

論文 高炉スラグ微粉末を高含有した結合材を用いた超速硬プレキャストコンクリートの強度発現に関する検討

柴田 雅至*1・西岡 由紀子*2・田中 悠登*3・近藤 智考*4

要旨：高炉スラグ微粉末を高含有した結合材を用いたプレキャストコンクリートの製造効率を高めるため、超速硬性混和材の添加と加熱養生を行う超速硬プレキャストコンクリートの強度発現に関する検討を行った。室内実験で強度発現に影響を与える調合の要因を把握し、水結合材比が小さく超速硬性混和材の添加量が多い調合ほど短時間で大きな強度発現があった。練上がり温度を変えた検討を行い、練上がり温度に関わらず20℃を基準温度とする積算温度で強度推定が可能だった。実部材の製造では、強度を推定し加熱試験体の圧縮強度を確認することで、蒸気養生開始後4時間で吊上げができた。

キーワード：高炉スラグ微粉末、プレキャストコンクリート、超速硬、超速硬性混和材、加熱養生、積算温度

1. はじめに

工事現場での生産性向上に有効なプレキャストコンクリート（以下、PCa）の製造量が近年増加している。筆者らはPCaの製造効率を高めるために、超速硬性混和材の添加と加熱養生により、コンクリートの硬化時間を短縮し、1台の型枠で1日に2回以上製造する技術を開発した^{1) 2) 3)}。この製造技術を適用することにより、PCa部材製造効率の向上や、鋼製型枠の数量が削減できる。また近年では持続可能な社会実現という観点から、コンクリート材料の分野においても様々な方策でCO₂排出量削減のための技術開発が行われている。ポルトランドセメント製造時に排出するCO₂を削減するために、ポルトランドセメントの使用量を少なくし、高炉スラグ微粉末を高含有した結合材が広く使用されている⁴⁾。PCa工場でも材料由来のCO₂排出量を削減するため、高炉セメントC種相当の結合材を使用したPCaが製造されている。

本研究では、高炉スラグ微粉末を高含有する結合材に超速硬性混和材を結合材内割置換で添加し、加熱養生した場合の強度発現特性を把握するため、水結合材比（以下、W/B）、超速硬性混和材の添加量、高炉スラグ微粉末の含有率の強度発現に影響を与える要因を明らかにするため、室内実験で検討を行った。また、部材の積算温度と初期強度の関係を把握し、練上がり温度が異なる場合の積算温度による初期強度の推定を検討した。適した調合と強度発現となる積算温度を把握した後に、PCa工場実部材製造実験を行い、蒸気養生した実部材の積算温度により強度の推定を行い、加熱養生試験体の圧縮強度を確認した上で、短時間の養生で正常に吊上げが可能か実証を行った。

2. 調合条件および練上がり温度が強度発現に及ぼす影響の検討（実験シリーズ1）

2.1 実験概要

(1) 使用材料・調合・フレッシュコンクリート試験結果
実験に使用した材料を表-1に示す。高炉スラグ微粉末は比表面積が4000cm²/gで、石膏添加によりSO₃量を3.5%に調整した材料を使用した。実験の調合とフレッシュコンクリート試験で測定したスランプ、スランプフロー、空気量、コンクリート温度を表-2に示す。BFS率はHとBFSの総量の内BFSが占める割合を示す。No.1~3でW/Bの影響把握を行い、No.2, 4, 5で超速硬性混和材の添加量の影響把握を行い、No.2, 6, 7, 8で高炉スラグ微粉末の含有率の影響把握を行った。また、No.1~3と同じ調合で夏期を想定した練上がり温度30℃以上のNo.9~11と、冬期を想定した練上がり温度15℃以下のNo.12~14で強度発現特性を比較した。

超速硬性混和材を16kg/m³添加するNo.2と、添加しな

表-1 使用材料

材料種類	記号	種類・産地	物性値・備考
水	W	水道水 常陸大宮市	密度 1.00g/cm ³
セメント	H	早強ポルトランドセメント	密度 3.14g/cm ³
混和材	BFS	高炉スラグ微粉末	密度 2.88g/cm ³ 比表面積 4000cm ² /g
	HA	超速硬性混和材	密度 2.52g/cm ³
細骨材	S	陸砂 茨城県常陸大宮市 上大賀産	表乾密度 2.58g/cm ³ F.M. 2.70 吸水率 2.33%
粗骨材	G	硬質砂岩碎石 常陸大宮市盛金産	表乾密度 2.62 g/cm ³ 実積率 63%
混和剤	SP	ポリカルボン酸系 高性能減水剤	コンクリート製品用
	AE	AE剤（I種）	1A=B×0.001%

