

# 論文 多量の高炉スラグ微粉末と早強ポルトランドセメントを併用した PCa 製品の各種耐久性評価

瀬上 翔太\*1・相内 豪太\*2・水野 克基\*3・岩城 一郎\*4

**要旨**：実用性と汎用性を兼ね備えた低炭素型プレキャストコンクリート (PCa) 製品の製造方法を見いだすことを目的に、高炉スラグ微粉末 (55%) と早強ポルトランドセメント (45%) を併用した配合を対象として、養生条件をパラメータとした実物大 PCaL 型擁壁を作製し、強度発現性、表層品質および各種耐久性を評価した。その結果、高炉スラグ微粉末を多量に混和した配合においても脱型強度を十分に満足し、従来品に比べて表層品質や各種耐久性が向上することを明らかとした。また、保湿養生を施すことで遮塩性が向上すること、AE 剤の混和により塩分環境下においても十分な凍結融解抵抗性を確保し得ることを明らかとした。

**キーワード**：高炉スラグ微粉末、早強ポルトランドセメント、プレキャストコンクリート、耐久性

## 1. はじめに

近年、カーボンニュートラル社会の実現に向けてあらゆる産業において CO<sub>2</sub> 排出量削減が喫緊の課題となっている。コンクリート分野においては、コンクリート製造時における CO<sub>2</sub> 排出量の大部分がセメント製造に由来しているため、高炉スラグ微粉末 (以下、BFS) やフライアッシュといった産業副産物をポルトランドセメントの代替材料とした低炭素型コンクリートの利活用が進められている<sup>1)</sup>。また、この種の副産物を混和したコンクリートは、潜在水硬性やポゾラン反応により、長期強度増進効果を有することや各種材料劣化に対する抵抗性が向上することが報告されており<sup>2)</sup>、コンクリート構造物の高耐久化・長寿命化が見込めるため、維持管理に要する CO<sub>2</sub> 排出量の低減、あるいは更新の頻度の低減に寄与することが期待される。このように、副産物を混和したコンクリートを利用することは CO<sub>2</sub> 排出量の削減に寄与するだけでなく、ライフサイクルコストの観点からも経済性に富んでおり、今後コンクリート構造物に積極的に導入していく必要がある。

他方、建設現場における労働人口の高齢化や減少も深刻な課題となっている。この課題に対応するため、国土交通省では i-Construction のトップランナー施策の一環として、建設現場における省力化・省人化、工期短縮、働き方改革への寄与が期待される方策が推進されている。その中でも、工場で製造されるプレキャストコンクリート (PCa) の利用拡大は、生産性向上に寄与する重要な手段として位置付けられており、PCa の活用が加速している。また、PCa の標準化や効率的な製造技術の導入も進められており、より一層の普及が期待される。

さらに、PCa においても前述の低炭素型コンクリートの検討が進められており、カーボンニュートラルの実現と働き手不足の解消に寄与するものとして注目されている。加えて、工場での安定した製造であることから多量の副産物を混和したコンクリートを一定の品質で製造可能であり、特に BFS を多量混和した PCa の開発が各機関で進められている<sup>3)</sup>ものの、検討事例が少なく製造時期を考慮した適切な配合選定や、部材レベルでの適切な養生方法および耐久性については十分な検討がなされていない。

そこで本研究では、実用性と汎用性を兼ね備えた低炭素型プレキャストコンクリート製品の実用可能な製造方法を見いだすことを目的に、養生条件をパラメータとした多量の BFS と早強ポルトランドセメント (以下、H) を併用した実物大 PCaL 型擁壁を冬期に実機プラントにて製造し、強度発現性、コンクリートの表層品質、および各種耐久性を実験的に検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 コンクリートの配合と養生条件

表-1~2 に本検討で使用したコンクリートの配合、使用材料を示す。コンクリートの配合条件は、プラントで通常出荷されている普通ポルトランドセメントを使用した配合 (N) を基準とし、N のセメントの内 45% を H、55% を BFS (4000) に変更した配合 (HB) の 2 配合とした。製造後の養生方法については、全条件で通常出荷と同様に蒸気養生を施し、翌日に脱型した。HB については、2 次養生による表層品質向上を期待して脱型直後に試験供試体の鉛直面へ 3 分間散水し、その後保水シート

\*1 日本大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (学生会員)

