

論文 150-200N/mm² 級超高強度コンクリートの養生方法と強度発現性

本間 大輔*1・小島 正朗*1・三井 健郎*2

要旨: 150-200N/mm² 級超高強度コンクリートの養生方法と圧縮強度発現について検討を行った。最高温度 90℃の蒸気養生を行う場合、凝結の始発以降から材齢 14 日までのどの時点で蒸気養生を開始しても、同等の圧縮強度が得られることが明らかになった。また、打込み後 2 時間から 45℃蒸気養生を実施すると、早期に脱型強度が得られ、かつ材齢 3 日以降本養生を実施しても長期材齢と同様の強度が得られることが確認された。90℃蒸気養生と、20℃、40℃水中養生した場合、90℃蒸気養生を実施したほうが 13 週までの全材齢で圧縮強度が高いこと、材齢が 7 日の時点で 13 週の 9 割程度の強度発現が得られることが明らかになった。

キーワード: 超高強度コンクリート, 蒸気養生, 圧縮強度

1. はじめに

1980 年からの建設省総合技術開発プロジェクト「New RC 総プロ」を契機に、高強度コンクリートの材料、施工技術、及び構造設計技術が飛躍的に進展し、超高層鉄筋コンクリート造建築が次々と建設された。1990 年代後半以降は Fc が 100~130N/mm² 級の超高強度コンクリートも使用され 50 階クラスの高層建物も建設されるようになった¹⁾。近年では、さらなる超高層化の実現と、広く自由度の高い快適な空間を実現するため、柱部材のスレンダー化や大スパン化が求められ、筆者らは、超高強度と高流動性に加え、耐火性、靱性を向上した超高強度・超高性能コンクリートを開発し、設計基準強度 300N/mm² までのコンクリートを開発してきた²⁻⁴⁾。本報では、設計基準強度 150~200N/mm² 級の超高強度コンクリートに対し PCa 部材の製造技術を想定し、テストピースレベルで蒸気養生方法の検討を行い、また、実機レベルで強度発現性を確認した試験結果について報告する。

度保持時間と強度発現性の関係(実験シリーズⅡ)、90℃蒸気養生開始材齢と強度発現性の関係(実験シリーズⅢ)、また硬化が遅い場合を想定した本養生前の硬化促進のための前養生が本養生後の強度発現へ及ぼす影響(実験シリーズⅣ)、実大模擬試験体と供試体コンクリートの強度発現性の違い(実験シリーズⅤ)とした。実験シリーズⅢに関しては、一般的に超高強度コンクリートは高性能減水剤を多量に使用するため硬化が遅くなり、蒸気養生開始材齢が不適切な場合に蒸気養生後、長期強度と同等の強度が得られないことがある⁵⁾。シリーズⅢでは 90 度蒸気養生実施の適切な時期を検討する実験を行う。また、実験シリーズⅣに関しては、冬場など凝結が著しく遅延する場合を想定し、本養生前に硬化を促進させるための 45℃養生を実施した場合の強度発現性の検討を行う。なお、90℃蒸気養生に関しては、既往の研究で、90℃高温養生、多くの SO₃ 量、水分の供給が重なった場合、遅れエトリングタイトの生成(DEF)が懸念されている⁷⁾。本研究では、対象としている水結合材比が低く、福田らの

2. 実験概要

2.1 実験シリーズ

既往の研究において、水結合材比 20~30% クラスの超高強度コンクリートは、硬化後に 90℃ 程度の高温養生を実施することで、材齢 7 日で長期材齢と同じ強度が得られることが確認されている⁵⁻⁶⁾。また、我々は更に水結合材比の小さい 12~20%、圧縮強度 150~200N/mm² 級の超高強度コンクリートについて、実機レベルで強度発現性の検討を行ってきた³⁾。本報では、PCa 部材を想定した蒸気養生方法と強度発現性の検討を行う。検討項目(実験シリーズ)を表-1 に示す。検討項目は、90℃蒸気養生、標準養生、40℃定温養生の養生条件の違いが強度発現性に及ぼす影響(実験シリーズⅠ)、及び 90℃最高温

表-1 実験シリーズ(検討項目)

