

ポルトランドセメントを使用しない 超低収縮・高強度コンクリートの実用化に向けた検討 —その3 実機ミキサを使用した製造実験—

Examination on Practical Use of Ultra-low Shrinkage and High Strength Concrete without Portland Cement

—Part3 Manufacturing Experiments using Actual Full-scale Mixer—

R&D センター	峯 竜一郎	RYUICHIRO MINE
R&D センター	臺 哲義	AKIYOSHI DAI
R&D センター	坂本 遼	RYO SAKAMOTO
R&D センター	松田 拓	TAKU MATSUDA

ポルトランドセメントを使用しない超低収縮・高強度コンクリートを実用化するため、プレキャスト工場の実機ミキサを用いた製造実験（夏期、標準期、冬期）を行った。柱部材を模擬したブロック試験体（断面寸法：400×400mm, 1,000×1,000mm）を作製し、脱型後の乾湿条件や断熱材被覆などの養生条件が部材温度および部材コアの強度発現に与える影響を確認した。実験の結果、スランプフローと空気量は打込み時期の違いによらず安定していた。部材の温度は従来の高強度コンクリートと比べ低くなり、養生温度が低いと部材コアの圧縮強度が小さくなった。断熱材被覆養生を施すことで強度発現が促進されることが確認された。

キーワード：ポルトランドセメント不使用、低環境負荷、プレキャスト部材コンクリート、

高強度コンクリート、製造方法

Manufacturing experiments (summer, standard period, winter) of ultra-low shrinkage and high strength concrete without portland cement were conducted using an actual full-scale mixer of a precast concrete factory. Mass blocks (cross-sectional dimensions: 400×400mm, 1,000×1,000mm) simulating column members were prepared, and the effects of curing conditions such as wet and dry conditions after demolding and adiabatic foams on the member temperature and the strength development of the member core were investigated. As a result, the slump flow and the amount of air were stable without being affected by the season of manufacture. The temperature of the members was lower than that of conventional high-strength concrete. The compressive strength of the member cores decreased when the curing temperature was low. Strength development was promoted by covering the members with adiabatic foams curing.

Key Words: Non-portland cement, Low environmental impact, Concrete for precast members, High strength concrete, Manufacturing method

1. はじめに

ポルトランドセメント（セメント）を使用しない条件においても製造可能な超低収縮・高強度コンクリート（サスティンクリート（STC））が開発されている^{1),2)}。

筆者らは、STCのうち、ポルトランドセメントを使用しない調査を対象として、プレキャストコンクリート部材としての実用化に向けた検討を行っており、本論文集（三井住友建設技術研究開発報告 No.20）では、3編の報告を行っている。その1では「力学特性と収縮性状」

表-1 使用材料

記号	種類	物性等
BFA	高炉スラグ微粉末 (石膏入り)	密度：2.88g/cm ³ , 比表面積：4,400cm ² /g
FA	フライアッシュ	密度：2.40g/cm ³ , 比表面積：5,680cm ² /g
SF	シリカフェーム	密度：2.26g/cm ³ , 比表面積：200,000cm ² /g
EX	膨張材	密度：3.17g/cm ³ , 比表面積：5,000cm ² /g
FNS	フェロニッケル スラグ細骨材	表乾密度：2.98g/cm ³ , 粗粒率：2.60
HG	硬質砂岩砕石2005	表乾密度：2.63g/cm ³ , 実績率：59.0%
W	水	密度：1.00g/cm ³
SP	高性能減水剤I種	ポリカルボン酸系

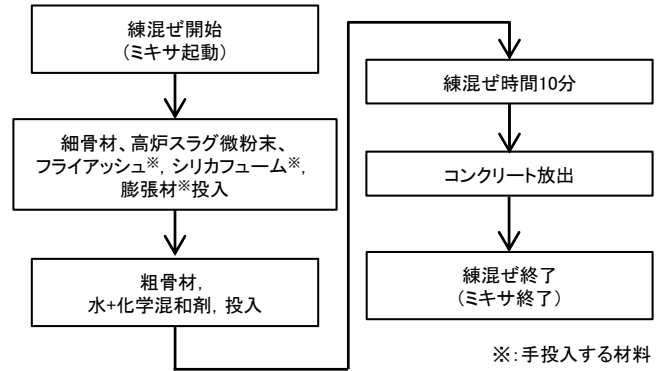


図-1 コンクリートの練混ぜ手順

表-2 コンクリートの調査条件

記号	W/B [%]	s/a [%]	目標 スランプ フロー [cm]	目標 空気量 [%]	W [kg/m ³]	Bの質量比率 [NC : BFA : FA : SF : EX]	EX [kg/m ³]	S	G
STC-RDC	15.0	60.4	60±10	3.5	130	0 : 0.537 : 0.293 : 0.147 : 0.023	20	FNS	HG

