論文　速硬性混和材と加熱養生を併用したプレキャスト用超速硬コンクリートの強度発現特性

小島　正朗[*1]・佐々嘉宣[*2]・入内島克明[*3]・栖原健太郎[*4]

要旨：プレキャスト部材の生産性向上を目的に，エトリンガイトの生成とエーライト反応を促進する効果を有する新規の速硬性混和材と加熱養生を併用する超速硬コンクリートの強度発現特性について検討した。速硬性混和材を適用し，3 時間強度と 28 日強度の両方を高める適切な加熱養生があること，プレキャスト部材の吊上げに必要とされる 12N/mm^2 程度の圧縮強度を材齢 3 時間で実現できることを確認した。また，部材厚 200～1000mm の模擬部材の加熱実験と部材温度追従養生を行い，初期温度を高めることにより，3 時間で吊り上げ可能な強度発現を実現できる見通しを得た。

キーワード：超速硬コンクリート，速硬性混和材，加熱養生，3 時間強度，プレキャスト

1. はじめに

建築の生産現場では，さらなる品質の向上や生産性向上が求められている。解決策のひとつとしてプレキャストコンクリート工法（以下，PCa 工法）が適用されているが，コストが割高で超高層 RC 建築に限定的に適用されるのが実情である。国内では，1970 年代に PCa 部材の生産性向上を目的として，練上り温度が 50℃を超えるようなホットコンクリートの利用が検討[1)]され，1990 年代には硬化促進材を用いた超速硬性コンクリートの開発[2)]や，他にも速硬セメントや急結剤，速硬性混和材などが開発された。現状でも縁石や U 字溝など小型プレキャスト製品用として，少量の混和材と蒸気養生を併用することで 1 日 2 サイクル製造を実現する技術は存在する。これらの従来技術を建築用の大型プレキャスト部材に適用するには，速硬性や品質上の問題，ハンドリングの問題，経済性に課題がある。

プレキャスト部材を 1 日に 2～3 サイクルで製造できるようになれば，生産量の拡大による短工期化や，生産量を同じとすれば型枠数の低減といったメリットが期待でき，建築生産現場の生産性向上につながると考えられる。筆者らは，建築プレキャスト部材用として新たな速硬性混和材を開発し，加熱養生を併用することで合理的に材齢 3 時間でプレキャスト部材の吊り上げに必要とされる 12N/mm^2 程度の圧縮強度を発現する超速硬コンクリートを開発している[3),4)]。本論文では，開発した超速硬コンクリートの基礎物性の把握のために行った，加熱養生条件および調合条件が強度発現に及ぼす影響の検討（シリーズ 1）と，部材厚とコンクリート温度が強度発現に及ぼす影響（シリーズ 2）について述べる。

2. 加熱養生条件および調合条件が強度発現に及ぼす影響の検討（シリーズ 1）

2.1 実験概要

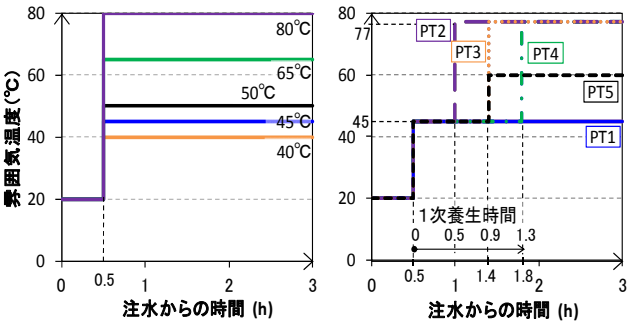
(1) 実験因子と水準

実験シリーズ 1 は，加熱養生条件が強度発現に及ぼす影響を把握する目的とした実験（1-a）と，調合条件が強度発現に及ぼす影響を把握する実験（1-b）を行った。**表－1** にそれぞれの実験因子と水準を示す。

実験（1-a）では，まず，**図－1(a)**に示す 40，45，50，65 および 80℃の一定温度で加熱したときのコンクリートの温度上昇，熱膨張量および圧縮強度発現を調べた。次にここで得られた結果を踏まえ，**図－1(b)**に示すように 2 段階加熱を行い，3 時間と 28 日の両方の強度発現に

表－1　実験因子と水準

実験	実験因子		水準
Ⅰ-a	加熱条件	一定温度加熱	40,45,50,65,80℃
		2段階加熱	1次養生継続時間；0.5,0.9,1.3時間
			2次養生温度；45,60,77℃
Ⅰ-b	調合条件	水結合材比	33,40,50%
		速硬性混和材置換率	0,5%