*1 (株)竹中工務店 技術研究所 建設基盤技術研究部 建設材料グループ 研究主任 (正会員)

*2 (株)竹中工務店 技術研究所 建設基盤技術研究部 建設材料グループ 研究主任 工修 (正会員)

*3 デンカ(株) エラストマー・インフラソリューション部門 青海インフラ技術研究部 工修 (正会員)

*4 竹本油脂(株) 第三事業部 研究開発部 化学グループ 工修

表-2 実験調査とフレッシュコンクリート試験結果

No	想定期間	調合名 W/B-BFS率-HA	W/B (%)	BFS率 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						SP (B×%)	AE (A)	スランプ (スランプフロー) (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度: CT (°C)
						W	H	BFS	HA	S	G					
1	標準期	30-60-16	30	60	42.0	160	207	310	16	668	935	0.800	9.5	(66×67)	3.8	17
2	標準期	37-60-16	37	60	42.7	160	167	250	16	715	975	0.750	8.0	23.0	4.2	15
3	標準期	50-60-16	50	60	44.1	160	122	182	16	782	1006	0.600	3.0	20.0	5.2	16
4	標準期	37-60-0	37	60	42.8	160	173	259	0	717	975	0.750	8.0	20.0	4.6	14
5	標準期	37-60-24	37	60	42.6	160	163	245	24	712	975	0.725	8.0	19.0	4.2	15
6	標準期	37-0-16	37	0	42.5	160	403	0	16	702	1019	0.825	6.0	20.5	4.6	17
7	標準期	37-50-16	37	50	42.9	160	208	208	16	720	975	0.700	6.5	18.5	4.1	16
8	標準期	37-70-16	37	70	42.6	160	125	292	16	712	975	0.700	8.5	20.5	3.8	17
9	夏期	30-60-16S	30	60	42.0	160	207	310	16	668	935	0.950	9.5	(69×70)	3.8	35
10	夏期	37-60-16S	37	60	42.7	160	167	250	16	715	975	0.800	7.0	22.5	5.4	34
11	夏期	50-60-16S	50	60	44.1	160	122	182	16	782	1006	0.850	3.0	19.5	5.8	35
12	冬期	30-60-16W	30	60	42.0	160	207	310	16	668	935	0.650	3.5	(66×65)	4.8	13
13	冬期	37-60-16W	37	60	42.7	160	167	250	16	715	975	0.550	3.5	20.0	5.3	13
14	冬期	50-60-16W	50	60	44.1	160	122	182	16	782	1006	0.650	1.5	16.0	4.2	13

い No.4 では SP の使用量は同等であった。また、空気量は 4.5%±1.5%以内とし、スランプの目視により材料分離がないことを確認した。

(2) 試験体と養生方法

フレッシュコンクリート試験後速やかに φ100×200mm のプラスチック製型枠に打込み試験体を作製した。養生方法は標準養生と加熱養生の2水準とした。加熱養生の方法は、既往の研究⁵⁾で試験体内部の温度差が小さく、コンクリート部材の温度履歴を精度よく再現ができる方法として確認されている、ジュール加熱養生法とした。養生方法の概要を図-1 に示す。筆者らの開発する超速硬コンクリート^{1~3),5~8)}は通常よりも高温の蒸気養生を行うことを特徴としている。温度設定は既往の研究を参考にして、実部材の蒸気養生時の温度データから床形状の薄部材の想定中心温度履歴を温度プログラムとして設定し、最高到達温度は75°Cとした。なお、本研究では強度発現に関する検討のみ行っており、高温の養生による耐久性や寸法安定性等への影響については今後の検討とする。また、加熱開始時間は実製造時の打込み、均し、養生準備の時間を考慮して注水から30分とした。

(3) 試験方法と目標強度

各調合・各養生水準で、φ100×200mm の試験体を用いて圧縮強度試験を JIS A 1108 に準じる方法で行った。ジュール加熱養生の水準は加熱開始から3時間 (No.3を除く)、3.5時間、4.5時間 (以下、3h、3.5h、4.5h) を試験材齢とした。標準養生の水準は1日 (No.9~14を除く)、7日、28日 (以下、1d、7d、28d) を試験材齢とした。

