

## 凍結防止剤散布下における道路橋PCaPC床版の高耐久化に向けた研究

(株)ピーエス三菱	正会員	○加藤 卓也
日本大学	正会員	岩城 一郎
東日本コンクリート(株)	正会員	戸川 邦彦
川田建設(株)	正会員	高橋 功

Abstract : In cold regions such as Tohoku region, since a large amount of deicing salt is sprayed on the surface of road at winter, penetration of chloride ion inside concrete deck is accelerated. As a result, it is necessary to concern the risk of combined deterioration among chloride attack, frost damage, Alkali-silica reaction, and fatigue due to traffic action. In order to solve this problem, this study aims at developing highly durable Precast PC bridge deck controlling high volume of air content and using Fly ash.

Key words : Fly ash , Precast PC bridge deck , deicing salt , durability, combined deterioration

## 1. はじめに

寒冷地である東北地方は、凍結防止剤を大量に散布するため、海洋より飛来する塩化物の影響を受ける地域以外でも、塩害等により多くのコンクリート構造物の劣化が顕在化している。このうち、道路橋の主要部材であるコンクリート床版は、橋脚や橋桁といった他の部材に比べ、床版内部に塩化物イオンが浸透するリスクが非常に高く、また凍害、アルカリシリカ反応などとの複合劣化と、交通作用の繰返し（疲労）が加わることで床版が早期劣化に至るといった問題を抱えている。

この種の問題に対し、筆者らはこれまで東北地方整備局と連携し、復興道路および復興支援道路において、フライアッシュを用いた高耐久コンクリートをRC床版に適用することを提案し、実橋で実施している。今後、このような取組みをプレキャストPC床版（以降、PCaPC床版と呼ぶ）にも展開する必要があると思われるが、凍結防止剤散布下でフライアッシュを用いたPCaPC床版を適用した事例が少ないことから、本研究では製品化に向けた課題を克服するため各種試験を実施した。

## 2. 研究の流れ

本研究は、図-1に示す3つのSTEPについてそれぞれ試験を行った。

STEP1	STEP1-1 室内試験練り 1	<ul style="list-style-type: none"> <li>W/B を 3 水準として C/W と圧縮強度発現の関係を調査</li> <li>フライアッシュを混入したコンクリートの W/B を決定</li> <li>決定した W/B のコンクリートで、フレッシュ性状および強度発現を確認 ⇒ 配合決定</li> </ul>
	STEP1-2 室内試験練り 2	
STEP2	要素試験（模擬試験体製作）	<ul style="list-style-type: none"> <li>基準配合 H, 配合 A, 配合 B の 3 種類を選定</li> <li>0.9m×0.7m×厚さ 0.2m の模擬床版を計 12 枚作成</li> <li>強度発現, 各種耐久性試験（模擬試験体からコア供試体）を実施（実物大供試体で使用するフライアッシュおよび配合の決定）</li> <li>本研究の配合を選定（打設および養生は標準的な方法）</li> <li>施工性, 充てん性, 強度発現性を確認</li> <li>各種耐久性試験（実物大試験体からコア供試体） ⇒ 実用化へ</li> </ul>
	各種試験（模擬試験体）	
	実物大 PCaPC 床版製作	
STEP3	各種試験（実物大試験体）	

図-1 研究全体の流れ

### 3. STEP1 フライアッシュを混入したPCaPC床版用コンクリートの配合

#### 3.1 本研究で使用したフライアッシュ

使用するフライアッシュは、東北地方(特に秋田県)のプレキャスト製品で既に多くの製造実績がある能代火力発電所産のⅡ種灰を、品質の安定と供給の面より採用候補とした(以降、配合Aと呼ぶ)。またフライアッシュ中に含まれる未燃炭素(強熱減量)は、AE剤を吸着する影響により、空気連行性が低下する傾向があることが分かっている。近年、その問題を解決するため未燃炭素を1%以下になるまで除去した、日本製紙産の高品質フライアッシュが東北地方で入手可能となったため、このⅡ種灰も採用候補とした(以降、配合Bと呼ぶ)。本研究では、配合A用と配合B用の2種類のフライアッシュを用いてPCaPC床版用コンクリートの配合などを検討した。

