

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

飛島建設	正会員	○滝波 真澄	飛島建設	正会員	筒井 隆規
飛島建設	正会員	熊谷 幸樹	飛島建設	正会員	平間 昭信
飛島建設	正会員	松田 浩朗	飛島建設		山田 博
原 商	正会員	秦 英昭	原 商	正会員	遠藤 信広

1. はじめに

NATM による山岳トンネルの主たる支保部材である吹付けコンクリートの品質は温度依存性が高く、コンクリート温度が低くなる冬期にはその影響が大きい。吹付け時にコンクリート温度が低下すると強度発現が遅れるため、支保部材による地山変位抑制効果の発現も遅れることとなり、結果として地山変位が増大してしまう。また、地山への付着性状が悪化し、施工性が低下する。このため、はね返り量が増大し、施工に必要なコンクリート数量も増大してしまう。

これらの問題に対して、通常は急結剤添加率を上げることで対応が行われている。しかしながら、急結剤添加率を増大させることはコストの増加に繋がるとともに、吹付け直後からの強度発現性に大きく影響を及ぼすこととなり、品質変動が大きくなってしまう。また、練混ぜ水に温水を使用することにより、コンクリートの練混ぜ温度を上げる方法なども行われている。しかしながら、練混ぜ水の加熱保温状況を逐次管理している例はあまりなく、外気温の変動や練混ぜ水の加熱状況等の影響で練上り温度が不安定となるため、たとえ温水を使った場合でも品質変動が大きくなってしまうという問題は解決されないままであった。

上記の問題に対して、毎回コンクリートの温度を把握してその温度に最適な急結剤添加率で吹付け作業ができれば、品質変動を小さくできる。また、現場作業員は吹付け状況を見ながら急結剤添加率を調整するため、その巧拙は作業員の熟練度に左右されてしまうが、練上り温度を適切な温度に保つことができれば、容易に最適な急結剤添加率を保持できることになる。これによって、作業員の熟練度によらず、適切な急結剤添加率を設定できるようになるため、品質や施工性は安定し、コストも抑えることが可能となる。

今回、施工時の環境温度、練混ぜ材料の温度を連続的に正確に測定し、コンクリートの練上り温度を予測することと、練混ぜ水に温度管理された温水を使うとともに材料を蒸気で加温することで、コンクリートの練上り温度を目標温度に自動制御するトンネル吹付けコンクリート用のバッチャープラント『スマートバッチャープラント』を開発した。ここでは、開発したスマートバッチャープラントの概要、連続温度測定方法、自動温度制御機能および付帯機能であるクラウド管理機能について報告する。

2. 開発したスマートバッチャープラントの概要

(1) スマートバッチャープラントの特徴

図1に今回開発した、コンクリートの練上り温度を自動制御するトンネル吹付けコンクリート用のバッチャープラントのシステム概念図を示す。本システムの最大の特徴は、水、骨材、セメントの温度測定に加えて、混練装置内のコンクリート温度を正確に測定できることである。これによって、目標練上り温度からの差に基づいた熱容量計算を行い、次バッチの温水の温度や温水添加量を自動的に調整できる。さらに、バッチャープラントでの練上り時から吹付け時までのコンクリート温度の変化を実測し、その結果を次サイクルのコンクリート製造時の目標練上り温度に反映できる。

各材料の温度、練混ぜ時、練上り時および施工時のコンクリート温度の測定結果は、無線 LAN 等を介して管理用 PC に伝送・集約されて、温水温度や配合計量制御に活用される。

キーワード 山岳トンネル, NATM, 吹付けコンクリート, バッチャープラント

連絡先 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 飛島建設 土木事業本部 土木技術部 TEL:044-829-6713