(a) 一定温度加熱　　(b) ２段階加熱

図－1　蒸気養生温度

*1 (株)竹中工務店　技術研究所　建設材料部門　主任研究員　工修　(正会員)
*2 (株)竹中工務店　技術研究所　建設材料部門　研究員　工修　(正会員)
*3 電気化学工業(株)　インフラ・無機材料部門　特殊混和材部　課長　(正会員)
*4 電気化学工業(株)　青海工場　セメント・特混研究部　博士(工学)　(正会員)

有利な加熱養生条件を検討した。2 段階加熱の 1 次養生の加熱温度は 45℃一定とし，1 次養生の継続時間を 0.5，0.9，1.3 時間とした場合，2 次養生の加熱温度を 45，60，77℃とした場合についてコンクリートの温度上昇と圧縮強度発現を調べた。

実験（1-b）では，水結合材比 33，40，50%において速硬性混和材の置換率を 5%および 0%として，実験（1-a）で得られた最適養生条件で加熱養生したときの強度発現を調べ，調合条件が強度発現に及ぼす影響を検討した。

(2) 使用材料，調合および練混ぜ

セメントは早強ポルトランドセメントを使用した。速硬性混和材は，カルシウムサルホアルミネートを主成分とし，エトリンガイトの生成とアルカリ成分の刺激によりエーライトの反応を促進する効果のある材料（密度 2.44g/cm^3）を使用した。化学混和剤は，ポリカルボン酸系およびスルホン化メラミン縮合物系の高性能減水剤を使用した。使用した骨材は**表－2** に示す通りである。

調合を**表－3** に示す。速硬性混和材の使用量は，事前の予備試験によりセメントの内割 5%置換とした。実験（1-b）では比較用として無添加の場合も実施した。化学混和剤は，目標のスランプおよび空気量となるように適宜調整した。

練り混ぜは，材料一括投入して空練りを 30 秒行ったのち，注水後 3 分間練り混ぜた。

(3) 実験方法，試験項目および試験方法

試験項目および試験方法を**表－4** に示す。

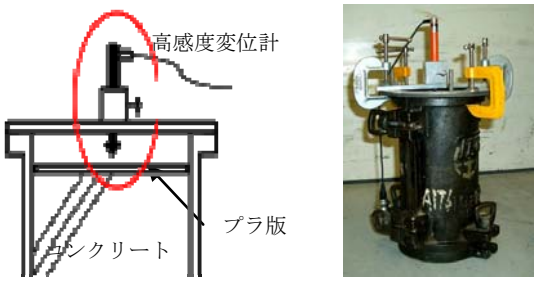
実験（1-a）の一定温度加熱の実験は，一定温度に設定した複数のチャンバー内に，φ10×20cm 鋼製型枠にコンクリートを詰めた供試体を，注水から 30 分後に入れた。材齢 3 時間またはマチュリティー（-10℃基準積算温度）が 190℃･h に到達するまで加熱養生をまで行った後，供試体をチャンバーから取り出し 20℃の室内で封かん養生を行った。加熱養生中のコンクリート中心部の温度と，熱膨張の挙動熱を耐熱性のあるひずみゲージ式高感度変位計を用いて，**図－2** に示す方法でチャンバー内にて計測した。圧縮強度は，想定マチュリティーが 50～190℃･h の時点，材齢 3 時間および 28 日に実施した。マチュリティー50～190℃･hr における圧縮試験は，各時点で供試体 1 体をチャンバーの温度が下がらないよう手早く取り出し直ちに試験を行った。マチュリティー120℃･h 以下の極く初期の試験については，載荷面はアンボンドキャッピングとし，載荷には高精度載荷試験装置を用いた。他の材齢 1 日までの間の加熱養生を施した試験体は，成型後にあらかじめ速硬性セメントキャッピングを行い，載荷面を平滑にした。材齢 7，28 日の供試体は，加熱養生後に試験前に端面研磨ののち強度試験を行った。

最適養生条件を検討する目的の 2 段階加熱の実験では，**図－1(b)**に示す PT1～PT5 の 5 パターンの養生温度履歴を与えて，一定温度加熱の実験と同様の試験を行った。ただし，型枠には軽量モールドを使用し，膨張量の測定は行っていない。

