

# 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初期強度推定に関する検討

西岡 由紀子\*1・原 靖宗\*2・小島 正朗\*3・樋口 隆行\*4

**要旨:** 本研究では、筆者らが開発している少量の速硬性混和材と加熱養生を併用した超速硬コンクリートの材齢 3~4.5 時間程度の初期強度について、異なる蒸気養生条件の試験体を作成して圧縮強度と蒸気養生開始時の温度を基準とした積算温度の関係を取得し、ロジスティック曲線を用いて初期強度推定式を立式した。また、実機プラントにて部材試作実験を行い、ジュール加熱追従養生によって部材内部の任意の箇所の温度に追従させた試験体の作成が可能であり、脱型・吊り上げ時の強度の判定に有効であること、部材製造時に本初期強度推定式が適用可能であることを確認した。

**キーワード:** 速硬コンクリート, 速硬性混和剤, プレキャスト, 加熱養生, 初期強度, ジュール加熱

## 1. はじめに

筆者らは、建設躯体工事の品質の向上や生産性の向上に有効なプレキャストコンクリート工法の適用拡大をねらいとして、プレキャスト部材の生産性の向上に資する超速硬コンクリートを開発しており、強度発現性や耐久性に関して検討を行ってきた(例えば1), 2)。

本工法は少量の速硬性混和材と加熱養生を併用し、注水から 3~4.5 時間(以下、この範囲を“材齢初期”とする)で脱型・吊り上げに必要な圧縮強度を発現させることにより、プレキャストコンクリート工場(以下、PCa工場)において1日に複数サイクルの部材製造を可能とするものである。部材製造において生産効率を上げるためには、脱型・吊り上げ時の所要強度を満足するように事前に適切な調合(例えば、水結合材比)や養生条件を決定することが重要である。

本研究では、超速硬コンクリートを用いたプレキャスト部材の、脱型・吊り上げの可否判断に関わる材齢初期の圧縮強度(以下、“初期強度”とする)の推定を目的とし、超速硬コンクリートの初期強度と積算温度を取得して初期強度推定式について検討を行った。また、PCa工場において部材試作実験を行い、初期強度推定式の適用性の確認を行った。

## 2. 室内実験

### 2.1 実験概要

#### (1) 使用材料および調合

使用した材料を表-1に示す。速硬性混和材は初期にエトリンガイトを生成するカルシウムサルホアルミネート成分と、エーライトの反応を促進するアルカリ成分を

主成分とする材料を使用した。

調合およびフレッシュ性状試験の結果を表-2に示す。調合は水結合材比を 50%, 40%, 30%の3種類とし、水結合材比 30%についてはスランプ・スランプスローの異なる2種類の調合とした。

#### (2) 練り混ぜ

練り混ぜは強制二軸ミキサーを用いて、各バッチ 55L 練り混ぜた。細骨材、セメント、混和材を投入後、30秒間空練りを行い、練混ぜ水を加えた後 50秒間練混ぜ、かき落し後、粗骨材を投入して 100秒間練り混ぜた。

#### (3) 試験体および養生方法

試験体は φ100×200mm の軽量モールドを用いて作成し、それぞれの調合の試験体について、注水から 1時間半以内に蒸気養生を始めた。また、蒸気養生開始から 2時間後に試験体中央の温度が 30, 45, 65°Cとなるように、蒸気養生槽の温度制御を行った。蒸気養生後は直ちに図

表-1 使用材料

材料	記号	種類・物性
セメント	C	早強ポルトランドセメント 密度 3.14g/cm <sup>3</sup>
混和材	H	速硬性混和材 密度 2.44g/cm <sup>3</sup>
細骨材	S	除塩海砂 表乾密度 2.57g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 1.61%
粗骨材	G	碎石 表乾密度 2.92g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 0.58%
高性能減水剤	SP	ポリカルボン酸系高性能減水剤
AE 助剤	AE	樹脂酸塩系陰イオン界面活性剤
消泡剤	D	ポリエーテル系消泡剤

\*1 (株)竹中工務店 技術研究所 建設材料部門 研究員 (正会員)

