

超高強度 PCa コンクリート部材の 初期高温養生に関する実験的研究

技術研究所 材工研グループ 中瀬博一
技術研究所 材工研グループ 鈴木雅博
技術研究所 材工研グループ 川畑智亮
技術研究所 材工研グループ 藤井和俊

概要：近年、建築物の超高層化に伴い、使用されるコンクリートも超高強度化が進んでおり、 $F_c=100\text{N/mm}^2$ 以上の超高強度 PCa コンクリート部材の製造技術の確立を目的として実験研究を行ってきた。しかし、施工性および部材内部温度応力低減の観点から低熱系セメントを用いるため、特に冬期においては強度発現が遅いという問題があった。このため、本研究は部材の初期材齢時に高温履歴を与えることにより、部材強度発現を早める特殊な養生方法を試みた。その結果、 $F_c100\sim150\text{N/mm}^2$ 級の超高強度 PCa 部材の強度保証材齢を、材齢 28 日程度に設定することが可能であることが明らかとなった。

Key Words：プレキャスト、超高強度コンクリート、初期高温養生

1. はじめに

昨今、建物の超高層化が進み、使用される現場打ちコンクリートの強度レベルは $F_c150\text{N/mm}^2$ までが実用化されている。これらの超高強度コンクリートを、高い品質で安定して施工するためには部材のプレキャスト化が有効であると考えられる。このため、 $F_c150\text{N/mm}^2$ 級の高強度プレキャストコンクリート部材の実用化を目指し、実機レベルで検討を行ってきた。しかし、低熱系のベースセメントを用いているため、製造時期によっては強度発現が遅く、要求性能を満足するためには日数を要することや、早期出荷を想定した場合、不経済な調合設計を余儀なくされる。そこで、本研究ではこれらの問題を解決する目的で、コンクリート材齢初期に高温履歴を与え、初期強度発現促進を試みた。その結果 強度発現性が鈍い寒冷期でも、材齢 28 日で 150N/mm^2 以上の部材強度が得られることが明らかとなった。

2. 実験概要

2.1 使用材料および調合

$F_c100\text{N/mm}^2$ 以上の超高強度コンクリートでは、施工性、部材内部温度応力低減および強度発現性の観点から、一般的に低熱系セメントにシリカフェームを混入して用いる場合が多く、本研究でもプレミックスタイプのシリカフェーム混入セメントを用いた。また、使用した骨材は、現在プレキャスト製品工場で一般的に用いられているものの中から、超高強度コンクリート部材の製造に適したものを骨材の諸物性および室内試験練りの結果から選定した。コンクリートの耐火性能を保つために混入する爆裂防止用有機繊維は、過去に耐火性能確認実験を行った結果を参考に、種類、混入量を定めた。使用材料を表-1にコンクリート調合を表-2に示す。



中瀬博一



鈴木雅博



川畑智亮



藤井和俊

表-1 使用材料

種類	産地・性質	記号
セメント	シリカフェーム混入セメント (密度 3.08g/cm ³)	C
細骨材	硬質砂岩砕砂 (密度 2.58 g/cm ³ , 吸水率 1.20%)	S
粗骨材	硬質砂岩砕石 (密度 2.63 g/cm ³ , 吸水率 0.84%)	G
混和剤	ポリカルボン酸系高性能減水剤	SP
繊維	ポリプロピレン (繊維径 18μm, 繊維長 10mm)	PP

表-2 コンクリートの調合

記号	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)					SP 添加率 (C×%)
		W	C	S	G	PP	
SFC-15	15	155	1033	424	855	1.5	2.50
SFC-19	19	155	816	607	855	1.0	1.85
SFC-23	23	155	674	725	855	0.5	1.45

2.2 コンクリートの練り混ぜ・フレッシュ試験

コンクリートの練り混ぜは PCa 製品工場既存の実機ミキサ (容量 2.2m³) で 1 バッチ 1.2m³ 練りで行った。練り混ぜ方法を図-1 に示す。

フレッシュコンクリートの測定項目はスランプフロー, フロータイム (50cm, Last), 空気量, コンクリート温度, 単位水量 (改良高周波加熱法:UME 法) とした。いずれの調合も, スランプフローは 65±10cm, 空気量は 2.0±1.0%, 単位水量は ±10kg/m³ を目標値とした。

