

道路土工構造物ボックスカルバート用
プレキャストコンクリート製品の
継手構造及び耐久性評価に関する
共同研究報告書(Ⅱ)

—蒸気養生中の温度管理やコンクリート表面の気泡跡が
物質透過抵抗性に及ぼす影響—

令和4年5月

国立研究開発法人土木研究所
一般社団法人道路プレキャストコンクリート
製品技術協会

Copyright © (2022) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、国立研究開発法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、この報告書の全部又は一部の転載、複製は、国立研究開発法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

道路土工構造物ボックスカルバート用 プレキャストコンクリート製品の 継手構造及び耐久性評価に関する 共同研究報告書(Ⅱ)

—蒸気養生中の温度管理やコンクリート表面の気泡跡が
物質透過抵抗性に及ぼす影響—

国立研究開発法人土木研究所
先端材料資源研究センター
材料資源研究グループ

グループ長 渡辺 博志
(～2019年3月)

グループ長 西崎 到
上席研究員 古賀 裕久
主任研究員 中村 英佑
(～2019年6月)

主任研究員 櫻庭 浩樹

一般社団法人道路プレキャストコンクリート製品技術協会

指針部会長 井上 幸一
カルバート工分科会長 高松 芳徳
擁壁工分科会長 吉田 辰也
コンクリート分科会長 横塚 泰弘

要 旨

近年、コンクリート構造物の建設における生産性向上が重要な課題となっており、プレキャスト製品のさらなる活用が期待されている。しかし、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。本研究では、プレキャスト特有の事項として、蒸気養生とコンクリート表面の気泡跡に着目して検討を行った。蒸気養生に関する検討では、従来型と大型断面プレキャスト製品を想定した実験を行い、局所的な高温を避けるための配慮事項や部材厚さ等の製造条件がコンクリート温度に及ぼす影響を検討した。気泡跡に関する検討では、実大のプレキャスト製品を用いて気泡跡が物質透過抵抗性に及ぼす影響を検討した。前者の検討結果をまとめて、第Ⅱ部「プレキャスト工場における蒸気養生時の留意点の提案」を示した。

キーワード：プレキャスト、蒸気養生、温度管理、気泡跡、物質透過抵抗性

第Ⅰ部 蒸気養生中の温度管理やコンクリート表面の気泡跡が物質透過抵抗性に及ぼす影響の検討

1	はじめに.....	2
1.1	背景と目的.....	2
1.2	本報告書の構成.....	4
2	蒸気養生中の温度管理方法の検討.....	5
2.1	概要.....	5
2.2	蒸気養生設備の実態調査.....	5
2.2.1	調査方法.....	5
2.2.2	調査結果.....	6
2.3	従来型PCa製品を想定した蒸気養生実験.....	8
2.3.1	蒸気養生実験の方法.....	8
2.3.2	蒸気養生実験の結果と考察.....	12
2.3.3	まとめ.....	16
2.4	大断面PCa製品を想定した蒸気養生実験.....	17
2.4.1	蒸気養生実験の方法.....	17
2.4.2	蒸気養生実験の結果と考察.....	19
2.4.3	温度管理に留意が必要な製造条件の検討.....	21
2.4.4	まとめ.....	27
3	コンクリート表面の気泡跡が物質透過抵抗性に及ぼす影響の検討.....	28
3.1	概要.....	28
3.2	コンクリート表面の気泡跡に関する実験方法.....	28
3.2.1	ボックスカルバート試験体.....	28
3.2.2	コンクリート表面の気泡跡の発生状況.....	29
3.2.3	物質透過抵抗性試験.....	29
3.3	物質透過抵抗性試験の結果と考察.....	31
3.4	まとめ.....	33
4	まとめ.....	34
	参考文献.....	36
第Ⅱ部	プレキャスト工場における蒸気養生時の留意点の提案.....	38
参考資料	コンクリート表面の気泡跡が物質透過抵抗性に及ぼす影響の試験方法（案）.....	43

第 I 部

蒸気養生中の温度管理やコンクリート表面の気泡跡が
物質透過抵抗性に及ぼす影響の検討

1 はじめに

1.1 背景と目的

建設業の技能労働者は、今後、大幅に減少することが予測されている。例えば、2014年度を基準とすると、技能労働者343万人の内、2025年度までに50歳以上の技能労働者が109万人離職するとの報告もある¹⁾。このような社会情勢を踏まえて、国土交通省では、2015年からi-Constructionと呼ばれる施策を行っている。i-Constructionでは、「ICTの全面的な活用（ICT土工）」、「全体最適の導入（コンクリート工の規格の標準化等）」、「施工時期の平準化」の3つのトップランナー施策を掲げ、建設業全体で生産性を向上させることを目指している²⁾。

トップランナー施策の対象であるコンクリート工は、30年以上前から生産性が横ばいであることが指摘されていた³⁾。このため、現場打ちコンクリートについては、流動性を高めたコンクリート⁴⁾や機械式定着工法⁵⁾等に関するガイドラインが整備され、これらの技術の導入促進が図られた⁶⁾。

一方、工場等で製作したプレキャストコンクリート（以下、PCaと称す）部材を用いて構造物を構築するPCa工法は、現場での作業を省力化でき、また、天候等の影響を受けずに高品質な部材を製造できると期待されることから、生産性向上の一手法として関心が高まっている。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。本研究では、プレキャスト特有の事項として、常圧蒸気養生（以下、蒸気養生）とコンクリート表面の気泡跡に着目して検討を行った。

蒸気養生について

プレキャスト製品は、蒸気養生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コンクリート温度が高くなり、遅延エトリンガイト生成（以下、DEF）を誘発するおそれがある⁷⁾。DEFによって劣化した側溝の事例⁸⁾を図1-1に示す。



図 1-1 DEFによって劣化した側溝の事例⁸⁾

蒸気養生に関しては、雰囲気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⁹⁾。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。また、近年では、大断面のプレキャストコンクリート部材を現地で接合して構造物を構築する事例も増えている。部材が厚くなるとマスコンクリートとしての取扱いが必要となり、水和熱によるコンクリート温度の上昇も懸念される。

蒸気養生を用いてプレキャストコンクリート部材を製造する際の温度管理は、プレキャストメーカーが個々に実施している状況であり、DEF に対する配慮の適切さを受発注者間で確認する方法は明確になっていない。信頼性のある温度管理を行うためには、プレキャスト工場の蒸気養生設備の実態を踏まえて、温度管理に関する留意点を検討する必要があると考えられる。

コンクリート表面の気泡跡について

振動締固めを行う一般的なコンクリートの施工では、締固めによって巻き込まれた余剰な空気を除去するが、型枠に接した面にある程度の気泡が残存して、硬化後に気泡跡(図 1-2)が見られることは珍しくない。また、気泡を取り除くために過剰な締固めを行うと、骨材とペースト分が分離することや、耐凍害性確保のために導入している微少な気泡も損なわれるなどの悪影響が生じることが懸念される。したがって、現場打ちコンクリートの場合は、特に景観や美観についての配慮を求められる構造物でなければ、コンクリート表面の気泡跡が問題視されることは多くない。

これに対し、プレキャストコンクリートの場合は製品としてコンクリートが硬化した状態で納品されるため、景観や美観への配慮を求めない用途の場合でも、製品表面の気泡跡の補修が求められ、生産性向上効果を損なっているとの指摘がある。

一方、締固め不足などで、コンクリートに豆板などの表面変状が生じることは、物質透過抵抗性への影響が懸念されることから認められない。気泡跡と締固め不足による軽微な豆板は、外観上は類似している点があること、判定基準が定まっていないことが課題である。このことから、製造上生じ得る気泡跡の程度を把握した上で、気泡跡が物質透過抵抗性に及ぼす影響を検討する必要があると考えられる。

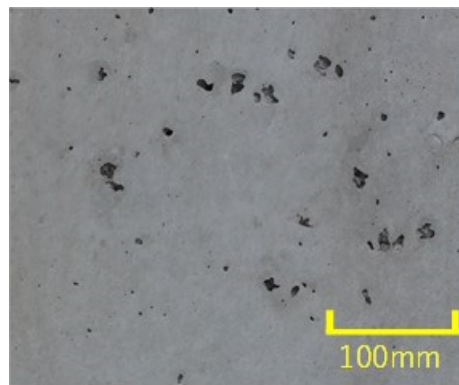


図 1-2 コンクリート表面の気泡跡の発生状況例

1.2 本報告書の構成

本報告書は、図-1-3 に示すとおり 2 部構成とした。

第 I 部は、4 章で構成した。第 2 章では、蒸気養生中の温度管理方法を検討するため、蒸気養生設備の実態調査、従来型および大断面 PCa 製品を想定した蒸気養生実験を行った結果を示した。第 3 章では、コンクリート表面の気泡跡が物質透過抵抗性に及ぼす影響を検討するため、実大の PCa 製品を用いて中性化および塩分浸透について実験した結果を示した。最後に、第 4 章では、第 2 章と第 3 章で得られた知見をまとめた。

第 II 部は、第 I 部第 2 章での検討結果を踏まえ、プレキャスト工場における蒸気養生時の留意点を提案した。

また、参考資料として、第 I 部第 3 章での検討結果を踏まえ、コンクリート表面の気泡跡が物質透過抵抗性に及ぼす影響の試験方法（案）を示した。

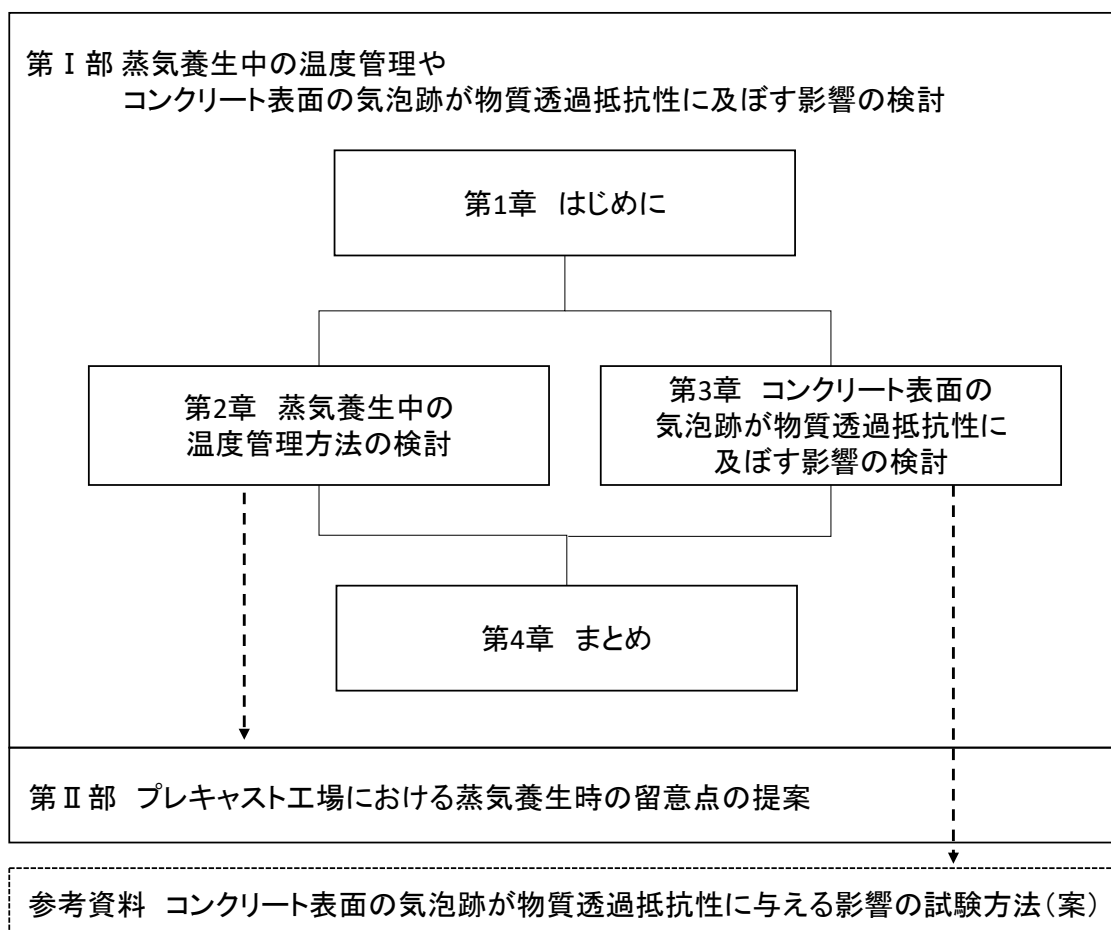


図 1-3 本報告書の構成

2 蒸気養生中の温度管理方法の検討

2.1 概要

DEF は、硬化後のコンクリート中で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。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針状の結晶で膨張性があるが、コンクリート中に通常存在するもので特別なものではない。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。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¹⁰⁾。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。

本章では、蒸気養生中の温度管理に関する留意点を検討するため、蒸気養生設備の実態を調査した上で、実際の製造を再現した蒸気養生実験を行った。まず、2.2 では、蒸気養生設備の実態に関して書面調査を行った結果を示す。2.3 では、水和熱の影響が少なく外部からの熱の供給の影響が大きい場合を想定し、従来型 PCa 製品を対象とした蒸気養生実験を行い、蒸気養生設備内の雰囲気温度の分布や蒸気吹出口から型枠までの距離の影響などについて検討した結果を示す。最後に、2.4 では、PCa 製品そのものの水和熱の影響が大きい場合を想定し、大断面のプレキャストコンクリートを対象としてコンクリート温度の上昇度合いを検討した結果を示す。

2.2 蒸気養生設備の実態調査

2.2.1 調査方法

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 2-1 は、蒸気養生の専用設備(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。なお、ヒューム管やパイルなど遠心成形により製造される製品は対象外とした。

調査項目は、1) 専用設備(区画)の寸法あるいはシートの覆い方、2) 蒸気吹出口の設置状況、3) 蒸気吹出口から型枠までの距離、4) 雰囲気温度の測定位置、の 4 項目とした。

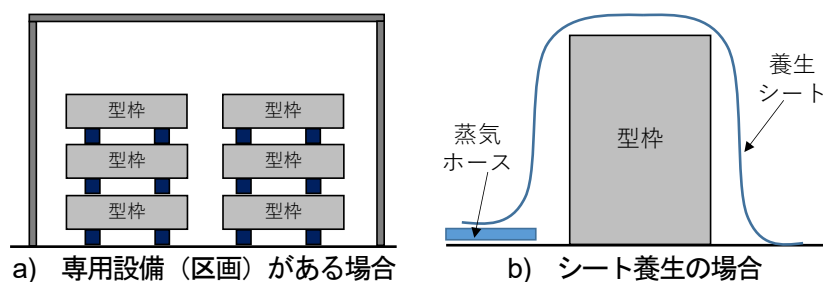


図 2-1 蒸気養生設備の種類

2.2.2 調査結果

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。

(1) 蒸気養生の専用設備(区画)の場合

蒸気養生の専用設備(区画)の寸法を図2-2に示す。寸法は、幅2~4m、奥行10mまでの範囲が多かった。蒸気養生設備における蒸気吹出口の配置例を図2-3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。図2-2に示すとおり、1箇所の場合は比較的寸法が小さい設備であった。蒸気吹出口から型枠までの距離を図2-4に示す。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ほとんどであった。

