

吹付けコンクリートの練上り温度を 自動制御するバッチャープラントの現場検証

滝波 真澄¹・熊谷 幸樹²・松田 浩朗³・筒井 隆規⁴・山田 博⁵

¹正会員 飛島建設 土木事業本部 土木技術部 (〒108-0075 東京都港区港南一丁目8-15 Wビル4F)
E-mail:masumi_takinami@tobishima.co.jp

²正会員 飛島建設 土木事業本部 土木技術部 (〒108-0075 東京都港区港南一丁目8-15 Wビル4F)
E-mail:koki_kumagai@tobishima.co.jp

³正会員 飛島建設 技術研究所 研究開発G 第一研究室 (〒270-0222 千葉県野田市木間ヶ瀬5472)
E-mail:hiroaki_matsuda@tobishima.co.jp

⁴正会員 飛島建設 札幌支店 新幹線ニセコトンネル作業所 (〒044-0052 北海道虻田郡倶知安町北二条西1-8-5)
E-mail:takanori_tsutsui@tobishima.co.jp

⁵飛島建設 東北支店 岩井トンネル作業所 (〒028-2631 岩手県宮古市区界第四地割28-24)
E-mail:hiroshi_yamada@tobishima.co.jp

山岳トンネル工法のNATMの吹付けコンクリートにおいて、初期強度、長期強度および付着性状に対し、急結剤の種類や添加量が与える影響は大きい。また、急結剤の性能は温度依存性が高く、ベースコンクリート温度の変動は、吹付けコンクリートの品質変動につながる。筆者らは、コンクリートの練上り温度を自動制御し、安定した温度のコンクリートを製造する“スマートバッチャープラント”を開発し、冬の最低気温が氷点下20℃に達する寒冷地で施工中の道路トンネル建設工事に適用した。本稿では、開発したスマートバッチャープラントの概要、練上り温度の自動制御機能の検証、従来工法との比較結果、および目標温度を実現したことによる品質と施工性の向上とコストダウン効果の検証結果について報告する。

Key Words : mountain tunnel, NATM, shotcrete, batcher plant, temperature control

1. はじめに

山岳トンネル工法のNATMにおける主要な支保部材である吹付けコンクリートの初期強度、長期強度および付着性状に対し、急結剤の種類や添加量が与える影響は大きい¹⁾。また、急結剤の性能は温度依存性が高いため、ベースコンクリート温度の変動は、吹付けコンクリートの品質変動につながる²⁾。

特に吹付けコンクリートの温度が低下する冬期では、付着性状や初期強度を確保するために急結剤添加率を増大するなどの対応が行われる。しかしながら、急結剤添加率の過度な増大は、長期強度の低下を招く恐れがある。また、施工時に急結剤添加率を調整する場合は、コンクリートの付着状態を見ながら行うことになるため、コンクリート温度に変動が生じる条件では、適切な付着性状を得るための急結剤の添加率の設定が困難であり、品質

低下につながる危険性がある。冬期の対応として練混ぜ水に温水を使用することにより、コンクリート温度を上げる方法も行われるが、練混ぜ水の加熱・保温状況を常時管理している事例は少なく、外気温の変動が大きい場合には練上り温度は不安定となる。

筆者らは、これまでに吹付けコンクリートの品質の安定化と施工性の向上を目的として、練上り温度を所定の温度となるよう自動制御し、安定した温度のコンクリートを製造する「スマートバッチャープラント」を開発³⁾し、冬の最低気温が氷点下20℃に達する寒冷地で施工中の「宮古盛岡横断道路 岩井地区トンネル工事（国土交通省東北地方整備局）」に試験適用した⁴⁾。

本稿では、開発したスマートバッチャープラントの概要、および寒冷地の道路トンネル建設工事に本格適用した際の冬期における練上り温度の自動制御機能の検証結果について報告する。

