

論文 高炉スラグ微粉末を多量置換したプレキャストコンクリートにおける蒸気養生の効果に関する研究

橋本 涼太*1・樋原 弘貴*2・牛田 潤*3・田中 孝一*4

要旨：高炉スラグ微粉末（BFS）を多量置換したプレキャストコンクリート（PCa）を想定し、当該コンクリートの諸特性に及ぼす蒸気養生の効果調べた。BFS4000 ブレーンおよび 6000 ブレーンを、それぞれセメントに対し 30%, 50%, 70%置換したコンクリートを作製した。蒸気養生の条件には、最高温度（20～60℃）と積算温度（340～540℃・h）が異なる 4 ケースを設定した。主な結果として、脱型時（材齢 17 時間）の圧縮強度は BFS 置換率 70%の場合でも積算温度を大きくすることで BFS 置換率 30%と同等の値となることがわかった。一方、BFS のブレーン値や置換率にかかわらず、材齢 14 日の圧縮強度は積算温度が大きい場合に小さくなった。

キーワード：高炉スラグ微粉末, 多量置換, プレキャストコンクリート, 蒸気養生, 最高温度, 積算温度

1. はじめに

我が国のコンクリート・セメント業界は、建築物や橋梁など社会・防災インフラに必須となる基礎素材を扱っている。自然災害が頻発する我が国では、耐震性・強度等を確保しつつ、CO₂ 排出削減にも貢献するコンクリート・セメントを開発していくことが重要である。セメント製造プロセスで CO₂ が必然的に排出されており、セメント産業からの排出が大半を占めている。コンクリートの主要な構成材料であるセメントは、製造時にセメント 1 t あたり CO₂ を約 770 kg 排出するとされるため、一般的な市中配合のコンクリートの製造には、1m³ あたり約 270 kg の CO₂ が排出される計算となる¹⁾。コンクリートの材料分野では、セメントの使用削減が CO₂ の排出削減に直接つながるため、近年ではセメントの大部分を高炉スラグ微粉末（BFS）やフライアッシュ等の混和材で置換した低炭素型コンクリートが注目されている。

一方で、今後人口減少に伴い技能者が減少することが見込まれており、生産性向上に向けてプレキャストコンクリート（PCa）を積極的に活用していく必要がある。PCa の CO₂ 排出量の約 80%は、原料のポルトランドセメントに由来するため、CO₂ 排出量がポルトランドセメントよりも少ない BFS をセメントに多量置換することで CO₂ 削減と副産物の有効活用による環境負荷低減が期待されている。また、BFS を使用することでコンクリートの水密性、化学物質に対する抵抗性、アルカリシリカ反応抑制、塩分浸透遮蔽性などの耐久性が向上するため、コンクリート構造物のライフサイクルが長くなるといった利点がある。しかし、BFS を多量置換した場合には、初期強度が低下するといった課題がある。PCa 製造では、一

般的に蒸気養生が行われるが、BFS を多量置換したコンクリートに対する蒸気養生の効果については不明な点が多い。そこで本研究では、BFS をセメントに 30, 50, 70% 置換した PCa に対して蒸気養生が与える影響について圧縮強度、自己収縮・乾燥収縮、塩化物イオン浸透性の観点から検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

表-1 に使用材料を、表-2 に作製したコンクリートの配合を示す。セメントには普通ポルトランドセメント、混和材にはあらかじめ石こうが添加された BFS4000 ブレーン（SO₃ 量：2.10%）および 6000 ブレーン（SO₃ 量：3.06%）を使用した。細骨材には除塩海砂、粗骨材には砕

表-1 使用材料

材料	記号	種類	密度 [g/cm ³]
セメント	N	普通ポルトランドセメント	3.15
混和材	BFS4000	高炉スラグ微粉末 4000	2.89
	BFS6000	高炉スラグ微粉末 6000	2.91
細骨材	S	除塩海砂 (福岡県玄界灘産)	2.59
粗骨材	G	碎石 (福岡県古賀市産)	2.76
混和剤	Ad	SPB 系高性能減水剤	-

