

# 論文 海洋環境下における PC 矢板の耐久性評価に関する促進試験

由浅直洋\*1・濱田秀則\*2・宮崎豊\*3

**要旨:** 本論文では、室内での乾湿繰り返し促進試験を行った PC 矢板の性状に基づき、長期にわたる海洋環境下での耐久性を考察した。その結果、高強度コンクリートを用いた PC 矢板は塩分浸透に対する抵抗性が大きく、埋設された鋼材の防食性に優れ、促進試験後の曲げ耐力の低下もないことを確認した。

**キーワード:** 高強度コンクリート, 塩分環境, 促進試験, PC 矢板, 塩分浸透, 耐久性

## 1. はじめに

PC 矢板は河川等の護岸用, 土留め壁あるいは擁壁用として JIS 規格化<sup>1)</sup>されており, 部材形状やかぶり等が標準化されている。

しかし港湾用としての PC 矢板においては, 特に規格化されたものもなく, JIS 規格を準用しつつ耐久性の観点からかぶりを大きくとり, そのつど断面設定しているものがほとんどで, かぶり厚も統一されていないのが現状である。

港湾用構造物の塩害に対する耐久性の調査, 研究においては各機関でされているが<sup>2), 3)</sup>, 対象としているものは RC 構造物もしくは通常の PC 構造物に対してであり, 今回の高強度コンクリートを用いた PC 矢板のような例はあまりみられない<sup>4)</sup>。

そこで本論文では, かぶり厚, 配合条件, 養生条件の 3 つのパラメータを考慮して PC 矢板の供試体を製作して促進試験を行い, ①外観観察, ②曲げ載荷試験, ③塩分浸透量, ④ PC 鋼線観察の 4 項目の調査を行い, この PC 矢板の耐久性について考察を行った。

表-1 供試体種別

No.	記号	部材高 h (cm)	かぶり (cm)	配合 条件	養生 条件
1	PS3	7	3	1	1
2	PS5	11	5	1	1
3	BS5	11	5	2	1
4	PS7	15	7	1	1
5	PN3	7	3	1	2
6	PN5	11	5	1	2
7	BN5	11	5	2	2
8	PN7	15	7	1	2

注 1) 配合条件は表-2 による。

注 2) 養生条件は次に示すとおりである。

条件 1: 蒸気で 1 日, 湿潤で 2 日, その後シート被覆

条件 2: 湿潤で 3 日, その後シート被覆

表-2 供試体の配合表

配合 条件	W/B (%)	s/a (%)	単 位 量 ( kg/m <sup>3</sup> )					高性能 AE 減水剤	AE 剤
			W	C	Slag	S	G		
1	32	45.3	150	469	0	784	950	1.2	0.0015
2	32	44.9	150	234	234	770	949	1.2	0.0020

注 1) 上表中, B = C + Slag

注 2) 高性能 AE 減水剤, AE 剤の数値は, B に対する割合

注 3) 配合条件 2 は高炉スラグ置換率 = 50%

注 4) Slag は高炉スラグ微粉末 密度 2.92 g/cm<sup>3</sup> 比表面積 6170 cm<sup>2</sup>/g

\*1 (株)ピー・エス 開発技術部 工修 (正会員)

\*2 運輸省港湾技術研究所 構造部 材料研究室室長 工博 (正会員)

