

山岳トンネルにおける 「移動式発破防護バルーン」の開発と適用

三井 善孝¹・山本 悟²・塚田 純一³・小林 雅彦⁴

¹正会員 西松建設株式会社 技術研究所 (〒105-0004 東京都港区新橋六丁目17番21号)

E-mail:yoshitaka_mitsui@nishimatsu.co.jp

²正会員 西松建設株式会社 技術研究所 (〒105-0004 東京都港区新橋六丁目17番21号)

E-mail:satoru_yamamoto@nishimatsu.co.jp

³ジオマシンエンジニアリング株式会社 (〒116-0001 東京都荒川区町屋1-19-1-904)

E-mail:junichi_tsukada@geomachine.co.jp

⁴正会員 株式会社東宏 (〒007-0829 北海道札幌市東区東雁来9条3丁目2番3号)

E-mail:kobayashi@k-toukou.co.jp

近年の長距離山岳トンネルでは、高速施工を目的に連続ベルトコンベヤシステムを採用してずり搬出を行う事例が多くなってきているが、発破掘削の場合には、飛石による損傷を避けるため、坑内設備を切羽から十分に離して設置しなければならず、ずり搬出時間の短縮効果を発揮しきれていなかった。そこで、トンネル断面を塞いで発破による飛石を受け止めることで、坑内設備の損傷を防ぎつつ退避距離を短縮することができる「移動式発破防護バルーン」を開発した。当社施工中の山岳トンネル現場へ適用した結果、クラッシャへのずり投入時の待ち時間が生じない程度に切羽とクラッシャの距離を狭めることで、ずり搬出時間を短縮できることが明らかになり、本装置が山岳トンネル施工の生産性向上に寄与できることが確認された。

Key Words : rock tunnel, protection of equipments, mucking, rapid construction

1. はじめに

近年では、新幹線トンネルを始めとした長距離山岳トンネルの工事が多くなってきており、また、工期の都合上、高速施工に関する取り組みが求められる場合も増えてきている。一般的な山岳トンネルの掘削サイクルをみると、その3割程度をずり搬出が占めており¹⁾²⁾、高速施工を実現するためには、ずり搬出時間を短縮することが重要であるといえる。そのため、長距離山岳トンネルでは、高速掘進による生産性向上を主な目的として、連続ベルトコンベヤシステムによるずり搬出方式を採用する事例が多くなってきている。例えば、小早川³⁾は、長大トンネルに対して連続ベルトコンベヤシステムを導入することで、ずり搬出時間が30分程度短縮されたことを報告している。高橋⁴⁾は、ベルトコンベヤシステムを採用した場合、タイヤ方式の積算と比較して、ずり搬送処理能力が1.7倍となるとともに、CO₂排出量や地球環境負荷が低減されることを確認している。吉富⁵⁾は、1箇所

の両方を導入して比較を行った。その結果、ベルトコンベヤ方式では、メインドライブやクラッシャの付近で騒音対策が要されるものの、粉塵濃度や月当たりの掘進長が改善されることを明らかにした。

連続ベルトコンベヤシステムを導入することにより高速施工を始めとした様々な効果が期待されるものの、発破掘削の場合には、飛石の衝突による損傷を防ぐため、坑内設備を切羽から十分に（例えば、60m程度以上）離して設置することが一般的である。そのため、切羽から連続ベルトコンベヤシステムの先端設備であるクラッシャまでの一次ずり運搬距離が長くなってしまうことが原因で、ずり搬出時間の短縮効果を活かしきれていない（図-1）。

このような背景から、筆者らは、切羽近傍にて発破時の飛石を受け止めることで、坑内設備の退避距離を短縮し、ずり搬出に掛かる時間を削減することが可能な「移動式発破防護バルーン」を開発した（図-2）。さらに、本装置を施工中の複数の山岳トンネルへ導入し、その効果について検証した。



