

# 報告 PCaPC 部材用環境負荷低減型コンクリートの開発

椎野 碧\*1・中瀬 博一\*1

**要旨:** 筆者らは高炉スラグ微粉末をセメントの70%以上置換した、プレテンション方式のプレキャストプレストレストコンクリートへ適用が可能な初期強度発現性の高い環境負荷低減型コンクリートを検討している。これまで、早強性混和材の使用によって初期強度発現性の向上は確認した。そこで、本報告では耐久性の確認および実部材製造による施工性や構造性能を確認した。その結果、塩分浸透および中性化に対しては十分な抵抗性を有していた。凍結融解抵抗性は早強セメント単味の配合に劣っていた。また、実部材の製造によって、施工性および構造性能は所要の性能を有していた。

**キーワード:** PCaPC, 高炉スラグ微粉末, 耐久性, 実部材製造, CO<sub>2</sub> 排出量削減

## 1. はじめに

地球温暖化対策としてCO<sub>2</sub>排出量の削減が望まれており、建設の分野でも様々な取組みがなされている。そのうちのひとつとして、セメントと比較して材料由来のCO<sub>2</sub>排出量が少ない高炉スラグ微粉末<sup>1)</sup>(以降、BFSと称す)を混和材としてセメントに置換使用することで、セメントの使用量を抑え、コンクリート製造時のCO<sub>2</sub>排出量を削減する取組みがある。今後はカーボンニュートラルの実現に向け、更なる削減が求められると推察される。

そこで、筆者らはBFSをセメントに対して質量比で70%以上置換使用した配合において、早強性混和材の使用によりプレテンション方式のプレキャストプレストレストコンクリート(以降、PCaPCと称す)工法に適用可能な初期強度発現性の高い環境負荷低減型コンクリートについて、各種耐久性、クリープ特性および、実部材製造による構造特性を検討した。本稿ではその結果について報告する。

## 2. 試験概要

### 2.1 コンクリートの仕様

環境負荷低減型コンクリートの仕様を表-1に示す。プレテンション方式のPCaPCへの適用を想定していることから、目標強度は材齢16時間で35N/mm<sup>2</sup>、材齢7日で50N/mm<sup>2</sup>とした。

### 2.2 使用材料

使用材料を表-2に示す。セメントには早強ポルトランドセメントを使用し、BFSは比表面積が6000cm<sup>2</sup>/gのものを使用した。早強性混和材ACはエトリンタイトの生成によってコンクリート強度を増進させるものであり、膨張材EXはエトリンタイト・石灰複合系である。

### 2.3 配合

配合を表-3に示す。配合HCは表-1に示す目標強度を満足する早強セメント単味の配合である。BFSの置換

表-1 コンクリートの仕様

試験項目	実施時期	目標値
①スランブフロー	練上り直後	50±7.5cm
②空気量	練上り直後	4.5±1.5%
③圧縮強度	プレストレス導入時強度	材齢16時間 35N/mm <sup>2</sup>
	設計基準強度	材齢7日 50N/mm <sup>2</sup>

表-2 使用材料

材 料	記号	仕 様
水	W	上水道水
セメント 高炉スラグ 微粉末	H	早強ポルトランドセメント, 密度3.14g/cm <sup>3</sup>
	BFS	高炉スラグ微粉末6000, 密度2.91g/cm <sup>3</sup> SO <sub>3</sub> : 3.06%
早強性 混和材	AC	エトリンタイトの生成を作用機構とする, 粉体, 密度2.55g/cm <sup>3</sup>
膨張材	EX	エトリンタイト・石灰複合系, 粉体, 密度3.08g/cm <sup>3</sup>
細骨材	S	S1 陸砂(茨城県行方市産), 表乾密度2.58g/cm <sup>3</sup> , 吸水率2.58%, F.M.2.59
		S2 砕砂(茨城県鹿沼市産), 表乾密度2.62g/cm <sup>3</sup> , 吸水率1.14%, F.M.2.98
粗骨材	G	碎石(茨城県鹿沼市産), 表乾密度2.64g/cm <sup>3</sup> , 吸水率0.64%, 最大寸法20mm
混和剤	SP	高性能減水剤
	AE	AE剤