雰囲気温度の測定位置を図2-5 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。

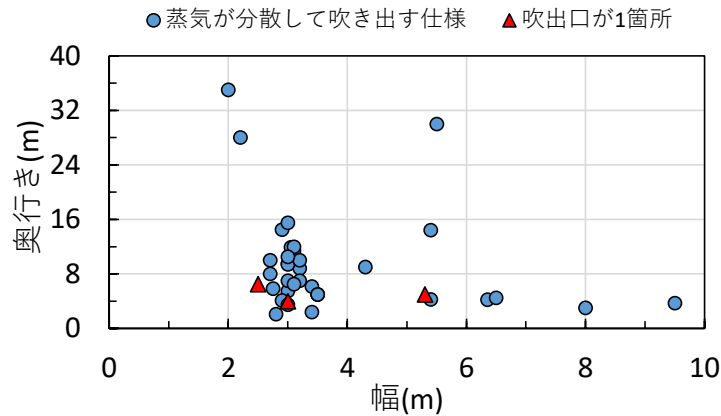


図2-2 蒸気養生の専用設備(区画)の寸法

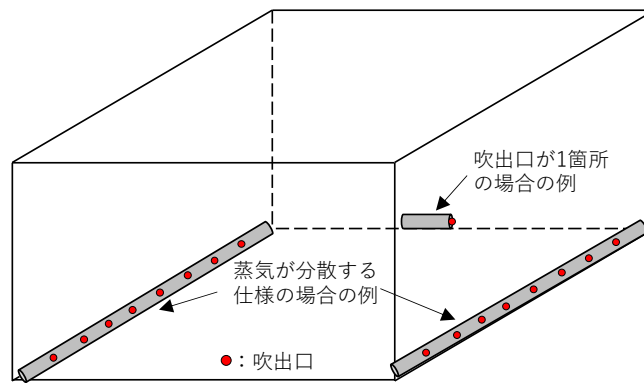


図2-3 蒸気養生設備における蒸気吹出口の配置例

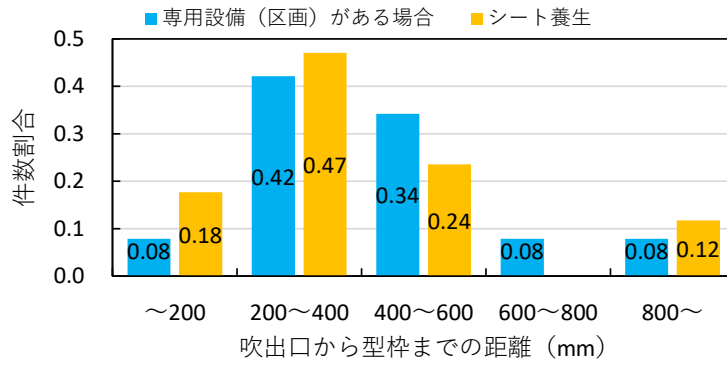
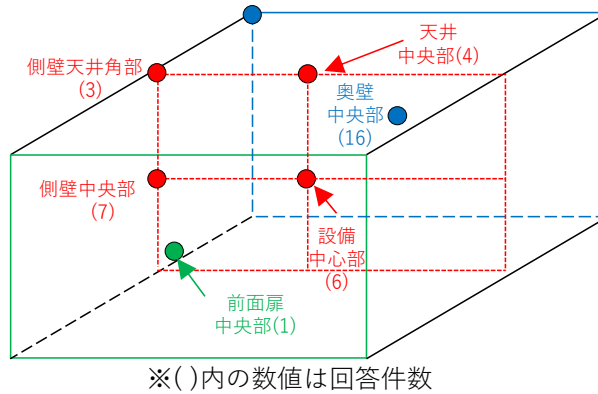
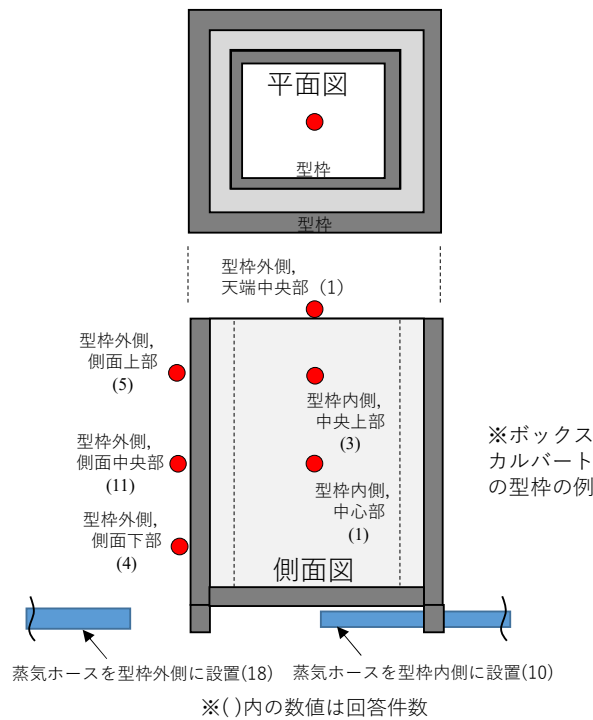


図 2-4 蒸気吹出口から型枠までの距離



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 2-5 雰囲気温度の測定位置

(2) シート養生の場合

養生シートの覆い方については、各工場で大きな違いは確認されなかった。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 2-5 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)の場合と同様に、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を図 2-4 に示す。蒸気吹出口から型枠までの距離は、蒸気養生の専用設備(区画)がある場合と同様に、200mm 以上確保している場合がほとんどであった。

雰囲気温度の測定位置を図 2-5 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している場合が最も多かった。

(3) まとめ

実態調査の結果、蒸気吹出口の仕様として、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。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。

2.3 従来型 PCa 製品を想定した蒸気養生実験

2.3.1 蒸気養生実験の方法

2.2 の調査結果を踏まえて、蒸気養生の専用設備(区画)がある 2 箇所の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。これらの実験では、フリュームまたはボックスカルバート製造時の条件を再現した。後者については、シート養生を行う際の雰囲気温度の測定位置も想定して実験した。

(1) 試験体

コンクリートの配合、フレッシュ性状および圧縮強度を表 2-1 に示す。

フリュームは、内高 300mm×内幅 300mm×長さ 2000mm (版厚 45mm) のものを用いた。フリュームの型枠は、底版が上(逆 U 字型)になっており、底版面からコンクリートを打ち込んで試験体を製造した。フリュームの数量は、実際の製造を想定し、専用設備の容量に入る最大の 32 体とした。

ボックスカルバートは、内高 1300mm×内幅 1300mm×長さ 2000mm (頂版厚 140mm、側版厚 130mm) および内高 1500mm×内幅 1500mm×長さ 2000mm (頂版厚 160mm、側版厚 140mm) のものを用いた。ボックスカルバートの型枠は、ボックスカルバートを縦にした形状のもので、コンクリートを縦に打ち込んで試験体を製造した。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。なお、コンクリート温度を測定する際には、版厚 140mm の面を測定対象とした。

表 2-1 コンクリートの配合、フレッシュ性状および圧縮強度

試験体の種類	W/B(%)	単位量 (kg/m ³)				スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度(°C)	圧縮強度*** (N/mm ²)
		W	B	S	G				
フリューム	48.0	160	334*	795	1149	10.0	4.2	15.0	37.1(47.6)
ボックスカルバート	38.2	180	470**	693	1001	21.5	0.8	31.0	44.0(62.8)

*普通ポルトランドセメントのみ、**普通ポルトランドセメントに膨張材 20kg/m³を加えた量、***試験体と同一養生で材齢 14 日の結果、括弧内の数値は 20°C 水中養生(蒸気養生無し)で材齢 28 日の結果

(2) 蒸気吹出口が1箇所の場合

a) 蒸気養生設備の仕様と試験体配置

蒸気養生設備の仕様とフリーム試験体の配置を図 2-6、蒸気養生設備の正面写真を図 2-7 に示す。蒸気養生設備の寸法は、幅 5300mm、高さ 3400mm、奥行き 5000mm である。蒸気養生設備は、断熱材を含む壁で囲まれた常設のものである。蒸気吹出口は1箇所、奥壁の左隅から 2000mm の位置に設置されている。蒸気の吹出方向は、図 2-6 に示す右側方向である。

フリームの型枠は、図 2-6 に示す各位置で4段に重ねた。蒸気吹出口から最も近い位置の型枠までの距離は 700mm 程度である。

b) 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 2-5 a) の7種類に床面中央部を加え、側壁中央については左側側壁と右側側壁の両方で測定して、合計9箇所とした。床面中央部は、蒸気吹出口とほぼ同じ高さとした。なお、この専用設備では、左側側壁中央の位置で測定した雰囲気温度を用いて蒸気を制御している。

フリーム試験体のコンクリート温度の測定位置を図 2-8 に示す。コンクリート温度は、合計 16 体の試験体 (A1~A4、B1~B4、C1~C4、D1~D4) を測定対象とし、各試験体に1個の熱電対を配置して測定した。熱電対の位置は、底板内部の中心とした。

蒸気養生条件は、前置き 3h 以上、昇温速度 20°C/h、最高温度 60°C、最高温度保持時間 5h とした。なお、実験目的から、最高温度は通常の製造時の温度 (50°C) よりも高く設定した。

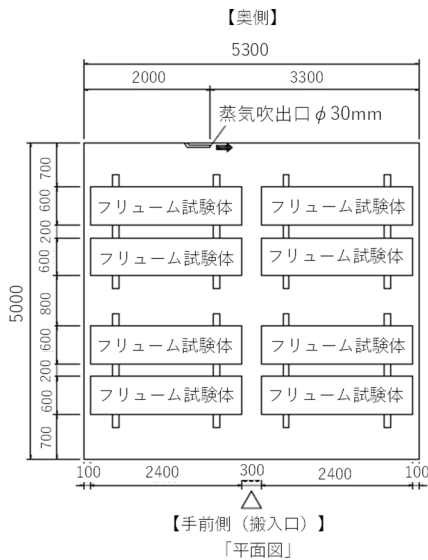


図 2-6 蒸気養生設備の仕様とフリーム試験体の配置 (単位 : mm)



図 2-7 フリーム試験体を用いた実験における蒸気養生設備の正面写真

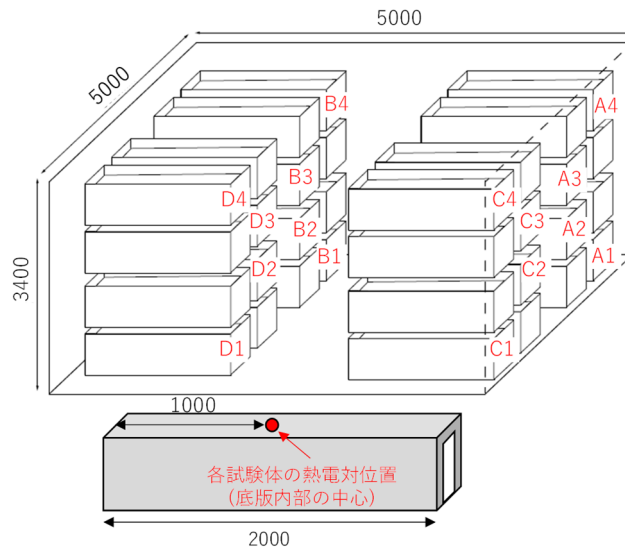


図 2-8 フリュウム試験体のコンクリート温度測定位置 (単位 : mm)

(3) 蒸気が分散して吹き出す仕様の場合

a) 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 2-9、蒸気養生設備の正面写真を図 2-10 に示す。蒸気養生設備の寸法は、幅 3700mm、高さ 4100mm、奥行き 6100mm である。また、この設備は、テント状の折り畳み式のものであり、今回の調査では専用設備に分類されているものの、設備の構造上はシート養生に近いものである。

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、蒸気ホースの先端 1000mm または 2000mm の範囲に、50mm ピッチの直径 10mm の穴を配置したものである。蒸気吹出口から型枠までの距離は、通常の製造では 400~500mm 確保しているが、本実験では、図 2-9 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。

b) 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 2-5 a) の 7 種類に床面中央を加えた 8 箇所および図 2-9 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 2-11)、合計 12 箇所とした。ボックスカルバート試験体近傍での測定は、シート養生を想定したものである。床面中央部は、蒸気吹出口より低い位置とした。なお、この設備では、左側側壁中央付近で測定した雰囲気温度を用いて蒸気を制御している。

ボックスカルバート試験体のコンクリート温度の測定位置を図 2-12 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°C/h、最高温度 65°C、最高温度保持時間 5h とした。なお、実験目的から、最高温度は通常の製造時の温度 (45°C) よりも高く設定した。

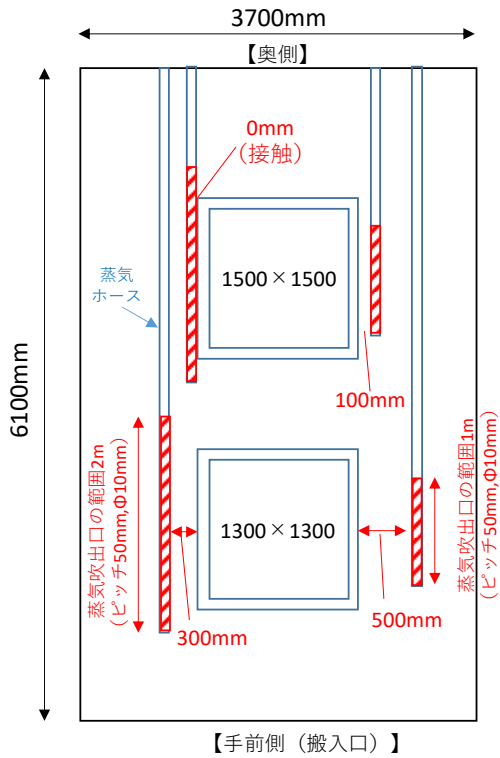


図 2-9 蒸気養生設備の仕様と試験体の配置



図 2-10 ボックスカルバート試験体を用いた実験における蒸気養生設備の正面写真

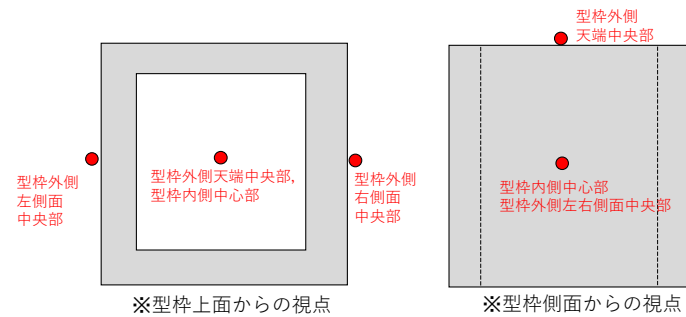


図 2-11 ボックスカルバート試験体近傍の霧囲気温度測定位置

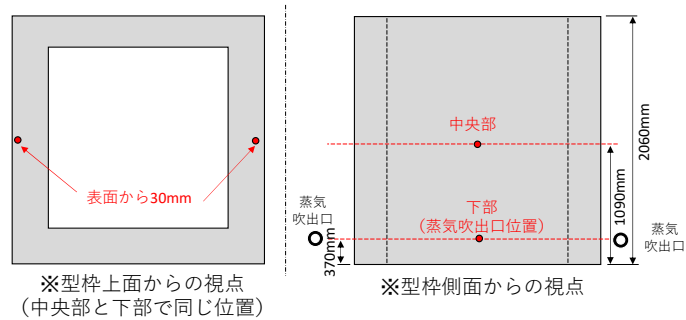


図 2-12 ボックスカルバート試験体のコンクリート温度測定位置

2.3.2 蒸気養生実験の結果と考察

(1) 蒸気吹出口が1箇所の場合

霧囲気温度の測定結果を図 2-13 に示す。図中には、工場内の気温も併せて示す。なお、測定開始 2h 頃から霧囲気温度が上昇しているが、前置き 3h 以上は確保した。工場では、左側側壁中央部で霧囲気温度を測定して蒸気を制御しているが、蒸気吹出口とほぼ同じ高さである床面中央部を除き、霧囲気温度に大きな差異は確認されなかった。蒸気吹出口からある程度高い位置で霧囲気温度を測定すれば、養生設備内を代表する霧囲気温度を測定できると考えられる。

