

乾式スラリーショットシステムによる二次覆工の施工 — 東海北陸自動車道飛騨トンネル避難坑工事 —

Secondary Lining by Shotcrete (Tokai-Hokuriku Expressway, Hida Evacuation Tunnel)

山田 博 ^{※1}	築地 功 ^{※2}	山口 憲吾 ^{※2}
Hiroshi Yamada	Isao Tsukiji	Kengo Yamaguchi
松原 利之 ^{※3}	柳 森 豊 ^{※3}	平間 昭信 ^{※4}
Toshiyuki Matsubara	Yutaka Yanagimori	Akinobu Hirama

【要旨】

飛騨トンネルは、東海北陸自動車道最後の未開通区間である飛騨清見IC～白川郷IC間に位置する全長10.7kmの山岳道路トンネルであり、道路トンネルとしては関越トンネルに次いで国内2番目（世界第7位）の長さとなる長大トンネルである。一般に、トンネルの二次覆工は打込みコンクリートにより施工されるが、飛騨トンネル避難坑は、地質状況の複雑さから多くの支保パターンで構成されており、避難坑の全線を従来のコンクリート覆工で施工する場合には、多種多様な型枠が必要となり不経済となる。このことから、従来の覆工コンクリートと同等以上の強度特性を有する高強度繊維補強吹付けコンクリートを全線に適用することとなった¹⁾。

施工に際しては、吹付け工法については品質、施工性などのから検討を行い、白川側はコンクリートの最大練り置き時間が2時間以上となること、二次覆工施工時にはインバートブロックが設置されている状況であり、コンクリートの処理が困難であるなどの事由から、これらの点に有利である乾式吹付け方式を選定した。しかし、乾式吹付け方式は、湿式吹付け方式と比較して発生粉じん量が多いことや、品質変動が大きいなどの課題を有していた。これらの課題に対して、新たに、乾式スラリーショットシステムや、輝度計を用いたドライミックスの含水量測定方法について検討し、それらの有効性について検証した。

【キーワード】 吹付けコンクリート、乾式吹付け工法、スラリー急結剤、二次覆工、繊維補強コンクリート

1. はじめに

飛騨トンネルは、東海北陸自動車道最後の未開通区間である飛騨清見IC～白川郷IC間に位置する全長10.7kmの山岳道路トンネルであり、道路トンネルとしては関越トンネルに次いで国内2番目（世界第7位）の長さとなる長大トンネルである。（図-1）。飛騨トンネルは本坑と避難坑からなり、避難坑は本坑に先行して掘削し、本坑施工時の地質概要の把握および水抜きを目的として、また、供用後には緊急時における避難用通路として利用されるトンネルである。

飛騨トンネル避難坑は10.7kmのトンネル延長を片側から施工するために、高速性に優れているTBM（Tunnel Boring Machine）を適用し、1998年2月より白川側から

掘削を開始した。途中、不良地山と大量湧水による工期の遅れを取り戻すために河合側からNATMによる掘削を併用し、2006年3月に貫通した。



図-1 飛騨トンネル位置図

1. 西日本土木支社 2. 中日本土木支社 3. 土木事業本部 技術統括部 トンネル技術グループ
4. 技術研究所 第三研究室

トンネルの二次覆工は打込みコンクリートにより施工されるが、飛驒トンネル避難坑においては、その地質状況の複雑さから、多くの支保パターンが適用されている。避難坑の全線を従来のコンクリート覆工で施工する場合には多種多様な型枠が必要となるとともに、吹付けコンクリートのみで施工することによりスライドセントルが不要となり、工期短縮およびコスト低減が可能となる。

これらのことから、二次覆工に従来の覆工コンクリートと比較して同等以上の強度特性を有する高強度繊維補強吹付けコンクリートを適用することとした。

本稿では、高強度繊維補強吹付けコンクリートによる二次覆工について、吹付けコンクリートの要求性能、品質および白川側の乾式吹付けコンクリートによる施工を中心に、その概要を報告する。

2. 工事概要

(1) 工事名

東海北陸自動車道飛驒トンネル避難坑工事

(2) 工事場所

岐阜県白川村～飛驒市河合町

(3) 発注者

中日本高速道路㈱ 名古屋支社

(4) 請負者

飛鳥建設㈱・鉄建建設㈱共同企業体

(5) 工期

平成8年10月18日～平成19年10月1日

(6) トンネル工事内容

トンネル延長：10.7km

掘削径：TBM 区間 4.5m

NATM 区間 5.0～7.2m

(レール区間5.0m, タイヤ区間7.2m)

