

吹付砕工省力化技術「ラクデショット®」の開発

(株)大林組 正会員 ○川本 卓人 (株)大林組 正会員 森田 晃司
(株)大林組 正会員 川西 貴士 日特建設(株) 正会員 窪塚 大輔
日特建設(株) 正会員 三上 登 日特建設(株) 正会員 石垣 幸整

1. 目的

わが国は平地が少なく山地・丘陵地が多い。道路工事等に伴って人工斜面（のり面）が数多く造成されてきた。防災などの観点から、のり面の安定化やのり面保護が行われてきた。数あるのり面保護工のうち、吹付砕工は、特に実績が多い工法として知られている。吹付砕工は、モルタルを用いてのり面上に格子状の枠を構築し、のり面の安定を図る工法である。のり面上に鉄筋・型枠を組立てた後、型枠内にモルタルを吹付けて構築する。すべての作業を人力で実施しており、現在に至るまで飛躍的な技術の発展には至っていない。のり面上で作業する熟練労働者の不足、のり面上での非効率な作業およびのり面からの転落・墜落災害の発生等課題が多い。また、国土交通省は、令和元年度以降、更なる ICT 活用による生産性向上を図るための要領、基準類を改定・発表している。その中で、ICT 施工の工種が拡大され、ICT のり面工（吹付工）が加えられた。吹付砕工が抱える課題の解決、技術の発展、ICT 化を達成すべく、吹付材料や吹付技術を探索し、検討を重ねた。その結果、高強度鋼繊維補強モルタル（圧縮強度



写真-1 ラクデショット®



写真-2 鉄筋・型枠組立作業

120N/mm²), 汎用バックホウおよび自動

吹付装置を使用することで、断面
200mm×200mm の吹付砕工を鉄筋不要、
型枠不要で安全かつ誰でも簡単に構築

できる新工法「ラクデショット®」を開発した（写真-1）。

表-1 配合 A

水粉体比 (%)	単位量(kg/m ³)				
	水	専用ブレ ミックス粉体	細骨材	鋼繊維 (1.0vol.%)	混和剤
20.3	180	888	1315	78.5	5.00

2. 吹付材料の試作

吹付砕工の施工の中で最も人員を要するのは型枠・鉄筋の組立作業である（写真-2）。工法全体に占める割合は、積算上約 50%である。鉄筋・型枠の組立て作業を省略できれば大幅な省力化に繋がる。しかし、鉄筋は枠の曲げ耐力を確保する上で重要な役割を担っている。そこで、モルタルを高強度化し、鉄筋の代替として鋼繊維により補強すれば、断面 200mm×200mm 程度の吹付砕工と同等の曲げ耐力が得られると考え、吹付材料に高強度鋼繊維補強モルタルを用いることとした。最初に試作した配合 A を表-1 に示す。所要の断面耐力を確保するために鋼繊維の混入率は 1vol.%とした。

のり面上に吹付けた際にモルタルにダレが生じないフロー値（JIS R 5201 に準拠）の目安は、120mm 程度とされている。モルタルを



<普通モルタル>

<配合 A>

写真-3 モルタルのフレッシュ性状



写真-4 湿式吹付機

キーワード 吹付砕工, 省力化, 高強度鋼繊維補強モルタル, 自動化

連絡先 〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2 品川インターシティ B 棟 (株) 大林組 TEL 03-5769-1302

高強度化するために多量の粉体と化学混和剤を使用することから流動性が高くなり、粘性も増大する傾向にあるため、吹付けが難しくなることが予想された。そこで、高粉体の配合 A におい

ても配合を調整し、フロー値を 120mm 前後に設定した（写真-3）。この配合 A を用いて吹付枠工で一般的に使用される湿式吹付機（写真-4）による吹付実験を実施した。繊維を混入するため、吹付機の吐出口とホースの直径は 3in とし、ホースの延長は 20m にとどめて実験した。

実験の結果、断続的な吐出の後、ただちに吐出不能となった。モルタルの粘性が高く、吹付機内部およびホース内部へのモルタルの付着による閉塞が原因であった。エア量やホースの直径を変えて実験を行ったが、吹付性能を改善することはできなかった。