表-3 配合

配合名	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )							
			W	B		AC	EX	S		G
				H	BFS			S1	S2	
B70	36	41.3	160	133	311	10	20	338	344	985
B90	32	38.5	160	50	450	30	20	301	305	985
HC	36	42.9	160	444	-	-	-	362	368	985

率は質量比で70%および90%(以降、B70およびB90と称す)とした。ACの使用量は圧縮強度の目標値を満足するようB70で10kg/m<sup>3</sup>、B90で30kg/m<sup>3</sup>とし、細骨材に置換した。EXの使用量は両配合で20kg/m<sup>3</sup>とし、細骨材に置換した。

\*1 ピーエス・コンストラクション(株) 技術本部 技術研究所 材料研究グループ(正会員)

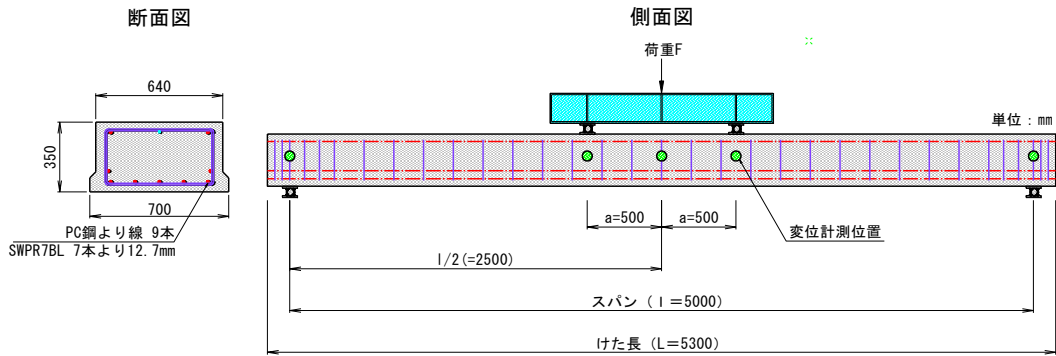


図-1 試験桁 (AS05)

## 2.4 試験項目および試験方法

試験項目および試験方法を表-4 に示す。耐久性の検討では、促進中性化、塩分浸透抵抗性、凍結融解抵抗性およびスケーリングについて実施した。各種耐久性試験の開始材齢は 28 日とし、クリープ荷重開始材齢は配合 HC は 1 日、配合 B70 および B90 は 3 日とした。中性化では促進中性化試験により中性化速度係数を算出した。促進中性化期間は 26 週とした。塩分浸透抵抗性では濃度 10% の塩水に浸せきさせた後、EPMA による面分析結果から塩化物イオンの見掛けの拡散係数を算出した。塩水浸せき期間は HC および B70 は 182 日、B90 は 365 日とした。構造特性の検討では図-1 に示す JIS A 5373 : AS05 桁 (以降、試験桁と称す) を製造し、打込み時の施工性の確認、脱枠後の充填不良の確認の後、曲げ強度試験による性能評価を実施した。試験桁は充実断面とし、PC 鋼材 (SWPR7BL 1S12.7) を 9 本配置し、 $1250\text{N/mm}^2$  のプレストレスをプレテンション方式で導入した。計測項目は荷重荷重と変位であり、荷重荷重はジャッキに取り付けたロードセルによって計測し、変位は図-1 の変位計測位置に両側面で合計 10 個の変位計を取り付け、鉛直変位を計測した。荷重点部と支点部の変位の差をたわみとした。試験桁の荷重方法はロードセルによる荷重制御とし、たわみが 50mm に達した後は変位制御とした。

