

15. 移動式プロテクタを用いた発破による トンネル活線拡幅工法(エルトン)の施工

佐藤工業(株)：*山本 徹、今岡 彦三、
稲童丸 征巳

1. はじめに

エルトン (Enlargement of Live Line Tunnel Method) は、プロテクタを移動式とし、発破工法が可能なトンネル活線拡幅工法であり、移動式プロテクタの構造は、作業時には一車線の交互交通を確保し、休工時に脚壁が上げられ車線を増やすことが可能な構造である。活線拡幅工事は、道路構造令の一部改正によるトンネル部の幅員縮小規定の廃止や交通量の急激な増加、老朽化したトンネルのリニューアルなどに対応するものであり、本工法は、一般的に行われているプロテクタをトンネル全線にわたって設置して機械掘削工法のみによる施工等による工事中的交通への支障、施工費、工期等を大幅に改善するものである。

平成13年度に「トンネル活線拡幅工法の移動架台(プロテクタ)の開発」で、開発した移動架台(プロテクタ)を採用した場合のトンネル活線拡幅工事について、その概要と有効性について報告した。

本報では、エルトンを初めて導入した一般国道229号岩内町敷島内トンネル工事における施工を、移動式プロテクタ仕様と発破による安全管理を中心に報告するものである。

2. 工事概要

国道229号線の岩内町から寿都町方面の約10kmの区間は、この地方の基幹を成す道路である。しかし、昭和37年に竣工し近年老朽化が目立ち、またトンネル部は幅員縮小規定が適用されて狭小であることから、国土交通省北海道開発局小樽開発建設部により長大トンネルの新設および既設トンネルの拡幅工事を含む岩内道路改良事業が進められている。

敷島内トンネルは、岩内町市街から約5km地点で海岸沿いに位置し、幅員6.0mで大型車の交差が困難であり、新設トンネルによる迂回ルート設定が困難であるため、本トンネルの拡幅を行うことが計画された。しかし、敷島内トンネルは1日の交通量が比較的少ないものの近くに迂回路がなく、流通や生活の基幹を成す本路線を工事の全期間中に全面通行止めとすることはできなかった。

よって、一般の通行を確保したままの活線による拡幅工事が計画された。本工事の施工は、地山が安山岩主体の硬岩地山であり、効率的な施工を行ううえでも発破掘削の採用が不可欠であった。

工事の主要諸元を表-1に、標準断面図を図-1に示す

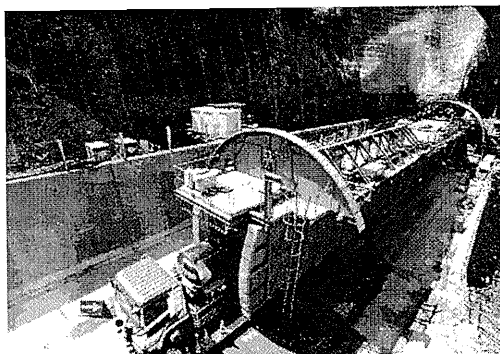


写真-1 移動式プロテクタ設置状況

表-1 主要諸元

工事名称	平成12年度施行 一般国道229号岩内町敷島内トンネル工事
発注者	国土交通省北海道開発局小樽開発建設部
工事場所	北海道岩内郡岩内町字敷島内
延長	98.5m (巻きだし含まず)
内空 断面積	既設トンネル 31.0㎡(幅員 6.0m) → 拡幅トンネル 62.9㎡(幅員 9.75m)
地質及び 強度	安山岩、一軸圧縮強度が平均 150N/mm ² 、最大 260N/mm ² の塊状部と平均 13N/mm ² の自破砕部・微風化部が混在した状態
掘削工法	発破工法

