

NATM等の新技術に対応した じん肺防止対策に関する 調査研究報告書

平成10年3月

建設業労働災害防止協会



は じ め に

じん肺防止対策については、昭和30年の珪肺等特別保護法の施行、昭和35年のじん肺法の施行、さらに昭和54年の粉じん障害防止規則の施行、昭和56年以来4次にわたる粉じん障害防止総合対策の推進等により、多くの努力がなされてきたが、今なおじん肺は職業性疾病の1割を占めており、新規有所見者の発生もあとを絶たない状況にある。特にトンネル建設工事においては、他の業種に比べ有所見率が高い状況がみられる。

トンネル建設工事におけるじん肺防止対策上の問題点の一つには製造業における屋内作業と異なり、トンネルの掘削に伴って各種作業状況が刻々と変化していくため、一律には粉じん対策がとりにくいということがある。

このため、当協会では、労働省から委託され、平成8年度、9年度2カ年にわたり、トンネル内における粉じん濃度測定方法、NATMにおける効果的な粉じん低減対策について委員会を設置して調査研究を行った。

本報告書は、昨年度の検討結果を踏まえ、現在の知見で最終的に取りまとめたものである。

本調査研究の実施にあたり、アンケート、実地調査にご協力いただいた関係事業場及び資料の収集、執筆並びにご審議いただいた委員各位に深甚なる謝意を表する次第である。

平成10年3月

建設業労働災害防止協会

目 次

第1章 調査研究の目的等	1
1. 1 調査研究の目的	1
1. 2 調査研究の内容	1
1. 3 調査研究の方法	2
第2章 調査結果	4
2. 1 委員会、作業部会の活動状況	4
2. 2 実地調査の状況	5
2. 3 アンケート調査の結果	5
2. 4 粉じん濃度測定結果	9
第3章 調査結果に基づく粉じん対策の現状と今後の方向	43
3. 1 NATMの現状	43
1. NATM施工の歴史	43
2. NATMの基本的考え方	43
3. コンクリート吹付作業における粉じん対策の現状	50
3. 2 トンネル掘削工事における主要工程別気中粉じん濃度の現状と問題点	53
1. 坑内における粉じん測定の現状と問題点	53
2. 主要工程別気中粉じん濃度の現状	54
3. 3 NATMにおける粉じん対策の現状と今後の方向	58
1. アンケート調査及び実地調査結果からの粉じん対策事例	58
2. 粉じん発散量の低減対策	63
3. 粉じんを対象にした換気・集じん方法	63
第4章 トンネル建設工事における粉じん濃度測定	72
4. 1 建災防指針に基づく現地測定結果とアンケート調査結果	72
4. 2 建災防指針に基づく現地測定結果についての所見	72
4. 3 トンネル建設工事に導入可能な測定についての検討	72
4. 4 作業環境中の粉じん濃度低減対策のための測定結果の利用方法	73
4. 5 現行の建災防指針の問題点の検討課題	73
第5章 今後の課題	75

第1章 調査研究の目的等

1. 1 調査研究の目的

じん肺防止対策については、昭和30年の珪肺等特別保護法の施行、昭和35年のじん肺法の施行、さらに昭和54年の粉じん障害防止規則の施行、昭和56年以来4次にわたる粉じん障害防止総合対策の推進等により、多くの努力がなされてきたが、今なおじん肺は職業性疾病の1割を占めており、新規有所見者の発生もあとを絶たない状態にある。特にトンネル建設工事においては、他の業種に比べ有所見率が高い状況がみられる。

トンネル建設工事におけるじん肺防止対策上の問題点の一つには製造業における屋内作業と異なり、トンネルの掘削に伴って各種作業状況が刻々と変化していくため、一律には粉じん対策がとりにくいということがある。

こうした状況から、当協会では、労働省から委託され、平成8年度、9年度2カ年にわたりトンネル内における粉じん濃度測定手法、NATMによる効果的な粉じん低減対策について委員会を設置して調査研究を行った。

1. 2 調査研究の内容

上記の目的のもとに、次の内容の調査研究を行った。

<平成8年度>

- (1) トンネル建設工事における粉じん濃度測定、換気、散水状況等の粉じん対策実施状況、NATMの施工状況等の現状把握のためのアンケート調査を行い、坑内の粉じん濃度に対する種々の要因に対する統計解析を行った。
- (2) 実地調査を行い、粉じん対策等についての意見交換を行い、アンケート調査項目の妥当性の確認を行った。
- (3) 文献調査により、トンネル建設工事における粉じん対策の効果的手法等について確認を行った。

<平成9年度>

前年度の検討結果を踏まえ、アンケート調査結果の解析を引続き行ったほか、実地調査を行うなどして、トンネル建設工事における粉じんに関する粉じん濃度測定のあり方について、具体的には、

- ① サンプルング時の測定点の取り方
- ② 測定値の整理及び測定結果の評価方法
- ③ 検討結果実証のための現地測定の実施

等について検討した。

また、NATMにおける粉じん対策のあり方について具体的には、

- ① 湿式、乾式による吹付け作業時の粉じん発生の相違
- ② 急結剤、粉じん抑制剤の効果確認
- ③ NATMにおける効果的な粉じん対策
- ④ NATMにおける粉じん作業別の特定

等について検討した。

1. 3 調査研究の方法

上記テーマについて検討するため、「トンネル建設工事におけるじん肺防止対策調査研究委員会（委員長 中央労働災害防止協会 労働衛生検査センター技術顧問 興 重治 他11委員）」を設置し、調査研究の基本方針の決定、調査研究結果内容の検討を行った。

本委員会には検討テーマについて具体的に審議するため、「トンネル建設工事におけるじん肺防止対策調査研究委員会作業環境測定部会（部会長 中央労働災害防止協会 労働衛生検査センター技術顧問 興 重治 他12委員）」及び「トンネル建設工事におけるじん肺防止対策調査研究委員会 NATM 部会（部会長 日本鉄道建設公団工務部工務第一課 補佐 松江 聡 他9委員）」を設置し、粉じん測定データの収集、分析及びNATMにおける効果的な粉じん対策について検討を行った。

トンネル建設工事におけるじん肺防止対策調査研究委員会

委 員 名 簿

委員長 興 重治 中央労働災害防止協会 労働衛生検査センター 技術顧問
委 員 木村 菊二 (財)労働科学研究所 名誉研究員
〃 小笠原光雅 (株)大林組 東京本社 土木技術本部 技術第二部 副部長
〃 小坂 稔 前田建設工業(株) 安全労務部長
〃 小西 淑人 (社)日本作業環境測定協会 研究技術課長
〃 松江 聡 日本鉄道建設公団 工務部 工務第一課 補佐
〃 中野 陽一 三井建設(株) 土木本部 機電部 機電課長
〃 名古屋俊士 早稲田大学 理工学部 資源工学科 教授
〃 本間 克典 (社)日本作業環境測定協会 研修センター 所長
〃 明星 敏彦 労働省 産業医学総合研究所 労働環境研究部 主任研究官
〃 江良 嘉宏 日本道路公団 技術部 道路技術課
〃 三上 辰雄 三上労働衛生コンサルタント事務所 所長

トンネル建設工事におけるじん肺防止対策調査研究委員会作業環境測定部会

委 員 名 簿

部会長 興 重治 中央労働災害防止協会 労働衛生検査センター 技術顧問
委 員 稲葉 力 西松建設(株) 技術研究所 技術部 土木技術課長
〃 今岡 彦三 佐藤工業(株) 土木総本部 土木本部 技術部 担当部長
〃 木村 菊二 (財)労働科学研究所 名誉研究員
〃 小坂 稔 前田建設工業(株) 安全労務部長
〃 小西 淑人 (社)日本作業環境測定協会 研究技術課長
〃 野中 格 (株)熊谷組 環境安全本部 労務安全部 部長
〃 佐藤 久 (社)日本トンネル技術協会 技術部長
〃 中村 隆 大成建設(株) 国際事業本部 安全・機材本部 安全機材室 室長
〃 名古屋俊士 早稲田大学 理工学部 資源工学科 教授
〃 本間 克典 (社)日本作業環境測定協会 研修センター 所長

- ◇ 明星 敏彦 労働省 産業医学総合研究所 労働環境研究部 主任研究官
- ◇ 三上 辰雄 三上労働衛生コンサルタント事務所 所長

トンネル建設工事におけるじん肺防止対策調査研究委員会 NATM 部会

委 員 名 簿

- 部会長 松江 聡 日本鉄道建設公団 工務部 工務第一課 補佐
- 委 員 荒 勇 前田建設工業(株) 施工本部 土木部 課長
- ◇ 小笠原光雅 (株)大林組 東京本社 土木技術本部 技術第二部 副部長
 - ◇ 佐藤 久 (社)日本トンネル技術協会 技術部長
 - ◇ 中野 陽一 三井建設(株) 土木本部 機電部 機電課長
 - ◇ 原田 実 鹿島建設(株) 技術研究所 第七研究部 専門部長
 - ◇ 水越 史郎 西松・本間・巴山特定共同企業体 当麻トンネル出張所 所長
 - ◇ 江良 嘉宏 日本道路公団 技術部 道路技術課
 - ◇ 目黒 悟 飛島・清水組建設共同企業 五日市トンネルあきるの作業所 所長
 - ◇ 三上 辰雄 三上労働衛生コンサルタント事務所 所長

(順不同・敬称略)

第2章 調査結果

2.1 委員会、作業部会の活動状況

平成8年度、9年度の2年間で、本委員会を延べ3回、作業環境測定部会を延べ7回、NATM部会を延べ7回開催した。また、その間実態把握のためのアンケート調査や現地調査を行った。

日 程	本委員会	測定部会	NATM 部会	備考
平成9年1月	第1回 本委員会の趣旨説明 検討内容の決定	第1回 作業部会の趣旨説明 検討内容の決定	第1回 作業部会の趣旨説明 検討内容の決定	 アンケート調査の実施・集計・分析 
平成9年2月		第2回 検討方針の決定	第2回 検討方針の決定	
平成9年3月		実態調査 (A1～A5トンネル工事)	実態調査 (A6～A8トンネル工事)	
平成9年8月	第2回 本年度検討方針について決定	第3回 中間報告の原案検討	第3回 中間報告の原案検討	
平成9年9月		第4回 検討事項の決定	第4回 検討事項の決定	
平成9年10月		第5回 検討方針の検討	第5回 検討方針の決定	
平成9年11月		現場実態調査 (B1トンネル工事)		
12月		同 (B2トンネル工事)		
平成10年1月		同 (B3トンネル工事)		
		同 (B4トンネル工事)		
		同 (B5トンネル工事)		
2月		第6回 とりまとめ方針の検討	第6回 とりまとめ方針の検討	
3月	第3回 報告書とりまとめについて検討	第7回 報告書原案の検討	第7回 報告書原案の検討	

2. 2 実地調査の状況

1. 平成8年度

平成8年度は、トンネル工事における粉じん対策について、粉じん測定の実施状況や換気方式に関する問題点等を把握するため、各部会毎に調査班を編成して次の8現場において実地調査を行った。

工事現場名	工法等の概要
A1 トンネル工事	上部半断面先進ベンチカット工法による機械掘削 (一部補助ベンチ付き全断面発破掘削)
A2 トンネル工事	補助ベンチ付き全断面発破掘削
A3 トンネル工事	補助ベンチ付き全断面発破掘削
A4 トンネル工事	TBM による先進導坑大断面掘削
A5 トンネル工事	全断面発破掘削
A6 トンネル工事	上半先進ショートベンチによる機械掘削
A7 トンネル工事	上半先進工法による発破掘削
A8 トンネル工事	全断面発破掘削

2. 平成9年度

前年度の検討結果を踏まえ、平成9年度は、粉じん測定データの収集及び各種条件下での効果的な粉じん対策事例を収集するため、両部会合同による調査班を編成して、実地調査を行った。

工事現場名	工法等の概要
B1 トンネル工事	全断面機械掘削
B2 トンネル工事	全断面発破掘削
B3 トンネル工事	ショートベンチ機械掘削
B4 トンネル工事	全断面発破掘削
B5 トンネル工事	ショートベンチ付き全断面発破掘削

2. 3 アンケート調査の結果

NATM における粉じん対策等の現状について把握するため、アンケート調査を実施した。

1. 調査の概要

(1) 調査方法

日本トンネル技術協会発行のトンネル年報'96をもとに、トンネル全長500メートル以上(シールドを含む)で、平成9年3月以降に完工予定のトンネルを対象とした。

調査にあたっては、トンネル施工会社(元請、共同企業体の場合はスポンサー会社) 45

社に対して調査協力を依頼し、各社から施工現場に調査表を送付するなどして調査を実施した。

(2) 調査の内容

トンネル工事作業環境調査表による。

(3) アンケート調査依頼件数

230件

(4) 回収状況

有効回答件数 219件

回収率 95.2%

山岳トンネル 139件

シールドトンネル 80件

2. 項目別調査結果

次に、アンケート調査結果の概要を述べる。

(1) シールド工事

① 都道府県別施工場所

東京を中心として関東地区、大阪地区、愛知地区の順となり、大都市におけるライフライン整備が進められているのがわかる。

② 工事目的

下水道整備が1位を占め、地下鉄建設がこれに次いでいる。

③ 掘削工法

掘削方式では、泥水式シールド工法が半数を占めていた。また、ずり出し方式では、泥水式の採用のため、パイプ圧送方式の設備が多い。

④ 掘削断面積

10m²以下の小断面トンネルが43%を占めている。

⑤ 換気方式

現場の80%で送気式が採用されている。

⑥ 換気量

小断面が大半を占めているため、トンネル延長との相関は見出せないが、換気量は15～100m³/minの間に集中している。

(2) 山岳トンネル

① 都道府県別施工場所

多い順に新潟県、山梨県、兵庫県となっている。

② 工事目的

高速道路を含めた道路整備が62.5%と顕著であった。

③ 掘削工法

掘削方式では、発破掘削の採用が66.2%と多いが、自由断面掘削機採用の機械掘削は30%強の実績があり今後の動向を注目したい。

全断面掘削は、回答での補助ベンチ付きを合計している。ショートベンチを含めるとこれらの工法で大半を占めている。掘削方式は、NATMが主流であるが、在来工法は16

件 (11.5%) あった。

また、ずり出し方式はタイヤ方式が78.4%と大半を占めている。

④ 掘削断面積

61~90m²の掘削断面積が半数以上を占めている。

20m²以下の水路トンネル建設が顕著であった。40m²以上の断面積では、道路トンネルの建設が多く、山間部の多い県別の建設件数が多いものと思われる。

今回の調査の中では最小断面積は5.67m²、最大断面積は高速道路の139m²であった。

⑤ 地質条件

花崗岩、泥岩が多く、我が国の地質構成上から新第三紀層、中古生層での掘削が多くなっていることがわかる。

⑥ 換気方式

送気式が67件 (48.2%) と多く、次いで送排気式が42件 (30.2%) となっている。

⑦ 換気量

断面積40m²以下では100m³/min 前後、41m²以上では1000~1500m³/min が多かったが、掘削延長との相関はみられなかった。

⑧ 風管径

掘削断面積40m²、換気量500m³/min 付近で風管径の採用が分かれている。掘削断面積60m²以上から風管径1400mm以上の採用が増加し、換気量増大に対応しているものと思われる。

⑨ 掘削運搬機の浄化装置

ずり積機においては、半数以上が浄化装置を取り付けているが、ずり運搬機械では、50%を割っており、今後の課題として残る。

⑩ 集じん機

70%が設置していない。

設置箇所は、切羽から50m以内は50%であった。設備風量は70~1500m³/min であったが、500m³/min が49%を占めている。

集じん機の効果は、効果有り21%、部分的効果があり70%、効果無し9%であった。

(3) 吹付コンクリート施工状況

① 地山状況

地山の状況は、比較的安定した地質条件の箇所が多い。湧水状況は湿潤状態かそれ以下の状態が40%となっている。

支保工状況は、H鋼支保工が69%を占めている。

② 吹付状況

吹付厚は10~15cmが多く59%であった。1サイクルの掘進長は1~1.5mで74%であった。余吹き率は200~300%が最も多い回答になっている。粉じん抑制剤は未使用が82%を占めていた。

③ 吹付機

乾式と比べ湿式が91%と大部分を占め、湿式採用の理由としては粉じん低減のためと回答としているものが53%あった。

④ 粉じん濃度測定

過去に粉じん測定を実施した現場は98件（86％）であった。

(4) 坑内一般

① 浄化装置

トラックミキサー車やコンクリートポンプ車への浄化装置の取付け状況については無しが大部分を占めている。坑内の機種に対する浄化装置の採用は、維持管理の経済性の問題もあり今後の機種開発に期待したい。

② 換気風量制御

換気風量をコンピューターにより管理しているのは全体の23％を占めている。現場における換気量の検討結果から22％の現場が増風を含めて改善されている。

(5) 粉じん濃度測定実施状況

① 測定実施率

粉じん濃度測定実施は山岳トンネル139件中121件で、測定実施率は87.1％であった。

② 測定状況

自社測定83.5％、外部委託測定16.5％の割合となっている。

③ 遊離けい酸含有率

実施あり71.3％、無し28.7％の割合であった。

④ 社内基準

トンネル坑内の粉じん測定について、社内基準が整備されているかどうかについては、有り48.9％、無し32.4％、未回答18.7％という割合であった。

(6) 粉じん濃度測定

① K値の測定結果

ずり積み時：0.01～0.04

吹付け時：0.01～0.05

の範囲にあるが、0.03～0.05が多い。

② ずり積み時の粉じん濃度

切羽の周辺風速が速くなっても、一部を除き濃度分布はあまり変わらない。

ずり積み機の動力別の濃度分布図によれば、電動式ショベル、機械掘削式は、ディーゼル機関のずり積み機より濃度分布が低いことが伺える。

③ 吹付時の粉じん濃度

換気方式別では、組合せ式の濃度は他より幾分高いように身受けられる。吹付機種別では、空圧式吹付機の濃度がピストン式、ロータリー式に比べて幾分高く見受けられる。余吹き率との関係については、余吹き量が多くなっても濃度分布は、一定の分布状況を示している。

吹付時間との関係は、吹付時間が長くても（吹付量が多い）横這いの一定濃度のような分布状況を呈している。

急結剤使用量は5.5％と7.0％の採用が最も多いが、粉じん濃度との関係については見受けられなかった。

吹付圧力は、4～7 kgf/cm²で吹き付けている現場が多いが、粉じん濃度との関係については見受けられなかった。

ホース距離・ノズル径と粉じん濃度との関係は特に見受けられなかった。

④ 機械掘削・せん孔時の濃度

機械掘削・せん孔時の濃度は、ずり積み時、吹付け時の濃度と比べ、 $2.5\text{mg}/\text{m}^3$ 以下の低レベルに分布している。

2. 4 粉じん濃度測定結果

1. 調査方法

(1) 粉じん濃度測定

建設業労働災害防止協会（以下「建災防」という。）が昭和61年に建設業界の自主基準として制定した、「地下工事における粉じん測定の指針」（以下「建災防指針」という。）に基づき、図2-1～2-5中の①～⑥の測定点（作業によっては邪魔になるため測定できなかった測定点がある。）で、デジタル粉じん計P-5H2を使用して相対濃度を測定するとともに、図2-1～2-5の●の測定点で相対濃度を質量濃度に変換するための質量濃度変換係数（K値）を求めるための併行測定を実施した。併行測定には多段型分粒装置（C-30型）付きのろ紙ホルダーにグラスファイバーろ紙（T60A20 $\phi 25\text{mm}$ 東京ダイレック㈱）を装着し、サンプリングポンプとして、AirCon2（日本カノマックス㈱）を使用して、流量 $15.0\text{ l}/\text{min}$ で10分から60分間のサンプリングを実施した。また、図2-1～2-5中の①～⑥の測定点で、直接粉じん質量濃度測定するために多段型分粒装置付ろ紙ホルダーを使用してグラスファイバーろ紙をろ過材として $15.0\text{ l}/\text{min}$ で10分から60分間測定を実施した。さらに換気状態確認のために図2-1～2-5のa、b、cの測定点でデジタル粉じん計を使用して粉じん個数濃度を測定し、併行測定で得られたK値により、粉じん質量濃度を求めた。併行測定付近では作業内容と粉じん濃度の経時変化を調べるための連続測定を実施した。

(2) 個人ばく露濃度測定

個人ばく露濃度測定は、吸入性粉じんと総粉じんが同時に捕集できる、労研TRサンプラー（型式PS-43 柴田科学器械工業㈱）を使用した。TRサンプラーは、ホルダーにグリース塗布したステンレス衝突板とグラスファイバーろ紙（T60A20 $\phi 25\text{mm}$ 東京ダイレック㈱）を使用し、作業者の襟元付近に装着して測定した。サンプリングポンプは、GilAir5（日本カノマックス㈱）を使用し、作業者の腰付近に装着し、 $2.5\text{ l}/\text{min}$ の流量で10分から250分間捕集した。

(3) 風速測定

各測定点の風速の測定は、熱線式風速計（クリモマスター MODEL6511 日本カノマックス㈱）を使用し、10秒間値を秒速に変換した値を求めた。

(4) 遊離けい酸含有率測定

遊離けい酸含有率測定は、あらかじめ金属基本底標準板（亜鉛）のX線強度を測定済みのグラスファイバーろ紙を併行測定用ろ紙として使用し、サンプリング後、X線回折装置（XD-6000㈱島津製作所）を使用して、基底標準吸収補正法により、粉じん中の SiO_2 を定量し、含有率を算出した。