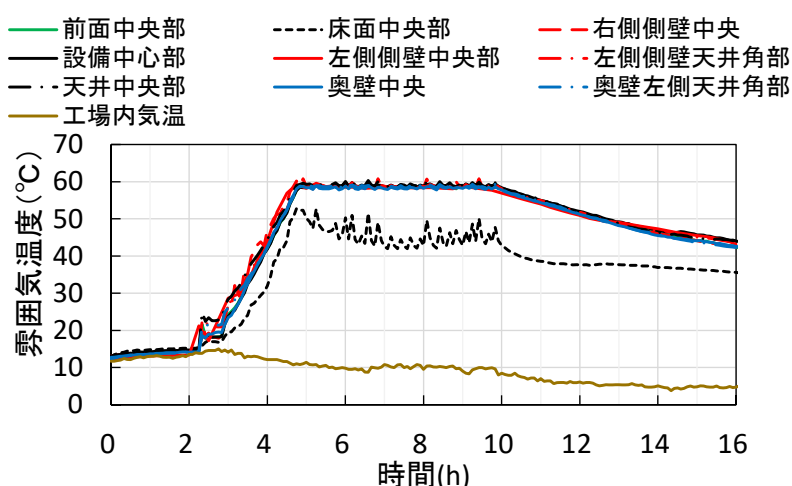


図 2-13 フリューム試験体の蒸気養生設備における霧囲気温度

フリューム試験体のコンクリート温度を図 2-14 に示す。図中には、工場で通常測定している位置の霧囲気温度の測定結果（左側側壁中央部）も併せて示す。A1 を除き、1 段目に配置された試験体の最高温度は、2～4 段目に配置した試験体の温度よりも 5°C 程度低かった。A1 の最高温度は、2～4 段目の結果と同程度であった。

養生開始から 3～5h における 1 段目の試験体のコンクリート温度の昇温速度と最高温度を図 2-15 に示す。A1 の昇温速度および最高温度は、他の試験体よりも高いことが確認できる。A1 は蒸気吹出口に近く、かつ、蒸気が吹き出す方向に位置するため、その他の 1 段目の試験体よりも、蒸気の影響を受けやすかったものと推察される。また、蒸気が吹き出す方向に位置する C1 の昇温速度は、B1 と D1 の結果よりも高い。よって、蒸気吹出口が 1 箇所の場合は、蒸気の吹出方向および吹出口からの距離に応じて、蒸気吹出口と同程度の高さに位置する製品のコンクリート温度が想定内であるかを確認することが望ましいと考えられる。

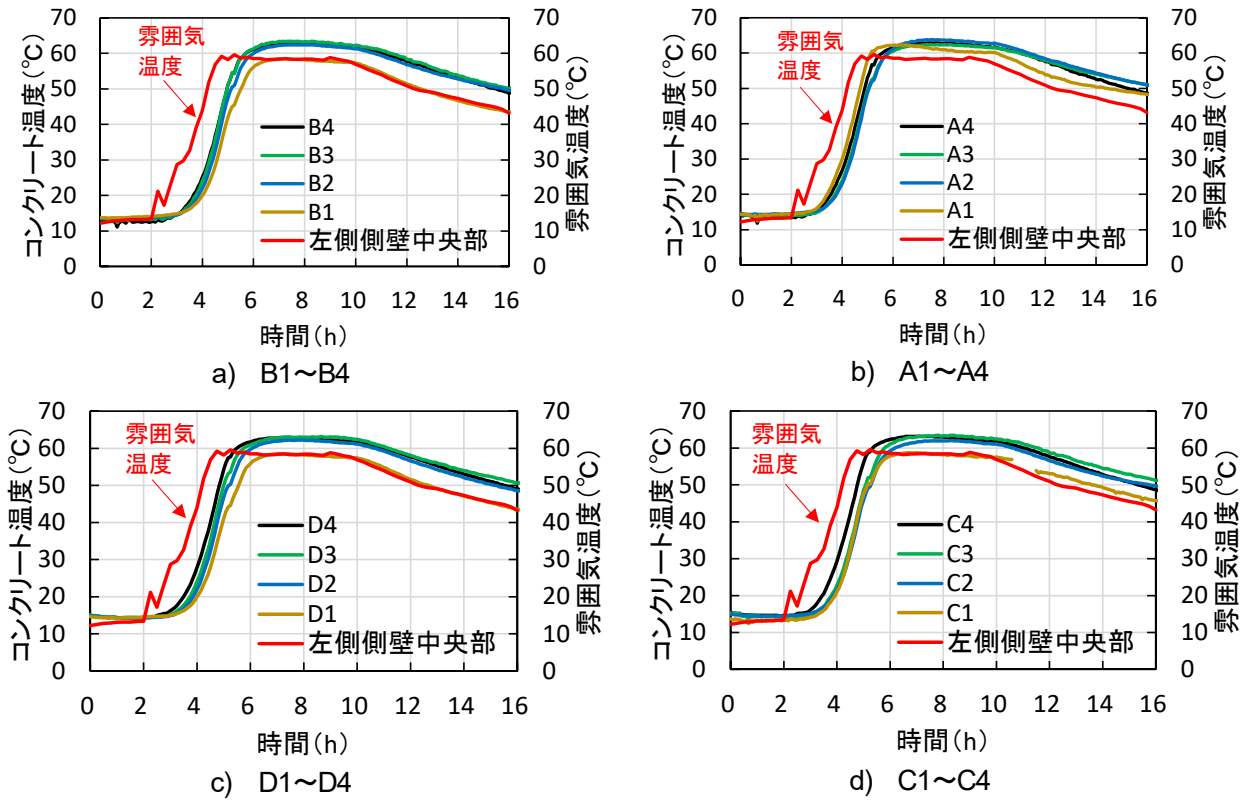


図 2-14 フリューム試験体のコンクリート温度 (図 2-6 の平面図と位置関係を対応させて表示)

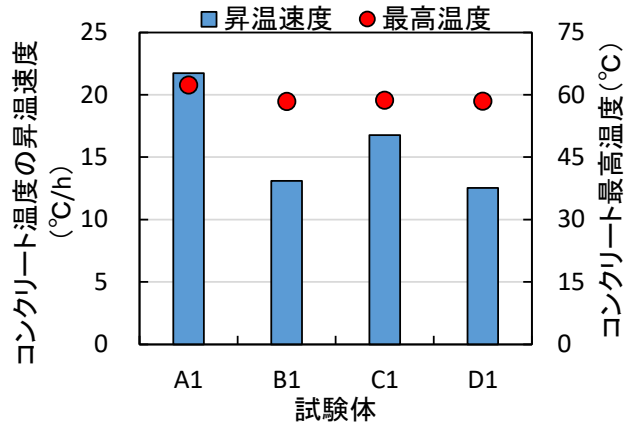


図 2-15 コンクリート温度の昇温速度 (3-5h の傾き) と最高温度

(2) 蒸気が分散して吹き出す仕様の場合

霧囲気温度の測定結果を図 2-16 に示す。なお、測定開始 2h 頃から霧囲気温度が上昇しているが、前置き 3h 以上は確保した。工場では、左側側壁中央部付近で霧囲気温度を測定して蒸気を制御しているが、蒸気吹出口よりも低い位置である床面中央部を除き、霧囲気温度に大きな差異は確認されなかった。蒸気吹出口が 1 箇所の場合と同様に、蒸気吹出口からある程度高い位置で霧囲気温度を測定すれば、養生設備内を代表する霧囲気温度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型枠周囲の霧囲気温度の測定結果を図 2-17 に示す。型枠内側の中心部で測定した霧囲気温度は、他の位置よりも昇温中の測定値が低い結果であった。蒸気吹出口は型枠鉛直面の外側に位置しているため、型枠鉛直面内側への蒸気の到達が比較的遅かったことが影響したと考えられる。型枠鉛直面外側に蒸気吹出口を配置する際には、蒸気の到達が比較的遅い型枠鉛直面内側で霧囲気温度を測定すると、全体の霧囲気温度よりも低い値を測定するおそれがある。また、蒸気の吹出しが終了した 10h 以降の結果では、型枠鉛直面の外側と内側で霧囲気温度に顕著な差があることが確認された。コンクリート温度を予測する際には、この温度差を考慮する必要があると考えられる。

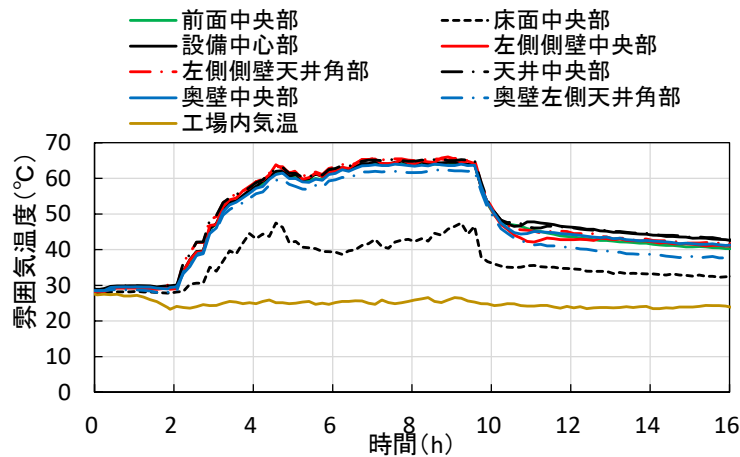


図 2-16 ボックスカルバート試験体の蒸気養生設備における霧囲気温度

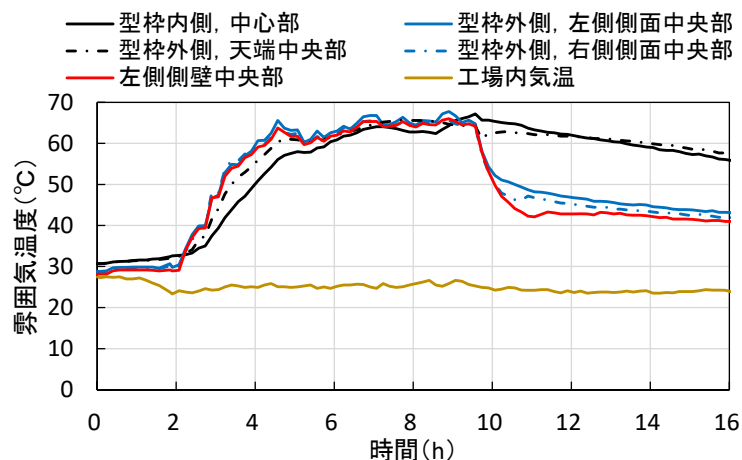


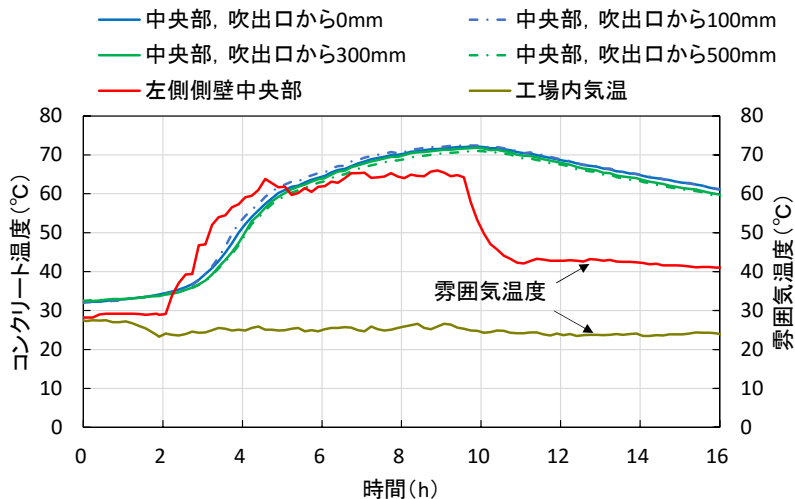
図 2-17 ボックスカルバート試験体の型枠周囲の霧囲気温度

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 2-18 に示す。図中には、工場で通常測定している位置の雰囲気温度の測定結果（左側側壁中央部付近）および工場内の気温も併せて示す。

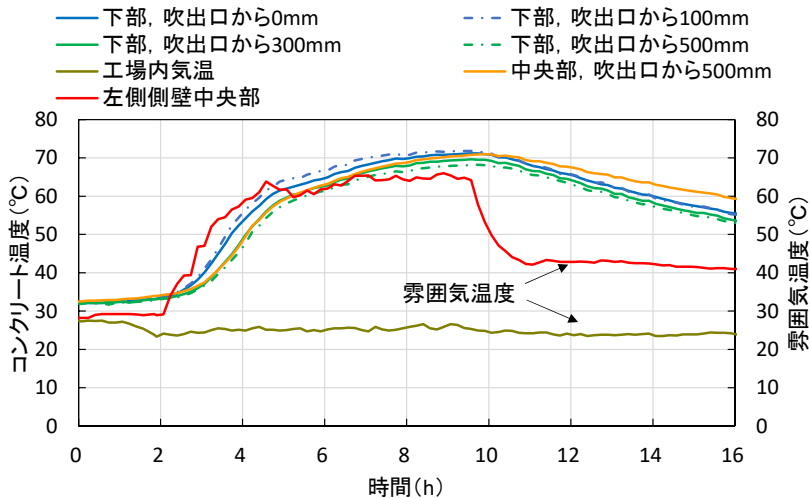
図 2-18 a)に示す中央部（図 2-12）の表面から 30mm 位置での測定では、蒸気吹出口から型枠までの距離によらず、同程度の結果を示した。

図 2-18 b)に示す下部（図 2-12）の表面から 30mm 位置での測定では、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 2-18 a)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。なお、蒸気吹出口から型枠までの距離 0mm の場合と 100mm の場合の結果が同程度となったのは、型枠にはリブがついており、0mm とした場合もコンクリートと接する型枠面には接触しておらず、100mm の場合との差が明確でなかったためと推察される。



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 2-18 ボックスカルバート試験体のコンクリート温度

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 2-19 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。