## 2.5 養生方法

加熱促進養生の温度設定を図-2 に示す。配合 HC は全ての検討で加熱促進養生を実施後、試験材齢まで気中養生とした。配合 B70 および B90 について、耐久性の検討では加熱促進養生を実施後、供試体を脱枠し、3 日間の標準養生を施した後、試験材齢まで室温 20°C、相対湿度 60% で気中養生とした。クリープ特性の検討に用いた供試体および試験桁は試験開始材齢や試験環境の制約より加熱促進養生を実施後、標準養生はせず、試験材齢まで気中養生とした。

## 3. 試験結果

### 3.1 圧縮強度

各種耐久性およびクリープ特性の検討に用いた供試

表-4 試験項目および試験方法

試験項目	試験方法	
圧縮強度	JIS A 1108	
耐久性	促進中性化	JIS A 1153
	塩分浸透抵抗性	JSCE-G 572
	凍結融解抵抗性	JIS A 1148(A 法)
	スケーリング	ASTM-C672
クリープ特性	JIS A 1157	
試験桁の施工性	目視	
構造特性	曲げ強度	JIS A 5373

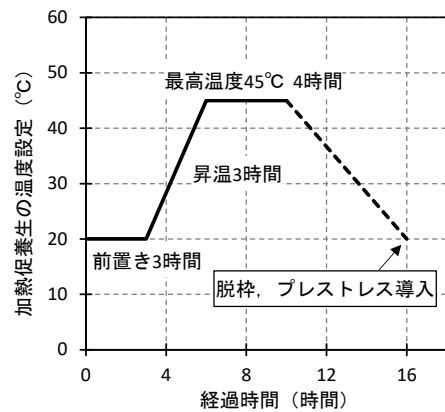


図-2 加熱促進養生の温度設定

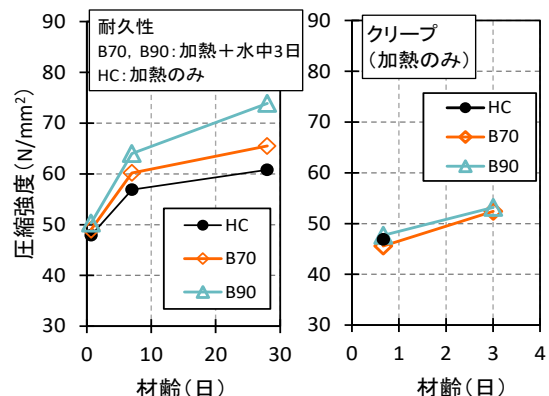


図-3 圧縮強度試験の結果

体と併せて採取した、直径 100mm、高さ 200mm の円柱供試体の圧縮強度を図-3 に示す。圧縮強度試験の試験材齢は耐久性の検討では 16 時間、7 日および 28 日とし、クリープの検討では 16 時間および 3 日とした。すべての供試体で圧縮強度の目標値を満足していることを確認

した。なお、クリープ載荷時の圧縮強度は配合 HC が 46.9N/mm<sup>2</sup>, B70 が 52.4N/mm<sup>2</sup>, B90 が 53.2N/mm<sup>2</sup>であった。

### 3.2 中性化

促進中性化試験の結果を図-4に示す。促進期間26週の中性化深さはHCが0.0mm, B70が8.5mm, B90が10.0mmであり, HCと比較してBFS置換率が大きくなるほど中性化深さも大きくなった。促進中性化試験の結果から, 式(1)<sup>2)</sup>によって算出される実環境下での中性化深さ推定値の経時変化を図-5に示す。図-5より, 実環境下での100年後の中性化深さの推定値はB70が11.02mm, B90が12.96mmとなる。コンクリート標準示方書【設計編】では, 中性化残りを通常環境下では10mm, 塩害環境下では25mm確保とすることで安全側とされていることから<sup>3)</sup>, 通常環境下ではかぶりをB70は21.02mm以上, B90は22.96mm以上, 塩害環境下ではB70は36.02mm以上, B90は37.96mm以上とすることで十分な中性化残りを確保できるものと考えられる。

$$\alpha_{ACT} = A_{ACT} \cdot \sqrt{CO_2 / CO_{2,ACT}} \quad (1)$$

ここに,  $\alpha_{ACT}$ : 二酸化炭素濃度の差を補正した中性化速度係数(mm/√年),  $A_{ACT}$ : 促進中性化試験から得られる中性化速度係数(mm/√年),  $CO_2$ : 実環境の二酸化炭素濃度(=0.042%),  $CO_{2,ACT}$ : 促進中性化試験の二酸化炭素濃度(=5%)

