

PCA フォームによるコンクリート構造物の耐久性向上に関する研究

竹田 宣典 栗原 正美 住野 正博
小柳 光生 入矢 桂史郎
(本社 土木技術本部
技術第4部)

Study on Improvement in Durability of Concrete Structures Using PCA-form

Nobufumi Takeda Masami Kurihara Masahiro Sumino
Mitsuo Koyanagi Keishiro Iriya

Abstract

The authors have developed "PCA-form" for the purpose of enhancing the durability of concrete structures. PCA-form is a high-durability thin-wall precast form consisting of laminated high performance mortar and a special polymer. The PCA-form is intended for permanent use without the need of removal, with a high capability of inhibiting penetration of corrosive factors.

Tests were conducted to confirm the effectiveness of PCA-forms to enhance durabilities of concrete structures. The durability was evaluated by estimating the long-term permeation of chloride ions. As a result, PCA-forms were estimated to inhibit chloride ion permeation effectively for more than 150 years, thus guaranteeing the durability of concrete structures. The tests also revealed remarkable effects of the forms to reduce the rate of carbonation and increase resistance of the structures to freezing and thawing, abrasion, and chemical attack.

概 要

コンクリート構造物の耐久性向上を目的とした、高耐久性のプレキャスト型枠「PCA フォーム」を開発した。PCA フォームは、高性能モルタルと特殊ポリマーの積層構造から構成される薄肉プレキャスト版である。PCA フォームは、脱型不要の型枠として用い、腐食因子の侵入を抑制することが可能である。PCA フォームによるコンクリート構造物の耐久性向上効果を確認するための試験を行い、長期的な塩化物イオンの透過による耐久性の評価を行った。その結果、PCA フォームを用いることにより、塩化物イオンの透過は150年以上の長期にわたって、著しく抑制され、コンクリート構造物の耐久性が確保されると考えられる。また、中性化速度の抑制、凍結融解抵抗性、耐摩耗性、化学抵抗性についても、著しい効果が得られることが確認された。

1. はじめに

近年、土木構造物の建設に当っては、施工の省力化、構造物の高耐久化、美観向上等が要求されることが多くなっている。特に、大型のマスコンクリート構造物では、温度ひびわれ対策の面から、低発熱性の混合セメントが使用される場合、中性化の速度が問題となることや、また海洋環境下に建設される構造物では、塩化物イオンの高い浸透抑制および耐海水性が要求される。

これらの課題に応ずるものとして、高耐久性のプレキャストコンクリート版を型枠として使用し、この型枠中に打設するコンクリートと一体化させることにより、コンクリート構造物の耐久性を向上させる方法が考えられる。この方法によると、コンクリート打設後の脱型作業が不要となりコンクリート工事の省力化が期待でき、構

造物の表面の美観を向上させることも可能である。

筆者らは、これらの目的を達成するよう新たに開発した防食性能の高いプレキャスト型枠『PCA フォーム』を用いたコンクリートの耐久性について検討を行った。

『PCA フォーム』は、非腐食性の繊維系材料を用いた高強度モルタル層と特殊ポリマー層を一体化させた積層構造から構成される薄肉のプレキャスト版である。PCA フォームの外観の一例を写真-1に示す。

本報告では、PCA フォームを用いたコンクリートの耐久性向上効果を確認するために行った遮塩性、中性化速度、凍結融解抵抗性、耐摩耗性、化学抵抗性に関する耐久性評価試験の結果について述べる。さらに、長期的な塩化物イオン浸透状況を推定し、コンクリート構造物の耐久性についても検討した結果を述べる。

2. 耐久性評価試験方法

2.1 供試体の構造

試験に用いたPCAフォーム供試体の断面図を図-1に示す。供試体は、ひびわれ抵抗性に富んだビニロン短繊維を含有した高強度モルタル層と、塩化物イオン・酸素・水分などの腐食因子を遮断する機能を持つ特殊ポリマー層との積層構造で構成され、高強度モルタル層の補強材として、引張表面側にアラミド長繊維のネットを敷設している。なお、耐久性評価試験は、比較用として普通コンクリートについても実施した。

