

# 港湾空港技術研究所 資料

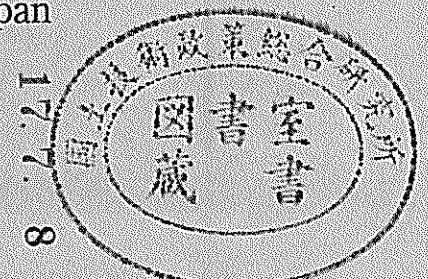
TECHNICAL NOTE  
OF  
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No. 1097      June 2005

促進試験によるプレストレストコンクリート製矢板の海洋環境下における耐久性評価

濱田 秀則  
横田 弘  
菊池 喜昭

独立行政法人 港湾空港技術研究所  
Independent Administrative Institution,  
Port and Airport Research Institute, Japan



## 目 次

要 旨 .....	3
1. はじめに .....	4
2. 劣化促進試験の方法 .....	4
2.1 試験の全体構成 .....	4
2.2 供試体の概要 .....	4
2.3 促進試験の方法 .....	6
2.4 試験項目および方法 .....	6
3. 劣化促進試験の結果および考察 .....	7
3.1 円柱供試体の試験結果 .....	7
3.2 矢板モデル供試体の試験結果 .....	10
3.3 塩分浸透性に基づいたPC矢板の耐久性評価 .....	12
4. 結論 .....	14
謝辞 .....	14
参考文献 .....	14

# Durability Evaluation of Pre-stressed Concrete Sheet Pile under Marine Corrosive Environments by Acceleration Test

Hidenori HAMADA\*  
Hiroshi YOKOTA\*\*  
Yoshiaki KIKUCHI\*\*\*

## Synopsis

In this paper, a term "PC sheet pile" is used as "Pre-stressed Concrete Sheet Pile". PC sheet pile has ever been used widely as river revetment, retaining wall, etc. However, it has not been used in port and harbor structures. The reason for this is that the environmental condition of port and harbor is severe for steel corrosion in concrete structures. Therefore, the adequate countermeasure for corrosion prevention is necessary in port structures. In a viewpoint of sheet pile setting, the sheet pile thickness should be as small as possible. On the other hand, in the viewpoint of corrosion prevention, the cover thickness of steel bars should be as larger as possible. Due to the lack of research data on adequate cover thickness, PC sheet pile has not been used for port and harbor structures. The objective of this study is to obtain experimental data to discuss about an adequate cover thickness of PC sheet piles under severe corrosive environments, such as marine conditions. In this study, PC sheet pile model specimens and cylindrical control specimens were exposed under artificial accelerating corrosive condition. Based on this experimental data, the durability of PC sheet pile under corrosive environments is quantitatively evaluated, and an adequate cover thickness is discussed based on the durability evaluation. Main conclusions obtained in this study are as follows.

- 1) Chloride ingress into concrete with compressive strength  $70\text{N/mm}^2$  is much smaller than that of concrete with ordinary strength, such as  $24\text{N/mm}^2$ .
- 2) Steam curing does not have a negative influence on concrete quality.
- 3) Inclusion of blast furnace slag leads to the shift of electrical potential to lower value, however, the steel corrosion is very small.
- 4) An adequate cover thickness depends on the environmental condition and required service life of the structure. If the required corrosion initiation time is 20 years, the minimum cover thickness becomes 30mm, as for 30 years it is 40mm and as for 50 years it is 50mm.

**Key Words:** PC sheet pile, corrosive environment, cover thickness, durability, acceleration test

---

\* Head of Materials Division, Geotechnical and Structural Department

\*\* Head of Structural Mechanics Division, Geotechnical and Structural Department

\*\*\* Head of Foundations Division, Geotechnical and Structural Department

# 促進試験によるプレストレストコンクリート製矢板の 海洋環境下における耐久性評価

濱田秀則\*  
横田 弘\*\*  
菊池喜昭\*\*\*

## 要 旨

プレストレストコンクリート製矢板を本文では「PC矢板」と略記する。PC矢板は河川などの護岸用あるいは土留め壁、擁壁用としてこれまでに多く用いられている。しかし、港湾用の矢板としての使用実績は極めて少ない。その理由は、港湾環境は海洋環境であることから、コンクリート内部の鋼材腐食防止の観点から、矢板厚が大きくならざるを得ないためである。一方、矢板打ち込みの施工性を向上させるためには、矢板の厚さは可能な限り小さくすることが望ましい。これまでに、PC矢板が港湾工事においてあまり用いられていないのは、かぶり厚さを適切に定めるための知見が十分に得られていないことが一つの大きな理由である。そこで本研究は、鋼材の腐食環境である港湾環境においてPC矢板を用いる場合に、適切と考えられるかぶり厚さを設定するための知見を得ることを目的としている。本研究では、供試体を用いた劣化促進試験を実施し、海洋腐食環境下におけるPC矢板の劣化挙動を調べた。その結果に基づき、PC矢板の海洋腐食環境下における耐久性を評価し、適切なかぶり厚さに対する考察を行った。得られた主要な結論は以下のとおりである。

(1) 劣化促進試験の前後でコンクリート自体の強度、弾性係数の物性値に低下の傾向が見られないことから、コンクリート自体の耐久性は優れていると判断される。

(2) PC矢板に用いられる設計強度(70N/mm<sup>2</sup>)相当のコンクリートであれば、コンクリート中への塩分の浸透はかなり抑制することが可能である。

(3) 蒸気養生と湿潤養生を行った供試体の試験結果に明確な差が見られないことより、蒸気養生がコンクリートの品質低下を招くことはないことを確認できた。

(4) 耐久性を考慮してかぶり厚を考察すると、内部鋼材の腐食開始時が20年で30mm、30年で40mm、50年で50mmが一応の目安となる。

キーワード：PC 矢板，腐食環境，かぶり厚さ，耐久性，促進試験

---

\* 地盤・構造部 材料研究室 室長  
\*\* 地盤・構造部 構造強度研究室 室長  
\*\*\* 地盤・構造部 基礎工研究室 室長

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人港湾空港技術研究所  
電話：046-844-5061 Fax：046-844-0255 e-mail：hamada@pari.go.jp

## 1. はじめに

プレストレストコンクリート製矢板（PC矢板）は、河川等の護岸用あるいは土留め壁、擁壁用として既にJIS規格化されており、部材形状、鋼材量およびそのかぶり厚さ等が標準化されている。一方、港湾工事においてPC矢板はこれまでにあまり使用されておらず、特に規格化されたものもないのが実状である。その理由の一つは、港湾用、すなわち、海洋環境に適用する場合の適切なかぶり厚さが設定されていないことにある。現状においては、JIS規格を準用しつつ耐久性の観点から、かぶりを大きくとってその都度断面を設定しているのがほとんどで、かぶり厚に関する一貫性のある考え方が確立されるに至っていない。

そこで本試験は、港湾環境のような腐食性環境下におけるPC矢板の耐久性を適切に評価し、それに基づく鋼材のかぶり厚さを適切に設定するために、耐久性評価促進試験結果を行うものである。そして、耐久性評価に基づいた適切なかぶり厚さについて考察を試みる。

