

# 論文 高温蒸気養生履歴を受けるモルタルの脱型強度の推定

入江 正明<sup>\*1</sup>・鏡 健太<sup>\*2</sup>・梅村 靖弘<sup>\*3</sup>

**要旨:** プレキャストコンクリート製品は、JISの規定に基づき一律の蒸気養生履歴を負荷させて製造されるため、使用材料の特徴や製造時の要求性能を加味できない上に製造時間が長く製造コスト増の一因になっている。そこで本研究では標準的な蒸気養生履歴に対して前置時間や昇温速度等を変化させ蒸気時間を短縮した場合の脱型時強度発現に及ぼす影響をモルタル試験体を用いて検証を行ったものである。その結果、蒸気養生履歴により強度発現は影響されるものの蒸気時間を短縮しても必ずしも脱型強度の低下は生じないこと、さらに蒸気積算温度を導入することで脱型時強度の推定が可能であることも分かった。

**キーワード:** プレキャストコンクリート, JIS, 常圧蒸気養生, 積算温度, モルタル, 性能規定型体系

## 1. はじめに

多くのプレキャストコンクリート製品（以下、PCa製品と省略）は、1950年の日本工業規格の制定以来JIS製品として仕様規定型体系下で見なし規定に近い製品製造が行われてきた。中でも、製造過程での常圧蒸気養生履歴は、1979年のJIS改正により自主規制化<sup>1)</sup>され任意の履歴が負荷できるようになったにもかかわらず現在でもJISA5302-1974<sup>2)</sup>や土木学会コンクリート標準示方書<sup>3)</sup>に示される一律の蒸気養生履歴が用いられる傾向が強い。これらの蒸気養生履歴の規定は、①前置時間(2~3時間以上)、②昇温速度(20°C/h以下)、③最高温度(65°C以下)、④降温速度(ひび割れ発生しないように徐々に下げる)などの条件により構成されPCa製品の製造時間の約9割を占めている。したがって、この蒸気履歴を仕様規定<sup>4)</sup>とした場合、製造時間の短縮による製造コストの削減が難しくPCa製品の販売の弊害となっている。しかし、昨今の性能規定型体系では、最終的な製品の要求性能を満足すれば、製造過程の蒸気養生履歴は製造者責任において使用材料や製品種類、工場設備の能力や材料温度・外気温などの環境雰囲気などさまざまなファクターを考慮して任意に設定することができるため、蒸気養生履歴の合理化が可能となる。PCa製品の第一義の要求性能は出荷時(14日)圧縮強度であるが、蒸気養生履歴の合理化を行う場合、脱型時間を早期に行うことが直接的に製造時間の短縮につながるため脱型強度も重要な要求性能となる。

従来までのPCa製品の強度に関する研究では、製品(出荷時)強度に着目した研究<sup>5,6,7)</sup>がほとんどであり、製造過程での要求性能である脱型強度に関する研究はほとんど存在しない。

そこで、本研究は、PCa製品の製造過程における蒸気

養生履歴の合理化を主眼にして、脱型時圧縮強度に及ぼす蒸気養生履歴の影響をモルタル供試体を用いて実験を行ったものである。なお、本研究は高温蒸気養生履歴を負荷させるため骨材の線膨張係数の影響<sup>8)</sup>を排除するためにモルタル硬化体により行った。

## 2. 実験

### 2.1 使用材料と試験方法

モルタルに使用した材料は、材料の差異による影響を極力減らすために、セメントは5%以下の混和材が含まれない普通ポルトランドセメントを使用、骨材はセメント強さ試験用標準砂を用い、水セメント比は50%一定とした。なお、水セメント比及びセメントの単位量の設定は、脱型時(24時間)強度10~15N/mm<sup>2</sup>、出荷時(14日)強度30N/mm<sup>2</sup>を目標として設定した。表-1に使用材料の諸元、表-2にモルタル配合を示す。

圧縮試験は、JIS A1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠して行い、φ50x100mmモルタル供試体を作製し、モルタル打設後直ちに蒸気養生装置にセットし蒸気養生を開始した。また蒸気養生終了後は直ちに蒸気養生装置から取り出し、試験材齢まで恒温恒湿室において20°C一定の封緘養生を行った。なお、比較検討用供試体として蒸気養生履歴を受けない供試体を作製し、モルタル打設後試験材齢まで恒温恒湿室において20°C一定

