

プレキャストコンクリートの DEF抑制対策に向けた蒸気養生実験

櫻庭浩樹・古賀裕久・井上幸一

1. はじめに

工場で製造されるプレキャスト製品は、天候の影響を受けにくく、安定した作業環境で製造できることなどから、生産性の向上や構造物の長寿命化に資するものとして期待されている。ただし、現状の技術規準類は主に現場打ちコンクリートに関する知見や経験に基づき整備されており、プレキャスト特有の配慮事項については、必ずしも明確でない点がある。

プレキャスト製品は、常圧蒸気養生（以下「蒸気養生」という。）を用いて製造されるものが多いが、その際の温度管理が適切でないと養生中のコンクリート温度が高くなり、遅延エトリンガイト生成（Delayed Ettringite Formation、以下「DEF」という。）によって劣化するおそれがある¹⁾。

蒸気養生に関しては、雰囲気温度（対象物周囲の空気の温度）の昇温速度および最高温度等が道路橋示方書コンクリート橋・コンクリート部材編等に規定されている。また、蒸気吹出口付近で局所的に高温になることなどに対する一般的な留意点はコンクリート標準示方書[施工編]に示されている²⁾。しかし、蒸気養生中の雰囲気温度を管理する方法や蒸気吹出口付近での局所的な高温の影響を避ける方法などについて具体的には示されていない。

以上のような背景から、蒸気養生設備の実態調査および実際の製造を再現した条件で蒸気養生実験を行ってDEFを抑制するための温度管理に関する留意点を検討した。

2. DEFの概要

DEFは、硬化後のコンクリートにおいてエトリンガイトが生じて膨張し、コンクリートにひび割れが生じる劣化である。DEFによって劣化した側溝の事例¹⁾を写真-1に示す。

エトリンガイトは、コンクリートの硬化過程で生成される物質であり、特殊なものではない。また、コンクリートが十分硬化する前にエトリンガイトが生成しても、変状の原因とはならない。しかし、養生中にコン

クリートの内部が高温になると水和反応で生成されたエトリンガイトが分解されるおそれがある。分解されたエトリンガイトは、コンクリートが硬化した後の水分供給等の条件によっては、再生成して膨張する場合がある。このため、「遅延」エトリンガイト生成と呼ばれている。

コンクリートが十分硬化した後にエトリンガイトが生成すると、その膨張圧で周囲の組織を破壊する。この際の膨張量は、膨張性という点で類似した劣化であるアルカリシリカ反応による膨張量よりも大きいことが知られており、DEFが発生すると深刻な劣化状態に至ることが懸念される。

ただし、ひび割れが生じるほどの顕著な膨張に至るのは、コンクリート温度が70℃以上の履歴を受けた場合とされている³⁾。このため、コンクリート温度を適切に制御すればDEFによる劣化を抑制できると考えられる。



写真-1 DEFによって劣化した側溝の事例¹⁾

3. 蒸気養生設備の実態調査

蒸気養生設備の実態を把握するため、道路用プレキャストコンクリート製品などを製造している約90社の工場に対して書面調査を行った。

蒸気養生設備の種類（図-1）は、専用設備（区画）がある場合とシート養生の場合があるため、これらを区別して調査した。調査項目は、1) 蒸気吹出口の設置状況、2) 蒸気吹出口から型枠までの距離、3) 雰囲気温度の測定位置、の3項目とした。なお、調査の結果、蒸気養生の専用設備（区画）について39件、シート養生について30件の回答があった。

蒸気養生の専用設備（区画）がある場合の蒸気吹出口の配置例を図-2に示す。蒸気吹出口が1箇所の場合と蒸気が分散して吹き出す仕様の場合があった。蒸気吹出口から型枠までの距離は、200mm以上確保している場合が90%以上であった。雰囲気温度の測定位置を図-3 a)に示す。図中の括弧内の数値は回答件数である。雰囲気温度の測定位置は、合計7種類、奥壁中央部で測定する場合が最も多かった。

シート養生の場合の蒸気吹出口の設置位置は、型枠外側に設置する場合と型枠内側に設置する場合があり（図-3 b)）、前者の方が多かった。蒸気吹出口の仕様については、蒸気養生の専用設備（区画）がある場合と同様に、蒸気吹出口が1箇所（蒸気ホース筒先から吹出し）の場合と蒸気が分散して吹き出す仕様の場合があった。蒸気吹出口から型枠までの距離は、200mm以上確保している場合が80%以上であった。雰囲気温度の測定位置を図-3 b)に示す。図中の括弧内の数値は回答件数である。雰囲気温度の測定位置は、合計6種類、型枠外側の側面中央部で測定する場合が最も多かった。

