

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

熊谷 幸樹¹・筒井 隆規²・滝波 真澄³・松田 浩朗⁴・山田 博⁵

¹正会員 飛島建設 土木事業本部 土木技術部トンネルG (〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸3-2-1)
E-mail: koki_kumagai@tobishima.co.jp

²正会員 飛島建設 土木事業本部 土木技術部トンネルG (同上)
E-mail: takanori_tsutsui@tobishima.co.jp

³正会員 飛島建設 土木事業本部 土木技術部トンネルG (同上)
E-mail: masumi_takinami@tobishima.co.jp

⁴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

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4地割28-24)
E-mail: hiroshi_yamada@tobishima.co.jp

NATM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、コンクリート温度に大きく依存する。たとえば、温度が低い場合、初期強度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って長期強度が低下する、練上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し供給することを目的として、コンクリート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”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、機能およびトンネル現場における試験運用結果について報告する。

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

1. はじめに

NATMによる山岳トンネルの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温度依存性が高く

(図-1)、コンクリート温度が高くなる夏期や低くなる冬期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

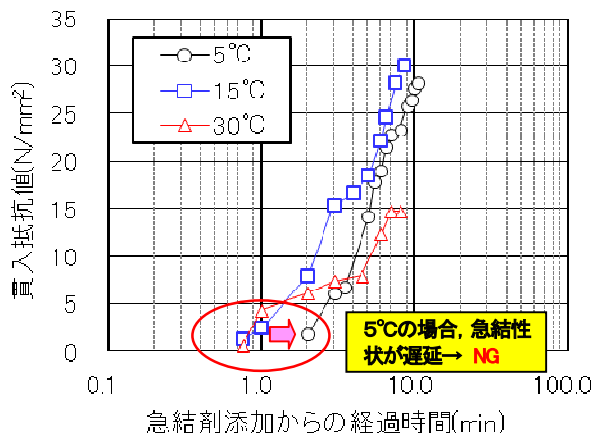


図-1 急結剤の温度依存性

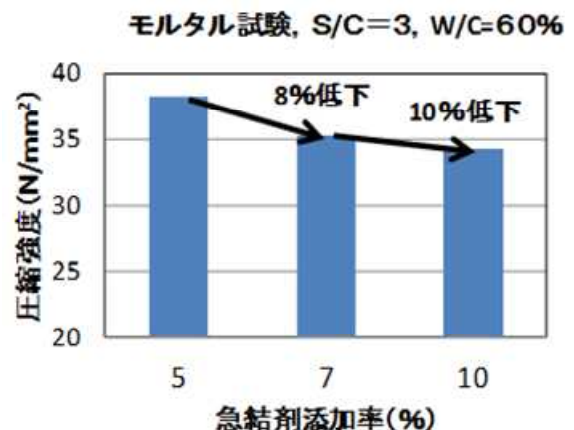


図-2 急結剤添加量が圧縮強度に及ぼす影響

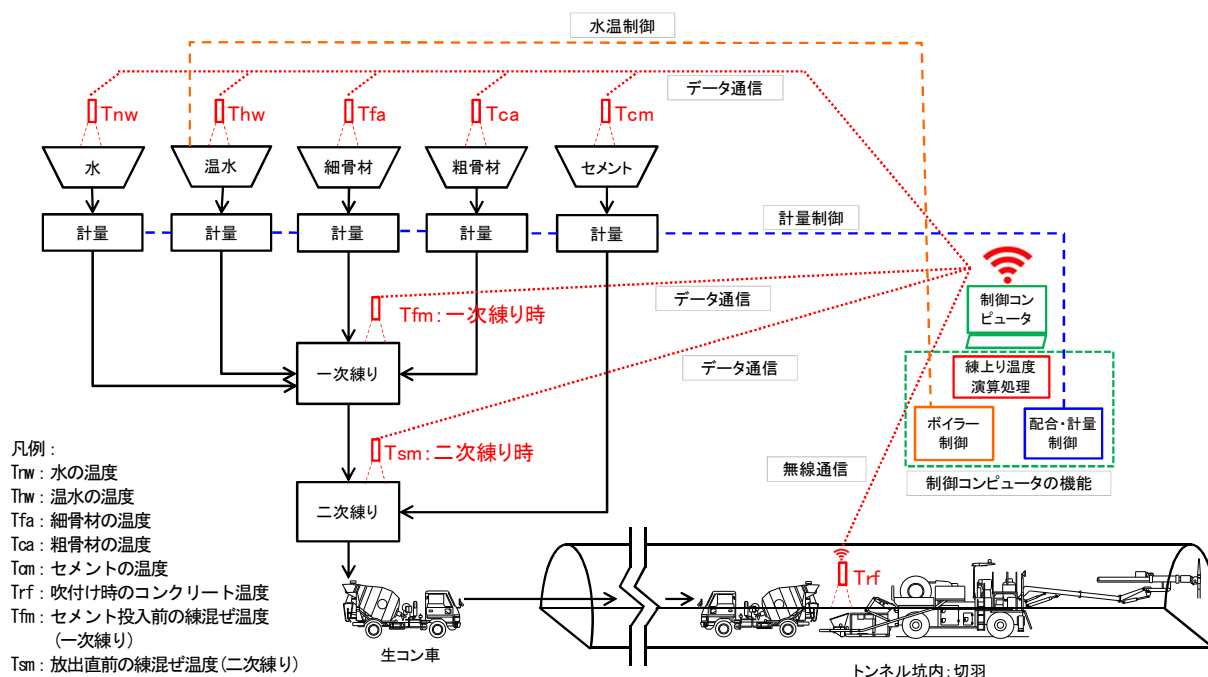


図-3 スマートバッチャープラントのシステム概念図

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、例えば寒冷地での冬期施工では、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や長期強度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(図-2)。