2.2 使用材料

PCAフォーム供試体の高強度モルタルおよび比較用の普通コンクリートに用いた材料を表-1に示す。

高強度モルタルの結合材には、強度発現の面から早強ポルトランドセメントを用い、耐海水性、遮塩性を高めるため高炉スラグ微粉末を、高強度化とワーカビリティを確保するためにシリカフェウムを用いた。また、色調の面から白色顔料を用いた。

PCAフォーム供試体では、ひびわれや破損防止、曲げ耐力の増大を目的として、ビニロン短繊維(長さ30mm)と、アラミド長繊維(三軸メッシュ)を用いた。腐食因子の遮断を目的とした特殊ポリマーには、親水性の変性エポキシ樹脂を用いた。このポリマーは高強度モルタル部に含浸し、一体化する特長を有する。ビニロン繊維・アラミド繊維・特殊ポリマーの物性値の概略を表-2に示す。

2.3 配合

PCAフォーム供試体の高強度モルタルおよび比較用の普通コンクリートの配合を表-3に示す。高強度モルタルの水結合材比は26%であり、材齢28日における圧縮強度は1,000 kgf/cm²であった。シリカフェウムは全結合材に対して約5%、ビニロン短繊維は容積比率で2%混入した。普通コンクリートのスランプは12cmとし、水セメント比55%、単位セメント量300 kg/m³のものをを用いた。

2.4 PCAフォーム供試体の作製方法

PCAフォーム供試体は、アラミド繊維ネットを敷設した振動台上の型枠に、振動を与えながら高強度モルタルを打込んだ後、特殊ポリマーを吹付けて作製した。養生は表面をシートで覆い、蒸気養生を行った。

PCAフォーム供試体の厚さは、高強度モルタル層が

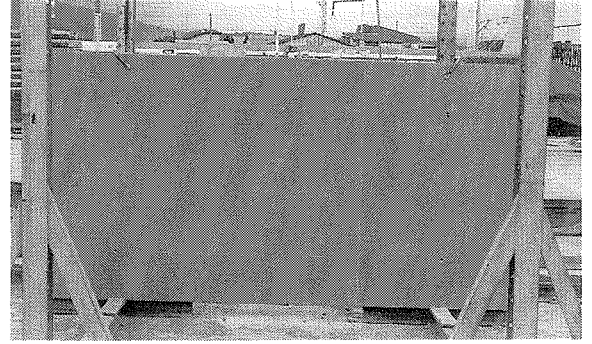


写真-1 PCAフォームの外観

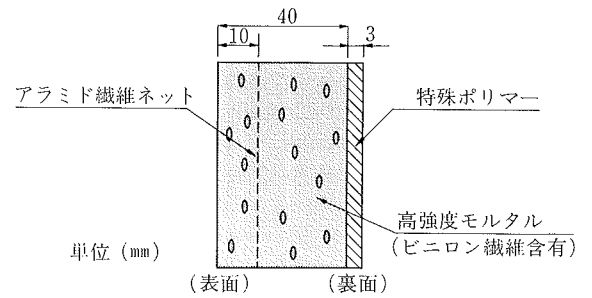


図-1 PCAフォーム供試体の断面図

表-1 使用材料

種類	使用材料	比重	備考
PCA高強度モルタル	早強ポルトランドセメント	3.14	比表面積：4,360cm ² /g
	高炉スラグ微粉末	2.91	比表面積：7,980cm ² /g
	シリカフェウム	2.20	白色系
	白色顔料	3.90	酸化チタン
	ビニロン繊維	1.30	長さ：30mm
	細骨材	2.62	山砂，F.M.：2.47
普通コンクリート	高性能AE減水剤	1.13	アミノスルホン酸系
	収縮低減剤	0.99	低級アルコール系
	普通ポルトランドセメント	3.16	比表面積：3,280cm ² /g
	細骨材	2.62	山砂，F.M.：2.70
普通コンクリート	粗骨材	2.65	Gmax：25mm，F.M.：6.58
	AE減水剤	1.25	リグニンスルホン酸系

