

戦 9 ずい道建設における機械掘削時の粉じん対策技術の開発

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 17～平 20

担当チーム：技術推進本部（施工技術）

研究担当者：小橋秀俊、宇田川義夫、澤松俊寿、徐永強

【要旨】

建設工事環境改善実験施設（延長 100m、断面積 80m²）を利用し、機械掘削時の粉じん低減技術の開発を目的とした実物大トンネル模擬実験を行い、得られた結果から、重回帰分析によって、粉じん濃度と施工条件との関係について分析した。また、各種の粉じん低減技術を適用し、それらの粉じん低減効果の検証を行った。実験の結果、①粉じん濃度に最も大きな影響を及ぼす因子は、一軸圧縮強度であること、②粉じん抑制技術よりも粉じん捕集技術の方が、粉じん低減効果が大きいことがわかった。

キーワード：トンネル、粉じん低減技術、機械掘削、重回帰分析

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はなく、作業員が長年にならわって吸込むと、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」（以下「ガイドライン」とする）¹⁾ を策定した。そして、このガイドラインにおいて初めて 3mg/m³ 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。

平成 20 年度の技術開発は、土木研究所構内にある建設工事環境改善実験施設（延長 100m、断面積 80m²）を利用し、機械掘削時の粉じん低減技術の開発を目的とした実物大トンネル模擬実験を行った。得られた実験結果から、重回帰分析を用いて、発生粉じん濃度と施工条件との関連性について分析を行った。また、各種の粉じん低減技術を適用し、それらの粉じん低減効果の検証を行った。

実施体制として、「山岳トンネルにおける機械掘削時の粉じん低減に関する研究」について、財団法人先端建設技術センターおよび民間会社 8 社と共同研究で進めた。

以下に、実験で得られた成果について述べる。

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（写真 1、写真 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 80m² 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 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 の鉄板が設置されており、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。



写真 1 実験施設外観と送風機



写真 2 実験施設内部

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1,500m³/minであり、一般的なトンネル建設工事現場の坑内平均風速0.3m/secを再現することができる。集じん機はバグフィルター形式で、最大処理風量は1,800m³/min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。また、送風機と集じん機はともにインバータ制御により風量を変えることができ、送風機と集じん機の風量の組み合わせにより、様々な換気状況を再現することができる。

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。岩盤は、一軸圧縮強度20~40MPa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(写真3)。



写真3 模擬岩盤コンクリート掘削状況

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30~35m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。

1回目の実験では、粉じん測定機器の配置は図1に示すように、粉じん濃度を求めるための、デジタル粉じん計(LD-3K)8台およびローボリウムエアサンプラー(分粒装置C-30+吸引ポンプLV-40BR 流量30L/min;分粒特性10μm以上100%カット、以下同様)2台、粉じん粒

度分布を求めるための、アンダーセンサンプラー(AN-200:分級範囲0.43~11μm、8段階、吸引流量28.3L/min、以下同様)3台によりおこなった。2回目および3回目の実験では、粉じん測定機器の配置は図2に示すように、デジタル粉じん計(LD-5D 8台・LD-3K 1台)、ローボリウムエアサンプラー4台、アンダーセンサンプラー1台によりおこなった。

ローボリウムエアサンプラーおよびアンダーセンサンプラーに使用したフィルターは、ガラス繊維のテフロンバインダーフィルターT60A20である。また、フィルターの計量に使用した天秤は、分析用電子天秤GR-202で感度0.1mgである。粉じん捕集後のフィルターの計量は、デシケータで24時間乾燥させた後におこなった。

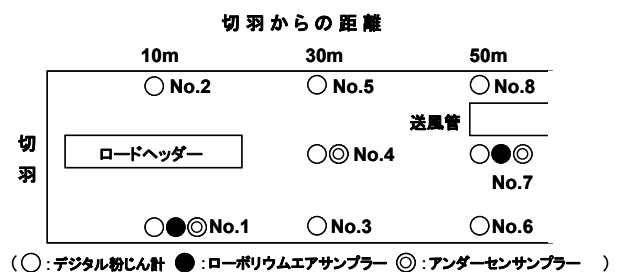


図1 粉じん計測器配置図(第1回実験)

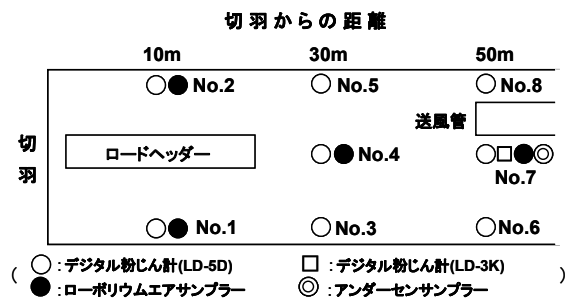


図2 粉じん計測器配置図(第2・3回実験)

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、粉じん低減技術の粉じん低減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)をおこない、その後、民間各社が保有する粉じん低減技術による実験をおこなった。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、

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

独立変数 X1 : 一軸圧縮強度、X2 : 散水ノズル数、
X3 : 掘削速度、X4 : 湧水量、X5 : 送风量、X6 : 集じん量

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を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)」（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1、図2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「一軸圧縮強度(MPa)」、「送风量(m³/min)」、「集じん量(m³/min)」、「散水ノズル数(口)」、「掘削速度(m³/hr)」、「湧水量(L/min)」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、重回帰分析をおこなった。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独立変数の次式である。

粉じん濃度 = $5.7121 \times$ 一軸圧縮強度 $- 4.4038 \times$ 散水ノズル数 $+ 3.7387 \times$ 掘削速度 $- 1.0268 \times$ 湧水量 $- 153.1459$