*1 福岡大学 工学部 社会デザイン工学科 助教 博士（工学）（正会員）

*2 福岡大学 工学部 社会デザイン工学科 准教授 博士（工学）（正会員）

*3 福岡大学大学院 工学研究科 建設工学専攻（学生会員）

*4 株式会社ヤマウ 技術本部 技術研究所 所長（正会員）

表-2 コンクリートの配合

BFS	スランプ [cm]	空気量 [%]	BFS/B [%]	W/B [%]	s/a [%]	単位量[kg/m³]					
						W	B		S	G	Ad [×B%]
							N	BFS			
6000	19.5	2.7	30	39	40	165	296	127	702	1121	1.90
	19.5	2.2	50				211	211	699	1118	
	20.5	2.6	70				127	296	697	1115	
4000	18.0	2.4	30				296	127	702	1121	
	20.0	1.9	50				211	211	699	1118	

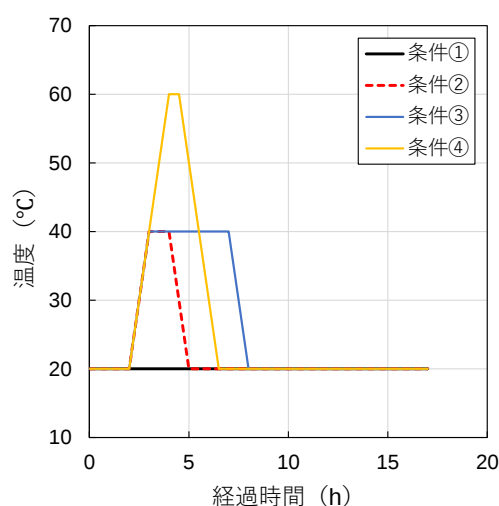


図-1 蒸気養生条件

石を使用した。また、単位水量は 165 kg/m³、水結合材比は 39%と一定とし、BFS の置換率は 30～70%とした。目標スランプおよび空気量はいずれも 18.0±2.5 cm および 2.0±1.5%とし、高性能減水剤 (Ad) で調整した。

2.2 蒸気養生条件

図-1 に蒸気養生条件を示す。蒸気養生の養生方法は、以下の 4 条件で行った。なお、条件①については 20°C の室内で養生を行った。

条件①：20°C (17h) (積算温度 340°C・h)

条件②：20°C (2h) → 昇温 20°C/hr (1h) → 40°C (1h) → 降温 20°C/h (1h) → 20°C (12h) (積算温度 420°C・h)

条件③：20°C (2h) → 昇温 20°C/hr (1h) → 40°C (4h) → 降温 20°C/h (1h) → 20°C (9h) (積算温度 540°C・h)

条件④：20°C (2h) → 昇温 20°C/hr (2h) → 60°C (0.5h) → 降温 20°C/h (2h) → 20°C (10.5h) (積算温度 540°C・h)

また、上記に示す条件①～④のいずれにおいても、蒸気養生終了後すぐに供試体を脱型し、その後は 2.3 節で後述する各種試験の方法に応じて気中養生 (温度 20±2°C、相対湿度 60±5%) あるいは水中養生 (温度 20±2°C の室内環境) にて供試体を管理した。

表-3 には、作製した供試体の水準を示す。

表-3 供試体の水準

配合	積算温度[°C・h]			
	340	420	540 (40°C)	540 (60°C)
BFS6000 30%	○	○	○	○
BFS6000 50%	○	○	○	○
BFS6000 70%	○	-	-	○
BFS4000 30%	○	○	○	○
BFS4000 50%	○	○	-	○

2.3 試験方法

(1) 凝結試験

凝結試験は JIS A 1147 に従い、凝結始発および終結時間を求めた。

(2) 圧縮強度試験

JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠して材齢 17 時間、14 日および 28 日で測定を行った。試験には Φ100×200 mm の円柱供試体を用い、各種コンクリートにおいて 3 体ずつの圧縮強度を測定した。なお、材齢 17 時間 (脱型直後に試験を実施) 以外の材齢 14 日および 28 日の供試体に関して、材齢 14 日は蒸気養生終了後に所定材齢まで気中養生とし、材齢 28 日は蒸気養生終了後に所定材齢まで水中養生とした。

