

V-3 粉じん対策技術の評価・開発

研究予算：運営費交付金（道路整備勘定）

研究期間：平 14～平 16

担当チーム：施工技術チーム

研究担当者：大下武志

波田光敬 井谷雅司 尾花誠太郎

【要旨】

ずい道建設工事に伴って発生する粉じんに起因するじん肺症等の粉じん障害は社会問題になっている。このため、発生抑制、希釈除去、吸入防止等の要素技術の開発と粉じん対策技術の適切な評価方法について、土研を中心として開発目標を設定し、民間 17 社および先端建設技術センターと共同研究開発を行ない、吹付け試験および実証試験により開発・改良した低減技術の効果を確認した。また、低減技術の普及を図るため、検討会において「トンネル工事における吹付け作業時の発生粉じん対策技術の手引き（案）」をまとめた。

キーワード：山岳トンネル、吹付けコンクリート、粉じん、低減技術、集じん

1. はじめに

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、ガイドラインという）を策定した。そして、ガイドラインにおいて初めて $3\text{mg}/\text{m}^3$ の目標値が示された。

そこで、(独)土木研究所、(財)先端建設技術センター、石川島播磨重工業(株)、(株)エヌエムビー、鹿島建設(株)、(株)カテックス、ケービーシーマシンナリ(株)、(株)鴻池組、小林エンジニアリング(株)、信越化学工業(株)、太平洋マテリアル(株)、電気化学工業(株)、西松建設(株)、日鉄鉱業(株)、(株)フジタ、前田建設工業(株)、三井住友建設(株)、(株)三井三池製作所、リブコンエンジニアリング(株)の計 19 機関により、平成 14 年度から 3 年間にわたり、ずい道建設における吹付け作業時の発生粉じん量低減技術および局所集じんシステムの開発に関する共同研究を民提案型で実施してきた。

その結果、発生抑制技術として

- ①粉じん低減剤を使用する方法。
- ②スラリー急結剤を使用する方法
- ③液体急結剤を使用する方法
- ④SEC により製造したベースコンクリートを使用する方法
- ⑤石灰石やシリカヒュームなど微粒分を加えた高品質吹付けコンクリートを使用する方法

および吹付け機械によるものとして

- ⑥ダストレス吹付け機で主に粉体急結剤を使用する方法。
- ⑦エアレス吹付け機で液体またはスラリー急結剤

を使用する方法

また、集じん技術によるものとして

⑧局所集じんシステムを使用する方法

⑨伸縮風管システムを使用する方法

について技術改良・開発した。なお、吸入防止等の技術についても、電動ファン付き呼吸用保護具の改良を重ね、呼吸用保護具を改良した。

2. 研究方法

研究は、まず実態調査を行い、それを基に実大規模の模擬トンネルで開発対象とする技術について吹付け試験を行なうとともに、実際の試験施工により確認することとした。

2.1 アンケート調査

山岳トンネル工法によるトンネル建設工事では、切羽においては削孔、発破、ずり積み・ずり出し、こそく、吹付けコンクリート、鋼アーチ支保工、ロックボルトを繰り返しながら掘削を進めるのが一般的である。また、後方作業としては、覆工やインバート工などがある。そこで、粉じん対策状況等についてアンケート調査を行った。その結果、吹付け作業時に最も粉じん濃度が高くなる現場が多いことがわかった。

2.2 模擬トンネルにおける吹付け実験

2.2.1 模擬トンネルの概要と実験項目

吹付け工法および換気方法などの技術の効果を確

認し、完成度を高めるためには実証実験が必要となる。実証実験の場としては実際のトンネル建設現場や小規模模擬トンネルなどが考えられるが、現場で実験を行うと工期に影響を及ぼすことや現場条件に即した粉じん濃度の計測が行えないといった問題がある。そこで、実大規模でコンクリート吹付けや換気などの実証実験が行える模擬トンネル(表-1)を建設し、本研究で用いた。なお、所内には他に実験用トンネル施設があるが、実際の吹付けによる機器への防じん、および吹付け面を何回も機械で壊すなど吹付け実験仕様に耐えられないものであったため、別途新たな実験施設を設けたものである。

