

山岳トンネル工事における機械掘削時の粉じん低減技術

宇田川義夫* 大下武志** 小橋秀俊***

1. はじめに

山岳トンネル工事に伴って発生する鉱物性粉じんは、作業効率を低下させるばかりでなく、作業員が長年にわたって吸い込むと、じん肺にかかるおそれがある。平成12年12月厚生労働省は「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」¹⁾（以下「ガイドライン」とする）を策定した。そして、このガイドラインにおいて初めて粉じん濃度 $3\text{mg}/\text{m}^3$ の目標値が示された。また、平成20年3月1日には「粉じん障害防止規則等の一部を改正する省令」²⁾が施行され、事業者は半月以内ごとに1回のトンネル内の粉じん濃度測定が義務化されることとなった。

本報文は、平成18年度から3年間にわたり、(独)土木研究所、(財)先端建設技術センターならびに鹿島建設(株)、カヤバシステムマシナリー(株)、清水建設(株)、菅機械工業(株)、西松建設(株)、日鉄鉱業(株)、(株)フジタ、(株)三井三池製作所の民間8社により共同研究で実施してきた、「山岳トンネル工事における機械掘削時の粉じん低減に関する研究」の成果について報告するものである。

2. 機械掘削による粉じん実験

2.1 実験施設

建設工事環境改善実験施設（図-1、図-2）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）造の切羽側30m区間と鉄骨造の坑口側70m区間の2つの部分に分かれている。RC造30mの区間は、内側に鉄筋コンクリートと一体化させた厚さ25mmの鉄板が配置されており、自由断面掘削機の掘削による振動にも耐えられる構造となっている。

2.2 実験概要

実験では、実岩盤を切り出して実験施設に運搬



図-1 実験施設外観と送風機



図-2 実験施設内部

し使用することは非常に困難である。したがって、実験では岩盤に粉じん粒度分布と強度が類似する材料としてコンクリートを使用した。一軸圧縮強度 $20\sim 40\text{MPa}$ 程度の地山を想定して実験施設内に模擬岩盤コンクリートを打設して、自由掘削断面機による掘削実験をおこなった（図-3）。

実験は平成18年10月、平成19年6～7月と平成20年6～7月の計3回おこなった。機械掘削の試験体は、1回目の実験では軟岩を模擬したコンクリート（一軸圧縮強度 20MPa ）および中硬岩を模擬したコンクリート（一軸圧縮強度 40MPa ）を使用し、2回目および3回目の実験では中硬岩を模擬したコンクリート（一軸圧縮強度 30MPa ）を使用した。

送風管はトンネル切羽から約 $30\sim 35\text{m}$ 地点に、集じん機（吸込み口）はトンネル切羽から約 75m 地点に設置した。

掘削に伴い発生する粉じんの濃度を測定するた



図-3 模擬岩盤コンクリート掘削状況

めに、デジタル粉じん計およびローポリウムエアサンプラーを用いた。また、粉じんの粒度分布を測定するために、アンダーセンサンプラーを用いた。図-4に2回目および3回目の実験における計測機の配置図を示す。

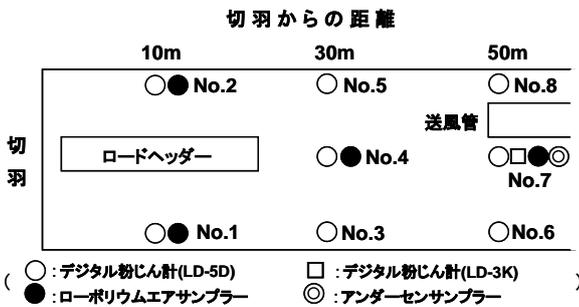


図-4 粉じん計測機配置図(第2・3回実験)

3. 無対策時の発生粉じん濃度に関する検討

研究の目的のひとつである所要換気量（送風量）の算定のため、粉じん濃度に影響を及ぼす要因を分析する必要があった。また、粉じん低減技術の効果を検証するためには、無対策時の発生粉じん濃度を把握する必要がある。そのために、最初に基礎実験（粉じん低減技術を適用しない実験）を行い、その後に、民間各社が保有する粉じん低減技術による実験を行った。

機械掘削時の粉じん濃度には、施工条件や地山状況などの様々な要因が関係していると考えられる。このため、基礎実験では、送風量、集じん量、散水ノズル数、掘削速度、湧水条件などの諸条件を変えて模擬岩盤を切削し、発生した粉じんを測定した。そして、得られた測定データをもとに、トンネル掘削の様々な要因が粉じん濃度に与える影響について、重回帰分析を用いて検討した。

