

## 冬期寒冷地における吹付けコンクリートの温度管理方法

## TEMPERATURE CONTROL METHOD FOR SHOTCRETE IN COLD WEATHER DISTRICTS

大橋 英紀\*<sup>1</sup>, 奥村 正樹\*<sup>2</sup>, 守屋 健一\*<sup>1</sup>, 田中 徹\*<sup>1</sup>  
 Hideki OHASHI, Masaki OKUMURA, Kenichi MORIYA, Tooru TANAKA

With the aim of establishing a desired quality level for shotcrete in cold regions during winter, we have developed a concrete temperature control system for the concrete manufacturing process. The system, which uses temperature controls for mixing water, a mixer body and mixer interior for manufacturing concrete by separate mixing, was tested in operation at the site to keep mixed concrete at a constant temperature, and was able to maintain the mixed shotcrete temperature at approximately 20°C even at an ambient temperature below the freezing point. In addition, it was confirmed that the shotcrete produced is able to meet the design criterion of estimated compressive strengths at the material age of 24 hours and the criterion of compressive strength at the age of 28 days.

**Keywords :** *batcher plant, shotcrete, concrete temperature, quick setting admixture*  
 バッチャープラント, 吹付けコンクリート, コンクリート温度, 急結剤

## 1. はじめに

山岳トンネル工事において、吹付けコンクリートは重要な支保部材であり、これまでも品質改善に関する多くの検討が行われている<sup>1)~3)</sup>。

特に、吹付けコンクリートに用いる急結剤の効果は施工時のコンクリート温度に依存し、品質に与える影響は大きく<sup>4), 5)</sup>、冬期寒冷地ではコンクリート温度が低下するため、急結剤の反応速度が低下し、付着性や初期強度の発現が阻害される。対策として、現場では練混ぜ水を加温して製造することや、急結剤の添加量を増加させること等が行われている。しかし、練混ぜ水の加温だけでは練上がり温度が安定しない場合が多く、また、急結剤の添加量増加は長期強度増進の阻害要因となる。さらには、急結剤の添加量増大はコスト増大につながること等が課題となっている。

課題解決技術の一つとして、ボイラーによる練混ぜ水の加温設備や粗骨材・細骨材加温用の蒸気噴霧装置を備え、コンクリートの練上がり温度を自動制御する工法が開発され実用化されている。しかしこの工法では、骨材加温に蒸気を用いるため骨材の表面水の管理が困難になるといった課題がある。

筆者らは、冬期寒冷地において、コンクリートの練上がり温度を一定に保つことが可能な独自の温度管理方法（以下、本工法）を開発した。これにより、吹付けコンクリートの品質の安定と急結剤の添加量を抑えることでコスト縮減が可能となる。

本稿では、本工法を札幌支店八雲立岩トンネル（写真1、写真2）に適用した結果を報告する。



写真1 現場コンクリート製造設備



写真2 吹付けコンクリート施工状況

\*1 戸田建設株式会社技術開発センター 修士（工学）

\*2 戸田建設株式会社技術開発センター

Research and Development Center, TODA CORPORATION, M.Eng.

Research and Development Center, TODA CORPORATION

## 2. コンクリート製造設備の概要

図1にコンクリート製造設備の概要と温度測定位置, 写真3に練混ぜ水温加温設備, 写真4にミキサ本体加温設備, 写真5に温風ヒーターによる加温設備を示す。

コンクリート製造設備は一般的に用いられているプラント設備に, 各材料温度の自動測定機器, 練混ぜ水の温度制御装置, ミキサ本体保温設備, ミキサ内用の温風ヒーター設備を追加した。

図2に本工法における吹付けコンクリートの製造フローを示す。本工法の特徴を以下に示す。

### ①練混ぜ水の温度制御

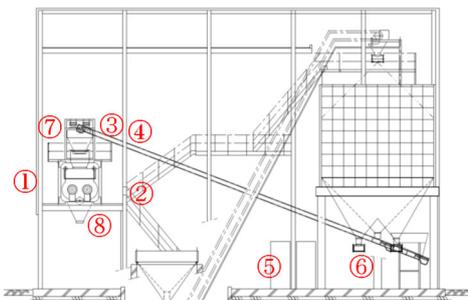
(分割練混ぜ方式におけるコンクリートの練混ぜ水(一次水)を灯油式ボイラー(60,000kcal×2台)により40~70℃の任意の温度に加温)