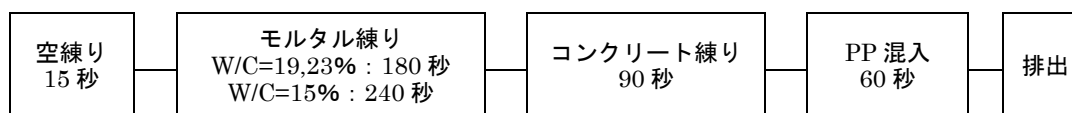


図-1 コンクリートの練り混ぜ方法

2.3 硬化コンクリートの試験項目

硬化コンクリートの圧縮強度確認用供試体 (φ100×200mm) は, それぞれ鋼製の軽量モールドに打ち込み, 表面の急激な乾燥を防ぐためラップをした後, 標準養生, 簡易断熱養生 (JASS 5T-705-2005), 部材同一養生を行った。また, 部材強度の確認のため模擬柱部材を製作し, 試験材齢ごとにコアを抜き, 圧縮強度試験を行った。模擬柱部材の形状, コア抜き取り箇所および部材内部温度測定位置を図-2 に示す。

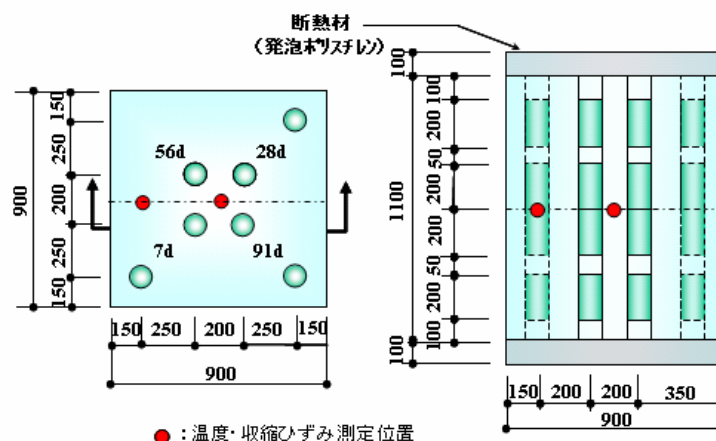


図-2 模擬柱部材の形状, コア抜き取り箇所, 温度測定位置

2.4 模擬柱部材蒸気養生条件

模擬柱部材は打込み後、厚さ 3mm の断熱シートで覆い、翌日(約 17 時間後)に脱枠し、素早く再び断熱シートで養生した。蒸気養生は打込み後 24 時間後からスタートとし、速やかに養生槽内温度を 50℃に調整した後、最高温度 70℃の高い温度設定で行った。図-3 に蒸気養生温度設定を、写真-1 に蒸気養生状況を示す。

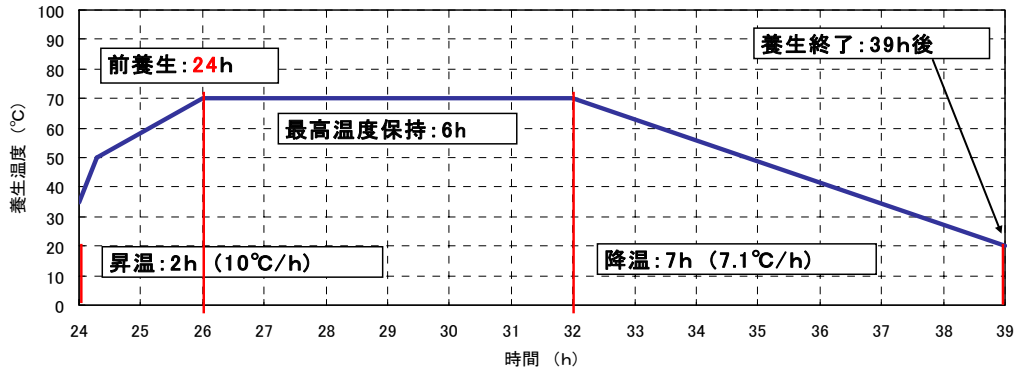


図-3 蒸気養生温度設定



写真-1 蒸気養生状況

2.5 温度履歴養生

実機試験で得られた部材中心部温度履歴をもとに、室内レベルで同一材料・調合で部材温度履歴養生試験を写真-2 に示す温度追従装置を用いて行った。温度追従装置は3槽に分かれ、それぞれ異なる温度設定を行うことが出来る。材齢 7 日までは実機試験で得た部材内部温度履歴をφ100×200mm の供試体に与え、8 日以後は実機試験を行った地域の実験時期における各試験材齢間の平均気温で養生を行った。温度履歴養生の設定温度を表-3 に示す。