### 3.3 塩分浸透抵抗性

#### (1) 塩分浸透深さ

EPMAによる50mm×50mmの面分析結果を図-6に示す。塩化物イオンの浸透深さは浸せき面から塩化物イオン濃度が一定となった深さとし, HCが12mm, B70が8mm, B90が14mm程度となった。HCと比較して, B70は4mm程度小さくなり, また, 浸せき期間が365日のB90でもHCと同程度であったことから, HCと比較して塩分浸透抵抗性が高くなることが確認された。

#### (2) 見掛けの拡散係数

面分析結果から得られた濃度分布より, Fickの第2法則に基づいた式から算出した見掛けの拡散係数を表-5

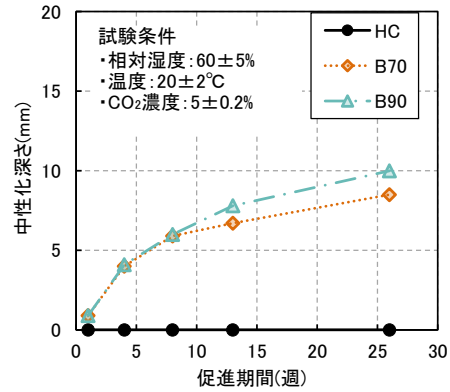


図-4 促進中性化試験の結果

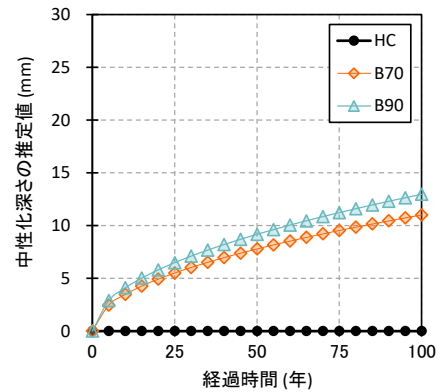


図-5 実環境での中性化深さの推定値

表-5 見掛けの拡散係数

配合	浸せき 期間 (日)	単位容積 質量 (kg/m <sup>3</sup> )	見掛けの 拡散係数 (cm <sup>2</sup> /年)	塩化物イオン濃度 (kg/m <sup>3</sup> )	
				表面	初期
HC	182	2323	0.349	6.70	0.45
B70	182	2305	0.104	6.85	0.42
B90	365	2305	0.112	16.73	0.67

に示す。HCが0.349cm<sup>2</sup>/年, B70が0.104cm<sup>2</sup>/年, B90が0.112cm<sup>2</sup>/年となった。

#### (3) 耐用年数

見掛けの拡散係数を用いて算出した, 鉄筋位置における塩化物イオン濃度が腐食発生限界濃度に到達する期間を耐用年数として表-6に示す。腐食発生限界濃度は「コンクリート標準示方書【設計編】」を参考に, HCは1.81kg/m<sup>3</sup>, B70は2.16kg/m<sup>3</sup>, B90は2.27kg/m<sup>3</sup>とし, B70およびB90は高炉セメントB種の式により算出した。