実験シリーズ	対象	検討項目
I	テストピース	標準養生, 40℃定温養生, 90℃蒸気養生(24h), 90℃蒸気養生(48h)の比較
II		90℃保持時間(6h, 12h, 24h, 36h)の検討
III		90℃蒸気養生(24h)開始時期の検討
IV		弱材齢における硬化促進養生の影響
V	実大模擬部材	実大模擬部材とテストピースの強度発現性比較

*1 竹中工務店 技術研究所 (正会員)

*2 竹中工務店 技術研究所 工博 (正会員)

表-2 使用材料

	種類	物性
セメント	シリカフェームプレミックスセメント 1(SFC1)	密度 3.08g/cm ³ , シリカフェーム 10%
	シリカフェームプレミックスセメント 2(SFC2)	密度 3.01 g/cm ³ , シリカフェーム 15-20%
混和剤	カルボン酸系高性能減水剤	
細骨材	安山岩系砕砂	表乾密度 2.62 g/cm ³
	流紋岩質溶結凝灰岩系砕砂	表乾密度 2.58 g/cm ³
粗骨材	安山岩系砕石 (6号)	表乾密度 2.63 g/cm ³ , 実績率 61%
	流紋岩質溶結凝灰岩系砕石 (1505)	表乾密度 2.61 g/cm ³ , 実績率 59%
繊維	鋼繊維	密度 7.85 g/cm ³
	ポリプロピレン繊維	密度 0.91 g/cm ³

表-3 調合

調合	水結合材比	セメント種類	骨材種類	かさ容積 (m ³ /m ³)	単位水量 (kg/m ³)	減水剤添加率
No.1	20%	SFC1	安山岩系	0.54	155	1.40%
No.2	16%					1.60%
No.3	15%	SFC2	流紋岩系	0.45	155	1.70%
No.4	12%					2.59%

研究にあるように、水分供給が十分になされないため、これまでの我々の他の実験においても、遅れエトリングaitの生成は見られていない⁸⁾。

2.2 使用材料および調合条件

表-2 に本実験の使用材料を示す。セメントは、低熱ポルトランドセメントをベースにシリカフェームを 10% プレミックスしたセメント SFC1、及び SFC1 と比較してピーライト量を増やしシリカフェームを 15~20% プレミックスした SFC2 の 2 種類を使用した。粗骨材、及び細骨材は、安山岩系骨材、及び流紋岩系骨材を使用し、また、混和剤は、高性能減水剤、及び消泡剤を使用した。繊維には鋼繊維とポリプロピレン繊維を併用し、耐火性能の確保を行った。本実験に使用した調合を表-3 に示す。調合は水結合材比 12%、15%、16%、20% の 4 調合とし、単位水量 155kg/m² に統一した。また W/B16%、及び W/B20% の調合に対しては、セメント種類を SFC1、骨材種類を安山岩系骨材、W/B12%、及び W/B15% の調合は、セメント種類を SFC2、骨材種類を流紋岩系骨材とし、セメント種類の影響も比較した。

表-4 実験の組み合わせ

W/B	養生開始材齢							
	凝結			24h	48h	72h	7d	14d
	始発前	終結前	終結後					
16%	○	○	○	○	-	○	○	○
12%	○	○	○	-	○	○	○	○

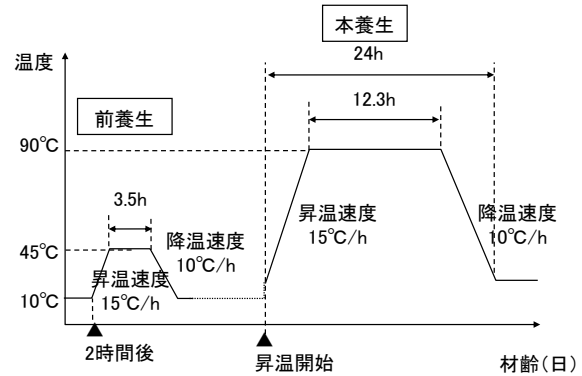


図-1 前養生を実施した場合の蒸気養生方法

2.3 実験シリーズ I ~ IV テストピースの強度発現性把握実験

(1) 養生方法と強度発現性の関係 (実験シリーズ I)