平成12年9月に取りまとめられた技術マニュアル<sup>1)</sup>においては、かぶりの標準値として“5cm”という値が示されている。しかし、昨今、性能設計の考え方が広まりつつあり、耐用年数に応じたかぶりの設定が本筋である。本研究で得られた成果は、PC矢板の性能設計を実施していく際に生かされるものである。

## 2. 劣化促進試験の方法

### 2.1 試験の全体構成

本試験の全体構成を表-1に示す。本実験では、大きく分類して3種類の供試体を使用した。すなわち、1) 円

表-1 本実験の全体構成（試験項目）

使用した供試体	試験項目
円柱供試体 ・無筋 ・鉄筋入り	1. 表面観察 2. 圧縮強度 3. 割裂引張強度 4. 静弾性係数 5. コンクリート中の塩分含有量試験 6. X線回折分析 7. 細孔径分布試験 8. 内部鋼材の自然電位 9. 急速塩化物イオン透過性試験
PC矢板モデル供試体	1. 表面観察 2. 曲げ載荷試験 3. PC鋼材の腐食状況観察 4. 内部鋼材の自然電位 5. コンクリート中の塩分含有量試験
角柱供試体 (補足用)	1. コンクリート中の塩分含有量試験

柱供試体、2) PC矢板モデル供試体、3) 10×10×40cmの角柱供試体（補足用）である。各々の供試体は、後述する乾湿繰返し劣化促進試験を実施した後に表-1に示す項目の試験を実施した。

### 2.2 供試体の概要

#### (1) 供試体の種類および寸法

供試体は、a) 円柱供試体、b) 矢板モデル供試体、およびc) 角柱供試体（補足用）の3種類である。

#### a) 円柱供試体

円柱供試体の一覧を表-2に示す。表に示すとおり、全体で11種類の供試体を作成した。表に示すように、配合条件が4種類、養生条件が3種類ある。これらの詳細は

表-2 円柱供試体の一覧

供試体記号	配合条件	養生条件
T-1	[条件-1] 高炉スラグ、置換率0%	条件-1
T-2		条件-2
T-3		条件-3
T-4	[条件-2] 高炉スラグ、置換率30%	条件-1
T-5		条件-2
T-6		条件-3
T-7	[条件-3] 高炉スラグ、置換率50%	条件-1
T-8		条件-2
T-9		条件-3
T-10	[条件-4] 高炉スラグ、置換率0% 圧縮強度24N/mm <sup>2</sup>	条件-4
T-11		条件-3

養生条件-1：蒸気1日→湿潤2日→シート被覆

①養生開始はコンクリート打設後4時間。

②養生中の温度上昇および下降は1時間につき15℃。

③最高温度は60℃とし、その継続時間は6時間。

養生条件-2：湿潤3日→シート被覆

養生条件-3：水中養生：標準養生

養生条件-4：湿潤5日→シート被覆

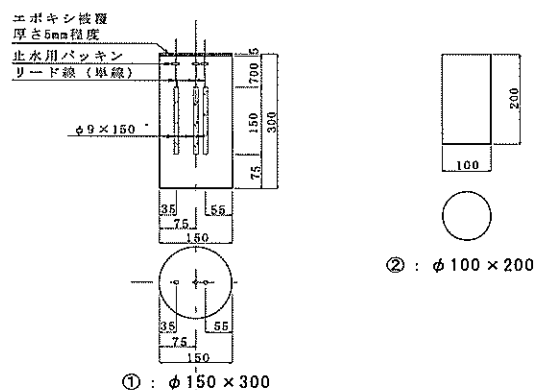


図-1 円柱供試体の形状と寸法

後述する。円柱供試体の形状・寸法を図-1に示す。図に示すように、鉄筋を埋設する場合は、 $\phi 150 \times 300\text{mm}$ 、無筋の場合は、 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ とした。鉄筋入りの場合は、かぶり厚さが30mm、50mm、70mmとなる位置に3本の鉄筋を埋設した。

b) 矢板モデル供試体

矢板モデル供試体の一覧を表-3に示す。表に示すように、全部で11種類の供試体を作成した。矢板モデル供試体の形状・寸法を図-2に示す。図に示すとおり、供試体の長さは1700mm、供試体の中央位置に3本のPCより線(SWPR7B)を埋設した。PC矢板の厚さが70mm、110mm、および150mmに対して、かぶり厚さが30mm、50mm、70mmである。3本のPC鋼より線の位置を固定するために、16本のスターラップを100mm間隔で配置

表-3 矢板モデル供試体の一覧

供試体記号	配合条件	養生条件	部材高(cm)	かぶり(cm)	備考	
SPS3	条件-1	条件-1	7.0	3.0	非促進	
SPS5			11.0	5.0		
SPS7			15.0	7.0		
SPS3	条件-1		7.0	3.0	促進	
SPS5			11.0	5.0		
SBS5	条件-3		11.0	5.0		
SPS7	条件-1	15.0	7.0			
SPN3	条件-1	条件-2	7.0	3.0		促進
SPN5			11.0	5.0		
SBN5	条件-3		11.0	5.0		
SPN7	条件-1		15.0	7.0		

S (左端) : 矢板

P : 普通ポルトランドセメント

B : 高炉セメント

S (左より3字目) : 蒸気養生 N : 標準養生

3, 5, 7 : かぶり 30mm, 50mm, 70mm

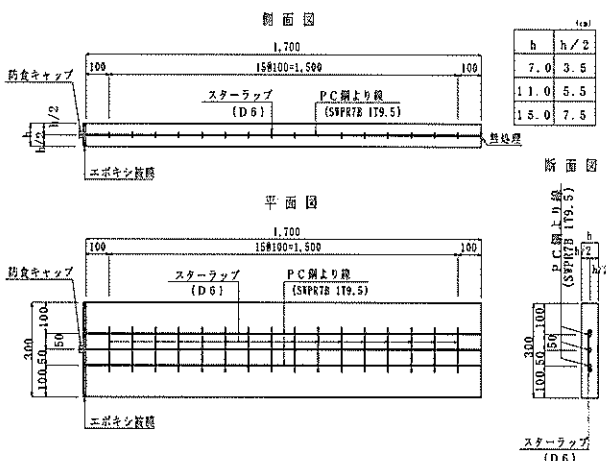


図-2 矢板モデル供試体の形状と寸法

した。PC矢板供試体の一方の端部はエポキシ樹脂により被覆した。なお、3本のより線のうち真中のより線のみ電気化学的計測を行うための電氣的接続を確保するために、端部から10数mm突き出した。

c) 角柱供試体 (補足用)

a) およびb)の高強度コンクリートと比べて、水セメント比の大きな普通強度のコンクリートの塩分含有量を検討するために、角柱供試体(10×10×40cm)を3本製作した。なお、本供試体は追加試験として行ったため、促進試験期間がa)およびb)よりも短い。

(2) コンクリートの配合

PC矢板に使用するコンクリートの配合は、耐久性の確保と同時に強度(初期、長期)が確保できるように定める必要がある。また、コンクリート製品工場における製造効率を向上させるために蒸気養生を実施することが一般的である。このため、本試験では、次の4種類の配合を設定した。