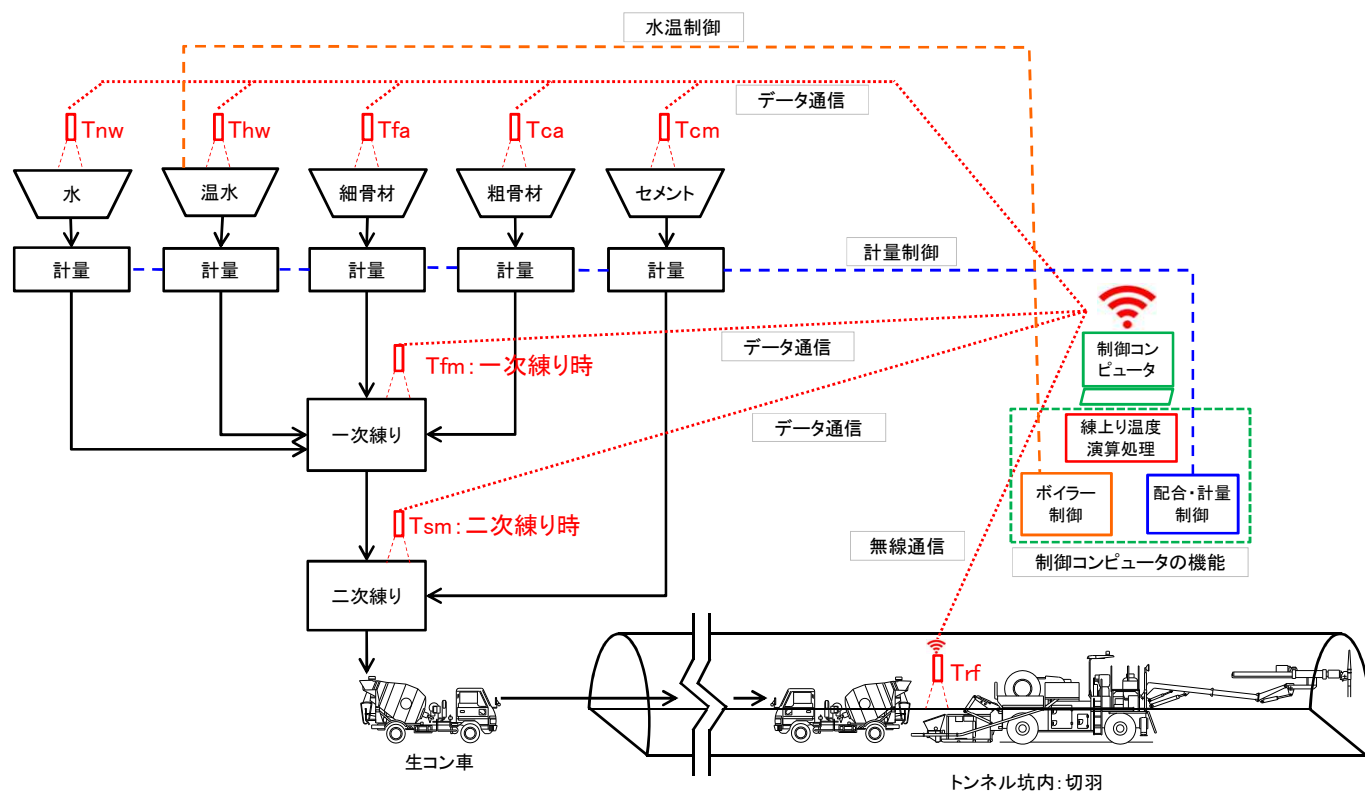


図1 練上り温度の自動制御システム図

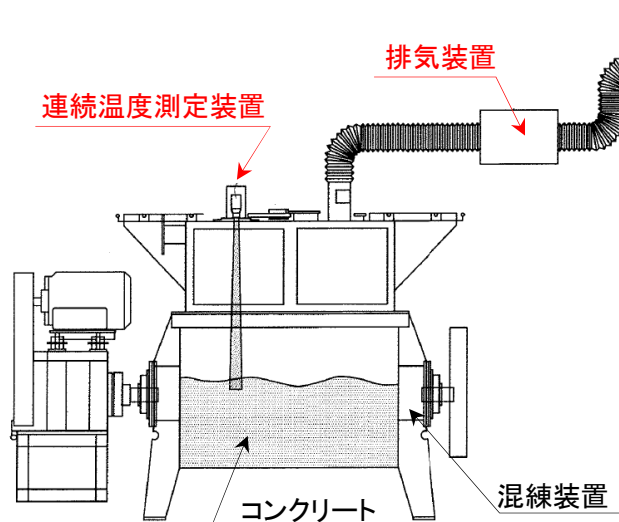


図2 練混ぜ時のコンクリート温度測定の概要

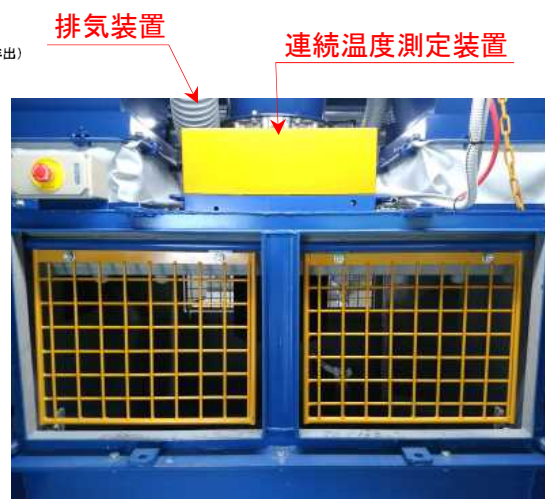


写真1 練混ぜ時の温度測定システム

(2) 連続温度測定方法の概要

図2，写真1に練混ぜ時のコンクリート温度測定の概要を示す。練混ぜ時のコンクリート温度は，排気装置で混練装置内に浮遊する微粒分を強制排気した後，シャッタ付連続温度測定装置により非接触で測定する。温度測定にはデジタル放射温度センサを用いた。

表1に練混ぜ時のコンクリート温度の測定結果を示す。測定時の外気温は約27℃で，粗骨材，細骨材および水の温度は，それぞれ23.0℃，21.4℃，22.1℃であった。今回の測定では，強制排気の有無に関係なく，練混ぜ時のコンクリート温度はアルコール温度計と同等の精度で測定できることを確認できた。なお，多数回のコンクリート製造を行うバッチャープラントで安定して練混ぜ時のコンクリート温度を測定する場合，混練装置内の強制排気が必要であることを確認している。

表1 練混ぜ時のコンクリート温度の測定結果

測定日時	練り混ぜ時刻	コンクリート温度 実測値(℃)		備考
		デジタル温度計	アルコール温度計	
2015/7/10				
測定1回目	10:30	27.1	28	排気あり
測定2回目	11:10	27.1	28	排気なし

(3) 温水製造および保温設備

練混ぜ水に使用する温水の製造には、ボイラを使用する。今回は灯油タイプの簡易ボイラ MBX-9000（ノーリツ：ボイラ能力 90,000kcal/h）を採用した。ボイラに隣接する 4.8m³ 保温タンクから給水して加熱し、再びタンクに戻して循環させることで、保温タンク内の水を全体的に加熱する。練混ぜ水として消費した温水の量だけ、通常水が保温タンク内に自動で供給されるよう管理されている（写真2）。