\*3 ドービー建設工業(株) 技術部 技術課

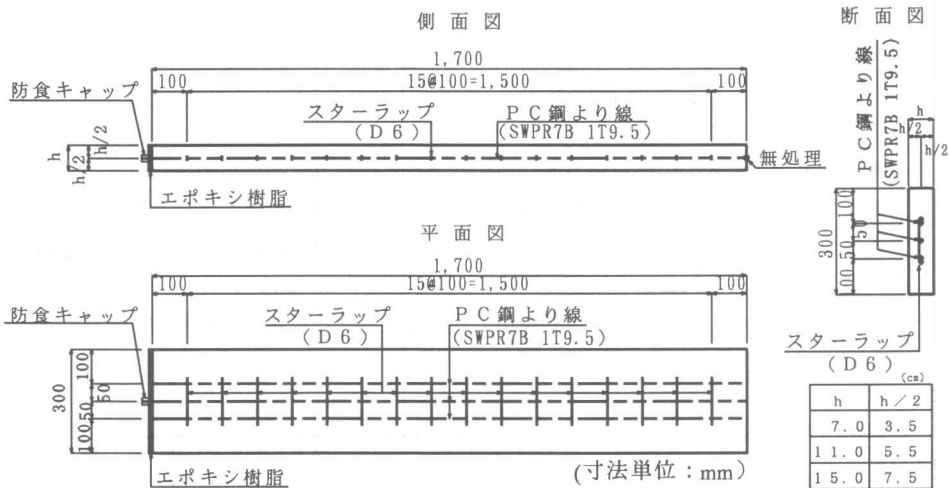


図-1 供試体寸法図

## 2. PC 矢板供試体の概要

促進試験を行う PC 矢板の供試体は、表-1 に示すように 8 種類とした。表中の記号については、配合条件と養生条件の違い、かぶり厚を示し、表-2 に示すように配合条件 1 のものは P、配合条件 2 のものは B とし、養生条件においては蒸気養生が S、湿潤養生が N としている。

いずれの供試体も通常の矢板製作では一般的である高強度とし（設計基準強度  $f_{ck} = 70 \text{ N/mm}^2$ 、プレストレス導入時強度  $35 \text{ N/mm}^2$ ）、かぶりについては 3cm、5cm、7cm の 3 種類を考えている。

供試体の寸法は、1,700 mm × 300 mm × 部材高さの矩形断面とし、部材高さにおいてはかぶり厚が違うことから、それに対応するように、7cm、11cm、15cm となっている。

また 3 本の PC 鋼より線 (SWPR7B 1T9.5) が配置されており、有効プレストレス  $\sigma_{pe} = 9 \text{ N/mm}^2$  が導入されている（プレテンション方式）。なお端部の処理においては、図-1 に示すように片面のみエポキシ樹脂で端面処理を行い、もう片方の面は無処理とした。

各供試体の配合は、現状の PC 矢板の標準的なものを基本配合として、表-2 の配合条件 1 に示すように水セメント比 (W/C) 32%、単位

セメント量  $C = 469 \text{ kg/m}^3$ 、スランプ 8.0 ± 2.5cm とした。もう一つは配合条件 2 に示すように、同じ水セメント比、単位水量であるが、セメント量を高炉スラグ微粉末で 50% 置換したものとし、その違いを確認した。

使用しているセメントは早強ポルトランドセメントで、細骨材、粗骨材（最大寸法 20mm）は鬼怒川産の川砂、鬼怒川産の砕石を使用している。

養生条件については、実物の PC 矢板は工場製品であり、合理的な製作条件として蒸気養生が一般的であるため、湿潤養生と蒸気養生の 2 種類を考え、その影響について確認を行うこととした。

## 3. 促進試験の概要

PC 矢板の長期にわたる海洋環境下における耐久性は、実際の港湾において長期にわたる暴露試験を行うことが本来は望ましいが、この場合試験期間が非常に長くなり、それに伴って結果の反映も遅くなる。したがって、本実験においては実験室内での促進試験を基に考察することとした。

室内での促進試験の内容は乾湿の繰り返し試験とし、1 日 40℃ の海水を噴霧して湿潤状態に

し、その後 2.5 日間扇風機を使用した乾燥を行い、3.5 日を 1 サイクルとして、220 サイクル(約 2 年) 実施した。

各供試体は、エポキシ樹脂を被覆している部分を上方にして壁に立てかけるように設置し、端部処理していない下端部は下にたまった海水に浸せきした状態になっている。

#### 4. 試験結果および考察

##### 4. 1 外観観察

促進試験後に矢板供試体の表面をよく洗浄して外観観察を行ったが、220 サイクルの促進試験中に有害なひび割れやその他の異常は発生しておらず、損傷は確認されなかった。

##### 4. 2 曲げ載荷試験

促進試験前後で 2 点集中載荷による曲げ載荷試験を行い、ひび割れ発生荷重および破壊荷重(曲げ耐力)を確認し、計算値と比較し耐力劣化の調査を行った。図-2 に載荷試験図を示す。

測定項目は、コンクリート上縁ひずみ(ゲージ 3 枚)、コンクリート下縁ひび割れ( $\pi$ 型ゲージ 5 個)および変位(10 点)であり、ひび割れ発生荷重および破壊荷重の計算値は、材齢 28 日時に計測した材料定数を用いて計算している。それらは圧縮強度が  $f'_c = 76.1 \text{ N/mm}^2$ 、引張強度が  $f_t = 6.4 \text{ N/mm}^2$ 、コンクリートの弾性係数が  $E_c = 3.68 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$  である。

