

山岳トンネルにおける切羽近傍の換気気流と粉じん濃度の解析

金岡千嘉男¹・古内正美²・因幡淳一³・大亦和代⁴・明星敏彦⁵

¹正会員 工博 金沢大学教授 工学部土木建設工学科 (〒920-8667 金沢市小立野 2-40-20)

²正会員 工博 金沢大学助教授 工学部土木建設工学科 (〒920-8667 金沢市小立野 2-40-20)

³金沢大学 工学部土木建設工学科 (〒920-8667 金沢市小立野 2-40-20)

⁴金沢大学 工学部土木建設工学科 (〒920-8667 金沢市小立野 2-40-20)

⁵工博 産業医学総合研究所 (〒214-8585 川崎市多摩区長尾 6-21-1)

山岳トンネル掘削作業中の切羽付近の粉じん濃度分布や粉じんの挙動に及ぼす、換気方式、換気量、風管の配置、重機などの障害物の影響を数値シミュレーションにより検討した。特に切羽近傍の粉じん濃度分布に着目し、建災防指針に基づいた作業環境評価の妥当性を検証した。

換気方式によっては換気量増加は粉じん濃度の減少をもたらさないこと、障害物後方の渦流れのため切羽-障害物間の粉じん濃度が大幅に増加すること、直径 10 μ m 以下の微小粒子が空間内に滞留し、壁面付着特性が排出粉じん量に影響を及ぼすこと、「建災防指針」に従った手法では切羽面近傍の高粉じん濃度領域を評価することはできないが、評価に適当な領域も存在することを明らかにした。

Key Words: numerical analysis, ventilation, dust concentration, particle motion

1. はじめに

掘削中の山岳トンネル中には多量の粉じんが切羽付近に発生する。掘削時の発じん源としては、発破や重機による掘削、ずり処理、近年普及している NATM 工法のコンクリート吹き付け作業などがある。この結果生じる高濃度の粉じんによるトンネル内の空気汚染は、作業能率の低下はもとより、じん肺の原因となるなど作業者の健康面から非常に問題となっている¹⁾。作業者への粉じんの曝露を低減するためには粉じんの発散を防止する発生源対策、換気対策、呼吸用保護具の使用、労働衛生教育を組み合わせる総合的に実施する必要がある。この中で坑内の粉じんの濃度を低減するための対策として、トンネル外から新鮮な空気を切羽近傍に送って換気する方法が広く採用され、一定の効果を上げている²⁾³⁾⁴⁾。しかし、最も粉じん濃度の高い切羽近傍では、粉じん発生量、換気方式、換気量、風管配置、切羽近傍に存在する重機の影響、掘削工法による切羽面形状の差などの多くの要因が換気状態に直接的に影響する。しかしながら、換気気流の状態と坑内の粉じん濃度分布に関してこれらの要因を考慮した系統的な検討は少ない⁵⁾。

現在、トンネル建設工事における粉じん測定は、建設業労働災害防止協会の「地下工事における粉じん測定の指針」(1986年11月)(以下「建災防指針」と呼ぶ)に基づいて行われている⁶⁾。この建災防指針では、測定時期(工事開始時、定期および随時)や測定点個数(6個)、測定点位置(切羽より5, 15, 25m, 断面方向並行等分割)、測定点高さ(床上0.5~1.5m)、測定装置(粉じん計の種類)などが定められており、測定粉じん濃度の幾何平均と幾何標準偏差に基づいた値を管理目標値と比較して評価するとされている⁶⁾。多くの作業現場では、この建災防指針による粉じん濃度測定が行われ管理目標値と対照して作業環境が管理されている。平成13年4月には新しい指針⁷⁾が制定されており、今後は新指針に従った同様の管理が行われる。しかし、粉じん濃度評価方法としての妥当性や作業環境測定の技術的な可能性についてさらに検討する必要がある。

本研究では、山岳トンネル掘削作業中の切羽付近について、換気方式、換気量、風管の配置、重機などの障害物の存在が換気の流れ、粉じん濃度分布や粉じんの挙動に及ぼす影響を数値シミュレーションにより検討した。特に切羽近傍の粉じん濃度分布に着目し、数値シミュレーションの結果を用いて建災

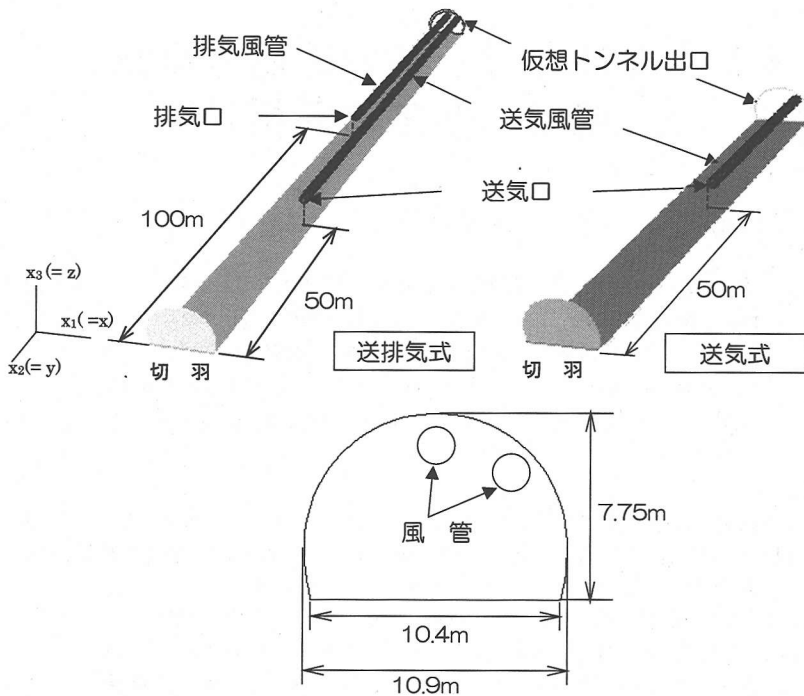


図 - 1 計算モデル

防指針に基づいた作業環境評価の妥当性を検証した。

2. 計算

(1) 解析対象の山岳トンネル

本研究の対象である山岳トンネルは鉄道用、高速道路用などの断面積が 50m^2 以上のトンネルであり、我国においては全施工数の約 3 分の 1 を占める。これらのトンネルの掘削では全断面掘削ないしベンチカット工法が広く用いられている²⁾。

