

山岳トンネル吹付け用スマートバッチャープラントの開発

Development of “Smart Batcher Plant” for shotcrete in mountain tunneling

滝波 真澄^{*1}

Masumi Takinami

平間 昭信^{*2}

Akinobu Hirama

筒井 隆規^{*1}

Takanori Tsutsui

松田 浩朗^{*3}

Hiroaki Matsuda

熊谷 幸樹^{*1}

Koki Kumagai

山田 博^{*4}

Hiroshi Yamada

【要旨】

山岳トンネルの 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品質や施工性は、コンクリート温度に大きく依存し、トンネル構造物の品質や建設費の増減に影響を及ぼす。特にコンクリート温度が低い場合、初期強度の確保や付着性状を確保するため、急結剤添加量を調整したり、温水を使用して練り混ぜ温度を上げたりするなどの対策が行われてきた。しかしながら、これらの方法では、急結剤が過添加となつて長期強度が低下する、練り上がり温度が変動して品質や施工性が安定しない、という問題が残されていた。そこで、吹付けコンクリートの性能が最大限に発揮されるコンクリート温度で安定して製造・供給することを目的として、コンクリート練り上がり温度を自動制御する“スマートバッチャープラント”を開発した。本文では、スマートバッチャープラントの概要、特徴、機能および山岳トンネル建設工事における試験運用結果について報告する。

【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

1. はじめに

NATM による山岳トンネルの主要な支保工である吹付けコンクリートの品質や施工性は温度依存性が高く、コンクリート温度が高くなる夏季や低くなる冬季にはその影響が大きい。すなわち、吹付け時のコンクリート温度が高すぎると、急結剤添加後の硬化が早まり過ぎてはね返りが増加して施工性が低下する。一方、コンクリート温度が低すぎると強度発現が遅れるため、支保工による地山変位抑制効果の発現も遅れて、地山変位が増大してしまう。さらに、コンクリート温度が高い場合と同様に、地山への付着性状が悪化し、はね返りが増加して施工性が低下する。

これらの問題に対し、冬季施工では、通常は急結剤添加率を調整して吹付けるなどの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場合、施工費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ふ。また、練り混ぜ水に温水を使用することにより、コンクリート練り上がり温度を上げる方法も行われているが、練り混ぜ水の加熱・保温状況を常時管理している事例は少なく、外気温変動や練り混ぜ水の加熱状況等の影響で、練り上がり温度は不安定となる。さらに、切羽での急結剤添加率の調整は現場作業員の経験による

ところが大きいことから、急結剤の最適な添加率を練り上がり温度に応じて調整することは極めて困難であり、品質変動が大きくなってしまふという問題があった。

以上の問題に対し、コンクリート温度を材料特性が最大限に発揮できる最適な温度になるように管理し、急結剤添加率等をむやみに変更することなく施工することができれば、品質変動は小さくなる。さらに、コンクリートの練り上がり温度を吹付けコンクリートの性能が最大限に発揮される最適な温度に一定に保つことで、付着性状が安定し、はね返りが最小化することで材料費、施工費を抑えることができる。

今回、コンクリート製造時の環境温度、練混ぜ材料の温度等をリアルタイムに測定することで、コンクリート練り上がり温度を予測し、練り混ぜ水に温度管理された温水を利用したり、骨材を蒸気で加温したりすることで、コンクリート練り上がり温度を目標温度となるように自動制御でき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。

本文では、開発したスマートバッチャープラントの概要、練り上がり温度の測定方法、付帯設備および付帯機能であるクラウド管理機能、山岳トンネル現場での試験運用結果について報告する。

