

法面吹付工の機械施工システムの開発

吹付けロボット「Robo-Shot」

庭田 和之

最近多発する土砂災害は大型化・先鋭化する傾向にあり、危険を伴う応急復旧作業の要請が増加している。通常の吹付け工は人力主体のため効率性が低く、作業員の熟練度に品質や安全が左右されるなどの課題があった。そのため崩壊危険箇所においても作業員の安全を確保し、効率の高い施工ができる機械施工システムの開発が求められていた。今回開発した「Robo-Shot」（以下「本工法」という）は、ロボットアームを搭載した吹付けロボットと大容量搬送装置を使用し、通常工法の5倍の吐出量で急速施工ができる吹付けシステムで、安全に効率性の高い施工が行える。

キーワード：のり面、吹付け工、ロボット、ノズルマン、安全性向上、作業効率向上

1. はじめに

平地が少なく、急峻な山々が多い地形の日本において、建設工事ではのり面保護工事を伴うことは多い。また、地球規模での異常気象は日本においても大型台風や集中豪雨でのり面崩壊を引き起こし、毎年のように甚大な被害が生じており、現在ののり面保護工事は防災工事としての側面も大きくなってきている。

応急復旧作業では迅速な対応が求められるが、通常の吹付け工は施工能力が人力に依存するため、効率の低い施工となるばかりか、二次災害に巻き込まれる危険性をはらんでいた。また、昨今の建設労働者不足はのり面業界においても深刻な問題となっている。特に吹き付け作業では、ノズルマンと呼ばれる経験豊富な熟練工を必要とするが、作業員の高齢化も重なり安定的な作業員の確保が困難を極め、のり面業界においても早急に解決しなければならない課題であった。

吹付け工が日本へ導入され50年以上経過するが、のり面吹付け工に関する機械開発はほとんど行われてこなかった。その理由として、定められた断面内で作業するトンネル吹付けと異なりのり面吹付けは、施工する面積が広いこと、のり面の勾配や凹凸、施工高さが変化することなど様々に変化する諸条件が機械開発の妨げとなっていた。また、モルタル吹付け工は、面積が広く厚さが薄い構造で、効率性を求めて大量吐出すると所定の平滑性、厚さの確保がむずかしかったことなどがあげられる。これらの技術的課題を解決し、のり面吹付け工の抱える諸問題を解消するために本工

法の開発をおこなった。

2. 本工法の特徴

本工法は、ベースマシンにロボットアーム（写真-1）を搭載した吹付けロボットによりモルタル吹付けを行う機械施工システム（図-1）で以下の特徴を持つ。



写真-1 ロボットアーム

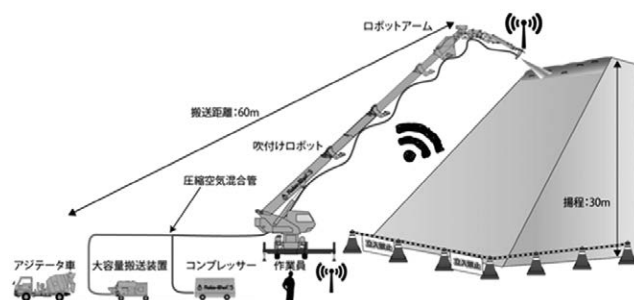


図-1 本工法の吹付けシステム

(1) 大量吹付けシステム

吹付け方式は、通常用いられている空気圧送方式と比較して軟練り材料の圧送が可能で、圧送時の材料分離が少ないポンプ併用空気圧送方式を採用している。1時間に35m³の圧送能力を持つ大容量搬送装置（エンジン式ピストンポンプ）で圧送し、先端ノズル40m手前で圧縮空気と合流させ、ロボットアームにより吹き付けを行う（図-2）。

