

覆工コンクリートの高品質化セントル養生システムの開発

— 「^{はるあき}春秋コンクリート」を山岳トンネルに適用 —

Concrete-Curing System Using Temperature Controlled Forms

若林 宏彰*1 藤本 和成*2 富澤 直樹*1
Hiroaki Wakabayashi Kazushige Fujimoto Naoki Tomisawa
森山 祐三*1 内田 博之*1 長沼 諭*1
Yuzo Moriyama Hiroyuki Uchida Satoshi Naganuma

要旨

覆工コンクリートは、構造および施工上、収縮変形による拘束や早期脱型（強度不足）に起因するひび割れ・剥離が発生しやすい。これらのひび割れは、それぞれ夏期、冬期において顕著であり、コンクリートのひび割れの発生が少ない適度な温度、すなわち春期または秋期の温度環境下に維持することが重要となる。「春秋コンクリート」は、型枠養生期間中の型枠温度を調整し、コンクリートを冷却・加温することで、上記問題を解決したものである。

本報告は、春秋コンクリートの室内試験で得られた基礎性状を踏まえ、実現場として美浜東バイパス 佐田トンネルにおいて適用した効果について紹介する。

キーワード：山岳トンネル 覆工コンクリート 春秋コンクリート 型枠 養生温度 冷却 加温

1. はじめに

覆工コンクリートは、構造および施工上、14～20時間で脱型し、その後は坑内環境で養生を行う。そのため、夏期施工のコンクリートは、練上がり温度が高く、ピーク温度も高くなることから、脱型時にコンクリート表面が急激に冷却・乾燥され、収縮に起因したひび割れが発生しやすい。逆に冬期施工のコンクリートは、練上がり温度が低く、ピーク温度も低くなることから、脱型時に強度不足によるひび割れや剥離が発生しやすい。

図1は、当社施工のASトンネルにおけるひび割れ発生状況をまとめたものである。この図によると7～9月の夏期施工のコンクリートは、練上がり温度が26℃以上と高く、ひび割れが多数発生しており、一方、5月、10月の春期および秋期に施工したコンクリートは、練上がり温度が20℃程度と低く、ひび割れがほとんど発生していないことがわかる。このことから、コンクリート温度を春秋環境に調整するこ

とは、ひび割れを抑制するのに有効であることがわかる。

一般にコンクリート温度を調整するためには、コンクリートの練上がり温度をコントロールする方法と、打込み時および打込み後のコンクリート温度をコントロールする方法が考えられる。前者は、骨材温度の調整や生コン自体を液化ガス等で冷却する方法が、後者は、散水やパイプクーリングにより冷却する方法や、ジェットヒータや遮風シートにより加温する方法がある。しかし、一般に覆工コンクリートの施工は、冬期に加温するケースはあるが、夏期に冷却するケースはほとんどない。

今回、開発した「春秋コンクリート」は、養生期間中の型枠温度を調整し、コンクリートを冷却・加温して、一年を通して春秋期に打設したコンクリートと同じ温度環境で施工することを可能にしたもので、これにより収縮ひび割れや強度不足による剥離を防止し、長期耐久性を向上させる。

春秋コンクリートのトンネル現場への適用にあたっては、事前に室内試験において、コンクリートの温度特性、型枠との剥離性、若材令と長期材令における強度特性、および収縮ひずみ特性についての基礎性状を確認した。また、実現場として、美浜東バイパス 佐田トンネルにおいて大型空調機と送風用配管を使用した専用セントルを用いて、覆工コンクリートを冷却・加温することで、春秋コンクリートの性状について確認した。

本報告は、春秋コンクリートの室内試験および実現場での適用結果について紹介する。

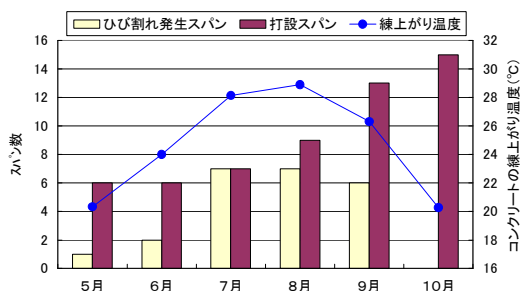


図1 ASトンネルにおける0.1mm以上のひび割れ発生状況

*1 土木事業本部 技術部 *2 大阪本店 土木部

2. 室内試験

2.1 実験目的

既存の実験データが少ない若材令コンクリートに対する冷却の影響や効果などの基礎性状を確認するために、夏期施工のコンクリートと春秋コンクリートに対して、①コンクリート温度測定、②剥離性試験、③若材令強度試験、④長期強度試験、⑤収縮ひずみ測定を実施した。

