

# 港 湾 技 研 資 料

TECHNICAL NOTE OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE  
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 191      June 1974

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

運輸省港湾技術研究所



# 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

## 目 次

要 旨 .....	3
1. まえがき .....	3
2. 海洋構造物としてのプレストレストコンクリート部材の利用 .....	5
2.1 既設のプレストレストコンクリート構造物 .....	5
2.2 開発中のプレストレストコンクリート構造物 .....	8
3. 海洋環境における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 .....	10
3.1 P C鋼材の腐食 .....	10
3.2 ひびわれ .....	15
3.3 コンクリートからの腐食物質の浸透 .....	20
3.4 製作工法の問題 .....	22
4. 各国の耐久性に関する規準 .....	23
5. 耐久性向上のための対策 .....	28
5.1 コンクリート .....	28
5.2 P C鋼材 .....	29
6. あとがき .....	30
参考文献 .....	30

## Durability of Prestressed Concrete under Marine Environments

Hiroshi SEKI\*  
Hisahiro KOGA\*\*

### Synopsis

It is very evidently that wide province in the field of marine structures which have been recently developed may be occupied by the concrete structures. This paper reports the investigation results of problems for prestressed concrete members to utilize in the marine structures.

Now the application of the prestressed concrete members to marine structures are only a few in the foreign countries. The study on durability of prestressed concrete members in marine environments logs very behind.

When we use the prestressed concrete members in the marine environments, there are many subjects. For example they are the problem of corrosion of tendons embedded in the prestressed concrete members and deterioration of concrete in sea water. The decreases of strength of prestressed concrete members taken place by these factors are also subjects.

---

\* Chief of the Materials Laboratory, Structures Division  
\*\* Trainee

# 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\*\*

## 要 旨

本文は、プレストレストコンクリートを海洋構造物などの海水作用をうける構造物に利用する際の問題点およびその対策を文献調査をもとに取り纏めたものである。本文では、特に、海洋環境下におけるプレストレストコンクリート部材の耐久性に焦点を絞って検討した。

プレストレストコンクリートの耐久性は、内部PC鋼材の腐食の問題に焦約される。PC鋼材に発生すると予想される各種形態の腐食の原因を分類し、各国における規準も参照して、その対策について検討した。

また、今後、技術開発によっては有効な防食対策となり得る方法も紹介してある。

## 1. まえがき

海洋構造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は握しておく必要がある。本文は、これら問題点のうち特に耐久性に焦点を絞り、その問題点および耐久性向上のための対策に関して文献調査をもとに取りまとめたものである。

近年、海洋開発(Ocean Development)が脚光をあびつつあるが、図-1に類別化して図示してあるよう

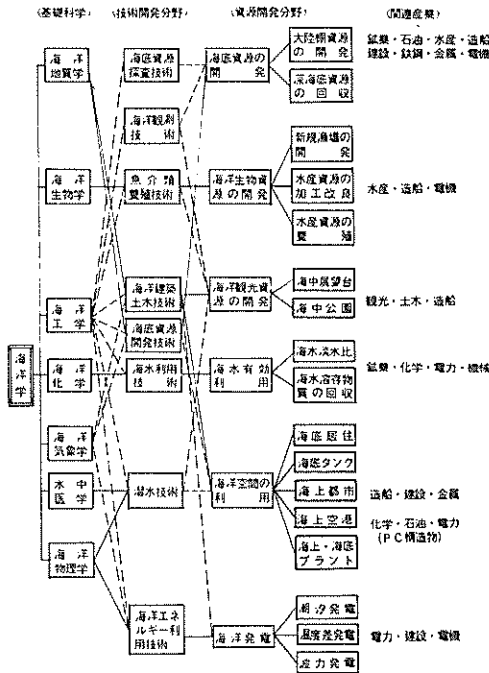


図-1 海洋開発の内容

に海洋構造物は、多くの内容を包含する海洋開発における建設分野に関連する。<sup>1)</sup>

海洋構造物の意味する範囲は、現在の所、確立した定義がないが、たとえば、構造物の置かれている場所から分類した次のような解釈がある。<sup>2)</sup>

「水ぎわ線までをも含めた海のすべての構造物を慣習的な呼び方による分類に従って以下のように区分する。

- (1) 海岸構造物：港湾施設を除いた水ぎわ線付近の構造物（海岸堤防、護岸など）
- (2) 港湾構造物：防波堤、岸壁などの港湾施設
- (3) 海洋構造物：上記以外のもので一般に水ぎわ線から離れて存在するもの。」

一方、海洋構造物は、海岸構造物および港湾構造物をも含めているものもある。<sup>3)</sup>すなわち、海水の作用を受ける海にあるすべての構造物を海洋構造物と呼ぶ考え方である。本文では、後者の広く解釈した構造物を、「海洋構造物」と考えることにする。海洋構造物には、海上都市、海上空港、海上発電所、海底貯油タンク、海底居住基地、シーバス、ドッグ、海底沈埋トンネル、海中基礎、防波堤、けい船岸、海岸堤防、などがある。

海洋構造物に対比することの出来る用語として「陸上構造物」がある。陸上構造物は一般に荷重の大きさが明確であって荷重方向が決まっているが、海洋構造物では、荷重構成が不明確である。すなわち、陸上構造物の場合には、輪荷重のように数値表示が簡単でその方向も決まっているが、海洋構造物の場合には、海洋上の気象および海象条件には、確率論的の考察が大きな役割を占めているため、数値表示が困難であり、また、外力の方向が決まらないという事である。

\* 構造部 材料施工研究室長

\*\* 研修員

外洋における海洋構造物に、プレストレストコンクリート部材を使った例は、わが国においては皆無と言って良く、また、外国においては2、3の例があるだけである。これは、外洋における海洋構造物建設の歴史が浅いことにもち論であるが、さらに、プレストレストコンクリート部材の海水に対する耐久性に関する知識が不足していることも一因と考えられる。しかし、一方ではプレストレストコンクリート構造物は、鉄筋コンクリート構造物あるいは鋼構造物に比較して有利な条件を備えているとも言える。すなわち、鉄筋コンクリート部材に比較してプレストレストコンクリート部材は、同一荷重条件に対して断面を小さくすることができ、有効な材料の利用を計ることができる。また、鋼構造物のように腐食による断面減少を考える必要が無い。従って、構造物の型式、施工条件、経済性、などを総合するとプレストレストコンクリート構造物が有利となり、積極的に活用される場もありうると考えられる。このためには、プレストレストコンクリート部材の海水に対する耐久性の問題点を明確にし、プレストレストコンクリート部材の耐久性向上のため対策を検討しておくことが大切である。

それでは、次に海水に対するプレストレストコンクリート部材の耐久性という問題について考えて見よう。港湾構造物設計基準では、コンクリートの耐久性を次の様に定義している。<sup>4)</sup>すなわち、「コンクリートの耐久性とは、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形物による摩耗などの機械的作用、鉄筋の腐食、その他の各種の有害な作用に対して抵抗するコンクリートの性質をいう。」

プレストレストコンクリート部材を劣化させるものとしては、

- (1) 化学作用などによるコンクリートの劣化
- (2) PC鋼材の腐食
- (3) スタラップ、スベーサー、などを含んだ鉄筋の腐食
- (4) 定着体の腐食

の4つが考えられる。この4つの要素によってプレストレストコンクリート部材は劣化し、初期に想定したプレストレストコンクリート部材の耐力が減少してゆく。

これらのプレストレストコンクリート部材の劣化に影響を与える要因としては、コンクリート部材自身に関連するものとして、<sup>5)</sup>

- a) 練りませ水、養生水、混和材料および骨材表面中に含まれる塩分や硫化物
- b) 活性骨材
- c) 不十分なセメント量
- d) セメントの品質(たとえばC<sub>3</sub>Aの量が過度に多いこと)

- e) 不十分なかぶり
- f) ひびわれ
- g) 不十分なグラウト
- h) 不十分な定着体の防護

などが考えられる。このコンクリート部材自身のもつ要因の大部分の項目は、部材の設計、材料の選択、コンクリート配合、練りませ、打ち込みおよび養生の段階で、適切に処理を施すことが可能である。しかし、f) 項の「ひびわれ」の問題、g) 項の「不十分なグラウト」の問題およびh) 項の「不十分な定着体の防護」の問題は、プレストレストコンクリート部材に特有な問題と考えられる。f) 項の「ひびわれ」の問題、この問題については後の章で詳述するが、その発生原因は多種多様であり、分類も色々の方法がある。本文では「荷重によるひびわれ」を考える。前述したように海洋環境下では、波力などによる予想し難い外力が構造物に作用するが、その外力の大きさは、設計時に想定した外力を上回ることも考えられる。このため、プレストレストコンクリート部材は、設計荷重載荷時にはひびわれが発生しないと言いつものの、このような過大荷重が載荷された場合には、ひびわれを発生させることは十分考えられる。g) 「不十分なグラウト」、および、h) 「不十分な定着体の防護」の2つの要因は、プレストレストコンクリート部材をプレテンション方式で製造するか、またはポストテンション方式で製造するかによって違ってくる要因である。すなわち、グラウトおよび定着体が必要なのは、ポストテンション方式で部材を製作した時であり、この2つの問題は、PC鋼材の腐食の問題と密接なつながりをもっている。

また環境のもつ要因としては、次の事項が考えられる。

- i) 海水(塩化物、硫化物)
- j) 空気中または海水中のO<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O
- k) ガス中のH<sub>2</sub>S
- l) 迷走電流
- m) 凍結融解作用
- n) キャピテーション
- o) 浮遊物質(漂砂、氷)
- p) 酸などの化学薬品
- q) 火および熱

などである。これらの環境の要因は、単独で構造物に作用して、プレストレストコンクリート部材の耐久性を著しく低下させる場合もあり、また、数要因が複合して作用し部材耐力を減少させる場合もある。

海洋構造物の耐久性を想定したときの影響の程度は、それぞれの要因により相違し、l)、p)、q)、などの要因は、ほとんど無視することができる。このため本文では、

プレストレストコンクリート部材の海洋環境中の耐久性を「耐海水性」という用語で表現し、 $l$ 、 $p$ 、 $g$ 、などの要因を、はぶいて話をすすめることにする。

なお、本文の作成に当っては、構造部善主任研究官に、査読して頂いた。ここに、謹んで感謝の意を表する次第である。

## 2. 海洋構造物としてのプレストレストコンクリート部材の利用

まえがきで述べた海洋構造物の分類は、陸上構造物という反対語からも分るように構造物の置れている地域の違いによっている。また、この分類と異った分け方もある。これは構造形式による分け方である。土木学会が昭和48年に発表した海洋鋼構造物設計指針(案)解説で、構造物を次のように分類している。<sup>6)</sup>

のように分類している。<sup>6)</sup>

- 1 接地式
  - 固定型 (くい、埋設、などにより支持するもの。)
  - 着底型 (底面により支持するもの。)
  - 自己昇降型 (昇降可能な脚および甲板を有し、接地した脚により支持するもの。)

- 2 浮上式
  - 海上型
  - 半潜水型
  - 海中型
 (浮力ならびにアンカーケーブルにより支持するもの。)

である。各分類における典型的な形状を図-2に示す。

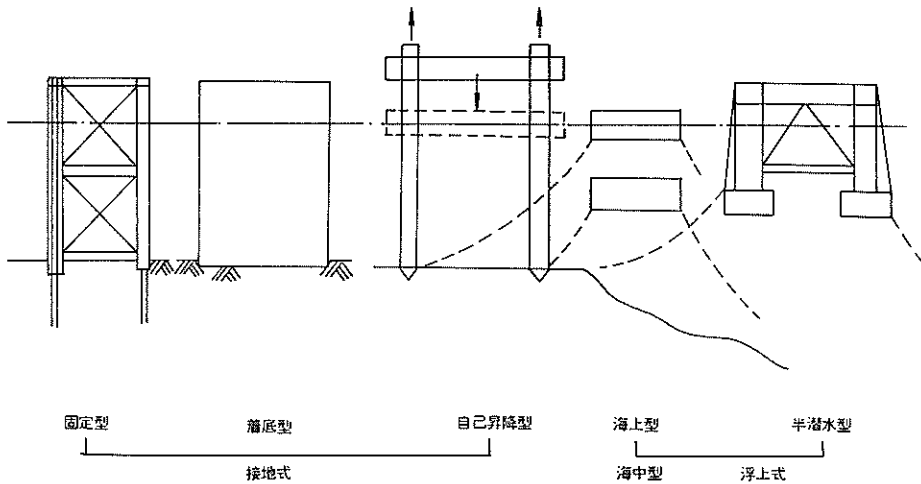


図-2 海洋構造物の分類の一例

### 2.1 既設のプレストレストコンクリート構造物

前述した構造型式による分類法に従うと、外洋に建設されたプレストレストコンクリート構造物の例としては、接地式着底型と浮上式海上型がある。構造物で言う、海底貯油タンク、海中基礎、輸送バージ、などである。

次にその実例を示す。

#### (1) Ekofisk 100万バレル貯油タンク<sup>7)~9)</sup>

この貯油タンクは前述の構造分類の接地式着底型にあたる。本構造物は、ノルウェエ領北海で、Phillips Group (アメリカ)により発見されたEkofisk油田の海底貯油タンクとして建設された。海象条件の荒い環境下においては通常のTanker作業が困難なので、その目的に合うように研究開発されたものである。

構造形式は次のようになっている。外観は円筒形であり、

全高は90mでそのうち20mが海面上に出ている。断面形状はほぼ円形であり、その直径は92mである。円柱部分は、波力による衝撃を緩和させる目的の外壁と、貯油タンクを形成する内壁とから構成されている。外壁は底面から58m区間が、1.35mの壁厚で、上部の32m区間が、1.85mの壁厚となっている。外壁には、2.4mの波高を想定した波力による衝撃を減少させる目的で、80cmから、130cmの直径の穴があけてある。この穴あき外壁によって波のエネルギーの約70%を失なわせることができるそうである。内側タンク壁は、4つのアーチ型の壁を合せた構造となっている。このタンクは、構造系の剛度を増すために間仕切壁によって6個の部屋に区切られている。壁厚は上部で50cm、下部で60cmである。この貯油タンクの構造図を、図-3に示す。