#### 3.2 コンクリートの目標性状

表-1にコンクリートの目標性状を示す。コンクリートの設計基準強度は、従来より製造されているPCaPC床版と同様、50N/mm<sup>2</sup>とした。この場合、プレストレスの導入時強度は35N/mm<sup>2</sup>であり、標準的な製造サイクルでは、打設翌日がプレストレス導入となることから、材齢1日でこの値を上回る必要がある。本研究を実施するPCa製品工場の実績では、PCaPC床版の配合(フライアッシュ混入無し)の水セメント比は、材齢1日で決定され、36.0%であった。フライアッシュを混入した場合、混入無しに比べ、初期材齢での強度発現は緩やかになると推察されたため、フライアッシュを混入したコンクリートの水結合材比(W/B)は、材齢1日の強度発現をもとに決定した。

目標スランプは、図-2の斜線部へのコンクリートの充てん性が懸念されたため18cmとした。

空気量は、凍結防止剤が大量に散布される東北地方で問題となっている複合劣化対策の一手段として、耐凍害性の向上が望まれる6.0%を目標とした。ただし基準配合(H)は、従来通り4.5%とした。

フライアッシュの置換率は、既往の研究より15~20%とすることにより、塩分環境下におけるASRと塩害に効果があることが確認されていることを踏まえ、本研究では凍結防止剤が大量に散布される過酷な環境下においても優れた耐久性が得られるよう、セメントに対する内割り置換率を20%とした。これらの条件を満足する配合を決定するため、55Lの水平2軸ミキサーを用いて試験練りを実施した。

表-1 コンクリートの目標性状, 配合条件

No.	項目	目標値, 条件
1	設計基準強度	$\sigma_{28} = 50.0\text{N/mm}^2$
2	プレストレス導入時強度	$\sigma_1 = 35.0\text{N/mm}^2$
3	目標スランプ	SL = 18.0cm ( $\pm 2.5\text{cm}$ )
4	目標空気量	Air = 6.0% (4.5%~6.9%) (基準配合Hは 4.5 $\pm$ 1.5%)
5	フライアッシュの置換率	Sr = 20% (セメント質量に対する内割り置換)

#### 3.3 試験練りにおけるコンクリートの配合検討と結果

使用したフライアッシュの強熱減量とブレン値を表-2に示す。PCaPC床版は設計基準強度が50N/mm<sup>2</sup>と高強度であるため、セメント量が多く、粘性が高いコンクリートとなる。特に配合B用ではブレン値が大きいため粘性が高く、スランプ18cm付近でも施工性に劣ることが手で触れることで確認された。また、粘性が高い状態であるが、モルタルの流動性が高いため、スランプを若干大きくするために混和剤を増量した場合には、スランプが大きく変動してしまう傾向が認められた。また、AE剤の効果が鈍重で所定の空気量が入りにくい傾向が認められた。このため、細骨材率を大きくし、モ

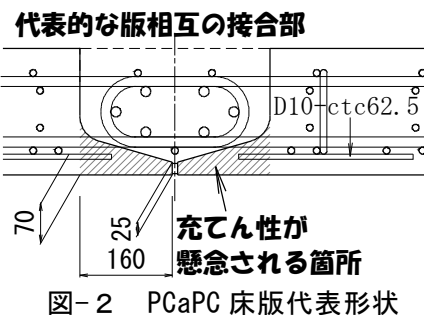


図-2 PCaPC 床版代表形状

表-2 フライアッシュの試験成績

フライアッシュⅡ種灰	強熱減量 %	ブレン値 cm <sup>2</sup> /g
配合A用	1.8	3,840
配合B用	0.5	4,770

ルタルの流動性を抑え、所定の空気量が入りやすいようAとBの配合を合わせるような形で修正した。表-3に試験練りで決定した配合と、フレッシュコンクリートの品質試験結果を示す。