切羽近傍では、削岩機、コンクリート吹付け機、バックホウ（パワーショベル）などの大型の建設用重機による一連の作業が繰り返し行われている。発破、機械掘削、ずり積み、ずり運搬、コンクリート吹付け等の作業に伴い、岩石、コンクリート、ディーゼルエンジンの排気ガス由来の粉じんなどが発生する。先の建災防指針による測定方式で管理目標値を $5\text{mg}/\text{m}^3$ 以上（平成 13 年度新指針では $3\text{mg}/\text{m}^3$ ）に設定しているところもあり、一般の作業環境に比べて作業環境中の粉じん濃度は高い。

坑内の粉じん濃度を低減するため風管を用いる換気装置が多く設置されている。代表的な換気方法に送気式と送排気式があるが、小断面のトンネルでは

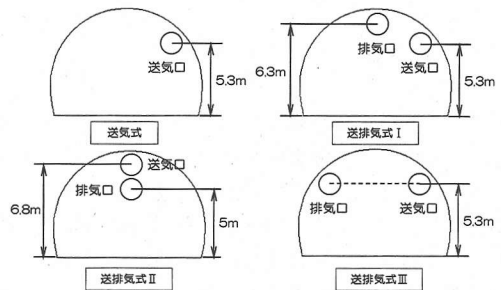


図 - 2 風管配置

排気式のみの場合もある。送気式では、トンネル天端付近に沿った風管から清浄空気を切羽方向へ送出し、含じん空気は坑内を通過して坑口から排出される。送気式は $500\sim 1000\text{m}$ 以下の短いトンネルやそれを超える長さのトンネルの掘削初期段階で用いられることが多いが、設置コストが低い反面、換気効率がそれほど高くなく、坑道が汚染空気の通り道となってトンネル全体に汚染が広がる問題がある。このため集じん機を併用することが一般的となっている。送排気式は切羽近傍で清浄空気の供給と汚染空気の排出を同時に行うため換気効率が高いとされているが、設置コストが高いことが欠点であり、送排気の

表-1 計算条件

(a) トンネル構造

トンネル断面積：70m²
 送気口～切羽間距離：50m
 排気口～切羽間距離：100m
 風管直径：1.7m

(b) 空気物性

密度	1.2kg/m ³
粘性係数	1.8×10 ⁻⁵ Pa·s
温度	293K
圧力	1.013×10 ⁵ Pa

(c)境界条件

壁面	速度	0m/s
トンネル出口	ゲージ圧力	0Pa
	乱流強度	5%
	乱れスケール	0.49m
吸気口	Z方向速度	13.71m/s
	乱流強度	5%
	乱れスケール	0.119m
排気口	圧力ジャンプ	460Pa

表-2 計算送排気流量

流量比	送気量(m ³ /min)	排気量(m ³ /min)
Q*=0.29	500	1000
Q*=0.59	1000	1500
Q*=1	1700	2200
Q*=1.76	3000	3500
Q*=2.94	5000	5500

風管の配置によって換気状態が大きく異なるので適切な配置を考える必要がある。

風管の配置以外に、大型の建設用重機など障害物の存在も切羽近傍の気流と粉じん濃度分布に大きな影響を及ぼしていると考えられる。

(2) モデル

掘削中の高速道路用片側通行2車線断面トンネルとほぼ同様の寸法、構造を持つ全断面の水平トンネルとして図-1に示す計算モデルを作成した。

対象とした換気方法は、代表的な送気式と送排気式の2方式とした。ここでは、図-2に示すように、送気式では1種類、送排気式では3種類の風管取り付け位置を設定して、換気方式の違いだけでなく風管取り付け位置の影響も検討した。また、切羽-送気口間距離を50m、切羽-排気口間距離を100m、

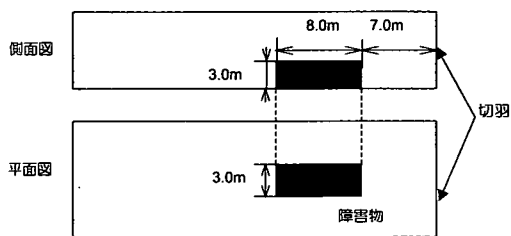


図-3 切羽近傍の障害物

風管直径を1.7mとした。

計算においては、切羽から坑口に至るトンネル全体について行うのが好ましいが、排気口から坑口までの気流は排気口からある程度離れると坑口での条件に近づくと考えられるので、計算機の記憶容量および計算時間を考慮して、送気式では、送気口から50m、排気口付近の反転気流が複雑な送排気式では、排気口から70m後方に仮想坑口を設定し、トンネル全長を送気式で100m、送排気式では170mとした。

さらに、図-3に示すように、切羽近くに障害物(幅3m×長さ8m×高さ3m)を設置し、重機等の障害物による効果についても検討した。

(3) 気流の計算方法および条件

標準k-ε乱流モデルから得られる基礎方程式を、有限体積法⁸⁾に基づく汎用流体解析ソフト FLUENT ver.5.2 を用いて数値解析した。計算条件を表-1に示す。標準k-ε乱流モデルは十分に発達した管内流れの解析には適したモデルであるが、ここで対象とする比較的複雑な流れには必ずしも精度は高くない⁹⁾。しかし、壁面近傍を除く解析対象領域の大部分では妥当な結果を与え、少なくとも定性的には十分妥当な情報が得られると考えられる。乱流エネルギーと散逸の支配方程式中のモデル定数には、領域全体の特性を議論する上では妥当と考えられる発達した等方性乱流に対して最適化された値¹⁰⁾を用いた。同様の観点で、乱流強度と乱流スケールは完全発達管内乱流の計算で用いられる代表的な値¹¹⁾を参考にした。空気の物性値は常温、常圧(20℃、大気圧)時のものとし、トンネル内温度は一様とした。導入される外気との温度差や重機の発熱の影響は発熱源近傍や流れがよどむ領域で無視できないが、領域全体では送風による強制対流による混合が支配的と考えられるので、ここでは考慮していない。また、計算モデルの格子数は障害物の有無により異なるが、約17万～21万である。