2.2 実験内容

2.2.1 コンクリート配合

実験に使用したコンクリートの配合は、適用現場である佐田トンネルの覆工コンクリートの配合とした。

表1に使用材料、表2に覆工コンクリート配合を示す。

表1 使用材料

種類	記号	物理性質など
セメント	C	高炉セメントB種、密度 3.04g/cm^3
細骨材	S1	福井県坂井市三国町産 陸砂 表乾密度 2.60g/cm^3 、粗粒率1.82
	S2	福井県敦賀市葉原産 砕砂 表乾密度 2.60g/cm^3 、粗粒率3.42
粗骨材	G	滋賀県今津町棕川産 碎石 表乾密度 2.81g/cm^3 、実績率58.0%
混和剤	WR	AE減水剤(リグニンスルホン酸化合物)

表2 覆工コンクリート配合

基準強度 (N/mm^2)	スランプ (cm)	Gmax (mm)	W/C (%)	S/a (%)	単位重量 (kg/m^3)					
					W	C	S1	S2	G	WR
18	15	20	60	47.3	170	283	383	468	1026	3.57

2.2.2 養生条件

コンクリートの練上がり温度は、夏期施工のコンクリートを想定して 30°C とした。次に打設後24時間の養生温度は、写真1に示す温度調整装置を用いて、夏期施工のコンクリートは 40°C (夏期におけるセントル天端の空間温度相当)、春秋コンクリートは 10°C (大型空調機の最大冷却温度相当)とした。その後、型枠を脱型し、室温 25°C 、湿度70%(トンネル坑内温度および湿度相当)の恒温室内で気中養生を行った。



写真1 温度調整装置

2.2.3 実験方法

①コンクリート温度測定

型枠は、実物大の覆工コンクリート($t=30\text{cm}$)を模擬した直径 30cm 、高さ 30cm のポイド型枠を使用した。型枠上部にはセントルのスキムプレートに模擬した鉄板蓋($t=6\text{mm}$)を、残りの5面には断熱材として発泡スチロール($t=5\text{cm}$)を設置した。また、型枠の上下5cmと中間の位置に熱電対を設置し、コンクリート温度を連続的に測定した。

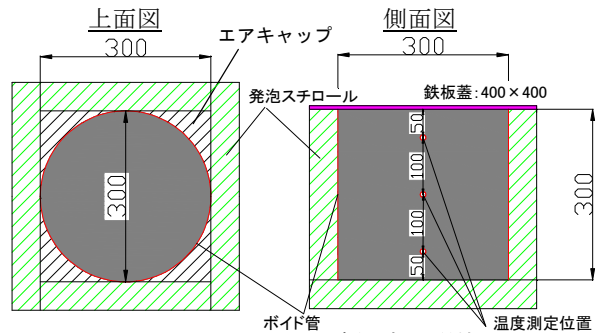


図2 コンクリート温度測定用型枠

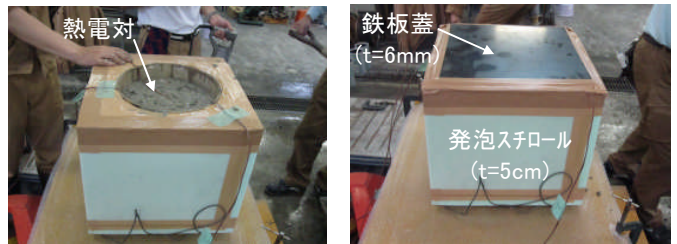


写真2 供試体作成状況

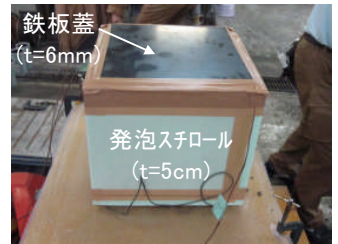


写真3 鉄板蓋設置状況

②剥離性試験

春秋コンクリートでは、型枠を 10°C に冷却することを想定したため、脱型時の強度発現不足によるコンクリート表面の剥離の有無について確認した。型枠は、コンクリート温度測定用型枠と同様の大きさ、形状のものを使用した。鉄板蓋の脱型時期は、セントルの脱型時期に相当する16時間および18時間とした。