(7) 地山岩種

白川花崗岩, 濃飛流紋岩, 花崗斑岩, 飛驒片麻岩, 船津花崗岩

3. 吹付けコンクリートの要求性能および要求品質

3.1 避難坑の覆工コンクリートに求められる性能

飛驒トンネル避難坑の覆工コンクリートに求められた性能を以下に示す。

- ① 将来的に曲げ、せん断荷重が作用し、ひび割れが発生した場合においても、直ちに破壊することがなく、ト

ンネル構造としての安全性が確保できること。

- ② 湧水箇所に対し、導水処理できること。
- ③ 現況の一次支保の凹凸による応力集中を緩和するため、覆工コンクリートにより、平坦性を確保する。
- ④ 一次支保（ロックボルト、鋼製支保工、鋼製ライナー）全面を覆工コンクリートで被覆し、劣化外力から保護する。

これらの性能を確保するため、高強度繊維補強吹付けコンクリートとして、表-1に示すの要求性能を設定した。また、使用する繊維として、鋼繊維では、中性化や湧水による錆の発生が予想されたため、非鋼繊維（ポリプロピレン繊維）を用いることとした。

3.2 吹付けコンクリートの品質基準と出来形基準

(1) 吹付けコンクリートの品質基準

吹付けコンクリートの品質基準を表-2に示す。

なお、曲げじん性強度については、旧日本道路公団トンネル施工要領の繊維補強覆工コンクリートの規定に準拠した。なお、試験体寸法については、覆工コンクリートでは最大骨材寸法が40mmに対して、吹付けコンクリートでは最大骨材寸法が15mmであることを考慮して、150×150×530mmから100×100×400mmに変更した。

(2) 吹付けコンクリートの出来形管理

1) 内空断面

設計値±50mm

2) 吹付け厚さ

設計吹付け厚さ以上

3) 平滑性

最凹部の深さが50mm/300mm以内（図-1参照）

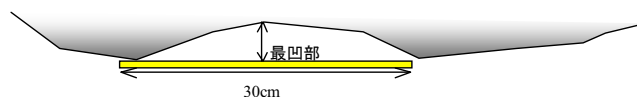


図-1 平滑性の出来型管理方法

4) 平坦性

最凹部の深さが500mm/3000mm以内（図-2参照）

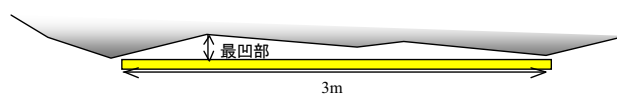


図-2 平坦性の出来型管理方法

表一 高強度繊維補強吹付けコンクリートの要求性能

吹付けコンクリートの品質		要求性能
圧縮強度	初期強度	高い若材齢強度は必要としない。
	長期強度	従来の覆工耐力と同等以上の強度が必要である。
曲げじん性、(せん断強度)		節理、亀裂の挙動に抵抗、および、ひび割れ発生後も耐力を保持するために、曲げじん性、(せん断強度)の高い吹付けコンクリートとする。
長期耐久性		物理的、化学的作用に対して、吹付けコンクリート自体の劣化が少なく、ロックボルトや補強繊維の機能が長期間保持できるように保護する機能が必要である。
付着強度 ^{※1}		構造的な優位性や、剥落に対する抵抗性を確保するために、岩盤および吹付けコンクリート各層間の付着強度を確認する必要がある。

