

粉じん低減を目的とした実大模擬トンネルでの吹付け実験

野間達也 大下武志^{*1}

概 要

厚生労働省は、平成12年12月に示したガイドラインにおいて、トンネル坑内粉じん濃度の目標値を $3\text{mg}/\text{m}^3$ 以下とすることを規定した。これを受け、(独)土木研究所は平成14～16年度に官民18機関と共同研究「ずい道建設における吹付け作業時の発生粉じん量の削減および局所集じんシステムの開発」を実施した。

本報では、この共同研究の成果の一部のうち、断面 80m^2 、長さ100mの実物大模擬トンネルにおける、吹付けコンクリートの低粉じん技術についての定量的な評価について、以下の結果を示す。

- ・発生粉じん濃度は総圧送エア量に依存すること、エアを用いなくても粉じん発生を防げないことが明らかとなった。
- ・はね返り率についても総圧送エア量との相関性は認められたものの、さらに検証が必要なことが明らかとなった。

Experiments into Dust Reduction during Spraying of Concrete using a Full-scale Model

Abstract

In December 2002, the Ministry of Health, Labor and Welfare announced a guideline specifying that density of dust in tunnels under construction should be kept to less than $3\text{mg}/\text{m}^3$.

In order to achieve this, the Public Works Research Institute conducted cooperative research with 18 institutes (from 2002 to 2005) in order to “develop methods for the reduction of dust while spraying concrete during tunneling and methods for the local dust collection”.

In this paper (as a part of results of this collaborative research) a new concrete spraying method is quantitatively evaluated based on experiments using a full scale tunnel model with a cross-sectional area of 80m^2 and length of 100m. The following findings were made:

- ・The density of dust generated depends on the volume of compressive air, although methods that do not use compressive air still generate dust.
- ・The rebound ratio of the spraying concrete is related to the compressive air volume. However, further examinations are necessary to detail the relationship.

キーワード: 吹付けコンクリート, 粉じん, 低減

*1 (独)土木研究所技術推進本部主席研究員

§1. はじめに

厚生労働省は、平成12年12月に示したガイドライン¹⁾において、坑内粉じん濃度の目標値を $3\text{mg}/\text{m}^3$ 以下とすることを規定した。

一方、現在の山岳トンネル工事はほとんどNATMにより施工されており、この中でも吹付けコンクリートはNATMにおける主要支保部材となっている。この吹付けコンクリートは、現状では大量の圧縮空気によりコンクリートを圧送し、また吹付けコンクリートに不可欠な急結剤についても粉体急結剤を用い、圧縮空気により添加される工法が主流となっている。

ガイドラインの目標値を現行の吹付け方法で満足することは困難であり、目標値の達成に向け様々な対策(集じん機の設置や粉じん低減剤の使用など)が行われている。これらはある程度の成果を上げているが、吹付時の粉じん量が減少していないことや、コストアップにつながることから根本的な解決策とはなっていない。これは、吹付け方法として圧縮空気を用い、急結剤として粉体急結剤を用いる点に最大の課題があるものと考えられる。

これらを受け、(独)土木研究所は平成 14～16 年度に官民 18 機関と共同研究「ずい道建設における吹付作業時の発生粉じん量の削減および局所集じんシステムの開発」を実施した。フジタは、共同研究の幹事会社の役割を担い、全ての実験・研究に参画した。本報では、この共同研究の主な成果について述べる。

§2. 実大模擬トンネルでの吹付け実験

2.1 実大模擬トンネルの概要

図 1 に模擬トンネルの設備及び計測位置を示す。

2.1.1 模擬トンネルの設備

模擬トンネルの内空断面は、一般的な2車線道路のトンネル断面形状となっており、高さが約8m、幅が約13m、断面積は約 80m^2 である。全長は100mあり、鉄筋コンクリート(RC)造の東側30m区間と鉄骨造の西側70m区間の2つの部分に分かれている。

