

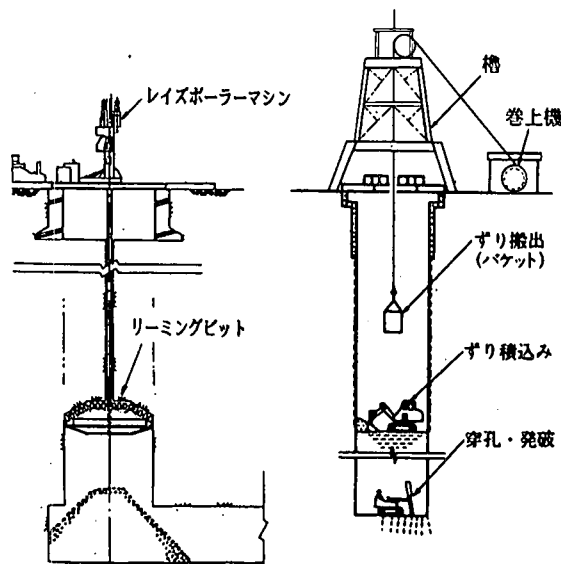
2. レイズボーラーによる立坑掘削

(1) 掘削工法の概略

従来工法による掘削工法としては、全断面発破掘り下がり工法や、導坑先進拡大掘削工法などがあるが、ここではより一般的な全断面発破掘り下がり工法と、レイズボーラー工法との比較を行う。図. 2に両者の概念図を示す。

全断面発破掘り下がり工法の施工手順としては、櫓・巻き上げ機等の仮設備設置→本体掘削→仮設備撤去となる。

これに対して、レイズボーラー工法は全断面機械掘削となるため、地表部近辺の軟弱な自立しないと考えられる部分については、薬液注入などの適切な地盤改良が必要となる。このため、施工手順としては、地盤改良工→坑口工→機械設置→パイロット掘削→リーミング掘削→機械撤去となる。



レイズボーラー工法

全断面爆破掘り下がり工法

図. 2 掘削工法の概念図

本立坑で採用したレイズボーラー工法における特徴を以下に示す。

- ① 地盤改良工としては、加圧性に優れた十分な浸透性注入の改良効果が期待できる二重管ダブルパッカー工法を採用し、注入材としては効果の持続性が得られる超微粒子系の恒久グラウト材を使用した。これより、改良部分は設計値 (3.5N/mm^2) 以上の強度が確保され、掘削完了時まで地山の崩壊は認められず、坑壁の自立性が確認された。
- ② パイロット掘削には、 $\phi 381\text{mm}$ のチップインサート型トリコーンビットを使用した。レイズボーラー工法におけるリーミング掘削の精度は、パイロット孔の施工精度で決定される。このため、孔曲がりの発生低減を目的としたロッド編成 (ストレートスタビライザー2本、スパイラルスタビライザー3本) とするとともに、設定ビット荷重を通常時では許容荷重の50%、さらに事前の調査ボーリングより地質の変化点と想定される部分については25%まで抑えた。これよりパイロット孔貫通時の掘削精度は、掘削長130mに対して0.3%程度の38cmという良好な結果が得られた。
- ③ リーミング掘削は、ドリルストリングスの強度向上のため、 $L=3.5\text{m}$ のロングステムを使用し、スタビライザーは通常のスタビライザーの他にリーミング専用のソリッドスタビライザー (1本) を使用した。なお、リーミングビットは32個のチップインサート型ローラーカッターで構成されている。

(2) 経済性の比較

上述したように、全断面爆破掘り下がり工法とレイズボーラー工法では、工種や工程が全く異なる。このため、両工法の掘削のみ (全断面爆破掘り下がり工法における一次覆工は考慮していない) に要する工程および労務数を比較したものを図. 3に示す。

また、両工法の経済性を比較するために、レイズボーラー工法の総工事費を100%とした場合の両工法の工種別経済性比較を表. 1に示す。

地盤条件等によっても異なるが、今回のような直径5.1m、深さ130m程度の立坑掘削では、これらの図・表より以下の事が示されている。

工 法	所 用 期 間 (月)								労務数計
	1	2	3	4	5	6	7	8	
全断面爆破掘下り工法	仮設備基礎および設置(構・巻上げ設備) D級部 掘削 C級部 掘削 B級部 掘削 仮設備撤去								2,061人
	3.0ヶ月		1.0ヶ月		2.0ヶ月		0.4ヶ月		
	3.0ヶ月×23日×8人		3.4ヶ月×23日×2(昼夜)×8人				1.4ヶ月×23日×8人		
レイズボーラー工法	地盤改良工 坑口工 マシンセット パイロット掘削 リーミング掘削 マシン撤去								1,417人
	2.0ヶ月		0.6ヶ月		0.5ヶ月		0.8ヶ月		
	3.1ヶ月×23日×8人		2.2ヶ月×23日×2(昼夜)×8人				0.2ヶ月×23日×8人		

