

掘削ずりの高速運搬システムの開発

—山岳トンネルの急速施工実現に向けて—

Development of High Speed Mucking System for Mountain Tunnels

浅野 剛* 塚本耕治* 齋藤隆弘*
熊澤伸康** 岩崎 光*** 中村優一****

要 旨

建設が進められている中央新幹線ではトンネルが全延長の約 85%を占め、施工される山岳トンネルは長大トンネルとなるため、コスト低減に加え、事業効果の早期発現に対して有力な方法である急速施工に対するニーズが高まっている。山岳工法で施工されるトンネル工事において、ずり運搬は一連のサイクルの約 30%を占めており、その高速化は急速施工を実現するためのポイントとなっている。このような状況をふまえ、長大トンネルで標準的な連続ベルトコンベヤーによるずり運搬を対象として、高速化する方法を提案した。本方法の特長は以下の 2 点である。

- i. 移動式伸縮ベルコンを用い、ずり運搬時にクラッシャーを切羽から 20m 地点まで近づける
- ii. クラッシャーをトンネル進行方向に直列に 2 台配置し、二段階破碎を行う

本報は、提案した高速ずり運搬システムの概要、および実証試験による性能の分析・評価結果について報告するものである。

キーワード：山岳工法、急速施工、ずり運搬、移動式伸縮ベルコン、クラッシャー、二段階破碎

1. まえがき

発破掘削で施工される山岳トンネルにおける主な作業は、①穿孔・装薬・発破、②坑外へのずり運搬、③支保工設置であり、各々が全施工時間の約 3 分の 1 を占めている¹⁾。①～③は並行作業が難しく、急速施工を実現するためには、各々の作業時間を短縮する必要がある。①の高速化については、油圧削岩機の性能向上、複数台のドリルジャンボ使用等、③については、時間当たりの吹付け性能が高い大型機械の使用等の対応策が提案・実施されている。一方、②については、高速化のための新しい方法は具体化されていない。検討の対象としている長大トンネルにおけるずり運搬方法としては、坑内環境、安全性の観点から、連続ベルトコンベヤー（以後、連続ベルコン）方式が採用される場合が多い²⁾。このような状況をふまえ、連続ベルコン方式によるずり運搬に着目して、高速化する方法を提案した。施工速度としては、①および③の高速化のための方法を併用することで、断面積 100m² のトンネルにおける C 級地山以上の区間で、月進 230m 以上を安定的に確保することを目標とした。

本報では、提案した高速ずり運搬システムの概要と、実機を用いた実証試験による運搬システムの性能検証結果について報告する。

2. ずり運搬性能への影響要因と現状の課題

連続ベルコン方式によるずり運搬における、標準的な切羽付近の機械配置を図-1に示す。発破後のずりは、サイドダンプによりクラッシャーに運搬・投入される。クラッシャーで破碎されたずりは、連続ベルコンの切羽側終端となるテーブルピース台車を經由して、連続ベルコンにより坑外まで運搬される。

切羽から坑外へのずりの運搬性能 (A) は、切羽からクラッシャーまでの運搬性能 (A_1)、クラッシャーの破碎性能 (A_2)、および連続ベルコンの運搬性能 (A_3) により決まる (図-1 参照)。

A_1 に対する影響要因は、運搬機械の性能 (例えば、サイドダンプのバケット容量等) および切羽からクラッシャーまでの距離である。バケット容量はトンネル断面積に対して施工性等を考慮して決められることから、ずり運搬時に切羽とクラッシャーの距離を短縮することが A_1 の向上に対して有効となる。

A_2 に対する影響要因は、クラッシャーの仕様および設定される破碎後の最大粒径 (D) である。クラッシャーについては、施工性や要求性能を考慮し、対費用効果が高い機械が選択される。仕様が同じクラッシャーを用いる場合、 D を大きく設定するほど A_2 は向上する。

*技術研究所 **東日本支社機械部 ***土木本部土木技術室 ****東日本支社土木技術部

一般的なクラッシャーの模式図を図-2に示す。切羽から運搬された掘削ずりは、クラッシャーのホッパーに投入された後、ホッパー底板を振動させることでジョークラッシャー方向にフィードされる。この時、処理の効率化を目的としてジョークラッシャーによる破碎前に、粒径 100~150mm 以下のずりは破碎不要分としてふるいにより取り除かれる。破碎後の最大粒径 D は、ジョークラッシャー下部の開口幅の最大値 (OSS) により決まり、OSS が大きいほど D が大きくなり、クラッシャーの破碎性能 A_2 が向上する。