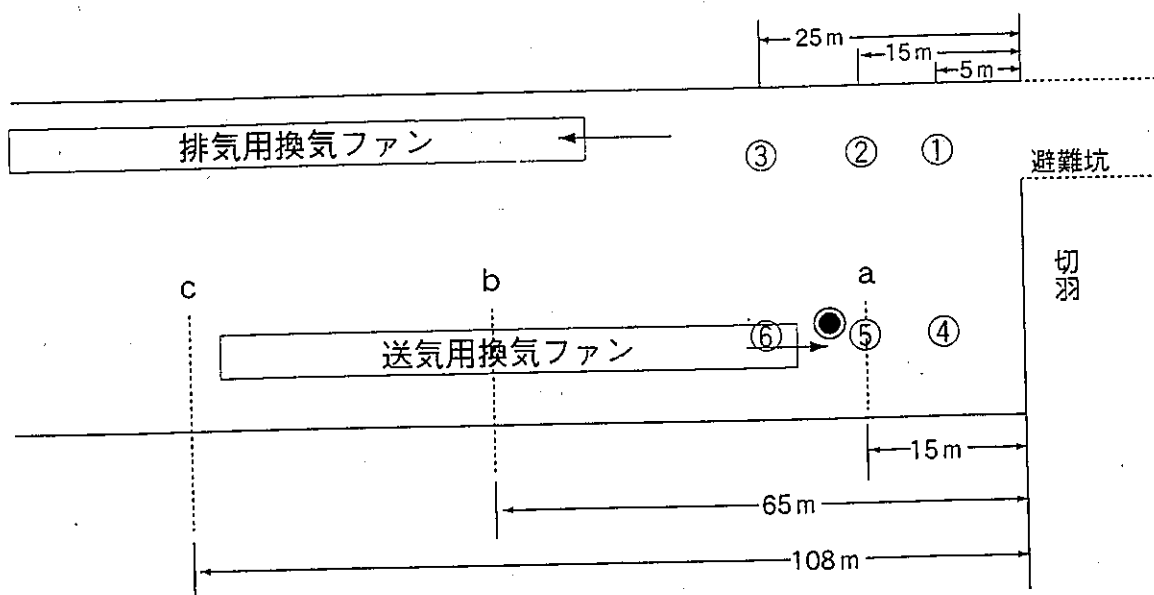


図2-1 B1トンネル工事測定点等の概要

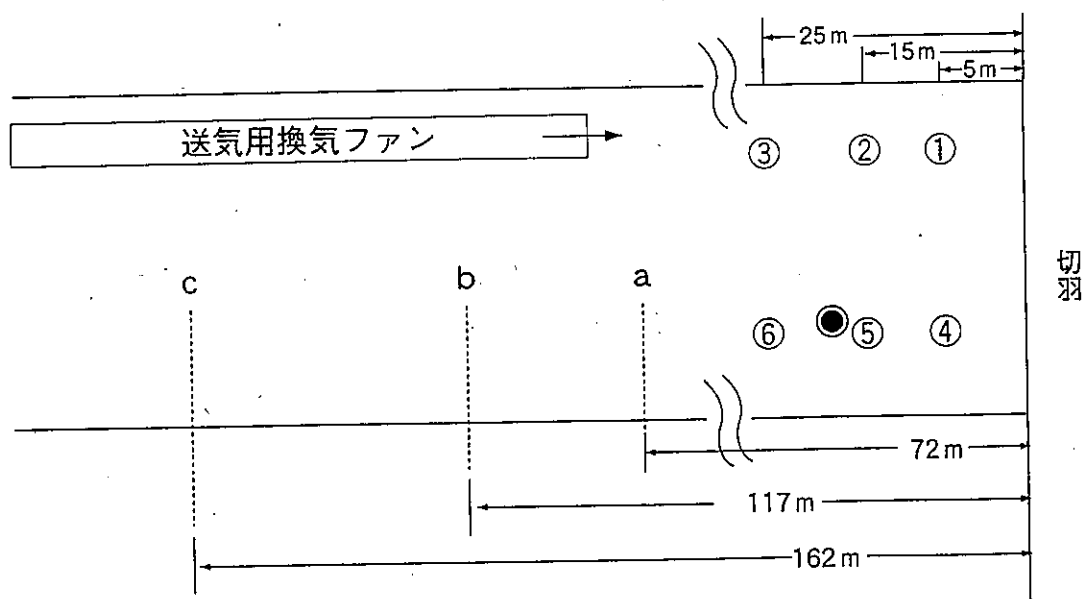


図2-2 B2トンネル工事測定点等の概要

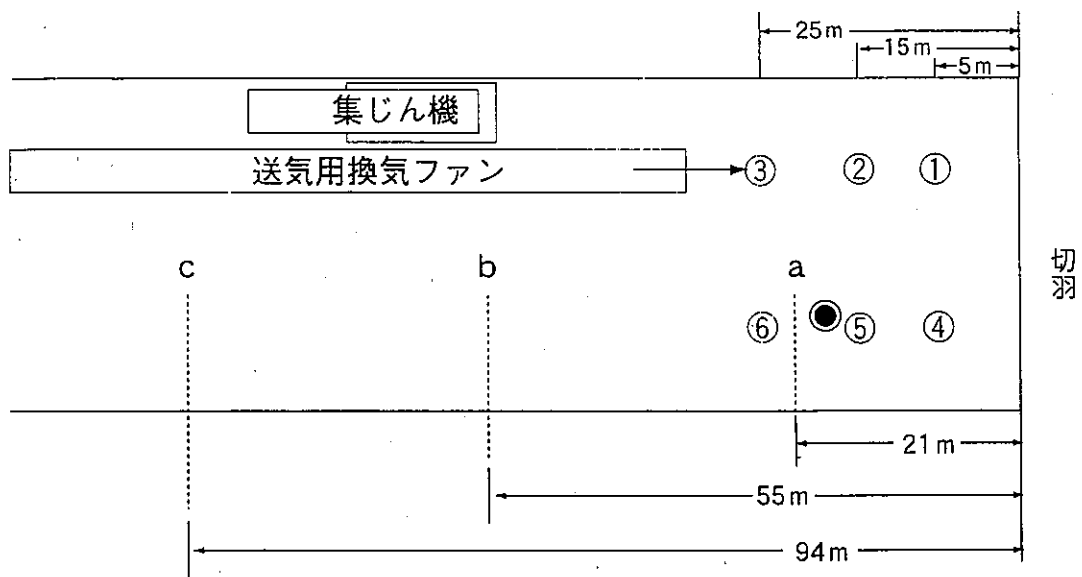


図 2-3 B3トンネル工事測定点等の概要

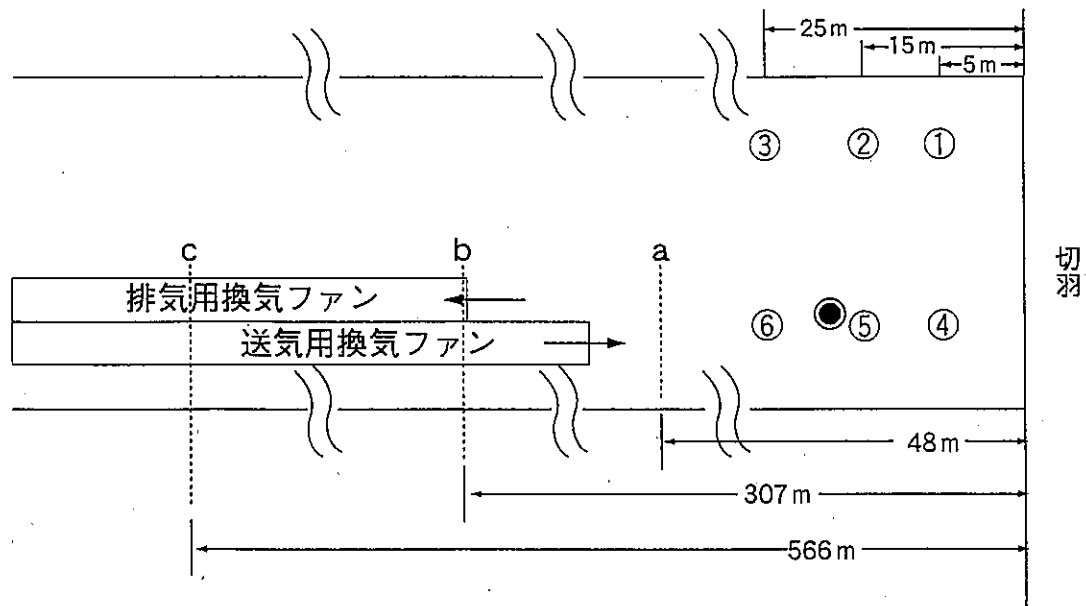


図 2-4 B4トンネル工事測定点等の概要

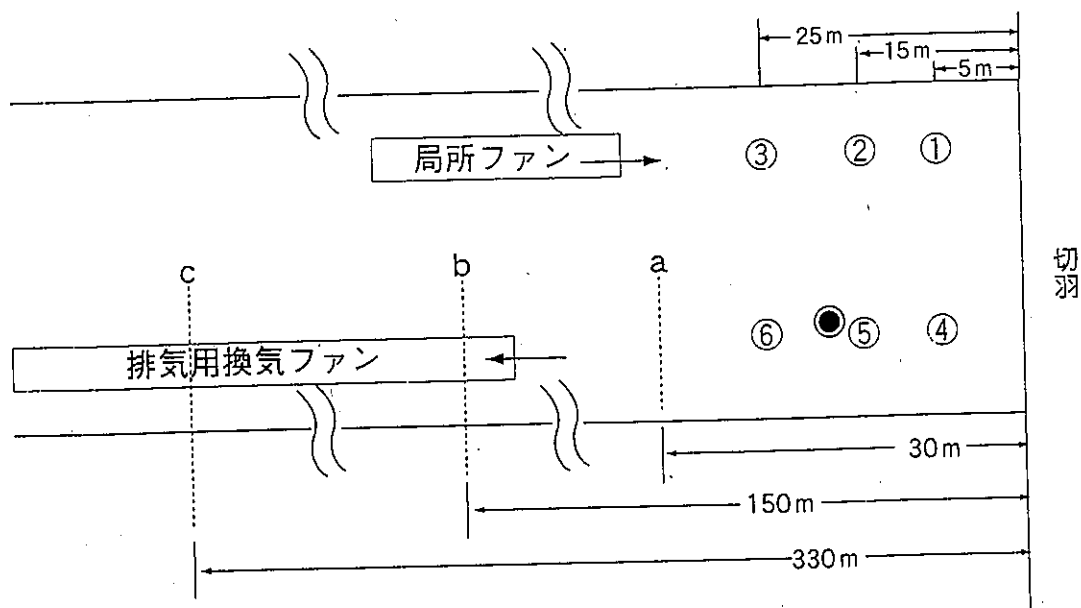


図2-5 B5トンネル工事測定点等の概要

2. 分析方法

(1) 粉じん濃度

多段分粒装置 (C-30型) からグラスファイバーろ紙を取り出し、読み取り限度0.01mgの天秤 (AEG-45SM (株)島津製作所) の天秤でそれぞれ秤量し、グラスファイバーろ紙上の粉じん質量を吸引空気量で除して粉じん質量濃度を算出した。

(2) 個人ばく露濃度

TR サンプラーのホルダーからステンレス衝突板及びグラスファイバーろ紙を取り出し、読み取り限度0.01mgの天秤 (AEG-45SM (株)島津製作所) の天秤でそれぞれ秤量し、吸入性粉じん濃度はグラスファイバーろ紙上の粉じん質量を吸引空気量で除して算出し、総粉じん濃度は、ステンレス衝突板上の粉じん質量とグラスファイバーろ紙上の粉じん質量を加えて、吸引空気量で除して算出した。

(3) 遊離けい酸含有率

多段分粒装置 (C-30型) からグラスファイバーろ紙を取り出し、読み取り限度0.01mgの天秤 (AEG-45SM (株)島津製作所) の天秤でそれぞれ秤量し、グラスファイバーろ紙上の粉じん質量を求めた後、X線回折装置 (XD-6000 (株)島津製作所) でサンプリング後のろ紙と金属基底標準板 (亜鉛) の強度、石英の強度を計測し、基底標準吸収補正法により石英の質量を算出し、グラスファイバーろ紙上の粉じん質量で除して遊離けい酸含有率を求めた。

3. 調査結果

粉じん測定を行ったトンネル工事現場の概要をまとめると表2-1のとおりである。

表2-1 トンネル工事実施調査現場の概要

実施日		平成9年11月28日		平成9年12月9日		平成10年1月14日		平成10年1月21日		平成10年1月23日	
工事名称		B1トンネル工事		B2トンネル工事		B3トンネル工事		B4トンネル工事		B5トンネル工事	
調査者	測定部会	興、小西、明星、中村	内藤	今岡、三上、名古屋	加納	小坂、小西、本間	松山	小西、三上	内藤	小西	内藤
	NATM部会	佐藤	大田原	小笠原	大田原	原田、三上	大田原	松江、荒	森脇	中野、目黒、原田	森脇
工事概要	工事目的	高速道路		国道		市町村道		鉄道複線		鉄道複線	
	規格：トンネルR	5000m・m		—		6100m・m		4750m・m		5100m・m	
	掘削高H	7.8m		6.950m		8.35m		8.2m		8.38m	
	掘削幅W	10.6m		10.4m		13.0m		10m		10.1m	
	掘削工法	全断面		全断面、ショートベンチ		全断面ショートベンチ		全断面		全断面、ショートベンチ	
	トンネル延長	1529.8m		1584m		1107m		3840m		2910m	
	切羽掘削断面積	68.3m ²		61.350m ²		92.567m ²		74.6m ²		74m ²	
	掘削方式	機械掘削		発破掘削		機械掘削		発破掘削		発破掘削	
	ずり出し方式	タイヤ		タイヤ		タイヤ		タイヤ		タイヤ	
	主な地質	新第三紀泥岩		頁岩		凝灰角礫岩・火山円礫岩		古生層粘板岩		花崗岩	
換気設備	換気方式	送排気式		送気式		排気式から送気式に変更		送排気式		送排気式	
	設計所要換気風量	1190m ³ /min		1500m ³ /min		706m ³ /min		909m ³ /min		1484m ³ /min	
	坑内風速	0.24m/s		0.25m/s		—		0.65m/s		0.31m/s	
掘削進捗状況	切羽の岩質	泥岩		堆積岩		凝灰角礫岩		凝灰岩		白亜紀貫入岩	
	岩石名	泥岩		頁岩		—		粘板岩		花崗岩	
	支保方式	鋼製支保工		鋼製支保工		ロックボルト・吹付コンクリート		鉄製支保工・ロックボルト・吹付コンクリート		ロックボルト・吹付コンクリート	
	湧水状況	なし		なし		300リットル/分		700リットル/分		75リットル/分	
集じん機	削孔	—		2.1本/m ²		—		1.5本/m ²		2本/m ²	
	設備の有無	無し		無し		有り		無し		無し	
	設備名	—		—		産業エンジニアリング RE-1500P		—		—	
	風量	—		—		1500m ³ /min		—		—	
	運転状況	—		—		乾式フィルター		—		—	
	稼働状況	—		—		16時間/日		—		—	
吹付け状況	使用効果	—		—		掘削・ずり出し・吹付時 効果有り		—		—	
	切羽湧水状況	殆ど水無し		局部的湧水		湿潤程度・局部的湧水		局部的湧水		局部的湧水	
	吹付け厚	25cm		15cm		10cm		12.5-20cm		10cm	
	吹付け数量：	—		—		—		—		—	
	1サイクル掘削長	1m		1.2m		1.5m		1-1.3m		2.5m	
	設計数量	5m ³		2.0351m ³		2.9m ³		2.8m ³		2.8m ³	
	実吹付量	15m ³		6.731m ³		9.0m ³		8.4m ³		8.0m ³	
	継続吹付時間/回	45分		100分		—		90分		—	
	現場配合：	—		—		—		—		—	
	最大骨材	15mm		15mm		15mm		10mm		10mm	
	W	53%		58%		60.5%		62%		60%	
	S	55%		67.4%		62%		60%		60%	
	セメント	360kg/m ³		400kg/m ³		360kg/m ³		360kg/m ³		C=342kg/m ³ ・CF=18kg/m ³	
	粗骨材	651kg/m ³		604kg/m ³		643kg/m ³		604kg/m ³		696kg/m ³	
	細骨材	1193kg/m ³		1226kg/m ³		1060kg/m ³		1075kg/m ³		957kg/m ³	
	急結剤量	7%		6.5%		20%		5-6%		6%	
	急結剤名	デンカナトミック TYPE5		デンカナトミック		デンカナトミック		デンカナトミック		デンカナトミック	
	粉じん抑制剤量	0.15ex%		—		—		—		—	
	粉じん抑制剤名	コンクリートS-113		—		—		—		—	
	メーカー名	堀田工業		—		—		—		ボソリス	
	混和材名	—		—		—		—		NT1000	
	混和材量	—		—		—		—		0.5CX%	
	吹付け機械	一体型吹付機		GSK ダイナミックローリ RTM-2025GV		アリバ285		GMB35C		アリバ285	
	吹付け圧	4kg/cm ²		5kg/cm ²		7kg/cm ²		7kg/cm ²		5.0kg/cm ²	
	方法	ロボット（一体型吹付機）		ロボット（ダイナミックシューター）		ロボット（AL305）		ロボット（GMB35C）		ロボット（AL306）	
	ノズル径	55mm		125mm		75mm		55mm		65mm	
	ホース長さ	10m		15m		15m		10m		20m	
	サイクルタイム	80分（吹付開始～終了）		80分（わり始め～吹付終了）		150分（わり始め～吹付終了）		90分（わり始め～吹付終了）		70分（わり始め～吹付終了）	
	吹付け時の風量等：	—		—		—		—		—	
	風量	500m ³		925m ³		120m ³		2000m ³		1400m ³	
	運転時間	—		100分 サイクル		—		90分 サイクル		50分 サイクル	

工事名称		B1トンネル工事	B2トンネル工事	B3トンネル工事	B4トンネル工事	B5トンネル工事
坑内一般	トラックミキサー	2台	4台	2台	2台	3台
	コンクリートポンプ	1台	1台	1台	1台	1台
	換気風量制御	コンピュータ制御している	インバータ制御している	していない	コンピュータ制御している	コンピュータ制御している
	その効果	多少効果有り			多少効果有り	効果があった
	内燃機関への対策	風量を大きくした	排ガス規制をしている	現状のまま	現状のまま	現状のまま
粉じん測定実施状況	測定実施者	自社測定	自社測定（現場員が行う）	自社測定（現場員が行う）	自社測定（現場員が行う）	委託測定
	測定機器の種類等					
	デジタル粉じん計	柴田科学器械工業（P-5L2）	柴田科学器械工業（P-5L2）	柴田科学器械工業（D-5H）	柴田科学器械工業（P-5L2）	柴田科学器械工業（P-5L2）
	ローボリュウムサンプラー				日本科学工業	柴田科学器械工業
	避塵けい離含有率	吹付時1.1% 掘削時9.1%	吹付時9.8%	3.77%	4.1%	2.54%
		委託分析	委託分析	委託分析	委託分析	委託分析
	社内測定基準の有無	有り	有り	無し	有り	無し
現在の工程	掘削作業場所、コンクリート吹付作業場所		地下工事における粉じん測定の指針（1986）	（但し目標値：5mg/m ³ ）		
	5mg/m ³ 以下					
換気系統図		【機械掘削工法】 機械の搬入 ↓ 掘削 ずり出し ↓ 一次吹付けコンクリート 鋼製支保工建て込み 金網取付け 二次吹付けコンクリート ロックボルト打設 ↓ インバート打設 ↓ 防水シート張り ↓ 掘工 ↓ 機械の搬出	【発破工法】 機械の搬入 ↓ 穿孔 装薬 発破・換気 ずり出し ↓ 鋼製支保工建て込み 吹付けコンクリート ロックボルト打設 ↓ 防水シート張り ↓ 掘工 ↓ 機械の搬出	【機械工法】 機械の搬入 ↓ 掘削 ずり出し ↓ 一次吹付けコンクリート 鋼製支保工建て込み 金網取付け 二次吹付けコンクリート ロックボルト打設 ↓ 防水シート張り ↓ 掘工 ↓ 機械の搬出	【発破工法】 機械の搬入 ↓ 穿孔・装薬 発破・換気 ずり出し ↓ 鋼製支保工建て込み 吹付けコンクリート ロックボルト打設 ↓ インバート ↓ 防水シート張り ↓ 掘工 ↓ 機械の搬出	【発破工法】 機械の搬入 ↓ 穿孔 装薬 発破・換気 ずり出し ↓ 吹付けコンクリート ロックボルト打設 ↓ 防水シート張り ↓ 掘工 ↓ 機械の搬出
		図2-1のとおり	図2-2のとおり	図2-3のとおり	図2-4のとおり	図2-5のとおり
その他換気測定の見解		①測定位置、回数について測定指針の見直しが必要。	①セントル部での風量の届かない箇所を減じている。前述箇所でのセントル移動時には送風を停止する必要がある。 ②現場からの意見として、排ガス規制を施した車を使用しているが所要換気量の計算は従来とおりとしている。それなりの計算方式があっても良いのではないかと。…NOXを規制しているのか？セントルより切頭側で粉じんがこもる傾向にあるので局所的な換気（1000m ³ /min）も考えている。	①管理2以上の者はいない。防じんマスクは下請が負担している。 ②現在、月1回測定しているが、これを月2回にするよう要請。コンクリート混練プラント（坑口傍）屋内粉じん作業につき、原料投入口（作業員1名）でも測定するよう要請。 ③現行の値では、集じん機は吹付けのみに限定されている。機械掘削は、NATMより発じんが多いので、これにも値算であるよう発注者を指導して欲しい。また、吹付量は4m ³ /hから6m ³ /hに値算が変えられたが、これに伴う発じん量増加に対する粉じん対策費は値算でみてくれないので、これも含めるよう発注者を指導して欲しい旨の要望があった。 ④測定回数（測定点）5回を3回にして欲しい旨の要望有り。	①じん肺健康診断は、最寄りの病院で実施。有所見者なし。 ②換気方式は送風式を採用しており、送気設備は1500m ³ /minのコントラファンと風管φ1200mm、換気設備は2000m ³ /minのコントラファンと風管φ1500mmの組み合わせによるもので、送気設備は比較的大型のものを採用していたように思われた。強力な送気を切羽に送ること、粉じんを早期に拡散・希釈し切羽付近の粉じん濃度を低下する方法を採用しているようであった。 ③換気設備には、台車上にセンサーが設置されており粉じん濃度を感知することにより風量の調節が行われるシステムになっていたが、切羽からの距離が100m～300mとなっており、当日は約300mの位置にありその状態が続いているようであった。これについては距離の長い状態が続くことのないよう改善の余地があるように思われた。	①高品質吹付けコンクリート現場試験結果から、粉じん測定結果では、従来吹付けコンクリートから高品質コンクリートの方が結果が良好となった。またシリカヒュームの液体とスラリーでの比較では粉体使用のコンクリートの方が良い結果となった。 ②当日の吹付けコンクリートは細骨材が従来の砕砂ではなく、荒い砂を使用したため、スランプがかなり高かったようである。

(1) B1トンネル工事

B1トンネル工事の作業工程は、表2-1に示すとおりで、機械掘削工法で行われ「機械の搬入」→「掘削・ずり出し」→「一次吹付けコンクリート」→「鋼製支保工建て込み」→「金網取付け」→「二次吹付けコンクリート」→「ロックボルト打設」→「インバート打設」→「防水シート張り」→「覆工」→「機械の搬出」の順で、5時間1サイクルの作業を6名で実施していた。写真2-1は、避難坑支保工取壊し作業、写真2-2は、二次吹付けコンクリート作業、写真2-3は、ロードヘッダによる掘削作業を示した。また、写真2-4は、ロックボルト打設作業を示し、写真2-5は、切羽面を示した。図2-1に、B1トンネル工事の二次吹付け作業と掘削作業の測定点を示した。作業環境濃度測定、個人ばく露濃度測定、換気状態の結果は表2-2に示した。図2-6には、作業環境測定結果と作業内容の関係を、図2-7には個人ばく露濃度測定結果と作業内容の関係を、図2-8には、粉じん濃度の経時変化と作業内容の関係を示した。

図2-6より作業環境測定結果では、二次吹付け作業は幾何平均値が $2.28\text{mg}/\text{m}^3$ で、掘削作業は幾何平均値が $0.79\text{mg}/\text{m}^3$ であり、二次吹付け作業の方が粉じん濃度が高かった。測定点と粉じん濃度の関係をみると二次吹付け作業は切羽に近い測定点①、④が粉じん濃度が高く、掘削作業では、測定点⑤が粉じん濃度が高かった。

図2-7より個人ばく露濃度測定結果から、吹付け作業者が、吸入性粉じん濃度が $2.18\text{mg}/\text{m}^3$ 、総粉じん濃度が $9.59\text{mg}/\text{m}^3$ と最も高い値を示した。

表2-2より換気状態は、二次吹付け作業では、切羽から15m地点で $0.56\text{mg}/\text{m}^3$ 、65m地点で $0.44\text{mg}/\text{m}^3$ 、108m地点で $0.41\text{mg}/\text{m}^3$ 、と切羽からの距離による差はみられなかったが、掘削作業では、切羽から15m地点で $0.88\text{mg}/\text{m}^3$ 、65m地点で $0.34\text{mg}/\text{m}^3$ 、108m地点で $0.31\text{mg}/\text{m}^3$ と65m以上において換気効果が見られた。

図2-8により作業内容別の相対濃度の経時変化では、二次吹付け作業が最も高濃度になると考えられている。

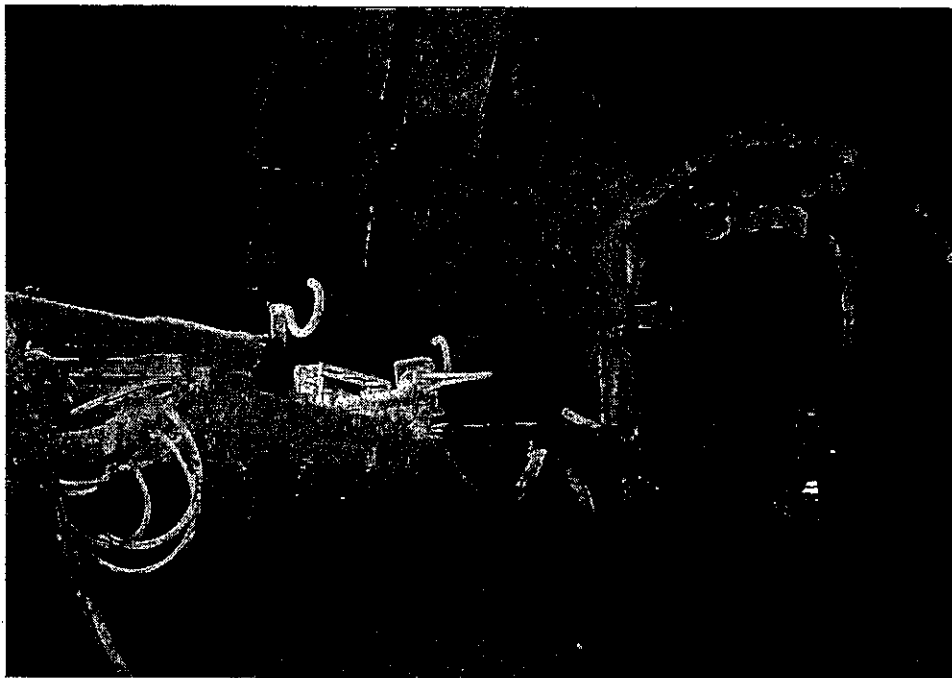


写真2-1 避難坑支保工取壊し作業 (B1トンネル)

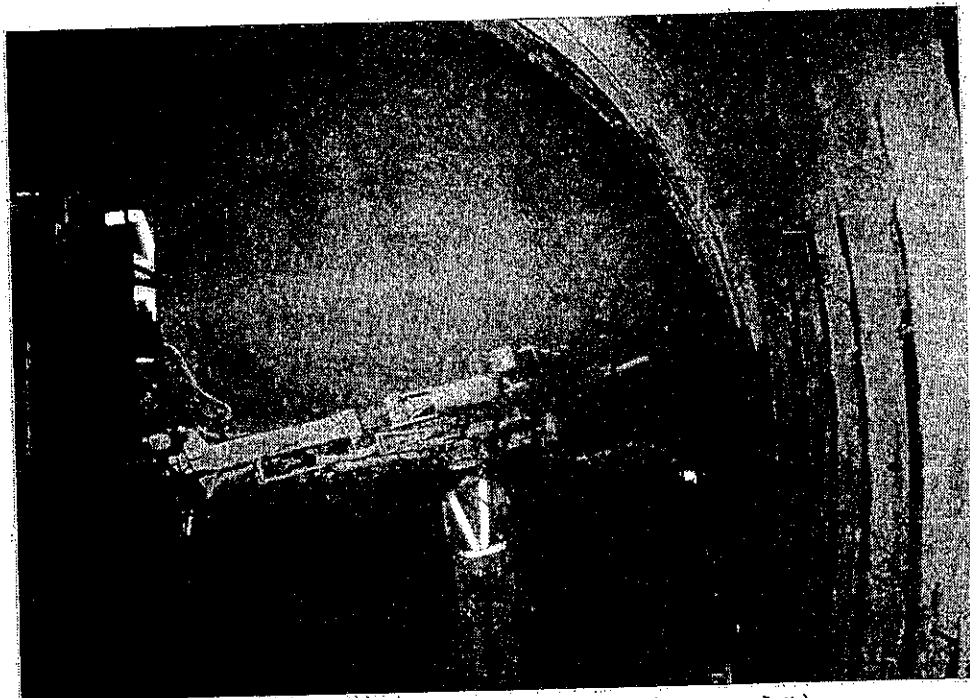


写真 2-2 二次吹付けコンクリート作業 (B 1 トンネル)

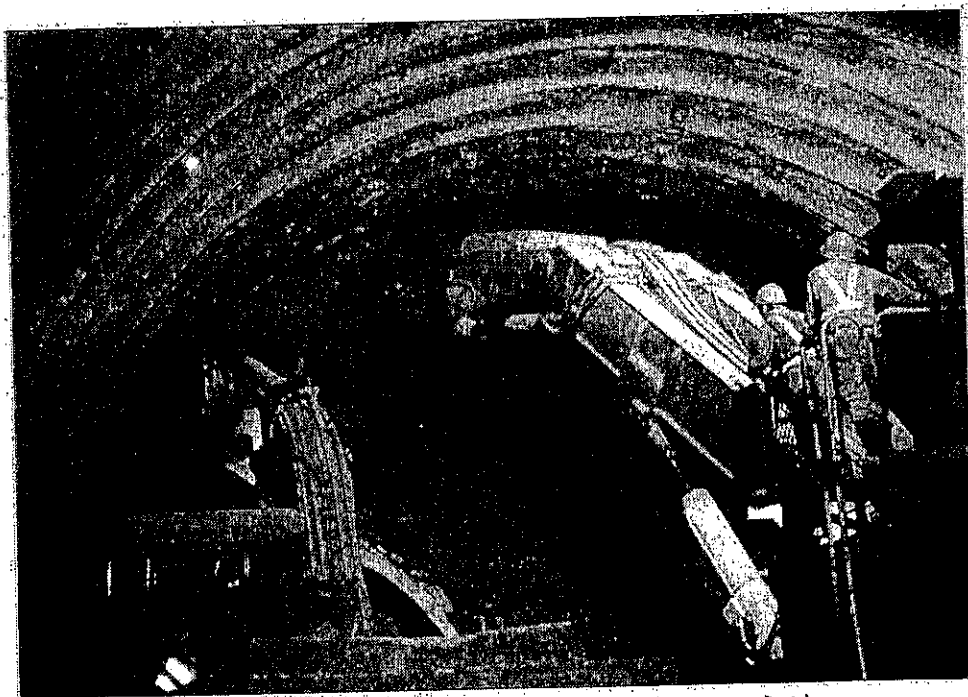


写真 2-3 ロードヘッダによる掘削作業 (B 1 トンネル)

