

トンネル坑内に浮遊する粉じん物性の 時系列変化の一事例

岸田 展明¹・進士 正人²

¹学生会員 山口大学大学院 理工学部システム設計工学系専攻 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)
E-mail:n004wc@yamaguchi-u.ac.jp

²正会員 山口大学教授 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

トンネル建設工事等で発生する粉じんは、それを吸引することで建設作業員が健康被害を引き起こす原因物質のひとつと言われている。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」では、吹付けコンクリート作業中にトンネル切羽から50m地点において粉じん濃度が $3.0\text{mg}/\text{m}^3$ 以下となるように目標レベルが定められている。しかし、浮遊粉じんは、吹付けコンクリート作業中だけでなく、発破作業等を含むすべての作業工程において発生すると考えられる。本研究では、トンネル工事の全作業工程並びに切羽からの距離における、粉じんの成分や粒度分布などの物性の変化を現場調査した。その結果、吹付けコンクリート作業時以外にも粉じん濃度を測定する必要性を確認した。

Key Words : tunnel, dust monitoring, particle size distributes, dust density, suspended dust

1. はじめに

トンネル建設工事等で発生する粉じんは、人体に吸引されたとしてもその大部分は、一旦吸引されても気管支の再喀出機能により体外に排出される。しかし、微小な粉じんは排出されず、肺胞内に滞留し、やがて肺胞に重鎮する。そのため、場合によっては、肺の主要な役割である呼吸機能が失われ、「じん肺症」を引き起こす原因となると言われている¹⁾²⁾。また、「ずい道等建設工事における換気技術指針」では、鉱物性粉じんによって引き起こされるじん肺症は、吸入性粉じんに分類される $7.07\mu\text{m}$ 以下の粉じんが原因であり、 $1\sim 5\mu\text{m}$ の大きさの粉じんがじん肺症を引き起こすと考えられている³⁾。これらの研究により、厚生労働省の「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」（以下、本文中では「ガイドライン」と略称する）において、吹付けコンクリート作業中にトンネル切羽から50m地点の粉じん濃度を $3.0\text{mg}/\text{m}^3$ 以下にするように管理目標が定められている⁴⁾。しかし、浮遊粉じんは吹付けコンクリート作業中だけでなく、発破作業やずり出し作業等、ほぼすべての作業工程において発生する。

本研究では、トンネル坑内の全作業工程や切羽からの距離ごとに粉じんの成分や粒度分布などの物性の時系列変化を調査し、吹付けコンクリート作業中以外でも粉じ



写真-1 吹付けコンクリートの作業状況

ん濃度を測定する必要性について検討を行った。また、粉じん濃度を測定には、一般的に光散乱式デジタル粉じん計（以下、本文中では“デジタル粉じん計”と略称する）使用されるが、デジタル粉じん計は相対濃度を測定する機器であるため、粉じん濃度を測定する場合は質量濃度換算係数（以下、本文中では“K値”と略称する）が必要となる。「ガイドライン」で示されているK値は、吹付けコンクリート作業中にトンネル切羽から50m地点での粉じん濃度測定を想定したものであり、その妥当性については今後の検討が望まれることを西村も指摘している⁵⁾。そこで、粉じん計とロウボリウムサンプラー

と併用して粉じん測定実施することでK値の時系列変化を調査し、吹付けコンクリート作業中以外の全作業工程ごとのK値の変動についても合わせて検討した。

2. 実験概要

(1) 現場概要

粉じんの測定は、発破掘削（補助ベンチ付全断面）により建設中の2車線道路トンネル（総延長約2km）の坑口から380m付近で実施された。主要建設設備の吹付けコンクリート施工時の配置を図-1に示す。図に示すとおり、トンネル建設時の換気は、坑外に設置した送風機（1500m³/min）から切羽に向い送風し、切羽後方約100mの位置に設置した移動式台車に積載した電気集じん機（最大処理能力2000m³/min）で切羽で発生した浮遊粉じんを集じんする方式が採用されている。また、吹付けコンクリートには石炭灰を添加し、吹付け時の粉じんの発生抑制効果を期待した。