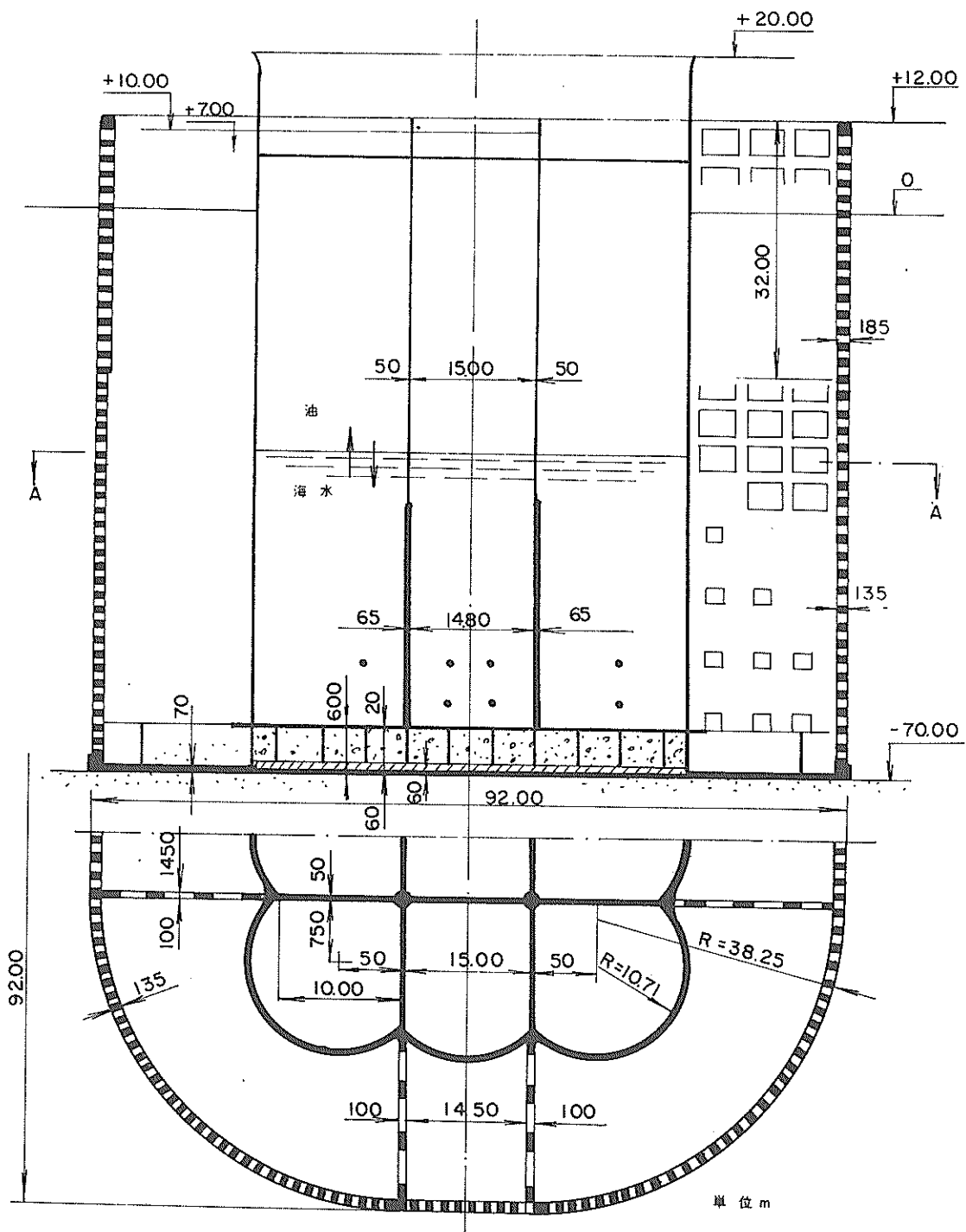


図-3 Ekofisk 100万バレル貯油タンクの構造図

すべての壁には、ポストテンション方式で応力が導入された。鉛直方向のPC鋼材は、LL字型に配置し、1本のPC鋼材は、直径が13mmのPC鋼線を12本たばねて使用した。円周方向のPC鋼材は、鉛直方向のPC鋼線と同じ直径が13mmの鋼線を24本たばねて使用した。ソースの直径は100mmであり、定着体は、フレンネーの12T13型の支圧板を2個つなげて使用した。

セメントは、普通ボルトランドセメントを使用した。骨材は、粗骨材が最大寸法32mmであり、その石質は花崗岩である。コンクリート配合は、水セメント比が最大で40%、最小で37%とし、単位セメント量は450kgとした。水セメント比は、部材の鋼材比によって相違させている。コンクリートの材令28日における平均圧縮強度は、435kg/cm<sup>2</sup>であった。プレストレストコンクリート部材の耐海水性に関する問題は、事前に実験などを行って検討し、その結果前記の材料の品質および配合で十分な耐海水性が得られるとしている。

貯油タンクは、ノルウェエのStavangen Fjordの海岸地帯に設けたドライドック内で建設された。建設期間は1971年7月から1973年6月の2年間であった。貯油タンクは建設完了後1973年6月に9日間かけて、建設地点から480kmはなれたEkofisk油田へ曳航された。貯油タンクは、Ekofisk油田のタンク設置箇所へ到着後海底へ着底させたが、これはあらかじめ決まっていた位置と2mの誤差しかなかったそうである。

現在、Ekofisk油田では、イギリスと西ドイツへのパイプラインの建設と、採油プラットフォームの建設が行われている。

## (2) Food 海峡浮橋<sup>10)</sup>

この橋は、アメリカ、Washington州のPuget Sound 湾西側にあるFood海峡に架設されている。Food海峡は、長さが88kmあり、幅が狭い所で1.6km、広い所で2.4kmある。そして、この海峡は、Seattle市とOlympic Peninsula市の間に位置しているため、両市の間の交通の大ききな妨げとなっていた。この妨げを取り除くために架設されたのが、Food海峡浮橋である。Food海峡の水深は、最大で100mであるため、普通型式の橋の建設が不可能であり、浮上式の構造物が採用された。

海中基礎にあたる浮遊体は、長さ111m、幅10m、高さ4.4mの大型プレストレストコンクリートポンツーンを23個並べた形をしていて、上部は橋脚部と橋梁部により構成されている。各ポンツーンは、ポストテンション方式で応力が導入されており、また、各ポンツーン間の結合もPC鋼材によるポストテンション方式で連結されている。

ポンツーンは、普通骨材コンクリート製で、浮遊体上部にある橋脚および橋梁は、人工軽量骨材による軽量骨材コンクリート製である。ポンツーンの外壁と底版の厚さは22.5cm、内壁の厚さは19cm、上版の厚さは17.5cmである。図-4に橋の断面図を示す。

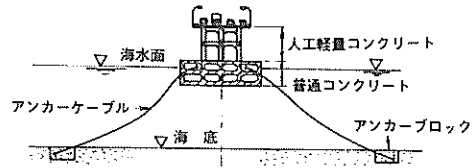


図-4 Food海峡浮橋の断面図

コンクリートの設計基準強度は、材令7日で210kg/cm<sup>2</sup>である。コンクリート配合は、単位セメント量320kg、水セメント比が0.45である。コンクリートの平均圧縮強度は、材令10日で308kg/cm<sup>2</sup>、材令28日で476kg/cm<sup>2</sup>、材令1年で630kg/cm<sup>2</sup>であった。

コンクリートの圧縮強度が210kg/cm<sup>2</sup>となった時点で、コンクリートに応力を導入した。使用したPC鋼材は、直径9mmのPC鋼線を8本たばねたもので、設置箇所はポンツーンの横断面43箇所である。計算上応力の導入によって、底版には3.15kg/cm<sup>2</sup>、上版には15.4kg/cm<sup>2</sup>の応力が入るようにした。また、ポンツーン相互の結合には、直径6mmのPC鋼線を40本たばねたものを使用した。この緊張によって計算上、底版には3.01kg/cm<sup>2</sup>の応力が導入され結果として6.16kg/cm<sup>2</sup>の応力が底版に導入された。応力の導入後PC鋼材に対して、エポキシ樹脂によるグラウトが行われた。本橋梁は、1961年に施工されたが、13年を経過した現在においても供用性を低下させるような現象は生じていないそうである。

## (3) 2千トンプレストコンクリートバージ<sup>11)</sup>

アメリカ、Hawaii州のA.A.Yeeは、プレストレストコンクリートバージの設計および建設を行っている。彼は1964年12月フィリピンのManila市南方約450kmにあるIloilo市で世界最初のプレストレストコンクリートバージを進水させ、その後1971年までに17隻のプレストレストコンクリートバージを進水させた。この2千トンのプレストレストコンクリートバージは、フィリピン諸島間の油の輸送や、ベトナムとの間の輸送に使われている。このプレストレストコンクリートバージの製造費は、同じ2千トンの鋼製バージに比較して16.5%少なくてすむと言っている。

図-5は、2千トンバージの一般図である。構造形式は、プレテンション方式の一体型である。外殻はプレストレス



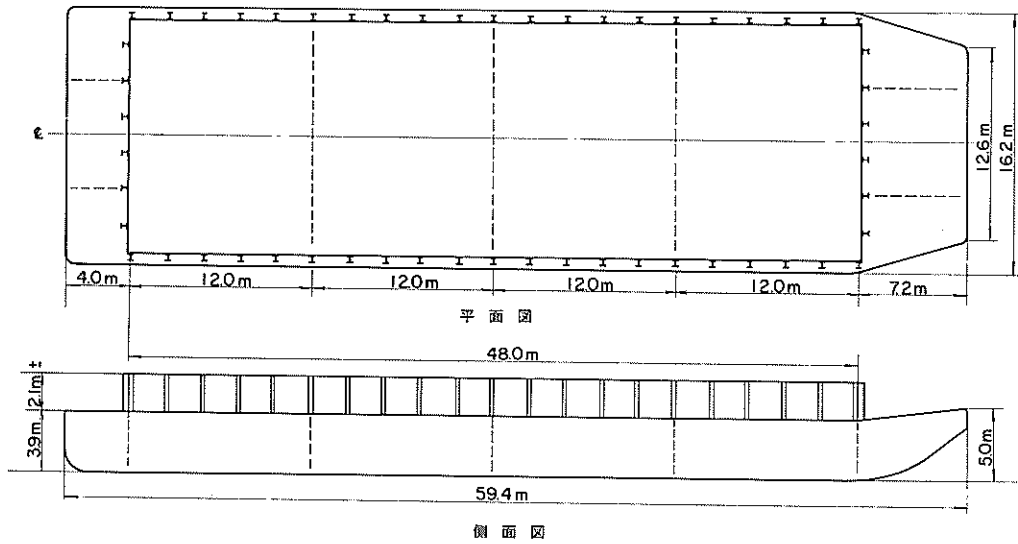


図5 二千トンプレストレストコンクリートバージの一般図

トコンクリート製で、内部の骨組を鋼製フレームで作っている。バージの大きさは、長さ59.4m、幅16.2m、高さ3.9mである。使用材料の量は、コンクリートが750ton、隅角部を補強するために使われている鉄筋が41ton、メッシュが14ton、PC鋼材が30ton、鋼製フレームが126tonである。

A. A. Yeeは、「外洋で受ける厳しい波や風の力に対しても、わずかの損傷しか発生せず、この損傷もドライドックに入れて補修するほどの事は無い。」と、述べている。バージの製造工法は、特許工法となっている(U. S. Patent 3324814)。

## 2.2 開発中のプレストレストコンクリート構造物

### (1) 20万バレルの海底貯油タンク<sup>12)</sup> <sup>13)</sup>

この20万バレルの海底貯油タンクは、アメリカのSanta Fe Pomeroy社が開発したものである。

図-6に、海底貯油タンクの一般図を示す。貯油タンク

装置の形状は、内径14m、長さ100mの2本のプレストレストコンクリート製の筒を、平行に並べ上下を2枚のコンクリート板ではさんだ形となっている。応力の導入方法は、ポストテンション方式を採用している。

この20万バレルの海底貯油タンクは、まだ提案の段階で、現在技術的な考案を加えて試設計を行っている。

### (2) 海底貯油タンクユニット<sup>7)</sup>

この海底貯油タンクユニットは、フランスのSea Tank Co.社が開発したものである。

図-7は、この海底貯油タンクユニットの構造図である。本装置は、長さと幅が7.8m、高さ3.0mの立方体のプレストレストコンクリート製タンクと、このタンクの上につく7.9mの直径の鋼製シャフトより構成されている。本装置もまた、提案された段階である。

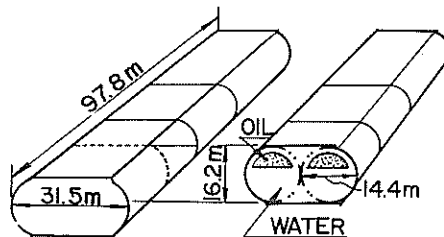


図-6 20万バレルの海底貯油タンクの構造図

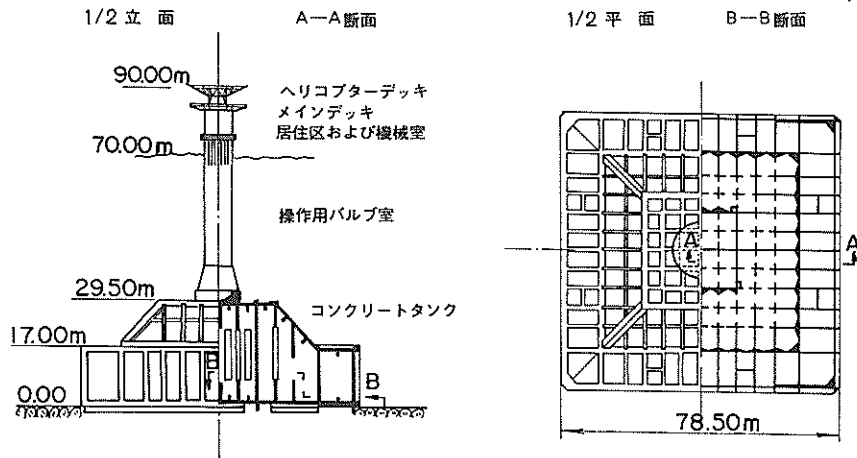


図-7 海底貯油タンクユニットの構造図

(3) 浮遊式潜水型トンネル<sup>14)</sup>

ノルウェエは、多くのフィヨルドがある。これらのフィヨルドは、数百メートルの深さと数キロメートルにわたる幅を持っているものがたくさんあり、ノルウェエの重要な交通網をシャ断している。そのため、これらのフィヨルド

を横切る浮遊式潜水型トンネルの建設の可能性についての研究がノルウェエで行われている。次にその例を示す。

図-8にトンネルの一般図を示す。トンネルの構造形式は、2車線幅を有する外径1.4mの円形断面である。壁の厚さは95cmで、主体は鉄筋コンクリート部材で造られ、

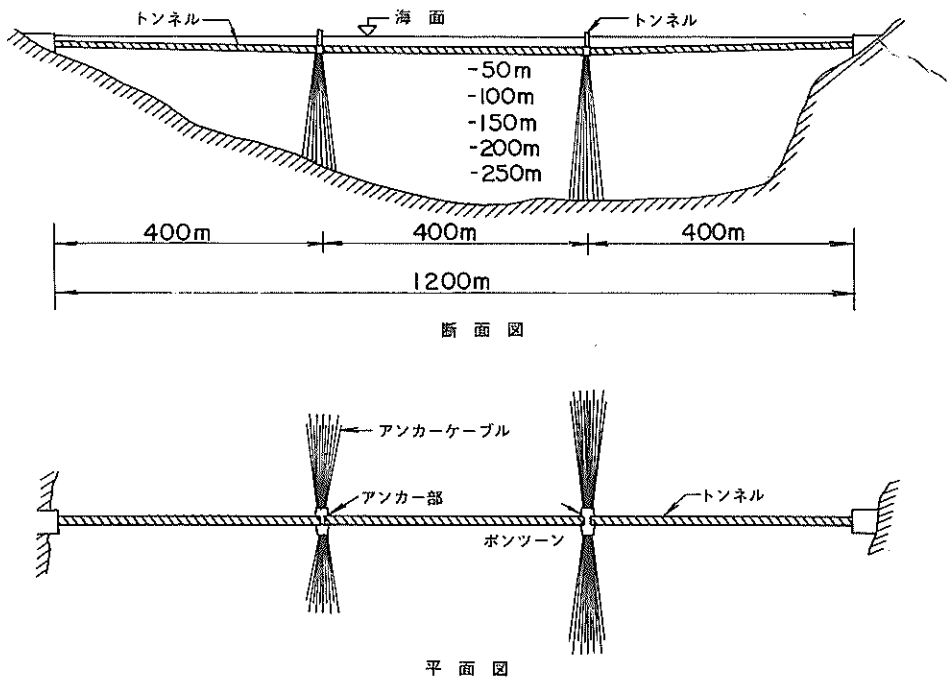


図-8 浮遊式潜水型トンネルの一般図

トンネルを一体化するためのポストテンション方式の結合法が検討されている。

トンネル自身の浮力と潮力に対応するためアンカーケーブルを取付け、このケーブルの他端は海底にしっかり定着させる型式となっている。

以上が開発中の海洋プレストレストコンクリート構造の例である。このほか、1972年、ソ連のTbilisで開かれた、「海洋コンクリート構造物に関するシンポジウム (FIP Symposium on Concrete Sea Structures)」で、プレストレストコンクリートバジに関して2編、浮ドックに関して2編、海中トンネルに関して2編の研究開発についての報告が行われた。<sup>15)</sup>