保温設備として、タンクでは投げ込み式ヒータ（八光電機：サブマリンヒーター）による加熱を補助的に行う。保温タンクの表面には、厚さ 40mm の断熱ウレタンボードを貼り付けている。また、通常のバッチャープラントは骨材搬入口がシャッターになっており、材料搬入のある日中は開けっ放しになっていることが多いが、本プラントでは、材料搬入ゲートを開閉が簡易なスライド式にすることにより、ゲートの開けっ放しによって真冬の冷気がプラント内部に入ることを防いでいる。

(4) 蒸気噴霧設備

コンクリート温度の自動制御のため、練混ぜ水に温水を使うことに加えて、蒸気で骨材を温める設備を実装した。蒸気ボイラには、灯油タイプの簡易ボイラ SZ-200（ミウラ工業：実質蒸発量 168kg/h）を採用した。写真3のように、骨材を計量器へと搬送するベルトコンベヤを金属板で覆い、蒸気を計 24 個のノズル（砂 10 個、砂利 10 個、各ホッパー出口 4 個）より噴射する。

(5) 各材料温度から練上り温度を決定するプロセス

本項では、前述の温度計測方法と加温方法を使って、コンクリート温度を目標練上り温度に自動制御するプロセスを説明する。

コンクリートの主な材料である粗骨材、細骨材、セメント、水、そして温水の各温度は、写真4に示すデジタル放射温度センサによって計量器投入前の温度が計測される。これらの温度に各材料の質量と予め設定しておいた比熱を掛けることで、0℃を基準とした熱容量を算出することができる。ここで、ミキサで練り混ぜた後に各材料が同一の温度になると仮定し、各材料の熱容量の合計を質量の合計で除することにより、練上り温度を予測することができる。

また、目標練上り温度と各材料の質量を掛けることで、目標練上り温度にするために必要となる熱容量が計算できる。そこから必要な温水の量や温度を逆算することで、コンクリート温度を自動制御することが可能と