について、その2では「中性化抵抗性と爆裂性状」について、本報ではその3として「実機ミキサを使用した製造実験」について報告する。

対象とした具体的な調査 (STC-RDC) で、プレキャスト工場の実機ミキサを用いて、プレキャスト部材の製造を想定した実機試験を行い、製造方法・フレッシュ性状・硬化後の性状の確認を行った。なお、実機試験は打込み時期の影響を確認するため、夏期 (8月)、標準期 (10月)、冬期 (1月) に行った。

2. 使用材料とコンクリートの調査条件

使用材料を表-1に示す。結合材 (B) を高炉スラグ微粉末 (BFA)、フライアッシュ (FA)、シリカフェーム (SF)、膨張材 (EX) とした。高炉スラグ微粉末は4000ブレーン相当のものを使用した。細骨材は、フェロニッケルスラグ細骨材 (FNS) を使用した。粗骨材は最大粒径が20mmの硬質砂岩砕石 (HG) とした。高性能減水剤 (SP) は、主成分がポリカルボン酸系のもを使用した。コンクリートの調査条件を表-2に示す。水結合材比 (W/B) を15.0%、単位水量を130kg/m³とした。結合材は表中に記載の質量比率で計量を行った。

3. 実験方法

(1) 練混ぜ手順

実機ミキサによる練混ぜ手順を図-1に示す。まず、砂、高炉スラグ微粉末、フライアッシュ、シリカフェーム、膨張材を投入した。なお、フライアッシュ、シリカフェーム、膨張材は手投入としている。次に粗骨材、水、高性能減水剤を投入し、練混ぜを開始した。練混ぜ時間は10分とし、ミキサ負荷電力が安定していることを目視で確認し、ミキサから排出した。排出後、ただちにフレッシュ試験を行い、スランプフローと空気量が目標値の範囲内であることを確認後に円柱供試体の作製および柱模擬部材の打込みを行った。なお、夏期、標準期は3バッチ、冬期は5バッチの練混ぜを行った。

(2) 柱模擬部材の種類と養生方法

実機試験の柱模擬部材種類と養生条件を表-3に示す。断面寸法が強度発現に与える影響を確認するため、柱模擬部材の断面寸法を□1,000×1,000mm (以下、□1000) と□400×400mm (以下、□400) の2水準とした。部材の高さ寸法は、h=1,000mmとした。また、養生温度と湿潤養生が強度発現へ与える影響を確認するため、コンクリート打込み後、次に示す3つの養生を行った。

- ① 材齢3日で脱枠→保水養生テープを4側面に貼り付け→材齢21日まで湿潤養生。

表-3 柱模擬部材の種類と養生条件

記号	□1000- h1000	□1000- h1000-ad	□400- h1000	□400- h1000-ad	□400- h1000-Air	
寸法 [mm]	□1000× 1000× h1000	□1000× 1000× h1000	□400×400 ×h1000	□400×400 ×h1000	□400×400 ×h1000	
型枠材の種類	鋼製	鋼製	木合板	木合板	木合板	
断熱材厚さ [mm]	0	200	0	200	0	
養生条件	材齢3日で脱枠→材齢21日まで湿潤養生				材齢3日 で脱枠→ 気中養生	
養生条件の詳細	材齢3日 まで	鋼製	鋼製 +断熱材	木合板	木合板 +断熱材	木合板
	材齢3日 ～21日	保水養生 テープ	保水養生 テープ +断熱材	保水養生 テープ	保水養生 テープ +断熱材	気中養生
	材齢21日 以降	気中養生	気中養生	気中養生	気中養生	

- ② 6面を厚さ 200mm の断熱材で被覆→材齢 3 日
 で脱枠→4 側面に保水養生テープを貼り付け、
 6面を断熱材で被覆→材齢 21 日まで湿潤養生
 と保温養生。
- ③ 材齢 3 日で脱枠→その後気中養生。