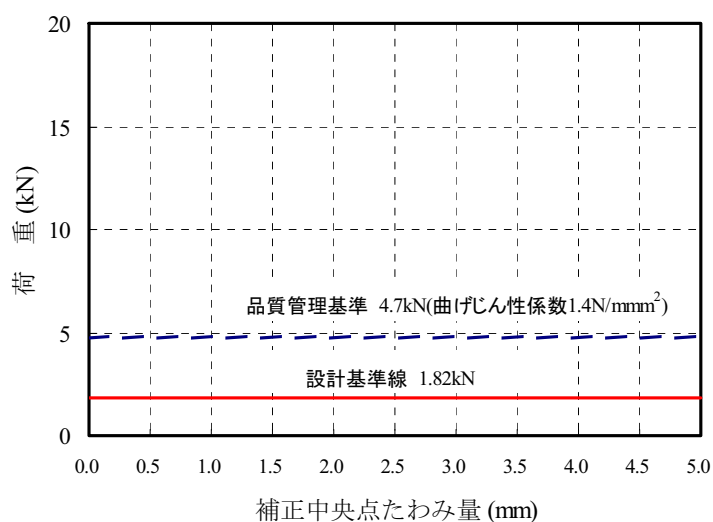
※1：付着強度については、試験方法が確立されていないことから、参考値とし、試験方法の確立を目指す。

表二 高強度繊維補強吹付けコンクリートの要求品質

吹付けコンクリートの品質		要求品質
材齢 1 日における平均圧縮強度		10N/mm ²
材齢 28 日における圧縮強度		36N/mm ²
材齢 28 日における曲げじん性強度		① X1～X4 のすべての曲げじん性曲線が設計基準線を下回らないこと ② X1～X4 の曲げじん性曲線の平均値が品質管理曲げじん性係数 (1.4N/mm ²) を下回らないこと
付着強度 ^{※1}	コンクリートへの最小付着強度	参考値 ^{※2} ：1.0N/mm ²
	岩盤への最小付着強度	参考値 ^{※2} ：0.5N/mm ²

※1：付着強度については、試験方法が確立されていないことから、参考値とし、試験方法の確立を目指す。

※2：FFNARCにおける吹付けコンクリートの規準「European Specification for Sprayed Concrete, 1996」で吹付けコンクリートの要求性能のひとつとして付着強度が示されている²⁾。



図一 高強度繊維補強吹付けコンクリートにおける曲げじん性の性能規定

4. 吹付け施工

4.1 吹付け方式の選定

吹付け方式は、表-3に示すように、白川側と河合側における施工延長、材料運搬方法、吹付け対象、作業環境等の違いを踏まえた上で、それぞれ所定の品質確保および作業効率の向上を目指し、選定した。

白川側は TBM 区間であり、運搬方法がレール工法であることから、コンクリートの最大練り置き時間が2時間以上となること、二次覆工施工時には、既にインバートブロックが設置されており、残コンの処理が困難であることなどから、これらの点に有利である乾式吹付け方式を選定した³⁾。しかし、乾式吹付け方式は、一般的に湿式吹付け方式と比較して発生粉じん量が多いことに加えて、河合側の作業や配置設備工事に対して坑道換気の上流側での施工となることから、発生粉じんの抑制が求められたため、スラリー急結剤を用いた乾式スラリーショット工法を新たに開発・適用することとした。一方、河合側は、NATM区間であり、タイヤ工法での施工が可能であったことから、通常の湿式吹付け方式による施工を選定した。

表-3 避難坑における白川側と河合側の吹付け条件

施工場所	最大運搬延長	運搬方法	最大練り置き時間	一次覆工	作業環境
白川側	約8km	レール工法	2時間超	鋼製ライナーが多い	坑道換気の上流側で施工
河合側	約4km	タイヤ工法	1時間以内	吹付けコンクリート	坑道換気の下流側で施工

4.2 配合

選定した吹付け方式を用いて、試験吹付けを実施し、表-2に示す要求品質を満足する配合を選定した。

なお、白川側については、一次覆工は鋼製ライナーが

多く、吹付け対象面にリブなどの突起が多いことなどから、乾式吹付けコンクリートの配合は、試験吹付けにおいて、はね返りを考慮した検討を行い、細骨材率は80%と通常より高い配合を選定した。選定した配合を表-4に示す。

4.3 吹付けコンクリートの施工

乾式吹付け方式における骨材表面水の補正は、乾式吹付け工法導入当初と同じく、ノズルマンの目視および触診により補正量を特定する方法を用いており、ノズルマンの技量によって、大きな品質変動が生ずる状況であった。そこで、施工位置近傍において、骨材表面水率を測定し、リアルタイムに添加水量を算出補正することにより、水量に起因する品質変動を改善することを目指した。骨材の表面水率の測定方法として、輝度計を用いたドライミックスの含水量測定方法を適用し³⁾、ノズルマンが施工位置近傍に設置されたモニターの数値に基づき水量を調整することで、品質変動を低減することができた。