(2) 測定機器概要

a) ロウボリウムサンプラー

写真-2に浮遊粉じんの測定機器を示す。この写真に示すように、粉じん量の測定は、ロウボリウムサンプラー（柴田科学製“C30”）を用いて、20L/minの吸引量で0.5m³の空気をガラス繊維フィルター（柴田科学製“T60A20”，以下本文中では“フィルター”と略称する）に通過させ総粉じんを採取した。また、採取配置は図-2に示すように切羽から50m、70m、90m、110mの計4点における床土1.3mの位置とし、0.5m³の吸引が終わるごとにフィルターを交換しながら一作業工程（作業サイクル）が終了するまで粉じん量測定した。

b) デジタル粉じん計

デジタル粉じん計（柴田科学製“LD-3K2”）は、図-2に示す測定位置にロウボリウムサンプラーの測定と併行して設置し、粉じん濃度を1分間隔で測定した。

(3) 分析方法

a) 元素分析

ロウボリウムサンプラーで粉じんを採取したフィルターを低真空走査電子顕微鏡（日本電子製“JSM-5600LV”，以下本文中では“SEM”と略称する。）を用いて観察した。加速電圧15Kv、倍率2000倍で観察したSEM画像（65×47.5μm）を用いて、その中の任意に選んだ3箇所を観察し、SEMに組み込まれたエネルギー分散形X線分析装置（日本電子製“JED-2200”）を用いて、粉じんと思われる箇所を選択しZAF法⁹⁾により定量分析を行い、

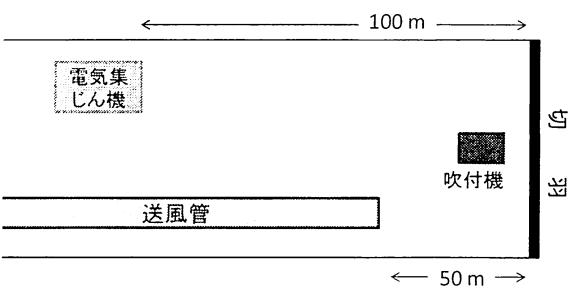


図-1 トンネル坑内の設備配置図

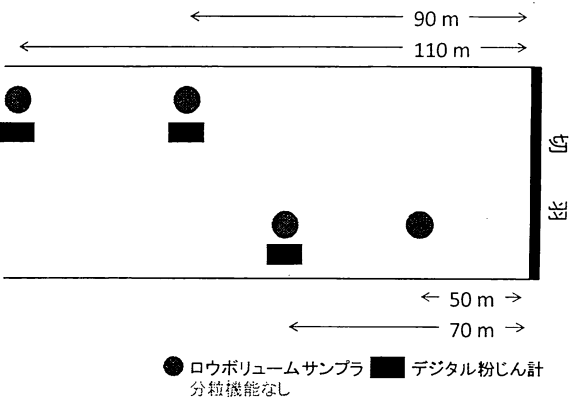


図-2 測定機器の配置図



写真-2 浮遊粉じん測定状況

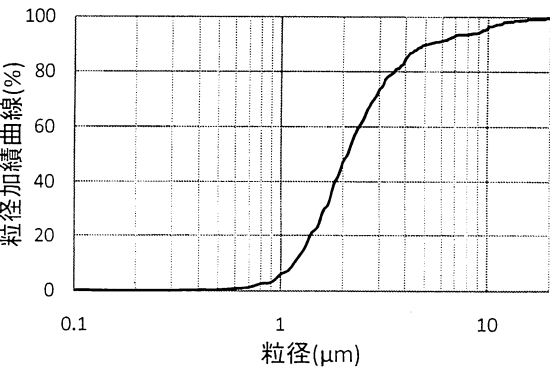


図-3 粒径加積曲線

構成元素単体の重量パーセントを調査した。

b) 粒度分析

粒度分布は、a) 元素分析と同様、SEM画像（65×47.5μm）の任意に3箇所選択し、一定方向の粉じんの粒子径をそれぞれの画像あたり計1000個程度の測定を行い、個数基準幾何平均粒径⁷⁾を算出するとともに粒径0.1μm毎の粉じん粒子の累積から図-3に示すような粒径加積曲線を求めた。図-3はその一例である。

c) 粉じん濃度とK値の算出

ロウボリウムサンプラーで粉じんを付着させたフィルタの重さと使用前のフィルタの重さとの差分から粉じんの重量を算出し、吸引量（0.5 m³）から質量濃度を求めた。次に、b) 粒度分析から求めた粒径加積曲線を用いて、7.07μm以下の吸入性粉じんの濃度を算出した。また、「ガイドライン」では、デジタル粉じん計による相対粉じん濃度は以下の式により求められる。