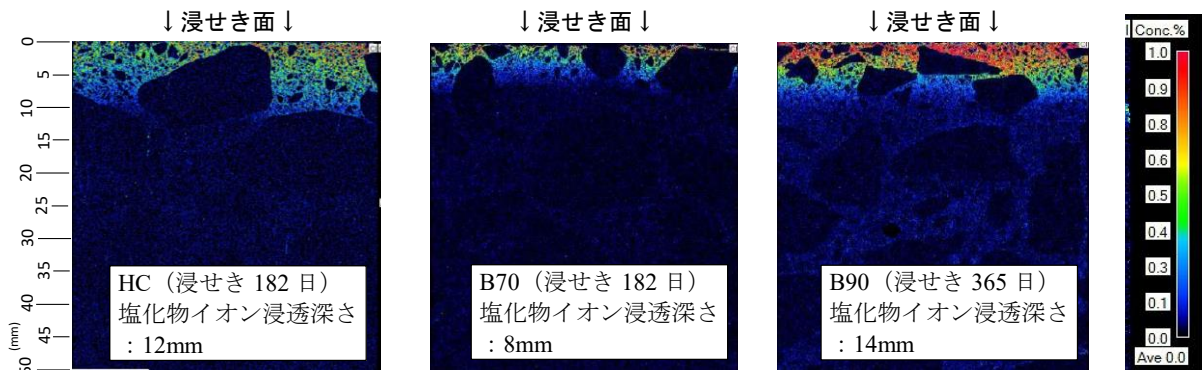


図-6 EPMAによる面分析結果

表-6 耐用年数

配合	見掛けの拡散係数 (cm <sup>2</sup> /年)	かぶり (mm)	腐食発生限界濃度に到達する期間 (年)*		
			飛沫帯	汀線付近	海岸から 0.1km
HC	0.349	35	5	7	12
		45	9	11	20
		70	23	28	59
B70	0.104	35	22	28	54
		45	36	46	89
		70	88	113	217
B90	0.112	35	19	24	45
		45	32	40	75
		70	78	99	183

\*コンクリート表面における塩化物イオン濃度は、飛沫帯で 13.0kg/m<sup>3</sup>、汀線付近で 9.0kg/m<sup>3</sup>、海岸から 0.1km で 4.5kg/m<sup>3</sup> として算出した。

表-6 より、飛沫帯でかぶりが 35mm の場合、耐用年数は HC が 5 年、B70 が 22 年、B90 が 19 年であり、HC と比較して環境負荷低減型コンクリートは約 4 倍となった。また、かぶりを 70mm 以上とすることで、汀線付近における耐用年数は 100 年程度以上となった。

### 3.4 凍結融解抵抗性およびスケーリング

凍結融解抵抗性試験およびスケーリング試験に用いた供試体の採取時の空気量はそれぞれ、HC が 4.5%、B70 が 4.8%、B90 が 3.8% である。凍結融解サイクル数と相対動弾性係数の関係を図-7 に、凍結融解サイクル数と質量変化率の関係を図-8 に示す。供試体 300 サイクル時の相対動弾性係数はそれぞれ、HC が 104%、B70 が 30%、B90 が 98% となり、HC と比較して B90 は同程度であったが、B70 では 180 サイクルから低下が確認された。質量変化率はそれぞれ、HC が 0.6%、B70 が 0.2%、B90 が 0.1% であった。B70 は 30 サイクルから増加して 240 サイクルで最大の 1.1% となり、その後 300 サイクルまで減少した。この減少はスケーリングによる表面の剥離によるものと推察される。

スケーリング試験の結果を図-9 に示す。50 サイクル終了時の累積スケーリング量はそれぞれ、HC が 0.07kg/m<sup>2</sup>、B70 が 1.67kg/m<sup>2</sup>、B90 が 2.66kg/m<sup>2</sup> となり、環境負荷低減型コンクリートは東北地方整備局の評価基準<sup>4)</sup>である「50 サイクルでのスケーリング量が 0.5kg/m<sup>2</sup> 以下」を満足しなかった。

これらのことから、凍結融解試験結果で判断した場合、B90 は凍結融解に対して十分な抵抗性を有していることとなる。一方で、スケーリング試験の結果を考慮すると、凍害に対して十分な抵抗性を有しているとは言い難い。試験結果に対し、打込み中の空気量の減少などが推察されるが、詳細な原因については不明であり、今後の検討を要する。