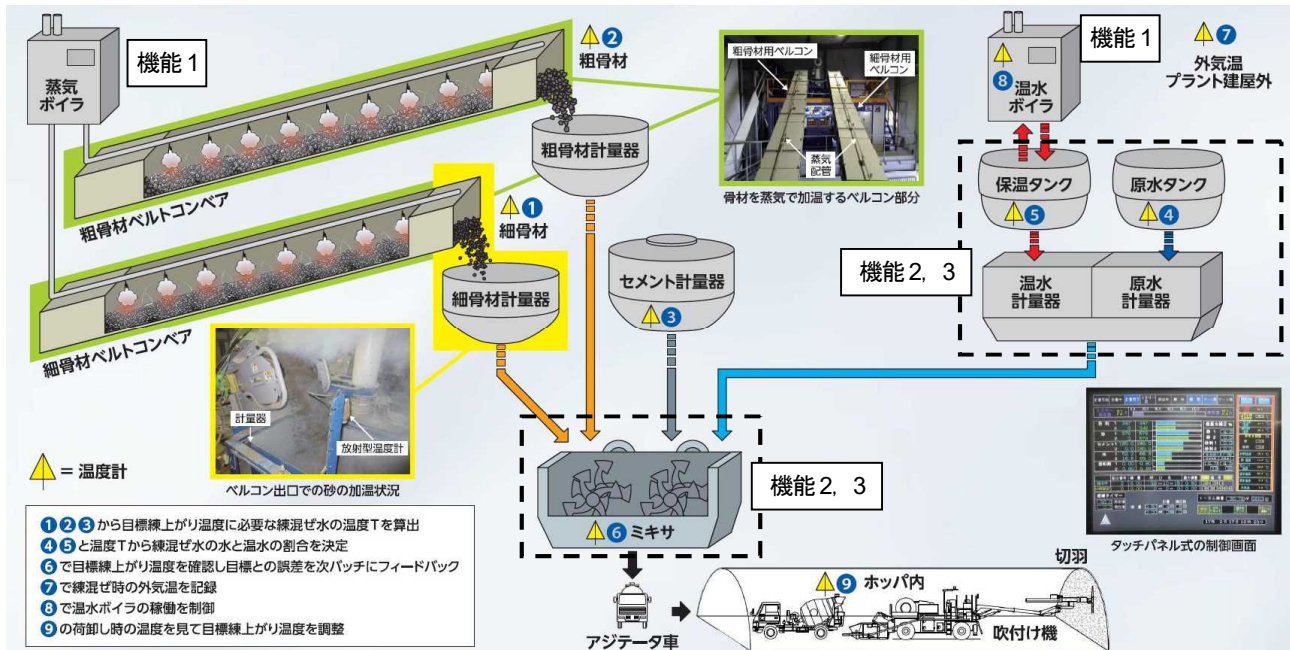


図-1 スマートバッチャープラントのシステムの概要

2. スマートバッチャープラントの概要

(1) 練上り温度の自動制御

開発したスマートバッチャープラントは、吹付けコンクリートの練上り温度を自動制御し、練混ぜ材料の性能が最大限に発揮される最適な温度でコンクリートを安定供給できるコンクリート製造設備である。スマートバッチャープラントのシステム概要を図-1に示す。

練上り温度を自動制御する機能は、表-1に示す3つの機能から構成されている。

スマートバッチャープラントの最大の特長は機能2と機能3である。すなわち、水（原水と温水）、骨材、セメント温度および練混ぜ後のコンクリート温度を正確に測定し、得られた測定値から目標練上り温度に必要な熱容量を逐次計算し、添加する温水の量を自動調整してコンクリートを製造する。

ミキサ内のコンクリート温度測定方法の概要を図-2に示す。練混ぜ後、浄化フィルタ付き排気装置でミキサ内に浮遊する微粒分を強制排気した後、ミキサ上部に取り付けたシャッター付きデジタル放射温度センサにより、練上り温度を非接触測定する。

表-1 練上り温度自動制御機能の構成	
機能1	コンクリート材料である、水、細骨材（砂）、粗骨材（碎石）を加温する機能
機能2	各材料の練混ぜ前の正確な温度計測および練混ぜ時の連続温度計測機能
機能3	目標練上り温度に合わせて原水（冷水）と温水の割合を自動調整する制御機能機能

また、測定した練上り温度と目標練上り温度の差を次サイクルの目標練上り温度にフィードバックすることにより、複数のバッチが投入されるアジテータ車内のコンクリート温度を目標練上り温度に近づけることができる。