③若材令強度試験

供試体は、 $\phi 100 \times 200$ を3本とし、写真4,5に示すようにコンクリート温度測定用型枠にコンクリートで埋設した。鉄板蓋の脱型時期は、14~24時間とし、脱型後にコンクリートを破砕して円柱供試体を取り出し、脱型時の必要強度が確保できるかを確認した。



写真4 型枠設置状況



写真5 供試体作成状況

④長期強度試験

型枠は、コンクリート温度測定用型枠と同じものを使用し、材令7, 28, 56, 91日のコア供試体(φ86)を採取して、圧縮強度試験を実施した。

⑤収縮ひずみ測定試験

若材令強度試験で作成した供試体を用いて、材令24時間でひずみゲージを設置し、その後の収縮ひずみを計測した。

2.2.4 試験ケース

室内試験ケースを表3に示す。

表3 室内試験ケース

種類	練上り温度(°C)	養生温度(°C)		①コンクリート温度	②剥離性	③若材令強度	④長期強度	⑤収縮ひずみ
		24hrまで	24hr以降					
夏施工のコンクリート	30	40	25	材令7日まで測定	—	14,16,18, 20,24hr	7,28, 56,91日	材令91日まで測定
春秋コンクリート	30	10	25		16,18hr			

2.3 室内試験結果

①コンクリート温度測定結果

コンクリート温度測定結果を図3に示す。

春秋コンクリートは、夏期施工のコンクリートと比較して、型枠の深度によっては最大20°C程度の冷却効果があるが、一番深い位置でも17°C程度冷却できることがわかった。