実験（1-b）の調合条件が強度発現に及ぼす影響に関す

表－2　使用材料

実験	分類	種類･密度
1-a	細骨材	君津産山砂（表乾密度2.61g/cm^3）
	粗骨材	八王子産硬砂岩砕石（表乾密度2.61g/cm^3）
1-b	細骨材	①宇賀川産川砂（表乾密度2.59g/cm^3）
		②藤原産石灰砕砂（表乾密度2.69g/cm^3）
	粗骨材	北勢町産砕石（2005：表乾密度2.65g/cm^3）



図－2　初期膨張量の測定方法

表－4　試験項目および試験方法

試験項目	試験方法	1-a	1-b
フレッシュ性状	スランプ(JIS A 1101)，空気量（JIS A1128），コンクリート温度(JIS A 1156)	○	○
養生時内部温度	熱伝対	○	
膨張量	ひずみゲージ式高感度変位計	○	
標準養生強度	JIS A 1108,JIS A 1107，材齢7，28日	○	○
加熱養生強度 JIS A 1108,JIS A 1107に準拠	マチュリティー50,85,120,155,190(℃･h)	○	
	材齢3時間，28日	○	○
	材齢1,7日		○

表－3　調合

実験	No.	水結合材比 (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	混和材置換率 (%)	S/a (%)	単位量(kg/m^3) 水	セメント	速硬性混和材	細骨材 砂	細骨材 砕砂	粗骨材	化学混和剤（結合材×%） 減水剤	AE助剤	フレッシュ試験結果 スランプ (cm)	空気量 (%)	C.T (℃)
1-a	1	40	12	4.5	5	45.2	165	392	21	776	0	943	0.6[1)]	0.024	11.0/15.0	4.1/3.1	23.0/22.0
1-b	1	33	18	4.5	5	41.2	165	475	25	209	469	979	0.6[1)]	0.020	18.5	4.9	23.0
	2	40	12	4.5	5	43.7	165	392	21	232	521	979	1.5[2)]	0.040	12.0	4.0	24.0
	3	50	12	4.5	5	45.9	165	314	17	253	569	979	0.5[2)]	0.040	11.0	3.8	24.0
	4	33	18	4.5	0	41.4	165	500	0	211	473	979	0.4[1)]	0.020	20.0	4.5	24.0
	5	40	12	4.5	0	43.9	165	413	0	233	524	979	1.5[2)]	0.040	8.5	3.5	24.0
	6	50	12	4.5	0	46.0	165	330	0	254	572	979	0.4[2)]	0.040	10.5	3.8	24.0

1)ポリカルボン酸系高性能減水剤　　2)スルホン化メラミン高縮合塩高性能減水剤

る実験は，**表－4** に示す項目について試験を実施した。養生条件は，加熱養生を施したものと標準養生とした。速硬性混和材を用いたコンクリートの加熱養生条件は，実験（1-a）の結果を踏まえ PT3 とし，速硬性混和材を添加していないコンクリートは，一般的なプレキャスト部材の加熱条件（前置き 3 時間，15℃/h で 55℃まで昇温し 2 時間保持ののち，自然冷却）とした。圧縮試験の方法は，実験（1-a）と同じとした。

2.2 実験結果および考察

(1) 加熱養生条件と膨張変形および強度発現

加熱養生したコンクリート供試体中心部の温度履歴を**図－3** に，コンクリート天端の型枠に対する相対変位から求めた膨張量の経時変化を**図－4** に示す。コンクリート温度は注水から 2～2.5 時間にかけて加熱養生の設定温度に近づくように上昇し続けるが，コンクリートの膨張変形は，最初は急激に膨張するが注水後約 1 時間で最大値を示し，その後は変形が収束している。

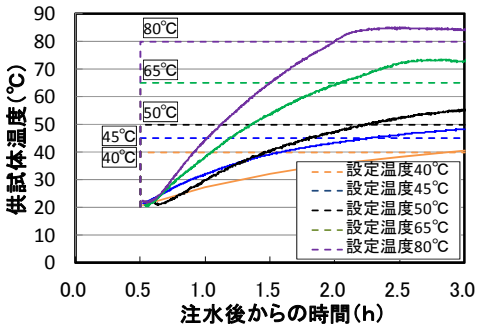
図－5 に注水を起点として実測温度から求めた-10℃を基準の積算温度と若材齢強度の関係を示す。同じ積算温度でも，加熱温度が高いものは若材齢強度が高くなっている。これは，加熱温度が高いほど水和反応が促進されること，逆に加熱温度が低い場合は，強度発現が始まる以前の積算温度も含まれることが理由として考えられる。**図－6** に養生温度と 3 時間強度及び 28 日強度の関係を示す。養生温度が高くなるほど 3 時間強度は増進し，逆に 28 日強度は低下している。28 日強度が低下した理由は，**図－7** に示す様に，養生温度が高いと熱膨張により空隙が大きくなること，急激な水和により水和生成物が成長して組織が粗になることが一因と考えられる。