脱型・吊上げ時に必要な強度は、一般的に吊上げ時の部材に生じる曲げモーメントと、吊り治具用インサートの引き抜き強度のいずれかで決まる。実適用においては、部材形状や重量により必要な強度を計算し、圧縮強度に換算して判定する^{2,3)}。よって、各調合の脱型・吊上げが可能な強度発現となる調合と加熱養生時間の把握および

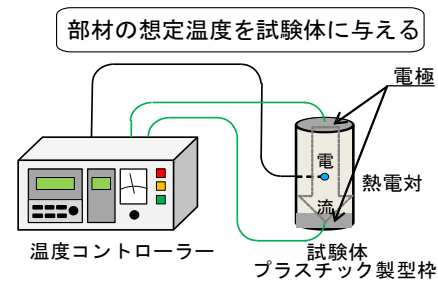


図-1 ジュール加熱養生の概要

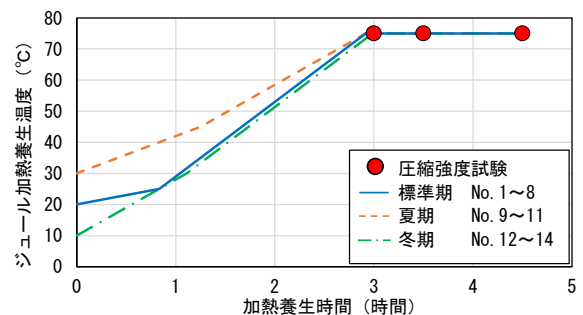


図-2 ジュール加熱養生の温度

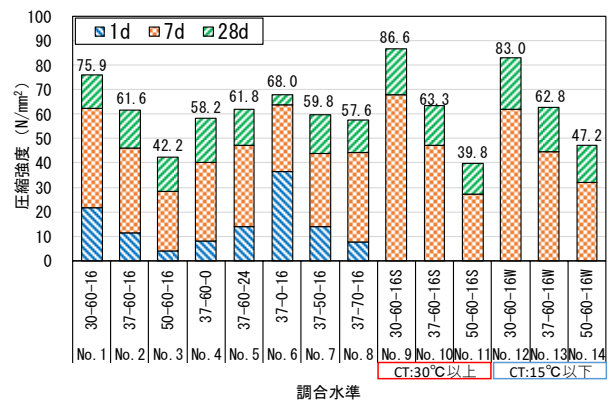


図-3 標準養生試験体の圧縮強度

正確な強度の推定方法の把握を本検討の目標とした。早強ポルトランドセメントを結合材とした既往の製造記録²⁾には、加熱養生時間を3時間とした場合の施工サイクルの例が示されている。高炉スラグ微粉末を結合材とし

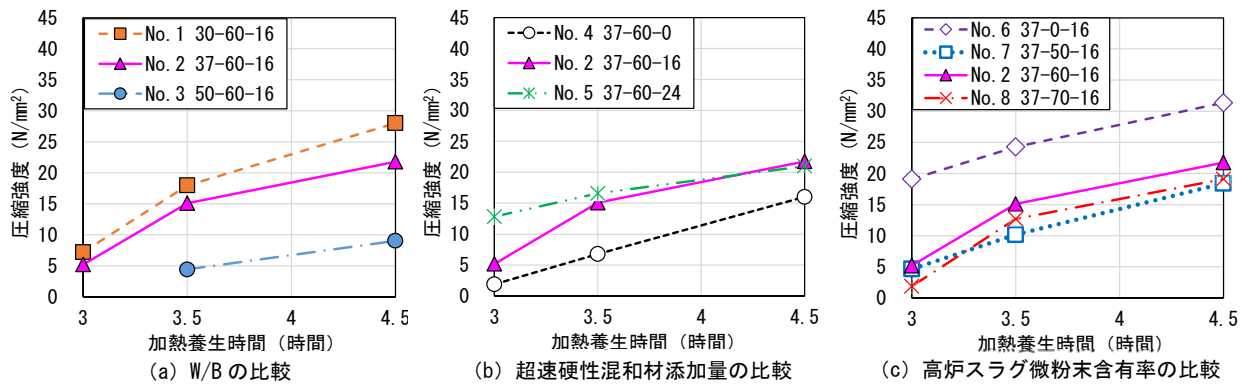


図-4 ジュール加熱試験体の加熱養生開始からの圧縮強度の推移

て使用した場合の特性として、初期強度発現性が早強ポルトランドセメントよりも低くなることを考慮し、加熱養生時間 3h~4.5h の強度を把握することとした。

2.2 実験結果と考察

(1) 標準養生試験体の圧縮強度

図-3 に標準養生試験体の材齢 1d, 7d, 28d の圧縮強度を示す。No.4 と 5 の強度データから超速硬性混和材の有無について比較すると、1m³ 当たり 24kg 添加した No.5 の方が 1d の圧縮強度は大きく、28d の圧縮強度もやや大きかった。超速硬性混和材の特性として、加熱養生しない場合であっても、一定の初期強度発現効果があり、28d の圧縮強度は同程度であることが分かった。