各換気方式における送排気流量を、表-2に示し

た。モデル化に際して参考にしたトンネルの換気条件（送気流量 1700m³/min, 排気流量 2200m³/min）を「基準条件」と定義し、基準条件に対する流量比 Q* を表-2 中に示した。含じん空気がトンネル内を出口に向かって流れることを防ぐため、送排気方式では、実トンネルでの送気量と排気量の差を参考にし、いずれの換気量でも両者に 500m³/min の差を設定した。また、送気速度は送気流量を風管断面積で除した値である。排気管入口では設定する排気流量が得られるように圧力値を設定した。

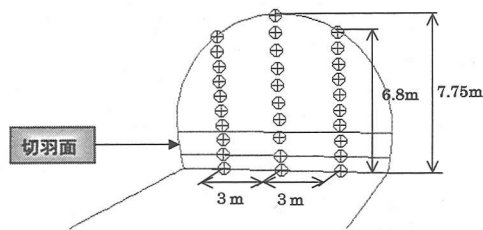


図-4 粒子発生位置

(4) 粉じん濃度と粉じん粒子の軌跡

a) 粉じん濃度分布

換気方法や送排気管の位置あるいは換気流量が異なると切羽から発生した粉じんの拡散経路と滞留時間に差が生じ、この結果として切羽近傍の粉じん濃度分布が変化すると考えられる。そこで、粉じん濃度に及ぼすこれらの要因の影響を明らかにするために、含じん空気を空気と同密度の連続体で近似し、乱流拡散係数を流体と等しく置いて解析した。なお、その妥当性については、次節で粒子運動を直接解析した結果との比較検討から考察した。

粉じんの拡散は式(1)に示す対流拡散方程式¹²⁾に基づいて計算した。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho m) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i m) = -\frac{\partial J_i}{\partial x_i} \quad (1)$$

$$J_i = -\left(\rho D + \frac{\mu_i}{Sc_i}\right) \frac{\partial m}{\partial x_i} \quad (2)$$

ここで、 D : 分子拡散係数, $i=1, 2, 3$ (但し x_1 =トンネル断面水平方向 x , x_2 =トンネル断面垂直方向 y , x_3 =トンネル軸方向 z), m : 粉じんの質量分率, Sc_i : 乱流シュミット数=1, u_i : 速度成分, μ_i : 乱流粘性係数, ρ : 空気密度である。また、先に述べたように粉じん発生量に関して一般化されたデータが少ないが、建設労働災害防止協会による推定発生量 (1.2~4g/min)²⁾を参考にし、切羽全面から連続的に 3g/min (質量分率 3.7×10^{-5}) の粉じんを発生させた。粉じん濃度分布の解析には、流れ場の計算から得られた速度分布をそのまま用いた。また、ここでは触れないが、粉じん濃度の経時変化も得られるように式(1)中の非定常項を残し、漸近解としての定常解を求めた (各変数の相対的な時間変化の最大値が 0.1%以下となった時を収束と判定)。

b) 粉じん粒子の運動軌跡

既報によれば、重機起源のディーゼル排気粒子のようなナノサイズからサブミクロンオーダーの極微

粒子直径: 0.1, 1, 2.5, 7, 10, 100 μ m

粒子密度: 2500kg/m³

初期速度: 0.016m/s

温度: 293K

小なものから NATM 工法における吹付けコンクリート中に含まれる 100 μ m を超えるものまで、掘削中の山岳トンネルでは種々の粒径の粒子が発生する²⁾。これに対し、上で述べた近似手法は、粒径が大きく慣性力や重力の影響が無視できない粒子には適用できないと考えられるので、粒子挙動を広い粒径範囲について正しく把握するためには、個々の粒子の運動に着目した検討が必要になる。そこでここでは、切羽面上の複数箇所での粒径・密度を与えた粒子を発生させて、個々の粒子運動を解析した。

図-4 は粒子軌跡観察時の切羽面上の粒子発生位置を示す。各発生位置から球状粒子を瞬間的に発生させた時の粒子軌跡を計算した。また粒子運動を考慮したときの粒子排出状態を定量的に評価するため、切羽面に対応する全ての分割要素から粒子を発生させ (総粒子個数 425 個)、各粒子の運動軌跡を計算して排気管から排出される割合を求めた。発生粒子の物性を表-3 に示す。

粒子の運動は以下に示す運動方程式¹³⁾に基づいて計算した。

$$m \frac{du_{pi}}{dt} = F_{Di} + g_i(\rho_p - \rho) \quad (3)$$

$$F_{Di} = C_D \frac{\pi D_p^2}{4} \cdot \frac{\rho}{2} |u_{pi} - u_i| (u_{pi} - u_i) \cdot \frac{1}{C_c} \quad (4)$$

ここで、 F_{Di} : 粒子に作用する流体抗力成分, g_i : 重力成分, m : 粒子質量, u_i : 流体速度成分, u_{pi} : 粒子速度成分, $i=1, 2, 3$ (但し x_1 =トンネル断面水平方向 x , x_2 =トンネル断面垂直方向 y , x_3 =トンネ

