

トンネル建設工事の切羽付近における
作業環境等の改善のための
技術的事項に関する検討会

報告書

令和2年1月30日

目次

I	開催要綱及び参集者.....	3
II	検討の経緯	6
III	検討結果	7
	第1 基本的事項について.....	7
	第2 測定の詳細事項等について.....	10
	第3 粉じん濃度測定結果に基づく措置について.....	12
	第4 工学的対策等及び実施管理について.....	14
	第5 今後のスケジュール等.....	16
IV	別紙	17
	別紙1 ずい道等建設工事中の質量濃度変換係数（K 値）に関する文献等について ..	17
	別紙2 浮遊粉じん中の遊離けい酸含有率に関する文献等について.....	28
	別紙3 トンネル工事における粉じん測定及び換気等に関する文献等について.....	35
	別紙4 結晶質シリカのばく露限度等の設定に関する文献等について.....	47
	別紙5 定点測定と個人測定の測定値の比較について.....	50
	別紙6 電動ファン付き呼吸用保護具の防護係数に関する文献等について.....	52
V	参考資料	56

I 開催要綱及び参集者

1 趣旨・目的

ずい道等建設工事において、新たな工法の普及、機械の大型化等により粉じんの発生の様相が多様化していること等の状況に応じた的確な対策の推進が、引き続き求められており、平成 25 年に策定された第 8 次粉じん障害防止総合対策においても、重点事項として定められている。

このため、トンネル建設工事の作業環境を将来にわたってよりよいものとする観点から、最新の技術的な知見等に基づき、簡便かつ負担の少ない正確なトンネル切羽付近の粉じん濃度測定・評価方法について検討し、作業環境を把握するためのより適切な手法の選択肢を広げ、確立することにより、作業環境管理及び健康障害防止に繋げることを目的として、厚生労働省労働基準局安全衛生部長の下に学識経験者、実務経験者等の専門家の参集を求め、「トンネル建設工事の切羽付近における作業環境等の改善のための技術的事項に関する検討会」を開催する。

2 検討事項

- (1) 切羽付近の粉じん濃度の測定方法及び測定結果の評価方法について
- (2) 作業状況、地山の状況、切羽付近の粉じん濃度等、記録すべき事項について
- (3) 切羽付近の作業環境の改善方法について
- (4) 呼吸用保護具（フィルター）の適切な管理について
- (5) 労働者の教育について
- (6) その他必要と認められる事項

3 構成・運営等

- (1) 本検討会は、厚生労働省労働基準局安全衛生部長が、別紙の学識経験者、実務経験者の参集を求めて開催する。
- (2) 本検討会に座長 1 名を置き、座長は議事を整理する。座長は、参集者の互選により選出する。
- (3) 本検討会に、座長を補佐し議事の整理を補助する者として、副座長を若干名置くことができる。副座長は、座長が指名する。
- (4) 本検討会においては、必要に応じ（1）の参集者以外の学識経験者、実務経験者等からヒアリングを行うことがある。
- (5) 本検討会の事務は、厚生労働省労働基準局安全衛生部化学物質対策課環境改善室において行う。

- (6) 本検討会の議事は原則公開とする。ただし、個人情報、個別企業等に係る案件を取り扱うときは非公開とする。
- (7) この要綱に定めるもののほか、検討会の運営に関し必要な事項は、座長が厚生労働省労働基準局安全衛生部化学物質対策課環境改善室と協議の上定める。

別紙

参集者 (50 音順)

- 阿部美行 建設労務安全研究会理事 (前田建設工業株式会社執行役員安全担当)
- 石田直道 全国トンネルじん肺根絶原告団事務局長 (令和元年 11 月から)
- 井上 聡 弁護士 (全国トンネルじん肺根絶弁護士・都民総合法律事務所)
- 漆原 肇 日本労働組合総連合会 (連合) 労働法制局長 (平成 30 年 8 月から)
- 及川 浩 全国トンネルじん肺根絶原告団事務局次長 (令和元年 11 月まで)
- 大野幸次 一般社団法人全国建設業協会労働委員会建設キャリアアップ検討 WG 委員 (西松建設株式会社土木事業本部土木部長) (平成 30 年 8 月まで)
- 吉川直孝 独立行政法人労働者健康安全機構労働安全衛生総合研究所建設安全研究グループ上席研究員
- 熊谷信二 元産業医科大学産業保健学部環境マネジメント学科安全衛生マネジメント学教授
- 小西淑人 一般社団法人日本繊維状物質研究協会専務理事
- ◎小山幸則 立命館大学総合科学技術研究機構上席研究員
- 佐藤恭二 一般社団法人日本建設業連合会安全委員会衛生対策部会長 (飛鳥建設株式会社安全環境部長)
- 諏訪 至 西松建設株式会社土木事業本部土木設計部課長 (一般社団法人全国建設業協会推薦) (平成 30 年 8 月から)
- 鷹屋光俊 独立行政法人労働者健康安全機構労働安全衛生総合研究所作業環境研究グループ部長
- 土屋良直 一般社団法人全国建設業協会常任参与 (一般社団法人日本トンネル技術協会推薦)
- 外山尚紀 労働安全衛生コンサルタント (特定非営利活動法人東京労働安全衛生センター)
- 野崎正和 一般社団法人日本トンネル専門工事業協会会長 (成豊建設株式会社代表取締役社長)

- 橋本晴男 東京工業大学キャンパスマネジメント本部総合安全管理部門特任教授
- 明星敏彦 産業医科大学産業生態科学研究所労働衛生工学研究室教授
- 本山謙治 建設業労働災害防止協会技術管理部長
- 吉住正男 日本労働組合総連合会（連合）総合労働局雇用対策局長（平成 30 年 8 月まで）
- ◎：座長 ○：副座長 五十音順、敬称略

オブザーバー

- 川尻竜也 国土交通省大臣官房技術調査課 課長補佐
- 村田博顕 経済産業省産業保安グループ
鉱山・火薬類監理官付・石炭保安室長補佐
- 中村憲司 独立行政法人労働者健康安全機構労働安全衛生総合研究所
作業環境研究グループ 主任研究員

Ⅱ 検討の経緯

第1回 平成28年11月30日

- (1) トンネル建設工事現場における粉じん対策の現状等について
- (2) 切羽付近の粉じん濃度の測定方法等について
- (3) その他

第2回 平成29年3月2日

- (1) トンネル建設工事現場における粉じん対策の現状等について
- (2) 切羽付近の粉じん濃度の測定方法等について
- (3) その他

第3回 平成29年4月28日

- (1) 切羽付近の粉じん濃度の測定方法等について
- (2) その他

第4回 平成30年8月8日

- (1) 作業環境に関するヒアリングについて
- (2) 切羽付近の粉じん濃度の測定結果等について
- (3) その他

第5回 令和元年6月26日

- (1) 前回議事のポイント
- (2) 前回の議論を踏まえた測定方法の方向性
- (3) 今年度の調査の方向性
- (4) その他

第6回 令和元年11月28日

- (1) 実地調査・アンケート調査の結果について
- (2) 報告書骨子（案）について
- (3) その他

第7回 令和2年1月15日

- (1) 報告書（案）について
- (2) その他

Ⅲ 検討結果

第 1 基本的事項について

1 報告書の趣旨等

この報告書は、ずい道等（ずい道及びたて坑以外の坑（採石法第 2 条に規定する岩石の採取のためのものを除く。）をいう。以下同じ。）を建設する工事であって、掘削、ずり積み、ロックボルト取付け、コンクリート等の吹付等、その実施に伴い粉じんが発生する作業を有するもの（作業の自動化等により、労働者がずい道等の坑内に立ち入らないものを除く。）において、粉じん障害を防止するために講ずべき措置を提言する。

また、発注機関においては、本報告書で提言する事項を実施するための必要な経費の積算について、配慮すべきである。

2 測定対象粉じんの粒径及び分粒装置を備えた測定器の使用

測定対象の粉じんの粒径は、吸入域（レスピラブル）とし、それに適合する適切な分粒装置（※）を備えた試料採取機器又は相対濃度計（※）（以下「測定器等」という。）を使用すべきである。

※ 分粒装置については、レスピラブル粒子を適切に測定できる（4 マイクロメートル 50% カット）ことが製造者等により確認されているものを使用すること。

※ 相対濃度計は、分粒装置を適切に機能させるため、吸引ポンプを内蔵したもの又は吸引ポンプと接続可能なもの（ポンプ流量が分粒装置を機能させるために適切なものに限る。）である必要がある。また、相対濃度計は、登録校正機関により 1 年以内ごとに 1 回、定期的に校正されたものを使用すること。

3 粉じん濃度測定の試料空気の採取について

事業者は、現行の「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」（平成 12 年 12 月 26 日付け基発第 768 号。以下「ガイドライン」という。）の第 3 の 4 及び別紙に定める粉じん濃度測定に代えて、次に掲げる測定方法のいずれかを実施すべきである。

(1) 定点測定

- ① 切羽からの距離が約 10 メートル以上 50 メートル以下の範囲（換気装置の吸入口よりも切羽側に限る。）で、範囲の両端と中間におけるトンネルの両側（計 6 点）に測定器等を設置すること。
- ② ただし、測定を行う作業者の安全確保の観点から、発破、機械掘削、

ずり出しの作業中は、切羽から 20 メートル以内の範囲に測定器等を設置しないことができる。

- ③ 測定器等を壁面から 1 メートル程度離すことよりも切羽に近づけることを優先し、三脚を使用する方法に加え、トンネル壁面、配管、支保工等に測定器等を設置することも可能とすること。
 - ④ 測定器等の試料採取口の高さは、床上 50 センチメートル以上 150 センチメートル以下の範囲内とすること。また、全ての測定器等について同じ高さであることが望ましいこと。
- (2) 個人サンプリングによる測定
- ① 個人サンプリングによる粉じん濃度測定は、切羽において掘削作業に従事する者の身体に装着する測定器等を用いて行うこと（※）。測定器等を装着する労働者の数は、2 人を下回ってはならないこと。
 - ② 測定対象者の負担を軽減するため、装着する測定器等は最小限とすることが望ましいこと。
- (3) 車両系機械を用いた測定
- 車両系機械を用いて行う粉じん濃度測定は、掘削作業中に切羽で使用する車両系機械（トラックを除く。※）に測定器等を設置して行うこと。測定器等は、落下物による損傷を避けることができる場所に設置すること（※）。測定器等を設置する車両系機械の数は、2 台を下回らないこと。ただし、切羽で使用する車両系機械が 1 台しかない作業工程がある場合は、1 台の車両系機械に複数の測定器等を設置しても差し支えないが、測定器等の間隔が可能な限り離れる箇所に設置すること（※）。
- (4) 複数の測定の組み合わせ
- (1) から (3) に定める測定のうち 2 以上の方法を同時に実施（※）しても差し支えないこと。また、定期的に行う測定ごとに、異なる方法の測定を行うことも差し支えないこと。
- ※ ずり出し用のトラックは、切羽から坑外に移動することから、切羽付近の粉じん濃度に限定した測定対象としては適切でない。
 - ※ 測定器等は、運転用キャビン等外部環境から隔離されている場所以外の場所に設置すること。
 - ※ 作業工程ごとに切羽で掘削作業に従事する労働者が入れ替わる場合は、それぞれの工程において、切羽で掘削作業に従事する労働者 2 人以上に測定器等を装着すること。
 - ※ 作業工程ごとに車両系機械が入れ替わる場合、それぞれの作業工程において、切羽で使用する車両系機械に測定器等を設置して測定すること。
 - ※ 複数の方法による測定を同時に実施する場合は、それぞれの方法の要件を満た

す測定を同時に実施すること（例：定点測定を４点、個人サンプリングを１人、車両系機械を用いた測定を１点とする、といった方法は認められない。）。

4 粉じん濃度の試料採取等の時間

試料空気の採取等の時間については、次に掲げるとおりとすべきである。

- (1) 定点測定及び車両系機械を用いて行う測定における試料空気の採取等の時間は、一般的な山岳トンネル（NATM 工法）の作業工程１サイクル（発破工法の場合は、発破後から装薬前までを１サイクルとする）の全時間とすること。（※）
- (2) 個人サンプリングにおける試料空気の採取等の時間は、作業工程の１サイクル（発破工法の場合は、発破後から装薬前までを１サイクルとする）の全時間とすること（※）。

※ 測定器等の損傷を防ぐため、発破により影響を受ける場所については、発破時の待避後に作業が開始される際に測定器等を設置すること。

※ 発破により労働者が待避している間は測定を行わず、労働者が切羽で作業を開始する時点で測定を開始すること。

5 粉じん濃度測定の頻度

測定の頻度については、次に掲げるとおりとすべきである。

- (1) 事業者は、現行の粉じん障害防止規則第６条の３に準じて半月以内に１回、定期的に、測定を行うこと。
- (2) なお、複数の測定方法を用いる場合は、２(1)から(3)に掲げる方法のいずれかが半月以内に１回、定期的に行われていれば差し支えない。

6 風速等の測定

現状のガイドラインの別紙の４(2)から(4)に定める方法により、風速、換気装置等の風量、気流の方向について、半月以内ごとに１回、定期的に、測定を行うこと。

第2 測定の詳細事項等について

1 検討内容

トンネル建設工事における粉じん濃度等に関する文献等を踏まえ、標準的な質量濃度変換係数の設定を含む粉じん測定の方法、標準的な遊離けい酸含有率を含む遊離けい酸含有率の測定方法を検討した。

2 粉じん濃度の測定方法

- (1) 粉じん濃度の測定方法は、質量濃度測定法（分粒装置を用いるろ過捕集方法及び重量分析方法）又は相対濃度指示方法（分粒装置を備えた相対濃度計及び質量濃度変換係数（K値）を用いた方法）のいずれかとすべきである。
- (2) K値の設定方法は、質量濃度測定法と相対濃度指示方法の併行測定により算定する方法に加え、文献等から統計的に決定した標準K値を使用することを認めるべきである（別紙1参照）。
- (3) (2)の標準K値は、次に掲げる相対濃度計の種類に応じた値とすべきである（別紙1参照）。なお、次に掲げるもの以外の相対濃度計を使用する場合、当該測定器のK値は、併行測定によって決定すること（※）。

LD-5R : 0.002 mg/m³/cpm

LD-6N2 : 0.002 mg/m³/cpm

※ 併行測定によるK値の決定は、測定の都度行うこと。ただし、現場ごとに複数回の測定の結果、K値が安定していることが確認できた場合は、当該K値をその後の測定におけるK値として使用できること。

3 遊離けい酸含有率の測定方法

遊離けい酸含有率の測定は、エックス線回折分析方法又は重量分析方法に加え、次に掲げる方法も認めるべきである（別紙2参照）。なお、エックス線回折分析方法等による場合は、1サイクルを通じて採取された試料を用いて遊離けい酸含有率を算定すること。

- (1) 遊離けい酸含有率は、工事前のボーリング調査等による工事区間の主たる岩石の種類に応じ、岩石の種類別に定められた標準的な遊離けい酸含有率により決定する。なお、二酸化ケイ素（SiO₂）を多量に含む変成岩である珪岩には、この方法は適用しない。
- (2) 標準的な遊離けい酸含有率は、文献等に基づき、次に掲げるとおり、岩石の種類に応じて定める（別紙2参照）（※）。なお、火成岩（塩基性岩又は超塩基性岩に限る。）については、標準的な遊離けい酸含有率を定めな

い(※)。

① 第1グループ(火成岩(酸性岩に限る。)、堆積岩及び変成岩(珪岩を除く。)) : 20%

② 第2グループ(火成岩(中性岩に限る。)) : 20%

※ 標準的な遊離けい酸含有率は、掘削・ずり出し作業中の遊離けい酸含有率に基づいて設定されている。コンクリート吹付作業中の遊離けい酸含有率は非常に低いことから、標準的な遊離けい酸含有率は、1サイクルを通じた遊離けい酸含有率よりも大きい(安全側である)と評価される。

※ 過去の文献から、火成岩(塩基性岩又は超塩基性岩に限る。)の遊離けい酸含有率は第2グループより低いことが推定されるため、仮に、火成岩(塩基性岩又は超塩基性岩に限る。)を主たる岩石とするトンネルを掘削する場合、安全側の推定値として、第2グループの標準遊離けい酸含有率(20%)を使用することは差し支えない。

第3 粉じん濃度測定結果に基づく措置について

1 検討内容

トンネル工事における粉じん測定及び換気等に関する文献等を踏まえ、粉じん濃度測定結果に基づく措置、遊離けい酸濃度の測定結果に基づく措置、粉じん濃度等の記録等について検討した。

2 粉じん濃度測定結果に基づく措置について

粉じん濃度測定結果に基づく措置については、現行のガイドラインの粉じん濃度目標レベル設定の経緯、粉じん濃度・所要換気風量に関する基準、作業環境測定及びその趣旨等を踏まえ、次に掲げるとおりとすべきである。

- (1) 粉じん濃度については、現行のガイドラインの第3の4と同様に、発生源対策及び換気装置等の工学的対策が適切かを判定する際の指標である「粉じん濃度目標レベル」と比較し、次のとおり評価すること（別紙3参照）。

- ① 評価値の計算については、各測定値を算術平均して求めること（別紙3参照）。
- ② 測定結果の評価については、評価値と粉じん濃度目標レベルを比較して、評価値が粉じん濃度目標レベルを超えるか否かについて行うこと。

(2) 粉じん濃度目標レベル

トンネル坑内の粉じん濃度に関する文献、トンネル坑内の換気手法に関する文献、換気以外の粉じん濃度低減方策に関する文献等の調査を行った（別紙3参照）。さらに、現状のトンネル工事での粉じん濃度の現状、換気装置や低粉じん吹付剤等の取り入れ状況に関するアンケート調査を実施した（参考資料1及び別紙3参照）。その結果を踏まえ、「粉じん濃度目標レベル」は次のとおりとすべきこと。なお、この目標レベルは、今後、10年後程度を目処に、トンネル掘削工事における粉じん低減対策の進展等を踏まえ、必要な見直しを行うべきである。

- ① 粉じん濃度目標レベルは $2\text{mg}/\text{m}^3$ とすること。
- ② ただし、掘削断面積が小さい（ 40m^2 未満）トンネルであって、 $2\text{mg}/\text{m}^3$ を達成するのに必要な大きさ（口径）の風管又は必要な本数の風管の設置、必要な容量の集じん装置の設置等が施工上極めて困難であるものについては、可能な限り、 $2\text{mg}/\text{m}^3$ に近い値を粉じん濃度目標レベルとして設定し、当該値を記録しておくこと。

(3) 測定結果に基づく措置

事業者は、評価値が粉じん濃度目標レベルを超える場合には、設備、作業工程又は作業方法の点検を行い、その結果に基づき換気装置の風量の増加、作業工程又は作業方法の改善等、作業環境を改善するために必要な措置を講ずること。また、事業者は、当該措置を実施した場合は、再度、粉じん濃度測定を実施すること。