表-1 模擬トンネル諸元

| | | |
|------|-------|----------------------------|
| 実験棟 | 構造 | RC造(30m)、鉄骨造(70m) |
| | 内空断面積 | 81.7m ² |
| 送風機 | 送風量 | 最大1,500m ³ /min |
| | 風管径 | 1,500mm |
| 集じん機 | 集じん形式 | バグフィルタ |
| | 処理風量 | 最大1,800m ³ /min |

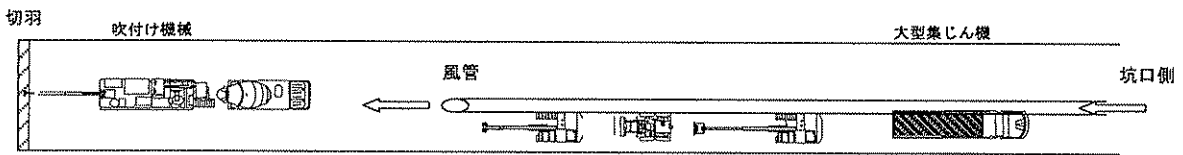


図-1 一般的な吹付け作業時の坑内切羽付近の機械配置

トンネル工事における吹付け作業時の一般的な坑内機械配置を図-1に示す。切羽では吹付け機械とアジテータトラックで吹付けが行われ、風管の先端は切羽から30m~70m付近にあり、さらに後方に大型集じん機が配置されることが多い。

このような坑内での機械配置状況を考慮すると、粉じん対策としては、トンネル断面の制約および経済性などの点を考慮して、粉じんの発生量を少なくする方法および効率的に除去する方法に着目した。

そして、開発技術の目標を表-2のとおりとし、前記①~⑨の技術および基準となる従来技術について、表-3に示す項目について吹付け試験を行った。

表-2 開発技術の目標性能

| 項目 | 性能 |
|-------|--------------------------------------|
| 粉じん濃度 | 切羽より50m離れた位置で3mg/m ³ 以下 |
| 施工性 | 作業能力10~12m ³ /h以上 |
| 強度 | 設計基準強度 $\sigma_{28}=18\text{N/mm}^2$ |

なお、従来技術については、この他に、圧送ホースの長短、ノズルと吹付け面との離れなどによる粉

じん濃度への影響についても試験した。

表-3 試験項目

| 項目 技術 | 粉じん濃度 | 骨材やスランプの変動 | 局所集じん機の位置 | 湧水時の付着 | はね返り | 換気量の変動 |
|----------|-------|------------|-----------|--------|------|--------|
| 従来技術 | ○ | ○ | | ○ | ○ | ○ |
| ①~⑦ | ○ | ○ | | ○ | ○ | ○ |
| ⑧ | ○ | | ○ | | | ○ |
| ⑨* | ○ | | ○ | | | ○ |

注*この技術は実際の現場でのみ行った。

2.2.2 吹付けのシミュレーションの概要と結果

模擬トンネルでの吹付け試験に先立ち、トンネル内部の換気条件、とりわけ送気条件と粉じん濃度分布との関係を把握するために解析を行った。

解析モデルを図-2に示す。切羽付近の定位置で一定量の粉じんを発生させた状態で、換気・集じん条件を変えて各平面位置のGL+1.0mでの粉じん濃度のモニタリングを行った。

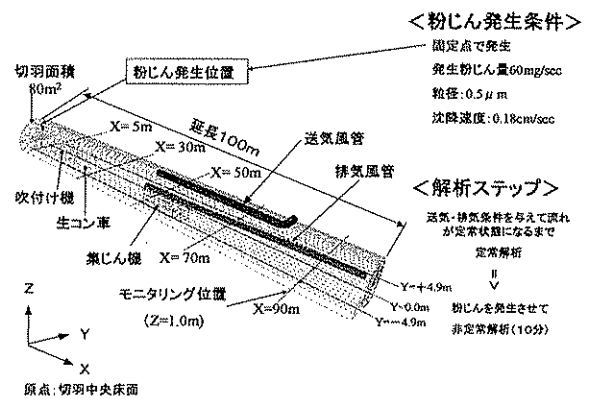


図-2 解析モデル

解析結果より、次のことがわかった。

- ① 集じん流量の増加は、切羽側の環境改善にはさほど有効ではない。
- ② 局所集じんの吸い込み口の位置が適切であれば、環境改善効果が期待できる。
- ③ 粉じん濃度は、送気流量が大きくなるに従って低下していることがわかった。このことから送