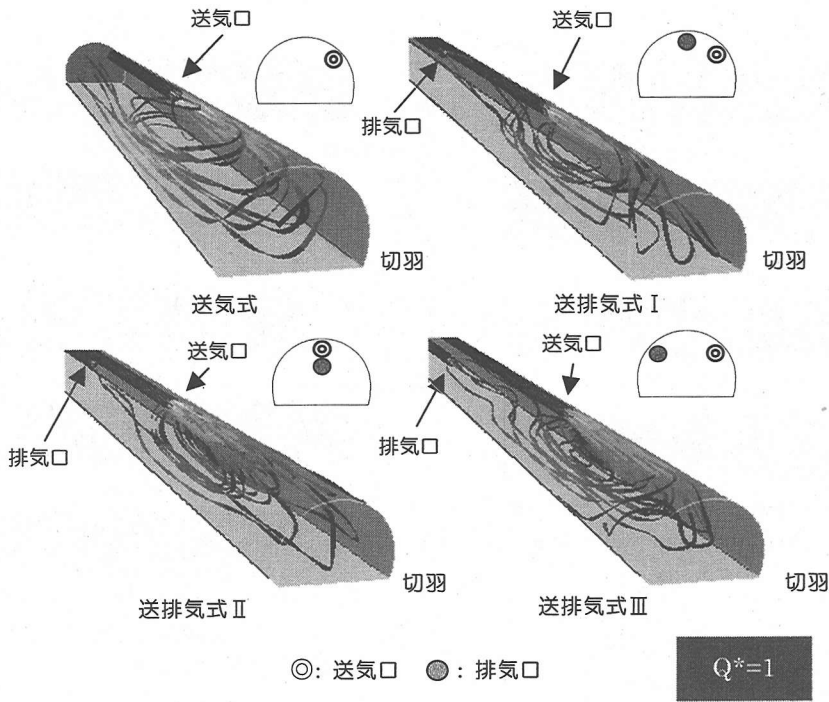


図-5 各換気方式・風管配置における送気口からの流線

ル軸方向 z), μ : 粘性係数, ρ : 流体密度, ρ_p : 粒子密度, D_p : 粒子直径, C_c : Cunningham 補正係数¹³⁾である. なお, 粒子レイノルズ数 Re は粒子・流体の相対速度を代表速度として次のように定義される.

$$Re = \frac{\rho D_p |u_{pi} - u_i|}{\mu} \quad (5)$$

ここでは抗力係数 C_D を Re 数の関数として以下のように近似した¹⁴⁾.

$$C_D = a_1 + a_2 / Re + a_3 / Re^2 \quad (6)$$

ただし, $a_1 \sim a_3$ は平滑球に関して Re 数の関数として与えられる係数である¹⁴⁾.

粒子運動に関するトンネル壁面の境界条件として, 切羽面を完全反射壁とした上で, トンネル内壁の濡れや表面状態などに応じた付着性の差の影響を見るため, 1)トンネル壁全面沈着, 2)トンネル床面沈着の二通り与え, 沈着粒子の再飛散は考慮しない理想化した場合を検討した. 実際には換気量が增大すると沈着粒子の再飛散が生ずるので, ここで検討する二つのケースと全壁面で再飛散が生ずる場合の中間の状態になると考えられる. また発生する粒子の初速度 u_{p0} は, 前節の含じん気流発生速度と等しく置いたが, 解析対象とした粒径範囲 ($0.1 \sim 100 \mu m$) の

粒子の停止距離¹³⁾ ($= \rho_p D_p^2 u_{p0} / (18 \mu)$) は, $u_{p0} = 10 m/s$ としても分割格子幅の $1/1000 \sim 1/10$ 程度と短く, 初速度のトンネル内の粒子運動への影響は実質的に無視できる.

3. 解析結果および考察

(1) 換気方式と風管配置の影響

図-5(a)-(d)に, それぞれ, (a)送気式, (b)送排気式 I, (c)送排気式 II および (d)送排気式 III における切羽近傍の流跡線を示す. ただし, $Q^* = 1$ の場合である. 送気口からの清浄空気は切羽方向に向かい, その後切羽面付近で反転し, 坑口あるいは排気口に向かって流れる. 送気口から切羽方向に向かう空気が切羽に到達せずに切羽と送気管の間を旋回する巻き込み流れが発生しており, その広がりや流線集中の度合いが換気方式, 風管配置で異なっている. このような旋回流は切羽面から排除された粉じんを再び切羽方向へ逆流させ, 送気口-切羽間の粉じん濃度を増加させると考えられる.

図-6に, 各換気方式, 風管配置におけるトンネル中心軸に沿った垂直方向断面の粉じん濃度分布を示す ($Q^* = 1$). 送気式は送排気式に比べ全体的に粉じん濃度が高く, 天井付近の高粉じん濃度領域が広

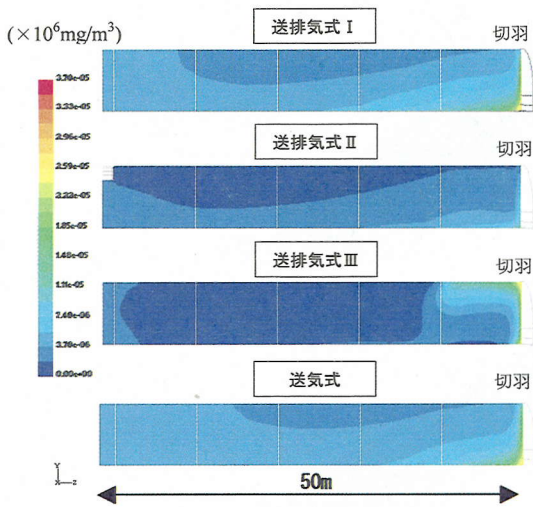


図-6 トンネル中央垂直断面内粉じん濃度分布におよぼす換気方式の影響 ($Q^*=1$)

