

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－

若林 宏彰¹・西村 長嗣²¹（株）鴻池組 土木事業本部技術部（〒136-8880 東京都江東区南砂 2-7-5）²近畿地方整備局 福井河川国道事務所（〒918-8015 福井県福井市花堂南 2-14-7）

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しない適度な温度、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、型枠養生期間中における型枠表面の温度を調整し、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したものである。

キーワード：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、材令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、コンクリート温度や養生温度が高くなることから、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、コンクリート温度や養生温度が低くなることから、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。

今回、開発した「春秋コンクリート」は、型枠養生期間中の型枠表面の温度を調整し、コンクリートを冷却・加温することで、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、強度不足によるひび割れや剥離を防止し、長期耐久性を向上したものである。

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、若材令時および長期材令時の強度特性、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、適用現場として美浜東バイパス佐田トンネルにおいて、大型エアコンと送風用鋼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優位性について確認した。

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。

2. 室内試験の内容

(1) 実験目的

既往の実験データが少ない若材令時のコンクリートに対する冷却効果を把握するために、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、基礎性状を確認した。

(2) コンクリート配合

適用現場である佐田トンネルにおける覆工コンクリートの配合を使用した。

表-1 に使用材料、表-2 に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 $3.04\text{g}/\text{cm}^3$
細骨材	S1	福井県坂井市三国町産 陸砂 表乾密度 $2.60\text{g}/\text{cm}^3$ 、粗粒率1.82
	S2	福井県敦賀市葉原産 砕砂 表乾密度 $2.60\text{g}/\text{cm}^3$ 、粗粒率3.42
粗骨材	G	滋賀県高島市今津町椋川産 碎石 表乾密度 $2.81\text{g}/\text{cm}^3$ 、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 コンクリート配合

基準強度 (N/mm^2)	スラブ ¹ (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

(3)養生条件

コンクリートの練上り温度は、夏期施工時のコンクリートを想定して 30℃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℃（夏期施工時のセントル天端の空間温度相当）、春秋コンクリートは 10℃（大型エアコンの最大冷却温度相当）とした。その後、型枠を脱型し、室温 25℃、湿度 70%（トンネル坑内温度および湿度相当）で気中養生を行った。



写真-1 温度調整装置

(4)実験方法

a) 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（ $t=30\text{cm}$ ）を模擬化した直径 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（t=6mm）を模擬化した鉄板蓋（ $t=6\text{mm}$ ）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。

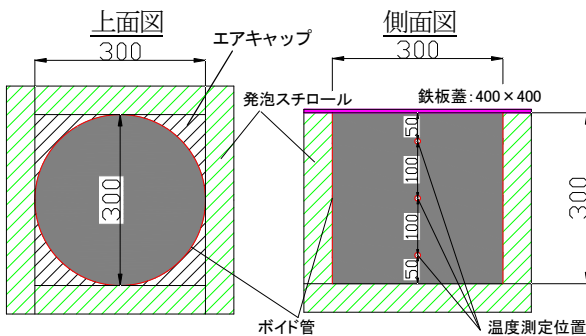


図-1 コンクリート温度測定用型枠

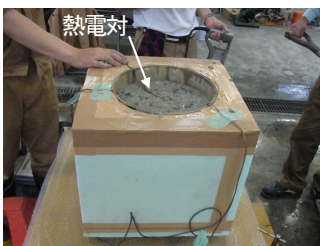


写真-2 供試体作成状況

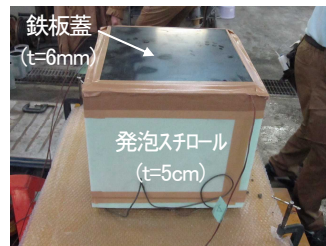


写真-3 鉄板蓋設置状況

b) 剥離性試験

春秋コンクリートでは、型枠を 10℃に冷却することを想定したため、脱型時の強度不足によるコンクリート表

面の剥離についての有無を確認した。

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。また、鉄板蓋の脱型時期は、セントル脱型時期に相当する 16 時間および 18 時間とした。

c) 若材令強度試験

供試体は、 $\phi 100 \times 200$ を 3 本とし、写真-4、写真-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碎して円柱供試体を取り出し、若材令時の圧縮強度試験を実施した。