図-1 従来の坑内設備の配置例

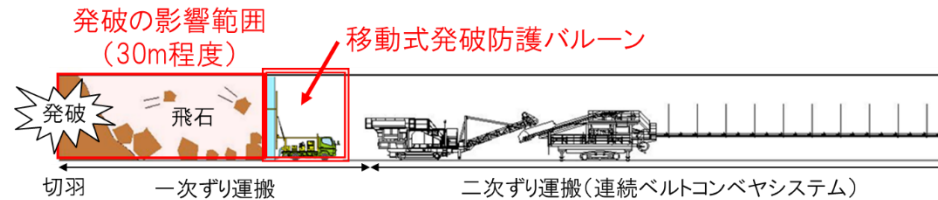


図-2 移動式発破防護バルーン使用時の坑内設備の配置例



図-3 移動式発破防護バルーンの外観

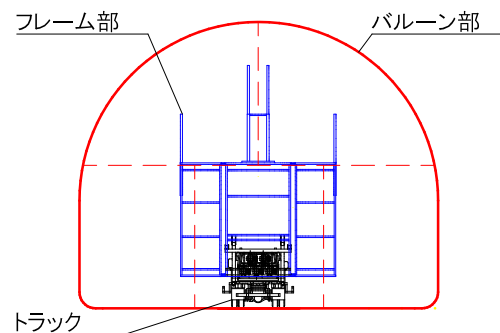


図-4 移動式発破防護バルーンの模式図

2. 装置の概要

(1) 全体構成

開発した装置の外観を図-3に、模式図を図-4に示す。本装置は、発破による飛石や粉塵等を受け止めて坑内設備を防護するための「バルーン部」と、バルーン部を支持するための「フレーム部」により構成される。これらの装置はトラックに搭載されており、任意の位置で使用することや、迅速な設置・撤去が可能となっている。そのため、発破前には切羽の進行に合わせた適切な位置（切羽から20～30m程度）にて装置を展開し、発破後には装置を迅速に収納してずり搬出作業に移行することが可能である。本装置は切羽近傍で毎回の発破に使用されるため、次節以降で述べるような工夫を各構成装置に施すことで、発破の衝撃に耐えることや迅速に設置・撤去することを可能としている。

(2) バルーン部

バルーン部は、トンネル断面を完全に塞いで飛石を受け止めることが出来るよう、適用現場のトンネル形状に合わせて作製することとした。径はトンネルよりも30cm程度大きく、壁面との隙間を確実に埋めることで、坑口側への飛石の散乱を抑制できるようにした。厚さは

1.2m程度であり、バルーンと壁面の摩擦力を利用することで、爆風の衝撃によるバルーンのめくれを防ぐようにした。

バルーン部は、独立した5つの小さいバルーンを紐で結び合わせることで構成されている。これは、飛石の衝突等によってバルーンが損傷した場合に、影響範囲を限定させることや、部分的な修理・交換を可能とするためである。

各々のバルーンは、内袋にアラミドシートと防爆シートを被せた三層構造とした（図-5）。内袋は、細かく編み込まれたナイロン製のシートで作製されており、内部に空気を入れて膨らませることができるが、飛石の衝突によって容易に破れることが予想された。そのため、耐切創性の高いアラミドシートとポリエステル製の防爆シートを外側に被せて飛石の衝撃を緩和することで、内袋の破れによる空気漏れを防ぐこととした。ただし、飛石は坑口側には衝突しないため、アラミドシートを切羽側と壁面側のみに配置することで、軽量化と低コスト化を図った。また、切羽側の下側には飛石が集中的に衝突することが考えられたため、防爆シートを二重に取り付けた。