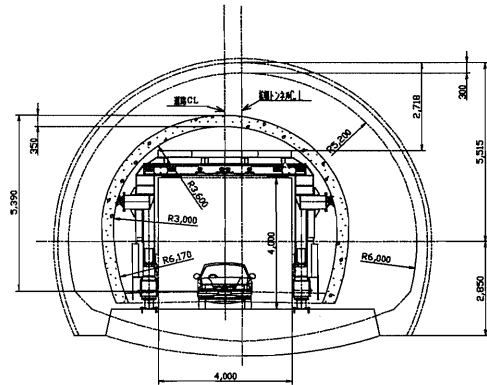


図-1 移動式プロテクタを用いた施工概要図

3. 移動式プロテクタの仕様と構造

(1) 移動式プロテクタの仕様

移動式プロテクタの主要仕様を表-2に、構造図を図-2に示す。

表-2 移動式プロテクタの主要仕様

項目	名称	規格	備考
全長		46.5m	標準 56.5m
(内訳)	前方架台	10.0m	
	中間架台	20.0m (10m×2)	標準 30m (10m×3)
	後方架台	16.5m	
有効内空幅	幅縮小時	4.0m	
	幅拡大時	7.0m	
有効内空高		4.0m	
架台外形幅	幅縮小時標準部	5.202m	
架台外形高	標準部	4.644m	
総重量		約 350t	標準 430t

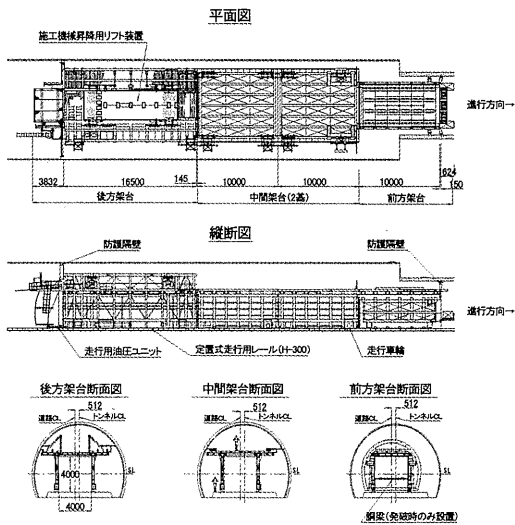


図-2 移動式プロテクタの構造図

*参考：平成13年度報告

(1) 移動式プロテクタの構造機構とその特徴

移動式プロテクタは、作業床と、この作業床の下側に設けられた脚壁とからなる。脚壁には走行装置が設けられており、レールを定置することで、トンネル縦断方向に沿ってプロテクタ全体が自由に移動可能な構造となっている。これにより、プロテクタの長さが必要最小限で済み、従来工法のように、トンネルの全線にわたって設置する必要がなくなった。さらに、発破をかける箇所が特定できるために、発破が影響する前方架台のみ強化するだけで発破工法の採用が可能となった。

移動式プロテクタは、大きく分けて前方架台・中間架台・後方架台の3つの部分より構成されており、架台の左右の脚壁は、休工事に2車線の解放が可能となるように、左右に開く構造となっている。これらの架台は互いに連結されており、標準仕様の架台数で全長55m程度、総重量が430t程度となる。

(2) エルトンの概要

エルトンの特徴を①～⑦に、適用範囲を図-3に、従来工法との比較を表-3に示す。

- ① 全長45～55m程度の短いプロテクタを移動式としたため、トンネル全長にプロテクタを設置する必要がなく長いトンネルの活線拡幅工事も効率よく施工できる。
- ② 機械掘削は勿論のこと発破掘削が可能のため、軟岩から硬岩までのあらゆる地山に対応できる。
- ③ 発破影響箇所が特定できるため一部分(前方架台のみ)を強化するだけでよく 防護プロテクタのコスト低減が図れる。
- ④ 拡幅工事は、特殊機械を必要とせず標準機械で施工できる。
- ⑤ 移動式プロテクタの脚壁が広げられるため、休工時に車線を増やす(1車線→2車線)ことが可能である。
- ⑥ 工事が一般交通へ影響しないようにするため、移動式プロテクタの最先端部と最後方部に防護隔壁を設け、作業エリアと通行エリアを完全に分離した。
- ⑦ 発破や吹き付け作業で発生する後ガスや粉塵等は、周辺環境に影響を与えないようにするため、隔離された作業エリア内に効果的に配置する集塵装置等の換気設備により除去できる。

