

◆ 報 文 ◆

トンネル吹付け時の粉じん低減技術の開発

大下武志* 波田光敬** 井谷雅司*** 尾花誠太郎****

1. はじめに

平成12年12月に厚生労働省は「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、「ガイドライン」と記す)を策定した。このガイドラインにおいて、初めて粉じん濃度目標レベル $3\text{mg}/\text{m}^3$ が示された。

そこで、(独)土木研究所、(財)先端建設技術センター、石川島播磨重工業(株)、(株)エヌエムピー、鹿島建設(株)、(株)カテックス、ケービーシーマシナリ(株)、(株)鴻池組、小林エンジニアリング(株)、信越化学工業(株)、太平洋マテリアル(株)、電気化学工業(株)、西松建設(株)、日鉄鉱業(株)、(株)フジタ、前田建設工業(株)、三井住友建設(株)、(株)三井三池製作所、リブコンエンジニアリング(株)の計19機関により、平成14年度から3年間にわたり、ずい道建設における吹付け作業時の発生粉じん量低減技術および局所集じんシステムの開発に関する共同研究を民間提案型で実施した。

この研究では、次の技術分野について検討し、技術改良・開発等を行った。

- (1) 吹付けコンクリートの配合等による低減技術
 - ①粉じん低減剤を使用する方法
 - ②スラリー急結剤を使用する方法
 - ③液体急結剤を使用する方法
 - ④Sand Enveloped with Cement (以下、「SEC」と記す)により製造したベースコンクリートを使用する方法
 - ⑤石灰石やシリカヒュームなど微粒分を加えた高品質吹付けコンクリートを使用する方法
- (2) 吹付け機械による低減技術
 - ⑥回転力方式で遠心カタイプの吹付け機械(以下、「ダストレス吹付け機械」と記す)で主に粉体急結剤を使用する方法
 - ⑦回転力方式で打撃投射タイプの吹付け機械(以下、「エアレス吹付け機械」と記す)で液体またはスラリー急結剤を使用する方法
- (3) 集じん技術による低減技術

- ⑧局所集じんシステムを使用する方法
- ⑨伸縮風管システムを使用する方法

2. 研究方法

この研究では、実大規模の模擬トンネルで開発対象とする技術について吹付け試験を行うとともに、実際の試験施工等により確認することとした。なお、各技術は湿式方式の吹付けを対象とした。

2.1 模擬トンネルの概要

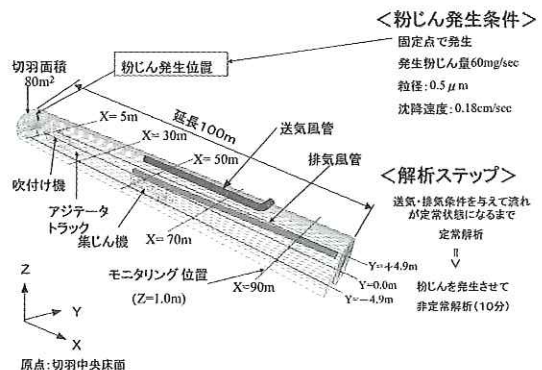
吹付け方法および換気方法などの技術の効果を確認するため、実大規模でコンクリート吹付けや換気など種々の条件を変えて実証実験を行った。実験には表-1の諸元の模擬トンネルを用いた。

表-1 模擬トンネル諸元

実験棟	構造	RC造 (30m)、鉄骨造 (70m)
	内空断面積	81.7m^2
送風機	送風量	最大 $1,500\text{m}^3/\text{min}$
	風管径	1,500mm
集じん機	集じん形式	バグフィルタ
	処理風量	最大 $1,800\text{m}^3/\text{min}$

2.2 換気および集じん条件の影響

模擬トンネル内部の換気条件と粉じん濃度分布との関係を把握するために解析を行った。解析は、 $k-\varepsilon$ 法による三次元乱流解析方法を用い、図-1に示す解析モデルにおいて、切羽付近の定位置で



一定量の粉じんを発生させた状態で、換気・集じん条件を変えて各平面位置のGL + 1.0mでの粉じん濃度のモニタリングを行った。

解析結果より、次のことがわかった。

- ・集じん位置を切羽より70mとした場合には、集じん風量を増加しても、切羽側の環境改善にはさほど有効ではない。
- ・送気量が多いほど50m地点での粉じん濃度の低減効果は高い。
- ・切羽付近では、送気口（風管先端）位置が切羽に近い方が粉じん濃度は低い。