なお、柱模擬部材の打込み・締固めは、一般的な高強度コンクリートと同様に、ホッパーを用いて打込み、棒形振動機を用いて締固めを行った。

(3) 柱模擬部材のコアの採取位置と温度測定方法

柱模擬部材のコア供試体の採取位置と温度測定位置の一例を図-2に示す。コア供試体の採取は JIS A 1107 に準拠した。採取位置は、断面寸法□1000 の柱模擬部材では 1 材齢につき中心部と端部の 2 箇所から採取した。断面寸法□400 の柱模擬部材は 1 材齢につき 1 箇所とした。

温度測定箇所は断面寸法□1000 と□400 のどちらも部材の中心部（中心部）と端部から約 50mm の箇所（端部）とし、高さは部材の中心部（h=500mm）とした。温度測定の基点は打込み完了時とした。

(4) 圧縮強度試験

円柱供試体の圧縮強度試験は、JIS A 1108 に準拠した。円柱供試体の養生条件は標準水中、20℃封かん、40℃封かんの3水準とした。標準水中と40℃封かんは供試体作製後に20℃封かん養生とし、注水から48時間後に所定の養生を開始した。

柱模擬部材のコア供試体は JIS A 1107 に準拠した。圧縮強度試験は材齢 28, 56, 91 日の3材齢で行った。

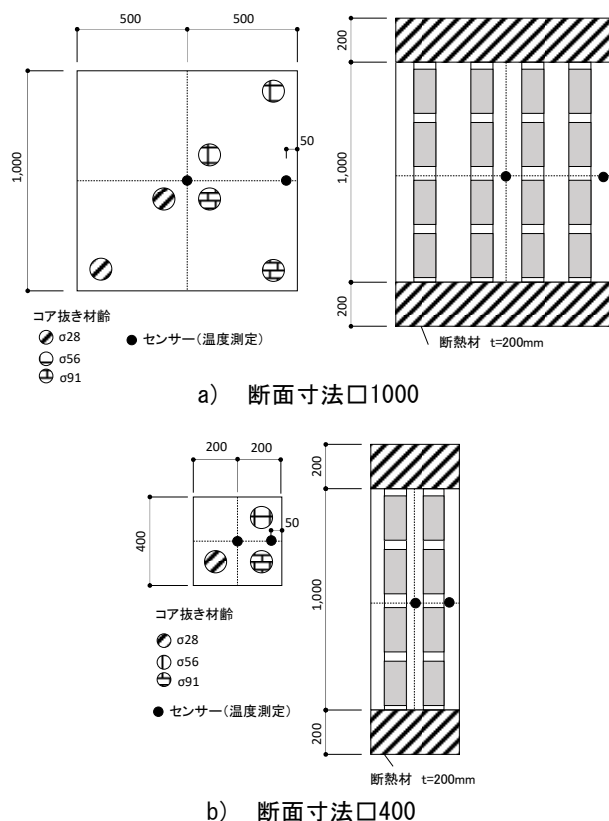


図-2 柱模擬部材のコア採取位置と温度測定位置の一例

表-4 フレッシュ試験結果

打込み時期	パンチNO.	SP [B × %]	練量 [m³]	スランブフロー [cm]				50cm到達時間 [Sec]	停止時間 [Sec]	空気量 [%]	練上がり温度 [°C]	外気温 [°C]
				1	×	2	平均					
夏期	1	1.00	1.20	66.3	×	66.0	66.0	9.5	83.9	3.4	34.0	29.0
	2	1.00	1.20	64.6	×	64.0	64.5	9.3	86.4	3.3	34.0	31.0
	3	1.00	1.20	63.1	×	62.2	62.5	9.8	99.2	3.5	36.0	33.0
標準期	1	1.00	1.20	57.4	×	57.2	57.3	12.9	69.7	3.8	27.0	16.8
	2	1.00	1.20	63.4	×	62.1	62.8	9.9	80.5	3.9	27.0	17.0
	3	1.00	1.20	65.9	×	64.3	65.1	9.4	76.0	3.5	27.0	17.3
冬期	1	0.85	1.00	61.0	×	57.8	59.4	11.5	70.6	3.8	13.0	6.9
	2	0.85	1.35	61.7	×	61.4	61.6	10.8	70.2	3.8	14.0	7.0
	3	0.85	1.35	56.6	×	56.3	56.5	19.3	63.1	3.4	15.0	6.9
	4	0.90	1.40	57.1	×	56.5	56.8	24.2	71.3	3.8	16.0	6.7
	5	0.95	1.40	68.3	×	65.7	67.0	9.7	121.5	3.7	16.0	6.3

