

トンネル技術の変化・変遷（開削工法）

Development in Tunnel Technology (Cut and Cover Tunneling Method)

中 村 兵 次 (なかむら ひょうじ)

パンフィックコンサルタンツ株式会社 常務取締役品質技術本部長

1. はじめに

開削工法は、地盤を掘削して目的とする躯体を築造後に埋め戻す工法で、人類の歴史とともに存在したものと考えられるが、本稿の目的を、既設の開削トンネルの維持管理、既設構造物に近接する開削工事の検討、今後の研究等への参考資料を提供することとして、最近の50年程度の開削トンネル技術の変遷について記述する。

上記のような目的を設定すると、開削トンネルに関する変遷を広い視野で扱うことが必要になる。そこで、以下では、最初に開削トンネルの施工実績を概観し、その後、開削トンネルに関する技術を「開削トンネルの構造と施工方法」に関するものと、「開削トンネルの設計方法」に関するものとに大別し、変遷（歴史）については表で示し、技術的内容を文章で示すことにする。

変遷を示した表は、1960年頃から現在までの50年間で対象とし、実際に施工された開削トンネルにおいて採用された構造・施工方法と設計方法について、その時代において約半数以上で採用された技術項目を実線で、半数程度以下ではあるが、とくに重要な技術項目についても取り上げることとし、その技術項目が比較的多く使用された時期を破線で示した。

なお、開削トンネルの変遷は、開削トンネルに携わった技術者によって、その捉え方が異なると考えられる。ここで示した内容は、筆者の感覚によるところが多いことを最初にお断りしておく。

2. 開削トンネルの施工実績

シールド工法が発達する以前は、トンネルの築造方法としては山岳工法と開削工法の2工法が主なものであり、開削工法はトンネルの設置位置が浅く、土砂地盤に築造される場合に採用され、日本では、1960年代の都市トンネルは、ほとんど開削工法によっていた。

その後、シールド工法が発達するとともに、都市トンネルの多くがシールド工法に取って代われ、現在では、複雑な断面形状を有する構造、大規模な構造、延長が短い構造、トンネル軸方向に断面が変化する構造、土被りがごく浅い場合等に限定されつつある。

3. 開削トンネルの構造と施工方法の変遷

開削トンネルの構造と施工方法の変遷を表1に示したが、以下ではこれらの技術項目のうち、主なものにつ

表1 開削トンネルの構造および施工方法の変遷

技 術 項 目		年 代 (西暦)					
		1960	70	80	90	2000	10
トンネルの構造材料	鉄筋コンクリート						
	鋼						
トンネルの形状	矩形断面						
	円筒形(立坑部)						
トンネルの構造	現場打ち構造						
	土留め壁の本体利用						
	プレキャスト構造						
防水材	アスファルト防水						
	モルタル防水						
	合成高分子材料系						
	ベントナイト系						
土留め壁	親杭横矢板						
	鋼矢板						
	鋼管矢板						
	柱列連続壁						
	ソイルセメント連続壁						
	安定液固化連続壁						
	鉄筋コンクリート連続壁						
	鋼製連続壁						
土留め支保工	木製支保工						
	鋼製支保工						
	グラウンドアンカー						
補助工法	地下水位低下工法						
	地盤改良(薬液注入)						
	地盤改良(生石灰杭)						
	地盤改良(深層混合処理)						
	逆巻き工法						
	切ばりプレロード						
環境への配慮	低振動・低騒音						
	地下水位低下防止						
	地下水流動阻害対策						
	掘削土の再利用						
施工管理	情報化施工						
	ISO9001(品質管理)						

いて記述する。

3.1 トンネルの構造材料

開削トンネルは、地下構造物であることから、鉄筋コンクリートが採用されることが多い。この傾向はこの50年間で変わっていない。しかし、大規模な地下空間を構築するような場合では、鉄筋コンクリート構造では、部材が厚くなりすぎることから、柱やはり等の主要部材に鋼材が採用されることもある。また最近では、鋼管矢板、鋼製連続壁およびH型钢を用いたソイルセメント連続壁の本体利用に関する研究が行われるなど、鋼材を用いた土留め壁の使用も多くなりつつある。

3.2 トンネルの形状

開削トンネルは、一般に現場打ちされることが多いので、施工上の都合から、ほとんどの開削トンネルが平面

論 説

部材（床版および壁）と線部材（はり）と柱）で構成され、その結果、断面形状は矩形となることが多い。

3.3 トンネルの構造

前述のように、開削トンネルは現場打ちされることが一般的であり、このことは現在も変わりがない。

70年代までは土留め壁は施工時の土留めとしてだけの目的で使用されてきたが、深い掘削が行われるのに伴って鉄筋コンクリート連続壁が用いられるようになったことから、この連続壁を仮土留め壁としてだけでなく、本構築の一部として利用することが多くなった。