### 3. 海洋環境における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

この章では、「1. まえがき」で述べたプレストレストコンクリートの耐海水性に影響を与える諸問題のうち、

1. PC鋼材の腐食機構
2. ひびわれの評価
3. コンクリートの化学変化
4. 工法の問題

の4つの問題について文献調査を行い、現時点における問題点を探って見る。

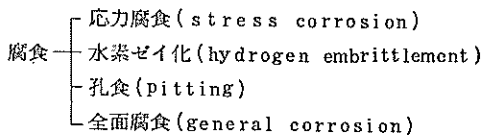
凍結融解作用は、耐久性を検討する上で極めて大きな要因であるが、その作用をうける地域はわが国では比較的限制されているために、本文では、耐久性の検討範囲から除いて考える。

#### 3.1 PC鋼材の腐食

##### (1) 概 説

この節では、(a)PC鋼材の成分、(b)プレストレストコンクリート部材中のPC鋼材の腐食の2項目について述べる。ここで言う「腐食 (corrosion)」とは、金属がそれを取り囲む環境にあって電気化学的に侵される場合に使い、物理的 (機械的) に侵される「浸食 (erosion)」と区別する。また、「錆びる (rusting)」という用語は、鉄および鉄合金が腐食して、主として水化した酸化第2鉄からなる腐食生成物を生成する場合のみ使用される。<sup>16)</sup>

金属の腐食は、たとえば次のように分類できる。

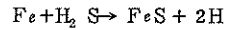


プレストレストコンクリート部材中のPC鋼材に発生する腐食は、「孔食」と「全面腐食」に関しては、鉄筋コン

クリート部材中の鉄筋と同じ作用を示すが、PC鋼材には応力が持続した状態なので、「応力腐食」、「水素ゼイ化」という特殊な腐食機構も考えなければならない。

応力腐食は、非常に複雑な現象でまだよくその化学的な発生原因は解明されていない。ただし、プレストレストコンクリート部材が荷重を受けない状態で急激な崩壊を起こした場合は、このプレストレストコンクリート部材の破壊はPC鋼材の応力腐食による破壊であると考えられている。

水素ゼイ化の破壊現象は、応力腐食の破壊現象と破断面の状態が良く似ている。しかし、この場合は、主に硫化水素 (H<sub>2</sub>S) の存在によって発生する。これはPC鋼材と硫化水素が化学反応し、発生した水素原子が鋼材の結晶中



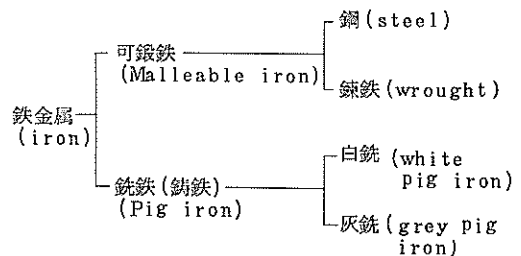
に浸透し、PC鋼材の機械的性質を変えるためであると考えられている。すなわち、PC鋼材の持っている延性が減少し、PC鋼材の破壊はゼイ性破壊に近づく。

孔食および全面腐食は、鋼材表面が錆びるといふ電気化学的なプロセス (局部電池の形成) で、鉄筋をも含めた鋼材に一般に発生するものと同じである。

##### (2) 鋼材の成分

###### a) 化学組成

鉄金属は、分類すると2つに分けられる。<sup>17)</sup> それは、可鍛鉄 (Malleable iron; C=0.04~1.7%, 融点1350℃~1500℃) と銑鉄 (Pig iron; C=1.7~4.5%, 融点1100℃~1200℃) である。炭素の含有量1.7%を境にして金属組織のうえでも、また機械的性質のうえでも大きな差がでてくる。建設材料として非常によく使用される「鋼」は可鍛鉄の分野に入る。



鋼はさらに炭素鋼、合金鋼に別けて考える事がある。炭素 (C)、ケイ素 (Si)、マンガン (Mn) 以外は、リン (P) イオウ (S)、銅 (Cu)、などの元素含有量が極めて少ない鋼が炭素鋼である。表-1は、現在わが国で使用されている鋼の化学成分表である。(I)は、PC鋼線およびPC鋼より線の原料であるピアノ線材の化学成分で、JIS G3502-1965にSWRS67Aとして規定されている。(II)は、PC鋼棒の原料であるばね鋼材の化学成分で、JIS G4801

表-1 鋼に含まれる元素

	炭素	ケイ素	マンガン	リン	イオウ	銅	クロム	バナジウム
I	0.65~0.70	0.12~0.32	0.30~0.60	<0.025	<0.025	<0.20	—	—
II	0.45~0.55	0.15~0.35	0.65~0.95	<0.035	<0.035	—	0.80~1.10	0.15~0.25
III	0.32~0.38	0.15~0.35	0.65~0.90	<0.030	<0.035	—	—	—

-1967℃SUP10として規定されている、Cr-V 合金鋼である。(Ⅲ)は、同じくPC鋼棒の原料である機械構造用炭素鋼材の化学成分でJIS G4051-1965にS35Cとして規定されている。

鋼のいろいろな性質におよぼす炭素の影響は大きい、その他の元素の影響も無視する事はできない。各元素の添加は、それぞれ単独に影響を与えるが、それぞれの共存によってその影響は左右される。

次に主な元素の鋼の性質におよぼす影響について述べる。

炭素(C) : 図-9に1例を示したが炭素量が増加すると引張強さ、降伏点、かたさが増加し、伸び、絞り、衝撃値は減少する。

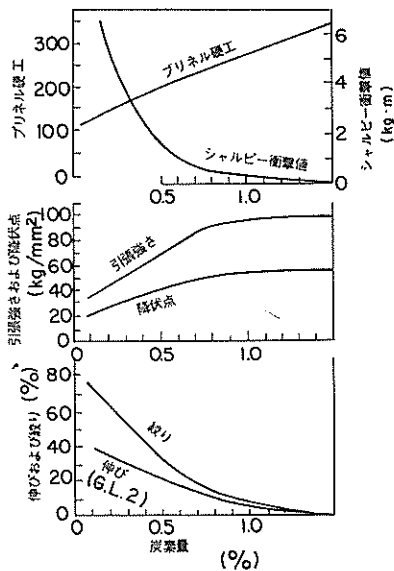


図-9 鋼の炭素量と機械的性質の関係

- ケイ素 (Si) : 脱酸剤として鋼を加えられる。約2%程度までは延性をそれほどそなわずに強度を高めるが、限度を越えともろくなる。しかし、耐熱性はあがる。
- マンガン (Mn) : 強度、かたさを増加し、伸び、絞りを減少させる傾向は炭素と同じであるが、マンガンによる強度増加は、炭素によるほどじん性の低下をきたさない。またイオウによる

ぜい性を防止する。

リン(P) : 含有量が多くなるともろくなる。

イオウ(S) : 通常マンガンと結合してMnSとなって存在するが、イオウの含有量が多すぎる場合、またはマンガンが不足の場合にはFeSとなる。これは赤熱状態で鋼をもろくする。この時のぜい性を赤熱ぜい性、または高温ぜい性という。

銅(Cu) : 耐食性を増す。引張強さ、かたさを高めるが、延性をそこなう。

クロム (Cr) : 鋼にねばり強さを与える。多量になると高温での強度を高める。ニッケルと共存して耐食性、耐熱性を大にする。

バナジウム (V) : 高温での強さを増す。焼戻しぜい性を防止する。

b) 結晶組成

鉄は、体心立方格子と面心立方格子の2つの結晶格子を持っている。常温では体心立方格子の形をしている。これをα鉄という。910℃まで温度を高めると、面心立方格子になる。これをγ鉄という。α鉄からγ鉄になると立方格子の原子の数が変わり急激な収縮をおこす。さらに温度を上げると約1400℃でγ鉄は再び体心立方格子の結晶構造となる。これをδ鉄と言う。図-10はその状態を示したものである。

鋼の場合、含有している炭素の量の影響によって、変

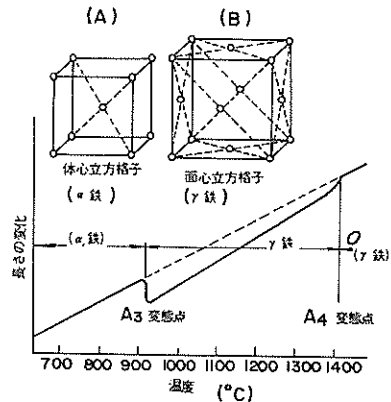


図-10 純鉄の膨張曲線と結晶格子の変化

態温度が違って来る。図-11に示すような値となる。図-11においてA-B-Cの線より左の部分は $\alpha$ 鉄に炭素

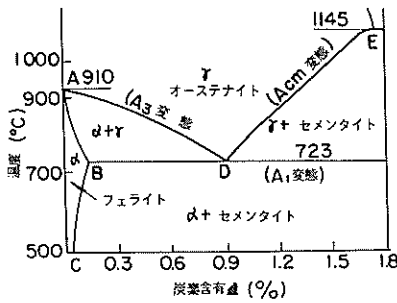


図-11 鋼の状態図

が固溶したもので、フェライトと呼ばれている。固溶とは固体が固体の中に溶け込む事を言う。 $\alpha$ 相は室温ではほとんど炭素を固溶しないが723°Cで、最大限0.035%の炭素を固溶する。この場合、固溶した炭素原子は、鉄原子の間に入り込んでいる。 $\alpha$ +セメンタイトと図示してある部分は、固溶しきれない炭素が $F_{0.035}C$ という炭化鉄(セメンタイト)として析出している部分である。「フェライト」は、純鉄に近く軟らかで延性に富んでいるが、「セメンタイト」は、硬くてもろい性質がある。

D点は炭素約0.9%に相当し、この点ではフェライトとセメンタイトが同時に析出し微細な縞状の組織を示す。これをパーライトと呼ぶ。

炭素量が0.9%より少くなるとパーライト組織は量が減って、フェライトの量が多くなる。炭素量が0.9%より多いときはパーライト組織の間に網目状にセメンタイトが析出してくる。セメンタイトは、銹鉄と鋼の境である炭素量1.7%までは炭素量が増につれてその厚さを増すが、網目の中のパーライトの量は0.9%で変化しない。

A-D-Eの上部 $\gamma$ 相はオーステナイトと呼ばれ、 $\alpha$ 相に比べ非常に多くの炭素原子(1.7%)を固溶する。

### c) 製造方法

鋼材を製造するには、加工、熱処理の2つの工程がある。

加工には、高温加工(Hot working)、低温加工(Cold working)の2種類の方法がある。

高温加工は、900°C~1200°Cで行うもので、この際鋼材中の結晶粒は成長せず組織はち密になる。低温加工は、常温状態で加工を行うもので、結晶は加工方向に並んで繊維状となる。この加工では、引張強さ、降伏点、かたさが増加するが、伸び、絞り、比重は減少する。

熱処理には、(イ)焼ならし(Normalizing) (ロ)焼なまし(Annealing) (ハ)焼入れ(Quenching) (ニ)焼戻し(Tempering)の4種類の方法がある。

- (イ) 焼ならしは、結晶粒を微細化し均一にする。
  - (ロ) 焼なましは、数種ある。その中で球状化焼なましは、層状パーライト中の遊離網目状のセメンタイトを球状化させる。
  - (ハ) 焼入れは、鋼材を急冷させる方法で、鋼材のかたさを増加させ、伸びを減少させる。
  - (ニ) 焼戻しは、鋼材にじん性を与える。
- 以上の加工、熱処理によって、次のような線材が製造される。

- (イ) タイムテンパー線(ストレスレリーブ線)
- (ロ) オイルテンパー線
- (ハ) 冷間圧延線
- (ニ) 熱処理線

(イ) タイムテンパー線は、次の工程で製造される。

原料→焼入れ(パテンチング)→酸洗い→冷間引抜き→伸線加工→低温熱処理→製品

パテンチングとは、一種の焼入れ工程で、次の伸線工程に都合の良いよう鋼の組織を均一なものに変えるために行う。この焼入れで引抜き加工が容易になる。冷間引抜き加工では、降伏点と弾性限界が割合低くてPC鋼線としては使用に耐えない。そこで低温熱処理を行う。これを一般には、「テンパー」と言い、伸線加工時に生じた内部の潜在応力を除く意味から「ストレス・レリーブ」と言い、これを行った製品の肌の色沢から「ブルーイング」とも言う。この低温熱処理を行うと降伏点が高くなり、リラクセーションが減少する。また応力腐食による抵抗を増すとされている。市販されているPC鋼線の大部分は、この方法で作られている。

(ロ) オイルテンパー線は、次の工程で製造される。

原料→焼入れ(パテンチング)→酸洗い→冷間引抜き→伸線加工→焼入れ(油槽)→焼戻し→製品

オイルテンパー線は、伸線後の加工がタイムテンパー線と違う。応力腐食による抵抗がタイムテンパー線に比べて低いと言われている。

タイムテンパー線の結晶組成は、大部分が層状パーライトを示す。オイルテンパー線は、大部分が粒状セメンタイトを示す。表-2は、PC鋼材のうち7本より線の機械的性質を示した表である。

(ハ) 冷間圧延線は、次の工程で製造される。

原料→焼入れ(パテンチング)→酸洗い→冷間圧延→伸線加工→低温熱処理→製品

タイムテンパー線と冷間圧延線の違いは、前者が冷間引抜き加工であるのに対して、後者が冷間圧延加工であるという点である。リラクセーションは、タイムテンパー線に比べて30%位低くなると言われている。

表-2 7本より線の機械的性質 (JIS G3536-1971)

公称直径d (mm)	断面積 (mm <sup>2</sup> )	周長 (mm)	破断荷重 (kg)	降伏荷重 (kg)	伸び (%)
6.2	23.2	25.8	4,100	3,450	3.5
7.9	37.4	32.6	6,550	5,600	3.5
9.3	51.6	38.5	9,050	7,700	3.5
10.8	70.3	44.9	12,200	10,400	3.5
12.4	92.9	51.7	16,300	13,900	3.5

(3) 応力腐食 (stress corrosion)

a) 原因

応力腐食は、腐食作用と静的応力とが同時に働いた時に金属に起る現象である。腐食により金属構造物の部材断面が徐々に減少し、ついに応力に耐えられなくなって起る延性的な場合と違って急激に起る点で重要なのである。

純金属は、どのような厳しい環境においても応力腐食を生じない。すなわち、不純物や合金元素が応力腐食の発生原因となるのである。H. H. Uhlig は、金属の応力腐食を次の様に述べている。<sup>16)</sup>「不純物や合金元素は、応力腐食による割れが進行する径路を作る。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 CuAl<sub>2</sub> を粒界に析出し、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、それによって局部腐食が急速に起こり、割れが進行する。」

プレストレストコンクリート部材中の PC 鋼材では、次に示すような要因によって応力腐食が発生する。

- 1 PC 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

PC 鋼材のうち、タイムテンパー線は、前項で述べたように金属の結晶組成は、大部分が層状パーライトを示すが、パテンチングがきつすぎると一部に粒状セメントイトも析出する。これは局部電池の形成とそれによる応力腐食を起させる要因となる。

コンクリートには、早期強度を増進させるために混和剤として塩化カルシウム (CaCl<sub>2</sub>) がよく用いられる。しかし、塩化カルシウムの添加量が増加すると、PC 鋼材の腐食に有害な影響を与えると言われる。