また、練混ぜ水に温水を使用することにより、コンクリート練上り温度を上げる方法も行われているが、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、外気温変動や練混ぜ水の加熱状況等の影響で、練上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依るところが大きいことから、急結剤の最適な添加率を練上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う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、コンクリートの練上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、コンクリート練上り温度を予測し、練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、コンクリート練上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、練上り温度の測定方法、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。

2. スマートバッチャープラントの概要

(1) 開発したシステムの概要¹⁾

図-3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。

たとえば、寒冷地での冬期施工の場合、練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ヤ上等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、練混ぜ時、練上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し集約されて、ボイラーによる水温制御や配合および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特

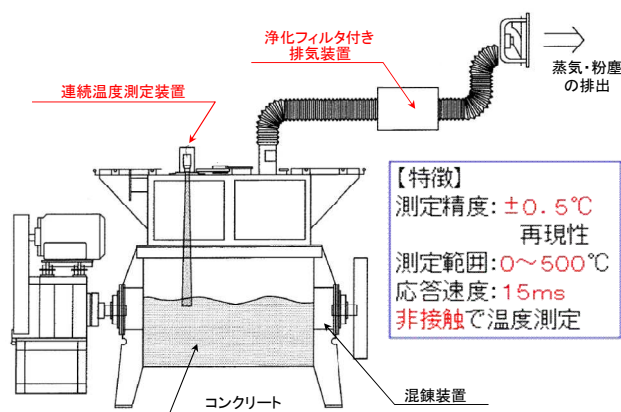


図-4 ミキサ内の温度測定システム



写真-1 ミキサ内の温度測定システム

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上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、コンクリートの練上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、目標練上り温度は、運搬や練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の材料費を5～10%程度(1 500m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。

(2) ミキサ内の温度測定システムの概要

図-4、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、シャッター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。

(3) 温水製造設備と蒸気噴霧設備の概要

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とおりである。

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。

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 実測値($^{\circ}\text{C}$)		気温($^{\circ}\text{C}$)
		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	27
測定2回目	11:10	27.1	28	28