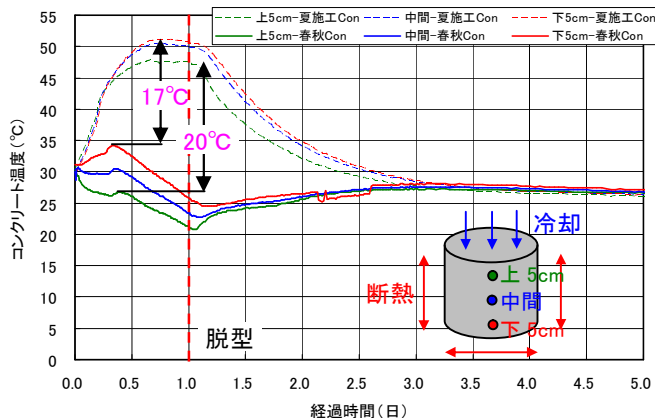


図3 コンクリート温度測定結果

②剥離性試験結果

材令16時間と18時間の剥離性試験結果を写真6に示す。

春秋コンクリートでは、型枠を10°Cに冷却しても、コンクリート表面は20°C程度と温かく、コンクリート表面に剥離が発生していないことがわかった。

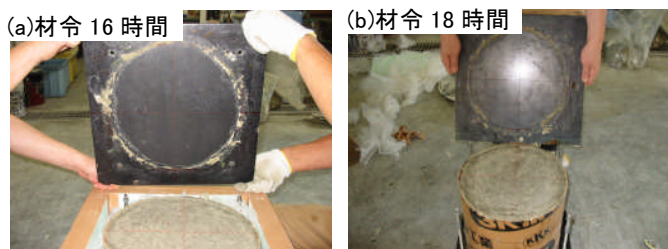


写真6 剥離性試験結果

③若材令強度試験結果

若材令強度試験結果を図4に示す。

春秋コンクリートは、材令16時間以降で脱型時の必要強度(2.1N/mm²)を満足していることがわかった。

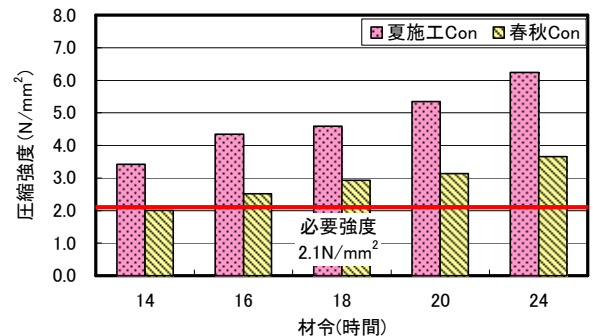


図4 若材令強度試験結果

④長期強度試験結果

長期強度試験結果を図5に示す。

春秋コンクリートは、材令7~91日で夏期施工のコンクリートの圧縮強度を20~30%程度上回ることがわかった。

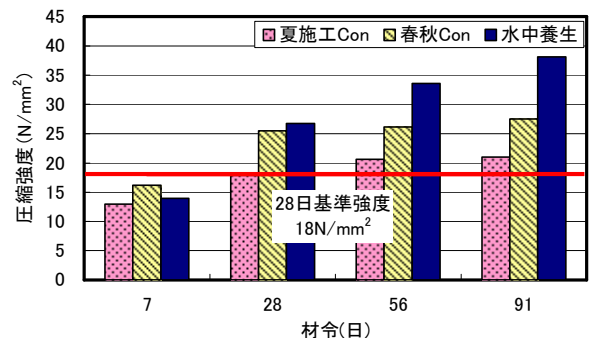


図5 長期強度試験結果

⑤収縮ひずみ測定結果

収縮ひずみ測定結果を図6に示す。

春秋コンクリートは、材令91日で夏期施工のコンクリートの収縮ひずみより200μ程度小さいことがわかった。これは、春秋コンクリートのピーク温度が、夏期施工のコンクリートよりも17~20°C程度低いため、温度および乾燥収縮ひずみが減少したものと考えられる。

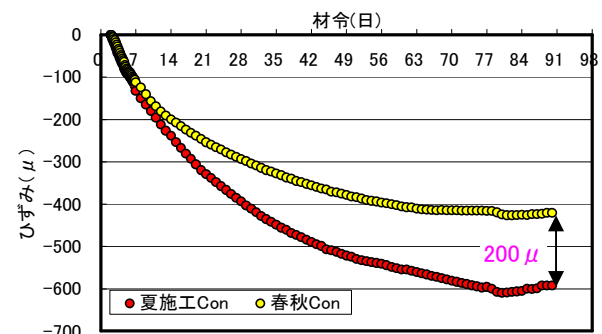


図6 収縮ひずみ測定結果

2.4 室内試験結果まとめ

春秋コンクリートの基礎性状について以下にまとめる。

- ① 春秋コンクリートは、10℃に冷却しても、コンクリート表面まで水和反応が起こり、脱型時にコンクリート表面が剥離しない。
- ② 春秋コンクリートは、脱型時の必要強度を満足できる。
- ③ 春秋コンクリートは、夏期施工のコンクリートに比べて水和反応が緩やかになるため、長期強度が増進する。
- ④ 春秋コンクリートは、ピーク温度が低いため、初期の急激な乾燥や温度変化が小さくなり、収縮ひび割れを抑制できる。その効果は、一般的な膨張コンクリートの効果に相当する。

3. 現場への適用

3.1 目的

実現場において、春秋コンクリートの性状を確認することを目的として、以下の測定を行った。

測定項目は、室内試験と同様、夏冬期に施工するコンクリートと、春秋コンクリートの①コンクリート温度測定、②ひび割れ・剥離状況、③若材令強度試験、④長期強度試験、⑤収縮ひずみ測定とした。

表4に適用現場の工事概要、図7に標準断面図を示す。

表4 トンネル工事概要

工事名称	美浜東バイパス 佐田トンネル工事
発注者	近畿地方整備局 福井河川国道事務所
施工者	株式会社 鴻池組
工事場所	福井県三方郡美浜町佐田地先
工事概要	<ul style="list-style-type: none"> ・工事延長680m、トンネル延長464m (NATM、機械掘削、内空断面積65.9m² 上半先進ショートベンチカット工法) ・地質状況：丹波層群 砂岩・頁岩・チャート