### ②ミキサ本体の温度制御

(ミキサ本体を電熱線(150W×28本)により40~70℃程度の温度に任意に加温)

### ③ミキサ内部の温度制御

(ミキサ内部を電気式の温風ヒーター(10kW×1台)により任意に加温)



①屋外 ②室内 ③細骨材 ④粗骨材 ⑤練混ぜ水(温水)  
⑥骨材貯蔵庫 ⑦セメント ⑧コンクリート

図1 コンクリート製造設備の概要と温度測定位置図



写真3 練混ぜ水加温設備

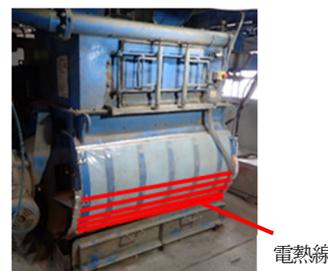


写真4 ミキサ加温設備

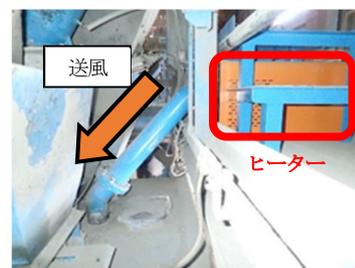


写真5 ミキサ用温風ヒーター

## 3. 現場適用試験

### 3.1 試験概要

本工法を現場プラントに適用し各種試験を実施した。試験は外気温が15℃以下の場合を対象とし, 本工法, コンクリートの製造時に練混ぜ水とミキサの温度制御を行わない(以下, 温度制御なし)場合, および, 練混ぜ水のみを40℃に加温した(以下, 練混ぜ水のみを加温)場合について各種材料温度とコンクリート温度の測定を行った。また比較として, 外気温が15℃以上の場合についても温度制御なしで同様に各種温度を測定した。

表1 使用材料

分類(記号)	使用材料
水(W)	上水道水(北海道二世郡八雲町)
セメント(C)	普通ポルトランド(密度3.16g/cm <sup>3</sup> )
細骨材(S)	粗目砂(せたな町産, 表乾密度2.60g/cm <sup>3</sup> , 粗粒率2.46)
粗骨材(G)	碎石(北斗市峯朗産, 表乾密度2.70g/cm <sup>3</sup> , 粗粒率6.34, 実積率63%)
混和材(FA)	フライアッシュ, 密度2.32g/cm <sup>3</sup> ブレン値4,200cm <sup>2</sup> /g
混和剤(Ad)	高性能減水剤, ポリエチレングリコール系

表2 配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						
		W1	W2	C	S	FA	G	Ad
55.0	60.0	128	70	360	977	86	743	2.52

表3 試験項目

試験項目	規格等	詳細
温度測定	—	屋外, プラント内, 粗骨材, 細骨材, 一次水, 二次水
コンクリート温度	JISA 1156	—
ブルアウト試験	JSCE-G-561	24時間強度を測定
圧縮強度	JISA 1107	コア供試体(材齢7, 28日)

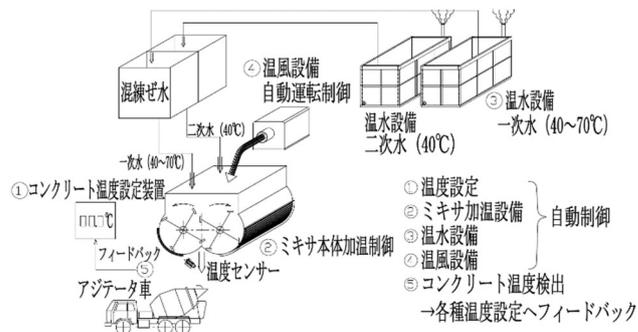


図2 吹付けコンクリート製造フロー

表 1 に使用材料, 表 2 に配合, 表 3 に試験項目を示す.

コンクリートは分割練混ぜ方式で製造した. 分割練り混ぜ方式は調整練り(一次水・粗骨材・細骨材を投入), 一次練り(結合材を投入), 二次練り(二次水・混和剤を投入)による練混ぜ方法である. また, 本練混ぜ方式は骨材表面を低水セメント比のセメントペーストで覆い骨材を改質するため, 圧縮強度や付着強度が向上し均質なコンクリートを製造することができる.

