

発破によるトンネルの活線拡幅工事用移動式プロテクタの 開発と国道 229 号敷島内トンネルへの適用

Development of Traveling Protector for Enlargement of Live Line Tunnel by Drilling and Blasting, and Application to Shikishimanai Tunnel Project (Route 229)

今岡彦三¹⁾・山本 徹²⁾・根岸秀樹³⁾・稲童丸征巳⁴⁾・林 忠男⁵⁾

Hikozou IMAOKA, Toru YAMAMOTO, Hideki NEGISHI, Masami INADOUMARU and Tadao HAYASHI

Technological development for the enlargement of existing tunnels is increasingly required to cope with problems related to traffic congestion, partial amendments of the Japanese ordinance of the public road structures and out-sizing of freight vehicles. There are cases, when the tunnel traffic must be maintained through existing tunnels during their reconstruction due to non-availability of detours, even for widening hard rock tunnels. Then, excavation by drill and blast is desired for widening such tunnels. Enlargement of live line tunnel method (ELLTM for short) is a tunneling method that adopts a traveling protector (staging) which can endure the impact by drilling and blasting. By the ELLTM, reduction of construction cost and time can be achieved. It is applicable to various geology and tunnel lengths. This paper reports on outlines of the ELLTM and the Shikishimanai tunnel project which used the ELLTM.

Key Words: enlargement of live line tunnel, drilling and blasting

1. はじめに

近年、車両の大型化への対応、交通量の急激な増加による交通渋滞解消や老朽化したトンネルの改良・安全性の向上といった観点から、既設トンネルの拡大・拡幅を効率的に行える施工技術が求められてきている。また、トンネルの拡幅工事は、新設トンネルを施工するよりも、自然環境への影響や新たな用地買収が最小限で済み、環境に対してもやさしい工法として注目されている。

これまでの一般的なトンネル活線拡幅工事では、一般交通用の空間を確保するための門型プロテクタをトンネル全線にわたって設置し、機械掘削工法または硬岩部における割岩工法で行われてきた。しかし、この工法は、効率性や経済性の面から問題点が多く、今後、ますますリニューアルに対するニーズが増大するなかで、早急な対応が求められている。

本稿では、発破によるトンネル活線拡幅工事の一層の合理化を目指して開発した、移動式の防護プロテクタを用いたトンネル活線拡幅工法であるエルトン (Enlargement of Live Line Tunnel Method) で施工した一般国道 229 号敷島内トンネルの施工について報告する。

-
- 1) 正会員 佐藤工業株式会社 土木本部 技術部門
 - 2) 正会員 佐藤工業株式会社 札幌支店 敷島内作業所
 - 3) 佐藤工業株式会社 札幌支店 敷島内作業所
 - 4) 佐藤工業株式会社 札幌支店 敷島内作業所
 - 5) 佐藤工業株式会社 土木本部 技術部門

2. 工事概要

敷島内トンネル工事は北海道岩内郡岩内町市街から約5km地点に位置し、雷電国道開通の昭和37年に竣工した大型車の交錯が困難な既設トンネル(内空断面積 31.0m^2 、トンネル幅員 6.0m)を新設トンネル(内空断面積 62.9m^2 、トンネル幅員 9.75m)に拡幅するものである。

本路線は海岸線の急崖斜面と狭小トンネルが連続する地域に位置することから迂回路もなく、流通や生活の基幹をなす路線であり、全面通行止めによる工事ができなかったため、一般車両の通行を確保した活線拡幅工事として施工した。図-1に拡幅標準断面図を写真-1に敷島内トンネル起点側拡幅部坑口の写真を示す。

掘削地点の地山は安山岩を主体としており、一軸圧縮強度が平均 $150\text{N}/\text{mm}^2$ 、最大 $260\text{N}/\text{mm}^2$ 程度にもおよぶ塊状部と平均 $13\text{N}/\text{mm}^2$ 程度の自破碎部・微風化部が混在している。よって、拡幅掘削延長 98.5m の内、両坑口の2～3m区間を除いて発破工法により施工した。