表-3 試験練りで決定した配合

配合名	SL (cm)	Air (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					品質試験結果	
					W	C	FA	S	G	SL(cm)	Air(%)
H(基準)	12±2.5	4.5±1.5	36.0	42.0	153	425	—	739	1142	11.0	4.9
A	18±2.5	6.0% (4.5%~6.9%)	33.0	44.0	153	371	93	729	1035	19.0	6.0
B	18±2.5		33.0	44.0	153	371	93	726	1035	20.5	6.0

4. STEP2 模擬試験体によるフライアッシュコンクリートを用いたPCaPC床版の要素試験

4.1 模擬試験体の種別

模擬試験体の種類と水準、および代表的な実施試験の有無を表-4に示す。フライアッシュコンクリートを、PCaPC床版に適用した場合の基礎物性を確認するために、床版を模擬した試験体を製作した。試験体は無筋で700×900×200mmの版形状とし、3種のコンクリート配合、2種の蒸気養生温度(45℃, 60℃)および2種の脱枠後の養生方法(気中, 保湿)で計12水準とした。保湿養生は脱枠後速やかに試験体全体をビニールフィルムでラッピングし、材齢28日まで保湿した。

表-4 模擬試験体の種類と水準と実施試験

配合名	蒸気養生温度	脱枠後の養生方法	温度測定	試験体呼称	塩分浸漬試験	スケリング試験
H(基準)	45℃	気中	○	H-45-A	○	○
		保湿(ラッピング)	—	H-45-M	○	
	60℃	気中	○	H-60-A	○	
		保湿(ラッピング)	—	H-60-M	○	
A	45℃	気中	○	A-45-A	○	○表裏
		保湿(ラッピング)	—	A-45-M		○
	60℃	気中	○	A-60-A		○
		保湿(ラッピング)	—	A-60-M		○
B	45℃	気中	○	B-45-A	○	○
		保湿(ラッピング)	—	B-45-M		
	60℃	気中	○	B-60-A		
		保湿(ラッピング)	—	B-60-M		

蒸気養生温度を2種類設けたのは、フライアッシュコンクリートを蒸気養生した際のポゾラン反応性に及ぼす温度依存性を評価するためである。



保湿養生の有無については、製品工場で特別な写真-1 ブリーディング試験状況 左A配合, 右B配合施設を設けず、出荷に影響のない範囲で保湿状態を保った養生(28日間のラッピング)と、通常の製品と同様に脱枠後は気中養生したものとを比較するためである。

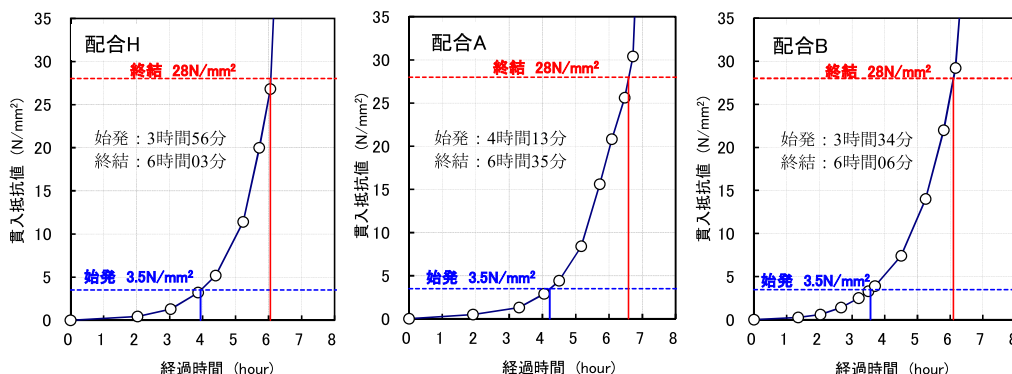


図-3 凝結試験結果

4.2 フレッシュ性状

(1) ブリーディング試験結果

配合Aと配合B, ならびに標準配合Hについて、ブリーディング試験を実施した。写真-1に試験状況(3時間後)を示す。その結果、練上り3時間後までにおけるブリーディングの発生は認められなかった。これは、W/Bが小さい配合であるためと推察する。