3. 吹付材料の改良および吹付機の設定

吹付機への安定供給を実現するためにモルタルの配合を修正した（表-2 配合 B）。単位水量を大きくして流動性を高めることとし、目標スランプフローを 550~650mm に設定した（写真-5）。所要の曲げ耐力を確保するために鋼繊維の混入率は配合 A と同様に 1vol.%とした。また、粘性を低減するために所要の曲げ耐力と材料分離抵抗性が得られる範囲内で水粉体比を増加させた。

配合 B を安定吐出できる吹付機の設定実験を実施した。吹付機は、コンクリートピストンポンプ（以下、ピストン式と略す）およびローター式吹付機（以下、ローター式と略す）の 2 種類を比較した。ピストン式はピストンの切替え時にスライドする切替面板と固定面板との間に鋼繊維が挟まり安定的に吐出できなかった（図-1）。一方、ローター式は、ローター内に重力により自己充填されたモルタルがエアで押し出されるシンプルな構造であるため、連続して吐出させることが可能であった（図-2）。

4. 吹付システムの開発

配合 B は、ローター式によって安定した吐出ができたとしても流動性が高いため、のり面に吹付けた際にダレが生じる。また、粘性の高い材料を連続して圧送するとホース内にモルタルが付着し、早期にホースの閉塞へ繋がる。そこで、吹付けた際に枠形状を保持するための自立性の付与と圧送に適した品質の確保を目的として急硬剤を適用することとした。施工実験により、モルタルの圧送性、吹付け後の自立性および急硬剤の添加方法について検討を行った。

配合 B をローター式で吹付けする際、吐出口の近傍で急硬剤を添加する装置（急硬剤添加装置）を考案した。急硬剤の使用によって、のり面にモルタルを吹付けた際

表-2 配合 B

水粉体比 (%)	単位量(kg/m ³)				
	水	専用プレミックス粉体	細骨材	鋼繊維 (1.0vol.%)	混和剤
24.3	230	945	1131	78.5	9.45



写真-5 配合 B のフレッシュ性状

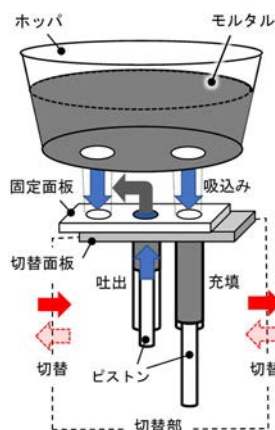


図-1 ピストン式

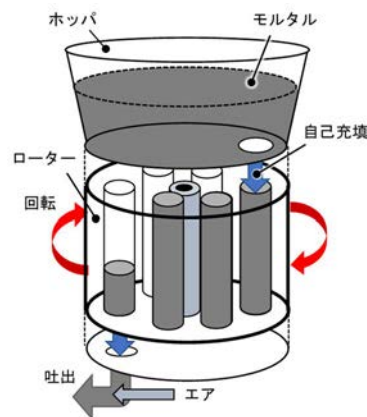


図-2 ローター式

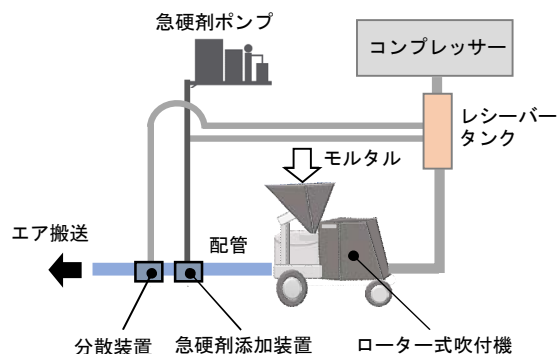


図-3 吹付システムの概要

のダレがなくなり、自立性が向上した。また、圧送性を向上させるためにホース内でモルタルを分散させる必要があると考え、複数の小径孔から、ホースの中心に向けてエアを噴射させ、モルタルを分散させる装置も考案した。これらの結果、急硬剤が添加されたモルタルがホース内に付着することなく吐出され、吐出の連続性と安定性が向上した。

ローター式、急硬剤添加装置、分散装置を組み合わせた吹付システムを構築した（図-3）。

5. 自動吹付装置の開発

(1)装置の機能

自動吹付装置の概要を図-4 に示す。所定の幅と厚さを有する平滑な枠を自動で構築するために①ノズルの往復スライド、②ノズルの揺動回転、③吹付厚の計測管理の3つの機能を備えた装置を考案した。