既設・拡幅トンネルの適用範囲

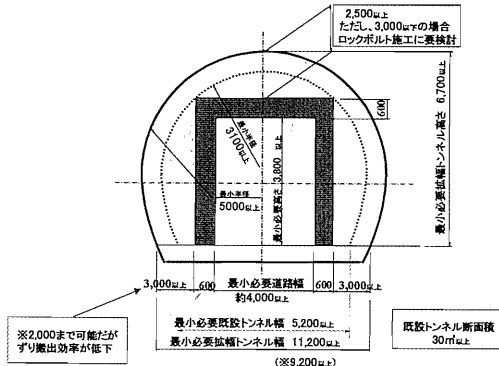


図-3 エルトンの適用範囲

4. 使用機械

各掘削サイクルにおいて使用した主要機械を施工位置別に表-4に示す。今回の拡幅では、道路中心と拡幅トンネルの中心が、海側に512mmシフトしているため、プロテクタを設置した場合、プロテクタ側壁外側部の下半海側の方が下半山側よりも施工スペースが広がる。よって、下半海側は下半山側に比べ大型の施工機械が採用できた。

表-3 従来工法との比較

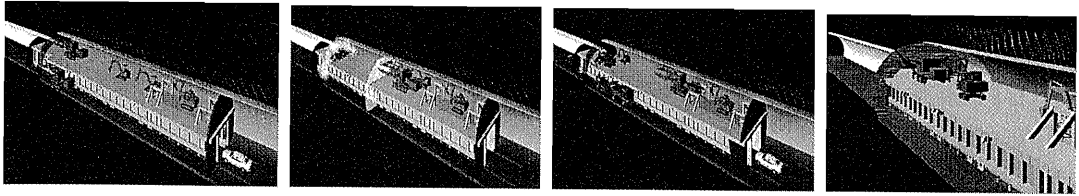
項目	従来工法	エルトン
施工延長	施工延長が短い(100m以下が多い)	中長大トンネル改築が可能
掘削方式	ほとんど機械掘削で施工されている	発破工法と機械掘削の両候補が可能
施工性	施工空間が制約されるため、機械の選定に制約を受ける。さらに、機械入れ替え等の施工性が悪い	施工空間に制約を受けないため、トンネル汎用機械が使用でき、機械の離合等、施工性がよい
覆工方式	掘削全線完了後プロテクタ撤去後の施工となる	掘削と覆工同時併進が可能(プレキャストコンクリート可)
効率性	加背分割施工(上半施工完了後下半施工)により効率性が悪い	全断面掘削・覆工併進が可能で、効率的要である
プロテクタ	固定式で全延長設置する。発破工法の場合は全線強化形にする必要がある	移動式のため全線設置する必要がない 発破工法の場合は限定強化でよい
交通規制	設置・撤去時は長期の交通止めが必要 撤去しない限り一車線規制となる	全線設置しないため交通止め期間は短い 脚壁拡張のため休工時は2車線開放が可能
坑内環境	施工箇所移動毎に隔壁・集じん装置を移動するため非効率で、一定の環境を保つのは難しい	隔壁・集じん装置とも移動式プロテクタに設置されているため、効率的で良好な環境を保てる
工費	—	従来工法に比べ約20%程度安価である
工期	非常に長い	新設トンネルとほぼ同等である