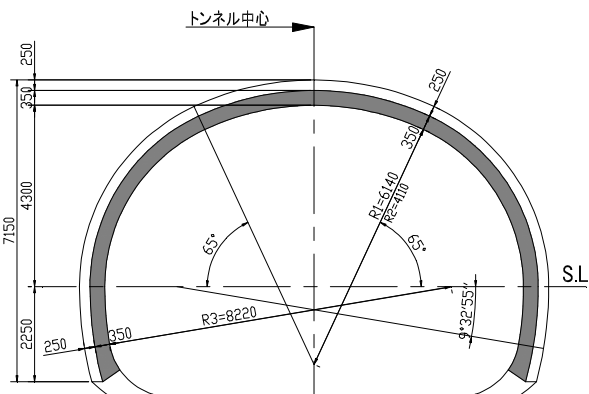


図7 標準断面図 (DIIIaパターン) の一例

3.2 春秋コンクリート専用セントル

図8に春秋コンクリート専用セントル概要図、表5に使用

用機材の仕様、写真7に使用機材を示す。トンネルの覆工コンクリートに適用する春秋コンクリートでは、大型空調機で冷却・加温した空気を補助ファンにより、セントル型枠に設置した送風用鋼管に風速10~15m/sで圧送し、型枠

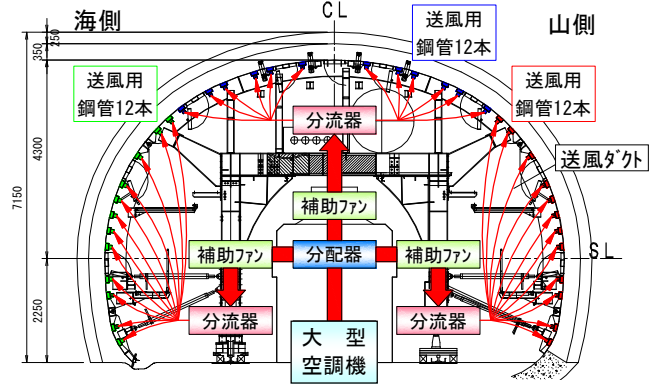


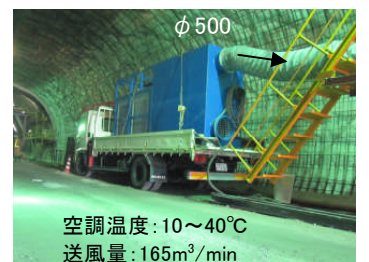
図8 春秋コンクリート専用セントル概要図

表5 使用機材の仕様

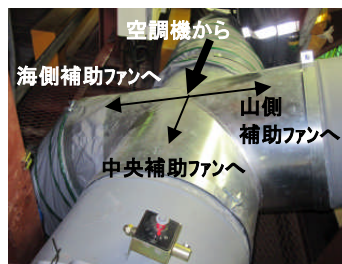
使用機材	仕様
大型空調機	<ul style="list-style-type: none"> ・能力 ; 冷房56kW/暖房63kW (60Hz) ・送風機 ; 定格風量165m³/min
分流器	<ul style="list-style-type: none"> ・送風方式 ; 12P同時送風
補助ファン	<ul style="list-style-type: none"> ・風量 ; 80m³/min
送風用配管	<ul style="list-style-type: none"> ・送風ダクト ; φ75mm