外側に位置する防爆シートに飛石が直接衝突するため、最も損傷が著しくなると考えられる。損傷が軽微な場合

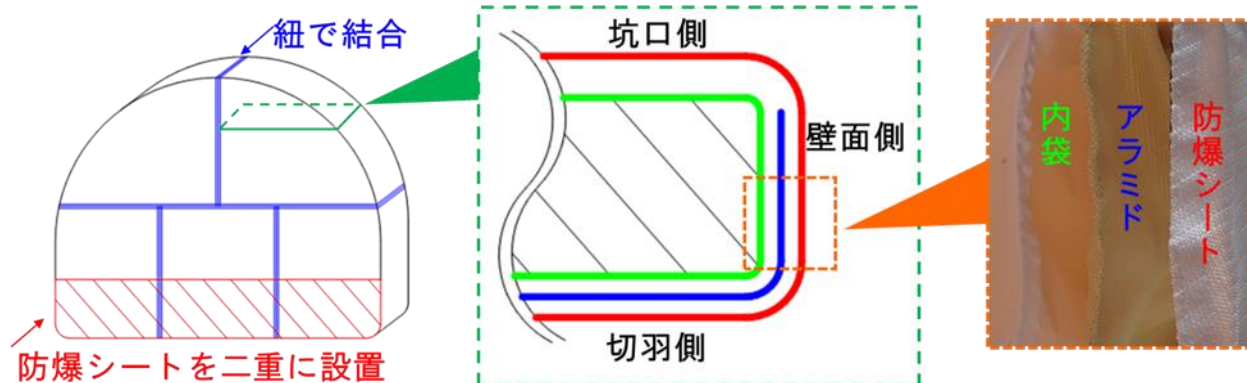


図-5 バルーン部の構造



図-6 縫合による防爆シートの補修の跡



図-7 送風機

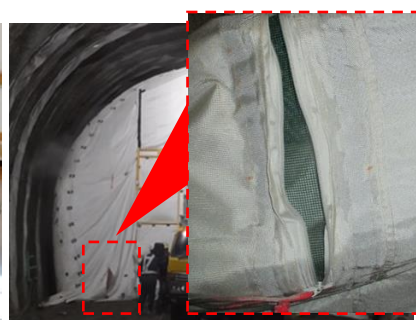


図-8 排気用のファスナー

には、補修用シートの貼付や縫合により、穴やほつれ箇所を補強することとした（図-6）。このような補強を行っても使用が困難な程度に損傷が著しい場合には、防爆シートのみを新品と交換することが可能な構造とした。

バルーン部を展開する際には、フレーム部を展開してバルーン部を上げながら、送風機で内袋へ空気を送る（図-7）。送風機を5台搭載し、各々のバルーンに1台ずつ接続した。また、送風機はインバータ制御式のものをを用い、送風量の調節を可能とした。一方、発破後にバルーンを収納する際には、送風機を止めるとともに、内袋に複数配置された長さ1m程度のファスナーを開放して排気を行うことで、迅速な収納を可能とした（図-8）。

(3) フレーム部

バルーンを展開する方法として、開発当初はバルーンを単体で用いる方式や吊り下げる方式も検討したが、作業時間の短縮やバルーン部の姿勢の安定性を考慮して、バルーンを格子状のフレームで面的に支持する方式を採用した（図-9）。ただし、大きいフレームが直立したままでは、トラックの走行に支障を及ぼす恐れがある。そのため、油圧シリンダーを用いてフレーム部を図-10のように小さく折りたたむ機構とした。それと同時に、フレーム部やトラックに発破の衝撃が加わることも懸念されたため、フレームと油圧シリンダーの接続部にスプリングを設置して、ダンパー機構を持たせることで、振動の軽減を図った（図-11）。