以上のことから，高い初期強度を得るためには，高温養生のほうが好ましいが，長期強度の低下が生じないように配慮した養生条件とする必要があることがわかった。

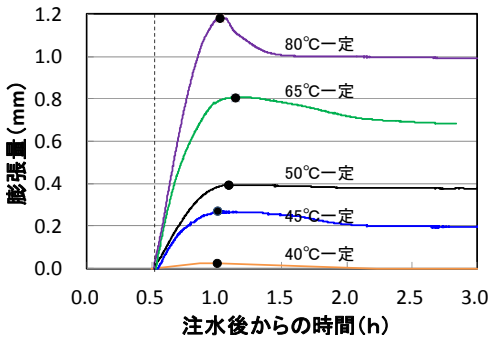
(2) 最適養生条件の検討

図－8 に試験体中心部のコンクリート温度の履歴を示す。**図－9** に若材齢における積算温度と圧縮強度の関係を示す。一定温度加熱したときの**図－5** では，養生温度によって異なる傾向であったが，**図－9** では PT1 の 45℃一定養生で水和反応の促進が十分でなかったものを除くと，積算温度と圧縮強度の関係はいずれも同じような傾向になった。これは，強度発現が始まるまでの初期の温度履歴が PT2～PT5 で大きく違わなかったことが一因と考えられる。

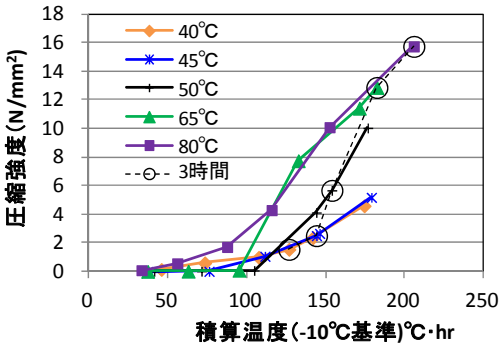
3 時間および 28 日強度に及ぼす養生条件の要因効果を**図－10** に示す。2 次養生温度を 80℃として 1 次養生時間を 0.5～1.4 時間で変化させた PT2，PT3，PT4 は，いずれも 3 時間で 12N/mm^2 の超える強度発現が得られている。1 次養生継続時間が短いほど（2 次養生の開始時間が早い



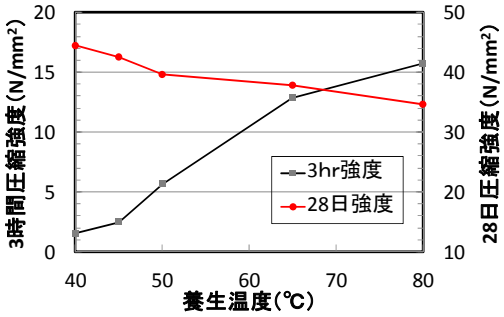
図－3　蒸気養生時の各温度履歴



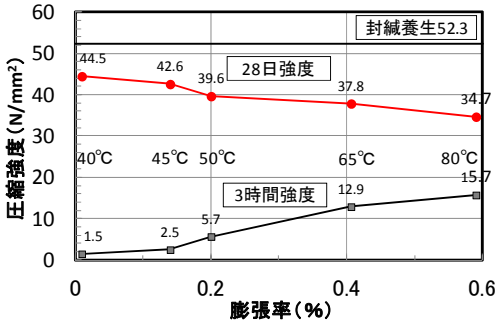
図－4　膨張量と時間の関係



図－5　積算温度と初期強度発現（一定温度加熱）



図－6　圧縮強度と養生温度の関係



図－7　膨張率と圧縮強度

ほど）若干ではあるが 3 時間強度は高くなっている。一方で 28 日強度は，1 次養生が短いほど強度が低く，特に膨張挙動がまだ収束していないと考えられる 1 次養生時間 0.5 時間（注水後 1 時間）の PT2 は，PT3，PT4 と比べて 28 日強度の低下が大きい。注水後 1 時間では膨張変形が収束するかしないかのタイミングであったが，PT2 の供試体を脱型すると目視で観察すると，熱膨張によるとみられる水平ひび割れが認められたことから，高温養生を行うタイミングが若干早かったと考えられる。PT3，PT4 は，それぞれ 1 次養生時間が 0.9，1.3 時間（注水後 1.4，1.8 時間）であり，膨張変形が収束した後に 2 次加熱養生を実施したことから，材齢 28 日においても良好な強度発現が得られた。