3 遊離けい酸濃度の測定結果に基づく措置について

2に定める措置に加え、遊離けい酸ばく露による健康障害を防止するため、遊離けい酸ばく露濃度の基準値を定め、それを超えるばく露が発生しないようにすべきである。ばく露低減措置については、換気等の工学的対策による作業環境管理に加え、次に掲げる方法により作業管理を行うべきである。（別紙3、別紙4、別紙5参照）。

(1) 遊離けい酸濃度の算定

遊離けい酸濃度は、2で測定された粉じん濃度の評価値に、遊離けい酸含有率を乗ずることによって算定すること。遊離けい酸含有率は、第2の3の「遊離けい酸含有率の測定方法」により算定すること。

(2) 要求防護係数の算定

遊離けい酸濃度は、(1)で算定した遊離けい酸濃度を遊離けい酸ばく露濃度の基準値で除した値（以下「要求防護係数」という。）により評価すること。

(3) 遊離けい酸濃度ばく露の基準値

(2)の遊離けい酸ばく露濃度の基準値については、米国政府労働衛生専門家会議（ACGIH）で提案されている結晶質シリカのばく露限界値（TLV）である、 $0.025\text{mg}/\text{m}^3$ を採用すべきであること。

(4) 要求防護係数に基づく有効な呼吸用保護具の使用

事業者は、(2)で評価された要求防護係数を上回る指定防護係数を有する呼吸用保護具を選定し、労働者にそれを使用させること（別紙6参照）。

4 粉じん濃度等の記録等

- (1) 事業者は、粉じん濃度及び遊離けい酸濃度の測定及び測定結果の評価を行ったときは、その都度、必要な事項を記録して、7年間保存すること。
- (2) 事業者は、粉じん濃度の測定を行うごとに、朝礼等において、粉じん濃度測定の結果等及び要求防護係数について、関係労働者に周知すること。

第4 工学的対策等及び実施管理について

1 検討内容

第1から第3に掲げる措置に加え、粉じん対策に係る計画、粉じん発生源に係る措置、換気装置等による換気の実施等、労働衛生教育の実施、測定及びその結果に基づく措置の実施管理、元方事業者が実施する事項について検討した。

2 粉じん対策に係る計画の策定

ずい道等建設工事を実施しようとするときは、事前に、粉じんの発散を抑制するための粉じん発散源に係る措置、換気装置等による換気の実施、粉じん濃度等の測定、防じんマスク等有効な呼吸用保護具の使用、教育の実施、その他必要な事項を内容とする粉じん対策に係る計画を策定すべきである。

3 粉じん発生源に係る措置

現行のガイドラインの第3の2に定める事項に加え、第3の2の粉じん濃度目標レベルを達成するため、以下の事項をガイドラインに盛り込むべきである。

- (1) コンクリート吹き付け時の粉じん濃度を低減させるため、吹き付けコンクリートへの粉体急結剤、液体急結剤、分割練混ぜ（SEC）等の導入、あらたな吹付機械としてエアレス吹付機械等の導入を図ること。
- (2) より本質的な対策として、遠隔吹付技術の導入を図ること。
- (3) また、設計段階において、より粉じん発生量の少ないTBM工法やシールド工法の採用についても検討すること。

4 換気装置等による換気の実施等

現行のガイドライン第3の3に定める事項に加え、第3の2の粉じん濃度目標レベルを達成するため、以下の事項をガイドラインに盛り込むべきである。

- (1) より効果的な換気方法である、吸引捕集方式の導入を図ること。
- (2) 新たな換気設備として、局所集じん機、伸縮風管、トラベルカーテン等の導入を図ること。

5 労働衛生教育の実施

労働衛生教育について、以下の事項をガイドラインに盛り込むべきである。

- (1) 事業者は、坑内の特定粉じん作業（粉じん障害防止規則第2条第1項第3号に規定する特定粉じん作業をいう。）に常時従事する者に対し、粉じん作業特別教育（粉じん障害防止規則第22条に基づく教育をいう。）を実施

- しなければならないこと。また、坑内において特定粉じん作業以外の粉じん作業に従事する労働者についても、特別教育に準じた教育を行うこと。
- (2) 事業者は、電動ファン付き呼吸用保護具の適切な選択及び使用を図るため、新規入場者に対し、第3の3の要求防護係数を満たす呼吸用保護具の選択及び使用等に関する事項について、教育を行うこと。
 - (3) 事業者は、労働者が休憩の際、容易に坑外に出ることが困難な場合においては、現行のガイドラインの第3の7に掲げる措置を講じた休憩室を坑内に設置すること。

6 測定及びその結果に基づく措置の実施管理

- (1) 粉じん測定及びその結果に基づく措置を適切に実施するため、ずい道等の掘削作業主任者の職務等を以下のとおり改めるべきである。
 - ① ずい道等の掘削作業主任者の職務に、粉じん測定とその結果に基づく作業方法の決定及び呼吸用保護具の選択、呼吸用保護具の点検等及び使用状況の監視等に関する事項を追加すること。
 - ② ずい道等の掘削作業主任者技能講習の範囲に、①で定める事項を追加し、講習時間を1～2時間程度延長すること。
- (2) 粉じん濃度測定を適切に実施するため、次に掲げる措置をガイドラインに盛り込むべきである。
 - ① 事業者は、粉じん測定を実施する際、ずい道等の掘削作業主任者自ら測定器等を設置（又は労働者に装着）するか、同主任者の指揮のもと労働者に行わせること。
 - ② 事業者は、相対濃度指示方法以外の方法による採取試料の分析については、十分な知識及び経験を有する者（第一種作業環境測定士等）に実施させるか、十分な能力を持つ機関（作業環境測定機関等）に委託すること。

7 元方事業者が実施する事項

元方事業者は、現行のガイドライン第4に定めるとおり、以下の事項を実施すべきである。

- (1) 粉じん対策に係る計画の調整
- (2) 教育に対する指導及び援助
- (3) 清掃作業日の統一
- (4) 関係請負人に対する技術上の指導等

第5 今後のスケジュール等

1 法令改正のスケジュール等

- (1) 省令（粉じん障害防止規則等）の改正については、令和2年6月の公布を目途に、手続きを進める。
- (2) 関連する厚生労働大臣告示については、令和2年7月の告示を目処に手続きを進める。
- (3) 大臣告示の告示日又はその後速やかに、関連ガイドラインを改正する。

2 施行期日

省令及び告示の施行期日は、令和3年4月1日（予定）とする。

3 経過措置

ずい道等の掘削作業主任者に関する改正規定については、施行後1年程度適用を猶予する。経過措置終了後は、施行の日に現に資格を有する者であって都道府県労働局長が定める講習（特例講習）を受講したものについては、当該作業主任者の業務に従事することを認める。なお、特例講習は、施行後2年間程度で終了する。

IV 別紙

別紙 1 ずい道等建設工事中の質量濃度変換係数（K 値）に関する文献等について

1 文献レビュー

- (1) 新藤ら（1985）は、NATM 工法のトンネル坑内において、 $10\mu\text{m}$ 以下の粉じんについて、切羽から $3\text{m} \times 3\text{m}$ のメッシュの 6 点（Fig. 4）で測定を行い、デジタル粉じん計とローボリュームサンプラー（ $15\text{--}30\text{L/min}$ ）と TR サンプラー（ 20L/min ）により併行測定を行い、K 値を求めた。その結果、相対濃度と質量濃度の関係はおおむね直線の関係となり、相対濃度が 500cpm 超えると、K 値が大きくなる傾向があったが、掘削・ずり出しとコンクリート吹きつけ時の K 値に大きな違いは見られなかったとしている（Fig. 5）。

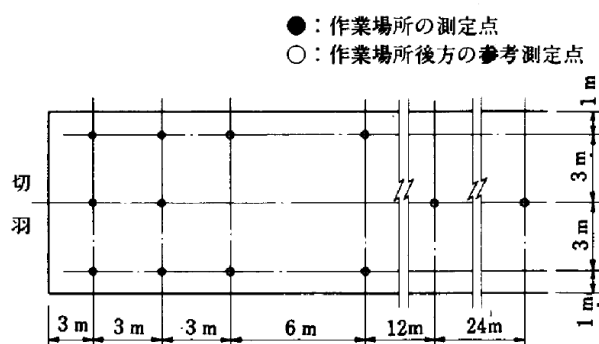


Fig.4 測定点の標準配置図

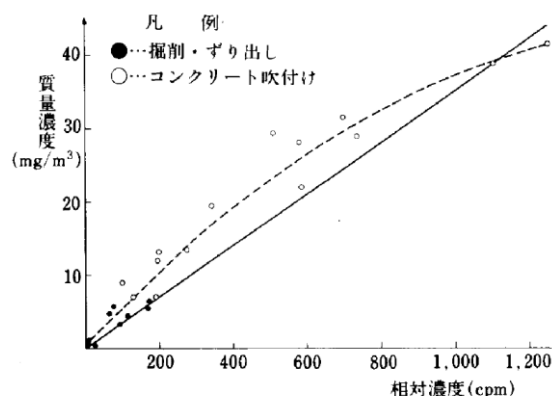


Fig.5 相対濃度～質量濃度の関係

- (2) 日本作業環境測定協会（2010）は、NATM 工法の 4 つのトンネルを対象に、個人ばく

露測定（8 時間）と切羽から 50 m 地点での定点測定を行った。個人ばく露測定は、Dorr Oliver サイクロン付きサンプラー（ $4\mu\text{m}$ 、50%カット相当）を装着したろ紙捕集方式サンプリングと、分粒装置の付いていない光散乱方式の相対濃度計（LD-2）との併行測定を行った。定点測定（10 分以上）は、多段階分粒装置（レスピコ

表 30 LD-2 型粉じん計の全作業時間の質量濃度変換係数（K 値）

トンネル名	K 値 ($\text{mg/m}^3/\text{cpm}$)	平均値	50m 地点 (併行測定)の K 値 ($\text{mg/m}^3/\text{cpm}$)
A トンネル	作業者 A1 0.0008	0.0009	0.0010
	作業者 A2 0.0006		
	作業者 A4 0.0010		
	作業者 A5 0.0010		
	作業者 B1 0.0012		
B トンネル	作業者 B2 0.0012	0.0012	0.0015
	作業者 B3 0.0013		
	作業者 B4 0.0014		
	作業者 B5 0.0012		
	作業者 C1 0.0012		
C トンネル	作業者 C2 0.0014	0.0012	0.0006
	作業者 C3 0.0018		
	作業者 C4 0.0011		
	作業者 C5 0.0005		
	作業者 D1 0.0008		
D トンネル	作業者 D2 0.0012	0.0009	0.0013
	作業者 D3 0.0014		
	作業者 D4 0.0006		
	作業者 D5 0.0010		
	作業者 D6 0.0007		
	平均値 0.0011		
最小値 0.0005			0.0006
最大値 0.0018			0.0015

ンパーティクルサンプラー) を装着したろ紙捕集サンプリングと、分粒装置のついていない光散乱方式の相対濃度計 (LD-2、LD-3K2) の併行測定を行った。これらにより、それぞれ K 値を算定した (表 30)。この結果、個人ばく露測定のトンネル毎の平均値 (0.0009~0.0012) は、全トンネルの平均値 (0.0011) の 0.81~1.1 倍であり、定点測定のトンネル毎の平均値 (0.0006~0.0015) は、全トンネルの平均値 (0.0011) の 0.55~1.36 倍のばらつきがあった。

- (3) 名古屋 (2008) は、分粒特性が $5\mu\text{m}$ 、50%カットから $4\mu\text{m}$ 、50%カットに変更されたことに伴い、切羽から 50m の地点において、ローボリュウムサンプラーによる質量濃度測定と、光散乱方式の相対濃度測定器による併行測定を行って K 値を算定した。K 値は、同一の測定値であっても作業内容やトンネルによりばらつきがあった (表 3 LD-1H:0.0010-0.0025、LD-2:0.0013-0.0030、LD-3K2:0.0011-0.0036、LD-5:0.0012-0.0029、LD-5D:0.012-0.028) が、平均値がおおむね 0.002 付近であった (表 3 LD-1H:0.0019、LD-2:0.0022、LD-3K2:0.0020、LD-5:0.0024、LD-5D:0.020) ことから、LD 系相対濃度の K 値は 0.002 が妥当であるとしている。

表 3 各トンネルに於ける質量濃度変換係数 K 値

トンネル	作業内容	測定時の粉じん濃度 (mg/m ³)	LD-1H	LD-2	LD-3K2	LD-5	LD-5D
A	2次吹き	1.40	0.0022		0.0022		
		3.42	0.0025		0.0027		
	ずり積み	0.28	0.0015		0.0015		
	2次吹き	4.26	0.0017		0.0018		
B	掘削〜ずり	1.09		0.0021	0.0019	0.0023	0.019
	2次吹き	7.56		0.0020	0.0021	0.0028	0.020
		7.90		0.0024	0.0036	0.0028	0.021
C	ずり積み	0.61			0.0013		
		0.21			0.0013		
		0.10			0.0014		
D	ずり積み	1.00	0.0010	0.0013	0.0011	0.0012	0.012
	2次吹き	9.15	0.0025	0.0030	0.0028	0.0029	0.028
		9.63	0.0019	0.0022	0.0021	0.0023	0.021
平均値			0.0019	0.0022	0.0020	0.0024	0.020

- (4) 赤坂ら (2005) は、NATM 工法トンネルのコンクリート吹きつけ時において、吹きつけ箇所から 10m と 50m の地点で、ローボリュウムサンプラーと光散乱方式の相対濃度計による併行測定を行って K 値を算定した。スランプの区分、圧送エア流量、フレッシュコンクリートの性状をパラメータとして変動させた結果、10m、50m いずれも K 値に大きな違いはなく、50m が 10m よりも若干高めの場合が多かったとしている (表 6)。

表-6 試験結果一覧表1

	スラン プの区 分	圧送 エア 流量 (m^3 / min)	フレッシュコン クリートの性状			粉 じ ん			
			スラ ン プ (cm)	空 気 量 (%)	温 度 ($^{\circ}\text{C}$)	実測K値		粉じん濃度	
						10m (mg/m^3 /cpm)	50m (mg/m^3 /cpm)	10m (mg/m^3)	50m (mg/m^3)
1	中	9	13.5	2.2	24.6	0.0023	0.0024	9.61	4.66
2		7	13.0	1.8	24.2	0.0024	0.0023	4.67	3.50
3		5	13.5	2.6	24.0	0.0022	0.0025	3.09	2.70
4		9	20.0	1.6	24.0	0.0023	0.0027	6.25	5.40
5	大	7	20.0	2.0	24.4	0.0024	0.0024	5.15	3.51
6		5	18.0	2.0	26.2	0.0038	0.0025	5.33	2.40
7		9	10.5	3.5	27.0	0.0026	0.0022	8.42	5.40
8	小	7	10.5	3.2	27.3	0.0024	0.0037	5.11	7.13
9		5	8.5	2.6	27.8	0.0025	0.0026	3.06	2.27
摘 要	・各ケースの試験回数は1回、吹付け量は5 m ³ 、吐出量は12m ³ /hr、ノズルと壁面との距離は2 m。 ・ここで用いたデジタル粉じん計の標準K値はK=0.003 mg/m ³ /cpm。 ・エア圧送距離は12.5 m、急結剤添加率は7％。 ・実測K値は、吹付け開始10分後から吹付け終了までのローボリュウムエアサンプラーとデジタル粉じん計の値より算出。 ・粉じん濃度は、デジタル粉じん計の吹付け開始10分後から吹付け終了までの平均値で、10m地点は2箇所、50m地点は3箇所の平均値として算出。								

- (5) 名古屋 (2014) は、NATM 工法の 2 つのトンネル坑内の掘削、ずり出し及び吹きつけ時の一連の作業において、切羽より 20m の地点で、いずれも排気管が設置されていない側に測定点を置き、ローボリュウムサンプラーによるろ紙捕集方法と光散乱方式の相対濃度測定器による併行測定を行い、K 値を算定した (図 3.2、図 3.7)。K 値は測定器によって異なり、LD-3K2:0.0027-0.0069、

LD-5:0.0032-0.0063、LD-5D: 0.028-0.033、LD-6N: 0.0032-0.0037 であった。切羽からの複雑な気流の影響により、切羽に向かって右側と左側で測定点をとることでK値が変化した可能性があるとしている。さらに、同様の作業を行っている現場であっても発生粉じん量やK値が著しくことなることはトンネル現場において一般的なことだとし、どのようなトンネル現場においても使用できるような十分安定した標準的なK値を求めることは困難であるとしている。

- (6) 労働安全衛生総合研究所(2018)は、NATM工法による5つの山岳トンネルの坑内において、吸入性粉じん用サンプラーによる質量濃度測定と光散乱方式の相対濃度測定器(分粒装置付きと分粒装置無しのもの)で併行測定を行い、K値を算定した。定点測定(LD-5R)での1サイクルを通じた測定については、切羽から25mから100mで行った。さらに、個人サンプラー(LD-6N, LD-6N2)及び重機内(LD-5, LD5R)での併行測定も行った。定点測定(LD-5R)での1サイクルでのK値は、外れ値の2点(いずれも、吹きつけ開始直後に15mg/m³を超える高濃度を記録しており、何らかの特殊要因があったと推定される。)を除くと、0.002を中心として0.001-0.003の範囲に分布している(図9)。また、切羽からの距離との関係を観てみると、外れ値の2点を除くと、おおむね0.002付近に分布した(図11)。分粒装置の有無によるK値の違いについては、分粒装置の機能により相対濃度が低くなることを反映して分粒装置無しのも