H. J. Godfrey は、タイムテンパー線 (ストレスリブ線) とオイルテンパー線の応力腐食の実験を行い、次のような結果を得た。<sup>18)</sup>引張強さの 60% で緊張した PC 鋼線を、硝酸アンモニウム (NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>) 40% を含む溶液中に、そのままの状態では硝酸 1% 当り、硝酸カルシウム

(CaNO<sub>3</sub>) 600% を浸せきしたところ、タイムテンパー線は、破断面近くに孔食だけが観察され、オイルテンパー線は、深く侵入したキレツがたくさん観察された。この事実から、H. J. Godfrey は、タイムテンパー線は、普通の腐食破壊をし、オイルテンパー線は、応力腐食破壊をしたと判定している。また彼は、コンクリート中の塩化カルシウムの影響も調べた。コンクリート配合は、単位セメント量 360Kg、水セメント比 0.44 である。塩化カルシウムの量は、セメント量の 2% (重量比) とした。材令 168 日目における角柱供試体 (5×5cm) の圧縮強度は、420 Kg/cm<sup>2</sup> であった。試験供試体は、プレテンション方式で製作し、供試体の寸法は、高さ 7.5cm、幅 7.5cm、長さ 1.2m である。断面部の図心位置には、直径 9mm の PC 鋼より線が配置され、6.3ton で緊張しコンクリートに応力を導入した。供試体は、亜硫酸ガス濃度を工場地帯と同じ状態にした実験室に 3 年間置かれた。その後 PC 鋼より線をコンクリート中から取り出し鋼材の物理試験を行った。表-3、はこの結果を示している。塩化カルシウムを混入した供試体の PC 鋼より線は、塩化カルシウムを混入しなかった供試体の PC 鋼より線より、引張強さで 5% 減少し、伸び量で 60% 減少した。

G. E. Monfore 等は、塩化カルシウムの混入と同じ程度の悪影響を与える要因として食塩 (NaCl) をあげている。<sup>19)</sup> 彼等は、供試体の寸法が、幅 3.1cm、高さ 5cm、長さ 40cm のモルタル供試体で実験を実施した。モルタルの水セメント比は 0.42、使用したセメントは、普通ポルトランドセメントである。PC 鋼線は、2本が断面中心からそれぞれ 7mm づつ離れた位置に配置されている。PC 鋼線の直径は、3.6mm である。セメントとの重量比で、塩化カルシウム 4% に相当する食塩を混入させた供試体と、塩化カルシウム 4% を混入させた供試体を作り、6カ月間湿った布をまきつけて養生を行った。その後 PC 鋼線を取り出して引張強さを調べたところ、塩化カルシウム 4% を含んだ供試体から取り出した PC 鋼線と同じ減少率を食塩を含んだ供試体も示したと報告している。

表-3 3年後のコンクリート供試体中の  
P C鋼材の引張試験

供試体 No	コンクリートのタイプ	破断強度 (Kg)	伸 び (%)
1-A-1	塩化カルシウム含まず	10,400	6.7
2-A-1	塩化カルシウム含まず	10,400	6.7
1-B-1	塩化カルシウム含む	9,600	2.6
2-B-1	塩化カルシウム含む	9,700	2.6

b) 事故例

カナダの Regina 市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>20)</sup> P C鋼材は、硬引鋼線(タイ  
ムテンパー線の低温熱処理を行わない鋼線)で、これらの  
P C鋼線の金属組成は、パーライト組織が十分でなくセメ  
ンタイトが析出していた。P C鋼線の破断は、このセメン  
タイトの部分に発生しており、破断していない部分は層状パ  
ーライトを示していた。彼は、この金属組織上の影響を、  
化学物質の影響と共に応力腐食に対する主要な要因である  
と述べている。G. E. Monfore 等によると、破壊した  
ヒューム管に使われたコンクリートには、強度増加の促進  
剤として塩化カルシウムが、1.5%~3% 含まれていたが、  
破壊しなかったヒューム管に使われたコンクリートには、  
これが使用されていなかったと報告している。<sup>19)</sup>

J. D. Gilchrist は、イギリスの Coventry 市で  
のプレストレスト構造物(構造物の名称は不明)の破壊に  
おいて使用された P C鋼線はオイルテンパー線であったと  
報告している。<sup>20)</sup> この P C鋼線の金属組成は、粒状セメン  
トであって、硝酸塩を含む溶液を用いた促進試験を行った  
ところ、ただちに応力腐食破壊を起したそうである。

c) 問題点

金属組成の点から言うと、粒状セメントを示すオイ  
ルテンパー線の使用は良くない。しかしこの P C鋼線はわ  
が国では市販されていない。タイムテンパー線であっても  
一部に粒状セメントが析出する場合がある。これは、  
低温熱処理がきつすぎた場合に起る。低温熱処理が完全で  
あればこれは防げる。

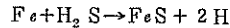
腐食を促進させる化学物質の点から言うと、塩化カルシ  
ウムの過大量の使用は、さけた方がよい。混和剤として市  
販されているものの中には、かなりの量の塩化カルシウム  
が含まれているものもある。

(4) 水素ゼイ化(hydrogen embrittlement)

a) 原因

この破壊は、鋼材を取り囲む環境中に硫化水素(H<sub>2</sub>S)  
の存在が必要条件となる。硫化水素は鋼材と化学反応をし、

その際水素を発生させる。



発生した水素は、原子状であり、これが鋼材の結晶中に浸  
透してゆく。格子間に入った原子状水素は、金属結晶中の  
格子欠陥部である空けき(void)やその他の有利な場所  
で分子状の水素となる。これに伴って大きな内部圧力が形  
成され、これによって粒内で割れを生じると言われている。  
<sup>16)</sup> 応力腐食による割れは、結晶と結晶の境界面で割れる  
「粒界割れ」であり、水素ゼイ化による割れは、結晶内で  
割れる「粒内割れ」である。

フェライト系の鋼は、マルテンサイト系の鋼より水素ゼ  
イ化に対する感受性が低いと言われている。<sup>16)</sup>

b) 事故例

W. Grundig は、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。<sup>21)</sup>  
ブラジルの Guiba 市では、デルタ地帯を通るプレストレ  
ストコンクリート橋梁を建設したが、橋梁の施工中硫化水  
素ガスが発生し、それによって P C鋼線の 98% が破断し  
たそうである。硫化水素ガスは、応力導入時にジャッキの  
すわりを良くする目的で使用した熔融イオウから発生した  
ものである。この硫化水素ガスが、P C鋼線と化合して水  
素ゼイ性破壊を起したのだと、W. Grundig は記述し  
ている。

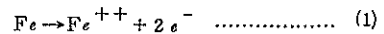
(5) 孔食(pitting)と全面腐食(general corrosion)

a) 原因

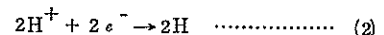
孔食及び全面腐食は、鋼材の表面が「さびる」という、  
電気化学的なプロセスによる。

H. H. Uhlig は、次のように述べている。<sup>16)</sup> かなる  
金属の表面も、数多くの電極から成り立っていると考えて  
よい。これらの電極は、その金属体自身を通じて電氣的に  
短絡されている。金属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、水または水溶液中に浸されると  
局部電池が活動可能となり、それに伴う化学反応によ  
って金属は腐食する。次のような化学反応を起す。(脚  
注参照)

アノードでは



カソードでは



コンクリート自体のpHは、コンクリート打設直後12.5~13.0である。これはセメントの水和によって生じた水酸化物(主として水酸化カルシウム:Ca(OH)<sub>2</sub>)によって強アルカリ性に保たれているからである。しかし、湿潤状態にある鉄筋コンクリート中に塩化カルシウム(CaCl<sub>2</sub>)や塩化ナトリウム(NaCl)が溶解していたり、また浸透して来たりすると、塩素イオンが強アルカリ性の中で不動化している鋼材の不動化を、妨げたり、破壊したりすると言われている。<sup>23)</sup>

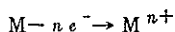
#### b) 事故例

D.Vandepitte は、デンマークのプレストレストコンクリート橋の劣化を報告している。<sup>24)</sup>この橋は、PC鋼材がコンクリート外部に配置されている、いわゆるアウトケーブル方式である。鉄道線路の上を横切って架設されていたため、下を通る蒸気機関車の蒸気エンジンから出る化学的に浸食作用のあるガスが、湿気と結びついてPC鋼材に孔食を発生させたと述べている。

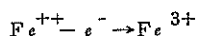
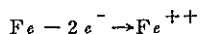
E.C.Roshore は、10年間海水の浸食作用を受けたプレテンション方式による供試体のPC鋼線の腐食について報告している。<sup>25) 26)</sup>供試体の寸法は、幅11cm、高さ23cm、長さ203cmである。PC鋼材としては、直径が6.3mmのPC鋼7本より線を9本使っている。コンクリート配合は、空気量4.5±0.5%、スランプ4.3cm、水セメント比0.52、単位セメント量334Kgである。セメントはⅢ型で、これはわが国の早強ポルトランドセメントに相当する。圧縮強度は、材令28日で42.2Kg/cm<sup>2</sup>であった。試験結果は、次の通りである。PC鋼より線の腐食の状態は孔食型で供試体の両端部は全面腐食へ移行していた。

#### 注)

アノードおよびカソードについて。<sup>22)</sup>電池で電流が液中に流出し、電子のたりなくなる極をアノード(anode)、逆に電流が液中から流入し、電子のあまる極をカソードとよぶ。アノードは陽極、カソードは陰極と訳される事もある。アノードは金属原子Mが、電子を失って腐食する場所で、一般に



と書き表わせるが、たとえば、



のような反応が起こり、これらはすべて酸化反応とよぶことができる。

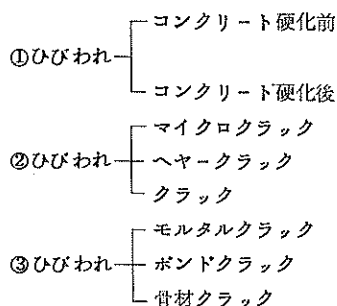
また7本より線の中で中心鋼線が他の6本の側線よりも一番腐食していた。7本より線の周囲は、セメントペーストでおおわれているが中心鋼線と側線との間の空けきにはセメントペーストが浸透できず、そのため中心鋼線と外側鋼線の接する環境が相違し、局部電池が形成され、中心鋼線が腐食したと考えられる。中心鋼線がアノード、側線がカソードである。E.C.Roshoreは、両端部にエポキシ樹脂を塗布したが、この補強が十分でないため両端部の腐食が激しかったのだと述べている。

### 3.2 ひびわれ(Crack)

#### (1) ひびわれの分類

コンクリート部材の耐久性を考える上で、ひびわれは重要で欠く事の出来ない要因の一つである。

ひびわれには、次のような分類法が考えられる。



①の分類法は、ひびわれの発生時期による分け方である。<sup>27)</sup>コンクリート硬化前のひびわれとは、コンクリートがまだプラスチックな時に発生するひびわれを言う。ひびわれの原因は単純なものではなく、多数の要因が重複して作用した時に発生するものと考えられ、その発生機構は明らかでない。発生原因は、配合、施工方法、施工場所および気象条件に関連があり、コンクリート打ち込み直後から凝結がはじまるまでの約2時間くらいの間には発生する事が多い。要因として、コンクリートのコンシステンシー、沈降温度、湿度、風、振動および衝撃などが考えられる。コンクリート硬化後のひびわれとは、荷重が作用した時の曲げひびわれなどと、温度変化や乾燥収縮を拘束した時に発生するひびわれなどが考えられる。

②の分類法は、上記の要因で発生したひびわれを、その幅で規定したものである。本文では、次のように定義する。マイクロクラックとは、クラック幅が極めて小さく熟練した観察者でさえ肉眼で発見する事の困難なひびわれの事を言う。熟練した観察者であれば、0.05mm幅程度のひびわれは、肉眼で見ることが出来る。マイクロクラック追求の手段は、通常顕微鏡を使用するが、この手段の他に、アセトンや四塩化炭素などの揮発性の薬品を使って調べる方法が



ある。ヘアクラックとは、可視クラックで0.05mm幅程度のもを言う。クラックは0.25mm幅以上のひびわれを言う。

③の分類法は、ブレンコンクリート中のひびわれを分類したものである。<sup>28)</sup>コンクリートを複合材料として次の3つの要素に分ける。それは、(1)モルタル、(2)骨材、(3)モルタルと骨材の接触面の3つである。モルタルクラックとは、(1)のモルタル中に発生するひびわれである。ボンドクラックとは、(3)のモルタルと骨材との接触面に発生するひびわれを言い、モルタルと骨材との付着面にそって現われるのでボンドクラックと言う。骨材クラックとは、(2)の骨材中に発生するひびわれの事を言う。T.C.Hsu等は、これらのひびわれについて次のように述べている。<sup>28)</sup>クラックは、荷重0の状態においてもすでに存在する。すなわちコンクリートのブリージングによって、骨材下面に形成されたモルタルと骨材の付着のない部分がこれに相当する。そのため、この境界面がコンクリートのよおな複合材料の一番の弱点となる。そして、彼等は、このひびわれは、荷重段階が0から破壊強度の30%位までは、長さも幅も増加しないが、30%を越えるとその幅と長さを増加しはじ

め、それと同時に応力・ひずみ曲線の直線性がなくなると述べている。またモルタルクラックについては、破壊強度の70~90%に達すると著しく増加しはじめ、ボンドクラックに接続し連続性のあるひびわれに発展してゆくと述べている。

(2) ひびわれ発生モーメントと設計荷重モーメント

プレストレストコンクリート部材は、設計荷重作用時には引張側コンクリートにひびわれが生じないように設計する。設計荷重時のモーメントとひびわれ発生時のモーメントを比較するため、長方形断面のプレストレストコンクリート部材の、曲げを受ける場合について計算を行い検討して見る。ひびわれ発生モーメントは、引張側のコンクリートの塑性変形を考慮する。<sup>29)</sup>

〔計算例〕

図-12は部材構造図を、図-13は載荷の状態を、表-4はコンクリートおよびPC鋼材の性質を示している。

図-13における中央点のモーメントは、次のようになる。

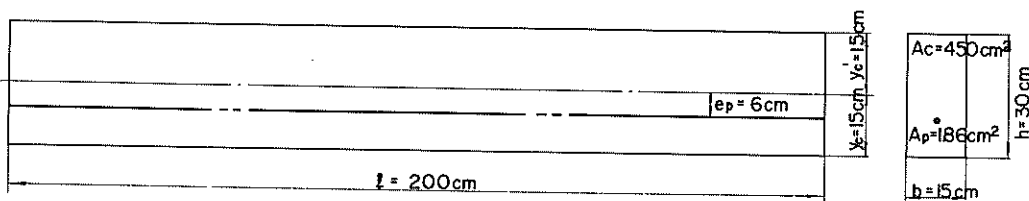


図-12 部材構造図

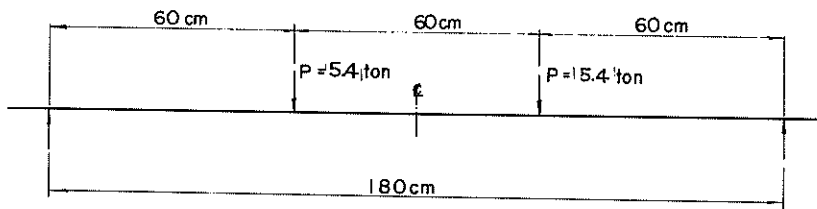


図-13 載荷状態図

表-4 コンクリートおよびPC鋼材の性質

$\sigma_c$	350 Kg/cm <sup>2</sup>	純引張強度 $\sigma_{tu} = 7.8 + 0.06 \sigma_c$
$\sigma_{tu}$	28 Kg/cm <sup>2</sup>	
$\sigma_b$	45 Kg/cm <sup>2</sup>	
$E_c$	325,000 Kg/cm <sup>2</sup>	$n = 6.15$
$E_p$	2,000,000 Kg/cm <sup>2</sup>	

$$M_g = \frac{P\ell}{3} = 324,000 \text{ Kg} \cdot \text{cm}$$

部材断面の諸係数は、次のようになる。

$$I_c = 33,750 \text{ cm}^4 \quad Z_c = 2,250 \text{ cm}^3$$

$$r_c = 8.7 \text{ cm}$$

$$I_e = 34,153 \text{ cm}^4 \quad Z_e = 2,292 \text{ cm}^3$$

設計荷重時のモーメント最大位置の下縁の応力が0となるようにプレストレスを算定する。

$$\sigma_c = \frac{P_e}{A_c} \left( 1 + \frac{e_p \times y_c}{r_c^2} \right) - \frac{M_g}{Z_e} = 0$$

