

# 吹付けコンクリートのスランプ最適化による吐出量の増加と はね返り率に関する検討

臼井 達哉\*<sup>1</sup>・福島 淳一\*<sup>2</sup>・吉山 友太\*<sup>2</sup>・高森 秀\*<sup>3</sup>

Keywords : Shotcrete, optimization of slump, discharge rate, rebound rate, dust concentration

吹付けコンクリート, スランプ最適化, 吐出量, はね返り率, 粉じん濃度

## 1. はじめに

トンネルの山岳工法では、掘削（穿孔・装薬・発破・ずり出し）、吹付けコンクリートの施工、鋼製支保建込み、ロックボルトの設置等の各作業工程を1サイクルとする施工を繰り返すことでトンネルを構築している。一般的な生産性の向上は工期短縮を目的としているが繰り返し作業で施工を進める山岳工法では、各作業のサイクルタイムの短縮が生産性向上に直結する。

これまで山岳工法の施工にあたり、施工機械の大型化や ICT 技術を取り入れた施工管理等による生産性向上が取り組まれてきた<sup>例え</sup>。しかし、それらの取組みについては、ほとんどが掘削またはずり出し作業に関わるものであり、吹付けコンクリートのサイクルタイム短縮に関する検討事例や報告はほとんどない。これは、一般強度（設計基準強度 18N/mm<sup>2</sup>）の湿式方式の吹付けコンクリートでは単位セメント量が 360kg/m<sup>3</sup>、スランプ（以降、SL と記載）が 8-12cm のベースコンクリートを用いるといった仕様規定<sup>2)</sup>になっていることに起因している。この仕様規定により、ポンプ吐出量は 12m<sup>3</sup>/h 程度で施工することが吹付け厚さをコントロールしやすく、加えてはね返り率が小さくなることが経験的に理解され、それ以上の吐出量では、圧送圧力が高くなることで圧送によるスランプ低下や配管閉塞の発生、ノズルからのコンクリートの吐出速度が高くなることでの地山への付着性の低下やはね返り率の増加といった不具合の原因となる<sup>2)</sup>。近年、作業性の確保等から高性能減水剤を用いることで 15-20cm 程度

のスランプを用いることがあるが、そのほとんどが高強度（設計基準強度 36 N/mm<sup>2</sup>、単位セメント量 450kg/m<sup>3</sup>）の配合に対してであり、特に一般強度の配合においては吐出量の増大に関する検討は行われていない。

そこで本研究では、一般強度における吹付けコンクリートにおいてポンプ圧送による圧送負荷低減<sup>3)</sup>の観点からスランプの最適化、水平換算距離の低減を行うことで吐出量の増大に取り組んだ。あわせて、配合の改良がはね返り率、粉じん濃度に及ぼす影響について検討した。粉じん濃度測定については、厚生労働省のガイドライン<sup>4)</sup>に基づき実施した。

## 2. 吹付けコンクリートの吐出量の増大

### 2.1 圧送負荷の低減による吐出量増大の検討

吹付けコンクリートの吐出量を 12 m<sup>3</sup>/h 程度としているのは、それ以上に吐出量を増加させると、ポンプが脈動することや、ベースコンクリートの流動性が不足することによる配管閉塞や、吐出速度の増加によってはね返りが大きくなってしまうためである。吐出量を増大させるには、コンクリートポンプにかかる圧送負荷を低減することが必要であるが、圧送負荷は水平管 1 m 当りの管内圧力損失とポンプ配管の水平換算距離の積である<sup>3)</sup>。そのため、コンクリートポンプ最大圧送負荷を低減させるためには、水平管 1m 当たりの管内圧力損失を低減する、または水平換算距離を低減せるといった 2 つの方法が考えられる。