さらに、切羽に位置する吹付け機ホップ投入時のコンクリート温度をデジタル放射温度センサで実測することで、練上り完了から吹付け開始までの外気温等によるコンクリート温度の変化を把握し、目標練上り温度を調整することにより、常に目標とするコンクリート温度での吹付け作業を可能とする。

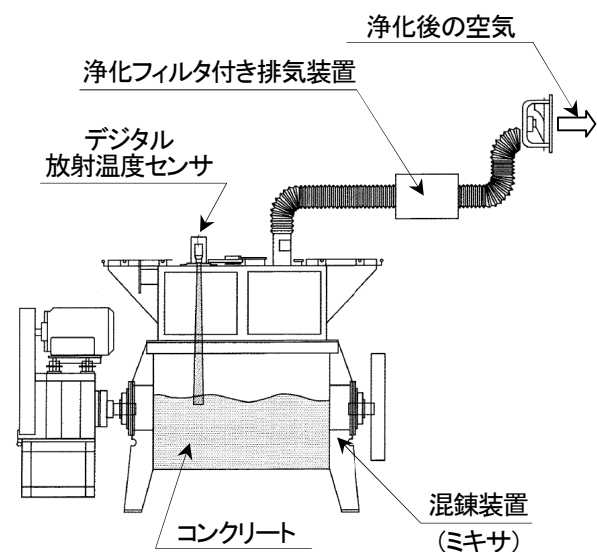


図-2 ミキサ内のコンクリート温度測定方法の概要

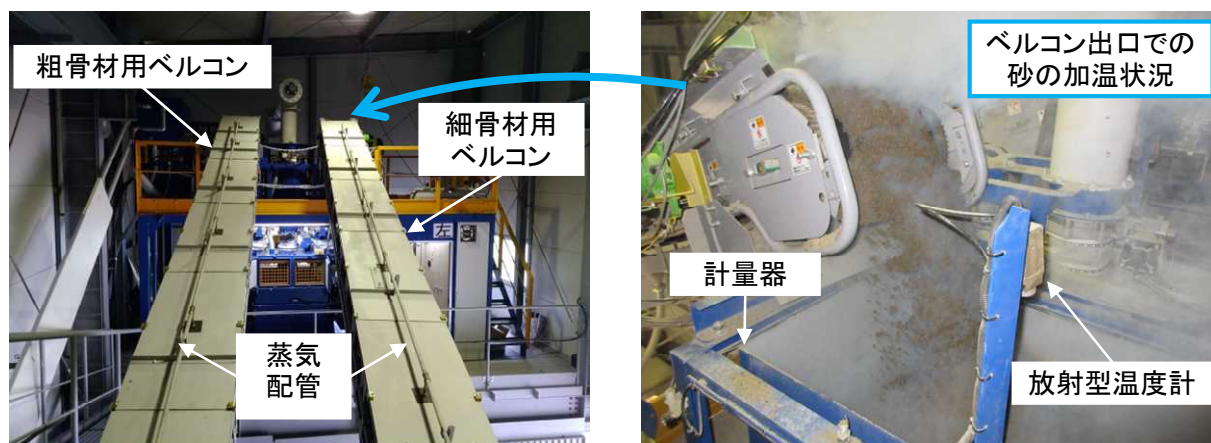


図-3 ベルトコンベヤ上の蒸気噴霧装置：機能1

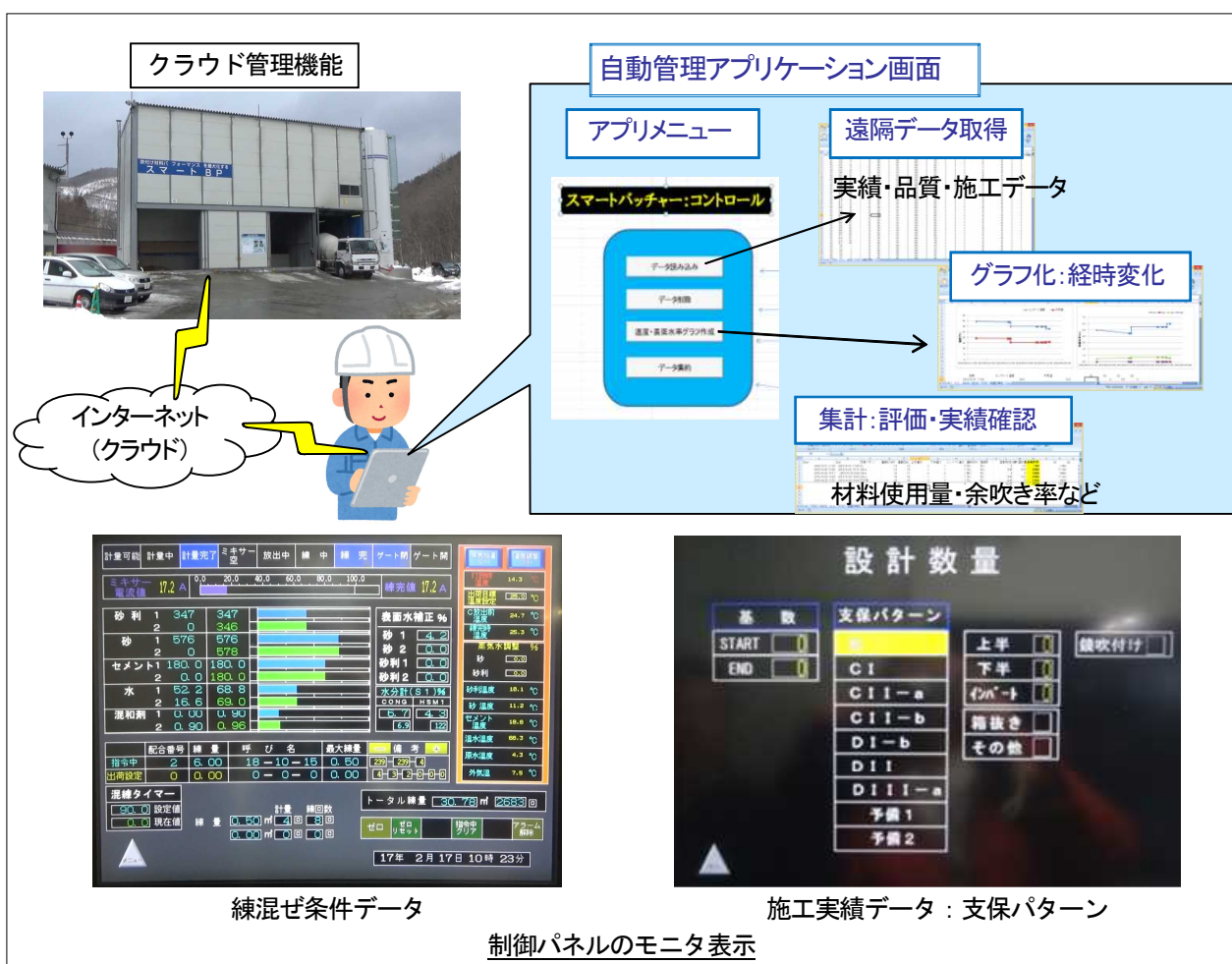


図-4 練混ぜ実績データのクラウド管理機能の概要

寒冷地の冬期において、温水のみでは目標練上り温度に自動制御することが困難な場合には、図-3に示す骨材加温用の蒸気噴霧装置を備えており、ベルトコンベヤ上の細骨材、粗骨材を加温することができる（機能1）。本機能により、練混ぜ前の骨材の温度を10℃前後加温することが可能であり、必要な量だけ加温できるため無駄も少ない。

(2) 練混ぜ実績データのクラウド管理

コンクリートの練混ぜ実績データのクラウド管理機能の概要を図-4に示す。

従来のバッチャープラントでは、印字プリントされた伝票を使ってトンネル施工時の練混ぜ実績データを管理していたが、スマートバッチャープラントでは練混ぜ実績データをデジタル化し、インターネット（クラウド）を介して遠隔で取得することができる。この練混ぜ実績

データには、コンクリート温度や表面水率などの品質に関するデータ、設計や実績支保パターンなどの施工に関するデータが含まれており、管理帳票変換機能によって自動でとりまとめられる。また、バッチャープラントの入口や内部に Web カメラを設置することにより、アジテータ車の出入りや骨材の在庫状況などの映像を PC やスマートフォンで確認できる。