表-1 使用材料

| 材料   |                       | 諸元   |
|------|-----------------------|--|
| セメント | 普通ポルトランドセメント          | 密度=3.16(g/cm <sup>3</sup> ),<br>比表面積=3,260(cm <sup>2</sup> /g) |
| 細骨材  | セメント強さ試験用標準砂(セメント協会製) | 表乾密度=2.62(g/cm <sup>3</sup> ),<br>吸水率=0.42(%)                  |

\*1 日本躯体工事(株) 取締役社長 (正会員)

\*2 日本大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 工修 (正会員)

\*3 日本大学 理工学部土木工学科 博士(工学) (正会員)

表-2 モルタル配合

| 水セメント比 (%) | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |        |       |
|------------|--------------------------|--------|-------|
|            | 水 W                      | セメント C | 細骨材 S |
| 50         | 300                      | 599    | 1348  |

の封緘養生（以下、常温養生と省略）を行った。供試体型枠は 1 日材齢脱型時強度を取得する必要から脱型が容易なプラスチック製を用いた。圧縮試験の試験材齢は、脱型時間を想定した 1 日（24 時間）材齢と出荷時材齢の 14 日材齢、さらに中間の 3, 7 日材齢とした。なお、蒸気養生前の材料温度および外気温は基準温度 20℃とし、供試体の大きさは多くの PCa 製品の規格である躯体厚さ 200mm 以下の薄肉製品を対象としシリンダー供試体を用いて行った。

2.2 蒸気養生履歴

モルタル供試体に負荷させる常圧蒸気養生履歴は、図-1 に示す JIS A5302-1974<sup>2)</sup> や土木学会コンクリート標準示方書<sup>3)</sup> で示されている①前置時間(2~3 時間以上)、②昇温速度(20℃/以下)、③最高温度(65℃以下)、④最高温度継続時間、⑤降温速度(ひび割れ発生しないように徐々に下げる)とする蒸気養生履歴（以下、標準蒸気養生履歴と省略）に対して、表-3 に示す前置時間の短縮、昇温速度の増、最高温度継続時間の短縮、降温速度の増を設定し、これらを組み合わせた全 16 パターンの常圧蒸気養生履歴とした。表-4 に今回設定した蒸気養生履歴パターンの一覧を示す。なお、図-1 には、JIS A5302-1974<sup>2)</sup> で示されている標準蒸気養生履歴での前置時間の設定

根拠である凝結時間を示し、さらに蒸気養生時の積算温度（基準温度-10℃）の算定面積（斜線部分）を併記した。蒸気養生履歴の負荷実験は、温度上昇下降や相対湿度を制御できる蒸気養生装置（図-2 参照）を製作しコンピュータ制御により行った。

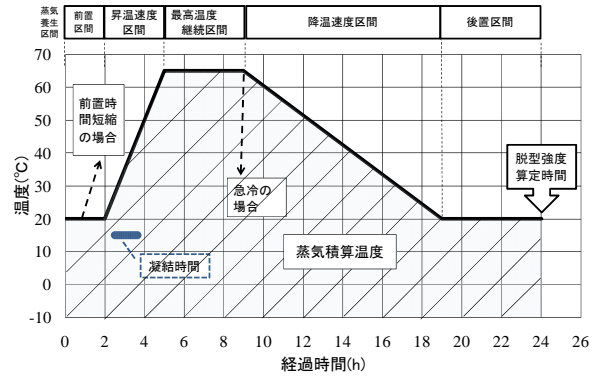


図-1 標準蒸気養生履歴と凝結時間

表-3 蒸気養生履歴の実験水準

| 温度条件        | 設定水準     |
|-------------|----------|
| 基準温度(°C)    | 20       |
| 前置時間(h)     | 0.5, 2.0 |
| 昇温速度(°C/h)  | 15, 30   |
| 最高温度(°C)    | 65       |
| 最高温度継続時間(h) | 2.0, 4.0 |
| 降温速度(°C/h)  | 4.5, ∞   |