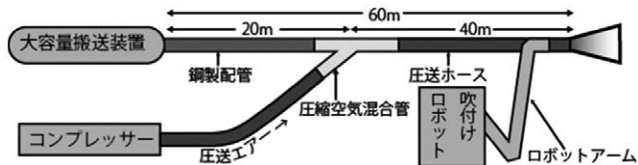


図-2 圧送システム

圧送時の脈動（断続的な圧送状態）は吹付けモルタルの品質変動を増加させ、管内閉塞の原因になる。そこで、吐出量に合わせて圧縮空気混合管より混入する空気圧力と空気流量を最適に調整することで、連続的な圧送を実現している。本工法では、通常よりも軟練り材料を適切な圧力でのり面へ吹き付けるため、大量吐出時も跳ね返り材料が少なく地山への付着性もよい。標準的な配合条件、施工条件を表-1, 2に示す。

表-1 配合条件

	本工法	通常工法
設計基準強度	18 N/mm ² 以上	15 N/mm ² 以上
単位セメント量	420 kg 以上	400 kg 以上
水セメント比	60% 以下	60% 以下
練混ぜスランプ	10 ± 2.5 cm	0 cm

表-2 施工条件

圧送距離	60 m	
施工高さ	30 m	
吐出量	空気流量	空気圧力
10 m ³ /h	15 m ³ /min	0.7 MPa
15 m ³ /h		
20 m ³ /h		

(2) ノズルマンの動作を再現したロボットアーム

通常施工はノズルマンの経験と感覚でノズルをのり面に対して直角に向け、1m程度地山から離して作業する。人の手が届く範囲（1×5m = 5m²）で腕を伸縮させ、複数回吹き重ねて所定の厚さと平滑性を確保する。図-3にノズルマン2名による施工範囲を示す。

