

山岳トンネル坑内の粉じん濃度低減の試み

TRIAL OF DUST REDUCTION IN TUNNEL EXCAVATION

大里 祥生¹⁾・斉藤 和男²⁾・吉富 幸雄³⁾・内田 正孝⁴⁾

Yoshio OSATO, Kazuo SAITO, Yukio YOSHITOMI, Masataka UCHIDA

The “Guideline for the measures against dust generated in the tunnel construction” set out by the Health, Labor and Welfare Ministry, in December 2000, the target control level of the dust was for the first time clearly set at $3\text{mg}/\text{m}^3$. Therefore, the authors carried out several tests and obtained dust reduction effect quantitatively by introducing different dust reduction measures such as use of dust preventing agent, large volume dust collector, and liquid accelerator. This report covers the results of the tests carried out in Nezame Tunnel, Nagano Prefecture, Japan, and also comments on the ideal future tunnel excavation method.

Key Words: tunnel, dust, dust preventing agent, dust collector, liquid accelerator

1. はじめに

近年、山岳トンネルでの坑内粉じん発生作業に対する意識は大きく変化している。その一つの理由としては、「す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）が厚生労働省より策定され、坑内粉じん濃度の目標レベルが $3\text{mg}/\text{m}^3$ と明示されたことが挙げられる。

そこで著者らは、粉じん濃度低減を目指し、長野県ねざめトンネルにおいて現状の山岳トンネルの粉じん濃度の調査・分析を行った。また、粉じん抑制剤、液状急結剤及び大容量集塵機を導入することにより、吹付けコンクリート施工時における粉じん濃度を低減する試みを行った。本報告ではこれらの結果とともに、粉じん濃度低減対策の試みを通して分かった、それぞれの施工性やコスト等について併せて報告する。

2. 坑内粉じん濃度の現状と問題点の把握

表-1に本トンネルの概要、表-2にはガイドライン施行前までの坑内作業中の粉じん濃度測定結果を示す。表-2の「ずり出し時」の測定結果は測定員が非常に危険性の高い状態に曝されるため、実際には「ずり出し始め」のタイミングで測定した結果である。また、表-3には換気設備、施工、衛生管理方法について、当初設計の仕様と本トンネルで実際に導入していた仕様を比較する。これらの結果より、積算上標準的な仕様を上回る換気設備や吹付けシステム等を導入していたにもかかわらず、吹付け作業時の粉じん濃度は、目標レベル $3\text{mg}/\text{m}^3$ を超えていたことがわかる。

図-1には、メモ리카ードへの自動記録が可能なダストセンサーRE-DS（流機エンジニアリング製、センサー部は柴田科学製）を用いて、坑内のある1日の

表-1 ねざめトンネル（小川側工区）の概要

掘削延長	1,145m(全長1,744m)
掘削断面積	60 m^2
地質	花崗岩（中世代上松花崗岩）
掘削工法	補助ベンチ付全断面掘削工法
掘削方式	発破掘削
ずり出し	タイヤ方式
吹付けコンクリート	湿式（SEC 練り）
換気方式	送・排気組合せ式
集塵機	フィルター式（500 m^3/min ）
トンネル用途	二車線道路トンネル

1) 正会員 大成建設株名古屋支店 2) 正会員 大成建設株北信越支店 3) 正会員 大成建設株土木本部土木技術部

4) 正会員 大成建設株土木本部機械部

表2 ガイドライン施行前の
坑内粉じん濃度 (mg/m³)