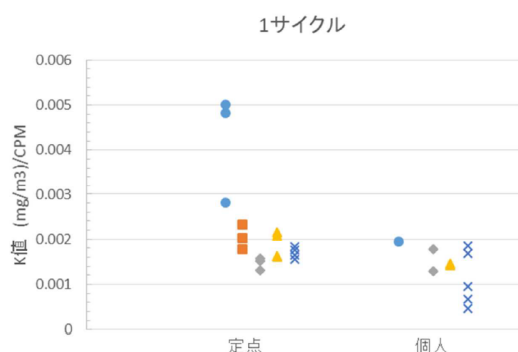


図9 測定方法毎のNATM1サイクルでのK値

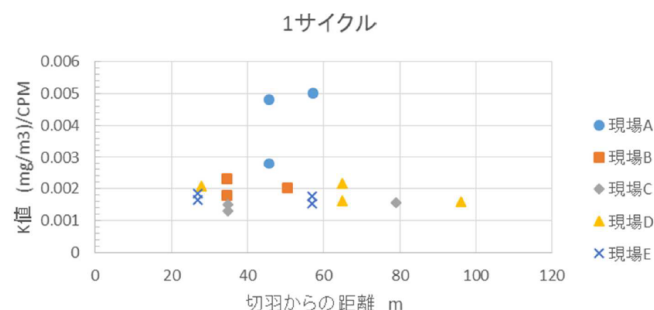


図11 定点観測における作業毎のK値の距離変動

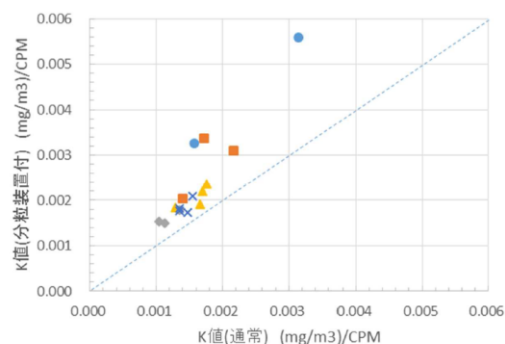


図12 通常の粉じん計と分粒装置を取り付けた粉じん計のK値の関係

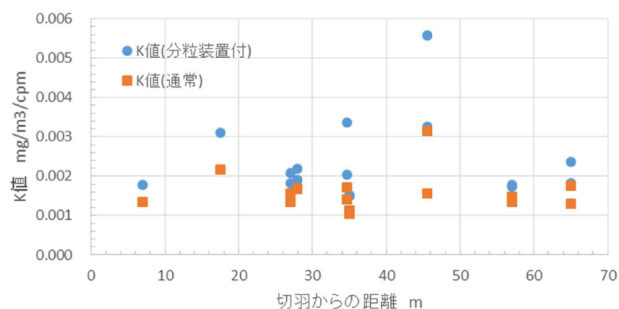
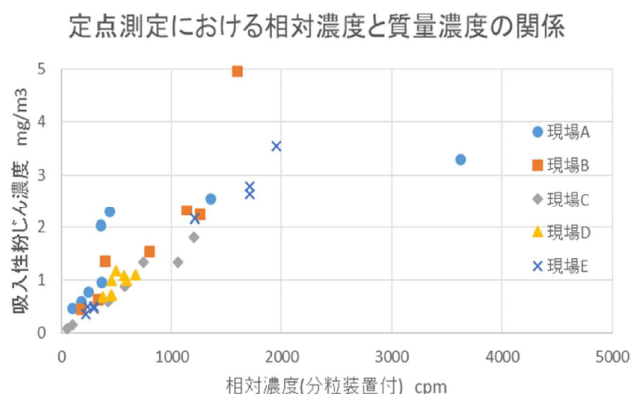
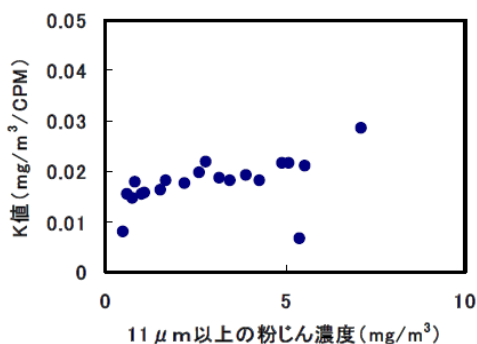


図13 通常の粉じん計と分粒装置を取り付けた粉じん計のK値の切羽からの距離による変化

のより K 値は相対的に大きくなったとして (図 12)。この傾向は切羽からの距離に対しても大きな変動はなかったとしている (図 13)。さらに、定点測定における相対濃度と質量濃度の関係を追加解析したところ、おおむね直線関係となっている (追加図)。



- (7) 大下ら(2007)は、模擬トンネル内の模擬岩盤を用いた機械掘削実験により、粒径別の粉じん濃度と K 値の関係について調査した。測定は、切羽から 10m、30m、50mの地点に、光散乱方式の相対濃度計 LD-5 を 8 台、LD-3K を 1 台、ローボリュームエアサンプラー (LV-40BR) 4 台、アンダーセンサンプラー (AN-200) 1 台により行った。その結果、粒径が大きい範囲 (11 μ m 以上) の粉じん濃度が増加するのに従って、K 値が大きくなっているとした (図 a))。その原因としては、光散乱方式では、照射光に対して粉じんの粒径が大きくなるほど前方散乱量が大きくなる傾向があるため、受光側の散乱量が相対的に低くなり、K 値が大きくなるものと考えられるとしている。さらに、粉じんの粒度分布が統計的なフラクタル分布 (粒度の細かい部分を拡大したときに粒度の粗い部分と類似の分布形態を示す分布) を示すことを仮定し、フラクタル次元と LD-5D の K 値との関係を調べたところ、フラクタル次元が大きくなる (粉じん中の細粒分が大きくなる) ほど K 値が減少しており、K 値が粉じんの粒度分布特性に依存していることを示しているとしている (図 8)。



a) 11 μ m以上の粉じん濃度と K 値の関係

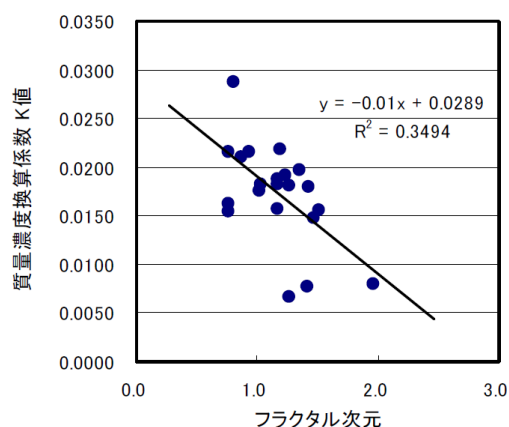
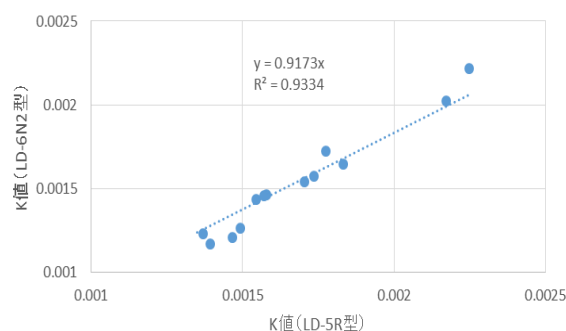
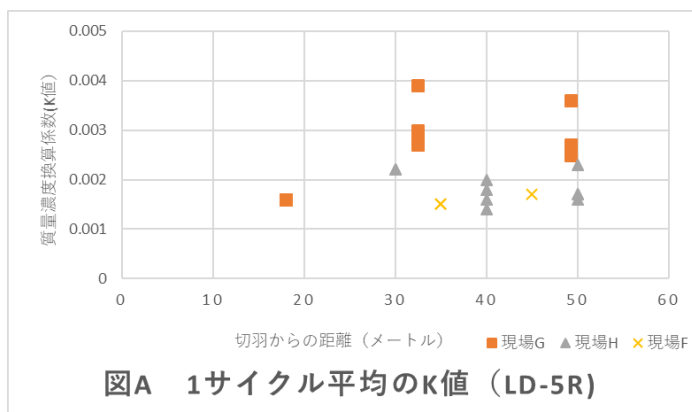


図8 粉じん粒度分布のフラクタル次元とK値の関係(LD-5D)

- (8) 労働安全衛生総合研究所 (2020) が実施した追加的な調査では、前年度に実施した測定結果と矛盾のない結果を示した。LD-5R (分粒装置付き) の K 値は、現場 F、G、H とともに、切羽からの距離に依存せず、おおむね一定の値に分布している (図 A)。また、同一測定点で LD-6N2 (分粒装置付き) と LD-5R (分粒装置付き) を併行測定した

際のそれぞれのK値には、直線的な相関性が見られ、LD-6N2の方が8%ほど小さい(図B)。



2 トンネル粉じん対策ガイドラインに記載されている標準K値の設定根拠

- (1) 「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」(平成12年12月26日基発第768号。以下「ガイドライン」という。)の制定当初の標準K値は、建設業労働災害防止協会の「ずい道工事における換気技術委員会報告書」(平成12年3月)において提言されている数値と一致している。
- (2) 平成20年にガイドラインが改正され、標準K値は測定機器が追加されるとともに、従来の標準K値が修正(LD-1L:0.03→0.02、LD-1H等:0.003→0.002)されている。これは、名古屋(2008)の提言と合致する。
- (3) 平成23年にガイドラインが改正され、LD-5D, LD-5, LD-2及び3442の光散乱方式の相対濃度測定器の標準K値が追加された。これは、平成22年12月の「平成22年度管理濃度等検討会中間報告」に基づくものである。平成22年12月に開催された平成22年度第2回管理濃度等検討会の資料2-9では、切羽から50m地点において、コンクリート吹きつけ作業中(一部ずり出しを含む。)に、分粒装置(4μm50%カット)を備えたサンプラーによる質量濃度と光散乱方式の測定器による相対濃度を併行測定し、K値を算定した(管理濃度等検討会(2010)別添1)。同一の作業であっても、K値には一定のばらつきがあった(LD-5D:0.013-0.038、LD-5:0.0012-0.0028、LD-2:1.36-2.85、3442:0.0024-0.0054)。標準K値は、測定器ごとの平均値の有効数字の2桁目を四捨五入して設定されたとみられる(LD-5D:平均0.021、K値0.02、LD-5:平均0.0024、K値0.002、LD-2:平均2.015、K値2.00、3442:平均0.0034、K値0.003)。
- (4) 平成29年にガイドラインが改正され、LD-5Rの標準K値が追加された。平成29年度第1回管理濃度等検討会の資料1-2でNATM工法のずい道坑内の切羽から50mの地点において、ずり出しと吹きつけの1サイクルの間、ローボリュームサンプラーによる質量濃度とLD-5とLD-5Rによる相対濃度を2器ずつ同時に併行測定し、K値を

算定した（管理濃度等検討会（2017）別添2）。この結果、K 値は作業内容によりばらついた（別添2表1 LD-5:0.001-0.0017、LD-5R:0.0012-0.0017）が、LD-5 と LD-5R の相対濃度が非常によく相関した（ $R^2=0.9977$ ）ことから（別添2図4）、LD-5 と同じ標準 K 値（0.002）が採用された。

3 考察

- (1) 作業の内容による K 値への影響については、新藤ら（1985）では、K 値に大きな違いは見られなかったとしているが、名古屋（2008）では、作業の内容による K 値の変動は大きい。赤松ら（2005）はコンクリート吹きつけ時のみの測定結果であるため、変動はほとんどない。
- (2) 切羽からの距離による実測 K 値への影響については、赤坂ら（2006）では、10m 地点と 50m 地点で K 値に明確な違いは認められないが、名古屋（2014）での 20m 地点での実測 K 値と名古屋（2008）での 50m 地点での光散乱方式の同一機種（LD-5）の平均値（0.002）と比較すると、20m 地点の値が 1.6～3.2 倍（0.0032-0.0063）大きかった。一方、労働安全衛生研究所（2018）での 1 サイクル平均の定点測定の K 値は、5 つのトンネルの測定結果を通じて、切羽からの距離による偏りはみられない（図 13）。名古屋（2014）は、分粒装置を装着していなかったため、粒度分布における大粒径の粉じん割合が高くなり、K 値が大きくなったと推定される（大下ら（2007））。
- (3) ガイドラインに定める標準 K 値の設定については、作業内容やトンネルにより実測された K 値は、平均値の 0.5～1.5 倍のばらつきがある。（名古屋（2008）では、平均値と比較して、平均値をまたがる一定のばらつきがあることを前提とした上で、全ての測定された K 値の平均値を算出している。光散乱方式の測定器については、制定時、平成 20 年、平成 23 年の改正のいずれも、実測された K 値の平均値に近い値を標準 K 値に採用している。
- (4) 過去の標準 K 値の設定方法を踏まえると、労働安全衛生研究所（2018）の1 サイクル平均の実測 K 値は、定点測定（LD-5R）については、外れ値の 2 点を除けばガイドラインの標準値である 0.002 の 0.6～1.4 倍の範囲で収まっており（図 9）、また、切羽からの距離による偏りもみられない（図 13）。さらに、定点測定における相対濃度と質量濃度の関係は、おおむね直線関係となっている（追加図）。以上から、これら測定結果に基づいて切羽における標準 K 値を定めることは、過去の標準 K 値の設定方法と矛盾しないといえる。ただし、この標準 K 値は、分粒装置が装着可能な光散乱方式の相対濃度計を使用する必要があり、具体的には、LD-5、LD-5R、LD-6N に使用機種を限定することが望ましい。
- (5) なお、名古屋（2014）での切羽からの 20m 地点での実測 K 値（LD-5:0.0032-0.0063）は、光散乱方式の相対濃度計に分粒装置を付けなかったため、粒度分布に占める大粒径粉じんが大きくなったことにより、K 値に大きな影響を受けたと考えられる（大下

ら(2007))。労働安全衛生研究所(2018)の値と比較して、標準K値である0.002との乖離が大きく、乖離もプラス方向に偏っているため、この結果に基づいて標準K値を定めるのは困難であったという判断は妥当である。

- (6) 日本作業環境測定協会(2010)では、個人ばく露測定、切羽から50m地点での定点測定のいずれも、LD-2の総測定点のK値の平均値は0.0011であった。この値は、労働安全衛生総合研究所(2018)の分粒装置が付いていなかったLD-5等のK値の分布(図13)の範囲内に収まっており、労働安全衛生研究所(2018)の測定結果と矛盾しない。ただし、分粒装置によるK値への影響は明らかでないため、分粒装置付きの光散乱方式の相対濃度計による吸入性粉じんの標準K値の設定及びその妥当性を検証するため、今年度に追加調査を行った。
- (7) 労働安全衛生総合研究所(2020)、労働安全衛生総合研究所(2018)によれば、分流装置を用いたLD-5RによるK値の測定結果のうち、1サイクル測定を行った測定点について、各サイクルの平均値を算出した結果を別添3の表Aに示す(切り羽からの距離が50mを超える測定点は除いている。)。全ての各サイクル平均K値の平均値は、0.0021となった。参考までに、切り羽からの距離が50mを超える測定点を含めた平均値も算出したが、同じ値であった。この値に、労働安全衛生総合研究所(2020)の図Bで示すLD-6N2との近似直線の傾きである0.9173を乗じると、0.0019となる。
- (8) これまでのガイドラインの標準K値の決定方法は、有効数字2桁目を四捨五入して有効数字一桁で示されており、同様の方法をとれば、LD-5R、LD-6N2のいずれも標準K値は0.002となる。

(参考文献)

- 赤坂雄司、大下武志、波田光敬、井谷雅司(2005)吹付けコンクリート工の施工条件を変動させた場合の粉じん濃度について コンクリート工学年次論文集 Vol.27, No.1 pp.1393-1398
- 大下武志、宇田川義夫、井谷雅司、徐永強(2007)ずい道建設工事における機械掘削時の粉じん対策技術の開発 国立研究開発法人土木研究所平成19年度重点プロジェクト研究報告書
- 建設業労働災害防止協会(2000)ずい道工事における換気技術委員会報告書(平成12年3月)
- 管理濃度等検討会(2010)ずい道等建設工事におけるガイドラインに示されている粉じん計のK値を新たに追加するための新規粉じん計の現場調査の実施結果について 平成22年度第2回管理濃度等検討会(平成22年12月7日)資料2-9
- 管理濃度等検討会(2017)新規粉じん計LD-5R型の質量濃度変換係数(K値)について 平

成 29 年度第 1 回管理濃度等検討会（平成 29 年 5 月 23 日）資料 1-2 別紙
新藤敏郎、平田篤夫、稲葉力（1986）トンネル坑内の浮遊粉じんについて－粉じんの性状、
濃度測定、対策、新方式の集じん装置－ 西松建設情報 Vol. 8 pp. 19-28
名古屋俊士（2014）トンネル建設工事における相対濃度計等を用いた粉じん濃度測定に係る
実証試験報告書 早稲田大学理工学院創造理工学部資源工学科
名古屋俊士（2008） 隧道等建設工事の現行測定法の検証とアーク溶接等への新測定法の提
案に関する研究 厚生労働科学研究費補助金平成 19 年度総括研究報告書
日本作業環境測定協会（2010） トンネル建設工事における個人ばく露濃度測定等推進事業
検討委員会報告書（平成 21 年度厚生労働省委託事業）（社）日本作業環境測定協会
労働安全衛生総合研究所（2018）トンネル建設工事の切羽付近における粉じん濃度測定に関
する研究報告書 独立行政法人労働者健康安全機構
労働安全衛生総合研究所（2020）トンネル建設工事の切羽付近における粉じん濃度測定に
関する研究 令和元年度現場調査報告書 独立行政法人労働者健康安全機構

ずい道等建設工事現場におけるガイドラインに示されていない新規相対濃度計の質量濃度変換係数(K値)一覧

機 種	P-5L P-5L2 P-5L3	P-5H P-5H2 P-5H3	LD-1L	LD-1H	3411	LD-1H2	LD-3K	LD-3K2	3423	3451	LD-5D	LD-5	LD-2	3442	備 考	
製造メーカー	柴田科学㈱				日本カノ マックス㈱	柴田科学㈱			日本カノマックス㈱		柴田科学㈱			日本カノマックス㈱	作業内容 測定位置	
K値の単位	(mg/m ³ /cpm)								(mg/m ³ /mg/m ³)	(mg/m ³ /cpm)		(mg/m ³ /mg/m ³)	(mg/m ³ /cpm)			
ガイドラインに示されて いるK値(有無)	0.04	0.004	0.02	0.002	0.02	0.002			0.003	0.6	無	無	無	無		
トンネル での 実測 値	1						0.0024				0.026	0.0028	2.00		二次吹き(50m)	
	3								0.0016		0.015		1.36		二次吹き(50m)	
	7						0.0008				0.013		2.31		二次吹き(50m)	
	8							0.0019			0.019	0.0023	2.06		二次吹き(50m)	
	9							0.0021			0.020	0.0028	2.01		二次吹き(50m)	
	10							0.0036			0.021	0.0028	2.37		二次吹き(50m)	
	11							0.0016					2.21		二次吹き(50m)	
	12							0.0021					2.85		二次吹き(50m)	
	13							0.0015					1.70		二次吹き(50m)	
	14							0.0016					1.61		二次吹き(50m)	
	15							0.0017					1.68		二次吹き(50m)	
	16								0.0033					0.0028	二次吹き(50m)	
	17								0.0033					0.0030	二次吹き(50m)	
	18								0.0031					0.0032	二次吹き(50m)	
	19								0.0031					0.0033	二次吹き(50m)	
	20								0.0030					0.0034	二次吹き(50m)	
	21								0.0030					0.0035	二次吹き(50m)	
	22								0.0050					0.0044	二次吹き(50m)	
	23								0.0050					0.0054	二次吹き(50m)	
	24								0.0036					0.0036	二次吹き(50m)	
	25								0.0036					0.0038	二次吹き(50m)	
	26								0.0024					0.0025	二次吹き(50m)	
	27								0.0024					0.0024	二次吹き(50m)	
	28								0.0031					0.0032	二次吹き(50m)	
	29								0.0031					0.0032	二次吹き(50m)	
	30							0.0019			0.019	0.0023			ずり積み(50m)	
	31							0.0021			0.020	0.0028			二次吹き(50m)	
	32							0.0036			0.021	0.0028			二次吹き(50m)	
	33							0.0011			0.012	0.0012			ずり積み(50m)	
	34							0.0021			0.021	0.0023			二次吹き(50m)	
	35							0.0019			0.022	0.0021			二次吹き(50m)	
	36							0.0031			0.038	0.0032			二次吹き(50m)	
	37							0.0016			0.021	0.0017			二次吹き(50m)	
	実測値の 平均値							0.0016	0.0021	0.003		0.021	0.0024	2.015	0.0034	
	ガイドライン 追加K値(案)											0.02	0.002	2.00	0.003	