標準養生、40°C定温養生、90°C蒸気養生 (最高温度保持時間 24 時間)、90°C蒸気養生 (最高温度保持時間 48 時間) の圧縮強度の経時変化を計測する。圧縮試験の材齢は 7 日、28 日、91 日とする。

(2) 最高温度保持時間と強度発現性の関係 (実験シリーズ II)

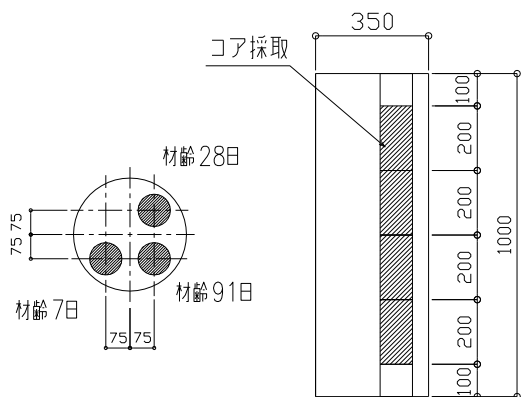
最高温度保持時間が圧縮強度に及ぼす影響を確認するため、最高温度保持時間を 6 時間、12 時間、24 時間、36 時間とした実験を行った。圧縮試験の材齢は 28 日において実施した。水結合材比は 12%、16%のみを比較した。

(3) 蒸気養生開始材齢が強度発現へ及ぼす影響 (実験シリーズ III)

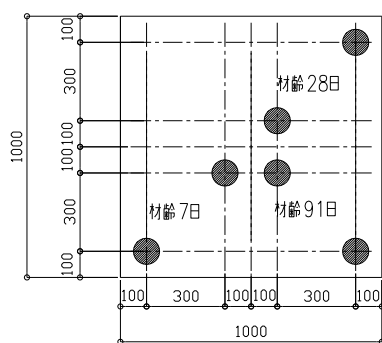
蒸気養生開始材齢が圧縮強度に及ぼす影響を確認するため、90°C蒸気養生開始時期を因子とする実験を行った。実験の組み合わせを表-4 に示す。調合は、W/B12% 及び W/B16%とし、水準は、凝結始発前 (打込みから 6 時間に設定)、凝結始発直後 (貫入抵抗値 5N/mm² に設定)、凝結終結直後 (貫入抵抗値 30N/mm² に設定)、材齢 17 時間、材齢 24 時間(W/B16%のみ実施)、材齢 48 時間 (W/B12%のみ実施)、72 時間、7 日、14 日とした。W/B16%の材齢 24 時間、W/B12%の材齢 48 時間に関しては硬化性状を踏まえ設定した。また、圧縮試験は、材齢 28 日に実施し、凝結の確認は JIS A 1147 コンクリートの凝結時間測定方法に従って測定した。

表-5 実験の組み合わせ

W/B (%)	セメント種類	養生方法		圧縮強度の試験材齢
		前養生	本養生	
16	SFC1	無し	有り	・硬化促進の確認： 17h, 24h, 48h, 72h ・前養生が本養生後の強度へ及ぼす影響の確認：28日, 91日
		有り		
12	SFC2	無し	有り	
		有り		



(a) 円柱試験体



(b) 角柱試験体

図-2 試験体寸法

(4) 硬化前の前養生が及ぼす強度発現への影響 (実験シリーズIV)

図-1 に硬化が遅い場合を想定し実施する蒸気養生方法を示す。冬期を想定し 10℃環境で実験を行い、打設 2 時間後昇温し 3.5 時間 45℃保持を行う。その後降温し、材齢 3 日から本養生を実施する。表-5 に実験の組み合わせを示す。試験する水結合材比は 12%、16%とし、前養生の有り、無しが本養生後の強度発現へ影響を及ぼすかを材齢 28 日及び材齢 91 日の圧縮強度で確認し、また材齢 17h, 24h, 48h, 72h の圧縮試験により前養生の硬化促進性の確認を行う。

2.4 実大模擬部材とテストピースの強度発現性の比較 (実験シリーズV)