設備としては、送風機と集じん機がある。送風機の最大風量は $1500\text{m}^3/\text{分}$ であり、一般的なトンネル建設工事現場の坑内平均風速 $0.3\text{m}/\text{秒}$ を再現することができる。集じん機はフィルター形式で、最大処理風量は $1800\text{m}^3/\text{分}$ である。集じん機はトラックの荷台に常時積載された状態にあり、実験条件に合わせて移動することができる。

2.1.2 計測項目

①粉じん計測

図 1 に今回実施した計測項目と計測位置を示す。デジタル粉じん計を切羽から10m地点に2台、 $30\cdot 50\text{m}$ 地点に3台ずつ設置するとともに、切羽から $10\text{m}\cdot 50\text{m}$ 地点にローボリュームエアサンプラーを設置し、質量粉じん濃度も測定した。なお、今回使用したデジタル粉じん型は、柴田科学(株)社製のLD-3Kである。

②はね返り率

はね返り率の測定方法としては、吹付け終了予想の3分程度前に吹付けをいったん中断し、床面にシートを設置後吹付けを再開し、吹付け終了後にシートを回収し、リバウンド重量を測定した。はね返り率計測時のコンクリート吹付け量は、時間による配分と、コンクリートポンプのピストンの往復回数を計測し、往復回数による配分の平均値としたが、時間による配分により求めた量とピストンの往復回数による配分との大幅な差は認められなかった。

2.2 低減技術の概要

共同研究では、低減技術を用いない場合(以下無対策)を基準として、9つの低減技術について粉じん低減性を定量的に評価したが、本報では無対策を含む以下の5つの技術について取り上げる。

2.2.1 無対策の場合

図 2 に通常の粉体急結剤使用時の吹付け機のコンクリート、コンクリート圧送エア(以下ほぐしエア)、急結剤添加用エアのフローを示す。図に示されるように、コンクリートはポンプによりほぐしエア添加ノズルまで圧送後、 75kW コンプレッサによるほぐしエアにより急結剤添加ノズルまで圧送され、最後に 37kW コンプレッサにより急結剤が添加され、吹き付けられる。ここで、本共同研究では図に示し

