

## 海洋環境におけるプレストレスト コンクリートの耐久性

関 博\*  
古 賀 尚 宏\*\*

## 1. ま え が き

近年海洋開発の必要性が叫ばれており、海洋観光資源の開発（海中展望台、海水公園など）、海洋空間の利用（海上都市、海上空港、貯油タンクなど）などに対する構築物の建設に土木・建築技術の果す役割も増大するものと考えられる。

外洋における海洋構築物に、プレストレスト コンクリート部材を応用した例は、わが国では皆無と云ってよく、また、外国においても数例の建設例があるのみである。これは、外洋における海洋構築物建設の歴史が浅いことにもよる。しかし、プレストレスト コンクリート構築物は、鉄筋コンクリート構築物や鋼構築物に比較して有利な条件も備えている。たとえば、同一荷重・外力条件下で、プレストレスト コンクリート部材は鉄筋コンクリート部材に比較し断面を低減することができ、材料の有効な利用を計ることができる。また、鋼材におけるように腐食による断面減少を考慮する必要がない。したがって、構築物の形式、施工条件、維持・管理、経を総合的に判断すると、プレストレスト コンクリート構築物など造物が他材料部材に比較し有利となる状況も多いと考えられる。

海洋における構築物にプレストレスト コンクリート部材を利用する際には、種々の問題点を適確に把握しておく必要がある。本文は、これらのうちでプレストレスト コンクリート部材で特に検討を要すべき問題点の一つである耐久性に焦点を絞り、その内容および耐久性向上のための対策に関して、既往の研究成果などをもとに取りまとめたものである。海洋環境では、陸上の環境条件に対してさらに潮風・波浪などの海象条件も含まねばならない。沿岸地域、外洋のいずれに対しても耐久性の観点から考慮すべき内容は重複するところが多いため、本文では潮風、波浪などの作用をうける構築物をすべて含めて考えることとする。

\* 運輸省港湾技術研究所 構造部 材料施工研究室長

\*\* ピー・エス・コンクリート（株）道路事業部

## 2. プレストレスト コンクリート部材の耐久性に関する問題点

## (1) 概 説

耐久性とは非常に広い内容を含むものであるが、港湾構築物設計基準<sup>1)</sup>の定義に従うとつぎのように考えられる。すなわち、「コンクリート部材の耐久性とは、気象作用、海水の化学的および物理的作用、波浪による衝撃や漂流固定形などの機械的作用、その他の各種の有害な作用によって生ずる、コンクリートの劣化、鉄筋、PC鋼材などの腐食、部材耐力の低下などに対して抵抗する性質をいう」。本文では、これを耐海水性という用語で表現することとする。

プレストレスト コンクリート部材が劣化する原因としては、次の事項が考えられる。

- ① 海洋における各種作用によるコンクリートの劣化
- ② PC鋼材の腐食
- ③ スターラップ、スペーサーなどの鉄筋の腐食
- ④ 定着体の損傷

上記の劣化を生じさせるコンクリート部材自身に関連する要因としては

- ① コンクリート使用材料（練り混ぜ水、混和材料、骨材表面）、養生水に含まれる塩分や硫化物
- ② 不十分なセメント量
- ③ セメントの品質（C<sub>3</sub>Aの量）
- ④ 不十分なかぶり
- ⑤ ひびわれ
- ⑥ 不十分なグラウト
- ⑦ 不十分な定着体の防護

などが考えられる。上記の項目の中で、⑥ および⑦はプレストレスト コンクリート部材に特有な項目である。ひびわれの発生原因は多種多様であるが、本文では「外力により発生するひびわれ」を想定することとする。ひびわれと耐久性の問題の取り扱いは、鉄筋コンクリートとプレストレスト コンクリートでは相違する。すなわち、後者では、一般には設計上ひびわれは発生しない。

しかし、海洋環境下では、構造物に作用する波力の大きさあるいは波力分布に関しては不明な事項が多く、設計時に想定した値を上まわる波力が作用することも考えられる。このような過大な外力は設計に関連するものではあるが、一方では、ひびわれの発生および閉合による残留ひびわれと P C 鋼材の腐食の問題も検討する必要がある。

また、プレストレスト コンクリートの耐海水性は、その応力の導入方式により観点が相違する事項も多い。プレテンション方式では、P C 鋼材そのものの腐食防止を検討する必要があるが、ポストテンション方式ではグラウト、定着体の防護などにも配慮が必要である。プレキャスト ブロックをプレストレスで一体化する構造物では、接合部の適切な処置を考えねばならない。

本章では、耐海水性に関する要因を、P C 鋼材の腐食機構、ひびわれの評価、コンクリート、工法の問題、に分けて検討することとする。

## (2) P C 鋼材の腐食

### a) 応力腐食 (stress corrosion)

1) 原因：応力腐食は、腐食作用と静的応力とが同時に働いたときに金属に起る現象であり、延性的な破壊と異なり急激に破断する。

純金属はどのような激しい環境においても応力腐食は発生しない。すなわち、不純物や合金元素が応力腐食発生の一要因である。H.H. Uhlig は、金属の応力腐食を次のように述べている<sup>2)</sup>。「不純物や合金元素は、応力腐食による割れが進行する経路を造る。ジュラルミン (4% Cu-Al) を低温熱処理すると、金属間化合物である  $\text{CuAl}_2$  を析出し、その付近の合金は Cu が不足する。これが応力を受けた状態で NaCl 溶液のような電解質に触れると、結晶粒と粒界の間に局部電池が形成され、それに沿って局部腐食が急速に起り、割れが進行する」。