相対粉じん濃度(mg/m³)
=質量濃度換算係数(mg/m³/cpm)×相対濃度(cpm) (1)

ここで、相対濃度：デジタル粉じん計によって得られる
相対濃度(cpm)

式(1)を用いてロウボリウムサンプラーで求めた質量濃度とデジタル粉じん計で測定した相対濃度からそれぞれの作業工程におけるK値を算出した。

3. 実験結果

(1) 粉じんの物性調査

a) 粉じんの形状

SEMで撮影したトンネル作業工程毎における代表的な粉じんの写真を写真-3～5に示す。すべての写真に見られる繊維状のものは、ロウボリウムサンプラーで浮遊粉じんをサンプリングする際に使用したガラス繊維フィルタである。写真からわかるように、写真-4, 5に示す削孔作業時、ずり出し作業時の粉じんは削孔や発破によって細かく粉砕されたと岩石であると考えられる角張った粉じんが多く見られる。次に、写真-5に示す吹付けコンクリート作業時に採取された粉じんは、丸みを帯びた形状の粉じんなどコンクリートの粒子と考えられる粉じんが見られ、削孔作業やずり出し作業時に採取した粉じんとは異なる形状を示す。

以上のことから、トンネル工事の作業工程ごとに、浮遊している粉じんの種類及び形状が異なっていることがわかった。



写真-3 削孔作業時の粉じんの SEM 写真

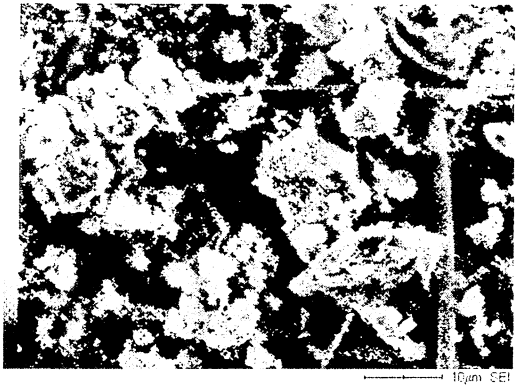


写真-4 ずり出し作業時の粉じんの SEM 写真

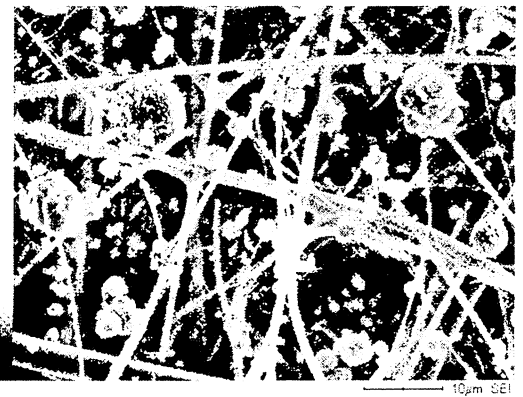


写真-5 吹付けコンクリート作業時の粉じんの SEM 写真

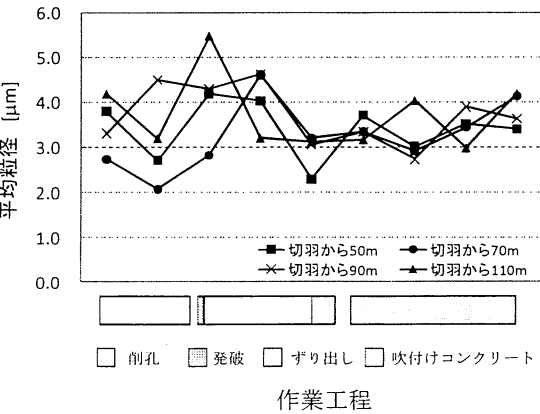


図-4 作業工程と測定位置における平均粒径の変化

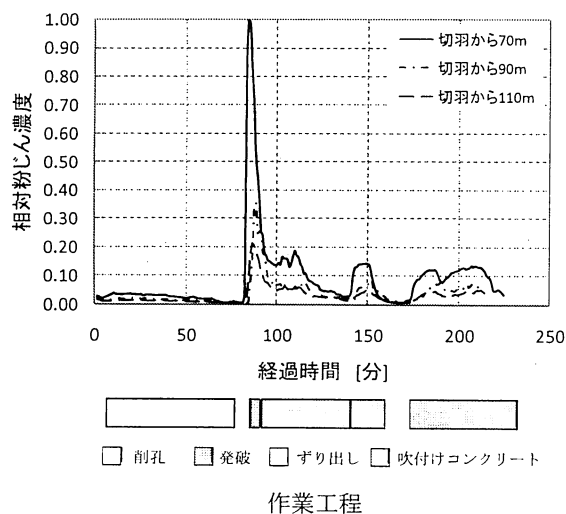


図-5 測定位置における相対粉じん濃度の経時変化

b) 平均粒径

SEM写真より求めた粒径加積曲線から平均粒径を求め、測定位置及び測定位置における平均粒径の変化をまとめた図を図-4に示す。この図から、発破・ずり出し作業時に切羽から110m地点での平均粒径が $5.5\mu\text{m}$ となり最大になったことがわかる。また、測定位置に関わらず、発破・ずり出し作業時に最も平均粒径は大きくなり、削孔作業時に最も小さくなることもわかった。すなわち、浮遊粉じんは切羽から離れるに従って、徐々に重い粉じんから沈降するが、発破によって発生した粉じんはその爆風によって沈降する前に十分後方まで大きく運ばれるものと考えられる。また、ずり出し作業時には、ずりを排出するために移動トラックによって堆積し始めた粉じんが再び巻き上げられたことが平均粒径を大きくした要因と考えられる。

これらのことより、トンネル工事の作業工程ごとに、浮遊粉じんの平均粒径は変化することがわかった。

c) 粉じん濃度

各測定位置においてデジタル粉じん計で測定した相対粉じん濃度を図-5に示す。ここで、相対粉じん濃度は、最大値を1.0として比較した。この図から、測定位置に関わらず、削孔時は粉じん濃度が低いことがわかる。また、吹付けコンクリート作業時だけでなく、発破・ずり出し作業時においても相対粉じん濃度が高くなっていることがわかった。また、発破作業時は、相対粉じん濃度が瞬間的に最も高くなり、切羽に近いほど大きいことがわかる。

d) 成分分析結果

SEMIに組み込まれたエネルギー分散形X線分析装置による成分分析の結果を図-6～9に示す。図-6は、切羽から50m地点での作業工程ごとの成分分析結果である。この図から、削孔作業時やずり出し作業時と比較すると吹