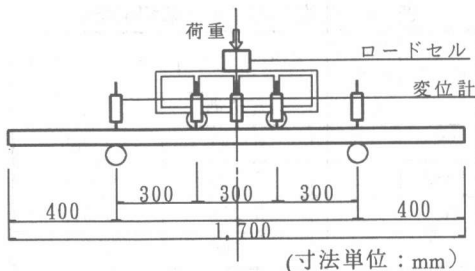


図-2 載荷試験図

促進試験前後のひび割れ発生荷重の比較を図-3 に示す。PS3 は促進前に 23.5 kN だったのが

促進後には 32.4 kN に、同様に PS5 は 47.1 kN から 54.0 kN、PS7 は 77.5 kN から 93.2 kN となった。各供試体とも促進前、促進後共に計算値を満足しており、促進試験を行ってもひび割れ発生時の荷重の低下は認められなかった。材齢にともない圧縮強度、弾性係数が大きくなっていることにより、逆に耐力が向上するような結果になった。

ひび割れ発生時のひび割れ幅においては、PC 矢板の場合、JIS A 5354 により 0.05mm 以内と規定されているが、かぶり 3cm の供試体が若干越えてしまったものの、それ以外のほとんどの供試体は 0.05mm 以内に収まっている。

同様に破壊荷重の比較を図-4 に示す。PS3 のモデルのみ、促進前の破壊荷重(46.6 kN)が計算値(51.0 kN)を下回ったほかは、ひび割れ発生荷重と同じように計算値よりも高い値を示し、促進後も曲げ耐力の低下は認められなかった。破壊状態は全供試体ともコンクリート上縁部の圧壊であり、その際のひずみは 2500~3500  $\mu$  の範囲で数値的にみても異常な値は示していない。

表-3 にひび割れ発生荷重の一覧表を示す。

湿潤養生と蒸気養生による違いについては明確には現れておらず、高炉スラグで置換した配合による違いについてはほぼ同値を示しており、おもだった大きな差は見られない。

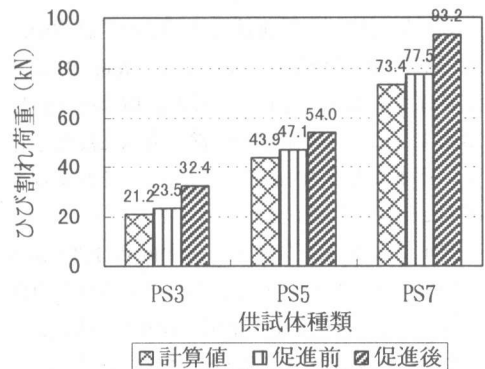


図-3 促進試験前後のひび割れ発生荷重比較

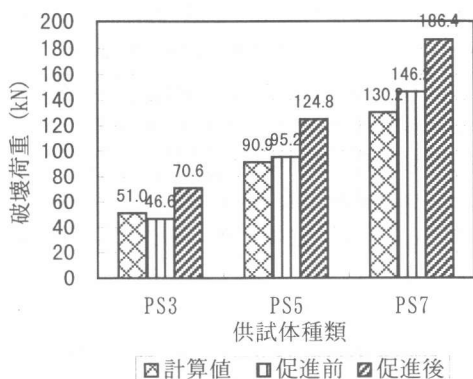


図-4 促進試験前後の破壊荷重比較

表-3 促進後ひび割れ発生荷重

記号	ひび割れ発生荷重 (kN)		
	計算値	促進前	促進後
PS3	21.2	23.5	32.4
PS5	43.9	47.1	54.0
BS5	----	----	54.0
PS7	73.4	77.5	93.2
PN3	----	----	30.4
PN5	----	----	54.9
BN5	----	----	54.0
PN7	----	----	98.1

#### 4. 3 コンクリート中の塩化物含有量調査

塩化物イオンの浸透状況を把握するために、促進試験終了後のコンクリート中に含まれる全塩化物含有量を測定した。

分析用試料は、載荷試験終了後の供試体の、PC鋼線付近（かぶり3cm, 5cm, 7cmの周囲）より採取するものとした。採取位置は図-5に示すように、促進試験中に常時海水に浸せきしていた下端より10cmのA位置と、それより上方60cmのB位置の2ヶ所とした。

測定は日本コンクリート工学協会 JCI-SC5「硬化コンクリート中に含まれる全塩分の簡易分析法」に準じて行い、全塩化物イオン量(Cl<sup>-</sup>)をセメント質量に対するパーセントで示す。