\*2 (株)竹中工務店 技術研究所 建設材料部門 研究員

\*3 (株)竹中工務店 技術研究所 建設材料部門 主任研究員 (正会員)

\*4 デンカ株式会社 青海工場 セメント・特混研究部 (正会員)

表-2 試験体の調合とフレッシュ性状（室内実験）

試験体記号	調合									スランプ・スランプフロー (cm)	空気量 (%)	練り上がり温度 (°C)	
	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					SP/B (%)	AE				D
			W	C	H	S	G						
W/B50	50	42.9	158	300	16	767	1162	0.35	-	0.2T	12.0	3.9	20
W/B40	40	40.4	160	380	20	693	1162	0.45	-	-	15.0	4.3	20
W/B30	30	35.3	165	530	20	558	1162	0.70	20A	-	17.0	2.8	23
W/B30F	30	50.5	165	530	20	798	888	0.91*	7A	-	46.0×44.5	4.7	22

※W/B30Fの高性能減水剤添加量は0.85%+後添加0.06%とした。

ー1 に示す簡易断熱養生槽に移動し、各試験まで簡易断熱養生を継続した。

(4) 試験項目

材齢3時間、4.5時間、7日、28日においてJIS A 1108に準拠して圧縮強度試験を行った。なお材齢初期の試験体は、成形直後にあらかじめ速硬性セメントでキャッピングを行っておくことで載荷面を平滑にし、脱型後迅速に試験を行えるようにした。

また、各調合・蒸気養生につき1体を温度履歴測定用として、試験体中央に熱電対を設置し、材齢28日まで圧縮強度試験体と同様の養生を行った。

なお、比較のため各調合において標準養生試験体を作成し、材齢7日、28日で圧縮強度試験を行った。

2.2 実験結果と考察

(1) 温度履歴

蒸気養生中の試験体中央の温度履歴を図-2に示す。練り上がり温度の影響で調合により初期の温度履歴に差があり、またW/B30-45°CとW/B30F-45°Cの養生1時間付近において、目標値に比べ温度が5°C程度大きくなっているが、おおそ目標通りの温度履歴となっている。

また、材齢7日までの試験体中央の温度履歴を図-3に示す。最高到達温度は最も高いもので90°C程度であるが、材齢7日ですべて30~35°C程度の温度となった。

(2) 圧縮強度

圧縮強度試験の結果を図-4に示す。材齢初期では、いずれの調合においてもより高温の蒸気養生を行った試験体の方が圧縮強度が大きくなり、最も強度の高かったW/B30Fの4.5時間強度は45.5N/mm<sup>2</sup>であった。材齢7日、28日ではより高温の履歴を受けたものの方が圧縮強度が小さくなる傾向であり、既往の報告(例えば<sup>3)</sup>のように材齢初期の高温履歴による長期強度の低下が起こっていると推察される。標準養生の材齢28日はいずれも蒸気養生を行ったものより圧縮強度が大きく、特にW/B40で差が大きかったが、その他では5N/mm<sup>2</sup>以内の差であった。