表-2 ビニロン繊維・アラミド繊維・特殊ポリマーの物性値

種類	比重	引張強度 (kgf/mm ²)	弾性係数 (kgf/mm ²)
ビニロン短繊維	1.3	90	3,000
アラミド繊維ネット	1.39	350	7,400
特殊ポリマー	1.1~1.3	7~21	—

表-3 PCAフォームの高強度モルタルおよび普通コンクリートの配合

種類	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)										スランプフロー (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (材齢28日) (kgf/cm ²)
		水	セメント	高炉スラグ微粉末	シリカフェウム	白色顔料	ビニロン繊維	細骨材	粗骨材	高性能AE減水剤	収縮低減剤			
PCAフォーム高強度モルタル	26	257	692	248	49	30	26	960	0	40	20	フロー26	2.0	1,000
普通コンクリート	55	165	300	0	0	0	0	859	980	0.75*	0	スランプ12	4.0	350

*：AE減水剤

表一4 試験項目・試験方法

評価項目	試験方法	供試体	
遮塩性	海水浸漬試験	Cl ⁻ 濃度1.8%の人工海水中に2カ月間浸漬後、全塩化物イオン量を測定	100×100 ×200mm
	海水浸漬乾燥繰返し試験	Cl ⁻ 濃度1.8%の人工海水への浸漬・湿潤・乾燥の繰返し200サイクル終了後、全塩化物イオン量を測定	
中性化速度	中性化促進試験	CO ₂ 濃度5%、温度30℃、湿度55%の室内に2カ月間放置後、フェノールフタレインの変色域を測定	100×100 ×厚さ40mm
凍結融解抵抗性	凍結融解試験	ASTM C-666 に準拠した凍結融解の繰返しを600サイクル迄実施、300サイクル迄30サイクル毎、以降600サイクル迄60サイクル毎に動弾性係数及び重量の変化を測定	100×100 ×400mm
耐摩耗性	摩耗試験	ASTM C-779 に準拠した回転式摩耗試験15分、30分、60分後にすりへり深さを測定	300×300 ×厚さ40mm
化学抵抗性	薬品浸漬試験	5% (HCl純濃度)塩酸溶液および5%硫酸マグネシウム溶液に12週間浸漬、1週毎に重量変化を測定	40×40 ×160mm (モルタル)

表一6 塩化物イオンの拡散係数

種類	拡散係数 Dc (cm ² /sec)	表面塩分量 Co (%)
PCAフォーム (高強度モルタル)	0.38×10^{-8}	0.2
普通コンクリート	7.50×10^{-8}	0.2

40 mm、特殊ポリマー層が3 mm とし、表面より10 mm の位置にアラミド繊維ネットを配置した。

2.5 試験項目・試験方法

試験項目および試験方法を表一4 に示す。いずれの試験も材齢4週から開始した。

遮塩性は、海水浸漬および海水浸漬乾燥繰返しによる促進試験による塩化物イオンの浸透量により評価した。いずれの試験にも、塩素イオン濃度1.8%の人工海水を用いた。促進試験の試験条件を表一5 に示す。モルタルおよびコンクリート中の塩化物イオンの測定はJCI 規準案（電位差滴定法）に準拠し、全塩化物イオン量を測定した。

遮塩性試験用の供試体の形状を図一2 に示す。一辺10 cm の正方形に整形したPCAフォームに、表一3 に示す配合の普通コンクリートを打継ぎ、周囲の面をエポキシ樹脂でコーティングし、塩化物イオンが表面のみから浸透するようにした。比較用の普通コンクリート供試体も同様な大きさとし、周囲の面をコーティングした。