実大模擬部材とテストピースの強度発現性を比較するため、実大模擬部材実験を行った。実大模擬部材の寸法とコア採取位置を図-2 に示す。試験体は、φ350×1000mm の円柱試験体と 1000×1000×1000mm の角柱試験体とし、実験を行った調査は水結合材比 12%、16%、20%とした。また、圧縮強度は、材齢 7 日、及び 28 日、91 日に測定を行い、高さ 500mm 断面の各試験体中心部、及びかぶり 30mm の位置に熱電対を設置し、水和熱、及び蒸気養生時の試験体内部温度を測定した。

3. 実験結果及び考察

3.1 実験シリーズ I ~ IV テストピースの強度発現性把握実験

(1) 養生方法と強度発現性の関係 (実験シリーズ I)

図-3 に各調査における標準養生、40℃水中養生、90℃蒸気 24h 養生、及び 90℃蒸気 48h 養生の圧縮試験結果を示す。各調査とも全ての養生条件で材齢の経過に伴う強度増進は、28 日から 91 日にかけての増進に比べ、7 日から 28 日にかけての増進が大きくなることが確認できる。また、養生条件毎に比較すると、90℃蒸気 48 時間が最も初期における強度発現性がよく、続いて 90℃蒸気 24 時間、40℃定温養生が強度発現性が良い結果となった。また、90℃蒸気 24 時間養生と 90℃蒸気 48 時間養生では、24 時間養生の方が若干圧縮強度が低いもののほぼ同じ傾向が確認できた。セメント種類により標準養生試験体を比較すると、SFC1(W/B20%、16%)に比べて SFC2 (W/B12%、15%) の方が初期の強度発現性が悪く、表 1 で記載したが、ベースとしている低熱ポルトランドセメントのピーライト量が低かったため、この結果となったものと思われる。また両セメント共に、標準養生における初期強度を比較すると、W/B が低いほど初期強度の発現が遅れていることが確認できる。一方、図-4 に 90℃蒸気養生を 48 時間実施した試験体について、各調査の 91 日圧縮強度を基準とした各材齢の強度比率を示す。蒸気養生を実施することで、材齢 7 日で 91 日強度の 8 割程度の強度が得られることが確認できる。

(2) 最高温度保持時間の影響 (実験シリーズ II)

図-5 に最高温度保持時間と圧縮強度の関係を示す。W/B16%では、6 時間程度で 24 時間蒸気養生を実施した場合と変わらない強度に達し、W/B12%では、6 時間の蒸気養生では、所定の強度に達していなかった。これはセメント種類によるものと思われるが、どちらの場合も 12 時間以上最高温度を保持することで所定の強度が得られることが確認された。