(3) 積算温度と初期強度推定

本研究では材齢初期に高温の蒸気養生を行っており、図-4に示す通り蒸気養生温度が初期強度に与える影響が大きい。よって温度の影響を考慮できる積算温度を用

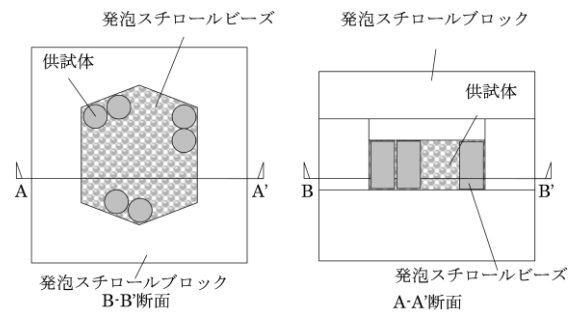


図-1 簡易断熱養生槽概要

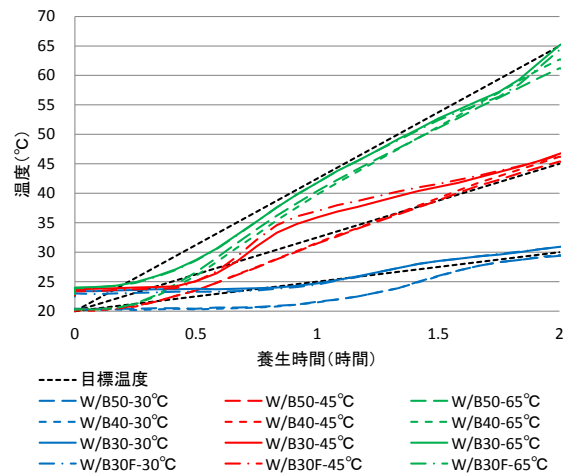


図-2 試験体中央の温度履歴（蒸気養生中）

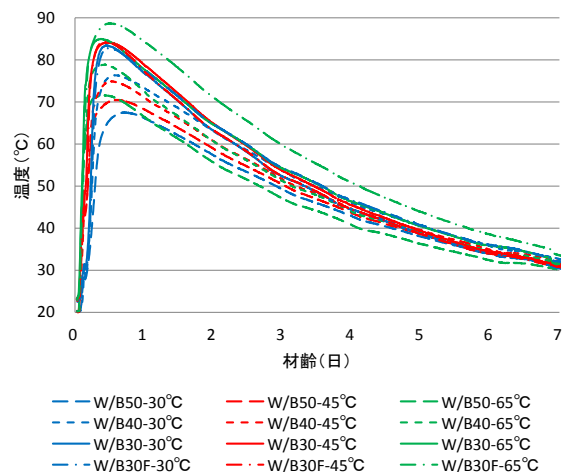


図-3 試験体中央の温度履歴（材齢7日まで）

いて、初期強度推定式の検討を行った。積算温度は蒸気養生開始時のコンクリート温度を基準とし、以下の式(1)により算出した。

$$M = \sum(T - T_{in})\Delta t \quad (1)$$

ここで、 $M$ : 蒸気養生開始から材齢  $t$  までの積算温度( $^{\circ}\text{C} \cdot \text{時間}$ )、 $T$ : 材齢  $t$  における試験体中央の温度( $^{\circ}\text{C}$ )、 $T_{in}$ : 蒸気養生開始時の試験体中央の温度( $^{\circ}\text{C}$ )、 $t$ : 材齢(時間)である。

積算温度を用いたコンクリートの強度増進推定式として、ロジスティック関数やゴンペルツ関数を用いたものがある<sup>4)~6)</sup>。これらの強度増進推定式は寒中コンクリートにおいて広く用いられているが<sup>7)</sup>、本検討のような材齢数時間の初期強度の積算温度を用いた推定の例は少ない<sup>8)</sup>。本検討では、各調合において以下の式(2)に示すロジスティック関数を用いて最小二乗法により近似を行って、初期強度推定式を算出した。

$$F_t = F_{\infty} / (1 + \exp(-K \log_{10} M + m)) \quad (2)$$

ここで、 $F_t$ : 材齢  $t$  における圧縮強度( $\text{N}/\text{mm}^2$ )、 $F_{\infty}$ : 最終強度( $\text{N}/\text{mm}^2$ )、 $K$ ,  $m$ : 実験定数である。なお、 $F_{\infty}$ は以下の式(3)に示すように結合材水比の関数とした。

$$F_{\infty} = a \cdot B/W + b \quad (3)$$

ここで、 $B/W$ : 結合材水比(-)、 $a$ ,  $b$ : 実験定数である。

式(1)により算出した積算温度と初期強度の関係と、式(2)により水結合材比ごとに算出した初期強度推定式を図-5に示す。また、初期強度の実験値とそれぞれの積算温度から式(2)を用いて算出した推定値の関係を図-6に示す。これらの図に示すように初期強度推定式は実験値によく適合している。