写真-2 温度追従装置

表-3 温度履歴養生の設定温度

材齢 (日)	設定温度 (°C)
0~7	実験データの温度履歴
8~28	11.1
29~56	5.3
57~91	1.7

実験結果

3.1 フレッシュコンクリートの性状

フレッシュコンクリート試験結果を表-4に示す。

フレッシュコンクリートの試験では、いずれの調合も目標値が得られ、良好な性状であった。特にこの強度レベルで重要な管理事項である単位水量の試験結果は、いずれの調も調合設計値 $\pm 3.0\text{kg}$ 以内に入っており、適切な単位水量管理が出来たと言える。

表-4 フレッシュコンクリートの試験結果

調合	W/C (%)	SP (C×%)	スランプフロー (mm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)	外気温 (°C)	フロータイム (秒)		単位水量 (kg/m ³)
							50cm	停止	
SFC-23	23.0	1.45	570×535	2.1	21.0	19.0	18.0	72.0	156.7
SFC-19	19.0	1.90	615×600	2.5	22.0	18.0	12.8	128.8	157.2
SFC-15	15.0	2.50	640×620	2.2	23.5	18.0	14.5	128.4	156.9

3.2 コンクリートの温度履歴

模擬柱部材の中心部・端部、部材同一養生供試体および断熱シート内の温度履歴を図-4に示す。

24時間後より図-3に示す設定で蒸気養生を行った結果、断熱シート内温度は、ほぼ設定した温度履歴となった。夜間の外気温が 15°C 以下となる場合でも厚さ 3mm の断熱シートで覆うことにより安定した養生温度管理が出来るものと考えられる。

部材内部温度は一旦、自己発熱により最高점에達した後、蒸気養生による断熱シート内の温度上昇に伴い、再び最高温度を示した。この現象は混和剤添加量が少なく、凝結時間が短い水セメント比が高い場合に顕著