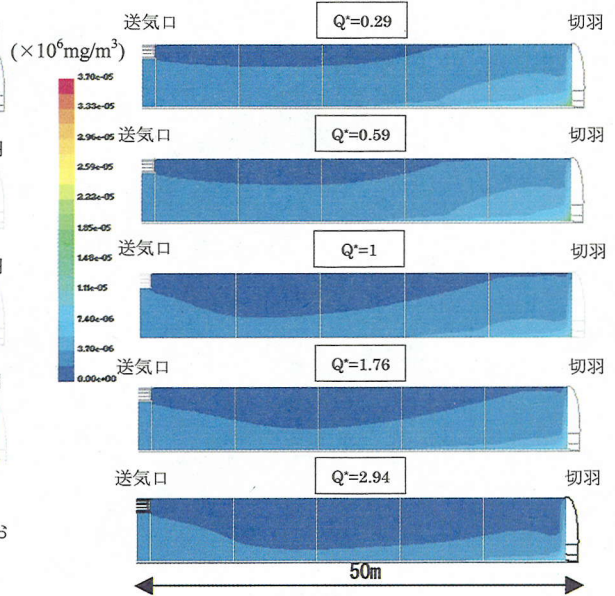
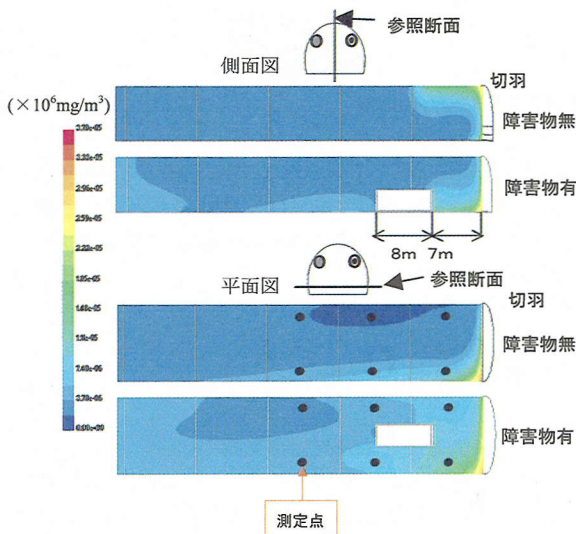


図-7 トンネル中央垂直断面内粉じん濃度分布におよぼす換気流量の影響 (送排気式 II)



幾何平均値 $3.15\text{mg}/\text{m}^3$
 障害物あり 幾何平均値 $5.75\text{mg}/\text{m}^3$

図-8 障害物による粉じん濃度の変化 (送排気式 III, $Q^*=1$)

くなっている。また、送排気式 III のように天井両側に送排気管がある場合に、切羽から 10m 以上離れた領域で粉じん濃度が際立って低くなっている。

(2) 換気流量の影響

送排気式 II の場合について、種々の換気量におけるトンネル中央垂直断面内粉じん濃度分布を図-7 に示す。換気量が増加しても切羽付近での粉じん濃

度分布は大きく変化しないが、全体的に粉じん濃度が低減されることが分かる。しかし、後述するように、換気方式や場所によっては換気量の増加は粉じん濃度の低下をもたらさないことに注意する必要がある。

(3) 障害物の影響

図-8 に、障害物がある場合のトンネル中心垂直断面内 (側面図) と床面から 1.5m の平面内 (平面図) の粉じん濃度分布を障害物がない場合と比較して示した (送排気式 III, $Q^*=1$)。障害物が存在しない時には比較的清浄に保たれていた坑内が、障害物の存在によって全体的に粉じん濃度が上昇している。また、トンネル天端付近の粉じん濃度に大きな差異はないが、障害物一切羽間で高粉じん濃度となっており、この間の領域に粉じんが封じ込められることが分かる。

障害物の影響は障害物寸法や個数が増加すると顕著になると考えられるため、切羽一重機間の距離も含めて切羽近傍の重機配置には注意する必要がある。

(4) 粒子運動

式(3)-(4)に基づいて球粒子の運動軌跡を計算した結果を図-9 に示す。ただし、送排気式 I ($Q^*=1$) を用いた時の粒子運動軌跡の解析結果を粒径が異なる場合で比較した。ここで、壁面衝突粒子は全て沈