中性化促進試験用の供試体も遮塩性試験と同様の供試体とした。摩耗試験および凍結融解試験用の供試体は、PCAフォームの高強度モルタルおよび普通コンクリートにより作製した。化学抵抗性試験においては、高強度モルタルおよび普通コンクリートをウエットスクリーニングしたモルタルにより供試体を作製した。

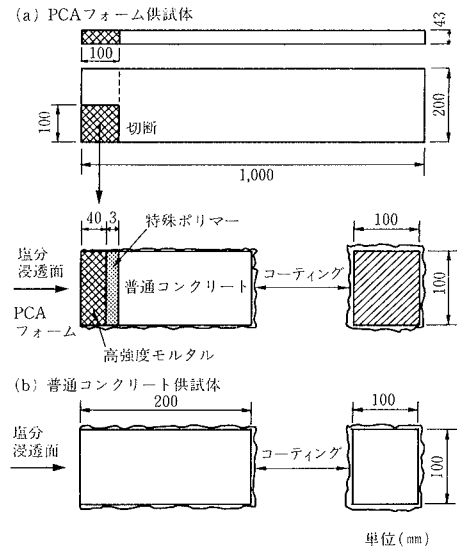
3. 耐久性評価試験結果

3.1 遮塩性

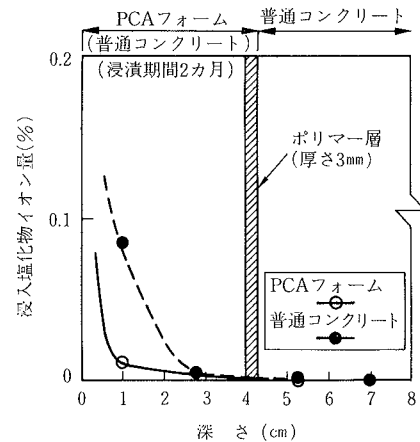
海水浸漬2カ月後および海水浸漬乾燥繰返し200サイ

表一5 促進試験条件

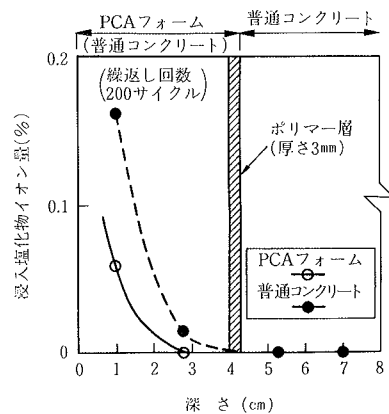
条件	人工海水浸漬 (60℃)	高温湿潤 (70℃, RH95%)	冷却乾燥 (70~15℃, RH95~25%)
時間	1時間	1.5時間	3.5時間



図一2 遮塩性試験用供試体



図一3 海水浸漬試験による塩化物イオンの浸透分布



図一4 海水浸漬乾燥繰返し試験による塩化物イオンの浸透分布

クル終了時の塩化物イオンの浸透状況を図-3, 図-4に示す。塩化物イオンの浸入量はモルタルあるいはコンクリート重量に対する百分率で表す。

200サイクルの浸漬乾燥の繰返しによっても、PCA フォームの裏面の特殊ポリマー層まで塩化物イオンが到達していないため、特殊ポリマーの遮塩効果を直接的には評価できなかった。よってPCA フォームの高強度モルタルおよび普通コンクリートについて塩化物イオン浸透分布より、拡散理論として知られている Fick の方程式(1)の拡散係数 (Dc) を、最小2乗法により算出した。

$$C = C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{X}{2\sqrt{Dc \cdot t}} \right) \right\} \dots\dots\dots(1)$$

- X : 表面からの深さ (cm)
- t : 経過時間 (sec)
- C : 表面からの深さ x での塩化物イオン濃度 (%)
- C₀ : 表面部 (x=0) での塩化物イオン濃度 (%)
- Dc : 塩化物イオンの拡散係数 (cm²/sec)
- erf : 誤差関数 : erf (x) = 2/√π · ∫₀^x e^{-t²} · dt