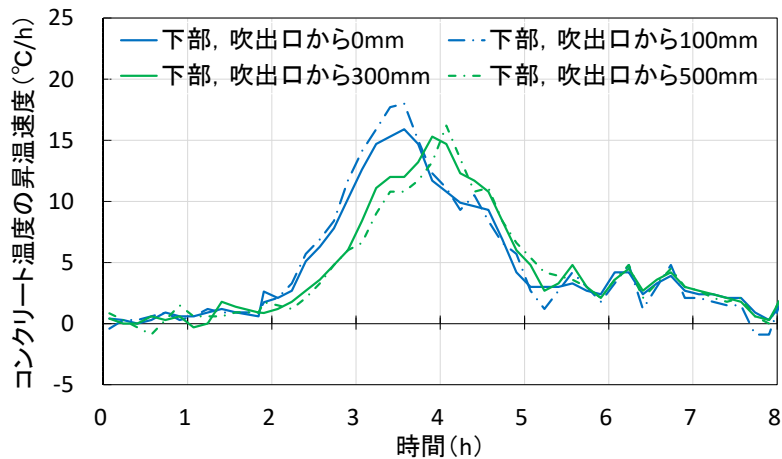


図 2-19 ボックスカルバート試験体のコンクリート昇温速度（表面から 30mm 位置）

2.3.3 まとめ

- 1) 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。ただし、蒸気吹出口を型枠鉛直面の外側に配置して、蒸気の到達が比較的遅い型枠鉛直面内側で測定した雰囲気温度は、設備全体の平均的な雰囲気温度よりも低い値が測定された。
- 2) 蒸気吹出口が 1 箇所の場合、蒸気吹出口よりも高い位置に配置されている試験体については、位置によるコンクリート温度の違いは顕著では無かった。一方、蒸気吹出口と同程度の高さに配置されている試験体については、蒸気の吹出方向および吹出口からの距離によっては、局所的にコンクリート温度が高くなる場合があった。
- 3) 蒸気が分散して吹き出す仕様の場合、今回の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。

2.4 大断面 PCa 製品を想定した蒸気養生実験

2.4.1 蒸気養生実験の方法

コンクリートの配合、フレッシュ性状および圧縮強度を表 2-2 に示す。なお、実験に先立ち、カルバート、擁壁、水路等を製造するプレキャストメーカー4社に配合をヒアリングした。普通ポルトランドセメントを用いた設計基準強度 40N/mm^2 の配合 8 件の水セメント比および単位セメント量の平均値は、それぞれ、約 44% および約 370kg/m^3 であった。本実験で使用した配合は、概ね平均的な水セメント比および単位セメント量であると考えている。

試験体は、大断面のボックスカルバートを想定し、部材厚を変えて 3 体製造した (図 2-20、図 2-21)。試験体の寸法は、幅 1000mm 、長さ 2000mm で、部材厚を 500mm 、 700mm 、 1000mm と変えることで水和熱の影響の程度が異なるように計画した。配筋は、実製品とほぼ同等であり、試験体の断面積に対して約 1%の量の主鉄筋を配置した。なお、従来の RC カルバートの部材厚は、 $130\sim 310\text{mm}$ の範囲¹⁾である。

表 2-2 コンクリートの配合、フレッシュ性状および圧縮強度

W/C(%)	単位量(kg/m^3)					スランプ (cm)	空気量 (%)	打込み 温度($^{\circ}\text{C}$)	圧縮強度*** (N/mm^2)
	W	B		S	G				
		C*	EX**						
43.2	160	370	30	854	995	13.0~19.0	1.0~2.0	15.0~17.0	51.8~57.9

*普通ポルトランドセメント、**膨張材、***設計基準強度 40N/mm^2 、試験体と同一養生で材齢 14 日



a) 型枠の状況



b) 配筋の状況



c) 脱型の状況

図 2-20 部材厚 500mm の試験体の製造状況

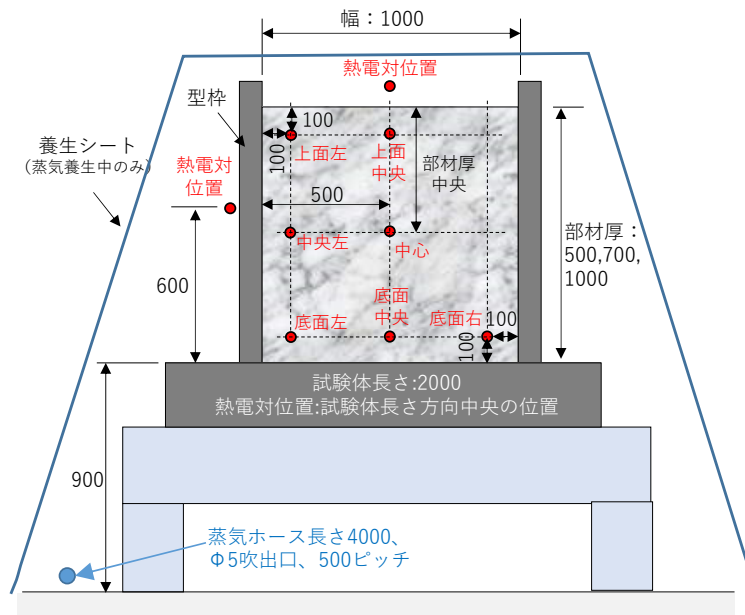


図 2-21 試験体の断面、蒸気ホースの配置および熱電対の位置 (寸法単位 : mm)



図 2-22 試験体の養生状況

コンクリートの打込みは、日程を変えて3回に分けて行った。脱型は、部材中心のコンクリート温度が最高温度に到達後に行った。

蒸気養生条件は、前置き時間 4h 以上、昇温速度 20°C/h、最高温度 40°Cとした。最高温度を 4h 保持した後は、蒸気の吹出しを止めて自然に徐冷した。なお、実験を行った工場では、同様の部材厚の製品を製造する際に最高温度 30°Cを標準としているが、実験目的から、通常の製造時よりも高く設定した。

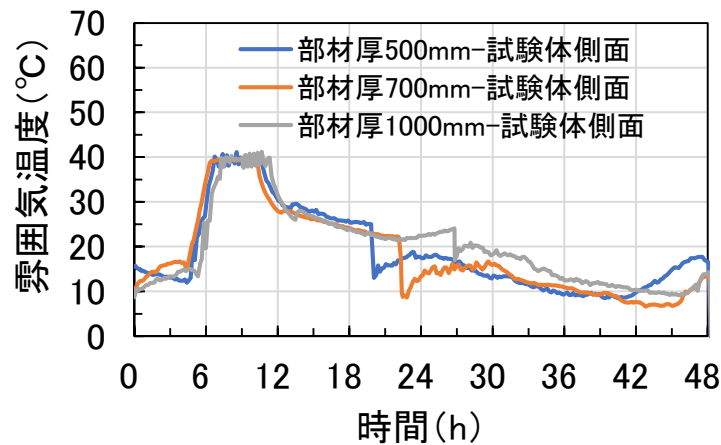
蒸気養生ホースは、型枠の左側の床面に配置した (図 2-21)。蒸気ホースは、蒸気が分散して吹き出す仕様であり、長さ 4000mm の区間にφ5mm の蒸気吹出口が 500mm ピッチで配置されている。蒸気を吹き出す際には、型枠全体を養生シートで覆い、蒸気が充満するようにした (図 2-22)。

熱電対の位置を図 2-21 に示す。蒸気ホースを配置した左側に多く熱電対を配置した。試験体付近の雰囲気温度の測定は、試験体側面および試験体上面に 1 個ずつ熱電対を配置して行った。

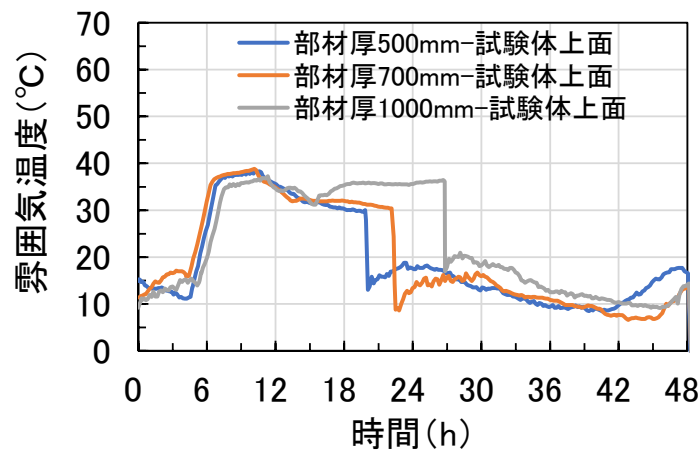
2.4.2 蒸気養生実験の結果と考察

(1) 雰囲気温度

雰囲気温度の測定結果を図 2-23 に示す。試験体側面の結果 (図 2-23 a)) から、設定した蒸気養生条件どおりの雰囲気温度であったことを確認した。なお、20h 以降に急激に雰囲気温度が低下しているのは、脱型のため養生シートを外したためである。脱型以降は、工場内の気温を示している。試験体上面の結果 (図 2-23 b)) から、蒸気吹出しを止めた後の雰囲気温度の低下が上面は側面よりも緩やかであったことを確認した。図 2-21 に示したように、試験体側面は型枠外側の位置であるのに対し、試験体上面は型枠内部の位置であるため、コンクリートの発熱の影響を受けて雰囲気温度の低下が少なかったものと考えられる。



a) 試験体側面



b) 試験体上面

図 2-23 雰囲気温度の測定結果

(2) コンクリート温度

断面中心位置のコンクリート温度の測定結果を図 2-24 に示す。部材厚 500mm、700mm、1000mm の試験体の最高温度は、それぞれ、54.4℃（打込み温度 17℃）、59.5℃（打込み温度 16℃）、60.5℃（打込み温度 15℃）であった。打込み温度が 1～2℃異なるものの、部材が厚いほど最高温度が高くなり、最高温度到達後の温度が低下しにくい傾向を示した。

部材厚 1000mm 試験体のコンクリート温度を図 2-25 に示す。コンクリートの最高温度は、試験体の中心、上面中央、底面中央、中央左、上面左、底面左、底面右の順に高い傾向であった。蒸気ホースを試験体の左側に配置していたが、型枠底面から 900mm 程度離れた条件では、蒸気ホースに最も近い底面の左側と底面の右側で顕著な違いはなかった。なお、上記の傾向は、その他の試験体も同様であった。

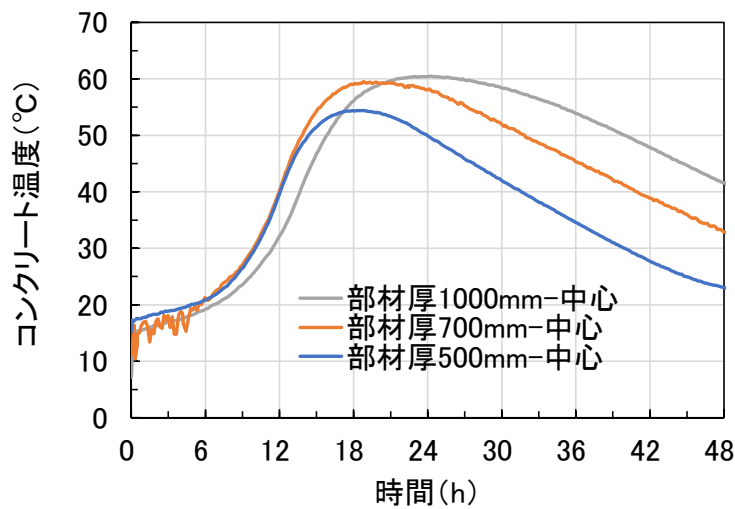


図 2-24 断面中心位置のコンクリート温度

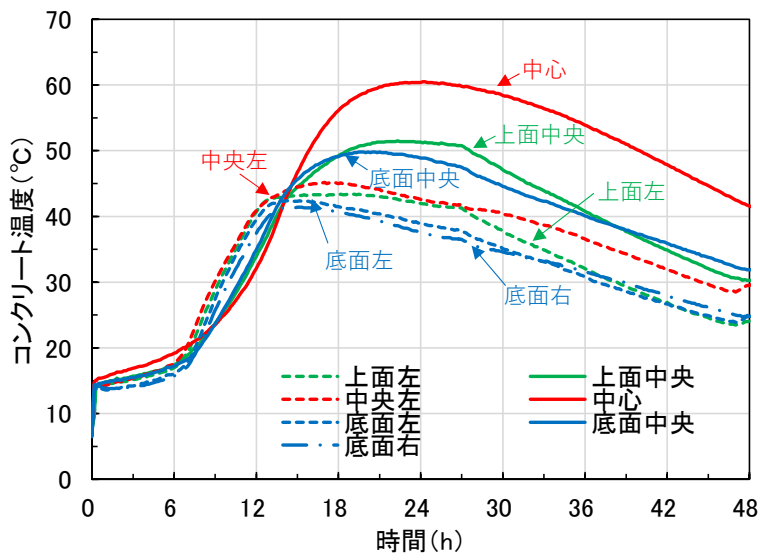


図 2-25 部材厚 1000mm 試験体コンクリート温度

2.4.3 温度管理に留意が必要な製造条件の検討

2.4.3 では、部材厚、打込み温度、蒸気養生条件に着目したパラメトリック解析を行い、温度管理に留意が必要となる条件を検討した。まず、蒸気養生の影響を考慮した熱伝導解析の方法を示した。次に、2.4.2 に示した蒸気養生中のコンクリートの温度変化と解析結果の整合性を確認した。最後に、整合性を確認した解析方法を用いて、製造条件が変わったときにどのような影響があるかを整理した。

(1) 解析方法

熱伝導解析により蒸気養生下のコンクリートの温度を予測するためには、水和による発熱量を適切に考慮する必要がある。発熱量を考慮する方法としては、断熱状態におかれたコンクリートの温度上昇量を実験的に求め、実験結果に基づいた数式（以下、断熱温度上昇式）を用いる方法が一般的である。断熱温度上昇式は、マスコンクリートのひび割れ制御指針 2016（以下、ひび割れ指針）等で提案されている¹⁰⁾。

断熱温度上昇式は、ひび割れ指針で提案している式(1)を用い、各パラメータを算定する際には、ひび割れ指針の普通ポルトランドセメントの算定式を用いた。

$$Q = Q_{\infty}[1 - \exp\{-\gamma(t - t_0)^S\}] \quad (1)$$

ここに、 Q ：断熱温度上昇量（℃）、 Q_{∞} ：終局断熱温度上昇量（℃）、 t ：材齢（日）、 t_0 ：発熱開始材齢（日）、 γ ：断熱温度上昇速度係数、 S ：温度上昇速度係数、なお、 Q_{∞} 、 t_0 、 γ は、単位セメント量と打込み温度の関数である。

しかし、提案されている断熱温度上昇式を、蒸気養生により水和反応が促進されるコンクリートに適用できるかは明確にされていない。蒸気養生の影響を受ける場合に式(1)を補正する方法として、断熱温度上昇特性に関する要素試験を行って断熱温度上昇式のパラメータを補正する方法が既往研究¹²⁾で提案されている。具体的には、蒸気養生の影響を考慮しない断熱温度上昇速度係数 γ 、終局断熱温度上昇量 Q_{∞} および温度上昇速度係数 S に対し、それぞれ、6 倍程度、0.8 倍程度および1.8 倍程度に補正している。まず、 γ を高く設定すると発熱の促進を表現できるが、コンクリート温度の最高温度が実際よりも高くなる傾向および養生開始から数時間程度間の昇温速度が顕著に早くなる傾向が確認されている。そこで、 Q_{∞} を低く設定してコンクリート温度の最高温度を抑制し、 S を高く設定して養生開始から数時間程度間の昇温も抑制することで実験結果を再現できることを示している。本研究では、この既往研究¹²⁾を参考に、ひび割れ指針で提案している γ 、 Q_{∞} および S をそれぞれ、6 倍、0.8 倍および2 倍に設定した。なお、断熱温度上昇特性を補正する方法はいくつか検討されているが^{13)、14)}、標準的な方法は確立されていない。また、比較のため、蒸気養生を考慮せず、ひび割れ指針に示されている算定式による値を用いた検討も行った。

