

# 港湾技研資料

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

No. 275      Sept. 1977

レジコンクリートの耐海水性について

関                      博  
大   即   信   明

運輸省港湾技術研究所



# レジンコンクリートの耐海水性について

## 目 次

要 旨 .....	3
1. ま え が き .....	3
2. レジンコンクリートの一般的特性 .....	4
3. 試験項目，供試体の製作および暴露条件 .....	4
3.1 試験項目 .....	4
3.2 使用材料 .....	5
3.3 レジンコンクリートの配合および成型手順 .....	7
3.4 暴露条件 .....	8
4. 試験方法の概要 .....	9
4.1 レジンコンクリートの試験 .....	9
4.2 複合材の曲げ強度試験 .....	11
5. 試験結果 .....	12
5.1 圧縮強度およびヤング係数 .....	12
5.2 曲げ強度および曲げ剛性 .....	15
5.3 埋設 P C 鋼材の腐食 .....	17
5.4 付着力の経年変化 .....	21
5.5 複合材としての曲げ強度試験 .....	21
6. 考 察 .....	23
7. 結 論 .....	24
参 考 文 献 .....	24

## Durability of Resin Concrete under Sea Environments

Hiroshi SEKI\*

Nobuaki OTSUKI\*\*

### Synopsis

Resin concrete has many advantages for the structural members. It is of necessity for resin concrete members to maintain adequate durability under maritime environments.

The paper reported the experimental results of resin concrete obtained by the age of five years, in which the additives of resin concrete were three kinds of unsaturated polyester. The specimens were exposed to such conditions as in the natural atmosphere, at the tidal zone of the sea water and under the sea water. Testing items were compressive strength, bending strength, bond strength between resin concrete and PC tendons, and bending strength of resin concrete reinforced with FRP.

Test results show as follows:

- (1) The tidal zone is the most severe sea condition regarding the deterioration of resin concrete.
- (2) Resin concrete mixed with polyester resin of isophthalate has comparatively higher durability than the others.
- (3) Resin concrete added with silane shows no distinguishable effect.
- (4) Pitting is observed on the surface of PC tendons embedded in resin concrete at the age of five years.

---

\*Chief of Materials Laboratory, Structures Division

\*\*Member of Materials Laboratory, Structures Division

# レジンコンクリートの耐海水性について

関 博 \*  
大 即 信 明 \*\*

## 要 旨

フラン樹脂、エポキシ樹脂、ポリエステル樹脂等を結合材としたレジンコンクリートは、構造部材として種々の優れた特性を有しているが、これらの樹脂を使用したレジンコンクリートを港湾構造物や海洋構造物に用いるには、海洋環境下における十分な耐久性が保障される必要がある。

本実験においては、3種の結合材を試験の対象とした。すなわち、耐久性が一般に良好であると考えられている不飽和ポリエステル樹脂を対象として、オルソフタル酸系不飽和ポリエステル、イソフタル酸系不飽和ポリエステルおよびオルソフタル酸系不飽和ポリエステルにシランカップリング剤を添加剤として用いたものの都合3種の結合材である。

これらの結合材を用いた3種のレジンコンクリートに関して、構造部材設計上重要な項目である強度、さらにはヤング係数、曲げ剛性、埋設PC鋼材の腐食性状などについて海洋環境下での経年変化を検討した。海洋環境としては、陸上部、感潮部、海中部の3水準を考え、暴露期間としては、1か月、3か月、6か月、2年および5年の5水準とした。

実験結果によると

- (1) レジンコンクリートの劣化は、陸上部、海中部、感潮部の順で大きくなる傾向がある。
- (2) レジンコンクリートの劣化は、曲げ強度および曲げ剛性に顕著に表われる。
- (3) イソフタル酸系の耐海水性が比較的すぐれている。
- (4) シランカップリング剤の効果はほとんど認められなかった。
- (5) レジンコンクリートに埋設したPC鋼棒は、かぶりが1cmのときには材令5年程度で点食が生ずるようである。

## 1. ま え が き

従来から、樹脂（レジン）を結合材としたレジンコンクリートを、土木・建築用の構造部材や補修材などに利用する試みは種々なされてきた。一部は実用化されおり、陸上の施設では、パイプや電線ケーブル用マンホールなどに利用されている。

レジンコンクリートの結合材としては、フラン樹脂、エポキシ樹脂、ポリエステル樹脂などが使用されている。これらの樹脂を使用したレジンコンクリートを港湾構造物や海洋構造物に利用するためには、海洋環境下における十分な耐久性が保障される必要がある。しかし、筆者の知る範囲では、レジンコンクリートの耐海水性に関す