プレストレストコンクリート中の P C 鋼材では、

- ① P C 鋼材の結晶組織
- ② 高い応力
- ③ 腐食を促進させる化学物質の存在

上記の要因が応力腐食発生の要因となる。

H.J. Godfrey は、タイムテンパー線 (ストレスレリーフ線) とオイルテンパー線の応力腐食に関し実験を行い次のように報告している<sup>3)</sup>。引張強度の 60% で緊張した P C 鋼線を、硝酸アンモニウムおよび硝酸カルシウムを含む溶液中に浸漬したところ、タイムテンパー線は破断面近くに孔食が観察されただけであるが、オイルテンパー線では深く侵入したきれつが多数認められた。この事実から、H.J. Godfrey は、オイルテンパー線では応力腐食による破壊であったと判定している。また、H.J.

表-1 P C 鋼材に対する塩化カルシウムの影響

供試体番号	コンクリートのタイプ	破断荷重 (t)	伸び (%)
1-A-1	塩化カルシウム含まず	10.4	6.7
2-A-1	塩化カルシウム含まず	10.4	6.7
1-B-1	塩化カルシウム含む	9.6	2.6
2-B-1	塩化カルシウム含む	9.7	2.6

- 注：① 供試体 7.5×7.5×120 cm  
 ② P C 鋼線  $\phi$  9 mm を断面中心に配置  
 ③ 塩化カルシウム添加量 2%×(セメント量)  
 ④ 上表は 3 年後の試験結果

Godfrey は、コンクリート中の塩化カルシウムの影響に関しても検討している。コンクリートの配合は、単位セメント量 360 kg、水セメント比 44% とし、セメント量の 2% (重量比) の塩化カルシウムを混入した。材令 168 日における圧縮強度は  $420 \text{ kg/cm}^2$  であった。試験供試体は、高さ 7.5 cm、幅 7.5 cm、長さ 1.2 m の形状である。断面の図心位置に直径 9 mm の P C 鋼線を配置し、プレテンション方式 (6.3 t の緊張力) で供試体は製作された。製作後、工場地帯とほぼ同一の亜硫酸ガス濃度とした実験室に 3 年間放置した。表-1 は供試体中から取り出した P C 鋼線の物理試験結果である。塩化カルシウムを混入した供試体の P C 鋼線は、混入しない供試体の P C 鋼線と比較し、引張強度で 5%、伸びで 60% 減少している。

G.E. Monfore 等<sup>4)</sup>は、塩化カルシウムと同程度に悪影響を与えるものとして塩化ナトリウムをあげている。実験に用いた供試体の寸法は、幅 3.1 cm、高さ 5 cm、長さ 40 cm であり、普通ポルトランドセメントを用いた水セメント比 42% のモルタル供試体である。P C 鋼線は直径 3.6 mm で断面中心から 7 mm 離れた位置に 2 本配置した。セメントに対する重量比で 4% に相当する塩化ナトリウムを混入した供試体を造り、6 か月間湿布で包み養生を行った。その後、P C 鋼線を取り出し引張試験を実施したところが、同一条件の 4% 塩化カルシウムを混入した供試体の P C 鋼線とほぼ同様の引張強度の低下を示したと報告している。

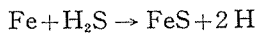
2) 事故例：カナダの Regina でのプレストレストコンクリートヒューム管の破壊 (1952 年) を J.D. Gilchrist は次のように報告している<sup>5)</sup>。P C 鋼線は硬引鋼線 (タイムテンパー線で熱処理を行わないもの) で、その金属組成はパーライト組織が十分でなくセメントタイトが析出していた。P C 鋼線の破断はセメントタイト部分で生じており、層状パーライト部分での破断は認められない。これに関連して G.E. Monfore<sup>4)</sup> は、破壊したヒューム管に使用されたコンクリートには 1.5~3% の塩化カルシウムが強度促進剤として添加されていたと報告し

ている。

J.D. Gilchrist は<sup>5)</sup>、イギリスの Coventry のプレストレスト コンクリート 構造物の事故例は、使用された PC 鋼線がオイルテンパー線であったことによるといっている。PC 鋼線の金属組成は 粒状セメントイットであり、硝酸塩を含む溶液に浸漬し促進試験を行ったところ応力破壊を生じたと報告している。

**b) 水素ゼイ化 (hydrogen embrittlement)**

1) 原因：鋼材を取り囲む環境中に硫化水素が存在すると、水素ゼイ化による破壊が生ずる恐れがある。硫化水素は鋼材に接すると原子状水素を発生し、鋼材の

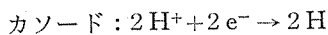
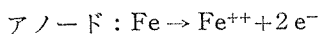


結晶中に浸透する。格子間に入った原子状水素は、金属結晶中の格子欠陥部の空げきやその他の有利な場所で分子状の水素に変わる。これに伴って大きな内部圧が形成され、粒内割れを生ずるといわれている。

2) 事故例：W. Grundig は<sup>6)</sup>、ブラジルで発生したプレストレスト コンクリート 橋梁の水素ゼイ化破壊を報告している。橋梁の建設中硫化水素ガスにより PC 鋼線の 98% が破断した。硫化水素は、応力導入時にジャッキのすわりをよくする目的で使用した溶融イオウから発生したものである。