気量が多いほど粉じん濃度の低減効果は高い。

- ④ 切羽付近では、送気口位置が切羽に近い方が濃度は低い。

2.2.3 吹付けに用いる圧縮空気量の影響

図-3 は、吹付けるために使用するほぐしエアおよび急結剤の圧送エアを合計した総圧縮空気量と粉じん濃度（切羽から 50m 地点）の関係を示したものであり、次のことがわかった。

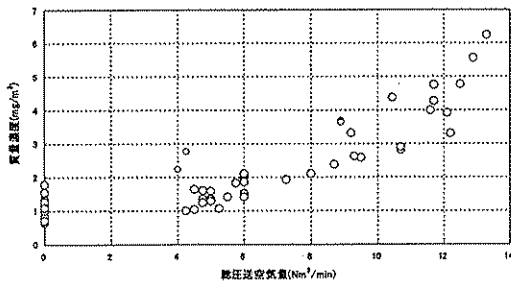


図-3 総圧縮空気量と粉じん濃度の関係

- ・ 圧縮空気量が多くなると粉じん濃度が上がる。
- ・ 圧縮空気量を全く使用しなくても、 $3\text{mg}/\text{m}^3$ 以下ではあるが粉じんは発生する。

したがって、粉じん濃度を低減するためには、圧縮空気量を少なくした吹付け技術が望ましい。一方、ほぐしエアを用いない方式を除けば、一般に圧縮空気量を少なくすると脈動等が発生し、圧送ホース内での閉塞を招き、吹付け作業の障害となることに留意する必要がある。特に、山岳トンネルの吹付けコンクリートは、重要な支保部材であり、吹付け作業の遅滞は、最悪切羽崩壊を招くため、使用する圧縮空気量を適切なものとする必要がある。

2.2.4 粉体急結剤の有無と粉じん濃度の関係

吹付けコンクリートから発生する粉じんの組成はセメント分が全体の 55%（セメント分を混入した微細粒水滴を含む）、骨材の微粒分 35%程度で、両者がある大部分を占めている。そして、ややもすると粉体急結剤は粉であり、これがコンクリートと未混合で吹付けられるため、粉じん濃度が高くなると考えられる傾向があった。

しかしながら、粉体急結剤の有無について比較した試験を行った結果、急結剤の添加は粉じん濃度を高くしていないことがわかった。

3. 各技術の試験結果

模擬トンネルでの従来技術による試験結果は、表-4 のとおりとなった。

表-4 従来技術による粉じん濃度

| 換気条件 | | 粉じん濃度 (mg/m^3) |
|---------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|
| 送風量 (m^3/min) | 集じん量 (m^3/min) | |
| 600 | 900 | 9.39 |
| 1000 | 1260 | 6.89 |
| 1500 | 1800 | 5.66 |

ここで、

- ・ 開発技術との比較目標となるため、開発技術との差異が明確となる程度の粉じん濃度が望ましいこと
- ・ 開発技術の目標はガイドラインに示された粉じん濃度 $3\text{mg}/\text{m}^3$ 以下であること
- ・ 平成 12 年当時の実トンネルにおける平均的な換気送風量が $1000\text{m}^3/\text{min}$ 程度であることから、模擬トンネルの吹付け試験で共通する換気送風量を $1000\text{m}^3/\text{min}$ とした。そして、これを基準として①～⑨の技術について改良・開発を行った。

なお、本報告では、各技術の粉じん低減効果を下記の式²⁾に用いられる係数 α により記述する。

$$\text{所要換気量 } Q_2 = \alpha (90 \cdot A_t) / G_a \quad (\text{m}^3/\text{min}) \quad (1)$$

α : 粉じん発生量低減対策による低減効果係数

90 : 定数 ($\text{mg}/\text{min}/\text{m}^2$)

A_t : トンネル掘削断面積 (m^2)

G_a : ガイドラインで示される粉じん濃度目標レベル (mg/m^3)