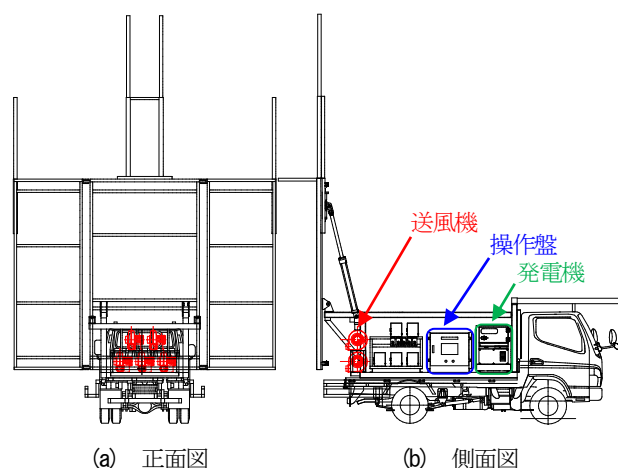


図-9 フレーム部の模式図（展開時）

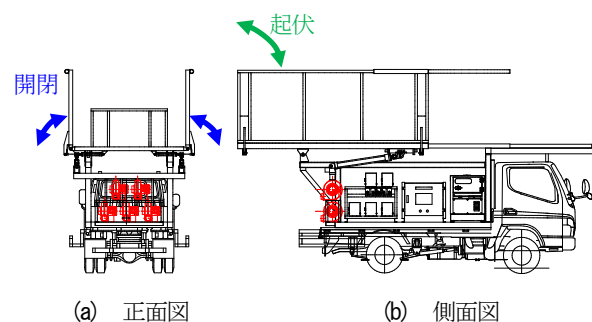


図-10 フレーム部の模式図（収納時）

(4) その他の構成装置

泥濘化等によって路盤が不安定な場合には、トラックが傾くことでバルーンがトンネル断面を完全に塞ぐことができず、飛石が坑口側へ飛び出すことが懸念される。そのため、フレーム部直下にアウトリガーを設置して、トラックの傾きを調整できるようにした（図-12）。

上述の送風機、油圧シリンダー、アウトリガーは、基本的にはトラックに搭載した発電機（3 相，200V，15KVA）を電源として作動する。発電機が故障した場合には、坑内の配線から電源を供給することも可能である。操作は、ペンダントスイッチや操作盤を用いて行う。

(5) 使用の流れ

本装置の使用の流れを図-13 に示す。

展開時には、切羽から 30m 程度の位置にトラックを

停め、アウトリガーを用いて車体を水平にする。その後、フレームを展開し、送風機を用いてバルーンを膨らませる。このとき、送風量は最大値（67.5m³/min/5 台）に設定されており、バルーンは迅速に展開される。この一連の設置作業は、5 分程度で完了する（図-13 中①～④）。

発破時には、飛石や爆風が作用することによって、内圧が増加し、内袋が破裂する恐れがある。そのため、展開終了後に送風量が自動的に調節され、バルーンの内圧が低減される仕様とした。

収納時には、送風機を停止するとともにファスナーを開放することで、バルーンから迅速に排気する。その後、フレームを収納し、バルーンが地面に接触しないようトラックにひもで固定する。この一連の収納作業は、3 分程度で完了する（図-13 中⑤～⑧）。