4. 実験結果

(1) フレッシュ性状

フレッシュ試験結果の一覧を表-4に、スランブフロー試験結果を図-3に、空気量試験結果を図-4に示す。

コンクリートの練上がり温度は、夏期で 34~36℃、標準期で 27℃、冬期で 13~16℃の範囲にあり、従来の高強度コンクリートの製造と大きな違いは見られなかつ

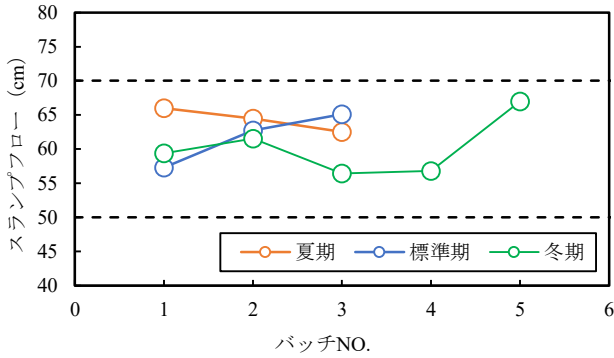


図-3 スランプフロー試験結果

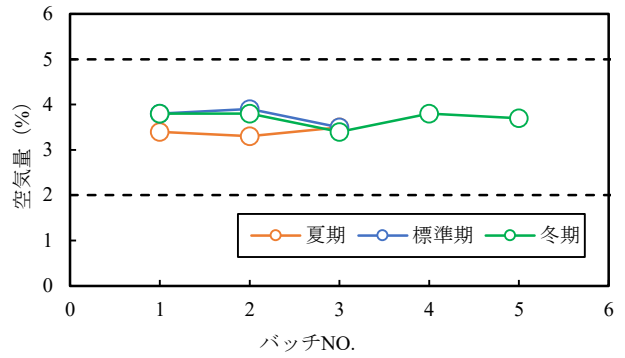
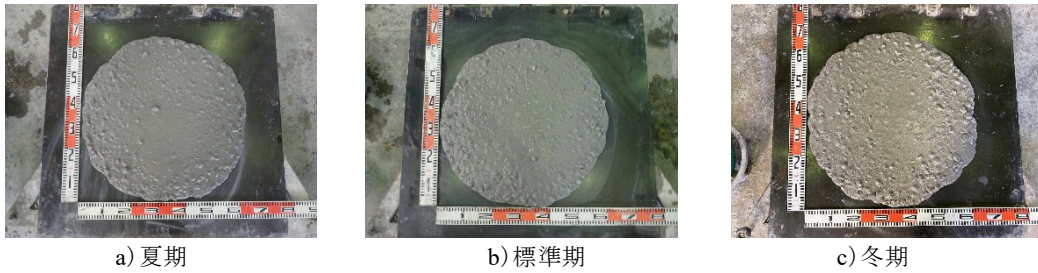