海水浸漬試験による塩化物イオンの浸透量と海水浸漬乾燥繰返し試験による塩化物イオンの浸透量の比較より、本試験での繰返し200サイクルは、波しぶきをかなり受ける海上大気中における2年間の暴露に相当するとして解析を行った²⁾。

表面塩化物イオン濃度 (C₀) は、使用環境条件を波しぶきを受ける海上大気中と想定して、各種の海洋暴露試験の結果より、0.2%とした³⁾。

解析により求められた塩化物イオンの拡散係数 (Dc) を表-6に示す。PCA フォームの高強度モルタル層の拡散係数は、0.38 × 10⁻⁸ cm²/sec と算出され、普通コンクリートの拡散係数の約1/20程度であり、高強度モルタル層の塩分遮断効果が確認できた。

3.2 中性化速度

2カ月間の中性化促進試験終了後の中性化深さは、普通コンクリートが21.5 mm であるのに対して、PCA フォームでは全く認められなかった。本試験における中性化の促進倍率を60倍程度と仮定すると⁴⁾、2カ月間の促進期間は約10年間に相当する。PCA フォームの中性化の抑制効果が認められ、中性化の進行は、PCA フォームの内部でとどまると考えられる。

3.3 凍結融解抵抗性

600サイクルの凍結融解試験の結果を図-5に示す。また、写真-2に600サイクルの凍結融解試験終了時の供試体の表面状態を示す。

凍結融解の繰返し600サイクル終了時において、普通コンクリートの動弾性係数は約7%、供試体重量は表面のスケーリングにより約5%低下したのに対し、PCA フォームは空気量が2%と小さいにもかかわらず、動弾性係数および供試体重量の低下は認められず、表面のスケーリング等の劣化はほとんど認められなかった。このことから、PCA フォームの凍結融解抵抗性は十分確保されて