(2) 凝結試験結果

図-3にコンクリートの凝結試験結果を示す。配合A, B共に配合Hと大きな差がないことから、表面仕上げ作業時間に関しては、標準的な製造サイクルのままで問題がないと考えられる。

4.3 圧縮強度結果

(1) 材齢と圧縮強度の関係

試験材齢と圧縮強度の関係を図-4 (気中養生) および図-5 (保湿養生) に示す。フライアッシュを混入した配合Aおよび配合Bは、無混入の配合Hに比べ初期材齢における強度発現が小さく、材齢28日では蒸気による加熱養生温度および脱枠後の養生方法(気中, 保湿)にかかわらず配合Hの方が圧縮強度が大きくなる傾向を示した。材齢91日では圧縮強度差は小さくなる傾向を示した。また、気中養生では、いずれの配合でも材齢28日までは圧縮強度の増進が認められたが、それ以降は圧縮強度の増進は認められなかった。一方、保湿養生を行った場合は、材齢28日以降も圧縮強度の増進が認められ、材齢91日では気中養生に比べ若干大きな圧縮強度を示した。

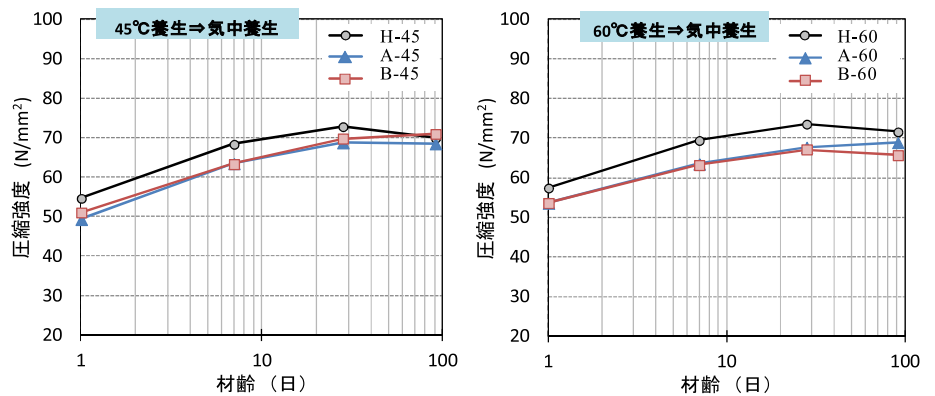


図-4 材齢と圧縮強度の関係(気中養生)

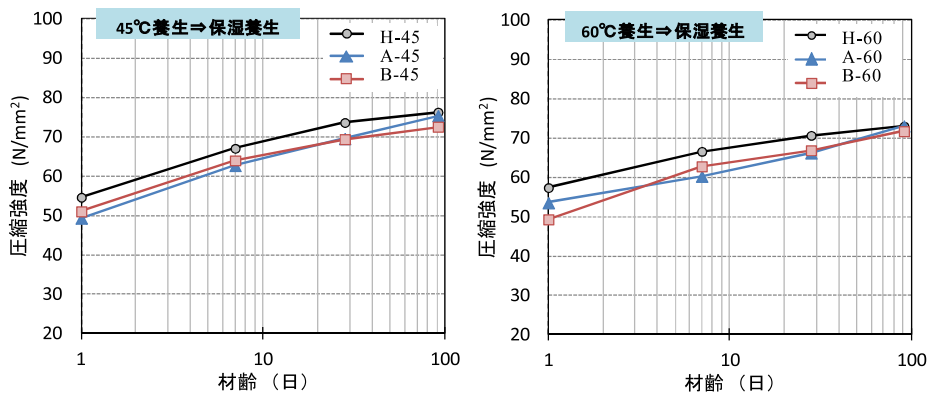


図-5 材齢と圧縮強度の関係(保湿養生)