配合条件-1 : 現状のPC矢板の標準的な配合。

配合条件-2 : 配合条件-1を基準として、耐久性の向上を目的として高炉スラグ微粉末を混入した配合。

配合条件-3 : 配合条件-2を基本とし、高炉スラグ微粉末の置換率を大きくした配合。

配合条件-4 : RC(鉄筋コンクリート)の標準的な配合とし、配合条件-1~3と比較して水セメント比を大きくした配合。

表-4に、各配合の設定条件を示す。この設定条件を満足する配合を見出すために、何回かの試し練りを行い、最終的には表-5に示すような配合を決定した。また、コンクリートの製造に使用した材料の一覧を表-6に、セメントおよび高炉スラグ微粉末の化学分析結果を表-7に示す。

表-4 コンクリート配合の設定条件

	条件-1	条件-2	条件-3	条件-4
高炉スラグ置換率	0%	30%	50%	0%
設計基準強度	70 N/mm <sup>2</sup>			24 N/mm <sup>2</sup>
プレ導入強度	35 N/mm <sup>2</sup>			---
セメント種類	早強セメント			普通セメント
セメント量	450 kg/m <sup>3</sup> 以上			330 kg/m <sup>3</sup> 以上
目標スランプ	8.0±2.5 cm			
目標空気量	4.0±1.0 %			
最大骨材寸法	20 mm			
水セメント比	32 %以下			55 %以下

表-5 コンクリートの配合

	条件-1	条件-2	条件-3	条件-4
W/B (%)	32	32	32	55
s/a (%)	45.3	45.0	44.9	45.0
W (kg/m <sup>3</sup> )	150	150	150	180
C (kg/m <sup>3</sup> )	469	328	234	330
高炉スラグ微粉末量 (kg/m <sup>3</sup> )	0	141	234	0
S (kg/m <sup>3</sup> )	784	775	770	790
G (kg/m <sup>3</sup> )	950	950	949	973
高性能 AE減水剤 (%v. s. 結合材)	1.2	1.2	1.2	0.2
AE剤 (%v. s. 結合材)	0.0015	0.002	0.002	0.002

表-6 コンクリート用材料一覧

使用材料	仕様
セメント	早強ポルトランドセメント (密度 3.14g/cm <sup>3</sup> , 比表面積 4550cm <sup>2</sup> /g)
	普通ポルトランドセメント (密度 3.16g/cm <sup>3</sup> , 比表面積 3280cm <sup>2</sup> /g)
混和材	高炉スラグ微粉末 (密度 2.92g/cm <sup>3</sup> : 比表面積 6020cm <sup>2</sup> /g)
細骨材	鬼怒川産川砂 (密度 2.62g/cm <sup>3</sup> )
粗骨材	鬼怒川産砕石 (密度 2.62g/cm <sup>3</sup> : 最大寸法20mm)
高性能 AE減水剤	ポリカルボン酸エーテル系の複合体
AE剤	変性アルキルカルボン酸

表-7 セメントおよび高炉スラグの化学分析結果

(%)

	普通ポルト	早強ポルト	高炉スラグ
酸化マグネシウム	1.4	1.4	6.2
三酸化硫黄	2.0	2.9	0.1
強熱減量	1.6	1.3	0.2
全アルカリ	0.63	0.56	-----
塩化物イオン	0.004	0.004	0.005

### 2.3 促進試験の方法

P C矢板の長期にわたる耐海水性を評価するためには、実際の港湾環境における暴露試験を行うことが最も確実な方法と言える。しかし、比較的早期に結果を得るために、本研究では実験室内における促進試験を実施した。

促進試験方法は、40°C の温海水を用いた乾湿繰り返し試験とし、湿潤1日（温海水噴霧）、乾燥2.5日（自然乾燥）の3.5日を1サイクルとして220サイクル（770日）まで継続した。

### 2.4 試験項目および方法

#### (1) 円柱供試体

円柱供試体に関しては、表-1に示すように、表面観察、

圧縮強度試験、割裂引張強度試験、静弾性係数試験、塩分含有量試験、X線回折分析試験、細孔径分布試験、内部鋼材の自然電極電位試験、急速塩化物イオン透過性試験、の計9項目について試験を行った。各試験の方法を以下に示す。

#### a) 表面観察

促進試験の前後において、供試体表面の洗浄後にコンクリート表面の目視観察を行った。観察図の作成および写真撮影を行い、コンクリート表面に発生している劣化の有無を確認した。

#### b) 圧縮強度試験

JIS A 1108 に準じた方法により、促進試験前後に実施した。また、促進期間中は50サイクル毎にコンクリートの超音波伝搬速度を計測し、圧縮強度の推定を行った。

#### c) 引張強度試験

JIS A 1113 に準じた方法により、促進試験前後に実施した。

#### d) 静弾性係数試験

ASTM C469-65 に準じた方法により、促進試験前後に実施した。また、促進期間中は25サイクル毎に超音波伝搬速度を計測し、JIS A 1127 に準じて弾性係数の推定を行った。

#### e) 塩分含有量試験

円柱供試体（φ150×300）の表面から3cm, 5cm, 7cmの深さより採取した試験片を用いて、日本コンクリート工学協会規準であるJCI-SC5およびJCI-SC4に準じて塩化物含有量を求めた。測定は10サイクル時、150サイクル時および促進試験終了後（220サイクル時）に実施した。

#### f) X線回折分析試験

引張強度試験を行った供試体を用いて、表面から3cm付近の試料を採取し、粉末X線回折分析試験を行った。採取したコンクリート塊より、できるだけ粗骨材を取り除き、めのう乳鉢で微粉砕したものを試料とした。促進試験前および促進試験後（220サイクル時）に試験を行った。

#### g) 細孔径分布試験

引張強度試験を行った供試体を用いて、表面から3cm付近より試料を採取した。水銀圧入式ポロシメータにより試験を行った。まず、モルタル部分（5mm程度の立方体）を切り出し、7日間真空乾燥させた試料を用いた。計測を行った細孔径の範囲は、0.003~15.2μmである。本計測は促進試験開始前、100サイクル終了時および促進試験後（220サイクル終了時）に実施した。

#### h) 自然電極電位試験および腐食状況観察

円柱供試体 ( $\phi 150 \times 300$ ) に埋設した鉄筋 ( $\phi 9 \times 150$ ) の自然電極電位を、促進試験期間中 25 サイクルごとに測定した。

また促進試験 100 サイクル時および 220 サイクル時 (促進試験終了時) に埋設鉄筋を取り出し目視観察を行い、腐食面積率を求めた。なお、ここでいう腐食面積率とは、鉄筋の全表面積に対する腐食面積の割合である。

#### i) 急速塩化物イオン透過性試験

促進試験の前後において、AASHTO T-277 に準じて塩化物イオンの透過性試験を行った。試験は、各配合の供試体一体について 6 時間電流を流し、初期電流値 (A) とクーロン値 (A·S) の関係が相関係数  $R \geq 0.8$  以上であることをまず確認した。確認後、各配合の供試体 2 体ずつについて初期電流値を測定し、予め求めておいた関係式を用いて、6 時間に相当するクーロン値を推定した。なお、初期電流値は測定開始後 5 分時の電流値とした。

#### (2) 矢板モデル供試体

矢板モデル供試体は、すべて曲げ載荷試験を行った。また、促進試験を終了した供試体は、曲げ試験終了後に PC 鋼材の観察、コンクリート中の塩分含有量試験を実施した。なお、促進試験期間中は、自然電極電位の計測を定期的に行なった。以下、各試験方法の概要を示す。