2.3 吹付けに用いる圧縮空気量の影響

図-2は、模擬トンネルにおいて同じ換気条件で行った従来技術^{注1)}や①～⑤および⑦の技術による吹付け試験時の湿式のコンクリートポンプ搭載型吹付け機械で使用したほぐしエア^{注2)}および急結剤の圧送エアを合計した総圧縮空気量と粉じん濃度（切羽から50m地点で測定した質量濃度）の関係を示したものであり、次のことがわかった。

- ・総圧縮空気量が多くなると粉じん濃度が上がる。
- ・総圧縮空気量を全く使用しない⑦の吹付け方法でも、3mg/m³以下ではあるが粉じんは発生する。したがって、粉じん濃度を低減するためには、

圧縮空気量を少なくした吹付け技術が望ましい。

一方、ほぐしエアを用いない吹付け方式を除いては、圧縮空気量を少なくすると脈動等が発生し、圧送ホース内での閉塞を招き、吹付け作業の障害となることがあるので圧縮空気量を適切なものとする必要がある。

2.4 開発技術の目標と試験項目

山岳トンネル工事におけるショートベンチカット工法による吹付け作業時の一般的な坑内機械配置の例を図-3に示す。切羽では吹付け機械とアジテータトラックを配置して吹付けが行われ、風管の先端は上半作業の支障とならないように切羽から30m～70m付近にある。さらに、ブレーカなどの掘削機械の後方に大型集じん機が配置されることが多い。

このような坑内での機械配置状況では、大型集じん機による効果がさほど有効でないこと、および送風による低減効果は風量に依存せざるを得ないこととなる。

一方、トンネル延長や断面の大きさなどにより送風量に限界があることおよび経済性などの点を考慮する必要がある。

そこで、粉じん対策としては、粉じんの発生量を少なくする方法および効率的に除去する方法に着目した。そして、開発技術の目標は、通常の吹付け作業時の施工性および吹付けコンクリートの強

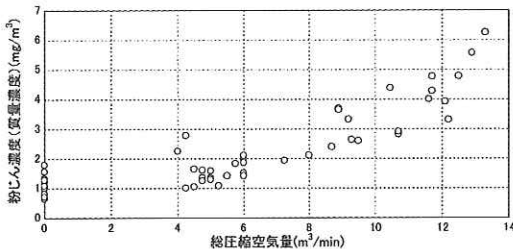


図-2 総圧縮空気量と粉じん濃度の関係

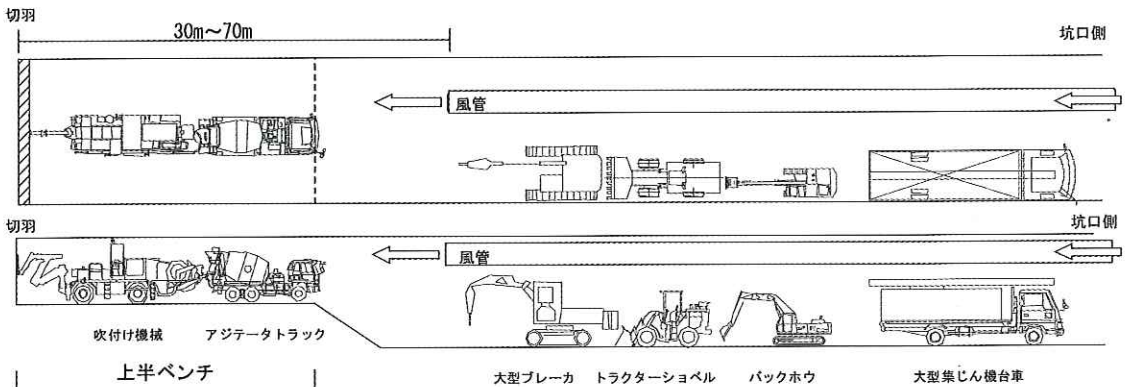


図-3 ショートベンチカット工法による吹付け作業時の坑内切羽付近での機械配置の例

注1) 本報では、①～⑨の技術を除き、粉体急結剤を用いたエア圧送方式で、単位セメント量 360kg/m³とし、混和剤等を含まない配合での湿式吹付けを「従来技術」と記す。