(3) 静弾性係数試験

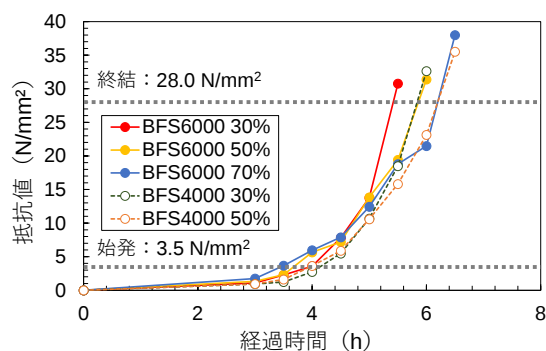
JIS A 1149 に準拠して測定を行った。静弾性係数試験は圧縮強度試験と並行して実施し、圧縮強度試験に用いた Φ100×200 mm の円柱供試体の側面に事前にひずみゲージを対面となるよう 2 箇所に貼り付けてデータロガーによりひずみの測定を行った。

(4) 自己収縮・乾燥収縮試験

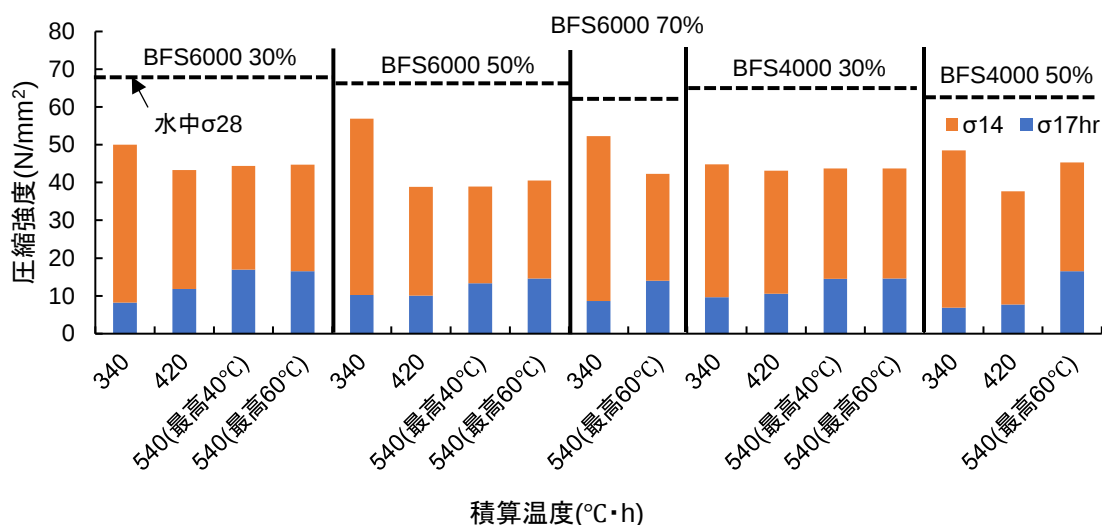
自己収縮試験は、JCI-SAS2「セメントペースト、モル

表－4 凝結の始発から終結までの経過時間

配合	経過時間 (h)
BFS6000 30%	1.9
BFS6000 50%	2.2
BFS6000 70%	2.8
BFS4000 30%	1.7
BFS4000 50%	2.3



図－2 凝結試験の結果



図－3 圧縮強度の比較

タルおよびコンクリートの自己収縮および自己膨張試験方法（案）」に準じて行った。自己収縮試験は、100×100×400 mm の角柱コンクリートを打設する際に、ひずみゲージをコンクリート中央部に埋設して、蒸気養生開始時からデータロガーによりひずみの計測を行った。蒸気養生終了後は、気中養生にて供試体を静置し、引き続きひずみの測定を行った。自己収縮試験は各配合 1 体ずつとした。

一方、乾燥収縮試験では、各配合 2 体ずつ作製し、100×100×400 mm の角柱供試体を用いて、蒸気養生終了後に 7 日間の水中養生を行った後、気中養生にて供試体を静置し、収縮ひずみの測定を開始した。ひずみゲージは、打設の際にコンクリート中央部に埋設した。本試験では、自己収縮は打設後、乾燥収縮は 17 時間の蒸気養生後を基点として測定を継続したが、配合ごとに膨張のデータが測定できていないものもみられたため、収縮が始まったところからのデータで考察を行っている。