コンクリートの特性は、ひび割れ指針等を参考として、熱伝導率 $2.7\text{W/m}^{\circ}\text{C}$ 、比熱 $1.15\text{kJ/kg}^{\circ}\text{C}$ 、密度 2400kg/m^3 、コンクリートおよび鋼製型枠の熱伝達率は一般的な $14\text{W/m}^2\text{C}$ とした。打込み温度は、2.4.2(2)で示した値（ $15\sim 17^{\circ}\text{C}$ ）を用いた。

熱伝導解析は、図 2-26 に示すように、部材の中心および上面中央を通る断面を対象とした 2 次元の有限要素法により行った。要素形状は、すべて一辺 25mm の正方形とした。境界条件となる雰囲気温度は、図 2-26 に示した試験上面およびそれ以外の面には、それぞれ、図 2-23 b)および図 2-23 a)に示した実測値の 1 時間の移動平均値を入力した。

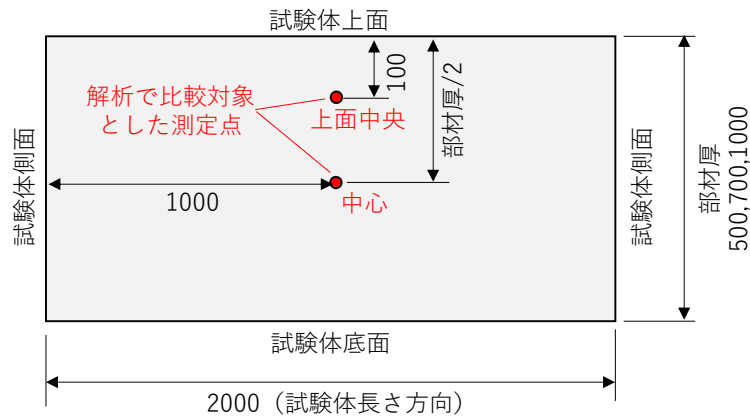
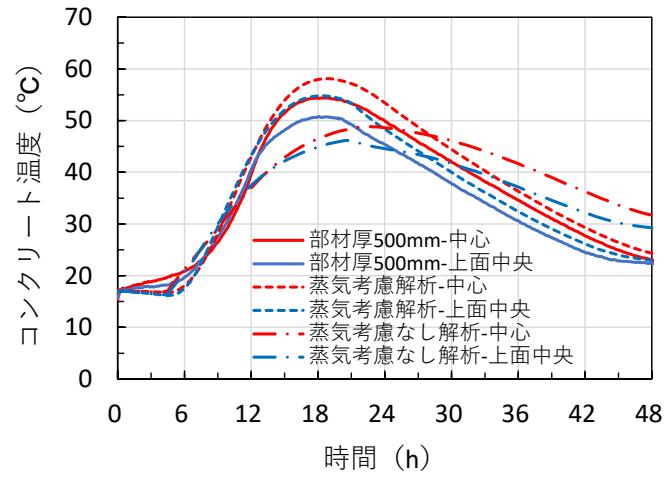


図 2-26 解析対象とした断面と測定点の位置（寸法単位：mm）

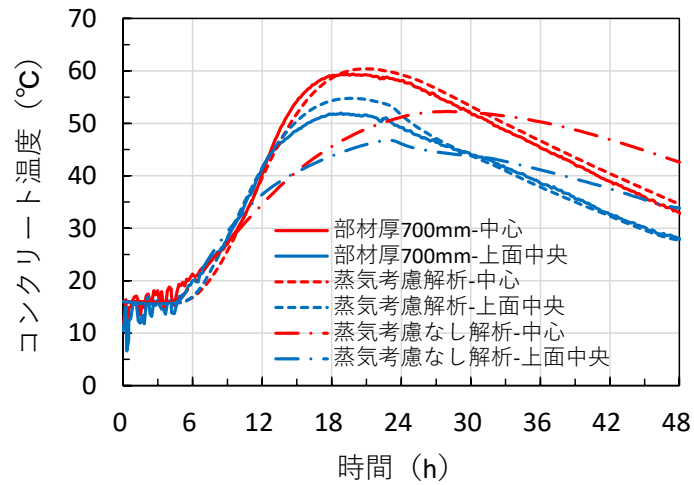
(2) 解析結果と考察

熱伝導解析によるコンクリート温度を図 2-27 に示す。まず、蒸気養生の影響を考慮せず、ひび割れ指針に示される断熱温度上昇式を用いた場合の結果に着目すると、実験と比較して、最高温度が低くなり、かつ、温度上昇が緩やかな結果であった。よって、一般的な断熱温度上昇式を用いた場合のコンクリート温度の再現性は低いことが確認された。

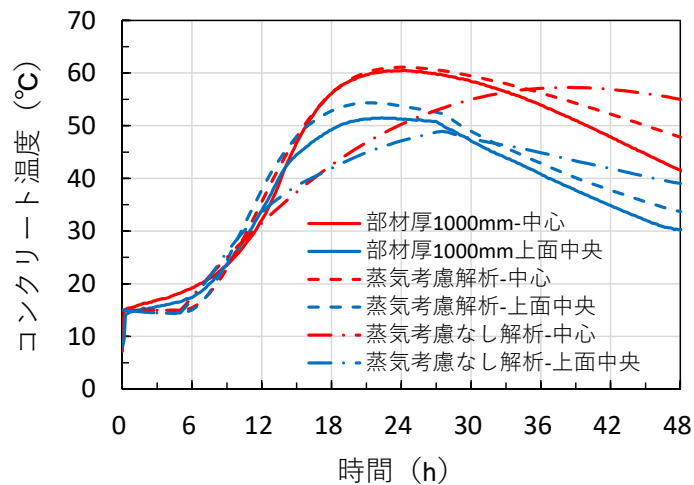
次に、蒸気養生の影響を考慮した断熱温度特性を用いた場合に着目すると、部材厚 500mm の場合は最高温度が 5°C 程度高いものの、部材厚 700mm と部材厚 1000mm の場合は実験での最高温度をほぼ再現できていた。また、温度上昇についても、ひび割れ指針に示される断熱温度上昇式を用いた場合と比較して、実験との整合性がみられた。これらのことから、蒸気養生の影響を考慮して、断熱温度上昇特性を補正することで、コンクリート温度を概ね予測できると考えられる。なお、同様の補正方法によってプレキャスト PC 桁（PC 桁のウェブ厚 300mm 、早強ポルトランドセメント、単位セメント量 450kg/m^3 ）の温度の検討もなされており、実測値に近い結果が得られることも報告¹⁵⁾されていることから、配合が異なる場合にも適用できるものと推察される。



a) 部材厚 500mm



b) 部材厚 700mm



c) 部材厚 1000mm

図 2-27 熱伝導解析によるコンクリート温度

(3) 部材厚、打込み温度、蒸気養生条件がコンクリート温度に与える影響の検討

前節の結果から、断熱温度上昇特性を補正する方法を用いた熱伝導解析は、蒸気養生を用いて製造されるプレキャスト部材の温度上昇を概ね適切に評価できていると考えた。そこで、コンクリート温度に及ぼす影響が大きいと考えられる、部材厚、打込み温度および蒸気養生条件が変化した場合に、コンクリート温度にどの程度の影響があるかを検討した。

検討対象とした条件を表 2-3 に示す。これらの条件を組み合わせ、合計 48 通りの解析を実施した。境界条件として設定した雰囲気温度は、図 2-28 に示すように、昇温前と降温後の温度を一定とし、試験体の上面、側面および底面で同一条件とした。昇温前と降温後の気温は、打込み温度から 5°C 低く設定した¹⁰⁾。なお、要素形状は、部材厚 250mm の場合は幅 25mm、高さ 12.5mm の長方形、その他はすべて一辺 25mm の正方形とした。

表 2-3 検討対象とした部材厚、打込み温度、蒸気養生条件

項目	条件
部材厚	250mm、500mm、700mm、1000mm ※250mm は、従来型 PCa 製品を想定した。
打込み温度	10°C、20°C、30°C ※打込み温度に対応する気温は、それぞれ、5°C、15°C、25°Cとした ¹⁰⁾ 。
蒸気養生条件	最高温度 30°C、40°C、50°C、60°C ※昇温速度 20°C/h、最高温度保持時間 4h、降温速度 20°C/h は固定とした。

※単位セメント量は 370kg/m³ で一定

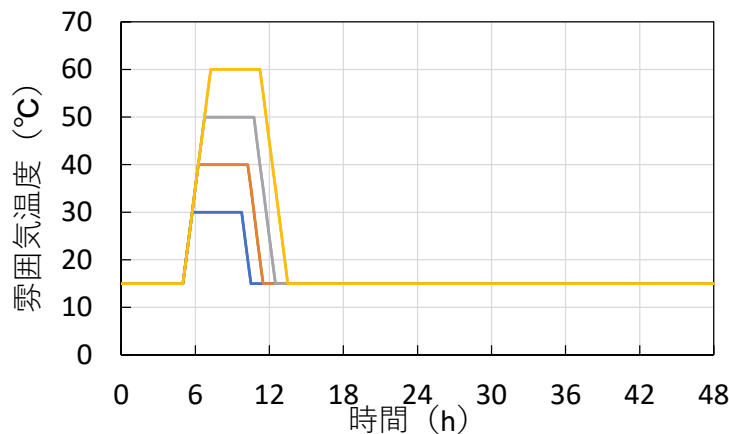


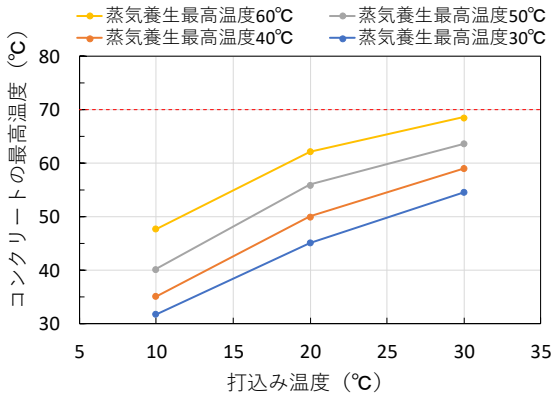
図 2-28 打込み温度 20°C を想定した雰囲気温度の設定

部材の中心および上面中央におけるコンクリートの最高温度を図 2-29 に示す。図には、DEF が生じるコンクリート温度の目安として 70°C の線も示す¹⁰⁾。

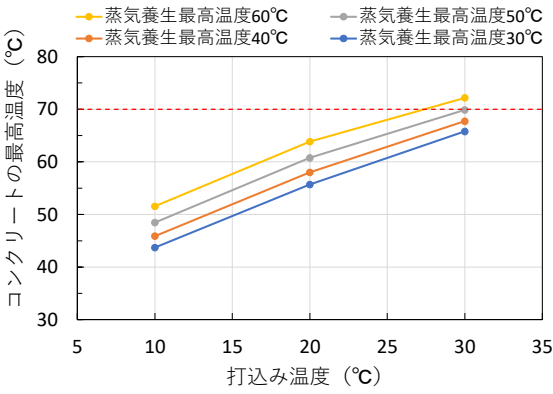
部材中心のコンクリートの最高温度に着目すると、部材厚 250mm ではいずれの条件でもコンクリートの最高温度が 70°C を超えなかった。部材厚 500mm および 700mm では、打込み温度が 25°C 程度を超えて蒸気養生の最高温度が 40°C を超えると、コンクリートの最高温度が 70°C を超える場合がある。部材厚 1000mm の場合は、蒸気養生の最高温度の影響は小さく、打込み温度が 24~26°C を超えるとコンクリートの最高温度が 70°C を超えた (図 2-29 f)。部材厚 1000mm の場合に蒸気養生の最高温度の影響が小さくなったのは、今回の蒸気養生条件では他の試験体と比べると部材中心までの熱の伝導が顕著ではなく、コンクリートの発熱が支配的であったためと考えられる。なお、蒸気養生の影響を考慮しない方法の場合には、部材中心の最高温度がやや低めに算出される傾向があった (図 2-27 c)。

部材の上面中央 (表面から 100mm) のコンクリートの最高温度に着目すると、各部材厚の結果が同程度であり、部材厚の影響が小さいことが確認された。打込み温度が 30°C 以下の場合には、今回設定した条件の範囲では、コンクリートの最高温度が 70°C を超えるリスクは小さいものと推察される。

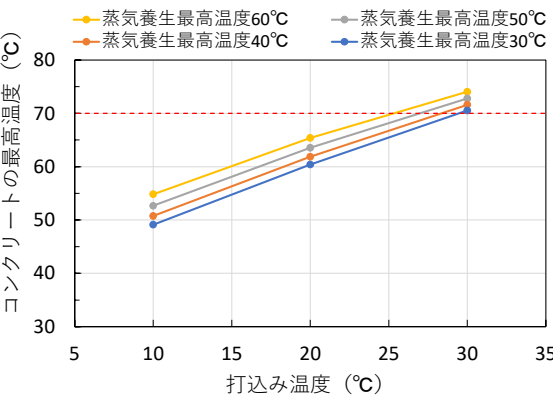
部材厚 250mm 以外について、部材の中心と上面中央でのコンクリートの温度差の最大値を求めた結果を図 2-30 に示す。部材厚が厚いほどコンクリートの温度差が大きくなり、打込み温度や蒸気養生条件の影響は、部材厚の影響に比べると小さい傾向がある。コンクリートの温度差が大きくなると、内部拘束による温度ひび割れが懸念される。温度ひび割れが生じた場合、DEF の発生条件である水分の供給が促進されることも考えられる。上述した部材の上面中央では、コンクリート温度は 70°C を超えなかったが、例えば脱型時の急激な温度変化により表層付近で温度ひび割れが生じると、コンクリート温度が 70°C を超えた部材中心付近にも水分が供給されやすくなるおそれもある。DEF と温度ひび割れの両方に対する配慮が重要と考える。