図-4 空気量試験結果



a) 夏期

b) 標準期

c) 冬期

写真-1 スランプフロー試験



写真-2 模擬柱部材の打込み状況

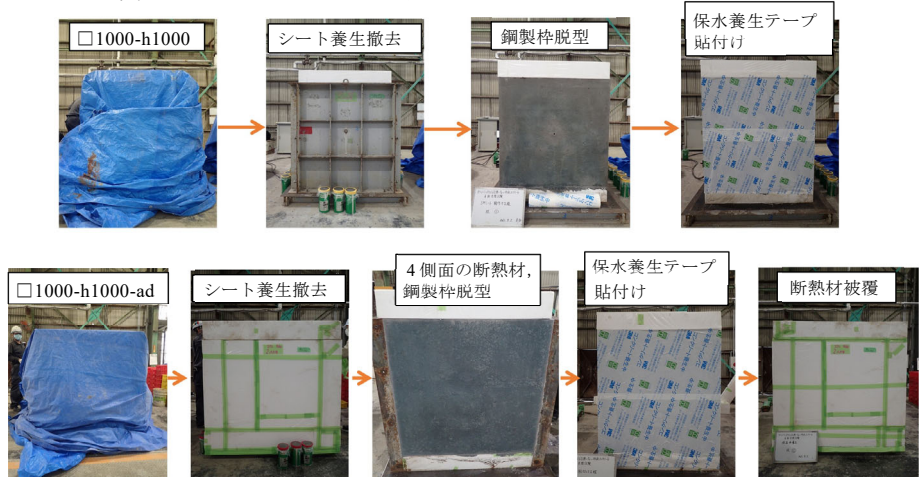


図-5 材齢3日における柱模擬部材の脱枠・養生

た。スランプフローに着目すると、夏期で 62.5～66.0 cm、標準期で 57.3～65.1 cm、冬期で 56.5～67.0 cm の範囲にあり、製造時期の違いによる大きな違いは見られなかった。空気量に着目すると、夏期で 3.3～3.5%、標準期で 3.5～3.9%、冬期で 3.4～3.8% の範囲にあり、スランプフローと同様に製造時期の違いは見られず、安定した製造を行うことができた。なお、夏期において練上がり温度が 36.0℃となったバッチ (3 バッチ目) があったが、フレッシュ性状に大きな違いは見られなかった。スランプフロー試験後のコンクリートを写真-1 に示す。目視の範囲で材料分離は見られず、スコップを用いた切返し作業は容易であり、室内試験で製造したものと同様の性状であった。柱模擬部材の打込み状況を写真-2 に示す。ホッパーを用いて打込みを行い、棒形振動機を用

いて締め固めを行ったが、充填性は良好で、従来の高強度コンクリートと同様の方法で柱模擬部材を作製することができた。締め固めにより、材料分離が発生することもなかった。

(2) 柱模擬部材の養生

材齢3日における柱模擬部材の脱型・養生状況の一例を図-5 に示す。3.(2)で前述したように、養生温度や養生中の湿潤条件が柱模擬部材の強度増進に与える影響を確認するため、□1000-h1000 は型枠を脱型した後、ただちに保水養生テープを4側面に貼り付け、乾燥を防止している。□1000-h1000-ad は、それに加え、外部環境の影響を少なくするため、断熱材で6面を被覆し、材齢21日まで養生を行った。