る実験研究は報告されておらず、長期にわたる海洋環境下における基礎的な性状は、は握されていないと考えられる。

本実験においては、3種の結合材を試験の対象とした。耐久性が一般に良好であると考えられている不飽和ポリエステル樹脂2種、すなわち、オルソフタル酸系不飽和ポリエステル、イソフタル酸系不飽和ポリエステル、および、オルソフタル酸系不飽和ポリエステルにおいてシランカップリング剤を添加剤として用いたものの都合3種の結合材である。これらの結合材を用いた3種のレジンコンクリートに関して、構造部材設計上重要な項目である強度、さらには、ヤング係数、曲げ剛性などについて海洋環境下での経年変化を検討した。海洋環境として

\* 構造部 材料施工研究室長

\*\* 構造部 材料施工研究室

は、陸上部、感潮部、海中部の3水準を考え、暴露期間としては、1か月、3か月、6か月、2年および5年の5水準とした。

なお、本研究はセキサン工業株式会社からの受託試験研究として実施したものであることを附記する。

## 2. レジンコンクリートの一般的特性

一般にコンクリートとはセメントコンクリートを指すことが多いが、厳密にはセメントコンクリート、レジンコンクリート、アスファルトコンクリート等が含まれる。ここでは、レジンコンクリートの一般的な物理的・化学的特性について概述する。

結合材にセメントを用いたいわゆるセメントコンクリートは、耐久性にすぐれていること、鋼材との組合せにより合理的な複合材料を構成することが可能であること、さらに、コストが低廉であること、などの理由により土木・建築における主要材料の位置を占めている。

しかし、セメントコンクリートは圧縮強度に比較して引張強度や曲げ強度が小さく、また、一般に耐薬品性や耐凍結融解性が劣るなどの欠点がある。これらの問題点の多くは、結合材として用いているセメント自体に起因するものであり、結合材を中心としたコンクリートの改良研究が望まれてきた。一方、セメントコンクリートとは異った分野で研究・開発が進められてきた高分子材料の多くが、耐薬品性が高いこと、硬化時間が短いこと、強度がセメントコンクリートに比べ極めて高いこと、などの特徴を有しており、セメントのもつ欠点と思われる性質を補う性質のあることから高分子材料をコンクリートの結合材または混和材料として利用する試みがなされるようになってきた。

これらの技術は、ポリマーセメントコンクリート、樹脂含浸コンクリートおよびレジンコンクリートに分類することができる。レジンコンクリートの一般的な特徴は下記に述べる項目であると言われている。

- (a) 引張強度、曲げ強度、圧縮強度が大きい。
- (b) 防水性、耐凍結融解性がすぐれている。
- (c) 耐摩耗性がすぐれている。
- (e) 接着剤で容易に接着できる。
- (f) 硬化時間が広範囲に制御しうる。しかも、硬化完了までの時間がきわめて短い。
- (g) グラスファイバー、各種合成繊維、鉄筋などによる補強ができる。

その反面、次のような欠点も挙げることができる。

- a) 材料コストが高い。

- b) 触媒などの扱いに専門的な知識が必要である。

レジンコンクリートの組成がセメントコンクリートのそれと最も異なるところは、結合材として合成樹脂のみを用い、セメントと水を全く用いない点にある。骨材として砂、砂利などを使用するので、性状などはセメントコンクリートと類似する点も見られるが、結合材と骨材との接着力がかなり異なる。一般にレジンコンクリートでは、接着力は大きく、このため、種々のすぐれた特性を示す。

レジンコンクリートの性質を最も左右するのは結合材である。結合材に要求される性質としては、硬化前は常温で通常液状で、容易に骨材と混合することができ、しかも硬化後は熱や酸、アルカリ、溶剤などの薬品類によって、軟化、浸食、膨張などの変化をしない固形物になること、等が挙げられる。種々の合成樹脂の中で、不飽和ポリエステル樹脂、エポキシ樹脂、フラン樹脂などが前記の条件を比較的よく満足すると言われている。特に、不飽和ポリエステル樹脂は、

- (a) 硬化後の反応生成物がない。

- (b) 硬化方法が容易で制御しやすい。

(c) 粘度が低く、また、任意な粘度に調節できる。などの長所があり、しかも比較的安価なため、我が国では最もよく用いられている。

レジンコンクリート用骨材としては、骨材と結合材の接着面において十分な接着を期待するために、骨材中にできるだけ水分を含有しないことが要求される。さらに結合材の強度に対応した品質の高い骨材を使用する必要がある。