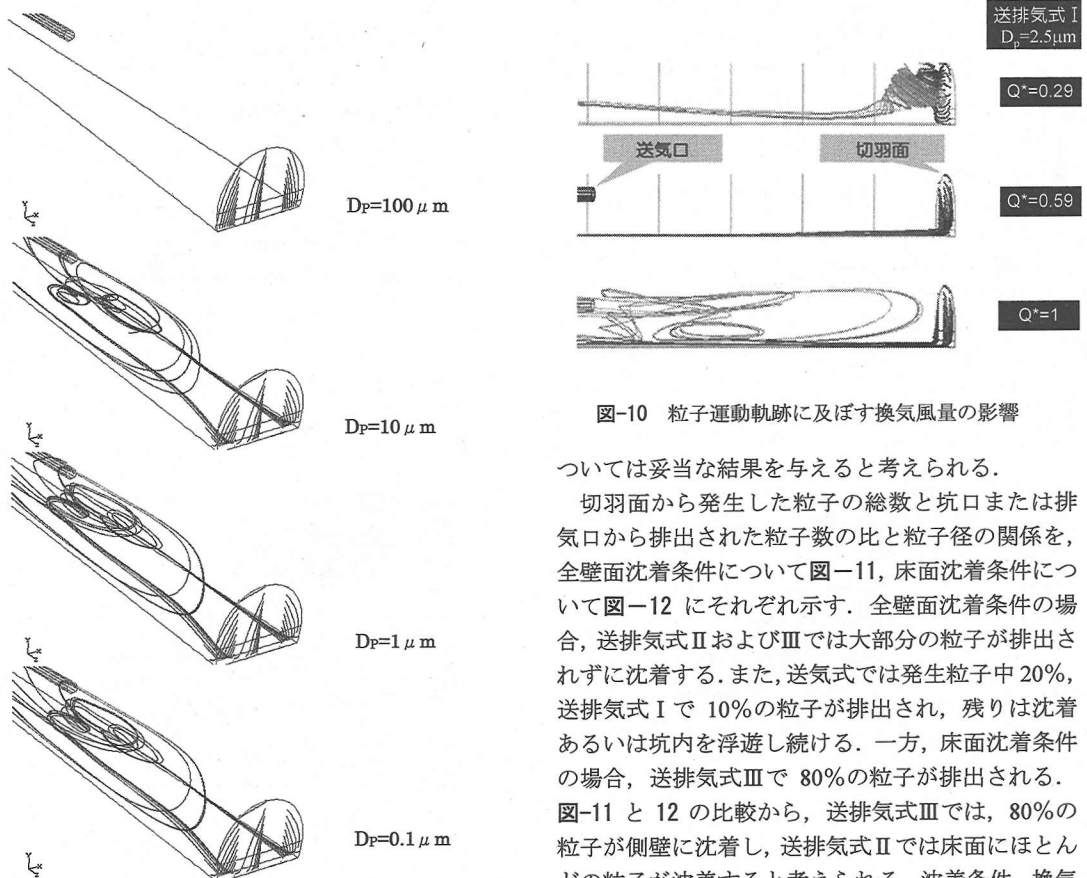


図-9 切羽面発生粒子の運動軌跡 (送排気式 I, $Q^*=1$)

着すると仮定し、再飛散は考えていない。重力沈降の影響が大きい $D_p=100\mu\text{m}$ の粒子は切羽面近傍に直ちに沈着するが、 $10\mu\text{m}$ 以下の粒子は気流に同伴されて流動し、送気口付近で反転後坑口あるいは排気口に向かう。しかし、一部は切羽方向への巻き込み流れの影響を受け、切羽と送気口の間で滞留する。

換気量と粒子の運動軌跡の関係を送排気式 I, $D_p=2.5\mu\text{m}$ の場合について示したのが図-10 である。 $Q^*=0.29$ と換気量が少ない場合には切羽近傍で発生した渦に粒子が巻き込まれた運動をしている。連続体近似による解析結果でも渦流れで粒子が旋回する領域の粉じん濃度が高く計算されていることも矛盾しない。 $Q^*=0.59$ の時には粒子は切羽方向には戻らないことから、粉じん濃度が低下すると考えられるが、これも連続体近似の結果と一致する。これらの結果から判断すると、含じん空気を連続体近似して得られる粉じん濃度分布は、 $10\mu\text{m}$ 以下の粒子に

図-10 粒子運動軌跡に及ぼす換気風量の影響

ついては妥当な結果を与えらる。と考えられる。

切羽面から発生した粒子の総数と坑口または排気口から排出された粒子数の比と粒子径の関係を、全壁面沈着条件について図-11、床面沈着条件について図-12 にそれぞれ示す。全壁面沈着条件の場合、送排気式 II および III では大部分の粒子が排出されずに沈着する。また、送気式では発生粒子中 20%、送排気式 I で 10% の粒子が排出され、残りは沈着あるいは坑内を浮遊し続ける。一方、床面沈着条件の場合、送排気式 III で 80% の粒子が排出される。図-11 と 12 の比較から、送排気式 III では、80% の粒子が側壁に沈着し、送排気式 II では床面にほとんどの粒子が沈着すると考えられる。沈着条件、換気方式、風管配置によらず、 $10\mu\text{m}$ を超える粒子は風管あるいは坑口からはほとんど排出されないことから、作業空間内には肺深部に吸引されやすい¹³⁾ 微小粒子が主に滞留することが分かる。

図-11、12 の結果から分かるように、坑内粒子濃度には、気流状態および粒子径と壁面沈着条件が大きく影響する。また、ここでは考慮していないが、粒子の再飛散も実際には影響が無視できない。最適な換気条件を決定するにはこれらを総合的に評価する必要があると考えられる。

(5) 計算結果の建炎防指針測定方法への適用

作業空間高さに対応した床面から高さ 1.5m にある水平面内の粉じん濃度分布の計算結果を各換気方式と風管配置についてそれぞれ図-13 に示した。また建炎防指針に従って切羽近傍の空間に設置した 6 箇所での測定点での粉じん濃度及びそれらの幾何平均値と幾何標準偏差を同じく示した。各粉じん濃度は計算に用いた格子の大きさ (約 60cm 立方) の平均粉じん濃度となる。送気管が天端中央にある送排気式 II の場合は、トンネル側壁側の領域で、天端中央

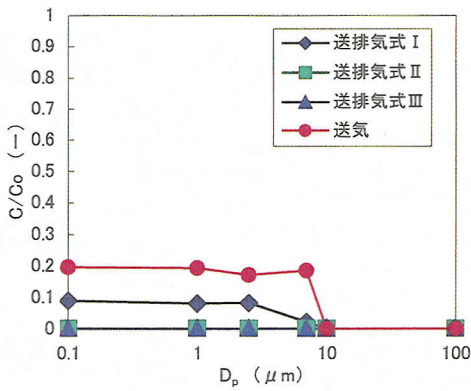


図-11 発生粒子と排出粒子の比率(全壁面沈着)