以上の調査結果を踏まえ、雰囲気温度の測定位置の違いの影響および蒸気吹出口から型枠までの距離が及ぼす影響を実験で確認することとした。

4. 蒸気養生実験の方法

4.1 概要

前章の調査結果を踏まえて、プレキャスト工場において、蒸気養生中の雰囲気温度およびコンクリート温度に関する実験を行った。

試験体はボックスカルバートとし、設計基準強度 40N/mm^2 、内空 1300mm および内空 1500mm のものを用了。ボックスカルバートの数量は、実際の製造を想定し、蒸気養生設備の容量に入る最大の2体とした。

4.2 蒸気養生設備の仕様と試験体配置

専用設備の仕様とボックスカルバート試験体の配置を図-4、設備の正面写真を写真-2に示す。なお、型枠は、ボックスカルバートを縦にした形状である。

この設備は、テント状の折り畳み式のものであるが、設備の構造上はシート養生に近いものであるため、シート養生を想定した温度の測定も行った。

蒸気吹出口は、各ボックスカルバート試験体の両脇に配置した。蒸気吹出口は、蒸気が分散して吹き出すように、50mmピッチの直径10mmの穴を配置したも

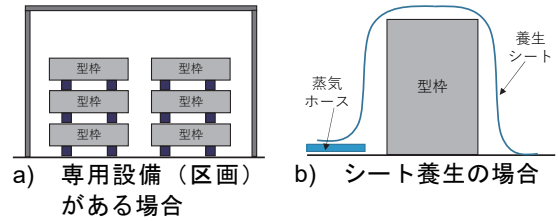


図-1 蒸気養生設備の種類

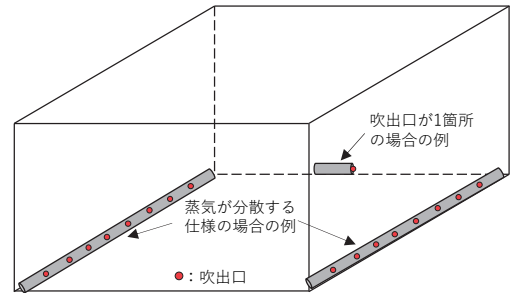
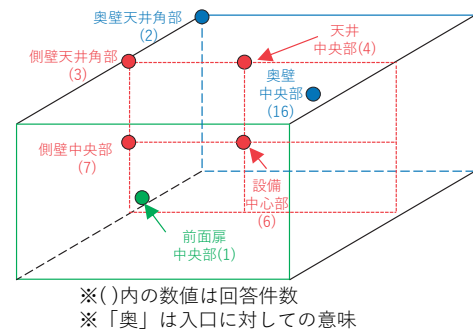
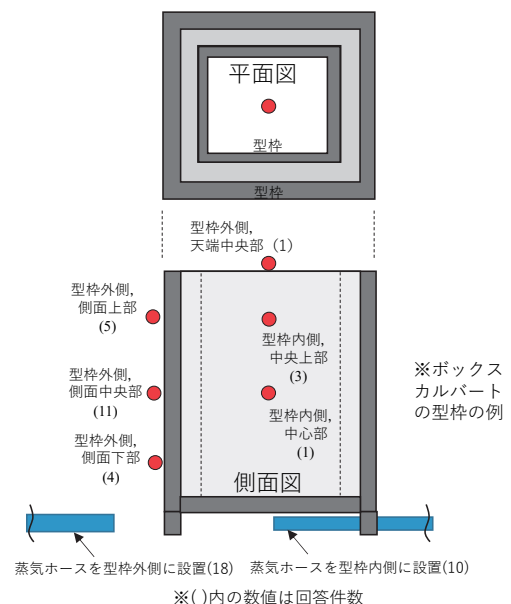


図-2 蒸気養生設備における蒸気吹出口の配置例



a) 蒸気養生の専用設備（区画）がある場合



b) シート養生の場合

図-3 雰囲気温度の測定位置

のである。この工場の通常の製造では蒸気吹出口から型枠までの距離を400～500mm確保しているが、本実験では、図-4に示すように、0mm（型枠に接触）、

100mm、300mm、500mmの4種類とし、蒸気吹出口から型枠までの距離がコンクリート温度に及ぼす影響を確認した。

4.3 温度の測定位置と蒸気養生条件

雰囲気温度の測定位置は、図-3a)の7種類に床面中央を加えた8箇所および図-4の奥側に配置したボックスカルバート試験体近傍の4箇所（図-5）、合計12箇所とした。なお、このうち左側側壁中央部付近で測定した雰囲気温度から蒸気を制御した。