##### a) 表面観察

促進試験終了後、供試体表面を洗浄し目視観察を行った。観察結果は、観察図および写真として記録した。

##### b) 曲げ載荷試験

曲げ載荷試験の方法は、2 点集中載荷方法とし、コンクリートひずみ、たわみ、曲げ耐力の測定を行った。実験結果を設計値と比較することにより耐力低下の有無を確認した。図-3 に曲げ試験載荷図および測定点を示す。

##### c) PC 鋼材の腐食状況観察

曲げ載荷試験を行った供試体を破碎し、供試体内部の PC 鋼材を取り出した。鋼材表面を清掃した後、発錆状況の観察を行った。また、観察図面より発錆面積率を算定した。PC 鋼材の端部の劣化状況を併せて確認した。

##### d) 自然電極電位試験

供試体に埋設された PC 鋼材の自然電位を促進試験期間中定期的に測定した。照合電極として銀-塩化銀電極を用いた。

##### e) 塩化物含有量試験

曲げ載荷試験終了後に、コンクリート中の塩化物含有量の計測を行った。なお、内部鋼材に腐食が生じている場合はその周囲より試料を採取し、塩化物含有量を測定した。

#### (3) 角柱供試体 (補足用)

補足角柱供試体 ( $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ ) については、促進試験 120 サイクル終了後に塩化物含有量試験を実施した。試験は、日本コンクリート工学協会規準である JCI-SC5 に準じた。

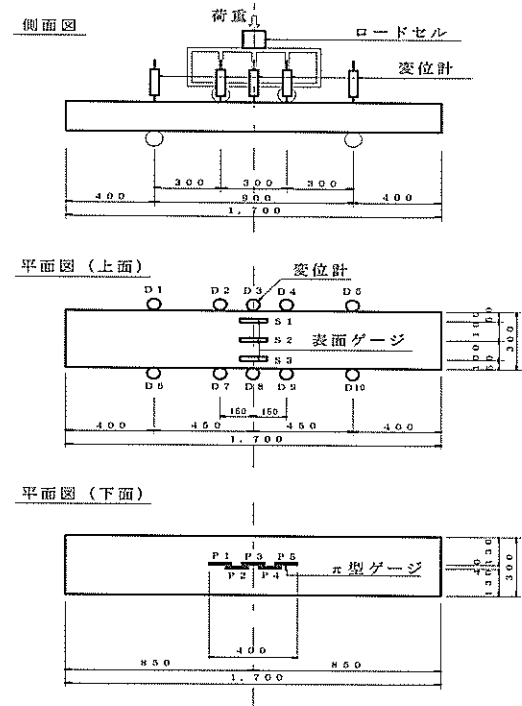


図-3 曲げ載荷試験の方法

### 3. 劣化促進試験の結果および考察

#### 3.1 円柱供試体の試験結果

促進試験は最終的には乾湿繰り返し 220 サイクル (770 日) まで実施した。

##### (1) 表面観察

促進試験前および促進試験後に行った表面観察では、各供試体に顕著な劣化は認められなかった。継続的に海水に曝されていたため、色彩的には茶系への変色が認められたが、コンクリート硬化体そのものは健全であると判断された。

##### (2) 圧縮強度試験

図-4 にコンクリートの圧縮強度試験結果を示す。促進試験前および促進試験後の圧縮強度の比較より促進試験の影響による圧縮強度の低下は認められず、むしろ、増加する傾向を示した。



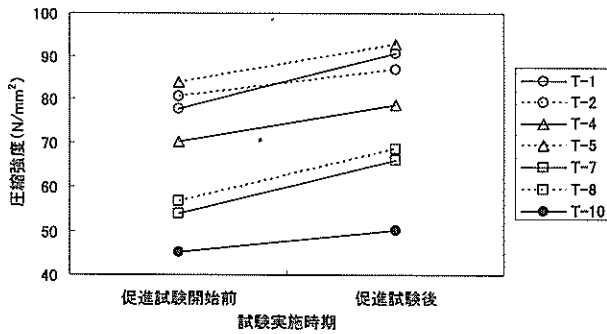


図-4 圧縮強度

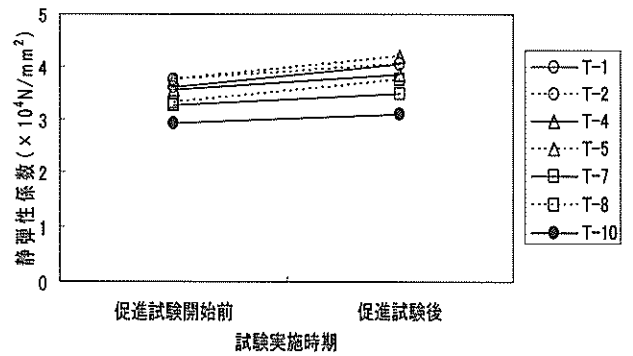


図-6 静弾性係数

### (3) 引張強度試験

図-5にコンクリートの引張強度試験結果を示す。一部の供試体 (T-5, T-8) においてわずかな低下が認められたが、他の配合においては、促進試験後に引張強度は増加する傾向を示した。T-5およびT-8において強度が低下した原因は不明であるが、有意な低下を示しているのではなく、試験データのばらつきに近いものと考えている。

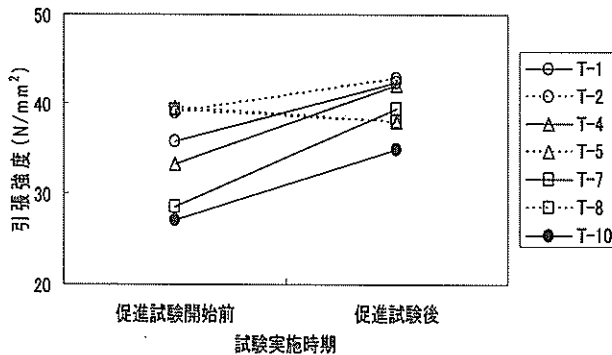


図-5 引張強度

### (4) 静弾性係数試験

図-6に静弾性係数試験結果を示す。促進試験後に静弾性係数の低下は認められず、すべての供試体において漸増の傾向を示した。

図-7に超音波伝搬速度より求めた動弾性係数試験結果を示す。すべての供試体において、促進前に比べて、促進期間中、促進試験後に低下する傾向は認められず、むしろ微増の傾向を示した。