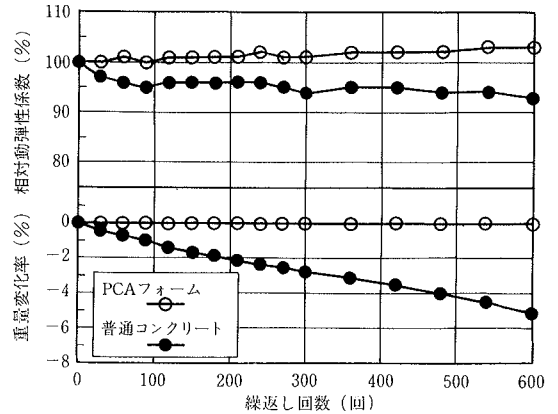


図-5 凍結融解試験結果

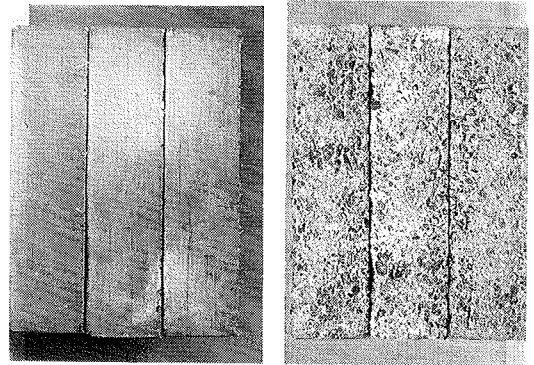


写真-2 600サイクル終了後凍結融解繰返し後の表面状態

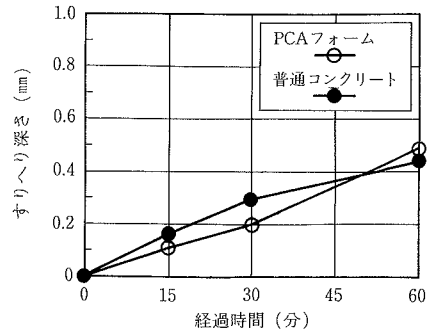


図-6 摩耗試験結果

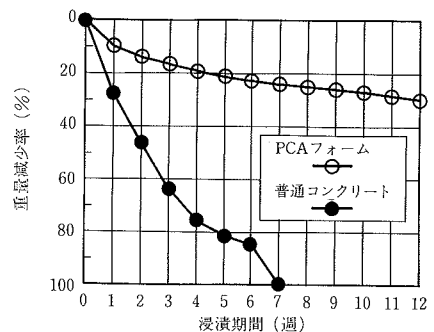


図-7 5%塩酸溶液浸漬試験結果

いると考えられる。

3.4 耐摩耗性

摩耗試験の結果を図-6に示す。PCA フォームは、水結合材比が26%程度の高強度モルタルであるが、粗骨材を含まないにもかかわらず、すりへり深さは、水セメント比55%の普通コンクリートと大きな差はなかった。従って、耐摩耗性は普通コンクリート (W/C=55%) と同程度であると考えられ、摩耗作用が著しく大きい箇所への適用でなければ、使用上の問題はないと考える。

3.5 化学抵抗性

5%塩酸溶液 (HC 純濃度) への浸漬試験結果を図-7に示す。浸漬期間4週後の供試体の状態を写真-3に示す。普通コンクリートは7週間ですべて溶出したが、PCA フォームではその溶出量は少なく、12週間後で約30%の重量減少であった。

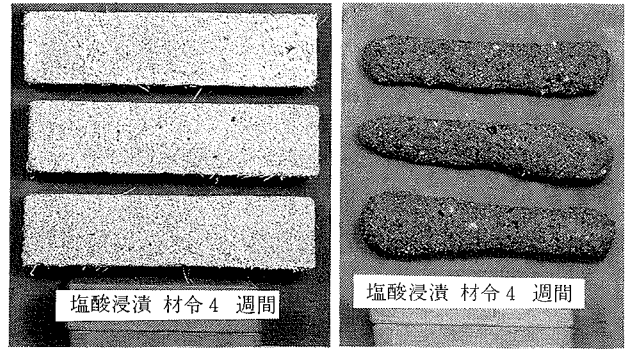
また、5%硫酸マグネシウム溶液への浸漬結果を図-8に示す。PCA フォーム・普通コンクリートともに膨張は認められず、重量変化も極めて少なかった。

実際の海洋環境下での使用を想定した場合、PCA フォームの耐海水性は十分に確保されていると考える。

4. 塩化物イオンの浸透予測解析による構造物の耐久性

4.1 塩化物イオンの浸透予測解析方法

海洋環境下の橋梁下部工などの重要構造物には、100年以上の耐用年数が求められることが多く、構造物の長期的な耐久性の予測を行う必要がある。ここでは、塩化物イオンの浸透による鉄筋腐食が、構造物の耐久性に及ぼす主要因であると考え、PCA フォームおよび普通コンクリート中への塩化物イオンの浸透について長期の予測解析を行った。