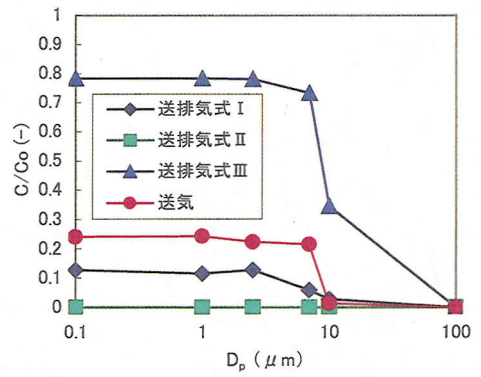
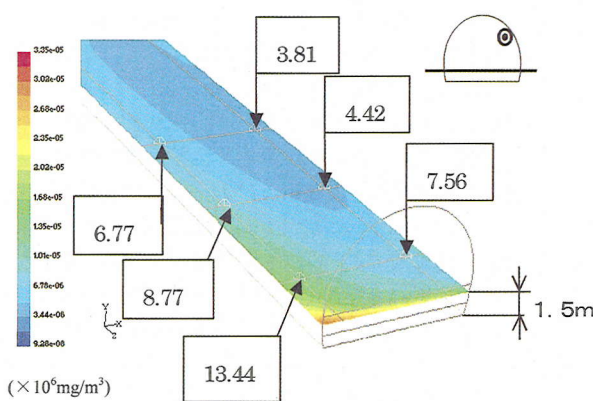
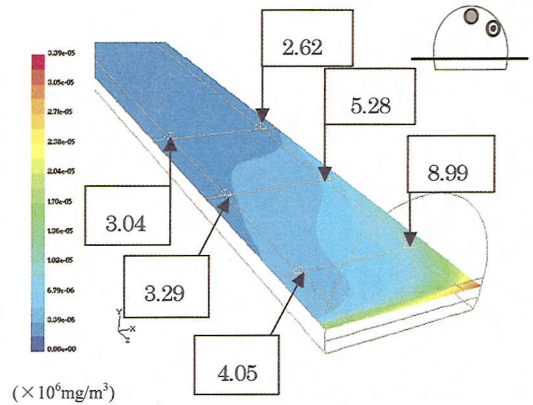


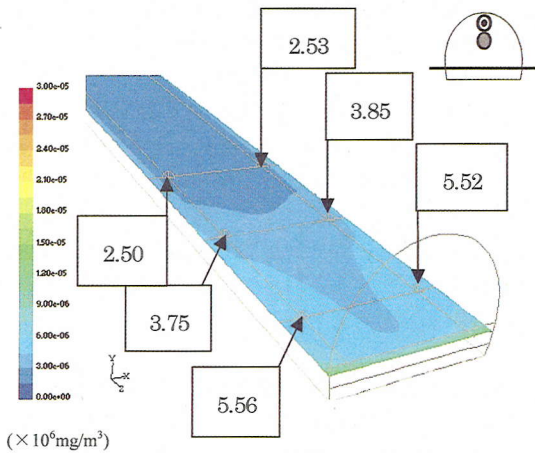
図-12 発生粒子と排出粒子の比率(床面沈着)



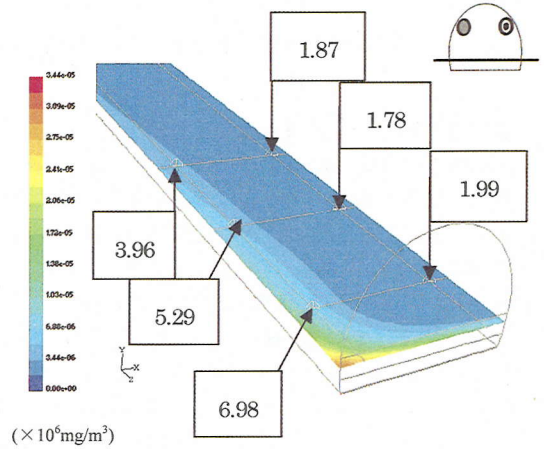
粉じん濃度の幾何平均値 6.83mg/m³ 幾何標準偏差 1.59



粉じん濃度の幾何平均値 4.14mg/m³ 幾何標準偏差 1.57



粉じん濃度の幾何平均値 3.75mg/m³ 幾何標準偏差 1.42



粉じん濃度の幾何平均値 3.15mg/m³ 幾何標準偏差 1.81

図-13 作業空間における粉じん濃度分布(高さ1.5m)と指針で指定された測定点の粉じん濃度

にない送気式, 送排気式 I, III の場合は, 送気管の反対側で高粉じん濃度になる傾向がある. 粉じん濃度の偏りは特に送排気式 III の場合に顕著であり, 粉

じん濃度の幾何標準偏差も大きくなっている. また, 幾何平均値で表した粉じん濃度は送気式で最も高く, 送排気式 III で最も低くなる.

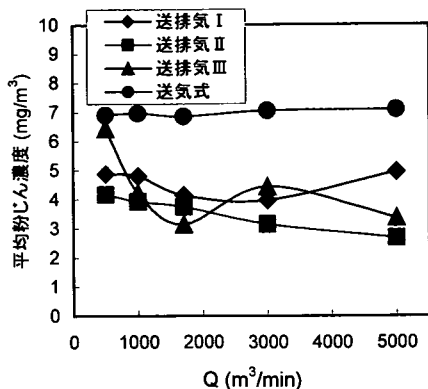


図-14 各換気方式での幾何平均値の換気量による変化

図-8 に示したようにトンネル内に障害物がある場合、床面から1.5mにおける平面内粉じん濃度分布は障害物が存在しない時に比べ全体的に粉じん濃度が上昇するが、障害物の有無による粉じん濃度の差を、建災防指針に従った6箇所の測定点での粉じん濃度値の幾何平均で比較すると、障害物の存在によって1.83倍粉じん濃度が高くなっている。

計算結果から建災防指針による測定方法で得た粉じん濃度幾何平均値と換気量の関係を、換気方式毎に図-14に示した。送気式では換気量を増やしても粉じん濃度は低下しないが、送排気式では換気量が増加すると減少する。しかし、その減少は単調ではなく、送排気式ⅠやⅢでは、換気量増が粉じん濃度を上昇させる場合が生じている。換気量の増加は粉じんを希釈する一方で、切羽方向への逆流、切羽近傍での気流の乱れの影響が強くなるのがこの原因であり、切羽-送気口間の作業空間の平均粉じん濃度を最少にする最適な換気量が換気方式、風管配置に応じて存在すると考えられる。

(6) 粉じん濃度分布と指針による結果の比較

送排気式Ⅰで換気量比($Q^*=1$)の時の、床面から高さ1.5mの平面におけるトンネル軸方向の粉じん濃度分布を図-15に示す。図中には建災防指針による測定点で得られる粉じん濃度幾何平均値を比較して示した。ここで、複数の粉じん濃度曲線は、異なる断面位置 x における粉じん濃度分布を示す (x 方向に50分割された面に対応)。