圧縮強度試験、引張強度試験および静弾性係数試験の結果を併せて考慮すると、コンクリート硬化体自体の促進試験による物理的劣化は生じていないものと判断される。

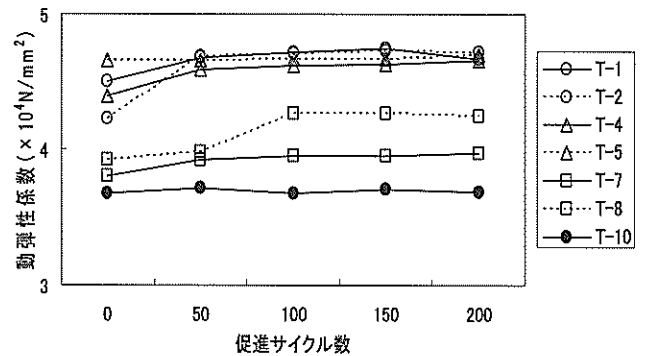


図-7 動弾性係数

### (5) 塩化物含有量試験

図-8に、促進試験終了後のコンクリート中の塩化物含有量の分布状況を示す。図中の塩化物含有量の単位は、セメント量に対するCl⁻の質量パーセントである。この図より、明らかにT-1～T-8では、塩化物含有量が0.01～0.03%程度とかなり小さいことがわかる。一方、供試体T-10の場合、かぶり30mm位置で0.38%、かぶり50mm位置において0.06%となっている。

以上より、配合条件T-1～T-9のコンクリートは、T-10に比べてコンクリート中への塩化物イオンの浸透を大きく抑制できることが明らかとなった。

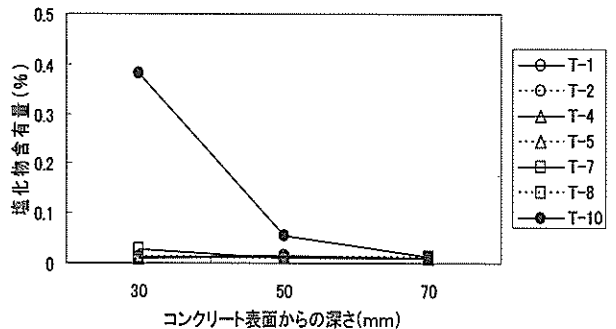


図-8 塩化物含有量の分布

(6) X線回折分析試験

表-8にX線回折分析試験の結果を示す。これより、配合T-1～T-8において、高炉スラグ微粉末の置換率が大きくなることにより、水酸化カルシウムおよびエトリンガイトの生成量が抑制されていることがわかる。

表-8 X線回折分析試験結果

試料名		T-1	T-2	T-4	T-5	T-7	T-8	T-10
水酸化カルシウム	促進前	○○	○○	○△	○○	△△	△△	◎◎
	促進後	◎	◎	○	○	△	△	○
エトリンガイト	促進前	△△	△△	---	---	---	---	△△
	促進後	△	△	-	-	-	-	△
モノサルフェート	促進前	-△	△-	---	---	---	---	△△
	促進後	△	△	△	△	-	-	-
石英	促進前	◎◎	◎◎	◎◎	◎◎	◎◎	◎◎	◎◎
	促進後	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
斜長石	促進前	◎◎	◎◎	◎◎	◎◎	◎◎	◎◎	◎◎
	促進後	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
緑泥石	促進前	△△	△△	△△	△△	△△	---	---
	促進後	△	△	△	△	△	△	△

◎ : 500cps 以上, ○ : 500~200cps  
 △ : 200cps 以下, - : 確認されず

(7) 細孔径分布試験

表-9に細孔径分布試験より求めた全細孔容積 (mL/g)の結果を示す。表に示されるとおり、いずれの配合においても促進試験後に細孔容積が大きく変化する傾向は認められない。このことから、コンクリート硬化体の劣化は発生していることが裏付けられる。

表-9 細孔径分布試験結果

	全細孔容積 (mL/g)		
	促進前	100サイクル	220サイクル
	T-1	0.0439 0.0488	0.0355
T-2	0.0448 0.0486	0.0350	0.0371
T-4	0.0476 0.0526	0.0447	0.0412
T-5	0.0428 0.0405	0.0489	0.0363
T-7	0.0512 0.0476	0.0538	0.0497
T-8	0.0461 0.0505	0.0391	0.0492
T-10	0.0935 0.0898	0.0727	0.0736

(8) 自然電極電位試験

図-9に促進サイクル経過に伴う自然電位の推移を示す。いずれの配合条件においても、計測電位は比較的大きく変動するが、顕著に電位が低下する傾向は認められ

ない。また、高炉スラグの混入の有無や、養生条件の違いによる測定電位の差は明確には現れていない。

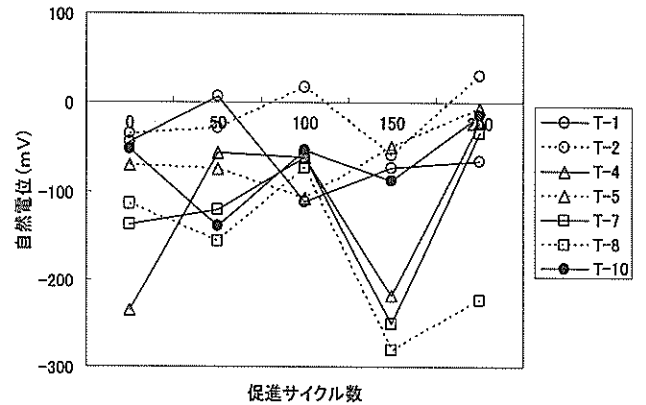


図-9 自然電極電位の変化

(9) 埋設鉄筋の腐食状況調査

埋設鉄筋の腐食面積率の測定結果を表-10に示す。表に示されるとおり、いずれの供試体においても、100サイクル時と220サイクル時の腐食面積の測定結果に大きな変化は見られない。また、かぶりの違い(30,50,70mm)の影響も明確には認められない。

表-10 腐食面積率測定結果

供試体種類	かぶり (mm)	100サイクル測定時		220サイクル測定時	
		腐食面積 (mm <sup>2</sup> )	面積率 (%)	腐食面積 (mm <sup>2</sup> )	面積率 (%)
T-1	30	330	7.8	86	2.0
	50	34	0.8	46	1.1
	70	64	1.5	18	0.4
T-2	30	23	0.5	9	0.2
	50	37	0.9	8	0.2
	70	244	5.8	12	0.3
T-4	30	50	1.2	19	0.4
	50	29	0.7	30	0.7
	70	38	0.9	4	0.1
T-5	30	107	2.5	98	2.3
	50	33	0.8	54	1.3
	70	26	0.6	13	0.3
T-7	30	40	0.9	26	0.6
	50	20	0.5	51	1.2
	70	34	0.8	7	0.2
T-8	30	48	1.1	15	0.
	50	5	0.1	32	0.8
	70	20	0.5	0	0
T-10	30	98	2.3	88	2.1
	50	92	2.2	35	0.8
	70	26	0.6	20	0.5

鉄筋全表面積 : 4241mm<sup>2</sup>

(10) 急速塩化物イオン透過性試験

促進試験前および促進試験後における初期電流値とクーロン値との関係を表-11 および表-12 に示す。回帰直線および相関係数を表-13 に示す。表よりわかるように、初期電流値とクーロン値には極めて高い相関が認められることから、初期電流値から6時間時のクーロン値を推定することは問題ないものと考えられる。

表-11 測定結果 (促進試験前)

供試体	配合条件	養生条件	初期電流値 (A)	クーロン値 (A・S)
T-1	条件-1 S700-0	条件-1	0.100	2638
T-2		条件-2	0.077	2800
T-3		条件-3	0.094	3082
T-4	条件-2 S700-30	条件-1	0.080	2030
T-5		条件-2	0.069	1593
T-6		条件-3	0.059	1398
T-7	条件-3 S700-50	条件-1	0.103	2718
T-8		条件-2	0.053	1485
T-9		条件-3	0.081	2372
T-10	条件-4	条件-4	0.164	5479
T-11	S240	条件-3	0.184	5244