測定結果の一覧を表-4に示す。

かぶり3cmのモデルで0.009~0.057%, かぶり

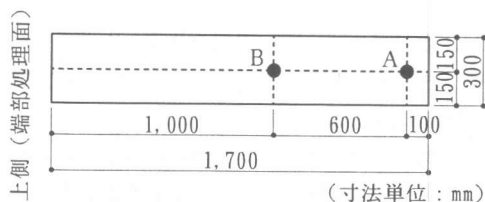


図-5 試料採取位置

5cmのモデルで0.009~0.114%, かぶり7cmのモデルで0.012~0.090%となっている。

下端より10cmのA位置は、常時海水に浸せきしていた部分であり、しかも端面処理していない面であることから、B位置と比較すると多くの塩分を含む傾向があるが、鉄筋腐食を引き起こす限界塩化物含有量の目安を、セメント質量に対する0.4%<sup>5)</sup>と考えると、ほとんどの供試体がかぶり塩化物含有量が少ないことがわかる。試験結果の最大値であるPN5の0.114%でさえ目安値の1/4程度である。3cm, 5cm, 7cmのかぶりの違い、配合の違いによる差も明確には現れない結果となった。

図-6に湿潤養生した供試体の塩化物含有量を、同様に図-7に蒸気養生した供試体の塩化物含有量を分けて示す。10cmのA位置ではばらつきがあるものの、B位置にいたっては養生条件の違いによる影響はほとんどみられない。

A位置でのばらつきも、限界塩化物イオン濃度の目安を考えると極めて少ないために、両者の差はほとんどないに等しいと判断できる。

表-4 全塩化物イオン量測定結果

記号	かぶり厚さ (cm)	全塩化物イオン量 (Cl <sup>-</sup> %)	
		A位置	B位置
PS3	3	0.057	0.009
PS5	5	0.009	0.012
BS5	5	0.018	0.012
PS7	7	0.090	0.012
PN3	3	0.015	0.009
PN5	5	0.114	0.012
BN5	5	0.021	0.012
PN7	7	0.024	0.015

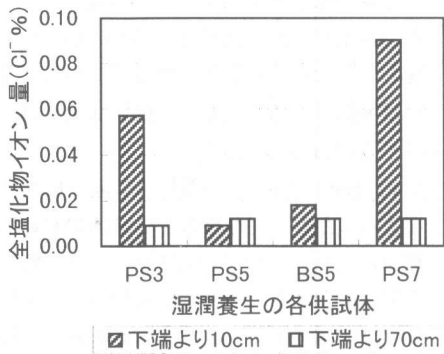


図-6 湿潤養生の塩分含有量

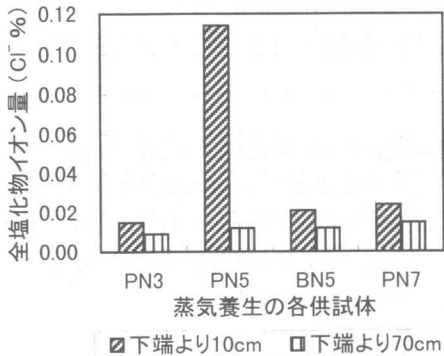


図-7 蒸気養生の塩分含有量

表-5 全P C鋼線の腐食面積率

供試体	腐食面積 (cm <sup>2</sup> )	腐食面積率 (%)	平均腐食面積率 (%)
SPS3	1.463	0.29	0.29
	1.628	0.32	
	1.292	0.25	
SPS5	1.207	0.24	0.27
	1.626	0.32	
	1.202	0.24	
SBS5	1.626	0.32	0.33
	1.966	0.39	
	1.378	0.27	
SPS7	1.132	0.22	0.20
	0.939	0.19	
	0.970	0.19	
SPN3	1.251	0.25	0.27
	1.548	0.31	
	1.245	0.25	
SPN5	1.076	0.21	0.23
	1.233	0.24	
	1.118	0.22	
SBN5	1.377	0.27	0.31
	1.834	0.36	
	1.505	0.30	
SPN7	1.477	0.29	0.26
	1.095	0.22	
	1.341	0.26	

#### 4. 4 PC 鋼材観察

曲げ載荷試験を行ったP C矢板の供試体より、埋設されていたP C鋼線（各供試体3本）を取り出し、発錆の進行度合いを目視にて調査した。

全供試体とも常時海水に浸かっていた下端部分にのみ錆が生じていたが、その他の部分には確認されなかった。

表-5 に全P C鋼線の腐食面積率の一覧を示し、図-8 にかぶりと腐食面積率の関係を示す。腐食面積率は、鋼材の全表面積（507.45 cm<sup>2</sup>）に対する面積割合として算出している。

