

論文 プレキャスト工場における部材同一養生供試体による調合計画に関する実験的検討

石川 伸介*1・大野 吉昭 *2・河村 光昭 *3・堀池 一男 *4

要旨: プレキャスト部材に用いるコンクリートの調合方法は建築工事標準仕様書・同解説 プレキャスト鉄筋コンクリート工事 (JASS10) の改定により大幅に変更された。本検討においてはこの改定により新たに検討が必要となる部材同一養生供試体と部材の強度の関係について、加熱養生方法、部材厚さ、水セメント比などを水準に実験により検討を行った。本実験の結果においては、普通セメントを使用した調合では、部材厚さ 300mm 以下であれば、おおむね部材同一養生供試体強度を使用して調合設計、強度管理ができることが示された。

キーワード: プレキャストコンクリート, プレキャスト部材同一養生, 加熱養生

1. はじめに

2013 年日本建築学会より改定発行された、建築工事標準仕様書・同解説 プレキャスト鉄筋コンクリート工事 JASS10¹⁾(以下, JASS10)においては、プレキャスト部材(以下, PC 部材)に用いるコンクリートの調合の方法が改定された。JASS10 では、調合管理強度を定めるための考え方を①設計基準強度 F_c36N/mm^2 以下で PC 部材の厚さが小さい場合, ② F_c36N/mm^2 超または F_c36N/mm^2 以下で PC 部材の厚さが大きい場合, ③簡易断熱供試体による S 値を用い, PC 部材に加熱養生を行わない場合の 3 つに区分している。このため, PC 部材の調合を定めるためには、設計基準強度、部材厚さ、加熱養生、製造時期を考慮する必要がある。①の条件で調合を作製する場合、圧縮強度の管理には、プレキャスト部材同一養生(以下, 部材同一養生)した供試体を用いるが、PC 部材および部材同一養生供試体は加熱養生の方法や製造時期によって圧縮強度の関係が異なるため、その影響を検討することが必要である。本研究は、(一社)プレハブ建築協会により、JASS10 の改定に対応するため行われたものであり、標準期、冬期、夏期における柱部材および板状部材から採取した供試体のコア強度と、各種条件で作製した部材同一養生供試体の圧縮強度を測定し、PC 部材の厚さ、加熱養生方法および部材同一養生の影響について検証を行い、部材同一養生でのプレキャストコンクリートの強度管理について検討を行った。

2. 実験方法

2.1 実験概要

実験は、プレキャスト部材製造工場 A,B の 2 工場で行

い、それぞれ水セメント比 3 水準、部材形状 3 種類の模擬部材を製造し、部材強度を確認するとともに、標準養生、部材同一養生を行った強度管理用供試体を作製し強度の比較を行った。

A 工場では、標準期、冬期、夏期の 3 シーズンの実験を行い、B 工場では標準期の実験を行った。

養生は蒸気による加熱養生を行い、一部加熱しない試験体を作製した。実験に用いた部材の形状および養生条件を表-1 に示す。

表-1 PC 部材の形状および養生条件

| 外観形状 | 厚さ (mm) | A 工場 | | B 工場 | |
|------|---------|------|------|------|------|
| | | 加熱養生 | 加熱なし | 加熱養生 | 加熱なし |
| 板状 | 200 | ○ | — | ○ | — |
| | 300 | ○ | — | ○ | — |
| 柱状 | 1000 | ○ | ○ | ○ | — |

2.2 使用材料、調合および加熱養生方法

(1) 使用材料

表-2 使用材料の種類および物性値

| 使用材料 | 項目 | A 工場 | B 工場 |
|-------|--------|-------------------------------|-------------------------------|
| セメント | 種類 | 普通ポルトランドセメント | |
| | 密度 | 3.16g/cm ³ | 3.15g/cm ³ |
| 細骨材 | 種類 | 砕砂 | 陸砂 |
| | 密度,吸水率 | 2.60g/cm ³ , 1.48% | 2.56g/cm ³ , 1.96% |
| 粗骨材 | 種類 | 碎石 2005 | 碎石 2005 |
| | 密度,吸水率 | 2.65g/cm ³ , 0.81% | 2.66g/cm ³ , 0.66% |
| 化学混和剤 | 種類 | Ad1 | 高性能減水剤 |
| | | Ad2 | 空気量調整剤 |
| | | | 高性能 AE 減水剤 |
| | | | — |