(2)スライド速度と平滑度の関係

土木学会の吹付けコンクリート指針（案）¹⁾（以下、指針と略す）では、吹付面の凹凸を平滑度と呼んでいる。本工法では、吹付材料の改良および吹付システムの開発によってモルタルの吐出の安定性は改善されたが、断続的な吹付けとなっている。断続的にモルタルが吐出される状況下でノズルのスライド速度が遅い場合、一様な厚さで吹き重ねることが難しい。そのため、吹付面に凹凸が生じやすく平滑度が低下する。そこで、平滑度が低下しないスライド速度の下限値を実験により求めた。モルタルの吐出量を $3.5\text{m}^3/\text{hr}$ で一定とし、スライド速度を 0.1m/s 、 0.5m/s 、 1.0m/s の3段階に変化させて、水平地盤上に枠を構築した。図-5に

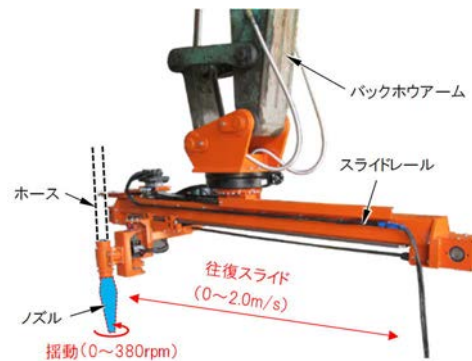


図-4 自動吹付装置の概要



<スライド速度：0.1m/s>



<0.5m/s(左上), 1.0m/s(右下)>

図-5 平滑度の比較

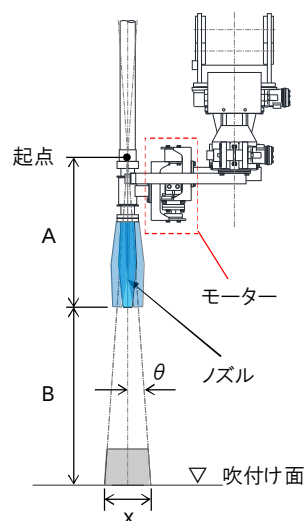


図-6 装置の断面図

表-3 実験結果一覧

スライド速度(m/s)	吹付幅(mm)	平滑度
2.0	150	×
1.5	190	×
1.0	220	△
0.7	225	○

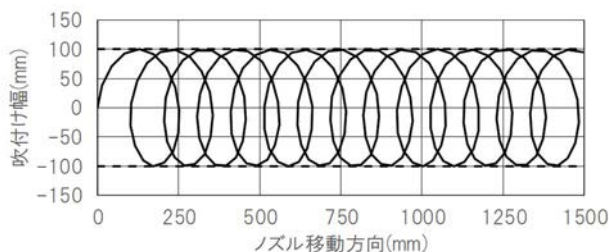
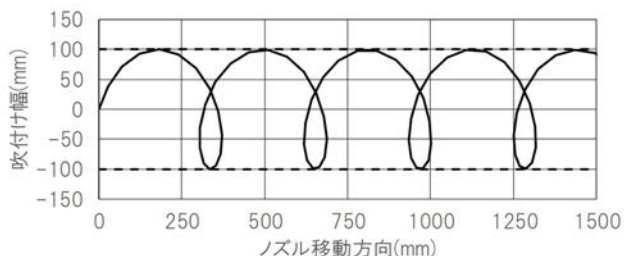


図-7 ノズル中心の軌跡と枠の形状

吹付けた枠とその平滑度を示す。スライド速度を 0.5m/s 以上とすることで凹凸を小さくできた。平滑度が低下しないスライド速度の下限値を 0.5m/s と設定した。