\* 1 技術センター 社会基盤技術研究部 先端基盤研究室

\* 2 九州支店 土木工事作業所

\* 3 ポゾリスソリューションズ

表-1 吐出量増大の検討に用いたコンクリートの配合

Table 1 Mix proportion for increased discharge rate

配合	SL (cm)	SF* (mm)	W/B (%)	s/a (%)	air (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					SP (B×%)
						W	C	FA (R) <sup>注)</sup>	S <sup>注)</sup>	G	NT
N	10	-	54.2	60.0	2.0	195	288	123	970	721	-
改良1	18-21	380-430									0.6-0.8
改良2	23-24.5	500									1.0

注：Cの20%wt, Sの5%wtをFAに置換。結合材量(B)は、360kg/m<sup>3</sup> \*スランプフロー(SF)は参考値として記載。

本研究では、まず水平管1m当たりの管内圧力損失の低減について検討した。水平管1m当たりの管内圧力損失は、SLが大きい配合ほど小さくなるが単純に圧送性のみを改善すべくSLを大きくした配合では、流動性が高くなることで吹付けコンクリートと地山が一体化するために必要な付着性が低下し、はね返りが大きくなってしまふことが想定される。そこで、配合の改良として高性能減水剤を用いてSLを調整し、SLが異なる3つの配合を用いて、吹付けコンクリートの圧送性と地山との付着状況を確認することではね返り率を大きくすることなく吐出量を増大することができる最適なSLについて検討を行った。その上で、圧送前後のコンクリートの性状変化をできる限り小さくすることを目的に水平換算距離の低減を試みた。

## 2.2 ベースコンクリートのスランプの最適化

### 2.2.1 検討配合

検討したコンクリートの配合と使用材料を表-1、表-2に示す。はね返り率の増大を招かずに吐出量を増加することができる最適なSLを把握するために、従来の高性能減水剤を使用しないSL10cmのN配合と高性能減水剤でSLを調整した改良1(SL18-21cm)と改良2(SL23-24.5cm)の3配合において実施した。SLの大きさの調整は、単位水量の増加と高性能減水剤の添加があるが、単位水量の増加によるスランプの増加はコンクリートの粘性が低下し材料分離や付着性状が低下することが想定されたため、高性能減水剤を添加により調整を行った。その後、実工事において吹付けを行い、吹付け性状の評価を目視により行った。

### 2.2.2 検討結果

目視による確認によりSL10cmのN配合では、吐出量12m<sup>3</sup>/hよりも大きくすると、コンクリートの流動性が不足することで吐出圧の増加に伴うSLの低下やポンプの脈動が発生した。その結果、はね返りが大きくなっていることが目視により確認でき、はね返りが大きくならずに施工できる吐出量は指針<sup>2)</sup>で報告されてい

表-2 コンクリートの使用材料(吐出量増大の検討)

Table 2 Concrete material for increased discharge rate

記号	名称	(表乾)密度
C	普通ポルトランドセメント	3.16 g/cm <sup>3</sup>
FA (R)	フライアッシュJIS II種(R産)	2.35 g/cm <sup>3</sup>
S	山砂	2.58 g/cm <sup>3</sup>
G	砕石1505	2.72 g/cm <sup>3</sup>
NT	吹付けコンクリート用高性能減水剤	-

表-3 吐出量増大の検討結果

Table 3 Results for increased discharge rate

配合	施工可能な最大吐出量	評価
N	12m <sup>3</sup> /h	流動性不足
改良1	20m <sup>3</sup> /h	流動性と粘性のバランスがよく吐出量増加
改良2	16m <sup>3</sup> /h	流動性に対して粘性が不足している

る12m<sup>3</sup>/h程度が上限値であった。次に、SLが最も大きい23-24.5cmの改良2の配合では、吐出量を16m<sup>3</sup>/h程度までは、はね返り率が大きくなることなく施工することができ、N配合よりも増大することができた。しかし、16m<sup>3</sup>/h以上の吐出量としたところコンクリートの粘性に対して流動性が高すぎることで、ノズルからの排出時、粗骨材が分離しモルタルのみが吐出されてしまうことで地山への付着が悪化、はね返り率が大きくなった。一方で中間のSLであるSL18-21cmの改良1では、改良2における施工可能な最大吐出量16m<sup>3</sup>/hを超えてもはね返りが大きくなることはなく、最大で20m<sup>3</sup>/hの吐出量においてもはね返りが大きくなることなく施工することができた(表-3)。以上の結果から単純にSLを大きくすることで圧送負荷を低減するだけでは、はね返り率が大きくなってしまふこと、吐出量を増加させることができる最適なスランプが存在することが明らかになった。なお、ベースコンクリートのSLを10cmから18-21cmに変更することで、管内圧力損失の標準値<sup>3)</sup>をもとに単位1m当たり管内圧力損失を算出すると、30%程度の低減が期待できるものであった。