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5独立変数および6独立変数の重回帰式の「送风量」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、「送风量」は影響の小さい因子であると判断される。

4. 粉じん低減技術の検証

基礎実験に引き続いて、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。

$$\beta = \frac{\text{[低減技術による粉じん濃度 (mg/m}^3\text{)]}}{\text{[無対策時 (基礎実験) の粉じん濃度 (mg/m}^3\text{)]}}$$

ここで、粉じん濃度は、切羽から50m地点（図1、図2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。

(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。β=0.27~0.64（平均値0.41）

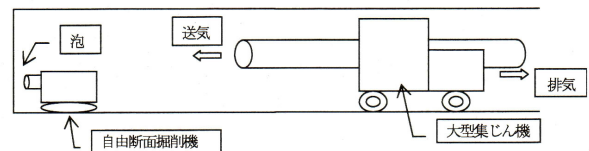


図3 界面活性剤溶液散布システム概要



写真4 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)

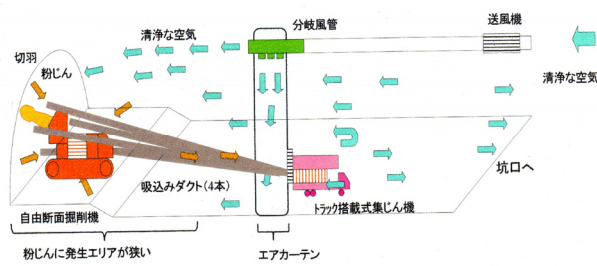


図4 局所集じんシステム概要



写真5 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)

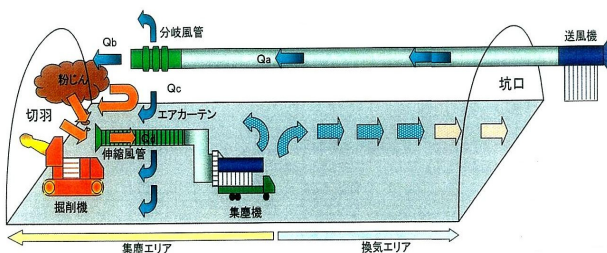


図5 伸縮風管システム(送気式)概要



写真6 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)

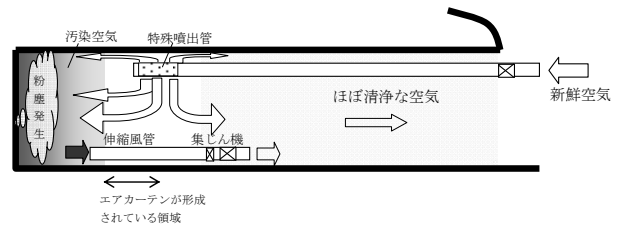


図6 伸縮風管システムとエアカーテン概要



写真7 実験状況(特殊噴出管によるエアカーテン)

(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)

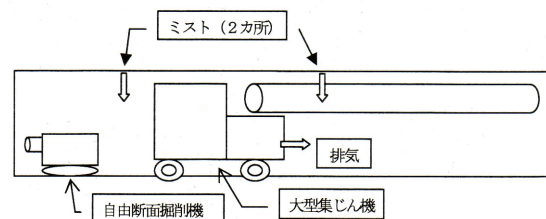


図7 ミストと局所集じんシステム概要

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]

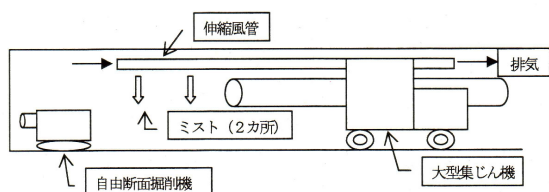


図8 ミストと伸縮風管システム概要



写真8 実験状況(ミスト)

5. おわりに

平成 20 年度の研究開発で明らかになった点について以下に述べる。

- ① 重回帰分析による検討の結果、トンネル機械掘削時の粉じん濃度が「一軸圧縮強度」、「掘削速度」と「散水量」に大きく影響を受けることがわかった。
- ② 各種の粉じん低減技術を適用し、それらの粉じん低減効果の確認を行ったところ、伸縮風管を使用した対策技術が非常に効果を発揮した。これは、なるべく粉じん発生源の近くで、粉じんが拡散する前に集じんを行うことが非常に有効であることを示している。

謝辞

最後に、共同研究メンバーである、(財)先端建設技術センター、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)三井三池製作所の関係各位には謝意を表します。

参考文献

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

DEVELOPMENT OF DUST REDUCTION TECHNIQUES IN THE TUNNEL CONSTRUCTION WITH DIGGING MACHINES

Abstract : A study was conducted using a full-scaled tunnel simulation at our Construction Environment Laboratory (100 meter-long, cross-sectional area 80 square meters). From the results of the study, correlation between dust concentration and construction conditions was analyzed by multiple linear regression analysis. Moreover, various kinds of dust reduction technology were applied, and those dust reduction effects were checked. As a result, it was found that (1) the result of the multiple linear regression analysis about the factor affecting the dust concentration found that the most influential factor causing dust concentration was "Unconfined Compressive Strength", and "Number of Watering Nozzles", "Digging Speeds", and "Amount of Watering", arranged in order of influence., (2) The various kinds of dust reduction techniques were applied and those dust reduction effects were examined. As the result, the elastic ventilation ducting was most effective. This result shows that it is very effective to collect the dust near the tunnel face before the dust diffuse.

Key words : Tunnel, Dust Reduction Techniques, Machine Digging, Multiple Linear Regression Analysis