本工法のロボットアームは、所定の吹付け厚さと平滑性を確保するために人間の腕と同じ4つの関節を持

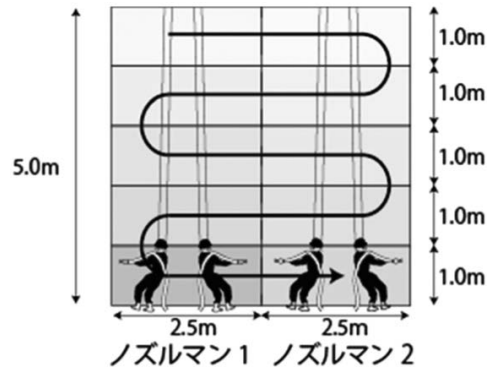


図-3 ノズルマンの動作

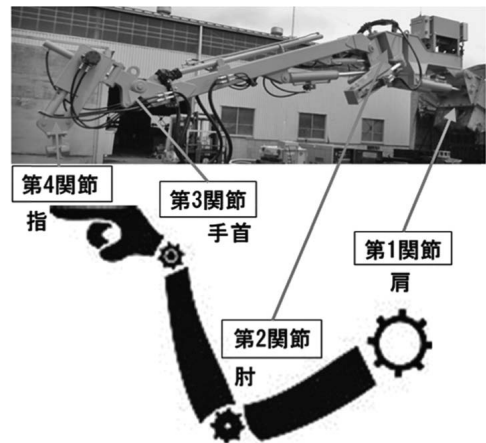


図-4 ロボットアーム

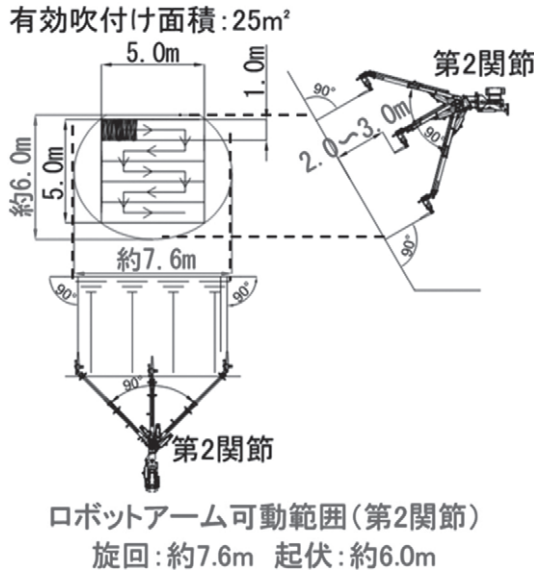
表-3 各関節の機能と可動範囲

関節	Robo-Shot	関節	機能	可動領域	動作数
肩	第1関節	アーム動作	ロボットアームをのり面に対して法線方向に向け、25m ² を1度に吹くための基本姿勢を保持するための関節。ベースマシンのアームとロボットアームの角度を調整する役割。	旋回、起伏90°	2
肘	第2関節		基本姿勢からロボットアームを旋回、起伏させ5×5mの面積を1度に吹き付けるための関節。	旋回、起伏90°	2
			ロボットアームを伸縮させ、のり面とノズルの距離を一定に保持する機能。	伸縮1.7m	1
手首	第3関節	ノズル動作	不陸の大きい吹付け面においてノズルの向きを自由に調節するための関節。	旋回、起伏90°	2
			第2関節の旋回、起伏動作と連動してノズルを常にのり面の法線方向に向ける機能。	連動による旋回、起伏90°	2
指	第4関節		ノズルを上下方向に揺動させるための関節。	上下90°	2

ち、11の動作ができる仕様としている（図-4, 表-3）。

吹き付け作業は、第2関節によるロボットアームの左右旋回と連動し、のり面に対して直角方向にノズルが向くよう自動制御された第3関節を併用してのり面との適切な離隔（2～3m）を保持しながら行う。ノズルマンの動作を再現した可動領域の大きいロボットアームを使用することで、ベースマシンを移動することなく25m²（5×5m）の範囲（有効吹付け面積）を1度に吹き付けることが可能となった（図-5）。

吹付け工は5～15cmと比較的薄い構造のため、



図一五 ロボットアームの可動範囲

大量吐出時の厚さ管理が課題であった。吹付け作業は前述の通り、ロボットアームの第2関節を旋回させて行うが、所定の厚さに仕上げるためにロボットアームの旋回動作は速度を変えて往復させている。往路は遅い速度で一定の厚さを確保し、復路は速い速度で表面を平滑に仕上げる。例えば、吹付け厚さ10cmを平滑に仕上げる場合の最適な巡回速度と往復回数の組み合わせは、表一四の通りである。本工法では、この組み合わせを基本に現場ごとにキャリブレーションを行い実施巡回速度と往復回数を定めている。

ノズル部を含めロボットアームのすべての動作は遠隔操作により制御できる。ロボットアームの旋回やノ

表一四 吐出量の違いによる巡回速度

吐出量	巡回速度		往復回数
	往路	復路	
10 m ³ /h	0.13 m/s	0.26 m/s	2回
15 m ³ /h	0.19 m/s	0.26 m/s	2回

ズルの揺動などの繰り返し動作は自動化されているため、作業員が行う操作は少なく操縦には熟練工を必要としない。

施工に用いるベースマシンは、現場条件に応じて汎用の機械より選定できる。0.8 m³バックホウおよび35 tラフテレーンクレーンを使用した場合の吹付け手順と適用範囲を図一六に示す。

(3) 品質・出来形

試験施工により品質・出来形を確認した。施工仕様を表一五に示す。吐出量は通常施工の約5倍、時間当たり10 m³の大量吐出により試験を実施した。

表一五 施工仕様

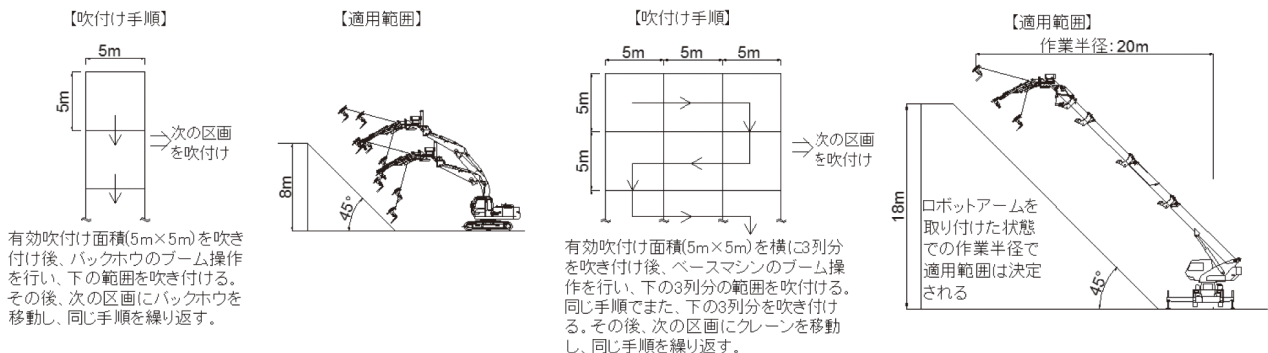
ベースマシン	0.8 m ³ バックホウ
吐出量	10 m ³ /h
空気圧力・空気流量	0.7 MPa 15 m ³ /min
ノズル距離・ノズル角度	3.0 m のり面と直角
ノズル揺動角度	± 15°