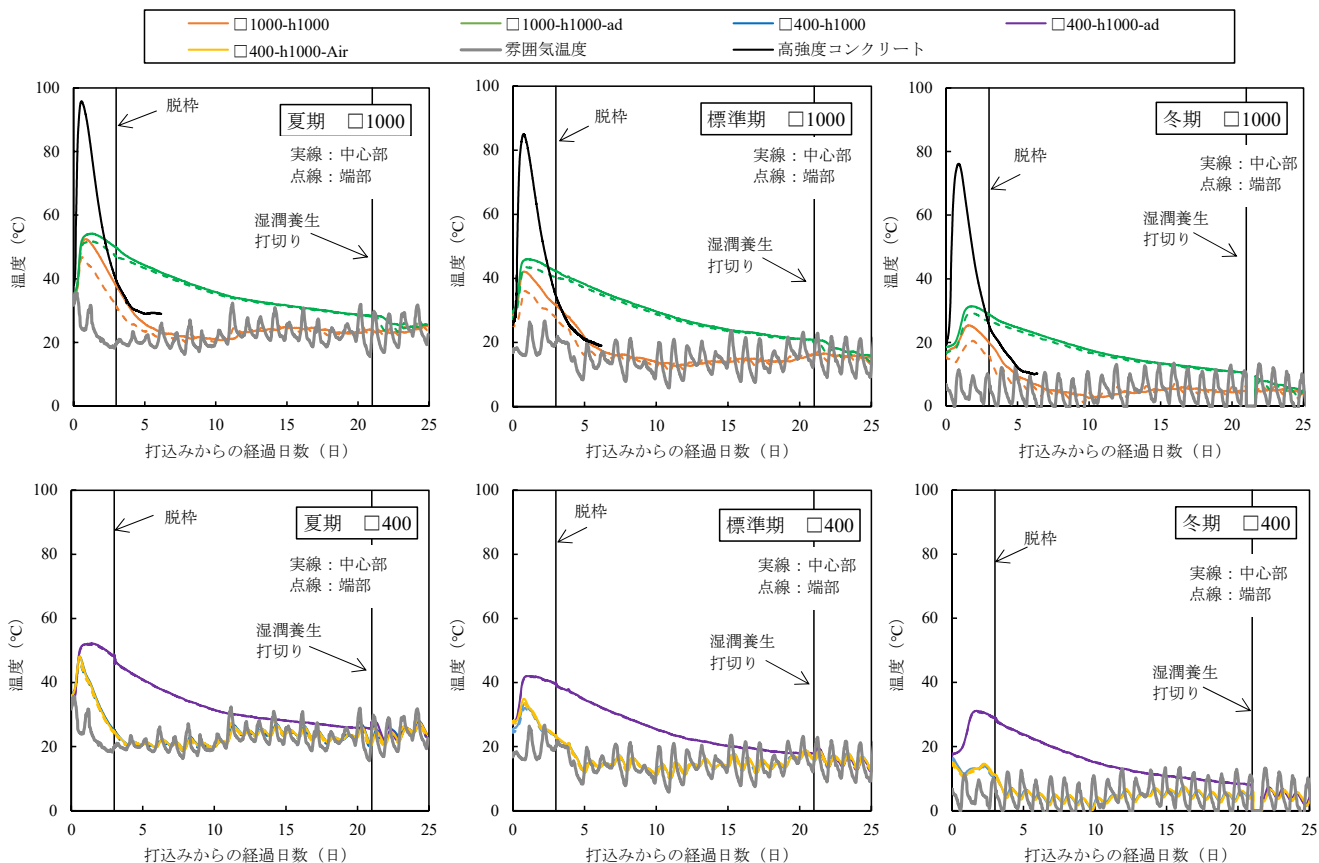


図-6 温度測定結果

(3) 温度測定結果

柱模擬部材の温度測定結果を図-6 に示す。図中には別途取得した W/C=27.5%, 普通ポルトランドセメントを使用した柱模擬部材の温度測定結果を併記(図中の凡例: 高強度コンクリート)した。

断面寸法□1000 に着目すると、打込み時期の違いによらず、断熱材で 6 面被覆を行った□1000-h1000-ad の温度が最も高く、最高温度は夏期、標準期、冬期でそれぞれ、54.2、46.0、31.4℃となった。また、中心部と端部の温度差は、□1000-h1000 の夏期、標準期、冬期でそれぞれ 5.6、6.1、4.9℃、□1000-h1000-ad の夏期、標準期、冬期でそれぞれ 2.5、2.5、2.3℃となっており、断熱材被覆を行うことで、最高温度が高くなり、中心部と端部の温度差が小さくなった。また、高強度コンクリートと比較すると STC-RDC の柱模擬部材の最高温度はいずれの打込み時期でも 40℃以上低くなる結果だった。

断面寸法□400 に着目すると、断面寸法□1000 と同様の傾向だった。また、□400-h1000 と□400-h1000-Air の温度履歴の違いはなかった。中心部と端部の温度差は断面寸法□1000 よりも小さくなった。

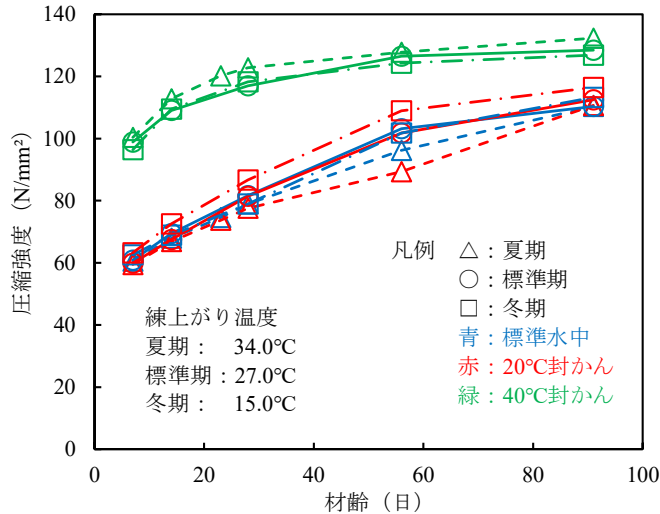


図-7 材齢と圧縮強度との関係 (円柱供試体)



写真-3 コア採取状況



写真-4 コア供試体

(4) 圧縮強度試験結果

円柱供試体の材齢と圧縮強度との関係を図-7に示す。一定の温度条件で養生された円柱供試体の強度増進には、製造時期もしくは練上り温度の影響は見られなかった。柱模擬部材のコア採取状況を写真-3に、採取したコア供試体を写真-4に示す。コア供試体は粗骨材が均一に分布しており、材料分離は確認されなかった。

