

40. 高圧水を使用したトンネル掘削機の粉じん抑制

鹿島建設株式会社 原 田 実
横 田 依早弥

1. はじめに

部分断面掘削用のブーム式トンネル掘削機が中硬岩以下を対象として使用されるようになり、その性能向上によってかなりの硬さまで掘削可能となったが、それに伴って粉じんの発生量が増大し作業環境の改善を迫られている。

本報文は、ブーム式トンネル掘削機で掘削中に発生する粉じん対策として、その発生源での抑制を目的とした高圧水ジェットおよびスプレー法を取り上げ、その効果的な仕様および使用条件を決定するために行ったモデル実験と実際に適用した現場実験の結果概要について述べる。

2. 掘削中に発生する粉じん濃度

ブーム式トンネル掘削機（以下、掘削機という）は、その先端の回転カッターヘッドに取り付けられたバイト（あるいはピック）により切削するものである。粉じんは切削部から岩石と共に発生し、その発生量は掘削量すなわちバイト個数、切削深さおよびカッターヘッド周速に比例するが、実際には岩の種類、硬さなどの影響が大きく、特に割れ目の少ない硬岩掘削時において著しい。

図-1に掘削中の発生粉じん濃度の測定結果例を示す。切羽から10m以内の粉じん濃度は $120\text{mg}/\text{m}^3$ もあり、時には $300\sim 400\text{mg}/\text{m}^3$ にも達することがある。なお、これより後方5m付近に送風機を設置し、吸込運転（ $300\text{m}^3/\text{min}$ ）している。

また、図-2に粉じんの粒度分布の分析結果例を示す。この結果、粒径は $0.5\sim 5\mu$ （一般の浮遊粉じん； 10μ 以下）と微細なものが多く、中心粒径（幾何重量平均粒径）が 1.5μ と小さい。このような発生粉じんは、掘削機のオペレータが操作位置から掘削面が全く見えないほどになり、作業性、安全性を著しく低下させている。

3. 高圧水による粉じん抑制の方法

(1) 高圧水ジェット法

高圧水ジェット法は、図-3に示すようにバイト先端の切羽面に吐出圧力 $10\sim 30\text{kg}/\text{cm}^2$ の高圧水を与え、切羽面および切削された岩石・岩粉をすみやかにぬらして粉じんを抑制しようとするものであ

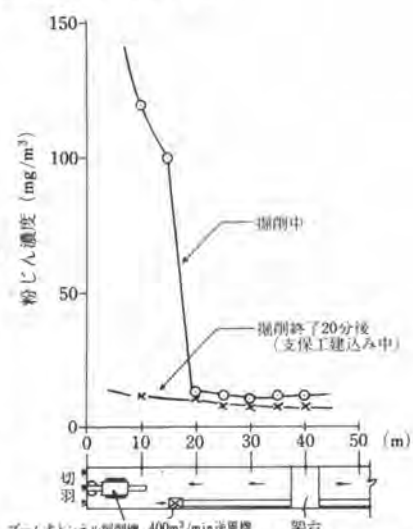


図-1 トンネル延長方向における粉じん濃度の測定結果例

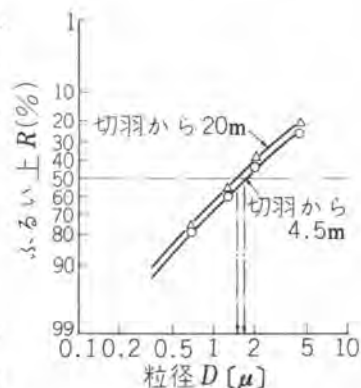


図-2 掘削時の粒度分布

る。抑制効果は、ジェットの水流量、速度に大きく関係し、この値を大きくするほど効果的である。しかしトンネル工事では、水流量および高圧ポンプの使用に制限を受けるため、これを考慮した適切なジェットの使用法を見つける必要がある。