表-4 材齢 1 日（24 時間）までの蒸気養生履歴パターン

| 蒸気養生パターン名 | ①前置区間             |       | ②昇温区間    |       | ③最高温度区間 |         | ④降温区間    |       | ⑤後置区間  |       |      |
|-----------|-------------------|-------|----------|-------|---------|---------|----------|-------|--------|-------|------|
|           | 温度(°C)            | 時間(h) | 速度(°C/h) | 時間(h) | 温度(°C)  | 継続時間(h) | 速度(°C/h) | 時間(h) | 温度(°C) | 時間(h) |      |
| 1         | N-2-15-65-4-4.5   | 20    | 2        | 15    | 3       | 65      | 4        | 4.5   | 10     | 20    | 5    |
| 2         | N-2-15-65-4-0     | 20    | 2        | 15    | 3       | 65      | 4        | -     | 0      | 20    | 15   |
| 3         | N-2-15-65-2-4.5   | 20    | 2        | 15    | 3       | 65      | 2        | 4.5   | 10     | 20    | 7    |
| 4         | N-2-15-65-2-0     | 20    | 2        | 15    | 3       | 65      | 2        | -     | 0      | 20    | 17   |
| 5         | N-2-30-65-4-4.5   | 20    | 2        | 30    | 1.5     | 65      | 4        | 4.5   | 10     | 20    | 6.5  |
| 6         | N-2-30-65-4-0     | 20    | 2        | 30    | 1.5     | 65      | 4        | -     | 0      | 20    | 16.5 |
| 7         | N-2-30-65-2-4.5   | 20    | 2        | 30    | 1.5     | 65      | 2        | 4.5   | 10     | 20    | 8.5  |
| 8         | N-2-30-65-2-0     | 20    | 2        | 30    | 1.5     | 65      | 2        | -     | 0      | 20    | 18.5 |
| 9         | N-0.5-15-65-4-4.5 | 20    | 0.5      | 15    | 3       | 65      | 4        | 4.5   | 10     | 20    | 6.5  |
| 10        | N-0.5-15-65-4-0   | 20    | 0.5      | 15    | 3       | 65      | 4        | -     | 0      | 20    | 16.5 |
| 11        | N-0.5-15-65-2-4.5 | 20    | 0.5      | 15    | 3       | 65      | 2        | 4.5   | 10     | 20    | 8.5  |
| 12        | N-0.5-15-65-2-0   | 20    | 0.5      | 15    | 3       | 65      | 2        | -     | 0      | 20    | 18.5 |
| 13        | N-0.5-30-65-4-4.5 | 20    | 0.5      | 30    | 1.5     | 65      | 4        | 4.5   | 10     | 20    | 8    |
| 14        | N-0.5-30-65-4-0   | 20    | 0.5      | 30    | 1.5     | 65      | 4        | -     | 0      | 20    | 18   |
| 15        | N-0.5-30-65-2-4.5 | 20    | 0.5      | 30    | 1.5     | 65      | 2        | 4.5   | 10     | 20    | 10   |
| 16        | N-0.5-30-65-2-0   | 20    | 0.5      | 30    | 1.5     | 65      | 2        | -     | 0      | 20    | 20   |
| 17        | N-常温養生            | 20    |          | -     |         | 20      |          |       |        |       |      |

注) 蒸気養生パターン名は、「セメント種-前置時間-昇温速度-最高温度-最高温度継続時間-降温速度-後置時間」を示す



図-2 蒸気養生装置

### 3. 実験結果

#### 3.1 各蒸気養生履歴と圧縮強度発現

##### (1) 前置時間の影響

図-3に標準蒸気養生履歴（パターン1）に対して前置時間を短縮した履歴（パターン9）と常温養生（パターン17）の強度発現曲線を示す。この図から前置時間を短縮した供試体は標準蒸気養生履歴と比べて、脱型時から出荷時材齢までのすべての材齢において高い強度を示した。また、常温養生の強度発現は、材齢1日強度では蒸気養生と比べ低い値を示したが、それ以降の材齢では高い強度を示した。JIS<sup>2)</sup>では、「凝結始発前に温度上昇を避けるため、前置時間を2~3h以上とすべきである」と明記されているが、前置時間を短くした方が高い強度を示した。この理由としては、浅賀ら<sup>9)</sup>の研究にあるようにエーライト相およびアルミネート相の反応率が高くなり強度増加が生じたためと考えられる。