	ずり出し	吹付け
平均値	1.9	7.6
最大値	4.3	17.4

測定回数：13ヶ月間の計26回

測定機器：柴田科学 P-5L

測定方法：切羽から5,15,25m 地点で

10分程度左右10分間

表3 坑内粉じん濃度低減のための試み

	当初設計	ガイドライン施行前	今回の試み
換気設備	送風機 延長1000mまで ①1000m ³ /min, φ1300 ②1000m ³ /min, φ1100 送排気式 延長1000m以上 ①750m ³ /min, φ1100(送) ②1000m ³ /min, φ1300(排)	送排気式 送気 ①1500m ³ /min, φ1000 55kw×2, 350mmAq 排気 ②2000m ³ /min, φ1400 110kw×2, 500mmAq	同 左
	集塵機 500m ³ /min級 (吹付け時のみ運転)	500m ³ /min(フィルター式)	○大容量集塵機(フィルター式) 1500m ³ /min, 55kw×2
施工	ずり出し 集塵機運転せず	集塵機運転	大容量集塵機の運転 坑内全線の放水 発破ズリへの放水 ブレーカー先端部からの放水
	吹付け コンクリート 湿式	SEC練り	SEC練り ○粉じん抑制剤の添加 ○液状急結剤吹付システム導入
衛生管理	保護マスク 防じんマスク	電動ファン式マスク(試験的)	電動ファン式マスク(全員)
	粉じん測定	2回/月の定期測定	2回/月の定期測定 24時間自動粉じん測定

粉じん濃度変化を連続的に測定した結果を示す。この図より坑内は、発破直後、ずり出しと吹付けコンクリート作業時において粉じん濃度が高い状態となっていることが把握できる。作業員は、発破直後に関しては後ガス排出のため10分間待避、ずり出し時はダンプや重機のキャビンの中にいるが、吹付け時には、常に粉じんに曝露される状態となる。

以上の現状分析結果から、特に吹付けコンクリート時については、粉じん濃度低減の対策が急務であることが分かった。そこで、本トンネルにおいて表-3の右側に示す項目についての粉じん濃度低減対策を試みた。以下では、表中○印の項目について報告する。

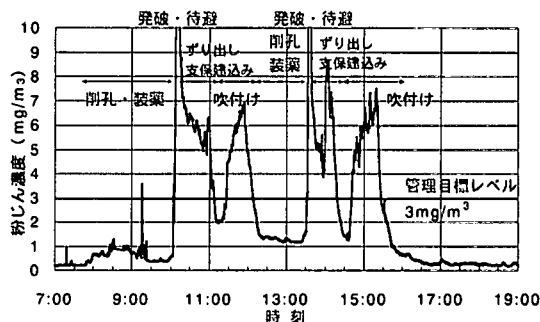


図1 1日の坑内粉じん濃度の変化
(濃度計位置：切羽から50mほど後方の左右側壁部)

3. 坑内粉じん濃度低減の試み

3.1 粉じん抑制剤による坑内粉じん濃度低減の試み

ここでは、粉じん抑制剤を吹付けコンクリートのベースコンクリートに添加したときの粉じん濃度の低減効果を報告する。また、粉じん抑制剤を添加したことによる吹付けコンクリート強度特性の変化及びコスト等について報告する。

<粉じん抑制剤>

粉じん抑制剤は、増粘効果により吹付けコンクリートの粘性を増加させる混和剤で、パッチャープラントにて添加される。粉じん濃度低減の他、リバウンドの低減にも効果があるとされている²⁾。今回使用した粉じん抑制剤は、セルロース系樹脂を主成分とする白色粉体であり、10kg/袋で納入された(ナトムクリン：信越化学(株))。吹付けコンクリートの配合は、表-4に示す。

<施工条件>

切羽位置：坑口より、930～950m 地点

支保パターン：CI (吹付け厚150mm, 上半H-125/1.2m)

パッチャープラント：北川鉄工所 (SEC練り, 0.5m³/バッチ)

吹付け機：KBC マカリ (一体型吹付け機 GMB35C-CL)

換気設備位置：送風機 切羽手前200m, 風管先端 切羽手前70m

集塵機 切羽手前160m (図-2)

表-4 吹付けコンクリート配合 (kg/m³)