ボックスカルバート試験体のコンクリート温度の測定位置を図-6に示す。コンクリート温度は、各試験体の蒸気吹出口に面している部位に熱電対を配置して測定した。熱電対を配置した断面は、試験体中央部と試験体下部であり、後者は蒸気吹出口の位置に対応させた。また、熱電対の位置は、試験体の表面から30mmとした。

蒸気養生条件は、前置き3h以上、昇温速度15℃/h、最高温度65℃、最高温度保持時間5hとした。なお、65℃は蒸気養生に関する技術基準等での雰囲気温度の一般的な上限値であり、実験目的から通常実施している温度（45℃）よりも高く設定した。

5. 蒸気養生実験の結果と考察

雰囲気温度の測定結果を図-7に示す。蒸気吹出口よりも低い位置である床面中央部を除き、雰囲気温度に大きな差異は確認されなかった。床面付近では蒸気の供給が少なかったと推察される。蒸気養生設備の高さの中央またはこれよりも高い位置で雰囲気温度を測定すれば、養生設備内の代表値を測定できると考えられる。

ボックスカルバート試験体のコンクリート温度の測定結果を図-8に示す。図-6に示す中央部の表面から30mm位置での測定（図-8a）では、蒸気吹出口から型枠までの距離によらず、同程度の結果を示した。図-6に示す下部の表面から30mm位置での測定（図-8b）では、蒸気吹出口から型枠までの距離が0mmおよび100mmの場合、特に雰囲気温度の昇温中に、コンクリート温度が高い結果を示した。一方、蒸気吹出口から型枠までの距離が300mmおよび500mmの場合は、図-8a)の中央部での測定結果と同程度であった。

以上から、本実験のように、蒸気が分散して吹き出す仕様の場合には、蒸気吹出口から型枠までの距離を300mm以上確保すれば、蒸気吹出口近傍のコンクリート温度が局所的に高くなることを防止できると考えられる。

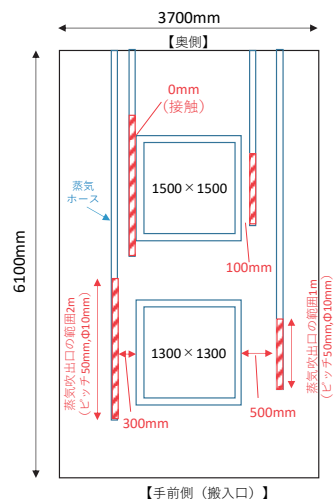


図-4 蒸気養生設備の仕様と試験体の配置



写真-2 蒸気養生設備の正面写真

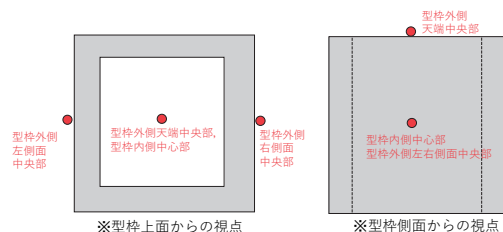


図-5 試験体近傍の雰囲気温度測定位置

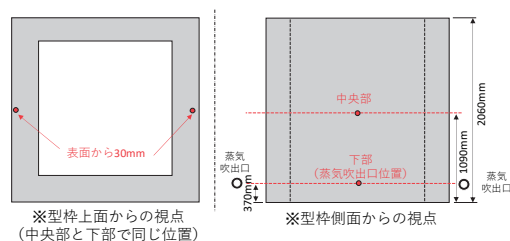


図-6 試験体のコンクリート温度測定位置

ボックスカルバート試験体のコンクリート温度の昇温速度を図-9に示す。昇温速度は、30分間ごとのコンクリート温度の増減から求めた。蒸気吹出口から型枠までの距離0mmおよび100mmの場合は、300mmおよび500mmの場合と比べて昇温速度が大きく、かつ、早くピークに到達することが確認できる。これらの結果からも、蒸気吹出口から型枠までの距離を適切に確保することが重要と考えられる。