(5) 塩水浸漬試験

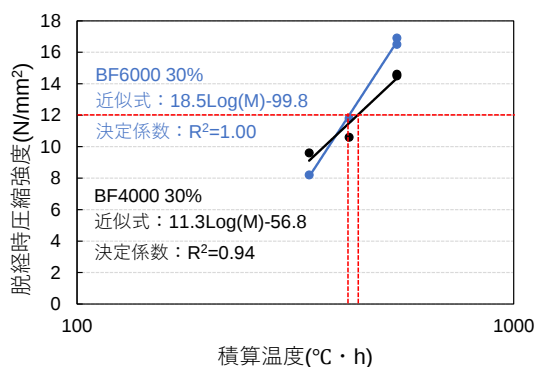
試験には、蒸気養生終了後に材齢 28 日まで水中養生

を行った Φ100×200 mm の円柱を高さ方向の中央部で半分カットし Φ100×100 mm としたものを供試体として用いた。カット面を塩水浸透面とし、それ以外の箇所（側面および底面）は塩水に触れないようにアルミテープで被覆した。その後、Cl 濃度 3% の NaCl 水溶液内に 91 日間浸漬を行った。試料は、各供試体の塩水浸透面における任意の 4 点を選び、それぞれ表層から 0～10 mm, 10～20 mm, 20～30 mm, 30～40 mm の深さ範囲をコンクリート用ドリルにより削ったものを採取した。全塩化物イオン量の算出は、JISA 1154「硬化コンクリートに含まれる塩化物イオン試験方法」に準拠して、電位差滴定装置により測定を行った。

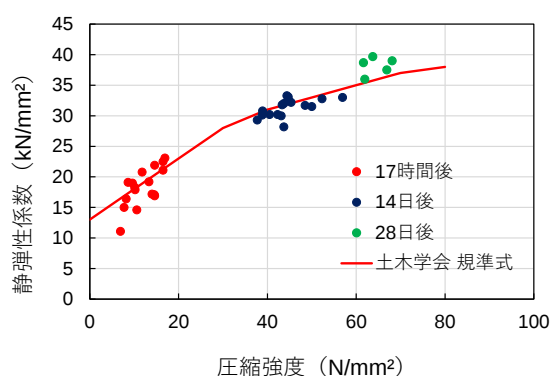
3. 結果および考察

3.1 凝結

表－4、図－2 には、凝結開始の始発から終結までの経過時間および抵抗値の経時変化を示す。凝結時間は、BFS が増加するにしたがって長くなり、またブレーン値が大きいものほど短くなる結果となった。本結果からも BFS を多量置換した場合には凝結時間が長くなることが確認



図－4 圧縮強度と積算温度の関係



図－5 静弾性係数と圧縮強度の関係

できた。

3.2 圧縮強度と積算温度の関係

図－3 は、各配合における一次養生終了後の 17 時間強度および材齢 14 日の圧縮強度を示す。なお、参考として 28 日間水中養生を行った圧縮強度（図中の点線）も併せて示す。17 時間後の圧縮強度は、いずれの配合においても積算温度が大きくなるにしたがって高くなる結果となった。また、最高温度が異なるが積算温度が同じ場合では、同等の圧縮強度が得られることがわかった。材齢 14 日の圧縮強度において、蒸気養生を行っていない積算温度 340°C・h に比べて蒸気養生を行った積算温度 420°C・h および 540°C・h が全体的に小さい傾向にある。その要因として初期水和の進行に違いがあった可能性があると考えているがこれに関してはより詳細な研究および検討が必要である。

次に、PCa の脱型時に必要な 17 時間強度を 12 N/mm² と設定し^{2), 3)}、その値を満足する積算温度を次に示す方法で算出した。図－4 において配合ごとに x 軸に積算温度と y 軸に圧縮強度を示し、その関係式から $y=12 \text{ N/mm}^2$ になる時の x（積算温度）を求めた。近似式は、既往研究にて谷田貝⁴⁾らが報告した式(1)、(2)を参考にし、本実験の実験値を近似した近似線および近似式を併せて図中に示している。なお、積算温度は、各種コンクリートが脱

表－5 PCa 脱型時に必要な積算温度

配合	12 N/mm² に必要な 積算温度[°C・h]
BFS6000 30%	409.8
BFS6000 50%	437.4
BFS6000 70%	444.1
BFS4000 30%	431.0
BFS4000 50%	445.9

型時に 12 N/mm² を得るために蒸気養生によって与える必要のある温度ということを図し、恒温装置の槽内温度で整理した。

$$f'_c = a \log(M) + b \quad (1)$$

$$M = \sum(\theta \cdot T) \quad (2)$$

ここに、 f'_c ：コンクリートの圧縮強度（N/mm²）、 a および b ：実験係数、 M ：コンクリートの積算温度（°C・h）、 θ ：恒温装置の槽内温度（°C）、 T ：時間（h）