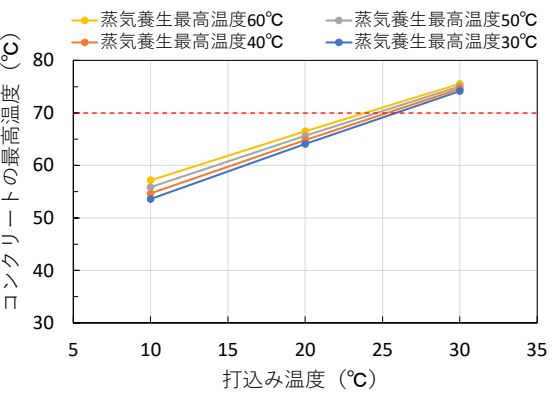
a) 部材厚 250mm、中心



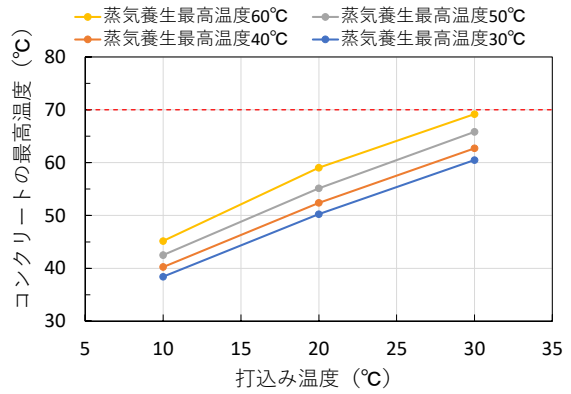
b) 部材厚 500mm、中心



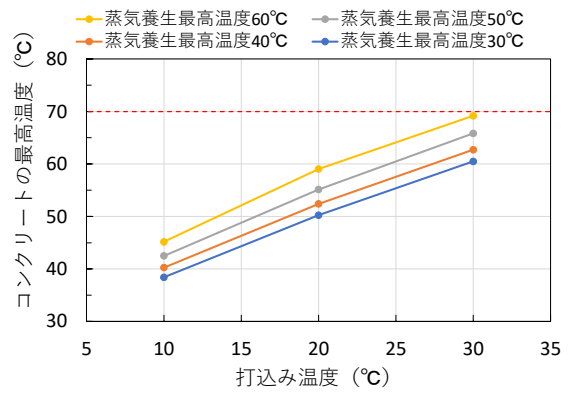
d) 部材厚 700mm、中心



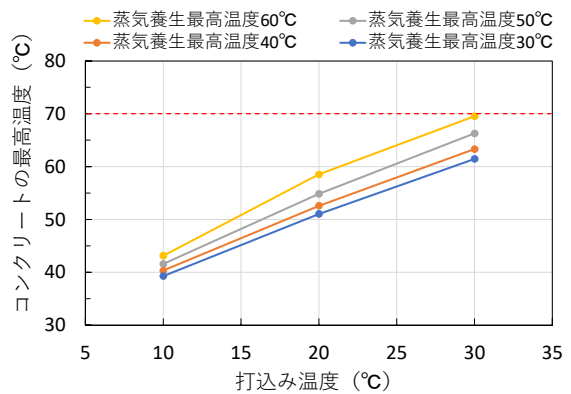
f) 部材厚 1000mm、中心



c) 部材厚 500mm、上面中央 (表面から 100mm)



e) 部材厚 700mm、上面中央 (表面から 100mm)



g) 部材厚 1000mm、上面中央 (表面から 100mm)

図 2-29 部材の中心および上面中央におけるコンクリートの最高温度

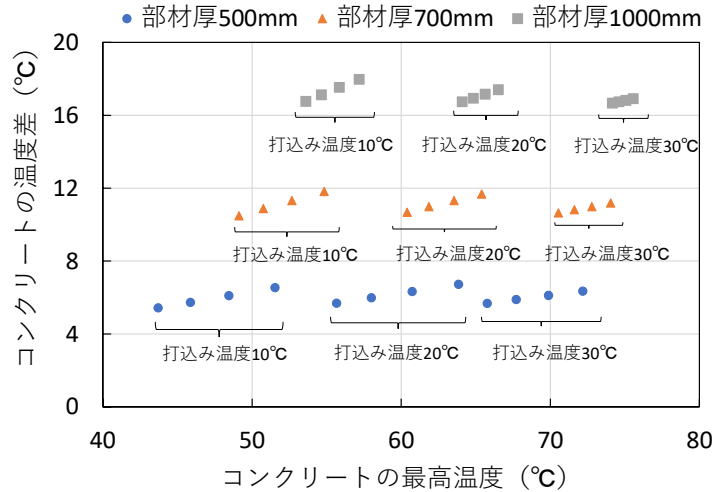


図 2-30 部材の中心と上面中央でのコンクリートの温度差の最大値

2.4.4 まとめ

- 1) W/C43%程度、単位セメント量 370kg/m^3 で膨張材 30kg/m^3 を添加したコンクリートを用いた試験体で実験を行った。蒸気養生の最高温度 40°C 、打込み温度 $15\sim 17^\circ\text{C}$ の条件において、部材厚 500mm 、 700mm 、 1000mm の試験体の最高温度は、 $54\sim 60^\circ\text{C}$ 程度となった。部材が厚いほど最高温度が高くなり、最高温度到達後の温度が低下しにくい傾向を示した。
- 2) コンクリートの最高温度は、試験体の中心、上面と底面の中央、側面の順に高い傾向であり、蒸気ホースを型枠からある程度離して配置した場合には局所的な温度上昇は確認されなかった。
- 3) 蒸気養生の影響を考慮して一般的に提示されている断熱温度上昇特性を補正することで、熱伝導解析により実測値を再現できることを示した。
- 4) 部材の中心位置では、打込み温度が 25°C 程度を超えて蒸気養生の最高温度が 40°C を超えると、コンクリートの最高温度が 70°C を超える場合があることを確認した。
- 5) 部材の上面中央の位置では、部材厚の影響が小さく、打込み温度が 30°C 以下の場合、今回設定した条件の範囲では、コンクリートの最高温度は 70°C を超えなかった。

3 コンクリート表面の気泡跡が物質透過抵抗性に及ぼす影響の検討

3.1 概要

本章では、コンクリート表面の気泡跡が物質透過抵抗性に及ぼす影響を検討するため、実大のボックスカルバート試験体を用いた実験を行った。3.2 では、ボックスカルバート試験体の製造方法、気泡跡の発生状況および物質透過抵抗性試験の方法を説明した。3.3 では、気泡跡の面積率と中性化、塩化物イオン浸透深さの関係について考察する。最後に、3.4 では、本章のまとめを示す。

3.2 コンクリート表面の気泡跡に関する実験方法

3.2.1 ボックスカルバート試験体

製造した供試体の形状を図 3-1、製造に用いたコンクリートの配合、フレッシュ性状、圧縮強度を表 3-1 に示す。なお、設計基準強度は 35N/mm^2 である。コンクリートは 2 層に分けて打込み、型枠バイブレータを用いて締め固めた。コンクリートの品質やコンクリート表面の気泡跡の発生状況を変化させるため、上部は 11 分 30 秒(200Hz)、下部は合計 18 分(200Hz で 6 分 30 秒、その後、上部の加振分 11 分 30 秒が加算)と異なるようにした(図 3-2)。この条件で、上部は締め固めの程度がやや不足していると考えている。なお、振動締め固めが十分及んでいないことによる豆板と、十分な振動締め固めを行った後も残る気泡跡を外観から区別する方法は、現時点では確立されていない。本報では、以降、両者をまとめて気泡跡として表現している。

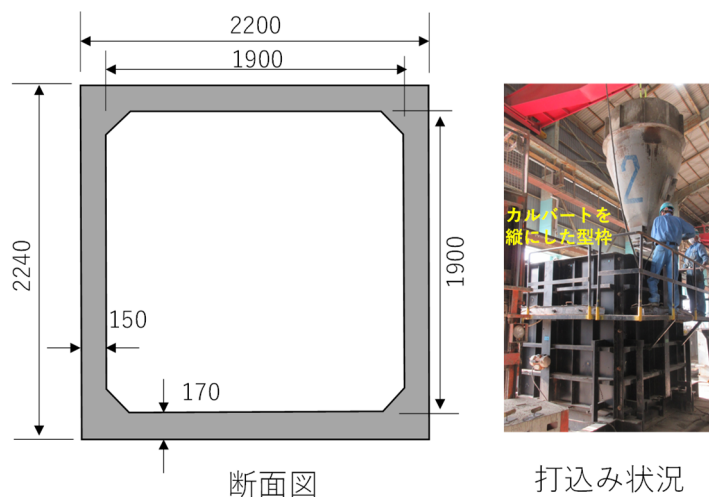


図 3-1 ボックスカルバート試験体の断面と打込み状況 (単位 : mm)

表 3-1 コンクリートの配合、フレッシュ性状、圧縮強度

W/C(%)	単位量(kg/m ³)				スランプ(cm)	空気量 (%)	打込み温度 (°C)	圧縮強度 (N/mm ²)
	水	セメント	細骨材	粗骨材				
42.2	174	416	794	941	19.0 (目標 18cm)	6.2	19	40.5 (50.7)

※普通ポルトランドセメントを使用、粗骨材の最大寸法 20mm、AE 剤を添加、圧縮強度は試験体と同一養生で材齢 14 日の結果で、括弧内の数値は 20°C 水中養生(蒸気養生無し)で材齢 28 日の結果

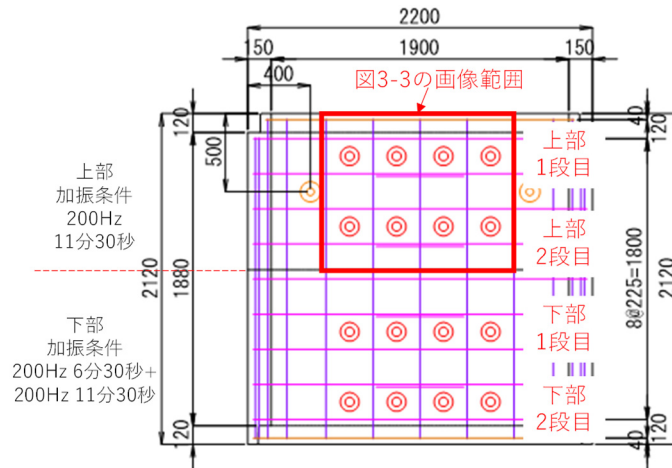


図 3-2 加振条件とコアの採取位置 (単位 : mm)

3.2.2 コンクリート表面の気泡跡の発生状況

気泡跡の発生状況の例を図 3-3 に示す。また、試験体 1 面の気泡跡の個数を二値化した画像から抽出した結果を図 3-4 に示す。図の横軸は、気泡跡と面積が等価な円相当径である。締め固め時間の短い上部の方が、気泡跡の個数は多い傾向があった。なお、上部と下部それぞれで幅 1.3m×高さ 1.0m の範囲において気泡跡の面積率を算出した結果、0.53%と 0.21%であった。

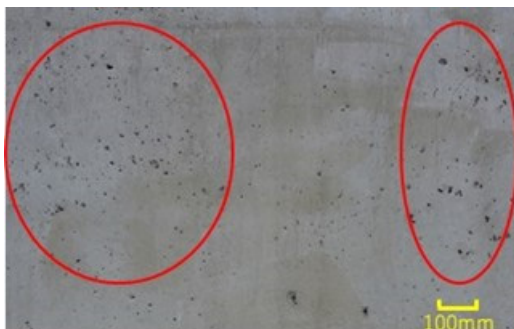


図 3-3 気泡跡の発生状況例
(赤線内は気泡跡が多い部位)

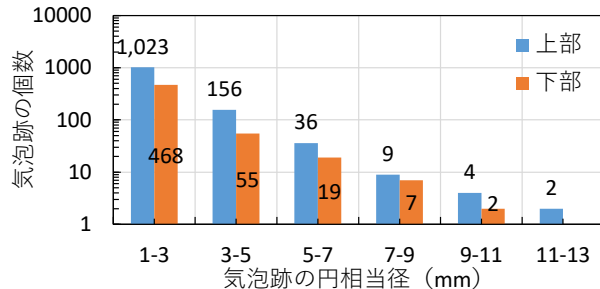


図 3-4 気泡跡の個数

3.2.3 物質透過抵抗性試験

ボックスカルバート試験体は、製造後は屋外ヤードで保管し、材齢 1 か月以降は水掛かりの無い屋内に移設した。

まず、材齢 91～100 日の期間にダブルチャンバー法による表層透気試験¹⁶⁾を実施した。表層透気試験の測定位置は、図 3-2 の赤色の二重丸の位置である。なお、試験に先立ち、高周波容量式および電気抵抗式の表面水分計を用いて測定箇所の含水状態を確認し、顕著な差はないことを確認した。

次に、材齢 10 か月頃に、図 3-2 に示す赤色の二重丸の位置で $\phi 100\text{mm}$ のコアを 16 本採取した。試験手順を図 3-5 に示す。コア採取後、コア側面の外観を目視で観察した。図 3-4 に示したとおり、試験体上部の方が気泡跡は多かったものの、コア側面の状況を目視で観察した限り、内部には豆板等の変状は確認されなかった。ボックスカルバート試験体上部の振動締め固めをやや不足するように設定したが、今回の試験体内部のコンクリートの充填状況は良

好(図3-6)であったものと考えられる。また、直径1mm程度以上の気泡跡を対象として、コア試験体の試験面での個数と面積を記録した。

採取したコアの側面にフェノールフタレイン溶液を噴霧して、JIS A 1152(コンクリートの中性化深さの測定方法)に準拠して中性化深さを測定した。中性化深さは、等間隔の8点で測定し、それらの平均を測定値とした。中性化深さ測定後、表面から50mmの位置でコアを切断し、側面と底面にエポキシ樹脂を塗布したコア試験体を製作した。

コア試験体を用いて10%NaCl水溶液への浸せき試験を行った。浸せき8週間後、試験体を割裂して0.1mol/L硝酸銀溶液を噴霧し、NDIS3437(硝酸銀溶液の噴霧による硬化コンクリートの塩化物イオン浸透深さ試験方法)に準拠して塩化物イオン浸透深さを測定した。塩化物イオン浸透深さは、等間隔の9点で測定し、それらの平均を測定値とした。

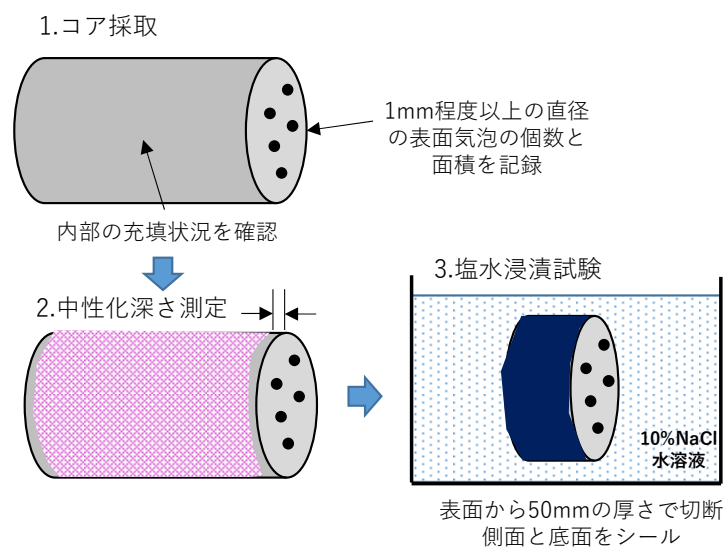


図3-5 物質透過抵抗性試験の手順

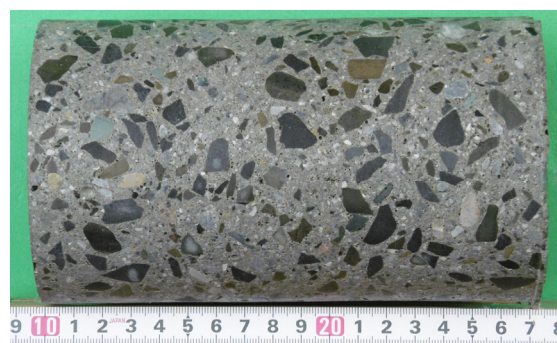


図3-6 上部1段目から採取したコアの側面写真例

3.3 物質透過抵抗性試験の結果と考察

気泡跡の面積率と中性化深さの関係を図 3-7 に示す。コア試験体の気泡跡の面積率に着目すると、いずれの鉛直方向の位置でも、その影響は明確でなかった。試験体の鉛直方向の位置に着目すると、中性化深さは、上部 1 段目で最大となった。気泡跡の面積率と中性化深さの関係を図 3-8 に示す。試験体の上部と下部では透気係数の傾向が異なり、中性化深さが大きい箇所では透気係数も比較的大きい値を示した。中性化深さは 2mm 程度で浅いものの、ブリーディング水の移動の影響により上部において水セメント比が大きくなることや、水の移動の痕跡が気体の移動経路になったことで、中性化が進行した可能性がある。