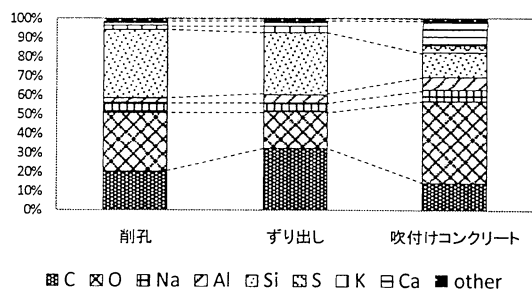


図-6 切羽から50m地点の成分比較

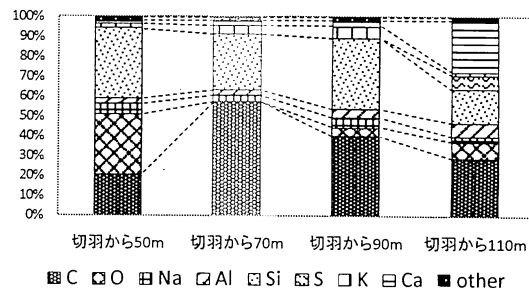


図-7 削孔作業時の成分比較

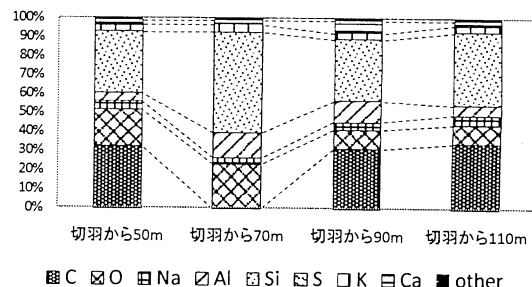


図-8 ずり出し作業時の成分比較

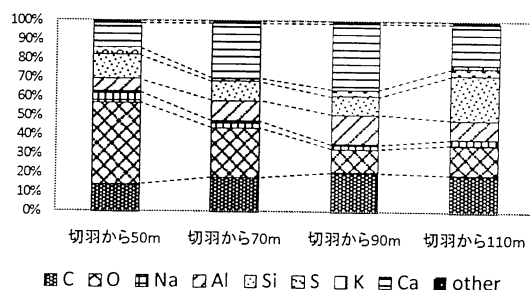


図-9 吹付けコンクリート作業時の成分比較

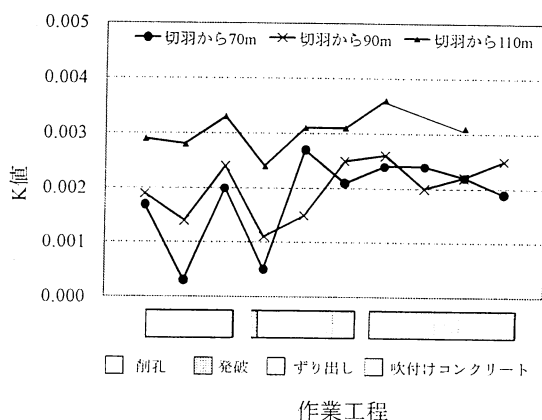


図-10 K 値の時系列変化

付けコンクリート作業時の粉じんには、吹付けコンクリートの成分と同様に、NaやCaが多く含まれていることがわかり、写真-5における粉じんの大部分はコンクリート成分であることがわかる。また、図-7～9は、作業工程ごとに各測定位置の成分分析結果を比較した図である。これらの図から、作業工程や測定地点の違いによらず、人体に有害とされるケイ素（Si）を含んでいることがわかった。

(2) K値の時系列変化

測定位置ごとのK値の時系列変化を図-10に示す。この図から、すべての作業工程において切羽から110m地点でのK値は、他の測定位置に比べて大きく、吹付けコンクリート作業時が最も大きい0.0036となった。また、ずり出し作業時に切羽から70m地点のK値が最も小さく0.0003であった。

以上のことから、K値は作業工程、測定位置により変化することがわかった。

4. まとめ

本研究では、吹付けコンクリート作業時以外の作業工程での粉じん濃度測定の実用性を検討するため、トンネル工事の全作業工程において切羽からの距離別に、粉じんの成分や粒度分布などの物性の時系列変化を調査した。また、デジタル粉じん計で使用されているK値に着目し、トンネル工事の測定位置ごとのK値の時系列変化を比較した。これにより明らかになったことを以下にまとめる。

A)トンネル作業中の浮遊粉じんの形状、平均粒径や成分

は作業工程により大きく変化する。

B)粉じん濃度は、吹付けコンクリート作業時だけでなく、発破・ずり出し作業時においても高くなる。また、トンネル工事の作業工程や測定位置に関わらず、浮遊粉じんには人体に有害とされるケイ素が含まれていることから、吹付けコンクリート作業時だけでなく、他の作業工程においても粉じん濃度を測定することも今後検討する必要がある。

C)トンネル工事の作業工程や測定位置によって、K値が変化する。そのため、デジタル粉じん計で粉じん濃度を測定する際には、各作業工程や測定位置によって、それぞれ状況に即したK値を設定することも合わせて検討する必要がある。