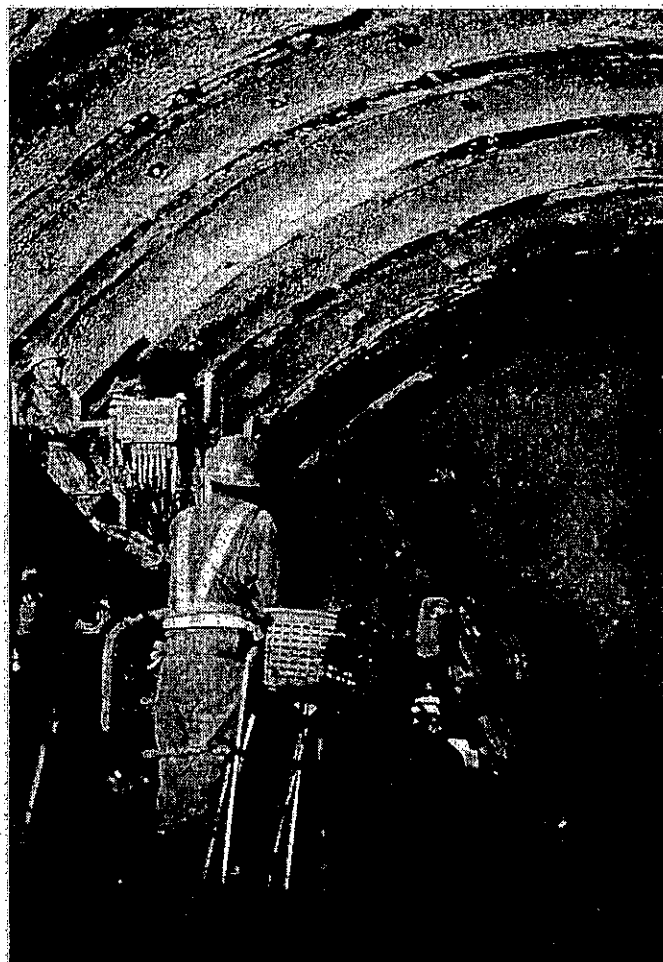


写真2-4 ロックボルト打設作業 (B1トンネル)

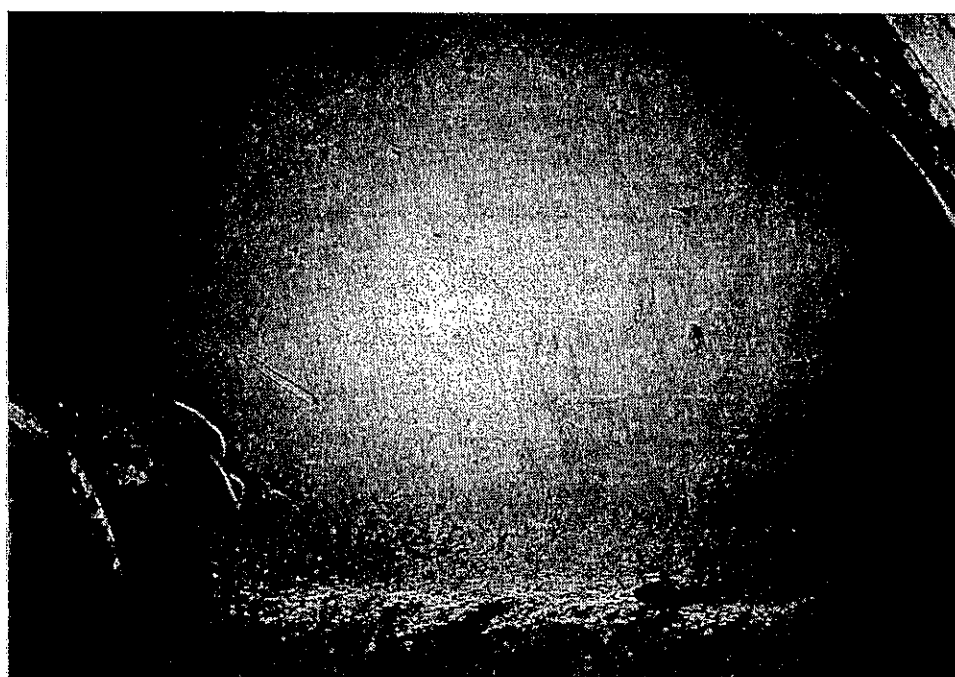


写真2-5 切羽面 (B1トンネル)

表2-2 B1トンネル工事の調査結果

表2-2 B1トンネル工事の測定結果

実施日	平成9年11月28日				
場所	B1トンネル工事				
○換気状態					
換気設備	送排気式		送排気式		
作業内容	二次吹付けコンクリート		掘削		
測定点	切羽からの距離	粉じん濃度 mg/m ³	切羽からの距離	粉じん濃度 mg/m ³	
a	15m	0.56	15m	0.88	
b	65m	0.44	65m	0.34	
c	108m	0.41	108m	0.31	
○作業内容(1)					
	ろ過捕集方法による粉じん濃度 mg/m ³	相対濃度計による相対濃度 cpm	風速 m/s		
測定点					
①	3.47	69.6			
②	2.92	60.2			
③	2.77	58.8			
④	2.83	63.4			
⑤	2.28	52.8			
⑥	0.78	15.2			
幾何平均値	2.28	48.3			
幾何標準偏差	1.72	1.75			
K値	—	K値=0.037			
遊離けい酸含有率	2.60%				
○作業内容(2)					
	ろ過捕集方法による粉じん濃度 mg/m ³	相対濃度計による相対濃度 cpm	風速 m/s		
測定点					
①	—	—			
②	—	—			
③	0.83	36.6			
④	—	—			
⑤	0.88	35.8			
⑥	0.68	32.0			
幾何平均値	0.79	34.7			
幾何標準偏差	1.14	1.1			
K値	—	K値=0.026			
遊離けい酸含有率	5.9%				
○個人ばく露測定結果					
作業者名	作業内容	吸入性粉じん濃度 (R) mg/m ³	総粉じん濃度 (T) mg/m ³	R・T	
W	生コン車運転、掘削	0.95	3.82	0.25	
K	生コン補給、掘削	0.36	1.41	0.26	
T	生コン補給、掘削	1.76	5.95	0.30	
I	吹付け、掘削	2.18	9.59	0.23	

「—」は機械移動により作業の邪魔になるため測定できなかった測定点
K値はP-5Lの感度で測定

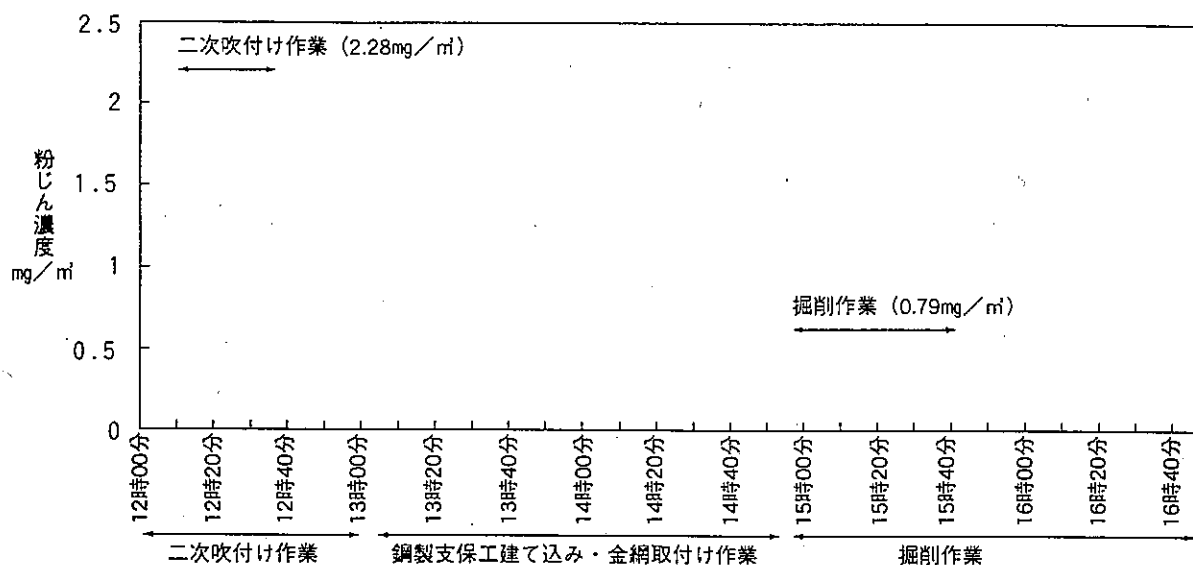


図 2-6 B1トンネル工事作業環境測定結果

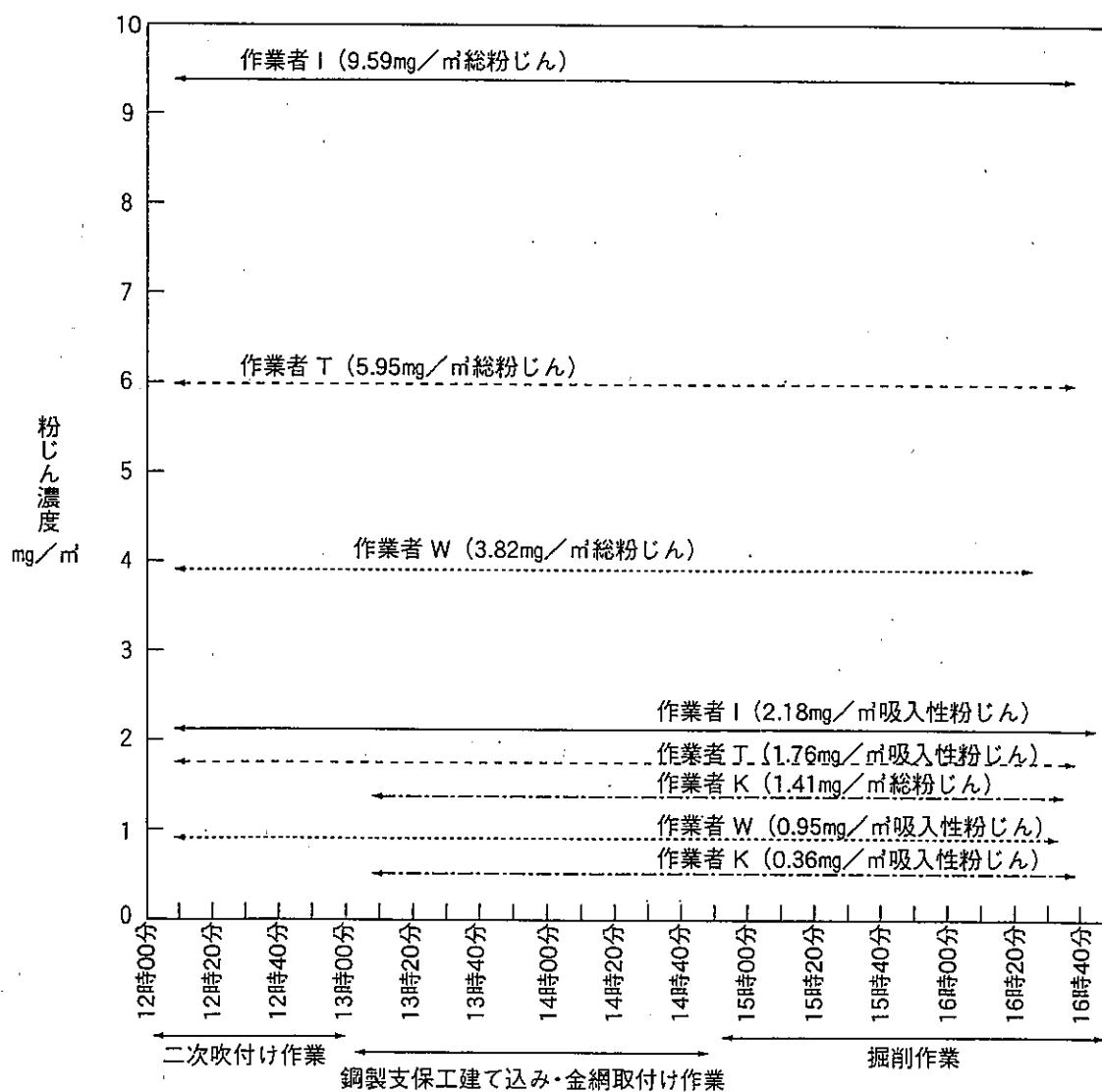


図 2-7 B1トンネル工事粉じん個人ばく露濃度結果と作業内容

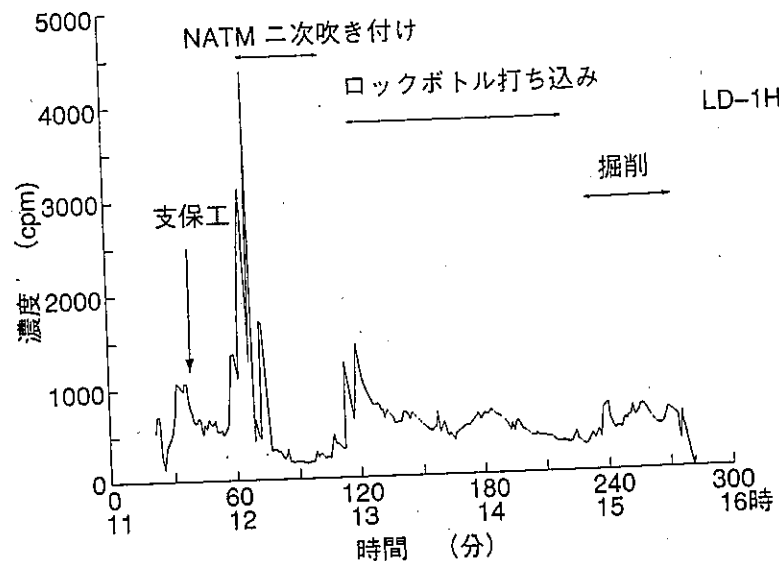


図 2-8 B1 トンネル工事粉じん濃度の経時変化と作業内容

(2) B2 トンネル工事

B2 トンネル工事の作業工程は、表 2-1 に示すとおりで、発破工法で行われ、「機械の搬入」→「穿孔」→「装薬」→「発破・換気」→「ずり出し」→「鋼製支保工建て込み」→「吹付けコンクリート」→「ロックボルト打設」→「防水シート張り」→「覆工」→「機械の搬出」の順で昼夜25人の作業員で実施している。

写真 2-6 は、穿孔・装薬、写真 2-7 は吹付けコンクリート作業、写真 8 は、ロックボルト打設を示す。また、写真 2-9 は、ずり出し作業、写真 2-10 は、切羽面、写真 2-11 は、換気設備を示した。切羽付近では、天井の一部より水が流れており、床面は、所々で水たまりができていた。図 2-2 に、B2 トンネル工事の吹付け作業と穿孔作業の測定点を示した。作業環境濃度測定、個人ばく露濃度測定、換気状態、測定点の風速の結果は表 2-3 に示した。図 2-9 には、作業環境測定結果と作業内容の関係を、図 2-10 には個人ばく露濃度測定結果と作業内容の関係を示した。

図 2-9 より作業環境測定結果では、吹き付け作業は幾何平均値が 4.00 mg/m^3 で穿孔作業は、幾何平均値が 0.59 mg/m^3 と吹き付け作業のほうが粉じん濃度が高かった。測定点と粉じん濃度の関係をみると吹き付け作業では切羽に近い測定点①が 6.73 mg/m^3 と最も粉じん濃度が高く、次いで測定点④の 4.24 mg/m^3 の順であった。穿孔作業では、測定点①の粉じん濃度が高く他の測定点の間では粉じん濃度はあまり差がみられなかった。

図 2-10 より個人ばく露濃度測定結果から、吹き付け作業員が、吸入性粉じん濃度が 13.0 mg/m^3 、総粉じん濃度が 27.0 mg/m^3 と吹き付け作業に従事している作業員が高い値を示した。

表 2-3 より換気状態は、切羽から 72m 地点で 0.43 mg/m^3 、117m 地点で 0.39 mg/m^3 、162 地点で 0.44 mg/m^3 と切羽からの距離による差はみられなかった。また、風速の測定結果より、切羽に近い測定点①、測定点②で 1 m/s 前後の風速であった。



写真 2-6 穿孔・装薬作業 (B 2 トンネル)

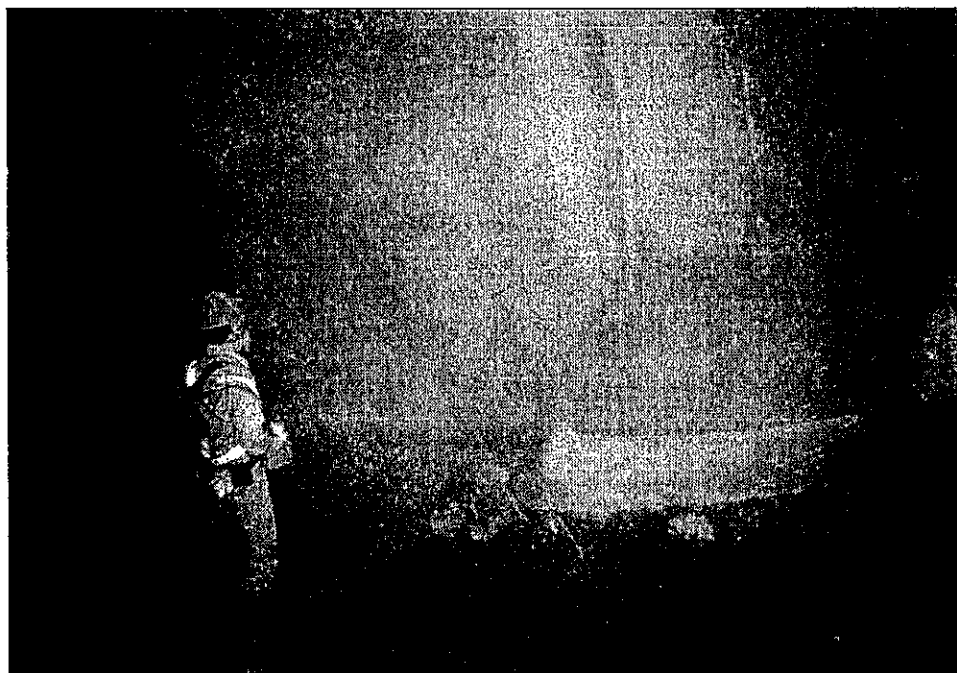


写真 2-7 吹付けコンクリート作業 (B 2 トンネル)

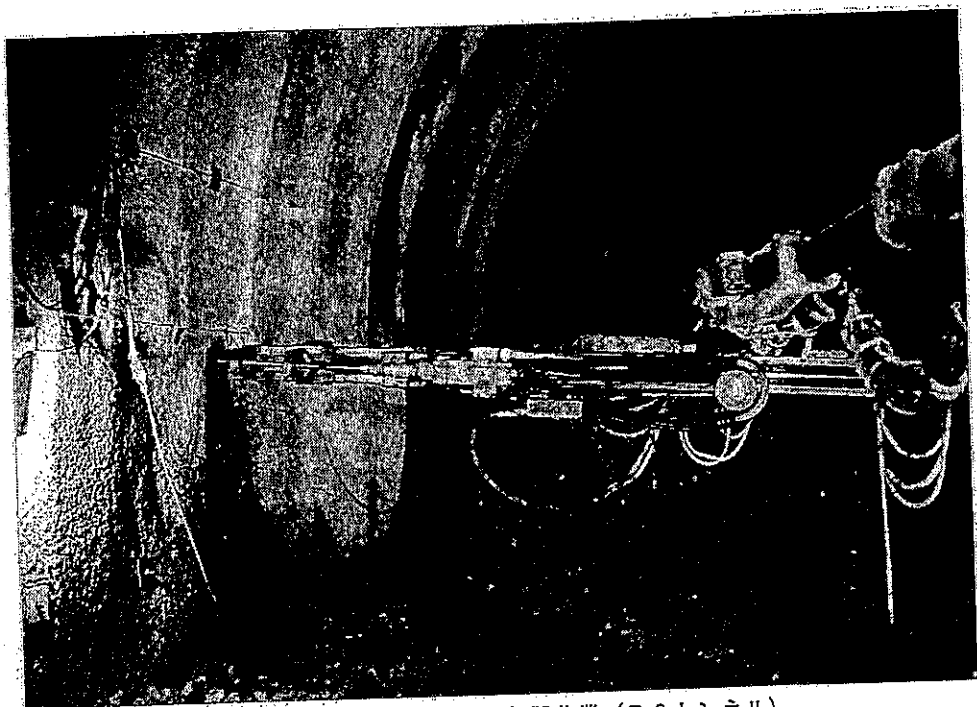


写真 2-8 ロックボルト打設作業 (B 2 トンネル)

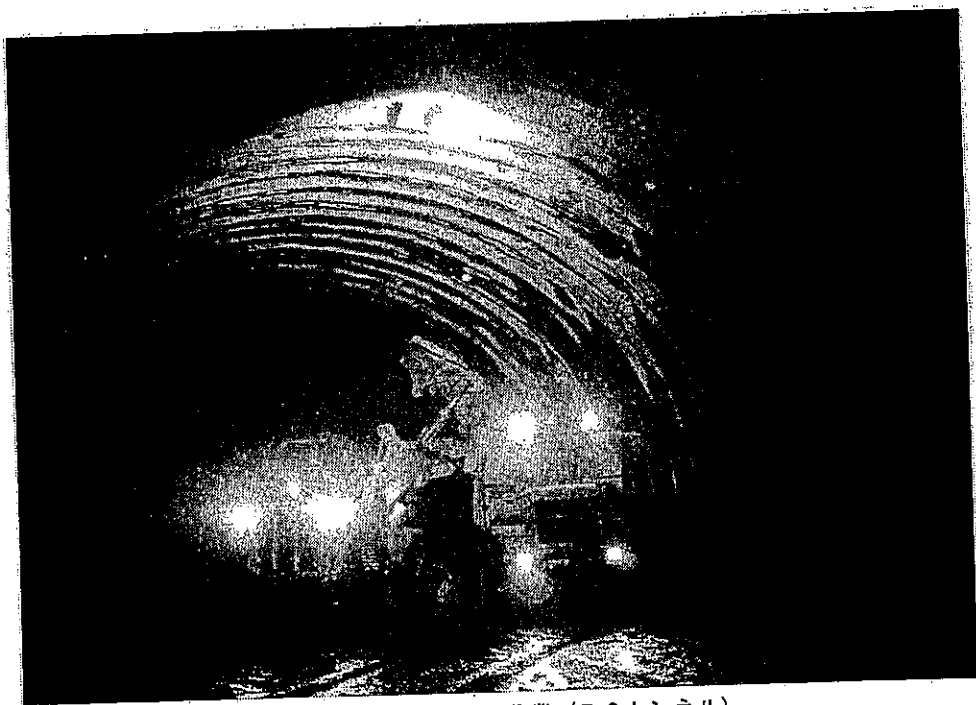


写真 2-9 ずり出し作業 (B 2 トンネル)

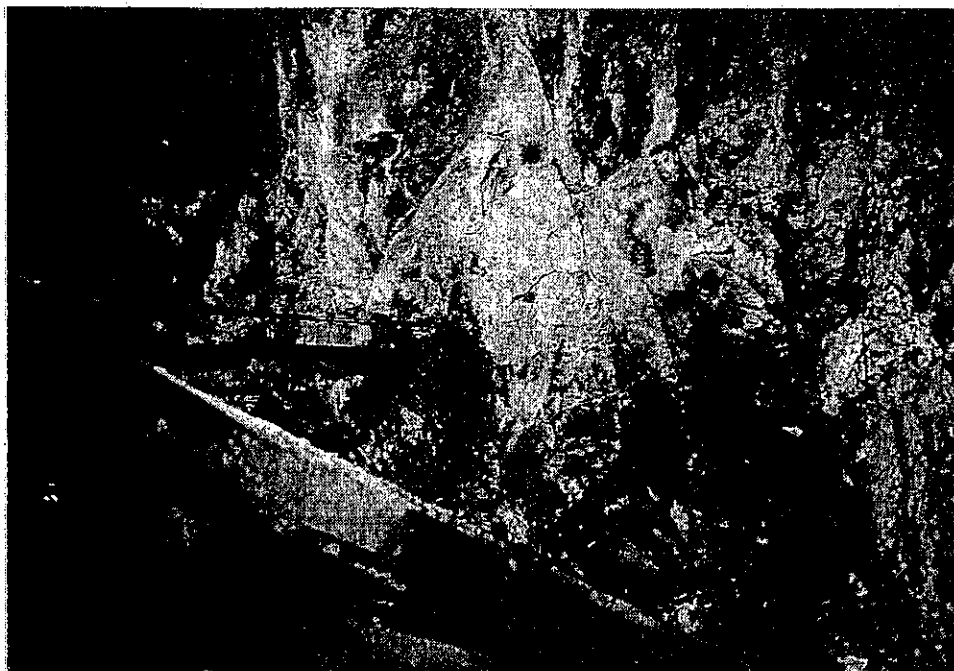


写真2-10 切羽面 (B2トンネル)

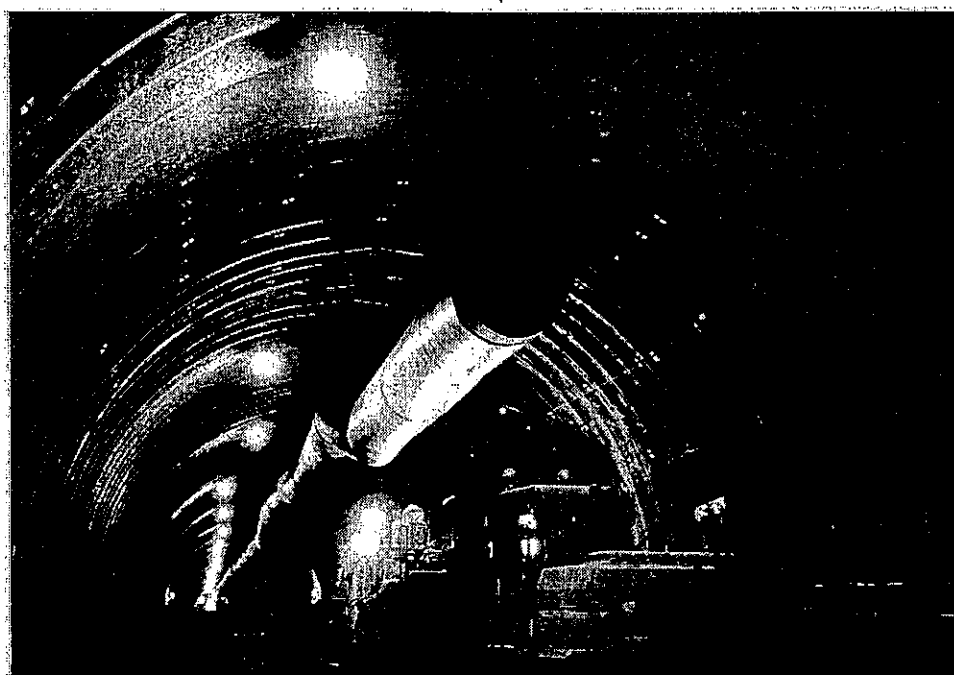


写真2-11 換気設備 (B2トンネル)