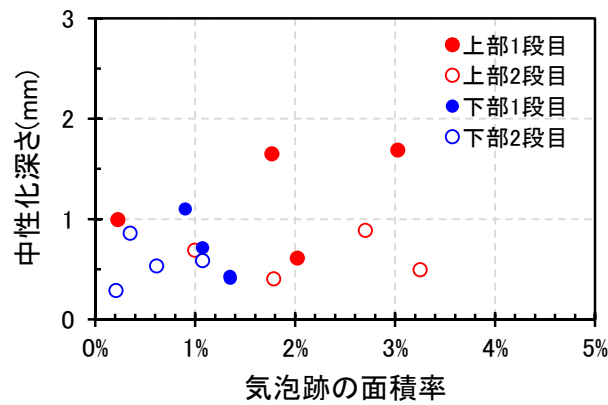


図 3-7 気泡跡の面積率と中性化深さの関係

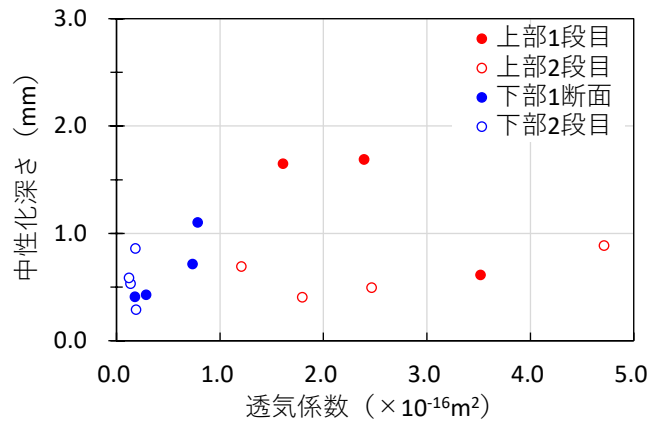


図 3-8 中性化深さと透気係数の関係

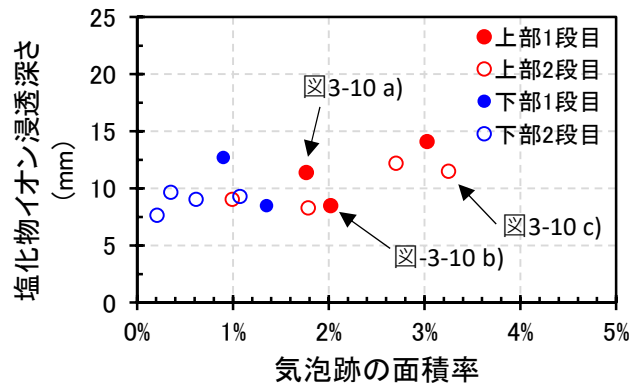
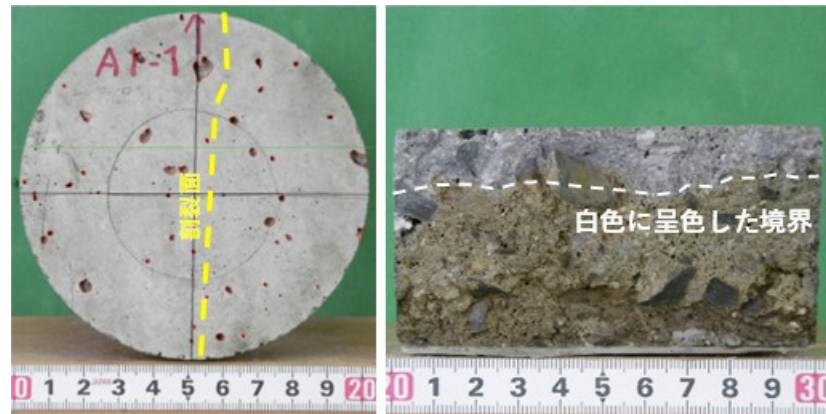


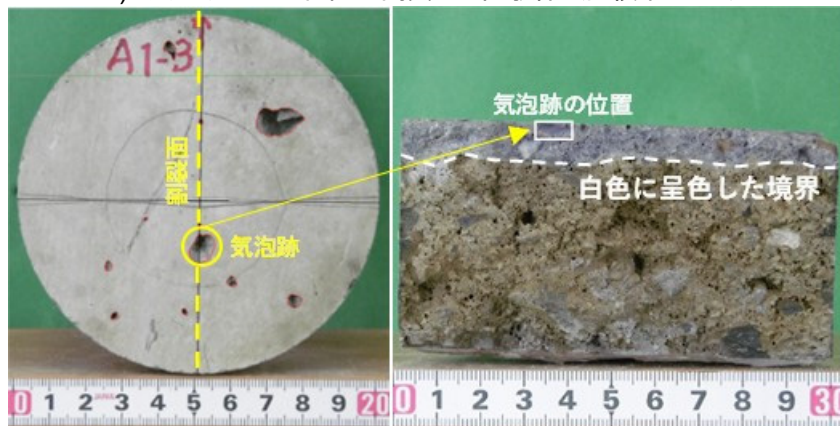
図 3-9 気泡跡の面積率と塩化物イオン浸透深さの関係

気泡跡の面積率と塩化物イオン浸透深さの関係を図3-9に示す。中性化深さの結果と同様に、いずれの鉛直方向の位置でも、コア試験体の気泡跡の面積率の増加の影響は明確に認められなかった。

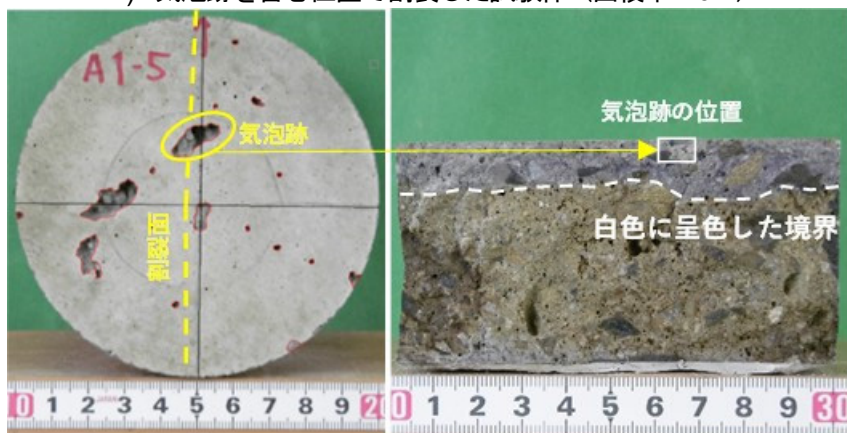
気泡跡の発生状況と塩化物イオン浸透深さを図3-10に示す。図3-10 a)は、気泡跡がない位置で割裂した試験体である。粗骨材の位置を除いて概ね均一に塩分が浸透した。図3-10 b),c)は、気泡跡を含んで割裂した場合の試験体であり、気泡跡の深さは、それぞれ、3.5mmと5.0mmであった。いずれも気泡跡の位置の塩分浸透は、気泡跡以外の位置と同程度であった。気泡跡直下のコンクリートは充填されており、気泡跡の位置で塩分が集中的に浸透することはなかったと考えられる。



a) 気泡跡がない位置で割裂した試験体 (面積率 1.8%)



b) 気泡跡を含む位置で割裂した試験体 (面積率 2.0%)



c) 気泡跡を含む位置で割裂した試験体 (面積率 3.3%)

図 3-10 気泡跡の発生状況と塩化物イオン浸透深さ

以上から、コンクリート内部の充填状況が良好で、コア試験体の気泡跡の面積率が3%程度の範囲では、気泡跡が中性化と塩分浸透に与える影響は顕著でないことを確認した。なお、既往研究では、コンクリートの締固め条件が気泡跡に及ぼす影響を検討している¹⁷⁾。本検討で用いたコンクリートと同様の配合(W/C43%、AEコンクリート、目標スランプ 18cm)を用いて、水平振動装置による種々の条件下で、10×10×40cm 試験体および 30×65×10cm 試験体の気泡跡の面積を測定した結果は 0.5～3%の範囲であり、締固めが良好と判断されたときの気泡跡の面積率は 1%程度以下であったことが示されている¹⁷⁾。本検討で確認されたコア試験体の気泡跡は、製造過程で発生し得るなかで、面積が大きいものであったと推察される。

3.4 まとめ

- 1) 製造した実大ボックスカルバート試験体の表面気泡は、締固め時間の短い上部の方が、気泡跡の個数および気泡跡の面積は多い傾向があった。
- 2) 気泡跡の面積率と中性化深さの関係に着目すると、いずれの鉛直方向の位置でも、気泡跡の面積率の影響は明確でなかった。試験体の上部と下部では透気係数の傾向が異なり、中性化深さが大きい箇所では透気係数も比較的大きい値を示した。
- 3) 気泡跡の面積率と塩化物イオン浸透深さの関係に着目すると、中性化深さの結果と同様に、いずれの鉛直方向の位置でも、気泡跡の面積率の影響は明確でなかった。また、気泡跡の位置の塩分浸透は、気泡跡以外の位置と同程度であり、コンクリートの充填状況が良好な場合には、気泡跡の位置で塩分が集中的に浸透することはなかった。

4 まとめ

本報告書では、蒸気養生設備の実態調査、従来型および大断面の PCa 製品を想定した蒸気養生実験を行って養生中の温度管理方法を検討した結果、ならびに、実大 PCa 製品を用いてコンクリート表面の気泡跡が物質透過抵抗性に及ぼす影響を検討した結果をとりまとめた。以下に、各検討で得られた知見を示す。

蒸気養生設備の実態調査

- 実態調査の結果、蒸気養生設備には、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り、前者は設備の寸法が比較的小さい場合に使用されていた。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。

従来型 PCa 製品を想定した蒸気養生実験

- 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。ただし、蒸気吹出口を型枠鉛直面の外側に配置して、蒸気の到達が比較的遅い型枠鉛直面内側で測定した雰囲気温度は、設備全体の平均的な雰囲気温度よりも低い値が測定された。
- 蒸気吹出口が 1 箇所の場合、蒸気吹出口よりも高い位置に配置されている試験体については、位置によるコンクリート温度の違いは顕著では無かった。一方、蒸気吹出口と同程度の高さに配置されている試験体については、蒸気の吹出方向および吹出口からの距離によっては、局所的にコンクリート温度が高くなる場合があった。
- 蒸気が分散して吹き出す仕様の場合、今回の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。

大断面 PCa 製品を想定した蒸気養生実験

- 蒸気養生の最高温度 40°C、打込み温度 15~17°C の条件において、部材厚 500mm、700mm、1000mm の試験体の最高温度は、54~60°C 程度となった。部材が厚いほど最高温度が高くなり、最高温度到達後の温度が低下しにくい傾向を示した。
- コンクリートの最高温度は、試験体の中心、上面と底面の中央、側面の順に高い傾向であり、蒸気ホースを型枠からある程度離して配置した場合には局所的な温度上昇は確認されなかった。
- 蒸気養生の影響を考慮して一般的に提示されている断熱温度上昇特性を補正することで、熱伝導解析により実測値を再現できることを示した。
- 部材の中心位置では、打込み温度が 25°C 程度を超えて蒸気養生の最高温度が 40°C を超えると、コンクリートの最高温度が 70°C を超える場合があることを確認した。

- 部材の上面中央の位置では、部材厚の影響が小さく、打込み温度が30℃以下の場合は、今回設定した条件の範囲では、コンクリートの最高温度は70℃を超えなかった。

実大PCa製品を用いたコンクリート表面の気泡跡が物質透過抵抗性に及ぼす影響の検討

- 製造した実大ボックスカルバート試験体の気泡跡は、締固め時間の短い上部の方が、気泡跡の個数および気泡跡の面積は多い傾向があった。
- 気泡跡の面積率と中性化深さの関係に着目すると、いずれの鉛直方向の位置でも、気泡跡の面積率の影響は明確でなかった。試験体の上部と下部では透気係数の傾向が異なり、中性化深さが大きい箇所では透気係数も比較的大きい値を示した。
- 気泡跡の面積率と塩化物イオン浸透深さの関係に着目すると、中性化深さの結果と同様に、いずれの鉛直方向の位置でも、気泡跡の面積率の影響は明確でなかった。また、気泡跡の位置の塩分浸透は、気泡跡以外の位置と同程度であり、コンクリートの充填状況が良好な場合には、気泡跡の位置で塩分が集中的に浸透することはなかった。

参考文献

- 1) 日本建設業連合会：再生と進化に向けてー建設業の長期ビジョンー、pp.38-42、2015、
<https://www.nikkenren.com/sougou/vision.html>（閲覧日 2020 年 6 月 3 日）
- 2) 国土交通省コンクリート生産性向上検討協議会：第 4 回 i-Construction 委員会資料、第 2 回資料 1、
2016、https://www.mlit.go.jp/tec/tec_tk_000032.html（閲覧日 2020 年 5 月 7 日）
- 3) 国土交通省コンクリート生産性向上検討協議会：コンクリート工における建設現場の生産性に関する現
状、第 1 回資料 1、2016、<https://www.mlit.go.jp/tec/i-con-concrete-conference001.html>（閲覧日 2020 年 5 月 7
日）
- 4) 流動性を高めたコンクリートの活用検討委員会：流動性を高めた現場打ちコンクリートの活用に関する
ガイドライン、2017、<https://www.mlit.go.jp/common/001191821.pdf>（閲覧日 2020 年 6 月 4 日）
- 5) 機械式鉄筋定着工法技術検討委員会：機械式鉄筋定着工法の配筋設計ガイドライン、2016、
<https://www.mlit.go.jp/common/001184141.pdf>（閲覧日 2020 年 6 月 4 日）
- 6) 国土交通省コンクリート生産性向上検討協議会：現場打ちコンクリートに関するガイドラインのフォロ
ーアップ、第 6 回参考資料 3、2018、https://www.mlit.go.jp/tec/tec_tk_000047.html（閲覧日 2020 年 5 月 7
日）
- 7) 川端雄一郎、松下博通：高温蒸気養生を行ったコンクリートにおける DEF 膨張に関する検討、土木学会
論文集 E2（材料・コンクリート構造）、Vol.67、No.4、pp.549-563、2011
- 8) 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、Vol.51、No.11、pp.38-41、2009
- 9) 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
- 10) (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.1-55、2016
- 11) 日本道路協会：道路土工カルバート工指針、pp.142-145、2010
- 12) 遠藤友紀雄、田代藤雄、森本博昭、小柳治：蒸気養生下におけるコンクリートの諸特性について、コンクリート工
学年次論文集、Vol.18、No.1、pp.1305-1310、1996
- 13) 齋藤寛泰、小澤満津雄、阪口裕紀、森本博昭：蒸気養生を行ったプレキャストコンクリート部材の初期応力に関
する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.33、No.1、pp.443-448、2011
- 14) 中村敏之、北澤利春、前田道孝、東洋輔：蒸気養生で製造されるコンクリートの温度上昇特性、第 22 回プレ
ストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集、pp.183-188、2013
- 15) 水戸健介、鈴木聡、北野勇一：フライアッシュを用いたプレキャスト PC 部材の温度応力に関する検討、第 30 回
プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集、pp.331-334、2021
- 16) Torrent, R. J. : A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of the permeability to air of the concrete cover
on site, Materials and Structures, Vol.25, No.6, pp.358-365, 1992
- 17) 河辺伸二、松岡重吉、陳海峰、岡島達雄：水平振動方式によるプレキャストコンクリート製品の締固め、コンクリ
ート工学、Vol.47、No.3、pp.39-46、2009