ゆえに

$$P_e = \frac{M_g \times A_c}{Z_e \times \left( 1 + \frac{e_p \times y_c}{r_c^2} \right)} = 29,000 \text{ Kg}$$

ここで

$\sigma_c$  = コンクリート下縁の応力

$P_e$  = 有効プレストレス力

$A_c$  = コンクリート断面積

$e_p$  = 断面図心とP C鋼材中心との偏心量

$y_c$  = 断面図心からコンクリート下縁までの距離

$$r_c^2 = I_c / A_c$$

$M_g$  = 設計荷重時の部材中央のモーメント

$$Z_e = I_e / y_c$$

設計荷重が載荷されていない状態での、プレストレスコンクリート部材中の応力を計算する。ただし自重を無視する。

$$\sigma_{ct}' = \frac{P_e}{A_c} \left( 1 - \frac{e_p \times y_c'}{r_c^2} \right) = -2 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\sigma_{ct} = \frac{P_e}{A_c} \left( 1 + \frac{e_p \times y_c}{r_c^2} \right) = 14.1 \text{ Kg/cm}^2$$

ここで

$\sigma_{ct}'$  = コンクリート上縁の応力

$\sigma_{ct}$  = コンクリート下縁の応力

次にクラック発生モーメントを計算する。プレストレスコンクリート部材は、曲げモーメントによるひびわれを発生する前に引張側コンクリートが塑性変形を起す。これによって見かけの曲げ強度が増大する。この影響を考慮してクラック発生モーメントを計算する。<sup>29)</sup>

クラック発生時の断面のつりあいは、図-14に示す状態と考える。

P C鋼材とコンクリートの間に付着があるものとし、図-14の記号を用いて、

(I) 圧縮側の方は

$$C = \frac{(\sigma_c + \sigma_{tu}) \times \mu \times h}{2} \times b$$

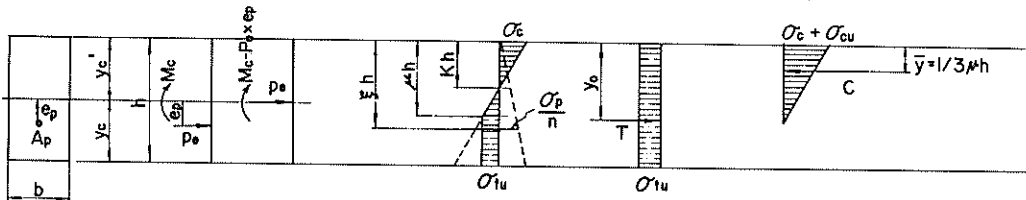


図-14 クラック発生時の断面のつりあい

ここで

$$\sigma_c = \frac{K}{\mu - K} \sigma_{tu}$$

ゆえに

$$C = \frac{\mu^2}{2(\mu - K)} b h \sigma_{tu}$$

(II) 引張側は

$$T = b h \sigma_{tu} + A_p \times \sigma_p$$

ここで  $\sigma_p$  は荷重によるP C鋼材の引張応力

①コンクリートに有効プレストレスを与える事により

P C鋼材中には

$$n \frac{P_e}{A_c} \left( 1 + \frac{e_p^2}{r_c^2} \right) \text{ の引張応力が作用する。}$$

②その後の荷重増加によって、 $n\sigma_s$ の引張応力が作用する。

$$\sigma_s = \frac{\xi - K}{\mu - K} \sigma_{tu}$$

ゆえに

$$\sigma_p = \text{①} + \text{②} = n \frac{P_e}{A_c} \left( 1 + \frac{e_p^2}{r_c^2} \right) + n \frac{\xi - K}{\mu - K} \sigma_{tu}$$

つり合いの条件は

$$C = P_e + T$$

ゆえに

$$\frac{\mu^2}{2(\mu-K)} bh\sigma_{tu} = bh\sigma_{tu} + Ap \left\{ n \frac{Pe}{Ac} \left( 1 + \frac{ep^2}{rc^2} \right) + n \frac{\xi - K}{\mu - K} \sigma_{tu} \right\}$$

ここで

$$p = \frac{Ap}{Ac}, n = \frac{Ep}{Ec}, \sigma_{cg} = \frac{Pe}{Ac}$$

上式をKで整理すると

$$K = \frac{np\xi + 2 \left( 1 + \frac{\sigma_{cg}}{\sigma_{tu}} \left\{ 1 + np \left( 1 + \frac{ep^2}{rc^2} \right) \right\} \right) \mu - \mu^2}{np + 2 \left( 1 + \frac{\sigma_{cg}}{\sigma_{tu}} \left\{ 1 + np \left( 1 + \frac{ep^2}{rc^2} \right) \right\} \right)}$$

上面から全引張力Tの作用点までの距離 $y_o$ は、 $bh\sigma_{tu}$ と、 $Ap \sigma_p$ の力の合力を求めればよいから、

$$y_o = \frac{1}{2} \times \frac{1 + 2np\xi \left\{ \frac{\xi - K}{\mu - K} + \frac{\sigma_{cg}}{\sigma_{tu}} \left( 1 + \frac{ep^2}{rc^2} \right) \right\}}{1 + np \left\{ \frac{\xi - K}{\mu - K} + \frac{\sigma_{cg}}{\sigma_{tu}} \left( 1 + \frac{ep^2}{rc^2} \right) \right\}} \times h = \zeta h$$

ひびわれが発生する時のモーメントは、

$$M_c - P_e \times e_p = C \left( y_o - \frac{1}{3} \mu h \right) = \frac{\mu^2}{2(\mu-K)} \times \left( \zeta - \frac{\mu}{3} \right) bh^2 \sigma_{tu}$$

見かけの曲げ強度 $\sigma_{bu}$ は換算断面を用いて求める。

$$\begin{aligned} \sigma_{bu} &= \frac{M_c - P_e \times e_p}{Z_e} - \sigma_{cg} = \frac{M_c - P_e \times e_p}{\alpha Z_c} - \sigma_{cg} \\ &= \frac{\mu^2}{\alpha(\mu-K)} (3\zeta - \mu) \sigma_{tu} - \sigma_{cg} \end{aligned}$$

ここで

$$\alpha = \frac{y_c}{y_e} \left\{ 1 + \frac{Ac(y_e' - y_c')^2 + nAp(e_p - y_e' + y_c')^2}{I_c} \right\}$$

したがってひびわれ発生モーメントは

$$M_c = (\sigma_{ce} + \sigma_{bu}) \times Z_e$$

となる。

(実際の計算)

$$p = \frac{Ap}{bh} = \frac{1.86}{15 \times 30} = 0.0041$$

$$np = 6.15 \times 0.0041 = 0.0252$$

$$\xi = \frac{d}{h} = \frac{21}{30} = 0.70$$

$$np\xi = 0.0252 \times 0.70 = 0.0176$$

$$rc^2 = 8.7^2 = 75.7$$

$$\frac{ep^2}{rc^2} = \frac{6^2}{75.7} = 0.476$$

$$1 + np \left( 1 + \frac{ep^2}{rc^2} \right) = 1 + 0.0252 \times 1.476$$

$$= 1.0372$$

$$\sigma_{cg} = \frac{Pe}{Ac} = \frac{29,000}{450} = 64.4$$

$$\frac{\sigma_{cg}}{\sigma_{tu}} = \frac{64.4}{28} = 2.29 \quad \mu = 0.70$$

$$K = \frac{np\xi + 2 \left( 1 + \frac{\sigma_{cg}}{\sigma_{tu}} \left\{ 1 + np \left( 1 + \frac{ep^2}{rc^2} \right) \right\} \right) \mu - \mu^2}{np + 2 \left( 1 + \frac{\sigma_{cg}}{\sigma_{tu}} \left\{ 1 + np \left( 1 + \frac{ep^2}{rc^2} \right) \right\} \right)}$$

$$= \frac{0.0176 + 2 \left( 1 + 2.29 \times 1.0372 \right) \times 0.70 - 0.70^2}{0.0252 + 2 \left( 1 + 2.29 \times 1.0372 \right)} = 0.63$$

$$\frac{\xi - K}{\mu - K} = \frac{0.70 - 0.63}{0.70 - 0.63} = 1.00$$

$$y_o = \frac{1}{2} \times \frac{1 + 2np\xi \left\{ \frac{\xi - K}{\mu - K} + \frac{\sigma_{cg}}{\sigma_{tu}} \left( 1 + \frac{ep^2}{rc^2} \right) \right\}}{1 + np \left\{ \frac{\xi - K}{\mu - K} + \frac{\sigma_{cg}}{\sigma_{tu}} \left( 1 + \frac{ep^2}{rc^2} \right) \right\}} \times h$$

$$= \frac{1}{2} \times \frac{1 + 2 \times 0.0176 \left( 1.00 + 2.29 \times 1.476 \right)}{1 + 0.0252 \left( 1.00 + 2.29 \times 1.476 \right)} \times 30$$

$$= 15.6 \text{ cm}$$

$$\zeta = \frac{y_o}{h} = \frac{15.6}{30} = 0.52$$

$$\alpha = \frac{y_c}{y_e} \times \left\{ 1 + \frac{Ac(y_e' - y_c')^2 + nAp(e_p - y_e' + y_c')^2}{I_c} \right\}$$

$$= \frac{15}{14.9} \times \left( 1 + \frac{450 \times 0.1^2 + 6.15 \times 1.86 \times 5.9^2}{33,750} \right) = 1.02$$

$$\sigma_{bu} = \frac{\mu^2}{\alpha(\mu-K)} \times (3\zeta - \mu) \times \sigma_{tu} - \sigma_{cg}$$

$$= \frac{0.70^2}{1.02(0.70 - 0.63)} \times (3 \times 0.52 - 0.70) \times 28 - 64.4$$

$$= 101 \text{ Kg/cm}^2$$

$$M_c = (141 + 101) \times 2,292 = 555,000 \text{ Kg} \cdot \text{cm}$$

$$\frac{M_c}{M_e} = \frac{555,000}{324,000} = 1.71$$

ひびわれ発生モーメント ( $M_e$ )と設計荷重モーメント ( $M_d$ )との比は 1.7 1 である。またこの曲げモーメントとなる荷重は、9.3 ton である。すなわち設計荷重の 1.7 1 倍までの過大荷重に対して、ひびわれが発生しない事になる。

### (3) ひびわれからの腐食物質の浸入

前章において、一例としてひびわれ発生荷重は、設計荷重に対して約 1.7 倍であると述べたが、海洋環境下では、波力などによる予想し難い外力が構造物に作用し、その外力の大きさは設計時に想定した外力を上回ることも考えられる。このため部材には、ひびわれが発生する事も十分考えられる。そして、部材に発生したひびわれは、たとえ、ひびわれ幅が小さくても毛細管現象によって、ひびわれを通して鋼材の腐食に有害な物質を浸透させれば、プレストレストコンクリート部材の耐久性をそこなうことになる。

P.W. Abeles 等は、プレストレストコンクリート部材にひびわれを発生させて、その部材を工業地帯の大気中と同じ状態にした気体中にさらし、その影響を調べた。<sup>30)</sup> 彼等は、このひびわれは四塩化炭素をふきつけて見なければわからないと述べているので、本文の定義では、マイクロクラックに相当すると考えられる。図-15 は、供試体の断面図である。この供試体の長さは約 4 m、支点間距離は

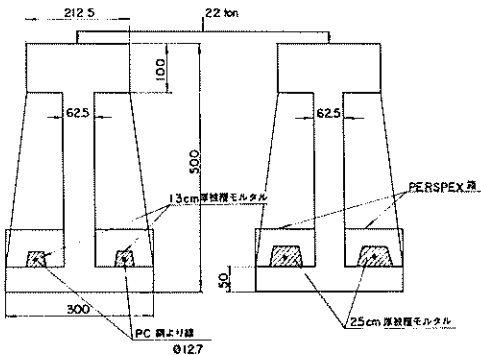


図-15 供試体断面図

3.6 m、荷重点間距離は 1.2 m の 3 分の 1 点荷重である。図-15 のハッチで示した部分が試験区域で、この区間を特別製の箱 (Perspex 箱) で密閉し、その中に亜硫酸ガスを満たした。試験区域はモルタル製で、この被覆モルタル中の PC 鋼材のかぶり厚は、1.3 cm と 1.5 cm である。この供試体を載荷して図-16 に示すような応力状態にして、試験区間にマイクロクラックを発生させた。こうする事により、亜硫酸ガスは、ひびわれ中に浸透し湿気と化合して硫酸となると考えたわけである。3 箇月後に観察を行った。結果はひびわれ面から深さ 0.8 cm の所までは、コンクリー

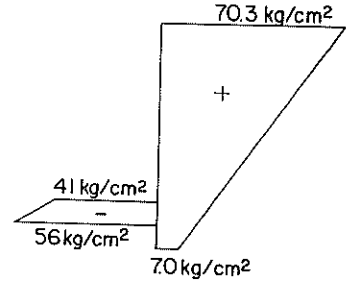


図-16 応力状態図

トが影響をうけていたが、PC 鋼材には腐食が現われなかったと述べている。この事から彼等は、肉眼で認められないようなひびわれ (マイクロクラック) は、毛細管現象を起こさないで、このひびわれからの PC 鋼材の腐食の危険性は少ないと述べている。

しかし、この実験は、亜硫酸ガスを含んだ大気中にさらしたものであり、これを海水中に浸水させた場合はかなり違って来ると考えられる。また 3 箇月間という期間で議論を進めているが、長期にわたる部材の耐海水性を検討するに際しては、この試験期間で判定を下すには、短かすぎるのではないだろうか。

E.C. Roshore も、ひびわれを入れたプレストレストコンクリート桁の耐海水性について報告しているが、このひびわれは本文の定義では、ヘアークラックに相当するものと考えられる。<sup>31)</sup>

試験供試体は、幅 1.4 cm、高さ 2.3 cm、長さ 20.6 cm の長方形断面桁である。図-17 に示すようにこの試験供

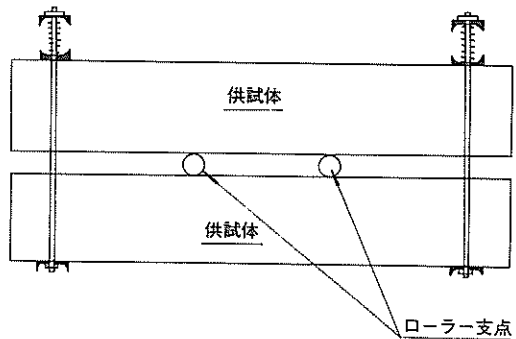


図-17 コンクリート供試体の載荷方法

試体 2 本を 1 組として、3 分の 1 点荷重で曲げモーメントを加えた。

使用した骨材の最大寸法は、1.9 mm であり、コンクリート配合は、空気量  $4.5 \pm 0.5 \%$ 、スランプ  $4.4 \pm 1.3 \text{ cm}$ 、水セメント比 0.52、単位セメント量  $330 \text{ Kg}$  である。材令 28 日でのコンクリート平均圧縮強度は、 $42.3 \text{ Kg/cm}^2$  で