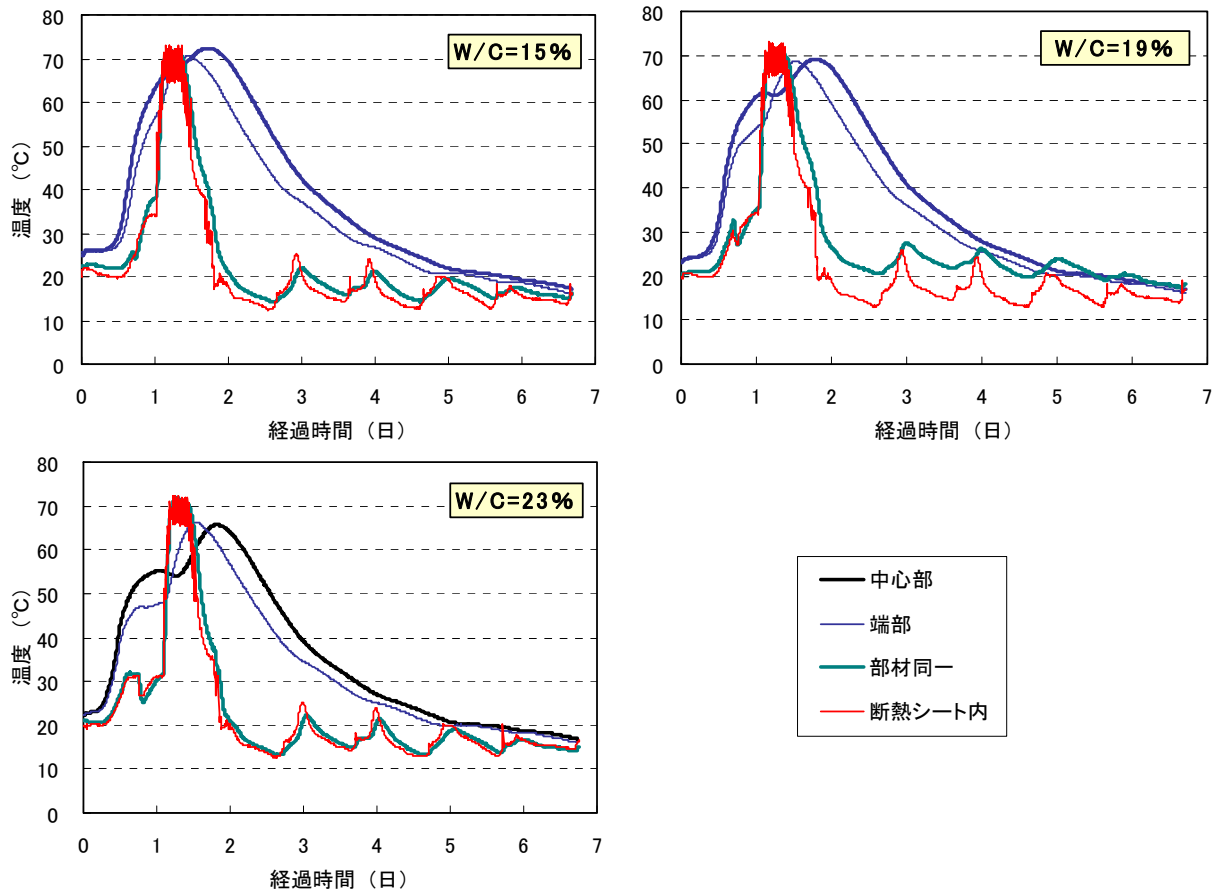


図-4 コンクリートの温度履歴

に認められた。また、自己発熱による内部温度上昇は、部材端部・中心部共ほぼ同時であったが、蒸気養生による部材内部温度変化は、部材端部が先行して上昇し、続いて中心部が上昇する傾向であった。部材内部最高温度は W/C=15%で 72.4℃、19%で 69.2℃、23%で 66.2℃であった。部材端部と中心部の最高温度の差はいずれも 2.0℃以内であった。部材同一養生供試体の温度履歴は、模擬柱部材とは異なり、断熱シート内の温度履歴と酷似した。