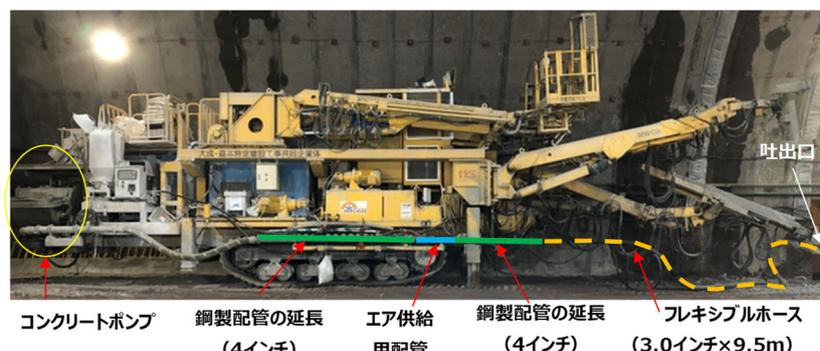


写真-1 改良後の吹付けコンクリート機の配管構成  
Photo.1 Piping configuration of the improved shotcrete machine

### 2.3 水平換算距離の低減

ベースコンクリートのSLの最適化に加え、圧送前後のコンクリートの性状変化をできる限り小さくするために水平換算距離の低減を試みた。配管構成の改良による水平換算距離の低減を表-4、吹付ロボットにおけるコンクリートポンプから吐出口までの配管構成を写真-1に示す。配管は、コンクリートポンプ吐出口（8インチ）から先端吐出口（2.5インチ）まで徐々に管径が小さくなる。特に、先端吐出口に接続しているフレキシブルホースは長さ15m、ホース径2.5インチであることから、配管構成上で最も管内圧力損失が大きい箇所となる。そこで、まずフレキシブルホース径を2.5インチから3.0インチにサイズアップを行った。さらに先端吐出口に接続しているフレキシブルホースを施工上必要な最低限の長さ9.5mまで短くし、鋼製配管4インチを3m長くすることとした。配管構成の改良によって、吹付ロボットポンプから先端吐出口までの水平換算距離を15.5m程度低減することができたと推定される<sup>3)</sup>。

ベースコンクリートのSLの最適化とコンクリート配管水平換算距離を低減することで、吐出量を12 m<sup>3</sup>/hから最大で20 m<sup>3</sup>/hに増加させることが可能となった。本章では、はね返りの状態を目視により定性的に評価したが、重要なパラメータであることから次章にてはね返り率の測定を行うことで定量的な評価を行うこととした。

## 3. ベースコンクリートのスランプ最適化がはね返り率、粉じん濃度に及ぼす影響

### 3.1 概要

2章では、はね返りの大小について目視により定性的に評価していたが、重要なパラメータであることから定量的に評価することとした。一方、厚生労働省「ざい道等建設工事における粉じん対策に関するガイドラ

表-4 水平換算距離の低減

Table 4 Reduction of horizontal conversion distance

項目	改良前		改良後	
	長さ	直径	長さ	直径
フレキシブルホース	15.0m	2.5インチ	9.5m	3.0インチ
鋼製配管の延長	-	-	3.0m	4.0インチ
水平換算距離	40m		24.5m	