表-12 測定結果 (促進試験後)

供試体	配合条件	養生条件	初期電流値 (A)	クーロン値 (A・S)
T-1	条件-1 S700-0	条件-1	0.084	1712
T-2		条件-2	0.072	1511
T-3		条件-3	0.076	1688
T-4	条件-2 S700-30	条件-1	0.088	1663
T-5		条件-2	0.076	1494
T-6		条件-3	0.080	1663
T-7	条件-3 S700-50	条件-1	0.080	1591
T-8		条件-2	0.064	1258
T-9		条件-3	0.084	1635
T-10	条件-4	条件-4	0.120	2543
T-11	S240	条件-3	0.104	2153

表-13 回帰直線および相関係数

	回帰直線 クーロン値 = a × 初期電流値 + b		相関係数 R
	a	b	
促進試験前	32239.94	-314.936	0.967
促進試験後	21806.66	-120.580	0.976

表-14 および表-15 に試験結果の一覧を示す。表中の評価は AASHTO 基準によるもので、その評価は表-16 に準拠する。表に示された試験結果より、いずれの供試体においても促進試験前に比べて、促進試験後のクーロン値が低下する傾向を示す。特に、T-10 および T-11 においてその低下が顕著に表れている。また、クーロン値に及ぼす配合条件および養生条件の影響を T-1 ~ T-9 の範囲で見た場合、それらの影響を認めることはできない。

表-14 試験結果一覧表 (促進試験前)

	初期電流値より求めたクーロン値	評価 (AASHTO)
T-1	2496	Moderate
T-2	2604	Moderate
T-3	2881	Moderate
T-4	1907	Low
T-5	1675	Low
T-6	1804	Low
T-7	2373	Moderate
T-8	1532	Low
T-9	2332	Moderate
T-10	5550	High
T-11	5869	High

表-15 試験結果一覧表 (促進試験後)

	初期電流値より求めたクーロン値	評価 (AASHTO)
T-1	1581	Low
T-2	1412	Low
T-3	1543	Low
T-4	1462	Low
T-5	1348	Low
T-6	1593	Low
T-7	1264	Low
T-8	1240	Low
T-9	1642	Low
T-10	2337	Moderate
T-11	1975	Low

表-16 電流量による塩化物イオン透過性の評価

電流量 (クーロン)	塩化物イオン透過性	備考
4,000~	High	(高) 水セメント比 (>0.6) 普通セメント使用
2,000~4,000	Moderate	(中) 水セメント比 (0.4~0.5) 普通セメント使用
1,000~2,000	Low	(低) 水セメント比 (<0.4) 普通セメント使用
100~1,000	Very Low	ラテックス混入コンクリート
~100	Negligible	ポリマー含浸コンクリート ポリマーコンクリート

3.2 矢板モデル供試体の試験結果

(1) 目視による表面観察

促進試験前および促進試験後において、すべての供試体において、ひび割れの発生等の明確な劣化現象は確認されなかった。

(2) 曲げ載荷試験

曲げ試験におけるひび割れ発生荷重を表-17 に、曲げ耐力(破壊荷重)を表-18 に示す。促進試験前後の試験結果を比べると、ひび割れ発生荷重は実験値と計算値の比が、促進試験前後ではほぼ同程度であるのに対して、破壊荷重は促進試験後の比が促進試験前より大きくなっている。この要因の一つとして、促進試験後の供試体が湿

潤状態であったことが考えられるものの明確ではない。  
いずれにしても、促進試験後に矢板の耐荷力の低下は認められなかった。

表-17 曲げひび割れ発生荷重

供試体記号	ひび割れ発生荷重 (tf)		a / b	ひび割れ本数	
	実験値 a	計算値 b			
促進試験前	SPS 3	2.40	2.16	1.11	5本
	SPS 5	4.80	4.47	1.07	3本
	SPS 7	7.90	7.48	1.06	1本
促進試験後	SPS 3	3.30	2.3	1.39	4本
	SPS 5	5.50	4.97	1.11	3本
	SBS 5	5.50	4.27	1.29	2本
	SPS 7	9.50	8.39	1.13	1本
	SPN 3	3.10	2.39	1.30	4本
	SPN 5	5.60	5.00	1.12	3本
	SBN 5	5.50	4.62	1.19	2本
	SPN 7	10.00	8.45	1.18	2本

表-18 曲げ破壊荷重

供試体記号	破壊荷重 (tf)		a / b	破壊形態	
	実験値 a	計算値 b			
促進試験前	SPS 3	4.75	4.93	0.96	圧壊
	SPS 5	9.70	8.87	1.09	圧壊
	SPS 7	14.90	13.07	1.14	圧壊
促進試験後	SPS 3	7.20	5.20	1.38	圧壊
	SPS 5	12.72	9.27	1.37	圧壊
	SBS 5	11.67	8.46	1.38	圧壊
	SPS 7	19.00	13.27	1.43	圧壊
	SPN 3	7.32	5.13	1.43	圧壊
	SPN 5	12.84	9.13	1.41	圧壊
	SBN 5	11.60	8.60	1.35	圧壊
	SPN 7	18.86	13.20	1.43	圧壊

(3) 自然電極電位試験

図-10 に矢板モデル供試体における自然電位の測定位置を示す。なお、図の左側が促進試験時における上側であり、下側 30cm 程度は暴露期間中、常時海水に浸水した状態であった。

図-11 に自然電位の計測結果を示す。図中では、測点(7,8,9)における計測値の平均値を示している。各供試体とも測定値に変動は見られるものの、促進試験後の値が初期値よりも幾分電位が低下する傾向にある。また、高炉スラグ混入の影響およびかぶりの影響は明確には認められない。

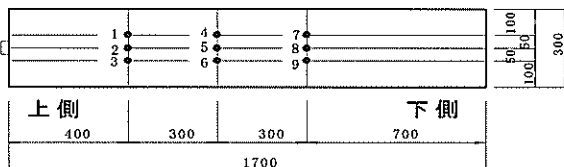


図-10 矢板モデル供試体における自然電位の測定位置

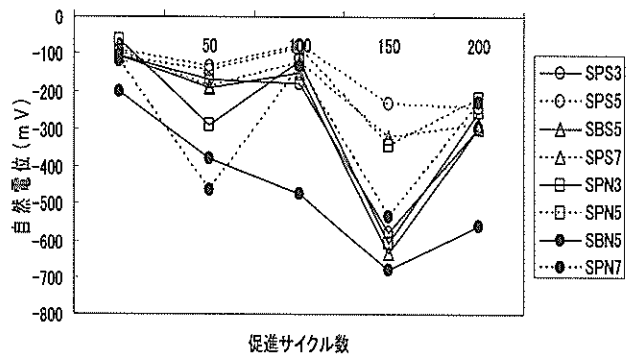


図-11 自然電極電位の変化 (矢板モデル供試体)