注2) 本報では、主にコンクリートの圧送に用いる圧縮空気を「ほぐしエア」と記す。

度についても満足する必要があることから、表-2のとおりとし、前記①～⑨の技術および基準となる従来技術について、吹付け試験を行った。

なお、施工性の指標の一つとして掘削1サイクル当りの実吹付け時間が該当すると考え、吹付け機械の吐出能力は10～12m³/hで使用されることが多いことから¹⁾、作業能力を設定した。

表-2 開発技術の目標

項目	性能
粉じん濃度	湿式方式で吹付けた場合において、切羽より50m離れた位置で3mg/m ³ 以下
施工性	作業能力10～12m ³ /h以上
強度	設計基準強度 $\sigma_{28} = 18\text{N}/\text{mm}^2$

模擬トンネルでの試験は、表-3に示すように骨材の粒度分布やスランプなどを変えた場合や湧水(約0.5～1l/分/箇所)の有無について行った。

表-3 試験項目

項目	測定項目			変動パラメーター		
	粉じん濃度	はね返り ⁴⁾	湧水時の付着	骨材の粒度分布やスランプ	換気量	局所集じん機的位置
従来技術	○	○	○	○	○	
①～⑦	○	○	○	○	○	
⑧	○				○	○
⑨ ³⁾	○				○	

3. 各技術の試験結果

模擬トンネルでの従来技術による試験結果は、表-4のとおりとなった。

表-4 従来技術による粉じん濃度

換気条件		切羽から50m地点の粉じん濃度 (mg/m ³)
送風量 (m ³ /min)	集じん風量 ²⁾ (m ³ /min)	
600	900	9.39
1000	1260	6.89
1500	1800	5.66

備考：ここに示す粉じん濃度は、模擬トンネルでの実験結果であり、実際のトンネルとは異なる。

ここで、従来の吹付け方法での粉じん濃度は開発技術の比較目標となるため、換気条件としては開発技術との差異が明確となる程度が望ましいこと、開発技術の目標はガイドラインに示された粉じん濃度3mg/m³以下であること、および平成12年当時の実トンネルにおける平均的な送風量が

1000m³/min程度であることから、模擬トンネルの吹付け試験時の送風量を1000m³/min(風管先端は切羽から50m地点)、大型集じん機処理風量を1260m³/min(切羽から77m地点)とした。

そして、この換気条件を共通として①～⑨の技術について改良・開発を行った。

なお、以下では、各技術の粉じん低減効果を下記の式³⁾に用いられる係数 a により記述する。

$$\text{所要換気量} = \frac{a (90 \cdot A_t)}{G_a} \quad (\text{m}^3/\text{min}) \quad (1)$$

ここに、 a ：粉じん発生量低減対策による低減効果係数、90：定数 (mg/min/m²)、 A_t ：トンネル掘削断面積 (m²)、 G_a ：ガイドラインで示される粉じん濃度目標レベル (mg/m³)

3.1 粉じん低減剤による技術

この技術は、粉じん低減剤を添加した配合として粉体急結剤を用い、エア圧送方式で吹付けるものである。湿式用の粉じん低減剤は、セメントペーストの粘性を高め、セメントペーストや骨材微粒子の分離を少なくして粉じんの発生を低減するものであり、主成分がセルロース系水溶性高分子のものを用いた。

粉じん低減剤は、通常コンクリートプラントに設置した供給機により添加されるが、研究では、小規模工事などで供給機を設置できない場合にも対応できる手投入(写真-1)で添加できる粉じん低減剤を新たに開発した。