**c) 孔食 (pitting) と全面腐食 (general corrosion)**

1) 原因：孔食および全面腐食は、鋼材の表面が「さびる」という電気化学的なプロセスによる。H.H. Uhlig は次のように述べている<sup>7)</sup>。いかなる金属の表面も数多くの電極から成り立っており、これらの電極は金属自身を通じて電氣的に短絡されている。金属表面が乾燥している間は、局部電流もそれに伴う腐食も生じないが、水分または水溶液中に接すると局部電流が発生し次のような化学反応によりアノード側で腐食が進行する。



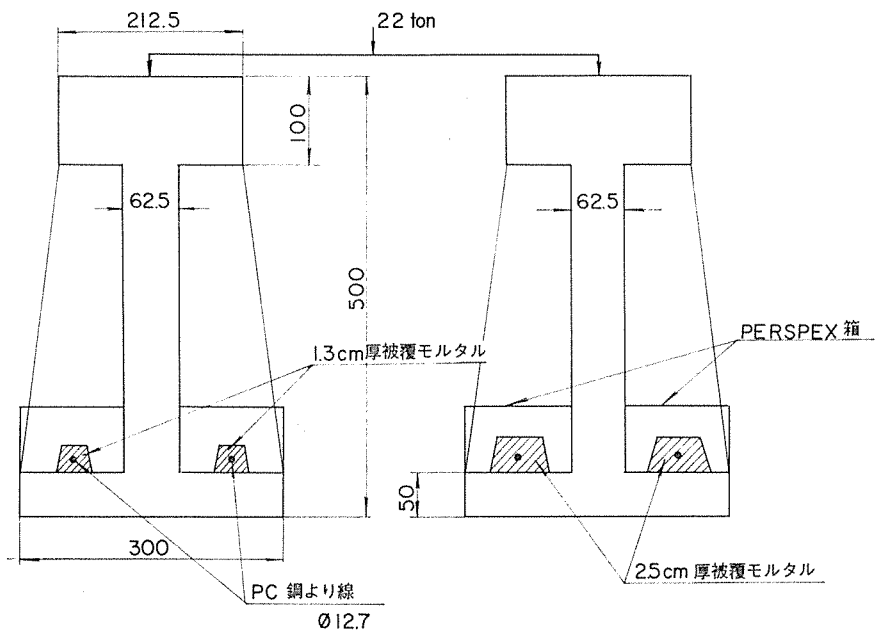
打込み直後のコンクリートの pH は、セメントの水和により溶出した水酸化物（主として水酸化カルシウム）のために、12.5~13 程度であり、鋼材表面は不動態化している。しかし、炭酸化により経年とともに pH は低下するし、また、コンクリート中に塩素イオンが存在ないし浸透すると鋼材の不動態反膜を破壊し、腐食が生ずる。

2) 実験例：E.C. Roshore は、9~10 年間海水作用を受けたプレテンション方式の供試体（幅 11 cm、高さ 23 cm、長さ 206 cm）における PC 鋼線の腐食について報告している<sup>7), 8)</sup>。使用した PC 鋼材は直径 6.3 mm の 7 本より線であり、最小のかぶりを 3.8 cm として 9 本を配置した。コンクリートの配合は、空気量 4.5%、スランプ 4.4 cm、水セメント比 52% であり、Ⅲ 型（早強ポルトランドセメントに相当）のセメントを用いた。圧縮強度は材令 28 日で 422 kg/cm<sup>2</sup> であった。試験結果は次のとおりである。

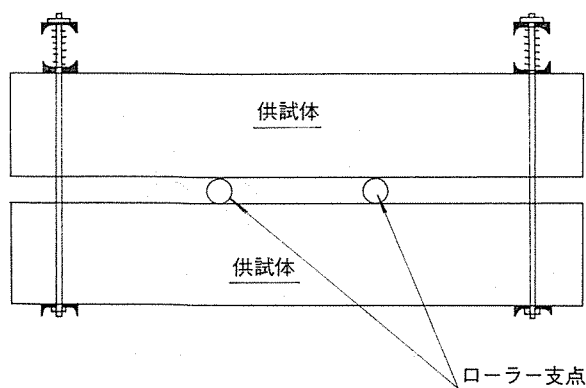
PC 鋼線の腐食は孔食の形態であり、端部ではほぼ全面が腐食していた。また、7 本より線の中心鋼線は他の 6 本の側線よりも腐食が著しい。供試体両端部はエポキシ樹脂を塗布したが、不十分であったために端部ではより腐食したと述べている。

**(3) ひびわれの影響**

P.W. Abeles 等は、ひびわれを発生させた供試体を工業地帯の大気と同じ状態にした気体中に暴露し、その影響を調べている<sup>9)</sup>。ひびわれは四塩化炭素を吹き付けねば確認できぬほどの微細なものであると述べている。供試体は支点間距離 3.6 m、載荷点は 1.2 m の 3 等分点載荷であり、断面形状は 図一1 である。斜線部分がモルタル製の試験部分であり、この部分は密閉容器でおおわれている。モルタル中の鋼材のかぶりは、1.3 cm および 1.5 cm である。3 か月後の観察結果では、PC 鋼材に腐食が認められなかったことから、肉眼で認められないような微細なひびわれでは、PC 鋼材の腐食の危険性は少ないと述べている。しかし、海水作用を受ける場合と



図一1 供試体断面図 (P.W. Abeles 等の実験)



図一 試験桁の持続荷重載荷方法  
(E.C. Roshore の実験)