従属変数（目的変数）を「粉じん濃度(mg/m³)」

表-1 ステップワイズ法による重回帰分析結果

変数の選択	重回帰式	赤池の情報量規準AIC	自由度調整済相関係数
1 独立変数	$Y = 2.7024X_1 - 56.7411$	302.3852	0.2550
2 独立変数	$Y = 4.4963X_1 - 3.6129X_2 - 91.6179$	296.9531	0.4985
3 独立変数	$Y = 5.821X_1 - 4.1481X_2 + 4.2718 X_3 - 170.2114$	294.2150	0.5799
4 独立変数	$Y = 5.7121X_1 - 4.4038X_2 + 3.7387 X_3 - 1.0268 X_4 - 153.1459$	293.6561	0.6058
5 独立変数	$Y = 5.8403X_1 - 4.3854X_2 + 4.3509 X_3 - 1.0177 X_4 - 0.0182 X_5 - 143.8375$	294.6380	0.6019
6 独立変数	$Y = 5.8703X_1 - 4.3905X_2 + 4.4418 X_3 - 0.9684 X_4 - 0.0139 X_5 - 0.0049 X_6 - 143.3036$	296.6220	0.5776

【凡例】 従属変数 Y : 粉じん濃度(mg/m³)
 独立変数 X1 : 一軸圧縮強度(MN/m²)、X2 : 散水ノズル数(個)、
 X3 : 掘削速度(m³/hr)、X4 : 湧水量(l/min)、
 X5 : 送風量(m³/min)、X6 : 集じん量(m³/min)

(ガイドラインで定められている切羽から50m地点の粉じん濃度、すなわち、図-4でのNo.7地点のローポリウムエアサンプラーで求めた粉じん濃度を用いた)、独立変数（説明変数）を表-1の凡例に示す6つとして設定した。

ステップワイズ法により独立変数を選択し、重回帰分析を行った。その結果を表-1に示す。

ここで、赤池の情報量規準AIC（小さい値ほど最適）ならびに自由度調整済相関係数（大きい値ほど最適）から最適モデルの判定を行った。その結果、最適モデルと判定されるのが4独立変数の式である。

重回帰式の偏回帰係数の大きさから判断すると、粉じん濃度に最も影響が大きい因子は「一軸圧縮強度」であり、次に「散水ノズル数」、「掘削速度」、「湧水量」となる。

表-1の4独立変数および5独立変数の重回帰式の「送風量」の偏回帰係数は、それぞれ0.0182、0.0139と小さい値であり、これより、「送風量」は影響の小さい因子であると判断される。なお、本回帰式は屋内実験の結果を基にしたものであり、現場での粉じん発生量予測等に用いるためには、今後、現場での検証を行っていく必要がある。

4. 粉じん低減技術の検証

共同研究各社が保有する粉じん低減技術を適用した機械掘削実験を行い、その粉じん低減効果を検証した。粉じん低減効果βは、無対策時（基礎

実験結果)との対比により、次式で算定した。

$$\beta = \frac{C}{C_0} \quad (1)$$

ここに、 β ：粉じん低減効果

C_0 ：無対策時（基礎実験）の粉じん濃度

C ：低減技術使用時の粉じん濃度

なお、粉じん濃度は、切羽から50m地点（図-4でのNo.7地点）のローボリウムエアサンプラーで求めた粉じん濃度を用いた。

(1) 発生抑制による低減技術

1) 界面活性剤溶液散布システム

泡を切削ビット近傍に噴霧し、粉じん粒子を吸着させ、それを落下させることにより粉じんの発生を抑制する方法である。 $\beta = 0.27 \sim 0.64$ （平均値0.41）

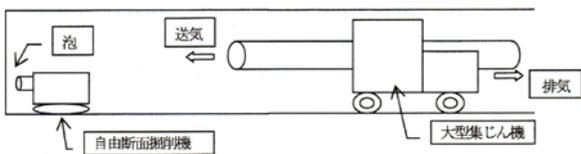


図-5 界面活性剤溶液散布システム概要



図-6 実験状況(界面活性剤溶液散布システム)

(2) 捕集による低減技術

1) 局所集じんシステム

大型集じん機からダクトを切削ビット付近に伸ばして粉じんを除去する方法（分岐風管併用）である。 $\beta = 0.00 \sim 0.14$ （平均値0.05）