(3) 揺動回転数と平滑度の関係

本工法では、曲げ耐力確保の観点から従来工法と同様に吹付幅 200mm 以上を確保する。吹付幅は、自動吹付装置の揺動回転機能によって調整する。揺動回転によってノズルのスライド方向と逆向きの慣性力が断続的に作用するため、平滑度に影響を及ぼすことが懸念された。そこで、吹付幅 200mm 以上の平滑な枠の構築が可能であるか前述の実験に揺動回転を加えて実験した。図-6 に装置の断面図を示す。ノズルに所定の角度を与え、モーターで回転させることで揺動動作を付加した。回転の起点からノズル先端までの距離を A (850mm)、ノズル先端から吹付面までの距離を B (指針で、1000mm 程度がよいとされている)、吹付面でのノズル軌跡 x (吹付幅 200mm) とし、揺動回転角を $\theta = \tan^{-1}\{x/2(A+B)\}$ と定義し、 $\theta = 3.0^\circ$ に設定した。スライド速度 (0.5m/s 以上) をパラメータとし、ノズルの揺動回転数は使用したモーター最大能力の 380rpm に設定した。実験結果一覧を表-3 に示す。また、吹付ノズル中心の軌跡と枠の形状を図-7 に示す。スライド速度 0.7m/s のとき、吹付幅 200mm 以上で平滑度が最良であった。スライド速度が遅く、ノズル中心が描く軌跡(円)が重複するほど平滑度が高まることを確認した。

(4) 吹付厚管理

図-8 に吹付厚の管理の概要を示す。自動吹付装置に傾斜計とレーザー変位計を設置した。計測値をバックホウキャビン内に設置したタブレット端末に表示し、運転手にリアルタイムで伝える。傾斜計の計測値からのり面と自動吹付装置が平行 (ノズルと吹付面が直交) した理想的な状態であることを確認できる。また、レーザー変位計の計測値から吹付面との離隔と吹付厚が確認できる。この管理手法を用いて 5.(3) 節までの吹付けに最適な条件で、実際にのり面上に枠を構築した。その出来形を図-9 に示す。国土交通省の出来形管理基準の規格値を満たした。

6. 施工方法の考案

(1) 起工測量および 3D データ作成

本工法では、ベースマシンとして汎用の 3D マシンコントロールバックホウ (以下、MCBH) を用いる。まず、

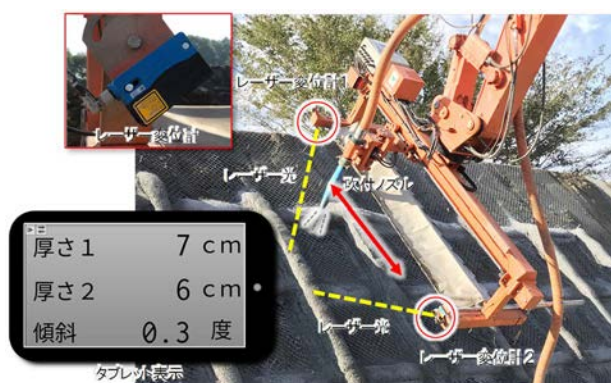


図-8 吹付厚管理の概要



厚さ 設計: 200mm
実測: 190~240mm (合格)
規格値: -30mm 以上

幅 設計: 200mm
実測: 190~210mm (合格)
規格値: -30mm 以上

図-9 枠の出来形

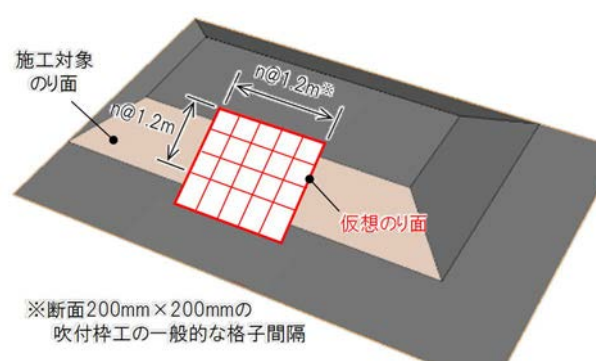


図-10 MCBH 入力用 3D データ

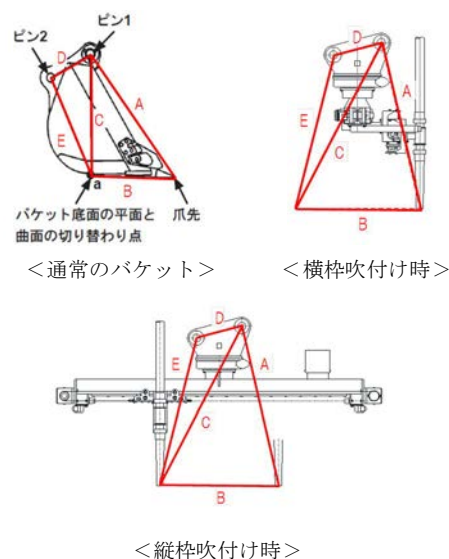


図-11 バケット寸法の設定

ドローン空撮により施工対象のり面の点群データを取得し、点群データから MCBH 入力用 3D データを作成する。3D データは、のり面から 1.0m オフセットした位置に吹付枠工の格子中心線（グリッド）を記した面データ（図-10）を作成し、MCBH に入力する。