(2) 調合が初期強度に及ぼす影響

ジュール加熱試験体の加熱養生からの初期強度の推移について図-4 に示す。図-4(a) は W/B が異なる No.1, 2, 3 の比較を示す。W/B30% の No.1 と 37% の No.2 は加熱養生時間 3h から 3.5h にかけて大きく強度が増進し、加熱養生時間 3.5h で圧縮強度 15N/mm² を超えた。W/B37%, 30% と W/B が小さい調合ほど、短い加熱養生時間で一定の初期強度を得た。

図-4 (b) に超速硬性混和材の添加量の異なる No.2, 4, 5 の比較を示す。16kg/m³ 添加した No.2 は加熱養生時間 3.5h 時点で 15.1N/mm² であり、無添加の No.4 の 6.8N/mm² と比べ大きく、増進効果が確認できた。24kg/m³ 添加した No.5 は加熱養生時間 3.5h と 4.5h は 16kg/m³ 添加した調合と同程度であるが、加熱養生時間 3h の強度は 12.8N/mm² で 16kg/m³ 添加した調合と比較して大きくなり、短い加熱養生時間で一定の初期強度を得た。

図-4 (c) に高炉スラグ微粉末含有率が 0% の No.6 と含有率 50~70% の No.2, 7, 8 の比較を示す。No.2, 7, 8 は加熱養生時間 3.5h でいずれも 10N/mm² 以上であった。高炉スラグ微粉末を使用しない No.6 は加熱養生時間 3h で他の調合の 4.5h に相当する大きな強度発現があった。高炉スラグ微粉末を結合材に高含有する場合は含有しない場合と比べて、より長い養生時間が必要になることが分かった。

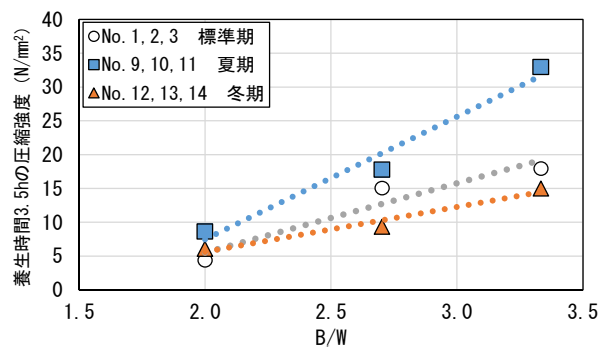


図-5 養生時間 3.5h の圧縮強度と W/B の関係

(3) 練上がり温度が初期強度に及ぼす影響

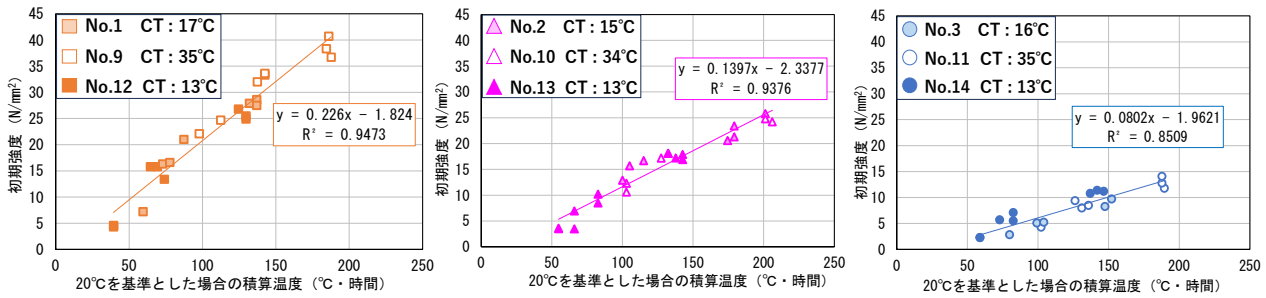
図-5 は標準期を想定した No.1~3 と夏期を想定した No.9~11 と、冬期を想定した No.12~14 の加熱養生時間 3.5h の圧縮強度と W/B の関係を示す。練上がり温度が高い水準の方が圧縮強度は大きい傾向であった。W/B50% は練上がり温度の差による強度差は小さく、特にコンクリート練上がり温度の差が小さい標準期と冬期はほぼ同程度であるが、W/B40%, 30% と W/B が小さくなるにつれて、圧縮強度の差は大きくなった。