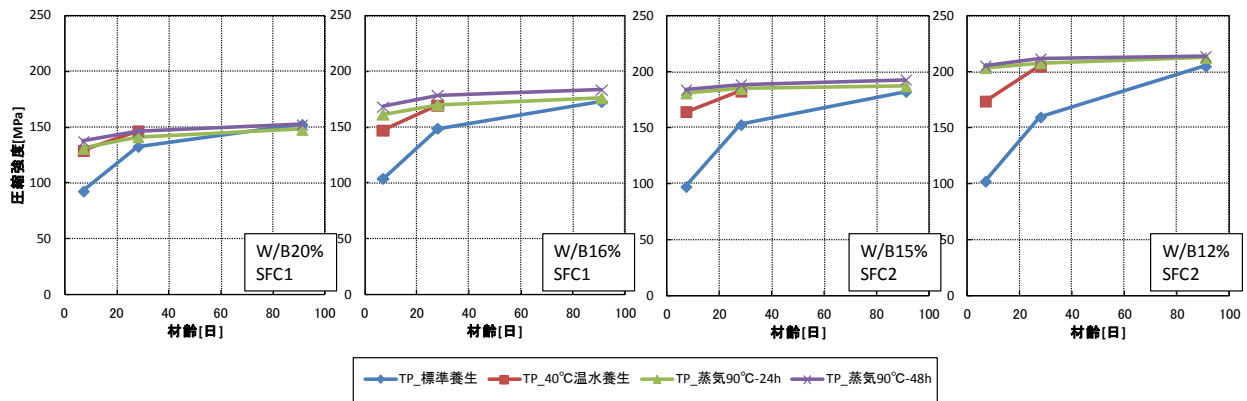


図-3 養生方法の違いが圧縮強度に及ぼす影響

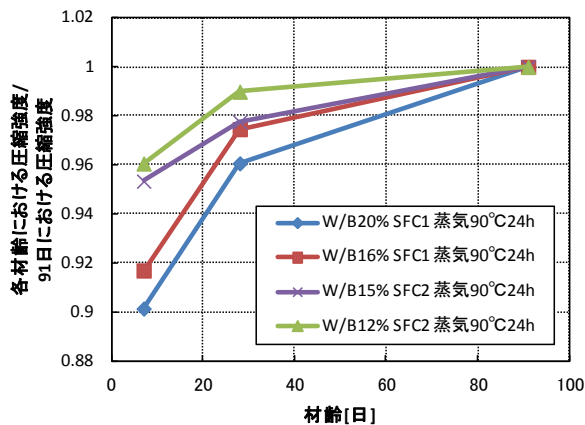


図-4 90°C48 蒸気養生試験体における材齢 91 日圧縮強度と各材齢圧縮強度の比率

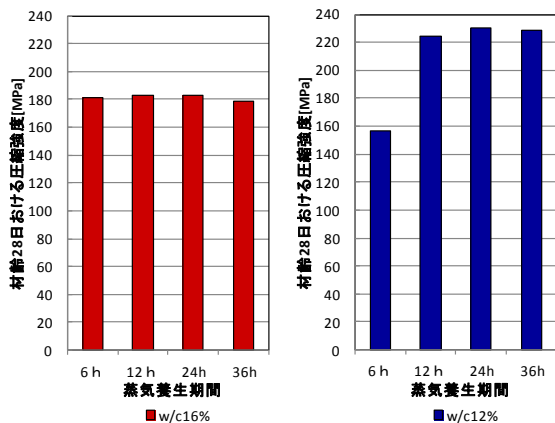


図-5 90°C最高温度保持時間と圧縮強度の関係

(3) 蒸気養生開始材齢が強度発現へ及ぼす影響 (実験シリーズⅢ)

図-6 に凝結試験結果、及び試験体内部温度測定結果を示す。W/B16%では、およそ材齢 8 時間で、混和剤を多く使用した W/B12%ではおよそ材齢 25 時間で凝結が始発した。その後、W/B12%, W/B16%ともに約 1.5 時間で凝結が終結 (貫入抵抗値 28N/mm²) した。試験体内部の温度上昇と貫入抵抗値の関係をみると、W/B12%, 16%共に水和反応に伴うと思われる温度上昇が見られる付近で、貫入抵抗値が上昇し硬化が始まっていることが確認された。