以上の検討より、材齢初期に蒸気養生を行う超速硬コンクリートの脱型・吊り上げに関わる初期強度推定において、ロジスティック曲線を用いて蒸気養生開始時の温度を基準とした積算温度と水結合材比を変数とする初期強度推定式を立式した。

次に、PCa工場にて実部材を試作し、前述の初期強度推定式の適用性について検討を行った。

### 3. 部材試作実験

#### 3.1 実験概要

##### (1) 使用材料および調合

使用した材料は室内試験と同様とした(表-1)。調合およびフレッシュ性状試験の結果を表-3に示す。調合は水結合材比を50%、40%、30%の3種類とした。

##### (2) 練り混ぜ

練り混ぜは実機プラントにて、各調合あたり  $1.3\text{m}^3$  を練り混ぜた。全材料を投入後、強制二軸ミキサーで90秒間練り混ぜを行った。

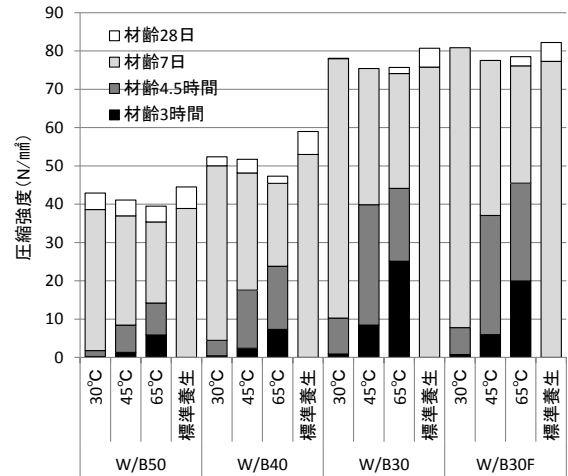


図-4 圧縮強度試験結果

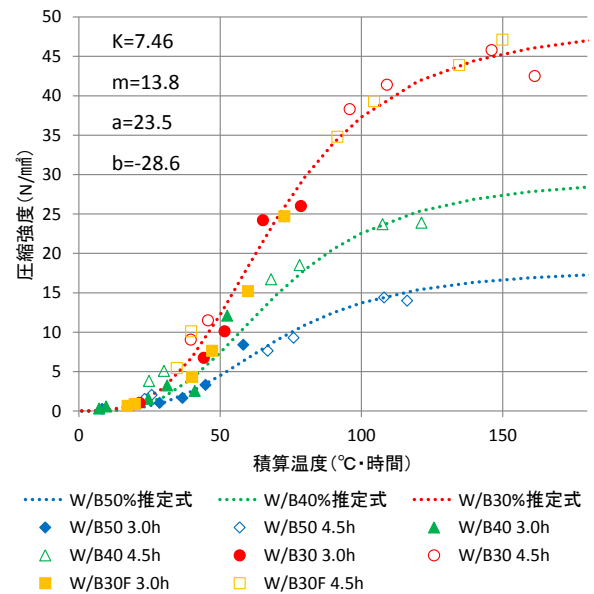


図-5 積算温度と圧縮強度の関係

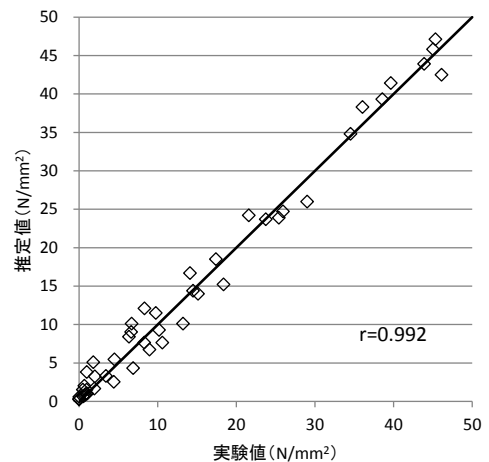
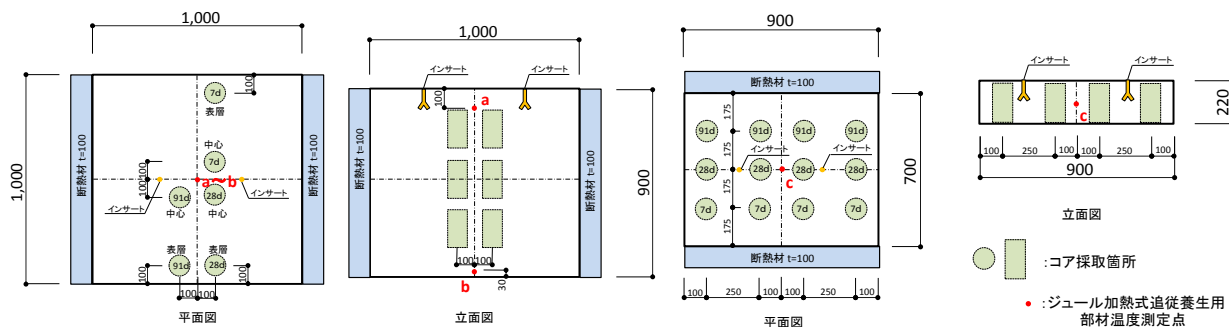