試験材齢まで試験体が受けた積算温度と初期強度の関係を図-6 に示す。いずれの調合も練上がり温度が異なる場合も線形関係を示していた。積算温度の算出方法は部材温度と基準温度の差に加熱養生時間を乗じて求めた。基準温度は一般的に -10℃ が用いられるが、既往の超速硬コンクリートの検討⁸⁾では 40℃ を基準とするケースもある。本検討においては、最小二乗法で求めた回帰直線のバラつきを示す決定係数 R² を、-30℃ から 50℃ まで 10℃ 毎に確認し、3 調合の決定係数の平均が 1 に近くなる基準温度を採用することとし、20℃ を基準温度とした。積算温度による初期強度推定式を式(1)に示し、図-6 の関係式の係数と定数を表-3 に示す。

$$\sigma = \alpha \cdot \sum (T - T_{int}) dt + \beta \quad (1)$$

ここに、 σ : 圧縮強度 (N/mm²)、 T : 加熱養生時間 t (時間) における部材温度 (°C)、 T_{int} : 基準温度 (°C)、 α, β : 表-3 に示す係数、定数

既往の研究⁶⁾でも、高炉スラグ微粉末を結合材とした



(a) 調査 No. 1, 9, 12 W/B30% (b) 調査 No. 2, 10, 13 W/B37% (c) 調査 No. 3, 11, 14 W/B50%

図-6 20°Cを基準とした積算温度と初期強度の関係

超速硬コンクリートは積算温度と初期強度が線形関係となることが報告されているが、本実験のように練上がり温度が異なる場合でも、積算温度算出時の基準温度を適切に設定することにより、同じ初期強度推定式で強度を推定することができた。

3. PCa 工場での超速硬 PCa 製造実証 (実験シリーズ 2)

3.1 実験概要

実験シリーズ 2 では、床を模擬した実部材を PCa 工場の蒸気養生設備で加熱した際の温度履歴を把握し、式(1)により実部材の強度推定を目的として実部材製造を行った。高炉スラグ微粉末を高含有した結合材であっても、短時間での脱型と吊上げが可能であるか実証を行った。

(1) 材料・調査・練混ぜ

使用材料は実験シリーズ 1 の表-1 と同じとし、調査は表-2 に示す No.1~3 と同じ 3 調査とし、W/B30%、W/B37%、W/B50%と表す。練混ぜは公称容量 1.5m³ の強制 2 軸ミキサーを用いて 1 バッチあたりの練混ぜ量は 1.3m³ とした。材料の投入順序は W/B50%と 37%の調査は、セメント、混和材、細骨材、水、粗骨材を投入して 90 秒練り混ぜた。W/B30%の調査はセメント、混和材、細骨材、水を投入しモルタルを 90 秒練り混ぜ、最後に粗骨材を投入して 120 秒練り混ぜた。

(2) 製造する実部材と試験体の概要

床を模擬した薄い実部材 (2000mm×2000mm×300mm) を各調査 1 体ずつ製造した。部材上部と部材両脇に蒸気配管を設置し、蒸気排出孔をバランスよく設け、全体をシートで覆うことで養生槽内の温度ができる限り均一になるようにした。部材の温度履歴を測定するため、実部材の平面中央部に、熱電対を設置した。高さ方向の熱電対の配置は、図-7 の断面図に示すように、表層からの深さ 20mm, 50mm, 100mm の位置と部材中心部の 4 点とした。なお、実部材は熱電対の固定用鉄筋を除き、無鉄筋とした。蒸気養生槽内の雰囲気温度の目標と実施及び W/B37%の実部材の表層 100mm 位置の温度を図-8 に示す。養生槽内の雰囲気温度の実測値は目標に対しやや大きくなった。これは蒸気養生の温度をコントロールするための計測点を養生槽内の温度が特に低い位置に設置