*1 株式会社安藤・間 技術研究所 (正会員)

*2 一般財団法人ベターリビング つくば建築試験研究センター 博士(工学) (正会員)

*3 一般社団法人プレハブ建築協会

*4 川田建設株式会社 那須工場 品質管理課

表-3 PC 部材に用いるコンクリートの調合

| 工場 | 調合 | スランプ または スランプ フロー (cm) | 空気量 (%) | W/C (%) | 細骨材率 s/a (%) | 単位量(kg/m ³) | | | | | |
|------|-----|------------------------------------|------------|------------|--------------------|-------------------------|-----------|----------|----------|--------------|--------------|
| | | | | | | 水 W | セメント C | 細骨材 S | 粗骨材 G | 混和剤 1 Ad1 | 混和剤 2 Ad2 |
| A 工場 | A55 | 12±2.5 | 4.5±1.0 | 55.0 | 47.0 | 165 | 300 | 866 | 984 | 3.00~3.60 | 1.20 |
| | A42 | 18±2.5 | 4.5±1.0 | 42.5 | 48.0 | 165 | 388 | 849 | 926 | 3.88~4.66 | 0.97~1.55 |
| | A30 | 55±7.5 | 4.5±1.0 | 30.0 | 45.7 | 165 | 550 | 746 | 893 | 7.15~8.25 | 0.55~0.83 |
| B 工場 | B55 | 12±2.5 | 4.5±1.0 | 55.0 | 48.2 | 165 | 300 | 858 | 958 | 1.80 | - |
| | B42 | 18±2.5 | 4.5±1.0 | 42.5 | 48.9 | 165 | 389 | 835 | 907 | 2.92 | - |
| | B30 | 55±7.5 | 4.5±1.0 | 30.0 | 47.6 | 165 | 550 | 750 | 857 | 4.68 | - |

実験はそれぞれの工場で通常使用している材料で行った。使用材料の種類および物性値を表-2に示す。

(2) 調合

調合を表-3に示す。水セメント比およびフレッシュ性状の目標値は2工場共通とし、水セメント比は55.0, 42.5, 30.0%の3水準、スランプは12±2.5cmまたは18±2.5cm, スランプフロー55±7.5cm, 空気量は4.5±1.0%とした。

(3) 加熱養生方法

加熱養生は、A,B両工場とも蒸気により行っているが、蒸気の導入方法に違いがある。A工場では定盤下面に蒸気を供給し養生シート内への蒸気の供給は少なく、主に定盤を加熱することによりPC部材を加熱している。一方B工場では養生シート内に直接蒸気を供給する方法で

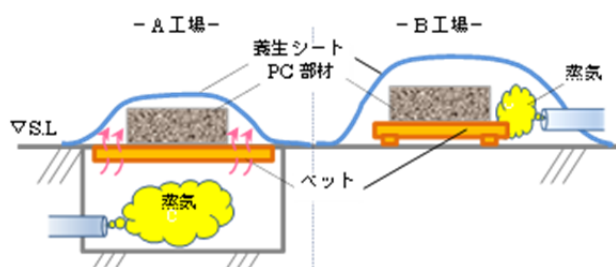


図-1 加熱養生方法概要

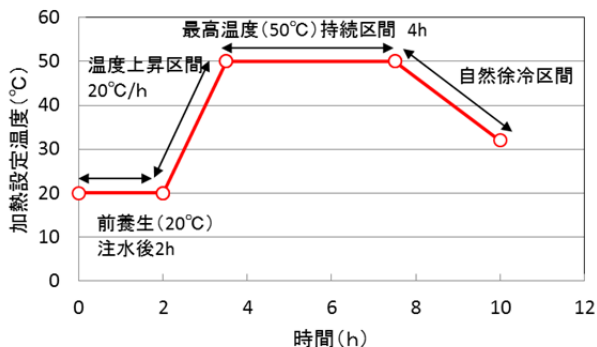


図-2 加熱養生パターン

あり PC 部材の全面から加熱される。両工場の加熱養生方法の概要を図-1に示す。

加熱養生パターンを図-2に示す。

前養生は、注水後2時間とし、養生最高温度50°C、最高温度保持時間4時間とした。工場およびシーズンに関わらず、同じ加熱養生パターンで試験体を作製した。温度制御を行う位置は、A工場では、ベット下であり、B工場では、PC部材脇の養生シート内となっている。