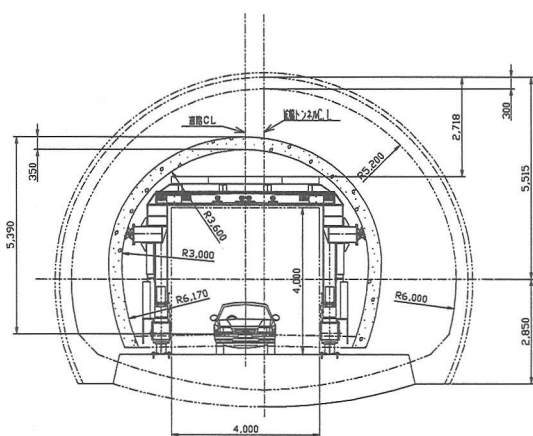


図-1 拡幅標準断面図

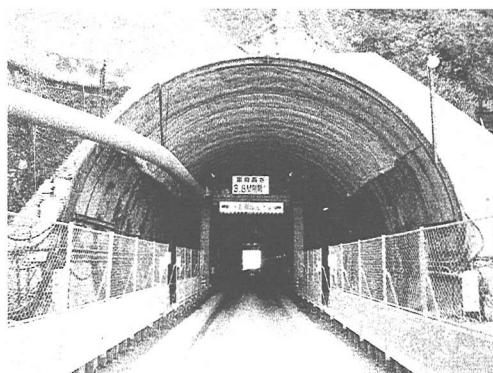


写真-1 トンネル起点側拡幅部坑口

3. 事前工事

トンネル拡幅掘削工事の準備工事として、明り部において、坑口部の切土工、法面工、坑口巻出し部の撤去工を施工した。起点側坑口巻出し部は延長 35m の明り巻きコンクリート部であり、大型ブレーカによる撤去となることから後述する移動式プロテクタ(前方架台と中間架台1基)を設置(夜間全面通行止め $22:00\sim 5:00$)し、一般車両の一車線交互通行により施工した。(写真-2)トンネル内においては、盤下げ工、仮舗装工、支障物移設等の拡幅掘削へ向けての準備工を行った。

また、トンネル覆工および背面空洞の現況を把握するため電磁波レーダー調査および打音調査を行った。この調査結果から、事前補強の必要性を再確認し、トンネル補強工として裏込め注入工(エアミルク)および補強ロックボルト工(FRPボルト $L=3.0\text{m}$)を実施した。



写真-2 起点側坑口巻出し部撤去状況

4. 移動式プロテクタの構造および特徴

写真－3に移動式プロテクタの全景を示し、図－2にその構造図を示す。

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すみ、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、全長46.5m、総重量約350tである。

また、図－3に示すようにプロテクタ左右の脚壁は、作業休止時に2車線の解放が可能のように、左右に開く構造となっている。

(1) 前方架台

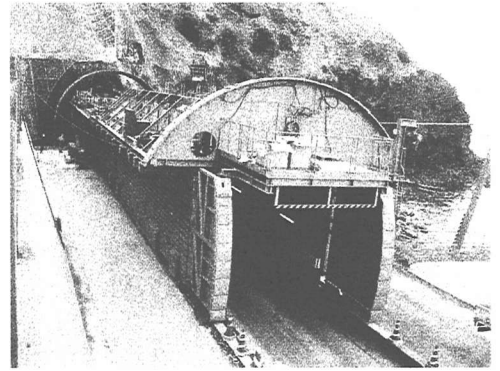
前方架台は、全長10mであり、門型構造となっている。この部分を既設トンネル内に挿入した状態で掘削を行うため、切羽は常に前方架台直上に位置することとなる。よって、発破工法を採用した場合にも、発破による影響範囲は、常に前方架台部分に特定できるために、この前方架台のみは、発破による衝撃荷重にも耐え得るように設計している。

(2) 中間架台

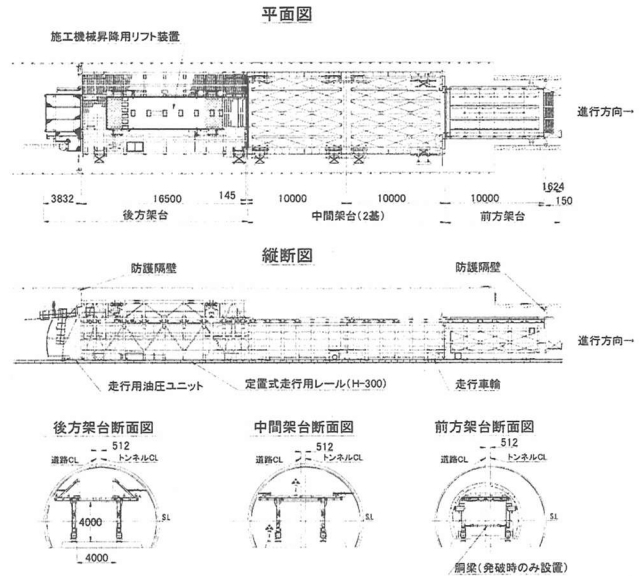
中間架台は、1基当りの長さは、前方架台と同様に10mである。π型構造となっており、この部分が汎用の施工機械による作業床となる。中間架台の数は、施工機械の規模や台数によっても異なるが、標準タイプは3基となっている。