表2-3 B2トンネル工事の調査結果

表 2-3 B2トンネル工事の調査結果

実施日	平成9年12月9日				
場所	B2トンネル工事				
○換気状態					
換気設備			送気式		
作業内容			穿 孔		
測 定 点	切羽からの距離	粉じん濃度 mg/m ³	切羽からの距離	粉じん濃度 mg/m ³	
a			72m	0.43	
b			117m	0.39	
c			162m	0.44	
○作業内容(1)					
	ろ過捕集方法 による粉じん濃度 mg/m ³	相対濃度計 による相対濃度 cpm	風 速 m/s		
測 定 点					
①	6.73	1443	1.08		
②	3.05	832	0.93		
③	※	702	0.35		
④	4.24	1690	1.13		
⑤	3.89	853	0.67		
⑥	3.05	732	0.45		
幾何平均値	4.00	980.6	0.7		
幾何標準偏差	1.38	1.45	1.62		
K 値	—		K 値=0.0040		
遊離けい酸含有率	5.6%				
○作業内容(2)					
	ろ過捕集方法 による粉じん濃度 mg/m ³	相対濃度計 による相対濃度 cpm	風 速 m/s		
測 定 点					
①	0.74	200			
②	0.58	208			
③	0.55	201			
④	—	228			
⑤	0.57	219			
⑥	0.53	193.0			
幾何平均値	0.59	207.8			
幾何標準偏差	1.14	1.1			
K 値	—		K 値=0.0035		
遊離けい酸含有率	21.6%				
○個人ばく露測定結果					
作業者名	作業内容	吸入性粉じん濃度 (R) mg/m ³	総粉じん濃度 (T) mg/m ³	R/T	
K a	吹付け作業等補助	13	27	0.48	
W	生コン車運転	1.9	4.6	0.41	
K o	吹付け	6.9	20.5	0.34	
Y	生コン車運転	3.1	11.6	0.27	
H	生コン補給	5.5	18.8	0.29	
K a	ドリルジャンボ機械操作	0.8	2.9	0.28	
W	火薬装着	1.4	2.2	0.64	
K o	ドリルジャンボ機械操作	0.9	3.9	0.23	
Y	ドリルジャンボ機械操作	4.8	15.3	0.31	
H	火薬装薬	0.8	3.6	0.22	

「—」は機械移動により作業の邪魔になるため測定できなかった測定点
「※」はサンプリングポンプ故障のため測定できなかった測定点

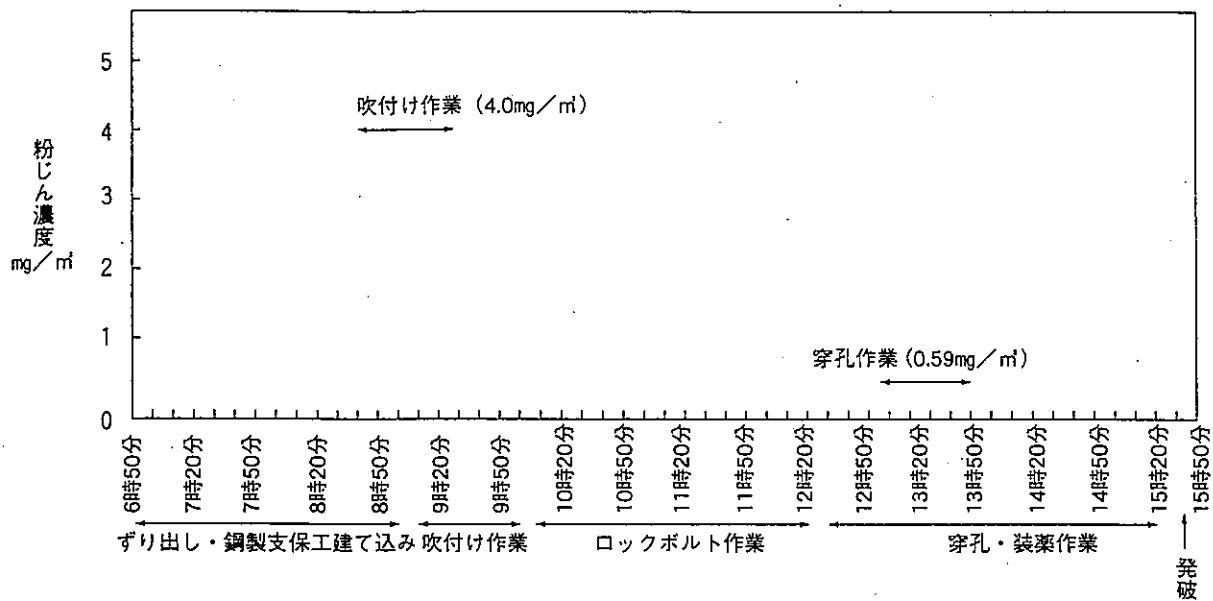


図 2-9 B2 トンネル工事作業環境測定結果

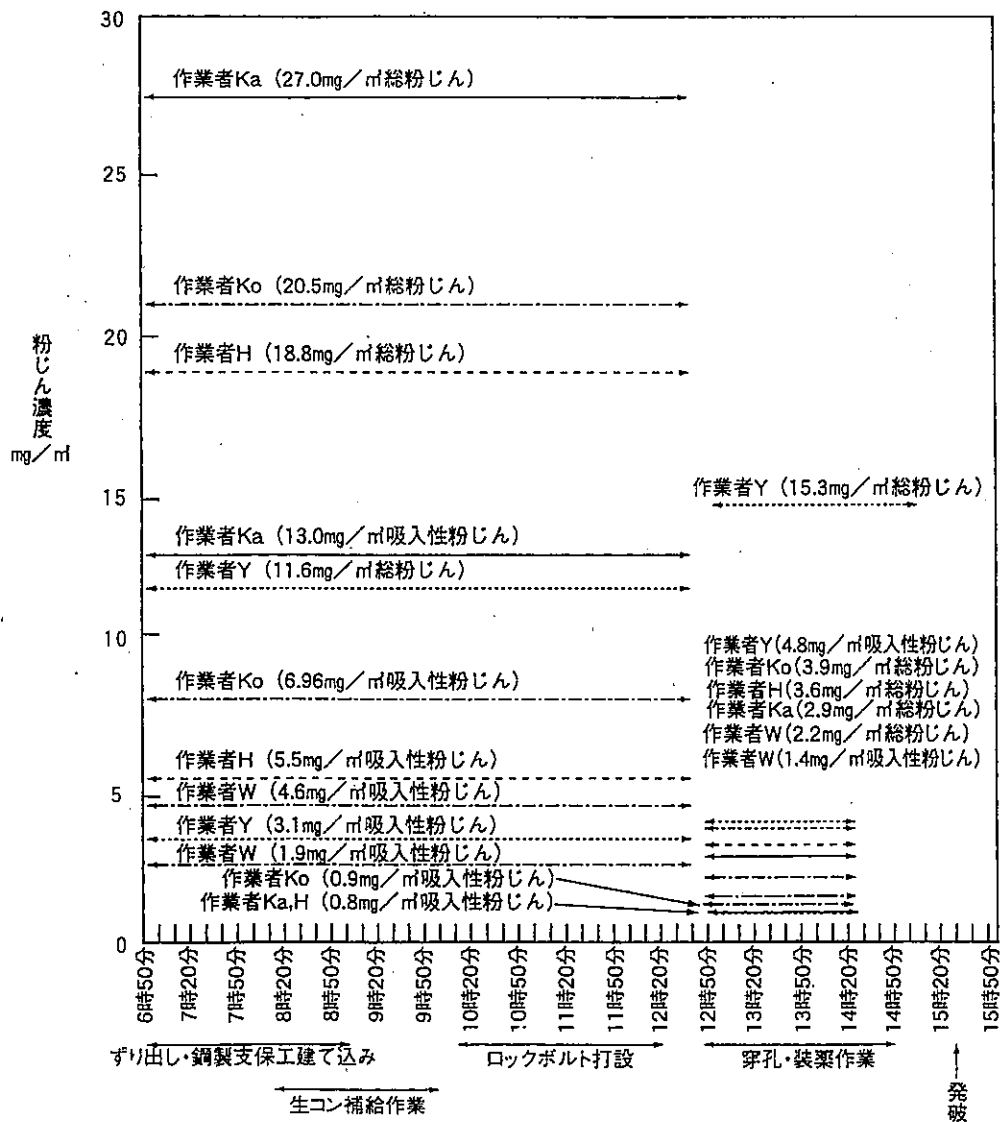


図 2-10 B2 トンネル工事粉じん個人ばく露濃度測定結果と作業内容

(3) B3トンネル工事

B3トンネルの作業工程は、表2-1に示すとおりで、機械工法で行われ「機械の搬入」→「掘削・ずり出し」→「一次吹付けコンクリート」→「鋼製支保工建て込み」→「金網取付け」→「二次吹付けコンクリート」→「ロックボルト打設」→「防水シート張り」→「覆工」→「機械の搬出」の順で、1日8人の作業者が2サイクルで実施していた。トンネルの掘削は、凝灰角礫岩という硬質地山であり、当初は、発破工法で施工する予定であったが、市街地の下を掘削するためやむなく発破ではなく機械工法で行っている。写真2-12は、掘削作業、写真2-13は、吹付コンクリート作業、写真2-14は換気設備を示した。

図2-3に、B3トンネルの吹付け作業と掘削作業の測定点を示した。作業環境濃度測定、個人ばく露濃度測定、換気状態、測定点の風速の結果は、表2-4に示した。図2-11には、作業環境測定結果と作業内容の関係を、図2-12には、個人ばく露濃度測定結果と作業内容の関係を、図2-13には、粉じん濃度の経時変化と作業内容の関係を示した。

図2-11より作業環境測定結果では、二次吹付け作業は幾何平均値が $4.96\text{mg}/\text{m}^3$ で掘削作業は、幾何平均値が $19.2\text{mg}/\text{m}^3$ で掘削作業の方が高い値を示した。測定点と粉じん濃度の関係をみると二次吹付け作業では切羽に近い測定点④が $9.55\text{mg}/\text{m}^3$ と粉じん濃度が高く、次いで測定点⑤の $7.11\text{mg}/\text{m}^3$ であった。掘削作業でも同時に切羽に近い測定点④が $27.22\text{mg}/\text{m}^3$ と最も高く、次いで測定点⑤の $26.48\text{mg}/\text{m}^3$ であった。

図2-12より、個人ばく露濃度測定結果では、ブレーカーの運転者が吸入性粉じん濃度が $24.6\text{mg}/\text{m}^3$ 総粉じん濃度が $36.9\text{mg}/\text{m}^3$ 、吹付け作業者が、吸入性粉じん濃度が $11.0\text{mg}/\text{m}^3$ 総粉じん濃度が $24.0\text{mg}/\text{m}^3$ と高い値を示した。

表2-4より換気状態では掘削作業時で、切羽から21m地点で $21.3\text{mg}/\text{m}^3$ 、55m地点で $6.7\text{mg}/\text{m}^3$ 、94m地点では $2.1\text{mg}/\text{m}^3$ で粉じん濃度が10倍低くなり、換気効果がみられた。

図2-13より粉じん濃度の経時変化と作業内容の関係では、掘削作業では最高値が、10000cpmの高濃度になるときがあった。この時の作業内容は、ロードヘッダとブレーカーが同時に並行して掘削作業を実施していたために高濃度になったものと考えられる。

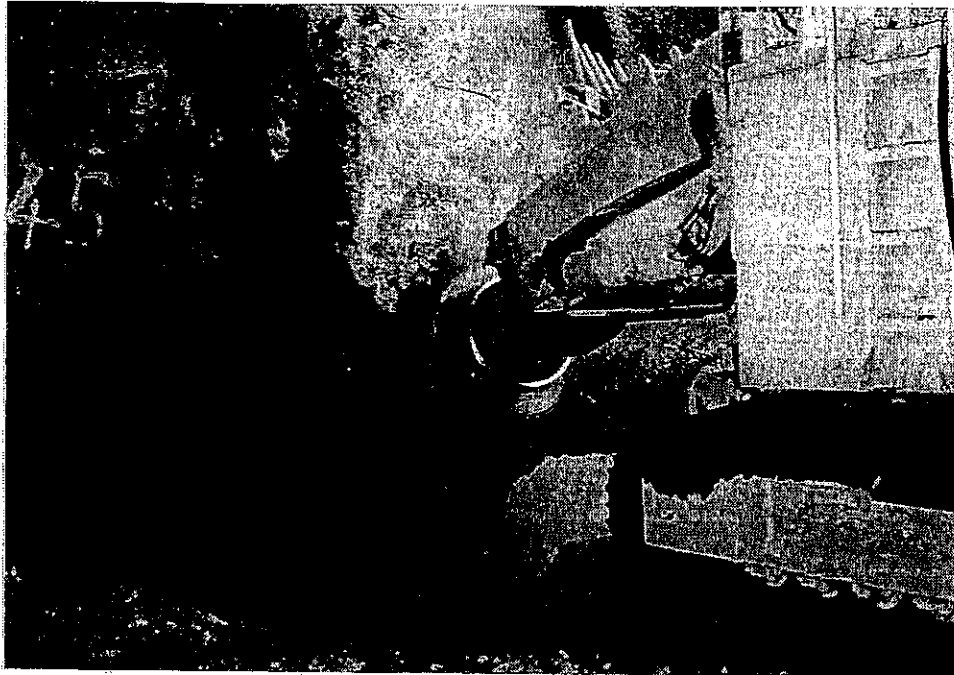


写真 2-12 掘削作業 (B 3 トンネル)

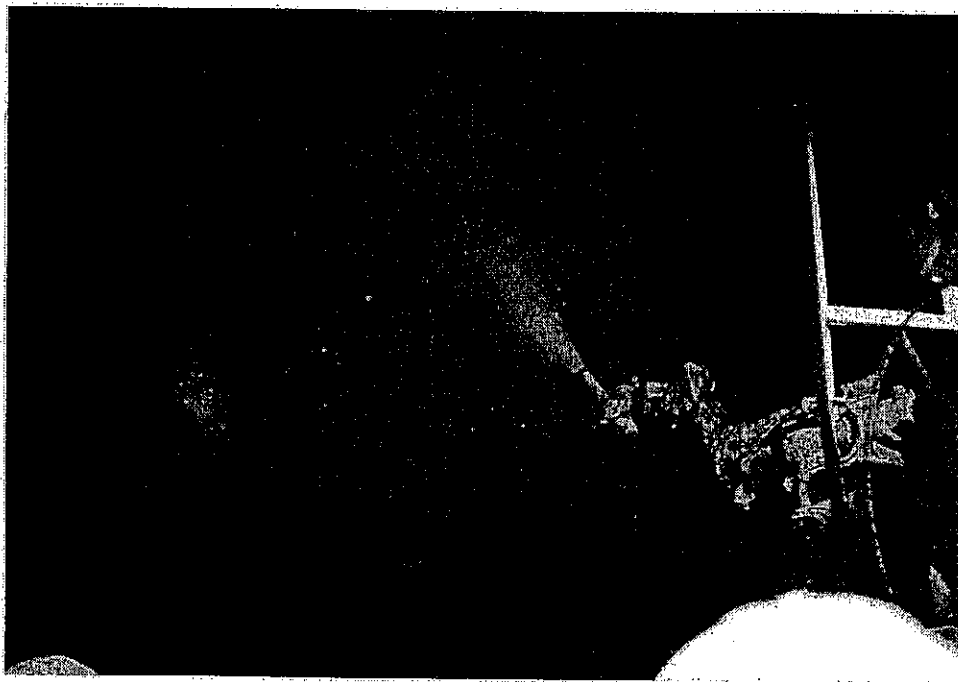


写真 2-13 吹付けコンクリート作業 (B 3 トンネル)



写真 2-14 換気設備 (B 3 トンネル)

表2-4 B3トンネルの調査結果

実 施 日	平成10年1月14日				
場 所	B 3 トンネル工事				
○換気状態					
換気設備			送気式 集じん機有り		
作業内容			掘 削		
測 定 点	切羽からの 距離	粉じん濃度 mg / m ³	切羽からの 距離	粉じん濃度 mg / m ³	
a			21m	21.3	
b			55m	6.7	
c			94m	2.1	
○作業内容(1)		二次吹付けコンクリート			
	ろ過捕集方法 による粉じん濃度 mg / m ³	相対濃度計 による相対濃度 cpm	風 速 m / s		
測 定 点					
①	2.57	604	1.21		
②	3.72	680	0.95		
③	3.89	836	0.38		
④	9.55	1534	2.32		
⑤	7.11	1166	2.13		
⑥	5.93	940	2.23		
幾何平均値	4.96	912.5	1.30		
幾何標準偏差	1.62	1.41	2.02		
K 値	—	K 値=0.0039			
遊離けい酸含有率	0.3%				
○作業内容(2)		掘削			
	ろ過捕集方法 による粉じん濃度 mg / m ³	相対濃度計 による相対濃度 cpm	風 速 m / s		
測 定 点					
①	16.77	2532			
②	14.96	3146			
③	14.96	3724			
④	27.22	3630			
⑤	26.48	4426			
⑥	24.25	4732.0			
幾何平均値	19.2	3621.3			
幾何標準偏差	1.22	1.3			
K 値	—	K 値=0.0048			
遊離けい酸含有率	1.0%				
○個人ばく露測定結果					
作 業 者 名	作業内容	吸入性粉じん濃度 (R) mg / m ³	総粉じん濃度 (T) mg / m ³	R / T	
S	ローリー車から生コン補給	9.9	18.4	0.54	
K a	吹付け	11.0	24.0	0.46	
T	ブレーカー運転	24.6	36.2	0.68	
K u	ヘッター掘削水掛担当	9.9	16.8	0.59	
O	ロードヘッダ運転	5.2	15.7	0.33	

「—」は機械移動により作業の邪魔になるため測定できなかった測定点

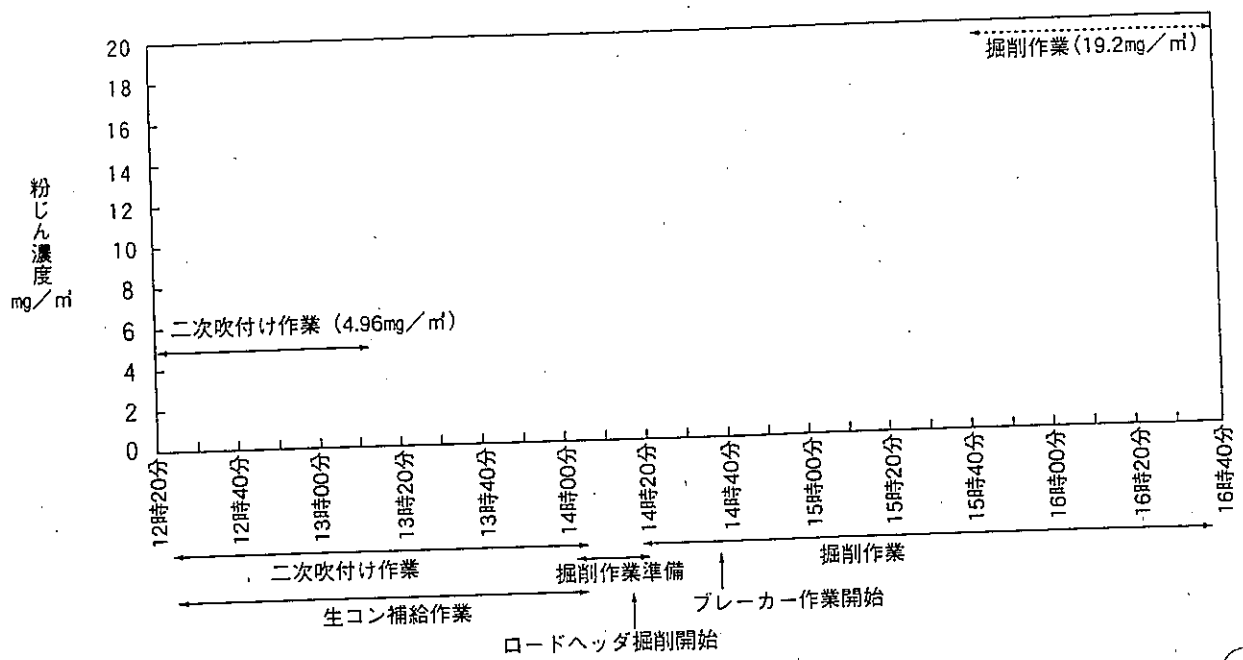


図 2-11 B 3 トンネル工事作業環境測定結果

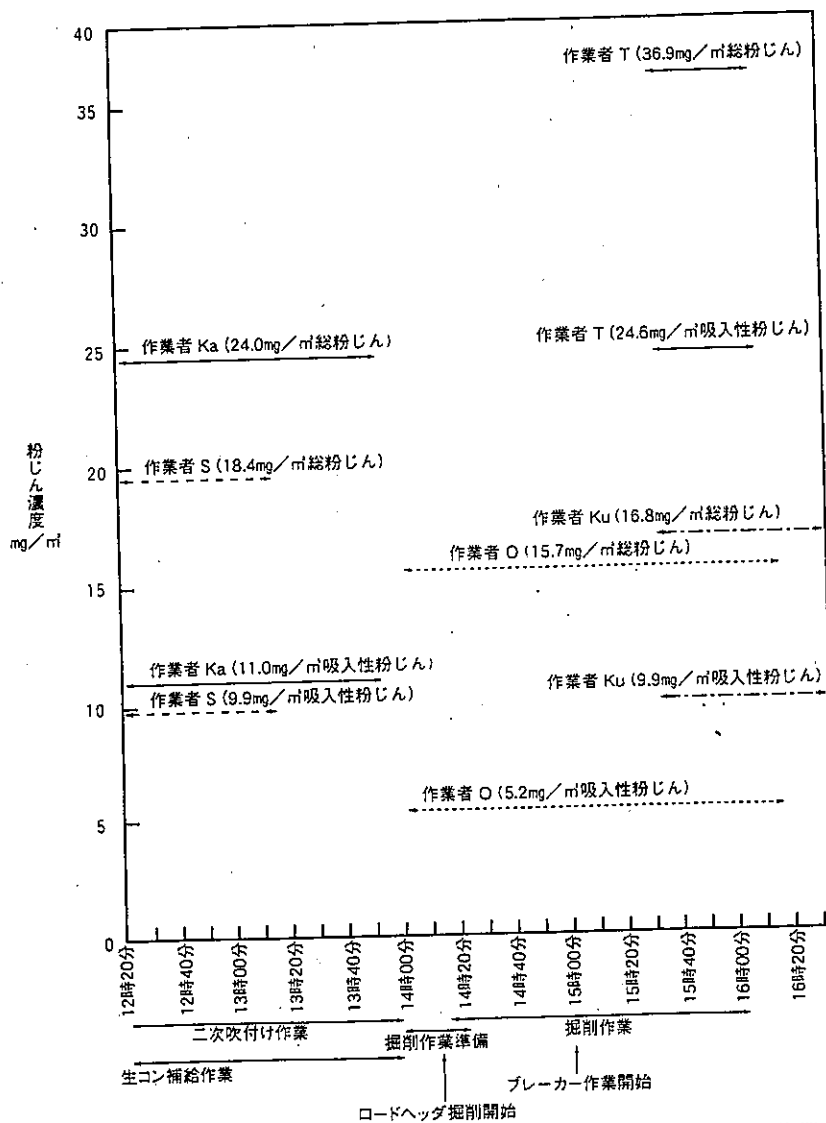


図 2-12 B 3 トンネル工事粉じん個人ばく露濃度測定結果と作業内容

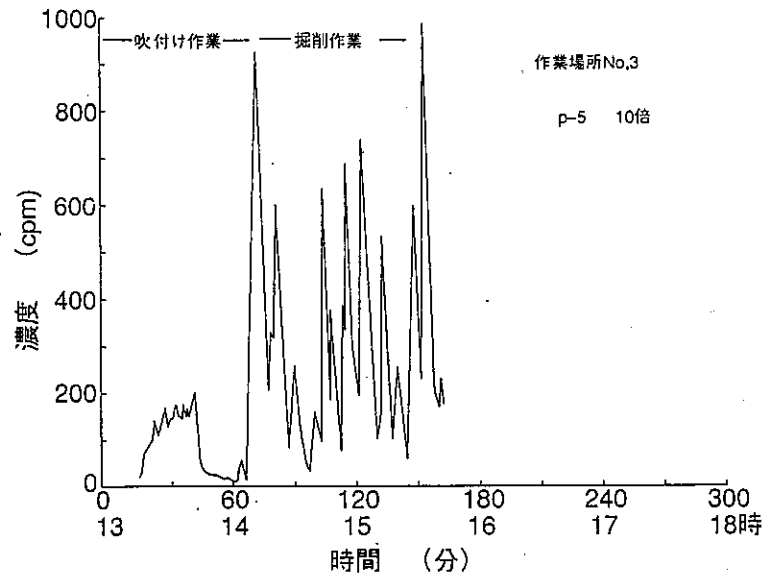


図 2-13 B 3 トンネル工事粉じん濃度の経時変化と作業内容

(4) B 4 トンネル工事

B 4 トンネル工事の作業工程は、表 2-1 に示すとおりで、発破工法で行われ、「機械の搬入」→「穿孔」→「装薬」→「発破・換気」→「ずり出し」→「鋼製支保工建て込み」→「吹付けコンクリート」→「ロックボルト打設」→「インバート」→「防水シート張り」→「覆工」→「機械の搬出」の順で 7 人の作業者が実施していた。写真 2-15 は、吹付けコンクリート作業、写真 2-16 は切羽面、写真 2-17 は換気設備を示した。トンネルの地面には、一部水たまりがあった。図 2-4 に、B 4 トンネル工事業所の吹付け作業と穿孔、装薬作業の測定点を示した。作業環境濃度測定、個人ばく露濃度測定、換気状態、測定点の風速の結果は表 2-5 に示した。図 2-14 には、作業環境測定結果と作業内容の関係を、図 2-15 には個人ばく露濃度測定結果と作業内容の関係を、図 2-16 には、粉じん濃度の経時変化と作業内容の関係を示した。