イン」<sup>4)</sup>（以降、新ガイドラインと記載）にて、トンネル工事における粉じん障害への対策をより推進することを目的とし、粉じん濃度の目標値、測定方法が改正され令和3年4月から適用されている。はね返り率の大小は粉じん濃度に大きく影響すると考えられることから、はね返り率の測定と粉じん濃度の測定を同時に行い、両者の関係を把握することとした。

### 3.2 はね返り率と粉じん濃度の測定方法と測定環境条件

はね返り率は、JSCE-F-563：吹付けコンクリート（モルタル）のはね返り率試験方法（パネル型枠）に基づき測定した。はね返り率測定後、後述する測定を行った。表-5に示す4配合のうちUG配合を除く3配合については、パネル型枠に吹付けたコンクリートからJISA 1107に準拠しφ50mmのコア供試体を採取した。その後、φ50mm×100mmに成形し、材齢28日まで封かん養生を行った後、吹付け前のベースコンクリートともにJISA 1107に基づき圧縮強度を測定した。粉じん濃度測定は、新ガイドラインの定置式の試料採取機器を用いる方法に基づき実施した。新ガイドラインでは、粒径が4.0μm以下であるレスピラブル（吸引力）粉じん（以降PM4.0と記載）を対象としており、S社製デジタル粉じん計（PM4.0 サイクロン搭載）を用い、切羽から概ね10m、30mおよび50m地点の両側壁面、地上から約1.0m地点での計6カ所にて同時測定した。あわせて旧規定で対象としている全粉じんの粉じん濃度と

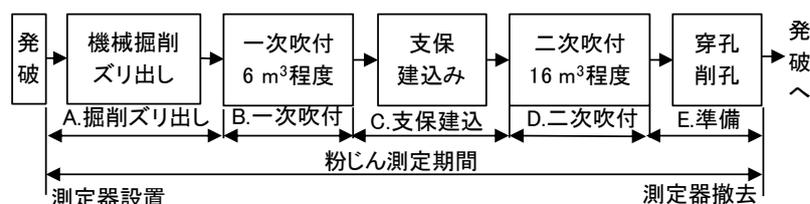


図-1 本研究での吹付けコンクリート施工サイクル

Fig.1 Shotcrete construction cycle in this study

表-5 粉じん濃度、はね返り率の測定に用いたコンクリートの配合

Table 5 Mix proportion for measuring the dust concentration and the rebound rate

配合	SL (cm)	W/B (%)	s/a (%)	air (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					SP (B×%)		粉じん低減剤 (B×%)
					W	C	FA (M) <sup>注)</sup>	S <sup>注)</sup>	G	NT	UG	Ds
N	10	56.1	59.0	2.0	202	288	123	960	713	-	-	-
NT	21									0.6	-	-
UG	21									-	0.6	-
NT+Ds	21									0.6	-	0.1

注：Cの20%wt, Sの5%wtをFAに置換。結合材量(B)は、360kg/m<sup>3</sup>

比較をするために、切羽から30mの地点に全粉じんの粉じん濃度測定機器を設置した。トンネル掘削の施工サイクルを図-1に示す。粉じん計測器は、発破による故障を防ぐため、発破完了の20分後に設置し、二次吹付が完了し、穿孔・削孔作業が開始前に撤去することとした。そのため、本計測の粉じん測定期間に、穿孔から発破までの計測は含まれていない。本試験を実施したトンネルの断面積は108m<sup>2</sup>であり、集塵機は切羽から60-80mの間にて設定値2500m<sup>3</sup>/min、送風機の風管位置は切羽から40-60mで設定値2200m<sup>3</sup>/minの稼働とし同一条件で測定を行った。なお、吹付けコンクリートの吐出量は、15-16m<sup>3</sup>/hの同一条件で行った。測定した配合、使用材料を表-5、表-6に示す。配合は、SL10cmのN配合と高性能減水剤でスランプを調整したSL21cmの配合とした。SL21cmの配合については、従来の高性能減水剤(NT)を使用した配合(NT)、粉じん低減型高性能減水剤を使用した配合(UG)、NTの配合に粉じん低減剤を加えた配合(NT+Ds)の3配合とし、全4配合の測定を行った。なお、はね返り率、粉じん濃度の測定は、フレッシュ性状試験を実施し規格値を満足していることを確認した後、実施した(表-7)。