写真-1 袋詰粉じん低減剤の投入状況

3.2 スラリー急結剤による技術

この技術は、主成分がカルシウムアルミネート

注3) この技術は実際の現場でのみ行った。

注4) この測定は、湧水時には行わなかった。

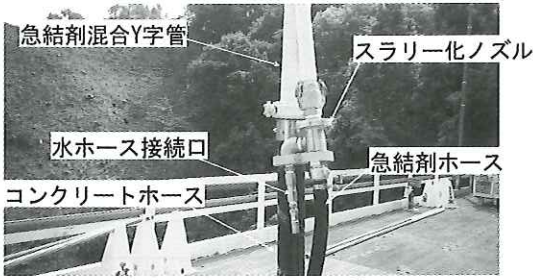


写真-2 従来の配管

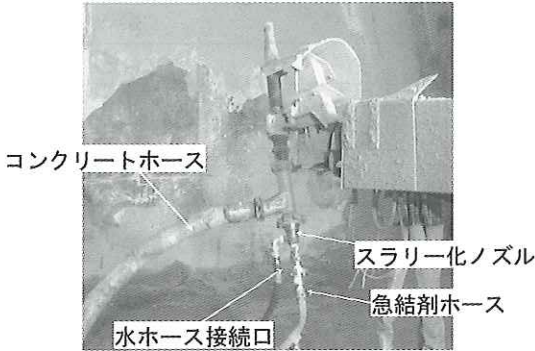


写真-3 新しい配管

鋳物系の粉体急結剤をコンクリートに添加する直前に専用の装置（以下、「スラリー化ノズル」と記す）を用いて連続的に水と混ぜてスラリー化し、ベースコンクリートに添加・混合する技術である。研究では、長期強度の発現性を高めるためスラリー急結剤の改良とエア圧送量を低減できる新しい配管を試行した。

これまでの配管は、噴射ノズルから2～3m手前でコンクリートとスラリー化した急結剤を混合する方式（写真-2）としていたが、新しい方式では噴射ノズルにおいて直接混合する配管方式（写真-3）とすることとし、粉じん・はね返り率が低減した。

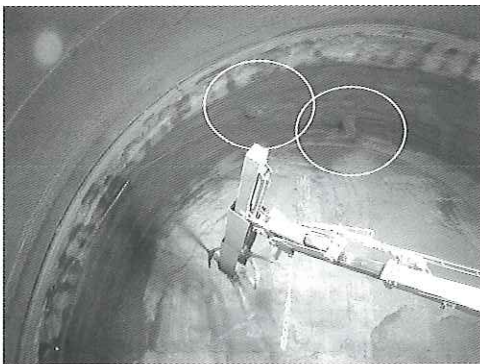


写真-4 湧水状況での付着状況
（白丸内の突出部は、厚く吹いたものである）

3.3 液体急結剤による技術

この技術は、液体急結剤を用いてエア圧送方式で吹付けるものである。研究では、主成分が水溶性アルミニウム塩系で単位セメント量 360kg/m^3 にも対応できる液体急結剤の改良を行った。その結果、単位セメント量を $360\sim 450\text{kg/m}^3$ と変化させても粉じん濃度には影響がないことがわかった。また、液体急結剤の添加量は通常10%程度であるが、湧水試験（写真-4）では15%程度まで増加させれば付着性を十分確保できることもわかった。

3.4 分割練混ぜ（SEC）による技術

この技術は、練混ぜ水を分割投入することにより、骨材の周囲が低水セメント比のセメントペーストによって覆われたベースコンクリートを製造し、これに粉体急結剤を添加してエア圧送方式で吹付けるものである。研究では、単位セメント量を $360, 400, 450\text{kg/m}^3$ と変えたが、粉じん発生量に与える影響はほとんど無かった。

3.5 高品質吹付けコンクリートによる技術

この技術は、石灰石微粉末やシリカヒュームなど微粒分を加えたベースコンクリートに粉体急結剤を添加してエア圧送方式で吹付けるものである。

3.6 ダストレス吹付け機械による技術

この技術は従来技術の機械とは異なり、ほぐし

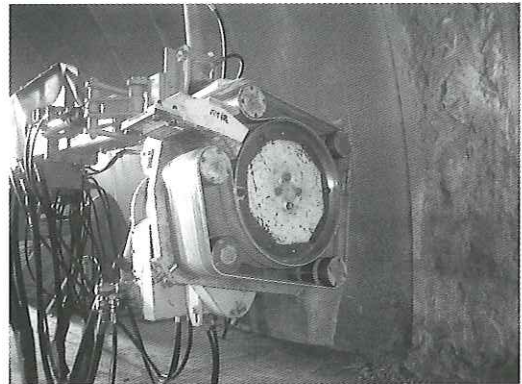


写真-5 ダストレス吹付け機械の回転装置

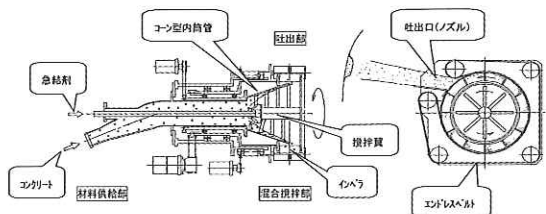


図-4 回転装置の基本構造

エアを使用せず、ブーム先端部にベルト駆動の回転装置(写真-5)を搭載した吹付け機械による方法である。この回転装置は図-4に示すような構造であり、コーン型内筒管を介して急結剤を機械的に混合攪拌し、遠心力により投射するものである。