写真2 練混ぜ水用簡易ボイラと保温タンク

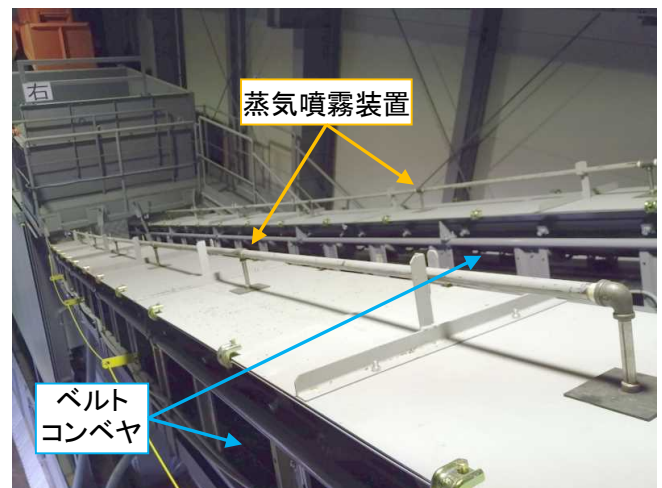


写真3 ベルトコンベヤ部の蒸気噴霧設備

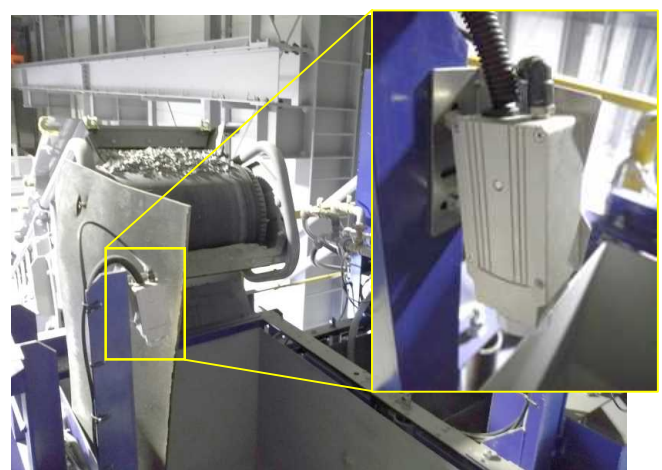


写真4 材料の温度測定状況

なる（写真5）。

ただし練上り温度は、コンクリート材料の温度以外にもミキサ周辺の気温、ミキサの羽根や外壁の温度、およびミキサの稼働による機械的発熱（メカニカルヒート）などの影響を受ける。そこで温度補正項を導入して目標練上り温度との誤差を逐次補正し、次バッチにフィードバックする機能を搭載している。

(6) 練上りから吹付けまでの温度変動

トンネル工事では、コンクリートの練上りから切羽への吹付けまで、コンクリートを積んだアジテータ車が一時間程度待機する場合がある。このとき、コンクリート温度はアジテータ車が待機する坑外または坑内の気温の影響を強く受ける。そこで、アジテータ車から吹付け機のホッパへコンクリートを投入する際に再度温度を計測してプラントに送信することで、待機時間の温度変動を見込んだ目標練上り温度を決めることができ、最適なコンクリート温度による吹付けが可能となる。

ここで、吹付け時の最適なコンクリート温度とは、次項に述べる品質、施工性、およびコストの面から、20℃から25℃の範囲内であると考えている。

(7) 練上り温度一定によるメリット

吹付け時のコンクリート温度を自動制御することで、その温度に応じた最適な急結剤の添加率を設定できる。これによって、吹付コンクリートの品質を安定させ、要求される強度を確実に発現することが可能となり、掘削直後から地山変位の過大な発生を抑制してトンネルの長期安定性を向上させるとともに耐久性向上にも寄与する。

また、切羽や掘削面への付着性状の向上が見込まれ施工性が向上するため、施工時間の短縮と必要なコンクリート数量の低減が期待できる。急結剤の過添加による配管閉塞リスクも低減されるため、工程ロスも少なくなる。

コストについては、急結剤の添加率の値を温度に応じた最適な値に設定することができるため、単価の高い急結剤の無駄な使用を低減できる。特に、標準のバッチャープラントでは冬期の冷たいコンクリート温度に合わせて急結剤添加率を高く設定する必要があるが、スマートバッチャープラントでは他の季節と同様の温度で練混ぜが可能であるため、急結剤の使用総量が低減する。