### 3.3 粉じん濃度およびはね返り率の測定結果

#### 3.3.1 配合の改良が粉じん濃度に与える影響

Nにおけるそれぞれの切羽からの距離のPM4.0粉じん濃度の経時変化を図-2に、各配合の全測点、各作業工程、吹付けコンクリート施工時の粉じん濃度の平均値を表-8に示す。各切羽からの距離の粉じん濃度をみると自明ではあるが切羽に近い測定位置となる切羽から10m地点の方が30m、50m地点よりも高い粉じん濃

表-6 コンクリートの使用材料(粉じん濃度、はね返り率)

Table 6 Concrete material (The dust concentration and the rebound rate)

記号	名称	(表乾)密度
C	普通ポルトランドセメント	3.16 g/cm <sup>3</sup>
FA (M)	フライアッシュJIS II種(M産)	2.30 g/cm <sup>3</sup>
S	山砂	2.58 g/cm <sup>3</sup>
G	碎石1505	2.72 g/cm <sup>3</sup>
NT	吹付けコンクリート用高性能減水剤	-
UG	吹付けコンクリート用高性能減水剤(粉じん・はね返り低減タイプ)	-
Ds	セルロース系粉じん低減剤	-

表-7 フレッシュ性状試験結果

Table 7 Results for fresh concrete property

配合	スランプ(cm) 21(10)±2.0cm	空気量(%) 2.0±1.5%	コンクリート温度(°C)
N	12.0	1.3	17
NT	20.0	1.3	16
UG	20.0	1.5	14
NT+Ds	19.0	3.1	17

表-8 各作業工程の粉じん濃度の平均値

Table 8 Average value of dust concentration in each work process

工程	PM4.0 粉じん濃度 (kg/m <sup>3</sup> )			
	N	NT	UG	NT+Ds
A.掘削ズリ出し	2.33	2.20	0.31	0.74
B.一次吹付	1.97	2.12	1.87	1.62
C.支保建込	0.90	0.40	0.24	0.33
D.二次吹付	2.44	1.97	1.80	1.69
E.準備*	0.25	0.31	0.13	0.33
A-Eの平均値**	1.84	1.70	0.98	1.03
BとDの平均値**	2.40	2.01	1.80	1.69