表-4 施工作业・施工位置別の主要機械一覧

施工位置	下半海側			プロテクタ上部			下半山側		
	機械名	規格	台数	機械名	規格	台数	機械名	規格	台数
掘削	ホールドドリルジャンボ	1ブーム 1バケット	1	クローラドリルジャンボ	2ブーム	1	ホールドドリルジャンボ	1ブーム	1
装薬	ホールドドリルジャンボ	1ブーム 1バケット	1	高所作業車	クローラ 9.7m	1	高所作業車	クローラ 9.7m	1
ずり出し	かき込みローダ	シャフローダ KL-20	1	ブレーカ	300kg級	1	かき込みローダ	シャフローダ KL-7	1
	ダンブトラック	4t積	2				ダンブ不整地車	クローラ 2t級	1
鋼製支保工	ブレーカ	300kg級	1				タイヤシャベル	0.4m³級	1
	クレーン付トラック	4t積	1						
吹付け コンクリート	吹付け機(湿式)	吐出量 2~2m³/hr	1	吹付ロボット	0.25m³級	1			
	急結剤供給装置		1						
	トラック	4t積	1						
ロックボルト	トラック	5.5m³	2						
	ホールドドリルジャンボ	1ブーム 1バケット	1	クローラドリルジャンボ	2ブーム	1	ホールドドリルジャンボ	1ブーム	1
	モルタルポンプ		1						
	トラック	2t積	1						

5. 拡幅掘削工事の施工手順

エルトンによる敷島内トンネルの拡幅掘削における主要作業の概要を図-4に示す。作業手順は、NATMによるトンネル掘削方法を基本としている。



(穿孔・装葉)

(発破)

(ずり出し)

(支保工)

図-4 主要作業の概要

① 削孔・装葉

削孔は、2ブームクローラドリル1台をプロテクタ上に、1ブームホイールドリル2台を山側下半、海側下半にそれぞれ配置して行った。補助ベンチ付き全断面工法により1～2m程度のミニベンチを設けながら上下半を同時に施工した。装葉は高所作業車をプロテクタ上と山側下半に配置し、海側下半は1ブームクローラドリルのバケットを使用した。

② 発破

発破時の飛び石防御のため、後退待機させた施工機械の前方には発破防護シートを設置し養生した。発破による通行規制の全面通行止めは20分間とした。第三者の有無を確認した後、胴梁台車のセット、電気雷管への結線、導通確認を行い作業員退避など周囲安全確認を行って点火した。発破後、後ガスを排除した後で、作業員退避を解除し、胴梁台車を撤去、安全を確認して一般車両の通行止めを解除した。

③ ずり出し

プロテクタ上の掘削ずりは、ブレーカで左右に振り分けた。振り分けた後、両サイドにそれぞれ配置したシャフローダとダンプトラックにより搬出した。ずり出しと同時に、油圧ブレーカで浮石の除去を行った。

④ 支保工

浮石の除去が終了した後、地山と密着するように速やかに一次吹付けコンクリートを施工した。吹付け作業は、上半部分はプロテクタ上に吹付けロボットを配置して行い、下半部分は人力による手吹きで行った。つづいて、鋼製支保工の建て込み、溶接金網取り付け、および、二次吹付けを行った。次にロックボルトの施工を行ったが、ロックボルトは必要なスペースが十分に確保できないためスリーブでジョイントする形式のツイストボルトを採用した。

⑤ 移動式架台プロテクタの移動

これら一連の作業が終了したのち、移動式プロテクタを移動して、次の掘削サイクルを行なった。移動式プロテクタの移動は、備え付けの油圧ユニットにより自走式で行えるようにした。