図 2-14 より作業環境測定結果では、吹付け作業は幾何平均値が 5.34 mg/m^3 で穿孔、装薬作業は、幾何平均値が 0.82 mg/m^3 で吹付け作業の方が粉じん濃度が高かった。測定点と粉じん濃度の関係をみると吹付け作業では測定点①が 9.41 mg/m^3 と粉じん濃度が高く、次いで測定点②が 8.51 mg/m^3 であった。測定点における風速では、測定点①が 2.29 m/s で次いで測定点④が 0.91 m/s であった。

図 2-15 より個人ばく露濃度測定結果では、吹付け作業関係者 2 名のうち一人は、吸入性粉じん濃度が 13.9 mg/m^3 総粉じん濃度が 38.3 mg/m^3 で他の一人は、吸入性粉じん濃度が 21.7 mg/m^3 総粉じん濃度が 60.5 mg/m^3 と高い値を示した。

表 2-5 より換気状態は吹付け作業時で、切羽から 48 m 地点で 2.80 mg/m^3 、307 m 地点で 0.59 mg/m^3 、566 m 地点で 0.28 mg/m^3 と換気効果がみられた。

図 2-16 より粉じん濃度の経時変化と作業内容の関係では穿孔作業中が 200 cpm で最も高い値を示した。



写真 2-15 吹付けコンクリート作業 (B 4 トンネル)



写真 2-16 切羽面 (B 4 トンネル)

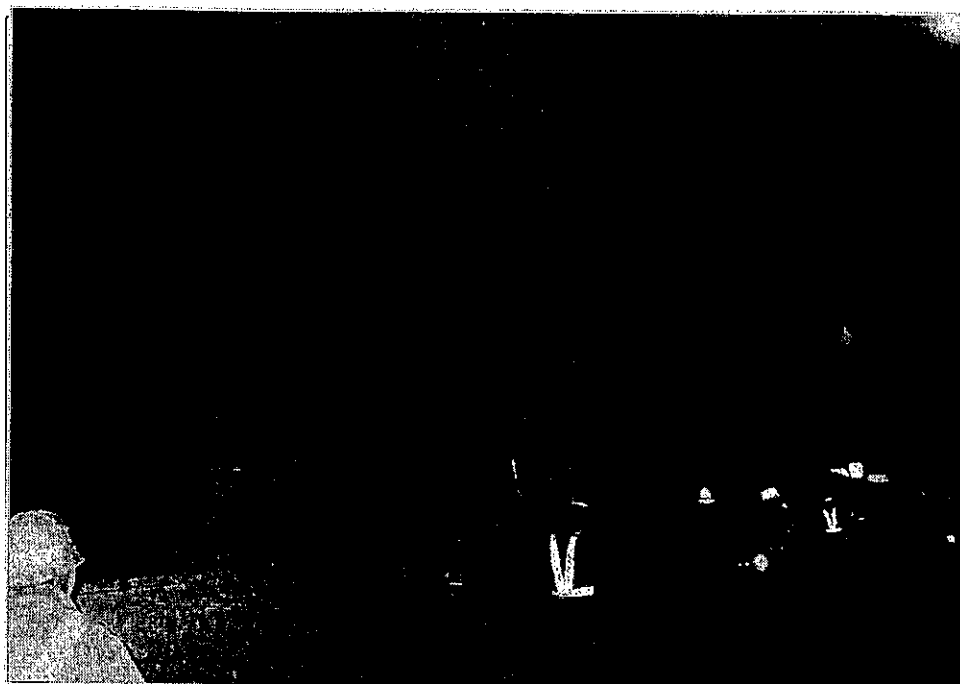


写真 2-17 換気設備 (B 4 トンネル)

表2-5 B4トンネル工事の調査結果

実施日	平成10年1月21日				
場所	B4トンネル工事				
○換気状態					
換気設備			送排気式		
作業内容			吹付け		
測 定 点	切羽からの距離	粉じん濃度 mg / m ³	切羽からの距離	粉じん濃度 mg / m ³	
a			48m	2.80	
b			307m	0.59	
c			566m	0.28	
○作業内容(1)		吹付けコンクリート			
	ろ過捕集方法 による粉じん濃度 mg / m ³	相対濃度計 による相対濃度 cpm	風 速 m / s		
測 定 点					
①	9.41	2338	2.29		
②	8.51	2382	0.52		
③	5.75	1475	0.12		
④	5.76	2075	0.91		
⑤	3.58	672	0.93		
⑥	2.43	592	0.38		
幾何平均値	5.34	1375.8	0.60		
幾何標準偏差	1.67	1.88	2.71		
K 値	—	K 値=0.0039			
遊離けい酸含有率	2.5%				
○作業内容(2)		穿孔、装薬			
	ろ過捕集方法 による粉じん濃度 mg / m ³	相対濃度計 による相対濃度 cpm	風 速 m / s		
測 定 点					
①	—	—			
②	0.86	248			
③	0.78	255			
④	—	—			
⑤	0.82	241			
⑥	0.82	239.0			
幾何平均値	0.82	245.7			
幾何標準偏差	1.04	1.0			
K 値	—	K 値=0.0034			
遊離けい酸含有率	5.2%				
○個人ばく露測定結果					
作 業 者 名	作業内容	吸入性粉じん濃度 (R) mg / m ³	総粉じん濃度 (T) mg / m ³	R / T	
T	穿孔、火薬装薬	1.5	8.0	0.19	
K	穿孔、火薬装薬	1.5	4.0	0.38	
O	穿孔、火薬装薬	1.1	3.4	0.32	
S	穿孔、火薬装薬	1.5	4.6	0.33	
T	吹付け作業補助	13.9	38.3	0.36	
K	吹付け作業補助	21.7	60.5	0.36	
O	生コン補給	2.0	3.6	0.56	

「—」は機械移動により作業の邪魔になるため測定できなかった測定点

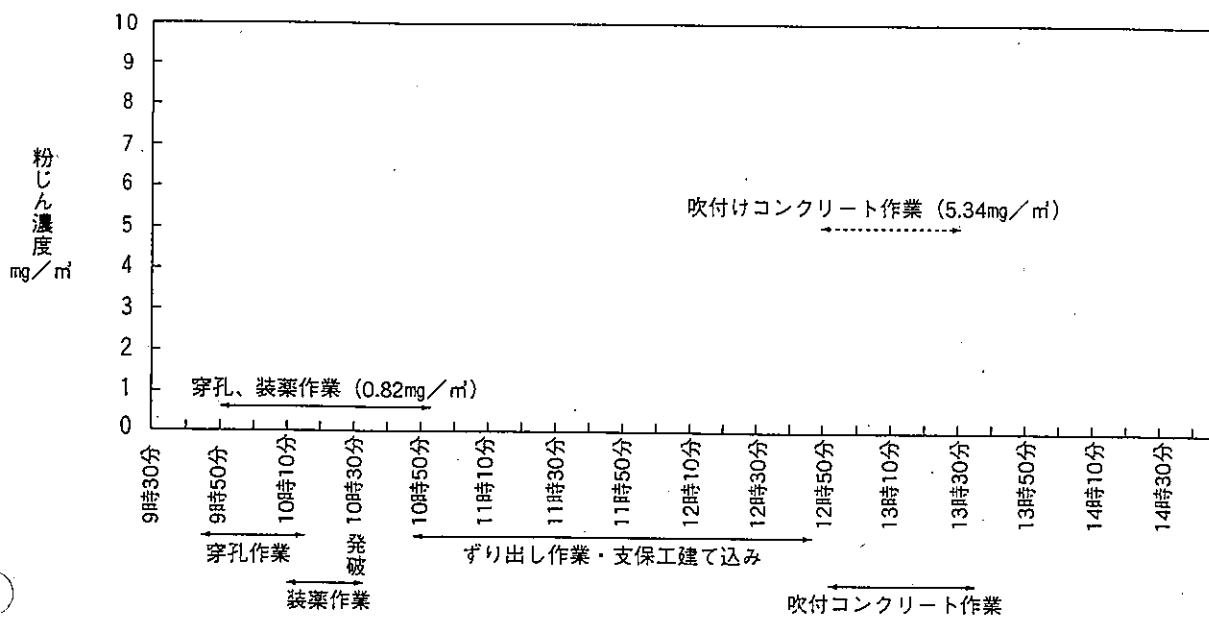


図2-14 B4トンネル工事作業環境測定結果

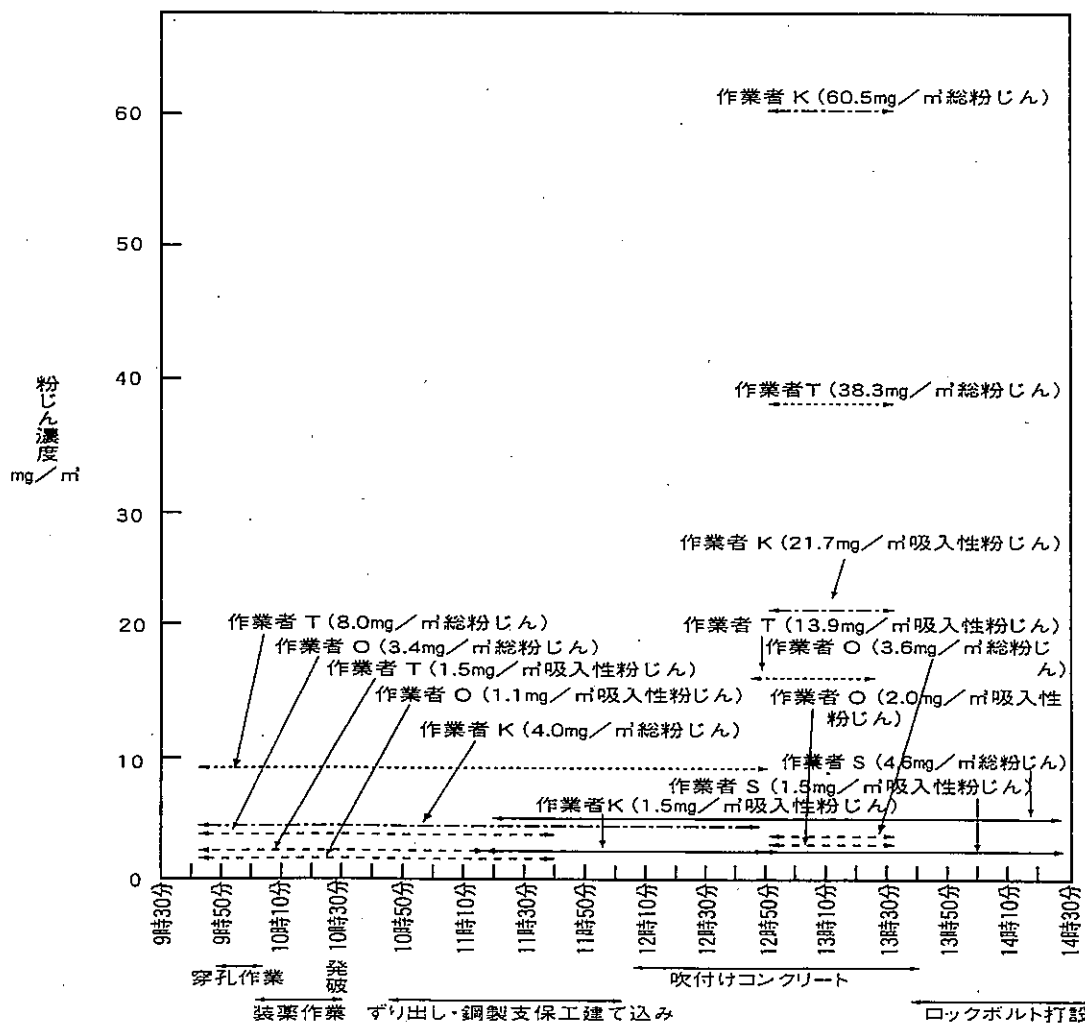


図2-15 B4トンネル粉じん個人ばく露濃度測定結果と作業内容

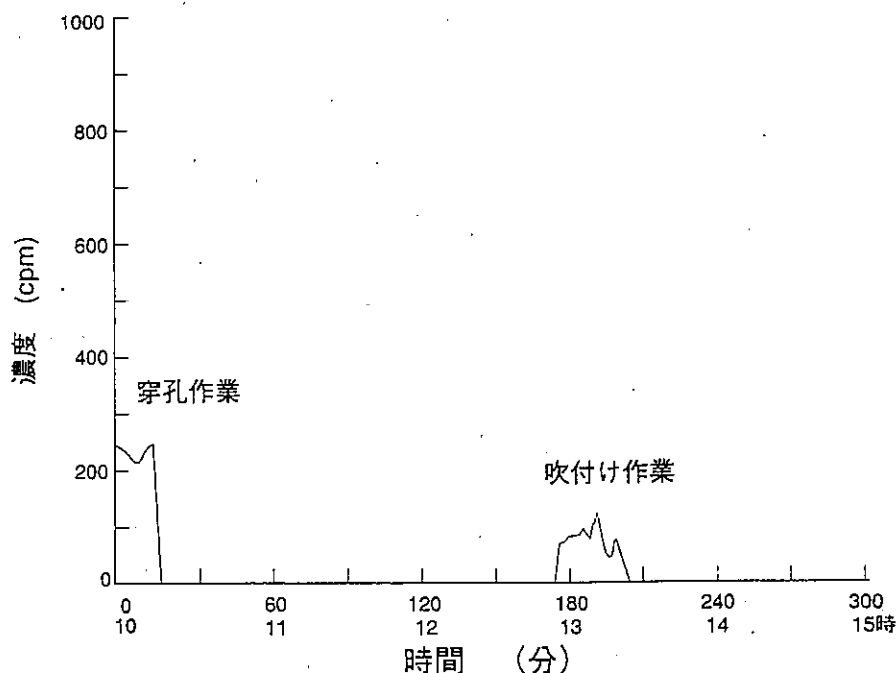


図 2-16 B 4 トンネル工事粉じん濃度の経時変化と作業内容

(5) B 5 トンネル工事

B 5 トンネル工事の作業工程は表 2-1 に示すとおりで、発破工法で実施され、「機械の搬入」→「穿孔」→「装薬」→「発破・換気」→「ずり出し」→「吹付けコンクリート」→「防水シート張り」→「覆工」→「機械の搬出」の順で 6 名の作業員で実施していた。写真 2-17 は、穿孔・装薬作業、写真 2-18 は吹付けコンクリート作業、写真 2-19 は、切羽面を示した。切羽付近の地面は、一面が水たまりの状態であった。図 2-5 に、B 5 トンネル工事の吹付け作業と穿孔作業の測定点を示した。作業環境濃度測定、個人ばく露濃度測定、換気状態、測定点の風速の結果は表 2-6 に示した。また、図 2-17 には、作業環境測定結果と作業内容の関係を、図 2-18 には個人ばく露濃度測定結果と作業内容の関係を示した。図 2-17 より作業環境測定結果では、吹き付け作業は幾何平均値が $10.2\text{mg}/\text{m}^3$ で、穿孔作業は幾何平均値が $1.04\text{mg}/\text{m}^3$ と吹き付け作業の方が粉じん濃度が高かった。測定点と粉じん濃度の関係をみると吹き付け作業では測定点②が $14.36\text{mg}/\text{m}^3$ が最も高く、次いで測定点⑥の $11.6\text{mg}/\text{m}^3$ であった。測定点における風速では、測定点⑤が $2.9\text{m}/\text{s}$ 、④、⑥が $2.5\text{m}/\text{s}$ 前後の風速であった。図 2-18 より個人ばく露濃度測定結果からは、吹き付け作業時の生コン補給者が吸入性粉じん濃度が $34.9\text{mg}/\text{m}^3$ 総粉じん濃度が $101.1\text{mg}/\text{m}^3$ で最も高濃度を示したが、これは吹き付け作業開始時に生コン投入口付近で材料の吹き出しがあったためであると思われる。表 2-6 より換気状態は吹き付け作業時で、切羽から 30 m 地点で $8.40\text{mg}/\text{m}^3$ 、180 m 地点で $2.71\text{mg}/\text{m}^3$ 、330 m 地点で $1.89\text{mg}/\text{m}^3$ と換気効果がみられた。

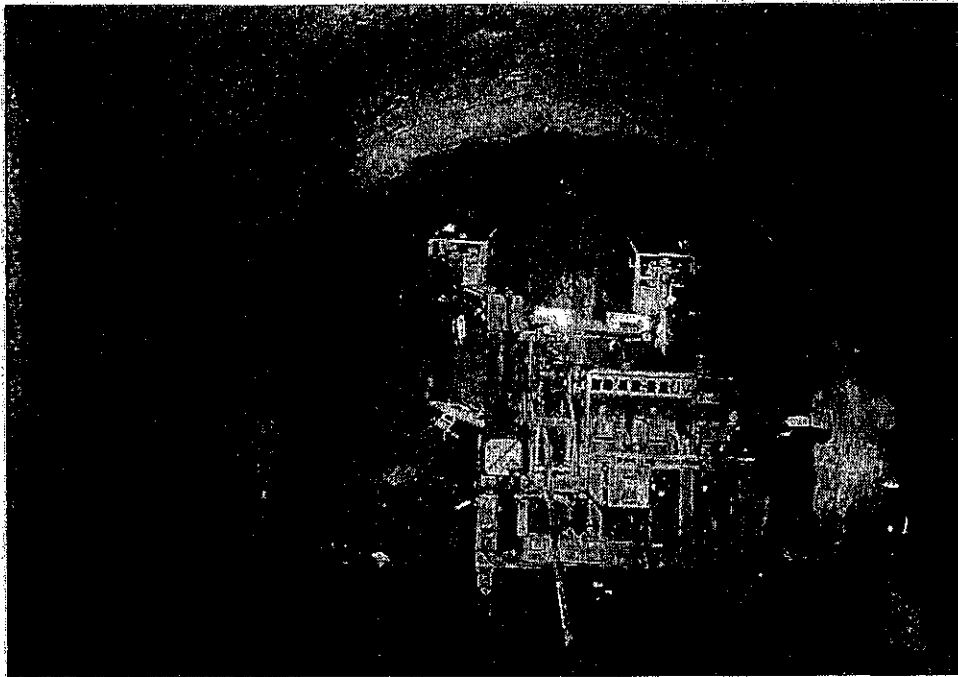


写真 2-18 穿孔・装薬作業 (B 5 トンネル)

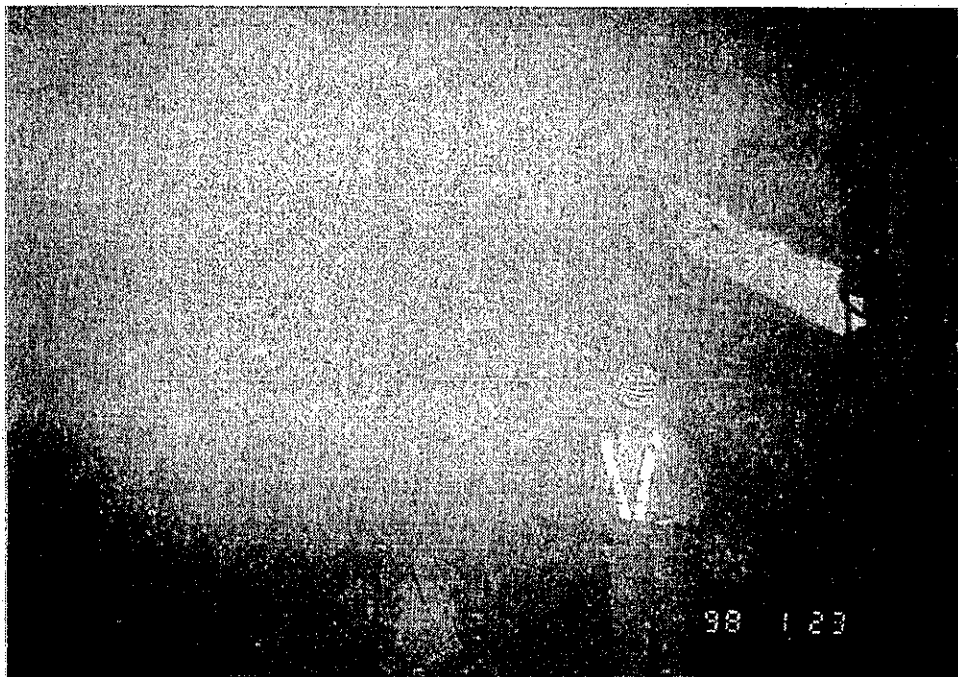


写真 2-19 吹付けコンクリート作業 (B 5 トンネル)



写真2-20 切羽面 (B5トンネル)

表2-6 B5トンネル工事の調査結果

実 施 日	平成10年 1 月23日				
場 所	B 5 トンネル工事				
○ 換気状態					
換気設備			送排気式		
作業内容			吹付け		
測 定 点	切羽からの距離	粉じん濃度 mg / m ³	切羽からの距離	粉じん濃度 mg / m ³	
a			30m	8.40	
b			180m	2.71	
c			330m	1.89	
○ 作業内容(1)		吹付けコンクリート			
	ろ過捕集方法 による粉じん濃度 mg / m ³	相対濃度計 による相対濃度 cpm	風 速 m / s		
測 定 点					
①	8.27	2378	1.71		
②	14.36	2670	0.74		
③	8.02	2795	1.17		
④	9.73	2672	2.55		
⑤	10.6	2170	2.90		
⑥	11.6	2233	2.44		
幾何平均値	10.2	2474.8	1.73		
幾何標準偏差	1.24	1.11	1.70		
K 値	—	K 値=0.0039			
遊離けい酸含有率	1.3%				
○ 作業内容(2)		穿 孔			
	ろ過捕集方法 による粉じん濃度 mg / m ³	相対濃度計 による相対濃度 cpm	風 速 m / s		
測 定 点					
①	0.75	255			
②	1.16	267			
③	1.16	267			
④	1.02	249			
⑤	1.11	263			
⑥	1.11	267			
幾何平均値	1.04	261.2			
幾何標準偏差	1.18	1.0			
K 値	—	K 値=0.0034			
遊離けい酸含有率	5.9%				
○ 個人ばく露測定結果					
作 業 者 名	作業内容	吸入性粉じん濃度 (R) mg / m ³	総粉じん濃度 (T) mg / m ³	R / T	
H	吹付け、火薬装薬	7.3	18.0	0.41	
S	ドリルジャンボ運転	6.9	19.0	0.36	
N	生コン補給	34.9	101.1	0.35	

「—」は機械移動により作業の邪魔になるため測定できなかった測定点

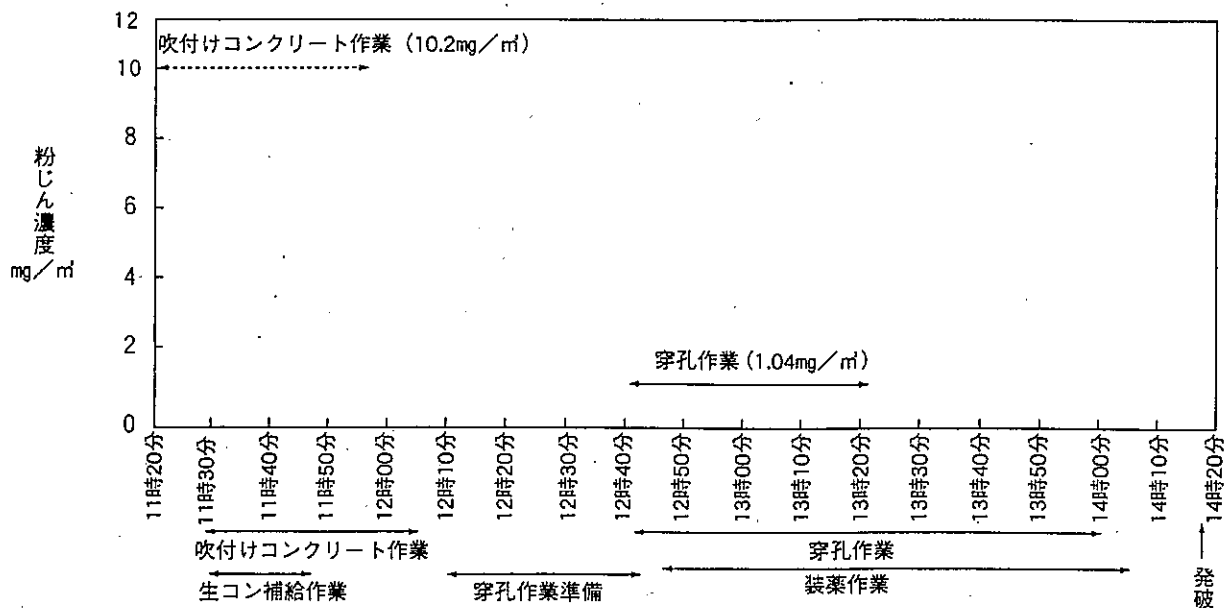


図 2-17 B 5 トンネル工事作業環境測定結果

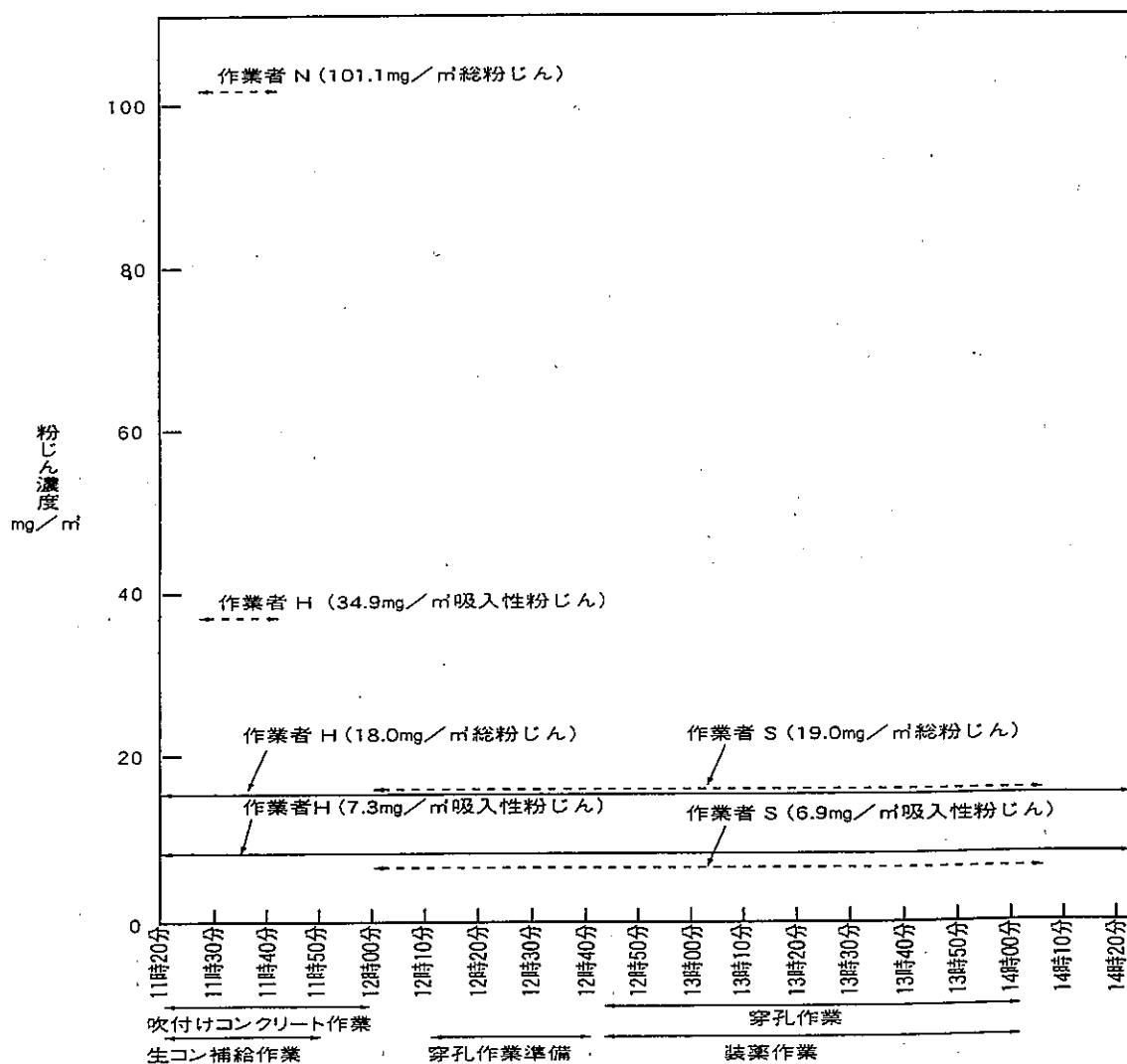


図 2-18 B 5 トンネル工事粉じん個人ばく露濃度測定結果と作業内容

第3章 調査結果に基づく粉じん対策の現状と今後の方向

3. 1 NATMの現状

1. NATM施工の歴史

トンネルの新しい支保としてロックボルト・吹付コンクリートが本格的に用いられ始めたのは、1950年代に入ってからであり、我が国においては、吹付コンクリートが青函トンネルで1965年頃から、またロックボルトについては山陽新幹線で補助的にはあるが相当量施工され、地下発電所に代表される硬岩地帯の周辺トンネル群でロックボルト、吹付コンクリートを組合せた支保が1970年頃から採用されている。これが理論的な解明を目的にシステムとして用いられ始めたのは、1976年中山トンネルでの試験施工が最初であり、その後の普及速度はめざましいものがある。