図-11 油圧シリンダーとダンパー機構



図-12 アウトリガー

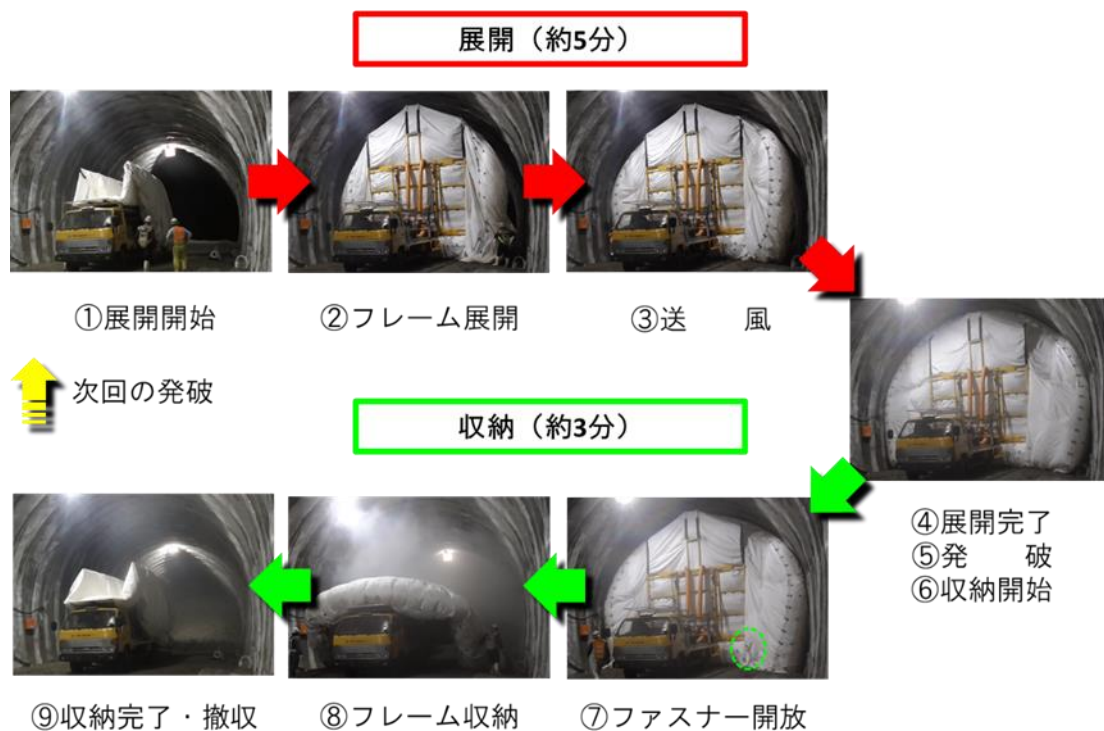


図-13 移動式発破防護バルーンの使用の流れ

3. 装置の適用効果

(1) 装置の適用状況

本装置を、当社施工中の2箇所の山岳トンネルに適用した。発破によるずりの飛散状況を図-14に示す。飛石はバルーンを設置した位置よりも切羽側のみに分布しており、本装置が飛石を確実に受け止めていたことがわかる。これにより、本来の目的である坑内設備の防護だけでなく、飛石の散乱を抑制し、ずりの回収作業が効率化されることも確認された。

これまでに本装置をおよそ400回の発破に供しており、使用が困難になるほどの大きな損傷は見られていない。しかし、バルーン部の小規模な破れが数回発生しており、その都度補修を行ってきた。今後は、このような補修作業を少なくすることができるよう、装置の構造や材質、補修方法の確立等を検討する必要があると考えられる。

(2) ずり搬出サイクルの短縮

坑内設備の退避距離を短くすることによるずり搬出時間の短縮効果について明らかにするため、切羽からクラッシャまでの一次ずり運搬状況を確認した。各発破における一次ずり処理能力と切羽-クラッシャ間距離（以下、

離隔距離と呼ぶ）の関係を図-15に示す。一次ずり処理能力は、単位時間当たりの一次ずり処理量（ton/hour）である。図中には、本装置を適用した現場A、現場Bでの結果と併せて、既往の研究の結果⁵⁾も記している。

適用現場での結果では、以下の特徴が認められる。離隔距離が35m程度以上の場合、一次ずり処理能力は既往の研究結果と同程度であり、離隔距離が短いほど一次ずり処理能力が高くなる傾向が見られる（図-15中①）。これは、クラッシャを切羽に近づけることで、ずりを搬送するサイドダンプの走行距離が減り、ずりの運搬に掛かる時間が短縮されたためと考えられる。一方、離隔距離が35m程度以下の場合には、一次ずり処理能力は低くなり、既往の研究結果との乖離が大きくなっている（図-15中②）。これは、ずり性状の変化によってクラッシャの処理容量が一時的に低下し、クラッシャに供給されるずりの量がそれを上回ることにより、ずり投入時に待ち時間が発生したためと考えられる。すなわち、適用現場Bで採用されているクラッシャの公称の処理容量は500ton/hourであり、今回のずり搬出量を十分に上回っているが、湧水によってずりが泥濁化することで、クラッシャ内での固着やベルトコンベヤの勾配区間での逆流が生じたため、積極的にずりを投入することができず