粉じんが発生する切羽面で最大粉じん濃度となり坑口に向かって粉じん濃度が減少する。送気口から排気口の間には、ほぼ粉じん濃度が一定した領域が存在するが、排気口よりも坑口側では粉じん濃度が

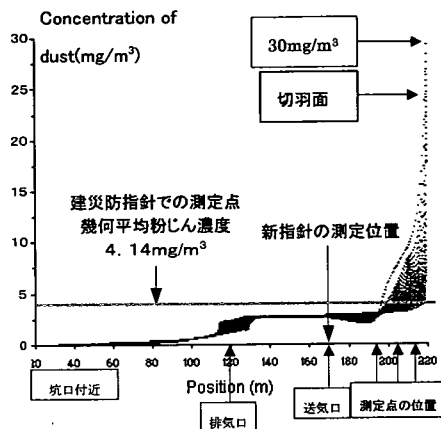


図-15 作業空間(高さ1.5m)における粉じん濃度分布と指針に従った測定粉じん濃度の比較

急減している。また、送気口から切羽の間では x 方向の粉じん濃度に偏りが生じており、送気管側で高粉じん濃度となっている。

建災防指針に従った測定点粉じん濃度の幾何平均値と比較すると、切羽近傍の粉じん濃度は8倍近くにも達しており、切羽-送気口間の領域を平均粉じん濃度で評価をすることは十分ではないといえる。平成13年4月からの新指針(切羽から50m、床上50cm以上150cm以下、側壁から1m以上はなれた点及び中央の点の3地点で 3 mg/m^3 以下)⁷⁾に従った測定位置は送気口の位置と一致しており、粉じん濃度がほぼ一定となる送気-排気口間の領域の管理指針として新指針は妥当なものといえる。しかし、建災防指針と同様に切羽付近の高粉じん濃度域の評価を想定していないため、切羽付近については、別の評価手法を検討する必要があると考えられるが、切羽付近では狭い領域に測定者が入ることは安全性に問題があり、測定点の検討のみではなく測定方法等も検討する必要がある。

送気口-排気口間における粉じん濃度は建災防指針による平均粉じん濃度に比べ小さい。また、新指針による測定値は建災防指針による値よりも低く、幾分危険サイドの評価となる。この領域内では場所による粉じん濃度変動が少なく、また測定場所や安全性を確保することが容易であり、今後トンネル全体の換気状態を監視するには適当であるといえる。

4. 結論

- (1) 送気式に比べ送排気式の換気効果が大きい。
- (2) 換気量の増加により送気式では巻き込み流れの

影響で粉じん濃度が低減されないが、送排気式では全体的な粉じん濃度が低減される傾向にある。

(3) 切羽近傍に障害物が存在すると、全体的に粉じん濃度が高くなる。

(4) 切羽近傍では、比較的粒径の大きな粒子の粉じん濃度が高く、各換気方式で粒子排出効果が異なる。

(5) 「建災防指針」と「新指針」に従った手法では切羽面近傍の高粉じん濃度領域を評価することはできないが、評価に適当な領域も存在する。

参考文献

- 1) 建設業労働災害防止協会: 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, 資料編: トンネル工事作業環境調査集計結果, 1998.
- 2) (社) トンネル技術協会: トンネル内吹付けコンクリート施工時の坑内作業環境に関する調査研究報告書, 1985.
- 3) ファジイ理論を用いた工事用換気システム, 建設機械化技術・技術審査照明報告書, (社) 日本建設機械化協会, 1994.
- 4) 吉川恵也: 国鉄におけるトンネル掘削中の換気, 建設の機械化, No.204, pp.16-22, 1967.
- 5) 大橋士郎, 原田実, 肥塚嘉剛: トンネル掘削中の換気

設備について, 鹿島建設技術研究所年報, vol.18, pp.225-235, 1994.

- 6) 建設業労働災害防止協会: 地下工事における粉じん測定の手引, 1986.
- 7) 厚生労働省: ずい道等建設工事における粉じん対策に関するガイドラインの概要, 2001.
- 8) Patankar, S.V.: *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere Publishing Co., New York, 1980.
- 9) 荒川忠一: 数値流体工学, 東京大学出版会, 1994.
- 10) Landauer, E. and Spalding, D.B.: *Lectures in Mathematical Models of Turbulence*, Academic Press, London, England, 1972.
- 11) Anderson, J. D. JR: *Computational Fluid Dynamics*, McGraw-Hill, New York, 1995.
- 12) Bird, R.B., Stewart, W.E. and Lightfoot, E.N.: *Transport Phenomena*, John Wiley & Sons, N.Y., 1960.
- 13) Hinds, W.C.: *Aerosol Technology*, 2nd ed., Wiley-Interscience Publication, New York, 1999.
- 14) Morsi, S.A. and Alexander, A.J.: An Investigation of Particle Trajectories in Two-Phase Flow Systems, *J. Fluid Mech.*, vol.55(2), pp.193-208, 1972.

(2001. 5. 17 受付)

FLOW AND DUST CONCENTRATION NEAR CUTTING FACE OF A MOUNTAIN TUNNEL UNDER CONSTRUCTION

Chikao KANAOKA, Masami FURUUCHI, Junichi INABA, Kazuyo OHMATA
and Toshihiko MYOJO

Flow patterns and dust concentration distribution in a mountain tunnel under construction have been numerically calculated. Influences of ventilation air flow rate, air tube configuration and an obstacle near the cutting face were discussed. Trajectories of different size particles were also calculated for different wall conditions for deposition. The dust concentration measured by the guideline measurement method was compared with calculated dust concentration distributions.

The injection-suction system was shown to be more effective than the simple injection system. Dust concentration in the injection-suction system decreased as the ventilation air flow rate is increased. A vortex flow developed around an obstacle led to increase in dust concentration. Removed fraction of particles from the outlet was affected by the wall condition.