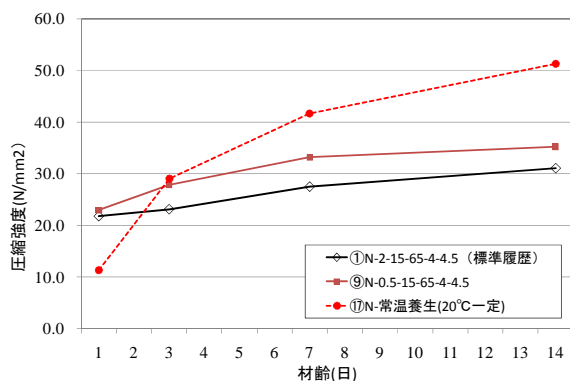


図-3 圧縮強度発現（前置時間の影響）

##### (2) 降温速度の影響

図-4に標準蒸気養生履歴（パターン1）に対して降温速度を上げた、いわゆる急冷した履歴（以下、降温急冷と省略）（パターン2）と常温養生（パターン17）の強度発現曲線を示す。この図から降温急冷した供試体は、標準蒸気養生履歴と比べて材齢1日では若干低くなるもののそれ以降の材齢では同等以上の強度発現を示した。また、さらに前置時間を短縮（パターン10）してもその傾向は同じであった。このように蒸気養生後に急冷した

場合に材齢1日以降強度増加が大きくなった理由としては、エーライト反応が活性化したことが要因の一つと考えられる<sup>10)</sup>。一般には、蒸気養生装置から取り出した後の急冷は、表面ひび割れ発生の恐れがあることから徐々に外気温まで下げる<sup>3)</sup>が示され降温速度3~5°C/hとしている。今回の実験では薄肉供試体であり鉄筋等の拘束体が無いことからひび割れの発生はなかったと考えられるが、拘束体のある場合などは降温速度は一律ではなく躯体状況を加味して決定すべきであると考えられる。

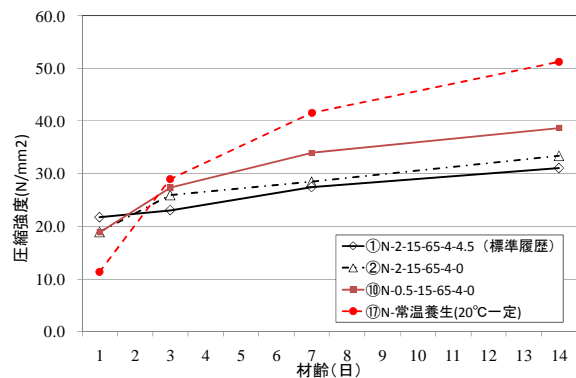


図-4 圧縮強度発現（降温速度の影響）

##### (3) 昇温速度の影響

図-5に標準蒸気養生履歴（パターン1）に対して昇温速度を上げた、いわゆる急熱した（以下、昇温急熱と省略）履歴（パターン5）と常温養生（パターン17）の強度発現曲線を示す。この図から昇温急熱した供試体は、標準蒸気養生履歴と比べて材齢1日では同等の強度であるが、それ以降の材齢では高い強度を示した。また、さらに前置時間を短縮（パターン13）した場合には、強度が相対的に低下し標準蒸気養生履歴と同等の強度を示した。