研究では、粉体急結剤のみならず、初めて液体急結剤も使用して試験した。その結果、骨材や配合あるいは急結剤の種類が変わっても粉じん濃度への影響は少ないことがわかった。

3.7 エアレス吹付け機械による技術

この技術は、ブーム先端部に回転装置(写真-6)を搭載した吹付け機械による吹付け方法であり、これまでは液体急結剤を使用していたが、研究で初めてスラリー急結剤を使用した。この回転装置の基本は、図-5のように羽根車を高速回転して、

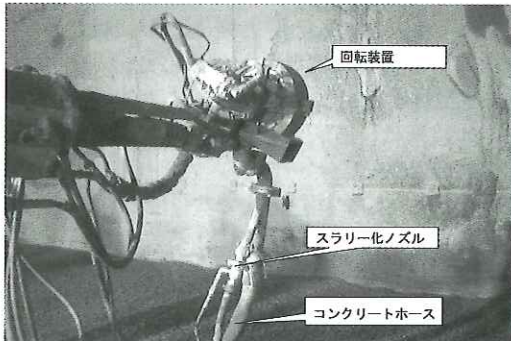


写真-6 エアレス吹付け機械の回転装置 (スラリー急結剤を用いる場合)

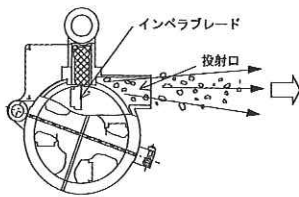


図-5 回転装置の基本構造

コンクリートを打撃投射する方式である。なお、液体急結剤を使用する場合には、全く圧縮空気を用いず回転力のみで吹付けることができる。

3.8 局所集じんシステムによる技術

この技術は、小型トラック等に積載した局所集じん機を吹付け機械の横に設置し、集じんを行うものである(図-6)。そして、研究では集じんエリアからの粉じん拡散防止の技術として、初めて集じん処理された清浄な排気エアをエアカーテン

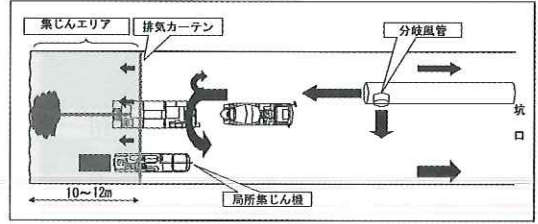


図-6 局所集じん機の配置

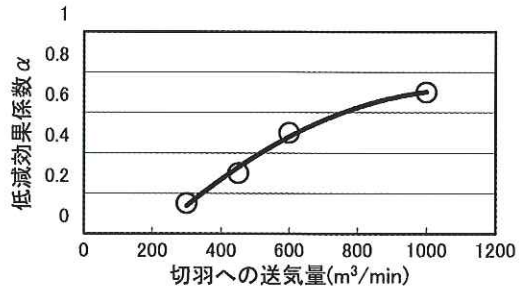


図-7 切羽への送気量とαの関係

とする方式を開発し、さらに、切羽への送気量を減らすために分岐風管を用いたものである。

図-7は、模擬トンネルの試験における切羽への送気量と粉じん低減効果係数αの関係を示したものであり、分岐風管により切羽への送気量を絞るほどエアカーテン効果が大きく、αが小さくなる。ただし、切羽への送気量を下げ過ぎると温度上昇等の作業環境の悪化が考えられるため、切羽への送気量としては、αが0.5に相当する600m³/min程度が目安となる。

3.9 伸縮風管システムによる技術

この技術は、坑内に設置する大型集じん機に接続された伸縮風管の吸引口を切羽近くまで移動して、集じんするものである(図-8)。あらかじめ伸縮風管用のレールを天井部に吊り下げ、風管先端の走行用モータを遠隔操作により操作し、自在に伸縮できる。これにより吹付け作業時には吸引口を切羽に近づけ、発破・重機作業時には切羽より退避できる。掘進の進行にも追従し、常に切羽