PCA フォーム 普通コンクリート
4 週浸漬後

写真-3 5%塩酸溶液浸漬試験後の表面状態

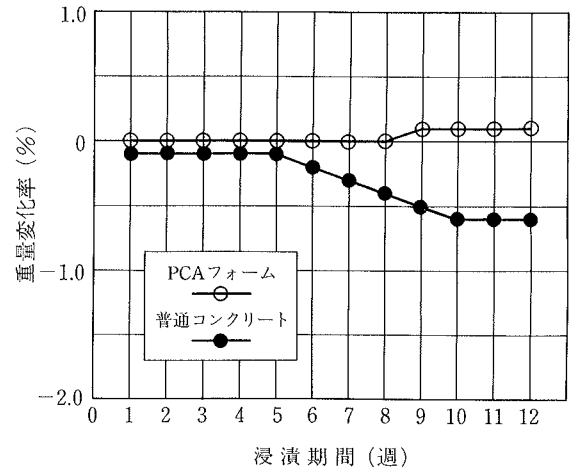


図-8 5%硫酸マグネシウム溶液浸漬試験結果

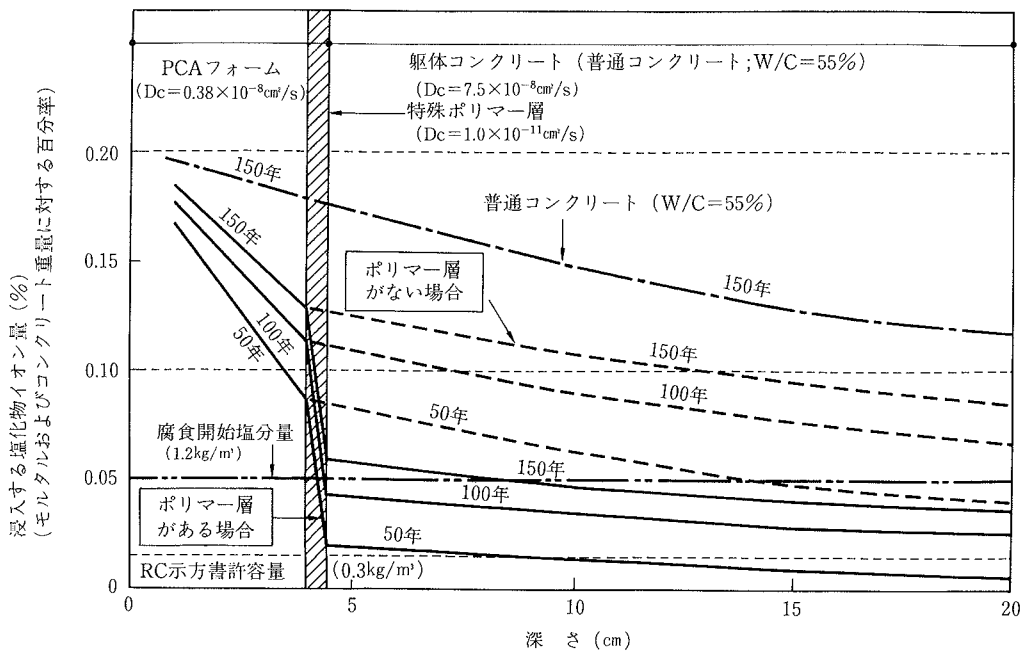


図-9 塩化物イオンの浸透予測

予測解析では、PCA フォームの内部に躯体コンクリートとして水セメント比55%の普通コンクリートを打設する場合を想定し、Fick の方程式を用いた。式中の塩化物イオンの拡散係数 (Dc) は、高強度モルタルおよび普通コンクリートについて、それぞれ促進試験によって得られた値 (表-6) を用いた。また、表面塩化物イオン濃度 (C₀) は、使用環境条件を海上大気中であると仮定して0.2%とした。

特殊ポリマーの塩化物イオンの拡散係数は、道路橋の塩害対策指針 (案)・同解説 (日本道路協会編)⁵⁾におけるエポキシ樹脂塗膜の遮塩性試験の結果を参考にし、 1.0×10^{-11} cm²/sec とした。

4.2 塩化物イオンの浸透量の予測結果と構造物の耐久性の評価

PCA フォームおよび躯体コンクリート中への塩化物イオンの浸透を長期的に予測した結果を図-9 に示す。予測期間は、50年、100年、150年とした。比較のために、PCA フォームの特殊ポリマー層がない場合あるいはPCA フォームを用いず普通コンクリート (W/C=55%) を用いた場合の予測結果も図中に示す。

PCA フォームを用いた場合は、150年経過後においても、外部より浸入する塩化物イオンは、裏面の特殊ポリマー層に遮断され、躯体コンクリート中への浸入は大きく抑えられると予測される。