表 1 ずい道建設工事現場における並行測定結果

機種	LD-5 型		LD-5R 型		併行測定 結果	備考
製造メーカー	柴田科学					
K 値の単位	mg/m ³ /CPM					
	ガイドラインで示されている K 値(有無)					
	0.002		無			
測定結果	CPM	K 値 (mg/m ³ /CPM)	CPM	K 値 (mg/m ³ /CPM)	(mg/m3)	作業内容/位置
1	744	0.0017	747	0.0017	1.240	ずり積み/左
2	765	0.0015	740	0.0016	1.173	ずり積み/右
3	210	0.0011	195	0.0012	0.225	吹付け/左
4	229	0.0011	221	0.0012	0.254	吹付け/右
5	220	0.0012	212	0.0013	0.267	2 回目吹付け/左
平均	-	0.0013	-	0.0014	-	

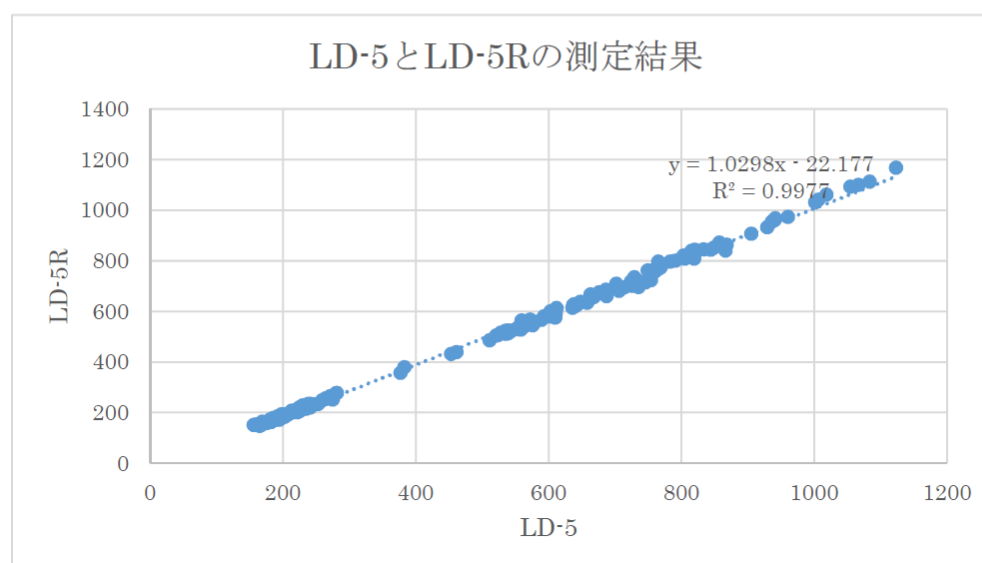


図 4 LD-5 型と LD-5R 型の相関

表A 質量濃度変換係数 (K値) (LD-5R)の平均値

現場	サイクル	定点	切り羽からの距離	K値	サイクルごとの平均値
A		①	45.6	0.0048	0.0038
		②	45.6	0.0028	
B		①	34.7	0.0023	0.0021
		⑥	34.7	0.0018	
C		①	35	0.0015	0.0014
		④	35	0.0013	
D		②	28	0.0021	0.0021
E		①	27	0.0018	0.0017
		③	27	0.0016	
F	1	①	35	0.0015	0.0015
	2	①	35	0.0015	0.0016
		②	45	0.0017	
G	1	②	18	0.0016	0.0025
		③	32.4	0.003	
		④	32.4	0.0028	
		⑤	49.2	0.0027	
		⑥	49.2	0.0026	
	2	②	18	0.0016	0.0029
		③	32.4	0.0039	
		④	32.4	0.0027	
		⑤	49.2	0.0036	
		⑥	49.2	0.0025	
H	1	①	30	0.0022	0.0017
		②	30		
		③	40	0.0016	
		④	40	0.0014	
		⑤	50	0.0017	
		⑥	50	0.0017	
	2	①	30	0.0022	0.0019
		②	30		
		③	40	0.002	
		④	40	0.0018	
		⑤	50	0.0016	
		⑥	50	0.0023	
1 サイクルごとのK値の平均値（50m以内）					0.0021
	A～Eのみの平均				0.0022
	F～Hのみの平均				0.0020
（参考） 1 サイクルごとのK値の平均値（全測定点）					0.0021
※ 切り羽からの距離が51m以上の測定点を除いている。					

別紙2 浮遊粉じん中の遊離けい酸含有率に関する文献等について

1 文献レビューの結果

- (1) 鉛・亜鉛鉱山について、房村（1955）は、岩石それ自体の含有する遊離けい酸と、

それが粉砕されて発生した粉じん中の遊離けい酸とは、量的に差があることが知られているとし、採取した岩石を粉砕した微粒子の遊離けい酸の含有率をリン酸法で調べた。この結果、坑道の走向方向（0-72m）、傾斜方向（高さ 80-205m）における上盤、鉱脈、下盤のいずれについても非常に激しい変動が認められることから、「一鉱脈又は一岩石から一つ採取された試料をもってその鉱脈又は岩石の全体としての遊離けい酸を知ることはできない」としている（第5表、第6表）。一方で、3区の鉱脈中の遊離けい酸濃度の分布は、統計的に有意な差（ $P=0.05$ ）はなかったとしている。また、全ての試料（111 試料）中の遊離けい酸の含有率を 10%刻みの分布として分析すると、正規分布していたとしている（第10表）。

第5表 鉱脈走向方向の遊離珪酸の変動

距離 m	0m	37m	71m
上盤	24.16	41.09	29.72
鉱脈	37.57	53.26	45.24
下盤	50.04	40.20	12.85

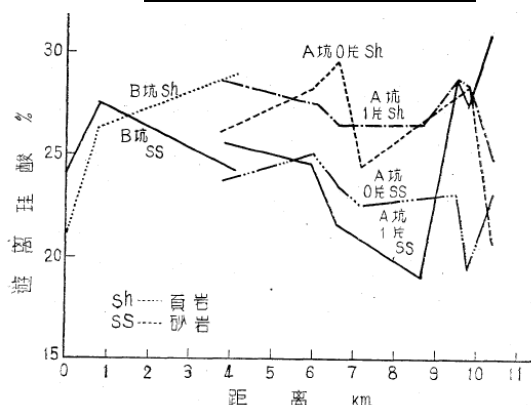
第6表 鉱脈傾斜方向の遊離珪酸の変動

海拔高さ m	80m	175m	205m
上盤	—	50.74	21.38
鉱脈	36.93	65.81	64.45
下盤	17.79	25.66	30.24

第10表 鉱床内遊離珪酸の分布

遊離珪酸	10%未満	20%未満	30%未満	40%未満	50%未満	60%未満	70%未満
上盤	1	3	15	8	1	2	1
鉱脈	—	1	3	11	9	5	4
下盤	1	6	11	9	5	1	—
母岩	4	5	3	—	—	—	—
中	—	1	—	1	—	—	—
計	6	16	32	29	15	8	5
累計	6	22	54	83	98	106	111
頻度%	5.4	19.6	48.7	74.8	88.4	95.5	—

- (2) 石炭鉱山について、房村（1957）は、走向方向 0-11km の砂岩、頁岩を粉砕した微粒子の遊離けい酸含有率を調べたところ、走向に沿って遊離けい酸の分布はかなり変動している（第1図）が統計上の有意差（ $P=0.1$ ）はなく、一方で、砂岩と頁岩の遊離けい酸含有率には統計上の有意差（95%範囲：頁岩 28.26-25.52%、砂岩 25.23-22.67%）があったとしている。また、砂岩中の遊離けい酸分布は正規分布となっているとし、頁岩についても、正規型をなすものと推定される、としている。



第1図 遊離珪酸の分布

(3) 採石プラントについて、房村 (1972) は、ハイボリュームサブラ (250-300l/min) によるろ紙捕集法で浮遊粉じんを採取し、リン酸法で遊離けい酸含有率を調べた。これによると、チャート質砂・頁岩、ホルンフェルス砂岩、砂岩・粘板岩互層がほぼ等しく (58.4-55.8%)、普通砂岩は 30% 台であり、塩基性岩類は 10% 台又はそれ以下であったとし (第 7 表)、従来分析してきた各種岩石の遊離けい酸含有率の結果の範囲内であった (第 8 表) としている。

(4) トンネル坑内の浮遊粉じんについて、新藤ら (1985) は、多段式分粒器を持つサンプラーを用いて採取した結果を示している。このうち、10 μm 以下の粉じんについて遊離けい酸含有率を測定したころ、粘板岩 (21.3%)、砂岩 (17.4%)、石灰岩 (10.7%)、コンクリート吹きつけ材料 (0.4%) 等であり、房村 (1972) の値より小さい傾向があるとしている (Table 4)。

(5) 日本作業環境測定協会 (2010) は、NATM 工法の 4 つのトンネルを対象に、個人ばく露測定 (8 時間) と切羽から 50m 地点での定点測定を行った。個人ばく露測定は、Dorr Oliver サイクロン付きサンプラー (4 μm、50% カット相当) を装着したろ紙捕集方式サンプリングと、定点測定 (10 分以上) は、多段階分粒装置 (レスピコンパーティクルサンプラー) を装着したろ紙捕集サンプリングを行い、X 線解析分析装置を使用して遊離珪酸含有率を求めた。この結果、定点測定 (表 31) では、地質別に、花崗岩 (A) : 6.4%、砂岩・頁岩 (B) : 10.7%、花崗斑岩 (C) : 9.8%、凝灰岩・泥岩 (D) : 6.9% であり、個人ばく露測定 (表 21) では、A : 5.6%、B : 13.4%、C : 8.1%、D : 8.2% であった。

第 7 表 岩石別の遊離珪酸含有率

岩 石	分 析 試料数	遊 離 珪 酸 %		
		最 大	最 小	平 均
砂 岩	12	46.45	24.00	36.04
ホルンフェルス砂岩	4	68.12	37.87	55.82
砂岩・粘板岩互層	6	76.22	35.60	55.84
チャート質砂・頁岩	8	74.65	31.75	58.42
片 麻 岩	4	48.60	6.15	30.83
石 英 斑 岩	2	27.88	23.86	25.87
輝 緑 岩	2	6.54	1.01	3.78
閃 緑 岩	1	-	-	19.06
蛇 紋 岩	1	-	-	15.18
安 山 岩	1	-	-	3.00
石 灰 岩	1	-	-	2.39
か ん らん 岩	3	0.38	0.22	0.30

第 8 表 各種岩石の遊離珪酸 (%)

種 類	遊離珪酸	種 類	遊離珪酸
火 成 岩		過塩基性岩	
酸性岩		輝 岩	0~1
花 崗 岩	29~38	角 閃 岩	0~23
石 英 斑 岩	25~53	かんらん岩	0~1
ペグマタイト	28~32	堆 積 岩	
流 紋 岩	21~34	砂 岩	25~65
花崗閃緑岩	18~28	砂 質 頁 岩	22~58
中 性 岩		頁 岩	20~45
石英粗面岩	26~47	粘 板 岩	28~44
石英安山岩	23~41	凝 灰 岩	25~58
角閃安山岩	20~34	珪 岩	45~82
変朽安山岩	11~30	粘 土	17~50
輝石安山岩	5~17	変 灰 石	0~8
ふ ん 岩	32~41	成 岩	
斑 岩	26~34	片 麻 岩	17~37
粗 面 岩	8~14	雲 母 片 岩	32~52
粗面安山岩	4~6	泥 片 岩	6~34
塩 基 性 岩		緑 簾 片 岩	18~41
斑 れ い 岩	0~11	閃 片 岩	10~22
輝 緑 岩	4~14	珪 岩	68~93
玄 武 岩	8~28	ス カ ル ン	30~50

Table4 遊離けい酸含有率測定結果

岩 種	遊離けい酸含有率 (%)
片 麻 岩	0.5
砂 岩	17.4
粘 板 岩	21.3
石 灰 岩	10.7
安 山 岩	5.8
凝 灰 岩 (風化赤)	1.3
凝 灰 岩 (風化黒)	1.6
コンクリート吹付け材料 (現場混練前)	0.4

表 31 遊離けい酸含有率測定結果

トンネルNo.	遊離けい酸含有率 (%)	平均値 (%)	標準偏差	変動係数 (%)
A	6.4	8.5	2.12	25.1
B	10.7			
C	9.8			
D	6.9			

- (6) 労働安全衛生総合研究所 (2020)
は、3つのトンネル掘削工事における浮遊粉じんにおける遊離けい酸含有率をエックス線回折分析法 (XRD) により分析した。主な岩石の種類ごとの遊離けい酸含有率は、19.9% (安山岩)、19.1% (花崗閃緑岩) 16.0% (細粒砂岩)、であった。

2 考察

- (1) 房村 (1955) と房村 (1957) は、鉱山及び炭鉱の岩石を粉碎した微粒子の分析結果であり、房村 (1972) は採石プラントの浮遊粉じんである

ことから、岩石種類毎の遊離けい酸含有率の定量的な分析の根拠としては適切でないが、定性的な傾向を評価するためには妥当である。

- (2) 房村 (1955)、房村 (1957) において、同一の坑内における遊離けい酸含有率の測定結果が正規分布していることを踏まえると、一定期間、坑内労働を行う労働者がばく露する遊離けい酸の総量は、坑内の岩石の種類に対応する遊離けい酸含有率の平均値を連続してばく露する場合の総量とほぼ同じになることが推定できる。また、房村 (1955)、房村 (1957) による鉱山の調査結果によれば、走向方向や傾斜方向については遊離けい酸含有率に統計上の有意差はなく、一方で、岩石の種別が異なる場合は統計上有意差がある。これらを踏まえると、トンネル掘削前のボーリング調査結果により主たる岩石の種類を把握し、過去の岩石分類別の遊離けい酸含有率の平均値と照らし合わせ、当該トンネルの遊離けい酸含有率を推定する方法は妥当と考えられる。
- (3) 火成岩は、二酸化ケイ素 (SiO_2) の含有率によって酸性岩、中性岩、塩基性岩、超塩基性岩に分類されているため、この分類は、当然、遊離けい酸 (SiO_2) 含有率に影響する。房村 (1972) の表 8 から、岩石種類ごとの遊離けい酸含有率の平均値を分類別に平均すると、酸性岩 (30.4%)、中性岩 (22.3%)、塩基性岩 (10.7%)、超塩基性岩 (4.0%) となっている。
- (4) 一方、堆積岩は、いろいろな起源をもつ粒子によって構成されているため、化学組成はまちまちであるが、房村 (1972) の第 8 表から、堆積岩 (珪岩を除く。) の遊離けい酸含有率の平均値は 33.43% と酸性岩 (30.4%) とほぼ同程度であり、また、新藤ら (1985) でも、砂岩 (17.4%)、粘板岩 (21.3%)、石灰岩 (10.7%) といった堆積岩の遊離けい酸含有率は、中性岩である安山岩 (5.8%) より高く、日本作業環境測定協会 (2010) の表 31 でも、堆積岩 (砂岩・頁岩 (10.7%)、凝灰岩・泥岩 (6.9%)) は、

表 21 遊離けい酸含有率 (個人ばく露)

作業者No.	遊離けい酸含有率 (%)	平均値 (%)	標準偏差	変動係数 (%)
A1	4.5	5.5	1.56	28.4
A2	6.3			
A3	6.3			
A4	5.4			
A5	3.0			
A6	7.4			
B1	15.8	13.4	5.47	40.9
B2	8.0			
B3	19.0			
B4	9.0			
B5	8.6			
B6	19.8			
C1	13.4	8.1	3.35	41.4
C2	4.1			
C3	7.4			
C4	7.5			
C5	8.1			
D1	9.7	8.2	3.87	47.5
D2	10.2			
D3	3.6			
D4	13.1			
D5	3.4			
D6	8.9			
作業者全体		8.8	3.56	39.6

酸性岩である花崗岩（9.8%）とほぼ同程度の含有率となっている。このため、過去の文献からは、堆積岩は酸性岩とほぼ同等の遊離けい酸含有率であることが推定される。

- (5) 変成岩は、岩石が熱や圧力等により変性したものでその由来はまちまちであるが、房村（1972）の第8表によれば、ケイ素を多く含む珪岩を除けば、遊離けい酸含有率の平均は29.0%となり、酸性岩（30.4%）とほぼ同等であることが推定される。
- (6) 以上から、遊離けい酸濃度を推定するための岩石の分類については、第1グループ（火成岩のうち酸性岩、堆積岩、変成岩）、第2グループ（火成岩のうち中性岩）、第3グループ（火成岩のうち塩基性岩及び超塩基性岩）の3つ程度とし、それぞれのグループ別に標準的な遊離けい酸含有率を設定することができる可能性があると考えられる。なお、二酸化ケイ素（ SiO_2 ）が再結晶した変成岩である珪岩を多く含む地層をトンネル掘削する場合は、この分類による推定によらず、別途、遊離けい酸含有率を実測すべきである。
- (7) 各グループ別のトンネル坑内の遊離けい酸含有率の定量的な評価については、新藤ら（1985）及び日本作業環境測定協会（2010）によるトンネル掘削中の粉じんの実測値を踏まえると、第1グループの岩石による標準的な粉じん中の遊離けい酸含有率は、10%～20%程度であることが見込まれる。さらに、房村（1972）の第8表によれば、第2、第3グループの遊離けい酸含有率は第1グループのそれぞれ3分の2、3分の1程度と推定されるが、本年度実施の追加調査で検証した。
- (8) 本年度実施された追加調査結果（労働安全衛生総合研究所（2020））によれば、酸性岩に属する花崗閃緑岩について、遊離けい酸含有率が19.1%であり、また、堆積岩に属する細粒砂岩の遊離けい酸含有率が16.0%であった。これらの値は、新藤ら（1985）、日本作業環境測定協会（2010）、房村（1972）の測定結果と整合的であり、第1グループの遊離けい酸含有率の推計とも合致する。しかし、中性岩に属する安山岩の遊離けい酸含有率（19.9%）は、新藤ら（1985）の安山岩の測定結果（5.8%）より大幅に高かった。この理由としては、房村（1972）の表8によれば、安山岩は、種類によって遊離けい酸含有率にばらつきがあるためと考えられる（第8表では、石英安山岩、角閃安山岩、変朽安山岩の遊離けい酸含有率の平均値は、花崗閃緑岩より高い。）。
- (9) 以上の結果を踏まえると、第1グループ（酸性岩、堆積岩、変成岩）については、標準的な遊離けい酸含有率を20%とすることは、過去の文献と整合し、妥当であるといえる。一方、第2グループ（中性岩）については、労働安全衛生総合研究所（2020）で安山岩が19.9%であったこと、房村（1972）の第8表から、中性岩には、安山岩等、種類によっては酸性岩と同程度の遊離けい酸含有率を持つ岩石があることを踏まえると、第1グループと同様に、標準的な遊離けい酸含有率を20%とすることは、安全側の評価として妥当と考えられる。一方、第3グループ（塩基性岩、超塩基性岩）については、第1、第2グループと比較して、遊離けい酸含有率が低いことは房村（1972）の第8表から容易に推定できるが、トンネル坑内での実測値が文献になく、今年度の