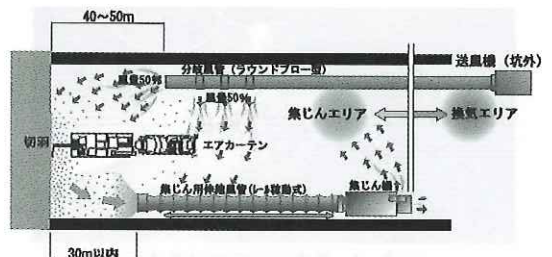


図-8 伸縮風管システムを用いた施工概要(平面図)

付近で発生粉じんを吸引できる。

また、送風管先端に分岐風管を取付け、分岐風によりエアカーテンを形成して粉じんの後方への漏洩を防ぐものである。

このシステムで吹付け作業時の発生粉じんを処理する場合の必要換気量は、下記の(2)式⁴⁾で示され、(1)式は適用できない。

(吹付け作業時の必要換気量) = (切羽作業員の呼気量) + (アジテータトラックの排出ガス希釈量) + (後方作業の必要換気量) (2)

なお、集じん機の容量の算定にあたっては、この式から算定される換気量にエアカーテン効果や集じん効率^{前掲2)}を考慮する必要がある。

この技術による現場試験施工の結果より、伸縮風管(写真-7)の吸込み口が切羽より30m以内とした場合には、大幅な低減効果が得られることが明らかになった。

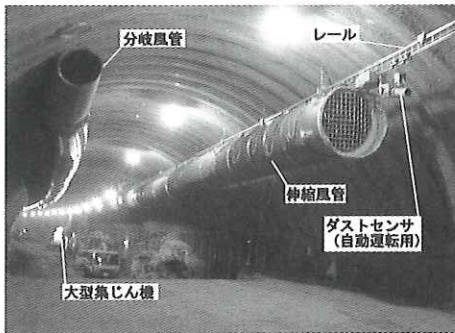


写真-7 伸縮風管の設置状況

3. 10 粉じん低減効果の状況

表-5は、模擬トンネルおよび現場(ただし、掘削断面50~90m²を対象)での吹付け試験時の換気量、トンネル断面積および切羽より50m地点のデジタル粉じん計による測定値(相対濃度に質量濃度変換係数を乗じて求めた粉じん濃度)から

表-5 吹付け作業時の粉じん低減効果係数 a

技術	a	技術	a
①	0.5~0.75	⑥	0.2~0.4
②	0.4~0.6	⑦	0.2~0.4
③	0.2~0.4	⑧	0.5~0.75
④	0.6~0.75	⑨	— : (1)式が適用できない
⑤	0.6~0.75		

(1)式により粉じん低減効果係数 a を逆算して求めた結果をとりまとめたものである。

なお、いずれの技術も施工性および強度に関する開発目標を満たしていた。

4. おわりに

本研究により、吹付け作業時に発生する粉じん低減技術①~⑨について、模擬トンネルでの試験や現場試験等を行い、粉じん抑制剤の使用等特別な発生源対策を行わない場合^{前掲3)}に比べて、粉じん低減効果が0.2~0.75程度まで低減できることが明らかになった。ただし、個々のトンネルの地山条件や使用する材料および施工条件などにより、低減効果も変わるため、低減技術の選定は現場技術者の判断による所が大きい。

なお、目標値3mg/m³の達成については、吹付け以外の他の作業も含めてトンネル全体としての粉じん対策が不可欠であり、今後も電動ファン付き呼吸用保護具の着用を始めとしてガイドラインで示された種々の対策が必要と考える。

参考文献

- 1) 山口「トンネルの吹付けコンクリート」日本トンネル技術協会, p.114, 1996.2
- 2) 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>」、p.228、平成14年3月12日
- 3) 前掲2) のpp.127~pp.132
- 4) 前掲2) のp.125およびp.145

大下武志*



独立行政法人土木研究所技術推進本部施工技術チーム
主席研究員
Takeshi OSHITA

波田光敬**



独立行政法人土木研究所技術推進本部施工技術チーム
主任研究員
Mitsutaka HADA

井谷雅司***



独立行政法人土木研究所企画部研究企画課研究員
Masashi ITANI

尾花誠太郎****



前 独立行政法人土木研究所技術推進本部施工技術チーム交流研究員
Seitarou OBANA