本工法では練混ぜ水温度, ミキサ本体の温度, 温風ヒーター温度を制御することにより, コンクリートの練上がり温度の目標値を 20℃程度としてコンクリートを製造した.

コンクリートの圧縮強度確認は以下の通り実施した. コンクリート製造後アジテータ車を用いてトンネル坑内に運搬し, パネル型枠に吹付けを行った. 材齢 24 時間の推定圧縮強度はブルアウト試験により測定し, 材齢 7, 28 日の圧縮強度は材齢 3 日でパネル型枠からコア供試体を採取し, その後封かん養生を行い, 試験を実施した.

なお, 本試験において急結剤はカルシウムアルミネート系を使用し, 添加率はセメントの質量に対して 9.0%とした. 比較のため, 練混ぜ水のみを加温した場合についても同量の急結剤を添加し試験を実施した.

### 3.2 各種温度の測定結果

はじめに, 外気温が 15℃以上の場合の測定結果を示す.

図 3 に外気温と材料温度の関係を示す.

外気温が 17~29℃の場合, 細骨材・粗骨材の温度は 15~25℃, 練混ぜ水は 12~22℃, セメント温度は 20~45℃となり, 材料の測定温度は外気温に応じて変化した.

図 4 に外気温とコンクリート温度の関係を示す.

外気温が 17~29℃の場合, コンクリートの練上がり温度は 17~31℃となり, 外気温の上昇に伴いコンクリート温度は高くなった.

次に, 外気温が 15℃以下の場合の測定結果を示す.

図 5~図 7 に本工法, 温度制御なしの場合, および, 練混ぜ水のみを加温した場合における外気温と各材料温度の関係を示す.

練混ぜ水の測定温度は本工法の場合, 温度制御により 60℃程度, 温度制御なしの場合 12~16℃, 練混ぜ水のみを加温した場合 30~40℃となった. これらに対して, 他材料の測定温度はいずれの場合も同程度であり, 細骨材・粗骨材温度は 8~12℃, セメントの温度は外気温の影響は小さく 10~30℃であった.

図 8 に骨材温度とコンクリート温度の関係を示す.

本工法においては粗骨材・細骨材が 10℃以下の場合でもコンクリート温度は 20℃程度で安定した. 一方, 温度制御なしの場合は骨材温度が 13~15℃に対して, コンクリート温度は 12~16℃であり, また, 練混ぜ水のみを加温した場合においても粗骨材・細骨材の温度が大きく影響していると考えられる.

図 9 に練混ぜ水温度とコンクリート温度の関係を示す.

本工法においては練混ぜ水の測定温度を 60℃程度に制御した場合, コンクリート温度は 20℃程度である. 一方, 練混ぜ水のみを加温した場合(測定温度 30~40℃), コンクリート温度は 5~18℃であった. 温度制御なしの場合, 練混ぜ水は 12~15℃であり, コンクリート温度は 13~21℃であった.

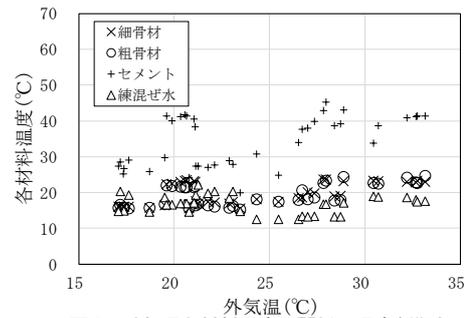


図 3 外気温と材料温度の関係 (温度制御なし)

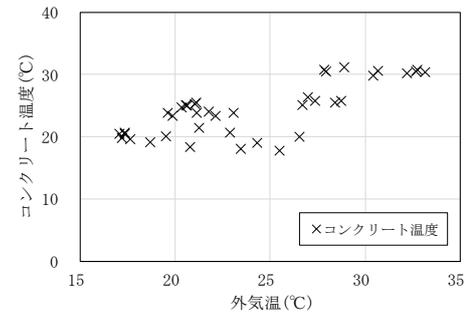


図 4 外気温とコンクリート温度の関係 (温度制御なし)

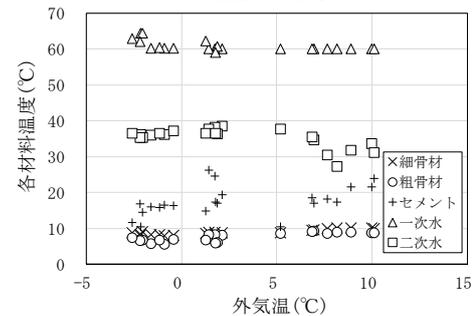


図 5 外気温と材料温度の関係 (本工法)