1. 土木事業本部 土木技術部 トンネルG
2. 技術研究所
3. 技術研究所 研究開発G 第一研究室
4. 東北支店 岩井トンネル作業所

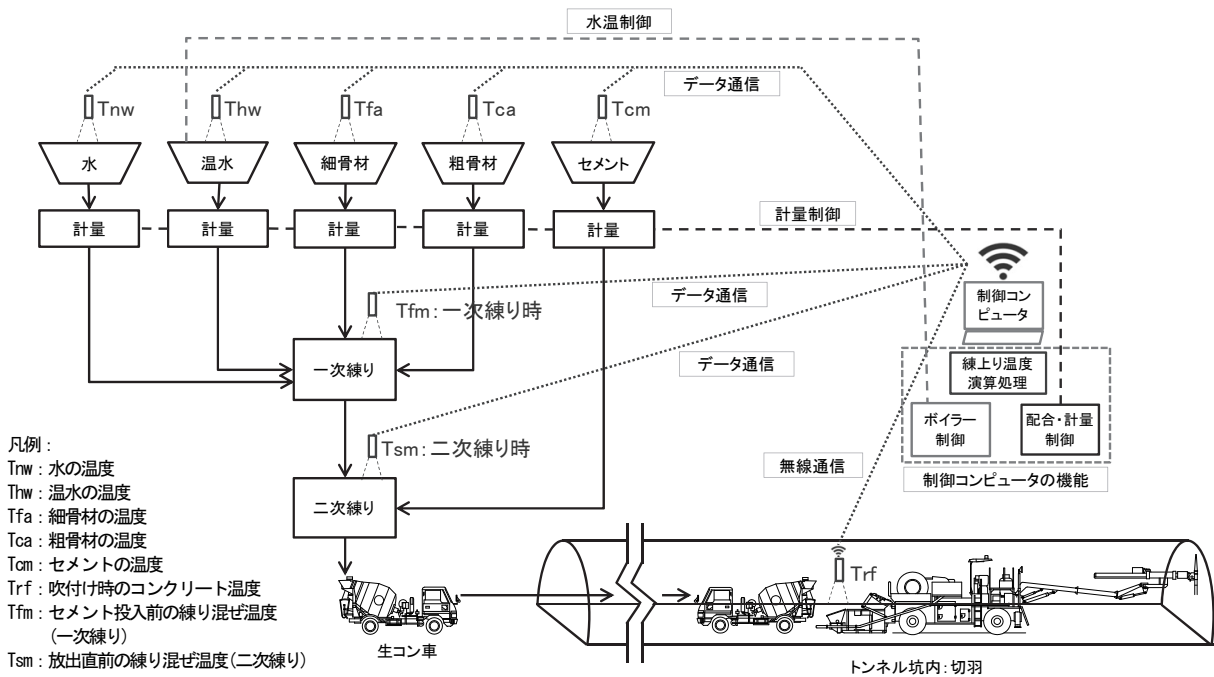


図-1 スマートバッチャープラントのシステム概念図

2. スマートバッチャープラントの概要

2.1 スマートバッチャープラントのシステム概要

図-1に、スマートバッチャープラントのシステム概念図を示す。

例えば、寒冷地での冬季施工の場合、練り混ぜ水は温水ボイラーにより加温し、細骨材や粗骨材はプラント内のベルトコンベヤ上等で蒸気により加温する。計量器に投入される前の各材料は、タンク内やベルトコンベア上での材料の温度を非接触型の温度センサで測定する。各材料の温度、練り混ぜ時、練り上がり時および吹付け時のコンクリート温度の測定結果は、有線や無線LAN等を介して制御コンピュータに送信・集約されて、ボイラーによる水温制御や配合・計量制御に活用される。

このように、スマートバッチャープラントの最大の長は、使用する材料（水、細骨材、粗骨材等）の温度に加え、混練装置（以下、ミキサと記す）内の練り混ぜ途中および終了時の温度を測定し、温水と原水の水量を目標練り上がり温度となるように自動調整できることである。これによって、季節や昼夜の気温変動によらず、コンクリートの練り上がり温度を制御して安定化させることが可能となり、急結剤添加量をむやみに調整することなく、吹付けコンクリートの品質や施工性を安定化させることができる。さらに、目標練り上がり温度は、運搬や練り置き時の温度変化を考慮して、吹付けコンクリートの性能を最大限に活用できる温度に設定することで、初期強度や長期強度の品質を安定化させることができる。また、吹付け作業時の付着性が確保できることで、はね返りが減少して余吹きが低減でき、吹付けコンクリート