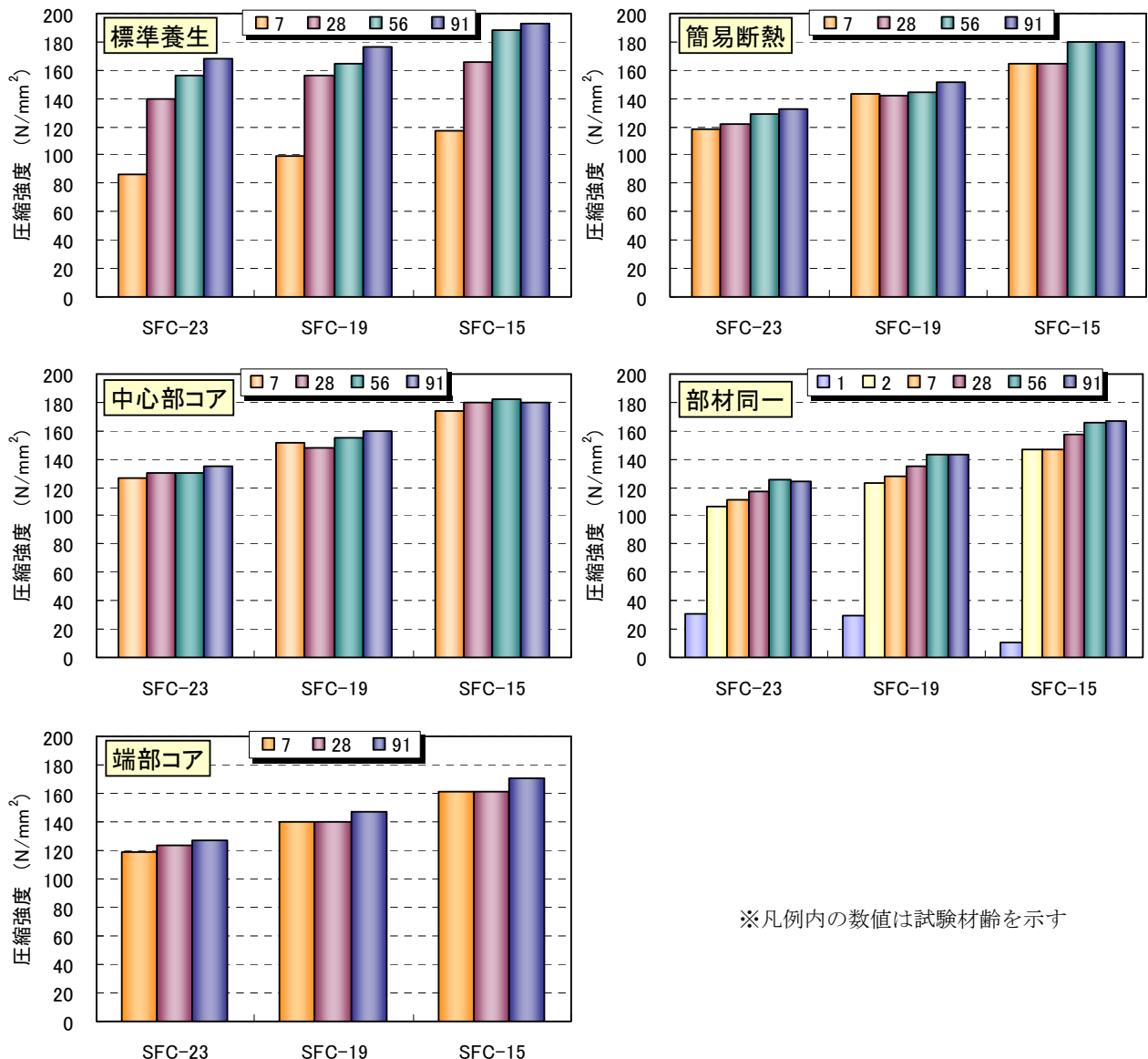
3.3 コンクリートの圧縮強度

養生方法別の圧縮強度を図-5に示す。

標準養生では、いずれの水セメント比でも材齢 91 日まで圧縮強度の増進が認められ、材齢 91 日強度は W/C=15, 19, 23%の順に、193, 176, 168N/mm²であった。

模擬柱部材中心部の材齢 7 日コア強度は、W/C=15, 19, 23%の順に、174, 152, 127N/mm²であり、材齢 91 日コア強度は、W/C=15, 19, 23%の順に、180, 160, 134N/mm²であり、材齢 7 日から 91 日までのコア強度の伸びは中心部とも 3~6%であった。部材端部も材齢 7 日から 91 日までのコア強度の伸びは、部材中心部と同様の傾向を示し 5~7%であった。材齢初期に高温の温度履歴を与えたことにより、初期強度の発現が良好であった。また、材齢初期に高温履歴を受けたことにより、温度応力ひびわれ等が懸念されたが、部材表面および部材から抜き取ったコアには、目視で観察できるひび割れは認められなかった。

試験室内で混練した実機試験と同一調合のコンクリートを、温度追従養生装置を用いて部材中心部の温度



※凡例内の数値は試験材齢を示す

図-5 圧縮強度試験結果

履歴を再現した温度履歴養生によるコンクリート強度試験結果を図-6に示す。

材齢7日で比較した場合、温度履歴養生をしたコンクリートの圧縮強度は、部材中心部のコア強度とほぼ同等の値を示し、部材の強度発現性を再現することが可能であると考えられる。ただし、材齢7日以降は強度発現が小さく、材齢91日では部材中心部と比較し温度履歴養生強度は5～7%小さかった。これは、部材中心部は外気温の影響を比較的受けにくく、表-3に示すような外気温よりも常に高い温度が保たれているため、材齢7日以後に外気温を再現した場合、外気温の影響を受けやすい温度履歴養生供試体(φ100×200mm)の方が積算温度が小さかったことが原因と考えられる。

