

論文

[1146] エポキシ・モルタル積層 PCa 型枠によるコンクリート構造物の高耐久化

竹田宣典*1・十河茂幸*2・栗原正美*3・住野正博*4

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い。特に大型のマスコンクリート構造物が海洋環境下に建設される場合、温度ひびわれ対策上、低発熱性の混合セメントが使用され、中性化速度が問題となったり、海洋環境下における塩化物イオンの浸透を抑制したり耐海水性等が必要となる。この様な状況のもとに、コンクリート構造物の耐久性を向上させるためには、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することが考えられ、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省力化が期待でき、さらに表面の美観も向上する。

本報告では、非腐食性の繊維系材料を用いた高強度モルタルと特殊ポリマーから構成される積層構造のプレキャスト型枠（以下、PCaパネルと称する。）について、耐久性（遮塩性、中性化速度、凍結融解抵抗性、耐摩耗性、化学抵抗性）に関する試験を行った結果について述べる。

2. PCaパネルの概要

2.1 構造の概要

図-1にPCaパネルの概略断面図を示す。PCaパネルは、ビニロン繊維を含有したひびわれ抵抗性に富んだ高強度モルタルと、腐食因子を遮断する働きを有する特殊ポリマーとの積層構造で構成され、モルタル層の補強材としてアラミド繊維のネットを用いている。

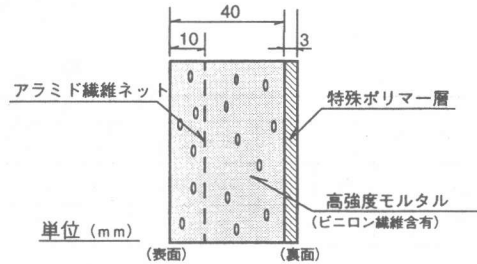


図-1 PCaパネルの断面図

2.2 製造方法

PCaパネルの製造方法を図-2に示す。アラミド繊維ネットを敷設した型枠内に、テーブルバイブレータによる振動を与えながら高強度モルタル（ビニロン繊維含有、厚さ40mm）を打込む。その後、湿潤接着型の特殊ポリマー（厚さ3mm）を吹付け、40℃の室内で蒸気養生を約10時間行う。

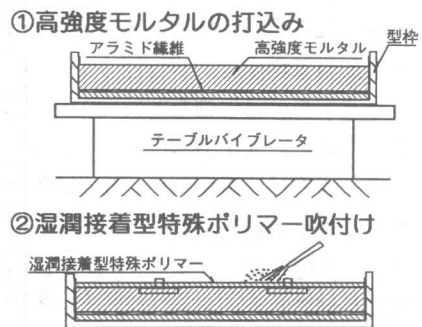


図-2 PCaパネルの製造方法

*1 ㈱大林組技術研究所 土木第三研究室 研究員, 工修 (正会員)
 *2 ㈱大林組技術研究所 土木第三研究室 主任研究員, 工博 (正会員)
 *3 ㈱大林組技術研究所 土木第三研究室 研究員
 *4 ㈱大林組技術研究所 化学研究室 主任研究員

2.3 使用材料および配合

高強度モルタルに用いた材料を表-1に、ビニロン繊維・アラミド繊維・特殊ポリマーの物性値を表-2に、配合を表-3に示す。また、比較用の普通コンクリートについても表中に併せて示す。

耐海水性、遮塩性を高めるため高炉スラグ微粉末を用い、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ームを用いた。また、特殊ポリマーには、親水性の変性エポキシ樹脂を用いた。

表-1 使用材料

種類	使用材料	比重	備考
高強度モルタル	早強ポルトランドセメント	3.14	ブレーン4360cm ² /g
	高炉スラグ微粉末	2.91	ブレーン7980cm ² /g
	シリカフェーム	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
	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
普通コンクリート	普通ポルトランドセメント	3.16	ブレーン3280cm ² /g
	細骨材	2.62	山砂, F. M. 2. 70
	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 物性値

種類	比重	引張強度 (kgf/mm ²)	ヤング率 (kgf/mm ²)	伸び (%)
ビニロン繊維	1.3	90	3000	6.0
アラミド繊維	1.39	350	7400	4.6
特殊ポリマー	1.1 ~ 1.3	7 ~ 21	—	2 ~ 4

表-3 配合

種類	W/C (%)	単 位 量 (kg/m ³)										スランブフロー (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (材令28日) (kgf/cm ²)
		水	セメント	高炉スラグ微粉末	シリカフェーム	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			
PCパネル	26	257	692	248	49	30	26	960	0	40	20	70-26	2.0	1000
普通コンクリート	55	165	300	0	0	0	0	859	980	0.75*	0	スラブ12	4.0	350