図-6 初期強度の実験値と推定値の関係

表-3 試験体の調合とフレッシュ性状（実機実験）

試験体 記号	調合							スランプ・ スランプフロー (cm)	空気量 (%)	練り上がり 温度 (°C)		
	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )								SP/B (%)	AE
			W	C	H	S	G					
W/B50-P	50	42.8	158	300	16	767	1162	0.60	2A	13.5	4.5	30.5
W/B40-P	40	40.3	160	380	20	691	1162	0.65	2A	17.5	4.9	32.0
W/B30-P	30	50.5	165	530	20	796	1162	1.20	3A	59.0×58.0	4.0	28.0



(a) 柱模擬部材

(b) スラブ模擬部材

図-9 模擬部材概要

(3) 試験体および養生方法

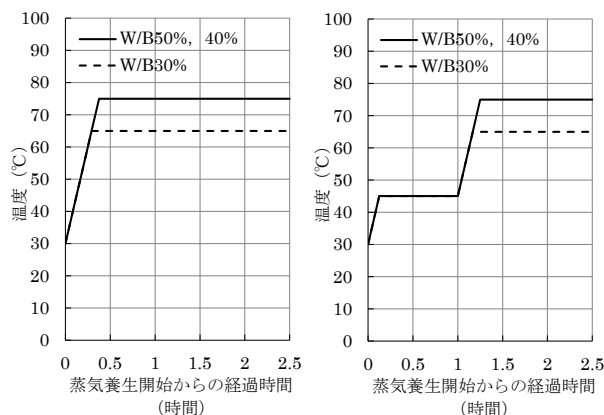
試験体は図-9 に示す通り柱模擬部材とスラブ模擬部材を作成し、それぞれの調合の試験体について注水から30分後に蒸気養生を始めた。蒸気養生の目標雰囲気温度を図-7に示す。なお、W/B30%についてはセメント量が多く過度な温度上昇が予想されるため、蒸気養生の目標温度を低く設定した。本実機実験は夏季に行っておりコンクリートの練り上がり温度が30°C程度であることから、蒸気養生開始時の雰囲気温度は30°Cに設定した。蒸気養生を2.5時間行った後、材齢3時間で脱型・吊り上げを行い、急激な温度低下を防ぐため毛布で覆って試験材齢まで静置した。

また、筆者らはプレキャスト部材の脱型・吊り上げ時の強度推定精度向上の目的で、部材内部の所要部分の温度を測定しながら、同等の温度履歴をリアルタイムでテストピースに与える、ジュール加熱追従養生方法の開発を行っている<sup>9)</sup>。装置の概要を図-8に示す。

本検討では、図-9に示す位置（柱模擬部材の上面から100mmをa点、底面から30mmをb点、スラブ模擬部材の中央をc点とする）において打ち込み完了から部材内部温度を測定し、ジュール加熱によって同等の温度履歴を与えたφ100×200mmのテストピース（以後、“追従養生試験体”とする）を作成した。なお、コンクリートの硬化が進むと試験体に電流が流れにくくなるため、ジュール加熱は材齢3時間までとし、その後は簡易断熱養生槽に移動して各試験まで簡易断熱養生を行った。