これらの工夫により、施工管理者は練混ぜ実績データと Web カメラ映像を遠隔で取得し、吹付けコンクリートに係る品質管理や材料管理業務を短時間で処理することが可能となり、管理業務の省力化や管理レベルの向上にもつながると期待される。

3. 寒冷地における現場検証

(1) コンクリートの練上り温度

寒冷地における冬期の練上り温度の自動制御機能の性能評価を目的として、「宮古盛岡横断道路 岩井地区トンネル工事（国土交通省東北地方整備局）」において現場検証を実施した。

2017 年 1 月における外気温と練上り温度の実績値を図-5 に示す。図中の丸印は、出荷されるコンクリートの平均温度（アジテータ車一台の平均温度）を示し、四角印がバッチ毎の練上り温度を示す。実線で示す外気温は、

現場近くのアメダス（区界）の観測データを示す。

今回の現場検証では、練上り後から吹付け作業までの練置き時間での温度低下を 5℃程度考慮して、目標練上り温度を 25℃に設定した。

図-5 より、出荷されるコンクリートの温度は、目標とした $25 \pm 3^\circ\text{C}$ の範囲に収まっている。また、コンクリート温度の変動傾向は、外気温の変動とは関連性がないことから、外気温が氷点下 20°C の冬期においても、外気温の変動によらず、安定した練上り温度でコンクリートを製造していたことを確認した。

図-6 に、自動温度制御機能のない温水を使用したバッチャープラントでコンクリートを製造している S トンネル工事（道路トンネル、福井県）での 2016 年 12 月～2017 年 3 月の練上り温度の実測値データと本工事における計測データと対比して度数分布で示した。

この結果、S トンネルでは温水を使ってコンクリートは製造しているものの、練上り温度が意図的に制御できないため、練上り温度の平均 μ が 15.9°C 、標準偏差 σ が 2.6°C であった。平均値 $\mu \pm \sigma$ の範囲に 64.1% のデータが収まったことから、ほぼ正規分布に近いばらつきである。これに対して、スマートバッチャープラントでは、全バッチを通じて目標練上り温度 25°C に自動制御することで、平均 μ が 24.7°C 、標準偏差 σ が 1.9°C となり、 $\mu \pm \sigma$ の範囲に 78.4% のデータが収まったことから、精度の良い製造温度の管理ができることを確認した。