条件が異なるし、また、3か月という期間で耐久性を検討することは困難であると考えられる。

E.C. Roshore は、ひびわれとプレストレスト コンクリートの耐久性について報告している<sup>10)</sup>。試験桁は、2. (2) c) で述べたと同様であり、プレストレスにより計算上上縁で  $-13 \text{ kg/cm}^2$ 、下縁で  $169 \text{ kg/cm}^2$  の応力とした。供試体は図一に示すように2本を1組として3等分点載荷としており、載荷荷重による曲げ応力は下縁でプレストレスの1.89倍となるように定めた。下縁には可視クラックが発生したが、ひびわれ幅については不明である。所定の荷重載荷後に Florida 州の St. Augustine の暴露試験場に放置された(1959年10月)。試験場は温暖な気候である。5回の冬を越した後の観察結果では、「良好」であったが、10年目の試験では荷重調整中に一部の供試体は破壊したと報告している。破断部のPC鋼線は全面的に腐食していた。

実際のプレストレスト コンクリート構造物では、ひびわれが発生するような過大荷重が持続して作用することはないと考えられる。上述の実験例によると、持続した可視のひびわれが持続するときには、部材の耐力を低下させることは明らかであるが、残留ひびわれとPC鋼材の腐食、かぶりの影響、などに関しては今後の課題として残される。

#### (4) 海水成分とコンクリート

海水中には、各種の塩類が含まれているが、これらはPC鋼材の腐食に対し直接的あるいは間接的に影響を及ぼす。間接的な作用としては、表一に示す海水成分のうちで硫酸塩があげられる。硫酸マグネシウムはセメントの水和反応によって生じた  $\text{Ca(OH)}_2$  および  $3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 12 \text{ H}_2\text{O}$  との反応により、カルシウムサルフォア

ルミネート ( $3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3 \text{ CaSO}_4 \cdot 32 \text{ H}_2\text{O}$ ) を形成する。これは、エトリングタイトと呼ばれる結晶で、化学変化により容積が増大するために、コンクリートの組織をルーズにする。このために、コンクリート表面からの他の有害物質の浸透を容易にする。

PC鋼材の腐食に直接悪影響を与えるものは、海水中の塩分(特に、塩素イオン  $\text{Cl}^-$ ) である。B. Ost 等はセメントペーストあるいはコンクリート中への塩化カルシウムの浸透試験を行っている<sup>11)</sup>。供試体は  $\phi 5 \times 10 \text{ cm}$  であり、セメントとしてはIA型(AE剤を添加した普通ポルトランドセメントに相当)を用いた。コンクリートの配合は、水セメント比42%、51%、69%の3種類とした。これらは、単位セメント量390 kg、306 kg、223 kgに相当する。コンクリートのスランプは、それぞれ5.6 cm、10.2 cm、11.2 cm、空気量は7%、10%、11%である。供試体は材令28日まで湿潤養生( $23^\circ\text{C}$ )の後、浸漬を開始した。試験結果の一例として図一3を示している。B. Ost 等の実験によると、塩化物の浸透は予想されるようにコンクリートにおいて大きな値を示す。また、コンクリート中の塩分の移動は水セメント比に大きく依存しているようである。たとえば、表面より5 cmの部分の塩化カルシウム量は、水セメント比が62%で4.4%、46%で0.6%、39%で0.0%程度である。さらに、材令6か月程度までは、浸透量の増加は顕著であるが、それ以後の蓄積量はそれほど伸びない。

E.C. Roshore の暴露試験に使用した供試体のコンクリート中に蓄積された全塩化物の測定結果は表一3である<sup>10)</sup>。試験条件は2. (2) に述べたとおりであり、表面から5 cm程度まではほぼ0.1% (試料重量に対して)以上の塩化物の蓄積が認められる。

これら、B. Ost あるいは E.C. Roshore の結果は、潮風的作用をうける既設の防波護岸における塩分量の調査結果<sup>12)</sup>と比較すると、ほぼ同程度か若干下まわる数値である。

いずれにせよ、海洋環境ではある程度以上の塩化物がコンクリート中に蓄積することは避け難い。しかし、セメント硬化体に固着されずに、コンクリート中を移動してPC鋼材の腐食に影響を及ぼす塩化物限度、あるいは、かぶりと塩化物の関係、などに関しては実験例も少なく明確な数値はとらえられていない。

#### (5) 製作工法上の問題

a) プレテンション方式 プレテンションによるプレストレスト コンクリート部材では、PC鋼材の腐食を防止するための適切なかぶりを定めることが重要である。一般に、鉄筋コンクリートではかぶりが小さ

表一 海水の化学組成 (%)

NaCl	MgCl <sub>2</sub>	MgSO <sub>4</sub>	CaSO <sub>4</sub>	KCl	Ca(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	MgBr <sub>2</sub>	SrSO <sub>4</sub>	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	計
2.685	0.314	0.227	0.116	0.072	0.011	0.007	0.002	0.002	3.441