\*2 日本大学 工学部土木工学科研究員 修士(工学) (正会員)

\*3 丸栄コンクリート工業(株) (正会員)

\*4 日本大学 工学部土木工学科教授 博士(工学) (正会員)

表-1 コンクリートの配合

ID	W/C (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						混和剤 (B×%)		Slump/flow (cm)	Air (%)	C.T (°C)
				W	B(H+BFS)		石灰石微粉末	S	G	高性能減水剤	AE剤			
					H	BFS								
N	39.5	39.5	41.0	165	418	-	44	710	1038	0.850	-	50×50	1.7	14.7
HB	78.2	35.1	40.0		211	259	-	692	1043	0.600	-	22.0	1.4	14.0
HB-P					225	275	-	642	998		-	22.0	5.8	15.6
HB-AE	73.3	33.0	39.2		225	275	-	642	998	0.008	-	22.0	5.8	15.6

表-2 使用材料

材料名	種類・品質・産地など	密度(g/cm <sup>3</sup> )
セメント	普通ポルトランドセメント	3.15
	早強ポルトランドセメント	3.13
細骨材	山砂, 静岡県菊川市産, 粗粒率2.80	2.63
粗骨材	川砂利, 大井川中流域産, 粗粒率6.60	2.64
混和材	高炉スラグ微粉末 (粉末度4000)	2.87
	石灰石微粉末 (200メッシュ)	2.72
混和剤	高性能減水剤, ポリカルボン酸系化合物	-
	高性能減水剤(粘性低減), ポリカルボン酸系化合物	-
	AE剤, アルキルエーテル型陰イオン界面活性剤	-

を鉛直面に敷設し、材齢 14 日まで保湿養生 (P) を行った条件 (ID:HB-P で写真-1)、耐凍害性を確保する目的で AE 剤を混和した条件 (HB-AE) についても併せて検討した。なお、蒸気養生後に脱型した供試体はいずれも雨掛かりのない屋内に存置した。

## 2.2 供試体概要および打込み方法

図-1 に供試体概要を示す。試験供試体は高さ 2000mm×幅 1998mm×底版幅 1300mm の L 型擁壁とした。コンクリートの製造はプラントで通常出荷されている L 型擁壁の製造方法と同様とし、写真-2 に示すように型枠には鋼製型枠を使用し、底版側を打込み面とした。なお締固めは鋼製型枠に振動機を固定し振動を与える型枠振動と棒振動によって行い、型枠振動には低周波振動機 (出力 1200W) を用い、周波数 230Hz, 振動数 115Hz とし、棒振動に用いた振動機は、振動部 φ43mm×345mm で振動数 230Hz とした。蒸気養生はコンクリート打込み後、打込んだ状態を保持したまま養生シートで覆い、ホースを用いて蒸気を供給することにより実施し、約 4 時間前置きを取った後に、20°C/h の昇温速度で槽内温度が 45°C となるまで昇温し 2.5 時間保持、その後は自然放冷とした。供試体は養生条件によらず材齢 18 時間で脱型した。なお、製造は 2024 年に静岡県掛川市内の屋内 (工場内) にて行い、製造時期は自己発熱および養生温度による強度発現が最も厳しいと想定される 2 月とした。供試体内部の温度は、打込み～脱型時まで熱電対を用いた計測を (図-1 緑丸位置で底版面から深さ 250mm, たて壁面から深さ 100mm) 実施し、蒸気養生シート内温度は (写真-2 黒丸位置) で実施した。ただし、N は 2 月 6 日、HB、HB-P は 2 月 7 日、HB-AE は 2 月 8 日にそれぞれ