セメント	水	細骨材	粗骨材	W/C	W1	W1/C
360	195	1,009	684	54.2%	120	33%

注) W1 はSEC練りでの一次水量。骨材は奈良井川水系産

<粉じん濃度の低減効果>

図-3に粉じん抑制剤の添加率を変えたときの粉じん濃度の測定結果を示す。これより、以下のことが分かった。

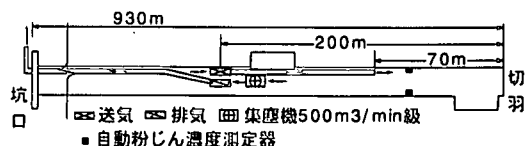


図-2 坑内換気設備の配置

・粉じん抑制剤の粉じん濃度低減効果は明瞭であり、添加量の増加とともに粉じん濃度の低減効果が見られた。

・粉じん抑制剤 0.1%添加時の粉じん濃度は、無添加時の 30%ほど低減することができた。

＜粉じん抑制剤を添加したベースコンクリートの性状及び強度特性他＞

・スランプ値に大きな変化はないが、粘性は増した。

・粉じん抑制剤の添加量の増加に伴い強度が低下する傾向が見られ、0.2%の添加率では、 σ_{28} 強度が大きく低下した（図-4）。

・プラント及びトラックミキサの洗浄水が泡立ち、消泡剤が必要となることがあり、排水に注意が必要であった。

＜コスト＞

・粉じん抑制剤の添加率を 0.1%とした場合、抑制剤は吹付けコンクリート 1 m^3 当たり 360g 必要となり、千円程度のコストが分かる。

・その他、パッチャープラントに粉じん抑制剤の添加装置の追加が必要。

＜まとめ＞

・粉じん低減剤を 0.2%添加すると粉じん低減効果は高いものの、吹付けコンクリートの最も重要な役割である強度が大きく低下した。添加量は、0.1%程度が適正であり、使用するときには適切な管理が必要である。

・粉じん抑制剤は、コストが比較的低く、粉じん低減効果もあるため導入しやすいが、強度低減特性があることを認識する必要がある。

・粉じん抑制剤だけでは、 $3\text{mg}/\text{m}^3$ の目標濃度達成が困難であった。その他の対策方法との組合せが必要と考えられる。

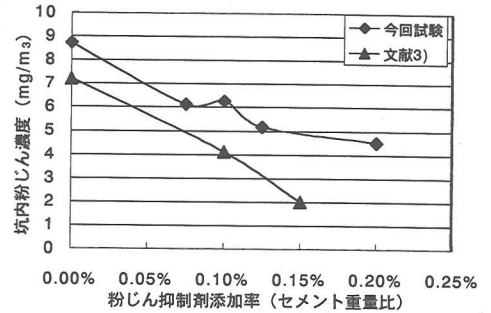


図-3 粉じん抑制剤の添加率と粉じん濃度の関係

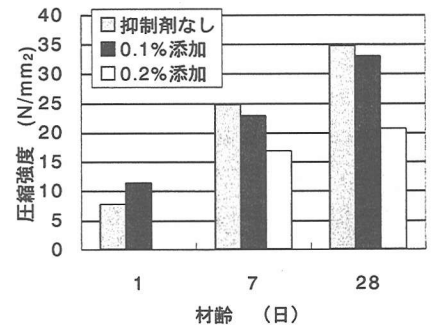


図-4 粉じん抑制剤の添加率が強度に及ぼす影響

3.2 大容量集塵機による坑内粉じん濃度低減の試み

次に、当初 $500\text{m}^3/\text{min}$ であった集塵機から、 $1,500\text{m}^3/\text{min}$ 級の大容量集塵機を導入したことによる、吹付けコンクリート施工時の粉じん濃度低減効果や施工状況について報告する。

＜大容量集塵機＞

現在、集塵機には電気式とフィルター式の大きく分けて 2 種類の集塵方法のものがある。電気式は、プラズマ電流によって粉じんを捉えるもので消費電力量や容積が小さく、ランニングコストが優れているとされている⁴⁾。しかし今回は、実績が多く、清浄度の高いフィルター式を採用した（RE-1500P：（株）流機エンジニアリング）。