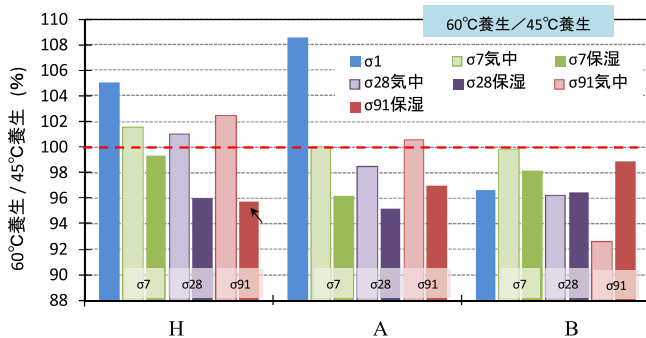


図-6 45°C養生に対する60°C養生の圧縮強度比

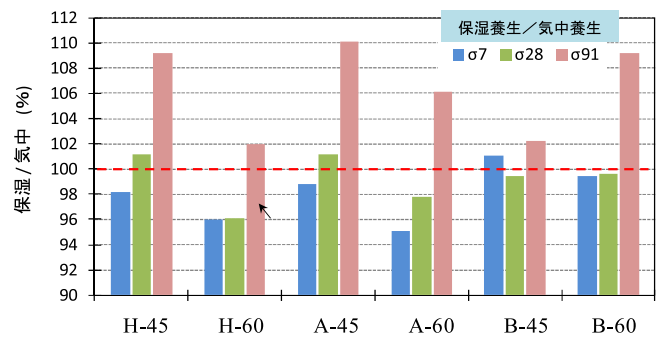


図-7 気中養生に対する保湿養生の圧縮強度比

(2) 蒸気養生温度による影響

蒸気による加熱養生温度(最高温度)が45°Cの場合に対する60°Cの場合の圧縮強度比(式1参照)を図-6に示す。配合Hおよび配合Aの材齢1日(脱枠時)と配合Hにおいて脱枠後に気中養生とした場合には圧縮強度比が100%以上であり、60°C養生の強度発現における優位性が認められたが、配合Bでは優位性は認められなかった。また、配合Aおよび配合Bでは、材齢7日以後において、圧縮強度比が100%程度以下であり、60°C養生に優位性は認められなかった。

$$\text{圧縮強度比 (蒸気養生温度)} = \frac{60^\circ\text{C養生供試体強度}}{45^\circ\text{C養生供試体強度}} \times 100 \quad (\text{式1})$$

(3) 脱枠後の養生方法による影響

気中養生供試体に対する保湿養生供試体の圧縮強度比 (式2参照) を図-7に示す。

$$\text{圧縮強度比 (脱枠後の養生方法)} = \frac{\text{保湿養生供試体強度}}{\text{気中養生供試体強度}} \times 100 \quad (\text{式} 2)$$

材齢28日までは圧縮強度比 (脱枠後の養生方法) は、いずれの配合およびいずれの蒸気養生温度においても101%程度以下であったが、材齢91日では102~110%となった。材齢初期(28日間)の保湿養生の影響が、長期強度の増進にある程度寄与する傾向が認められた。なお、耐久性試験の結果については5.2に実物大床版の結果と合わせて示す。

表-5 実物大 PCaPC 床版  
フレッシュコンクリートの試験結果

配合名	スランブ (mm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)	外気温 (°C)
A	19.5	5.1	25	23