2.3 試験体

試験体は、PC部材から採取したコア供試体と円柱供試

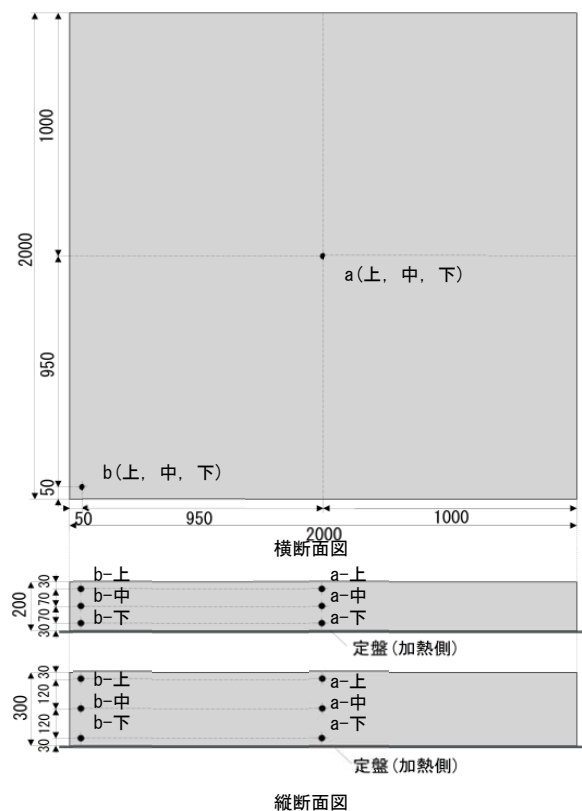


図-3 温度測定位置(板状部材)

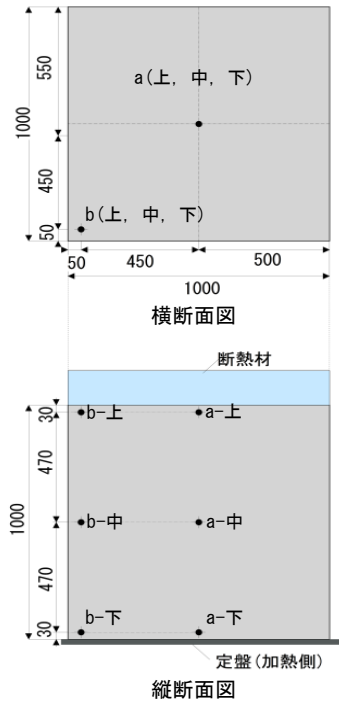


図-4 温度測定位置（柱部材）

体とした。PC 部材の寸法は、2000×2000mm で厚さ 200mm (20N) および 300mm (30N) の板状部材、1000×1000×1000mm の柱状部材 (100N) の 3 条件とした。温度測定は、PC 部材が図-3 および図-4 に示す中心部 (a) と端部 (b) の上中下の 6 点、円柱供試体が養生条件別に中央 1 点とした。

部材同一養生の円柱供試体は、模擬試験体と同じシート内の部材上部と部材付近に置き、試験材齢まで同じ環境下で養生を行った。部材上部は、シート内の柱状の模擬試験体の上、部材付近は、板状の模擬試験体の周辺の定盤の上に置いた。打込み面は、ビニールキャップした封かん養生供試体、ビニールキャップ無しの気乾養生供試体の 2 種類とした。