追加調査でも測定値を得ることはできなかった。このことは、第3グループの岩石を主たる岩石とするようなトンネルの掘削は、まれであることを示すものである。このため、現時点の限られた情報によって、あえて標準的な遊離けい酸含有率を定める必要はないと考えられる。ただし、第3グループは、文献から第2グループよりも低い遊離けい酸含有率が推定されるため、仮に、第3グループの岩石を主たる岩石とするトンネルを掘削する場合、安全側の推定値として、第2グループの標準遊離けい酸含有率20%を使用することは差し支えないと考えられる。

- (10) (9)の遊離けい酸含有率は、掘削・ずり出し作業中のものである。一方で、コンクリート吹き付け時の遊離けい酸含有率は、1%未満（新藤ら（1985））である。さらに、1サイクルの総粉じん量に占める掘削・ずり出しの粉じん量の占める割合は、労働安全衛生総合研究所（2018、2020）の測定結果によると、発破工法で（56%～24%）、機械掘削で（70%～11%）である（表D参照）。このため、(9)の遊離けい酸含有率を1サイクル平均濃度に乘ずると、遊離けい酸濃度を過大評価することとなる。このため、1サイクル粉じん濃度に対する遊離けい酸含有率は、(9)の含有率に、一定の比率を乗じて算出する方法も考えられる。
- (11) しかし、コンクリート吹付での粉じん量は、岩盤の状況や吹付コンクリートの種類や低粉じん剤の使用の有無にも影響されるため、表Dにあるように同じ工法であってもばらつきが非常に大きく、標準的な比率を定めることは困難である。さらに、掘削時の粉じん量が1サイクル総粉じん量に占める割合は、最大で、発破工法で56%、機械掘削で70%あることを考えると、(9)の遊離けい酸含有率をそのまま1サイクル粉じん濃度に乗じる方法でも、安全のマージンとして過大であるとは言えない。なお、正確な遊離けい酸含有率を特定したい場合は、1サイクル連続測定で採取した試料をエックス線回折分析方法により分析することとなる。

表D 粉じん量定の作業別分布

現場	施工方法	サイクル	定点	切り羽からの距離	掘削・ずり出し		1 サイクル総計		総粉じん量 に占める掘削等の割合
					粉じん量 (mg)	平均値	粉じん量 (mg)	平均値	
A	発破		①	45.6	0.106	0.130	0.478	0.407	31.8%
			②	45.6	0.153		0.337		
B	発破		①	34.7	0.351	0.258	1.211	1.088	23.8%
			⑥	34.7	0.166		0.966		
C	機械		①	35	0.818	0.713	1.178	1.015	70.2%
			④	35	0.608		0.852		
D	機械		②	28	0.098	0.098	0.261	0.261	37.6%
E	機械		①	27	0.103	0.088	0.699	0.623	14.1%
			③	27	0.072		0.547		
F	発破	1	①	35	0.269	0.269	0.573	0.573	46.9%
		2	①	35	0.380	0.414	0.616	0.741	55.9%
			②	45	0.448		0.866		
G	機械	1	②	18	0.056	0.078	0.359	0.596	13.0%
			③	32.4	0.095		0.688		
			④	32.4	0.102		0.652		
			⑤	49.2	0.064		0.617		
			⑥	49.2	0.071		0.665		
		2	②	18	0.051	0.084	0.388	0.738	11.4%
			③	32.4	0.083		0.977		
			④	32.4	0.077		0.702		
			⑤	49.2	0.114		0.936		
			⑥	49.2	0.095		0.689		
H	発破	1	①	30	0.083	0.083	0.470	0.347	24.0%
			③	40	0.086		0.337		
			④	40	0.078		0.259		
			⑤	50	0.090		0.341		
			⑥	50	0.080		0.328		
		2	①	30	0.097	0.082	0.406	0.315	25.9%
			②	30	0.066		0.217		
			③	40	0.084		0.337		
			④	40	0.086		0.292		
			⑤	50	0.086		0.287		
			⑥	50	0.071		0.346		
1 サイクルごとの粉じん量の平均値（50m以内）						0.209		0.609	32.2%
		発破工法の平均				0.257		0.679	34.7%
		機械掘削の平均				0.168		0.552	29.3%
※ 切り羽からの距離が51m以上の測定点を除いている。									

(参照文献)

- 新藤敏郎、平田篤夫、稲葉力（1986）トンネル坑内の浮遊粉じんについて－粉じんの性状、濃度測定、対策、新方式の集じん装置－、西松建設情報 Vol. 8 pp. 19-28
- 房村信雄（1955）鉱山における遊離珪酸の分布、日本工業会誌 71 巻 803 号 pp. 235-239
- 房村信雄（1957）石炭鉱山の岩盤中にける遊離珪酸の分布、日本工業会誌 73 巻 826 号 pp. 211-214
- 房村信雄（1972）採石プラントにおける粉じんの実態、日本工業会誌 88 巻 1007 号, pp. 23-28
- 日本作業環境測定協会（2010） トンネル建設工事における個人ばく露濃度測定等推進事業 検討委員会報告書（平成 21 年度厚生労働省委託事業）（社）日本作業環境測定協会
- 労働安全衛生総合研究所（2018）トンネル建設工事の切羽付近における粉じん濃度測定に関する研究報告書、独立行政法人労働者健康安全機構
- 労働安全衛生総合研究所（2020）トンネル建設工事の切羽付近における粉じん濃度測定に関する研究 令和元年度現場調査報告書 独立行政法人労働者健康安全機構

別紙3 トンネル工事における粉じん測定及び換気等に関する文献等について

1 ガイドラインでの粉じん目標レベル設定の経緯

- (1) 「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（平成12年12月26日付け基発第768号の2。以下「ガイドライン」という。）の「粉じん濃度目標レベル」の趣旨は、このガイドラインの内容を検討した報告書（建災防(2000)）において、「坑内における作業環境管理を進める過程で、粉じん発生源における粉じん発散等を防止するための発散源対策が適切であるか否か及び換気装置等が適切に稼働しているか否かを判定する際の指標」とされている。
- (2) さらに、建災防(2000)では、粉じん濃度目標レベルは、「坑内における粉じん濃度を可能な限り最小限にとどめるための現実的な目標レベルとする必要があり、ずい道の種類、坑内の粉じん作業における作業工程、作業の態様、粉じん発生の態様等を踏まえ、設定することが重要である」としている。
- (3) その上で、建災防(2000)では、粉じん濃度目標レベルについては、「実現可能な範囲で出来るだけ低い値を設定することとし、具体的には、現在の換気技術レベル等を考慮し、 $3\text{mg}/\text{m}^3$ 程度とすることについて、検討することが適当と考えられる」と提言している。この提言を踏まえ、ガイドラインでは、粉じん濃度目標レベルとして $3\text{mg}/\text{m}^3$ を採用している。

2 粉じん濃度に関する基準、所要換気量等に関する文献

- (1) ACGIH(2018)では、ばく露限界値(TLV)が定められていない粒子状物質については、空気中濃度を $3\text{mg}/\text{m}^3$ (吸入性粉じん(レスピラブル))及び $10\text{mg}/\text{m}^3$ (吸引性粉じん(インハラブル))より低く抑えるべきであるとしている。さらに、結晶質シリカ(遊離けい酸)のTLVを $0.025\text{mg}/\text{m}^3$ としている。ばく露評価では、粉じん濃度に結晶シリカの含有率(Q値)を乗じて結晶質シリカの曝露量を求め、この値とTLVを比較する(Souvet et. al(2013)など)。この考え方では、TLVを満たすことのできる粉じん濃度は、Q値に反比例して小さくなる(5%で1/5、10%で1/10、15%で1/15、30%で1/30など)。
- (2) 管理濃度等検討会(2008)では、吸入性粉じんの濃度を測定し、その中でもっとも有害性がある結晶質シリカについて管理濃度を定めることとし、ACGIHのTLVの付録Eで規定する混合物の複合的な影響を評価する相加式を用い、 $3\text{mg}/\text{m}^3$ と $0.025\text{mg}/\text{m}^3$ を包含する管理濃度として、 $3/(1.19Q+1)$ を採用した(Q:遊離けい酸含有率。)。この考え方では、管理濃度は、Q値にほぼ反比例して小さくなる(5%で1/6.95、10%で1/12.9、15%で1/18.85、30%で1/36.7など)。
- (3) 日本産業衛生学会が発行する許容濃度等の勧告(2018年度)を見ると、吸入性結晶質シリカの許容濃度は $0.03\text{mg}/\text{m}^3$ とある。また、第2種粉じんとして、結晶質シリカ含有率3%未満の鉱物性粉じんでは、吸入性粉じんの許容濃度を $1\text{mg}/\text{m}^3$ 、総粉じんの

許容濃度を 4 mg/m^3 と規定している。

- (4) 欧州諸国については、European Network for Silica (NEPSI) がヨーロッパ各国の

Occupational Exposure Limits (職業上暴露限界) の一覧表を示しており、それによれば、「Quartz, respirable dust (吸入性シリカ粉じん)」の暴露限界として、 $0.025 \sim 0.15 \text{ mg/m}^3$ の値をヨーロッパ各国では規定している。表で示す (NEPSI 2019)。

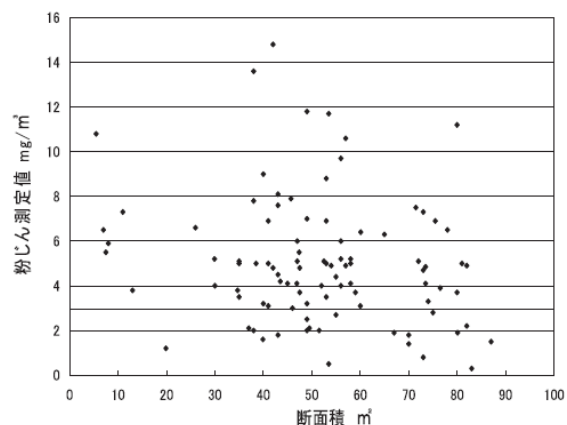
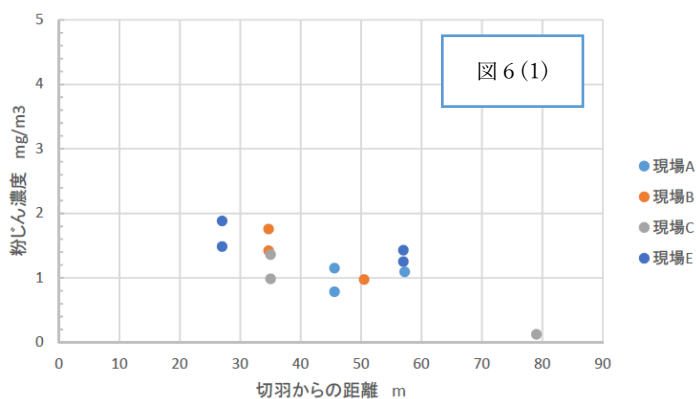
- (5) 粉じん濃度を減少させるための所用換気量 (希釈換気) については、建災防 (2012) において、清浄な外気を送気することを前提として、所用換気量 (Q) = (換気係数 (K) × 粉じん発生量 (S)) / (粉じん管理目標濃度 (E) × 所要換気時間 (t)) としており、所要換気量は粉じん管理濃度目標に反比例する。したがって、粉じん発生量が同じで粉じん管理濃度目標が $1/10$ になれば、所要換気量は 10 倍となる。

Country/Authority (see caption p. 3)	(inert dust INHALEABLE)	(inert dust RESPIRABLE)	Quartz	Cristobalite	Tridymite	Diatomaceous earth	Amorphous silica	Fused silica	Kaolin	Mica	Talc
Austria/I	10	5	0,15	0,15	0,15			0,15			2
Belgium/II	10	3	0,1	0,05	0,05	3	2	0,1	2	3	2
Bulgaria/III		4	0,07	0,07	0,07	1 ²					3
Cyprus/IV		/	10k/Q ³	/	/	/	2	/	/	/	/
Czech Republic/V			0,1	0,1	0,1			4		2	2
Denmark/VI	10	5	0,1	0,05	0,05	1,5		0,1	2		
Estonia			0,1	0,05	0,05		2				
Finland/VII	10	/	0,05	0,05	0,05	5					2
France/VIII	10	5	0,1	0,05	0,05				10		
Germany/IX	10	0,5 ⁴	0,05 ⁵	0,05 ⁵	0,05 ⁵	0,3 ⁶	4 ⁷	0,3 ⁸	/	/	/
Greece/X	10	5	0,1	0,05	0,05						2
Hungary			0,15	0,1	0,15						2
Ireland/XI	10	4	0,1	0,1	0,1	2,4	0,08	2	0,8	0,8	
Italy/XII	10	3	0,05 ⁹	0,05	0,05			0,1	2	3	2
Lithuania/XIII		10	0,1	0,05	0,05						1
Netherlands/XVI	10	5	0,075	0,075	0,075					2,5	0,25
Norway/XVII	10	5	0,1	0,05	0,05	1,5	1,5			3	2
Poland/XVIII	2	0,3	0,1	0,1	0,1	2	2	1	10		1
Portugal/XIX	10	5	0,025	0,025	0,025			0,1	2	3	2
Romania/XX		10	0,1	0,05	0,05				2	3	2
Slovakia	10		0,1	0,1	0,1		2			2	2
Slovenia			0,15	0,15	0,15			0,3			2
Spain/XXI	10	3	0,05	0,05	0,05			0,1	2	3	2
Sweden/XXII		5	0,1	0,05	0,05						1
Switzerland/XXIII		6	0,15	0,15	0,15		0,3	0,3	3	3	2
UK/XXIV	10	4	0,1	0,1	0,1	1,2	2,4	0,08	2	0,8	1

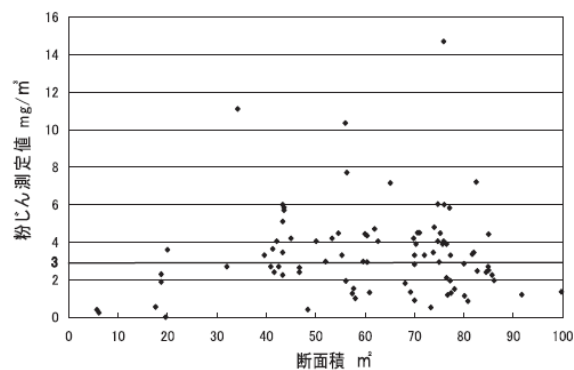
3 トンネル坑内の粉じん濃度に関する文献

- (1) 建災防 (2000) は、掘削断面積が 60 m^2 以上のずい道 (NATM を採用している 72 現場) における粉じん濃度について、単純平均では、コンクリート吹きつけ時において 4.16 mg/m^3 、ずり出し作業時において 3.11 mg/m^3 であったとしている。一方、 6 mg/m^3 未満の現場の割合は、吹きつけ時で約 80%、ずり出し時で約 90% であり、 3 mg/m^3 未満の現場は、吹付、ずり出しそれぞれで約 30%、約 55% であったとしている。断面積 60 m^2 以下未満 (NATM 採用 17 現場) においては、吹付時の平均濃度は 5.11 mg/m^3 であり、 6 mg/m^3 未満、 3 mg/m^3 未満の現場の割合は、それぞれ約 70%、約 30% であったとしている。

- (2) 西村(2010)は、ガイドラインの粉じん濃度目標レベルに対して、ガイドライン以前は 3 mg/m^3 以上が約80%であったが、2005年の調査では、 3 mg/m^3 以下が50%とかなり改善が進んだとしている（図－1）。
- (3) 労働安全衛生総合研究所（2018）は、NATM工法による5つの山岳トンネルの坑内において、切羽から25mから100mで定点測定（質量濃度測定法）で1サイクルを通じた測定を行ったところ、切羽からの距離に影響を受けているようには見えず、 $0.8\sim 2\text{ mg/m}^3$ に分布したとしている（図6（1））。



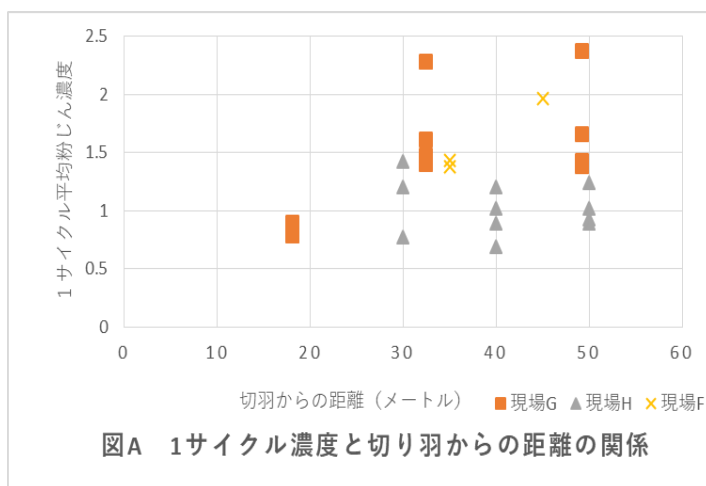
「ガイドライン」以前 1998 年建災防調査データ



「ガイドライン」後 2005 年日本建設機械化協会データ

図－1 「ガイドライン」前後の調査データの比較

- (4) 労働安全衛生総合研究所（2020）は、NATM工法による3つの山岳トンネルの切り羽から18mから50mで定点測定（質量濃度測定方法）で1サイクルを通じた測定を行ったところ、それぞれの現場ごとの粉じん濃度分布は、現場F（ $1.38\sim 1.96\text{ mg/m}^3$ ）、現場F（ $0.79\sim 2.38\text{ mg/m}^3$ ）、現場F（ $0.77\sim 1.42\text{ mg/m}^3$ ）に分布し、いずれの現場も、切り羽との距離と粉じん濃度には関連は見受けられないとしている（図A参照）。労



図A 1サイクル濃度と切り羽からの距離の関係

表C 定点測定の粉じん濃度の平均値

現場	平均粉じん濃度*(mg/m^3)
現場A	0.97
現場B	1.59
現場C	1.18
現場D	0.96
現場E	1.69
現場F（1）	1.38
現場F（2）	1.70
現場G（1）	1.30
現場G（2）	1.77
現場H（1）	0.92
現場H（2）	1.12
平均	1.32

* 1 サイクル測定値（切り羽からの距離が50m以内に限る。）の平均値

働安全衛生総合研究所が2018年と2019年に測定した8つの山岳トンネルの1サイクル定点測定各トンネルの粉じん濃度の平均値は、0.96~1.77mg/m³ となっており、いずれも2mg/m³を下回っている（表C）。

- (5) 米国の状況として、Sauve et. al (2013)は、建設業における結晶質シリカのばく露状況を報告している。報告は、1987年から2009年に発表された文献から6118の記録を集めて工事種別に分析した結果、トンネル工事(tunnel boring)での結晶質シリカ(QCS)濃度の幾何平均は0.328mg/m³と、TLV(0.025mg/m³)の13.1倍となっており、コンクリート研磨（scrabbling concrete）とはつり（chipping）に次いで、3番目に高い濃度であった（Fig. 1）。

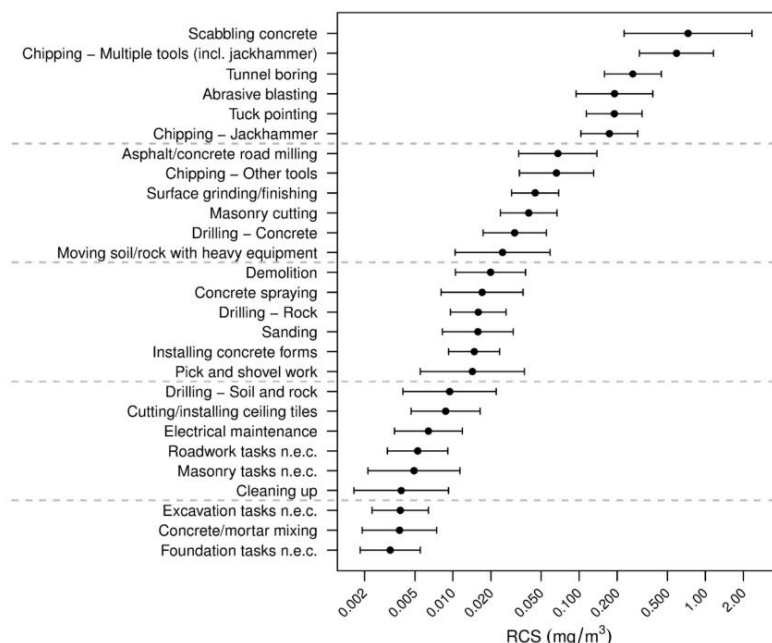


Fig. 1. Estimated geometric mean respirable crystalline silica exposure by task, based on the median sampling duration by task, year 1998 and absence of source controls, averaged across 20 iterations.