結局レジンコンクリートという材料は、従来のセメントコンクリートに比較して、高品質、高価格の材料を用い、高強度、高耐薬品性等を有する材料であると言える。

## 3. 試験項目、供試体の製作および暴露条件

### 3.1 試験項目

試験項目は大きくわけて、(a)母材レジンコンクリートの耐海水性、(b)複合材（レジンコンクリートとガラスクロス）の耐海水性、および、(c)レジンコンクリート中に埋設したPC鋼材の腐食である。

試験項目の(a)については、円柱供試体（ $\phi 10\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ ）を用いた圧縮強度試験およびヤング係数試験、角柱供試体（ $10\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 40\text{ cm}$ ）を用いた曲げ強度試験および曲げ剛性試験を行なった。さらに、角柱供試体（ $10 \times 10 \times 40\text{ cm}$ ）を用いたPC鋼材とレジンコンクリートの付着力試験も実施した。

(b)に関しては、角柱供試体（5 cm×10 cm×40 cm）を用い曲げ強度試験を行なった。

試験項目の(c)については、円柱供試体（φ10cm×20cm）にφ11mmのPC鋼棒を埋設し、PC鋼棒表面の腐食の有無を観察した。

### 3.2 使用材料

3.1で述べたように、供試体としては主にφ10cm×20cmの形状の円柱供試体および10cm×10cm×40cmの角柱供試体を使用した。供試体の製作に用いたレジンコンクリートの使用材料は以下の通りである。

#### (1) 結合材

前述したように、レジンコンクリートの性質は主として結合材に支配され、結合材の選定は重要である。本実験においては、我が国で最もよく用いられていると言われる不飽和ポリエステル樹脂を用いた。そのなかでも最もよく用いられているオルソフタル酸系不飽和ポリエステル（以下フタル酸系と略記する）、フタル酸系に対して高温時に優れた特性を有すると言われるイソフタル酸系不飽和ポリエステル（以下イソフタル酸系と略記する）、さらにフタル酸系において結合材と骨材との界面性状を

改善すると言われるシランカップリング剤を添加した結合材（以下フタル酸系+シランと略記する）の3種を用いた。

不飽和ポリエステル樹脂について述べると以下のごとくである。<sup>1)</sup>「不飽和ポリエステル樹脂の歴史は1939年頃の研究に端を発し、その後アメリカで急速な発展を遂げ、特に第2次世界大戦後においては、強化プラスチックとして、その強靱さと軽量さを生かして航空機部品、小型舟艇、ヘルメットなどの軍需目的に大いに利用された。今日では熱硬化性樹脂としての重要な位置を占めるに至った。

不飽和ポリエステル樹脂は一般に淡黄色、粘調な液状のものである。その成分は不飽和ポリエステルとビニル単量体との混合物といえることができる。

いま、2塩基酸と2価アルコールとを反応させるとポリエステルが生成する。たとえば最も簡単な例として無水マレイン酸とエチレングリコールとを用いた場合の反応は図-1に示すごとくである。すなわち、マレイン酸ポリエステルが生成する。この不飽和ポリエステルをビニル系単量体、たとえばスチレン、酢酸ビニル、メチルメタクリレートまたはジアルキルフタレートなどに溶解さ

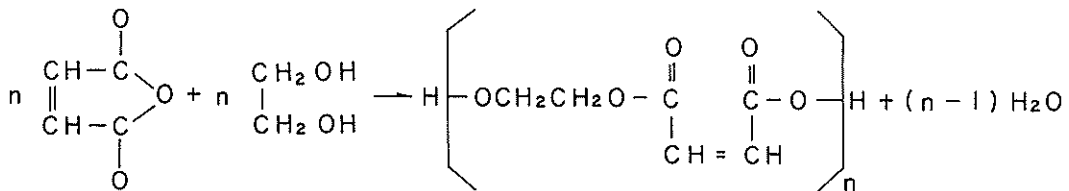


図-1 無水マレイン酸系とエチレングリコールの反応

せると透明な樹脂が得られる。これが通称「不飽和ポリエステル樹脂」と呼ばれるものである。

不飽和ポリエステル樹脂の性能については、その種類も多く一概に述べるのは難しいがおよそ次のことが言える。熱硬化性樹脂の1つである不飽和ポリエステル樹脂は、塩化ビニルなどの熱可塑性樹脂に比べてレジンコンクリート用結合材として硬化後の物性がすぐれた点が多いと言われている。すなわち、

- (a) 構造的性能がすぐれている。  
強度が大きいこと。（圧縮強度 $\geq 1000 \text{ kg/cm}^2$ ）  
ヤング係数が大きいこと。（ $E \geq 10^4 \text{ kg/cm}^2$ ）
- (b) 耐熱温度が高い。
- (c) 薬品抵抗が大きい。