図. 3 爆破掘り下がり工法とレイズボーラー工法の工期比較

- ① レイズボーラー工法は、全断面爆破工法と比較して、工期、労務数共に約 30%低減可能である。これは、全断面機械掘削による省人化の効果が大きいと考えられる。
- ② このように工期・労務数は約 30%低減できるものの、総工事費の縮減率は約 20%程度となっている。これは、経済性比較におけるレイズボーラー工法の掘削費が突出していることより、機械損料が影響を及ぼしていると考えられ、これも機械掘削の特徴といえる。
- ③ 全断面爆破掘下り工法は、仮設における機械設備費に最も費用がかかっており、立坑施工特有である櫓等の機械設備費の比重が大きいことが示されている。

表. 1 両工法の経済性比較

	レイズボーラー工法	全断面爆破掘下り工法
1. 掘削工事		
掘削工	67.9 %	38.8 %
地盤改良工	20.0 %	—
ブリ運搬費	0.6 %	2.9 %
2. 仮設工事		
仮設建物	1.3 %	11.3 %
機械基礎	1.9 %	6.5 %
機械設備	3.2 %	58.2 %
共通仮設	0.6 %	1.5 %
3. 共通費		
電力費	2.8 %	2.9 %
機械運転経費	1.5 %	1.3 %
工事費計	100.0 %	123.3 %

以上より、今回のような立坑掘削では、工期・経済性ともレイズボーラー工法の方が優れていることが分かった。レイズボーラー工法は、地表部等軟弱層を地盤改良する必要があることや、地下に横坑がないと成立しない工法という課題はあるものの、安全面についても優れており、換気立坑のように必ず横坑が構築される場合には今後とも活用される工法と考えられる。

3. 立坑急速覆工システム

従来の立坑覆工では、一次覆工としては移動式型枠もしくは、吹付けコンクリートを使用しており、また二次覆工については、連続打設工法（スリップフォーム工法）が主流となっているが、一次覆工から二次覆工への段取り替えに日数がかかり、また仮設備も櫓等の設置で大規模なものとなる。

本立坑は、上述したようにレイズボーラー工法を採用しており、掘削には従来の立坑施工に不可欠な櫓等を組む必要はない。このため、コンクリート覆工方法についても工夫をすれば、全工期にわたり櫓を組む必要が無く、軽微な設備で一次・二次覆工とも施工可能となる。

本立坑で採用した立坑用急速覆工システムを従来工法と比較した場合の利点を下記に示す。

- ① 櫓等の大規模な仮設設備が不要となる。
- ② 坑内作業足場（スcaffolding）の構造が簡易的なものとなる。
- ③ 一次覆工から二次覆工への段取替えが簡易となる。
- ④ 二次覆工時の1日当たりの施工長が長くなる。

（1）一次覆工

一次覆工は、坑壁がレイズボーラー工法で掘削を終了した時点では無支保の状態であるため、地表側から連続的に吹付けコンクリートを打設した。

吹付けの施工方法としては、スcaffolding上で手吹きとする方法や、ミニショベルのアームにノズルを搭載し、アームの旋回により吹付ける方法などが考えられる。しかし、立坑坑内という狭隘な環境下での吹付け作業は、コンクリートのリバウンドや発生する粉塵により、作業員にとって大きな苦渋作業となる。また、ミニショベルに搭載した場合には、スcaffolding上にミニショベルや湿式コンクリート吹付け機などを積載する必要がある、さらにミニショベルの動作の反力を確保する足場とする必要があるため、スcaffoldingを剛構造とする必要がある。しかし、剛構造とすることによりスcaffolding部材の大型化が避けられず、支柱の裏側等で直接吹付けの不可能な死角部分が発生する。

これより、深礎掘削における吹付けコンクリートの施工方法として開発された遠心力吹付け工法³⁾を一次覆工に採用した。この吹付け工法は、スcaffoldingから吊り下げて吹付け作業を行い、スcaffolding上からの遠隔操作が可能であり、吹付け装置自体の重量も700kgf程度と軽量である。さらに、圧縮空気を使用しないため粉塵の発生量が少ない。従って、遠心力吹付け工法の使用により以下の利点が得られる。