- (6) 米国の状況として、Flanagan et. al (2006)は、建設業における結晶質シリカのばく露状況を報告している。報告は、1992年から2002年（70%は1997-2002）における134機関からの報告を分析した結果、トレンチ又はトンネルの掘削(Cut trench/tunnel)の結晶質シリカ濃度の幾何平均は0.25mg/m³、吸入性(レスピラブル)粉じん濃度の幾何平均は15.64mg/m³であり、それぞれ、TLV(0.025mg/m³, 3mg/m³)の10倍、5.2倍であって、作業別では3番目に高かった。

4 トンネル坑内の換気手法に関する文献

- (1) 西村(2010)は、トンネル技術の発展と現状についての総説において、集塵機の能力が大型化し、2000m³/min クラス、3000m³/min クラスが主流となっているとしている（図-2）。さらに、従来の希釈方式に加え、より効果的な吸引捕集方式が開発され、必要風量の減少が可能となったとしている（表-3）。

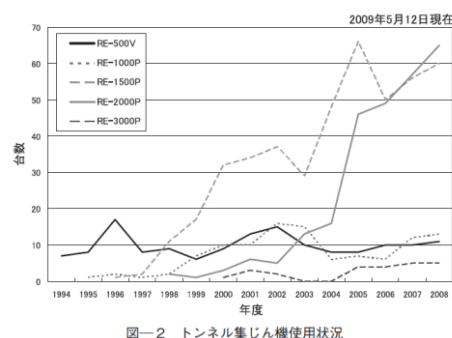


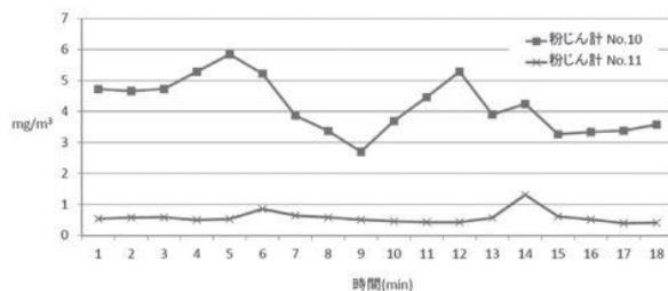
図-2 トンネル集じん機使用状況

表—3 管理濃度の強化による換気設備比較

目標濃度	3mg/m ³ の場合		2.5mg/m ³ の場合		2mg/m ³ の場合	
換気方式	吸引捕集	拡散希釈	吸引捕集	拡散希釈	吸引捕集	拡散希釈
必要風量	1,395 m ³ /min	1,733 m ³ /min	1,395 m ³ /min	2,070 m ³ /min	1,395 m ³ /min	2,575 m ³ /min
ファン動力	80 kW × 2	110 kW × 2	80 kW × 2	110 kW × 4	80 kW × 2	110 kW × 4
集じん機能力	2,000 m ³ /min	3,000 m ³ /min	2,000 m ³ /min	3,000 m ³ /min	2,000 m ³ /min	1,800 m ³ /min × 2
総動力	320 kW	370 kW	320 kW	590 kW	320 kW	660 kW

モデル：発破工法 2,000 m 75 m² 算定方法：建災防「ずい道建設工事における換気技術指針」による

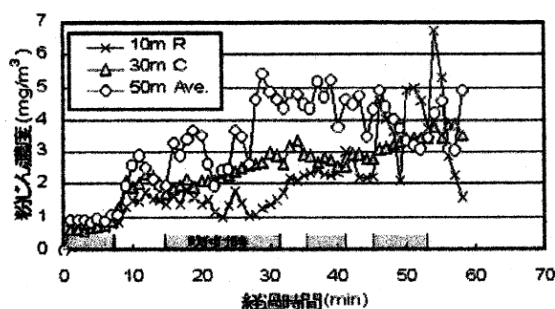
- (2) 大林組ら（2012）は、平成 24 年度の日本建設機械施工協会会長賞の受賞業績として、トンネル坑内の粉じん低減工法である「トラベルクリーンカーテン」の効果を検証している。具体的には、2 車線トンネル（断面積 80m³）を想定した模擬トンネルにおいて、カーテン無し（送風量 1000m³/min、排気量 1500m³/min）とカーテンあり（送風量 750m³/min、排気量 1500 m³/min）の場合の粉じん濃度を比較したところ、濃度が 8mg/m³ の状態で装置を稼働させ、カーテン後方の濃度を

図—7 現場適用結果（吹付時、送風量 1330 m³/min、排気量 2000 m³/min）

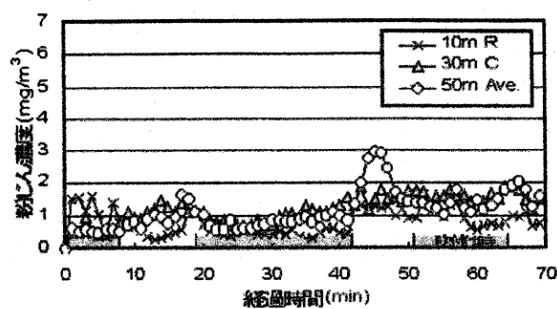
0.1mg/m³まで下げることができ、かつ、切羽付近の濃度が 3mg/m³を下回るのに要する時間が 225 秒から 170 秒に短縮したとしている。実際のトンネルでの吹付作業中（送風量 1330m³/min、排気量 2000m³/min）に、カーテンより切羽側（切羽から 15m）と後方（切羽から 50m）で測定した結果、カーテンの効果は確認できたとしている（図—7）（15m 地点では 3～6 mg/m³、50m 地点では 0.5～1.2mg/m³程度。）。

5 換気以外の粉じん濃度低減方策に関する文献

- (1) トンネルに関する学術誌で発表された論文における粉じん低減対策に関するものの検索結果から、換気以外の粉じん低減方策の文献を収集した。大窪ら（2002）は、液体急結剤を使用した吹付コンクリートの採用による粉じん濃度低減効果を報告している。具体的には、高速道路トンネル工事（送気量 1200m³/min）において、従来の粉体急結剤（P 方式）と液体急結剤をスラリー化したもの（S 方式）を使用した場合の



図—3 P方式の粉じん濃度経時変化(送風停止)



図—4 S方式の粉じん濃度経時変化(送風停止)

粉じん濃度を切羽から 10m、30m、50m 地点で測定した値を比較し、S 方式の方が粉じん濃度が低いことが確認できたとしている（図－3、図－4）。また、赤坂ら（2004）は、模擬トンネルにおいて、粉体急結剤（カルシウムアミネート系）を添加することにより、切羽から 10m、30m、50m の位置の粉じん濃度が、添加しないケースのほぼ 1/2 となったと報告している。

- (2) さらに、大里ら（2002）は、粉じん抑制剤を吹付コンクリートに添加することによる粉じん濃度低減効果を報告している。具体的には、粉じん抑制剤（セルローズ系樹脂を主成分とする白色粉体）の添加率ごとに粉じん濃度測定を行ったところ、添加量の増加に応じて粉じん濃度の低減効果がみられた（図 3）としている。

- (3) 為石ら（2006）は、アルカリフリー液体急結剤（AF 急結剤。水溶性アルミニウム塩系）を用いたコンクリート吹付け時の粉じん低減効果を報告している。NATM 工法の山岳トンネル工事において、光散乱方式の相対濃度計（P-5L）を切羽から 5 m の地点に 2 台、50m の地点に 3 台設置して測定を行った。AF 急結剤を使用したときの 50 m 地点の粉じん濃度の平均値は、 $0.92\text{mg}/\text{m}^3$ であり、粉体急結剤（カルシウムアルミニート系）使用時の $3.72\text{mg}/\text{m}^3$ の約 1/4であった。さらに、切羽 5 m 地点でも、 $2.3 \sim 2.7\text{mg}/\text{m}^3$ と低い濃度を達成したとしている。

- (4) 鈴木ら（2003）は、圧縮空気を用いずにコンクリートを吹き付ける方式（エアレス吹付）による吹き付け時の粉じん濃度低減効果を報告している。具体的には、3 つの NATM 工法のトンネル（No. 1（内断面 71.4m^2 ）、No. 2（断面 46.7m^2 ）、No. 3（断面 62.9m^2 ）。総風量はいずれも $1,200\text{m}^3/\text{min}$ ）の吹き付け作業時に通常吹付とエアレス吹付を比較したところ、断面の大きさに関わらず、切羽から 50m 地点の粉じん濃度が $3\text{mg}/\text{m}^3$ 以下となったとしている。また、経時変化では、切羽 50m 後方においては通常吹付が最大 $13.6\text{mg}/\text{m}^3$ 、エアレス吹付では最大 $2.2\text{mg}/\text{m}^3$ 、切羽 5 m 後方では通常吹付が最大 $20.8\text{mg}/\text{m}^3$ 、エアレス吹付では最大 $5.5\text{mg}/\text{m}^3$ となり、効果が確認できたとしている（図 8）。

- (5) 最新の情報として、尾畑（2019）は、山岳トンネルのコンクリート吹付作業における遠隔吹付技術の開発について報告している。吹付機にネットワークカメラを搭載し、作業員は、切羽から離れた場所に設置する移動式の操作室内部から、モニタ映像を見ながら吹付機のリモコンボ

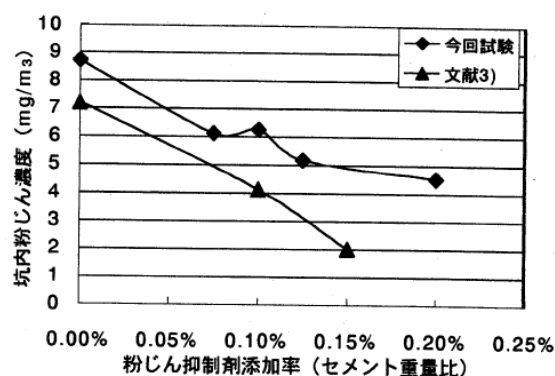


図-3 粉じん抑制剤の添加率と粉じん濃度の関係

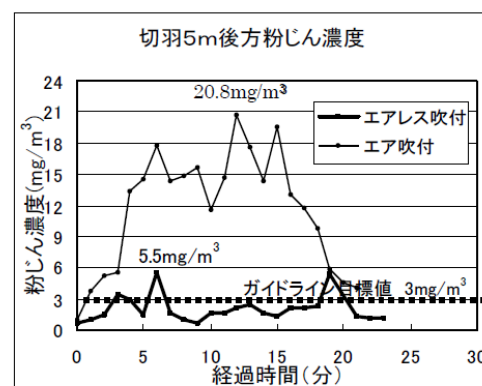


図 8 切羽後方5m地点の粉じん濃度経時変化

ックスを操作する。試験施工の結果は、通常の吹付コンクリートと変わらない仕上がりであったことがわかったとしている。

6 トンネル建設工事における粉じん対策実施状況の現況調査結果

- (1) 厚生労働省(2020))は、トンネル建設工事を行っている 28 社の本社(回収率 100%)と、66 現場(回収率 78.6%) から、現状のトンネル建設工事における粉じん濃度、管理能力や低粉じん化対策の取り入れ状況等に関するアンケートの提出を受け、その結果を分析した。

- (2) 本社調査によれば、各粉じん対策の採用率は、液体急結剤が 75.0%、粉じん低減剤が 70.8%など、5 種類のコンクリートへの低粉じん化対策の採用率は 5 割を超えている。一方で、ダストレス、エアレス吹きつけの採用率はいずれも 8.3%にとどまる。換気設備の強化については、伸縮風管の採用率が 83.3%、局所集じん装置が 50.0%であった(図 2)。採用した対策による粉じん濃度の低減率は、おおむね 8 割程度で 10%以上となった。対策によっては、50%を超える低減率を達成したものもあった(図 3)。対策を採用しなかった理由としては、コスト(価格・効率)が高く(33%~75%)、技術的な課題(0%~25%)、品質(0%~25%)よりも割合が高かった(図 4)。粉じん濃度目標レベルの引き下げについては、50%が可能であると回答し、引き下げ可能なレベルとしては、1.5~2.0mg/m³とする回答が最も多かった(42.9%)。

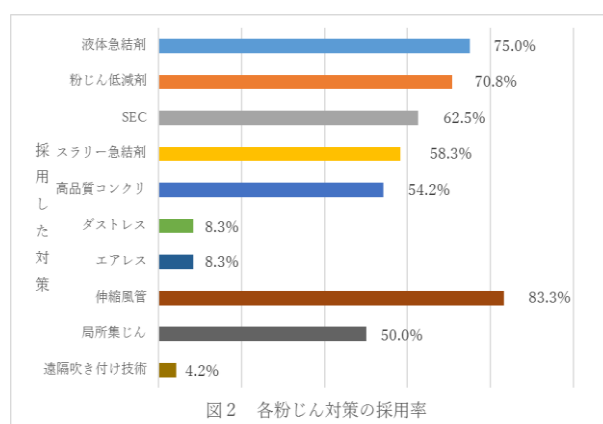


図2 各粉じん対策の採用率

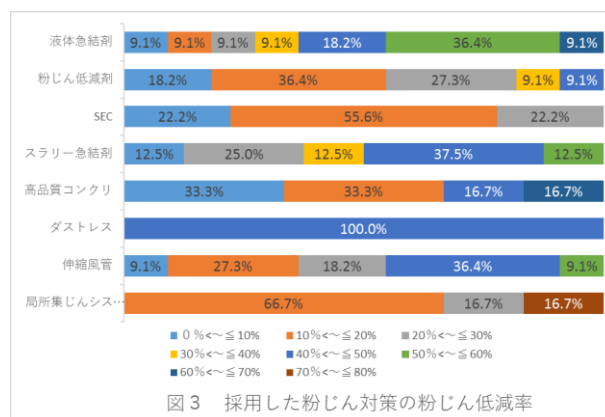


図3 採用した粉じん対策の粉じん低減率

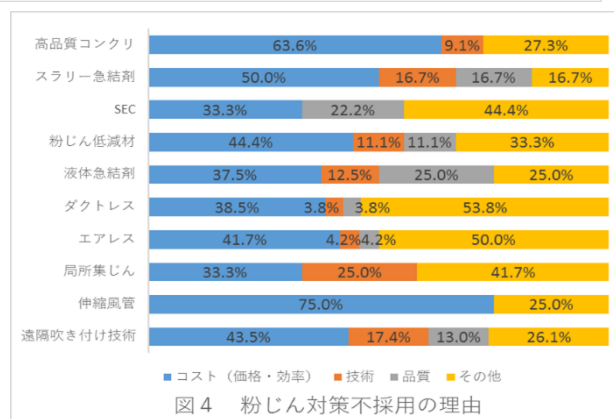
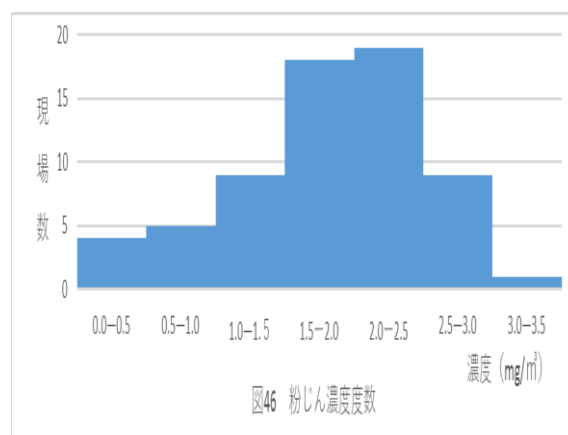
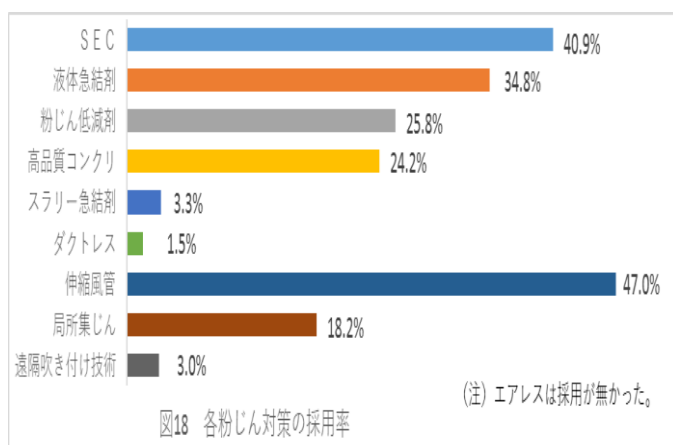