図-8 より腐食面積率に着目すると、どの条件においても非常に小さい値となっており、かぶり厚の大小の影響が鋼材の腐食に明確にでない。このことから、今回の促進試験においては、腐食面積率はかぶり厚の大小とは関係がないといえ、錆が発生している位置が常時海水

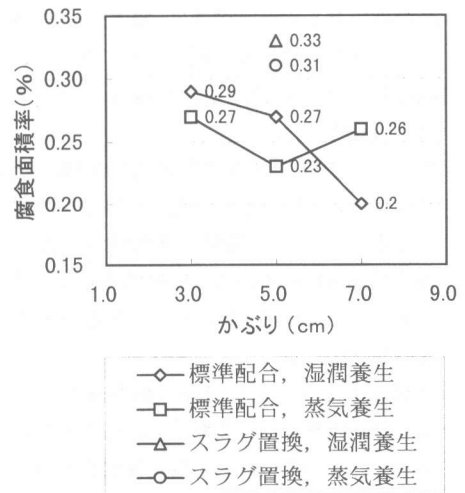


図-8 かぶりと腐食面積率の関係

に浸せきしていた部分であり、下端部はエポキシ樹脂で処理していない端面であることから、P C鋼材の腐食の原因はかぶり厚の違いによる塩分の浸透差ではないと判断できる。

配合条件の違いでは、セメント量を高炉スラグ微粉末で 50%置換した供試体の方が多少腐食面積は大きくなる傾向がみられるものの、0.2~0.3 %程度と極めて小さい値であるため、明確にその差については確認されなかった。養生条件の違いによる鋼材の腐食の差も同様である。

この発錆状況は、全塩化物含有量の試験結果を裏付けるものであり、端面の処理が十分にできていれば、この矢板モデルは塩分の浸透に対しては優れているものと判断できる。

## 5. まとめ

本研究はP C矢板の海洋環境下での耐久性を考察するために、促進試験をとおして各種の調査、試験を行った。その試験結果より得られた結果をまとめると以下ようになる。

- ① 促進試験の前後で曲げ荷重試験を行ったが、促進試験後のひび割れ発生荷重、破壊荷重の低下がみられないことから、力学的に健全であることが確認できた。
- ② 高強度である設計基準強度 70 N/mm<sup>2</sup>のコンクリートを使用する通常のP C矢板は、塩化物イオンの浸透量はかなり少ないことが確認できた。
- ③ セメントを高炉スラグ微粉末で置換した配合を用いて試験を行ったが、ひび割れ発生荷重およびP C鋼材の発錆状況で若干の差がみられるものの、早強ポルトランドセメントを用いたコンクリートとほぼ同等の性状を示した。
- ④ 蒸気養生を行った供試体と湿潤養生を行った供試体を比較したが、どれも明確な差がみられないことから、蒸気養生を実施できる可能性があることも確認できた。
- ⑤ 部材中に埋設されているP C鋼線がほと

んど健全な状態であることが確認できた。塩分浸透が少ないためであるが、端部処理をしていない、海水に浸せきしていた部分には発錆が見られるため、適切な端部処理は必要であるといえる。

- ⑥ 3cm, 5cm, 7cm のかぶり厚の違う供試体を比較したが、促進後の全供試体のP C鋼線がほとんど健全な状態であり、曲げ耐力の低下もないことから、建造物の耐用年数を十分考慮すれば、高強度であるP C矢板は部材厚を薄くすることが可能であるといえる。また、かぶりの違いによるひび割れ、破壊性状への影響もないことが確認できた。

本研究は促進試験に基づいて論を展開している。さらに長期の耐久性を確認するために現在暴露試験を継続している。それらの結果と併せてP C矢板の総合的な耐久性を把握することができるものと考えている。

## 6. 参考文献

- 1) 社団法人 プレストレスト・コンクリート建設業協会：プレストレストコンクリート矢板設計便覧，1988.12
- 2) 長瀧重義監修：コンクリートの長期耐久性 [小樽港百年耐久性試験に学ぶ]，技報堂出版，1995
- 3) 福手勤，濱田秀則，山本邦夫：海洋環境に20年間暴露されたコンクリートの耐久性に関する研究，土木学会論文集，No.442/V-16，pp.43-52，1992.2
- 4) 山崎純子，梶田佳寛，中村成春：高強度コンクリートの塩害抑制効果の評価，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.1，pp.209-214，1998
- 5) 社団法人 土木学会：コンクリート建造物の維持管理指針（案），pp.15，1995