(4) 試験項目

追従養生試験体は材齢3時間、4時間、7日、28日においてJIS A 1108に準拠して圧縮強度試験を行った。ま



(a) 柱模擬部材

(b) スラブ模擬部材

図-7 蒸気養生の目標雰囲気温度

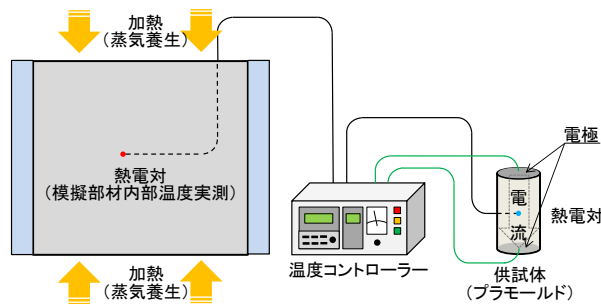


図-8 ジュール加熱追従養生装置概要

た材齢7日, 28日, 91日において模擬部材から図-9に示す箇所のコアを採取して圧縮強度試験を行った。なお, 比較のため各調査において標準養生試験体を作成し, 材齢7日, 28日, 91日で圧縮強度試験を行った。

### 3.2 実験結果と考察

#### (1) 温度履歴

部材内部温度履歴と追従養生温度履歴の例(W/B30%)を図-10に示す。図に示す通り, 部材内部温度によく追従できていることが確認できた。

#### (2) 追従養生試験体の圧縮強度

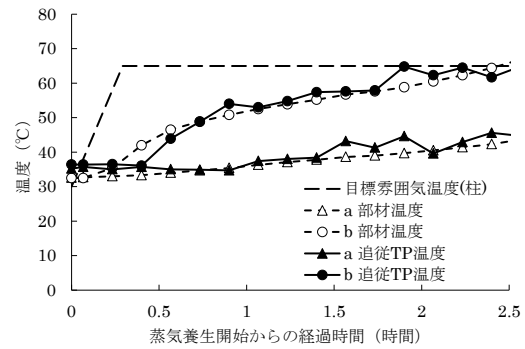
追従養生試験体の圧縮強度の結果を図-11に示す。b点に追従させたものが, 材齢3時間の圧縮強度が大きいことがわかる。これは部材底面に近く, より高温の履歴を受けたためだと推察される。一方, 材齢7日, 28日の圧縮強度をみると, b点の追従養生試験体はa点, c点の追従養生試験体に比べて小さくなった。b点は部材底面に近いので, 材齢初期の過大な温度上昇によって強度増進の停滞が起きていると推察される。このような強度増進の停滞を防ぐためには, 急激な温度上昇が起きないように蒸気養生開始時の温度勾配を緩やかにするなどの配慮が必要であると推察される。また, 材齢3時間の強度を比較すると, a~cのどの地点においてもW/B40%が最も大きい結果となった。これはW/B30%は蒸気養生の目標温度を低く設定したために, 初期の圧縮強度増進が小さかったためだと推察される。

#### (3) 標準養生試験体とコアの圧縮強度

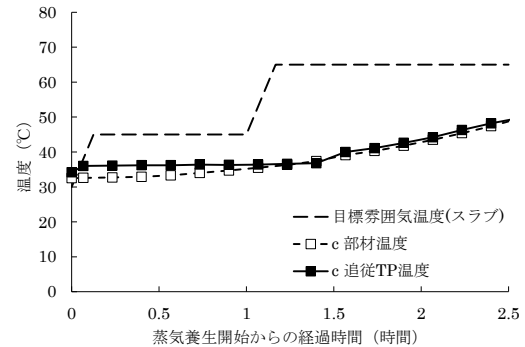
標準養生試験体と模擬部材から採取したコアの材齢7日, 28日, 91日の圧縮強度を図-12に示す。同一調査で比較すると, すべての材齢, コア採取箇所において, 標準養生試験体との圧縮強度の差は $5\text{N/mm}^2$ 以内となり, 本実験における蒸気養生範囲とコアの採取位置では初期の高温履歴による強度増進停滞の影響は少ないと推察される。また, 材齢7日, 28日の標準養生試験体と材齢91日のコア強度を比較すると, おおよそコア強度の方が大きく構造体強度補正值 $\gamma_{S91}$ はいずれも0,  $_{28}S_{91}$ はW/B50-PとW/B40-Pで0, W/B30-Pで0~5程度となる。