\*準備時間は、吹付完了後35分で統一し、濃度を算出

\*\*作業時間の重みを考慮した平均値を算出

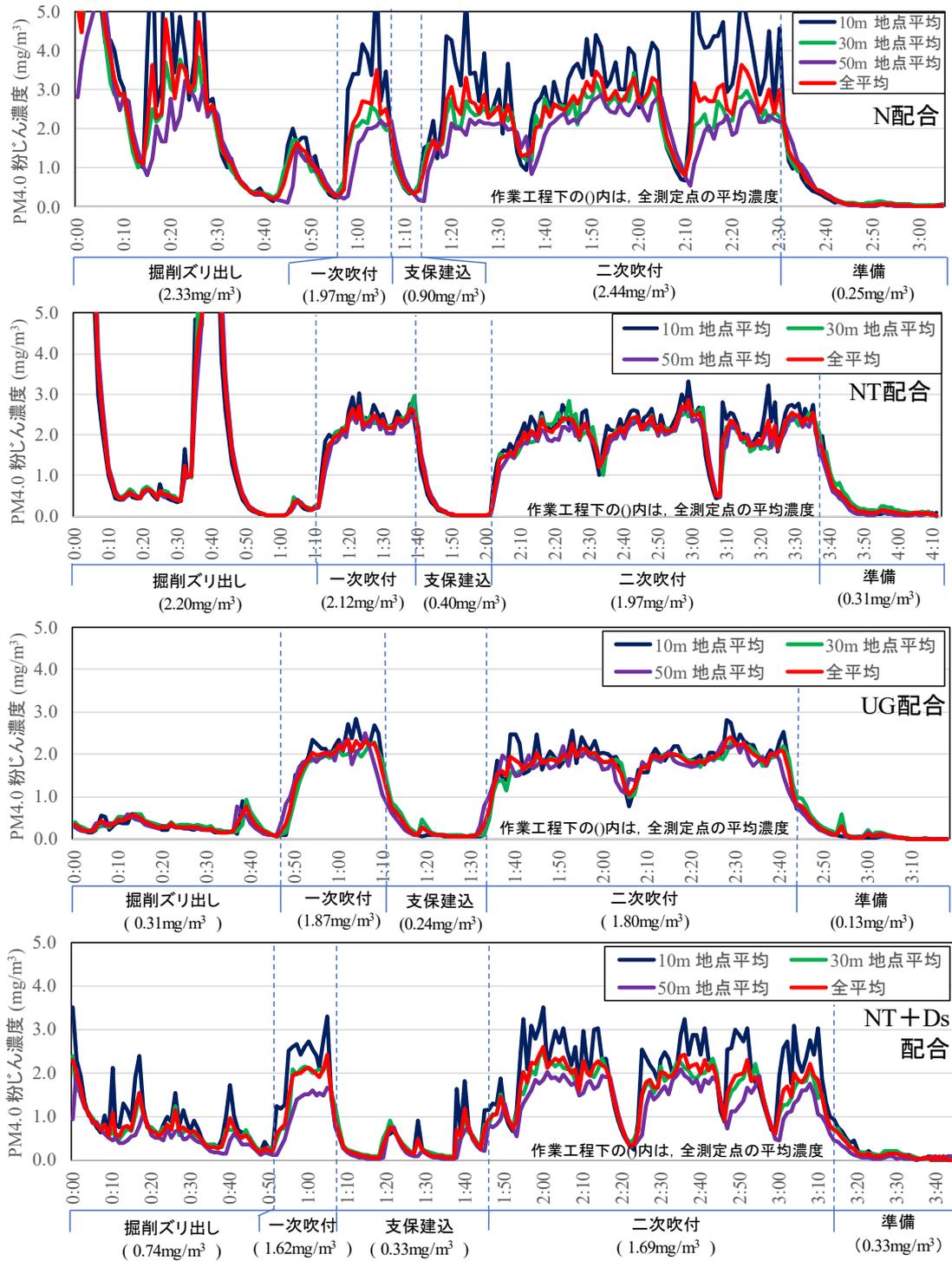


図-2 切羽からの距離毎のPM4.0 粉じん濃度の経時変化

Fig.2 Time depending on PM4.0 dust concentration per distance for the tunnel working face

度を示していることがわかる。次に、各作業サイクルの粉じん濃度をみると支保建込、準備では、粉じんはほとんど発生せず、主として粉じん濃度が高くなるのは吹付コンクリート施工時であった。一方で機械掘削、ズリ出しでは、NとNTで粉じん濃度が高く、UGとNT+Dsは低くなり配合毎に異なる傾向であった。この工程では配合の違いは関係ないことから発破後の機械掘削の作業強度によって粉じん濃度が大きく異なること

を示している。次に配合の違いを明確とするために、吹付けコンクリート施工時の平均粉じん濃度と比較すると  $N > NT > UG > NT+Ds$  の順で粉じん濃度が低減されていることがわかる。これは混和剤を使用する事によるスランプの増加による圧送性の改善、ペースト部の粘性の向上によりコンクリート吐出時の材料分離や散乱、噴発が改善されたことが要因として考えられる。そのため、コンクリートの粘性が高くなるUGやNT+Ds