スマートバッチャープラントの追加設備の初期導入および運用費用は、施工性の向上によるコンクリート量の低減と、急結剤使用量の低減によるコスト低減効果によって相殺することができる。このため、ある程度以上の工事規模であれば、導入および運用費用以上のコストダウンが見込めると考えている。

3. 製造実績のクラウド管理機能

(1) クラウド管理機能の概要

図3に練混ぜ実績データのクラウド管理機能の概要を示す。

材 料		出荷時の温度をセット				
		比 熱	単 位 質 量	熱 容 量	温 度	含 有 熱 量
	割 合	kJ/kg℃	kg / m ³	kJ/m ³ ℃	℃	kJ / m ³
砂 利		0.80	339.0	271.2	17.4	4718.8
表面水率	%	4.19	0.0	0.0	17.4	0.0
砂		0.80	537.0	429.6	17.1	7389.1
表面水率	%	4.19	12.0	50.2	17.1	864.8
セメント		0.83	190.0	157.7	20.1	3359.0
急結材 (C比)						
粉塵抑制剤 (C比)						
練混水 (W/C)			86.2	361.1		
温水 (W比)	0.0	4.19	12.4	303.3	32.4	9404.0
原水 (W比)	0.0	4.19	13.8	57.8	16.1	884.6
メカニカルヒート						0.0
合 計			1000.0	1269.9		26620.5
練上がり温度 (演算) = 含有熱量 / 熱容量					21.0	
温度変動要素 (温度補正)					0.0	
出荷目標温度					21.0	
出荷時温度					18.5	

写真5 自動温度制御システムの設定画面

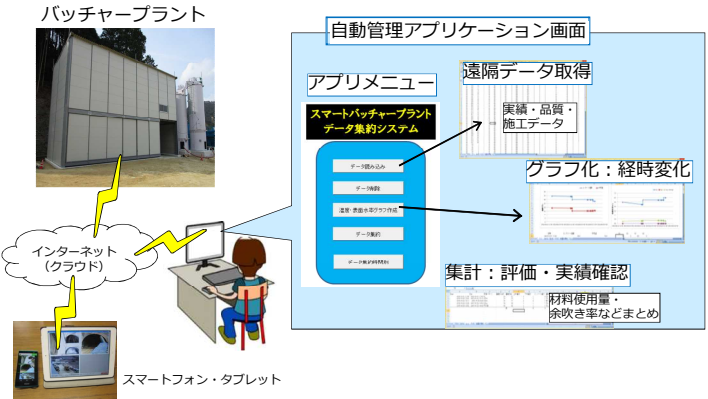


図3 練混ぜ実績データのクラウド管理機能の概要

従来、バッチャープラントの練混ぜ実績データは印字された紙伝票として出力されていた。そのため、職員が材料の実績を管理する場合、紙伝票の数字を PC へ手入力する必要があった。今回実装したクラウド管理機能により、今までの印字されていたデータに加え、温度制御のために計測しているコンクリート材料や外気温、練混ぜ時の温度データをデジタル化し、インターネットを介して遠隔で取得することができる。

また、練混ぜ時に「支保パターン」や、上半、下半、鏡面等の「吹付け箇所」を情報として入力することで、支保パターン毎の実績管理を容易に行うことができる。さらに、データの整理を行う自動帳票機能も搭載されているため、吹付けコンクリートに係る品質管理や材料管理を迅速に行い、しかも省力化することが可能となる。

(2) クラウド管理機能の活用例

図4にクラウド管理機能の活用例を示す。

クラウド管理の最大の特長は、遠隔地からデータを取得できることにある。すなわち、現場の職員が現場事務所の PC から練混ぜ実績をリアルタイムに確認できるのはもちろんのこと、坑内に無線 LAN 環境があれば、スマートフォンやタブレットを持った作業員が切羽にいながらにして練上り温度を把握し、最適な急結剤添加率を設定して吹付け作業を実施することができる。