3.1 粉じん低減剤による技術

この技術の模擬トンネルでの試験（写真-1）および現場試験より、次のことが明らかになった。

- ・ 掘削断面積約 80m^2 のトンネルでの吹付け作業時において、粉じん濃度から低減効果係数 α を算定すると $0.3 \sim 0.6$ 程度となり、模擬トンネル以外の現場試験施工およびこれまでの実績も考慮すると、 α は $0.5 \sim 0.75$ が考えられる。
- ・ 初期強度の管理値および長期強度（コア供試体）の目標強度についてそれぞれ満足し、同一水セメント比の通常の吹付けコンクリートとほぼ同程度の強度であった。
- ・ はね返り率は $18 \sim 25\%$ 程度であり、従来技術と同等か若干低かったが、これまでの実績等も考慮すると、従来技術とほぼ同等であるといえる。

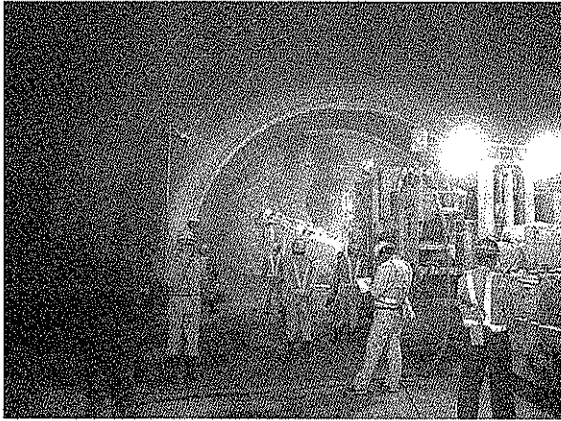


写真-1 粉じん低減剤による試験状況

3.2 スラリー急結剤による技術

スラリー急結剤による技術は、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。

この技術の模擬トンネルでの試験（写真-2）および実現場での結果から、次のことが明らかになった。

- ・ 模擬トンネルで実施した吹付け試験では、スラリー急結剤を使用した場合の粉じん量は、従来技術と比較して 40～60%程度の結果が得られ、 α は 0.4～0.6 が考えられる。
- ・ ベースコンクリートにスラリー急結剤を標準添加した場合の強度発現性は、従来の粉体急結剤を使用した吹付けコンクリートと同等で、目標強度 18N/mm^2 を満足した。
- ・ はね返り率は 22%以下であった。

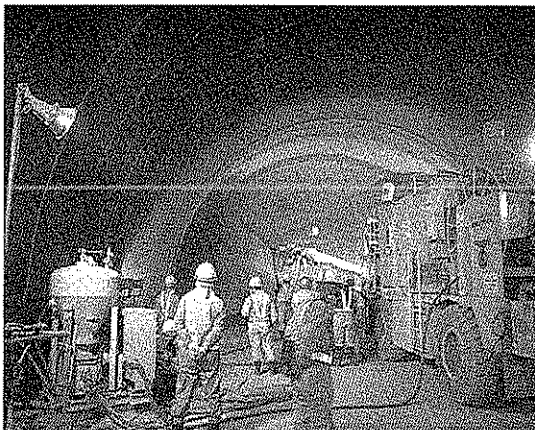


写真-2 スラリー急結剤による試験状況

3.3 液体急結剤による技術

この技術の模擬トンネルでの吹付け試験（写真-3）および実現場の結果から、次のことが明らかになった。

- ・ 模擬トンネルで実施した吹付け試験では、液体急結剤を使用した場合の粉じん量は従来技術と比較して 20～40%程度の結果が得られ、 α は 0.2～0.4 と考えられる。
- ・ 単位セメント量を $360\sim 450\text{kg/m}^3$ に変化させても、粉じん濃度には影響がない。
- ・ 強度試験結果では材齢 24 時間の管理値 5N/mm^2 および材齢 28 日の目標強度 18N/mm^2 に対してすべての配合において十分上回った値が得られた。
- ・ はね返り率は 9～15%程度と良好な結果が得られた。
- ・ 液体急結剤の添加量は通常 10%程度であるが、湧水試験では 15%程度まで増加させれば付着性を十分確保できる。