A_3 に対する影響要因は、連続ベルトコンのベルト幅である。必要なベルト幅は D の 3 倍程度であり、 D が大きくなると必要なベルト幅が広がる。 D の設定値を大きくしてベルト幅を広くすると、 A_2 、 A_3 ともに向上するため運搬性能が上がる。しかし、ベルト幅を広げることは、切羽から坑口までの距離が長くなる長大トンネルでは大きなコスト増の要因となる。さらに、限られたトンネル断面内における施工性の観点からも、ベルト幅

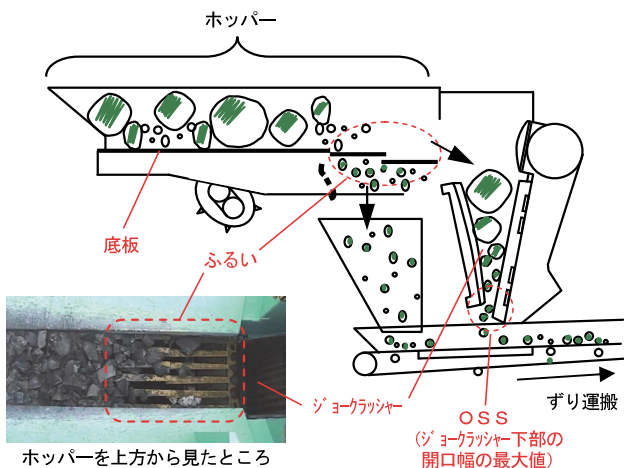


図-2 クラッシャーの模式図

は制限を受ける。

標準的な連続ベルトコン方式によるずり運搬方法の場合、発破時の退避や作業性を考慮して図-1に示すように切羽からクラッシャーまでの距離は約 60m、ベルト幅は 600~750mm ($D=200\sim250\text{mm}$) とされることが多い。現状では A_1 が A_2 を上回り、クラッシャーへの投入待ちが発生している状況が多く見られる。そのため、ずり運搬時に切羽とクラッシャーの距離を縮めることが A_1 の向上には有効である。同時に、 A_2 を向上させることにより A_1 、 A_2 、 A_3 のバランスをとることが A の向上に向けての課題となっている。

3. 高速ずり運搬システムの概要

ずり運搬に関する現状での課題をふまえ、目標月進の実現に必須となる高速ずり運搬システムの開発に取り組んだ。提案システムにおける機械配置を図-3に、本システムで想定している切羽からクラッシャーまでのずり運搬機械、クラッシャーおよび移動式伸縮ベルトコン (以後、伸縮ベルトコン) の仕様を表-1に示す。目標月進の実現およびコストの観点から、切羽から坑外へのずりの運搬性能 A は 550t/h 以上、破碎後の最大粒径 D は 250mm 以下を目標とした。提案したシステムの特長を以下に示す。

3.1 伸縮ベルトコンの採用

クラッシャーとテールピース台車との間に伸縮ベルトコンを設置する。発破時には、伸縮ベルトコンを縮めるとともにクラッシャーを切羽から 40m 地点まで退避させておき、飛石による損傷を防止する。発破後、すみやかにクラッシャーをずり発生箇所近傍 (切羽から 20m 程度) に移動する。同時に伸縮ベルトコンを延伸し、クラッシャーとテールピース台車間に運搬ルートを作成する。