(3) 後方架台

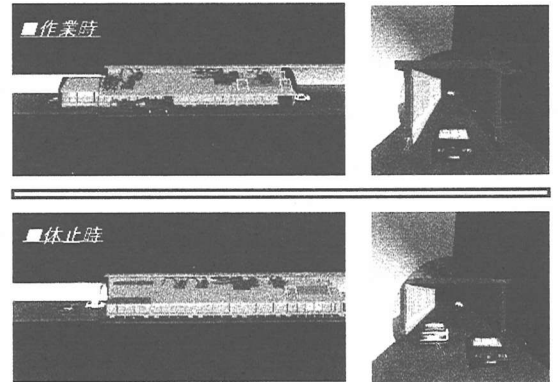
後方架台は、全長16.5mであり、基本的な構造形式は中間架台と同じであるが、施工機械や資機材の搬入をおこなうリフトを装備しているのが特徴である。



写真－3 移動式プロテクタ



図－2 移動式プロテクタ構造図



図－3 作業休止時の2車線確保

5. 拡幅掘削

発破時間が制約されているため、標準的な施工サイクルは図-5に示すようにプロテクタ移動～切羽穿孔までを昼間施工、装薬～吹付コンクリートまでを夜間施工とした。

図-4に支保パターン図を、表-1に各サイクルにおける使用機械を示す。また、図-6に主要作業のイメージ図を示す。

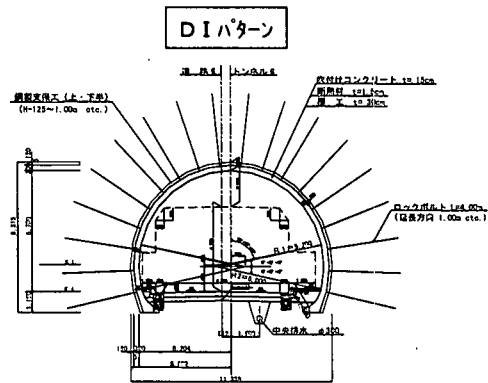


図-4 支保パターン図

(1) 削孔・装薬

削孔は、2ブームクローラジャンボ1台をプロテクタ上部に、1ブームホイールジャンボ2台を両側下半にそれぞれ配置した。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。装薬は高所作業車およびジャンボのバケットを使用した。

(2) 発破

発破時は飛石防止のため、プロテクタ後部の防護隔壁扉を開け、退避させた施工機械の前方には発破防護シートを設置した。発破による全面通行止めは20分間とし、十分な換気と切羽および坑内の安全点検を行った後に交通開放を行った。

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。

- ①一般車両を通行させながらの装薬作業であるため、漏洩電流、静電気、雷に対して不感である非電気式の導火管付き雷管を使用し第三者に対する安全を確保する。
- ②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爆薬量を減らし、段数を多くすることにより、発破振動の軽減を図る。
- ③ざり形状を極力小さくし（直径40cm程度）、時間的に分散してプロテクタに衝突するようにすることでプロテクタの設計荷重を低減させる。