圧縮強度試験体は、コア供試体が試験材齢 7, 28, 56, 91

表-4 加熱養生と円柱供試体の処理方法の組合せ

| 養生条件 | 養生位置 | 供試体 処理方法 | 材齢 | | | | |
|------|-------|-------------|----|----|-----|-----|-----|
| | | | 1日 | 7日 | 28日 | 56日 | 91日 |
| 加熱養生 | 部材付近 | 気乾 | ○ | ○ | ○ | — | — |
| | | 封かん | ○ | ○ | ○ | — | — |
| | 部材上部 | 気乾 | ○ | ○ | ○ | — | — |
| | | 封かん | ○ | ○ | ○ | — | — |
| 加熱なし | — | 気乾 | ○ | ○ | ○ | — | — |
| | | 封かん | ○ | ○ | ○ | — | — |
| 標準養生 | 20℃水中 | — | — | ○ | ○ | ○ | |

日にそれぞれ内側 3 本、外側 3 本ずつ採取し、円柱供試体は試験材齢 1, 7, 28 日 (各 3 本) とした。

3. 結果と考察

3.1 フレッシュ性状および標準養生強度

使用したコンクリートの、フレッシュ性状および標準養生強度を表-5 に示す。

スランプ、スランプフロー、空気量はいずれも目標値の範囲内であり、コンクリート温度は、夏期の A 工場の W/C=30% が 35℃ で若干高めであったが、フレッシュ性状に大きな違いはなかった。

標準養生供試体の圧縮強度は、W/C=30% の材齢 91 日で B 工場の圧縮強度が大きい値を示したが、それ以外の圧縮強度は ±10% 程度であり、A 工場と B 工場のコンクリートの性質は概ね同じであると考えられる。

表-5 フレッシュ性状の測定結果と標準養生供試体の圧縮強度

| 記号 | 時期 | フレッシュ性状 | | | 圧縮強度(N/mm ²) | | |
|-----|-----|------------------|-------|--------|--------------------------|------|-------|
| | | SL(cm) SF(cm) | AC(%) | CT(°C) | 7日 | 28日 | 91日 |
| A55 | 標準期 | 14.0 | 4.9 | 21.0 | 29.1 | 40.1 | 48.7 |
| A42 | | 18.0 | 4.8 | 23.0 | 49.3 | 61.6 | 69.0 |
| A30 | | 52.5 | 4.9 | 26.0 | 69.9 | 82.8 | 86.1 |
| A55 | 冬期 | 13.5 | 3.8 | 10.0 | 27.2 | 41.0 | 46.7 |
| A42 | | 20.5 | 3.7 | 12.0 | 49.8 | 64.3 | 74.5 |
| A30 | | 55.5 | 3.9 | 16.0 | 69.9 | 84.2 | 93.9 |
| A55 | 夏期 | 13.5 | 4.0 | 31.0 | 30.8 | 41.5 | 47.6 |
| A42 | | 20.0 | 4.4 | 33.0 | 48.7 | 58.4 | 64.9 |
| A30 | | 52.5 | 5.0 | 35.0 | 64.6 | 75.6 | 83.7 |
| B55 | 標準期 | 10.5 | 4.3 | 18.0 | 29.8 | 41.8 | 47.1 |
| B42 | | 18.5 | 4.9 | 21.0 | 42.4 | 54.3 | 60.7 |
| B30 | | 53.3 | 5.2 | 21.5 | 76.1 | 88.9 | 102.1 |

3.2 温度

PC 部材と円柱供試体の調合別の最高温度について、A 工場の標準期を図-5、B 工場の標準期を図-6、A 工場の冬期を図-7 および A 工場の夏期を図-8 に示す。

図-7 に示す、冬期の A 工場では W/C=55% の調合で、部材厚さが大きいほど最高温度が低くなる傾向にあったが、それ以外の調合では部材厚 1000mm のものが、200mm、300mm のものに比べコンクリート内部の最高温度が高くなる傾向が認められた。

標準期の場合、図-5 に示すように A 工場は W/C=30% の部材厚 1000mm の PC 部材で端部より中央部の温度が高い。また、B 工場では部材厚 200mm と 300mm の PC