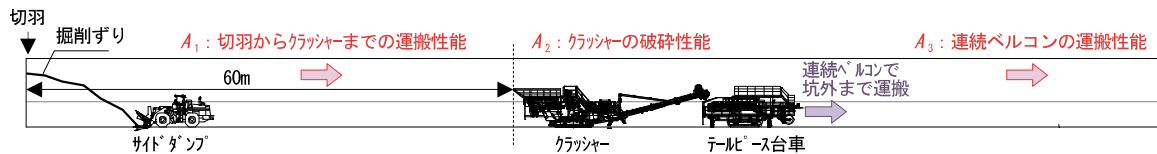


図-1 連続ベルトコン方式によるずり運搬時の標準的な機械配置

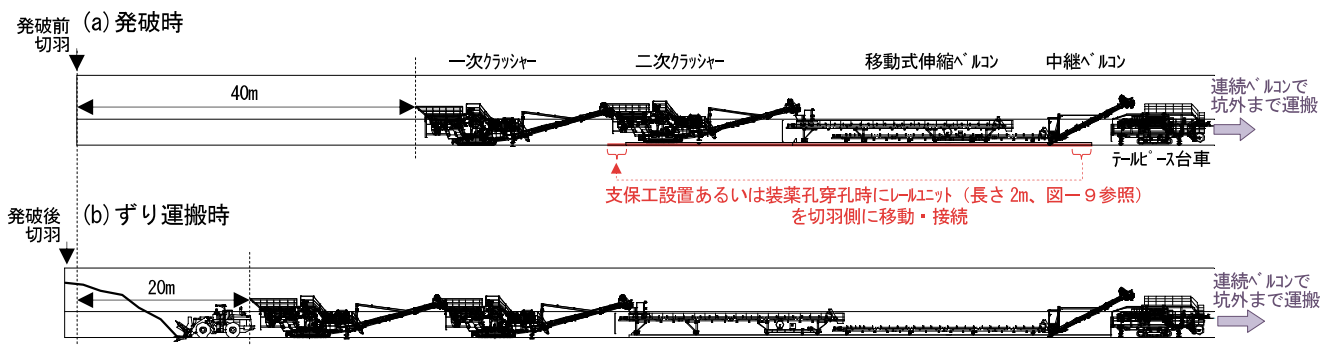


図-3 提案システムにおける機械配置 (発破時およびずり運搬時)

伸縮ベルコンを使用せずに一般的な方法で連続ベルコンを 20m 延伸する場合には 3 時間程度必要となるが、伸縮ベルコンを用いることで 5 分以内に移動が可能となる。

3.2 2台のクラッシャーの直列配置

汎用的なクラッシャー NT300 級を 2 台使用し、これらを直列に配置して二段階破碎を行う。切羽側に配置したクラッシャー（以後、一次クラッシャー）により一次破碎したずりを、そのまま坑口側に配置したクラッシャー（以後、二次クラッシャー）に投入して二次破碎する。切羽から運搬される大径のずりを最初に破碎する一次クラッシャーの OSS を大きくするとともに、二次クラッシャーの OSS を小さくすることで、クラッシャーの破碎性能 A_2 を確保しつつ、 D を小さくすることが可能になる。

本システムでは、二次クラッシャーには一次クラッシャーで破碎したずりを投入するため、二次クラッシャーの処理性能に余裕が生じる。この余裕を利用して、1 時間あたり 100t 程度のずりを一次クラッシャーを経由させず二次クラッシャーに投入する（以後、直接投入）。2 台のクラッシャーを部分的に並列使用することで、全体の処理性能をさらに向上できる。

4. 実証試験の内容

提案したシステムの性能確認を目的として、実機を用いた実証試験を実施した。試験方法として、クラッシャー 1 台を用いた単独試験、およびクラッシャー 2 台を直列に配置した 2 連試験を計画した。

表-1 本システムで用いる機械の仕様

使用機械	仕様
サイドダンプ コマツ WA500	寸法（全長×全幅×全高）9.9×3.4×4.8m バケット容量 3.8m ³
クラッシャー 中山鉄工所 NT300	稼働時寸法（全長×全幅×全高）20×3.1×4.7m 最大供給岩塊寸法（厚さ×幅）600×800mm クラッシャー駆動モータ形式 132kW、440V
移動式 伸縮ベルコン	ベルト幅 900mm 伸縮量 21m 電動機出力 15kw×2、200V

4.1 試験サイトの状況

実証試験は稼働中の碎石場で実施した。試験サイトにおける 2 連試験実施時のクラッシャー、伸縮ベルコンの配置を図-4、写真-1 に示す。試験では、実施工のずり運搬システムで用いるテールピース台車および連続ベルコンは使用せず、クラッシャーおよび伸縮ベルコンを用いてシステムの性能を検証した。

4.2 試験に用いた掘削ずり

掘削ずり（以後、供試体）として、碎石場で採取される岩石を用いた。岩種は中生代の砂岩である。圧縮強度は平均 342N/mm² と非常に大きく³⁾、強度の面からは岩盤等級 B 以上と判断できる⁴⁾。国内のトンネルにおける岩石強度がこの値を上回る可能性は低く、この供試体を用いて得られるクラッシャーの破碎性能 A_2 は、実施工への適用にあたっては安全側の評価になると考えられる。試験に用いたクラッシャーの仕様を考慮し、投入ずりのうち、最大供給幅寸法 800mm を超えるずりは供試体から取り除いた。