写真-4 型枠設置状況



写真-5 供試体作成状況

d) 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 日にコア供試体（ $\phi 86$ ）を採取して、圧縮強度試験を実施した。

e) 収縮ひずみ測定

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。

(5) 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(℃)	養生温度(℃)		a)コンクリート 温度	b)剥離 性試験	c)若材 令強度	d)長期 強度	e)収縮 ひずみ
		24hrまで	24hr以降					
夏施工 コンクリート	30	40	25	材令7日 まで 測定	—	14,16, 18,20, 24時間	7,28, 56,91日	材令91 日まで 測定
春秋 コンクリート	30	10	25			16,18 時間		

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-2 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℃程度の冷却効果があるが、一番深い位置でも 17℃程度冷却できることがわかった。また、室内試験と同じ養生条件で、温度応力解析を実施した結果、ピーク温度やコンクリート温度の上昇傾向が、解析値と実測値で概ね一致することを確認できた。

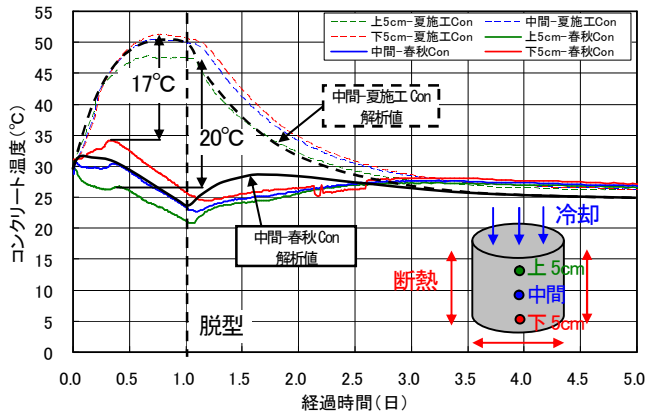


図-2 コンクリート温度測定結果

(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を確認できた。



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-3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を確認できた。

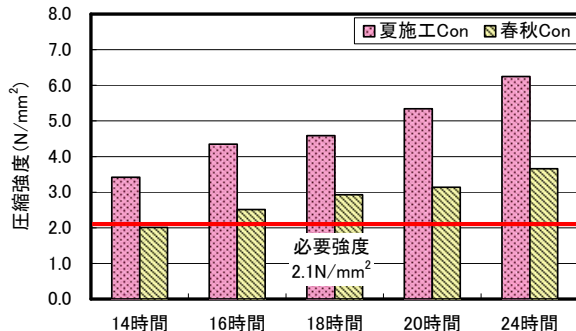


図-3 若材令強度試験結果

(4) 長期強度試験結果

長期強度試験結果を図-4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30～40%程度上回ることを確認できた。

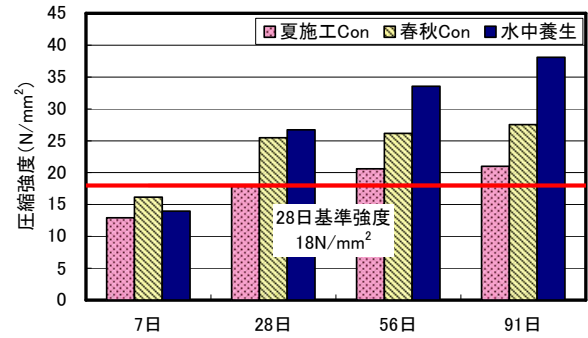


図-4 長期強度試験結果

(5) 収縮ひずみ測定結果

収縮ひずみ測定結果を図-5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程度小さいことを確認できた。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。

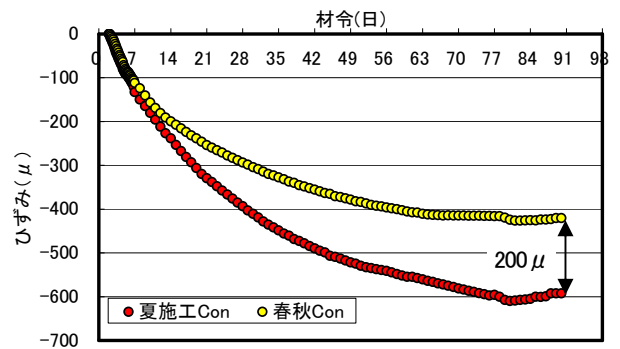


図-5 収縮ひずみ測定結果

(6) 室内試験結果まとめ

春秋コンクリートの基礎性状を以下にまとめる。

- 春秋コンクリートは、温度応力解析によりコンクリート温度の上昇傾向を概ね予想できる。
- 春秋コンクリートは、10°Cに冷却しても、コンクリート表面まで水和反応が促進され、脱型時にコンクリート表面の剥離は発生しない。
- 春秋コンクリートは、脱型時の必要強度を満足できる。
- 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、長期強度が向上する。
- 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。