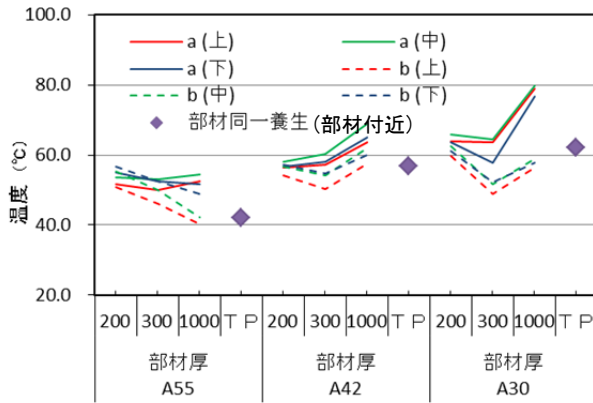


図-5 PC 部材と円柱供試体の調合別の最高温度 (A 工場, 標準期)

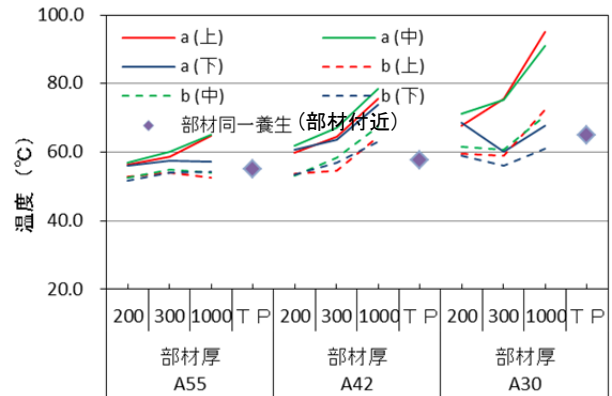


図-8 PC 部材と円柱供試体の調合別の最高温度 (A 工場, 夏期)

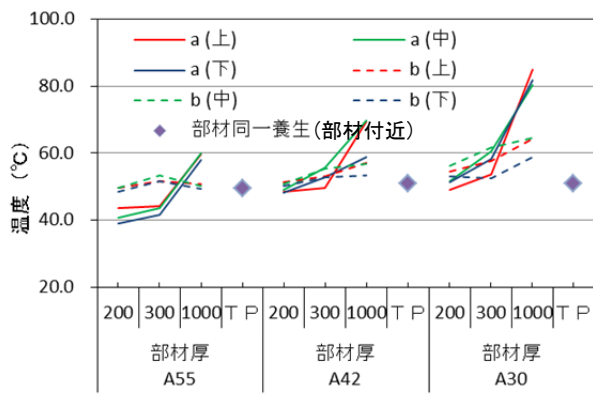


図-6 PC 部材と円柱供試体の調合別の最高温度 (B 工場, 標準期)

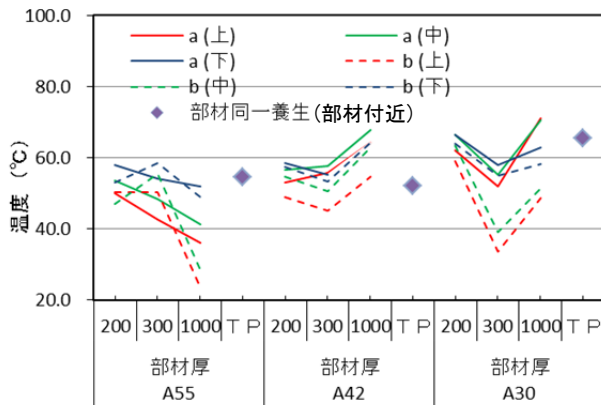


図-7 PC 部材と円柱供試体の調合別の最高温度 (A 工場, 冬期)

部材は端部より中央部の温度が低いか同じであり、1000mm の温度は端部より中央部の方が高い。水セメント比が小さいほど、温度差は顕著であった。

冬期の場合、A 工場の W/C=55%の部材厚 1000mm は端部より中央部の温度が低く、W/C=42.5%, 30%では端部より中央部の温度が高い。いずれも端部と中央部の温度差が大きく、PC 部材の下部と上部の温度差も生じてい

る。

夏期の場合、すべての水セメント比、すべての部材厚で端部より中央部の温度が高く、標準期と概ね同じ傾向を示した。ただし、夏期は気温が高く、全体の傾向として標準期よりもコンクリートの温度が高い。