(4) PC鋼材の観察

220 サイクル時 (促進試験終了時) において曲げ載荷試験を実施した矢板モデル供試体より、PC鋼材 (各供試体3本) を取り出し、腐食状況の観察を行った。PC鋼材の表面の腐食の面積を測定し、全表面積に対する割合を腐食面積率として算出した。表-19 腐食面積率の測定結果を示す。観察の結果、海水に常時浸せきされていた下端部に発錆している部分が認められたが、その他の部分では発錆は確認されなかった。また、かぶりや養生条件の影響は、今回の実験の範囲内では認められなかった。

表-19 PC鋼材の腐食面積率

鋼材 No.	腐食面積 (cm <sup>2</sup> )	全面積 (cm <sup>2</sup> )	腐食面積率 (%)	平均腐食面積率 (%)
SPS 3	1	1.463	0.29	0.29
	2	1.628	0.32	
	3	1.292	0.25	
SPS 5	1	1.207	0.24	0.27
	2	1.626	0.32	
	3	1.202	0.24	
SBS 5	1	1.626	0.32	0.33
	2	1.966	0.39	
	3	1.378	0.27	
SPS 7	1	1.132	0.22	0.20
	2	0.939	0.19	
	3	0.970	0.19	
SPN 3	1	1.251	0.25	0.27
	2	1.548	0.31	
	3	1.245	0.25	
SPN 5	1	1.076	0.21	0.23
	2	1.233	0.24	
	3	1.118	0.22	
SBN 5	1	1.377	0.27	0.31
	2	1.834	0.36	
	3	1.505	0.30	
SPN 7	1	1.477	0.29	0.26
	2	1.095	0.22	
	3	1.341	0.26	

(5) 塩分含有量試験

分析用試料の採取は、促進試験中に常時海水に浸せきしていた位置（位置A）と、その上60cm位置の位置（位置B）の2か所とし、PC鋼材周囲より採取した。測定結果を、表-20 および図-12 に示す。なお、塩分含有量の単位はセメントに対する質量パーセントである。図-12 より、常時海水に浸せきしていた位置（A）の方が、位置（B）よりも明らかに塩分含有量が多くなっている。

当然ではあるが、かぶり厚さが小さい（SPN3, SPS3）場合に塩分含有量が多くなる傾向にある。一方、SPS7（かぶり7cm）においても塩分含有量が多い。この原因は不明である。配合・養生条件の違いが塩分含有量に及ぼす影響も明確ではない。本実験の結果によると、塩分含有量自体はかなり小さいレベルにあることから、本実験で用いたような圧縮強度が70N/mm<sup>2</sup>程度のコンクリートの遮塩性はかなり優れていると判断される。

表-20 塩分含有量試験測定結果

	測定位置（供試体下端より）	
	A (10cm)	B (70cm)
SPS 3	0.057	0.009
SPS 5	0.009	0.012
SBS 5	0.018	0.012
SPS 7	0.090	0.012
SPN 3	0.015	0.009
SPN 5	0.114	0.012
SBN 5	0.021	0.012
SPN 7	0.024	0.015

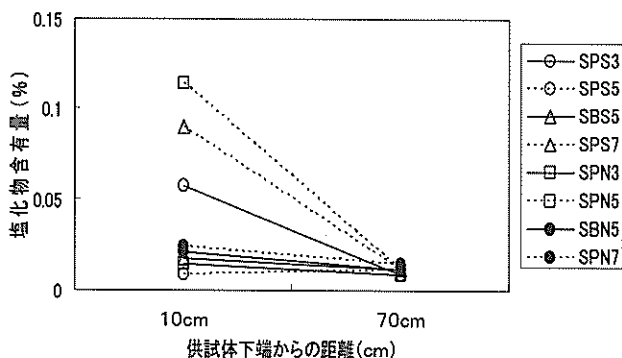


図-12 塩化物含有量の分布

3.3 塩分浸透性に基づいたPC矢板の耐久性評価

3.1 節および3.2 節でまとめた促進試験より得られたコンクリート中の塩化物含有量のデータを用いて、塩分拡散係数の算出および腐食開始時期の推定を行い、PC

矢板の耐久性評価を試みた。測定数が少ない点是否定できないが、乾湿繰り返し試験220サイクルの結果に基づいて検討を行った。

(1) 試験結果の整理

図-13 に、T-1（配合強度：70N/mm<sup>2</sup>）とT-10（配合強度：24N/mm<sup>2</sup>）の220サイクル終了時における、コンクリート中の塩化物含有量の分布状況を示す。この分布より、供試体（T-10）のコンクリート表面における塩分含有量（C<sub>0</sub>）を、C<sub>0</sub>=0.9%と推定した。また、C<sub>0</sub>は配合に影響されることはないと仮定し、コンクリート表面の塩分含有量C<sub>0</sub>の値を供試体（T-1）にも適用した。この値C<sub>0</sub>（0.9%）を用いて拡散係数を算出した。

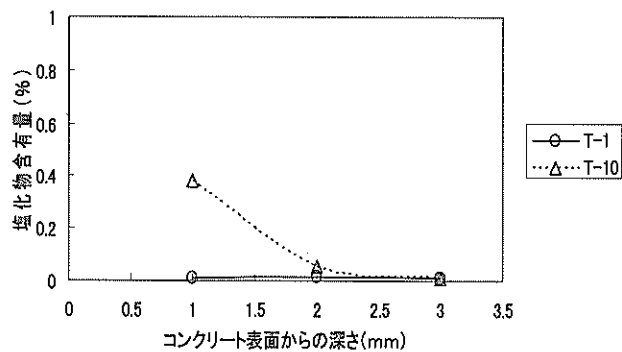


図-13 T-1とT-10の塩化物含有量の分布

表-21 に、コンクリート表面からの距離、コンクリート中の塩化物含有量の測定値（C）および[(C/2C<sub>0</sub>)×100]の計算結果を示す。また、T-1およびT-10について横軸をコンクリート表面からの距離とし、縦軸を[(C/2C<sub>0</sub>)×100]として正規確率紙にプロットしたものを図-14 に示す。図よりわかるとおり、両者の関係はほぼ直線となる。この直線の傾き a は次式で表される。

$$a = 1/\sqrt{(2Dt)} \tag{1}$$

ここに、D：拡散係数(cm<sup>2</sup>/sec)

t：暴露期間(sec)