写真-3 液体急結剤による試験状況

3.4 分割練混ぜ（SEC）による技術

この技術の模擬トンネルでの試験を行い、次のことが明らかになった。

- ・ 単位セメント量を $360, 400, 450\text{kg/m}^3$ と変えて吹付けを実施したが、単位セメント量が切羽後方 50m の粉じん発生量に与える影響はほとんど無く、 α は 0.6～0.75 と考えられる。
- ・ はね返り率については、単位セメント量が 360kg/m^3 において 17.2%、 450kg/m^3 において 16.1%とほぼ同じ程度と考えられ、単位セメント量のはね返り率に与える影響は小さく、平均して 16.6%であった。

- ・ 強度については、一般的な吹付けコンクリートと同じ程度の強度であった。

3.5 高品質コンクリートによる技術

この技術の模擬トンネルでの試験を行い、次のことが明らかになった。

- ・ 骨材の種類と粉じん発生量に関しては、砕砂のみより混合砂を用いた方が粉じん発生量が少なく、従来技術に対して約 40%低減し、 α は 0.6~0.75 と考えられる。
- ・ はね返り率は、砕砂のみを用いた場合を測定したが、その平均は 15.0%であった。
- ・ 強度については、目標強度より約 1.30 倍高い強度を示した。

3.6 ダストレス吹付け機による技術

従来技術の機械とは異なり、空気圧縮機を使用せず、ブーム先端部に回転装置を搭載した吹付け機械による吹付け方法であり、ほぐしエアを用いずに、ベースコンクリートに粉体急結剤を添加して機械的に混合攪拌して、回転力で吹付け、粉じん発生量を低減するものである。

この技術の模擬トンネルでの試験(写真-4)および現場施工中の粉じん計測(写真-5)より、次のことがわかった。

- ・ 吹付け作業能力(12m³/h 程度)に関わらず、能力の変動による粉じん濃度への影響は少なく、 α は 0.2~0.4 と考えられる。
- ・ はね返り率は約 25~30%の範囲であった。
- ・ 骨材や配合あるいは急結剤の種類が変わっても粉じん濃度への影響は少ない。



写真-4 ダストレス吹付け機による試験状況

3.7 エアレス吹付け機による技術

ブーム先端部に回転装置を搭載した吹付け機械に

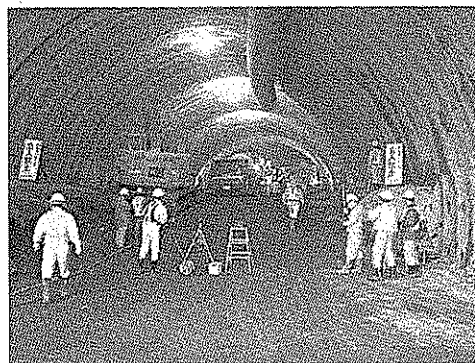


写真-5 ダストレス吹付け機による現場試験状況

よる吹付け方法であり、ほぐしエアを用いずに、ベースコンクリートにスラリー急結剤または液体急結剤を添加して回転力で吹付け、粉じん発生量を低減するものである。

この技術の模擬トンネルでの試験(写真-6)および現場試験施工の結果より次のことが明らかになった。

- ・ エアレス吹付け機においては、ベースコンクリートの配合および吹付け作業能力にかかわらず、 α は 0.2~0.4 と考えられる。
- ・ はね返り率は、液体急結剤およびスラリー急結剤とも 18%であった。



写真-6 エアレス吹付け機による試験状況

3.8 局所集じんシステムによる技術

小型トラック等に積載した局所集じん機を吹付け機械の横に設置し、集じんを行うものである(図-4)。また、集じんエリアからの粉じん拡散防止の技術としてエアカーテンを効率的に用いる。さらに、切羽への送風量を減らすために分岐風管を用いる。

図-5 は、模擬トンネルにおいて得られた切羽への送気量と α の関係を示したものであり、分岐風管により切羽への送気量を絞るほどカーテン効果が大きいことがわかる。ただし、切羽への送気量を下げ

過ぎると温度上昇等の作業環境の悪化が考えられるため、切羽への送気量としては、 $\alpha=0.5$ に相当する $600\text{m}^3/\text{min}$ 程度が目安となる。