2. NATMの基本的考え方

(1) NATMの定義

「NATMとは、ロックボルト、吹付コンクリートを主たる部材として地山の強度的変化を極力抑え、地山が本来持っている耐荷（支保）能力を積極的に活用しながら現場計測管理のもとに、トンネルを掘り進めていこうとするものである。」と「NATMの手引書」（土木学会）において、NATMの定義（案）として示されている。

トンネルを本質的に支持する要素は周辺の地山であり、支保部材は地山中に耐荷リングを構成し、地山と一体となって構造物としてのトンネルを形成するものである。

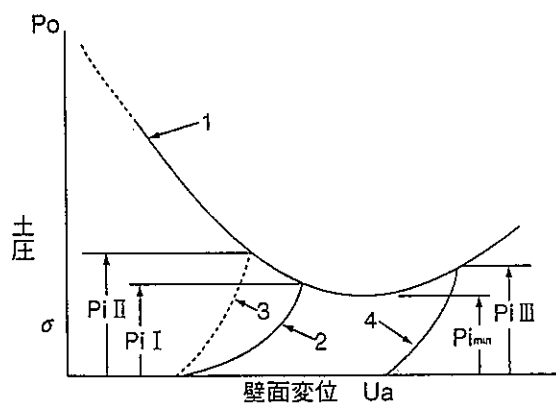


図3-1 特性曲線

支保の剛性、設備時期と掘削壁面の変位の関連を示す概念図は図3-1の特性曲線で示される。この図で、曲線1はトンネル掘削後の支保に作用する土圧と掘削壁面の内空変位の関係を示すもので、最小土圧 $P_{i\min}$ の存在を暗示し、その点の変位量よりも小さい状態で支保部材の支持を行うと、地山の強度劣化を抑えることができることを意味している。曲線2, 3, 4は、支保部材の設置後の土圧と変位を示した曲線で、それぞれの曲線と曲線1との交点が、最終土圧 P_{iI} 、 P_{iII} 、 P_{iIII} となる。この場合は、曲線2の支保部材が最

適な時期に設置し、かつ適切な剛性であることを意味しているのに対し、曲線3は、設置時期は適切であるが、支保の剛性が大きすぎて、不経済な設計例である。また、曲線4は設置時期が遅すぎたため、壁面の変位が大きく、そのため地山の劣化が生じ、地山の安定が得られない支保の状態を示している。

このように NATM は岩盤力学に裏付けられた理論によって体系づけられた工法であり、我が国への導入時には解析や計算が主体であるかのような誤解が一部生じていたが、現在では施工の蓄積による統計的・経験的手法をも加味した見直しがなされている。

(2) NATM 適用の範囲

トンネルの合理的な施工法として、昭和61年11月(社)土木学会が山岳トンネルの標準工法として NATM の設計、施工の基準を示したことからこの工法の普及に拍車がかかり、近年は立坑や開削にも応用されている。また地質的な適用範囲も硬岩から膨張性地山や未固結地山に至るまで幅広くなっている。

しかし、NATM の適用範囲にも限界があって、次のような場合は慎重な検討を要する。

- ① 湧水量が多く、吹付コンクリートの施工が困難な地山
- ② 流砂現象を生じる地山
- ③ ロックボルトの穿孔、打込みが著しく困難な地山
- ④ 切羽が自立しない地山
- ⑤ 断面積が小さく技術的に吹付け作業ができない場合
- ⑥ 山間、狭あいな場所でプラント設備が設置できない場合

このような場合では、在来工法による施工も困難であり、一般に何らかの補助工法を必要とする。NATM による場合でも、適切な補助工法を採用することにより施工が可能になることもあるので、安全性・施工性を考慮して選定する必要がある。

(3) 設計の基本

トンネルの設計は事前及び施工段階での種々の調査結果に基づき、トンネルの用途、地山条件、周辺環境条件に適合するとともに、安全性、施工性、経済性、耐久性等を考慮して支保部材、断面形状、掘削工法、施工順序、断面の閉合時期等の総合的な検討を要する。

また、施工段階において、観察と計測結果を総合的に分析し施工にフィードバックする必要がある。

① 断面形状

断面形状の決定にあたっては、所定の建築限界外に施工上あるいは保守上必要な余裕を考慮して設計内空断面を定める。

また、断面形状は地形、地質に適合するようにし、地山自体の支保能力を有効に利用するため、できるだけ隅角部が少なく丸味をもったものとし、履工及び地山内に応力集中の発生がない形状にすることが重要である。

② 支保の考え方

素掘のトンネルを掘った場合、トンネル周辺の地山は2次応力状態になってせん断破壊してトンネルを填充しようとするが、同時に地山自体の持っているせん断抵抗力はこの挙動を阻止しようとする。

この空洞を放置しようとするれば、地山強度の劣化が進行してやがては空洞が崩壊することになるが、地山のせん断抵抗力の不足分をロックボルト、吹付コンクリート、鋼製

支保工、金網等で補い、劣化を防止してやれば空洞はきわめて効果的に保持されることになる。これがNATMの支保の基本的な考え方である。

イ. 吹付コンクリート

吹付コンクリートは地山をゆるめないための最も重要な支保部材であり、地山に密着し任意の形状に施工ができる。

吹付コンクリートは、一般に表3-1に示すような作用効果を有していると考えられている。

土圧が大きい場合には吹付コンクリートの耐力を増やす必要があるが、吹付圧をいわずらに大きくすることは構造的な弱点（吹付コンクリートが曲げ破壊しやすくなる。）ばかりでなく、吹付回数または一層の吹付厚が厚くなって剥離するなど安全面への影響も考えられるので、鋼製支保工や金網の併用、あるいは鋼繊維による補強等も検討する必要がある。

ロ. ロックボルト

ロックボルトは、吹付コンクリートとともにNATMにおける主要な支保である。ロックボルトの作用効果は現在のところ定量的な解明はなされていないが、定性的には表3-2に示すような効果があるといわれている。

設計にあたっては、対応する地山条件に応じてロックボルトの作用効果、使用目的、発生軸力及び引抜耐力等について検討し、ロックボルトの種類、長さ及び配置を定めるものとする。

表 3-1 吹付コンクリートの作用効果

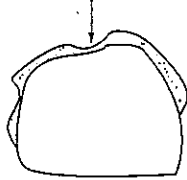
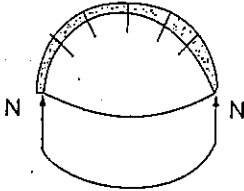
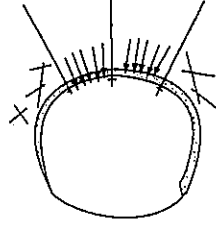
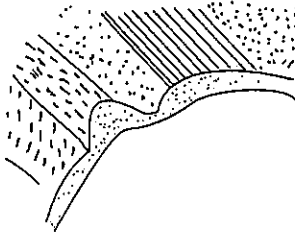
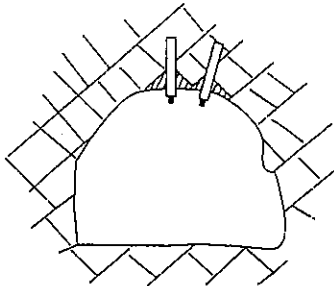
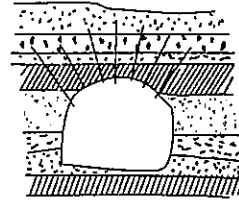
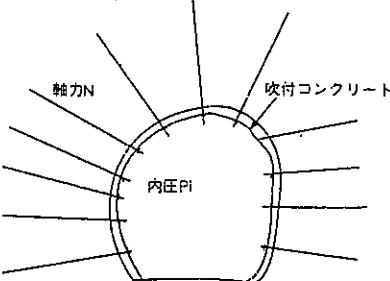
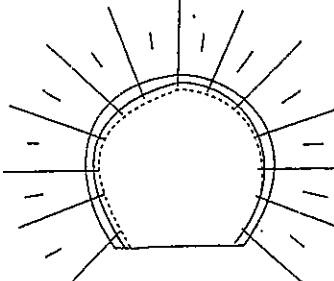
吹付コンクリートの作用効果	概 念 図
① 岩盤との付着力、せん断力による抵抗 吹付コンクリートと岩盤との付着力により、吹付コンクリートに作用する外力を地山に分散させ、またトンネル周辺の割れ目や亀裂にせん断抵抗を与え、落ちやすいキーストンを保持し、グラウンドアーチをトンネル壁面近くに形成させる。割れ目の多い硬岩等に作用効果が大きい。	
② 曲げ圧縮又は軸力による抵抗 比較的厚い吹付コンクリートが1個の部材として地山を支持するため、できるだけ早くリングに閉合することが望ましい。周辺地山に内圧を与えることにより、地山を三軸応力状態に保持し、地山の強度劣化を防止する。軟岩や土砂地山等に作用効果が大きい。	
③ 外力の配分効果 鋼製支保工、あるいはロックボルトに土圧を伝達する版として挙動する。	
④ 弱層の補強 地山の凹みを埋め、弱層を跨いで接着することにより、応力集中を防ぎ弱層を補強する効果。	
⑤ 被覆効果 風化防止、止水、微粒子流出防止などの被覆効果。	

表 3-2 ロックボルトの作用効果

ロックボルトの作用効果	概 念 図
① 縫い付け効果 (吊り下げ効果) 爆破などで緩んだ岩塊を緩んでない地山に固定し、落下を防止しようとするもので、最も単純な効果である。亀裂、節理の発達する地山において、吹付コンクリートと併せて比較的小さな目に対しても効果がある。一次履工を地山に縫い付けるものもこれに当る。	
② はり形成効果 トンネル周辺の層を成している地山は層理面で分離して重ねばりとして挙動するが、ロックボルトによる層間の締め付けにより層理面でのせん断応力の伝達を可能として、合成ばりとして挙動させる効果がある。	
③ 内圧効果 ロックボルト引張力に相当する力が内圧としてトンネル壁面に作用すると考え、これによって、二軸応力状態のトンネル近傍の地山を三軸応力状態に保つ効果である。これは圧縮試験時の拘束応力 (σ_3: 測圧) の増大と同じような意味をもち、地山の強度あるいは耐荷能力の低下を防ぐ作用をする。	
④ アーチ形成効果 システムロックボルトによる内圧効果のため、一体化して耐荷能力の高まったトンネル周辺の地山は、内空側に一様に変位することによってグランドアーチを形成する。	

ハ、鋼製支保工

在来工法における鋼製支保工は主要な支保部材としての役割を果たすが、NATMにおいては、付加的な支保部材として考えられている。

NATMにおける鋼製支保工の使用目的として次の項目が挙げられる。

- (イ) 吹付コンクリート、ロックボルトの一次支保の不足に伴う強度あるいは剛性を高める必要がある場合
- (ロ) 鋼管、鋼矢板等で切羽の先受けを行うために支点として使用する場合
- (ハ) 吹付コンクリートあるいはロックボルトの支保機能が発揮されるまでの仮支保と

して必要な場合

鋼製支保工の設計にあたっては、対応する地山条件に応じてその使用目的を検討し、また類似の施工例等も考慮する必要がある。

ニ. 金網

金網の役割として次のものが考えられる。

- (イ) 吹付コンクリートのせん断補強及び付着性の向上
- (ロ) 吹付コンクリートの破壊時の剝離防止
- (ハ) 地山の剝離防止

したがって、吹付コンクリートが地山から剝離するような土砂地山、掘削後の自立性の悪い地山、あるいは比較的変形の大きい地山には金網を設置する必要がある。

ホ. 二次覆工

現在のところ、二次覆工に対しての統一的な設計法が確立されていないので、設計にあたっては標準的支保、類似条件下での施工例等を考慮して定める必要がある。

二次覆工の機能及び地山条件に対する基本的な考え方を次に示す。

(イ) 構造体としての力学的機能

- a 一次支保により変位が収束し、地山の安定は保たれているが、一次支保部材が永久構造物としての安全率を有していないと考えられる場合
- b 一次支保により変位が収束せず、二次覆工の剛性で土圧に対抗する場合、あるいは工程上の理由でやむを得ず変位の収束前に二次覆工を打設する場合
- c 将来、地下水圧のかかることが予想される場合

(ロ) 湧水のあるトンネルにおける防水性

地山から湧水のある場合には、一次覆工のみで止水処理を行うことは困難であり、止水シート等の設置が必要である場合が多い。

将来の維持・保守上、湧水により問題が起こることが予想される場合には遮水性の二次覆工が必要となる。

(ハ) 永久構造物としての耐久性

トンネルの覆工は、温度変化、漏水等により経時的に劣化する。この劣化の程度は寒冷地ほど、また坑口に近いほど顕著であり、劣化が進めばトンネル覆工が剝離、剝落することもあり、トンネル内を走行する車両に危険を及ぼすこともある。吹付コンクリートを永久覆工とするには、まだいくつかの課題があり、今後の研究課題である。

ヘ. インバート

トンネルは力学的には地山の支持リングと支保から構成されたチューブとみなされ、閉合された状態で機能を発揮する。したがって下盤自体が軟質でそれ自身チューブとして動かないような地山では、吹付コンクリートまたはインバートコンクリートを施工し、リングを閉合して内空変位を制御することが重要である。

さらに地山の挙動は、基本的にはリングを閉合する時期によってきまるため、インバートの施工時期も考慮しなければならない。

また、地形上偏圧が予想される場合、あるいは二次覆工に力学的機能を必要とする場合、または坑口付近には一般にインバートを設置している。

ト. 防水工、ひびわれ防止工

防水工の設置にあたっては、トンネルの立地条件、湧水状況及び湧水量、気象条件等について検討して、将来の保守に支障のないようにするのが望ましい。

特に寒冷地においては、凍結、つらら防止対策等を考慮する必要がある。

NATMの二次覆工コンクリートにひび割れが発生するケースが多いが、この主な原因は吹付コンクリート及び岩盤による収縮変形の拘束であると考えられている。その対策として最も効果的なのは、止水シートの張付や縁切り材を吹付コンクリート面と二次覆工コンクリート背面間に介在させ、両者の密着を阻害して拘束を断ち切る方法である。

止水シートを使用する場合は、防水とひび割れ防止の二役を果たしていることになる。

(4) 在来工法との差異の概要

在来工法とNATMの大きな相違は、在来工法が最終的なゆるみ領域の荷重を鋼製支保工と厚肉のコンクリートを主たる支保部材とする剛な支保構造で地山に対抗しようとするのに対し、NATMは地山自体が本来持っている抵抗力を失うことなく、有効に利用して吹付コンクリートとロックボルトを支保の主要部材としていることにある。

また、作業の安全性について、在来工法は支保工、矢板工法では、矢送り、掛け矢板、支保工建て込み、崩落等の当たり付け等、切羽直近の作業がほとんどで、その危険性は非常に高い。それに比べNATMでは、吹付ロボットにより、切羽及びその周辺の一次支保、崩落部の充填等の作業を遠隔操作で安全に行うことができるため、切羽真近の作業は少なくなり、安全性は高い。

その他、在来工法との主な違いを次に示す。

- ① 在来工法の覆工コンクリートが厚肉構造であるのに対し、NATMの二次覆工コンクリートは薄肉構造となっている。
- ② 在来工法では、主に木製矢板で地山を被覆しているため、地山との間に空隙が生じるので、支保後、あるいは覆行後もせん断破壊が進行し、崩落、後荷によるクラックの発生等の原因となるのに比べ、NATMでは吹付コンクリートで直接地山を被覆するため、支保と地山との間に空隙がなく、密着性のよい構造物となり、P57に示す作用効果を発揮し、地山の安定に寄与することとなる。
- ③ 在来工法では支保を主に経験によりゆるみ土荷重、変形など定性的に推定して設計しているのに対し、NATMでは当初設計は主に標準的支保パターンまたは類似条件下での支保パターンの採用という経験的手法を用いるが、地圧、支保応力、地山及び支保の変形などの継続的な計測システムとして確立することにより、支保を一応定量的に設計することができる。さらに計測結果を設計フィードバックすることにより比較的容易に支保の構造を変更できるなど施工中のフォローがなされる。
- ④ 在来工法に比べ、設備機械を含む大幅な計画変更が少なく、また比較的断面（加背）を大きくすることができ、大型機械の投入が可能である。
- ⑤ 切羽の自立しない地山や湧水量の多い地山等に対しては、在来工法と同様に補助工法を必要とする。
- ⑥ NATMは地山のゆるみを極力抑えるという工法理念ではあるが、ゆるみ領域は表3

－ 3 に示すように在来工法に比べて少ないものの、表のような数値といわれている。

表 3－3 ゆるみ領域^{注1)}

岩盤等級 注2)	ゆるみ領域 (m)					
	在来工法		NATM		TBM 工法	
	トンネル幅 5 m	10m	5 m	10m	5 m	10m
A	0.8	1.3	0.4	0.7	0.2	0.3
B	1.5	2.3	0.8	1.2	0.4	0.6
C	1.9	2.9	1.0	1.5	0.5	0.7
C	2.3	3.5	1.2	1.8	0.6	0.9
C	2.3以上	3.5以上	1.2以上	1.8以上	0.6以上	0.9以上

注 1) トンネル掘削によるゆるみ領域の調査報告書 (社)日本トンネル技術協会) の「ゆるみ領域および弾性係数の標準値」を一部削除。

注 2) 岩盤等級は電力中央研究所による。

3. コンクリート吹付作業における粉じん対策の現状

コンクリート吹付方法には、大別して、乾式工法と湿式工法がある。

乾式工法は、ドライ状態で混練したコンクリートを圧縮空気によってホース内を搬送し、ノズル近傍で水を加えて吹付けを行う工法である。

湿式工法は、あらかじめ水を加えて混練したコンクリートをコンクリートポンプにより圧送し、ノズル近傍で圧縮空気を加えて吹付けを行う工法である。

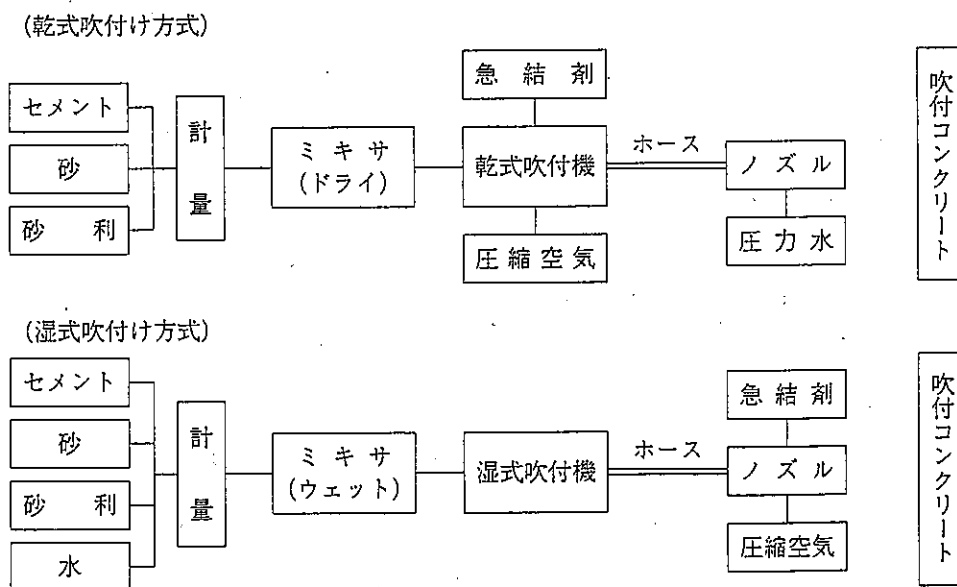


図 3－2 乾式、湿式のフローチャート

それぞれの工法には、それぞれ一長一短あるが、発じん量で比べた場合、湿式工法の方が若干少ないと判断される。これは乾式の場合、発じん物質であるセメント粒子、急結剤粒子、

骨材に含まれる微細粒子等が水と十分混合されずドライ状態で空気中に放出される割合が湿式に比べて多いためと考えられる。

したがって、粉じん低減を図るためには、水との十分な混合に配慮する必要がある。

(1) 湿式工法採用時の注意点

- ① 吹付空気圧が高くなると粉じん量は増加傾向にあるので、はね返り状態や吹付けたコンクリートの品質を勘案して適度な空気圧を選定する必要がある。
- ② 粉末タイプの急結剤を用いる場合、一般にノズル近傍で添加するがコンクリートと十分混ざらず、発じんする場合がある。このような場合、添加位置や添加圧力等を調整して十分混合されるようにする必要がある。

(2) 乾式工法採用時の注意点

- ① 水の添加位置とノズルの間隔を十分とってドライミックスコンクリートと水がよく混合されるようにする必要がある。
- ② 空気圧が高いと発じん量が増加するので許せる範囲で空気圧を低下して吹付ける方が良い。
- ③ 砂の表面水が適切な範囲にあれば発じん量は少ないとされているので、表面水管理を十分行う必要がある。
- ④ 乾式の場合、ノズル位置だけでなく、吹付機本体付近での発じん量が多いので、セメントの供給装置での発生防止及び局所集じん等について検討する必要がある。

(3) コンクリート材料

吹付粉じん組成の一例は表3-4に示すとおりである。

表3-4 粉じん組成分析(乾式吹付け)

対象物質	組成(%)
セメント	54 ~54.5
骨材	35.8 ~38.6
水分	6.51~ 8.66
急結剤	1.04~ 0.89

これら材料のうち、微細粒子が浮遊粉じんとなるので、できるならば浮遊粉じんとなる粒径の材料を極力減少させる方が良い。

(4) 配合

湿式、乾式のいずれの工法においても、使用骨材の大きさや配合条件によって粉じん量は変化する。特に水セメント比、細骨材率についてはその影響が大きいようである。

水セメント比、細骨材率についてはその使用骨材ごとに粉じん量の少なくなる範囲があるとされる。したがって、事前に粉じん量の少なくなる配合条件を試験によって確認する方がよい。

(5) 急結剤

現在使用されている急結剤には液体と粉体の2種類がある。文献等によれば液体急結剤の方が粉じんは少ないとされているが、粉体急結剤は水と混合されにくく、そのまま浮遊粉じんとなって放出される割合が多いためと考えられる。特に乾式工法の場合、液体急結

剤は添加水と混合して使用できるので、粉じん低減の意味からは積極的に利用すべきである。なお、添加量については一般的に粉体タイプより増加する傾向にある。

湿式工法の場合には、液体急結剤を添加することで元のコンクリートのスランプが増加し、はね返りの増加や硬化の遅れを生ずる場合があるので、注意しなければならない。

さらに、乾式の場合と異なり、湿式では急結剤の原液がミストとなって飛散する可能性があるため低アルカリ性の急結剤を用いる等の処置が必要になる。

(6) 粉じん抑制剤

コンクリート打設時のコンクリートの粉じんを発生源で抑制する方法のひとつに粉じん抑制剤が使用されている。粉じん抑制剤の効果については、粉じん抑制剤を使用した数例の現場調査での粉じん濃度の減少、文献調査等による実験結果をみると著しい効果があったことが報告されていることより粉じん抑制剤の効果があることは確かなようである。しかし、実際のトンネル現場での粉じん抑制剤の使用実績も少なく、また粉じん抑制効果の実証例も少ない。そこで、粉じん抑制剤の使用については、今後、更に使用実績を積み、その効果的な使用方法について技術的検討を行うとともにその効果を確認しつつ、普及を図る方向で考えていく必要がある。