表－5 には、17 時間で圧縮強度 12 N/mm² に達するまでに必要な積算温度を示す。この結果、目標強度を満足するために必要な積算温度は、ブレン値が小さく、スラグ置換率が高いものほど高くなる結果となった。BFS を高置換した場合でも蒸気養生によって必要な温度を与えることで、十分に目標強度に到達できることが可能であった。

3.3 静弾性係数

図－5 には、各試験材齢における静弾性係数と圧縮強度の関係を示す。17 時間後、14 日後においては蒸気養生＋気中養生、28 日後は水中養生の結果である。同図には、土木学会が提案する標準式を併せて標記している⁵⁾。土木学会の標準式と比較すると、17 時間後および 14 日後の圧縮強度は標準式と同等であるとわかる。また、蒸気養生終了後に水中養生を行った材齢 28 日では、圧縮強度に対する静弾性係数が大きいことがわかった。

3.4 積算温度の違いが収縮に与える影響

図－6 には、積算温度 340°C・h における各配合の自己収縮ひずみの経時変化を示す。自己収縮ひずみは、BFS 置換率が増加するにしたがって大きくなる結果となった。また、同一の BFS 置換率で比較すると、BFS のブレン値が大きいものほど自己収縮ひずみが大きくなる傾向となった。スラグ反応率に応じて自己収縮量が大きくなるという既往の研究⁶⁾の通り、本試験においても同様の結果を確認できた。

図－7～図－9 には、各積算温度の自己収縮ひずみの経時変化を示す。蒸気養生を行った場合、積算温度や最高

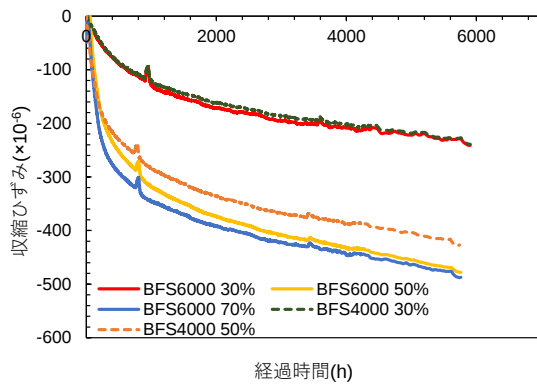


図-6 自己収縮[積算 340°C・h (最高 20°C)]

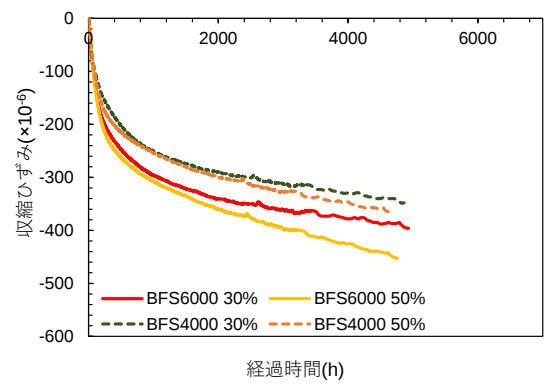


図-7 自己収縮[積算 420°C・h (最高 40°C)]

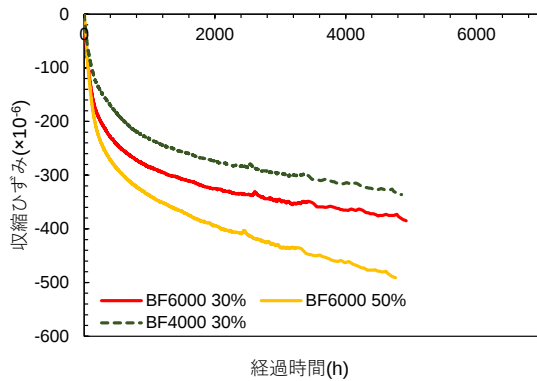


図-8 自己収縮[積算 540°C・h (最高 40°C)]