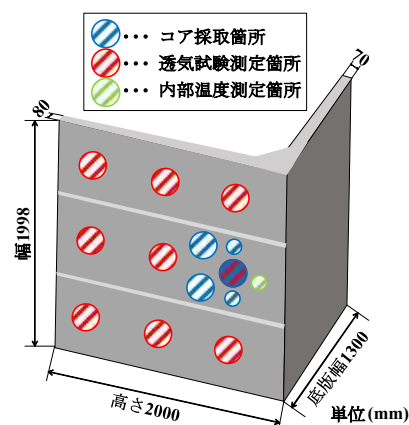


図-1 供試体概要



(a) 散水状況 (b) シート敷設状況

写真-1 保湿養生状況



写真-2 L型擁壁製造

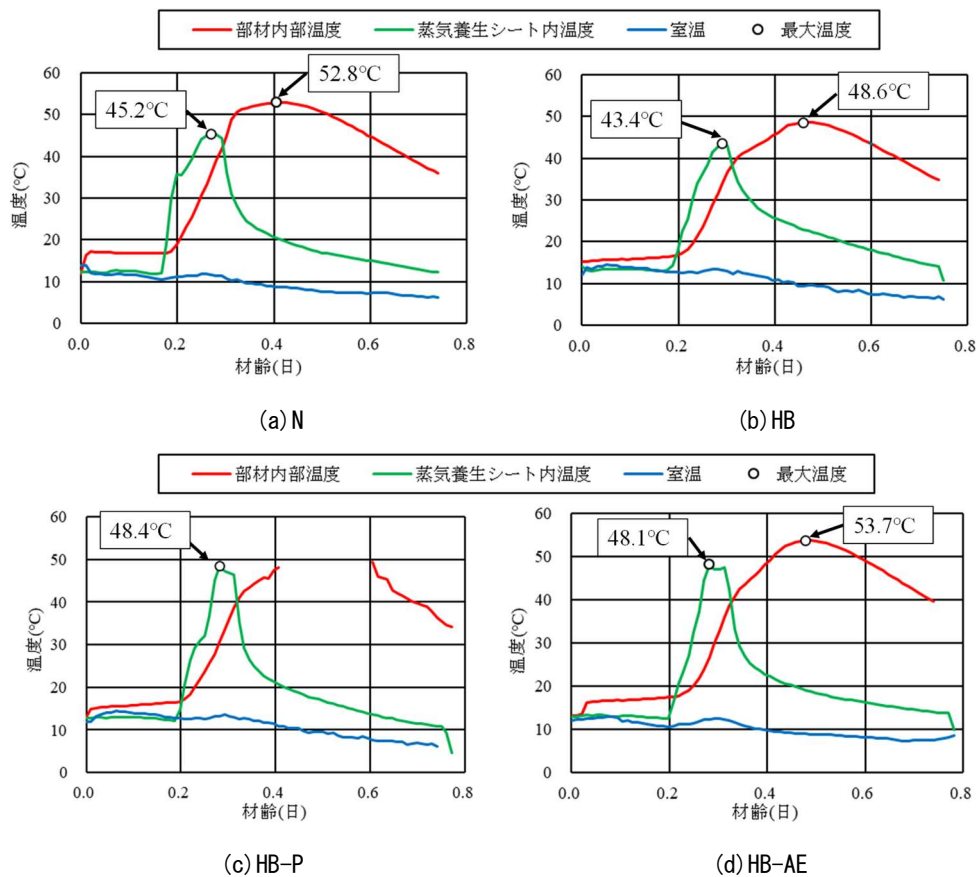


図-2 L型擁壁内部の温度履歴

れ打込み，打設時の工場内温度は 12°C～14°Cであった。

### 2.3 実験項目

検討項目は，強度発現性，表層品質，耐久性の項目で行い，強度発現性は材齢 1，14，28，56 日の圧縮強度試験で評価した。表層品質はトレント法による透気試験で評価し，測定位置は図-1 中の赤丸位置，材齢 28，56，182 日の 3 材齢で実施した。耐久性試験はいずれも材齢 28 日時点で L 型擁壁からコアを採取し（図-1 中青丸位置），材齢 35 日で試験を実施した。試験項目は，ASTM C672 による凍結融解試験（試験媒体に 3%NaCl 水溶液を使用），コンクリート表面を 3%NaCl で湛水させ，40°C環境で 91 日間促進させる塩分浸透試験，気泡間係数測定（リニアトラバース法）とした。なお，塩分浸透試験では促進終了後，試験面から 3mm ピッチで 30mm まで粉碎し，JIS A 1154 のイオンクロマトグラフ法により塩化物イオン濃度を測定した。

## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 温度履歴

図-2 に L 型擁壁内部の温度履歴を示す。測定箇所は部材内部温度，蒸気養生シート内温度および工場内の温度（室温）の 3 箇所であり，図中には部材内部温度と蒸気養生シート内温度の最大値を併記している。なお，HB-