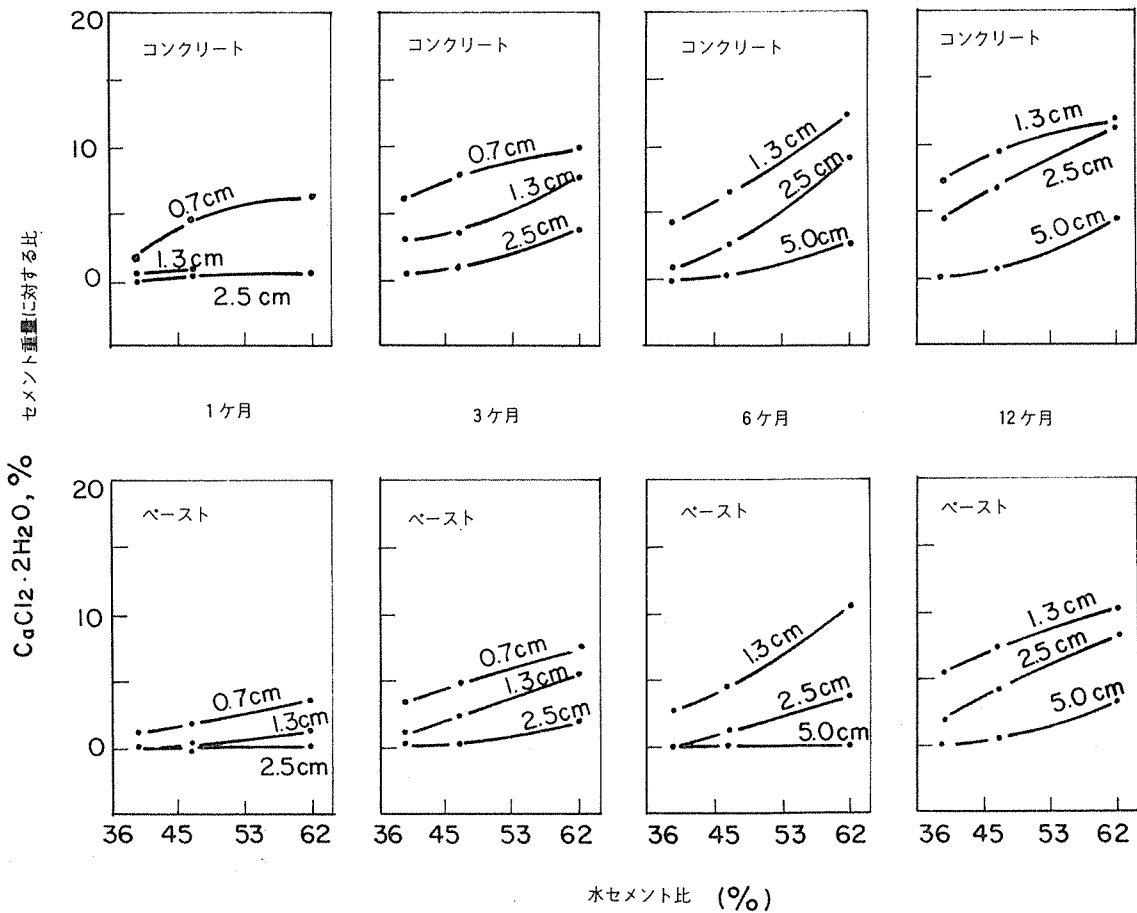


図-3 塩化カルシウム 2% 溶液に浸漬した供試体への浸透 (B. Ost 等の実験)

表-3 コンクリートに蓄積された塩化物

桁番号	桁端からの距離 (cm)		試料番号	桁表面からの深さ (cm)	塩化物 (%)	
	陸側	海側			試料重量に対して	試料中のセメント重量に対して
8	181	21	4	1.3	0.44	2.71
			3	2.5	0.25	1.55
			2	5.0	0.14	0.85
			1	5.7	0.14	0.83
10	68	135	102	1.3	0.32	1.96
			103	2.5	0.20	1.20
			104	5.0	0.25	1.52
			101	5.7	0.30	1.84
10	29	174	202	1.3	0.22	1.33
			204	2.5	0.18	1.13
			201	5.0	0.07	1.02
			203	5.7	0.20	1.26
18	184	18	4	1.3	0.29	1.76
			3	2.5	0.25	1.53
			2	5.0	0.24	1.47
			1	5.7	0.25	1.53
18	146	57	8	1.3	0.30	1.87
			5	2.5	0.20	1.26
			6	5.0	0.23	1.42
			7	5.7	0.31	1.91

注: ① 供試体 11×23×206 cm  
 ② PC鋼材 φ6.3mm の7本より線を9本配置  
 ③ 上表は 9~10年の暴露試験結果

ければひびわれの分散性が高まりひびわれ幅は小さくなる。しかし、小さなかぶりとする塩分浸透による鋼材腐食の危険性がある。プレストレスト コンクリートにおいてもかぶりが小さいときには同様であって、構造物の所要の耐用年数とも関連した最適なかぶりを調べる必要がある。

**b) ポストテンション方式** 定着体の防護が不十分であると、定着体の腐食、さらには、PC鋼材の腐食をうながす。E.C. Roshore は種々の定着体の防護に関する実験から、コンクリート部材端部に定着体を埋め込みPC鋼材を定着させる内部定着方式が跡埋めが少なく適切な方式であるとしている<sup>13)</sup>。しかし、この方式では、応力導入やグラウトなどの施工面で多少の難かしさがある。施工上からは外部定着方式が望ましいが、定着体の腐食に対する防護、施工性の両者を勘案した定着方式の開発が望まれる。

**c) 部材の接合** プレキャスト部材をプレストレスで接合して一体化する構造物では、確実な応力伝達とともに漏水防止に有効であり、長年月に亘って海洋環境で劣化を生じない材料を選択する必要がある。

プレストレスト コンクリート橋のブロック工法では、接合面にエポキシ樹脂を塗布する方法がとられている。

プレストレスト コンクリート技術協会の PC ブロック  
 工法委員会が提案しているエポキシ樹脂による接合剤の  
 品質規格案では、曲げ引張強度、圧縮強度、透水性に関  
 して、コンクリートの特性と同等かあるいはそれ以上と  
 規定している。また、地下埋設物のボックスカルバートの  
 目地部処理には、セメントモルタルを充填する方法も