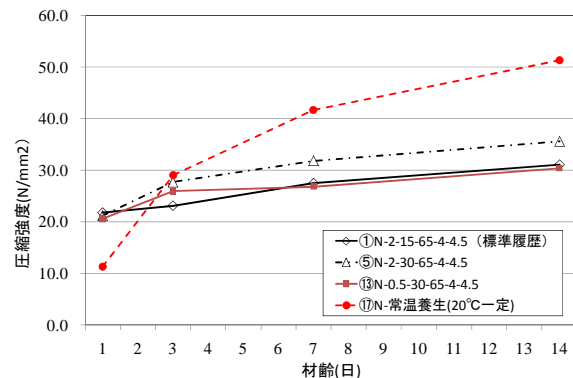


図-5 圧縮強度発現（昇温速度の影響）

##### (4) 昇温・降温速度の同時影響

図-6に標準蒸気養生履歴（パターン1）に対して昇温と降温の両区間の速度を同時に上げた、いわゆる昇温

急熱と降温急冷した履歴（パターン6）と常温養生（パターン17）の強度発現曲線を示す。この図から昇温急熱と降温急冷を同時に行った場合は、材齢1日材齢は低下することがわかった。しかし、材齢3日以降は強度増を生じていることから蒸気養生の影響は少ないと考えられる。また、さらに前置時間を短縮（パターン14）した場合も同じ傾向を示した。このことから、昇温急熱と降温急冷の同時負荷は材齢1日の強度に影響することが分かった。

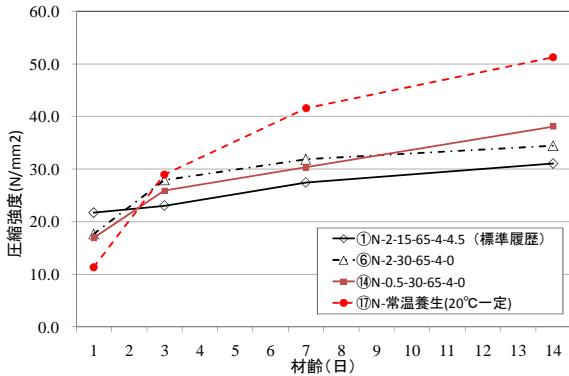


図-6 圧縮強度発現（昇温・降温速度の影響）

(5) 最高温度継続時間が短い場合の前置時間の影響

図-7に標準蒸気養生履歴（パターン1）に対して最高温度継続時間を短縮した履歴（パターン3）と常温養生（パターン17）の強度発現曲線を示す。この図から最高温度の継続時間を半分に大幅に短縮しても同等の強度発現を示したことが分かる。また、さらに前置時間を短縮（パターン11）してもその傾向は同じであり材齢3日以降若干強度増加も見られた。

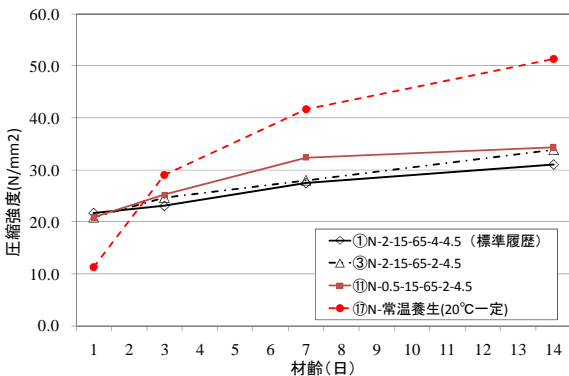


図-7 圧縮強度発現（最高温度継続時間が短い場合の前置時間の影響）

(6) 最高温度継続時間が短い場合の降温急冷の影響

図-8に標準蒸気養生履歴（パターン1）に対して最高温度継続時間を短縮し降温急冷した履歴（パターン4）と常温養生（パターン17）の強度発現曲線を示す。この図から材齢1日強度は大きく低下するがそれ以降の材齢

は逆に高い強度を示した。また、さらに前置時間を短縮（パターン12）しても同様の傾向を示した。

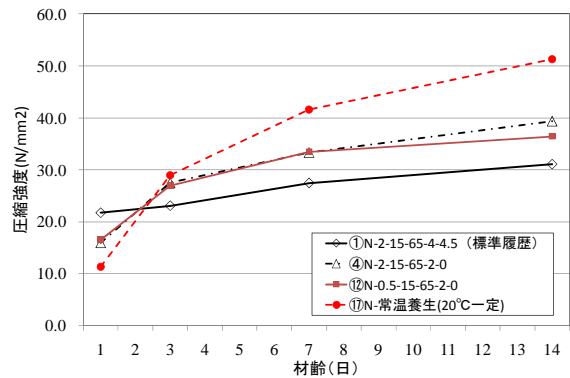


図-8 圧縮強度発現（最高温度継続時間が短い場合の降温速度の影響）

(7) 最高温度継続時間が短い場合の昇温急熱の影響

図-9に標準蒸気養生履歴（パターン1）に対して最高温度継続時間を短縮し昇温急熱の履歴（パターン7）と常温養生（パターン17）の強度発現曲線を示す。この図から昇温速度を上げて最高温度の継続時間を短縮した場合、材齢1日は若干強度低下するがそれ以降の材齢では標準蒸気養生履歴よりも高い強度を示した。また、さらに前置時間を短縮（パターン15）してもその傾向は同じであった。