表3-5に市販されている主な粉じん抑制剤を示す。なお、粉じん抑制剤は増粘剤を主成分としているため、種類によってはコンクリートの早期の強度発現を遅らせたり、長期強度の若干の低下を示すものもあるので、使用にあたっては、これらの点を考慮しておく必要がある。

表3-5 粉じん抑制剤一覧表

商 品 名	メーカ
1. シリボン	ヘンケル白水(株)
2. エスペゾール(PEO)	製鉄化学(株)
3. ナトムクリーン3B	信越化学(株)
4. ダストルS-B	三興コロイド(株)
5. デンカクリアップ	電気化学工業(株)
6. クリコート	栗田工業(株)
7. アロン	東亜合成(株)

(7) 施工

現在、コンクリート吹付工法の主流は、吹付材料を圧縮空気の力で壁面や岩盤面に勢い良く吹き付ける方法であるため、100%のコンクリートの付着は難しい。よって、粉じんの発生はある程度避けられない状況である。

しかし、施工上の注意で粉じんの発生は低減可能であるので、照明の工夫による良好な作業条件や施工法の各種検討が必要になる。特に吹付けの圧送ホースの脈動や閉塞は、粉じんの発生を増大を招くので、吹付機械の調整や正しい操作手順、骨材等の使用材料にあった配合の工夫が必要である。また吹付の良い悪しは、ノズルマンの技量によって大きく変わるので、ノズルマン等の作業員の育成も必要となる。また掘削面に凹凸があるとリバ

ウンドが多くなり粉じんも増えるので、掘削面を平滑に仕上げることも大切である。

3. 2 トンネル掘削工事における主要工程別気中粉じん濃度の現状と問題点

1. 坑内における粉じん測定の実況と問題点

(1) 測定実施の経緯

坑内の粉じん測定については、労働安全衛生法（以下、単に「安衛法」という。）第65条に基づく作業環境測定の実況はない。

これは、屋内作業場のように作業環境の実態把握のための測定手法が確立されていないことに起因するものと推察されるが、一方、建設業界としては坑内における粉じん対策を効果的に進め、じん肺予防に資するためには、坑内の気中粉じん濃度を把握し、その結果に基づき適切な対応を図ることが必要との認識のもとに昭和50年前後粉じん測定が行われるようになったと推定される。

ちなみに、昭和54年1月に建災防が実施した粉じん対策についてのアンケート調査では、262現場中粉じん測定を実施していたのは61件（23.3%）であった。

さらに、昭和57年7月に実施したアンケート調査では、91現場中、測定を実施していたのは63件（69.2%）と拡大していた。

また、(社)日本トンネル技術協会（以下、単に「トンネル技術協会」という。）がNATM施工の97現場に対し行ったアンケート調査では、89件（91.8%）が測定を実施していた。

しかし、これらの粉じん測定の実情を調べてみると、測定手法が確立されていないため、屋内作業場で採用されている作業環境測定基準をもとにそれぞれ自社流の測定手法により行われていたことが判明した。

このため、建災防では、平成9年3月「トンネル建設工事におけるじん肺防止対策に関する調査研究報告書」第2章2.2「地下工事における粉じん測定の指針制定の経緯とその概要」で述べたように、昭和61年11月に建災防指針を建設業の自主基準として制定し、関係者にその普及推進を図ってきた。

その結果の確認を含め、昭和62年12月に建災防において、日本道路公団発注のものを除くトンネル工事について実施したアンケート調査では、回答59現場中45件（76.3%）で測定が実施されていた。また、同時期にトンネル技術協会が日本道路公団発注工事について実施したアンケート調査では、回答127現場中96件（75.6%）で測定が実施されていた。

今回のアンケート調査結果では、139現場中測定結果の報告があったのは121件（87.1%）で、さらに測定実施率が向上していることが判明した。

しかし、さらに測定指針の普及状況について回答を求めたところ、回答90件中、指針どおり実施しているもの51件（56.7%）、指針どおりではないが測定しているものが20件（22.2%）、指針は知らないが測定は実施しているものが19件（21.1%）であることが判明した。

(2) 問題点

以上の経緯から、粉じん測定の必要性については、年々理解が高まり、実施率も向上してきているが、建災防指針の普及状況も今一步の感もあり、また、指針自体の妥当性についての検討も含め一層の努力が求められていることが明らかになった。

アンケート調査結果からも、K値採用の問題事例のように測定精度上からみて、まだ多

くの問題点を抱えていることが今回の調査でわかってきており、今後この面からのフォローが坑内粉じん濃度の実態把握に欠かせないことを再認識する必要がある。

2. 主要工程別気中粉じん濃度の現状

坑内における粉じん測定には、現状において前述のような問題点をもっているが、一応これまでに集められた測定データの統計解析は、昭和62年の建災防及びトンネル技術協会のアンケート調査でも、また、今回のアンケート調査でも行ったが、前述のように測定精度の問題もあり、また、粉じん濃度に影響を与えると思われる要因データも極めて多く、相関関係を如実に示す結果は、まだ十分解析されるまでには至っていないのが現状といえる。

ただ、単純集計として現在までのデータについて各工程別にまとめてみると次のようであった。

(1) 昭和57年アンケート調査結果（建災防）

粉じん濃度 mg/m ³ 工程	1未満	1以上 5未満	5以上 10未満	10以上
掘削・穿孔	(34.2%) 13	(50.0%) 19	(10.5%) 4	(5.3%) 2
ずり積み	(27.3%) 9	(57.6%) 10	(12.1%) 4	(3.0%) 1
コンクリート 吹付け	(11.8%) 2	(29.4%) 5	(47.0%) 8	(11.8%) 2

(2) 昭和62年アンケート調査結果（建災防）

粉じん濃度 mg/m ³ 工程	1未満	1以上 2未満	2以上 3未満	3以上 5未満	5以上 10未満	10以上 20未満	20以上	備考
掘削・ 穿孔	(48.9%) 22	(26.7%) 12	(13.3%) 6	(8.9%) 4	(2.2%) 1	0	0	最小0.062 最大6.05 平均1.67mg/m ³
ずり積み	(18.4%) 9	(20.4%) 10	(20.4%) 10	(28.6%) 14	(8.1%) 4	(4.1%) 2	0	最小0.19 最大14.4 平均3.76mg/m ³
コンクリ ート吹付 け	(2.8%) 1	(13.9%) 5	(5.5%) 2	(22.2%) 8	(38.9%) 14	(16.7%) 6	0	最小1.01 最大16.39 平均6.07mg/m ³

(3) 昭和62年アンケート調査 (トンネル技術協会)

粉じん濃度 mg/m ³ 工程	1 未 満	1 以 上 2 未 満	2 以 上 3 未 満	3 以 上 5 未 満	5 以 上 10 未 満	10 以 上 20 未 満	20 以 上	備 考
掘削・ 穿孔								最小0.1 最大4.8 平均0.8mg/m ³
ずり積み	(13.6%) 9	(7.6%) 5	(27.3%) 18	(27.3%) 18	(24.2%) 16	0	0	最小0.5 最大14.9 平均3.4mg/m ³
コンクリ ート吹付 け	(8.7%) 6	(5.8%) 4	(8.7%) 6	(30.4%) 21	(36.3%) 25	(10.1%) 7	0	最小0.9 最大24.1 平均5.1mg/m ³

(4) 平成 8 年アンケート調査 (建災防)

粉じん濃度 mg/m ³ 工程	1 未 満	1 以 上 2 未 満	2 以 上 3 未 満	3 以 上 5 未 満	5 以 上 10 未 満	10 以 上 20 未 満	20 以 上	備 考
機械掘削	(50.0%) 7	(14.3%) 2	(21.4%) 3	(7.1%) 1	(7.1%) 1	0	0	最小0.1 最大5.68 平均1.63mg/m ³
穿孔	(76.0%) 38	(20.0%) 10	(2.0%) 1	0	0	(2.0%) 1	0	最小0.059 最大11.66 平均0.888mg/m ³
ずり積み	(18.6%) 18	(17.5%) 17	(27.8%) 27	(19.6%) 19	(12.4%) 12	(2.1%) 2	(2.1%) 2	最小0.079 最大22.6 平均3.47mg/m ³
コンクリ ート吹付 け	(3.0%) 3	(8.1%) 8	(9.1%) 9	(32.3%) 32	(38.4%) 38	(7.1%) 7	(2.0%) 2	最小0.28 最大22.2 平均5.25mg/m ³

以上(1)~(4)の推移からみて、確実に坑内粉じんは低減してきていることが伺えるが、まだコンクリート吹付け作業では5 mg/m³を切ることが難しく、坑内での粉じん対策の最重点とすべきことが明らかであり、次いでずり積み作業、機械掘削作業の順となる。

しかし、これまでのアンケート調査結果から、工法等の変遷をみると、

<発じん増加要因と考えられるものとして>

- ① 掘削方式において機械掘削方式が増加してきている。

調査年 工法	昭和57年	昭和62年			平成8年
		建災防	トンネル技術協会	計	
機械掘削	(9.2%) 8	16	44	(24.3%) 60	(30.9%) 43
発破掘削	(90.8%) 79	84	91	(70.9%) 175	(66.2%) 92
その他	0	5	7	(4.8%) 12	(2.9%) 4
計	87	105	142	247	139

* () 内は百分率を示す。以下同じ

- ② ずり出し方式においてタイヤ方式が増加してきている。

調査年 工法	昭和57年	昭和62年			平成8年
		建災防	トンネル技術協会	計	
レール方式	(50.0%) 44	44	0	(18.5%) 44	(18.7%) 26
タイヤ方式	(36.4%) 32	57	133	(79.8%) 190	(78.4%) 109
その他	(13.6%) 12	4	0	(1.7%) 4	(2.9%) 4
計	88	105	133	238	139

- ③ 掘削断面積が大型化してきている。

昭和57年の調査では、50㎡以上のものが87件中52件（59.8%）、昭和62年建災防調査では、97件中55件（56.7%）であったが、平成8年調査では、139件中61㎡以上のものが81件（58.3%）となっている。

<このような状況の中で粉じん濃度を低減させてきた要因として>

① 換気量の増大が図られてきた。

調査年 換気風量 m ³ /min	昭和57年	昭和62年			平成8年
		建災防	トンネル技術協会	計	
500未満		12	2	(11.7%) 14	(9.2%) 9
500以上 1000未満		29	31	(50.0%) 60	(16.3%) 16
1000以上 1500未満		10	32	(35.0%) 42	(49.0%) 48
1500以上 2000未満		0	3	(2.5%) 3	(18.4%) 18
2000以上		0	1	(0.8%) 1	(7.1%) 7
計		51	69	120	98
最大 最小	50 1100			100 1050	70 2500

② 坑内風速が高くなっている。

調査年 換気風量 m ³ /min	昭和57年	昭和62年			平成8年
		建災防	トンネル技術協会	計	
0.2未満		13	1	(13.2%) 14	(2.1%) 2
0.2以上 0.4未満		36	22	(54.7%) 58	(32.0%) 31
0.4以上 0.6未満		12	14	(24.5%) 26	(32.0%) 31
0.6以上 0.8未満		0	3	(2.8%) 3	(6.2%) 6
0.8以上 1.0未満		3	2	(2.5%) 3	(3.1%) 3
1.0以上		0	0	(0.8%) 1	(24.7%) 24
計		64	42	120	97
最大 最小	0.05 0.96			0.18 0.90	0.11 2.5

- ③ 換気方式において送・排気組合せ方式が増加してきている。

調査年 換気風量 m ³ /min	昭和57年	昭和62年			平成8年
		建災防	トンネル技術協会	計	
送気式	(56.8%) 46	68	86	(65.3%) 154	(48.2%) 67
排気式	(23.5%) 19	24	23	(19.9%) 47	(16.5%) 23
送・排気 組合せ式	(12.3%) 10	12	14	(11.0%) 26	(30.2%) 42
坑道換気	(7.4%) 6	0	8	(3.4%) 8	(4.3%) 6
その他	0	1	0	(0.4%) 1	(0.8%) 1
計	81	105	131	236	139

- ④ コンクリート吹付け機の湿式方式が増加してきている。

調査年 換気風量 m ³ /min	昭和57年	昭和62年			平成8年
		建災防	トンネル技術協会	計	
乾式	(34.8%) 8	25	43	(35.6%) 68	(8.5%) 10
湿式	(65.2%) ※15	34	89	(64.4%) 123	(91.5%) 107
計	23	59	132	191	117

※セミ湿式10件を含む。

があげられる。

3. 3 NATM における粉じん対策の現状と今後の方向

1. アンケート調査及び実地調査結果からの粉じん対策事例

(1) アンケート調査結果からの意見等の事例

<換気量に関して>

- ① 管理濃度を満足させることは、ほとんど不可能に近い。現状は呼吸用保護具を使用し、作業環境を少しでも良くするため、設備投資は惜しむべきではないのではないか。
- ② 回転数を上げ、換気量を増やすと粉じんは低減するが、騒音とコストは増加する。これらを考慮した最適化を掘削延長を加味して対策を図る必要がある。
- ③ 換気技術指針どおりコントラファンを設置しても、風管の損傷が激しく、貫通点に近づくと風量、風速が低下するため、1ランク上のコントラファンを設置している。
- ④ 換気により作業環境が良好に維持できるかは工事に従事している全ての作業員の努力が必要で、日々の保守管理、日常点検は必要最低条件だ。
- ⑤ トンネル延長が500mまでは比較的計算にあった換気量で施工可能だが、長大トンネ

ルでは、基本的に送気、排気の併用が望ましい。

- ⑥ 現場経験から所要換気量は計算値より1.2~1.5倍大きくとり換気計画をしたほうが良い。
- ⑦ 内燃機関は使用していないが、換気設備の計画として、換気技術指針に基づき穿孔、発破の後ガス、ずり出し、作業員の吸気を考慮して所要換気量を決定する。
- ⑧ ファンの能力、制御方法を進歩に合わせて漏風率の減少を考えることが必要で、発生源をなくす（少なくする）ことを前提に環境を整えることが必要である。
- ⑨ 従来の換気方法以外に新しい方法を開発する時期が来ていると思われる。例えば圧力差による換気量の増大等の技術開発ができるのではないか。

<換気設備に関して>

- ① ファジー制御システムを採用し、局所換気を行い経済的だった。換気設備付近は騒音がひどいため耳栓を使用した。低騒音の設備の開発を期待する。
- ② 吹付コンクリート施工時は集じん機を併用して換気したが、粉じんがトンネル全体に充満した。送排気併用式にしてからは十分な効果があった。
- ③ 坑内外の温度差によりセントル付近や中間部に汚染空気が停滞し、作業に支障をきたした。補助ファンを取付け、常に風の流れがあるように設備した。
- ④ 送風機本体は避難坑の中に設置し、外部と遮断する防音扉を設けた。騒音は著しく低下した。作業内容に応じて送風方向を変化できる設備が望ましい。
- ⑤ 新鮮な空気を供給する方法とし、坑外の送気ファンから切羽まで連続した送風管で接続した。風管の延伸方とし、200m収納カプセル風管を使用した。
- ⑥ 電動式ローディングショベルを採用した。コンテナ工法により運搬機の台数を減らした。直列排気式換気設備を採用した。

<集じん機に関して>

- ① 集じん機周辺部の集じん効果は認めるが、集じん機による騒音やメンテナンスを考えると、集じん機は必要ないと思われる。その分換気量を増やした方がよい。
- ② 小型、軽量、移動性と送風機とのシステム開発の発展により、今後大いに期待できる設備になると思われる。
- ③ 坑外への粉じん流出は地元環境対策への配慮からできない。必要換気量を確実に処理できる集じん機を設置し、結果的には概ね満足できた。

<吹付け粉じんに関して>

- ① 粉じん低減剤は非常に効果的であると思われるが、設計計上されていないうえに、単価が高いため、使用していない。換気設備と防じんマスクで対応している。
- ② 吹付システムの改良・改善が進み、粉じん濃度が半減しても呼吸用保護具の着用は免れない。呼吸用保護具の軽量小型化、性能向上が課題であると思われる。
- ③ 吹付け作業等は、防じんマスクの着用の厳守とできるかぎり必要最小人員で作業を行うことが必要と思われる。
- ④ 粉じんが一番ひどいものが吹付コンクリートの粉じんであり、吹付コンクリートの使用しない工法を考えなければ解決しないと思われる。
- ⑤ SEC 練りを採用して高性能減水剤（NT-1000）を使用し、リバウンド及び粉じん低減に努めている。

- ⑥ 袋詰めをやめ、1回分を移送用タンクに入れ、密閉型連続練りミキサーポンプを介し、吹付けるシステムを採用し、作業員は粉じん作業から解放された。
- ⑦ 建設省より技術評価を受けている低粉じん工法で施工した。集じん機を使用する二次対策でなく、発生源を制御する方法が最良だと思われる。

＜坑内煤煙に関して＞

- ① 各機種とも浄化装置の取付けと定期点検を実施する。また、できるものならば電動式にしている。
- ② ずり積み機械の排出ガス浄化装置をセラミックフィルターにする。
排出ガス浄化装置にセラミックフィルターと水タンクによる浄化装置を取り付けた。
- ③ トンネル機械は設備が大切で、エアクリーナーの清掃をこまめに行うことで、煤煙が少なくなる。
- ④ 路盤を仮舗装等で改良し、重機への負荷を軽減するなどしている。
- ⑤ 重機の燃料に助燃剤を添加して効果を試した。多少の効果があつたように思われる。
- (2) 実地調査結果からの意見等の事例
各種施工方式に対して、本方式採用の理由と現状での問題点等について実地調査結果をまとめると以下とおりであった。

施工方式の違いによる本方式採用の理由と現状での問題点
＜実地調査結果＞

施 工 方 式		本方式採用の理由	現状での問題点
1. 吹付け方式			
(1)乾式・湿式の別	乾式		①機械のメンテナンス及び骨材管理がたいへんである。(B 4 トンネル) ②骨材の乾燥等の設備が必要である。(B 5 トンネル)
	湿式	①粉じんが少ない。(B 1 トンネル) ②乾式に比べて、発じんも少なく、吹付け効果も特に問題がない。(B 2 トンネル) ③今までの経験から乾式に比べて粉じんが少ない。また品質が安定している。(B 2 トンネル) ④粉じん量が少ない。社有機械が湿式でこの現場に転用、積算に組み込まれている。湧水が多いので湿式の方が仕上がりもよい。(湧水が多いと乾式が有利といわれている。)(B 3 トンネル) ⑤一般的であり、粉じん量も低減できるため。(B 4 トンネル) ⑥粉じんが乾式と比較し、湿式の方が少ないと考えられる。(B 5 トンネル)	①粉体急結剤が十分混ざらないと発じん量が多くなった。湧水が多い場合、はく難しやすい。(B 1 トンネル) ②最低気温が－5℃程度となるため、温水を使用しているが、練り上がり温度を一定に調整するのが難しい。(B-2 トンネル)

施 工 方 式		本方式採用の理由	現状での問題点
(2)エアー式・ロータリー式の別	エアー式	①ロータリー式は未完成で市場に回っていない。(B 1 トンネル) ②ロータリー式の実績がない。(B 2 トンネル) ③ポンプ式で先端部分でエアー送り込み。(B 2 トンネル) ④吹付圧 7 kg/cm^2 だが、 $4 \sim 4.5 \text{ kg/cm}^2$ 、吹付け面を吹き出し口の距離 $2 \sim 2.5 \text{ m}$ 、最大限 3 m で操作して効果的である。(B 3 トンネル) ⑥実績及び機械の汎用性から決定した。(B 5 トンネル)	①エアーがなくなれば粉じんが低減するのは明らかであるが、ロータリー式は未完成。(B 1 トンネル)
	ロータリー式		
2. コンクリート搬送方式			
(1)エアー圧送式		①幅広い骨材の使用が可能であり、メンテナンスもポンプ式と比較して少ないと考えられる。(B 5 トンネル)	①エアー圧送式の場合、脈動があり、品質にばらつきがでる。また、閉塞したときに一気に圧力上昇し、危険性がある。(B 2 トンネル) ②脈動があり、エアーのみのとき発じんが多くなると思われるので、2 シリンダーで補完することを検討してほしい。(B 3 トンネル)
(2)ポンプ式		①ホース損耗、吹付機の損耗が少ない。(B 1 トンネル) ②エアー式に比べて脈動が少なく、発じんも少ない。(B 2 トンネル) ③配管内のエアー圧送距離が短いため、安全性が高い。(B 4 トンネル)	①スランプが大きくなり、エアー式と比べ急結剤を多く必要とする。(B 1 トンネル) ②エアー式よりも機構が複雑であり、消耗し交換する部品の種類が多いため、メンテナンスにやや手間がかかる。(B 2 トンネル)
3. コンクリート混練方式			
(1)一括練り		①ロイヤリティーと機械費が SEC ではアップし、強度、粉じん、リバウンド等の SEC 効果はあるが、経済的メリットがない。(B 1 トンネル) ②最も一般的である。(B 4 トンネル)	
(2)分割練り (SEC)			①SEC の場合やや割高になる。現在使っている設備でも骨材の表面水量の自動測定はできる。(B 2 トンネル)

施 工 方 式		本方式採用の理由	現状での問題点
4. 配 合			
(1)従来方式		①指定配合 (B 1 トンネル) ②計画とおり。(B 2 トンネル) ③設計仕様による (B 3 トンネル) ④発注者仕様による。4 月からは高強度高品質にする予定。(B 4 トンネル)	①砂の F.M が高く微粒分がないため、流動性が悪く、閉塞や跳ね返りの原因となっている。そのため、セメント量を約40kg/m ³ 増量している。(B 2 トンネル)
(2)高強度高品質		①発注者の意向によって、間もなく高品質の配合とする。シリカ配合 18kg/m ³ 、粉体使用。投入時の粉じん発生については自動計量としている。リキッドタイプだと寒冷地では攪拌等管理が難しい。(B 5 トンネル)	①材料費が4000円/m ³ 程度アップする。シリカヒューム投入計量設備としてセメントと同様の単独設備が必要で設備費がかかる。(B 5 トンネル)
5. 急結剤			
(1)有り	①粉体	①デンカナトミックを使用しているが、液体急結剤は硬化の遅れがあり、はく離しやすく、特に湧水の多い所は付着しにくい。(B 1 トンネル) ②デンカナトミックを使用しているが、液体より混練がよい。(B 2 トンネル) ③液体の場合だと管理が難しい。供給装置が複雑になる。アルカリ性が強い。デンカナトミックを使っているのは湧水に対して強いため。(B 2 トンネル) ④デンカナトミックを使用しているが、品質管理上も取扱上も液体より容易で、初期強度発現も早い。(B 3 トンネル) ⑤急結性が良好であり、塩分を含有しないため支保工等の鋼材に対して安全である。デンカナトミックとアサノスーパーセメントを交互に使用している。(B 4 トンネル) ⑥デンカナトミックを使用しているが、施工性及び急結効果により決定。(B 5 トンネル)	①液体に比べて粉じんが増大する。(B 1 トンネル)
	②液体		
(2)無し			
6. 粉じん低減剤			
(1)有り		①仕様書に集じん機か粉じん低減剤の使用との条件があった。粉じんは低減した(試験結果40%低減)。リバウンドも低減した。(B 1 トンネル)	①発注者からの指示指導が必要。高価なため経済性に難がある。(B 1 トンネル)

施 工 方 式	本方式採用の理由	現状での問題点
(2)無し	①粉じん低減剤は高価な割に効果が少ない。機械掘削の発じんが多く、粉じん対策として集じん機採用で対応した方が有利と考えた。(B 3 トンネル) ②発注者仕様による。(B 4 トンネル) ③経験として乾式には効果があったと思うが、湿式にはそんなムードがない。(B 4 トンネル)	

2. 粉じん発散量の低減対策

現在、NATMにおける吹付コンクリートの施工技術は、吹付機械及び吹付助剤、急結剤により非常に進歩し、その施工実績も多くなってきている。

よって、発注や施工の体制も限られたトンネル施工業者から一般土木業者までと幅広く行っている。

したがって、それに従事する作業員の数も拡大している。そのような実態の中で前述の各現場で行われている粉じん低減方法、またはそれに類する各種の知識、技能（例えば作業手順、機械操作、保護具）を修得した作業員の不足が予測される。

粉じんの発生量の増減及びばく露状況の低減等の判断についても作業員自身によるところも多いと考えると、多くの作業員が正しい知識と正しい作業方法（保護具の着用方法を含む）を修得することが今後とも必要であり、そのための教育、訓練も重要である。

また、時代はポスト NATM を見据え、各方面で吹付コンクリートの改善や吹付コンクリートに変わるよりよい作業環境での施工を求め、研究開発を進めている。

3. 粉じんを対象にした換気・集じん方法

(1) 換気・集じん方法の現状

① 実地調査したトンネル工事の概要と主な換気仕様

本調査研究委員会で実施した平成 8 年度、平成 9 年度のトンネル工事における実地調査現場は表 3-6 のとおりである。

表 3-6 実地調査現場の一覧表

調査 年度	トンネル名	断面積 (m^2)	延 長 (m)	掘削工法	換気方式	所要換気量 (m^3/min)
平成 8 年 度	A 1		1,677	発破	送気式	2,000
	A 2	54.7	1,734	発破	送排気式	1,150
	A 3	56.5	3,192	発破	坑道式・集じん	1,000
	A 4		1,698	機械 TBM	送気式・集じん	354
	A 5	40.2	2,222	発破	送気式	1,131
	A 6	88.8	863	機械ロード	送気式	1,010
	A 7	73.2	1,654	発破	送排気式	1,132
	A 8	73.3	1,036	発破	送排気式	900
平成 9 年 度	B 1	68.3	1,529	機械	送排気式	1,190
	B 2	61.3	1,584	発破	送気式	1,500
	B 3	92.5	1,077	機械ロード	送気式・集じん	706→3,600
	B 4	74.6	3,840	発破	送排気式	909
	B 5	74.0	2,330	発破	送排気式	1,500

② 所要換気量の算定方法

実地調査を行ったそれぞれのトンネル工事現場の所要換気量の算定方法、換気量に対する現場サイドの要望等をまとめた。

トンネル名	所要換気量の算定方法
A 1	所要換気量については、「ずい道工事等における換気技術指針（建災防）」により算定している。風管により外気導入しており、切羽においても換気流が感じられた。ただし、厳冬季にこれだけの風量を送気する必要がないようにも思われた。
A 3 A 4	「ずい道工事等における換気技術指針（建災防）」による換気量の算定は、ディーゼル機関の排気ガスの希釈で決められている。最も粉じん濃度の高いのは、コンクリート吹付け作業、機械掘削作業等であり、この「換気技術指針」の見直しが必要と感じられた。
A 5	所要換気量に関して粉じん発生量から換気量が計算できないため、換気量の不足が感じられた。
A 4	所要換気量の算定は、トンネル内の作業の安全衛生を確保するために、 28°C 以下の温度、 0.3m/s の風速の維持を条件としている。トンネル断面が大きくなると、この条件では、換気ファン容量が設備面で大きな負