行われている。エポキシ樹脂などの接合材料の海水作用  
 に対する耐久性は今後さらに検討の余地がある。

### 3. プレストレスト コンクリートの耐海水性に関する規準

表—4 および 表—5, 6, 7 に、わが国および外国にお

表—4 耐久性に関する規定

項 目	無筋および鉄筋 コンクリート標 準示方書 (土木学会)	プレストレスト コンクリート標 準示方書(案) (土木学会)	Recommendations for Design of Concrete Sea Structures (FIP)	コンクリート構 造物設計施工国 際指針 (CEB-FIP)	Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI)	The Structural Use of Concrete (BS, CP 110)	Spanbeton : Rich- tlinien für Bemessung und Ausführung (DIN 4227)
セメントに 対する規定	海水作用に対し て耐久なもの	無筋および鉄筋コ ンクリート標準示 方書を参考とする。	(普通、早強ポル トランドセメン ト、高炉スラグ セメント、耐硫 酸性セメント。 ただし、ポルト ランドセメント では $C_3A \leq 8\%$ が良好)				
練り混ぜ水	海水の使用禁止	海水の使用禁止	(新鮮で飲用水に てきするもの)	有害な有機物ある いは化学物質をほ とんど含まないも の	塩素イオンの有害 量を含まない。		
混和剤に対 する制限	良好な AE 剤ま たは減水剤	塩化カルシウム、 あるいは、塩化カ ルシウムを多量に 含む混和剤は、そ れが PC 鋼材に接 するおそれがある ときは使用禁止	(塩化カルシウ ム、あるいは、 塩化カルシウム を含む混和剤の 使用禁止)	塩化物、硫化物お よび硫酸塩の量を 制限。特に、注入 グラウト、プレテ ンション部材では 硝酸塩、塩化物を 混入しない。	塩素イオンを含む 混和剤の使用禁止	塩化カルシウムの 使用禁止	
耐久性から 定まる水セ メント比 (%)	表—5 参照	無筋および鉄筋コ ンクリート標準示 方書を参考とする。	(45% 以下、ただ し、40% 以下で あればさらに好 ましい。)		(44% 以下、ただ し、人工軽量骨 材コンクリート では圧縮強度は 280kg/cm <sup>2</sup> 以上)		セメント規格強度 350kg/cm <sup>2</sup> 級以上 浸食作用の強い 場合 50% 浸食作用の弱い 場合 60%
最小単位 セメント量 (kg)			(感潮部 400 kg その他の部分 粗骨材最大寸法 40 mm 320 kg 粗骨材最大寸法 20 mm 360 kg)			(粗骨材最大寸法 40 mm 320 kg 粗骨材最大寸法 20 mm 360 kg)	セメント規格強度 350 kg/cm <sup>2</sup> 級を使用する場合 240 kg
最小の かぶり (cm)	(a) 海水に直接 接する部分、 海水で洗われる 部分および 激しい潮風を 受ける部分 7 cm (b) 上記以外 の部分 5 cm	(a) プレテンシ ョン方式 有害な化学作用 を受けるおそれ のある部分で、表面 に保護層を設けな い場合 スラブ 3.0 cm はり 3.5 cm (b) ポストテン ション方式 シース径の 0.5 倍以上かつ 4 cm 以上	(a) 感潮部あ るいは乾湿作 用を受ける部 分 10 cm (b) 海水中 7.5 cm ただし、ポリ マー含浸ある いは表面コー ティングをし たときは、上 記の値は減少 してよい。	表—6 参照 (海水作用をうける ときは設計者 が規定)	一般の規定は表— 7 参照 過酷な作用を受け るコンクリートで は、かぶりを増す、 コンクリートの水 密性を高める、表 面の保護を行う、 などの処置をす る。	(コンクリートの 等級 40 6.0 cm コンクリートの 等級 50 以上 5.0 cm)	現場でコンクリ ートを打つ場合 一般の構造物 4.0 cm 壁構造物 3.5 cm プレキャスト製品 3.0 cm

注：〔 〕は、海洋の環境における耐久性を考慮したプレストレスト コンクリート規定。他は、海洋の環境における鉄筋コンクリート、あるいは、一  
般の環境におけるプレストレスト コンクリートの耐久性に関する規定。

表—5 海洋コンクリートにおける耐久性から定める最大水セメント比 (%)

露出状態	気象条件 断面	凍結融解がしばしば繰返される場合			氷点下の気温となることがまれな地域		
		うすい場合	普通の場合	厚い場合	うすい場合	普通の場合	厚い場合
(a) 潮風を受ける部分 波しぶきを受ける部分		50	55	55	50	60	65
(b) 潮の干満作用を受ける部分 海水で洗われる部分		45	50	55	45	50	55
(c) 常時海中にある部分		55	60	65	55	60	65

注：① 土木学会無筋および鉄筋コンクリート標準示方書の規定  
 ② 普通ポルトランドセメントを用い AE コンクリートとしたときの値

表-6 PC 鋼材の最小かぶり (CEB-FIP)

ポストテンション方式 (シースのかぶり)	(1) 突縁において垂直方向 (a) 4 cm (b) 単一のシースまたは相接して配置したシース群の水平寸法
	(2) 腹部またはリブ中において水平方向 (a) 4 cm (b) 垂直寸法の 1/2 (c) 単一のシースまたは相接して配置したシース群の水平寸法
プレテンション方式	きびしい大気条件(激しい降雨, 乾湿の繰り返しなど)にさらされる屋外構造物の場合 3 cm 以上 鋼材直径との比 1.25 倍以上 骨材の最大寸法との比 1.5 倍以上