＜施工条件＞

写真-1 と図-5 には、大容量集塵機の設置状況を示す。大容量集塵機は 10t 平トラックにマウントし、除塵空気を切羽へ送る方向に設置した。

切羽位置：坑口より、990～1,010m 地点

支保パターン：CII（吹付け厚 150mm、上半 H-125@1.2m）

換気設備位置：送風機切羽手前 150m、風管先端切羽手前 60m

大容量集塵機切羽手前 80m（図-5）

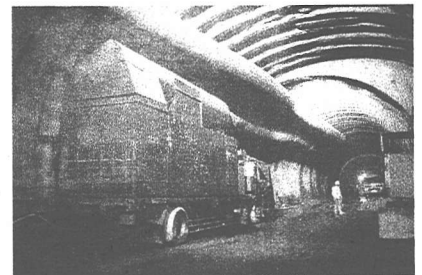


写真-1 大容量集塵機の設置・運転状況

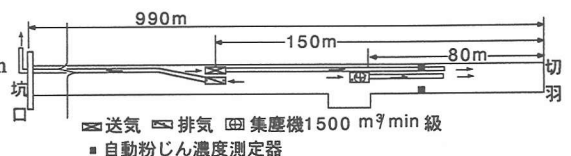


図-5 坑内換気設備の配置

＜粉じん濃度の低減効果＞

図-6 に吹付けコンクリート施工時に大容量集塵機を稼働した時の粉じん濃度低減効果を示す。以下に判明したことを示す。

- ・大容量集塵機による粉じん濃度低減効果は、大きい。
- ・粉じん濃度低減効果は、特に粉じん抑制剤を併用したときに大きく、0.1%添加時の粉じん濃度は、大容量集塵機を運転していないときの35%ほど低減できた。

<施工状況>

- ・大容量集塵機は、風管を外せば10tトラックにマウントしているため、切羽の進行にあわせた移動が容易に可能であった。
- ・大容量集塵機の騒音は、それほど気にならなかったが、集塵機からの放熱により、切羽では気温が上昇し、作業環境がやや悪化した。
- ・大容量集塵機に蓄積される粉じん量は多く、月1回程度の清掃が必要となった。

<コスト>

- ・大容量集塵機の価格は、500m³級集塵機の2～3倍である。
- ・ランニングコスト（電気代）は49,000円/日であり、同容量の電気式集塵機の約3倍である⁴⁾。
- ・その他、メンテナンス費・集塵機をマウントするトラック等台車のリース費用等が必要。

<まとめ>

大容量集塵機の価格は高いものの、導入することにより容易に切羽粉じん濃度を低減することができ、現状では優れた効果のある方法の一つと考えられる。ただし、大容量集塵機は、粉じん発生源を根本から無くすものではなく、エネルギー消費量も大きいことなどから最良の方法ではないことを念頭におき、更なる技術開発が必要と思われる。

3.3 液状急結剤による粉じん濃度低減の試み

最後に、液状急結剤による吹付けコンクリート施工時の粉じん濃度低減効果とその施工性について報告する。

<液状急結剤>

急結剤は粉体であることが日本では一般的であるが、海外では液状急結剤が普及しており、ここ数年は特にアルカリフリー化が進められ、安全性や品質の改善が図られている。日本でも幾つかの現場で施工されているが、既存の吹付機械の改良が必要なことや、急結剤の価格、富配合になることによるコスト高などの要因により、本格的に適用された例は少ない。液状急結剤は、低粉じん、アルカリフリー、低リバウンド、アル骨反応の抑制、急結剤の添加が正確・容易、などが特徴としてあげられている⁹⁾。今回用いた液状急結剤の主成分は水溶性アルミニウム塩で、PH2.5である（メイコSA162：ポノリス物産株）。

<施工条件>

- 切羽位置：坑口より、1,060～1,070m 地点
- 支保パターン：DI（吹付け厚150mm、上下半H-125@1.0m）
- 吹付け機：SKW-MBT スイスメイコ社ロードランナー2000
シャーシー：メルセデスベンツ アクトロス3240B
吹付能力20m³/hr、液状急結剤タンク4t、発電機搭載
- 納入荷姿：1t プラスチック製コンテナ
- 換気設備位置：送風機切羽手前100m
風管先端切羽手前60m
集塵機切羽手前80m（図-7）

吹付けコンクリート配合：表-5に示す

<粉じん濃度の低減効果>

・図-8に示すとおり、液状急結剤の粉じん濃度低減効果は粉体急結剤よりも大きく、粉じん濃度は25%ほど低減した。

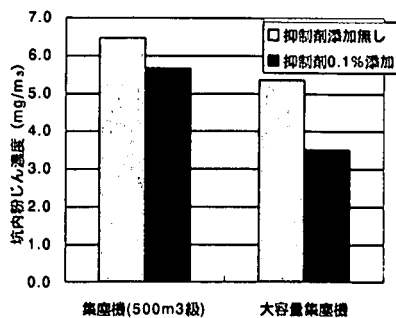


図-6 大容量集塵機による粉じん低減効果
(吹付けコンクリート施工時)