1 次養生時間 0.9 時間として 2 次養生温度を 45～80℃とした PT1，PT3，PT5 で比較すると，2 次養生温度が 45℃(45℃一定養生)の PT1 は明らかに 3 時間強度が低く，2 次養生温度が高いほど 3 時間強度は高くなった。1 次養生時間 0.9 時間を確保して膨張変形が収束した以降に 2 次養生を行っていることから，28 日強度の低下はいずれもみられなかった。

以上の結果から，初期の硬化までの間の熱膨張変形を抑えつつ，硬化後に高い温度を与えて水和反応を促進することで，3 時間強度を高めかつ，28 日強度の低下が生じにくいことがわかった。今回の実験の範囲では， PT3 または PT4 の養生条件が最適であることがわかった。

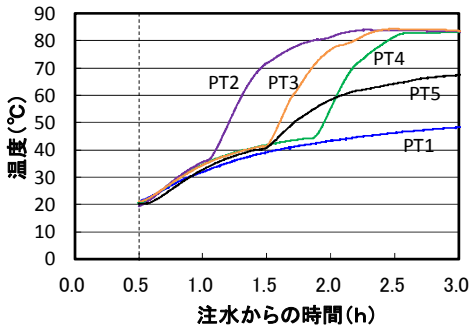
(3) 調合条件と強度発現

表－3 にフレッシュコンクリートの試験結果を併記した。化学混和剤を適量添加することで，いずれの調合においても目標としたスランプおよび空気量を得ることができた。

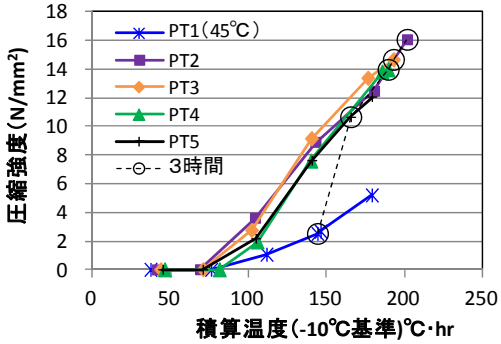
調合条件ごとの圧縮強度（加熱養生条件：PT3，一般 PCa）を**図－11** に示す。速硬性混和材を添加したコンクリートの 3 時間強度は，水結合材比 33，40，50%でそれぞれ 28.3，15.4，7.8N/mm^2 であり，同じ加熱養生条件でも水結合材比の影響が大きい。

加熱養生を施したコンクリートの 28 日強度は，速硬性混和材の有無にかかわらず，標準養生 28 日強度よりも低い傾向が認められ，その低下幅は速硬性混和材を用いたほうがやや大きい。初期材齢に急激な加熱養生を施すことが一因として考えられる。水結合材比 40%，50%では，混和材を添加したほうが無添加のものより 9～14N/mm^2 低いが，水結合材比 33%では，ほぼ同等の強度になっている。水結合材比が小さい場合には，初期強度，28 日強度のいずれも有利な傾向が認められる。

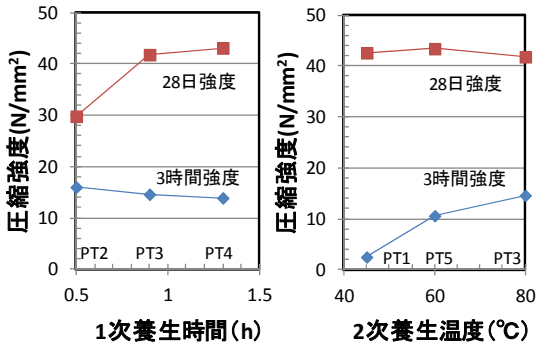
所要の脱型時強度や設計基準強度を得るための調合は，加熱養生したときの構造体コンクリートの強度発現特性を考慮して，加熱養生条件と水結合材比を考慮して