*: AE減水剤

3. 試験概要

3.1 試験項目および方法

表-4に試験項目と試験方法をまとめて示す。

PCパネルの遮塩性を確認するために、人工海水の浸漬による方法と浸漬乾燥くり返しによる促進試験方法によって塩化物イオンの浸透量を測定した。表-5に促進試験の試験条件を示す。塩分量の測定はJCI規準案（電位差滴定法）に従い、全塩分量を測定した。いずれの試験も材令4週で開始した。

表-4 試験項目および方法

評価項目	試験方法	供試体
遮塩性	人工海水浸漬試験 Cl ⁻ 濃度 1.8%の人工海水中に2ヶ月間浸漬後、塩化物イオン量を測定	100x100 x200mm (各2本)
	海水浸漬乾燥くり返し試験 Cl ⁻ 濃度 1.8%の人工海水の浸漬・湿潤・乾燥のくり返しを200サイクル終了後、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°C, 湿度55%の室内に2ヶ月間放置後、フェノールフタレインの変色域を測定	100x100 x 厚さ40mm (3本)
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くり返しを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600サイクル毎に動弾性係数及び重量の変化を測定	100x100 x400mm (3本)
耐摩耗性	摩耗試験 ASTM C-779 に準拠した回転式摩耗試験を行い、15分, 30分, 60分後にすりへり深さを測定	300x300 x 厚さ40mm (3枚)
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	40x40 x160mm (各2本)

3.2 供試体

表-4に各試験の供試体寸法および数量を示す。また、図-3に塩分浸透試験用の供試体形状を示す。10cm×10cmに整形したPCaパネルに、普通コンクリート(表-2に示す配合)を打ち継ぎ、周面をエポキシ樹脂でコーティングし、塩分をPCaパネルの表面からのみ浸透させた。普通コンクリートが実構造物での躯体コンクリートに該当する。比較用の普通コンクリート供試体も同様な大きさとし、周面をコーティングした。

表-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

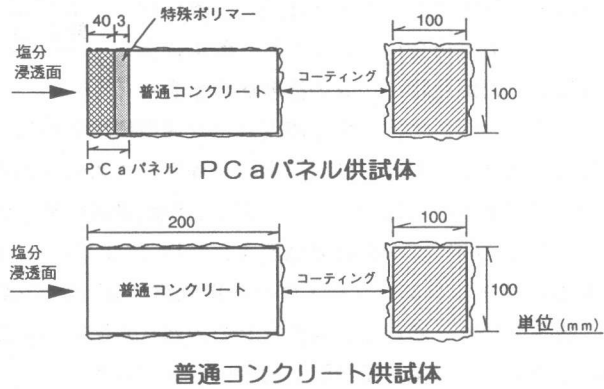


図-3 塩分浸透試験用の供試体

4. 試験結果および考察

4.1 遮塩性

人工海水浸漬2ヶ月後および海水浸漬乾燥くり返し200サイクル終了時の塩化物イオンの浸透状況を図-4, 5に示す。塩化物イオンの浸入量はモルタル重量に対する百分率で表す。

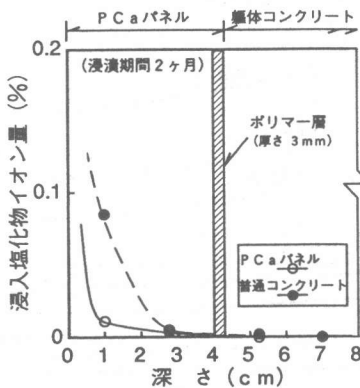


図-4 人工海水浸漬試験による塩化物イオンの浸透分布

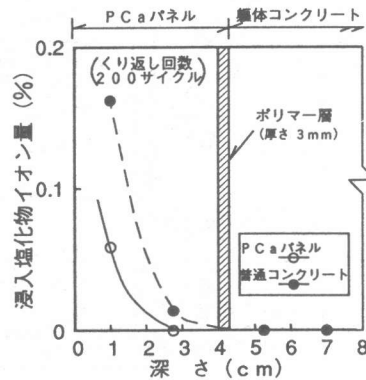


図-5 海水浸漬乾燥くり返し試験による塩化物イオンの浸透分布

200サイクルの浸漬乾燥のくり返しによっても、PCaパネルの裏面の特殊ポリマー層まで塩化物イオンが十分に浸透していないため、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が、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{式(1)}における拡散係数(Dc)を算出した。