図4 粉じん対策不採用の理由

- (3) 現場調査によれば、調査対象のトンネル（66 現場）は、大断面（40m²以上）が 87.9%であり、60～80m²のトンネルが最も多かった。施工方法は、発破が最も多く（62.7%）、機械（23.9%）、発破機械併用（13.4%）の順であった。各粉じん対策の採用率は、液体急結剤が 40.9%、粉じん低減剤が 25.8%など、5 種類のコンクリートへの低粉じん化対策の採用率はいずれも本社調査と比較して 3 割程度低い。ダストレス（1.5%）の採用率も低かった。換気設備の強化については、伸縮風管の採用率が 47.0%、局所集じん装置が 18.2%であった（図 18）。本社調査と現場調査の違いは、現場ごとに対応にばらつきがあるためと考えられる。粉じん濃度については、93.9%が現行のガイドラインどおり、切り羽から 50mの地点で測定を行っており、各現場の粉じん濃度の平均値は、2mg/m³前後であったとする現場が最も多く、2mg/m³以下が過半数（55.4%）を占めた（図 46）。粉じん目標レベルの引き下げについては、39.4%が可能と回答し、引き下げ可能なレベルとしては、2.0～2.5mg/m³が最も多かった。



7 作業環境測定及びその評価の趣旨について

- (1) 作業環境測定の評価は安衛法第 65 条の 2 に規定されており、その趣旨は、「単位作業場所について、作業環境測定の結果得られる測定値を統計処理し、評価値を算出して、測定対象物質ごとに決められている管理濃度と評価値等を比較することにより管理区分の決定を行うこと」とされている（労働安全衛生法の詳解（1991））。
- (2) さらに、評価値については、作業場内における有害物質の濃度の分布は、「時間的にも空間的にも正規分布ではなく、対数正規分布に近い」ことを前提とし、幾何平均値と幾何標準偏差を用い、全ての測定点（場所、時刻、日を含む。）のうち、管理濃度を超えるような濃度を示す測定点が 5%未満である値（第 1 評価値）と、環境空気中の有害物質の平均濃度（第 2 評価値）を算定している（日本作業環境測定協会（2010））。

8 考察（新たな粉じん濃度測定の結果の位置づけ）

- (1) トンネル工事（NATM・発破工法）は、削孔・装薬→発破・待避→ずり出し・支保工

建込→コンクリート吹付→削孔・装薬というサイクルを4～6時間程度で繰り返すが、作業ごとに粉じん濃度は大きく異なる。このため、粉じん濃度が時間的に対数正規分布しているという作業環境測定の評価値の算定の前提（日本作業環境測定協会（2010））は成り立たない。また、空間的にも、単位作業場は切羽から集じん口までとするにしても、集じんしきれない粉じんの濃度を管理するという観点であれば、トンネル全長の測定が必要となる可能性が高く、現在検討している測定点の数では、これらの空間的な平均を求めることも困難である。

- (2) これらの問題を新たな測定方法（1サイクル連続測定や個人サンプラーによる測定）によりある程度解決したとしても、単位作業場を特定できない問題は残る。すなわち、トンネルの切羽は毎日前進していくため、切羽の土質が前日とは異なる可能性が高い上、仮に同じ土質であったとしても土中の水分量等の変動により、測定日の単位作業場と測定日の翌日の単位作業場の粉じんの発生しやすさには、連続性があるとはいえず、前者の平均的な作業環境は後者の平均的な作業環境に一致するとはいえない。
- (3) 以上から、現在検討している新たな粉じん濃度測定の結果は、作業環境測定の評価値に基づく厳密な管理区分設定にはなじまない。このことは、遊離けい酸に係る測定が行われる場合にあっては同様である。一方で、当該測定結果は、トンネル工事中の粉じん濃度の工学的対策の効果を示す目安としては使用可能であることから、従来どおり、工学的対策である、発散源対策及び換気装置等が適切かを判定する際の指標である「粉じん濃度目標レベル」と比較するための値として位置づけるべきである。
- (4) ただし、遊離けい酸に係る測定結果については、工学的対策だけで十分な低減を図ることは困難である。例えば、遊離けい酸含有率が15%の場合、粉じん濃度は、ACGIH方式で1/15、管理濃度方式で1/19にまで粉じん濃度が低減される必要があり、そのための所要換気量（希釈方式）はその逆数である15倍～19倍となる（建災防（2012））。現在の一般的な換気量である2000m³/minにおいては（西村（2010））、大口径の送風管（1700mm）を使用している、風速が14m/s（2000m³/2.3m²/60）に達しており、それを単純に15倍すると風速210m/sとなる。送風機等の工学的限界はさておき、そのような風速を切羽に導入することは、落石等、切羽での労働災害の発生を誘発する恐れがあるなど、現実的でない。なお、米国においてもこのような管理を行っていないことは、トンネル工事における結晶シリカ濃度の幾何平均がTLVの10～13倍となっていることから明らかである（Sovue et. al（2013）、Flanagan et. al（2006））。
- (5) 遊離けい酸による健康障害の防止のためには、作業者の遊離けい酸のばく露を十分に低減する必要があることから、換気等の工学的対策による作業環境改善に加え、義務付けられている電動ファン付き呼吸用保護具を適切に選択する等の作業管理が必要となる。米国安全衛生庁（USOSHA）やISO/TS 16975においては、測定されたばく露濃度をばく露の基準値で除した値を「要求防護係数」（ISOでは、protection level (PL)）として評価する。そして、「要求防護係数」を上回る「指定防護係数」

(assigned protection factor(APF))を有する呼吸用保護具を使用することを定めている (US-OSHA 29 CFR 1910.134)。

- (6) ばく露濃度の基準値は、それぞれの物質ごとに決定されるものであるが、遊離けい酸ばく露濃度の基準値については、国際的に最も厳しい値である、米国政府労働衛生専門家会議 (ACGIH) で提案されている結晶質シリカのばく露限界値 (TLV) である、 $0.025\text{mg}/\text{m}^3$ を採用することが妥当である。なお、一般的な粉じんに対するばく露の基準値は $3\text{mg}/\text{m}^3$ であることから、はるかに厳しい値である $0.025\text{mg}/\text{m}^3$ に対して十分な指定防護係数を有する呼吸用保護具を使用すれば、一般粉じんに対する防護としては十分なものとなる。
- (7) 粉じん濃度測定値の評価方法として、全測定値を算術平均するのか、幾何平均するのかという問題がある。一般的な作業環境の濃度分布は、発生源からの距離に応じて指数的に濃度が減少する幾何正規分布を前提として、評価値の計算には、幾何平均が多く用いられる。しかし、労働安全衛生研究所 (2018) の図 6 (1) で、1 サイクル連続測定の粉じん濃度は、切羽からの距離との関連は見られない。労働安全衛生研究所 (2020) においても同様の結果となった (図 A 参照。) この理由は、切羽近辺に分布する大粒径の粉じんを分粒装置によって除いていること、強力な換気によって発散後短時間で粉じん濃度が空間的に均質化することなどが考えられる。このため、粉じん濃度測定値の評価値は、全測定値を算術平均した値とすることが妥当である。

9 考察 (新たな粉じん濃度測定に係る目標レベル)

- (1) 現在検討している粉じん濃度測定結果に係る目標レベルの値は、工学的対策の目標値として、「坑内における粉じん濃度を可能な限り最小限にとどめるための現実的な目標レベルとする必要があり、ずい道の種類、坑内の粉じん作業における作業工程、作業の態様、粉じん発生の態様等を踏まえ、設定することが重要である」(建災防 (2000)) とされていることを踏まえる必要がある。
- (2) 西村 (2010) によれば、2005 年時点において、 $3\text{mg}/\text{m}^3$ を実現している現場は約 50% としている。また、労働安全衛生総合研究所 (2018, 2020) によれば、8 つの NATM 山岳トンネルでの 1 サイクル定点測定の各トンネルの平均値は、全て $2\text{mg}/\text{m}^3$ を下回っている (表 C)。
- (3) 粉じん濃度低減のための技術開発の進展を観てみると、吸引捕集方式の開発 (西村 (2010))、トラベルクリーンカーテンの開発 (大林組ら (2012)) など、換気方法の技術開発が進んでいる。さらに、液体急結剤 (大窪ら (2001)、為石ら (2006))、粉じん抑制剤 (大里ら (2002)) の吹付コンクリートへの添加、エアレス吹付 (鈴木ら (2003)) の採用による コンクリート吹付時の粉じん濃度の低減方策の技術開発も進んでいる。また、遠隔操作によるコンクリート吹付作業の技術開発も進んでいる (尾畑 (2019))。
- (4) 労働安全衛生研究所 (2018) の最新の粉じん測定の結果や、粉じん濃度低減に関す

る技術開発の進展を踏まえれば、現在検討している粉じん測定に係る目標レベルは、実現可能な範囲で出来るだけ低い値を設定すべきである。適切な値を設定するために、現状のトンネル工事における粉じん濃度の現状、換気設備や低粉じんコンクリート吹付施工等の取り入れ状況をアンケート調査した。

- (5) 厚生労働省(2020)においては、トンネル現場の約半数の粉じん濃度は 2 mg/m^3 以下となっており(図15)、約半数の粉じん濃度は 3 mg/m^3 以下であった2005年当時と比較して(西村(2010))、15年間で粉じん濃度は3分の2にまで低減している。さらに、下げることが可能と回答した事業者の42.9%が $1.5\sim 2.0\text{ mg/m}^3$ まで目標レベルを下
げることが可能であると回答している。このため、大きな効果があると確認された粉
じん低減化技術や、換気技術の導入がさらに進めば、目標レベルを 2 mg/m^3 まで引き
下げることが、十分に達成可能であると考えられる。なお、これら技術を採用しない
最大の理由がコスト(価格・効率)であるため、これら新技術の必要経費に係る発注
条件における積算について、検討いただきたい。

(参考文献)

Flanagan ME, Seixas N, Becker P, Takacs B, Camp J (2006) Silica Exposure on Construction Site: Results an Exposure Monitoring Data Compilation Project. J of Occup and Envi Hyg. Vol.3 pp. 144-152

ISO/TS 16975-1: 2016 Respiratory protective devices – Selection, use and maintenance – Part 1: Establishing and implementing a respiratory protective device programme.

NEPSI (2019) Occupational Exposure Limits in mg/m^3 – Respirable dust In EU 27¹ + Norway & Switzerland. Available at:
https://www.nepsi.eu/sites/nepsi.eu/files/content/document/file/oel_full_table_may_2019_europe.pdf

Sauve J, Beaudry C, Dion DC, Gerin M, Laboue J (2013) Silica Exposure During Construction Activities: Statistical Modeling of Task-Based Measurements from Literature. Ann Occup Hyg, Vol. 57, No. 4 pp. 432-443

US-OSHA : 29 CFR 1910.134. The final Respiratory Protection Standard

赤坂雄司、大下武志、波田光敬、鈴木裕一 (2004) 吹付けコンクリートにおける急結剤の有無による粉じん発生量の相違について コンクリート工学年次論文集 Vol. 26, No. 1 pp. 1605-1610

大林組、国土交通省八代河川国道事務所(2012) トンネル坑内の粉じん低減工法「トラベルクリーンカーテン」の開発～短時間で坑内の作業環境を飛躍的に改善～ 建設の施工

企画 2012 年 10 月号 pp. 67-71

大窪克己、片寄学 (2002) 吹付コンクリートの粉じん対策 トンネル工学研究論文・報告集
第 12 巻 pp. 275-278

大里祥生、斉藤和男、吉富幸雄、内田正孝 (2002) 山岳トンネル坑内の粉じん濃度低減の試
み トンネル工学研究論文・報告集 第 12 巻 pp. 419-424

尾畑洋 (2019) 次世代トンネル施工システムの開発ー吹付コンクリートの遠隔操作技術ー
土木施工 Vol. 60 No. 1 pp. 83-84

建設業労働災害防止協会 (2000) ずい道工事における換気技術委員会報告書 平成 12 年 3 月

建設業労働災害防止協会 (2012) ずい道等建設工事における換気技術指針 (換気技術の設計
及び粉じん等の測定)

管理濃度等検討会 (2008) 管理濃度等検討会報告書 平成 20 年 10 月 27 日

厚生労働省 (2020) トンネル建設工事における粉じん濃度、換気能力等に係るアンケート調
査の分析結果 厚生労働省労働基準局安全衛生部化学物質対策課環境改善室

鈴木裕一、野間達也、土屋敏郎、三河内永康 (2003) 低粉じん型方式コンクリート吹付機の
現場適用 フジタ技術研究報告第 39 号 pp. 1-6

為石昌弘、坂口和雅、富澤直樹、坂口武志 (2006) アルカリフリー液体急結剤を用いた吹付
けコンクリートによる粉じん低減効果 コンクリート工学 Vol. 44, No. 3

西村章 (2010) 進化するトンネル換気技術 建設の施工企画 2010 年 9 月号 pp. 47-53

日本作業環境測定協会 (2010) 作業環境測定ガイドブック「0」総論編 第 4 版 pp. 153-161

日本産業衛生学会 (2018) 許容濃度等の勧告 (2018 年度),
<https://www.sanei.or.jp/images/contents/309/kyoyou.pdf>.

労働安全衛生法の詳解 (1991) 第 3 版 労働調査会

別紙 4 結晶質シリカのばく露限度等の設定に関する文献等について

1 米国安全衛生専門家会議 (ACGIH) の限界基準 (TLV) の根拠等

- (1) ACGIH(2006)は、結晶質シリカの限度基準値 (TLV) として、 $0.025\text{mg}/\text{m}^3$ を提案した。
ACGIH は、結晶質シリカが直接の肺がんの発がん性物質であることを示す文献はほとんどなく、かつ、珪肺による肺の繊維化が肺がんの主たるリスクを構成することを示す根拠が十分にあるとした。この評価から、珪肺を防止できるまでばく露を防止することで、肺がんの増加を防止できるとした。
- (2) ACGIH は、 $0.05\text{mg}/\text{m}^3$ のレベルで管理された労働者には、数%の珪肺 (ILO 1/0 又は 1/1) の有所見が認められたが、寿命や肺機能への影響はなかったとしている。しかし、Steenland ら (2001) が平均ばく露濃度 (レスピラブル) $0.065\text{mg}/\text{m}^3$ で、有意に肺がんによる死亡率が上昇することを報告しているとした。しかし、Steenland ら (2001) において、 $0.065\text{mg}/\text{m}^3$ (レスピラブル) を超える平均ばく露濃度で肺がんの死亡リスクが有意に上昇したとしていることから、ACGIH は、 $0.005\text{mg}/\text{m}^3$ は、おそらく、労働者の健康を守るには十分でないとした。
- (3) Graham ら (2001) は、350 人の採石場の労働者について、就業中の者と退職後の者の X 線フィルムを比較した。平均ばく露濃度は、1940 年は約 $0.1\text{mg}/\text{m}^3$ であったが、その後、1955 年までに、徐々に $0.05\text{--}0.06\text{mg}/\text{m}^3$ にまで低下した。1940 年以降に採用された 350 人を就業中に X 線検査を受けた群 (81 人) と退職後に X 線検査を受けた群 (269 人) での有所見率を比較したところ、前者が 1.2% のところ、後者が 7.1% であった。この報告から、ACGIH は、退職後に珪肺が進行することは否定できないとし、 $0.025\text{mg}/\text{m}^3$ の TLV-TWA が珪肺の発生、そして、肺がんの発生を防止するだろうとした。
- (4) ACGIH は、TLV-TWA $0.025\text{mg}/\text{m}^3$ は、過去のばく露の測定や珪肺の発見が不完全であるという疫学調査の不確実性に基づいているとした。

2 日本産業衛生学会の許容濃度勧告の根拠等

- (1) 日本産業衛生学会 (2006) は、結晶質シリカ (レスピラブル) の許容濃度を $0.03\text{mg}/\text{m}^3$ としている。同学会は、結晶質シリカには発がん性が認められるが、珪肺症を防止できる濃度を達成すれば、肺がんの発生を実質的に防ぐことができるという立場をとり、「ばく露期間 25 年 (勤続年数 40 年)、じん肺 2 型を 5 % 以下に押さえる」という許容濃度値を求めた。
- (2) 同学会は、Graham ら (2011) の実施した米バーモント州の花崗岩置き場及び採石場の労働者 5,414 人に関する死亡調査を延長した報告に基づき、 $0.06\text{mg}/\text{m}^3$ の環境濃度に 20~40 年ばく露した労働者が珪肺症 (ILO 2/1+) を起こすリスクは低い ($<1\%$) とした HSE の見解を検討した。
- (3) 同学会は、Graham ら (2001) の結果を Miller ら (1998) のスコットランド炭鉱労働者

を対象にした珪肺症（ILO 2/1+）のばく露量反応関係（表2参照）に外挿し、ばく露期間25年で珪肺（ILO 1/0+）を起こす確率が5%となるばく露濃度を推定した。ただし、珪肺の程度基準の変換（ILO 1/0+からILO 2/1+）係数には大きなばらつきがある（2.7倍～36倍）が最も保守的な数字（36倍）を使って推計を行った。この結果、0.03mg/m³を許容濃度として勧告した（日本産業衛生学会（2006））。

3 欧米諸国の基準値について

- (1) 欧州諸国については、European Network for Silica (NEPSI) がヨーロッパ諸国の Occupational Exposure Limits（職業上暴露限界）の一覧表を示しており（NEPSI (2019)）、それによれば、「Quartz（結晶質シリカ）」の職業ばく露限度（レスピラブル）として、約0.025～0.15 mg/m³の値が規定されている（表参照）。最も多く採用されている基準値は0.1mg/m³である（13カ国）一方、0.1mg/m³未満の基準値は7カ国であり、0.025mg/m³を採用しているのは1カ国に過ぎない。
- (2) 米国安全衛生局（OSHA）が定めた法令上の許容ばく露限度値（PEL）は、0.05mg/m³である（US OSHA (2016)）。