第Ⅱ部

プレキャスト工場における蒸気養生時の留意点の提案

プレキャスト工場における蒸気養生時の留意点

1. 適用範囲

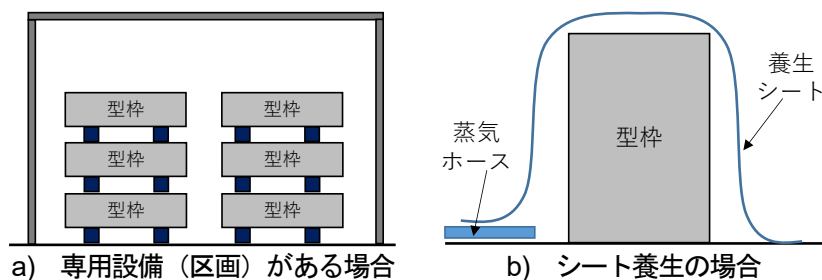
- (1) 本留意点は、プレキャスト製品の DEF を抑制するために、蒸気養生時にコンクリートが過度に高温にならないようにするための具体的な事項を示すものである。
- (2) ここに示されていない事項については、関連する技術基準類によるものとする。

【解説】

(1)について

DEF によって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°C 以上の履歴を受けた場合とされている。このため、蒸気養生中の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。ただし、既存の技術基準類では、局所的にコンクリート温度が高温になることを避けるなどの一般的な留意事項は示されているものの、具体的な方法は明確に示されていない。

本留意点は、コンクリート温度が 70°C 以上となることを抑制するための留意点として、蒸気養生設備内の雰囲気温度の測定位置、蒸気吹出口から型枠までの距離、コンクリート温度の過度な上昇に留意が必要な製造条件を示したものである。なお、蒸気養生設備の種類として、専用設備(区画)がある場合およびシート養生の場合を想定している(解説 図 1)。



解説 図 1 蒸気養生設備の種類

(2)について

ここに示されていない事項については、次の既存の技術基準類を参考にするとよい。

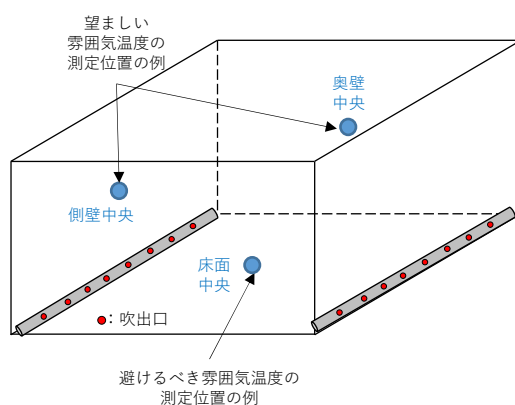
- ・日本道路協会:道路橋示方書・同解説(Ⅲコンクリート橋・コンクリート部材編)、2017
- ・日本道路協会:コンクリート道路橋施工便覧、2020
- ・土木学会:2017 年制定コンクリート標準示方書[施工編]、2017
- ・日本コンクリート工学会:マスコンクリートのひび割れ制御指針 2016、2016

2. 蒸気養生設備内の雰囲気温度の測定位置

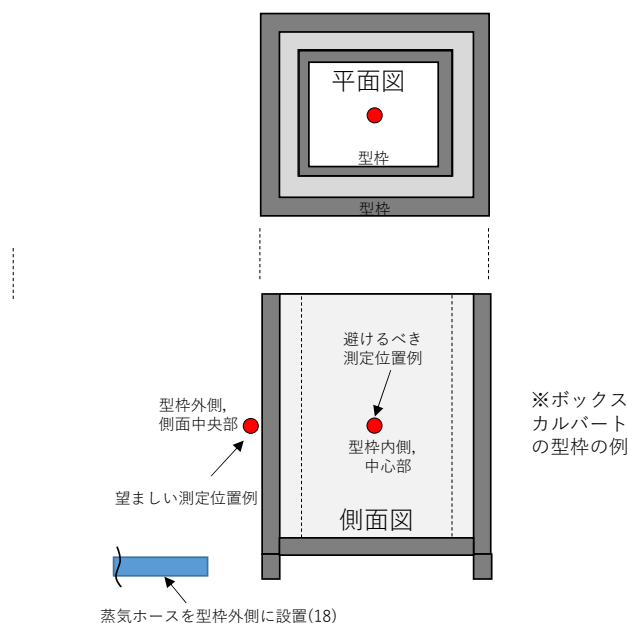
蒸気を制御するための雰囲気温度の測定位置は、蒸気吹出口よりも高い位置とし、蒸気が回りこみにくい位置での測定を避けるように設定する。

【解説】

雰囲気温度の測定位置を蒸気吹出口よりも高い位置で測定すれば、設備内を代表する温度を測定できることが確認されている（解説 図2、側壁中央、奥壁中央）。一方、雰囲気温度の測定位置を蒸気吹出口よりも低い位置にした場合、設備内の代表する雰囲気温度よりも低い温度が測定されることが確認されている（解説 図2、床面中央部）。また、シート養生の場合で、蒸気吹出口を型枠の外に配置し、雰囲気温度の測定位置を型枠の内側中心とした場合（解説 図3）には、蒸気の回り込みが遅れるために、周囲の雰囲気温度よりも低い温度が測定されることも確認されている。このような位置で雰囲気温度を測定して蒸気を制御した場合、想定よりも雰囲気温度が過度に高くなるおそれがあるため避ける必要がある。



解説 図2 蒸気養生の専用設備における雰囲気温度の測定例



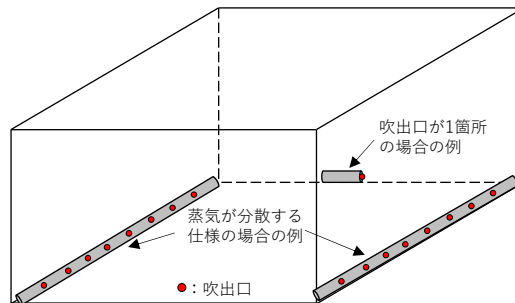
解説 図3 シート養生の場合の雰囲気温度の測定位置例

3. 蒸気吹出口から型枠までの距離

蒸気が分散して吹き出す仕様の場合、蒸気吹出口から型枠までの距離は、300mm 以上確保することを標準とする。

【解説】

蒸気が分散して吹き出す仕様の場合（解説 図4、解説 図5 a）、蒸気吹出口から型枠までの距離を 300mm よりも短くすると、コンクリートの昇温速度が大きくなり（解説 図6）、局所的に高温になるおそれがあることが確認されたことから、蒸気吹出口から型枠までの距離を 300mm 以上確保することを標準とした。やむを得ず 300mm よりも距離を短くする場合には、コンクリート温度が過度に上昇していないかを確認する必要がある。なお、吹出口が1箇所の場合（解説 図4、解説 図5 b）には、蒸気吹出口付近のコンクリート温度が過度に上昇していないかを別途検討する必要がある。検討にあたっては、第I部2.3を参考にするとよい。



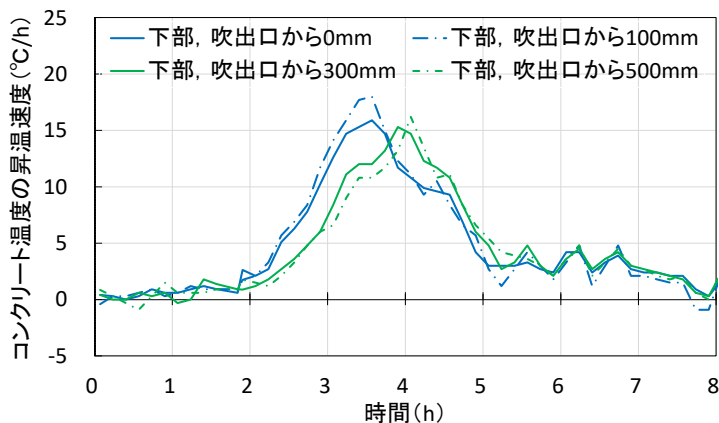
解説 図4 蒸気養生設備における蒸気吹出口の配置例



a) 蒸気が分散する仕様の場合

b) 吹出口が1箇所の場合

解説 図5 蒸気吹出口の仕様例



解説 図6 蒸気吹出口から型枠までの距離がコンクリート昇温速度に及ぼす影響

4. コンクリート温度の過度な上昇に留意が必要な製造条件

部材寸法が大きいプレキャスト製品の製造において、表 1 に示す条件に該当する場合は、事前にコンクリート温度を確認する。

表 1 事前にコンクリート温度の確認が必要な製造条件

	部材厚 310mm 超～ 500mm 以下 (下記の両方に該当)	部材厚 500mm 超～ 700mm 以下 (下記の両方に該当)	部材厚 700mm 超～ 1000mm 以下 (打込み温度のみ)
打込み温度	30℃以上	25℃以上	25℃以上
蒸気養生の最高温度※1	50℃以上	50℃以上	※2

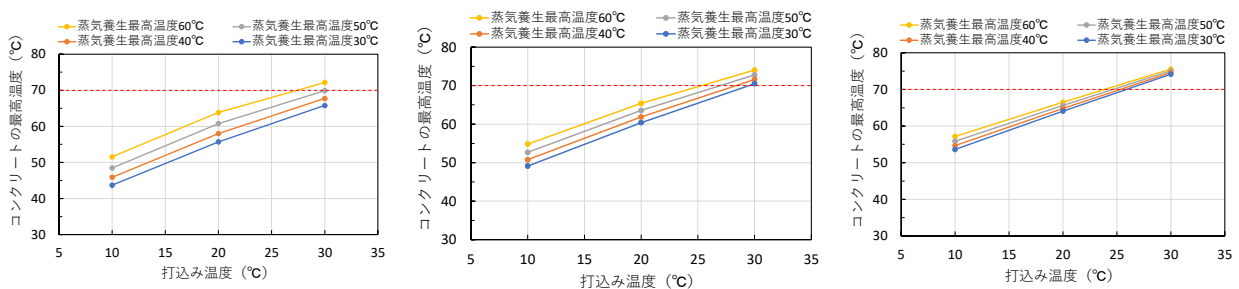
※1:最高温度の保持時間は 4 時間以上を想定

※2:部材厚が 700mm を超えるような場合には水和熱の影響が支配的になるため、打込み温度 25℃以上では蒸気養生の最高温度の設定に関わらずコンクリート温度が過度に上昇するおそれがある

【解説】

部材寸法が大きいプレキャスト製品の製造において、表 1 に示す条件に該当する場合、コンクリート温度が 70℃以上となるおそれがあるため（解説 図 7）、対象製品に熱電対を埋設してコンクリート温度を測定あるいは第 I 部 2.4.3 に示した解析方法によりコンクリート温度を確認する必要がある。部材厚 310mm は、従来型 RC ボックスカルバートの最大部材厚であり、これを超える製品を製造することを想定して設定したものである。部材厚 1000mm を超える場合は、別途検討する必要がある。

なお、表 1 の条件は、普通ポルトランドセメントを使用して、W/C43%、単位セメント量 370kg/m³ としたコンクリートを対象とした検討結果に基づいたものである。この検討結果よりも単位セメント量が顕著に多い場合など、コンクリート温度の上昇が懸念される場合には、ここに示した条件以外でもコンクリート温度を確認する必要がある。



a) 部材厚 500mm

b) 部材厚 700mm

c) 部材厚 1000mm

解説 図 7 プレキャスト製品の中心位置の最高温度の試算例

参考資料

コンクリート表面の気泡跡が物質透過抵抗性に及ぼす影響の試験方法（案）

1. 適用範囲

この「コンクリート表面の気泡跡が物質透過抵抗性に及ぼす影響の試験方法(案)」は、締固め作業等の製造計画の妥当性について、気泡跡の位置における物質透過抵抗性も参考にして検証するためのものである。プレキャスト製品の日常の品質管理や検査に適用するものではないことに留意されたい。

2. 試験方法の概要

プレキャスト製品表面の気泡跡を含むコアを採取し、採取したコアを用いて塩水浸せき試験を実施するものである。なお、物質透過抵抗性の指標は、特別な試験機が不要で、塩化物イオンの浸透性状を視覚的に確認できる硝酸銀溶液の噴霧による塩化物イオン浸透深さとする。

3. 引用規準

次に示す規準は、この試験方法に引用されることによって、この試験方法の規定の一部を構成する。この規準は、その最新版を適用する。

・NDIS3437 硝酸銀溶液の噴霧による硬化コンクリートの塩化物イオン浸透深さ試験方法、2021

4. 試験に使用するプレキャスト製品

試験に使用するプレキャスト製品は、部材厚 70mm 以上かつ実製品と同程度の部材厚を有するものとする。試験に使用するプレキャスト製品の製造方法は、実製品と同様とする。配筋については、コア採取を想定し、採取箇所の配筋ピッチを広げる、または、採取箇所の鉄筋を一部切断するのがよい。

5. コアの採取と寸法

コアの採取は、設計基準強度に到達したことを確認後に行う。コアは、プレキャスト製品の面全体から少なくとも 5 本以上採取する。コアの寸法は、直径 100mm とする。

6. コンクリートの充填状況の確認と気泡跡の測定

コアの採取後、製品内部のコンクリートの充填状況を確認し、塩水浸せきの試験面における気泡跡の数と面積を測定する。測定対象とする気泡跡の直径は、1mm 程度以上とする。

7. 塩水浸せき

コアの側面および底面には、塩水が浸透しないように、エポキシ樹脂であらかじめシールする。エポキシ樹脂の硬化後、温度 $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ の水中で 24 時間以上保存する。

塩水は 10%NaCl 水溶液とし、 $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ で、8 週間浸せきする。浸せき溶液の量は、浸せきするコアの合計の体

積の2倍以上かつ溶液の表面がコアの上面あるいは上端から20mm以上高くなるようにする。また、蒸発により溶液が減らないように、コアを浸せきするための容器にふたをして密閉する。

なお、W/Cが40%よりも小さい場合や高炉スラグ微粉末等の塩化物イオン浸透に対する抵抗性が向上する混和材を用いたコンクリートの場合には、浸せき期間を13週間とするのがよい。

8. コアの割裂または切断

気泡跡を通る位置で、圧縮試験機を用いて割裂または乾式のカッターを用いて切断する。気泡跡は、試験面のなかで最大寸法のものを対象とする。割裂または切断後には、気泡跡の深さを測定する。

9. 塩化物イオン浸透深さの測定

塩化物イオン浸透深さの測定は、NDIS3437に準拠して行う。

10. 報告

測定者は次の事項を報告する。なお、試験結果の評価にあたっては、第I部第3章を参考にするとよい。

- a. 打設日
- b. 測定日時
- c. 試験体の材料と配合
- d. 試験体製造時の締固め条件
- e. コア採取時の圧縮強度
- f. コアの採取位置
- g. コアの気泡跡の数、面積、深さ
- h. コアの側面の写真(コンクリートの充填状況)
- i. 塩水浸せきの期間
- j. 塩化物イオン浸透深さ、測定面の写真

共同研究報告書
Cooperative Research Report of PWRI
No.564 May 2022

編集・発行 ©国立研究開発法人土木研究所

転載・複写の問い合わせは

国立研究開発法人土木研究所 企画部 業務課
〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6 電話029-879-6754