#### (4) 材齢初期の圧縮強度と積算温度

式(1)により算出した積算温度と材齢3時間, 4.5時間の圧縮強度の関係を, 2章の室内実験結果と初期強度推定式と合わせて図-13に示す。また, 初期強度の全実験値と推定値の比較を図-14に示す。これらの図に示すように室内実験結果から算出した初期強度推定式に対して, 部材試作実験の初期強度のばらつきが大きいものの, おおよそ推定式に適合している。なお, 本章における部材試作実験は夏季実験であり, 練り上がり温度, 蒸気養生開始時の温度は, 初期強度推定式の算出を行った2章の室内実験時と比較して $10^\circ\text{C}$ 程度大きい。しかし, 本検討



(a) 柱模擬部材 (W/B30%)



(b) スラブ模擬部材 (W/B30%)

図-10 部材内部温度と追従養生を行ったテストピースの温度履歴の例

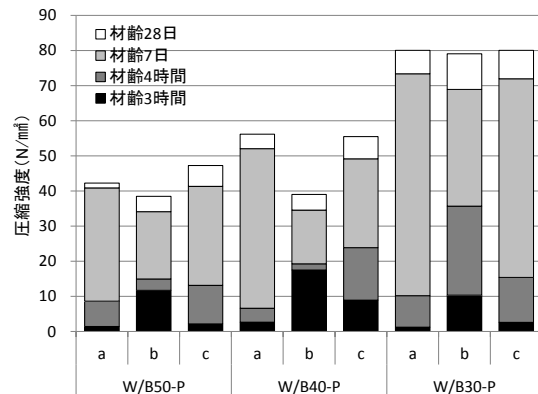


図-11 追従養生試験体の圧縮強度

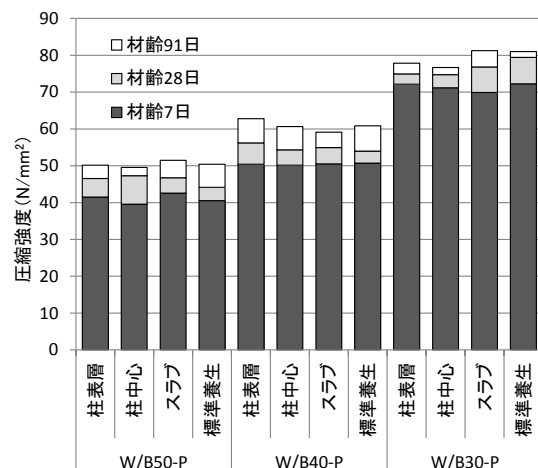


図-12 コアと標準養生試験体の圧縮強度

のように蒸気養生開始時の温度を基準とした積算温度を用いることで、同一の推定式で検討が可能であることが推察される。なお、本推定式の適応範囲は本実験範囲内であり、使用材料や割合を変更した際の適用可能性や推定精度の向上については今後の検討が必要である。