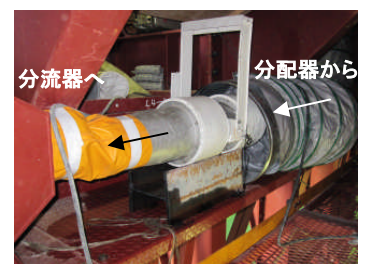
(a) セントル全景



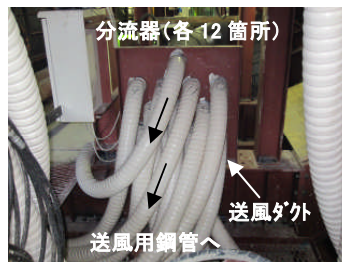
空調温度 : 10~40℃
送風量 : 165m³/min
(b) 大型空調機



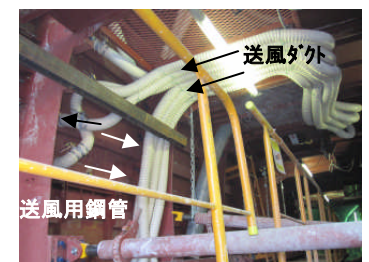
(c) 分配器



(d) 補助ファン



(e) 分流器・送風ダクト



(f) 送風ダクト・送風用鋼管

写真7 使用機材

表面を冷却・加温するもので、これにより脱型までのコンクリート温度を春秋期環境に調整した。

3.3 測定内容

3.3.1 養生条件

夏期は、温度調整を行わないコンクリートと空調機の温度を15～20℃に調整した春秋コンクリート、冬期は、ジェットヒータで加温したコンクリートと空調機の温度を40℃に調整した春秋コンクリートについて、脱型まで養生し、各測定項目を比較した。また、秋期に温度調整を行わないコンクリートのデータも採取した。

3.3.2 測定方法

①コンクリート温度測定、および収縮ひずみ測定

10.5mの覆工スパンの中央部の天端、肩部および脚部の3箇所における地山側、中心、坑内側のコンクリート温度と収縮ひずみを連続的に測定した。

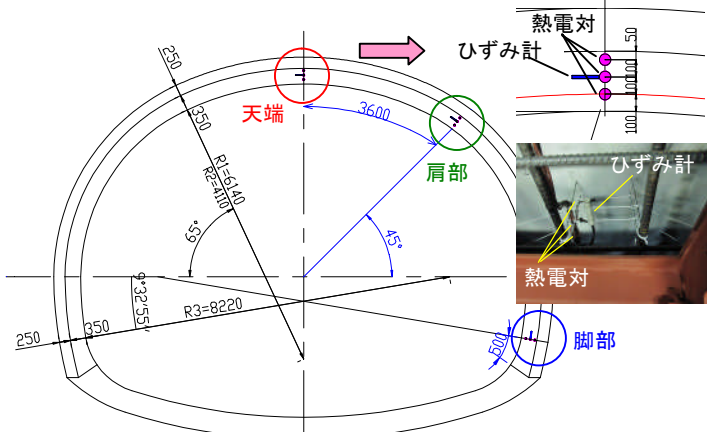


図9 コンクリート温度および収縮ひずみ測定位置

②ひび割れおよび剥離状況の確認

セントル脱型後のコンクリート表面を定期的に観察した。

③若材令強度試験

PT型テストハンマーを使用し、覆工コンクリート天端の棲部における材令14～20時間の若材令強度を測定した。

④長期強度試験

NR型テストハンマーを使用し、天端、肩部および脚部の3箇所の覆工コンクリート表面における材令7, 28, 56, 91日の長期強度を測定した。

3.3.3 測定ケース

施工条件に応じて比較した測定ケースを表6に示す。

表6 測定ケース

施工時期	ケース	練上り温度(℃)	養生条件		①コンクリート温度	②剥離性試験	③若材令強度	④長期強度	⑤収縮ひずみ
			脱型まで	脱型後					
8月	夏-無対策	30	—	坑内環境	材令7日まで測定	随時	材令14,16,18,20 hr	7.28, 56,91日	材令60日まで測定
	夏-春秋con	28	15~20℃						
11月	秋-無対策	18	—	坑内環境	材令7日まで測定	随時	材令14,16,18,20 hr	7.28, 56,91日	材令60日まで測定
	冬-ジェットヒータ	10	ジェットヒータ						
1月	冬-春秋con	10	40℃	坑内環境	材令7日まで測定	随時	材令14,16,18,20 hr	7.28, 56,91日	材令60日まで測定
	冬-ジェットヒータ	10	ジェットヒータ						

3.4 計測結果

①コンクリート温度測定結果

夏期、秋期および冬期施工時のコンクリート温度測定結果を図10～12に示す。

春秋コンクリートのピーク温度は、夏期では10℃程度（練上がり温度を考慮すると8℃程度）低下し、冬期では脚部で3℃程度上昇することがわかる。また、秋期施工のコンクリートと、夏冬期施工の春秋コンクリートのピーク温度差を比較すると天端、肩部で6℃程度と小さく、春秋環境を適切に模擬化できていることを確認できた。