- ① スcaffolding下で吹付け作業を行うため、坑壁と吹付け機との間に足場等の障害物が無く、全周囲に均等な吹付けが可能となる。
- ② 作業員の作業空間にはリバウンドや粉塵が発生せず、苦渋作業から解放される。
- ③ スcaffoldingの軽量化が図れ、地上の巻上げ設備も簡素化が図れる。

図. 4 に一次覆工時のスcaffoldingを示す。

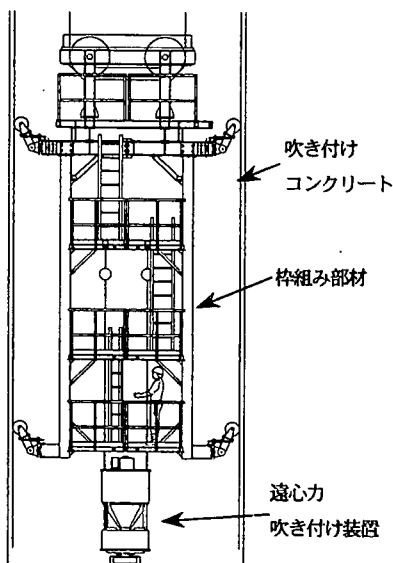


図. 4 一次覆工時のスcaffolding

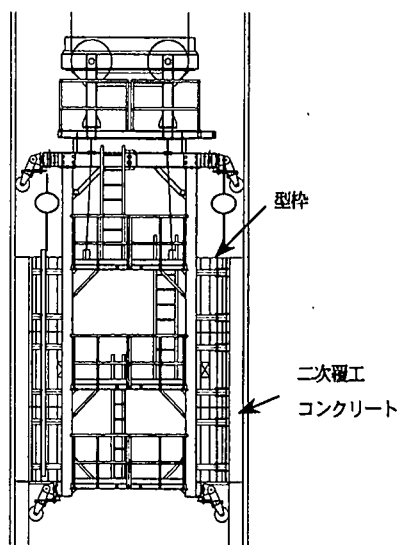


図. 5 二次覆工時のスcaffolding

吹付け方法としては、全周にわたり同時に吹付ける方法と、一方向に集中的にコンクリートを吹ける方法の選択が可能である。これより、基本的に全周吹付けとし、キープブロックの崩落など部分的に坑壁が欠損した部分には一方向吹付けを行う施工方法とした。吹付け能力は、実績として 3~4m³/h、リバウンド率は 15%であった。なお、昼間のみの施工とし、レディーミクストコンクリートを用いた。

スカフォードまでのコンクリート供給は、2.9t 吊り門型クレーンと 1m³ 積みコンクリートホッパーを用いた。また、作業員の昇降は 3 人乗りのエレベーターを使用した。

(2) 二次覆工

二次覆工の主流となっている連続打設工法は、一次覆工時の設備を撤去した後に新たな覆工設備を設置する必要があり、またコンクリートを断続的に打設するため、昼夜施工とならざるを得ない。

ここでは、一次覆工で用いるスカフォードを、二次覆工にそのまま使用し、図. 5 に示すように、スカフォードの外周に型枠を上部から吊り下げるという簡単な機構とした。このため、一次覆工が終了した段階で、立坑下部の横坑内で遠心力吹付け装置を取り外し、二次覆工用型枠を組み上げ、スカフォードから吊り下げる、といった作業のみで二次覆工が開始可能で、実施工では 3 日間で段取替えを完了し二次覆工に移ることができた。

サイクルタイムは、コンクリートの供給がクリティカルパスとなるため、深度によりコンクリート打設時間が変化するが、解体・移動に 1 時間、清掃・剥離材塗布・組立に 2 時間、深度 100m でコンクリート打設は 6 時間程度で計画し、型枠長さは 4.5m (設計打設量 25m³) とした。実施工では型枠組立時の重複部や型枠上部の余裕を除いても、1 回のコンクリート打設で平均 4.4m の打設が可能であった。これは、連続打設工法の昼夜施工で 4m/日程度の進捗に比べ、昼間施工のみで十分な施工長を確保できる結果となった。また、深度が 100m 以浅では、型枠長さを 6.0m としても十分打設が可能であった。