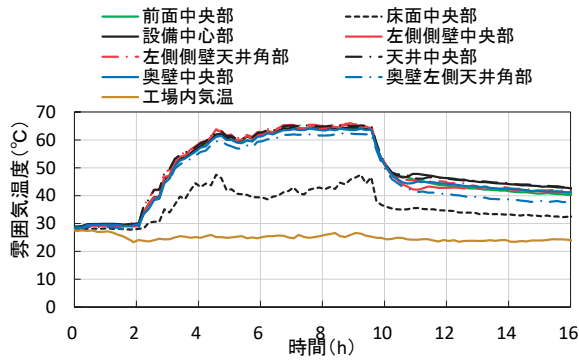
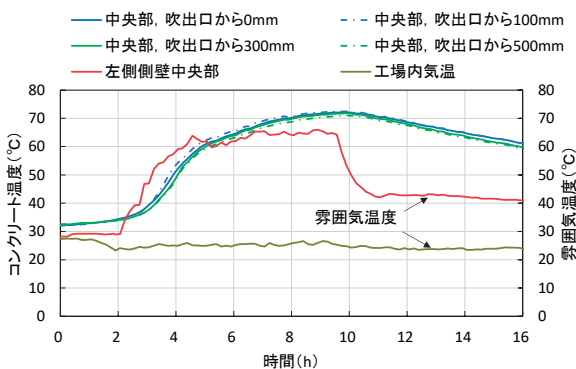
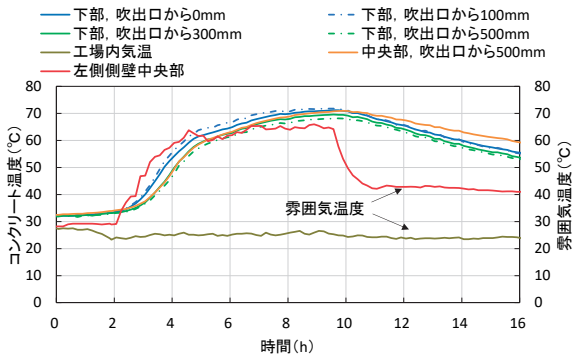


図-7 蒸気養生設備における雰囲気温度

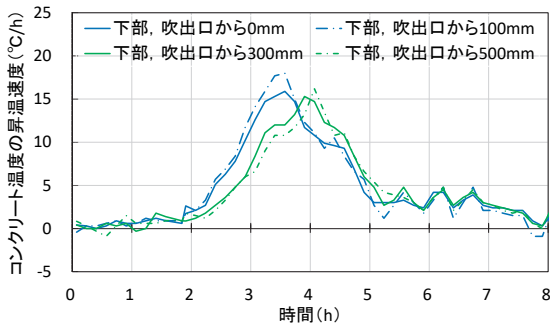


a) 中央部での測定結果 (表面から 30mm)



b) 下部での測定結果 (表面から 30mm 位置)

図-8 ボックスカルバート試験体のコンクリート温度

図-9 ボックスカルバート試験体のコンクリート
昇温速度 (表面から30mm位置)

6. まとめ

本研究で得られた知見を示す。

- 1) 蒸気養生設備には、専用設備がある場合とシート養生の場合があり、これらについて実態を調査した。共通する事項として、蒸気吹出口には、吹出口が1箇所の場合と蒸気が分散して吹き出す仕様の場合があった。また、蒸気を制御するための雰囲気温度の測定位置および蒸気吹出口から型枠までの距離は、工場によって異なることを確認した。
- 2) 今回の実験では、蒸気養生設備の雰囲気温度は、蒸気吹出口よりも高い位置（設備の高さの中央またはこれよりも高い場合）での測定値であれば、位置や高さの影響は顕著ではなく設備内の代表値とみなせることを確認した。
- 3) 同実験では、蒸気吹出口から型枠までの距離を100mm以下とした場合には局所的なコンクリート温度の上昇が認められた。一方、300mm以上とした場合には、局所的なコンクリート温度の上昇は認められなかった。

本稿では紹介できなかったが、この他にも異なる製造状況で蒸気養生中の温度についてデータを取得しており、今後、これらの結果を実工場においてDEFを抑制するための蒸気養生中の温度管理方法としてとりまとめる予定である。なお、本研究は、(国研) 土木研究所と(一社) 道路プレキャストコンクリート製品技術協会とで実施した共同研究の成果の一部である。

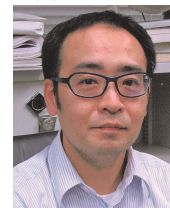
参考文献

- 1) 藤兼雅和、中原浩慈、仲村哲男：エトリングaitの遅延生成 (DEF) によるコンクリート製品の劣化に関する報告、土木技術資料、第51巻、第11号、pp.38~41、2009
- 2) 土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書【施工編】、pp.366~367、2017
- 3) (公社) 日本コンクリート工学会：マスコンクリートのひび割れ制御指針2016、pp.20~25、133~136、2016

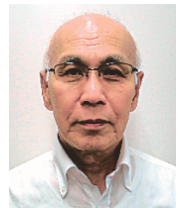
櫻庭浩樹

土木研究所先端材料
資源研究センター材
料資源研究グループ
主任研究員、博士(工
学)
Dr. SAKURABA Hiroki

古賀裕久

土木研究所先端材料
資源研究センター材
料資源研究グループ
上席研究員、博士(工
学)
Dr. KOGA Hirohisa

井上幸一

道路プレキャストコ
ンクリート製品技術
協会 技術委員会
指針部会長
INOUE Koichi