(a) 坑口側から観た様子



(b) 側壁側から観た様子

図-14 発破によるずりの飛散状況

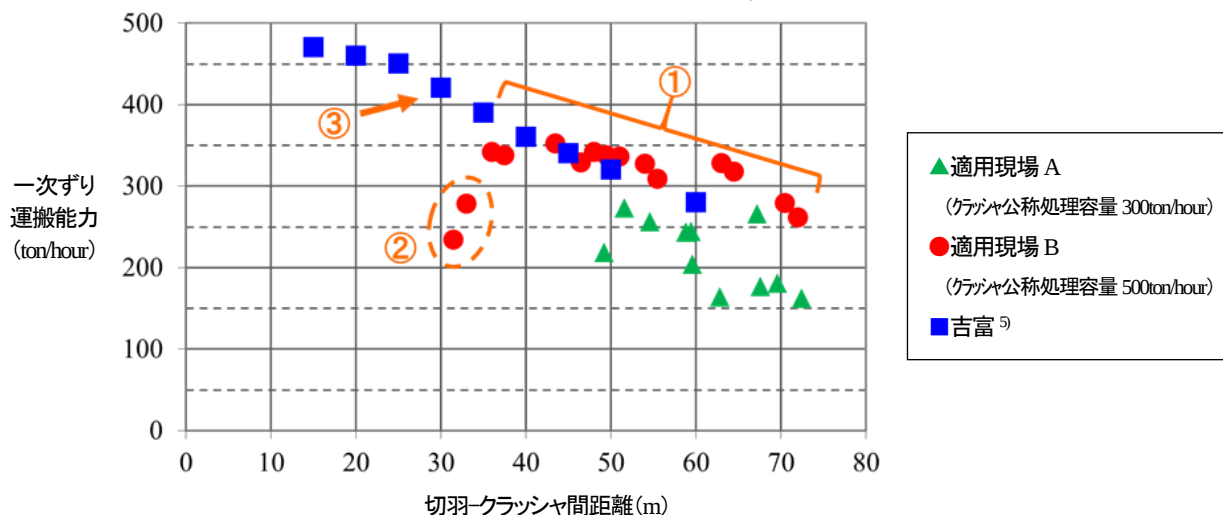


図-15 一次ずり処理能力と切羽-クラッシャ間の離隔距離の関係

に待ち時間が生じ、実際の処理容量が低下してしまったと考えられる。

既往の研究より、仮にクラッシャへの投入時の待ち時間が全く発生しない場合には、離隔距離を30m程度にすることで一次ずり運搬能力は420ton/hour程度となり、従来（離隔距離60m程度、一次ずり運搬能力280ton/hour程度）の1.5倍程度となることが期待される（図-15中③）。しかし、今回の適用で見られたように、湧水の状況等により、離隔距離を短縮しても一次ずり処理能力が向上しない場合がある。よって、ずり搬出時間の短縮効果を得るためには、各々の現場の状況に合わせて、最適な位置にクラッシャを設置することが重要であるといえる。そのためには、本装置のように、任意の位置で発破防護ができる装置の利用が有効であると考えられる。

(3) 防音効果

本装置はトンネル断面を塞いで使用するため、防音効果を有することが期待された。そこで、発破時の騒音と低周波音を観測し、装置の適用前後で最大音圧レベルの比較を行った。切羽から 100m 離れた断面において、センターライン上の路盤から 1m 程度の高さの位置に、1 台の計測機器を三脚にて設置し、発破音を観測した。観測回数は、装置の適用前後で各々 5 回、4 回である。ただし、各発破で装薬量が異なるため（30.2～111.4kg）、以下に示す方法で、装薬量が 100kg の場合の最大音圧レベルに換算してから比較を行った。

まず、船津⁹⁾らの予測式に準じて、坑内音圧レベルを算出するための式(1)、式(2)を導いた。

$$L_N = 130 + 16\log W - 16\log D + \Delta L \quad (1)$$

$$L_L = 141 + 7\log W + \Delta L \quad (2)$$

ここで、

L_N : 騒音レベル (dB)

L_L : 低周波音レベル (dB)

W : 装薬量 (kg)

D : 坑内距離 (m)

ΔL : 指向性や回折減衰等の補正值 (dB)