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

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

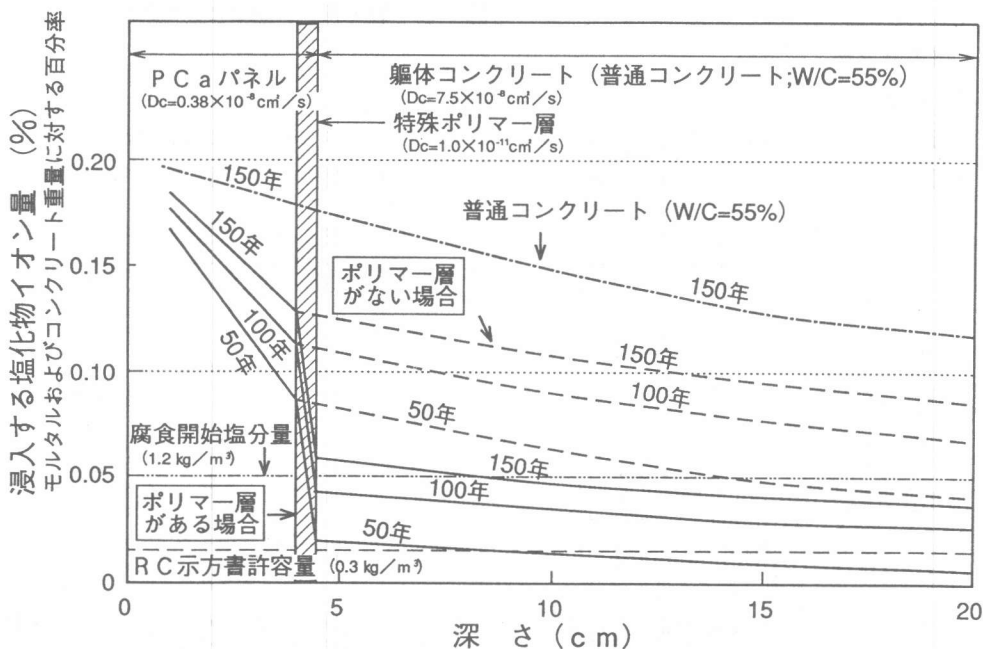
人工海水浸漬試験による塩化物イオンの浸透量と海水浸漬乾燥くり返し試験による塩化物イオンの浸透量の比較より、本試験でのくり返し200 サイクルは、波しぶきをかなり受ける海上大気中における2ヶ年間の暴露に相当するとして解析を行った[1]。解析により求められた塩化物イオンの拡散係数を表-

表-6 拡散係数の解析結果

種 類	拡散係数 D_c (cm ² /sec)	表面塩分量 C_0 (%)
P C a パネル (高強度モルタル層)	0.38×10^{-8}	0.2
普通コンクリート	7.50×10^{-8}	0.2

6に示す。表面塩化物イオン濃度(C_0)は使用環境条件によって定まると考えられ、波しぶきを受ける海上大気中においては、通常0.2%程度との報告が多く、解析にはこの値を用いた[2]。

表-6に示す拡散係数およびエポキシ樹脂塗膜の遮塩性試験より特殊ポリマー(変性エポキシ樹脂)の塩化物イオンの拡散係数を 1.0×10^{-11} cm²/secと仮定してFickの方程式を用い、P C a パネル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-6に示す。特殊ポリマー層がない場合とP C a パネルを用いず普通コンクリート(W/C=55%) のみの場合の塩化物イオンの浸透量予測も図中に併せて示す。



*モルタル及びコンクリート重量に対する百分率
図-6 塩化物イオンの浸透予測

外部より浸入した塩化物イオンは、P C a パネル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が大きく抑えられている。

P C a パネルの裏面より10cmの深さに鉄筋が配置される(躯体コンクリートのかぶり10cm)場合に、150年後における鉄筋位置の

表-7 150年後の塩化物イオン浸透量比較

種 類	浸入塩化物イオン量 (kg/m ³)
P C a パネル (特殊ポリマー層有)	1.0
P C a パネル (特殊ポリマー層無)	2.3
普通コンクリート	3.1

塩化物イオン量を比較した結果を表-7に示す。塩化物イオンのPCaパネルへの浸透量は、普通コンクリートのそれに対して、ポリマー層がある場合は約30%、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が極めて高いと考えられる。

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、環境条件、施工条件等により異なると考えられるが、一般に1.2kg/m³程度とする報告が多く[3]、かぶり10cmの構造物にPCaパネルを用いた場合、150年後においても、鉄筋の腐食が開始する塩化物イオン量は浸入しないと予測される。

4.2 中性化速度

中性化促進試験の結果を表-8に示す。中性化深さは、普通コンクリートで21.5mmであるのに対して、PCaパネルでは全く認められず、PCaパネルによる中性化の抑制効果が認められた。