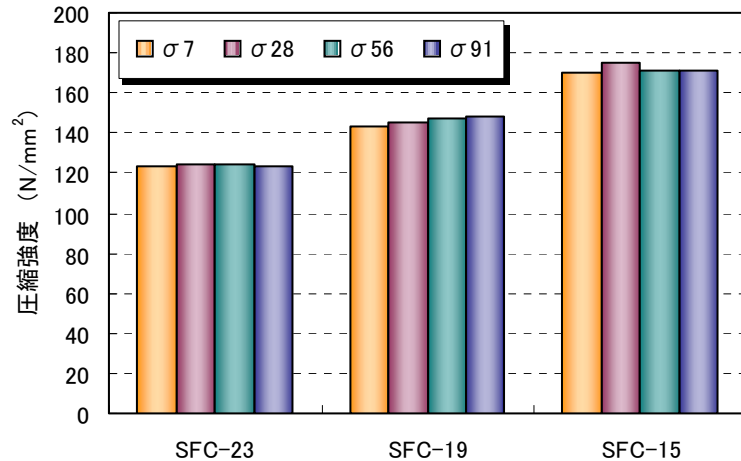


図-6 温度履歴養生強度

図-7に各種養生方法による圧縮強度とコア強度の関係を示す。簡易断熱養生強度と比べ、中心部コア強度は大きく、端部コア強度は小さいが、いずれも差は小さく、初期高温履歴による強度発現の阻害は認められなかった。また、部材同一養生強度と比べ、コア強度はいずれの場合でも大きく、部材同一養生での部材強度管理は安全側の推移であった。温度履歴養生強度とコア強度は高い相関が認められ、高温養生を行った場合でも、部材コンクリートの温度履歴を与えることにより、強度発現性を模擬できると考えられる。

本実験は材齢7日までの平均気温が14.0℃、材齢91日までの5.8℃と低温期に行われた。一般的に低熱系セメントベースの結合材を用いた場合、低温期において材齢初期の強度発現は鈍化する。しかし、材齢初期に70℃程度の高温履歴を与えた場合、長期強度増進は抑制されるものの、低温期でも大きな初期強度が得られた。このため、Fc150N/mm²級の超高強度コンクリート部材の材齢28日以前の強度保証も可能であると考えられる。

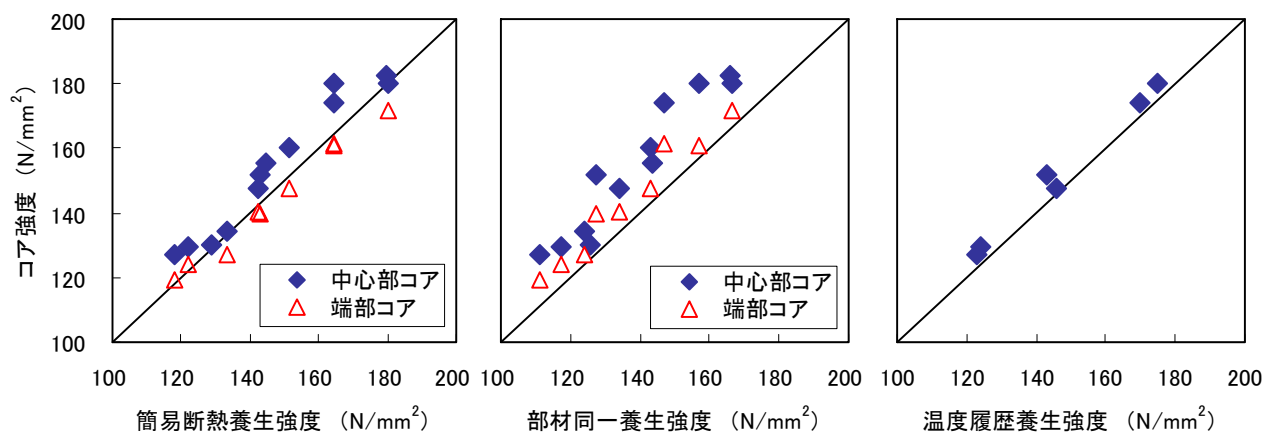


図-7 各種養生方法による圧縮強度とコア強度の関係

4. まとめ

シリカフェーム混入セメントを用いて行った本実験により、低温期でも24時間以降の材齢初期に高温履歴を寄与した場合、強度発現を大きく阻害することなく、材齢28日以前で F_c150N/mm^2 級の部材強度が得られた。これにより部材コンクリート温度管理を適切に行うことにより、季節によらず、早期に強度保証が可能であることが明らかとなった。今後、耐久性等についても高い品質を確保するために、これまで得られた結果を踏まえた上で、収縮特性等の諸物性についても検討を加える予定である。

謝辞

本研究では、宇部三菱セメント(株)、宇部三菱セメント研究所(株)およびBASFポゾリス(株)の方々の多大なご支援および貴重なご助言をいただいている。これら関係各位に、心よりお礼申し上げます。