また、浅い掘削で規模の小さなトンネルを、短い施工期間で築造する場合では、80年頃からプレキャスト構造が多く採用されるようになった。

3.4 防水材

開削トンネルは、地下水位以下に築造されることが多いので、防水は重要である。60年頃はアスファルト防水とモルタル防水が主流であり、とくに重要な構造物ではアスファルト防水が多く用いられた。アスファルト防水は、止水性はよいものの開削トンネルでは施工性に難があった。80年代になって、合成高分子材料系の防水が、また90年代になってベントナイト系防水が用いられるようになり、施工性が改善された。

3.5 土留め壁

60年頃の開削工事に用いられた土留め壁は、親杭横矢板が主流であり、とくに地下水位が高い場合に限って鋼矢板が用いられていた。これらの土留め壁は、曲げ剛性も耐力もあまり大きくはないので、良好な地盤あるいは浅い掘削に用いられるべきものである。掘削深さが深くなるに伴って、曲げ剛性も耐力も大きな土留め壁が必要になり、70年代に入り、柱列連続壁が登場し、少し遅れて鉄筋コンクリート連続壁が用いられるようになった。80年代では柱列連続壁の施工性と止水性を向上させたソイルセメント連続壁、鉄筋コンクリート連続壁の経済性を向上させた安定液固化連続壁、耐力を向上させた鋼製連続壁が用いられるようになった。

3.6 土留め支保工

土留め支保工は切ばりや腹起し等の総称である。60年頃には、地下鉄の建設工事でも木製支保工が使用されていた。しかし、木製支保工は強度および施工性に劣ることから、鋼製支保工に取って代わられた。グラウンドアンカーは、切ばりを設置することが難しいか不経済である場合に80年代頃から用いられるようになった。

3.7 補助工法

開削工事における補助工法は、①地下水の処理、②掘削底面地盤の剛性と強度の増加、③土留め壁の変形の抑制を目的として用いられる。

地下水位低下工法は、ボーリングの防止を目的としたもので、既に60年代には用いられていた。薬液注入による地盤改良は、地下水の処理（止水）と地盤強度の増加を目的として60年代から使用されていたが、地下水汚染が問題となり、都市部においては75年から止水を主目的とする材料だけが用いられている。生石灰杭によ

る地盤改良は、掘削底面地盤の剛性と強度の増加を目的として70年代から90年代にかけて、軟弱な地盤で大規模な掘削を行う際に多く使用された。その後、生石灰杭工法より大きな改良強度が必要になり、深層混合処理工法が採用されるようになった。

土留め壁の変形を抑制し土留め架工全体の安定性を高める工法として逆巻き工法が現在でも採用されるが、この工法は60年代に既に採用されていた。切ばりプレロードは、近接施工の一環として発展した工法で、70年代から使用されている。

4. 開削トンネルの設計方法の変遷

開削トンネルの設計方法の変遷を表2に示したが、以下ではこれらの技術項目のうち、主なものについて記述する。

4.1 本構築の設計法の基本

従来は許容応力度設計法が使用されてきたが、「発生応力度を許容応力度以下にすること」で、構造物に要求されるすべての性能を保証できるものではないとの観点から、現在では性能設計が採用される機運にある。

荷重の作用による構造物の挙動に着目し、構造物の挙動が限界値以下となる場合に、構造物に要求される性能が満足されると考える手法が限界状態設計法であり、現

表2 開削トンネルの設計方法の変遷

技 術 項 目	年 代 (西暦)					
	1960	70	80	90	2000	10
本構築の設計法の基本	許容応力度設計法					.....
	限界状態設計法					.....
	性能設計					....
本構築の設計で要求される性能	安定性(沈下、浮上り)					
	常時の安全性					
	遮水性					
	耐久性					
	耐震性			.....		
	耐火性				.....	
本構築の設計荷重	常時の荷重					
	地盤沈下の影響					
	地震の影響					
本構築の応力計算法	たわみ角法		.....			
	変形法(弾性)		.....			
	変形法(非線形)					
	FEM(周辺地盤を含む)					.....
下床版下面の地盤反力 耐震設計法	等変分布荷重					
	地盤ばね					
	震度法(ラーメン)					
	応答変位法(ラーメン)					
	応答変位法(FEM)					.....
	応答震度法(FEM)					.....
	逐次動的解析(FEM)					.....
掘削底面の安定検討	ヒービング					
	ボーリング					
	盤ぶくれ					
土留め工の応力・変形計算	慣用計算法					.....
	弾塑性法					.....
	FEM					.....
土留め工の設計用土圧	極限土圧(古典土圧)					
	見掛けの土圧					
	実測値に基づく土圧					
近接施工	土留め壁の変形予測					.....
	周辺地盤の変形予測					.....
	既存構造物の影響予測					.....