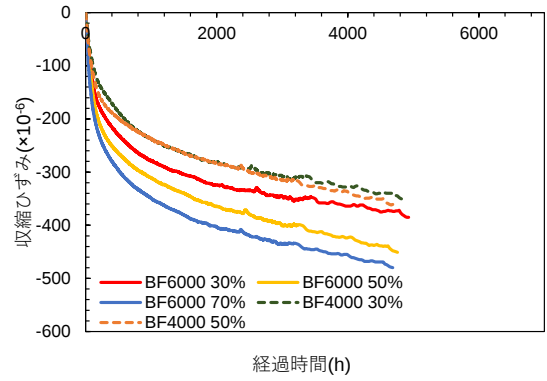


図-9 自己収縮[積算 540°C・h (最高 60°C)]

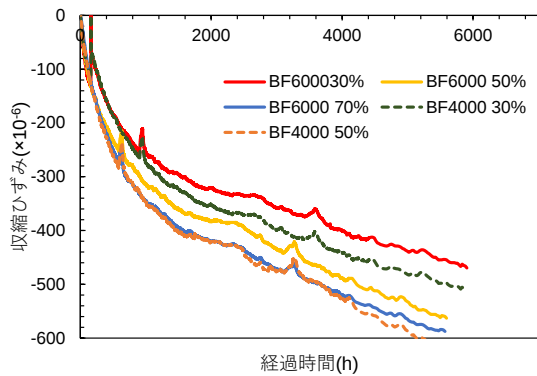


図-10 乾燥収縮[積算 340°C・h (最高 20°C)]

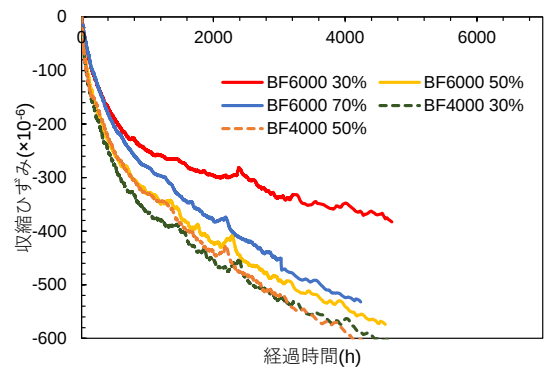


図-11 乾燥収縮[積算 540°C・h (最高 60°C)]

温度にかかわらず、BFS30%において BFS4000 プレーンおよび 6000 プレーンともに図-6 よりも自己収縮ひずみが顕著に大きくなった。一方、BFS50%や BFS70%では、いずれのプレーン値においても図-6 と比較して自己収縮ひずみが顕著に大きくなるということとはなかった。また、同一の BFS 置換率における BFS のプレーン値の違いによる自己収縮ひずみの差は、積算温度や最高温度にかかわらず、図-6 と同様に BFS のプレーン値が大きいものほど自己収縮ひずみが大きくなった。

以上の結果から、本実験で検討した測定期間の範囲における自己収縮ひずみは、BFS のプレーン値にかかわらず、BFS の置換率が 30%の場合に蒸気養生の影響を強く

受けるが、それに比べ BFS の置換率が 50%および 70%では蒸気養生の影響が小さくなることがわかった。

図-10 には、積算温度 340°C・h における乾燥収縮ひずみの経時変化を示す。乾燥収縮は、BFS の置換率が増加するにしたがって大きくなる傾向を示し、BFS30%から BFS50%にかけて顕著に大きくなる結果となった。

図-11 には、積算温度 540°C・h の最高温度 60°C における乾燥収縮を示している。6000 プレーン BFS30%を除く、いずれもが同等の乾燥収縮ひずみとなった。積算温度の違いで比較すると、BFS50%以上になると収縮ひずみに大差がなく、BFS を多量置換した場合でも収縮ひずみが顕著に大きくなるといったことは確認されなかった。