これらの式を基にすると、装薬量 W の下で観測された最大音圧レベル $L_{N,ob}$ 、 $L_{L,ob}$ と、装薬量 100kg 相当の最大音圧レベル $L_{N,100}$ 、 $L_{L,100}$ は、以下のように表される。

$$L_{N,ob} = 130 + 16\log W - 16\log D + \Delta L \quad (3)$$

$$L_{N,100} = 130 + 16\log 100 - 16\log D + \Delta L \quad (4)$$

$$L_{L,ob} = 141 + 7\log W + \Delta L \quad (5)$$

$$L_{L,100} = 141 + 7\log 100 + \Delta L \quad (6)$$

ここで、

$L_{N,ob}$: 観測された最大騒音レベル (dB)

$L_{N,100}$: 装薬量 100kg 相当の最大騒音レベル (dB)

$L_{L,ob}$: 観測された最大低周波音レベル (dB)

$L_{L,100}$: 装薬量 100kg 相当の最大低周波音レベル (dB)

式(3)と式(4)、式(5)と式(6)の両辺の差分をとると式(7)、式(8)が導かれ、各発破で観測された最大音圧レベル $L_{N,ob}$ 、 $L_{L,ob}$ と装薬量 W より、装薬量 100kg 相当の最大音圧レベル $L_{N,100}$ 、 $L_{L,100}$ が得られる。

$$L_{N,100} = L_{N,ob} - 16\log W + 16\log 100 \quad (7)$$

$$L_{L,100} = L_{L,ob} - 7\log W + 7\log 100 \quad (8)$$

換算した音圧レベルを図-16 に示す。最大騒音レベルの平均値は、装置の適用前後で各々 136dB、125dB であり、10dB 程度減少した。一方、最大低周波音レベルの平均値は、装置の適用前後で各々 150dB、148dB であり、若干減少したものの、各データのばらつきが大きいいためその差は明瞭ではない。

山岳トンネルにおいては、近隣住民への負荷を低減するために、発破音を抑制する取り組みが行われている。例えば、志賀ら⁷⁾は、高精度電子雷管を利用して起爆秒時差を制御することにより、従来の電気雷管と比較して騒音レベルが 2～3dB 程度低減されることを確認している。また、三村ら⁸⁾は、消音器や防音扉を組み合わせた一体型の防音扉を設置することで、騒音レベルが 16dB 低減されることを確認した。本装置の適用による騒音レベルの低減量は 10dB 程度であり、装薬量や測定位置等