表-3 条件と初期強度推定式の係数・定数

条件				係数 α	定数 β
W/B %	BFS率 %	HA添加量 kg/m³	基準温度 °C		
30	60	16	20	0.2260	-1.8240
37	60	16	20	0.1397	-2.3377
50	60	16	20	0.0802	-1.9621

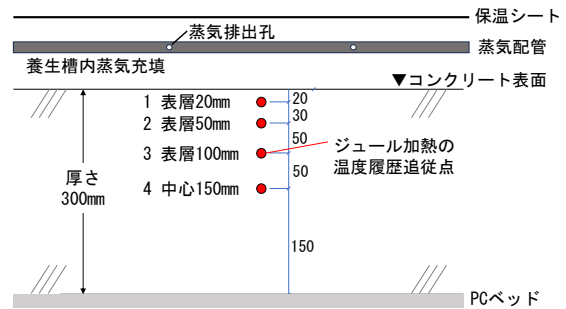


図-7 床を模擬した実部材の断面図

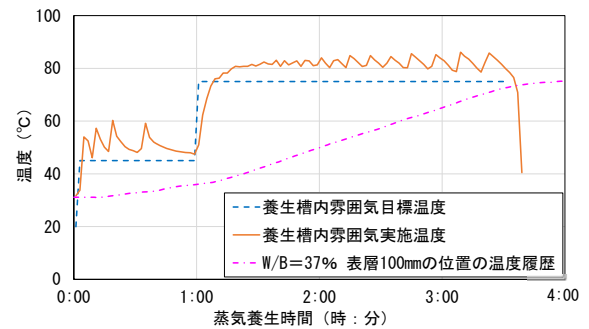


図-8 蒸気養生の目標・実施温度と部材温度

してしまっことが原因と推定される。実部材製造時には計測点の位置の検討に加え、蒸気配管の配置や保温シートの性能などを改善することでより目標温度に近づけることが可能と考えられ、今後の検討とする。蒸気養生は 3 調査同時に開始し 3.5 時間行った。順番に練混ぜを行う都合上、注水から蒸気養生開始までの時間はそれぞれ異なり、W/B50%は 150 分後、W/B30%は 70 分後、W/B37%は注水 30 分後とした。吊上げの実証は既往の製造事例²⁾と近い時間で加熱養生が開始できる W/B37%の部材で行った。また、圧縮強度試験体を作製しジュール加熱養生を行った。吊上げ実証を行う W/B37%のジュール加熱試験体は図-8 に示す実部材の表層 100mm の位

置で測定した温度履歴をリアルタイムに試験体に与えるように設定を行い、実部材の強度を試験体の圧縮試験により精度よく推定できるようにした。W/B50%と30%のジュール加熱試験体は打込み後から蒸気養生開始まで時間差が生じるため、図-2の標準期の温度設定で注水30分後から加熱した。

(3) 試験項目と吊上げ強度の判定方法

フレッシュコンクリート試験で空気量は4.5%±1.5%を確認し、スランプ形状の目視により材料分離がないことを確認した後、試験体と実部材へ打込んだ。

圧縮強度試験をJIS A 1108に準じて行い、ジュール加熱試験体は加熱開始から3h, 3.5h, 4.5hの材齢で試験を実施した。また、実部材は直径100mmのコアを削孔し、200mm長さに切断して試験を行い、圧縮強度と静弾性係数を取得した。コアの圧縮試験材齢は7d, 28d, 90dとし、それぞれ各試験材齢前に削孔した。

W/B37%の調査において吊上げ可能な強度の判定を行った。使用する吊上げ用インサートの定着部である表層100mmの位置の推定強度で判定することとした。既往の製造事例²⁾において、ばらつきを考慮した目標強度7.7N/mm²を採用しており、本実験の判定強度の参考値とした。表層100mmの位置の実部材の温度履歴を測定し、リアルタイムにジュール加熱装置に反映させて試験体を加熱し、圧縮強度を確認した。また、部材の各断面位置で温度を測定して、積算温度により圧縮強度を推定した。

3.2 実験結果と考察

(1) 部材の温度履歴と強度推定

図-9は各調査を蒸気養生した際の部材中心部の温度履歴を示す。いずれの調査も蒸気養生終了後に最高温度に到達しており、W/Bが小さいほど最高温度は高くなったが、材齢3.5hまでの中心温度の推移は大きな違いはなかった。W/B37%の調査において、熱電対を設置した各測定点の20°Cを基準とした積算温度を、実験シリーズ1で求めた式(1)に代入して求めた推定強度と、ジュール加熱試験体の圧縮強度を図-10に示す。養生開始から5時間までは、表層よりも中心に近づくほど積算温度の上昇が遅くなることから、表層20mmの位置とジュール加熱装置の温度履歴の追従点とした表層から100mmの位置では、同じ推定強度に達するのが1時間程度遅くなると推定できた。吊上げ強度の判定に使用するジュール加熱試験体に与える温度は、断面位置により積算温度が異なることを考慮し、適切に設定すべきである。