高圧水ジェットは、噴射軸上動圧の距離減衰が著しく、その関係は

$$\left. \begin{aligned} \ell_1/d_n = 0 \sim 90 \text{ のとき, } P/P_0 &= (d_n/\ell_1)^{0.07} \\ \ell_1/d_n = 90 \sim 600 \text{ のとき, } P/P_0 &= (d_n/\ell_1)^{\alpha + \beta(\ell_1/d_n)^2} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 $\alpha = 0.088$ 、 $\beta = 4.6 \times 10^{-7}$ 、 P_0 ：ノズル吐出の動圧、 P ：軸上平均動圧、 ℓ_1 ：ノズル出口からの距離、 d_n ：ノズル径

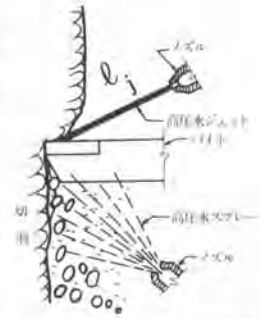


図-3 高圧水ジェットと高圧水スプレー

となり、抑制に効果的な動圧として $P = 5 \text{ kg/cm}^2$ 以上とし、 $P_0 = 20 \text{ kg/cm}^2$ とした場合、 $\ell_1/d_n = 500$ となり 1.0ϕ のノズルであれば $\ell_1 = 500 \text{ mm}$ 以下で使用することができる。

(2) 高圧水スプレー法

高圧水スプレー法では、水滴の速度を早くして粉じん粒子に衝突させることを目的とするから、ポテンシャル流として、水滴粒子の捕集効率 η_r と慣性パラメータ ϕ の関係は、 $\eta_r = \{ \phi / (\phi + 0.24) \}^2$ で示される。スプレーノズルから高圧水で噴射した場合の水滴径 δ は、 100μ 前後と小さいため、ノズル出口から離れるに従って速度減衰が大きく、捕集効率が異なってくる。従って、 η_r をノズル出口からの距離 ℓ_2 の変数として $\eta_r(\ell_2)$ で表わすと、水滴がガス流に対して相対的に x 移動すれば、高圧水スプレーの抑制効率 η は次式で表わすことができる。

$$\eta = 1 - P_i, \quad P_i = \exp \left\{ - \int_0^{\ell_2} [k \cdot \eta_r(\ell_2) \cdot G] / \delta \right\} \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 P_i ：通過率、 G ：水ガス比、 k ：スプレーの形状係数

高圧水スプレーは、水滴粒子の速度が大きいため慣性パラメータが大となる効果と、水滴が速くまで飛ぶために ℓ_2 が大きくなる効果とにより、少量で高効率な抑制が期待できる。

4. モデル実験

(1) 実験方法

実験に使用した掘削機はロードヘッダ (MRH-S 40C 型) であり、主な仕様はカッターヘッド周速 11 m/sec 、バイト数 30 個、カッター電動機 37 kw 、総重量 15 t である。掘削供試体は、圧縮強度が $100 \sim 200 \text{ kg/cm}^2$ (材令 2 週間) のコンクリートであり、大きさが $4 \text{ m(W)} \times 2 \text{ m(D)} \times 2 \text{ m(H)}$ である。掘削は図-4 に示す掘削機、供試体を包囲する 240 m^3 のチャンパー内で行い粉じん発生に対する外乱の影響を防いだ。

高圧水ジェット法は、カッターブームの周囲に取り付けた 10 個のノズルからバイト先端の切削面を狙って噴射し、この吐出圧力は、高圧ブランチャーポンプの使用により約 20 kg/cm^2 まで得られるようにした。一方、高圧水スプレー法では、スネーク式スクリーポンプの使用により脈動の少ない高圧を加え、 400ϕ 風管内で噴射し、けい砂 (幾何平均粒径 1.7μ) を含んだ空気の流れを 3.0 m/sec に調節した。

図-5 に使用したジェットノズル、スプレーノズル (噴角 $50 \sim 60$ 度の充円錐型) の各種口径別の吐出圧力と吐出水量の関係を示す。抑制効果はローボリュームエアサンプラ、粒径分布はアンダーセン