5. STEP3 実物大PCaPC床版の製作と耐久性試験

5.1 実物大PCaPC床版の製作

フライアッシュをセメント質量に対し内割り20%置換したW/B=33%の高強度コンクリートは、粘性が非常に高くなるのがこれまでの試験で確認された。よって、狭隘部への充てん性や、フィニッシュビリティなどを確認するため、実物大で配筋した供試体を製作した。また、STEP2の試験を通して高強度コンクリートの場合の施工性は、配合Aの方が優れていると判断し、本試験では配合Aを用いて実物大のPCaPC床版を製作することとした。供試体のサイズは、橋軸方向約2.0m、幅員方向7.3mの2主桁、床版最小厚250mmで、プレテンションも導入することとした。表-5にフレッシュコンクリートの試験結果を、写真-2に打設状況を示す。

コンクリートの打設は一般的な方法とし、コンクリートの締固めに棒形振動機を用い、長辺の間詰め部では型枠振動機を併用した。表面仕上げは仕上げ補助剤を用い金ゴテ仕上げとした。施工性については、充てん性や表面仕上げ性ともに良好であり、間詰め部分の薄肉となる個所や隅角部など細部にまで充てんが可能であり、表面仕上げも一般のコンクリートと同様な施工が可能であった。



写真-2 実物大 PCaPC 床版供試体の打設状況

5.2 耐久性試験結果

(1) スケーリング試験

スケーリング試験は、ASTM C 672に準拠し行い、φ150mmでコア削孔した円柱の打設面側に、止水テープで土手を作製し、3%のNaCl水溶液で湛水した供試体を用いた。測定項目は、5サイクル毎の単位面積当たりのスケーリング量である。設定温度は、融解保持時間として最高融解温度20±3°Cを6時間、温度移行時間を1時間、凍結保持時間として最低凍結温度-20°C±3°Cを16時間、温度移行時間を1時間とし、これを1サイクルとして50サイクルまで実施した。試験結果を図-8に示す。スケーリング量は、既往の研究<sup>1)</sup>によると0.5 kg/m<sup>2</sup>程度以下であれば現実問題ないとしているが、計測した7つの供試体からのスケーリング量は、更に厳しい指標値である0.3kg/m<sup>2</sup>を全て下回り、優れた耐凍害性を有していることが確認できた。

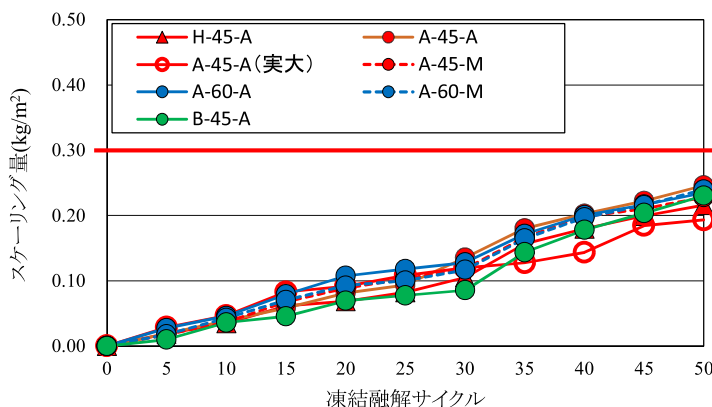


図-8 スケーリング試験結果

(2) 塩分浸漬試験

塩分浸漬試験は、模擬試験体からφ150mmでコア削孔した円柱の打設面側を試験面として、3%のNaCl

水溶液に91日(13週)まで湛水させる方法とした。促進環境は、温度40℃、相対湿度60%であり、供試体は試験装置内に静置させた。なお試験溶液の濃度管理は週に1回行った。91日経過した供試体からは、φ50mmのコアを2本採取し、塩化物イオン濃度は、JIS A 1154「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」に準拠し、イオンクロマトグラフ分析により測定した。試験結果を図-9に示す。参考のラインは、著者の1人である岩城の別の研究で得られた圧縮強度30N/mm<sup>2</sup>程度のRC床版を想定したコンクリートの結果である。この参考ラインと比較して判るように、本研究のコンクリートはいずれも塩分浸透性が極めて小さいことが判った。図-9の下のグラフから、その中でも配合Aと配合Bの45℃養生とした2種類のフライアッシュコンクリートは共に、塩分浸透抵抗性に優れていることが確認できた。