4. 適用現場の概要

(1) 目的

実現場において、春秋コンクリートの基礎性状について確認した。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・剥離状況確認、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 に適用現場の概要、図-6 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	・工事延長680m、トンネル延長464m (NATM、機械掘削、内空断面積65.9m ² 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

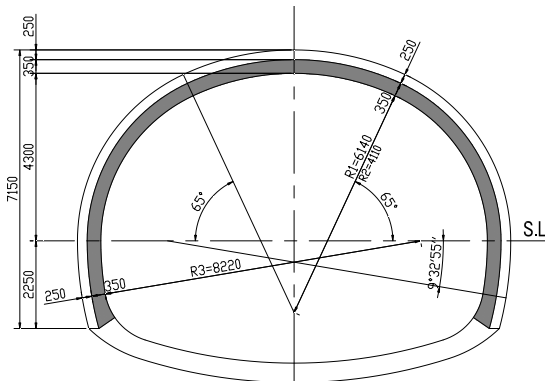


図-6 標準断面図 (DIIIa パターン) の一例

(2) 春秋コンクリート専用セントルの概要

春秋コンクリート専用セントルは、大型エアコンで冷却・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10～15m/sの風速で圧送し、型枠表面を冷却・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するものである。

図-7 に春秋コンクリート専用セントル概要図、表-5 に使用機材の仕様、写真-7～写真-12 に使用機材を示す。

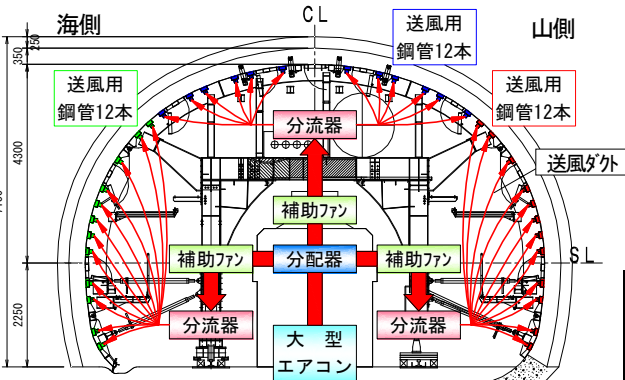


図-7 春秋コンクリート専用セントル概要図

表-5 使用機材の仕様

使用機材	仕 様
エアコン	・能力 ; 冷房56kW／暖房63kW (60Hz) ・送風機 ; 定格風量165m ³ /min
分 流 器	・送風方式 ; 12P同時送風
補助ファン	・最大風量 ; 80m ³ /min
送風用配管	・送風ダクト ; φ75mm



写真-7 セントル全景



写真-8 大型エアコン

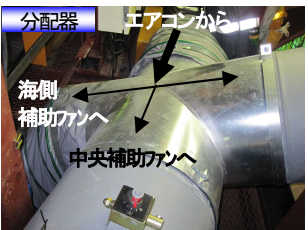


写真-9 分配器



写真-10 補助ファン



写真-11 分 流 器

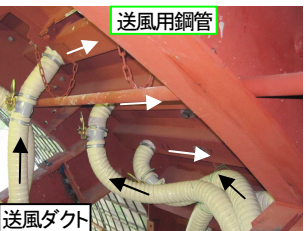


写真-12 送風用鋼管

5. 適用現場での測定内容

(1) 養生条件

夏期は、温度調整を行わないコンクリートとエアコン温度を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エアコン温度を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。

(2) 測定ケース

施工条件に応じて比較した測定ケースを表-13 に示す。

表-13 測定ケース

施工 時期	ケース	練上り 温度 (℃)	養生条件		a)コンク リート温度	b)剥離 性試験	c)若材 令強度	d)長期 強度	e)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	14.16, 18.20, 時間	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	—	—					
1月	冬-ジェットヒータ	10	—	ジェットヒータ					
	冬-春秋con	10	—	40℃					