#### 4. 結論

本検討により得られた知見を以下に示す。

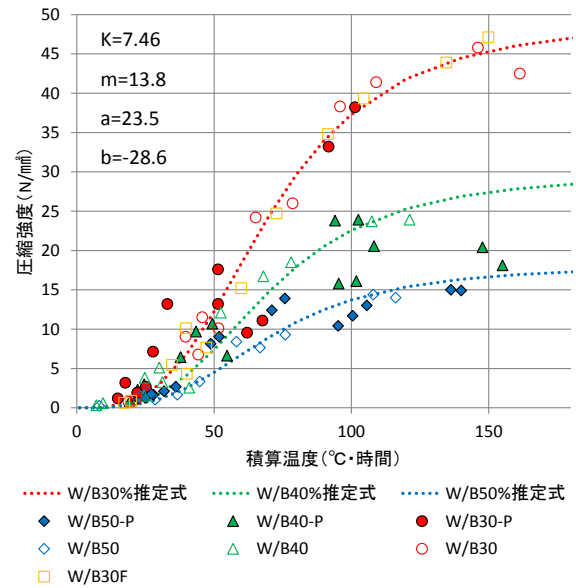
- 1) 超速硬コンクリートの初期強度は蒸気養生による高温履歴の影響を大きく受ける。
- 2) 材齢初期に蒸気養生を行う超速硬コンクリートの初期強度推定において、ロジスティック曲線を用いて蒸気養生開始時の温度を基準とした積算温度と水結合材比を変数として近似を行うことで、初期強度推定が可能である。
- 3) ジュール加熱追従養生によって、部材内部の任意の温度履歴をリアルタイムで追従することが可能であり、脱型・吊り上げ時の強度判定に有効である。
- 4) 部材の底面に近い（底面から 30mm）地点では、材齢初期の過度な温度上昇の影響で、材齢 7 日、28 日の強度増進が抑制される。
- 5) 割合が同等であれば練り上がり温度、蒸気養生開始時の温度が異なっても、蒸気養生開始時の温度を基準とした積算温度を用いることで、同一の初期強度推定式が適用可能である。

#### 謝辞

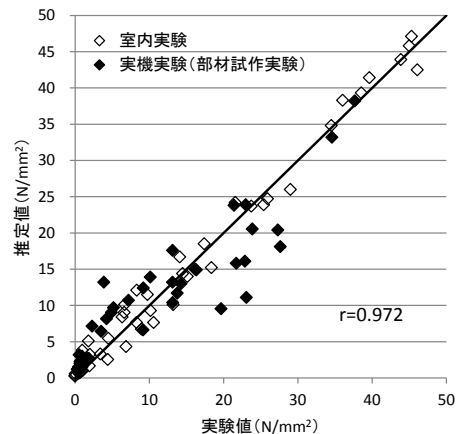
本実験の実施にあたり、株式会社ヤマックスに多大なる協力を頂きました。末尾ながら記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 小島正朗, 佐々嘉宣, 入内島克明, 栖原健太郎: 速硬性混和材と加熱養生と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, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.1786-1791, 2014
- 2) 小島正朗, 佐々嘉宣, 入内島克明, 樋口隆行: 速硬性混和材と加熱養生を併用した超速硬コンクリートの実大実験による強度発現性と耐久性の検証: コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.1471-1476, 2015
- 3) 杉山央, 榊田佳寛: 初期高温履歴を受けたコンクリートの長期強度発現性, 日本建築学会構造系論文集, No.515, pp.23-30, 1999
- 4) 吉田隆行, 岡永健, 御厨祐, 大坪正典: 成長曲線によるコンクリート強度推定法の研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.1, pp.555-560, 1992
- 5) 氏家勲, 大野浩二: 各種の成長曲線によるコンクリ



図一13 積算温度と圧縮強度の関係(室内・実機実験)



図一14 初期強度実験値と推定値の関係  
(室内・実機実験)

- 1) 一トの早期強度推定に関する検討, 土木学会論文集, No.798, pp.51-61, 2005
- 6) 谷口円, 桂修, 濱幸雄, 吉野利幸: 水セメント比の適用範囲を拡張したコンクリート強度予測式の提案, 日本建築学会構造系論文集, Vol.74, No.641, pp.1205-1210, 2009
- 7) 寒中コンクリート施工指針・同解説, 日本建築学会, 2010
- 8) 中嶋清実, 吉田弥智: 超速硬セメントおよび高性能減水剤を用いた低水セメント比のコンクリートの強度発現特性に関する研究, 土木学会論文集, No.390, pp.161-170, 1988
- 9) 西岡由紀子, 佐々嘉宣, 松下哲郎, 小島正朗: 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12)ジュール加熱法による部材温度追従養生の検討, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.593-594, 2015