円柱供試体と柱模擬部材コアの圧縮強度試験結果を図-8に示す。室内試験の養生温度を変えた強度試験の結果から、STC-RDCの強度増進は養生温度が低いほど小さくなり、柱模擬部材コアの圧縮強度は夏期>標準期>冬期となった。□1000-h1000と□1000-h1000-adの圧縮強度を比較すると、打込み時期によらず、断熱材で被覆した□1000-h1000-adの方が高く、断熱材被覆を行うことで養生温度が高くなり、プレキャスト部材コンクリートの強度増進を早めることができた。また、断面寸法の違いによる圧縮強度の影響は小さかった。

長期的な強度増進については温度条件の影響を含め確認していく予定である。

5. まとめ

ポルトランドセメントを使用しない超低収縮・高強度コンクリートの実用化に向けた検討を行い、本実験の範囲内で以下のことがわかった。

- ① 打込み時期の違いによらず、スランプフローと空気量は目標値の範囲内にあり、安定した製造ができた。
- ② 打込み時期の違いによらず、実機ミキサを用いた製造が可能だった。
- ③ 一般的な高強度コンクリートと同様の手順で打込み・締固めを行い、柱模擬部材を作製することができた。
- ④ 柱模擬部材に断熱材被覆を施すことで、養生温度が確保され、プレキャスト部材コンクリートの強度増進を早めることができる。
- ⑤ 柱模擬部材より採取したコアの圧縮強度は夏期>標準期>冬期となった。
- ⑥ 断面寸法の違いがプレキャスト部材コンクリートの圧縮強度に与える影響は小さかった。

参考文献

1) 松田拓ほか：ポルトランドセメントを使用しない超低収縮・高強度コンクリート，日本建築学会大会学術講演梗概集（中国），pp.369-370，2017.8

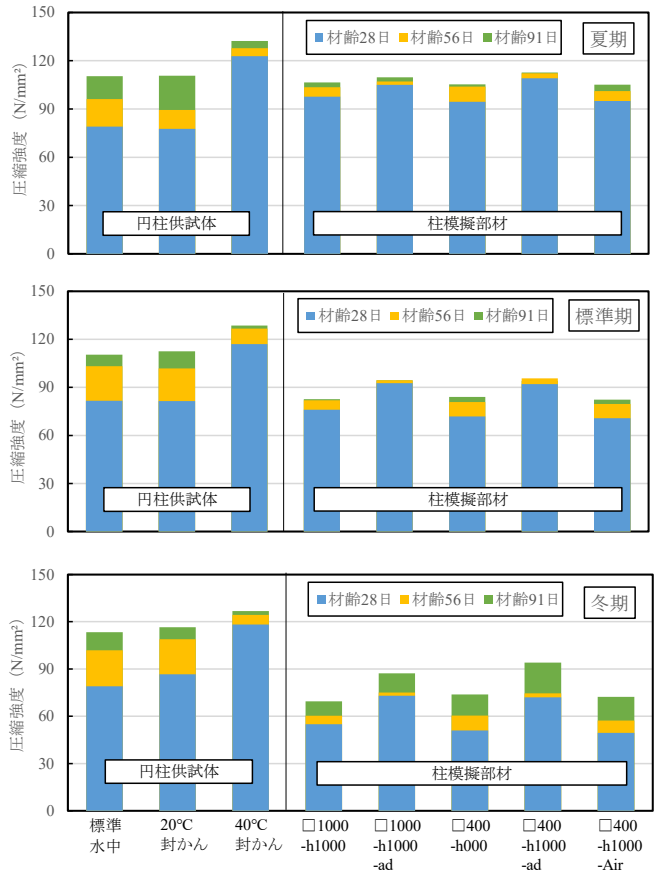


図-8 円柱供試体と柱模擬部材コアの圧縮強度試験結果

- 2) 松田拓：超低収縮・低炭素・低発熱・高強度・高流動を副産物で実現した高性能コンクリート，コンクリート工学，Vol. 59, No.9, pp.788-793, 2021. 9
- 3) 峯竜一郎ほか：人工軽量細骨材を使用した低環境負荷・高強度コンクリートの収縮特性と凍結融解抵抗性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，vol. 43, pp.857-862, 2021.7

謝辞

本実験を行うにあたり、東京大学大学院 工学系研究科 野口貴文教授にご助言をいただきました。また、日本シーカ(株)にご協力いただきました。ここに記して感謝いたします。