表-8 中性化深さ

種類	中性化深さ (mm)
PCaパネル	0
普通コンクリート	21.5

4.3 凍結融解抵抗性

凍結融解試験の結果を図-7に示す。凍結融解のくり返し600サイクル終了時ににおいて、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パネルは空気量が2%と小さいにもかかわらず、動弾性係数の低下は認められず、また表面のスケーリング等も認められなかった。

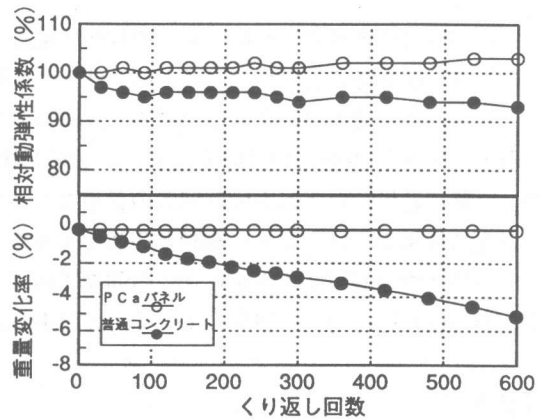


図-7 凍結融解試験結果

4.4 耐摩耗性

摩耗試験の結果を図-8に示す。PCaパネルは水結合材比を小さく(W/P=26%)した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、すりへり量は普通コンクリートとあまり変わらず、耐摩耗性は普通コンクリートと同程度であると考えられる。

4.5 化学抵抗性

図-9に5%塩酸溶液(HCl純濃度)での浸漬試験結果を示す。普通コンクリートは7週間ですべて溶出したが、PCaパネルではその溶出量が著しく少なく、12週間

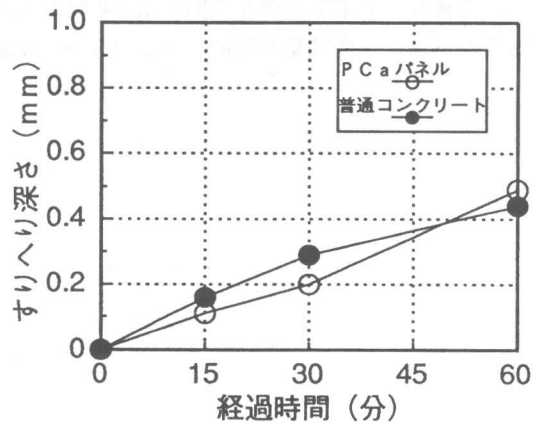


図-8 摩耗試験結果

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12週間浸漬では、PCaパネル・普通コンクリートとも膨張は認められず、重量変化もなかった。

5. まとめ

エポキシ・モルタル積層のプレキャスト版(PCaパネル)の耐久性評価試験より、以下のことが確認された。

- (1) ビニロン繊維含有の高強度モルタル層の塩化物イオンの拡散係数は、 $0.4 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{sec}$ 程度であり、特殊

ポリマー層と一体化して塩化物イオンの浸入を抑制することが可能であることが確認された。

- (2) 中性化速度は著しく小さく、中性化の進行は長期間パネル内にとどまると推定される。

- (3) 凍結融解抵抗性については、600 サイクル迄のくり返しの結果、動弾性係数の低下は認められず、表面のスケーリング等も認められないことが確認された。

なお、モルタルを用いているため、表面の耐摩耗性や化学薬品に対する抵抗性が懸念されたが、試験の結果、いずれもW/C=55%の普通コンクリートと同等以上であることが確認された。

以上の結果より、エポキシ樹脂と高強度モルタルの積層構造から成るPCaパネルは、コンクリート構造物の高耐久化を図る上で有効な工法であると考えられる。今後、さらに施工の省力化や色調の改善等について検討していく考えである。

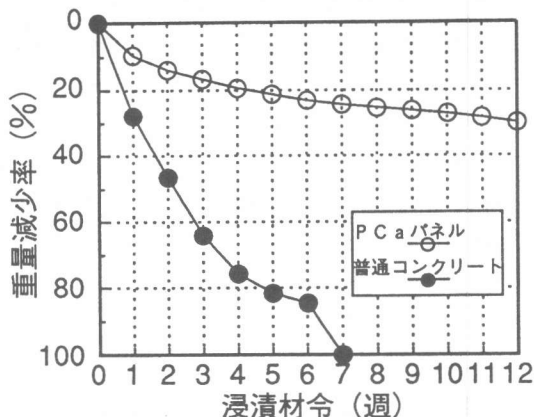


図-9 5%硫酸溶液浸漬試験結果

【参考文献】

- [1] 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，pp.420-421，1987.9
- [2] 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，pp.268-267，1989.10
- [3] 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)