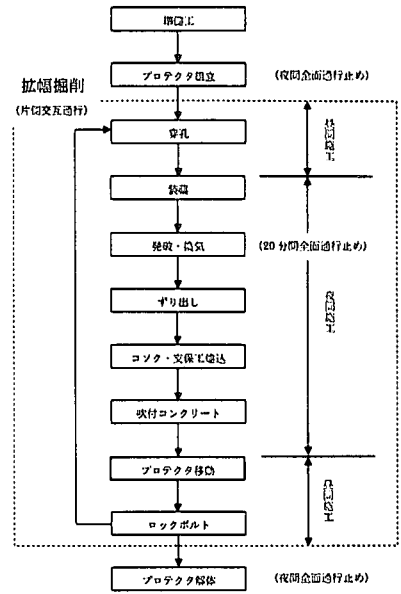


図-5 拡幅施工フロー

表-1 各サイクルにおける主要機械配置一覧表

施工位置	下半掘削			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
削孔	ホイール式ドリルジャンボ	1ブーム 1バケット	1	クローラ式ドリルジャンボ	2ブーム	1	ホイール式ドリルジャンボ	1ブーム	1
装薬	ホイール式ドリルジャンボ	1ブーム 1バケット	1	高所作業車	クローラ式 9.7m	1	高所作業車	クローラ式 9.7m	1
ざり出し	かき込みローダ	シャフローダ KL-20	1	ブレーカ	0.2m ³ 級	1	かき込みローダ	シャフローダ KL-7	1
	ダンプトラック	4t 積	2				不整地運搬車	クローラ式 2t 級	1
	ブレーカ	0.2m ³ 級	1				タイヤシロベル	0.4m ³ 級	1
鋼製支保工	クレーン付トラック	4t 積	1						
吹付けコンクリート	吹付機(固定)	空気搬送式 吐出量 2～12m ³ /hr	1	吹付ロボット	0.25m ³ 級	1			
	急降下供給装置		1						
	トラック	4t 積	1						
ロックボルト	トラックミキサ	4.5m ³	2						
	ホイール式ドリルジャンボ	1ブーム 1バケット	1	クローラ式ドリルジャンボ	2ブーム	1	ホイール式ドリルジャンボ	1ブーム	1
	モルタルポンプ		1						
	トラック	2t 積	1						

写真－４に発破直後の切羽状況を示す。

(３) ずり出し

プロテクタ上の掘削ずりは、油圧ブレーカでコソクを行いながら左右の下半盤へ掻き落とす。左右の下半盤では、掻き落としたずりをシャフローダとダンプトラックおよび不整地運搬車により搬出した。

(４) 支保作業

吹付け作業は、上半部分はプロテクタ上部の吹付けロボットを使用し、下半部分は手吹きで行った。

ロックボルト工は作業スペースが狭いため、継ぎノミによる穿孔を行い、継ぎボルト ($L=1.0\text{m}+2.0\text{m}$ または $L=2.0\text{m}+2.0\text{m}$) で施工した。また、孔壁が自立しないような地質箇所および作業スペースが特に狭い山側については安全を考慮して自穿孔ボルトを採用した。

６．発破振動が既設覆工に与える影響

既設覆工コンクリートにどの程度の発破振動が発生するかを確認する目的で、発破掘削の初期段階で振動速度測定を行った。測定箇所は切羽から 7.5～12.5m 離れた測点 A、測点 A から 5m 離れた測点 B、さらに測点 B から 5m 離れた測点 C の 3 点とした。

測定結果を表－２に示す。実際に使用した一段当りの最大斉発量は 0.6～2.2kg の範囲であったため、計画最大斉発量 (3.0kg) に満たない薬量であったが、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(kine)、そこから 5m および 10m 離れた測点 B、測点 C では、1cm/sec(kine)以下と小さい値であった。

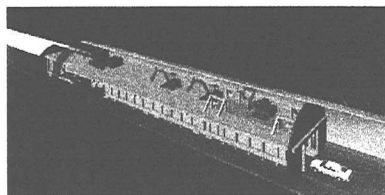
この測定結果をもとに、前方架台の既設トンネルへの挿入長さである切羽から 5m 地点での発破振動の既設覆工への影響を評価した。式 (1) ¹⁾ に示した振動速度予測式に基づいて伝播係数 K 値を求め、さらに、求めた K 値を用いて、一段当りの最大斉発量を 3.0kg としたときの振動速度を算出した。

その結果、伝播係数 K 値は、31～201 (平均 71) となり、これまでの実績 ¹⁾ による坑道掘削の K 値の範囲 200～700 程度と比較して小さい値となった。これは、発破振動の大きくな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。

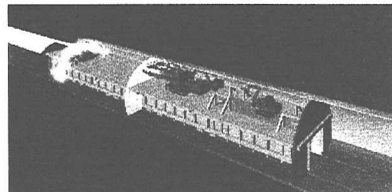
K 値の最大値は $K=201$ であり、式 (1) を用いて計画最大斉発量 3.0kg、切羽から 5m 地点の振動速度算出すると最大 16.8cm/sec(kine) となった。これは、山陽新幹線建設時に導坑仮巻きコンクリートで行った実験での、ヘアクラックの入り始める振動値が 33.8kine であったことと比較しても 1/2 程度と小さい値であった。