P において 0.4～0.6（日）の部材内部温度データが取得されていなかったため，該当期間のデータおよび最高温度の記載を行っていない。図より，N では他の配合に対し顕著な温度上昇が観察され，部材内部温度が最高温度に達する時間が明らかに早い結果であった。これは，N では高温環境下における蒸気養生によって水和反応が促進され，この水和熱により内部温度の上昇が早期に生じたものと考えられる。

一方，HB においては，N と比較して内部温度の上昇が相対的に緩やかに進行していることが確認された。早強ポルトランドセメントのような早強性のセメントはエーライト（C<sub>3</sub>S）の含有量が多いため，発熱速度や発熱量が大きいことが知られているが，コンクリートに BFS を多量に用いる場合には初期の水和反応が停滞することで発熱速度が減少することが報告されている<sup>4)</sup>。本検討においては，高炉スラグ微粉末（55%）と早強セメント（45%）を併用することでこれらの反応が相互に影響し，発熱速度や発熱量が N に比べ抑制されたと推察されるが，この種の評価は今後の検討課題としたい。

### 3.2 強度発現性

図-3 に圧縮強度試験結果を示す。なお，図中における材齢 28 日については標準水中養生を施した供試体の結果を示しており，HB および HB-P については同一パッ

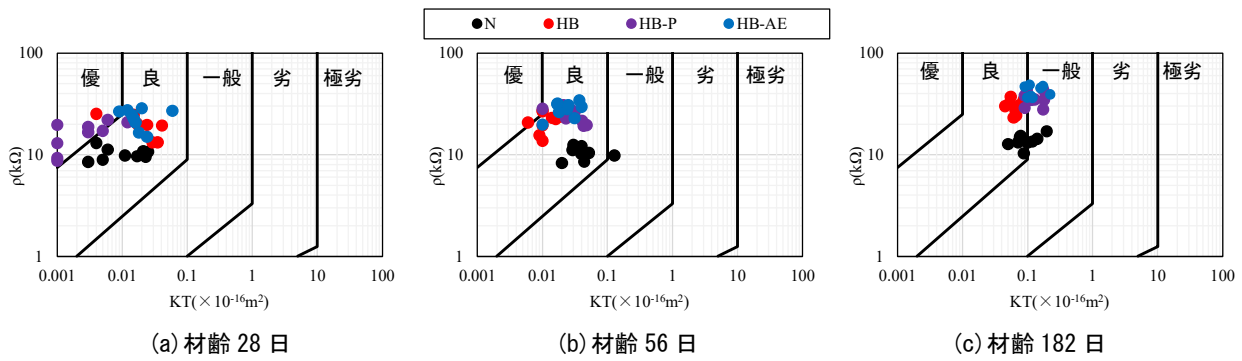


図-4 表層品質試験結果

チから採取したため結果は同一である。また、その他の材齢はいずれもL型擁壁供試体と同様の養生を施した供試体の結果を示している。図より、材齢1日時点の圧縮強度はNで24.4N/mm<sup>2</sup>、HBで22.9N/mm<sup>2</sup>、HB-Pで22.9N/mm<sup>2</sup>、HB-AEで21.7N/mm<sup>2</sup>と全配合で脱型強度(12N/mm<sup>2</sup>)を満足する結果であり、BFSを55%と多量に混和した配合を用いて冬期にPCa製品を製造する場合には、蒸気養生を施し初期強度発現を促進することで、脱型強度を十分に満足することを明らかとした。また、今回の製造実験は工場内温度12°C~14°Cの冬期に行っていることから、本検討配合は夏期の高湿環境下においては、蒸気養生を施さなくても脱型強度を満足する強度発現が可能であることが示唆された。

標準水中養生を行った材齢28日の圧縮強度は、HBとHB-PがNに比べ高いことから、BFSを55%置換した場合であっても、Hを併用することで従来配合よりも高い強度発現性が得られた。

材齢14日以降では、HB-AEは空気量を5.8%確保しているため他の配合と比して強度発現性がやや低いものの、いずれの配合においてもNと同程度の強度が得られる結果であった。また、保湿養生を行った条件(HB-P)では材齢14日以降の強度増進が顕著であり、材齢56日時点では70.4N/mm<sup>2</sup>と全条件で最も高い強度が得られる結果であった。これは、HB-P以外の条件では蒸気養生による初期水和水が進む一方で、初期に多量の自由水が消費されたことにより強度増進が鈍化したものと考えられるが、HB-Pでは蒸気養生後に保湿養生を施すことで水和水反応に必要な水分がコンクリート中に供給されたため、長期的な強度増進が得られたものと考えられる。