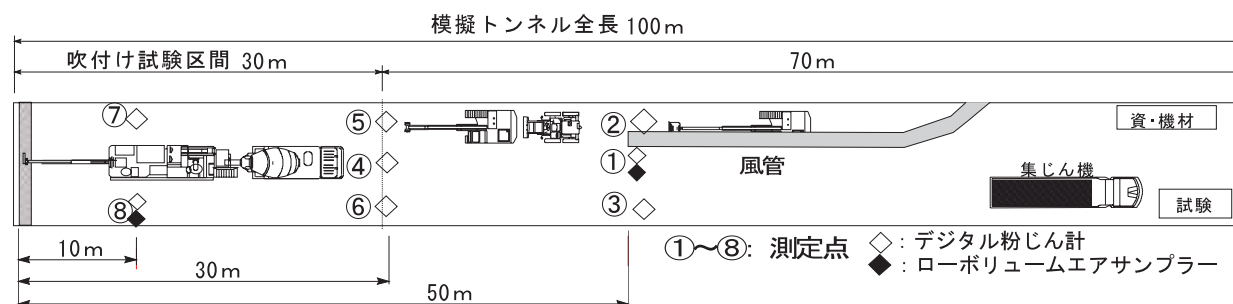


図1 模擬トンネルの設備および計測項目

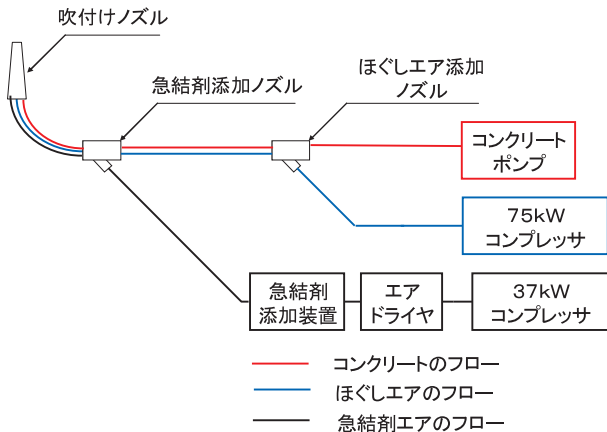


図2 粉体急結剤使用時のコンクリート・エアのフロー

たように両コンプレッサに流量計を取り付け流量を計測したが、ここでは両者の和を総圧送エア量とする。

2.2.2 粉じん低減剤

粉じん低減剤とは、主成分がセルロース系の水溶性高分子であり、水に溶解してセメントペーストの粘性を高め、吹付け時の粉じんの発生を低減するものである。

標準添加率としては対セメント比 0.1 質量%であり、材料の添加方法としては、コンクリート中に所定量を添加して分散混合され、水に十分に溶解しその性能が発揮される方法で行う。一般的には、自動計量で添加する装置に量槽に添加する方法（プラント添加方式）が用いられる。

一方、JIS 工場のコンクリートプラントでベースコンクリートを製造する場合など、供給機の設置が困難な場合には、可溶性の袋に詰められた粉じん低減剤をアジテータラックのドラム内に手で投入し、高速攪拌して練り混ぜる方法（アジテータラックへの手投入方式）を用いる場合がある。

2.2.3 スラリー急結剤

スラリー急結剤による技術とは、専用の粉体急結剤をコンクリートに添加する直前に専用の装置（スラリー化ノズル）を用いて連続的に水と混ぜてスラリー化し、ベースコンクリートに添加・混合する技術である。

スラリー急結剤を用いるとコンクリートとの混合性が向上し、粉じんの発生を低減できる。

ベースコンクリートには、水溶性高分子からなる粉体の混和剤「急結助剤」をベースコンクリート練混ぜ時に添加する。「急結助剤」を添加するとベースコンクリートの粘性が上がるが、作業性は大きく変わらない。

吹付けには専用のシステム（スラリーショットシステム）を用いる。このシステムは、粉体急結剤の添加装置とスラリー化に必要な水を供給する装置（水ポンプ）が自動的に連動して作動し、しかもコンクリート吐出量に合わせ急結剤の添加量を変えると自動的に添加水量が変わり、粉体急結剤とスラリー化水の比を常に一定に保つことができる。図3にスラリーショットの概要を示す。