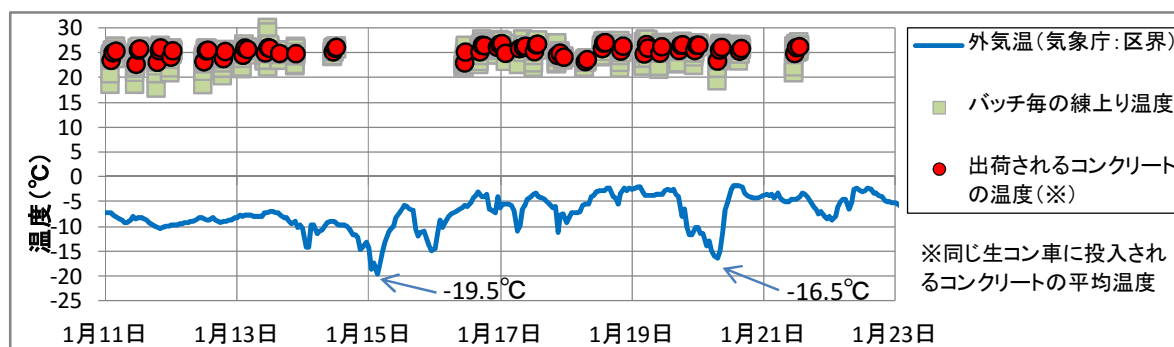


図-5 コンクリート練上り温度と外気温の経時変化

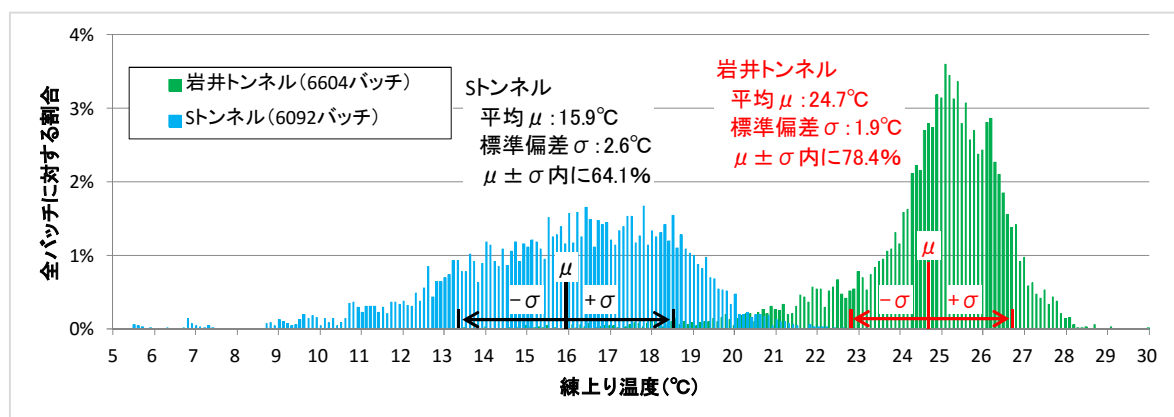


図-6 コンクリート練上り温度の度数分布

表-2 吹付けコンクリートの配合

水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
		水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	粉じん低減剤 CL (C×0.5%)
51.1	62.0	184	360	1105	694	1.80 (C×0.5%)

表-3 施工条件

施工条件	仕 様
吹付け方式	湿式
吹付け機	エレクター付一体型吹付け機 (fts:ヘラクレス)
吐出量	15m ³ /hr (最大 25m ³ /hr)

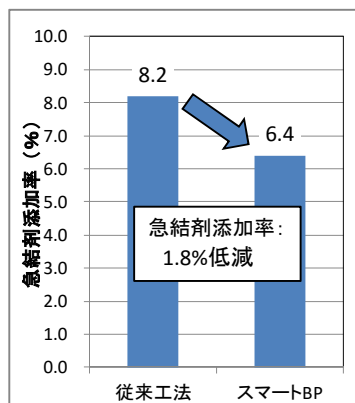


図-7 急結剤添加率の比較

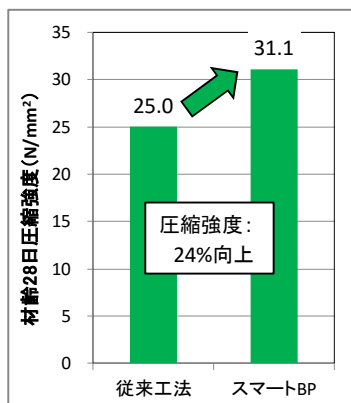


図-8 圧縮強度の比較

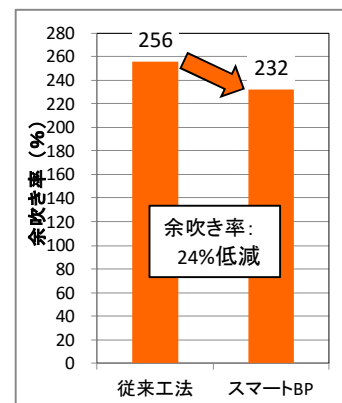


図-9 余吹き率の比較

(2) 品質と施工性に及ぼす影響

吹付けコンクリートの温度を安定させ、吹付作業時の単位時間当たりの吹付け施工数量や急結剤添加率を厳格に管理すれば、気温氷点下の施工環境の厳しい冬期であっても、吹付コンクリートの付着特性や施工性が安定化し、品質低下の防止や品質のばらつきの抑制が期待され、品質の向上に寄与するものと考えられる。

表-2 に検討の対象とした吹付けコンクリートの配合を、表-3 に施工条件を示す。吹付けコンクリートの配合は単位セメント量 360kg、設計基準強度 18N/mm²の配合である。また、吹付け作業は、湿式方式により吐出量を約 15m³/hr にして実施した。