在では、この方法が使用されつつある。

4.2 本構築の設計で要求される性能

地下構造物に要求される性能は、従来は、安定性（沈下、浮上り）、常時応力に対する安全性、遮水性、耐久性であるとされていたが、兵庫県南部地震の後には、ほとんどの開削トンネルにおいて耐震性も要求されるようになった。また、最近では交通量の多い道路トンネルにおいては耐火性も要求されるようになった。

4.3 本構築の設計荷重

本構築の設計荷重は、従来は、常時の荷重（トンネル自重、トンネル内荷重、土圧、水圧、地表面荷重等）を想定することが一般的であった。数は少ないが地盤沈下が想定される軟弱地盤で地盤沈下の影響を、また偏荷重を受ける場合やトンネル上に橋梁の基礎が載るような特殊なケースに限定して地震の影響を考慮してきた。

このように従来は地震の影響を考慮することは一般的でなかったが、前述のように、兵庫県南部地震の後には多くのトンネルで考慮されるようになった。

4.4 本構築の応力計算法

開削トンネルは、特別な場合を除いて横断面が設計断面となる。常時の応力・変形の検討に用いる計算法は、60年代は主としてたわみ角法が用いられ、70年代以降では部材を弾性体と仮定する変形法が用いられてきた。両者の相違は軸方向の変形を無視するか考慮するかであり、とくに中柱を用いる構造ではたわみ角法の計算結果は20%を超える誤差が発生することもある。

トンネル延長方向の変形や応力が問題となる場合には、トンネルを弾性床土のはりとしてモデル化して計算を行うことが多い。

地震時の検討で、躯体を弾性体と仮定することが適切でない場合には、周辺地盤をばねで評価する変形法を用いるときも、また有限要素法でモデル化するときも、トンネルを構成する部材は非線形性を考慮する。

4.5 下床版下面の地盤反力

開削トンネルに作用する鉛直方向荷重は、トンネル自重、土被り荷重、地表面上の荷重等であり、その分布形状はほぼ正確に想定できるが、それらの荷重を受けて下床版下面に発生する地盤反力の分布形状を正確に想定することは難しい。従来は、等分布荷重とすることが多かったが、土留め壁が撤去されることが多かったため、このような扱いはとくに問題となることはなかった。しかし、土留め壁や中間杭が残置され、土留め壁と側壁がずれない状態で施工されるようになった現在では、このような仮定は現実とかけ離れたものとなっていると想定され、下床版下面の地盤を等分布ばねで、土留め壁および中間杭を集中ばねで代表させる計算法が用いられるようになった。

4.6 耐震設計法

開削トンネルのような地下構造物は、地震時に慣性力を受けて自由振動することはないことから、一般には地震の影響を考慮することはない。ただし、偏荷重を受ける場合やトンネル上に橋梁の基礎が載るような場合

には、地震の影響を無視できないとして、地震時土圧を作用させたり、地上部分の慣性力を作用させたりして、地震の影響を考慮してきた。その後、地震時の地盤のせん断変形に着目して、とくに重要な構造物では骨組みモデルによる応答変位法が使用されるようになっていた。

そうした状況において、兵庫県南部地震が発生し、一部の開削トンネルで壊滅的な破壊が発生した。これを受けて、開削トンネルの耐震設計に関する研究が急激に進展し、現在では、骨組みモデルによる応答変位法や、いずれも有限要素法を用いる応答変位法、応答震度法、逐次動的解析等を用いて耐震設計を行うことが一般的となっている。

4.7 土留め工の応力・変形計算と設計用側圧

土留め工の応力と変形の計算法は、前述の本構築の設計法および耐震設計法とともに、最近の50年間で著しく進展した設計技術である。

切ばりで支えられた土留め工の応力の計算には、約50年前は、切ばり軸力の測定値を整理して得られた側圧を、切ばり支点あるいは根入れ部の仮想支点で支持される単純ばりあるいは連続ばりに作用させて、土留め壁および支保工の応力を求める方法（慣用計算法）が採用されていた。

しかし、この計算法は掘削面側の受働抵抗を合理的に取り入れていないことから、軟弱地盤への適用には問題があった。これを解消するために70年代に考え出された方法が弾塑性法である。この方法は掘削面側地盤を弾塑性のばねで代表させること、掘削に伴って構造系を変化させること等、実態に合ったモデルである。現在では、10 mを超える掘削に対しては弾塑性法が主に用いられている。

土留め壁の背面に作用する側圧は、土留め壁の変形に伴って直線分布ではなくなり、切ばり支付近および掘削底面より少し下がった部分が大きくなって、変位が大きくなる掘削底面付近では小さな値となる。弾塑性法の計算では、このような実際に作用する側圧を用いる必要があることから、土圧計による現場実測値を整理した側圧を用いることにしている。

5. おわりに

開削トンネルにおける技術の変遷について包括的な説明を行い、開削トンネルの構造と施工方法、開削トンネルの設計法に分けて年表で示すとともに、各技術項目の内容を記述した。

扱った期間は、最近の約50年間としたが、既設の開削トンネルの維持管理、既設構造物に近接する工事の検討、今後の研究等への参考資料として役立たせていただければ幸いである。

参 考 文 献

- 1) 土木学会：トンネル標準示方書〔開削工法編〕・同解説、1979/1986/1996.

(原稿受理 2006.5.29)