表-7 PC 鋼材の最小かぶり (ACI)

構 造 物	か ぶ り
土中にコンクリートを打込む構造物, あるいは, 永続的に土と接する構造物	7.6 cm
地面に接するか風雨にさらされる構造物 壁, 床 その他	2.5 cm
	3.8 cm

けるプレストレスト コンクリートの耐海水性に関する主要な規格を一括して示した。なお規準の多くは特に耐海水性ということで規定していないために内容の大部分は一般の耐久性に関する条項から抽出したものである。

これらの規定によると, 混和剤としての塩化カルシウムあるいは塩素イオンの混入を制限ないし禁止しているものが多い。海洋の構造物に用いるコンクリートの最小水セメント比は, 外国の規準では厳しい数値を掲げており, これに関連してセメントの最小単位量の値も大きい。PC 鋼材の最小かぶりは規準によって相違するが, FIP では, 海水中で 7.5 cm, 他の海洋の環境で 10 cm と規定している。

#### 4. 耐海水性向上のための対策

##### (1) コンクリートに関して

3. で述べた各国の規準では, PC 鋼材の腐食を防止するためのコンクリートに関する対策とし, ① 混和剤としての塩化物の混入禁止ないし制限, ② かぶりの増大, などの措置を採っているものが多い。さらに積極的な方法としては, ① 表面コーティング, ② インヒビター, ③ コンクリートの水密性の向上などが考えられる。

**a) 表面コーティング** コンクリート表面を不透水性皮膜でおおい, 塩化物などの浸透を防止する方法である。FIP の指針でもコーティングを施した場合あるいはコンクリートにポリマーを含ませた場合, かぶりを減少させてよいとの規定がある。

コンクリート表面へのコーティング材料としては, エポキシ樹脂, ポリエステル樹脂, フラン樹脂, フェノール樹脂などが研究されている<sup>14)</sup>。コンクリートへ含浸させるポリマーとして検討されているものには, メチルメタアクリレート, スチレン, アクリロニトリル, ジアリルフタレート, などがある<sup>15)</sup>。

**b) 防 錆 剤** コンクリートに混和剤として添加させるもので, 鋼材の腐食抑制剤である。各国の規定では塩化物を混和剤として使用することを制限しているのので, 配合時にコンクリート中に混入する量は少ない。しかし, 海洋環境ではコンクリート表面から各種の塩類が浸透する。特に, 塩素イオンは鋼材表面に形成された不動態皮膜を破壊し, 鋼材の腐食を促す。コンクリート中に添加された防錆剤は, 不動態皮膜により生じた鋼材表面の局部電流を低下させ, PC 鋼材の腐食速度を抑制する働きがあるといわれている。ただし, 防錆剤はコンクリートにひびわれが発生し, そこから塩素イオンが浸入してきた場合には, 腐食抑制剤としての効果は期待できない。わが国においても, 現在, 数社が防錆剤を開発, 市販している。

**c) 水密コンクリート** コンクリートの透水性を改善し, 水密なコンクリートを得ることも, PC 鋼材を抑制させるために有効な手段である。

プレストレスト コンクリートでは, 高強度コンクリートを用いることにより 2 次的に水密性の高いコンクリートとすることができる。高強度コンクリートは, 配合上は水セメント比を小さくすることで, また, 施工上は十分な締固めや, 養生を行うことにより得られる。現在, 500 kg/cm<sup>2</sup> 圧縮強度のコンクリートの水セメント比は 37% 程度であるが, 水セメント比を 30% 程度とすることによって 800 kg/cm<sup>2</sup> の圧縮強度とすることができる。普通骨材コンクリートでは, 水セメント比を 10% 減少させると不透水性が 30% 程度向上するようである。また, T.C. Power 等の実験では<sup>16)</sup>, 水セメント比 50% のモルタルの透水係数は約  $20 \times 10^{-12}$  cm/sec であるが, 水セメント比を 30% とすると約  $0.1 \times 10^{-12}$  cm/sec となると報告している。富配合のコンクリートでは, 一般の減水剤や AE 剤を添加することでは水密性を高めることはできない。単位セメント量が 500~600 kg のコンクリートでは, 分散効果の大きい減水剤を用いることによりコンクリート中の空げきが減少し, 水密性を改善することができる。芳香族系の減水剤 (NL 1400 など) はこの目的に有利である<sup>17)</sup>。

##### (2) PC 鋼材に関して

PC 鋼材の腐食を防止する手段として, PC 鋼材自体をめっきする方法がある。亜鉛めっきを施した PC 鋼線

は、コンクリートとの付着が向上するという報告がある<sup>18)</sup>。これは表面粗さの影響と思われる。また、亜鉛めっき鋼線では応力腐食に対しても抵抗性が高いとしている。しかし、亜鉛めっきはPC鋼材を溶融亜鉛に浸漬して行うために、機械的強度が低下する欠点がある。表一8は普通のPC鋼より線と亜鉛めっきしたPC鋼より線の試験結果であるが、破断荷重は10%程度減少している。

表一8 亜鉛めっき PC 鋼より線の機械的性質

種 別	公称径 (mm)	標準重量 (kg/km)	降伏荷重 (t)	破断荷重 (t)	破断時伸び (%)
亜鉛めっきより線	12.4	752	11.3	15.0	4.5
普通より線	12.4	735.2	13.9	16.3	3.5