	担になるので、汚染空気を拡散させずに処理するようにしている。
A 7	換気量を決定するには粉じんの管理濃度（許容濃度）の設定が必要であると思われた。トンネル工事の粉じん管理濃度は、公的には決められていなく、施主側の積算で採用された値も分からない状態である。
B 2	排気ガス規制を施した車を使用しているが所要換気量の計算は従来どおりとしていた。それなりの計算方式があっても良いように思われた。
B 3	現行の積算では、集じん機は吹付けのみに限定されている。機械掘削は、NATM より発じんが多いので、これにも積算でみるよう発注者を指導して欲しい。また吹付コンクリート量は $4 \text{ m}^3/\text{h}$ から $6 \text{ m}^3/\text{h}$ に積算を変えられたが、これに伴う発じん量増加に対する粉じん対策費は積算で見てくれないので、これも含めるよう発注者を指導して欲しいとの要望があった。
B 3	機械掘削による粉じんを考慮し、大型集じん機の導入を行った場合の所要換気量としては次のように変更している。 ① 排気ガスに対して算定した所要換気量 $Q = 1,200 \text{ m}^3/\text{min}$ ② 掘削粉じんに対する所要換気量 Q_a は、地山の状態やサイクルタイムなどによって大きく異なり、一般に定量化することが極めて困難なため、平均粉じん濃度を $3 \text{ mg}/\text{m}^3$、換気量を $1,200 \text{ m}^3/\text{min}$ とし、1 分間当りの粉じん発生量は $3 \text{ mg}/\text{m}^3 \times 1,200 \text{ m}^3/\text{min} = 3,600 \text{ mg}/\text{min}$ と推定している。ここで管理目標濃度を $1 \text{ mg}/\text{m}^3$ とした場合、作業環境の改善に必要な所要換気量 $Q_a = 3,600 \text{ m}^3/\text{min}$、となり、これに設計変更している。これより主換気ファンが $2,000 \text{ m}^3/\text{min}$、大型集じん機が $1,600 \text{ m}^3/\text{min}$ を分担する処理風量となっている。

③ 採用している換気方式、集じん方法

トンネル名	所要換気量の算定方法
A 1	換気設備については、一本の風管で送気を行っている。また粉じんの発生を感知して風量を制御するとのことである。
A 2	送排気式を採用して切羽以外の換気は極めて良好であるが、発破掘削のため排気口が切羽から 100 m 以上離れるため、切羽の作業員数を極力減らし、呼吸用保護具の着用励行と、重機の排ガス対策に重点をおいている。

A 7	換気方式は切羽の汚染空気を坑内全域に拡散させないで坑外に排出するために集中・送排気組合せ式（主風管内：正圧）を採用している。切羽付近の換気は補助ファンにより切羽へ送気している。換気ファンの主ファンは口径1,500mm、風量2,000m³/min、全圧800mmAq、電動機350kWのターボファンであり、補助ファンは口径1,500mm、風量1,500m³/min、全圧100mmAq、電動機55kWの軸流ファンである。これらのファンは換気台車に設置し、切羽の進行に合わせて移動させるようにしている。風管は主ファンの排気用、補助ファンの送気用とも正圧となるため軟管を使用し、主換気の排気風管にFST-1,500mmφ、補助換気の送気風管にFST-1,000mmφを用いている。
A 7	換気ファンの運転は、トンネル工事作業に伴って発生する粉じん濃度と坑内の温度、風速などを換気台車に設置した各種のセンサーで検知して、その程度に応じてファンの稼働負荷を変化させることができるインバーター制御によって所要換気量を調整している。特に換気風量を多く必要とする発破とコンクリート吹付けでは、粉じん濃度が高くなるため最大風量で稼働させている。
A 8	換気方式としては、送排気組合せ方式を採用して作業環境は良好である。
B 3	換気方式は、当初の換気計画では集中・排気式であったが、坑口付近の汚染空気の大気拡散防止対策の面から送排気式（組合せ式）と大型集じん機の導入に変更した経緯とのことである。コンクリート吹付けにより切羽付近で発生する粉じんは送気式主換気風管（切羽～吹出口＝35～40m）による新鮮空気希釈し、これより後方に設置した集じん機（切羽～集じん機吸込口＝約75m）により坑内全域に拡散させないように集じんし、これより70m後方で除じん空気を吹き出している。 主換気ファンによる送気の換気流と切羽付近における対流状況の把握とその結果、切羽後方に設置した集じん機による吸い込み流れとのバランスが適正になっているかを観察した。
B 4	換気方式は送排気式を採用しており、送気設備は1,500m³/minの軸流ファンと風管1,200mmφ、排気設備は2,000m³/minの軸流ファンと風管1,500mmφの組合せによるもので、送気設備は比較的大型のものを設備していた。強力な送気を切羽に送ることで、粉じんを早期に拡散・希釈して切羽付近の粉じん濃度を低下する方法を採用していた。排気設備には、台車上にセンサーが設置されており粉じん濃度等を感知することにより風量の調節が行われるシステムになっていたが、切羽からの距離

	が100～300mとなっていた。
--	------------------

④ 換気口の配置条件

トンネル名	所要換気量の算定方法
A 1	送風管の設置位置が、トンネルの中心線からずれているので、送風管が壁に近い側では気流が遅くなり、それにつれて粉じん濃度も相対的に低く、気流の速い反対側は約2.5倍高くなっている。
A 2 A 5	切羽後方100～140m付近に換気架台がある。 風管吐出口の取付位置が切羽から50m以上離れて、切羽の進捗に対して遅れぎみになっている。

⑤ 換気状態

トンネル名	所要換気量の算定方法
A 1	トンネル内には2,000m ³ /minの送風がされており、コンクリート吹付け作業の粉じん濃度は3.1mg/m ³ (σ _g :2.1) であり、作業が行われている現場から50m程度離れた場所では、視界がよかった。しかし、吹付け作業のリモートコントロールを行っている作業者は、吹付け壁面から10m離れていたため、吹付コンクリートの跳ね返りと噴霧粉じんをかなりばく露していた。
A 1	吹付け作業中は粉じん濃度は高く、切羽から出口の方に拡散していた。また風管と吹付け作業部位の位置関係からトンネルの片側に粉じんが流れる。風管から風が切羽周辺で舞っており粉じん濃度は安定しないと思われる。
A 3	送気方式と集じん機の組合せ方式で、集じん機後方の坑内浄化に効果を挙げているのは、送排気量のバランスをとるため従来の500m ³ /minのものを、切羽後方100～140mに大型集じん機 (1,500m ³ /min) を設置している。また、覆工コンクリート打設付近においては、コンクリートポンプ車及び生コン車等の排気ガス処理を行っており、坑内後方の良好な環境を維持していた。
A 6	希少動物の保護及び周辺住民の住環境への配慮から坑口は防音壁とドームで覆われており坑内からの排気は、大容量で行えない状況にある。そのような特殊条件下にありながら坑内、坑口とも換気状況は良好である。

	った。さらに坑内の空気を清浄にするためには、坑口で強制的に排気する必要があるが、周辺住民を考慮し、遠慮しているのが実状である。また、送気ファンはサイレント式、可変連型であり消音効果が非常に効いていて、ほとんど無騒音であった。
A 7	坑内環境状況としての粉じん濃度は、切羽付近では発破後10分経過のずり積み作業が$6.0\text{mg}/\text{m}^3$、吹付コンクリート作業が$14.8\text{mg}/\text{m}^3$と高濃度である。換気台車と坑口間では概ね$1.0\text{mg}/\text{m}^3$以下である。粉じんの管理濃度は「ずり道工事等における換気技術指針（建災防）」の吹付コンクリート施工の計算例の粉じん管理目標濃度$2.4\text{mg}/\text{m}^3$と最大目標値$5\text{mg}/\text{m}^3$を暫定的に用いているようである。
A 7	坑内のファンには消音設備があり、ほとんど騒音を感じなかった。効果は大であった。換気設備は一般的に騒音が大きいですが、消音設備により低騒音で運転されており、トンネル内で音による圧迫感がなかった。
B 3	機械掘削、コンクリート吹付け、ずり積み・搬出等の粉じん・煤煙の発生状況は、自由断面掘削機ロードヘッダ、大型ブレーカによる切羽掘削等の発生量が多く、次にコンクリート吹付け・ずり積み・搬出となっている。切羽付近で発生する粉じんは集じん機により除じんするので、坑内全域や坑口付近への汚染拡散がなく、全般的には作業環境の改善に努力している。

(2) 換気・集じん方法の今後の方向

① 設計所要換気量の検討について

現行「ずり道工事等における換気技術指針」による所要換気量の算定は、発生粉じん量のデータが我が国をはじめ、諸外国にもないことから、ディーゼル機関等からの排気ガス等（NO、CO）を許容濃度以下に希釈する方法により行っているが、現実の換気方式では、吹出口（吸込口）と切羽の距離が発破の関係もあり、30～50mと離れていることや、風管、集じん機の配列が、運行機械の通路確保の面から制約されていること等から、コンクリート吹付け作業では、気中粉じん濃度が $5\text{mg}/\text{m}^3$ を切れない現場が未だ多い実情である。

このことから、アンケート調査、実地調査における関係者の意見でも述べられているように、設計風量の増量が現実に行われている例がみられる。

このためには、粉じん発生量の推定が必要となるが、トンネル建設工事では、地山の地質、形状、施工方法等の施工条件が多様多様であり、また、統一された測定データもないことから一般化された数値は皆無に近いといえよう。

しかし、坑内における粉じん測定が、前述のようによく定着をみつつあり、測定精度になお問題を残すものの一応の目安の数値はみえつつあるので、これを一つの参考値として、粉じん発生量を測定し、設計風量の是非を検討し、発生粉じんの低減対策を

講じるための一方策を提言したい。

② 粉じん発生量の推定に基づく所要換気量の検討方法について

坑内粉じん測定により、粉じんの幾何平均濃度 (M) mg/m^3 と、風速 (V) m/s を把握する。

このときの坑内断面積 (A) m^2 とすると

$$\text{粉じん含有気流量 } (\text{m}^3/\text{min}) = 60 \cdot A \cdot V$$

$$\text{粉じん発生量 } D (\text{mg}/\text{m}^3) = 60 \cdot A \cdot V \cdot M$$

で示される。

この粉じん発生量 D と屋内作業場におけるばく露限界濃度

$$E = \frac{2.9}{0.22Q + 1} (\text{mg}/\text{m}^3)$$

$$Q = \text{SiO}_2 (\%)$$

により、所要換気量は $Q_{\max} (\text{m}^3/\text{min})$ は次式で算定する。

$$Q_{\max} = \frac{D}{E}$$

この値と「ずい道工事等における換気技術指針」に基づく設計風量と比較して所要換気風量の見直しの目安とする。

【計算例】

今、コンクリート吹付け作業で、 $A=50\text{m}^2$ 、 $V=0.3\text{m}/\text{s}$ 、 $M=5.25\text{mg}/\text{m}^3$ (平成8年アンケート調査の平均値) とすると、粉じん発生量 $= 60 \cdot A \cdot V \cdot M = 60 \times 50 \times 0.3 \times 5.25 = 4,725 (\text{mg}/\text{m}^3)$

この場合、コンクリート吹付け作業の使用原材料を遊離けい酸の含有率0のものを採用すると、屋内作業場におけるばく露限界濃度式

$$E = \frac{2.9}{0.22Q + 1}$$

によると、 $Q=0$ につき、 $E=2.9\text{mg}/\text{m}^3$ となるので、必要換気量は、

$$\text{必要換気量 } Q_{\max} = \frac{D}{E} = \frac{4,725}{2.9} = 1,629 (\text{m}^3/\text{min})$$

となる。

また、 $Q=2\%$ とすると $E=2.01\text{mg}/\text{m}^3$ 、

$$Q_{\max} = \frac{4,725}{2.01} = 2,350 (\text{m}^3/\text{min})$$

となる。

③ 換気方式、集じん方式についての提言

イ 換気方式としては、長大トンネルでは送・排気組合せ式+集じん機の設置が最適な方法といえる。この方式にした場合、切羽の換気状態が比較的正常に保たれる方法となる。この他、坑内の途中で二次巻などの重機作業を伴う作業がある場合にはこの部分に局所集じん機・局所ファンを設置、あるいは切羽付近で吹付け近接後方に仕切りして、集じん機を使用して局部的に対応できるような方法についても検討するようにする。

ロ トンネル全域に対する換気としては、粉じん発生箇所を極力小範囲に限定し、発生粉じんを早期に坑外へ排出することができる換気設備とする。切羽側に設置する換気風管の吸い込み口（排気口）の位置は、できるかぎり切羽側に近付けるようにし「例えば、30m程度）、切羽後方の作業箇所には坑外より所要換気量（新鮮空気）を供給するようにする。

また、路盤の防じん対策としては路面を清掃あるいは湿潤状態にして、発じんしないようにする。

ハ 切羽側に設置する換気風管（送気風管）の吹出口はカプセル化（例えば風管延長50m）し、切羽の作業状況に併せて設置・収納を行い、風管の盛り替え作業の容易性や切羽作業用機械類の稼働上の障害にならないようにすることと、風管の保護にも役立つようにする。

ニ 切羽と換気架台および切羽と集じん機の設置距離が極力短くする。

発破時に退避可能な局所ファンを設置し、切羽からなるべく近い位置での集じん・排気を行うようにする。

適用する集じん機は、メンテナンスフリーのタイプを採用して換気エネルギーコストの削減を図るようにする。坑内重機による排気ガスの発生を抑制するため、できる限り電動機を使用するか、排気ガスの処理等を適切に行うようにする。

このうち、切羽後方に設置する集じん機による吸い込み流は、換気流れとのバランスが適正になるようにすることが望ましい。つまり、送風量と集じん処理風量のバランス、集じん機吐出風管延長・口径（例、 $L=70\text{m}$ 、 $1,500\text{mm}\phi$ ）などの適正な組合せ・換気条件などを注意して設置するようにする。また、小型な局所ファンを設置して適当に希釈拡散させることにより集じん機の吸込口に誘引させるようにする。このように、大型集じん機を設置する場合、効果的な捕集効率を高めるには、粉じん発生領域と集じん機の吸込口を最短距離にする必要がある。

ホ セントル部での風管の屈曲が送風量を減じるので、セントル部での風管の屈曲がないようにセントル部でも直線になるようにする。

ヘ 換気ファンの運転は、トンネル工事作業に伴って発生する粉じん濃度と坑内の温度、風速などを換気台車に設置した各種のセンサーで検知して、その程度に応じてファンの稼働負荷を変化させることができるようにコンピュータによるインバーター制御、もしくは可変翼制御によって所要換気量を調整する。特に換気量を多く必要とする発破とコンクリート吹付けでは、粉じん濃度が高くなるため最大風量で稼働させるようにする。

ト 粉じん検知センサーの設置位置は吹付け機械の台車等に取り付けて作業状況に合わせた検知と主換気ファン、局所ファン（風管の吹出口は切羽に極力近づける）を最適に連動制御させて、切羽の汚染空気を速やかに排除・希釈させるようにする。

④ ノズル作業員専用の操作室及び休憩所の設置についての提言

イ 吹付け作業員は防じんマスク（エアーストリーム：電動ファン付面体を含む。）の着用を義務付け、必要最小限の作業員が遠隔操作によりコンクリート吹付け作業を行う。また空調が完備したキャビン室での遠隔操作方式の採用についても検討する。

ロ 長大トンネル等の場合、休憩所が坑内に設置される場合は空気清浄機を据え付ける

ようにする。

⑤ 呼吸用保護具使用の定着化について

ずい道建設工事において、現行粉じん障害防止規則では、同則第27条により、同則別表第3に掲げる粉じん作業については、呼吸用保護具の着用を義務づけているが、現在行われている坑内粉じん作業は、前述のような坑内気中粉じん濃度下で行われているにもかかわらずすべてが別表第3の対象作業には含まれているわけではない。

これは、特定粉じん作業については同則第4条、特定粉じん作業以外の粉じん作業については、同則第6条により講ずべき粉じん対策を規制していることに基づくが、これらの粉じん対策の効果を数値的に示すことは現状では困難なこともあり、明らかにされていない。

しかし、現実には、坑内粉じん作業において前述のように粉じん対策の技術的対応の努力にかかわらず、屋内粉じん作業場における粉じんのばく露限界濃度

$$E = \frac{2.9}{0.22Q + 1}$$

を超える作業が存在するが、これらは現在使用されている防じんマスクの正しい着用の励行により粉じん障害の防止は可能であり、現実には各現場でも坑内作業者の防じんマスクの着用は定着化しつつある。

今後は、この定着化をさらに進めるとともに、正しい装着を図るための教育の充実、さらにはフィットネステスターの普及に努めることが必要と思われる。

⑥ 換気設備・集じん機の低騒音化についての提言

イ トンネル内の作業員に対する騒音対策としては、換気ファン本体防音カバーや吸込口に消音器を取り付けて低騒音化を図る。騒音対策効果としては、全負荷運転時でも吸込口から1.5mの点で85dB（A）以下の低騒音にして、換気ファンの近傍でも会話ができる状態にする。

ロ 一方、周辺住民の住環境への騒音対策としては、坑口に防音壁や防音ドーム等を据付けて低騒音化を図るようにする。

ハ 坑口の主換気風管の排気口は、坑口より離れた場所まで延長する必要がある。つまり、坑口に排気した汚染空気が再度坑内に再循環されないようにする。

第4章 トンネル建設工事における粉じん濃度測定

4. 1 建災防指針に基づく現地測定結果とアンケート調査結果

平成9年度に実施した現地測定結果から、建災防指針に基づく粉じん濃度測定の幾何平均値は $0.6\sim 19.0\text{mg}/\text{m}^3$ であり、質量濃度変換係数（K値）は、現場で使用しているデジタル粉じん計としてP-5LとP-5Hの感度があるが、P-5Lの感度に換算してみると $0.03\sim 0.05$ であり、また、遊離けい酸含有率は $0.3\sim 21.6\%$ の範囲であった。これは、平成8年度に実施したアンケート調査（以下アンケート調査と略）とほぼ同様の結果であり、各現場で実施されている粉じん濃度測定が満足できる状態にあると考えられる。特に、K値については一定の数値を採用することが可能であると考えられる。

4. 2 建災防指針に基づく現地測定結果についての所見

現地測定では建災防指針による粉じん濃度測定を実施したが、その結果から、建災防指針による測定を実施する場合、コンクリート吹付け作業や掘削作業、ずり積み・ずり出し作業、穿孔・装薬作業等の切羽付近での作業中は部外者立入り禁止区域となっており、その中で測定を実施することになる。アンケート調査によると、測定実施者は現場員が41%、外部委託が59%であり、部外者が立入って測定を実施するケースが多く、その際の測定者に対する安全確保に十分な配慮が必要となる。また、建災防指針では切羽付近に6ヶ所の測定点を設定し、各測定点で5回の繰り返し測定を実施することになっているが、各作業に使用する大型の重機の移動や配置状況と作業状況によっては必ずしも6ヶ所の測定点を設定できるとは限らず、稼働中の大型重機の間をぬっての各測定点で繰り返し測定が不可能な場合もある。今回の測定結果から、各測定点の繰り返し測定のバラツキが小さいことを考慮すると、各測定点の繰り返し測定については再検討する必要がある。さらに、トンネルの坑口から切羽までの間でのブレーカー等の重機を使用した作業等による粉じんの発生をも考慮すると、トンネル以外の粉じん作業場で実施されている作業環境測定手法にとらわれず、トンネル内の粉じんの実態把握により効果的な測定法の導入を考える必要がある。

4. 3 トンネル建設工事に導入可能な測定についての検討

今回の現地測定では、建災防指針による粉じん濃度測定以外に個人ばく露濃度測定、換気設備に対応した測定及び連続測定を併せて実施した。

1. 個人ばく露濃度測定

個人ばく露濃度測定は作業者に個人サンプラーを装着し作業時間中の時間荷重併記濃度を測定する方法であり、通常は測定前後のフィルターの質量差を採取空気量で除して粉じんの質量濃度を算出するが、最近では小型で、リアルタイムの粉じん濃度を表示するとともに、一定の基準を超えた場合に警報を発生する直読式のサンプラーも市販されている。

粉じんばく露が高いと思われるコンクリート吹付けノズル操作者や、ずり積み機械操作者等には、これら個人ばく露濃度測定を併用させることも一つの測定方法と考えられるが、測定対象作業者の選定、サンプリング時間の決定、環境改善への活用等の面で検討すべき問題が多い。個人ばく露濃度測定の場合は、特定個人のばく露が分るのみで、環境改善の対策に

結びつかないので、トンネル工事での測定としては必ずしも適切ではない。

2. 換気設備に対応した測定

今回は送排気の換気設備の送気口、排気吸引口、排気口から坑口方向に向かって送気口と排気吸引口の距離と同等の距離の地点で粉じん濃度を測定した。この場合は切羽で発生した粉じんと換気状態の関係を把握することが可能であり、測定点を坑口方向へ延長することによりトンネル全体の状況を把握することも可能である。使用する測定器は相対濃度計でよく、K値は一定の数値を使用することにより、より簡便な測定が可能である。

3. 連続測定

粉じん濃度の連続測定は上記2.の測定器を使用して、データの記録装置を接続することにより実施できる。この場合は粉じん濃度の経時変化と作業内容を関連させた調査が可能である。

トンネル建設工事での粉じん濃度測定において、より実態把握を十分にするためには、以上の1.～3.の測定方法を選択して採用することが望ましい。また、場合によっては1.や2.の測定器を重機の操作室に設置したり、坑口から切羽までの一定区間ごとに設置し、一定の基準を超えた場合に警報を発生させることも可能である。

4. 4 作業環境中の粉じん濃度低減対策のための測定結果の利用方法

トンネル工事に係わる作業環境中の粉じん濃度を低減させる方法としては有効な換気設備の設置が必要であり、換気状態の確認と適切な運用のために粉じん濃度測定結果が重要である。そのためには4. 3に記載した測定方法との連携が必要である。現在、粉じん測定器が組み込まれた換気装置も市販されており、粉じんの濃度に対応した排気風量を自動的に調節することが可能である。また、個々の作業者の粉じんばく露濃度低減対策としては、現状実行可能な換気対策とともに、呼吸用保護具の使用徹底が不可欠と考えられる。この場合にはリアルタイム方式の個人サンプラーを併用することにより、個人ばく露に対する作業者本人の防じんマスクの着用の必要性を確認することも可能である。さらに、重機の操作室内やずり運搬車の運転室内へクリーンエアを送気が可能であれば、測定器を重機の操作室やずり運搬車内に設置することにより、粉じんの濃度に対応した送気が可能となる。

このように、粉じんばく露濃度低減対策と対策に適した測定方法を導入することにより測定結果を有効に利用できると考えられる。

4. 5 現行の建災防指針の問題点の検討課題

建災防指針による粉じん濃度測定はトンネル建設現場において継続して行われており、現場の関係者における目標濃度として活用されている。しかし、ずり出し作業時など現在の指針では事実上測定不可能な場合もある。

したがって、建設業労働災害防止協会の現在の指針を基に作業者のじん肺の防止により有効な測定法を得るために以下のような点を今後検討するよう提言をする。

- (1) 切羽付近の6地点(5回)測定を簡略化する。6地点の濃度のばらつきの少ないこと、測定者(特に外部委託の場合)の安全を考えると測定の回数、地点数の再検討が必要である。
- (2) 風管換気の有効性評価に役立てるためトンネル内部の現在の測定点より離れた地点での

粉じん濃度計測を加える。覆工作業やインバート作業の場所にも作業者がおり、この点にも留意して測定点を検討する必要がある。

- (3) 切羽付近での粉じん濃度の自動連続測定を検討する。測定装置とコンピュータを接続することにより連続測定する方法は近年安価で容易になってきている。装置についてはさらに検討を要するが、この測定では作業別の粉じん発生の解析、風管風量の調節、作業員への粉じん発生警報などじん肺の防止に即効的な利点がある。

第5章 今後の課題

本委員会において、2ケ年にわたりトンネル建設現場のアンケート調査と一部の立入り調査、また1ケ年の現場測定の結果からみて、各現場では風管風量は年々増加しており、NATMにおいても粉じん低減の努力がなされている。

しかし、粉じん発生量が多い、閉鎖空間であること、全体換気であること、作業場所が移動することから、現場の作業者は他の粉じん職場の作業者に比べかなりの粉じんにばく露する。さらにずり出し作業がレール台車からダンプカーに転換したこと、地域住民との関係で発破作業が行えずブレーカーを使用する場合があるなど、粉じん発生とばく露に新しい要因も加わっている。したがって、現在でもトンネル建設現場では防じんマスクを必ず使用して行うように努めている。

これまで行ったアンケート調査、トンネル建設現場における換気装置等の実態調査及び粉じん濃度測定の結果から、NATM等の新技術に対応したトンネル建設工事において、より効果的な粉じん対策を明らかにするためには、今後、以下の点を更に検討する必要があると考えられる。

1. 換気装置の稼働確認のための測定方法の導入

空气中粉じん濃度の低減化を図るための換気装置の効果を確認するため、測定点、測定時間、使用機器等の粉じん濃度測定方法について検討する。

2. 粉じん濃度の継続的監視警報装置の導入

発じん状況に応じて、防じんマスク等の呼吸用保護具を迅速に着用するため、粉じん濃度の監視警報装置の導入に関して、使用機器、測定点等について検討を行う。

3. 上記1及び2にかかる測定手法の簡素化のために必要な定数等の検討

粉じん濃度の測定にあたっては、測定精度よりも、結果が即座に得られること、対策を念頭においた測定を行うこと、操作が容易であること等を考慮し、測定手法を簡素化するための質量濃度換算係数等の定数について検討する。

4. 換気装置の選定及び適正な稼働方法の検討

粉じん濃度の低減化とダンプトラック等のディーゼル機関からの排気ガスを許容濃度以下に希釈する方法の両面から、工法等に応じた換気装置の選定と適正な稼働方法について検討する。

5. 防じんマスクの適正な着用のための教育訓練カリキュラム及び教育内容の策定

換気対策を講じてもお粉じん濃度が高い場合には、防じんマスクによる粉じんばく露の低減が必要であることから、各作業者が防じんマスクを適正に着用するための教育、訓練の方法、教材等の開発について検討する。