(3)測定方法

a) 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。

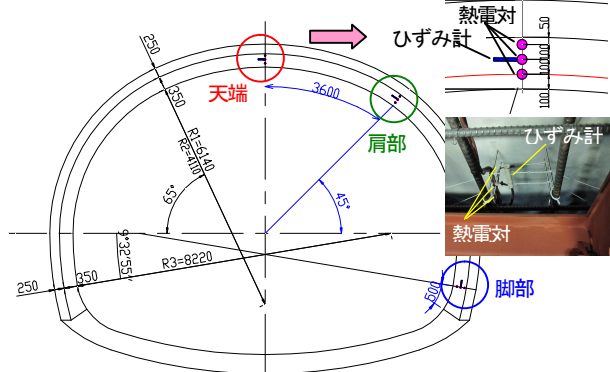


図-8 コンクリート温度および収縮ひずみ測定位置

b) 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。

c) 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、脚部における材令14～20時間の若材令強度を測定した。

d) 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日、28日、56日、91日の長期強度を測定した。

6. 適用現場での測定結果

(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覆工厚の中心部におけるコンクリート温度測定結果を図-9～図-11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℃程度上昇するとともに、天端と脚部の温度差が8℃程度（ジェットヒータによる加温は14℃程度）と小さいことがわかる。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。

さらに、適用現場と同じ養生条件（コンクリート練上り温度、送風用鋼管内の温度および風速、脱型時間）を入力値として温度応力解析を実施した結果、ピーク温度やコンクリート温度の上昇傾向が、解析値と実測値で概ね一致することを確認できた。

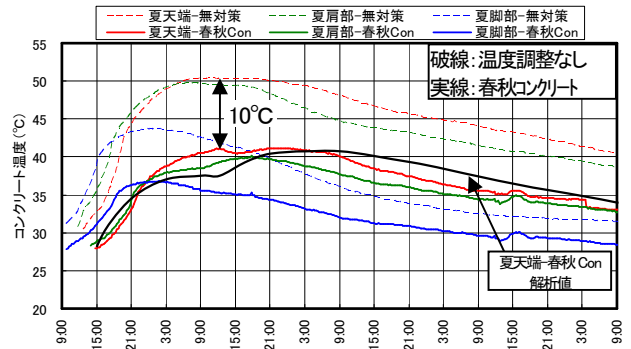


図-9 夏期施工のコンクリート中心温度比較

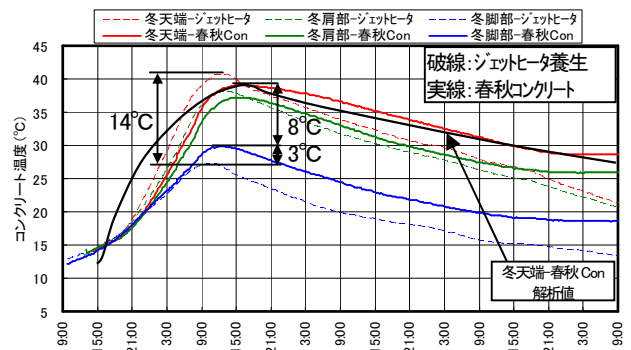


図-10 冬期施工のコンクリート中心温度比較

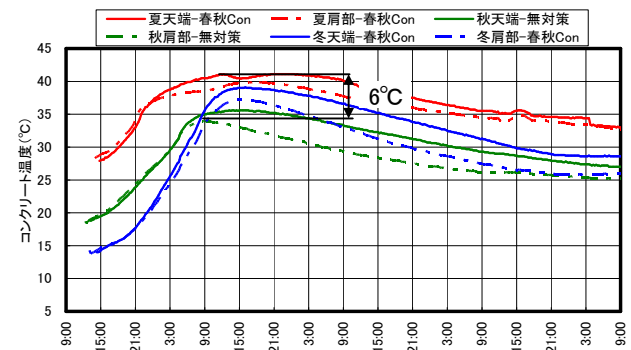


図-11 秋期施工のコンクリート中心温度比較

(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-13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、綺麗なコンクリートを施工できた。