吹付け面よりコア採取した供試体で吹付けモルタルの圧縮強度を確認したところ、材令28日における設計基準強度18 N/mm²に対して平均圧縮強度31 N/mm²、品質のばらつきを表す変動係数は12%となった。のり面吹付け工では、跳ね返り材料の混入が品質変動の大きな要因となるため、一般的に圧縮強度の変動係数は25%程度となることが多い¹⁾。本工法では独自の施工方法により吹き付け時のはね返り材料を抑えることで圧縮強度のばらつきを50%以上低減し、通常より品質の安定した吹付け構造物を構築することができる(図一七)。

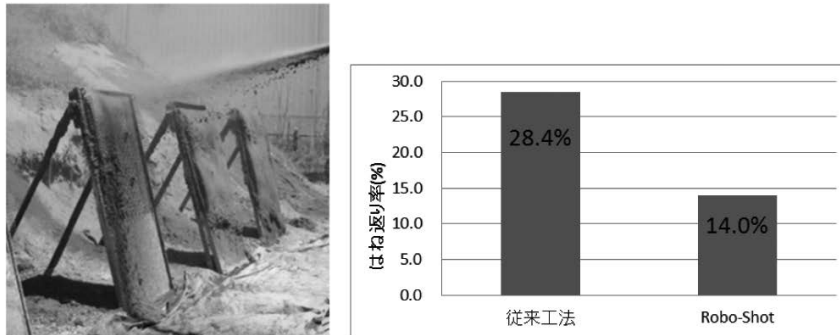
吹付け厚さ10 cmに対して出来形測定を行った結果、規格値 t ≥ 5 cm - 20 mm (200 m²当たり1箇所)に対して10.5 cmとなり規格値を満足した。吹

バックホウ(バケット容量0.8m³)ベースの場合

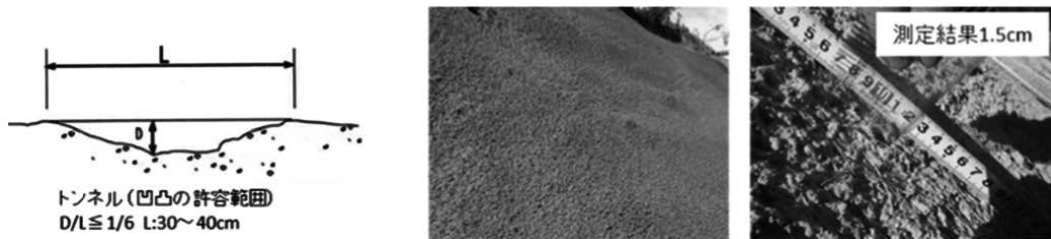
35tラフテレーンクレーンベースの場合



図一六 本工法の適用範囲と吹付け手順



図一七 跳ね返り率の測定結果



図一八 平滑性

付け面は、図一八に示すようにのり面になじみよく仕上がっている。のり面吹付け工は地山の凹凸に沿って施工するため平滑度は出来形管理項目には含まれていないが、参考に「吹付けコンクリート指針（案）トンネル編」にある方法²⁾で平滑度を確認したところ、平滑性の目安1/6以下に対して1/20となり一定の平滑性を確保できることが確認できている（図一八）。