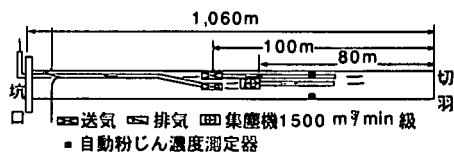


図-7 坑内換気設備の配置

表-5 吹付けコンクリート配合 (kg/m³)

急結剤 種類	セメント	水	細骨材	粗骨材	W/C	W1	NT-1000 (C×%)
粉体	360	195	1,009	684	54.2%	120	0
液状	430	194	1,061	571	45.0%	120	1.0

注) NT-1000は、高性能減水剤

＜液状急結剤吹付コンクリートの強度特性＞

- ・液状急結剤を添加した吹付けコンクリートのプルアウト試験を 3, 24 時間で実施した。 $\sigma_{3\text{r}}$ 強度は粉体急結剤使用時をやや上回るなど、施工上大きな問題になるようなことはなかった（図-9）。
- ・表-5 の配合表に示すとおり、セメント量が通常吹付けコンクリートと比べて 1m^3 当たり 70kg 増やしていることから、ベースコンクリートの強度 σ_{28} は 39.9N/mm^2 で品質上問題なかった（図-10）。
- ・テストパネルに吹付けして、コア抜きした結果 σ_{28} も、基準を満たしており、長期強度的にも問題がないことがわかった（図-10）。

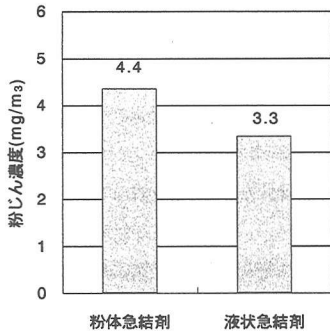


図-8 液状急結剤の粉じん濃度低減効果
(大容量集塵機稼働時)

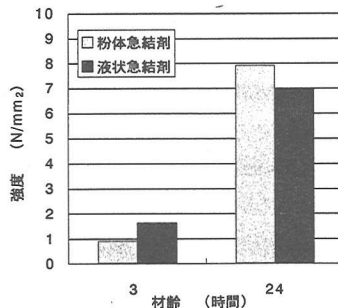


図-9 プルアウト試験結果

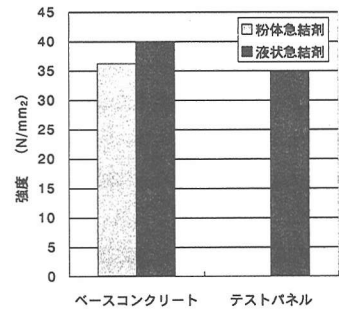


図-10 σ_{28} 強度試験結果

＜施工状況＞

- ・粉じん濃度の測定結果のとおり、視界はとても良好であった。
- ・液状急結剤吹付けコンクリート特有のマニピレータ操作に慣れると、吹付けコンクリートの施工時間は短くなった。
- ・液状急結剤の吹付け時間は、粉体急結剤の 20%以上短縮することができた（図-11）。これは、リバウンド量が少なく、施工性が良かったものと判断できる。
- ・液状急結剤には自硬性がないため、ベースコンクリート単位水量の管理が粉体急結剤の場合よりも重要であった。
- ・今回使用した液状急結剤吹付け機（ロードランナー2000）は、エンジンでも吹けるため、キャプタイヤケーブルを敷き回さずに施工することもでき、施工効率が向上した。
- ・液状急結剤は 1t コンテナで搬入され、ポンプで吹付け機へ補給する。1 袋 25kg を添加タンクへ投入する粉体急結剤では、作業員が粉じんにさらされたり、大きな労力が必要となる。吹付け準備段階においても液状急結剤の利点は大きい。
- ・アルカリフリーであり、手が荒れるといったことは無かった。