B 工場が PC 部材全体を加熱養生しているのに対し、A 工場は PC 部材の定盤を蒸気で加熱しているため、下部が上部よりも加熱養生の効果が高い。全体的に水セメント比が小さいほど内部温度が高くなる傾向にあった。PC 部材中央は水和熱の影響で温度が高くなっており、PC 部材厚さが大きいほど水和熱の影響が大きい。

部材同一養生供試体は、部材付近および部材上部に配置したが、部材上部に配置した部材同一養生供試体の温度は、A 工場では、加熱養生の影響が小さく部材と比較してかなり低い温度となった。また B 工場においては、ほとんど差は見られなかった。

部材付近に配置した部材同一養生供試体の最高温度は、PC 部材の厚さ、水セメント比の大小に限らず、概ね部材端部の温度と同等であった。

A 工場の 3 シーズンで比較した場合、W/C=50%、部材厚 1000mm の中部と上部で PC 部材の温度が低いが、他の位置については、概ね同じ傾向であった。部材同一養生供試体はセメントの水和熱を放散しやすく、PC 部材端部のように水和熱の放散や加熱養生の影響を受けやすい部位と同じ最高温度を示した。

また、B 工場では、部材同一養生供試体の最高温度は、ほぼ、設定養生最高温度の 50°C であるのに対して、A 工場では水セメント比が小さくなり部材の最高温度が高くなるに従い、部材同一養生供試体の最高温度も高くなる傾向が見られる。これは、部材同一養生供試体の周囲の温度が、B 工場の方法では、直接制御されているため設定温度に近づいているのに対して、A 工場では、部材周囲の空間が比較的狭く、直接温度制御されていないため、定盤を介して受ける熱に加えて部材の水和発熱によ

る温度上昇からの影響も受けるためであると考えられる。

3.3 養生条件と部材同一養生供試体強度

材齢28日の養生方法別の圧縮強度を図-9～図-11に示す。水セメント比および養生法を水準とした圧縮強度は、W/C=55%～30%のいずれも標準養生の圧縮強度が最も大きい。

部材同一養生供試体の圧縮強度は、冬期の部材付近の気乾養生が封かん養生にくらべてかなり低い値となった。

冬期のシート解放時点は、供試体は暖かいが周りの温度が低く、湿度も低いいため、水が逸散しやすくなると推察される。部材付近の方が部材上部より加熱養生により

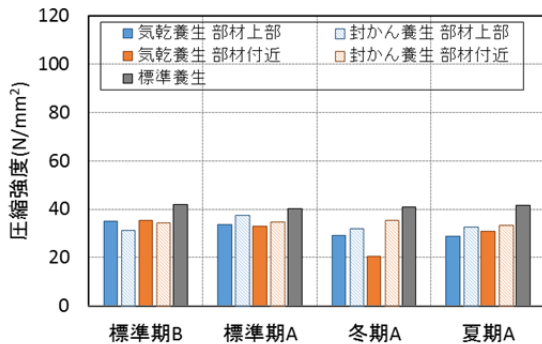


図-9 供試体養生方法による圧縮強度の違い (W/C=55%)

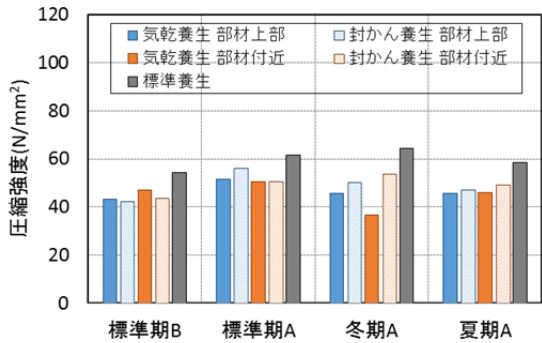


図-10 供試体養生方法による圧縮強度の違い (W/C=42.5%)