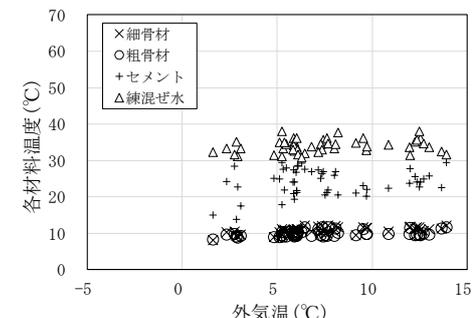


図 6 外気温と材料温度の関係 (温度制御なし)

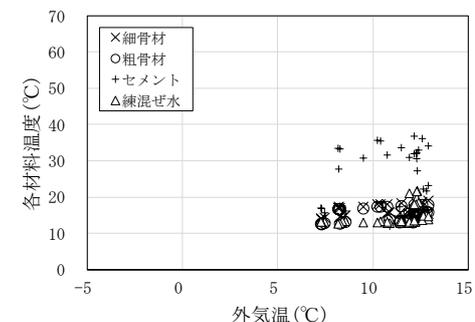


図 7 外気温と材料温度の関係 (練混ぜ水のみを加温)

以上より、本工法において練混ぜ水の温度を60°C程度まで加温し、さらにミキサ本体や内部の温度を制御することにより、コンクリート温度を概ね20°Cに保つことができることが確認できた。

図10～図12に本工法と温度制御なしの場合、および、練混ぜ水のみを加温した場合における外気温と測定したコンクリート温度、および、推定温度の関係を示す。

ここでコンクリートの推定温度は各材料温度、および、各材料の比熱を用いた算出方法がコンクリート工学ハンドブック<sup>6)</sup>に示されている(式(1))。

$$\theta_0 = \frac{\alpha_c \theta_c M_c + \alpha_a \theta_a M_a + \alpha_w \theta_w M_w}{\alpha_c M_c + \alpha_a M_a + \alpha_w M_w} + \beta \quad (1)$$

$M_c, \theta_c, \alpha_c$ :セメント質量(kg), 温度(°C), 比熱(J/kg・K)

$M_a, \theta_a, \alpha_a$ :骨材質量(kg), 温度(°C), 比熱(J/kg・K)

$M_w, \theta_w, \alpha_w$ :練混ぜ水の質量(kg), 温度(°C), 比熱(J/kg・K)

$\beta$ :セメントの水和熱、および、材料間の摩擦による上昇温度

本工法においては外気温が氷点下の場合もコンクリート温度は20°C程度であり、式(1)で算出した推定温度と比較すると、測定温度は2～5°C程度小さくなった。これは本工法の練混ぜ水の温度制御やミキサの温度制御により、コンクリート温度が安定したためと考えられる。

温度制御なしの場合、外気温(7～13°C)の変化に伴いコンクリート温度も変化する傾向が見られ、式(1)で算出した推定温度と近い値となった。これはミキサ等の温度が材料温度と同程度であり、練混ぜ中に温度が変わらなかったためと考えられる。

練混ぜ水のみを加温した場合、式(1)で算出した推定温度よりも測定温度が低くなり、本工法よりも推定温度と測定温度の差が大きくなった。これは外気温が低くミキサ等の温度が低下したためと考えられる。

いずれの場合も推定温度と測定温度には乖離があるが、今回は本工法における練上がり温度の推定に関する検討を行った。

式(1)中の $\beta$ はセメントの水和発熱、および、材料間の摩擦によるコンクリート温度の上昇を表す係数であるが、練混ぜ中の水和熱の影響は微小であることが示されている<sup>7), 8)</sup>。また、 $\beta$ は練混ぜ時間により変化することも示されている。しかし、本工法において単位セメント量、練混ぜ時間は一定である。一方、ミキサ本体や内部の温度変化によるコンクリートの温度変化に関する影響は考慮されていない。そのため、本工法においてはミキサ本体や内部の温度制御による温度変化を $\gamma$ とし、 $\beta + \gamma$ による練上がり温度の推定式を新たに検討した。これにより、コンクリートの練上がり温度 $\theta_0$ を式(2)を用いて管理することができると考えられる。

$$\begin{aligned} \theta_0 &= \frac{\alpha_c \theta_c M_c + \alpha_a \theta_a M_a + \alpha_w \theta_w M_w}{\alpha_c M_c + \alpha_a M_a + \alpha_w M_w} + \beta + \gamma \\ &= \frac{\alpha_c \theta_c M_c + \alpha_a \theta_a M_a + \alpha_w \theta_w M_w}{\alpha_c M_c + \alpha_a M_a + \alpha_w M_w} + 0.16t - 3.74 \end{aligned} \quad (2)$$