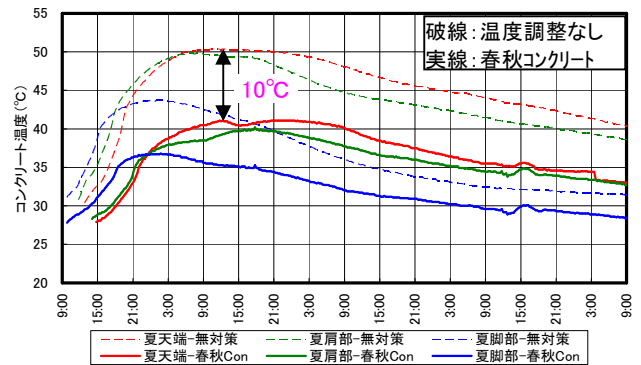


図10 夏期施工のコンクリート温度比較

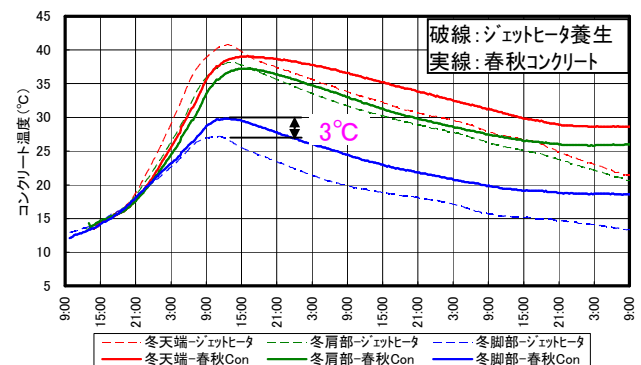


図11 冬期施工のコンクリート温度比較

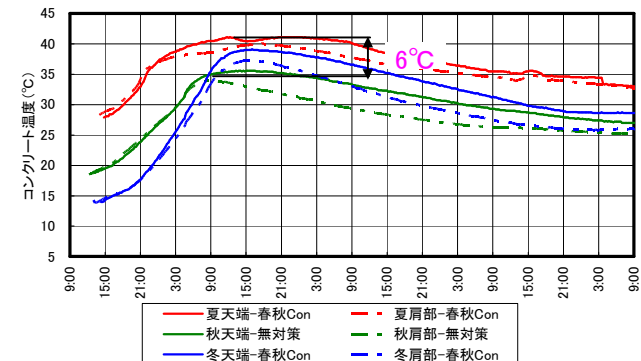


図12 秋期施工のコンクリート温度比較

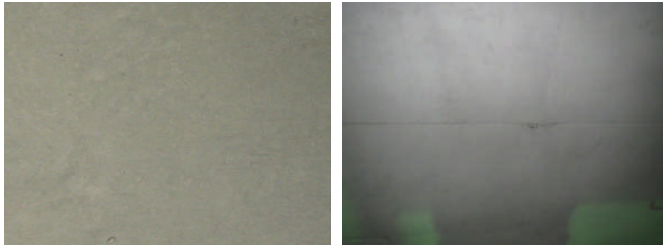
②ひび割れおよび剥離状況

セントル脱型後における春秋コンクリートの表面状況を

写真 8 に示す。

夏期施工の春秋コンクリートでは、脱型後の急激な乾燥や温度低下による収縮ひび割れもなく、緻密なコンクリートを施工できた。

同様に、冬期施工の春秋コンクリートでは、強度不足によるひび割れや剥離もなく、緻密なコンクリートを施工できた。



(a) 夏期-春秋コンクリート (b) 冬期-春秋コンクリート
写真 8 春秋コンクリートの表面状況

③若材令強度試験結果

材令 14～20 時間の若材令強度試験結果を図 13 に示す。

春秋コンクリートを含め、いずれのケースも脱型時の必要強度(2.1N/mm²)を満足していることがわかった。

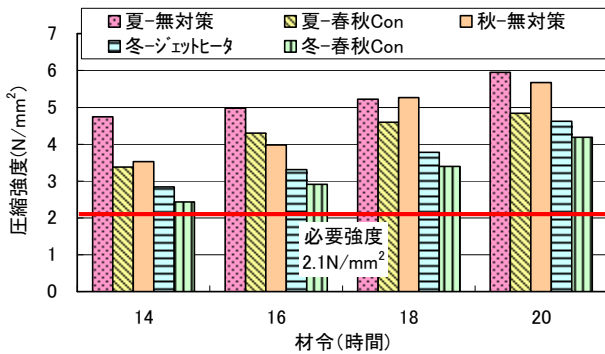


図 13 若材令強度試験結果

④長期強度試験結果

材令 7, 28, 56, 91 日の長期強度試験結果を図 14 に示す。

春秋コンクリートは、夏期施工のコンクリートの圧縮強度を 10～20%程度上回ることがわかった。

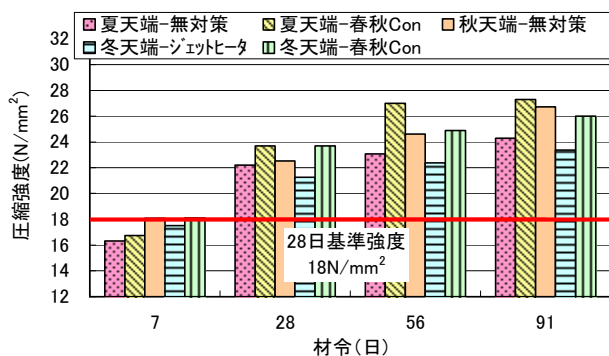