(2) MCBH の設定と活用方法

MCBH では、使用するバケットによって個別に寸法を設定できる。本工法では、自動吹付装置をバケット形状に見立て、MCBH に寸法を設定する。設定する寸法を図-11 に示す。通常のバケットでは、A ～ E の各寸法を MCBH に入力し、バケット形状を認識させる。自動吹付装置も同様に A ～ E の寸法を入力することで、形状を認識させる。横枠吹付け時と縦枠吹付け時は、自動吹付装置を 90°回転させるが、簡単のためにバケット形状は、同一としている。

MCBH 運転席のモニターには、枠の中心線であるグリッドとバケット形状に変換された自動吹付装置が表示される（図-12）。これを利用し、モニター上に表示されるバケットの隅角をグリッドの交点に合わせることで、自動吹付装置の吹付ノズル先端を所定の位置にセットすることができる。

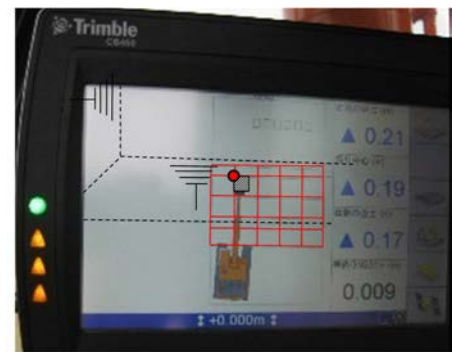


図-12 ノズル先端のセット

表-4 自動吹付装置の設定

項 目	設定値	備 考
スライド速度	0.65m/s	
スライド幅	0.8m	横枠吹付け時
	1.0m	縦枠吹付け時
揺動幅	60 mm	
揺動速度	380rpm	

(3) 自動吹付装置の設定

吹付枠工における所定の出来形、出来栄を確保するには、自動吹付装置の設定が重要である。5章の結果を踏まえて施工時における吹付ノズル自動吹付装置の標準選定を表-4 に示す。



写真-6 横枠吹付け状況



写真-7 縦枠吹付け状況

(4) 横枠の吹付手順

横枠の吹付手順は、同じ段に位置する横枠を吹付け、その後、段を変えて吹付けを行う。吹付方法は、自動吹付装置を水平にセットし、表-4 の仕様で吹付けを行う。1 枠分の横枠の吹付けを終えたら、吹付けを中断することなくバックホウを隣の枠へ走行移動させ連続して吹付けを行う（写真-6）。

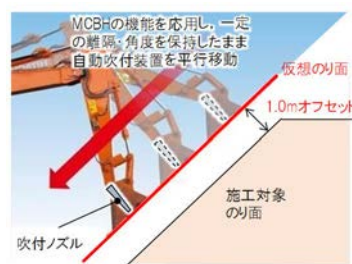


図-13 バケット角度保持機能



写真-8 格子枠吹付け完了

(5) 縦枠の吹付手順

縦枠の吹付けは、のり肩からのり尻に向かって行う（写真-7）。吹付方法は、自動吹付装置が縦枠と平行となるようにセットし、吹付けを開始する。厚さが概ね 10cm 程度になれば、装置をのり尻方向へ平行移動させる。MCBH のバケット角度保持機能を起動させ、ノズルがのり面と直交した状態かつ一定の離隔（1.0m）を保った状態で吹付ける。ノズルが常にのり面と直交した状態かつ一定の離隔を保った状態で吹付ける（図-13）。のり長が長い場合は、バックホウを一旦後退させ、同様の手順でのり尻まで吹付ける。厚さ 10cm 程度の縦枠をのり尻まで構築した後、のり尻からのり肩に向かって 10cm 程度の仕上げ吹きを行い、厚さ 20cm の縦枠を構築する。こうして格子状の枠を構築する（写真-8）。