同様に、冬期施工時は、ジェットヒータによる加温では、側壁部に部分的な表面剥離が見られたが、春秋コンクリートでは、強度不足によるひび割れや表面剥離もなく、綺麗なコンクリートを施工できた。

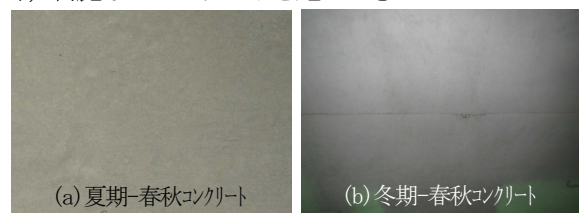


写真-13 春秋コンクリートの表面状況

(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-12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を確認できた。

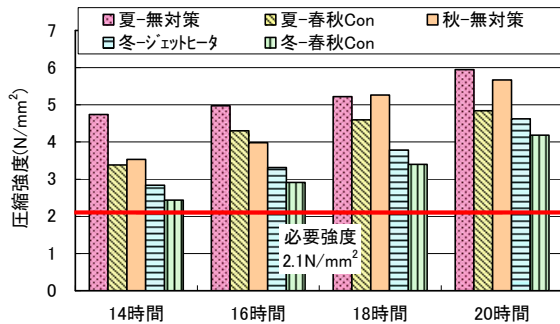


図-12 若材令強度試験結果

(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-13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、圧縮強度が10～20%程度上回ることを確認できた。

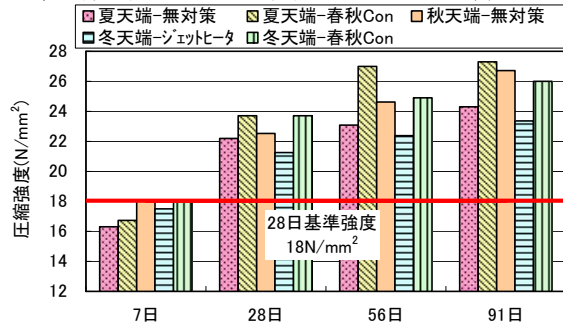


図-13 長期強度試験結果

(5) 収縮ひずみ測定結果

収縮ひずみ測定結果を図-14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、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を確認できた。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。

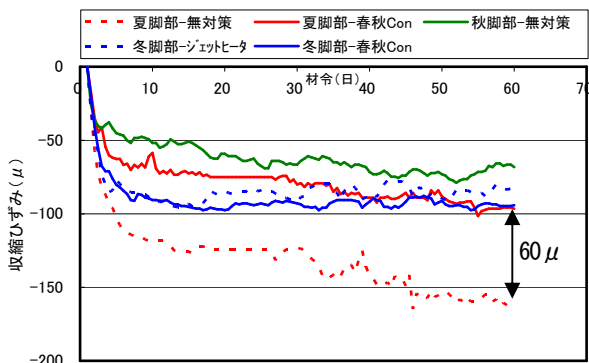


図-14 ひずみ測定結果

(6) 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。

- 春秋コンクリートは、エアコン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。
- 冬期施工の春秋コンクリートは、コンクリート全体を均一に加温できるため、強度不足によるひび割れや表面剥離を抑制できる。
- 春秋コンクリートは、通常の養生時間で脱型時の必要強度を満足できる。
- 夏期施工の春秋コンクリートは、水和反応が緩やかになるため、長期強度が向上する。
- 夏期施工の春秋コンクリートは、ピーク温度が低いいため、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。

以上より、室内試験で得られた優位な基礎性状について、実現現場でも確認することができた。

7. 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、エアコンの冷却・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ながら、導入していきたいと考える。

近年、覆工コンクリートの養生方法としては、専用の養生台車を使用して湿潤状態を維持する方法や、コンクリート面にシートを設置したり、養生剤を塗布することで収縮ひび割れを防止する方法等が開発されている。

今回、当社が開発した春秋コンクリートは、大型エアコンを使用してコンクリート温度を春秋環境に調整するシステムで、これらの養生方法に先行して型枠存置中のコンクリート温度を管理するものであり、覆工コンクリートの標準的な施工方法に伴うひび割れ発生の要因を除去できる技術である。また、山岳トンネルの覆工コンクリートのみならず、マスコンクリートなどコンクリートの温度制御が必要となる一般構造物におけるコンクリートの高品質化にも適用が可能であると考えられる。

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