### 3.3 表層品質

図-4に表層品質試験結果を示す。材齢28日の時点では、HB-Pが「優」に、それ以外の配合は「良」の範囲にプロットされる結果であり、前述の強度発現性同様に、保湿養生による効果が示された。その後は材齢が進むに伴い透気係数および電気抵抗率が增大する傾向を示し、材齢56日および182日時点では、全ての配合で評価が

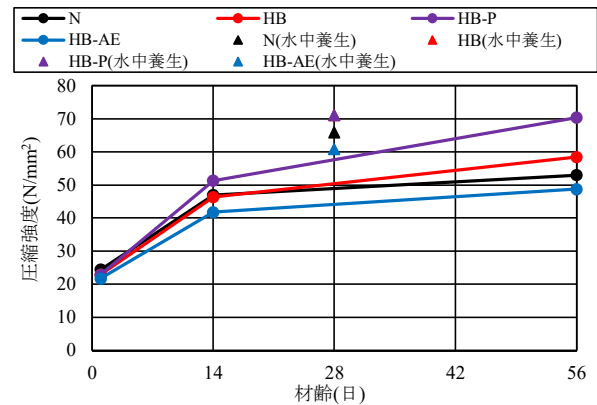


図-3 圧縮強度試験結果

「良」もしくは「一般」の範囲にシフトした。これは、材齢経過に伴いコンクリート表面の乾燥が進行し、硬化プロセス中に生成された微細な毛細管空隙中の水分が逸散したことが要因と考えられ、毛細管の閉塞が減少することで気体移動経路が増加するため、透気係数および電気抵抗率が增大したものと推察される<sup>9)</sup>。さらに、HBに関してはBFSの水和反応の進行に伴いコンクリート中の自由水が消費されたためNと比して、電気抵抗率が増加したものと考えられる。

材齢182日以降における長期材齢においてコンクリートの表層品質は、材齢182日時点でコンクリート中の自由水の逸散や消費がほぼ収束するため、それ以降の大きな変化は生じないと推察される。

### 3.4 耐久性

#### (1) 塩分浸透抵抗性

図-5に塩分浸透試験結果を示す。図より、試験面から10mm以深に着目すると、HBは養生方法にかかわらず、いずれも塩化物イオンがほとんど浸透しておらず、従来配合(N)よりも明らかに塩分浸透抵抗性が向上する結果であった。これは、BFSの水和反応が進行することで、コンクリート内部における毛細管空隙量が減少し、塩化物イオンの拡散経路を物理的に遮断したことや、BFSに含まれる酸化カルシウム(CaO)や酸化アルミニ

ウム ( $Al_2O_3$ ) が水和することでフリーデル氏塩が生成され塩化物イオンを化学的に固定化したことで塩分浸透抵抗性が向上したのと考えられる<sup>6)</sup>。また、HB-P で表層部の塩化物イオン濃度が極めて大きい値となっているのは、前述した表層品質試験結果から分かるように、表層が他配合と比してより緻密である為、コンクリート表面に塩化物イオンが蓄積された可能性が考えられる。

次に、図-5の塩分浸透試験結果より、JSCE-G 572-2003に記載の Fick の第 2 法則に基づいた拡散方程式を適用して算出した各条件の見掛けの拡散係数を図-6 に示す。なお、ベースとした N の結果は土木学会コンクリート標準示方書[設計編]に示される予測式よりも大きくなっている。これは、土木学会の予測式が実環境に暴露されたコンクリートをもとに水セメント比と見掛けの拡散係数の関係から算出された回帰式であるのに対して、本試験は浸漬による促進試験を実施しており、より厳しい環境条件下であることが拡散係数に影響しているものと推察される<sup>7)</sup>。そのため、今回はあくまで同一試験条件下での比較として評価した。図より、N に対して HB はいずれも見掛けの拡散係数が大幅に低下していることが確認された。特に、保湿養生を施した HB-P ではその傾向が顕著であり、PCa L 型擁壁に対して蒸気養生後に適切な保湿養生を施すことでコンクリートの塩分浸透抵抗性が向上することを明らかとした。