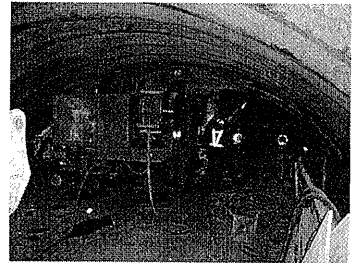


写真-2 上半削孔施工状況

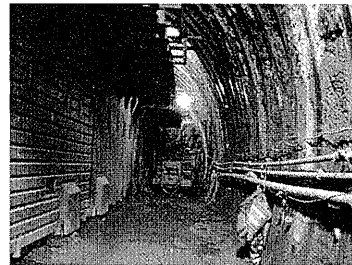


写真-3 下半(海側)削孔施工状況

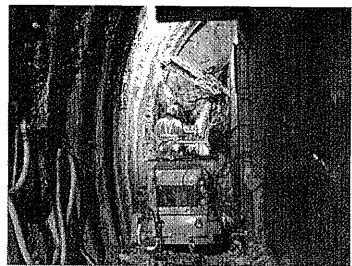


写真-4 下半(山側)削孔施工状況

6. 発破に対する安全管理

(1) 発破システム

写真-5に発破直後の切羽状況を示す。発破システムは以下の理由より、非電気式起爆システム（ノネル）による制御発破を採用した。



写真-5 発破直後の切羽状況

① 一般車両を通行させながらの装薬作業を考慮すると、漏洩電流、静電気、雷に対し不感であるノネルは安全である。

② 約450m離れたの民家と既設覆工コンクリートへの発破振動の影響を考慮して、一段あたりの斎発爆薬量を3kg以下に抑える。

③ 発破時の岩塊がプロテクタに衝突する瞬間に発生する応力は、既往の換算式りに基づくと極めて大きくなり、プロテクタ自体が非常に強固で巨大なものとなる。そこで、岩塊を小さくし（直径40cm程度）、かつ、時間的に分散して衝突するようにして、プロテクタへの負担を可能な限り小さくするため、削孔数を3.4~3.8孔/m²程度と多くし段数も0~60段までに増やす。

(2) 発破振動が既設覆工に与える影響

発破時は全面交通止めを行い、第三者への安全は確実に確保して行われるものの、発破振動が、既設の覆工コンクリートに影響し、切羽前方の未拡幅部分の既設覆工が崩落することなどが懸念された。そこで、発破掘削の初期段階で、測定結果を表-5に示す振動速度測定を行った。

一段あたりの最大薬量は0.6~2.2kgの範囲にあり、一段あたりの計画斎発爆薬量である3.0kgとした結果ではないが、振動速度は、切羽から7.5m~12.5mとした測点Aで最大3.55cm/sec(3.55kine:以降kine表示とする。)程度であり、そこから5mおよび10m離れた測点B、測点Cでは、すべての方向で1kine以下と小さい値であった。

測定結果をもとに、前方架台の既設トンネルへの挿入長さである切羽から5m地点での発破振動の既設覆工への影響を振動速度により評価することにし、一段あたりの爆薬量を3kgとしたときの振動速度を、式1²⁾に示した振動速度予測式に基づいた伝播係数K値の最大値を用いて算出(表-6)した。

表-5 発破振動速度測定結果

回数	薬量(kg)	項目	測点A			測点B			測点C		
			V	L	T	V	L	T	V	L	T
1	0.6	切羽距離	10.5(m)			15.5(m)			20.5(m)		
		方向*	V	L	T	V	L	T	V	L	T
		振動速度(cm/sec)	0.30	0.10	0.20	0.16	0.12	0.30	0.07	0.10	-
2	1.0	切羽距離	7.5(m)			12.5(m)			17.5(m)		
		方向*	V	L	T	V	L	T	V	L	T
		振動速度(cm/sec)	3.55	1.43	0.70	-	-	-	0.13	0.18	-
3	2.0	切羽距離	10.5(m)			15.5(m)			20.5(m)		
		方向*	V	L	T	V	L	T	V	L	T
		振動速度(cm/sec)	1.13	0.78	2.33	0.85	0.38	0.56	0.35	0.20	-
4	2.2	切羽距離	12.5(m)			17.5(m)			22.5(m)		
		方向*	V	L	T	V	L	T	V	L	T
		振動速度(cm/sec)	1.13	0.88	2.18	0.45	0.40	0.75	0.25	0.13	-

*V:上下方向 L:掘削点と受爆点とを結ぶ方向 T:掘削点と受爆点とを結ぶ方向と直角方向

$$v = K \cdot \frac{W^n}{r^m} \quad (1)$$

ここで、

v:振動加速度値 (cm/sec)

W:装薬量 (kg)

r:距離 (m)