図 14 長期強度試験結果

⑤収縮ひずみ測定結果

収縮ひずみ測定結果を図 15 に示す。

春秋コンクリートは、材令 60 日で夏期施工のコンクリート脚部の収縮ひずみより 60μ程度小さいことが、また、秋期施工のコンクリートと比較して同程度であることがわかった。これは春秋コンクリートのピーク温度が、夏期施工のコンクリートよりも 10℃程度低いため、温度および乾燥収縮ひずみが減少したものと考えられる。

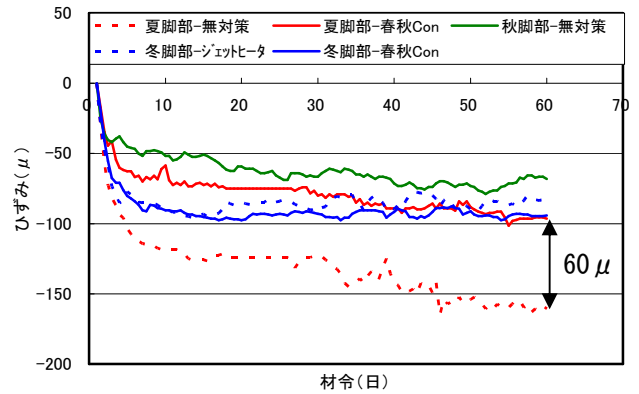


図 15 収縮ひずみ測定結果

3.5 現場適用結果まとめ

春秋コンクリートの現場適用結果を以下にまとめる。

- ① 空調機の温度を調整することで、一年を通して春秋施工時に近いコンクリート温度に調整できる。
- ② 春秋コンクリートは、夏期施工や冬期施工のコンクリートにおける収縮ひび割れや剥離を抑制できる。
- ③ 春秋コンクリートは、通常の養生時間で脱型できる。
- ④ 春秋コンクリートは、長期強度が向上する。

以上より、室内試験で得られた基礎性状を実現現場でも確認することができた。

4. おわりに

今回、春秋コンクリートの室内試験および実現現場での適用にあたり、優位な結果が得られた。

今後、春秋コンクリートの現場への適用にあたっては、使用機材の適正配置、空調機の冷却・加温能力のさらなる向上、設備・電力コストの縮減といった施工上の問題点を解決し、導入していきたいと考える。

本報告の執筆にあたり、現場適用をご承認頂いた近畿地整 福井河川国道事務所、および本工法の開発に協力頂いた(株)岐阜工業、(株)流機エンジニアリングに心より謝意を表します。