躯体コンクリート中の鉄筋のかぶりを10 cmとした場合、PCA フォームの裏面より10 cmの深さの鉄筋位置における150年後の塩化物イオン量を比較した結果を図-10に示す。PCA フォームを用いた場合、この位置における塩化物イオンの浸透量は、特殊ポリマー層がある場合は約1.0 kg/m³、特殊ポリマー層がない場合は約2.3 kg/m³と予測される。これは、普通コンクリートを用いた場合の浸透量に対して、特殊ポリマー層がある場合は約30%、特殊ポリマー層がない場合は約75%となり、特殊ポリマー層の遮塩効果は極めて高いものと考えられる。

鉄筋の腐食が開始する限界の塩化物イオン量については、使用材料、環境条件、施工条件等により異なると考えられているが、一般に1.2 kg/m³程度とする報告⁶⁾が多い。従って、躯体のかぶりが10 cm程度の構造物にPCA フォームを用いた場合、上記のことから、150年間の供用後においても、鉄筋位置にまで鉄筋の腐食が開始する塩化物イオン量は、到達することはないと予測される。

5. まとめ

PCA フォームの種々の耐久性評価試験より、以下のことが確認された。

① PCA フォームの高強度モルタル層の塩化物イオンの拡散係数は、 0.4×10^{-8} cm²/sec程度であり、さらに特殊ポリマー層と一体化して塩化物イオンの浸入を著しく抑制することが可能である。

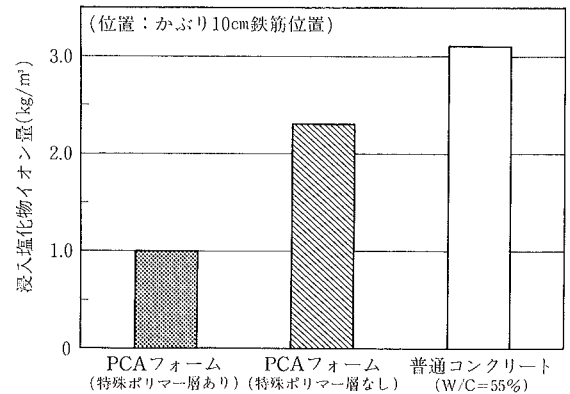


図-10 150年後の塩化物イオンの浸透量比較

② 通常のコンクリートを躯体コンクリートとして用いた海洋構造物にPCA フォームを用いた場合、鉄筋のかぶりが10 cm程度であれば、150年後においても、鉄筋位置にまで鉄筋の腐食が開始する塩化物イオン量が、到達することはないと予測される。

③ 中性化速度は著しく小さく、中性化の進行は、少なくとも10年程度は、PCA フォーム内にとどまると予測される。

④ 凍結融解繰返し試験の結果、動弾性係数の低下、あるいは表面のスケーリング等は認められなかった。PCA フォームは高い凍結融解抵抗性を有している。

⑤ 耐摩耗性および化学薬品に対する抵抗性は、いずれも水セメント比55%程度の普通コンクリートと同等以上である。

以上の結果より、型枠としてPCA フォームを用いることにより、コンクリート構造物の高耐久化を図ることが可能であると考えられる。

参考文献

- 1) 小柳光生, 小川晴果, 田村悦徳, 岡本秀雄: 薄肉PCA折り曲げ型枠工法の開発, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 14, No. 1, p. 137~142, (1992)
- 2) 竹田宣典, 迫田恵三, 十河茂幸: 各種塗装材料を用いたコンクリートの防食効果に関する研究, 土木学会第42回年次学術講演会講演概要集, V-191, p. 420~421, (1987)
- 3) 竹田宣典, 迫田恵三, 十河茂幸: 海洋環境下におけるコンクリート中への塩分浸透に関する研究, 土木学会第44回年次学術講演会講演概要集, V-107, p. 267~268, (1989)
- 4) 日本建築学会: JASS5, 鉄筋コンクリート工事, p. 288, (1984)
- 5) 日本道路協会編: 道路橋の塩害対策指針 (案)・同解説, コンクリート塗装材料の品質試験方法 (案), p. 61~65, (1984)
- 6) 岸谷孝一, 西澤紀昭他編: コンクリート構造物の耐久性評価シリーズ 塩害 (I), p. 31~34, (1986)