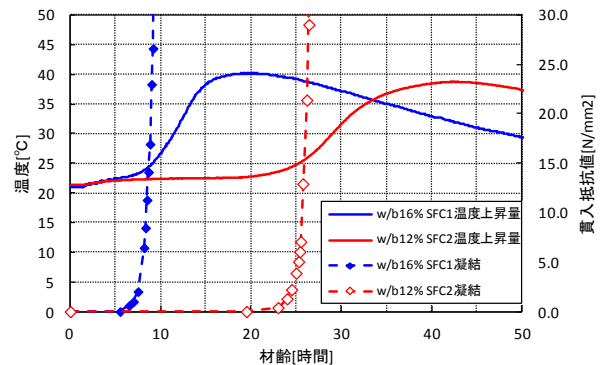


図-6 試験体内部温度および貫入抵抗値の経時変化

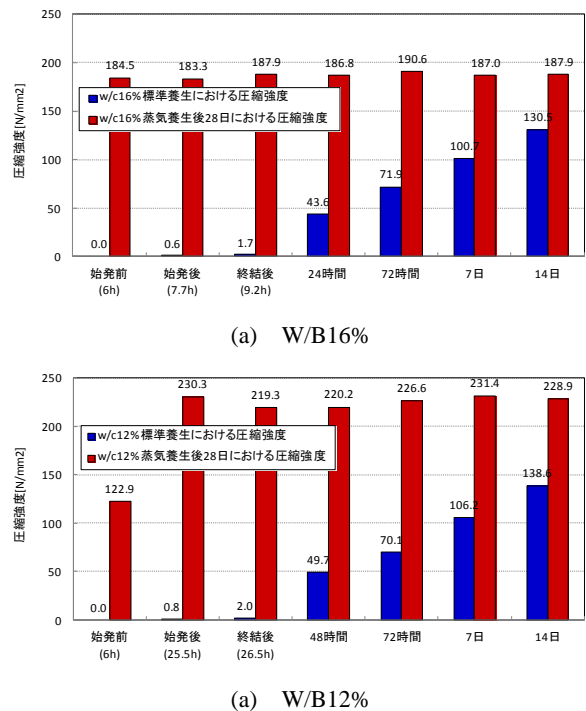
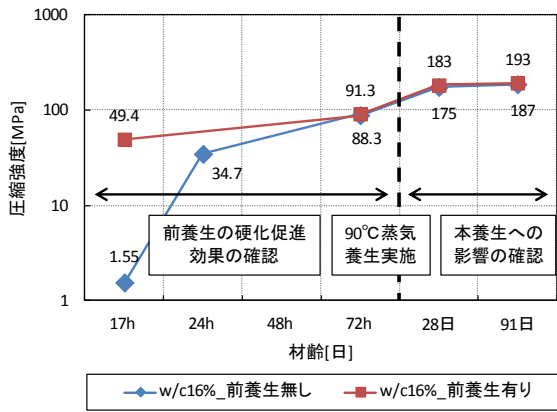
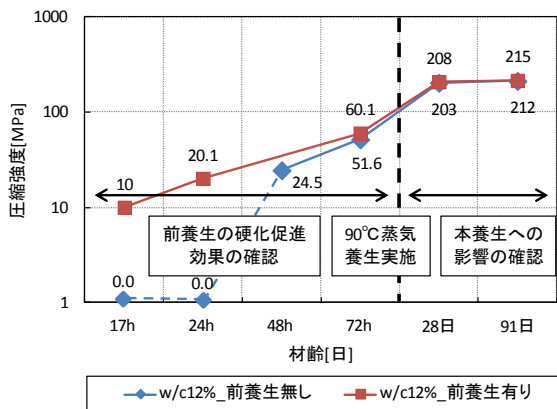


図-7 蒸気養生開始材齢と圧縮強度の関係

図-7 に各調合の蒸気養生開始材齢と材齢 28 日における圧縮強度の関係を示す。図には標準養生供試体の圧縮強度経時変化も併記する。図より、W/B12%では、凝結始発後に蒸気養生を行った試験体は、ほぼ同じ圧縮強度となることが確認でき、凝結始発前に蒸気養生を行った試験体では、他の材齢で蒸気養生を開始した試験体の



(a) W/B16%



(a) W/B12%

図-8 前養生の有無による強度発現性への影響

圧縮強度よりも低い結果となった。一方、W/B16%に関しては、どの材齢において蒸気養生を実施してもほぼ同じ圧縮強度となった。W/B16%に関しては、始発前に蒸気養生を行った試験体の蒸気養生実施時（材齢 6h に設定）と凝結始発時（およそ材齢 7.5h）とが、近接していたためこの結果となったと思われる。本調査において、本実験より蒸気養生開始材齢は、硬化が遅い調査においても、凝結始発後に蒸気養生を実施すれば、所定の強度が得られることが確認できる。また本実験より、試験体内部温度上昇時期からも、凝結が確認でき、蒸気養生開始時期の目安となることが確認できた。

(4) 前養生の強度発現に及ぼす影響（実験シリーズⅣ）

図-8 に、各調査の前養生を行った試験体と前養生を行っていない試験体の圧縮強度の経時変化を示す。W/B16%では、減水剤添加量が少ないため、前養生を実施していない試験体においても、24 時間で十分な圧縮強度が得られていることが確認できたが、初期材齢で前養生を実施すれば、さらに早い材齢 17 時間の段階で、脱型可能な強度（5N/mm² 程度を想定）を得られていることが確認できた。