Country/Authority (see caption p. 3)	(inert) dust INHALEABLE	(inert) dust RESPIRABLE	Quartz	Cristobalite	Tridymite	Diatomaceous earth	Amorphous silica	Fused silica	Kaolin	Mica	Talc
Austria/I	10	5	0,15	0,15	0,15			0,15			2
Belgium/II	10	3	0,1	0,05	0,05	3	2	0,1	2	3	2
Bulgaria/III		4	0,07	0,07	0,07	1 ²					3
Cyprus/IV		/	10k/Q ³	/	/	/	2	/	/	/	/
Czech Republic/V			0,1	0,1	0,1			4		2	2
Denmark/VI	10	5	0,1	0,05	0,05	1,5		0,1	2		
Estonia			0,1	0,05	0,05		2				
Finland/VII	10	/	0,05	0,05	0,05	5					2
France/VIII	10	5	0,1	0,05	0,05				10		
Germany/IX	10	0,5 ⁴	0,05 ⁵	0,05 ⁵	0,05 ⁵	0,3 ⁶	4 ⁷	0,3 ⁸	/	/	/
Greece/X	10	5	0,1	0,05	0,05						2
Hungary			0,15	0,1	0,15						2
Ireland/XI	10	4	0,1	0,1	0,1		2,4	0,08	2	0,8	0,8
Italy/XII	10	3	0,05 ³	0,05	0,05			0,1	2	3	2
Lithuania/XIII		10	0,1	0,05	0,05						1
Luxembourg/XIV	10	6	0,15	0,15	0,15			0,3			2
Malta ¹⁰ /XV		/	/	/	/						
Netherlands/XVI	10	5	0,075	0,075	0,075					2,5	0,25
Norway/XVII	10	5	0,1	0,05	0,05	1,5	1,5			3	2
Poland/XVIII	2	0,3	0,1	0,1	0,1	2	2	1	10		1
Portugal/XIX	10	5	0,025	0,025	0,025			0,1	2	3	2
Romania/XX		10	0,1	0,05	0,05				2	3	2
Slovakia	10		0,1	0,1	0,1		2			2	2
Slovenia			0,15	0,15	0,15			0,3			2
Spain/XXI	10	3	0,05	0,05	0,05			0,1	2	3	2
Sweden/XXII		5	0,1	0,05	0,05						1
Switzerland/XXIII		6	0,15	0,15	0,15		0,3	0,3	3	3	2
UK/XXIV	10	4	0,1	0,1	0,1	1,2	2,4	0,08	2	0,8	1

4 考察

- (1) ACGIH、日本産業衛生学会いずれも、珪肺を防止すれば、肺がんを防止できるという見解に基づき、限度値を設定している。ただし、これらの限度基準値は、この値を超えると直ちにじん肺（肺がん）を発症するという性質のものではなく、ばく露量反応関係により、ばく露量が多くなることに応じて、じん肺を発症する確率が上がるという性質のものである。この観点から、国際的には、ばく露した粉じん濃度が、これら基準値の何倍であるか（要求防護係数）を評価して、対策を実施している（ISO/TS 16975）。
- (2) なお、限度値の提案書で引用されている Steenland ら（2001）や Graham ら（2001）の報告は、0.05mg/m³を下回る濃度によって肺がんの発生リスクが有意に高まることを直接示すものではない。日本産業衛生学会は、Graham ら（2016）の結果を、Miller ら（1998）の示したばく露量－反応関係に外挿し、限度値を求めた。ただし、珪肺の程度

基準の変換 (ILO 1/0+から ILO 2/1+) 係数には大きなばらつきがある (2.7 倍～36 倍) が最も保守的な数字 (36 倍) を使って推計を行っている。ACGIH は、疫学調査の不確実性を踏まえ、 $0.05\text{mg}/\text{m}^3$ の半分である $0.025\text{mg}/\text{m}^3$ であれば、珪肺や肺がんを防止できるだろうとしている。

- (3) 一方で、2016 年に引き下げられた米国の法令限度 (PEL) は $0.05\text{mg}/\text{m}^3$ であり、欧州各国でも、最も多く採用されている限度値は $0.1\text{mg}/\text{m}^3$ である。このため、 $0.025\text{mg}/\text{m}^3$ は保守的な限度値である。 $0.05\text{mg}/\text{m}^3$ を超えない範囲内であれば、珪肺や肺がんの発生が有意に増加することを直接的に立証する疫学調査結果はなく、米国等で採用されている法令上の限度値である $0.05\text{mg}/\text{m}^3$ 等が不当に高い値とは言えず、 $0.025\text{mg}/\text{m}^3$ には、欧米の最新基準に照らしても、一定の安全上の余裕があると言える。

(参考文献)

NEPSI (2019) Occupational Exposure Limits in mg/m^3 – Respirable dust In EU 27¹ + Norway & Switzerland. Available at:

https://www.nepsi.eu/sites/nepsi.eu/files/content/document/file/oel_full_table_may_2019_europe.pdf

Graham WBG, Vacek PM, Morgan WKC, et al. (2001) Radiographic abnormalities in long-tenure Vermont granite workers and the permissible exposure limit for crystalline silica. J Occup Environ Med. 43(4) pp.412-417

ISO/TS 16975-1: 2016 Respiratory protective devices – Selection, use and maintenance – Part 1: Establishing and implementing a respiratory protective device programme.

Steenland K, Sanderson W (2001) Lung cancer among industrial sand workers exposed to crystalline silica. Am J Epidemiol 153, pp. 695-703

別紙5 定点測定と個人測定の測定値の比較について

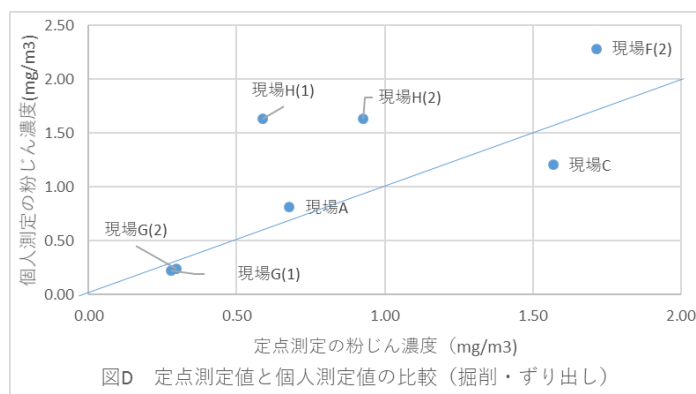
1 定点測定と個別測定の測定値の比較

- (1) 定点測定と個人測定の現場毎の平均値に系統だった違いがあるかどうかを比較するため、本年度、追加調査を行った。追加調査（労働安全衛生総合研究所（2020）では、健康リスクの高い遊離けい酸ばく露のある作業として、掘削・ずり出し作業について測定を行った。いずれの測定も作業員が測定器を装着しており、定点測定は切羽から50m以内で測定した。なお、現場Fの第1サイクルは、定点測定値が1点だけのため、比較対象からは除いている。
- (2) 追加調査の結果と、昨年度の測定結果から調査員の測定値を除いたものと合わせた結果を表D及び図Dに示す。なお、昨年度の測定値からは、調査員に関する測定値を除くとともに、切羽付近の測定値を比較する観点から、切羽から51m以上離れた測定点の測定値については、定点観測の平均値から除いている。

表D 定点測定と個人測定値の比較（掘削・ずり出し）

	定点測定平均値(mg/m ³)	個人測定平均値(mg/m ³)	個人/定点
現場A	0.61	0.81	1.34
現場C	1.57	1.20	0.77
現場F(2)	1.72	2.28	1.33
現場G(1)	0.28	0.23	0.81
現場G(2)	0.30	0.24	0.79
現場H(1)	0.59	1.63	2.78
現場H(2)	0.93	1.63	1.76

調査員除く。現場F(1)は定点測定が1点のため除いた。



2 考察

- (1) 二つの異なる測定方法の間の系統的な片寄りの有無を評価するためには、同一の現場における同一の作業中における2つ方法の測定値に直線的な関係があるかを評価することが通常である（例：管理濃度等検討会（2017））。なお、コンクリート吹付中の遊離けい酸濃度は極めて低い（新藤ら（1985）によれば0.4%。）ため、遊離けい酸濃度測定に関する比較を行う場合、掘削・ずり出し作業の測定値で比較することが妥当である。
- (2) 掘削・ずり出し作業における比較結果については、データ数が少なく、ばらつきが大きい。表D及び図Dからは、現場によって個人測定の方が大きい場合もあれば、小さい場合もあり、系統だった違いは認められない。
- (3) 本年度の追加調査においては、現場Fで、個別測定者の一人が30分早く仕事を切り上げたことが確認されている。さらに、現場Fは発破工法であるが、定点測定のポンプが停止中に個人測定者が切羽付近で作業を開始する等により、粉じん濃度が高い

時間帯の定点の測定時間が個人より短かった可能性があるとしている。このため、このデータの信頼性は機械掘削より低い。

- (4) これまでに述べた事項のほか、測定値が影響を受ける要素として、定点測定の位置、作業者が個人測定中にどのタイミングで切羽付近にいたか、換気による粉じんの拡散の状況といった要因が考えられる。また、データの欠損（例：現場 A のノズルマンの吹付機異常によるもの。）による影響も考えられる。
- (5) 以上から、現場毎の個別の事情によって、定点測定や個人測定の測定条件が異なっている可能性が高いことを踏まえると、表 D から、定点測定と個人測定の違いによる系統的な測定値の違いがあるとは言えない。むしろ、正確な定点測定のために、発破工法においては、作業員が切り羽付近に立ち入る前に、定点測定の測定を確実に再開することをガイドライン等で明確にすることが望ましい。

（参照文献）

新藤敏郎、平田篤夫、稲葉力（1986）トンネル坑内の浮遊粉じんについて－粉じんの性状、濃度測定、対策、新方式の集じん装置－、西松建設情報 Vol. 8 pp. 19-28

管理濃度等検討会（2017）新規粉じん計 LD-5R 型の質量濃度変換係数（K 値）について 平成 29 年度第 1 回管理濃度等検討会（平成 29 年 5 月 23 日）資料 1-2 別紙

労働安全衛生総合研究所（2018）トンネル建設工事の切羽付近における粉じん濃度測定に関する研究報告書 独立行政法人労働者健康安全機構

労働安全衛生総合研究所（2020）トンネル建設工事の切羽付近における粉じん濃度測定に関する研究 令和元年度現場調査報告書 独立行政法人労働者健康安全機構

別紙6 電動ファン付き呼吸用保護具の防護係数に関する文献等について

1 電動ファン付き呼吸用保護具の規格における規定

- (1) 電動ファン付き呼吸用保護具の規格（平成 26 年厚生労働省告示第 455 号。以下「構造規格」という。）では、第 6 条（性能に関する試験）の粒子捕集効率試験の試験条件として、フィルタの捕集効率の等級を PS1/PL1 : 95.0%、PS2/PL2 : 99.0%、PS3/PL3 : 99.97 の 3 等級に区分している。
- (2) 構造規格第 6 条は、電動ファン付き呼吸用保護具の漏れ率試験の試験条件として、指定のフィルタを装着したマスクからの漏れ率を等級ごとに S 級:0.1%、A 級:1.0%、B 級:5.0%の 3 等級に区分している。したがって、この漏れ率は、フィルタ及び面体からの漏れ率を両方評価した数値となり、防護係数の逆数に近い概念となる。

2 日本工業規格における規定等

- (1) JIS T8150:2006 の付表 2 は、指定防護係数（訓練された着用者が、正常に機能する呼吸用保護具を正しく着用した場合に、少なくとも得られるであろうと期待される防護係数）について、ろ過式の動力付きの呼吸用保護具の指定防護係数は、半面形で 4～50、全面形で 4～100、フード形で 4～25、フェイスシールド形で 4～25としている。さらに、付表 2 の注では、ろ過式の防護係数は、面体等の漏れ率[Lm(%)]及びフィルタの透過率[Lf(%)]から、 $100/(Lm+Lf)$ によって算出すると規定している。
- (2) JIS T8150:2006 の解説では、付表 2 に示した防護係数は、米国国家規格（ANSI）及び米国職業安全衛生研究所（NIOSH）、英国安全衛生部（HSE）等 に示された指定防護係数を参照し、我が国の呼吸用保護具の種類に適した数値について安全性を考慮して決めたものであるとしている。さらに、同解説では、欧米の指定防護係数の根拠は、実験室において被験者が呼吸用保護具を実際に着用し、一定の動作及び発声を行ったときの実測値を集計し、その代表値として帰納した値であり、着用者間のばらつきに対して安全側に設定した値であるとしている。

3 米国の法令等における規定

- (1) 米国安全衛生庁（USOSHA）の規則（29 CFR 1910.134(d)）「呼吸用保護具の選択」においては、各種類の呼吸用保護具の指定防護係数(assigned protection factor)を Table 1 において規定しており、電動ファン付き呼吸用保護具（PAPR）については、半面形で 50、全面形で 1,000、ヘルメット形で 25、フード形で 1000、ルーズフィッティング形で 25としている。
- (2) OSHA の指定防護係数は、米国産業規格（ANSI）Z88.2:1992 の指定防護係数を根拠の一つとしている（Steelnack(2007)）。ANSI の原案作成委員会では、指定防護係数の根拠

としていくつかの文献をあげている (Nelson (1996))。半面形 PAPR については、鉛溶融炉における高性能フィルタ (HEPA) を備えた半面形 PAPR を着用した作業者の防護係数を実測した結果、防護係数の幾何平均が 431、5 % パーセンタイルの推定値が 58であったことを主な根拠としている (Lenhart and Campgell (1990))。全面形 PAPR については、鉛溶融炉における全面形 PAPR を着用した作業者 (定量的フィットテストの結果、最小のフィット係数は 500であった。)の防護係数を実測した結果、5 % パーセンタイルの防護係数が 1400であったこと (Colton et al. (1990))、ヘルメット・フード形の PAPR の防護係数実測値の 5 % パーセンタイルの防護係数が 1470であったこと (Keys et al. (1990))を主な根拠としている (Table III 参照)。

- (3) さらに、同規則 1910.134(d) (3) (iv) において、事業者は、米国安全衛生研究所 (USNIOSH) に認証された高捕集効率フィルタ (HEPA) か、42CFR part 84 によって NIOSH が認証したフィルタを使用することを求めている。
- (4) 42CFR part 84 では、試験粒子別に、最低フィルタ捕集効率別に型式を定めており、その捕集効率の種類は、N100/R100: 99.97%、N99/R99: 99%、N95/R95: 95%の3段階となっている。

4 考察

- (1) 構造規格においては、防護係数の直接の規定はないが、JIS T8150 で定める防護係数の計算方法 ($100/(Lm+Lf)$) に構造規格の漏れ率試験の試験条件である等級別の漏れ率を面体からの漏れ率とフィルタ捕集効率の合計値として代入することにより、防護係数を計算した結果を表 1 に示す。

TABLE III. Workplace Protection Factors—Powered Air Purifying Respirators

Studies	N	Geometric Mean	Geometric Standard Deviation	Best Estimate 5th Perc.
<i>Half mask</i>				
Lenhart ⁽²⁶⁾	25	431	3.4	58
Myers & Peach ⁽⁸⁾	7	49	2.5	11
daRoza (simulated work data) ⁽¹⁰⁾	—	5000	—	—
Skaggs (simulated work data) ⁽¹¹⁾	—	14300–20000	—	—
<i>Full facepiece</i>				
Ayer (simulated work data) ⁽¹²⁾	—	—	—	—
Myers & Peach ⁽⁸⁾	3	66	3.6	8
<i>Subsequent data</i>				
Colton ⁽¹³⁾	55	10300	3.4	1400
<i>Helmet/hood</i>				
<i>Decision based on analogy to atmosphere supplied helmet/hood data</i>				
<i>Subsequent data</i>				
Keys ⁽¹⁴⁾	60	10400	3.3	1470
<i>Loose-fitting facepiece</i>				
Myers (battery) ⁽¹⁵⁾	47	127	2.3	32
Gosselink ⁽¹⁶⁾	7	199	2.6	41
Myers (smelter) ⁽¹⁷⁾	43	184	3.3	27
Que Hee ⁽¹⁸⁾	—	—	—	—
daRoza (simulated work data) ⁽¹⁰⁾	—	—	—	—
Skaggs (simulated work data) ⁽¹¹⁾	—	—	—	—
Dixon (program protection factor) ⁽¹⁹⁾	—	230	—	—
<i>Subsequent data</i>				
Gaboury ⁽²⁰⁾	20	1410	2.5	306
Stokes ⁽²¹⁾	39	1530	5.8	85

表 1 構造規格の等級ごとの漏れ率の逆数

	B 級	A 級	S 級
防護係数	20	100	1000

- (2) OSHA 規則の指定防護係数の根拠となる文献が、それぞれ、高性能フィルタ (HEPA) を使用し、又は、フィットファクターが 500 あるなど、フィルタからの漏れ率をほぼ無視できる状態での実測値であることから、OSHA の指定防護係数は、面体からの漏れ率の逆数と考えるのが妥当（全面形で 0.1%、半面形で 2 %）である。したがって、この漏れ率と NIOSH のフィルタ等級に応じたフィルタからの漏れ率を JIS T8150 の防護係数の計算式（ $100/(L_m+L_f)$ ）に当てはめて防護係数を計算した結果を表 2 に示す。なお、N100/R100 のフィルタ漏れ率は 0 として計算している。

表 2 米国規則の指定防護係数及び NIOSH の規則から計算される防護係数

	N95	N99	N100
全面形	19.6	90.9	1000.0
半面形	14.3	33.3	50.0

- (3) 以上の検討を踏まえると、全面形の電動ファン付き呼吸用保護具の防護係数については、表 1 によることが、OSHA 規則の指定防護係数とおおむね矛盾せず、妥当であると考えられる。一方、半面形については、表 2 と矛盾しない防護係数であるべきであり、今後、検討の必要がある。

(参照文献)

29 CFR 1910.134 Respiratory Protection Standard, US OSHA

42 CFR Part 84 Respiratory Protective Devices, NIOSH

OSHA (2009) Assigned Protection Factors for the Revised Respiratory Protection Standard, US OSHA

Colton, C.E., Mullis, H.E., Rhoe, C.R.(1990) Workplace Protection Factor for a Powered Air-Purifying Respirators. Paper presented at the American Industrial Hygiene Conference Orland, FL, May 1990.

Keys, D.R., Guy, H.P., Axon, M. (1990) Workplace Protection Factors of Powered, Air-Purifying Respirators. Paper presented at the American Industrial Hygiene Conference Orland, FL, May 1990.

Lenhart, S.W. and Campbell, D.L. (1984) Assigned protection factors for two respirator

- types based upon workplace performance testing. Ann. Occu. Hyg. Vol.28, pp.173-182
- Nelson, T.J. (1996) The Assigned Protection Factor According to ANSI, AIHA Journal, Vol.57. pp.735-740
- Steelnack, J. (2007) Assigned Protection Factor (APF) Table Added to OSHA's Respiratory Protection Standard 29 CFR 1910.134. Paper presented at the American Industrial Hygiene Conference, June 2007.
- JIS T8150:2006 呼吸用保護具の選択、使用及び保守管理方法・同解説

V 参考資料

厚生労働省（2020）トンネル建設工事における粉じん濃度、換気能力等に係るアンケート調査の分析結果 厚生労働省労働基準局安全衛生部化学物質対策課環境改善室
労働安全衛生総合研究所（2018）トンネル建設工事の切羽付近における粉じん濃度測定に関する研究報告書 独立行政法人労働者健康安全機構
労働安全衛生総合研究所（2020）トンネル建設工事の切羽付近における粉じん濃度測定に関する研究 令和元年度現場調査報告書 独立行政法人労働者健康安全機構