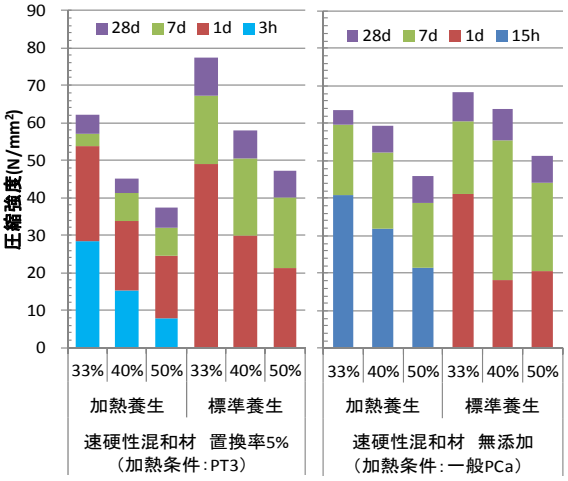
図－8　コンクリート内温度履歴



図－9　積算温度と初期強度発現（２段階加熱）



図－10　圧縮強度に及ぼす養生条件の要因効果



図－11　調合条件と圧縮強度

適切に定める必要があるといえる。

3. 部材厚およびコンクリート温度が強度発現に及ぼす影響の実験（シリーズ 2）

3.1 実験概要

(1) 実験因子と水準

実験シリーズ 2 では，実部材の加熱養生を想定して，

部材厚の異なる模擬部材の加熱養生実験を行い，模擬部材内のコンクリート温度の上昇特性を把握し，同じ温度履歴を与えたコンクリートの強度発現性を検討した。

実験因子は，コンクリートの初期温度，部材厚および加熱養生パターンとした。コンクリートの初期温度は3シーズンの季節を想定して10, 20, 30℃の3水準とした。部材厚は，柱・梁を想定した1000mm，500mmと，版状の薄部材を想定した200mmの3水準とした。加熱養生パターンは，**図－12**に示す2段階養生（実験(1-a)のPT3）と，大断面部材を想定しても最も極端な加熱養生条件である1段階で90℃まで加熱する養生の2通りとした。

(2) 使用材料，調合および練混ぜ

使用材料は，実験シリーズ1の実験(1-b)と同じとし，調合は，実験(1-b)の水結合材比40%の調合No.2を基本とし，化学混和剤の添加量でスランプと空気量を調整した（**表－2**，**表－3**参照）。練り混ぜ方法も同じとし，全材料投入後，空練り30秒後に注水し，3分間練り混ぜた。

(3) 実験方法，試験項目および試験方法

模擬部材は，**図－13**に示す3種類の形状とした。1次元の熱伝導となるように周辺を断熱材（A種フェノールフォーム1種2号；熱伝導率0.020W/mK，厚さ50mm）で断熱した。断熱材には，コンクリートからの湿分および加熱養生時の湿分を吸収しないようプラスチックフィルムで覆った。部材厚1000mmについては，500mmの試験体の片面を断熱することで1000mm相当とした。

コンクリートを模擬部材に打込み，注水から30分後に，**図－12**の加熱養生パターンで蒸気養生槽を用いて加熱養生を行い，各模擬部材について3～5点のコンクリート内部温度を測定し，3時間後に蒸気養生槽から取り出した。測定したコンクリート温度のうち，**表－11**に示す部材，加熱養生パターン，位置について，同じ調合のコンクリートを材齢3時間まで温度追従養生した。その後は簡易断熱槽内で養生した。圧縮強度は，材齢3，6時間および28日に測定した。材齢3時間で強度が発現していなかった条件については，材齢4.5時間で試験を行った。強度試験方法は実験シリーズ1と同じとした。

3.2 実験結果および考察

(1) コンクリート温度履歴

コンクリートの内部温度履歴を**図－14**に示す。

部材厚200mmでは，2段階加熱した場合は，表層と中心部の温度の違いは小さいが，90℃加熱養生で急激に加熱した場合は内外の温度差が大きくなっている。コンクリートの初期温度が高いほど，温度上昇幅が小さいため断面内の温度差は小さくなっている。