4.3 単独試験の方法

単独試験の目的は、クラッシャー単体の性能確認である。クラッシャーの処理性能検討では破碎不要分を 30% とする場合が多いが⁵⁾、掘削ずりの状況に左右されることから、単独試験ではジョークラッシャーの破碎性能そのものを把握するために、供試体の破碎不要分を取り除いた。具体的には、100mm×150mm のスケルトンバケットで供試体をふるい、バケット不通過分を試験に用いた。



写真-1 クラッシャーと移動式伸縮ベルコンの配置 (実証試験サイト)

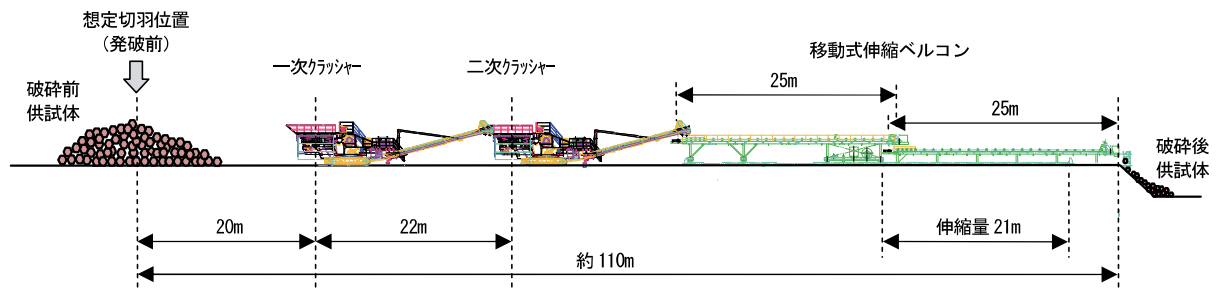


図-4 実証試験における機械配置 (2 連試験、ずり運搬時)

供試体は、本システムの実工事への適用時にあわせて一次クラッシャーから 20m 地点に配置し、サイドダンプでクラッシャーまで運搬した。破碎した供試体は伸縮ベルコンにより運搬して終端部のポケットに落下させ、それをダンプトラックに積み込み、トラックスケールで重量を計測することでクラッシャーの破碎性能を評価した。供試体の粒径については、地上に敷設した鉄板上に供試体を広げて高所作業車から写真撮影して確認した。1回の試験におけるホッパーへの供試体投入時間は約10分とし、試験時間中はホッパーに供試体が満たされている状況を維持した。

計測項目、および計測方法を2連試験の場合とあわせて表-2に示す。

4.4 2連試験の方法

2連試験は、伸縮ベルコンの伸縮、クラッシャーの移動等の施工性を含めたずり処理性能の確認を目的として実施した。2台のクラッシャーはいずれも通常の仕様であり、特別な設備は追加していない。

実施工では、一次クラッシャーにおける破碎不要分も二次クラッシャーに投入されることになるため、2連試験では粒径 100~150mm 以下を含む供試体を用いた。スケルトンバケットによるふるいを全く行わないケースと、単独試験と同様の粒径 100~150mm 以下を含まないずりに単独試験の破碎後ずりを混入した2パターンを供試体として用いた。各パターンにおいて、ふるい試験により把握した平均破碎不要分は 29.0%、9.5%である。

試験時の供試体配置、破碎後の重量計測による処理性能の評価方法、供試体の粒径確認方法は単独試験と同じであるが、ずり投入は表-3に示すパターンで実施した。切羽に近い一次クラッシャーへの投入を優先し、ホッパーの状況から一次クラッシャーへの投入が難しい場合のみ二次クラッシャーへの投入可否を判断し、可能な場

表-2 計測項目と計測方法

計測項目	計測方法
岩石強度	1回の試験で用いる供試体について、5個の岩石に対しシュミットハンマー試験を実施
破碎不要分の重量比率	1回の試験で用いる供試体全体の10%をスケルトンバケットでふるい、通過・不通過の重量比をトラックスケールで計測
供試体の粒度分布	地上に広げた供試体を写真撮影し画像処理により最大長さを抽出
処理後の供試体重量	試験終了後に、処理した供試体を10tダンプに積み込み、トラックスケールで計測
クラッシャー電流値	クラッシャー制御盤の電源ケーブルにクランプを設置し、クランプメータで計測