練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(ノーリツ：ボイラ能力、90 000kcal/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、投込み式のヒータ（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）から蒸気を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）。

(4) 練上り温度の自動制御

写真-5に、自動温度制御システムの設定画面を示す。コンクリートの練上り温度は、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する。具体的には、練上り目標温度と各材料の質量と比熱を掛けることで、目標練上り温度にするために必要な熱容量



写真-2 温水製造設備

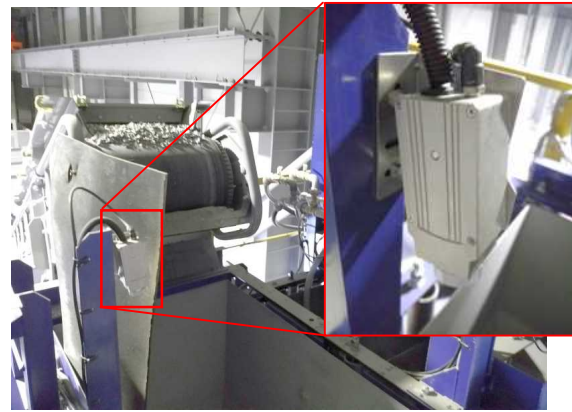


写真-4 骨材、砂の温度測定装置

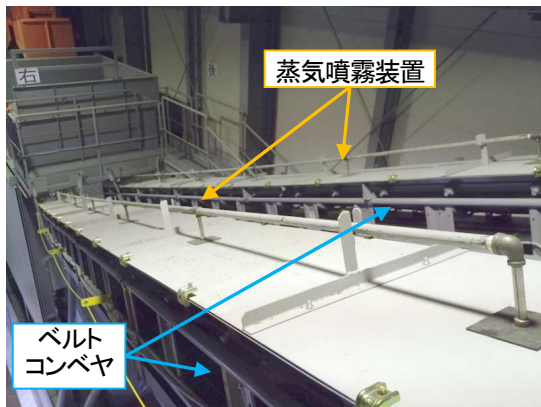


写真-3 蒸気噴霧設備

材 料		出荷時の温度をセット				
		割合	比 熱 kJ/kg℃	単位質量 kg / m³	熱容量 kJ/m³℃	温度 ℃
砂利			0.80	339.0	271.2	17.4
表面水率	%	4.19	0.0	0.0	0.0	0.0
砂			0.80	537.0	429.6	17.1
表面水率	%	4.19	0.0	0.0	0.0	0.0
セメント			0.83	190.0	157.7	20.1
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	72.4	303.3	32.4
原水 (W比)		0.0	4.19	13.8	57.8	16.1
メカニカルヒート						0.0
合 計				400.0	1269.9	26620.5
線上がり温度 (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						20.5

写真-5 自動温度制御システムの設定画面

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、コンクリート練上り温度は、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上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

(1) クラウド管理機能の概要

図-5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、支保パターンごと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特長

図-6に、クラウド管理機能の特長を模式的に示す。

クラウド管理の特長は、遠隔地から実績データを取得することである。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上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