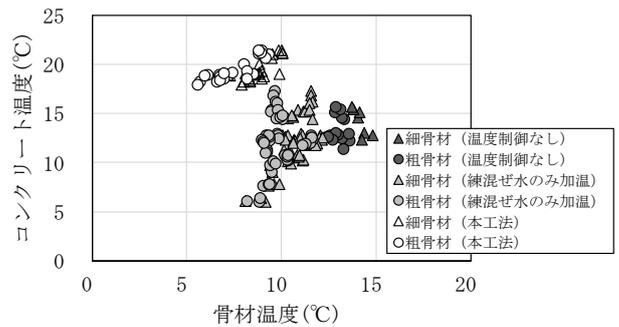


図8 骨材温度とコンクリート温度の関係

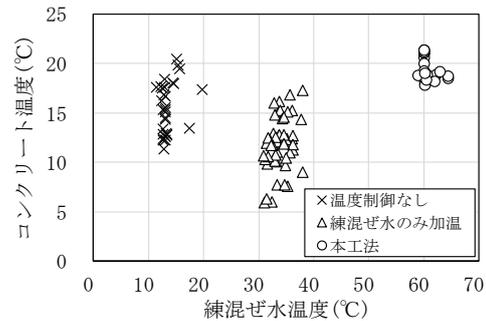


図9 練混ぜ水温度とコンクリート温度の関係

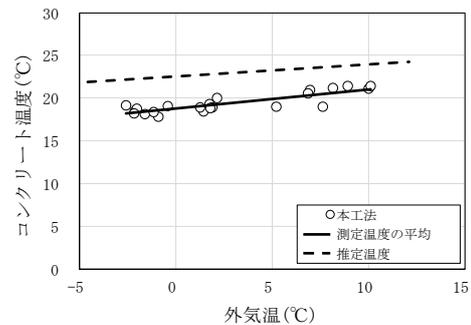


図10 外気温とコンクリート温度の関係 (本工法)

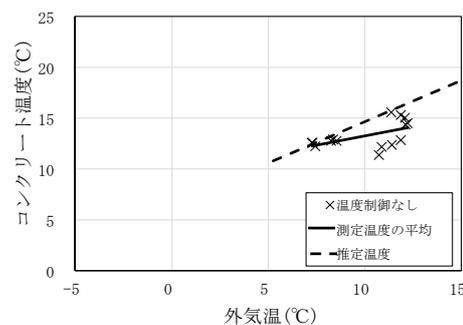


図11 外気温とコンクリート温度の関係 (温度制御なし)

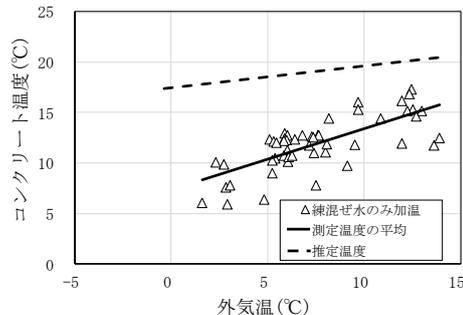


図12 外気温とコンクリート温度の関係 (練混ぜ水のみを加温)

ここで、 $t$ : 外気温 (°C) である。

図 13 に本工法の場合の式 (2) における  $\beta + \gamma$  を示す。

式 (2) の温度推定式中の  $\beta + \gamma$  は外気温と正の相関を示し、相関係数は 0.69, 決定係数  $R^2$  は 0.47, 標準偏差は 0.46 (°C) であった。

### 3.3 コンクリート強度測定結果

写真 6 にパネル型枠への吹付け状況, 写真 7 にプルアウト試験状況, 写真 8 にプルアウト試験後の状況を示す。また, 表 4, および, 図 14 に本工法を用いた吹付けコンクリートの圧縮強度試験結果を示す。