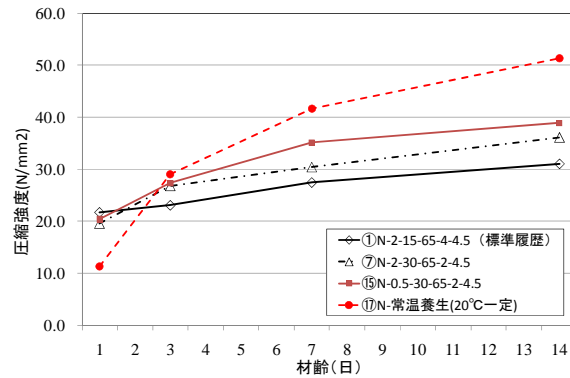


図-9 圧縮強度発現（最高温度継続時間が短い場合の昇温速度の影響）

(8) 最高温度継続時間が短い場合の昇温急熱と降温急冷の影響

図-10に標準蒸気養生履歴（パターン1）に対して最高温度継続時間を短縮し昇温急熱と降温急冷を同時に行った履歴（パターン8）と常温養生（パターン17）の強度発現曲線を示す。この図から材齢1日強度は大きく低下するが、それ以降の材齢では非常に高い強度を示した。また、さらに前置時間を短縮（パターン16）しても同様の傾向を示した。

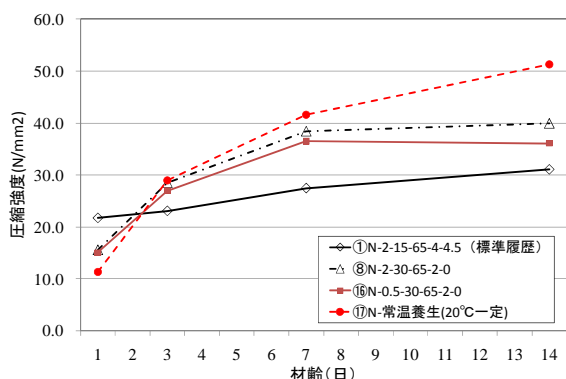


図-10 圧縮強度発現（最高温度継続時間が短い場合の昇温・降温速度の影響）

以上のことから蒸気養生履歴の影響は材齢1日強度に大きく影響するが3日以降では影響は少なく蒸気養生履歴の組合せにより大きく変化することもわかった。

### 3.2 出荷時強度に対する各材齢の強度増加率

図-11は、材齢14日（出荷時）圧縮強度を100%とした場合の各材齢での圧縮強度の増加率を各蒸気養生履歴毎に示したものである。この図より材齢1日（脱型時）強度は出荷時強度の約40~70%、材齢3日までに約40~80%、材齢7日までに約70~90%の強度発現しており蒸気養生が若材齢時の強度発現に大きく寄与していることがわかるが、各材齢の増加率は蒸気養生履歴により大きく影響を受けることもわかる。

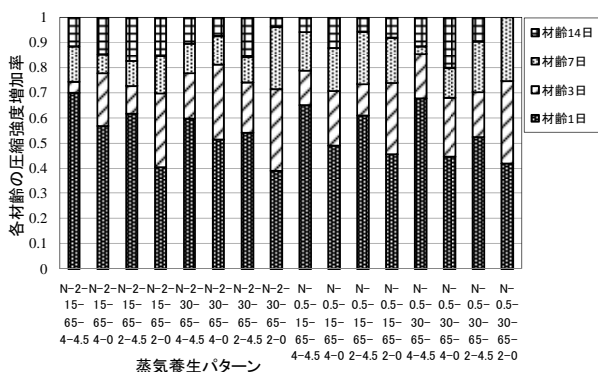


図-11 各材齢の強度増加率

### 3.3 標準蒸気養生履歴および常温養生に対する強度比

図-12は、各蒸気養生履歴の圧縮強度を標準蒸気養生履歴に対する強度比で示したものである。この図から材齢1日強度は、ほとんどの履歴パターンで標準蒸気養生履歴より低い強度を示すが、材齢3日以降の強度は標準蒸気養生履歴よりも高い強度を示していることがわかる。このことはJIS<sup>2)</sup>やコンクリート標準示方書<sup>3)</sup>で示されている標準蒸気養生履歴はPCa製品の出来型強度を満