また、W/B37%の調査の加熱養生時間3.5時間のジュール加熱試験体の圧縮強度は10.8N/mm²で、判定強度の参考値とした7.7N/mm²を上回った。式(1)を使用した推定強度とジュール加熱試験体の圧縮強度を比較すると、加熱養生時間3.5hは同程度であったが、他の材齢では2~

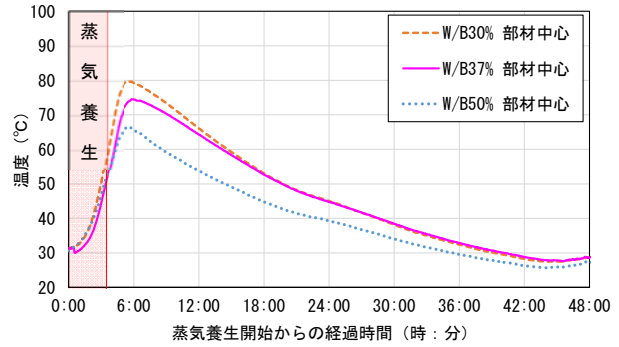


図-9 部材の中心温度の履歴

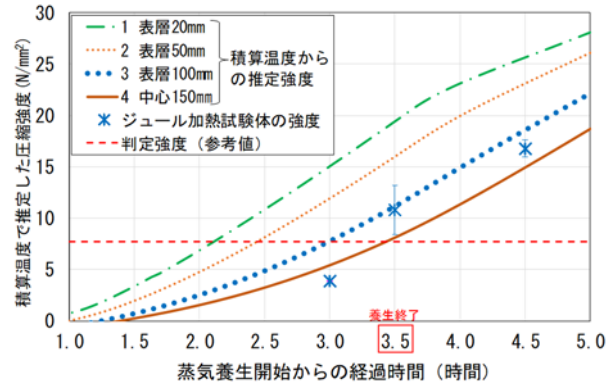


図-10 部材の各断面位置の推定強度
(W/B37%・基準温度20°Cの場合)

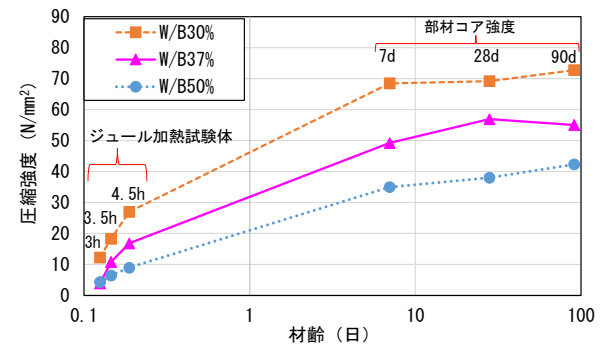


図-11 圧縮強度の推移

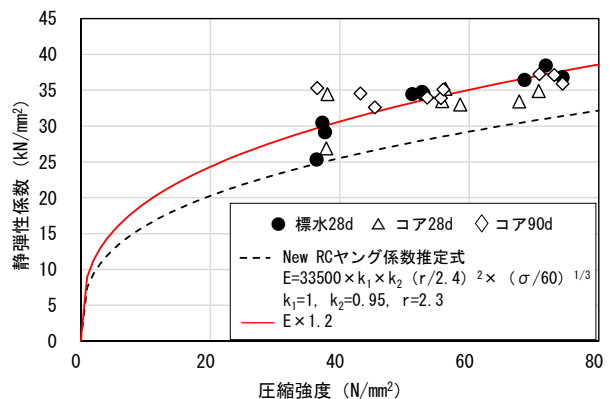


図-12 圧縮強度と静弾性係数の関係

3N/mm²の差が生じていた。実際に製造する際には、ばらつきを考慮して判定強度を設定するとよい。

(2) 圧縮強度の発現性と静弾性係数

圧縮強度の推移を図-11に示す。3h, 3.5h, 4.5hの強

度はジュール加熱試験体のデータを示し、7d、28d、90dは実部材のコア強度を示す。各調査ともに材齢7d以降も順調に強度発現しており、長期の強度発現性においても問題はなかった。3hのジュール加熱試験体の強度はW/B37%よりも50%の方が大きかった。これは図-8に示すW/B37%の試験体の温度履歴の元となる、部材の表層100mmの位置の温度上昇が、図-2のW/B50%の試験体の温度設定と比べて遅かったためと推定される。