サンブラによって測定した。

(2) 高圧水ジェット法による実験結果
図-6に吐出圧

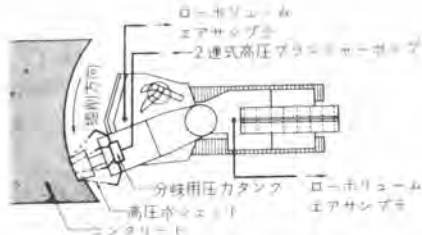


図-4 モデル実験の概要

力20kg/cm²における

ジェットノズル径と抑制効率の関係を示す。この結果、ノズル径 d_n は大きいほど抑制効率が良く、これは(1)式に示すよう

に d_n が大きいほど動圧の距離減衰が小さくなり、また、吐出水量が d_n の2乗に比例して多くなるためである。このときの効果的な距離としては $l_j = 40 \sim 50$ cmであったが、この距離はノズル個数、ノズル径によって多少異なってくる。図-7は $l_j / d_n = 420$ のときの吐出圧力と抑制効率の関係を示し、圧力減衰 P / P_0 は(1)式から0.35、すなわち吐出圧力が20kg/cm²のとき、掘削面でのジェットの平均動圧は7kg/cm²となり、このときの抑制効率は70~80%であった。

以上の結果から、ジェットにより少量で抑制効率を高めるには、ノズルをできるだけ掘削面に近づけて噴射するのが良く、また吐出圧力は10~20kg/cm²が必要である。

図-8はアンダーセンサンブラにより測定した部分抑制率の結果であり、粒径の小さなものの方が良く抑制されている。これは一般の集じん法(ろ過、洗浄、電気集じんなど)には見られない特異な現象であり、この理由としてはジェットの抑制原理が粉じん発生面、すなわち掘削面および掘削した岩石、岩粉をすみやかにぬらすことであり、このとき小さな粒子ほど発生面から離れる速度が小さいので、発生面に噴射された水に捕集されてしまうためと考えられる。

(3) 高圧水スプレー法による実験結果

高圧水スプレーによる抑制効率 η ($= 1 - P_1$)は、図-9に示すように、吐出圧力 $P_0 = 5$ kg/cm²のとき27%であるのに対し、 $P_0 = 20$ kg/cm²では63%であった。図-10は、口径0.8, 1.0, 1.4, 2.0φの4個のノズルを使用して、吐出水量 Q_0 と抑制効果の関係を示したものである。水ガス比 G と通過率 P_1 の関係は(2)式で示され、 $Q_0 = 1$ L/min(このときの水ガス比は 0.43×10^{-4})を基準としたときの理論値(k , $\eta_r(l_n)$)がノズル径の影響を受けないとして計算)を破線で示した。 Q_0 が5 L/minを超える点から理論値との差が大きくなり、これ以