## (2) 凍結融解抵抗性

図-7 に凍結融解試験結果を示す。なお、N は 30 サイクル時点からスケーリング量が急激に増加し、50 サイクル時点では  $39.0kg/m^2$  であった。一方で、HB はいずれも N よりスケーリングが抑制される傾向が確認されたが、50 サイクル時点での累積スケーリング量は HB-P で  $1.59kg/m^2$ 、HB で  $2.02kg/m^2$  と十分な凍結融解抵抗性を有しているとは言い難い結果であった。これに対し、AE 剤を混和した HB-AE では累積スケーリング量は  $0.43kg/m^2$  と AE 剤を混和することでスケーリング抵抗性が顕著に向上することを明らかとした。

各配合の気泡間隔係数 (図-8) は、N で  $1271\mu m$ 、HB で  $1487\mu m$ 、HB-P では  $1807\mu m$  といずれも  $1200\mu m$  以上であるが、累積スケーリング量を比較すると、N よりも HB が小さく、スケーリングが抑制される傾向が認められた。このスケーリング抵抗性の向上については、硬化コンクリート中における気泡間隔係数の違いだけでなく、前述したように塩分浸透抵抗性が向上したことによりコンクリートマトリクス自体の劣化が抑制され、スケーリングの発生が軽減されるものと考えられる<sup>8)</sup>。

一方、HB-AE は気泡間隔係数が  $251\mu m$  と明らかに小さく、AE 剤を混和したことにより所定のエントレインドエアが連行されたため、スケーリング抵抗性が顕著に

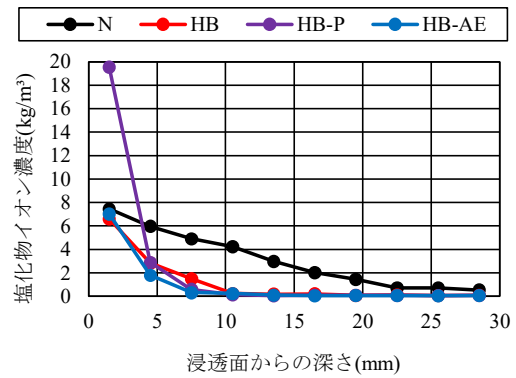


図-5 塩分浸透試験結果

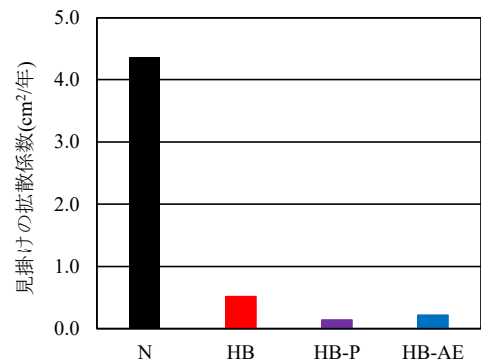


図-6 見掛けの拡散係数

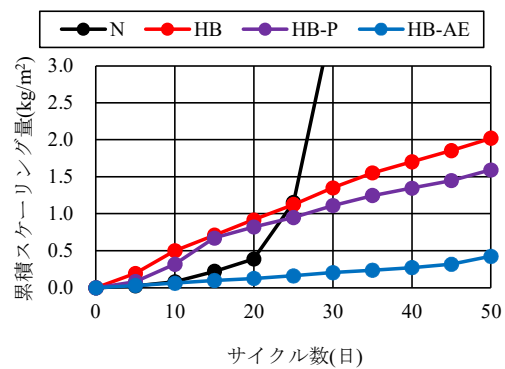


図-7 凍結融解試験結果

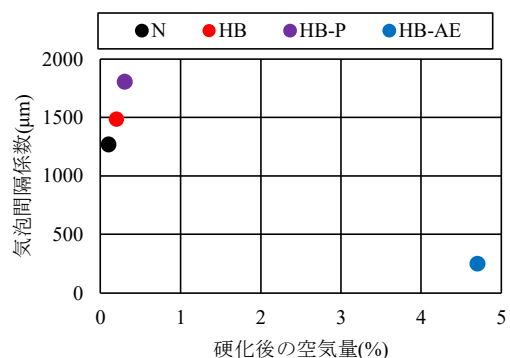


図-8 気泡間隔係数と硬化後の空気量

向上したものと考えられる。これらの結果より、BFSを55%と多量に置換する配合においても、凍結防止剤散布下のような厳しい塩分環境下で供用する場合には、AE剤により十分なエントレインドエアを連行し、凍結融解抵抗性を向上させるといった対策が必要である。