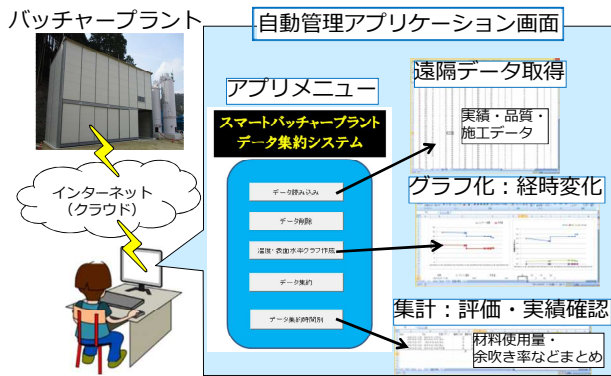


図-5 クラウド管理機能の概要

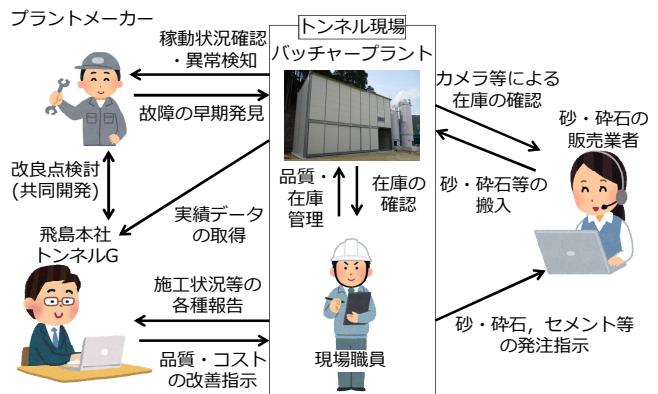


図-6 クラウド管理機能の特長

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、骨材ピンを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および品質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。

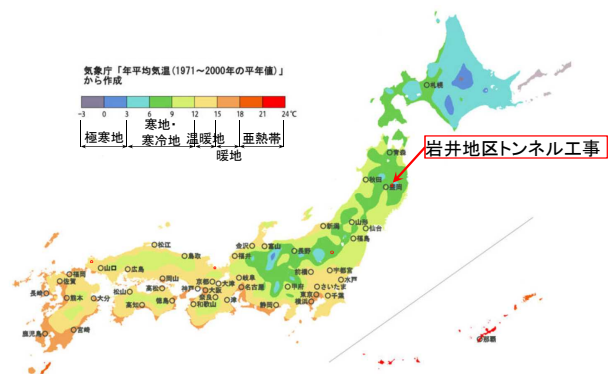


図-7 岩井地区トンネルの位置図

4. 山岳トンネル現場での適用例

(1) 現場の概要

練上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-7）。

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

(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。

図-8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



写真-6 制御盤の操作パネル画面

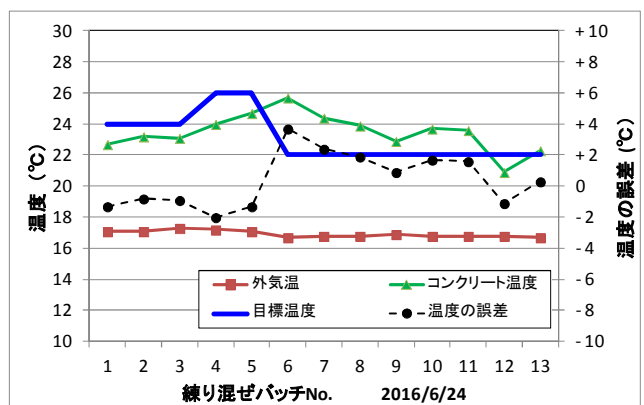


図-8 自動温度制御の試験運用結果

まり、第13バッチではほぼ0℃になったことが分かる。

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、岩井地区トンネル工事において本格的に運用する中で、冬期に-20℃にも達する寒地での山岳トンネル工事での改良改善を行いながら、コンクリート製造設備としての信頼性を高めていく予定であ

る。さらに、南北に広範囲に分布する国内での山岳トンネル建設工事への適用を想定し、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コンクリート性状を安定化させるシステム機能の追加整備も行っていきたいと考えている。

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 回年次学術講演会第VI部門，pp.943-944，2016.

(2016.8.5 受付)

DEVELOPMENT OF SMART BATCHER PLANT FOR SHOTCRETE OF NATM

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

In construction of shotcreting in NATM, temperature of mixed concrete has strong influence in quality and construction characteristics of shotcrete. Even if the concrete temperature is too high or even if it is too low, the quality and the construction characteristics of shotcrete largely decrease. Therefore the authors have developed the batcher plant that can automatically control the mixed concrete temperature to keep concrete temperature on shotcreting at tunnel surface the most suitable constantly. This batcher plant is called as “ Smart batcher plant ”. This paper reports an outline of the system of the smart batcher plant, the characteristics, the functions and the results of study case on a mountain tunnel construction site.