材齢 24 時間の圧縮強度はプルアウト試験により強度を推定した。その結果, 本工法を用いた 24 時間後の推定圧縮強度は 9.02N/mm<sup>2</sup> となり, 管理値 8.0N/mm<sup>2</sup> に対して 1.1 倍程度となった。

コア供試体の圧縮強度は材齢 28 日で 36.1N/mm<sup>2</sup> となり, 設計基準強度の 18.0N/mm<sup>2</sup> に対して 2 倍程度となった。また, 練混ぜ水のみを加温した場合と比較すると, 圧縮強度は材齢 7 日では変わらなかったが, 材齢 28 日では本工法の方が高くなった。

なお, 本現場において吹付け直前のコンクリート温度は練上がり温度と同等であり, 運搬による温度変化は認められなかった。

### 4. まとめ

本工法の適用効果として以下を把握することができた。

- ①本工法を適用することで外気温が氷点下の環境においてもコンクリートの練上がり温度を概ね 20°C に保つことができた。
- ②本工法において材料温度と外気温からコンクリートの練上がり温度を推定できることが確認できた。
- ③材齢 24 時間の推定圧縮強度, および, 材齢 28 日の圧縮強度は設計基準強度を満足することができた。

今後も測定を継続しデータを蓄積することで, より正確なコンクリート温度を推定することができ, 安定した品質のコンクリートを製造することができると考えられる。

### 参考文献

- 1) 田中徹, 松浦誠司, 板本淳, 魚本健人「吹付けコンクリートの耐久性に関する実験的研究」, コンクリート工学年次論文集 vol.23 No.2 pp.1363-1368 2001
- 2) 酒井芳文, 駒田憲司, 川口和義, 牛島栄「急結剤の種類および添加量が吹付けコンクリートの品質に及ぼす影響」, コンクリート工学年次論文集 vol.20 No.2 pp.1141-1146 1998
- 3) 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 pp.1381-1386 2000
- 4) 寺村悟, 岩崎昌浩, 平野健吉, 笹川幸男, 中川浩二「各種急結剤と吹付けモルタルの特性に関する基礎的研究」, 土木学会論文集 No.634 V-45 1999.11
- 5) 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 2000
- 6) 「コンクリート工学ハンドブック」, 朝倉書店 2009.10

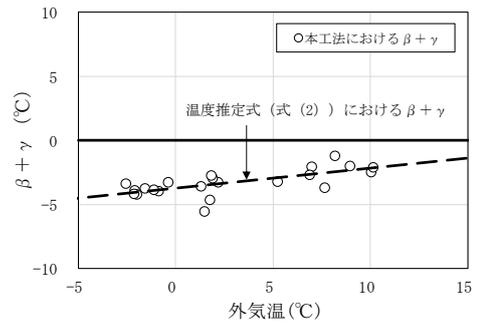


図 13 本工法における  $\beta + \gamma$



写真 6 パネル型枠への吹付け状況



写真 7 プルアウト試験状況



写真 8 本工法におけるプルアウト試験後の状況

表 4 吹付けコンクリートの圧縮強度

種類	圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )		
	24 時間*	7 日	28 日
本工法	9.02	20.9	36.1

※24 時間：プルアウト試験による推定圧縮強度

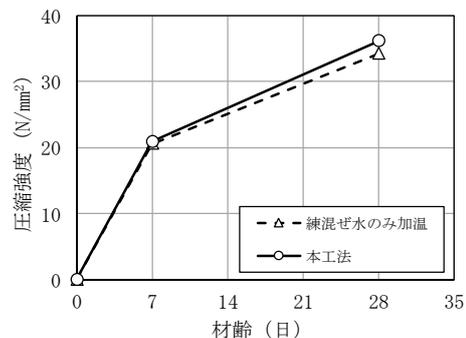


図 14 コア供試体の圧縮強度

冬期寒冷地における吹付けコンクリートの温度管理方法

- 7) 「建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 2018」  
日本建築学会 2018
- 8) 米谷裕希, 小山智幸, 小山田英弘, 伊藤是清, 原田志津男, 黒田泰弘,  
新大軌「暑中コンクリートの温度推定式に関する研究推定式中の係数 $\beta$   
に関する実機実験 4」, 日本建築学会大会学術講演梗概集 pp.625-626  
2013.8