### 3.5 クリープ特性

載荷材齢 160 日までのクリープ係数の経時変化を図-10 に示す。クリープ係数はそれぞれ、HC が 1.08、

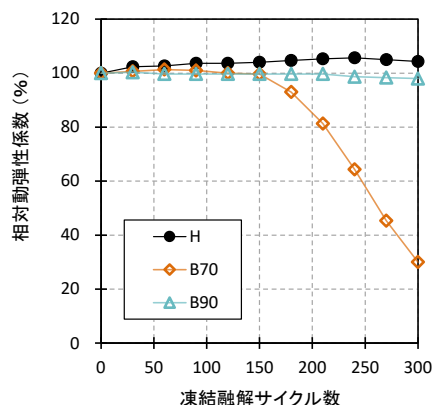


図-7 凍結融解サイクル数と相対動弾性係数の関係

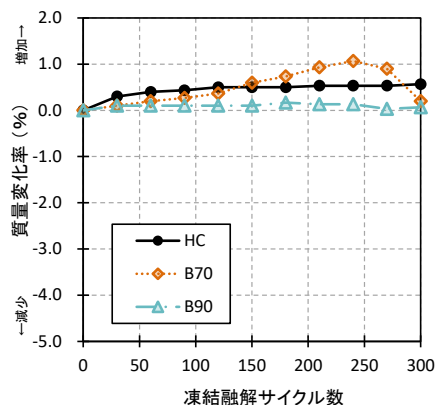


図-8 凍結融解サイクル数と質量減少率の関係

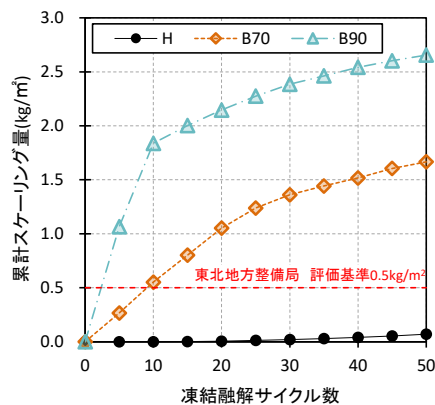


図-9 スケーリング試験の結果

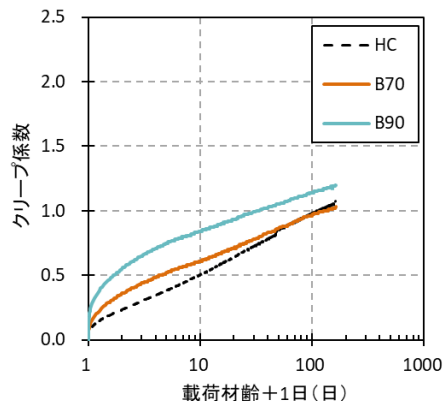


図-10 クリープ係数の経時変化



配合 B70



配合 B90

写真-1 脱枠後の試験桁の状況

B70 が 1.02, B90 が 1.20 であり, HC と同程度であった。

### 3.6 実部材製造の検討

#### (1) 施工性

試験桁の脱枠後の状況を写真-1 に示す。充填不良などは確認されず, 施工性は良好であった。

#### (2) 圧縮強度

圧縮強度試験の結果を図-11 に示す。試験材齢は 16 時間, 7 日, 21 日(B70 のみ), 23 日(B90 のみ)および 28 日とした。B70 および B90 の圧縮強度は目標値を満足した。曲げ強度試験実施時の圧縮強度は, B70 が材齢 21 日で 63.2N/mm<sup>2</sup>, B90 が材齢 23 日で 58.7N/mm<sup>2</sup>であった。