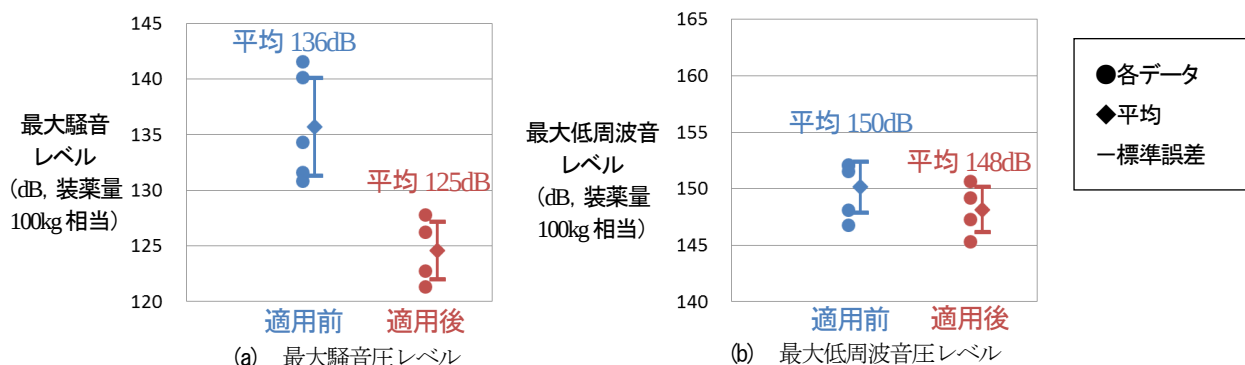


図-16 移動式発破防護バレーンの適用による防音効果

の諸条件が異なるため一概には言えないものの、騒音に対してはこれらの研究と同様の低減効果があるといえる。

以上のことより、移動式発破防護バルーンを適用することで、低周波音はほとんど変化しないものの、騒音は低減されており、ある程度の遮音性能を有することが確認された。

4. おわりに

今回、坑内設備（クラッシャ）を発破による飛石から防護して退避距離を縮めることでずり搬出時間を短縮することが可能な「移動式発破防護バルーン」を開発し、施工中の山岳トンネル現場へ適用した。その結果、クラッシャの詰まりが生じない範囲で切羽-クラッシャ間距離を狭めることで、ずり搬出時間を短縮できることが明らかとなり、本装置が山岳トンネル施工の生産性向上に寄与することが確認された。

また、本装置を使用することによって粉塵や後ガスが切羽側へ閉じ込められることが確認されており、伸縮風管を併用することで、これらを効率的に回収することも期待される。今後は、遮音性能とともにこのような坑内環境の改善効果に関しても検証を行う予定である。

なお、本装置については、複数の山岳トンネル現場への採用が決定されており、今後は多くの現場へ展開していく予定である。これらの適用を通して、装置の継続的な改良を進めていきたい。

参考文献

- 1) 小島英郷, 藤内隆, 藤井攻: 長大山岳トンネルにおける生産性向上への取組み-急速ずり処理システムとロングブーム吹付け機の開発-, トンネルと地下, vol. 47, no. 7, pp.25-34, 2016.
- 2) 福井正規, 富澤直樹, 若林宏彰, 森山祐三, 宮越征一: 全断面追尾式穿孔誘導システム「ドリル NAVI」の適用と効果, 土木学会平成 27 年度全国大会第 70 回年次学術講演会, VI-781, pp.1561-1562, 2015.
- 3) 小早川忠行, 鈴木仁志, 江上晴久, 蓼沼慶正, 渡辺康司: 長大トンネルのズリ搬出システムの開発, トンネル工学研究論文・報告集第 12 巻, pp.291-296, 2002.
- 4) 高橋和寛, 三木忍: 山岳トンネルのずり搬送における長距離バルコンの活用, 土木学会平成 22 年度全国大会第 65 回年次学術講演会, VI-030, pp.59-60, 2010.
- 5) 吉富幸雄: 山岳トンネルにおける連続ベルトコンベヤずり出しシステムの研究, 平成 14 年九州工業大学学位論文, 2002.
- 6) 船津弘一郎, 内山恒光: トンネル発破の特性と予測, 昭和 62 年日本騒音制御工学会技術発表会講演論文集, 1-2-1, pp.57-60, 1987.
- 7) 志賀弘史, 上南隆, 手塚康成, 岩野圭太, 犬塚隆明, 花岡紀恵: 住宅街に近接したトンネル発破における騒音・低周波音低減に関する検討, 土木学会平成 28 年度全国大会第 71 回年次学術講演会, VI-413, pp.825-826, 2016.
- 8) 三村聡, 永松雄一, 佐土原一也: 移動式一体型防音扉適用による掘削工程遅延への対応事例, 土木学会平成 28 年度全国大会第 71 回年次学術講演会, VI-445, pp.880-881, 2016.

(2018. 8.10受付)

DEVELOPMENT AND APPLICATION OF “TRUCK-MOUNTED BLAST PROTECTION BALLOON” FOR ROCK TUNNELS

Yoshitaka MITSUI, Satoru YAMAMOTO, Junichi TSUKADA and Masahiko KOBAYASHI

Recently, conveyor belt has been applied to rock tunnels for the sake of rapid construction. However, the rapid construction is not fully achieved because tunnel equipments are generally placed far away from a tunnel face to avoid collision of flying rocks in the case of blasting excavation. “Truck-Mounted Blast Protection Balloon” was developed and applied to rock tunnels in order to receive the rocks and place the equipments in the vicinity of the face without collision of the rocks. It was clarified that the time for mucking is shortened when a crusher is closer to the face if a crusher jam does not occur. It describes that this apparatus can contribute to productivity growth in rock tunnel construction.