の方が増粘剤成分の添加されていないNTよりも粉じん濃度が小さくなったと推察される。

### 3.3.2 はね返り率と粉じん濃度の関係

各配合での吹付コンクリート施工時におけるはね返り率とPM4.0の粉じん濃度の関係を図-3に示す。PM4.0の粉じん濃度とはね返り率は高い相関関係があることがわかる。コア供試体による圧縮強度試験結果とベースコンクリートのとの強度低下を表-9に示す。この結果をみると、粉じん濃度が小さく、はね返り率の小さい配合ほど、強度低下は小さくなっている。最適なスランプでかつ粘性を向上させたベースコンクリートを使用し吹付けコンクリートを施工することは、粉じん濃度が低減するといった坑内の作業環境の改善ではなく、コンクリートの品質向上、加えてはね返りが低減することで生産性や経済性に優れた施工を可能とすることが示された。

### 3.3.3 PM4.0と全粉じんの粉じん濃度の関係

ここでは、本研究の主題とは逸れるが、PM4.0と全粉じん濃度の関係について検討した事例がほとんどないことから記載することとした。NT配合の30m地点における各作業工程のPM4.0と全粉じんの経時変化を図-4、

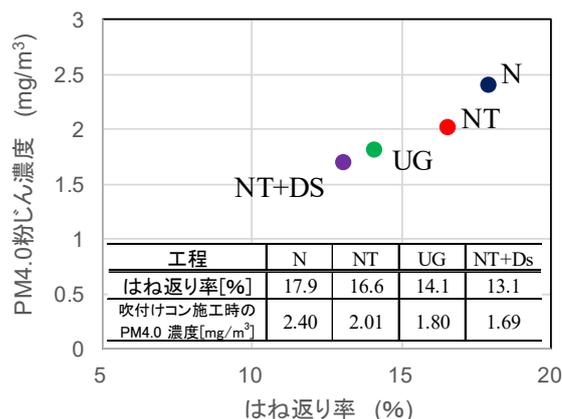


図-3 PM4.0とはね返り率の関係

Fig.3 Relationship between PM4.0 and the rebound rate

表-9 吹付けコンクリートの圧縮強度と強度低下  
Table 9 Compressive strength and strength reduction rate

配合	材齢28日圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )		強度低下率 (2)/(1)
	(1)ベースコン	(2)吹付けコン	
N	41.6	25.0	0.60
NT	-	29.9	0.72*
NT+Ds	38.0	33.9	0.89

\*: W/Bが同一のためベースコンの強度をN配合と同等と仮定

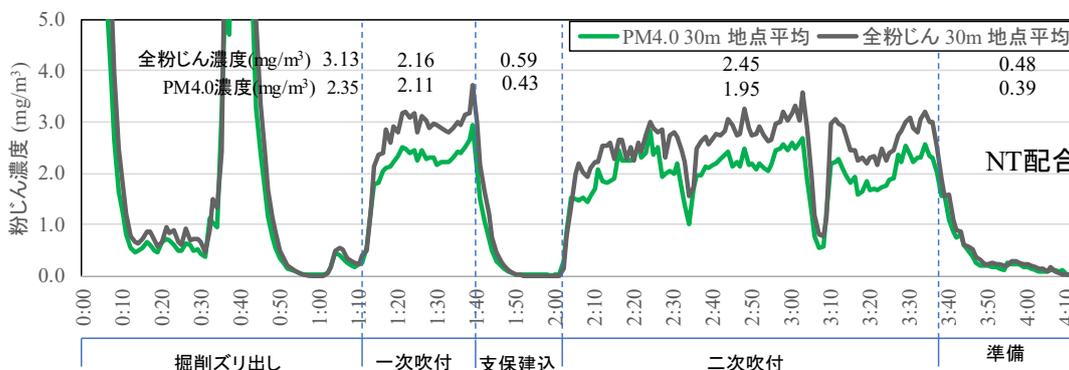


図-4 PM4.0と全粉じん濃度の測定結果 (切羽から30m地点, NT配合)

Fig.4 Results of PM4.0 dust concentration and total dust concentration (30m from the tunnel working face, NT)