表-3 2連試験における供試体投入パターン

クラッシャーの状況		対応
一次クラッシャー	二次クラッシャー	
投入可能	投入可能	一次クラッシャーに投入
投入可能	投入不可	一次クラッシャーに投入
投入不可	投入可能	二次クラッシャーに投入
投入不可	投入不可	待機

合に二次クラッシャーに直接投入した。一次、二次クラッシャーとも投入不可の場合には投入待ちとなるが、試験では投入待ちとなるような状況は発生しなかった。1回の試験におけるホッパーへの供試体投入時間は単独試験と同様に約10分としたが、ずり処理を1時間継続した場合（新幹線断面で一掘進長 3m 以上のずり運搬時間に相当）も1ケース実施した。

5. 実証試験結果

5.1 単独試験

単独試験における試験ケースおよび結果を表-4に、処理速度と OSS の関係を図-5に示す。単独試験で用いた供試体には破碎不要分は含まれていないことを考慮し、破碎不要分が一般的な 30%の場合の処理速度（以後、換算処理速度）として「破碎速度/0.7」を用いた。OSS は NT300 における最大値 190mm から 20mm ピッチで3ケースとし、各ケースとも2回試験を実施した。

図-5より、OSS を大きくするほど換算処理速度が大きくなるのがわかる。OSS が 190mm の場合の換算処理速度は 486.0~514.3t/h であり、二次クラッシャーへの直接投入を 100t/h と想定すると、OSS を 190mm とすることで目標とするずりの運搬性能 550t/h を十分に達成可能であると判断した。

破碎前後の供試体の粒径データを表-5に、OSS が 170mm の場合の破碎後の粒径分布を図-6に示す。OSS を 170mm とすることで、約 99%のずりが、破碎後の最大粒径 D の目標値 250mm 以下となることがわかる。

表-4 試験ケースおよび結果（単独試験）

OSS (mm)	最大ずり径 (mm)		換算処理速度 (t/h)	試験前供試体の 100×150mmスケルトンバケット通過比率 (%)
	破碎前	破碎後		
150	780	290	360.9	0
150	680	250	423.9	0
170	720	320	461.3	0
170	770	280	413.3	0
190	700	350	486.0	0
190	720	380	514.3	0

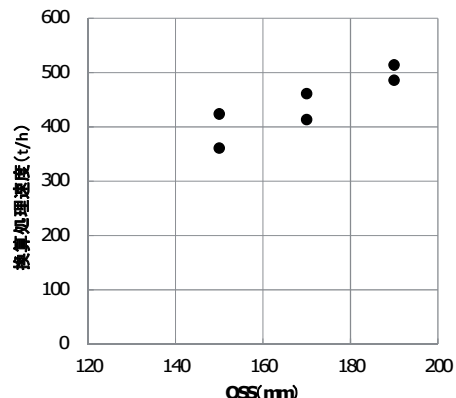


図-5 換算処理速度と OSS の関係（単独試験）

5.2 2連試験

a. クラッシャーの処理性能

2連試験における試験ケースおよび結果を表-6に、破砕後の供試体の粒径分布を図-7に示す。単独試験結果に基づき、処理速度に影響する一次クラッシャーのOSSは190mm、Dに影響を及ぼす二次クラッシャーのOSSは、D=250mmが実現可能な170mmとした。

スケルトンバケットによるふるいを全く行わないケースについては、供試体の平均破砕不要分は29.0%であり、クラッシャーの設計に用いられる一般的な値である30%と同等の値であったことから、実測値をそのまま換算処理速度とした。単独試験の破砕後のずりを混入したケースでは供試体の平均破砕不要分は9.5%であったことから、破砕不要分30%の場合の換算処理速度を「実測処理速度×0.905/0.7」により算定した。

表-5 破砕前後の供試体の粒径（単独試験）

		平均径 (mm)	最大径 (mm)	250mmアンダー比率 (%)
破砕前		228	790	67.4
破砕後	OSS : 190mm	150	380	94.4
	OSS : 170mm	122	320	98.9
	OSS : 150mm	115	290	99.5