また、W/B12%に関しては、減水剤を多く使用してい

表-6 フレッシュコンクリートの性状

調査	W/B(%)	スランプフロー(cm)	空気量(%)	練り上り温度(°C)
No.1	20	56.5	1.9	20
No.2	16	58.0	1.9	17
No.3	12	65.0	2.5	28

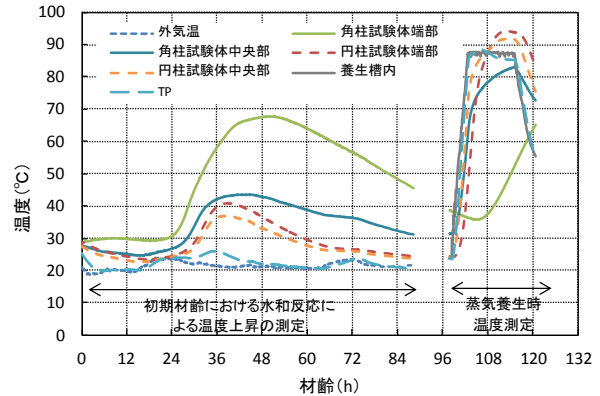


図-9 温度上昇量及び蒸気養生温度(W/B12%)

るため、凝結が遅延し材齢 24 時間で硬化していなかったが、前養生を実施することで、材齢 24 時間で十分な脱型強度が得られること確認できた。また、いずれの水結合材比の場合も、前養生を実施することで硬化が促進し、本養生を実施した後の材齢 28 日、及び材齢 91 日の圧縮強度に影響を与えていないことが確認された。

3.2 実大模擬部材とテストピースの強度発現性の比較（実験シリーズⅤ）

(1) フレッシュ試験結果

フレッシュコンクリートの性能試験結果を表-6 に示す。本調査いずれの場合もスランプフロー50cm 以上、空気量 2.0±0.5%以内に収まっている。

(2) 初期材齢及び蒸気養生時試験体内部温度

図-9 に W/B12%実大模擬試験体の初期材齢及び蒸気養生時の試験体内部温度を示す。初期材齢の試験体内部温度は、大断面の角柱試験体で水和反応による温度上昇が最も大きくなることを確認でき、蒸気養生時の試験体内部温度は、断面の小さい円柱試験体でほぼ設定温度と同じ温度となり、大断面の角柱試験体では、中心部の温度上昇が遅れる傾向が確認された。

(3) 実大模擬試験体の強度発現性

図-10 に実大模擬試験体、及びテストピースの蒸気養生時に計測された最高温度毎に示した圧縮強度の経時変化を示す。圧縮強度試験は、蒸気養生後材齢 7 日、28 日、91 日に実施した。図より、円柱供試体および、角柱供試体ともに、テストピースと同様の強度発現が確認できた。一方、蒸気養生時の最高温度により比較を行うと、角柱試験体の中心部では、内部温度が 70°C弱までしか上昇し

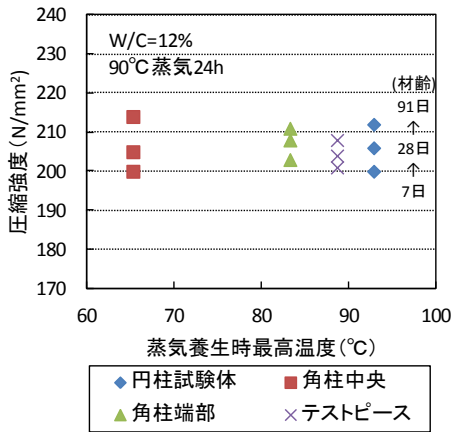


図-10 実大模擬部材とテストピースの圧縮強度の比較

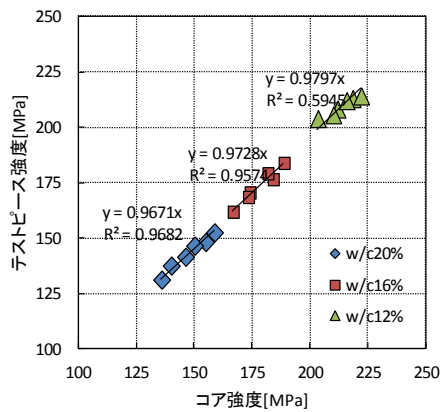


図-11 実大模擬試験体とテストピースの圧縮強度の比較

ていなかったが、他の試験体同様、所定の強度が発現していることが確認できた。この点に関しては、角柱供試体は設定温度に対し遅れて追従するものの、90°Cに達していなかったが、初期材齢における高温履歴の影響も考えられ今後の課題である。