以上の結果から前方架台で保護されていない、切羽より 5m 以上離れている既設覆工コンクリートにおいて発破

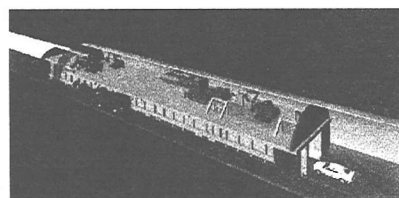
【削孔・装薬作業】



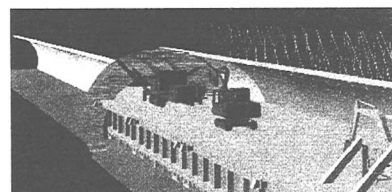
【発破作業】



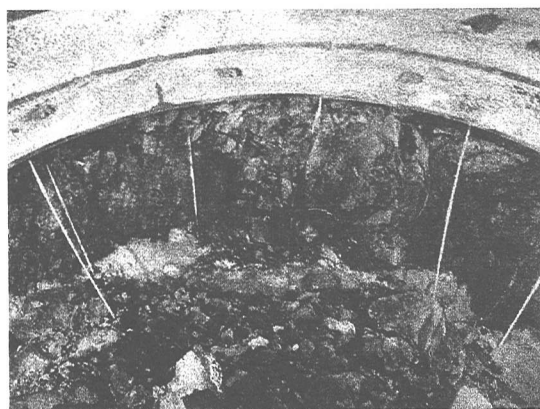
【ずり出し作業】



【支保作業】



図－６ 主要作業イメージ図



写真－４ 発破の切羽状況

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た。

7. 簡易プロテクタの設置

既設の覆工コンクリートは、拡幅掘削に先だって行った覆工調査の結果より、裏込め注工を実施し地山と既設覆工コンクリートの空隙を充填するとともに、縦横断方向に1mピッチでファイバーボルトによる補強ロックボルト工を実施している。さらに、振動計測結果より切羽から5m以上離れた範囲においても、大規模な崩落は想定しにくい。しかし、潜在ひび割れ等

による小規模な剥離が懸念されたため、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を10cm～20cm程度の小規模な崩落を想定した簡易プロテクタを配置した。

しかし、既設トンネル近接施工対策マニュアル²⁾において、「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2cm/sec(2kine)としていることから、それ以下となる範囲においてはこの基準においては安全であるといえる。

今回の測定は切羽から20mの範囲内で行っているが、切羽から15m～20m離れた箇所における振動速度は1cm/sec(1kine)未満である。したがって、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(簡易プロテクタの設置)は、切羽より20mの範囲でも十分安全であったと考えられる。

8. おわりに

本工事の場所は観光地で、昼間時の発破規制があり、発破作業は夜間、1日当たり1発破のみ行なった。1日当りの進行は支保パターンにより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に目立った損傷はなく、発破振動による既設覆工コンクリートの有害な影響を与えなかった。

一般通行に対する影響を少なくし、トンネルの発破による拡幅掘削を活線下で無事実施できたことは、開発したエルトンの有効性を十分に実証できたといえる。

今あるものを有効に再利用する。さらに、修復期間中もその機能を停止しない。このことは、これからの時代に求められる最大のニーズである。交通を確保しながらトンネル拡幅を行うことのできるこの拡幅工法は、まさにこれを実現する有力な工法の1つであり、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。

参考文献

- 1) (社) 日本トンネル技術協会：トンネル爆破技術指針，1982. 2，P142～P143
- 2) (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

表-2 発破振動速度測定結果

回数	重量(kg)	項目	測点A			測点B			測点C		
1	0.6	切羽からの距離(m)	10.5			15.5			20.5		
		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	切羽からの距離(m)	7.5			12.5			17.5		
		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	切羽からの距離(m)	10.5			15.5			20.5		
		方向*	V	L	T	V	L	T	V	L	T
		振動速度(cm/sec)	1.13	0.78	2.33	0.65	0.38	0.98	0.35	0.20	-
4	2.2	切羽からの距離(m)	12.5			17.5			22.5		
		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:発振点と受振点とを結ぶ方向 T:発振点と受振点とを結ぶ方向と直角方向

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

ここで、

v:振動速度値(cm/sec)

W:装薬量(kg)

r:距離(m)

K:伝播係数

m,n:係数,m=2,n=2/3とした