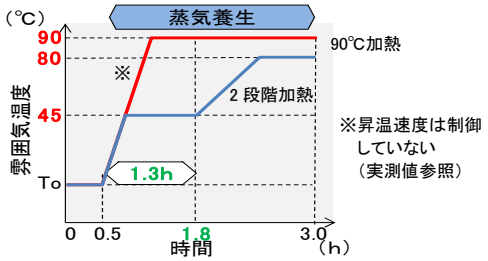
部材厚500mm，1000mmで2段階加熱した場合は，ほぼ同じような温度履歴となっている。90℃加熱養生した場合は，250mm以深の温度上昇は，部材厚1000mmのほうが小さい傾向となっているが，表層から100mmまでの温度履歴は，部材厚1000mmと500mmでほぼ同じになった。断面内の温度差は，コンクリートの初期温度が高いほど小さくなる傾向になるのは，部材厚200mmの場合と同じであった。

部材厚が1000mm，500mmと大きくなると，中心部の温度は上がりにくいが，コンクリートの初期温度が30℃の場合には，90℃加熱では3時間後に70℃程度まで上昇しており，2段階加熱養生した場合でも55℃程度まで上昇している。実験(1-a)の結果から，このとき中心部でも数N/mm^{2}程度の強度は発現していると推測される。

今回の小型の模擬試験体ではシリーズⅠのPT2のときのように脱型後にひび割れは認められなかったが，急激な温度変化による表面ひび割れの可能性がある。極く表層の品質については強度発現と耐久性の観点からの検証[3),4)]が必要と考える。

(2) 強度発現

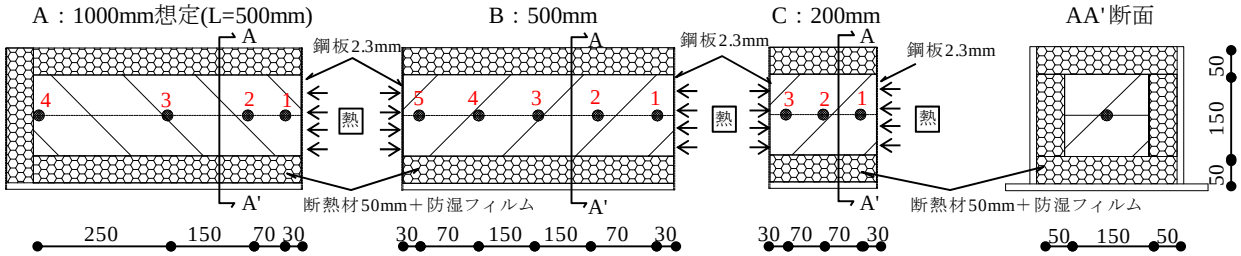
温度履歴追従養生した供試体の圧縮強度を**図－15**に示す。いずれもコンクリートの初期温度が高いほど3時間強度が高く，28日強度の発現も高い傾向であった。