今回適用した吹付けシステム概要を図-4に示す。



写真-1 輝度計による含水量の測定状況

表-4 高強度繊維補強吹付けコンクリート配合

種別	スランブ (cm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	繊維 ^{※1} 混入率 (vol%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤		急結剤 ^{※2} C×%
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	高性能減水剤 C×%	粉じん低減剤 C×%	
白川側 (乾式吹付け)	—	45	80	1.00	203	450	1,284	323	—	—	8 (US-50)
河合側 (湿式吹付け)	18	45	65	0.75	203	450	1,059	559	1.6	0.08	10 (T-10)

※1：繊維は、ポリプロピレン繊維（密度=0.98g/cm³、長さ32mm）を使用

※2：湿式吹付け工法が高強度対応粉体急結剤（T-10）、乾式吹付け工法は高強度対応スラリー用粉体急結剤（US-50）を使用

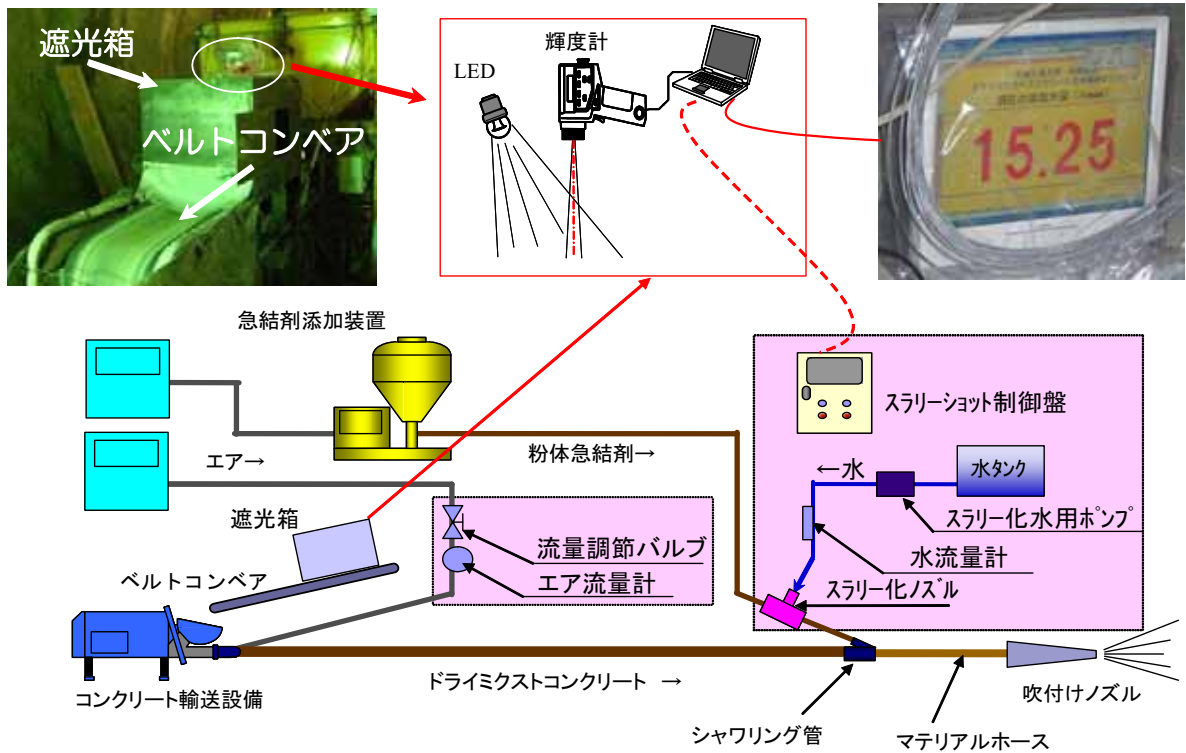


図-4 乾式スラリーショットの吹付けシステム概要図

5. 吹付けコンクリートの品質

5.1 吹付けコンクリートの品質管理結果

本工事における高強度繊維補強吹付けコンクリートの強度に関する品質管理の結果を表-5に示す。

高強度繊維補強吹付けコンクリートの初期強度、圧縮強度（材齢28日）および曲げじん性係数は、全て、表-2に示す品質基準を満足していた。また、圧縮強度の変動係数は、白川側（乾式吹付け方式）が10.5%、河合側（湿式吹付け方式）が8.2%であった。一般に良好な管理がなされているレディーミクストコンクリート工場の変