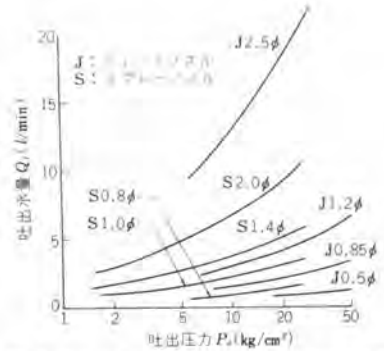


図-5 ジェットおよびスプレーノズルの吐出水量

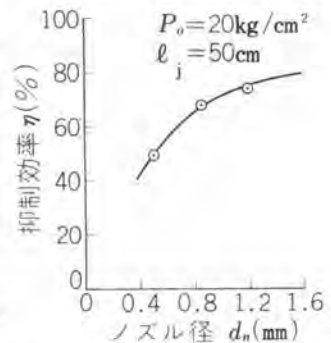


図-6 ジェットノズル径と抑制効率の関係

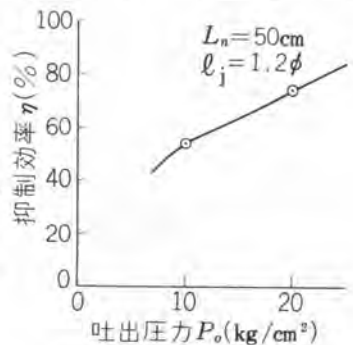


図-7 ジェット圧力の効果

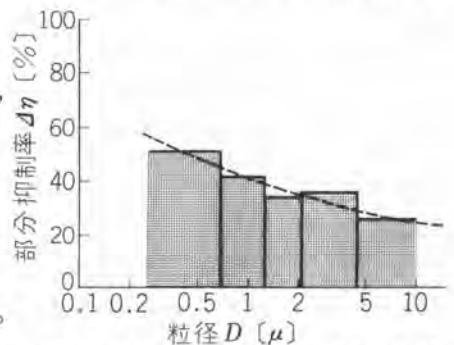


図-8 高圧水ジェットの部分抑制率

上のノズル径の増大による水量の増加は効果的でない。

一方、吐出水量を2.5 l/minに一定としてみた場合、図-9および図-10から $P_0 = 5 \text{ kg/cm}^2$ のとき $\eta = 27\%$ 、 $P_0 = 15 \text{ kg/cm}^2$ のとき $\eta = 40\%$ となり高圧水スプレーの効果が見られる。

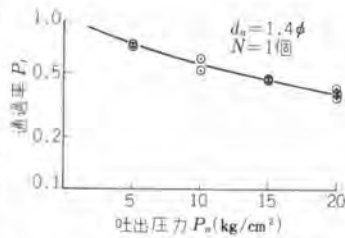


図-9 スプレー吐出圧力の効果

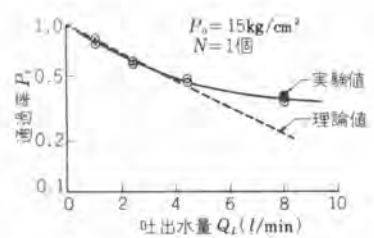


図-10 スプレー吐出水量の効果

5. 現場実験

現場実験では、モデル実験で得られた結果をもとに、高圧水ジェットおよび高圧水スプレーを併用した方法を実際のトンネル工事現場へ適用し、その効果について調

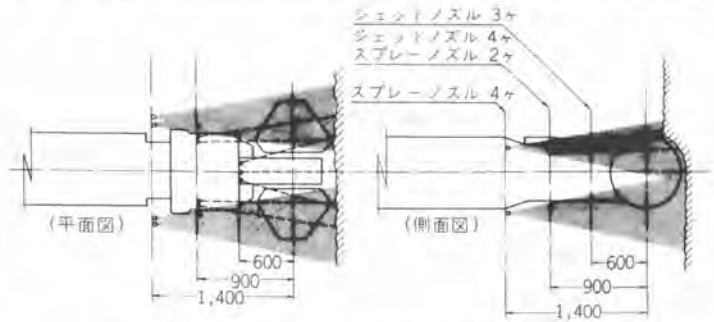


図-11 カッターヘッド部のノズル取付状況

べたものである。掘削機はアルビネマイヤー (AM50) で、この主な仕様はカッター周速 3 m/sec 、バイト数90個、カッター電動機100kw、総重量が23tである。

表-1 掘削時の抑制効果(抜粋)

高圧水の使用方法は、掘削面に対してジェット、浮遊粉じんに対してはスプレーを効果的に与えるために、カッターブームの上側にはジェットノズル(25φ)、下側にはスプレーノズル(2.0φ)を各々取り付けて噴

水噴射の有無	粉じんの重量濃度(mg/m³)				抑制効果(%)
	1	2	3	平均	
無	176	305	143	208	—
有	45	39	44	43	79

射するものである(図-11参照)。水の噴射は高圧ブランジャーポンプを使用し吐出圧力を 10 kg/cm^2 、ノズル13個の総水量を 130 l/min とした。

表-1に高圧水ジェットおよびスプレーの噴射の有無に対して各々3回にわたってハイボリュームエアンプラで測定した抑制効果を示す。平均重量濃度から計算した抑制効率は“約80%”に達し、高圧水による粉じん発生源対策が効果的であった。

6. おわりに

今回は、掘削機の稼働時に発生する粉じんの抑制法として、高圧水ジェット法および高圧水スプレー法の組み合わせを取り上げて実機に適用した結果、抑制効率が80%であり効果的であることが判明した。しかし、掘削時の粉じん濃度は非常に高く(水噴射後でも $40 \sim 50 \text{ mg/m}^3$ ある)、もっと高濃度になることも予想されるため、掘削時の作業性を考慮すれば、さらに高効率の対策方法の適用が必要である。現在は、この発生源近傍での抑制法に加えて、切羽付近に設置できる合理的な局所集じん装置について検討中である。次の機会には粉じん抑制法の最適システムについて紹介する予定である。