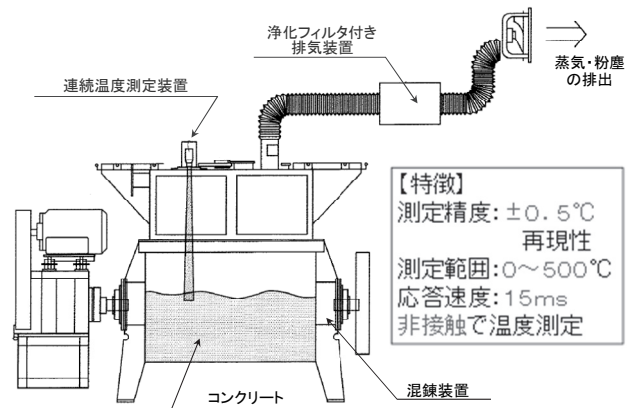


図-2 ミキサ内の温度測定システム



写真-1 ミキサ内の温度測定システム

の材料費を5~10%程度(延長1500m程度の2車線道路トンネルでの試算結果)低減し、施工サイクルを短縮することが可能となる。

表-1 コンクリート温度の測定結果:精度検証

測定日時	練り混ぜ時刻	コンクリート温度		気温(°C)
		実測値(°C)		
		デジタル温度計	アルコール温度計	
測定1回目	10:30	27.1	28	27
測定2回目	11:10	27.1	28	28

2.2 ミキサ内の温度測定システムの概要

図-2, 写真-1に, ミキサ内のコンクリート温度を任意時刻に測定可能な温度測定システムの概要を示す.

練り混ぜ時のコンクリート温度は, 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, シャッタ付連続温度測定装置により非接触で測定する. 測定には, 測定精度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ (再現性)のデジタル放射温度センサを用いた.

表-1に, 練り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 27°C で, 練り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.

2.3 温水製造設備と蒸気噴霧設備

東北地方の山岳トンネル現場に設置したスマートバッチャープラント内の設備は以下の通りである.

写真-2に温水製造設備を, 写真-3に蒸気噴霧設備を, 写真-4に材料の温度測定装置をそれぞれ示す.

練り混ぜ水用の温水の製造には, 灯油を燃料とする簡易ボイラ MBX-9000 (ノーマル:ボイラ能力, $90,000\text{kcal/h}$)を使用する. ボイラに隣接した容量 4.8m^3 の貯留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, 貯留タンク内の水を全体的に加熱する. 練り混ぜ水として消費した温水の量だけ, 通常水が貯留タンク内に自動で供給されるよう管理されている. また, この貯留タンク内には, 投げ込み式のヒーター (八光電機:サブマリンヒーター) による加熱が補助的に行われており, 貯留タンク表面は厚さ 40mm の断熱ウレタンボードで覆われている.

砂, 骨材はベルトコンベヤ上に配備された蒸気噴霧設備により加温される. 蒸気ボイラには, 灯油を燃料とする簡易ボイラ SZ-200 (ミウラ工業:実質蒸発量 168kg/h)を使用する. 写真-3に示すように, 骨材を計量器へと運ぶ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) から骨材に直接噴射する. 蒸気加温した骨材や砂は, 計量中に温度を測定する (写真-4 参照).

2.4 練り上がり温度の自動制御

写真-5に, 自動温度制御システムの設定画面を示す.