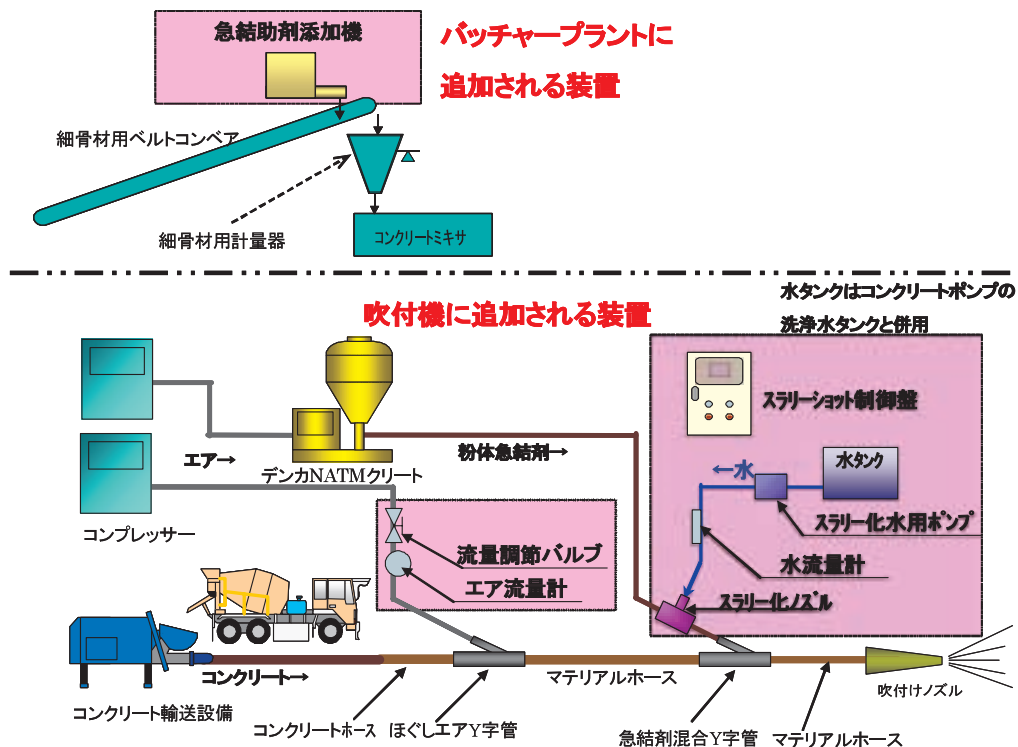


図3 スラリーショットの概要

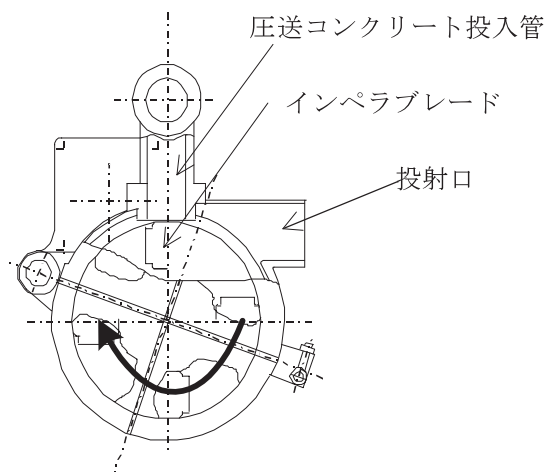


図 4 インペラヘッドの模式図

2.2.4 液体急結剤

日本に NATM が導入された当初は、吹付けコンクリートに用いる急結剤としては、液体が使用されていた。しかし、従来の液体急結剤は強度の立ち上がりが遅いこと、湧水部への付着性が悪いこと、強アルカリで皮膚に付着した場合などの安全性に問題があることなどの課題があった。このため、10年ほど前より、初期強度特性に優れ、弱酸性（pH3程度、レモン水やコーラとほぼ同じ）で人体にやさしく、湧水部への付着性が良好な液体急結剤を導入・改良を行ってきた。

液体急結剤による技術は、ノズルもとまでエアを使用しないポンプ圧送式の湿式吹付け機による吹付け方式である。すなわち、図2において、急結剤添加ノズルまではコンクリートをポンプにより圧送し、急結剤は75kWコンプレッサ使用のエア圧送とし、37kWコンプレッサは使用しない。このため、エア使用量が少なく、また、液体急結剤はベースコンクリートとの混合性に優れるため混合されない急結剤のみが空气中に放出されることを最小限に抑えることができ、粉じんの発生を抑制できる。

2.2.5 エアレス吹付け

エアレス吹付けとは圧縮空気を用いない打撃投射タイプの吹付け工法であり、通常のベースマシンのロボットアーム先端に図4に示すインペラヘッドが取り付けられている。インペラヘッドにはインペラと呼ばれる円形の回転体に取り付けられており、この回転体には4枚のブレードが取り付けられている。インペラは周囲をケーシングに覆われていて、このケーシングには圧送コンクリートを内部のインペラに誘導する圧送コンクリート投入管が設けられている。実際の吹付けにおいては、駆動用油圧モータによりインペラは2000～2800rpmの回転数で回転しており、圧送されてき