今後機会があれば、再度同様の現場実験を行い、資料の収集に努めて行きたいと考えている。

参考文献

- 1) (財) 労働科学研究所：日本のじん肺と粉じん公害—その予防と対策のために—, pp.77-78, 1977.
- 2) 名古屋 俊士：粉じんの健康影響とその最近動向について、セイフティダイジェスト, Vol.55, No.4, pp.12-19, 2009.
- 3) 建設業労働災害防止協会：改訂 ずい道等建設工事における換気技術指針（設計及び粉じん等の測定）, p53, 2005.
- 4) 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, p.8, 2008.
- 5) 西村 和夫：トンネル技術の発展と現状, 土と基礎, Vol.54, No.11, pp.1-5, 2006.
- 6) 日本電子顕微鏡学会関東支部：走査電子顕微鏡の基礎と応用, pp.443-444, 1985.
- 7) 粉体工学会：粉体の基礎物性, p.3, 2005.

THE FIELD RESEARCH ON THE PHYSICAL PROPERTIES OF SUSPENDED DUST DURING ALL TUNNEL CONSTRUCTION PROCESS

Noriaki KISHIDA and Masato SHINJI

Generally, the pneumononiosis is caused by the suspended dust which the particle size is less than 7.07 μm . In the guideline, the target level of the dust density is measured at 50 m behind from the tunnel face during the sprayed concrete works. However, the suspended dust is generated the every tunnel construction works.

In this paper, the result of field research on time-scale changes of suspended dust during all tunnel construction process is described. As the result, the necessity of the dust density measurement except for the sprayed concrete work was confirmed.