#### 4. まとめ

本研究では、多量の高炉スラグ微粉末と早強ポルトランドセメントを併用した実物大PCaL型擁壁を実機プラントにて製造し、その強度発現性、表層品質、および各種耐久性について実験的に検討した。得られた主な知見を以下に示す。

- 1) 多量の高炉スラグ微粉末と早強ポルトランドセメントを併用した配合では、普通コンクリート配合と比して蒸気養生時における内部の温度上昇速度が抑制されることを明らかとした。
- 2) 高炉スラグ微粉末を55%と多量に置換した配合においても、早強ポルトランドセメントを併用することにより、PCa製品に要求される脱型強度を十分に満足することを明らかとした。また、蒸気養生後における保湿養生が、コンクリートの長期強度増進に寄与することを明らかとした。
- 3) 多量の高炉スラグ微粉末と早強ポルトランドセメントを併用した実物大PCaL型擁壁は、養生方法にかかわらず普通コンクリート製品と同程度以上の表層品質を有することを明らかとした。
- 4) 多量の高炉スラグ微粉末と早強ポルトランドセメントを併用した配合は、普通コンクリートよりも塩分浸透抵抗性が向上することを明らかとし、特に蒸気養生後に保湿養生を施すことにより遮塩性が向上することを示した。
- 5) 多量の高炉スラグ微粉末と早強ポルトランドセメントを併用した配合は、養生方法にかかわらず普通コンクリートよりも凍結融解抵抗性が向上することを明らかとした。また、AE剤の混和により厳しい塩害環境下においても十分な凍結融解抵抗性を確保し得ることを示した。

今後は、夏期において同配合のPCa製品を製造し、養生の有無による強度発現性を評価するとともに、CO<sub>2</sub>排出量の更なる削減を目指し、冬期製造時においても蒸気養生を不要とする配合および養生方法について検討する。また、コンクリート中の温度やひずみを計測し、FEM

解析を通してひび割れ発生リスクの評価や、蒸気養生を施した際の水和反応や発熱に対する、高炉スラグ微粉末と早強ポルトランドセメントの相互効果についての検討を実施し、現場実装に向けた準備を進める予定である。

謝辞：本研究は日本大学工学部と丸栄コンクリート工業株式会社の共同研究で実施された。研究を進めるにあたっては、著者らの所属機関の職員および学生に多大なるご協力を賜りました。また、本論文の執筆に際しては、日本大学工学部の前島拓専任講師に貴重なご意見を頂戴しました。ここに記して感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 大脇英司, 岡本礼子, 松元淳一, 渡邊悟士: 混和材を大量に使用したコンクリートと事例, コンクリート工学, Vol 57, No.1, pp.71-74, 2019
- 2) 萩野正貴, 大脇英司, 白根勇二, 中村英佑: 複数の環境に約2年間曝露した低炭素型のコンクリートの強度と耐久性, コンクリート工学年次論文集, Vol 36, No.1, pp.220-225, 2014
- 3) 堀口賢一, 松元淳一, 河村圭亮, 坂本淳: 低炭素型コンクリートを使用したコンクリート二次製品の開発, コンクリート工学年次論文集, Vol 38, No.1, pp.213-218, 2016
- 4) 國府勝郎, 村田芳樹, 高橋茂, 安斎浩幸: 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの断熱温度上昇と水和性状に関する研究, 土木学会論文集, Vol 396, V-9, pp.39-48, 1988.8
- 5) 氏家勲, 長瀧重義: コンクリートの透気性の定量的評価に関する研究, 土木学会論文集, Vol 1988, No.396, pp.79-87, 1988.8
- 6) 石田哲也, 宮原茂禎, 丸屋, 剛: ポルトランドセメントおよび混和材を使用したモルタルの塩素固定化特性, 土木学会論文集 E, Vol 63, No.1, pp.14-26, 2007.1
- 7) 片山強, 佐々木謙二, 原田哲夫: プレキャストコンクリート製品の耐塩害設計に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol 39, No.1, 2017
- 8) 檀康弘, 伊代田岳史, 兼安真司, 植木康知: 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの凍害および凍結防止剤に対する劣化抵抗性, 土木学会論文集 E, Vol 65, No.3, pp.291-299, 2009.7