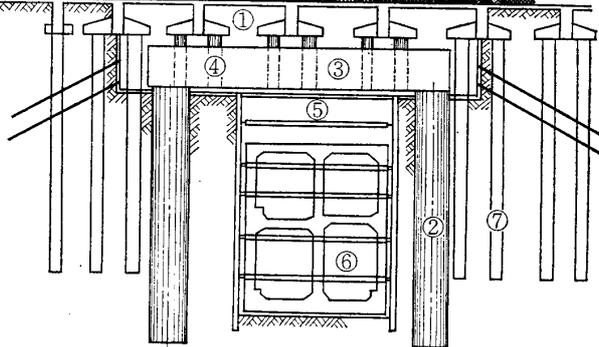


図-5 高層ビルディングのアンダーピニング



10. 地下鉄トンネルと地震

交通営団では営業線トンネル内と付近の地盤中に地震計を設置し、地震に対する常時測定を行っている。図-8はその観測データの一つで、1978年6月12日の宮城県沖地震のときのものである。これらのデータから次のことが考察できる。①地震時におけるトンネルの挙動は周辺地盤とほぼ同一とみてよく、トンネルは自己振動しない。②したがってトンネルの地震時挙動は地上構造物と全然異なる形態をとる。このため地上構造物の耐震設計法をそのままトンネルに用いることは適当でなく、地盤自体の変形、変位などの

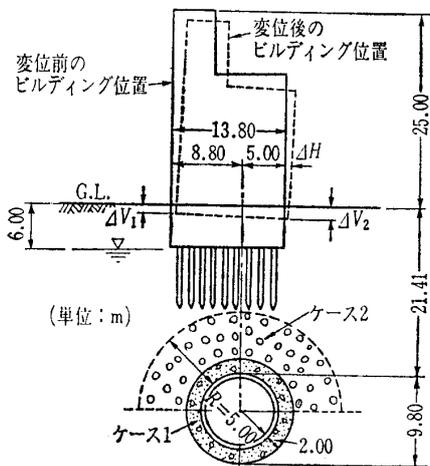


図-6 薬液注入による地盤沈下防止

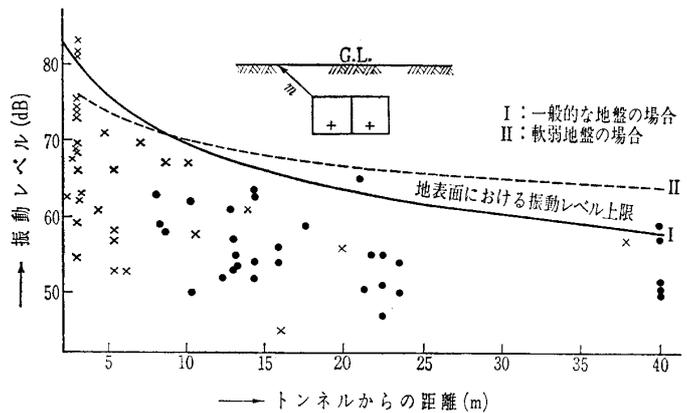


図-7 地表面における振動レベル (列車速度 30~70 km/h)

挙動に基づいて検討すべきである。

11. むすび

地下鉄トンネルの掘削技術は地質との関係が密接である。各都市の地盤性状は全く異なったものであるから、地下鉄掘削技術は他都市の真似では駄目で、その都市に最も合致した方法を探らねばならぬ。それには工事着手前の設計段階における細密な地質調査が死命を制することを銘記すべきである。多様にわたる地下鉄トンネル建設技術は、土木各部門の総合技術であるが、その基本は土質工学である。

また、最近の社会情勢は、住民の環境意識が著しく向上している現状にかんがみ、今後の地下鉄建設工事は、計画段階から環境対策を取り入れた設計として、先取りした工法を積極的に推進することが肝要である。

(原稿受理 1979. 9. 11)

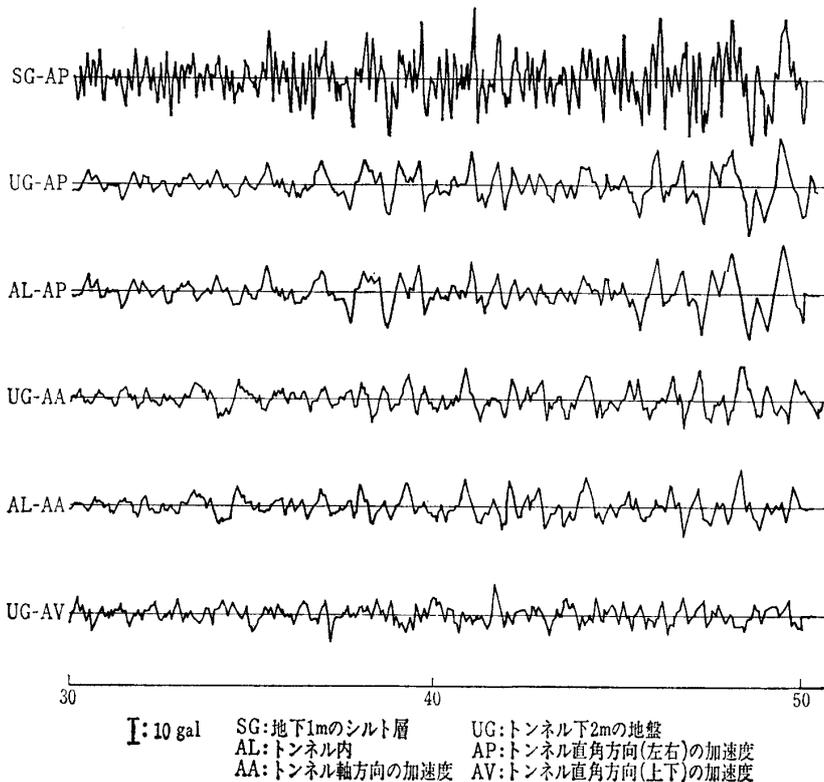


図-8 地震振動の記録 (東京・広尾 1978年6月12日)