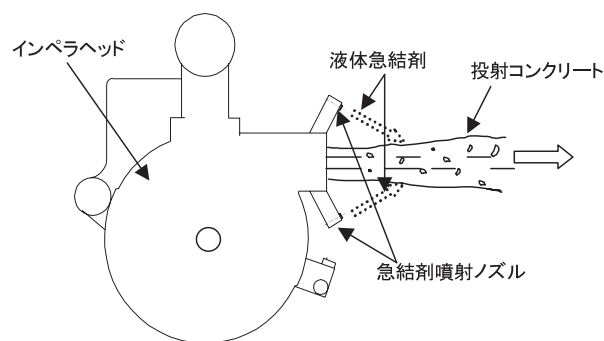


図 5 エアレス吹付けの液体急結剤添加方法

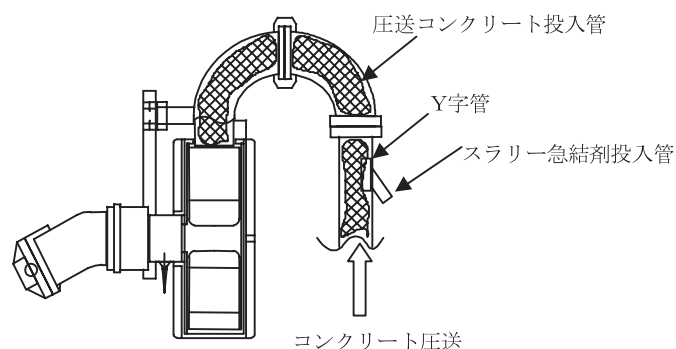


図 6 エアレス吹付けのスラリー急結剤添加方法

たコンクリートは高速回転しているインペラ内に誘導され、ブレードにより打撃されてトンネル地山に吹き付け（投射）られる機構となっている。

急結剤としては液体急結剤とスラリー急結剤の使用が可能であり、液体急結剤を使用する場合は、図5に示すように打撃・投射されたコンクリートに対して急結剤噴射ノズルより液体急結剤を噴射させて添加する方法となっている。液体急結剤は、急結剤タンクより専用のポンプによって配管を通して噴射ノズルまで圧送される。スラリー急結剤を使用する場合は、図6に示すようにインペラヘッド手前のコンクリート投入管に取り付けられたY字管直前まで粉体状態の急結剤をエア搬送し、Y字管部分にてスラリー化水と混合させてコンクリートに添加する方式である。

本方式は、コンクリート圧送にエアを使用しないため、粉じんの発生を抑制できる。

2.3 各技術の代表的なコンクリート配合

以上述べた各粉じん抑制技術におけるコンクリート配合は、それぞれ異なったものとなっている。これは、例えばスラリー急結剤や液体急結剤を使用する場合は、急結剤添加時に液体が含まれるため、添加時にW/Cが増加するので、粉体急結剤と比較すると単位セメント量を増やす必要がある、などの理由による。

表 1 各技術のコンクリート配合の代表例

配合の種別	目標 スランプ (cm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 S/a (%)	急結剤 添加率 (C×%)	単 位 量 (kg/m ³ , 混和剤除く)					
					水 W	セメント C	細 骨 材 S	粗 骨 材 G	混 和 剤 (C×%)	混和剤の種類
無対策	12	58	60	7	210	360	1035	694	－	－
粉じん低減剤	13.5	60	60	7	215	360	1026	690	0.10	粉じん低減剤
スラリー急結剤	15	55	63	7	220	400	1052	620	0.05	急結助剤
液体急結剤	20	46	64	10	185	400	1022	687	1.30	高性能減水剤

共同研究では、スランプの変化による発生粉じんの違いを見るなどさまざまなコンクリート配合による実験を実施したが、ここでは各技術における代表的な配合例を表 1 に示す。なお、エアレスの場合は、液体・スラリー急結剤の配合と同様である。

§3. 実験結果

3.1 無対策における換気条件と粉じん濃度の関係

各技術の粉じん低減効果を定量的に評価するにあたり、実験時の換気条件(送風量と集じん量)を一定とする必要がある。このため、まず無対策において、送風量を 600, 1000, 1500m³/分とし、これに対する集じん量を 900, 1260, 1800 m³/分とした場合の風量とローボリュウムエアサンプラーより求めた質量粉じん濃度の関係を求めた。表 2 に結果を示す。

表より、送風量が増えることによる希釈効果により、粉じんの質量濃度も減少していることが定量的に示されている。

なおこの結果より、以降の一連の低減技術の実験では、低減効果がある程度明瞭に示されることを念頭に置き、送風量 1000m³/分集じん量、1260 m³/分で行っている。