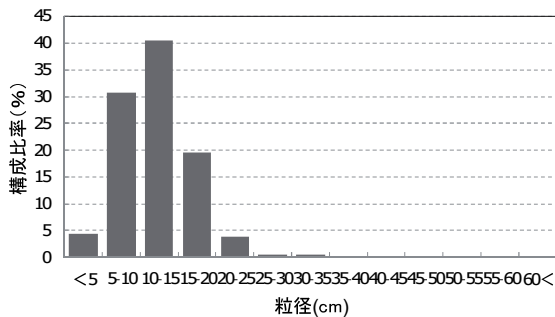


図-6 破砕後の粒径分布（単独試験、OSS170mm）

表-6 試験ケースおよび結果（2連試験）

OSS (mm)		最大ずり径 (mm)		換算 処理速度 (t/h)	試験前供試体の 100×150mmスケルトン バケット通過比率 (%)
一次 クラッシャー	二次 クラッシャー	破砕前	破砕後		
190	170	720	280	551.0	25
190	170	790	300	558.9	27
190	170	720	275	559.8	35
190	170	710	285	589.1	8
190	170	690	305	581.0	11

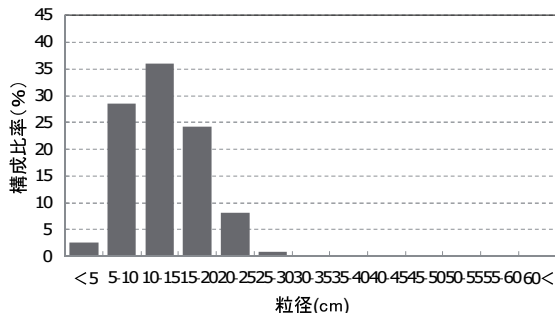


図-7 破砕後の粒径分布（2連試験）

本システムによる換算処理速度は551.0~589.1t/hであり、目標とする550t/h以上の性能を持っていることを確認できた。破砕後の供試体については、単独試験におけるOSS170mmのケースと同様に、粒径250mm以下の比率が99%以上となっている（図-7参照）。

2連試験では、時間あたりの二次クラッシャーへの直接投入回数は12~18回（72~108t）であり、運搬4~8回に1回の投入となった。二次クラッシャーへの直接投入の可否は、二次クラッシャーのホッパーの状況により判断した。直接投入前の一次および二次クラッシャーのホッパーは写真-2のような状況となっている。二次クラッシャーのホッパーには、一次クラッシャーから破砕された供試体が投入され、その堆積高さは20cm程度である。直接投入直後には写真-3のような状況になるが、2~3分程度経過すると投入前の状況に戻り、再度直接投入が可能となる。この時の一次および二次クラッシャーの電流値の推移を図-8に示す。直接投入前には二次クラッシャーの電流値に大きな変化は見られない。OSS190mmで一次破砕された供試体を、OSS170mmで



一次から二次クラッシャーへ投入

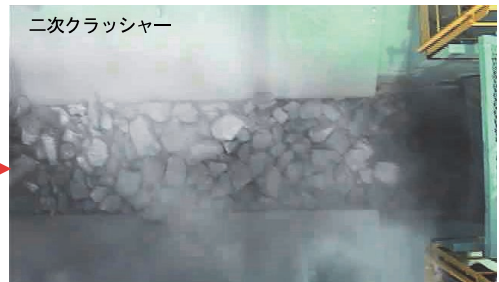


写真-2 直接投入前のホッパー内の状況（2連試験）



写真-3 直接投入直後の二次クラッシャーのホッパー内の状況（2連試験）

二次破碎する際には、大きな負荷は発生していないことがわかる。直接投入時に電流は増加するが、その値は一次クラッシャーと同程度にとどまっており、2分程度経過すると直接投入前の状態に戻っている。

b. 実施工への適用性

ずり運搬時の切羽と一次クラッシャーとの距離を20mとしてクラッシャーを2台用いる本システムでは、目標とした運搬速度、破碎後の最大ずり径を実現できることを前項で述べた。しかしながら、本システムを実工事に適用するためには、発破時に伸縮ベルコンを縮めて退避した状態から、それを伸ばすとともに2台のクラッシャーを移動し、ずり搬出が可能な状態とするまでの作業を効率的に行う必要がある。一般的な積算基準では、ずり出し準備の時間は5分とされていることから¹⁾、5分以内にクラッシャーが退避した状態からずり搬出が可能な状態まで移動することを目標とし、2連試験で実施可能であることを確認した。