表-10 作業工程毎のPM4.0と全粉じんの粉じん濃度平均値

Table 10 Average values of PM4.0 dust concentration and total dust concentration

工程	N			NT			UG			NT+Ds		
	(1)PM4.0	(2)全粉じん	(1)/(2)									
	(mg/m <sup>3</sup> )			(mg/m <sup>3</sup> )			(mg/m <sup>3</sup> )			(mg/m <sup>3</sup> )		
A.掘削ズリ出し	2.19	2.95	0.74	2.35	3.13	0.75	0.34	0.48	0.70	0.72	1.03	0.70
B.一次吹付	1.72	2.09	0.82	2.11	2.65	0.80	1.77	2.26	0.78	1.59	2.17	0.74
C.支保建込	0.83	1.11	0.75	0.43	0.59	0.72	0.29	0.43	0.69	0.36	0.49	0.73
D.二次吹付	2.26	2.76	0.82	1.95	2.45	0.80	1.77	2.28	0.78	1.63	2.15	0.76
E.準備*	0.27	0.38	0.71	0.39	0.48	0.82	0.17	0.28	0.61	0.33	0.45	0.74
A-Eの平均値**	1.71	2.19	0.78	1.74	2.24	0.78	0.98	1.28	0.76	1.01	1.36	0.74

\*準備時間は、吹付完了後35分で統一し、粉じん濃度を算出

\*\*作業時間の重みを考慮した平均値を算出

30m 地点の作業工程毎の PM4.0 と全粉じんの粉じん濃度平均値を表-10 に示す。吹付コンクリートの施工に伴う全粉じん量と PM4.0 の比は 0.79 であった。それに対し吹付コンクリートの施工以外の工程（掘削ズリ出し、支保建込、準備）の全粉じん量と PM4.0 の比は、吹付コンクリートの施工における比よりも 0.05-0.1 程度小さくなっている。これは、PM4.0 は吹付けコンクリートの施工時の方がその他の作業よりも発生しやすいことを示している。1 サイクルの平均値で見ると、全粉じん量と PM4.0 の比は 0.74-0.78 でありほぼ同一の結果であった。

#### 4. まとめ

本研究では、スランプの最適化、水平換算距離の低減を行うことで吐出量の増大に取り組み、配合の改良が粉じん濃度、はね返り率に及ぼす影響について検討した。

得られた知見は以下のとおりである。

- ・はね返り率を増加させずに吐出量を増加することができる最適なスランプは 18-21cm であり、吐出量は最大で 20m<sup>3</sup>/h であった。
- ・粉じん濃度およびはね返り率は、改良前の SL10cm の配合よりも改良した SL21cm の配合の方が小さくなる。SL21cm の配合の中でもペーストの粘性が高い配合ほど小さい結果となった。これは、ペースト部の粘性の向上によりコンクリート吐出時の材料分離や散乱、噴発が改善されたためと考えられる。

- ・粉じん濃度とはね返り率は、正の相関関係がある。加えて、はね返り率の低い配合ほど、ベースコンクリートに対する強度低下が小さくなった。
- ・最適なスランプでかつ粘性を向上させたベースコンクリートを使用することは、坑内の作業環境の改善に加え、吹付けコンクリートの品質の向上や、はね返りの低減による生産性の向上に寄与することが明らかになった。

本研究では、吐出量の増大することができる最適なスランプの大きさについて実工事の吹付け施工をもとに評価を試みた。今後はよりはね返りの低減が期待できる配合選定の手法について検討しさらなる吹付けコンクリートの品質向上や生産性の向上に努めていきたい。

#### 謝辞

本技術の現場適用および公表にあたり、工事関係者各位に多大なるご協力を頂きました。ここに付記して感謝致します。

#### 参考文献

- 1) (一社) 日本建設業連合会：2019 年生産性向上事例集～土木編～，pp72-73，2019
- 2) 土木学会：コンクリートライブラリー121「吹付コンクリート指針(案)トンネル編」，pp44，45，64，2005
- 3) 土木学会：コンクリートライブラリー135「コンクリートポンプ施工指針[2012 年度版]」，pp17-19，2012
- 4) 厚生労働省「ずい道等建設工事における粉じん対策に関するガイドライン」，2020