図-11 に実在模擬試験体と同時に蒸気養生を行ったテストピースの圧縮強度の比較を示す。図には、材齢7に、28日、91日、最高温度保持時間24時間、48時間の養生条件を同じとした場合の実大模擬試験体とテストピースの強度発現性を比較した。図より、テストピースに比べ、コア強度が若干強度が高い値を示しているが、ほぼ同等の強度であることが確認できる。

4. まとめ

150-200N/mm² 級超高強度コンクリートの養生方法と強度発現性に関して検討実験を行った。その結果、以下の知見が得られた。

(1) テストピース実験により90°C24時間の蒸気養生を実施することで、材齢7日で材齢91日の9割程度の強度が得られ、その強度増加率は、水結合材比が小さ

いほど、大きい。

- (2) 蒸気養生開始材齢に関しては、水結合材比12%の凝結が遅い調合においても、凝結の始発（凝結試験貫入抵抗値で5N/mm²程度）以降に、蒸気養生を実施することで、所定の強度が発現する。また、凝結の始発以降では、材齢14日までに蒸気養生を実施すれば、所定の圧縮強度が得られる。
- (3) 硬化が遅いW/B12%の調合において、打込み後2時間程度で最高温度45°Cの蒸気養生を3時間実施することで、24時間で十分な脱型強度が得られることが確かめられた。また、材齢の若いうちに前養生を行った後、90°Cの本養生を実施しても、材齢28日、91日の圧縮強度に影響を及ぼさないことが確認された。
- (4) テストピースと実大模擬試験体同時に、蒸気養生を実施した結果、実大模擬部材においても、テストピースとほぼ同等の圧縮強度が確認できた。

参考文献

- 1) K. Mitsui, T. Yonezawa, T. Ueda and T. Sato : Mass construction of 100N/mm² high strength and highly fire resistant concrete to high-rise reinforced concrete building, AIJ Journal of Architecture and Building Science, Vol.20, pp.47-52, 2004
- 2) 斎藤和秀 : 150~200N/mm² 超高強度高流動コンクリートの実験的研究 (その1-その3), 2009年度大会 (関東) 学術講演梗概集, pp.897-900, 2009.7
- 3) 小島正朗, 辻大二郎, 松下哲郎, 三井健郎, 本間大輔 : 300N/mm² 超高強度・高性能コンクリートの開発 (その1-その3), 2011年度大会 (関東) 学術講演梗概集, pp.399-404, 2011.8
- 4) 三井健郎, 米澤敏男, 小島正朗, 木之下光男, 三橋博三 : ハイブリット型繊維補強を用いた設計基準強度150~200N/mm² 超高強度・高性能コンクリートの強度発現, 靱性と耐火性能に関する研究, Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.60, No.8, pp.701-708, 2011.8
- 5) 日本建築学会 : 建築工事標準仕様書・同解説 JASS10 プレキャスト鉄筋コンクリート工事 2003, 日本建築学会, 2003
- 6) 三井健郎, 小島正朗, 米澤敏男 : 初期材齢での高温養生条件における超高強度コンクリートの強度発現に及ぼす骨材品質の影響, コンクリート工学年次論文集, vol.17, No.1, pp.1025-1030, 1995
- 7) 羽原俊祐, 福田峻也, 小山田哲也, 藤原忠司 : コンクリートの DEF による硫酸塩膨張の生起条件の検討, コンクリート工学年次論文集, vol.28, No.1, pp.743-748, 2006
- 8) 福田峻也, 羽原俊祐, 松尾久幸, 薄葉信一 : モルタル及びコンクリートにおける DEF 膨張について, コンクリート工学年次論文集, vol.30, No.1, pp.723-728, 2008