## 6. 論旨

本研究の成果より得られた知見を以下に示す。

- (1) 高強度のフライアッシュコンクリートは、粘性が高くワーカビリティが低下するが、配合Aでは適切に流動性を管理することで、従来の施工方法でPCaPC床版の製作が可能であることが確認できた。
- (2) PCaPC床版は、従来より低水セメント比の高強度コンクリートを使用しているため、配合Hでも耐久性に優れているが、フライアッシュをセメントに置換使用することで更に塩分浸透性が小さくなることが明らかとなった。
- (3) 空気量を4.5%以上に制御したコンクリートを用いたPCaPC床版は、塩分環境下においても優れたスケーリング抵抗性を有していることが確認できた。
- (4) 蒸気養生の最高温度を60℃とした本研究の範囲では、養生温度の違いによるフライアッシュコンクリートのポズラン反応性に起因する強度発現性の明確な違いを、確認することができなかった。
- (5) 材齢初期(28日間)に保湿養生を行うことにより、長期強度の増進に一定の効果があることが認められた。

謝辞：本研究は、学校法人日本大学、株式会社IHIインフラ建設、株式会社安部日鋼工業、オリエンタル白石株式会社、川田建設株式会社、昭和コンクリート工業株式会社、ドーピー建設工業株式会社、日本高圧コンクリート株式会社、株式会社日本ピーエス、東日本コンクリート株式会社、株式会社ピーエス三菱、株式会社富士ピー・エス、三井住友建設株式会社の共同研究として行われたものである。ここに、共同研究に携わった関係者と、日本大学工学部コンクリート工学研究室の諸氏、ならびに当時博士研究員であった前島拓氏に謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 月永洋一、庄谷征美、笠井芳夫：凍結防止剤によるコンクリートのスケーリング性状とその評価に関する基礎研究、コンクリート工学論文集、Vol. 8, No. 1, pp. 121-133, 1997.

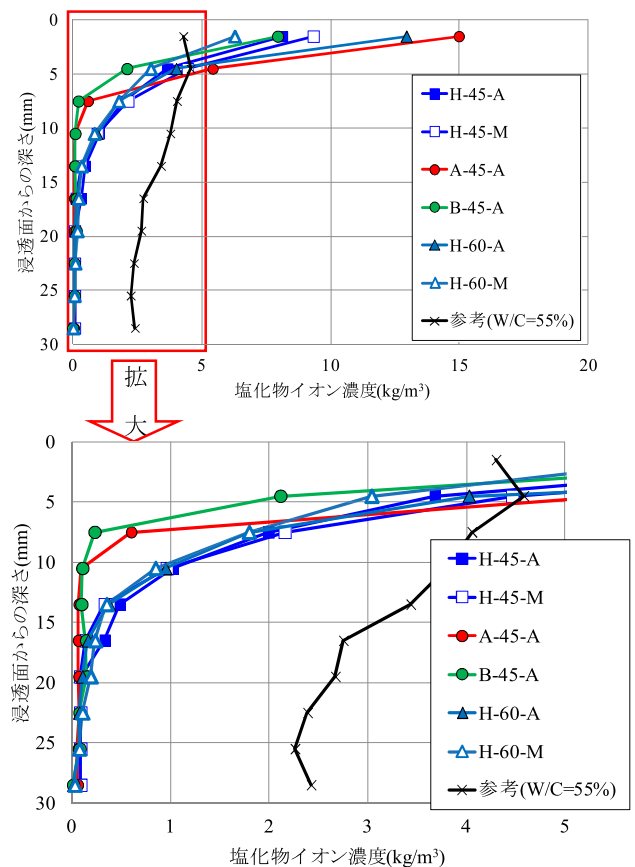


図-9 塩分浸漬試験結果