3.2 質量濃度変換係数のバラツキについて

図 1 で示されているように、本研究では 10m 地点、50m 地点において粉じん濃度の計測をローボリュウムエアサンプラーとデジタル粉じん型を併用している。

ここで、ガイドラインでは、デジタル粉じん型で計測された相対濃度(cpm)は、機種固有の質量濃度変換係数(K 値)により次式により粉じん濃度に変換するものとしている。

$$\text{粉じん濃度 (mg/m}^3\text{)} = \text{質量濃度変換係数 (mg/m}^3\text{/cpm)} \times \text{相対濃度 (cpm)} \quad (1)$$

表 2 換気条件と粉じん濃度の関係

換気条件		切羽より50m地点における 粉じん質量濃度(mg/m ³)
送風量 (m ³ /分)	集じん量 (m ³ /分)	
600	900	9.39
1000	1260	6.89
1500	1800	5.66

これは、ローボリュウムエアサンプラーによる計測は電子天秤等が必要であり、現場で簡易に計測することは困難なため、デジタル粉じん型のみを使用する場合の係数と考えられ、今回使用した LD-3K は 0.003 と規定されている。

このため、ここではローボリュウムエアサンプラーから求めた質量濃度と、デジタル粉じん型から得られた相対濃度より、(1)式より実測の質量濃度変換係数(以下実測 K 値)を逆算し、質量濃度との関係を求めた。図 7 に質量濃度と実測 K 値との関係を示す。

図より、実測 K 値にはかなりバラツキが大きいこと、またほとんど全ての実測 K 値が 0.003 以下となっており、ガイドラインの質量濃度変換係数を用いれば安全側の評価となることが分かる。ただし、ケースによっては 0.002 以下となる場合もあり、注意を要する。

3.3 総圧送エア量と発生粉じんの関係

図 8, 9 に、トンネル先端より 10m, 50m 地点における総圧送エア量と粉じん濃度の関係を示す。

図に示されているように、総圧送エア量と発生粉じんの関係は明瞭であり、総圧送エア量が増えれば発生粉じん濃度も上昇する傾向が認められる。

10m 地点を見ると、3mg/m³以下が可能となるのは、液体かエアレスに限定される。一方 50m 地点を見ると、今回の試験条件では、総圧送エア量を絞ることにより粉体・無対