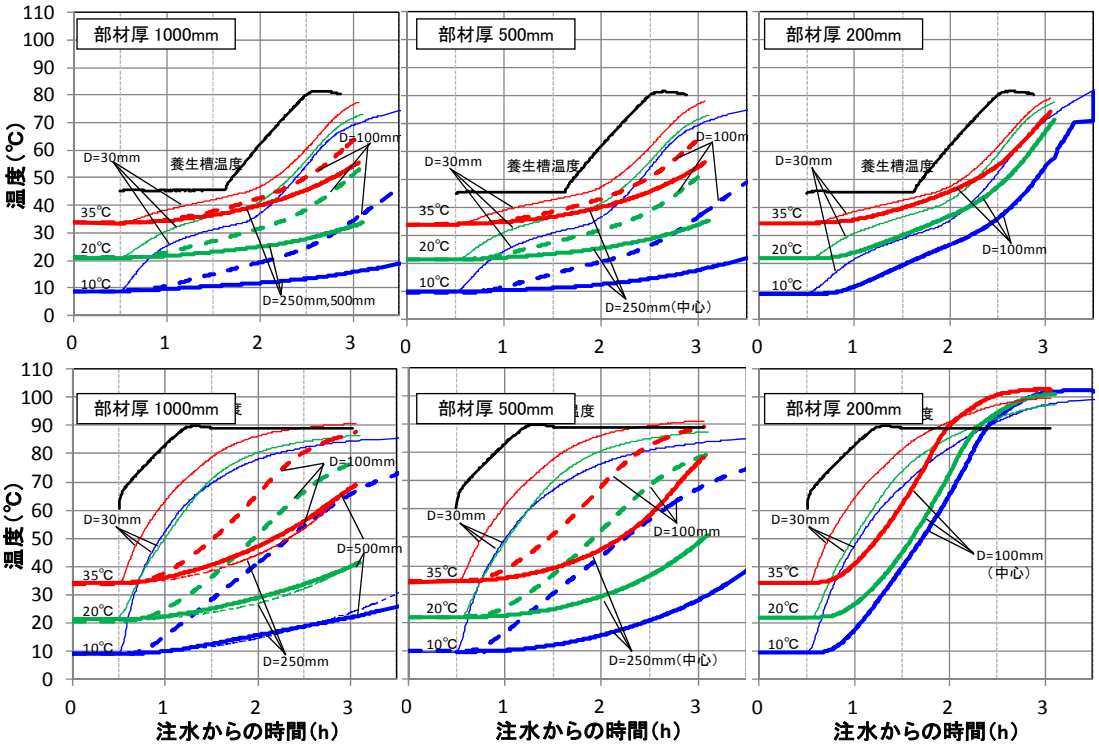
図－12　加熱養生パターン

表－11　温度追従養生を行った部材および位置

部　材	加熱養生パターン	位　置
A:1000mm想定	90℃加熱	4-中心部（D=500mm） 2-表層部（D=100mm）
C：200mm	2段階加熱	2-中心部（D=100mm）



図－13　模擬部材の形状

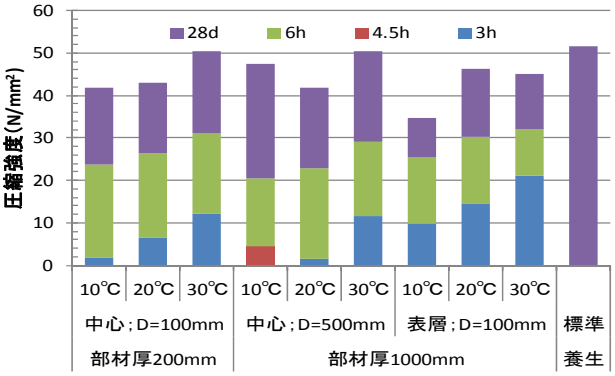


図－14　部材内部温度

部材厚 200mm の薄部材に 2 段階養生した場合は，コンクリートの初期温度が 30℃であれば中心部で 12N/mm^2 程度の強度発現が得られた。

部材厚 1000mm の厚部材に 90℃加熱養生したときの表層 100mm の 3 時間強度は，コンクリートの初期温度 30℃では 20N/mm^2 を超える強度を発現し，10℃の場合でも 10N/mm^2 程度の強度発現が得られた。厚部材の中心部でも，30℃の場合は 12N/mm^2 程度の強度発現が得られた。コンクリートの初期温度が高い場合は，厚部材に対して 90℃加熱よりも緩やかな加熱条件で良いと考えられる。

以上のことから，季節に応じて練上り温度を高めたり，水結合材比を調整することにより，材齢 3 時間で吊り上げに必要な強度を得ることができると考えられる。



図－15　温度履歴追従養生強度

4. 結論

速硬性混和材と加熱養生を併用したプレキャスト用超速硬コンクリートの基礎物性について検討し，以下の知見を得た。

(1) エトリンガイトの生成とエーライト反応を促進する効果を有する新規の速硬性混和材を添加したコンクリートに適切な加熱養生を施すことで，材齢 3 時間でプレキャスト部材の吊上げに必要とされる 12N/mm^2 程度の圧縮強度と，加熱養生による 28 日強度の低下の小さい，良好な強度発現を実現できる。

(2) 部材厚 200～1000mm を想定した模擬部材でも，初期温度を制御したり，水結合材比を適切に設定することで，材齢 3 時間で部材の吊り上げに必要な強度を確保できる見通しを得た。

参考文献

1) 例えば，仕入豊和ほか：PC パネル用ホットミクストコンクリートの強度におよぼす初期養生条件について，セメント技術年報 26，pp.552-556，1972

2) 押田文雄ほか：硬化促進材混入コンクリートを用いたプレキャストコンクリート部材の 1 日多サイクル製造の検討，日本建築学会学術講演梗概集，材料施工，pp.887-888，1992.8

3) 畑信次，小島正朗ほか：超速硬性混和材と加熱養生を併用する超速硬コンクリートの開発，その 1～その 2，日本建築学会学術講演梗概集，材料施工，pp.493-496，2012.9

4) 畑信次，小島正朗，栖原健太郎ほか：超速硬性混和材と加熱養生を併用する超速硬コンクリートの開発，その 3～その 5，日本建築学会学術講演梗概集，材料施工，pp.593-598，2013.8