#### (3) 曲げ強度

たわみと載荷荷重の関係を図-12 に示す。曲げ強度試験の結果, ひび割れ発生荷重は B70 が 220.0kN, B90 が 212.0kN であり, 曲げ破壊荷重は B70 が 346.9kN, B90 が 363.6kN となった。JIS A 5373 の検査項目では「曲げひび割れ耐力に相当する荷重で載荷したとき肉眼で確認できるひび割れが発生してはならない」とされている。試験桁の形状である AS05 の場合, 式(2)により算出すると 127kN となる。これに対して, B70 および B90 のひび割れ発生荷重が上回っていることから, 十分な構造特性を有していると考えられる。

$$F = \left[ (M - M_{a0}) \times \frac{4}{l - 2a} \right] - W \times g \quad (2)$$

ここに,  $F$ : 曲げひび割れ荷重(kN),  $M$ : 曲げひび割れ耐力(=148kN・m),  $M_{a0}$ : 製品自重による曲げモーメント(=17.5kN・m),  $W$ : 載荷装置の質量(=0.335t),  $l$ : スパン(m),  $a$ : 載荷位置(m),  $g$ : 重力加速度(=9.81m/s<sup>2</sup>)

### 4. CO<sub>2</sub> 排出量削減率

本検討で用いた HC, B70 および B90 の材料に起因する CO<sub>2</sub> 排出量を表-7 に示す。各配合の CO<sub>2</sub> 排出量は表-2 に示す使用材料のうち, H, BFS, AC, EX, S1, S2 および G を対象とした。練混ぜ水は微量であるため, 本検討では省略することとした。港湾空港技術研究所の資料<sup>5)</sup>を参考に, 各単位量に表-8 に示す CO<sub>2</sub> 排出原単位<sup>1)</sup>を乗じて, それらを足し合わせることでコンクリート 1m<sup>3</sup>あたりの CO<sub>2</sub> 排出量を算出した。なお, 早強性混

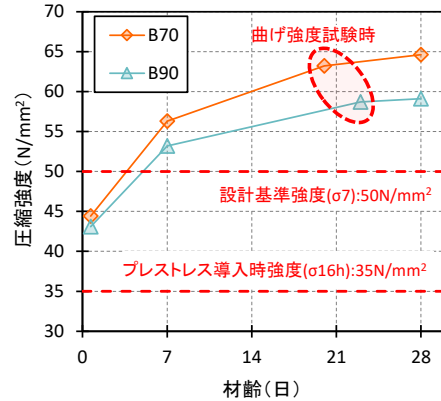


図-11 圧縮強度試験の結果

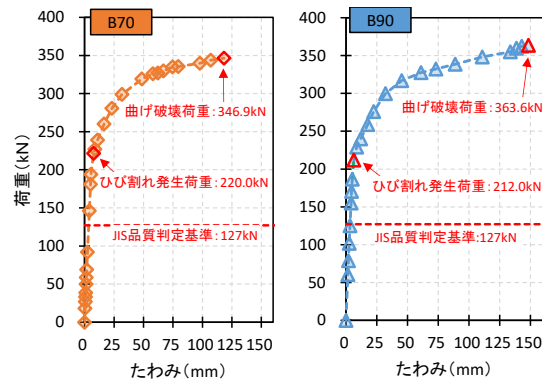


図-12 曲げ強度試験の結果

表-7 各配合の材料に起因するCO<sub>2</sub>排出量

材料	HC		B70		B90	
	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )	CO <sub>2</sub> 排出量 (kg/m <sup>3</sup> )	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )	CO <sub>2</sub> 排出量 (kg/m <sup>3</sup> )	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )	CO <sub>2</sub> 排出量 (kg/m <sup>3</sup> )
W	160	—	160	—	160	—
H	444	340.4	133	102.0	50	38.3
BFS	—	—	311	8.0	450	11.5
AC	—	—	10	9.7	30	29.0
EX	—	—	20	19.8	20	19.8
S1	362	1.3	338	1.3	—	1.1
S2	368	1.4	344	1.3	—	1.1
G	985	2.9	985	2.9	985	2.9
CO <sub>2</sub> 排出量の合計	346.0kg/m <sup>3</sup>		145.0kg/m <sup>3</sup>		103.7kg/m <sup>3</sup>	
CO <sub>2</sub> 排出量の削減率	—		58%		70%	