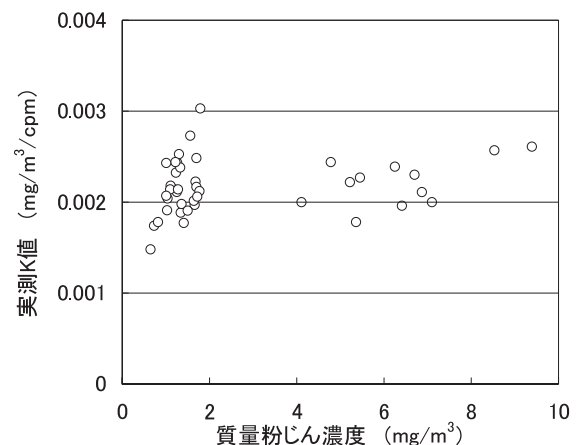


図 7 質量濃度と実測 K 値との関係

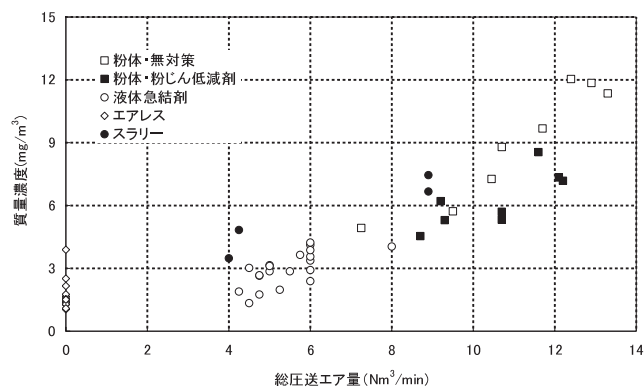


図 8 10m 地点における総圧送エア量と粉じん濃度の関係

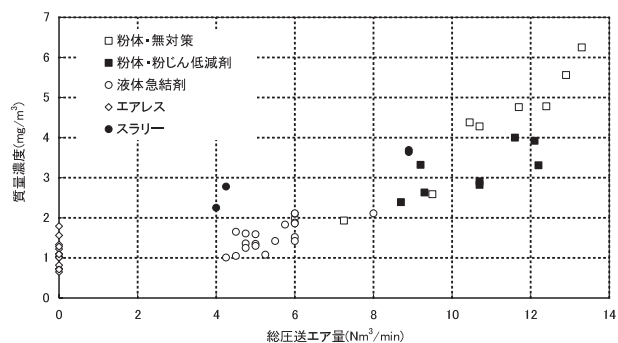


図 9 50m 地点における総圧送エア量と粉じん濃度の関係

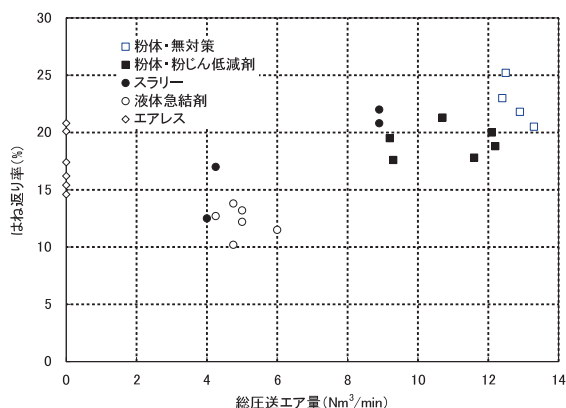


図 10 総圧送エア量とはね返り率の関係

策でも $3\text{mg}/\text{m}^3$ 以下とすることも可能であった。ただし、あまり総圧送エア量を絞ると、吹付けコンクリートが噴発するなどの施工上の問題が発生する。従って、エアを若干絞りながら経済的な粉じん低減技術を採用する等により、50m 地点において $3\text{mg}/\text{m}^3$ 以下を遵守する、など状況に合わせた使用が考えられる。

いずれにしろ、発生粉じん濃度は総圧送エア量に大きく依存していること、また、エアを用いない吹付け方法でも粉じんの発生は防げないことが確認できた。

3.4 総圧送エア量とはね返り率の関係

図 10 に、総圧送エア量とはね返り率の関係を示す。ここでも、総圧送エア量とはね返り率は相関性が認められるも

の、これについては試験数が少なく、さらに検証する必要がある。

§4. おわりに

断面 80m^2 、長さ 100m の実物大模擬トンネルにおいて、吹付けコンクリートの低粉じん技術についての定量的な評価に取り組み、以下の結果を得られた。

- ① 粉じん対策を施さない場合の、換気条件と粉じん濃度の定量的な関係を把握した。
- ② 質量粉じん濃度より実測質量濃度変換係数を求めたところ、ガイドラインの係数よりも低いことが分かり、ガイドラインの係数は安全側にあることが明らかとなった。
- ③ 発生粉じん濃度は総圧送エア量に依存すること、エアを用いなくても粉じん発生を防げないことが明らかとなった。
- ④ はね返り率についても総圧送エア量との相関性は認められたものの、さらに検証が必要ことが明らかとなった。

謝 辞 本報告は、「ずい道建設における吹付け作業時の発生粉じん量の低減技術および局所集じんシステムの開発」として、平成 14 年度から平成 16 年度にかけて、(独)土木研究所、石川島播磨重工業(株)、小林エンジニアリング(株)、(財)先端建設技術センター、西松建設(株)、リブコンエンジニアリング(株)、(株)エヌエムビー、鹿島建設(株)、(株)カテックス、ケービーシーマシナリ(株)、(株)鴻池組、信越化学工業(株)、太平洋マテリアル(株)、電気化学工業(株)、日鉄鉱業(株)、前田建設工業(株)、三井住友建設(株)、(株)三井三池製作所の共同研究の成果の一部である。ここに共同研究各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1)厚生労働省:「ずい道建設工事における粉じん対策に関するガイドライン」、2000。

ひとこと



野間 達也

19 機関におよぶ共同研究において、幹事役として研究を取りまとめた経験は得がたいものがあり、この経験を今後の業務にも役立てていきたい。