K:伝播係数

m, n:係数、m=2/3, n=2とした

表-6 K値と爆薬量3.0kg切羽から5m地点の換算振動速度算出結果

回数	項目	測点A			測点B			測点C		
		V	L	T	V	L	T	V	L	T
1	方向	V	L	T	V	L	T	V	L	T
	K値	46	15	31	54	41	101	41	59	-
	振動速度 cm/sec	3.9	1.3	2.6	4.5	3.4	8.4	3.4	4.9	-
2	方向	V	L	T	V	L	T	V	L	T
	K値	200	80	39	-	-	-	40	55	-
	振動速度 cm/sec	16.6	6.7	3.3	-	-	-	3.3	4.6	-
3	方向	V	L	T	V	L	T	V	L	T
	K値	78	54	162	98	98	65	93	53	-
	振動速度 cm/sec	6.5	4.5	13.5	8.2	4.8	7.1	7.7	4.4	-
4	方向	V	L	T	V	L	T	V	L	T
	K値	104	81	201	81	72	136	75	39	-
	振動速度 cm/sec	8.7	6.8	16.8	6.8	6.0	11.3	6.2	3.2	-

伝播係数K値は、201～31(平均71)であり、これまでの実績³⁾による坑道掘進のK値の範囲200～700程度と比較してかなり小さい方の値であった。これは、今回、既設のトンネルを拡幅するための発破であるため、発破振動に影響を与える芯抜き発破がなく、払い発破中心の発破パターンであったことが理由と考えられる。

K値の最大値はK=201で、爆薬量3.0kg、切羽から5m地点の振動速度は最大16.8kineとなった。これは、山陽新幹線建設時に導坑仮巻きコンクリートで行った実験での、ヘアクラックの入り始める振動値が33.8kineであったことと比較しても1/2程度と小さい値であった。

さらに、掘削に先だって背面注入工および補強ロックボルト工により既設覆工の事前補強を行っている。

以上のことから、切羽から5m以降では、発破振動により有害なクラックが発生して崩落にいたる可能性はほとんどないと考えられた。

(3) 簡易プロテクタの設置

既設の覆工コンクリート補強対策工および振動計測結果から、切羽5m以降の範囲においても大規模な崩落は想定しにくいと判断したが潜在ひび割れ等による小規模な剥離が懸念されたため、今回、特に安全を重視した対策として、移動式プロテクタ前方架台の進行方向側の全区間にコンクリート塊の大きさが10cm～20cm程度の小規模な崩落にも耐え得る程度の簡易プロテクタを配置した。

「覆工に落下の可能性のあるクラックがある場合や止水用の薄いモルタル等がある場合」の近接施工における振動の規制値として、既設トンネル近接施工対策マニュアル⁴⁾では2kineとしていることから、それ以下となる範囲においては安全であるといえる。

安全を考慮して、振動の規制値を1kineと前記マニュアルより小さくしたとしても、今回の測定実績では、爆薬量を最大3.0kgとした場合に振動速度が1kineとなるのは切羽より20m地点であり、敷島内トンネルの場合、コンクリートの剥離等の小規模な落下まで含めた発破振動に対する対策は、切羽より20m以内の範囲で十分安全であったと思われる。

7. 工事実績

本工事の場所が観光地でもあり、昼間は発破作業を行わず、夜間通行量が減少した中で1日当たり1回のみ発破作業を行なった。1日当りの進行は1.0～1.2mで、約5ヶ月間で掘削を終了した。100回近い発破に対しても移動式プロテクタ(ステージ)に損傷は見あたらず、発破振動による有害な崩落も生じなかった。なお、プロテクタ脚壁を上げての2車線開放は行わなかった。

8. おわりに

交通を確保しながら発破工法によるトンネル拡幅工事を行うことのできるこのエルトン、安全でかつ経済的な工法であり、今後も数多くのトンネルで広く採用されることを期待している。

また、最近、古いトンネルの覆工の一部が剥落する事故が続発しているが、その対応策の1つとして部分的な縫い返し工事にも適用できると考えている。

<参考文献>

- 1) (社)日本道路協会：落石対策便覧，2000.6，p20-24
- 2) スティング・オロフソン：最新発破技術ハンドブック，1992.10，p195
- 3) (社)日本トンネル技術協会：トンネル爆破技術指針，1982.2，p142
- 4) (財)鉄道総合技術研究所：既設トンネル近接施工マニュアル，1996.9，p22