足する最低の蒸気養生履歴である位置づけが改めて確認された。また、図-13は、各蒸気養生履歴の圧縮強度を常温養生に対する強度比で示したものである。この図から材齢1日強度は全ての履歴パターンで常温養生より高い強度を示すが、材齢3日以降の強度は常温養生よりも低い強度を示していることがわかる。この強度発現の傾向は、標準蒸気養生履歴に対する強度発現と全く逆の傾向を示しており蒸気養生を行う場合には、脱型強度に及ぼす蒸気養生履歴の影響を評価する指標が必要であることがわかる。

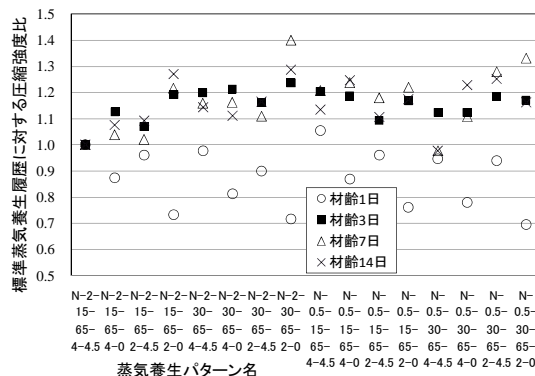


図-12 標準蒸気養生履歴に対する各蒸気養生履歴の強度比

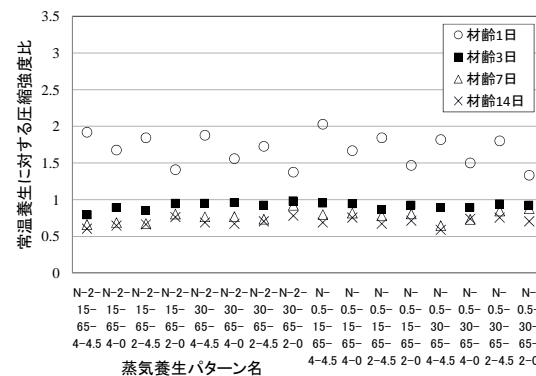


図-13 常温養生に対する各蒸気養生履歴の強度比

### 3.4 積算温度と圧縮強度

図-14は、圧縮試験材齢時の積算温度と圧縮強度の関係を示したもので、常温養生の強度発現もあわせて併記した。この図から積算温度が大きくなれば強度増になる傾向が見られるが、材齢1日とそれ以降の材齢では、積算と強度関係の傾向が異なる。これは前節でも示したように材齢1日は蒸気による積算温度（以下、蒸気積算温度と省略）に比例して強度発現していることを示しているがそれ以降の材齢では、蒸気養生の影響は小さいことを示している。また、常温養生との強度関係は、材齢1日では、蒸気養生履歴を受けた場合が強度が高いが、それ以降の材齢では、常温養生の場合が高い傾向を示した。なお積算温度は、基準温度を-10℃として算定した。



以上のことから、プレキャストコンクリートにおける蒸気養生は、材齢1日強度に対しては蒸気養生履歴の影響を直接受けるが、それ以降の材齢は蒸気養生履歴の影響は少ないと考えられる。蒸気養生は脱型時強度を向上させるための手段であると考えることが妥当である。