コンクリートの練り上がり温度は, 混練前に測定した各材料の温度, 質量および比熱から熱容量に基づき予測

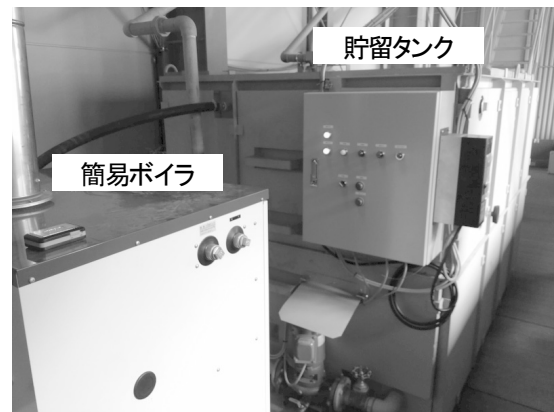


写真-2 温水製造設備

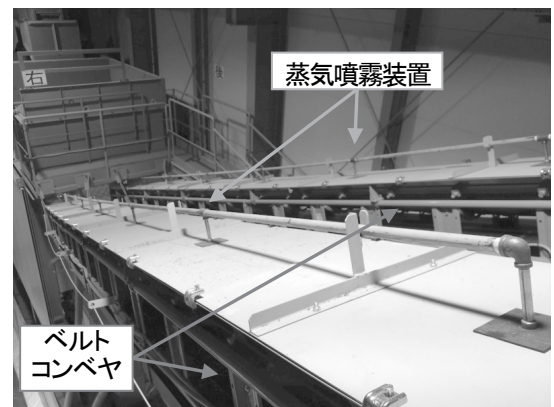


写真-3 蒸気噴霧設備



写真-4 骨材, 砂の温度測定装置

材料	割合	比熱 kJ/kg°C	単位質量 kg/m³	熱容量 kJ/m³°C	出荷時の温度をセット	
					温度 °C	含有熱量 kJ/m³
砂利	0.80	339.0	271.2	17.4	4718.0	
表面水率	%	4.19	0.0	17.4	0.0	
砂	0.80	537.0	428.6	17.1	7389.1	
表面水率	%	4.19	12.0	17.1	864.0	
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	32.4	303.3	32.4	
原水 (W比)	0.0	4.19	13.8	57.0	16.1	
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

する。具体的には、練り上がり目標温度と各材料の質量と比熱を掛けることで、目標練り上がり温度にするために必要な熱容量が算定でき、必要となる温水の量や温度を逆算することにより自動的に温度制御することが可能となる。ただし、コンクリート練り上がり温度は、ミキサが設置されているプラント内の気温、混練に伴う発熱等の影響を受けるため、温度補正項を導入して練り上がり目標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ことで精度を高めることができる。

3. コンクリート製造実績のクラウド管理機能

3.1 クラウド管理機能の概要

図-3に、コンクリート製造の実績データのクラウド管理機能の概要を示す。

これまでのバッチャープラントでは、コンクリート製造に伴う練り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、職員が材料管理する場合、紙伝票の数字を読み取ってPC上のデータシートに手入力する必要があった。これに対して、今回のスマートバッチャープラントに実装した「クラウド管理機能」では、今まで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、練り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、練り混ぜ時に「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。

3.2 クラウド管理機能の特長

図-4に、クラウド管理機能の特長を模式的に示す。

クラウド管理の最大の特長は、遠隔地から実績データを取得できることである。現場の職員は、現場事務所のPC等から実績データを確認できる。また、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は、切羽付近で作業しながら練り上がり温度を把握した上で、最適な急結剤添加率を設定し吹付け作業を行うことができる。