図-7 に、秋期から冬期において、自動温度制御機能を稼働する前後での急結剤添加率の平均値を示す。また、図-8 に同時期における圧縮強度を、図-9 に余吹き率をそれぞれ対比して示す。なお、ここで示す余吹き率とは、設計厚さの吹付けコンクリートの数量に対して、余掘り分、はね返し分、および余った量等をすべて含めた吹付けコンクリートの数量の割合であり、吹付けコンクリートの付着性状が改善すれば、この値は低減するものと考え参考として示すこととした。

冬期でも良好な付着性状と強度発現を確保することを目的として、コンクリート練上り温度を 25℃（施工時のコンクリート温度 20℃）にすることで、図-7 に示すように、急結剤添加率を 8.2%から 6.4%に低減することが可能となった。これによって、吹付けコンクリートの材齢 28 日圧縮強度は 31.1N/mm² となり、急結剤添加 8.2%の場合よりも 24%向上し（図-8）、余吹き率は

256%から 232%へと 24%低減できた（図-9）。

スマートバッチャープラントの機能1～3に対する設備費用はコストアップとなるが、急結剤添加率の低減による材料費のコストダウンは追加設備に要する費用と同等以上であり、余吹き率低減による吹付け施工数量の減少を加味すれば、コストダウン効果はさらに大きくなるものと考えられる。

4. おわりに

吹付けコンクリートは、NATM による山岳トンネルにおいて主要な支保部材であり、品質の安定と施工性の向上は重要な施工管理項目である。今回開発したスマートバッチャープラントは、材料の性能が効果的に発揮できるコンクリート温度でコンクリートを安定供給できることから、外気温の変動や冬期の低下があっても、吹付けコンクリートの良好な施工性を確保することができる。このため、吹付けコンクリートの品質向上と施工費のコストダウンを同時に実現できる技術であることが確認できた。

今後は、練上り温度をより正確に自動制御できるミキサ加温機能や次バッチへのフィードバック方法の改良の他、夏期の外気温やコンクリート温度上昇時にも対応できるように、材料冷却設備の追加整備も検討を進める。また、さらに適用実績を積み重ねて、練上り温度の自動制御が吹付けコンクリートの付着性状や強度発現の向上に寄与する基礎データを蓄積し、はね返しや強度のばら

つきの小さい高品質の吹付けコンクリートの施工方法の確立に向けた取り組みを行う所存である。

謝辞：本開発にあたりご協力いただいた(株)原商の関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 平間昭信, 安藤慎一郎, 荒木昭俊, 魚本健人: 使用材料が吹付けコンクリートの強度特性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2, 日本コンクリート工学会, 2000.
- 2) 門田克司, 丸川真一, 西江寛次, 松田敦夫, 小西正

- 郎, 岩本容昭, 寺本丈夫, 高橋正: 凝結遅延材を用いた吹付けコンクリートの季節毎の特性, 土木学会第55回年次学術講演会, V-222, 土木学会, 2000.
- 3) 滝波真澄, 筒井隆規, 熊谷幸樹, 平間昭信, 松田浩朗, 山田博, 秦英昭, 遠藤信広: トンネル吹付けコンクリート用のスマートバッチャープラントの開発, 土木建設技術発表会概要集, 土木学会, 2016.
- 4) 熊谷幸樹, 筒井隆規, 滝波真澄, 松田浩朗, 山田博: 練上り温度を自動制御するスマートバッチャープラントの開発と現場適用, トンネル工学報告集, Vol.26, 土木学会, 2016.

(2017.8.11 受付)

FIELD VALIDATION OF BATCHER PLANT CAPABLE OF CONTROLLING AS-MIXED TEMPERATURE OF CONCRETE

Masumi TAKINAMI, Koki KUMAGAI, Hiroaki MATSUDA, Takanori TSUTSUI and Hiroshi YAMADA

The authors have developed "smart batcher plant" that automatically controls the as-mixed temperature of concrete and produces concrete of stable temperature and field-tested the plant at a road tunnel construction site in a cold region where the lowest temperature in winter can reach 20°C below the freezing point. This paper briefly describes the "smart batcher plant" and reports on the field validation of the automatic as-mixed temperature control function, the results of comparison with the conventional construction method, and the verification of quality and workability improvements and cost reduction accomplished by achieving the targeted temperature.