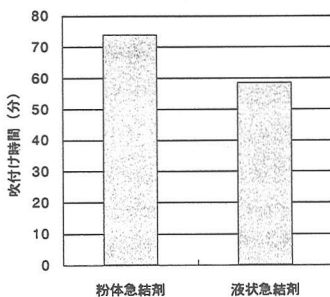


図-11 吹付けコンクリート
施工時間の比較

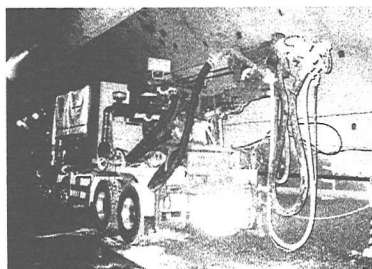


写真-2 液状急結剤吹付け機



写真-3 吹付け施工状況

<コスト>

液状急結剤コンクリートは、粉体急結剤のコンクリートと比較して、急結剤の価格が 1.5 倍、セメント量が 1m³ 当たり 70kg 増え、更に高性能減水材 NT1000 が必要となる。また、液状急結剤の添加率はセメント重量比 9%程度が標準であり、粉体急結剤の 7%程度と比較して多くなっている。これらより算定すると、液状急結剤 1m³ 当たりの吹付けコンクリートは、粉体急結剤の吹付けコンクリートよりも 1.5 倍ほど高い。しかし、リバウンド量の低減により、1m 当たりの施工費は同程度になると、メーカーでは試算している。図 11 の液状急結剤と粉体急結剤の吹付け時間の比較結果は、この試算を裏付けるものとなっているものの、更に多くのデータが必要と思われる。

<まとめ>

ここでは、坑内の粉じん低減を目標として取り組んだものの、実際には液状急結剤吹付けの施工性と品質に関する情報が少なかったため、これらのデータの収集も重要となった。今回の試みでは、多くのデータが収集できたわけではないが、幾つかの貴重なデータを得ることができた。粉じん濃度の低減効果、強度特性、吹付け時間の短縮などの優れた結果からは、液状急結剤が将来性のある急結剤であると感じられた。今後は現場での実績を増やし、コストの問題や湧水地山など特殊地山での適用性などの施工データを収集・分析して、標準工法をも目指していくべきと思われる。

4. おわりに

ガイドラインが策定されて以来、各機関において粉じん濃度低減への積極的な取り組みが行われてきている。著者らも、長野県ねがめトンネルにおいて、自動粉じん濃度計を導入し、幾つかの粉じん低減対策に取り組んだ。この取り組みを通して分かったことと、今後の課題を以下に示す。

・今回採用した粉じん濃度計は、測定員が不要で自動で連続的なデータが取得できるため、粉じん濃度の管理・分析を行っていく上で、非常に有効であった。今後、広く普及されていくことが望まれる。

・今回試みた「粉じん抑制剤」、「大容量集塵機」、「液状急結剤」ともに、粉じん濃度低減に効果があることを定量的に把握することができた。しかし、いずれにも長所短所があるため、それらを十分把握し適切に適用していくことが必要である。

・坑内の粉じん濃度は、切羽進行に伴って毎回施工条件変わるため変動し、粉じん濃度低減対策による効果を単純に比較することが困難なこともあった。これより、大がかりな粉じん濃度低減対策を実施しなくとも、粉じん濃度を低減させるファクターは、他にもいろいろあることが分かった。例えば、換気設備のスペック増強だけでなく、風管の曲がり・破れ、送風機架台と切羽離れ、集塵機フィルターの管理など換気設備の適切な管理である。また、吹付けコンクリートの品質管理、吹付けロボットの操作、急結剤の添加率などの管理である。今回の試みを通して、身近な施工管理が粉じん低減効果に大きく影響することを改めて実感した。

・坑内粉じん濃度低減の取り組みは、多くの労力・費用・時間が必要となるものの、坑内作業の施工性向上への寄与は小さい。しかし、今後は人の健康に関する問題は、何よりも重要なファクターとなっていく。粉じん濃度低減への取り組みは、一過性のものではなく、関係者皆で継続的にそして更なる技術開発を進めていくことが必要と思われる。

謝辞：今回の坑内粉じん低減への試みを行うにあたり、長野県木曽建設事務所には多くの御指導、御協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

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，2000.12.26.
- 2) トンネルと地下：吹付けコンクリートに関する Q&A(6)，第 32 巻 11 号，pp.60-64，2001.1.
- 3) 粉じん抑制剤技術研究会：低粉じん吹付けコンクリートの実験報告書，1987.12
- 4) 萩森・酒井・片谷・村中：車載型電気集塵機を用いたトンネル工事換気システムの開発，建設の機械化，pp.21-27，2000.10.
- 5) 清水・岩田・ハーゲ・市毛・蓑宮：アルカリフリー液状急結剤「メイコ SA161」について，エヌエムビー研究所報別刷，No.13，pp.1-13，2000.