220 サイクル時は、

$$t = 3年 \times 365日 \times 24時間 \times 60分 \times 60秒 \\ = 94,608,000sec$$

この関係式より拡散係数Dを求めた。この際、促進効果を考慮せず、220 サイクル時を3年（実試験期間）として以下の計算を実施した。

表-21 C / 2 C<sub>0</sub> × 100 の算出結果

	コンクリート表面からの距離 (cm)	塩化物含有量 C (%)	C / 2C <sub>0</sub> × 100
T-10	1	0.727	40.4
	1.5	0.641	35.6
	2	0.555	30.8
	2.5	0.468	26.0
	3	0.382	21.2
	3.5	0.281	15.6
	4	0.180	10.0
	5	0.055	3.1
	6	0.034	1.9
T-1	1	0.600	33.5
	1.5	0.460	25.3
	2	0.310	17.1
	2.5	0.160	8.8
	3	0.010	0.6
T-2	1	0.604	33.5
	1.5	0.455	25.3
	2	0.307	17.1
	2.5	0.159	8.8
T-4	1	0.603	33.5
	1.5	0.455	25.3
	2	0.306	17.0
	2.5	0.158	8.8
T-5	1	0.603	33.5
	1.5	0.455	25.3
	2	0.306	17.0
	2.5	0.158	8.8
T-7	1	0.609	33.8
	1.5	0.464	25.8
	2	0.318	17.7
	2.5	0.173	9.6
T-8	1	0.603	33.5
	1.5	0.455	25.3
	2	0.306	17.0
	2.5	0.158	8.8
T-10	1	0.603	33.5
	1.5	0.455	25.3
	2	0.306	17.0
	2.5	0.158	8.8

$$erf(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-u^2} du \quad (3)$$

コンクリート中の鉄筋において腐食が開始される時の限界塩分含有量として0.4% (vs.セメント量)を仮定し、塩分含有量が0.4%に到達する時間を算出した。

結果を図-15に示す。図は、かぶり厚さに対する鉄筋の腐食開始推定時期を示している。T-10 (設計基準強度:24N/mm<sup>2</sup>)において、かぶり30mmで10年未満、50mmで20年、70mmで40年と推定される。一方、T-1 (設計基準強度:70N/mm<sup>2</sup>)においては、かぶり30mmで約18年、50mmで50年相当、70mmで90年以上と推定される。適切なかぶり厚さを一律に決定することは困難であるが、腐食発生時を20年とした場合は30mm、30年とした場合は40mm、50年とした場合は50mmが一般的な目安になるものと思われる。

上記のデータは、昨今広まりつつある性能設計の考え方をPC矢板の設計に適用していく中で、耐用年数に応じたかぶりの設定を行うことを可能にするものである。

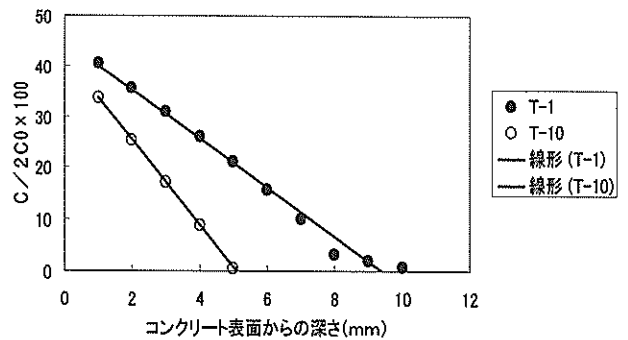


図-14 C / 2 C<sub>0</sub> × 100 の計算結果

上で求めた拡散係数を用いて、暴露期間 t およびコンクリート表面からの距離 x の場合のコンクリート中の塩分含有量 C を(2)式を用いて求めた。

$$C(x, t) = C_0 \left( 1 - erf \frac{x}{2 \sqrt{D \cdot t}} \right) \quad (2)$$

ここに、C<sub>0</sub>:コンクリート表面における塩分含有量 (%)

erf: 誤差関数,

であり、誤差関数は(3)式で定義される。

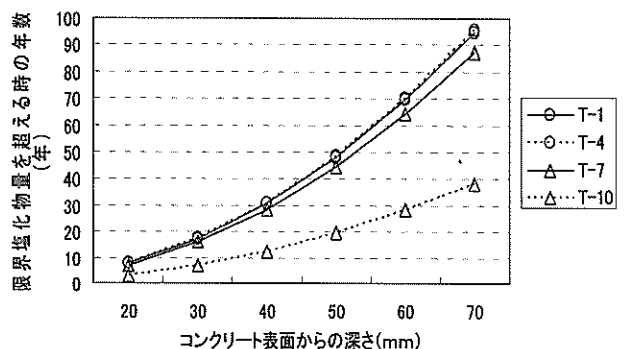


図-15 塩化物含有量0.4%に到達するまでの時間

#### 4. 結論

港湾構造物の特徴は、構造物が海水の影響を直接受ける極めて厳しい環境下に存在することであり、外部環境からコンクリート中に侵入する塩化物の量を予め十分に考慮に入れる必要がある。

本試験は腐食性環境下におけるPC矢板の耐久性確保を主眼に、適切な鋼材かぶりの設定について促進試験を通して検討を行った。本研究より得られた主要な結論は以下のとおりである。

(1) 劣化促進試験の前後でコンクリート自体の強度、弾性係数の物性値に低下の傾向が見られないことから、コンクリート自体の耐久性は優れていると判断される。

(2) PC矢板に用いられる設計強度(70N/mm<sup>2</sup>)相当のコンクリートであれば、コンクリート中への塩分の浸透はかなり抑制することが可能である。

(3) 蒸気養生と湿潤養生を行った供試体の試験結果に明確な差が見られないことより、蒸気養生がコンクリートの品質低下を招くことはないことを確認できた。

(4) 耐久性を考慮してかぶり厚を考察すると、内部鋼材の腐食開始時が20年で30mm、30年で40mm、50年で50mmが一応の目安となる。

(2005年2月10日 受付)

#### 謝辞

本研究は、平成7年度から9年度にかけて実施された。この成果をもとに、平成12年9月に沿岸センターから、「港湾用PC矢板技術マニュアル」が発行されている。マニュアルの発刊からすでに4年の時間が経過しているが、今後のPC矢板を用いた港湾構造物の設計の合理化を図るために研究成果を港空研資料として公表することとした。

本研究の遂行においては、以下に示す多くの方々のご指導と協力をいただいた。ここに、改めて感謝の意を表する次第である。

横井聡之氏 (港湾PC構造物研究会会長)、

福手勤氏 (当時: 運輸省港湾技術研究所構造部長, 現: 東洋大学教授)、

森下昭吾氏 (当時: オリエンタル建設 (株), 現: (株) オリエンタルコンサルタント)、

甲斐一夫氏 (オリエンタル建設 (株))、

中橋一壽氏 (オリエンタル建設 (株))、

仲田健治氏 (当時: (株) ピーエス, 現: (株) ダイニチ技研)、

石田邦洋氏 ((株) ピーエス三菱)、

鈴木義晃氏 ((株) ピーエス三菱)、

久保欣也氏 ((株) ピーエス三菱)、

由浅直洋氏 (当時: (株) ピーエス, 現: 国土交通省)、

梅田順治氏 (当時: ドーピー建設工業 (株), 現: 退社)、

宮崎豊氏 (ドーピー建設工業 (株))、

堀克弘氏 (ドーピー建設工業 (株))、

伊澤亮氏 ((株) 富士ピーエス)、

中島禎氏 ((株) 富士ピーエス)、

黒木隆二氏 ((株) 富士ピーエス)。

#### 参考文献

1) 港湾用PC矢板技術マニュアル, 沿岸開発技術ライブラリー No. 9, 財団法人沿岸開発技術研究センター, 平成12年9月

2) 濱田秀則・中橋一壽・黒木隆二: 高強度コンクリートの塩化物イオン浸透性および内部鉄筋の防食性に関する促進試験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 21, No. 2, 1999

3) 由浅直洋・濱田秀則・宮崎豊: 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, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 21, No. 2, 1999

港湾空港技術研究所資料 No. 1097

2005. 6

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所  
横須賀市長瀬3丁目1番1号  
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 昭和情報プロセス株式会社

Copyright © (2005) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。