3. 適用の効果

(1) 工期短縮

通常施工の5倍以上の吐出量を得られる本工法は、大幅な工期短縮を達成している。

例えば、モルタル吹付け工（ $t = 10\text{ cm}$ ） $2,000\text{ m}^2$ 当たりの施工期間で比較した場合、通常工法では施工期間が約40日かかるのに対して、本工法では18日と50%以上吹付け期間を短縮することができる。施工規模によって工費は同等もしくは若干高くなる場合もあるが、のり面崩壊による道路交通、物流が遮断された場合の経済的損失を考慮すれば、大幅に工期を短縮できる本工法の経済的効果は大きい。



写真一 二 通常施工



図一 九 本工法による安全施工のイメージ図

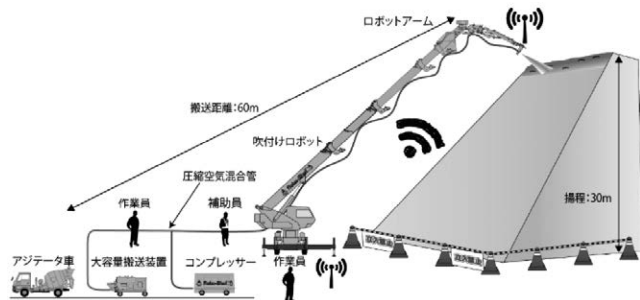
(2) 安全性の向上

のり面上で人力作業する通常施工（写真一 二）では、のり面崩壊による二次災害に巻き込まれる可能性があった。ノズルマンの動作を再現できる遠隔操作可能な吹付けロボットの開発により、人力による作業が危険なのり面上やのり面直下に立ち入らずに施工が可能

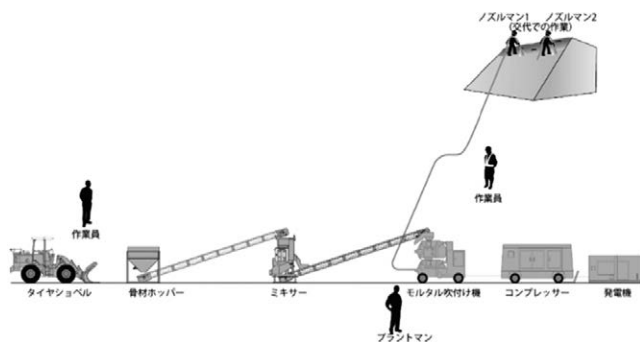
となり、作業員に対する安全性が向上した（図一 九）。緊急性を求められる応急復旧作業においても活用の効果が期待できる。

(3) 省人化

使用材料，圧送システムを変更したことでプラント人員を削減，ロボットアームを使用することでノズルマン（熟練工）が不要となり通常施工に対して作業人員を2名程度省人化できる（図— 10, 11）。のり面上での苦渋作業が不要で操作が容易な機械施工システムの開発により，他工種の労働者や，経験の浅い若年層による作業も可能となった。のり面業界における新規雇用開拓が可能となり労働力不足解消に貢献できる。



図— 10 本工法の人員配置 (3名)



図— 11 通常施工の人員配置 (5名)

(4) 安定した品質

独自の吹付けシステムとロボットアームの最適制御技術により，通常施工よりはね返り材料の混入が少なく品質が安定した耐久性の高い構造物を構築することが可能となった。跳ね返り材料の低減は，品質だけでなく施工能率の向上，産業廃棄物減少による環境負荷の低減にも効果が高い。

4. おわりに

専業土木分野，特にのり面分野においては施工の機械化が遅れていた。本工法の開発は単に吹付け工の機械化にとどまらず，のり面对策工全般の機械化を飛躍的に牽引する可能性がある。今回開発したロボットアームは吹付け作業のほか，地山削孔作業や斜面掘削作業などへも応用が可能である。様々な工種への適用を検討し，のり面对策工の安全性向上・高効率化へ貢献していきたい。

JICMA

《参考文献》

- 1) 土木学会 吹付けコンクリート指針（案）のり面編 P39 2005年7月
- 2) 土木学会 吹付けコンクリート指針（案）トンネル編 P66 2005年7月

【筆者紹介】

庭田 和之 (にわた かずゆき)
 ライト工業(株)
 開発企画室
 室長