このため、夜間作業が不要となり、レディーミクストコンクリートで十分対応可能で、12 時間以上の養生時間を経た後に型枠を解体するため、コンクリートも十分硬化しており、コンクリート管理も容易であった。

作業人員の編成を見ても、昼間のみ 5 人の作業で施工可能であったため、従来工法に比べ大幅な省人化が図れた。

(3) 経済性の比較

以上述べたように、立坑急速覆工システムは、経済性にすぐれ、また工期短縮が図れる。ここでは、これらについて定量的な評価を行う。

図. 6 に従来工法と新工法の工程と必要労務数を比較したものを示す。

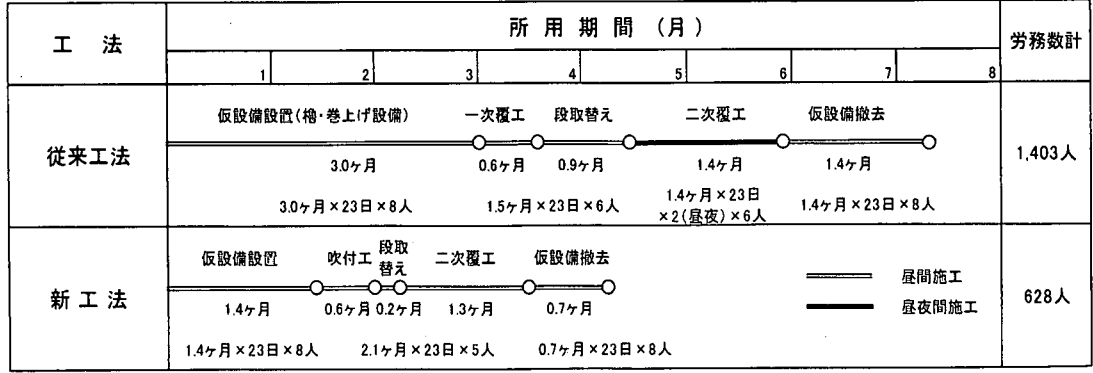


図. 6 従来工法と新工法の工程・必要労務数の比較

なお、ここでの比較はあくまで実施工に即して掘削にはレイズボーラー工法を採用したという仮定に基づいており、櫓等の構築も含まれている。表 2 に、新工法の総工事費を 100%とした場合の両者の経済性比較を示す。

これらの図・表より、以下のことが示されている。

- ① 新工法の開発により、工程で約 40%、労務数で約 55%の低減が可能となった。これは、櫓等の仮設備を省略可能となったことと、二次覆工において昼夜間作業が昼間のみ、さらにこの作業も省人化が可能となった点による。
- ② 総工事費を比較しても、新工法を採用したことにより半分以下に縮減可能となった。これは、上記した効果が大きく反映された結果と考えられる。

	新 工 法	従来工法
1. 一次覆工		
労務費	1.4 %	1.6 %
材料費	3.1 %	2.9 %
2. 二次覆工		
労務費	3.0 %	9.0 %
材料費	6.7 %	6.7 %
3. 仮設工事		
仮設建物	3.3 %	29.2 %
機械基礎	5.8 %	16.7 %
機械設備	71.8 %	150.2 %
共通仮設	1.7 %	3.8 %
4. 共通費		
電力費	2.3 %	3.8 %
機械運転経費	1.0 %	1.7 %
工事費計	100.0 %	225.5 %

表 2 新工法と従来工法の経済性比較

以上より、新工法の開発により、経済性・工期・施工時の作業環境が共に大きく改善されたことは明らかである。

4. おわりに

ここでは、換気立坑構築において掘削についてはレイズボーラー工法、覆工については急速覆工システムの開発について述べた。これらの採用・開発により、従来工法に比べ、経済性の大幅な改善、および工期短縮の実現が図れた。

今後、このような都市近郊トンネルにおける換気立坑の需要は増加するものと考えられ、その構築に際しては、これらの工法の採用が有効なものであると考えられる。

参考文献

- 1) 方山他：「径 5.1m のレイズボーラーで立坑を掘る 国道 185 号線休山換気立坑」、トンネルと地下、vol. 33、no. 4、pp. 15～22、2002.
- 2) 野村他：「大深度立坑とその周辺」、岩の力学国内ニュース、
<http://wwwsoc.nii.ac.jp/isrmjp/journal/050/003.html>
- 3) 例えば「深礎杭のモルタル吹き付けを機械化」、日経コンストラクション、11/22 号、1996.