動係数は~10%程度⁴⁾であり、骨材の管理方法や、表面水率の補正などが適切に行われたことにより、レディーミクストコンクリート工場と同程度の品質変動に抑えられたと判断される。

曲げじん性係数は、曲げ強度同様、圧縮強度に比べて変動係数が大きい傾向が確認された。これは、既往の文献⁵⁾に示されているように、圧送空気流量などの施工条件が繊維の配向性やはね返りに影響を及ぼすことから、変動係数が大きくなったと推察される。

表-5 高強度繊維補強吹付けコンクリートの強度に関する統計値

項目	推定圧縮強度 σ_1 (N/mm ²)		圧縮強度 σ_{28} (N/mm ²)		曲げじん性係数 σ_{28} (kN)	
	白川側	河合側	白川側	河合側	白川側	河合側
基準値	10		36		4.67	
データ数	209	51	75	27	67	24
最大値	36.7	37.0	58.1	56.2	10.6	10.8
最小値	10.3	18.5	36.2	42.4	4.72	5.05
平均値	19.0	27.8	42.1	49.0	7.09	7.35
標準偏差	4.86	3.94	4.43	4.00	1.50	1.94
変動係数(%)	25.6	14.2	10.5	8.2	21.1	26.4

5.2 中性化抵抗性に関する検討

吹付けコンクリートの耐久性評価の一つとして、中性化抵抗性について、試験体を採取して促進中性化試験を実施した。試験条件は、温度 20℃、湿度 60%、CO₂ 濃度 5%とした。材齢 13 週までの促進中性化試験の結果を図-5に示す。

図に示すように、覆工コンクリートに比べて、乾式吹付け工法、湿式吹付け工法とも中性化深さが大きい結果である。特に、吹付け面については、吹付け深さ方向の底面に比べて 3mm 程度、中性化深さが大きく、吹付け表面は吹付け圧によるコンパクション小さいために、底面ほど密実性が得られていないものと推察される。また、湿式吹付け工法（河合側）については、吹付けしていないコンクリートについても試験を実施した。その結果は、吹付けコンクリートの方が中性化深さは大きく、吹付け施工の特殊施工の影響が大きいことが確認された。

吹付けコンクリートによる二次覆工において、要求品質として中性化抵抗性が求められる場合には、表面改質剤などを適用する必要がある。

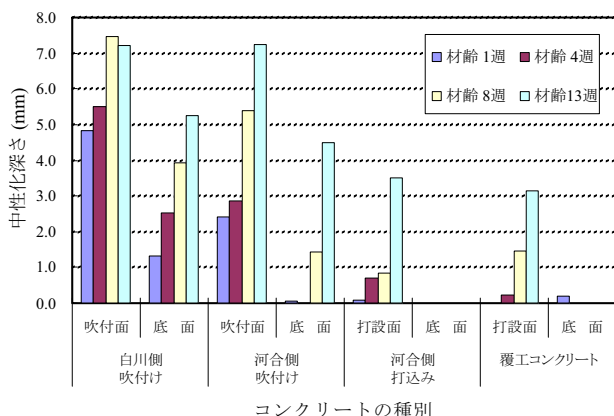


図-5 促進中性化試験結果

5.3 付着強度の検討

(1) 試験方法

付着試験方法については、試験方法が確立されていないことから、参考値とし、試験方法の確立を目指すこととし、吹付け施工前に型枠を設置する方法など様々な試験方法を試行し、写真-2に示す方法により付着強度を評価することができた。

対象面をサンダーにて平滑とした後に、コアマシンによりφ50mmのスリットを導入し、吹付けコンクリート面に付着用治具をエポキシ接着剤で貼り付け、建研式付

着試験用ジャッキで引抜荷重を作用させた。



写真-2 付着試験実施状況

(2) 試験結果

吹付けコンクリート表面での治具の剥離や、作用荷重の偏心などにより、付着強度のばらつきが大きく、本工事中において、原位置での付着試験方法を確立するまでには至らなかった。ただし、表-6に示すように、鋼製ライナー区間における測定では、概ね 1N/mm²の付着強度が得られていることを確認した。付着強度は、吹付けコンクリートを二次覆工に適用する上で、支保部材であることから、一次覆工との付着は応力伝達の観点から重要な要素である。今回検討した試験方法を見直し、試験方法の確立を目指して、今後も検討を進める予定である。