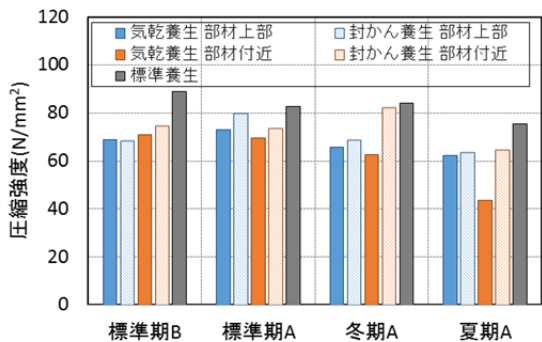


図-11 供試体養生方法による圧縮強度の違い (W/C=30%)

温まっており、水分の散逸は大きいと考えられる。

一方、夏期は、W/C= 30%で全体に圧縮強度が小さかった。練りあがり温度が35℃と高く、高い外気温や自己発熱の影響で高温となり強度増進が小さくなったと考えられる。特に加熱養生の影響を受けやすい部材付近が小さかった。

封かん養生を行った場合、いずれの条件でも十分な湿潤状態が保持できるため、圧縮強度の差は小さかった。

一方、気乾養生を行った場合、A工場では部材同一養生供試体の強度が低かった。A工場の定盤の下から加熱する方式の場合、PC部材周辺には蒸気が十分いきわたらないため、気乾養生の部材同一養生供試体は乾燥しやすくなると考えられる。

3.4 部材同一養生供試体強度とPC部材強度の関係

図-12～図-15に各工場の材齢28日における、部材同一養生供試体とコア供試体によるPC部材強度の関係を示す。PC部材強度は、内側と外側のコア供試体強度の平均値とし、部材同一養生供試体の養生位置は、両工場において、部材に近い温度履歴を示した、部材付近を検討対象とすることとした。

JASS10では、部材同一養生強度を用いて調査を作成する場合、設計基準強度が36N/mm²以下で部材厚が小さいものとしているが、ここではPC部材強度が部材同一養生強度の±10%になる範囲を、おおむねPC部材強度と部材同一養生強度が同一とみなせる範囲として検討を行う。また、JASS10による調査策定では、PC部材強度と部材同一養生供試体強度の差を補正值 ΔF_T として加えることとしているので、 $\Delta F_T < 0.1F_c$ となる範囲ということになる。

図-12、図-14、図-15に示すように定盤の下から加熱を行うA工場においては、各シーズンとも、部材同一養生強度に対するPC部材強度の比率は、部材厚が大きいものほど大きくなっている。この加熱養生方法では、下面のみの加熱のため部材が厚くなるに従い、部材全体に加熱養生の効果が及びにくくなり高温履歴による強度へのダメージが少なくなるためと考えられる。また、水セメント比が変わっても部材同一養生強度に対するPC部材強度の比率は、概ね同じであった。部材同一養生強度には、気乾養生と封かん養生で差があったが、気乾養生を行った部材同一養生強度に対するPC部材強度の比率は、概ね90%以上であった。部材厚1000mmのPC部材であっても気乾養生の場合、部材同一養生よりPC部材強度が大きく部材同一養生で管理しても安全側となるが、これは部材厚が大きい場合、上部まで加熱が十分に行われないためと考えられ、加熱方法や部材同一養生供試体の管理方法について検討をする必要があると思われる。

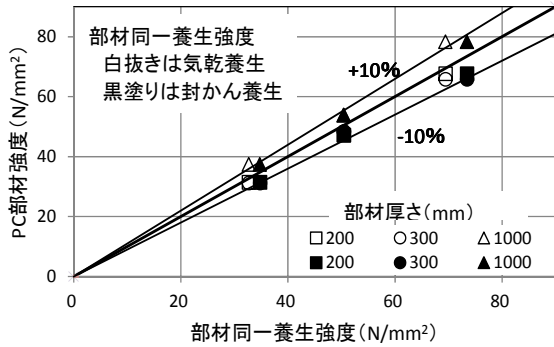


図-12 部材同一養生強度と PC 部材強度
(A工場 標準期)