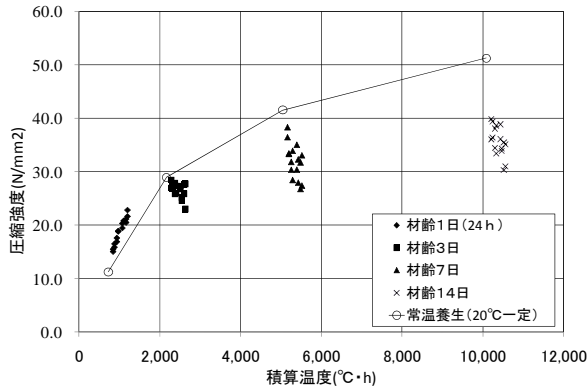


図-14 積算温度と圧縮強度の関係

### 3.5 蒸気積算温度による脱型強度の推定

前節までに蒸気養生履歴を受ける供試体は、脱型時強度に大きく影響することを示した。またPCa製品の合理的製造を行うためには、脱型材齢時の強度管理が最重要項目であることも示した。したがって、蒸気養生を受けるPCa製品の合理的工程管理を行うためには、蒸気養生履歴を加味した脱型時強度の推定を行う必要がある。

図-15は、蒸気積算温度と脱型時強度の関係を示したものである。さまざまな蒸気養生履歴を受けているにもかかわらず線形で示されることがわかる。特に、降温速度区間の影響は直接的に蒸気積算温度で評価できることもわかる。

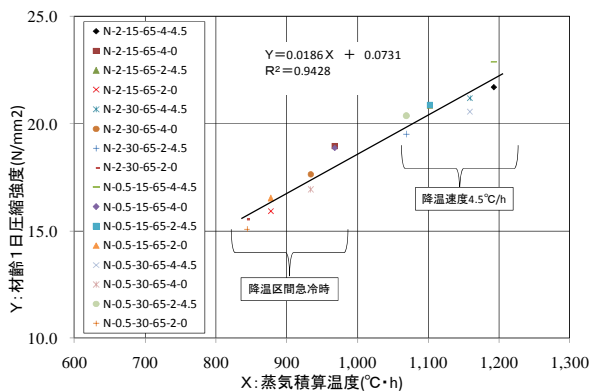


図-15 蒸気積算温度と脱型時強度の関係

## 4. まとめ

さまざまな蒸気養生履歴を受けるモルタル供試体の圧縮強度試験結果より、以下に示すことが分かった。

- (1)同一配合であっても異なる蒸気養生履歴を受けると強度発現は大きく異なる。
- (2)蒸気養生は主に若材齢時強度を促進させるが、それ以降の材齢での強度増加への寄与は少ない。
- (3)材齢1日強度(脱型強度)は、蒸気積算温度に比例する。したがって、蒸気積算温度は脱型強度推定の指標として有効である。
- (4)蒸気養生履歴を受ける供試体は、材齢1日において常温養生(常温20°C一定)と比べ高くなる。

## 参考文献

- 1) 日本規格協会：JIS A5302-1979 (第五回改正) 鉄筋コンクリート管
- 2) たとえば、日本規格協会：JIS A5302-1974 鉄筋コンクリート管
- 3) 土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書施工編 特殊コンクリート第14章工場製品 14.5.5 養生【解説】(2)，2008.3
- 4) 日本規格協会：分野別認証指針 JIS Q1012 プレキャストコンクリート製品
- 5) 群道夫，井上肇，水野弘：蒸気養生時間と養生温度の変化がコンクリートの圧縮強度におよぼす影響，セメント技術年報告 XV，昭和36年
- 6) 木村敬三，秋浜繁幸，穴戸良雄：蒸気養生コンクリートの実験研究(その1) -前置時間，蒸気養生時間，温度上昇速度がコンクリートに与える影響について-，建築学会論文報告集，号外，昭和41年10月
- 7) セメント協会 F-53，蒸気養生条件がコンクリートの強度発現に及ぼす影響，コンクリート専門委員会報告，2006.3
- 8) 細田暁，藤原浩一，青木千里：高炉スラグ微粉末含有コンクリートの力学的特性に対する微視的温度応力の影響，土木学会論文集 E，Vol.63，No.4，pp549-561，2007.10
- 9) Kiyoshi Asaga et al：Effect of curing temperature on the hydration of Portland cement compounds,9th international congress on the chemistry of cement,pp181-187,1992
- 10) L.E.Copeland and D.L., Kantro：Principal Paper Hydration of Portland Cement, International Congress on the Chemistry of Cement in Tokyo,pp387-421,1956