注：① 亜鉛めっきよりの亜鉛付着量は 275 g/m<sup>2</sup>  
 ② より線のより合せピッチは (36~48)×d

## 6. あとがき

本文は、プレストレスト コンクリートを海洋環境の構造物に応用する場合を想定し、特に、耐海水性に焦点を絞り、その問題点および対策に関し文献調査を基に検討した。実験例が少なく今後さらに明らかにしていかなければならない項目も多いが、本調査の範囲で明らかになった事項および残された問題点を列記すると、以下のとおりである。

1) PC鋼材の応力腐食は、鋼材の金属組成に起因する要素が大きい。粒状セメントイトを示すオイルテンパー線は好ましくないが、タイムテンパー線であっても粒状セメントイトが析出せぬような熱処理が必要である。水素ぜい化は特殊な状況以外は、あまり問題とならないようである。一般の腐食（孔食および全面腐食）に対しては、これを防止するような対策を考えねばならない。

2) 混和剤中あるいはコンクリート表面より浸透する塩素イオンは、PC鋼材の腐食に大きな影響を及ぼす要因である。

3) 過大荷重が作用してプレストレスト コンクリート部材にひびわれが残留する場合、PC鋼材の腐食に影響を与えることが予想されるが、この問題は耐海水性を考える上でさらに検討する必要がある。

4) ポストテンション方式では、問題点の一つにPC鋼材の定着方式がある。定着体などの腐食を防止し、施工が容易な方式を開発しなければならない。

5) プレキャスト部材をポストテンション方式で一体化する構造物では、接合面の処理を確実なものとする必要がある。漏水、荷重伝達能力の低下を防止するための耐久性の良好な接合材料を選択することが大切である。

6) PC鋼材の腐食を防止するために、コンクリート

の使用材料として塩化物（特に塩化ナトリウム、塩化カルシウム）の混入量を制限する、適切なかぶりとする、などが挙げられる。その他、現在開発ないし検討中のものとしては、表面コーティング、防錆剤、水密性の高いコンクリート（減水剤、高強度コンクリート）、亜鉛めっきPC鋼材、などの使用が考えられる。

## 参 考 文 献

- 1) 運輸省港湾局編：“港湾構造物設計基準”，日本港湾協会，昭和47年
- 2) H.H. Uhlig 著，岡本剛・訳監修：“腐食反応とその制御”，産業図書，昭和43年，p. 365
- 3) H.J. Godfrey：“Corrosion Test on Prestressed Concrete Wire and Strand”，PCI Journal, Vol. 5, No. 1, March 1960, pp. 45~51
- 4) G.E. Monfore and G.J. Uerbeck：“Corrosion of Prestressed Wire in Concrete”，ACI Journal, Vol. 32, No. 5, Nov. 1960, pp. 491~515
- 5) J.D. Gilchrist (宮川一郎訳)：“英国製 PC 鋼線の応力腐食について”，プレストレスト コンクリート，第7巻，第6号，昭和40年12月，pp. 79~80
- 6) W. Grundig (野口 功・訳)：“水素によるゼイ化が PC 鋼線の破断をひきおこす”，プレストレスト コンクリート，第3巻，第4号，昭和36年8月，p. 59
- 7) E.C. Roshore：“Durability of Prestressed Concrete Beams”，PCI Journal, Vol. 10, No. 5, Oct. 1965, pp. 49~59
- 8) E.C. Roshore：“Durability and Behavior of Pretensioned Beams”，ACI Journal, Vol. 61, No. 7, July 1964, pp. 811~846
- 9) P.W. Abeles and S. Filipek：“Corrosion of Steel in Finely Cracked Reinforced and Prestressed Concrete”，PCI Journal, Vol. 10, No. 2, April, 1965, pp. 36~40
- 10) E.C. Roshore：“Durability and Behavior of Prestressed Concrete Beams, Report 3”，U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Oct. 1971, p. 21
- 11) B. Ost and G.E. Monfore：“Penetration of Chloride in to Concrete”，Research and Development Laboratories of the PCA, Bulletin 192, Jan. 1966, pp. 46~52
- 12) 関 博，小野寺幸夫，丸山 浩：“長期間海岸環境中に暴露された無筋コンクリート構造物の劣化状況調査”，港湾技研資料，No. 142，昭和47年6月，p. 33
- 13) E.C. Roshore：“Durability and Behavior of Prestressed Concrete Beams, Report 2”，U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, March 1967, p. 14
- 14) 小林一輔：“プラスチックコンクリートの防食材・接着材としての利用”，コンクリートジャーナル，第11巻，第4号，昭和48年4月，pp. 34~39
- 15) 田沢栄一，小林貞雄：“ポリマー含浸コンクリートの特性”，コンクリートジャーナル，第11巻，第4号，昭和48年4月，pp. 27~33
- 16) T.C. Power：“Permeability of Portland Cement Paste”，ACI Journal, Vol. 51, No. 3, Nov. 1954, pp. 285~298
- 17) 村田二郎，大塚茂雄：“高強度コンクリートの2, 3の性状”，土木学会第28回年次学術講演会講演概要集，第5部，昭和48年10月，pp. 170~172
- 18) G. Rehm, U. Nürnberger and G. Rieche：“Investigation upon the Properties of Galvanized High-Strength Prestressing Steel”，FIP 2nd Symposium on Stress Corrosion of Prestressing Steel, No. 2-6, pp. 1~12

1974.12.4・受付