標準養生試験体と蒸気養生を行った実部材コアの圧縮強度と静弾性係数の関係を図-12に示す。静弾性係数の値はNewRC式⁹⁾による推定値の1.2倍程度となり、養生条件に関わらず同一の推定式で圧縮強度から静弾性係数の推定が可能であることが確認できた。

(3) 吊上げの実証

W/B37%の調査について、3.5時間の蒸気養生の終了後に脱型を行い、蒸気養生開始からおおよそ4時間後に吊上げができた。この時の積算温度による推定強度は表層100mmの位置で約15N/mm²であった。実際の吊上げ状況を図-13に示す。吊上げ後に仕上りの確認を行い、脱型時のかけや、吊上げを起因とするひび割れ等の欠陥がないことを確認した。

4. まとめ

高炉スラグ微粉末を高含有した結合材を用いた超速硬PCaにおいて、W/B、超速硬性混和材の添加量、高炉スラグ微粉末含有率、練上がり温度と強度の関係を検討し、PCa工場では部材を製造して吊上げの実証を行った。得られた知見を下記に示す。

(1) W/B30%、37%の調査は加熱養生時間3.5hで圧縮強度15N/mm²を超えた。W/Bが低い調査ほど、短い加熱養生時間で一定の初期強度を得た。

(2) W/B37%で超速硬性混和材を24kg/m³添加した調査は、加熱養生時間3hの強度は12.8N/mm²であり、16kg/m³添加よりも短い加熱養生時間で一定の初期強度を得た。

(3) 積算温度と初期強度は線形関係となっており、練上がり温度が異なる場合でも、同じ初期強度推定式で圧縮強度を推定することができた。

(4) 実部材を蒸気養生した場合、表層よりも中心の方が積算温度の上昇が遅いため、表層20mmより表層100mmの位置の方が、1時間程度強度発現が遅いと推定できた。

(5) W/B37%の調査で3.5時間蒸気養生を行い模擬部材を製造した。積算温度により強度推定を行うことで、ひび割れ等の欠陥を発生させることなく吊上げができた。

謝辞

本成果は、株式会社DTプレコンの関係各位に多大な実験協力を頂き得られたものである。末尾ながら記して謝意を表す。



図-13 加熱養生直後の吊上げ状況

参考文献

- 1) 小島正朗, 佐々嘉宣, 入内島克明, 栖原健太郎: コ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, 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, 石山直希, 山本登昭, 入内島克明: プレキャスト部材用超速硬コンクリートの開発と適用—やわらぎ森のスタジアムの施工—, コンクリート工学, Vol.52, No.7, pp.582-588, 2014.7
- 3) 深沢茂臣, 小島正朗, 西岡由紀子, 鈴木仁: (仮称)加須物流センターにおける超速硬コンクリートのサイトプレキャスト部材への適用—1日での製造・取付けサイクルの実現—, コンクリート工学, Vol.59, No.8, pp.673-678, 2021.8
- 4) 小島正朗, 辻大二郎, 依田和久, 橋本学: エネルギー・CO₂ ミニマムセメント・コンクリートの開発と適用, コンクリート工学 Vol.59, No.9, pp.776-781, 2021.9
- 5) 西岡由紀子, 松下哲郎, 佐々嘉宣, 小島正朗: 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, No.1297, pp.593-594, 2015.9
- 6) 柴田雅至ほか: 速硬性混和材を混合した高炉スラグ高含有結合材を用いた超速硬プレキャストコンクリートの初期強度の検討: 日本建築学会学術講演梗概集, No.1153, pp.305-306, 2024.8
- 7) 畑信次ほか: 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(part.1), 1247, 493-494, 2012.9
- 8) 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4)超速硬コンクリートの脱型・吊上げ時の圧縮強度推定方法: 日本建築学会学術講演梗概集, No.1298, pp.595-596, 2013.8
- 9) 野口貴文, 友澤史紀: 高強度コンクリートの圧縮強度とヤング係数との関係, 日本建築学会構造系論文集, 第474号, 1-10, 1995.8