あった。PC鋼材としては、直径6.3mmの7本より線を9本使用した。有効プレストレス量は、計算上上縁で-13 Kg/cm<sup>2</sup>、下縁で16.9 Kg/cm<sup>2</sup> となった。PC鋼材の最小かぶり厚は3.8 cmである。載荷荷重による曲げ応力は、下縁で有効プレストレス量の1.89倍となるようにした。この値は、前項の「ひびわれ発生モーメントと設計荷重モーメント」の計算からも分かるように、ひびわれ発生荷重（プレストレスの1.71倍）を大きく越えている。このため、下縁に可視クラックが発生したわけである。ひびわれ幅は、文献に記載されておらず不明である。

試験供試体は、1959年10月Florida州のSt. Augustineの暴露試験場に放置された。この暴露試験場は、一年中温暖な気候状態にある。5回目の冬を越した1964年7月の第1回目の報告では観察結果は、「良好」であった。1971年の第3回目の報告では、1968年の荷重調整期間中にこの試験桁が破壊したと報告している。これは9回目の冬を越した後の事で、破壊部のPC鋼線は全面腐食によって破断していた。<sup>31)</sup>

表-5 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

これは、プレストレスコンクリート部材にかぎった事柄ではなく、あらゆるコンクリート構造物の問題点でもある。

(1) 塩分浸透(塩素イオン、Cl<sup>-</sup>)

B. Ost等は、コンクリート中への塩化物(塩化カルシウム、CaCl<sub>2</sub>)の浸透の試験を実験室内で行った。<sup>32)</sup> 直径5 cm、高さ10 cmの円柱供試体を作り、1年間塩化カルシウム溶液(2%と8%)につけた。

供試体は、コンクリートとペーストの2種類を製作した。セメントはIA型で、これは、わが国の普通ポルトランドセメントにAE剤を混入した物に相当する。コンクリート配合は、単位セメント量390Kg、306Kg、223Kg、水セメント比0.42、0.51、0.69の3種類とした。コンクリートの場合、スランプはそれぞれ、5.6cm、10.2cm、11.2cm、空気量は、7%、10%、11%である。供試体は材令28日まで、23℃の湿潤養生を行い、その後浸透量試験を行った。塩分量の測定は、電位滴定法によって行った。

実際の構造物では、フルプレストで設計したものも、パースタルストレスで設計したものも、ひびわれが入るような過大荷重が持続してかかる事は無い。しかし、ある短い時間に過大荷重がかかり、それによってひびわれが発生し、その後荷重が除かれ、ひびわれが閉じるという現象は考えられる。E.C. Roshoreの実験では、可視クラックが耐海水性を低下させる事は判ったが、閉じたひびわれに対する実験は行っていない。この点は問題として残って来る点である。

3.3 コンクリートからの腐食物質の浸透

ある状況下では、周囲の環境から塩化物がコンクリート中に浸透する。たとえば、寒い地方のコンクリート橋の床版は、冬期になると氷結防止の目的から塩化カルシウムをまく。これが雪解期になると、水溶液となってコンクリート中に浸透するわけである。また、海水中や海上の構造物では海水の化学組成が表-5に示したような構成となっているため、NaCl、MgCl<sub>2</sub>、MgSO<sub>4</sub>、などの塩化物の浸食を受ける。

結果を図-18、図-19に示す。図-18は、塩化カルシウム溶液が2%、図-19は8%のものである。図は、縦軸がセメント量に対する塩化カルシウムの重量比、横軸は、水セメント比が示してある。パラメーターは、コンクリート表面からの深さであり、それぞれ0.7cm、1.3cm、2.5cm、5.0cmである。

セメントペーストとコンクリートを比較すると、塩化物の浸透は、セメントペーストよりコンクリートの方が大きい。コンクリート中の骨材と、モルタルの付着面での欠陥部、たとえば、ブリージングによってできる欠陥が、主な原因となっているものと考えられる。塩化物の浸透は、水セメントに大きく依存している事が分かる。たとえば、12箇月間2%の塩化カルシウム溶液につけた後の供試体では、表面より5cmの箇所の塩化カルシウムの量は、水セメント比が0.62では4.4%、0.46では0.6%、0.39では0.0%であり、8%溶液では、水セメント比が0.62では5.2%、0.46では1.4%、0.39では0.1%である。

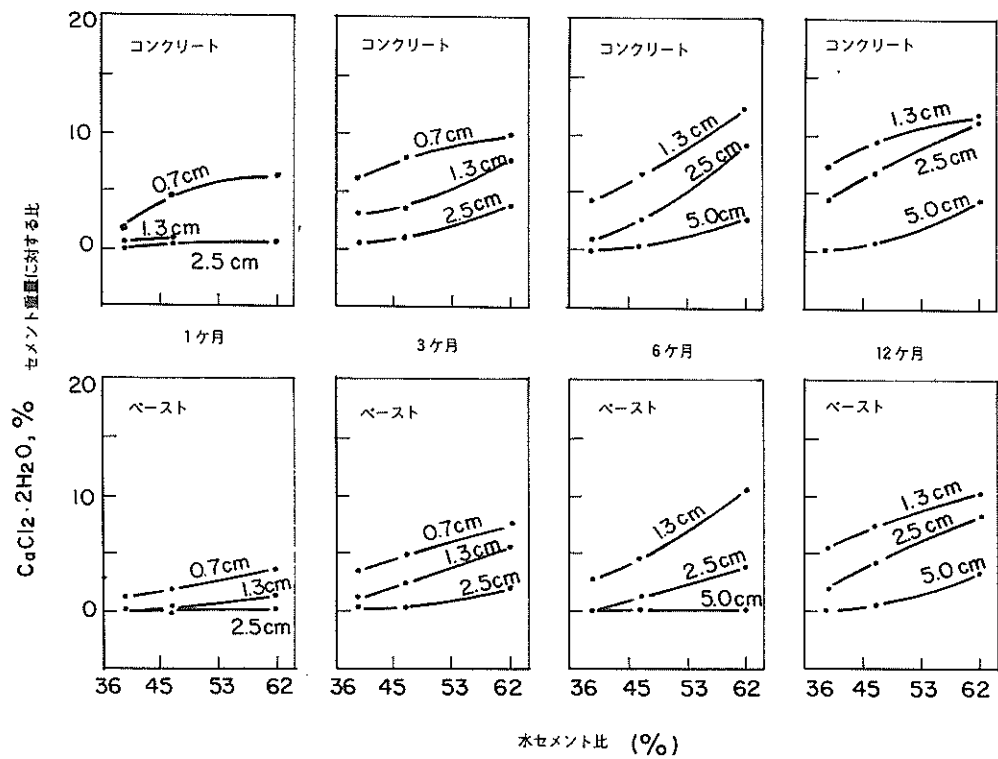


図-18 塩素イオンの浸透図 (塩化カルシウム 2%)

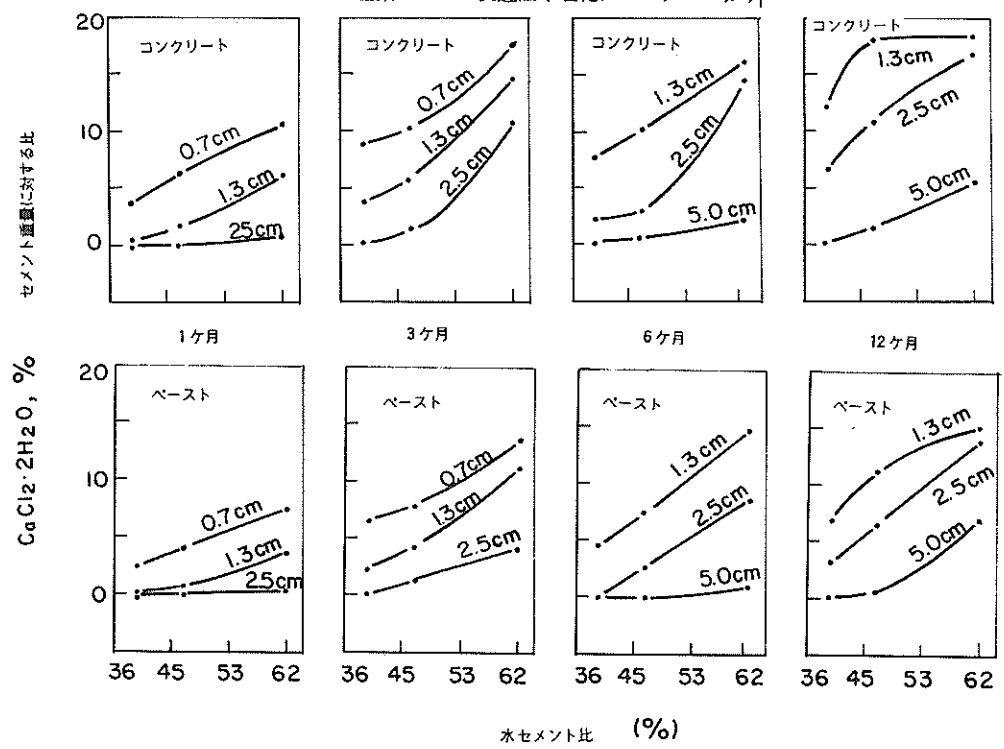


図-19 塩素イオンの浸透図 (塩化カルシウム 8%)

結論としては、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と述べている。

E.C.Roshore も野外暴露試験に使用した試験桁の

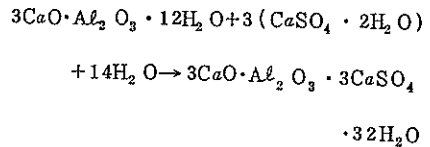
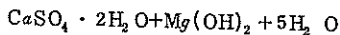
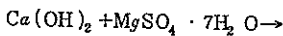
塩化カルシウムの浸透量の測定を行った。<sup>31)</sup> 測定法は、B. Os t等の方法と同じ電位滴定法である。表-6は、その結果を示している。

表-6 コンクリート中の塩化物の量

桁	資料番号	桁の表面からの深さ (cm)	桁端からの距離 (cm)		塩化物量 (%)	
			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	4	1.3	181	21	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	102	1.3	68	135	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
	202	1.3	29	174	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	4	1.3	184	18	0.29	1.76
	3	2.5			0.25	1.53
	2	5.0			0.24	1.49
	1	5.7	146	57	0.25	1.53
	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			

(2) その他の物質の浸透

W. Czerninは、<sup>33)</sup>「セメント硬化体に対する化学的浸食の可能性は溶解や浸出の分野に限られるのではなく、むしろそのほかに浸食物質とセメント硬化体との化学変化によって、溶けがたいが、コンクリートを膨張し、崩壊に至らしむる生成物を生むところにも危険な要素が含まれている。」と述べ、そこで硫酸塩の浸食作用をあげている。硫酸マグネシウムは、海水中に0.2%含まれている(表-5参照)。この硫酸マグネシウムは、コンクリート中のCa(OH)<sub>2</sub>と化合してセッコウ(CaSO<sub>4</sub>)を作る。このセッコウは、セメントの水和生成物であるアルミン酸3石灰と化合し、カルシウムサルホアルミネートを作る。これは、エトリンガイトと呼ばれる結晶で、コンクリートを膨張させ、コンクリートの組織をルーズにさせる性質をもっている。化学反応式を次に示す。



3.4 製作工法の問題

プレストレストコンクリート部材の製作工法には、(1)プレテンション方式、(2)ポストテンション方式、の2つの工法がある。

プレテンション方式は、コンクリート打設前にPC鋼材を緊張しておく方式である。このため、PC鋼材をあらかじめ定着しておくためのアバットが必要であり、このことから、工場製作の方式として向いている。工場製品は、品質管理が確実に行えるので、「1. まえがき」で記述した、耐久性に与えるコンクリート部材自身に存在する要因のうち、かなりの項目を取り除く事ができる。これは厳しい海洋環境にあって有利な点となる。

ポストテンション方式は、コンクリート硬化後にPC鋼

線を緊張し応力を導入する方式で、これはプレテンション方式で作ったプレストレストコンクリート部材を、海洋構造物として作り上げるための結合材料としての利用法がある。

それぞれの工法の問題を探ってみる。

(1) プレテンション方式

a) かぶり

コンクリート部材にあって、かぶりとひびわれの分散の関係は、切り離して考える事の出来ない問題である。一般に、かぶりが小さければ、ひびわれは分散され、ひびわれ幅は小さくなる。従って、腐食に対する抵抗力を増加させる。しかし、かぶりが小さいと、3.3で述べたように、コンクリート表面からの塩分浸透による鋼材の腐食の問題が重要となる。このため、構造物の耐用年数も含めてどの程度のかぶりが最適であるか調べる必要がある。

(2) ポストテンション方式

a) 定着方法

定着体の防護が不十分であると、定着体が腐食する。定着体の腐食は、PC鋼材の腐食をうながし、プレストレストコンクリート部材の耐力を減少させる原因となる。E. C. Roshore は、定着体の防護に関する種々の実験を行った。<sup>34)</sup> その中で彼は、コンクリート部材端部に定着体を埋込みPC鋼材を定着させる内部定着方式が、跡うめが少なくすむし、定着体の腐食を防止する最も適切な方式である、との結論を下した。しかし、この方式は、定着体がコンクリート部材端より内側に入っているため、応力導入やグラウトなどの施工面に多少の難かしさが問題として残る。施工上から言うと、外部定着方式が良い。このため、外部定着方式でも、定着体の腐食を防止する方式が無いかが検討して見る必要がある。

b) 接合面

部材間の接合面は、PC鋼材で結合させていても、接合面を無処理のままの突合わせの状態にしておけば、あらかじめ発生させてあるひびわれのようなものである。また、構造物を作った場合、この面より海水が漏れる事は避けな

ければならないし、また、荷重伝達能力が低下しないようにしなければならない。そのためにも、この接合面の処理は、確実に行わなければならない。

従来、プレストレスト橋梁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。プレストレスト技術協会のPCブロック工法委員会ではエポキシ樹脂による接着剤の品質規格案を示している。<sup>35)</sup> それによると、接着剤の曲げ引張強度は、材令7日で100Kg/cm<sup>2</sup>以上、圧縮強度は、材令7日で500Kg/cm<sup>2</sup>以上、引張強度は、材令7日で100Kg/cm<sup>2</sup>以上になるように規定している。すなわち、接着剤の強度特性としてコンクリート強度と同等かそれ以上を要求している。また透水性に、関して規格は、コンクリートと同等以下になるようにと規定している。また、地下埋設物であるボックスカルバートの目地部処理では、セメントモルタルを充てんする方法も行われている。この方法は、エポキシ樹脂を接合面にぬる方法よりも簡単である。しかし、これらの方法が海洋構造物においても適用できるのか検討する必要がある。

4. 各国における耐久性に関する規準

(1) 日本

わが国のコンクリート構造物に対する規格は、土木の分野については、「コンクリート標準示方書」、「プレストレストコンクリート標準示方書(案)」などがある。「コンクリート標準示書」では、29章に海洋コンクリートに関する章を設けている。<sup>3)</sup> 耐海水性に関する記述を次に示す。

a) 材料について

鉄筋コンクリート構造物では、海水の使用を禁じている(75条)。混和剤については、塩化物に関する規定はない(233条)。

b) コンクリート配合について

耐久性を考慮した水セメント比を表-7に示す(234条)。

表-7 耐久性から定まるAEコンクリートの最大の水セメント比(%)