本試験では、伸縮ベルコンの移動についてはレール方式を採用した。レールの構造を図-9に示す。レール4本と枕木から一つのレールユニットを構成しており、トンネル進行方向の長さは2mである。切羽の進行にあわせて、中継ベルコンの下方の空間(図-3(a)参照)を

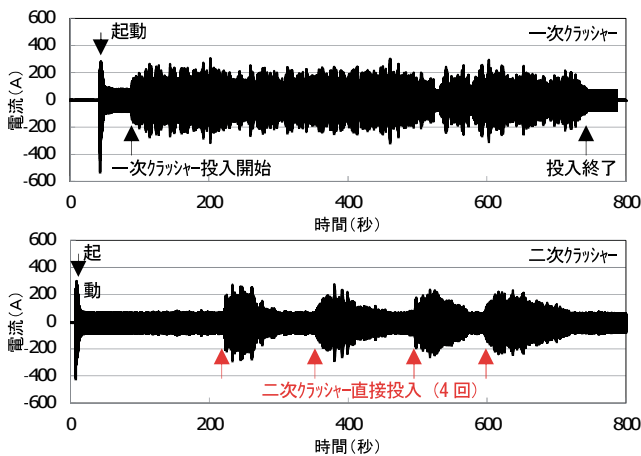


図-8 クラッシャーの電流値の推移(2連試験)

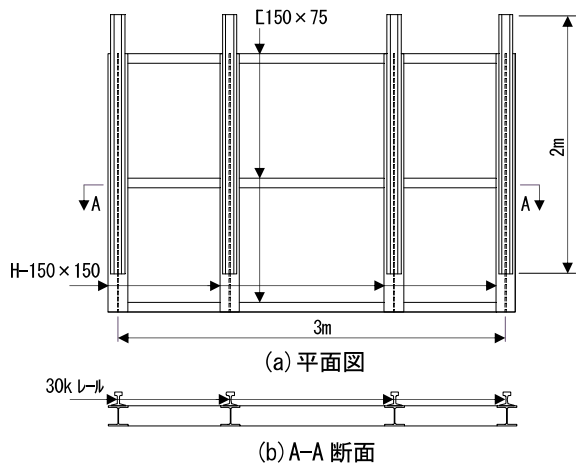


図-9 移動式伸縮ベルコン用のレールの構造

利用してレールユニットを取り外し、切羽側に連結する。この手順を支保工設置時、あるいは装薬孔穿孔時に行うことで施工サイクルへの影響を回避できる。なお、伸縮ベルコンの移動方法については履帯方式等も可能であり、これについては検討の余地があると考えている。

6. まとめ

急速施工実現のポイントとなっているずり運搬に着目し、高速化する方法を提案するとともに、その性能確認を目的として実機を用いた実証試験を実施した。試験により得られた知見、本システムの特長を以下に要約する。

- i. 伸縮ベルコンを用いることで、5分以内で2台のクラッシャーをずり運搬時の所定の位置(切羽から一次クラッシャーまで20m)に移動できる
- ii. 2台のクラッシャーを用いた二段階破碎と並行して、二次クラッシャーに直接ずりを投入する「部分的並列使用」が可能である
- iii. ずり運搬時にクラッシャーと切羽距離を近づけることに加え部分的並列使用を実施することで、「処理速度 550t/h、破碎後の最大ずり径 250mm以下」を実現できる
- iv. 上記処理速度は、現在最も一般的である NT300 級クラッシャー1台を用いる方法に対して60%、国内最大級で特殊機械とされる NT500 を用いた場合に対して14%上回っている
- v. 汎用的なクラッシャーNT300級を2台用いるため機械トラブル時の対処が容易であり、1台のクラッシャーが作動不能になった場合でも切羽停止を回避できる

7. あとがき

本システムは、北海道新幹線の立岩トンネルで採用し、引き続き性能を検証していくとともに、中央新幹線等で今後建設が予定されている長大トンネルにおけるずり運搬システムとして提案していく予定である。

【参考文献】

- 1) NATM 積算研究会、「NATM の施工と積算」、p.293、2006.9
- 2) 土木学会、「トンネル標準示方書 山岳工法・同解説」、pp.152-156、2006.7
- 3) 大泉砕石株式会社、「大泉砕石(株) 飯渕工場 砕石原山岩質調査 報告書」、2012.7
- 4) 三木幸蔵、「絵とカラー写真で理解する 岩盤力学入門」、p.197、1986.11
- 5) 社団法人日本建設機械化協会、「骨材の採取と生産」、p.220、1975