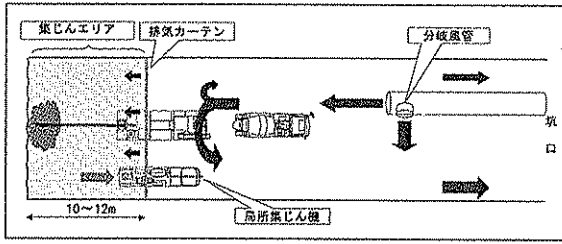


図-4 局所集じん機の最適な配置

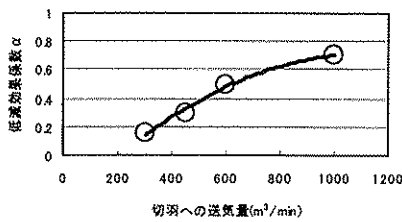


図-5 切羽への送気量 α の関係の例

3.9 伸縮風管システムによる技術

坑内に設置する大型集じん機に取付けられた伸縮風管の吸引口を切羽近くまで移動して、集じんするものである(図-6)。あらかじめ伸縮風管用のレールを天井部に吊り下げ、風管先端の走行用モータを遠隔操作により操作し、自在に伸縮できる。これにより吹付け作業時には吸引口を切羽に近づけ、発破・重機作業時には切羽より退避できる。掘進の進行にも追従し、常に切羽付近で発生粉じんを吸引できる。

また、送風管先端に分岐風管を取付け、分岐風管によりエアカーテンを形成して粉じんの後方への漏洩を防ぐものである。

このシステムで吹付け作業時の発生粉じんを処理する場合の必要換気量は、下記の式で示され、(1)式は適用できない。

(吹付け作業時の必要換気量)

$$= (\text{切羽作業員の呼気量}) + (\text{ミキサー車の排出ガス希釈量}) + (\text{後方作業の必要換気量}) \quad (2)$$

この技術による現場試験施工の結果より、伸縮風管(写真-7)の吸込み口が切羽より30m以内とした場合には、大幅な低減効果が得られることが明らかとなった。

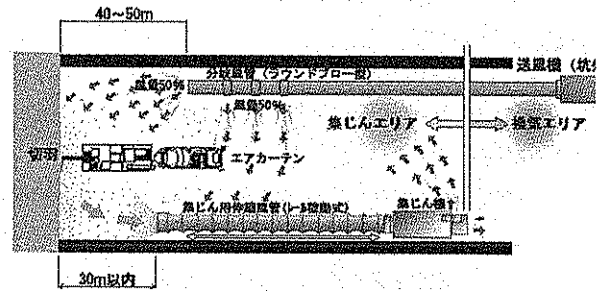


図-6 伸縮風管システムを用いた施工概要

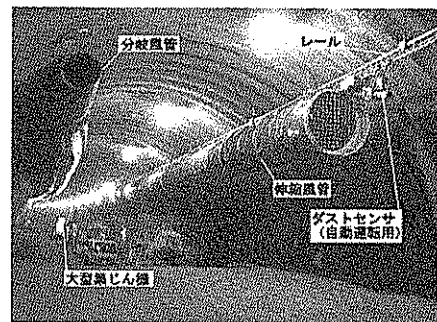


写真-7 伸縮風管の設置状況

4. まとめ

本研究により、吹付け作業時に発生する粉じんの低減技術①~⑨について、模擬トンネルでの試験および現場試験施工を行ない、従来技術に対して粉じん低減効果が0.2~0.75にまで低減できる技術を開発した。

また、概算工費については、掘削断面積 80m^2 の延長700mのトンネル(発破工法)の試算によると、従来技術に比較して-5~+8%の範囲にあるが、トンネルで使用する重機の排ガス対策が進めば、更なるコストダウンが見込まれる。

なお、目標値 $3\text{mg}/\text{m}^3$ の達成については、吹付け以外の他の作業によるトンネル全体としての対策が不可欠であり、今後も電動ファン付き呼吸用保護具の着用を始めとしてガイドラインで示された対策が必要である。

参考文献

- 1) 建設業労働災害防止協会「改訂ずい道等建設工事における換気技術指針<設計及び粉じん等の測定>」, p. 145, 平成14年3月12日