構造物の 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) 潮風をうける部分 波しぶきをうける部分		50	55	55	50	60	65
(b) 潮の干満作用をうける部分 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



c) 設計について  
海水の作用を受ける構造物のかぶりを表-8に示す。

「プレストレストコンクリート標準示方書(案)」では、耐海水性に関する記述は次の通りである。

表-8 海洋構造物のコンクリートの最小かぶり (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うける部分	7
(b) 上記以外の部分	5

a) 材料について

練りませ水に、海水の使用を禁止している(第6条・(2))  
混和剤は、塩化カルシウムまたは塩化カルシウムを多量に含むものは、それがPC鋼材に接触するおそれがある場合には用いてはならない、と規定している(第10条・(3)・(iii))。

b) コンクリート配合について

「コンクリートの配合は、所要の品質および作業に適するワーカビリティをもつ範囲内で、単位水量をできるだけ少なくするように、試験でこれを定めなければならない」と規定している(第51条)。そして、耐久性から必要とされる水セメント比については、無筋ならびに鉄筋コンクリート標準示方書を参考とするのがよいと述べている。また、設計基準強度が、 $400\text{Kg}/\text{cm}^2$ のコンクリートにおける単位セメント量は、一般に $370\sim 430\text{Kg}$ の範囲とするのが適当であると述べている。

c) 設計について

最小かぶりは、プレテンション部材では、表-9に示す

表-9 鋼材の最小かぶり

	スラブ	はり	柱
風雨にさらされない場合	1.0cm	1.5cm	2.0cm
寸法が大きく重要な構造物または風雨にさらされるもの	2.0cm	2.5cm	3.0cm
ばい煙、酸、油、塩類等の有害な化学作用をうけるおそれのある部分を有効な保護層で保護しない場合	3.0cm	3.5cm	4.0cm

値となっている(第123条・(2))。鉄筋の最小かぶりも、この表の値を使う。ポストテンション部材では、4cmか、または、シースの直径を0.5倍した値の大きい方としている(第124条・(2))。

(2) ヨーロッパ (i)

ヨーロッパコンクリート委員会(Comite Europeen du Beton; 略称CEB)と国際プレストレストコンクリート連盟(Federation Internationale de la Precontrainte; 略称FIP)が協力してCEB-FIP合同委員会を作り、1970年にコンクリート構造物の設計施工指針を公表した。<sup>36)</sup>「コンクリート構造物設計施工国際指針」(Recommandations internationales pour le calcul et l'exécution des ouvrages en béton)に述べられている耐海水性に関する記述は次の通りである。

a) 材料について

混和剤に関して、次のよおに規定している。「プレストレスを与えた構造物では、混和材(剤)に含まれる塩化物、硫化物および硫酸塩の量は厳重に制限しなければならない。さらに、注入グラウトおよびプレテンション構造物のコンクリートには硝酸塩および塩化物を用いてはならない。(R73・24)」と規定している。

a) コンクリート配合について

「使用するコンクリートの配合は、実際のコンクリート打ちの条件(鉄筋の配置、締め固めの方法、など)にできるだけ近い条件で試験により実験的に定め、次の事項を確かめなければならない。

必要な機械的強度

使用条件および環境条件に対して構造物が耐久性を維持するのに必要な十分な均等性と密度、および適切なかぶり量、鉄筋の適切な防護。(R73・1)」

と規定している。

c) 設計について

鉄筋の最小かぶりは、表-10に示す値以上と規定している(R51・31)。さらに、次のように規定している。「海岸にあるか、あるいは著しく浸食性の環境にある構造物、および化学作用、あるいはすりへり作用に対して抵抗性のあることが必要な部材の場合には、鉄筋のかぶりは設

表-10 鉄筋の最小かぶり

コンクリートの仕上面からの最小間隔	絶 対 最 小 値	最大径の 鉄筋直径 との比	骨材の最 大寸法と の比
安定した非侵食性の大気中の屋内構造物	1 cm	1	1
結露、または非侵食性の水に常に接している屋内構造物 雨または飽和された状態の霜に対して保護されている 屋外構造物 非侵食性の土中に埋め込まれた構造物	2 cm	2	1
侵食性の煙またはガスにさらされる屋内構造物 きびしい大気の影響(激しい降雨、湿乾の変動、水に 飽和された状態の霜)にさらされる屋外構造物 きびしい霜および除氷塩の作用にさらされる構造物 (後者の場合にはA Eコンクリートにしなければならない)	3 cm	1.25	1.5

表-11 PC鋼材の最小かぶり

ポストテンション 方式	(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	鉄筋の最小かぶりに同じ

計者が別に規定しなければならない。」

PC鋼材の最小かぶりは、表-11に示す値以上と規定している(R52・31)。ただし、この値は構造物がわずかに侵食性の大気中にあるという前提のもとに定められたものである。環境条件が、これより厳しい場合には、鉄筋のかぶりにおけると同様にPC鋼材の最小かぶりを、増さなければならないとしている。

(3) ヨーロッパ (a)

FIPは、1973年に「海洋コンクリート構造物の設計に関する指針」(Recommendation for the design of concrete sea structures)を公表した。<sup>37)</sup>

1972年、ソ連のTbilisiでFIPは、海洋コンクリート構造物に関するシンポジウムを開催した。このシンポジウム開催にFIPの関係者は、近年急速に発展して来た海洋構造物の分野にコンクリート構造物が、大きな位置をしめるであろうことを予想して、海洋コンクリート構造

物に関する委員会を設置する事を決議した。そして、委員会は、1974年5月にニュー・ヨークで開かれる第7回FIP総会で報告書を発表する事にした。委員会は3つの部会に別れている。すなわち、設計部会、材料部会、および施工法部会である。この指針は、設計部会および材料部会の報告をまとめたものである。施工法部会は、ノルウェー領北海で建設されたEkofisk油田の海洋貯油タンクの結果などを取りまとめている。

この指針では、耐海水性に関して次のように記述している。

a) 材料について

セメントは規格に適合したポルトランドセメントの使用を認めている。そしてアルミン酸3石灰(C<sub>3</sub>A)が、8%以下のポルトランドセメントが耐海水性に関して良い結果を与えていると報告している(R4・1・1)。

混和剤では、塩化カルシウムの使用を禁じている(R4・1・4)。

b) 配合について

単位セメント量は、感潮部に浸せきする構造物に対して最小量を400Kgとし、暴露部および海水部については、粗骨材の最大寸法が40mmの場合、最小量を320Kg、粗骨材の最大寸法が20mmの場合、最小量を360Kgとしている。また、550Kg以上のセメントを使用したコンクリートは、乾燥収縮によるひびわれの発生率が增大するので締め固めや養生などに特別な配慮を行わなければ使用すべきでないとしている。(R4・2・4)。

水セメント比は、0.45以下と規定している。望ましい水セメント比は0.40位であると述べている。(R4・2・5)。

c) 設計について

最小かぶりを表-12に示すように規定している。ただし、ポリマーを含浸させたコンクリートおよびコーティン

表-12 鋼材の最小かぶり

	鉄筋	P C 鋼材
感潮部・暴露部	7.5 cm	10.0 cm
海水部	6.5 cm	7.5 cm

グさせたコンクリートを使用する場合は、技術者の判断によって、このかぶり厚さを低減させてよいと規定している(R4・2・10)。

(4) アメリカ

アメリカコンクリート学会(American Concrete Institute; 略称ACI)のACI201委員会(供用中のコンクリート部材の耐久性に関する委員会)は、1962年に「供用中のコンクリート部材の耐久性(Durability of concrete in service)」と題し

表-13 コンクリートの水セメント比

構造形式	暴露状態					
	温度変化の激しい所又は凍結融解作用を受ける所			おだやかな気候の所		
	空气中	水際部及び感潮部		空气中	水際部及び感潮部	
		水	海水及び硫酸塩の含まれる水と土 <sup>⊙</sup>		水	海水及び硫酸塩の含まれる水と土 <sup>⊙</sup>
薄内部材、欄干、ふち石、RCパイプ、パイプ、及びかぶりが2.5cm以下のもの	0.49	0.45	0.40	0.53	0.49	0.40
普通の部材桁、ガーダー、柱	0.53	0.49	0.45	※	0.53	0.45
マスコンクリート	0.58	0.49	0.45	※	0.53	0.45
プレバックドコンクリート	-	0.45	0.45	-	0.45	0.45
スラブ(地上に接している)	0.53	-	-	※	-	-
風雪にさらされるコンクリート、ビルディング地中構造部	※	-	-	※	-	-

※ 水セメント比は必要なコンクリートの強度及びワーカビリティを基にして決める。

⊙ 0.2%以上の硫酸塩を含む土及び地下水。

た報告書を発表した。<sup>38)</sup> その中で水セメント比に関して表-14に示すように規定している。表-13に示すように規定している。また、空気量に関し

表-14 コンクリート中の空気量

最大粒形骨材 mm	空気量 %	
	平均設計値	最小値
13	8	7
19	7	6
25	6	5
38	5.5	4.5
50	5	4
75	4.5	3.5
150	4	3

ACI 318 委員会は、1963年に「RC構造物に対する建築規格 (Building code requirements for reinforced concrete)」を発表した。これは1971年に改正された。<sup>39)</sup> この中の耐久性に関する記述を次に示す。

a) 材料について

混合水に海水の使用を禁じている。また水分中に塩素イオンを含む事を制限している (3・4・1)。

混和剤に関しては、塩素イオンを含む混和剤の使用を制限している。(3・6・1)

b) コンクリート配合について

水セメント比は、海水の作用を受けるコンクリートの最大水セメント比を0.44、水の作用を受けるコンクリートの最大水セメント比を0.48と規定している。ただし、軽量骨材コンクリートについては、海水の作用を受けるコンクリートは、少なくとも圧縮強度が280Kg/cm<sup>2</sup>、水の作用を受けるコンクリートは圧縮強度が260Kg/cm<sup>2</sup> なくてはならないと規定している(4・2・6)

c) 設計について

最小かぶりは、プレストレストコンクリート部材につて、一般に表-15に示すように規定している。ただし、鋼材が腐食する可能性の強い地域では、上記の最小かぶりを

表-15 PC鋼材の最小かぶり

構 造 物	か ぶ り
風雨にさらされる構造物	
壁、床	2.5 cm
その他	3.8 cm
地上に接していて、風雨にさらされない構造物	
壁、床	1.9 cm
桁、ガーター、柱	3.8 cm

50%増加するようにと規定している。(7・14・1・3)

(5) ドイツ

ドイツ工業規格 (Deutsche Industrie Norm; 略称 DIN) が、コンクリート構造物の規格を記載している。鉄筋コンクリート構造物に関しては、DIN-1045 が鉄筋コンクリート構造物の設計および施工に関する事項を規定している (Bestimmungen des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton; Teil A, Bestimmung Ausführung von Bauwerken aus Stahlbeton)。プレストレストコンクリート構造物に関しては、DIN-4227で、プレストレストコンクリート構造物の設計および施工に関して規定している (Spannbeton; Richtlinien für Bemessung und Ausführung)。この中で、PC鋼材の製造から運搬、設置まで一貫して腐食防護をする事を義務づけている。

耐久性に関する記述をあげると次のようになる。

a) コンクリート配合について

単位セメント量に関しては、セメントの規格強度が350 Kg/cm<sup>2</sup>級のものを使用する場合には240Kg、250Kg/cm<sup>2</sup>級のものを使用する場合には280Kgの値を最小セメント量と規定している(6・5・5・1)。

水セメント比に関しては、セメントの規格強度が350 Kg/cm<sup>2</sup>級のものを使用する場合には0.75、250Kg/cm<sup>2</sup>級のものを使用する場合は0.65の値を最大水セメント比と規定している。海水などの化学作用の影響については、セメントは、規格強度が350Kg/cm<sup>2</sup> 級のものを使用して、浸食作用の弱い所では0.60、浸食作用の強い所では0.50の水セメント比を使いようにと規定している(6・5・7・4)。

b) 設計について

海水などの化学作用の影響を受ける構造物の最小かぶりは、現場でコンクリートを打ち込む場合、一般構造物では4.0cm、壁構造物では3.5cm、プレキャスト製品では3.0cmと規定している(13・2)。

(6) イギリス

コンクリート製造関係の規格は、British Standard Codes of Practice (BS CP) の中に記載されている。関係の規格をあげると次のようになる。CP 110; Code of Practice for the Structural Use of Concrete (これは、英国の新しい統一規格 (Unified Code) でもある。)

CP 114; Structural Use of Reinfor-

ced Concrete in Buildings  
CP 115; Structural Use of Prestressed Concrete in Building  
CP 116; Structural Use of Precast Concrete  
CP 117; Composite Construction in Structural Steel and Concrete  
CQ 2007; Design and Construction of Reinforced and Prestressed Concrete Structure for the Storage of Water and Other Aqueous Liquids

などである。この中の耐久性に関する項目をあげると次のようになる。

a) 材料について

塩化カルシウムは、セメントとの重量比で2%以上の使用を禁止している。コンクリート中に塩化カルシウムがある場合、2.5mm以上のかぶりがないと規定している。

塩化カルシウムは、プレストレストコンクリート部材に混入させてはならないと規定している(CP116・205)。

b) 設計について

PC鋼材の最小かぶりは、2.5mm。屋外や地面に接している構造物や屋内で腐食の可能性のある構造物は最小かぶりを、4.0mmと規定している(CP115・308)。

海水の作用を受ける構造物は、最小かぶりを5.0mmとしている(CP116・208)。

(7) その他の国々

1969年のA.C.I. Journalに掲載されたR. Szilardの文献に、各国の規格についての記述があるので、それを要約する。<sup>40)</sup>

i) ノルウェー

イ) 早強ポルトランドセメントの使用を許している。

ロ) プレテンション部材の最小かぶりを2cmとし、ポストテンション部材の最小かぶりを4cmとしている。ただし、これらの値は、環境状態の悪化につれて増加させる事としている。

ii) フランス

イ) セメントと混和剤に塩化物を含ませる事を禁じている。

ロ) 表面に欠陥のある鋼材の使用を禁じている。

iii) スイス

イ) PC鋼材の応力腐食および水素ゼイ化に関する試験を含んだPC鋼材の防食についての示方を含んで

いる。

ロ) 水セメント比は、0.38から0.43の間としている。以上が、各国の耐久性に関する基準である。

## 5. 耐久性向上のための対策

### 5.1 コンクリート

各国の規格では、プレストレストコンクリート部材の耐海水性を向上させるため、(1)塩化物の混入を禁止する。(2)かぶり厚さを増大させる。などの措置をとっている。しかし、これらは耐久性向上のための積極策ではない。というのは、塩化物の混入を禁じても、部材が海水中にあれば塩化物は浸透してくるし、かぶりを厚くしても塩化物の浸透が悪くなるわけではないからである。耐海水性向上のための対策として考えられる事は、(1)プレストレストコンクリート部材の表面で塩化物の浸透を阻止する。すなわち、部材表面をエポキシ樹脂、ポリエステル樹脂、などのプラスチックでおおう方法。(2)侵入した塩素イオンなどによる鋼材の腐食を抑制する様な化学成分をコンクリート中に混入させておく。すなわち、混和剤としてインヒビターを使用する方法。(3)コンクリート自体の透水性を改善する。すなわち、この1つの方法として、高強度コンクリートを使う事が考えられる。ただし、これら(1)~(3)の方法は、現在まだ研究段階である。次の各項目について述べる。

#### (1) 表面コーティング

FIPの指針の中に、コンクリートにポリマーを含浸させた場合、およびコーティングをした場合は、かぶりを小さくして良いという規定がある。<sup>37)</sup>この方法は、耐海水性を向上させる1つの対策である。この方法によってコンクリートの不透水性が良くなり、コンクリート中への塩分浸透が遮断され、またかぶりを小さく出来る事からプレストレストコンクリート部材の断面を有効に使える利点がある。