表-6 ライナーとの付着試験結果

No	付着強度 (N/mm ²)	備考
1	—	治具設置時に、治具が剥離
2	0.77	治具が剥離し、最終荷重は不明
3	1.15	治具が剥離し、最終荷重は不明
平均	0.96	

6. おわりに

我が国においては、二次覆工に吹付けコンクリートを適用した事例が少ない中で、飛驒トンネル避難坑工事では 10.7km の全線を吹付けコンクリートにより約 14 ヶ月で二次覆工を完了することができ、工期短縮を図ることができた。

乾式吹付け方式の適用に際して、課題とした粉じんについては、スラリーショットシステムの適用により、湿式と同等の作業環境を得ることができた。また、骨材管

理や表面水率の補正を適切に行えたことにより、乾式吹付け方式でも、従来の打込みコンクリートと同等以上の強度発現、および品質変動を有するコンクリートを確保できることを確認した。

本工事では、覆工コンクリートの耐久性設計に関する検討を行うことを目的とし、高強度繊維補強吹付けコンクリートの耐久性に関する検討も実施した。その結果については、二次覆工における吹付けコンクリート適用のための基礎資料として検討を進める予定である。



写真-7 白川側吹付け完了状況

【謝辞】

吹付けコンクリートによる二次覆工の適用、施工に際しては、中日本高速道路（株）名古屋支社清見工事事務所飛驒工事区、（株）高速道路総合技術研究所道路研究部トンネル研究室をはじめとし、多くの方々にご協力を頂

いた。ここに記して感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 森山守, 海瀬忍, 築地功, 平間昭信: 東海北陸自動車道飛驒トンネル避難坑工事—吹付けコンクリートによる二次覆工—, コンクリート工学, Vol.46, No.4, pp.49-53, 2008.4
- 2) 土木学会: コンクリートライブラリー121, 吹付けコンクリート指針(案) [トンネル編], pp.149-151, 2005.6
- 3) 日本トンネル技術協会: 現場技術者のための吹付けコンクリート・ロックボルト, pp.2-130-2-132, 2005.3
- 4) 平間昭信, 岩城圭介, 築地功, 矢島哲司: 輝度計を用いたドライミクストコンクリートの含水量測定方法に関する研究, コンクリート工学年次論文集第29巻, pp.439-444, 2007.7
- 5) 日本コンクリート工学協会: コンクリート技術の要点'05, pp.136, 2005.10
- 6) 平間昭信, 西村次男, 大森啓至, 魚本健人: 繊維補強吹付けコンクリートの強度特性に関する研究, コンクリート工学年次論文集第23巻 No.2, pp. 1339-1344, 2001.7

Summary The Hida Tunnel is a 10.7-km mountain highway tunnel located in the section between the Hidakiyomi and Shirakawago interchanges, the last section to be opened to traffic on the Tokai-Hokuriku Expressway. It is Japan's second (world's seventh) longest highway tunnel next to the Kan-etsu Tunnel. The secondary lining of a tunnel is generally constructed by placing concrete. The evacuation tunnel in the Hida Tunnel was composed of numerous patterns of supports because of the complex geological conditions. Constructing the evacuation tunnel throughout the length using traditional concrete lining was expected to require various types of formwork and not to be cost effective. It was then decided to apply high-strength fiber reinforced shotcrete throughout the length, which was as strong as or stronger than traditional lining concrete.

The quality and ease of construction were examined for shotcrete. On the side of Shirakawago, freshly mixed concrete was expected to be left for more than two hours and invert blocks were expected to have been installed at the time of construction of secondary linings and disposing of concrete would be difficult. In order to solve these problems, dry-mix shotcrete was selected. Dry-mix shotcrete, however, had such problems as the production of more dust and greater variations of quality than wet-mix shotcrete. To solve these problems, the effectiveness of a dry slurry shot system and a method of measuring the water content of dry-mix shotcrete using a luminance meter was verified.

Key Words : Shotcrete, Dry-process shotcreting, Slurry type accelerator, Secondary lining, Fiber reinforced concrete