7. 実物大枠による曲げ耐力の確認実験

(1)実験概要

枠の構造性能を確認するために、実際に吹付けにより作製した供試体を用いて静的曲げ載荷試験を行った。供試体作製状況を写真-9に示す。鉛直下方にモルタルを吹付けることで供試体を作製した。自動吹付装置の設定は、表-4の通りとし、吹付面と吹付ノズル先端の離隔は1.0mとした。試験ケースを表-5に、載荷試験状況を写真-10に示す。載荷試験は、JIS A 1106「コンクリートの曲げ強度試験方法」に準じ、3等分点載荷により実施した。3体中1体（Case3）は、上下反転し載荷した。本工法で構築した枠の断面形状は台形形状であり、上下非対称である。吹付枠工では、のり面中間における円弧すべりを想定した場合、引張縁が枠の上端となるため、上下を反転して試験を行った。試験は、材齢28日経過後に実施した。



写真-9 供試体作製状況

表-5 試験ケース

試験 ケース	断面形状(mm)			支点間距離 L(mm)	等曲げ区間 L/3(mm)
	上底	下底	高さ		
Case1	172	270	202	600	200
Case2	160	270	232	675	225
Case3	325	235	230	702	234



写真-10 載荷試験状況

(2)実験結果

載荷試験によって得られた荷重－たわみ曲線を図-14に示す。また、試験結果の一覧を表-6に示す。得られた最大荷重から最大作用曲げモーメントを算出し、断面係数を用いて曲げ強度を算定した。本工法を用いて作製した実物大の枠の曲げ強度(f_b)は 6.13N/mm^2 であった。今、設計断面を上底250mm、下底150mm、高さ200mmと安全側に設定すれば、曲げ耐力(M_u)は $6.42\text{kN}\cdot\text{m}$ となった（ $M_u=f_b\times Z/\gamma_b$ 、 Z :断面係数、 γ_b :終局限界状態の部材係数で1.15）。従来の断面 $200\text{mm}\times 200\text{mm}$ （鉄筋D10×2本×2段配筋、有効高さ $d=155\text{mm}$ ）の吹付枠工の曲げ耐力(M_u)は $5.34\text{kN}\cdot\text{m}$ であり、従来工法と同等以上の断面性能を有することを確認できた。

8. まとめ

高強度鋼繊維補強モルタルの使用とその圧送と急結を可能とする吹付システムを開発した。また、自動吹付装置を取り付けた汎用バックホウを使用することで、吹付作業を機械化した。これらによって従来の断面 $200\text{mm}\times 200\text{mm}$ 程度の吹付枠工を鉄筋・型枠不要で誰でも簡単に構築できる新工法を開発することができた。今後は、品質管理手法を確立し、試験施工においてデータを蓄積することにより、現場への展開を図っていく予定である。また、実物大の強度試験の実

施は困難であるため、現場への適用に向けて簡易な強度管理手法を確立する必要がある。

参考文献

1) 吹付けコンクリート指針（案）[のり面編]，土木学会，pp.27，2005

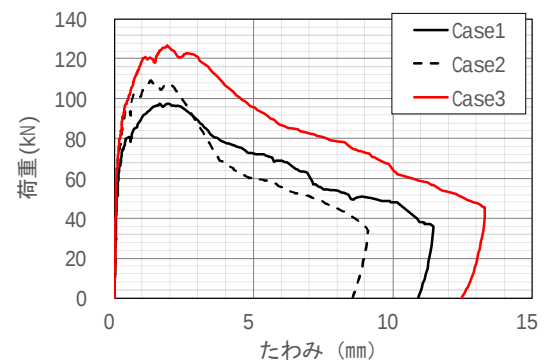


図-14 荷重－たわみ関係

表-6 試験結果一覧

試験 ケース	最大荷重 P(kN)	曲げモーメント $M=PL/6$ ($\text{kN}\cdot\text{m}$)	断面係数 Z (mm^3)	曲げ強度 $f_b'=M/Z$ (N/mm^2)	平均曲げ強度 f_b (N/mm^2)
Case1	97.48	9.75	1,596,296	6.08	6.13
Case2	109.11	12.27	2,062,493	5.95	
Case3	126.62	14.81	2,322,968	6.38	