コンクリートへ含浸させるポリマーとしては、メチルメタアクリレート、ステレン、アクリロニトリル、ジアリルフタレート、などが研究されている。<sup>41)</sup>メチルメタアクリレートを使用したポリマー含浸モルタルの耐薬品性に関して、10%の食塩水に9日間浸せきした所、表面の変色状態も、変形状態も、浸食状態も元のままであったという報告がある。<sup>41)</sup>なお、この実験に使用した供試体は、JIS R5201-1964・セメントの物理試験方法に記載されている、強さ試験(曲げ強さおよび圧縮強さ)で使用するモルタルである。供試体寸法は、幅4cm、高さ4cm、長さ16cmであり、配合は、セメント520g、砂(豊浦標準砂)1040g、水338gである。

コンクリート表面へのコーティング材料としては、ポリ

エステル樹脂、エポキシ樹脂、フラン樹脂、フェノール樹脂、などが研究されている。<sup>35)</sup> これらの樹脂は、透水性も吸水性も無いので、これ等を使ってコーティングしたプレストレストコンクリート部材の透水性および吸水性の問題はなくなる。ただし、合成樹脂を使用した場合、合成樹脂の耐海水性、合成樹脂とコンクリートとの長期的な付着特性に関しては、まだ明確な結論は得られていない。

(2) インヒビター（防錆剤）

ここで言うインヒビター（Inhibitor）とは、コンクリートに、混和剤として配合時に混入させる鋼材の腐食抑制剤の事をさすものとする。各国の規格では、塩化物の混入を厳しく制限しているため、配合時にコンクリート中に混入する事は少ない。しかし、塩素イオンによる鋼材の腐食の問題は、プレストレストコンクリート部材を海水に浸せきした場合に発生して来る。すなわち、コンクリート中に浸透して来た塩素イオンが、鋼材の不動態皮膜を破壊して鋼材を腐食させるからである。この際インヒビターがコンクリート中に混入されていると、このインヒビターは、PC鋼材の腐食した箇所から流れている局部電流を低下させ、PC鋼材の腐食速度を抑制する役目があると言われている。ただし、この改善策は、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来た場合は役に立たない。インヒビターは、現在、研究開発の段階であり、実験の蓄積も少なく、その効果については、まだ明確ではない。わが国では、ボソリス社がニトロソ磷酸有機エステルを主成分とするインヒビターを市販している。

(2) 高強度コンクリート

コンクリートの透水性を改善するには、水密性のあるコンクリートを作る事によっても、得られる。プレストレストコンクリートの場合は高強度コンクリートを利用する事により、二次的に不透水性のあるコンクリートを得る事が

できる。高強度コンクリートの製造は、設計上では水セメント比を小さくする事で、また、施工上では十分な締め固めや養生を行う事で得られる。現在、 $500\text{Kg}/\text{cm}^3$  の圧縮強度を持つプレストレストコンクリート用のコンクリートの水セメント比は、0.37位である。これを $800\text{Kg}/\text{cm}^3$  の圧縮強度を持つコンクリートにすると水セメント比は、0.29となる。約20%水セメント比が小さくなり、練りませ水の量は $1\text{m}^3$ 当り約20Kg少なくてすむ。水の量が少なければ、セメントの水和に不必要となる水の量が少なくなり、ブリージングの量やコンクリート中の空けきの量が少なくなる。このため、コンクリートの不透水性が良くなるのである。普通骨材コンクリートでは、水セメント比が10%小さくなると不透水が30%良くなるという報告がある。<sup>42)</sup> また、T.C.Power等は、実験の結果水セメント比0.50のモルタルの透水係数は、約 $20 \times 10^{-12}\text{cm}/\text{sec}$ となり、水セメント比0.30のモルタルの透水係数は、約 $0.1 \times 10^{-12}\text{cm}/\text{sec}$ となったと報告している。<sup>43)</sup>

5.2 PC鋼材

(1) 亜鉛メッキ

PC鋼材の腐食を防ぐ手段として、PC鋼材自体をメッキする方法がある。西ドイツにおける、高強度亜鉛メッキPC鋼線に関する研究では、コンクリートとの付着性はメッキ線が裸線より良い結果を示したという報告がある。<sup>44)</sup> これは表面粗さの影響と思われる。また、応力腐食に関して、亜鉛メッキは抵抗性がある、とも報告している。しかし、この方法は、PC鋼材を溶融亜鉛につけて行うため、鋼材の機械的性質が多少減少してしまい欠点がある。表-16に普通のより線と、亜鉛メッキしたより線の機械的性質を示す。引張荷重で約1割減少している。

表-16 PC鋼より線の機械的性質

(1) 普通より線

公称直径 mm	標準 断面積 mm <sup>2</sup>	標準 重量 Kg/km	引張荷重 Kg (Kg/mm <sup>2</sup> )	降伏荷重 Kg (Kg/mm <sup>2</sup> )	破断時伸び		レラクセ- ション量 %	より合せ ピッチ mm
					伸び %	測定長 mm		
12.4	92.9	735.2	16,300(175)	13,900(150)	3.5	600	3.5	(36-48) ×d

(2) 亜鉛メッキより線

公称直径 mm	標準 断面積 mm <sup>2</sup>	標準 重量 Kg/km	引張荷重 Kg (Kg/mm <sup>2</sup> )	降伏点荷重 Kg (Kg/mm <sup>2</sup> )	破断時伸び %	亜鉛 付着量 g/m <sup>2</sup>	より合せ ピッチ mm
亜鉛メッキ 12.4	96.6	752	15,000(155)	11,300(117)	4.5	275	(36-48) ×d

## 6. あとがき

本文では、プレストレストコンクリート部材を海洋構造物に適用する場合を想定して、特に、耐海水性に焦点を絞り、この問題点および対策を文献調査を基に検討した。プレストレストコンクリート部材の耐海水性に関しては、比較的実験例が少なく、今後さらに問題点を明らかにしていかなければならない項目が多い。本調査の範囲で明らかとなった項目および残された問題点を列記すると、次のようになる。

(1) PC鋼材の腐食の中で、「応力腐食および水素ゼイ化」は、大部分がPC鋼材の金属組成に起因して来る問題と思われる。そのため、プレストレストコンクリート部材を作る上での問題点とは多少違ったものである。すなわち、PC鋼材の製造メーカーが応力腐食および水素ゼイ化を起こさないような鋼材を製造するよう努力してくれる事である。プレストレストコンクリート部材を作る上でのPC鋼材の腐食の問題は、孔食および全面腐食に関してであり、この種の腐食を起こさないようなコンクリート配合、設計および施工を実施する必要がある。

(2) 塩素イオン( $Cl^-$ )は、PC鋼材の腐食に大きな影響をおよぼす要因である。塩素イオンは、海水中に多量に存在するので、海洋環境下における構造物の設計には、かぶりなどの配慮は忘れてならない要因の一つである。また、塩分のコンクリート中への浸透量とPC鋼材のかぶりの問題は、経済性と耐久性を合わせて考慮しなければならない点で重要である。すなわち、かぶり量は、小さくした方が断面を有効に使えるが、PC鋼材の腐食の問題からは弱点となってしまふ。

(3) 海洋環境下にあるプレストレスト構造物には、波力などの予想し難い外力が作用する事がある。そして、この外力は、設計時に想定した外力を上回り、これにより部材にはひびわれが入る事も考えられる。このため、プレストレストコンクリート部材のひびわれに関しても、耐海水性を考える上で検討する必要がある。

(4) ポストテンション部材を使用する場合の問題点の一つに、PC鋼材の定着方法がある。定着体などの腐食を防止し得る有効な方式を開発する必要がある。

(5) ポストテンション部材の接合面は、この場所から漏水などの問題が発生した場合、構造物としての維持が困難になるし、また、荷重伝達能力が低下するという事もさげなければならぬので、接合面の処理という点が問題点としてあげられる。

(6) 各国の規準では、塩化物がコンクリートの練りませ水や混和剤に含まれる事を厳しく制限している。わが国

では、練りませ水として海水の使用を禁じている。混和剤については、プレストレストコンクリート部材は、塩化カルシウムおよび塩化カルシウムを多量に含むもの使用を禁じている。かぶりについては、各国とも普通環境状態より増加するように規定している。

(7) プレストレストコンクリート部材の耐海水性を向上させたための対策としては、適切な材料、配合(特に水セメント比)、設計(特にかぶり)および施工を実施することが前提条件であるが、その他に現在開発ないしは検討中のものとして、表面コーティング、インヒビターの使用、高強度コンクリートの使用、亜鉛メッキPC鋼材の使用、などがあげられる。

以上述べた問題点などを明らかにするために、1973年10月より、「プレストレストコンクリート部材の耐海水性に関する試験」を開始した。この試験は、10年間にわたるものである。(1974年4月1日受付)

## 参考文献

- 1) 竹中一雄、"海洋開発産業"、東洋経済社、1970年、PP.4
- 2) 土木学会文献調査委員会、"海洋構造物について"、土木学会誌、Vol.55、No.9、1970年9月、PP.29~38
- 3) 土木学会編、"コンクリート標準示方書"、土木学会1974年、
- 4) 運輸省港湾局編、"港湾構造物設計基準"、日本港湾協会、1967年、PP.3~3~1
- 5) B.C.Gerwick, Jr., "Practical Methods of Ensuring Durability of Prestressed Concrete Ocean Structures", Annual Convention of A.C.I., 1973年 PP.1~9
- 6) 土木学会編、"海洋鋼構造物設計指針(案)解説"、土木学会、1973年、PP.1~2
- 7) 海洋開発産業協会編、"欧米における海洋スペース利用の事業計画及び技術開発状況に関する調査報告書"1973年、PP.1~108
- 8) ビーエスコンクリート社編、"新技術集-1972年度報告-Ⅱ1"、ビーエスコンクリート株式会社、1973年、PP.271~336
- 9) "Ekofisk One becomes an island in the North Sea", Ocean Industry, 1973年8月、PP.21~24

- 10) C.C.Nichols, "Construction and Performance of Food Canal Floating Bridge", ACI Symposium on Concrete Construction in Aqueous Environment, Vol. SP8, 1962年, PP.97~106
- 11) A.A.Yee, "Prestressed Concrete Hull and Method of Marking Same", A.A.Yee & Associates, 1970年, PP.1~15
- 12) 吉田匡邦, "沿岸海域の空間利用とコンクリート構造物", セメントコンクリート, 1972年1月, PP.21~27
- 13) B.C.Gerwick, Jr., "Prestressed Concrete Underwater Oil Storage System", Offshore Technology Conference, 1969年, PP.659~666
- 14) A.Brandtzaeg, "Concrete Underwater Floating Tunnels", Proceedings of the FIP Symposium on Concrete Sea Structures, 1972年9月, PP.42~47
- 15) C.A.Power, "The Development of Prestressed Concrete Barges on Fiji", Proceedings of the FIP Symposium on Concrete Sea Structures, 1972年9月, PP.12~17
- 16) H.H.Uhlig 著, 岡本剛監修 "腐食反応とその制御", 産業図書, 1968年, PP.107~130
- 17) 鋼材倶楽部編, "土木技術者のための鋼材知識", 技報堂, 1968年, PP.47~52
- 18) H.J.Godfrey, "Corrosion Test on Prestressed Concrete Wire and Strand", PCI Journal, Vol.5, 1960年3月, PP.45~51
- 19) G.E.Monfore and G.J.Verbeck, "Corrosion of Prestressed Wire in Concrete", ACI Journal, Vol.32, 1960年11月, PP.491~514
- 20) J.D.Gilchrist 著, 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, Vol.7, 1965年12月, PP.79~80
- 21) W.Grundig 著, 野口功訳, "水素によるぜい性化が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, Vol.3, 1961年8月, PP.59
- 22) 伊藤伍郎, "腐食科学と防食技術", コロナ社, 1969年, PP.29~30
- 23) 岸谷考一, "海水による鉄筋の腐食とその対策", コンクリートジャーナル, Vol.10, 1972年8月, PP.32~36
- 24) D.Vandepitte, "Site Constructions (Problems and Difficulties) Remedies and Solutions", Fourth Congress of the FIP, 1965年, PP.115~127
- 25) E.C.Roshore, "Durability of Prestressed Concrete Beams", PCI Journal, Vol.10, 1965年10月, PP.49~59
- 26) E.C.Roshore, "Durability and Behavior of Pretensioned Beam", ACI Journal, Vol.61, 1964年7月, PP.811~846
- 27) 神山 一, "鉄筋コンクリート", コロナ社, 1963年, PP.125~129
- 28) T.C.Hsu, F.O.Slate, G.M.Sturman and G.Winter, "Microcracking of Plain Concrete and the Shape of the Stress-strain Curve", ACI Journal, Vol.66, 1963年2月, PP.209~224
- 29) 岡田 清, 神山 一, "プレレストレストコンクリートの設計", 国民科学社, 1963年, PP.119~125
- 30) P.W.Abeles and S.J.Filipek, "Corrosion of Steel in Finely Cracked Reinforced and Prestrssed Concrete", PCI Journal, Vol.10, 1965年2月, PP.36~40
- 31) E.C.Roshore, "Durability and Behavior of Prestressed Concrete Beams Report 3", U.S.Army Engineering Waterways Experimental Station, 1971年10月, PP.1~21
- 32) B.Ost and G.E.Monfore, "Penetration of Chloride into Concrete", Research and Development Laboratories of the PCA, Bulletin 192, 1966年1月, PP.46~52
- 33) W.Czernin 著, 徳根吉郎訳, "建設技術者のためのセメントコンクリート化学", 技報堂, 1969年, PP.137~140
- 34) E.C.Roshore, "Durability and Behavior of Prestressed Concrete Beams Report 2", U.S.Army



- Engineering Waterways Experimental Station, 1967年3月, PP.1~4
- 35) 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、Vol.11、No.4、1973年4月、PP.34~39
- 36) CEB/FIP、"コンクリート構造物設計施工国際指針"、鹿島出版会、1970年
- 37) FIP、"Recommendation for the Design of Concrete Sea Structures"、FIP、1973年
- 38) ACI Committee 201、"Durability of Concrete in Service"、ACI Manual of Concrete Practice Part 1、1968年
- 39) ACI Committee 318、"Building Code Requirements for Reinforced Concrete"、ACI、1971年
- 40) R.Szilard、"Corrosion and Corrosion Protection of Tendon in Prestressed Concrete Bridges"、ACI Journal、Vol.66、No.1、1969年1月、PP.42~59
- 41) 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、Vol.11、No.4、1973年4月 PP.27~33
- 42) 村田二郎、"コンクリートの耐久性"、セメントコンクリート、No.308 1972年10月、PP.15~32
- 43) T.C.Power、L.E.Copeland、J.C.Hayes and H.M. Mann、"Permeability of Portland Cement Paste"、ACI Journal、Vol.51、No.3、1954年11月、PP.285~298
- 44) G.Rehm、U.Nürnbergger and G.Rieche、"Investigation upon the Properties of Galvanized High-strength Prestressing Steel"、FIP 2nd Symposium、Stress Corrosion of Prestressing Steel、No.2-6、PP.1~12

港 灣 技 研 資 料      No. 191

1 9 7 4 . 6

編 集 兼 發 行 人      運 輸 省 港 灣 技 術 研 究 所

發 行 所      運 輸 省 港 灣 技 術 研 究 所  
                 橫 須 賀 市 長 瀬 3 丁 目 1 番 1 号

印 刷 所      株 式 會 社 東 京 プ リ ン ト

Published by the Port and Harbour Research Institute  
Nagase, Yokosuka, Japan.