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にもクラウド管理による実績データやその他の施工・品質

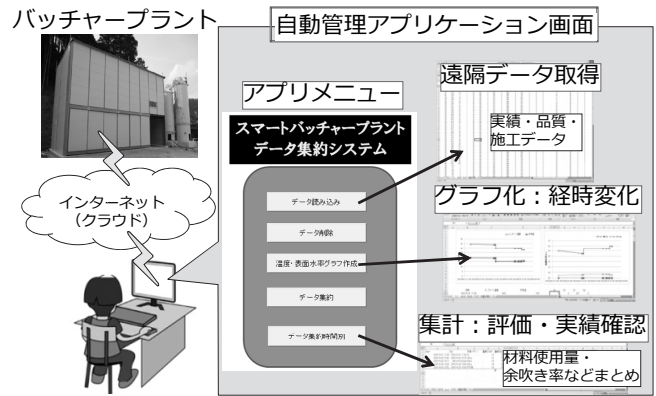


図-3 クラウド管理機能の概要

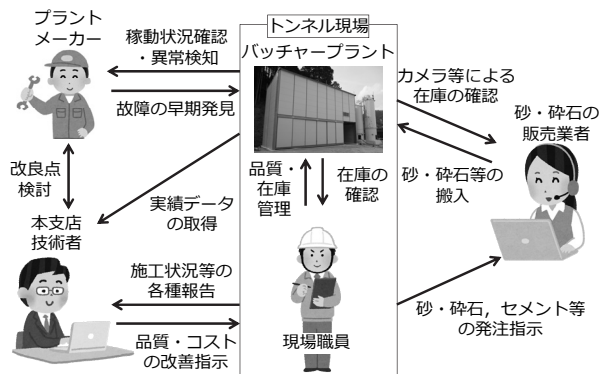


図-4 クラウド管理機能の特長



図-5 岩井地区トンネルの位置図

実績データを共有することで、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である。

4. 山岳トンネル現場での適用例

4.1 現場概要

練り上がり温度の自動制御機能を搭載したスマートバッチャープラントを初導入したのは、岩手県宮古市区界に位置する岩井地区トンネル工事(国土交通省東北地方整備局)である。現場は本州の中でも特に寒い地域(寒地)に属し、真冬の外気温は-15~20℃となる(図-5参照)。

- ・岩井第1トンネル, 延長 L=682m
- ・岩井第2トンネル, 延長 L=143m

4.2 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へ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。

図-6には, 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, 練り上がり目標温度を 24°C, 26°C, 22°Cと変化させる中で, 実際の練り上

がり温度は約 21°C~28°Cの範囲で変動しながら, 目標温度に追従している様子が見えてくる。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°Cとなった。しかしながら, 第7バッチ以降の誤差は ±2°Cの範囲に収まり, 第13バッチではほぼ 0°Cになったことが分かる。

5. まとめ

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, 冬季に-20°C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, 冬季に加えて, 夏季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。

謝辞: 本開発にあたりご協力いただいた株式会社原商の関係各位に謝意を表します。

【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.

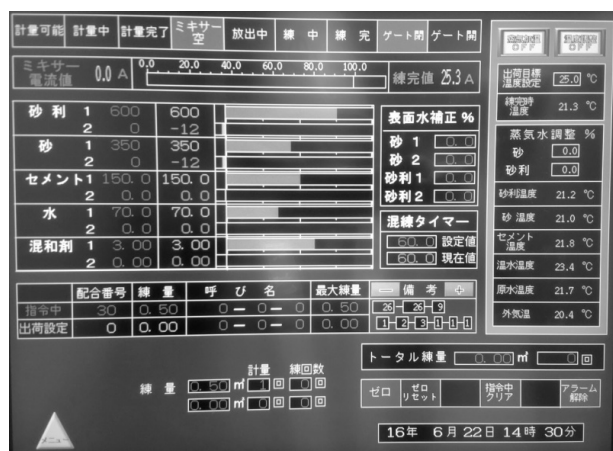


写真-6 制御盤の操作パネル画面

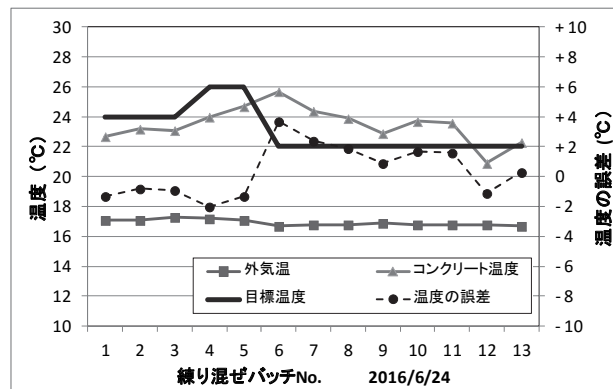


図-6 自動温度制御の試験運用結果

Summary The quality and workability of shotcrete used in mountain tunneling depend heavily on temperature of concrete. In the case of using low-temperature shotcrete, it is common practice to adjust the setting accelerator content or heat mixing water for concrete, so as to meet initial strength and bond strength requirements. There are two problems, however, with these methods. First, an excessively high content of setting accelerator leads to reduce the long-term strength of shotcrete, and second, a fluctuation in as-mixed temperature of concrete leads to reduce the stability of quality and workability. In order to solve these problems, “Smart Batcher Plant” that automatically controls the as-mixed temperature of concrete has been developed. This paper briefly describes “Smart Batcher Plant”, explains its characteristics and functions and reports on field-test results obtained in the mountain tunnel construction project.

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