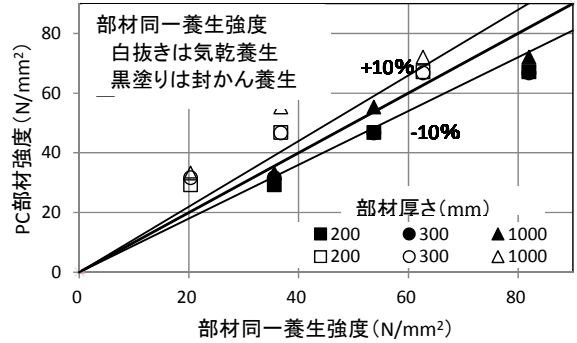


図-14 部材同一養生強度と PC 部材強度
(A工場 冬期)

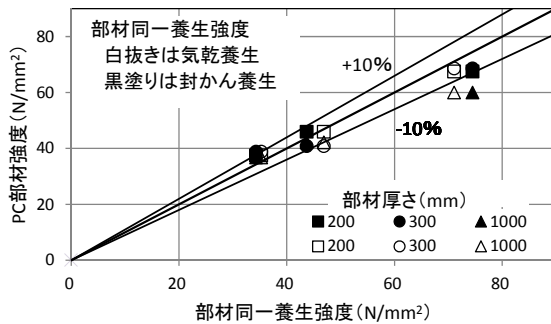


図-13 部材同一養生強度と PC 部材強度
(B工場 標準期)

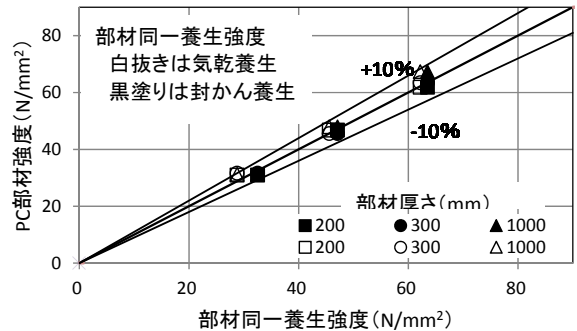


図-15 部材同一養生強度と PC 部材強度
(A工場 夏期)

一方、シート内に蒸気を供給し部材全面を加熱する B 工場では、図-13 に示すように部材厚が大きいほど、水セメント比が低いほど部材同一養生の圧縮強度が PC 部材の圧縮強度より大きくなる傾向にあった。

普通セメントを用いたコンクリートにおいては、初期に高温を履歴することにより長期の強度が低下すると考えられることから²⁾、部材厚が大きいほど、また水セメント比が小さくなるほど水和熱が蓄積され模擬部材内部の最高温度が高くなったことが原因と考えられる。部材厚 1000mm を除き、部材同一養生強度に対する PC 部材強度の比率は、概ね 90%以上であった。

PC 部材強度が部材同一養生強度 $\pm 10\%$ になる範囲を、おおむね PC 部材強度と部材同一養生強度が同一とみなせる範囲とした場合、全面加熱方式の B 工場では、部材厚 300mm までなら同一とみなせ、一方、定盤の下から加熱する A 工場では、部材同一養生を気乾養生とすれば安全側になることが示された。

このことから、JASS10 における強度補正值 ΔF_T を、設計基準強度の 10%とすれば、両工場において、部材厚 300mm までのプレキャスト部材において、部材同一養生で安全側に管理できると考えられる。

4. まとめ

本報告では、PC 工場での実大試験体を製造することにより、部材の強度と、部材同一養生供試体の温度、強度の関係について検討を行った。主な結果は以下のとおりである

- 1) 加熱養生方法により傾向は異なるものの、部材厚 300mm までであれば、PC 部材の圧縮強度は、部材同一養生供試体の圧縮強度の概ね 90%以上であった。
- 2) このことから、JASS10 における強度補正值 ΔF_T を、設計基準強度の 10%とすれば、部材厚 300mm までのプレキャスト部材において、部材同一養生で管理することができる。
- 3) 定盤を加熱する加熱養生方式の場合、直接蒸気を導入する方法に比べ、PC 部材の乾燥が進みやすいため部材同一養生供試体も、気乾養生を行うと安全側で管理できる。

参考文献

- 1) (社)日本建築学会：建築工事標準仕様書 JASS10 プレキャスト鉄筋コンクリート工事、2013
- 2) 杉山・樹田ほか：大断面プレキャストコンクリート部材の強度特性、日本建築学会技術報告集、第 14 号、19-24、2001 年 12 月