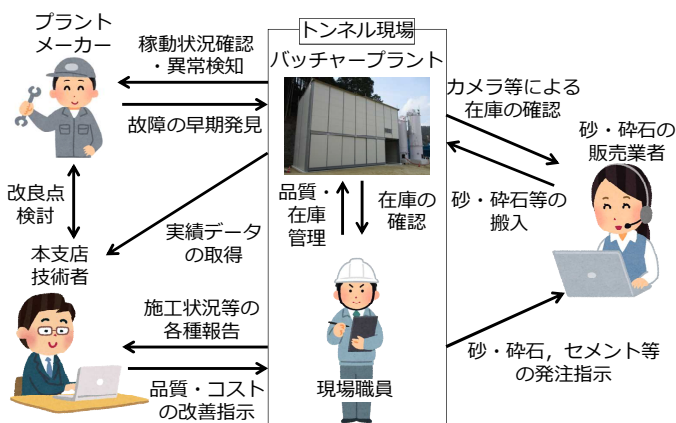


図4 クラウド管理機能の活用例

材料管理においては、資材搬入業者と使用した材料の数量データをリアルタイムに共有化することで、資材搬入業者は材料の次回搬入時期と搬入量を予想することができる。また、実績データのみならず、骨材ビンネットワークカメラで撮影し配信することで、目視による在庫確認も実施することができる。

さらに、現場を統括管理する支店や本社の担当部署ともクラウド管理による実績データやその他の施工・品質実績データを共有化することで、品質やコストの改善指示をタイムリーに行うことができる。

なお、これらのデータをプラントメーカーに公開することも可能で、機器異常の早期検知によるメンテナンスコストやダウンタイムの削減が可能となる。

4. トンネル現場での適用例

(1) 適用現場の概要

練上り温度自動制御スマートバッチャープラントを初適用したのは、岩手県宮古市区界にある岩井地区トンネル工事(国土交通省東北地方整備局)で、2016年6月にバッチャープラントを設置した。トンネルは延長 L=682m の岩井第1トンネルと、延長 L=143m の岩井第2トンネルの合わせて2本の施工となる。現場は本州の中でも特に寒い寒地に属し、真冬の外気温は-20℃前後となる。

(2) 吹付け配合試験時の適用実績

写真6に、本トンネルに導入したスマートバッチャープラントの制御盤の操作パネルの画面を示す。

操作は従来のボタンやツマミ等のスイッチの他、タッチパネル方式を利用して行う。設定メニューから各支保パターンの設計数量や配合設定、温度計算の際に重要となる材料の比熱や温度補正の項目を編集できる。



写真6 制御盤の操作パネル画面

図5に、吹付け配合試験時に実施した自動温度制御の試験運用結果を示す。本図より、練上り目標温度を 24℃、26℃、22℃と変化させる中で、実際の練上り温度は約 21℃～28℃の範囲で変動しながら、目標温度に追従している様子がうかがえる。目標温度との誤差は、目標温度の設定を変更した直後のバッチで最大約 4℃となった。しかしながら、第 7 バッチ以降の誤差は±2℃の範囲に収まり、第 13 バッチではほぼ 0℃になったことが分かる。

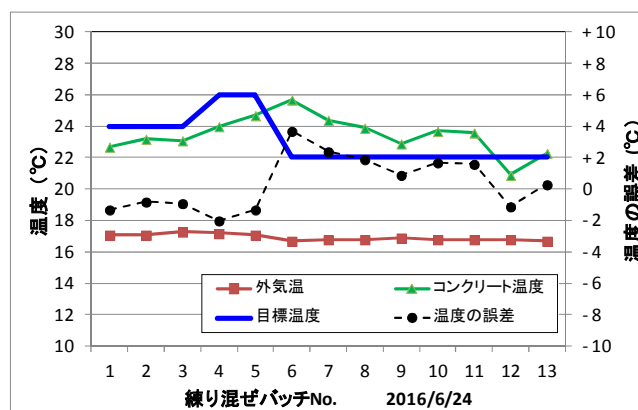


図5 自動温度制御の試験運用結果

5. 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るとともに、品質の安定化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、今後、冬期に-20℃にも達する岩井地区トンネル工事において本格的に運用する中で、改良・改善を行いながら、品質へ与える影響と施工性の向上による建設費の削減効果を検証する予定である。さらに、南北に広範囲に分布する国内の山岳トンネル建設工事への適用を想定して、冬期に加えて、夏期のコンクリート温度上昇時に対応した材料冷却設備やシステム機能の追加整備も行いたいと考えている。

参考文献

- 1) 滝波真澄，筒井隆規，平間昭信，山田博，秦英昭，遠藤信広：練り上がり温度を自動制御する吹付けバッチャープラントの開発，土木学会第 71 回年次学術講演会講演概要集，VI-472，pp.943-944，2016.9.