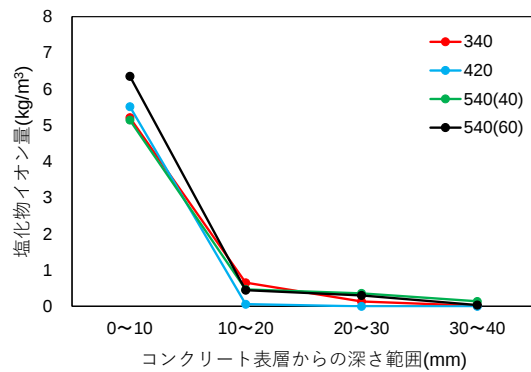


図-12 BFS6000 30%の塩化物イオン量

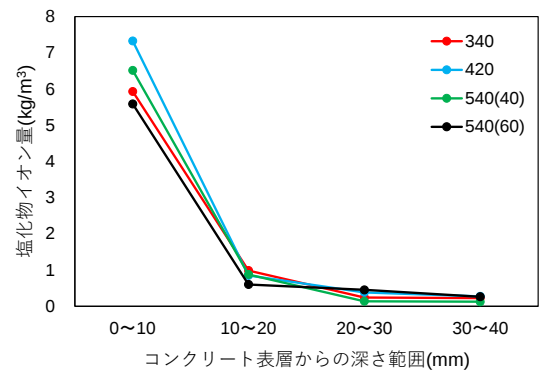


図-13 BFS6000 50%の塩化物イオン量

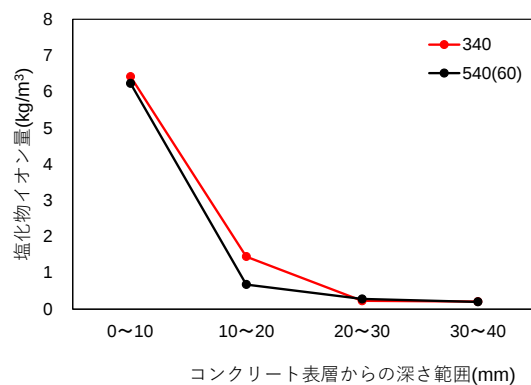


図-14 BFS6000 70%の塩化物イオン量

また、積算温度 $420^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ および $540^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ の最高温度 40°C については、いずれも蒸気養生の積算温度や最高温度の違いでデータの傾向が異なり、確実性が乏しいため、より詳細な検討の必要がある。

3.5 塩化物イオン量

図-12～図-14 は、一例として 6000 プレーンにおける配合ごとの全塩化物イオン量分布を示す。いずれの配合においても積算温度や最高温度の明確な違いは確認されなかった。また、BFS30%～BFS70%での塩化物イオン量の浸透程度は同等であった。すなわち、BFS 置換率による塩化物イオン浸透性の違いあるいはそれに対する蒸気養生の影響はみられなかった。

4. まとめ

本研究より得られた知見を以下に記す。

- (1) 17 時間後の圧縮強度は、いずれの配合においても積算温度が大きくなるにしたがい高くなった。一方、材齢 14 日の圧縮強度は、蒸気養生を行っていない積算温度 $340^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ よりも蒸気養生を行った積算温度 $420^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ および $540^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ の方が全体的に小さくなる傾向となった。これに関して、蒸気養生の有無による初期水和の進行の違いが影響していると推

察するが、より詳細な検討が必要と考える。

- (2) BFS を多量置換したケースにおいて、最高温度が異なる場合でも積算温度が同等の場合には、圧縮強度が同等となった。
- (3) BFS30%では、蒸気養生条件によって自己収縮、乾燥収縮に強く影響を受けるが、BFS50%以上になると蒸気養生条件の影響は小さかった。
- (4) 本研究で検討した配合および蒸気養生条件において、塩化物イオン浸透性に違いはみられなかった。

謝辞

本研究の遂行ならびに各種検討の一連の成果は、株式会社ヤマウと実施した共同研究によって得られたものである。ここに付記し、関係者の皆様に深く謝意を表する。

参考文献

- 1) 日本建設連合会：低炭素型コンクリートの普及促進に向けて、<https://www.nikkenren.com/sougou/10thaniv/pdf/05-06-20.pdf>（閲覧日：2024 年 6 月 10 日）
- 2) 社団法人日本建築学会：高強度コンクリート施工指針（案）・同解説，2005
- 3) 社団法人日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 10 プレキャスト鉄筋コンクリート工事，2003
- 4) 谷田貝敦，齋藤淳：冬期蒸気養生がコンクリートの圧縮強度および中性化に及ぼす影響に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol. 3，No. 2，pp. 277-282，2021
- 5) 公益社団法人 土木学会 コンクリート委員会：コンクリート標準示方書（設計編），2017
- 6) 伊代田岳史，兼安真司，壇康弘：高炉セメント中のスラグ粉末度と石こう量が水和発熱と自己収縮特性に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol. 29，No. 1，pp. 99-104，2007