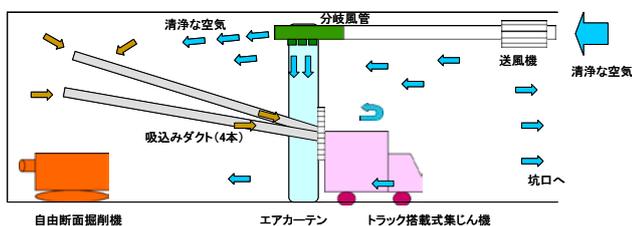


図-7 局所集じんシステム概要



図-8 実験状況(局所集じんシステム)

2) 伸縮風管システム

大型集じん機から伸縮風管を切羽付近まで伸ばして粉じんを捕集する方法である。排気式と送気式がある。 $\beta = 0.00 \sim 0.09$ （平均値0.01）

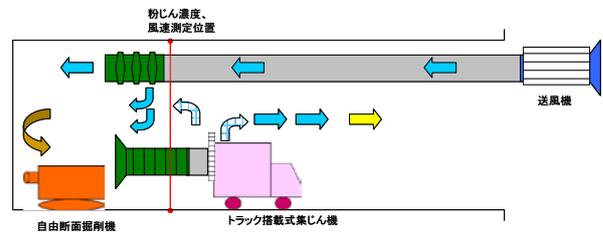


図-9 伸縮風管システム（送気式）概要



図-10 実験状況(伸縮風管システム)

3) 伸縮風管システムとエアカーテン

エアカーテンで粉じんを切羽近傍に封じ込め、伸縮風管で粉じんを捕集する方法である。 $\beta = 0.00 \sim 0.21$ （平均値0.07）

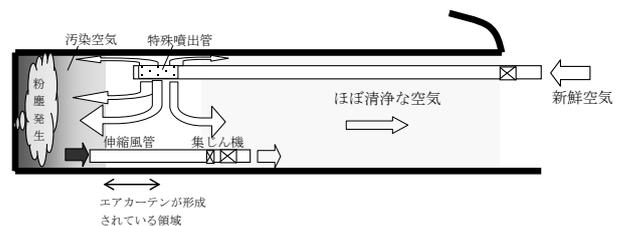


図-11 伸縮風管システムとエアカーテン概要



図-12 実験状況(特殊噴出管によるエアカーテン)

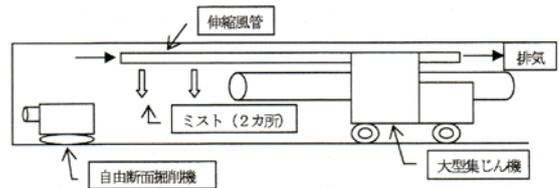


図-14 ミストと伸縮風管システム概要

(3) 発生抑制と捕集による低減技術

1) ミストと局所集じんシステム

ミストをトンネル内壁面から噴霧し、粉じん粒子を落下させるとともに、切羽に近づけた大型集じん機で捕集し、粉じんを低減する方法である。 $\beta = 0.00 \sim 0.03$ (平均値0.01)



図-15 実験状況(ミスト)

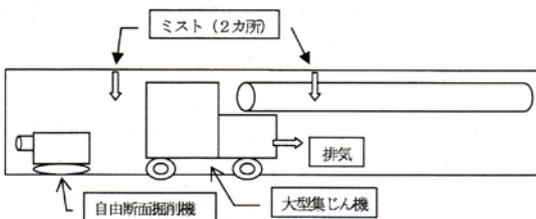


図-13 ミストと局所集じんシステム概要

2) ミストと伸縮風管システム

ミストをトンネル内壁面から噴霧し、粉じん粒子を落下させるとともに、伸縮風管システムも併用して粉じんを低減する方法である。 $\beta = 0.02 \sim 1.40$ (平均値0.49) [実験時の坑内外の気温差が大きいいため参考値とする]

5. おわりに

本報文では、山岳トンネル工事における機械掘削時の粉じん低減を目的として3年間にわたって行ってきた共同研究の成果の一部について報告した。研究成果が、今後の山岳トンネル工事における粉じん低減、坑内作業環境の改善に役立てば幸いである。

参考文献

- 1) 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、2000年12月。
- 2) 厚生労働省：粉じん障害防止規則等の一部を改正する省令、2008年3月。

宇田川義夫*



株式会社フジタ建設本部
土木技術部、主席コンサルタント、博士(理学、工学)、技術士(総合、建設、応用理学)(前独立行政法人土木研究所つくば中央研究所技術推進本部施工技術チーム 主任研究員)
Dr. Yoshio UDAGAWA

大下武志**



前独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所技術推進本部
施工技術チーム 主席研究員、技術士(建設)
Takeshi OSHITA

小橋秀俊***



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所技術推進本部
施工技術チーム 主席研究員、博士(工学)
Dr. Hidetoshi KOHASHI