表-8 CO<sub>2</sub> 排出原単位

材料	H	BFS	AC	EX	S1	S2	G
CO <sub>2</sub> 排出原単位 (kg-CO <sub>2</sub> /t)	766.6	25.6	967.0	989.0	3.7	3.7	2.9

和材および膨張材のCO<sub>2</sub>排出原単位はメーカーヒアリングによる値を用い、陸砂は砕砂の値を用いた。上記の算出方法により算出される各配合のCO<sub>2</sub>排出量はそれぞれ、B70が145.0kg/m<sup>3</sup>、B90が103.7kg/m<sup>3</sup>、HCが346.0kg/m<sup>3</sup>となり、HCと比較してB70では58%、B90では70%のCO<sub>2</sub>排出量の削減が可能であると考えられる。

## 5. まとめ

PCaPCに適用可能な初期強度発現性の高い環境負荷低減型コンクリートの耐久性やクリープ特性、実部材への適用性を検討した結果、以下の知見が得られた。

- (1) 促進中性化試験の結果、結合材に対する高炉スラグ微粉末の置換率が大きくなるほど中性化深さも大きくなった。実環境下における100年後の中性化深さ推定値は、高炉スラグ微粉末の置換率が70%の配合では11.02mm、90%の配合では12.96mmであり。かぶりを38mm程度以上とすることで塩害環境下でも十分な中性化残りを確保できるものと考えられる。
- (2) 塩分浸透抵抗性は、早強セメント単味の配合と比較して高くなった。また、飛沫帯でかぶりが35mmの場合、見掛けの拡散係数から算出される、鉄筋位置における塩化物イオン濃度が腐食発生限界濃度に到達する期間も4倍程度となった。
- (3) 凍結融解試験における300サイクル時の相対動弾性係数は、早強セメント単味の配合が104%であるのに対し、高炉スラグ微粉末の置換率が90%の配合では98%と同等であったが、置換率が70%配合では30%となり、早強セメント単味の配合に対し、凍結融解抵抗性が劣る結果となった。一方、50サイクル終了時

の累積スケーリング量は高炉スラグ微粉末で置換した配合はいずれも東北地方整備局の評価基準を満足しなかった。これより、高炉スラグ微粉末で置換した配合は凍害に対して十分な抵抗性を有しているとは言い難い。試験結果に対し、打込み中の空気量の減少などが推察されるが、詳細な原因については不明であり、今後の検討を要する。

- (4) 載荷材齢160日のクリープ係数は早強セメント単味の配合は1.08、高炉スラグ微粉末の置換率が70%の配合は1.02、90%の配合は1.20であり、早強セメント単味の配合と同程度であった。
- (5) JIS A 5373 : AS05 桁の製造時の施工性は良好であり、充填不良等は確認されなかった。
- (6) JIS A 5373 : AS05 桁を用いた曲げ強度試験の結果より、ひび割れ発生荷重がJISの品質判定基準である127kNを上回っていたことから、所要の構造特性を有していた。

## 参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート技術を活用したカーボンニュートラルの実現に向けて、pp.64-70, 2023.10
- 2) 国立研究開発法人土木研究所・大成建設株式会社・前田建設工業株式会社：低炭素型セメント結合材の利用技術に関する共同研究報告書(IV), p.22, 2016.1
- 3) 土木学会：2022年制定コンクリート標準示方書【設計編】，p.163, 2022.12
- 4) 国土交通省・東北地方整備局：東北地方における凍害対策に関する参考資料(案), p.19, 2019.3
- 5) 中村堇，川端雄一郎，辰巳大介：港湾構造物の建設時におけるCO<sub>2</sub>排出量算定に関する基礎的検討，pp.12-13, 2022.3