(d) 接着強度が高い。

などの特徴を有している。さらに、本実験で用いる3種の結合材について述べると以下のようなものである。

#### (a) フタル酸系

ポリエステルの原料として2塩基酸を用いるが、このうち最も用いられているのがフタル酸である<sup>1)</sup>。これには図-2に示すように3種の異性体があるが、フタル酸という場合、ここではオルソフタル酸をさす。オルソフタル酸は比較的安価でレジンコンクリート用結合材として最も使用されている。これを用いた樹脂はアルカリに弱く、長期間水中に暴露すると除々に加水分解し耐久性に問題があると言われている。

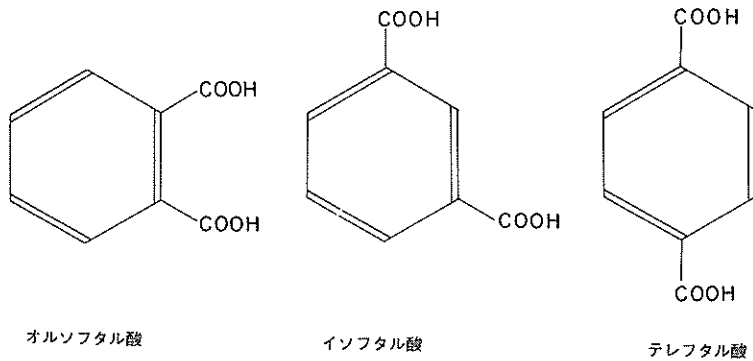


図-2 フタル酸の異性体

表-1 フタル酸系およびイソフタル酸系ポリエステル樹脂を用いたレジンコンクリートの耐熱性<sup>2)</sup>

種 類	温 度 条 件	圧縮強度(kg/cm <sup>2</sup> )		σ70/σ30(%)
		30℃	70℃	
フタル酸系	30℃あるいは70℃の温水に1時間浸漬	913	421	46
イソフタル酸系	30℃あるいは70℃の温水に4時間浸漬	924	810	83

(b) イソフタル酸系

2塩基酸としてオルソフタル酸の異性体であるイソフタル酸を用いると、比較的高温時(70℃程度)における強度特性がフタル酸系よりも優れていると言われている。表-1<sup>2)</sup>に試験結果の1例を示す。これによるとイソフタル酸系の耐熱性が比較的に優れていることがわかる。

(c) フタル酸系+シラン

シランカップリング剤は、その構成分子中に2個以上の異なる反応基を有しており、その1つは無機質の材料(レジンコンクリートにおいては骨材)と化学結合する反応基(メトキシ基、シラノール基等)であり、もう1つは有機質材料(各種合成樹脂)と化学結合する反応基(ビニル基、エポキシ基等)である。シランカップリング剤を添加すると、骨材と樹脂との界面性状を改善することが期待できる。このため、フタル酸系とシランカップリング剤を結合材としたレジンコンクリートは、フタル酸系のみを用いたレジンコンクリートに比較して優れた特性を有することが期待できる。その一例として煮沸に対する強度特性の試験結果を図-3<sup>2)</sup>に示す。

(d) 骨材

用いた粗骨材(5~20mm)および細骨材(<5mm)は富士川産の川砂利および川砂である。骨材は絶乾状態に

近づけるためにアスファルトプラントにおいて乾燥させその後は室内に放置して自然冷却させた。この処理により、骨材の含水量はほぼ0.3%以下であった。一般的には許容最高含水率は0.2~0.3%と考えられており、本実験で用いる骨材はこの値を満足していると言える。

(e) 炭酸カルシウム

一般に、合成樹脂結合材および骨材の特性は著るしく相違する。たとえば、熱膨張率はそれぞれ60~80、5~10×10<sup>-6</sup>/℃、また、ヤング係数はそれぞれ3~4×10<sup>4</sup>kg/cm<sup>2</sup>、40~70×10<sup>4</sup>kg/cm<sup>2</sup>程度である。境界面における応力集中やひびわれを防止するためには、合成樹脂結合材部分の特性を骨材のそれに近づけるための工夫が必要となる。その方法として、数段階の粒径の骨材を組合せる、微粉子の骨材を添加する、などが有効である。骨材による増量の他の目的は経済性にあり、要求特性内において、極力増量するのが望ましい。

本実験では、微粉充填剤として0.074mmふるいを通過する炭酸カルシウムを用いた。

(f) PC鋼棒

レジンコンクリート中に埋設した鋼材の腐食傾向を観察することを目的として、異形PC鋼棒2種を埋め込んだ。PC鋼棒を使用した理由は、レジンコンクリート

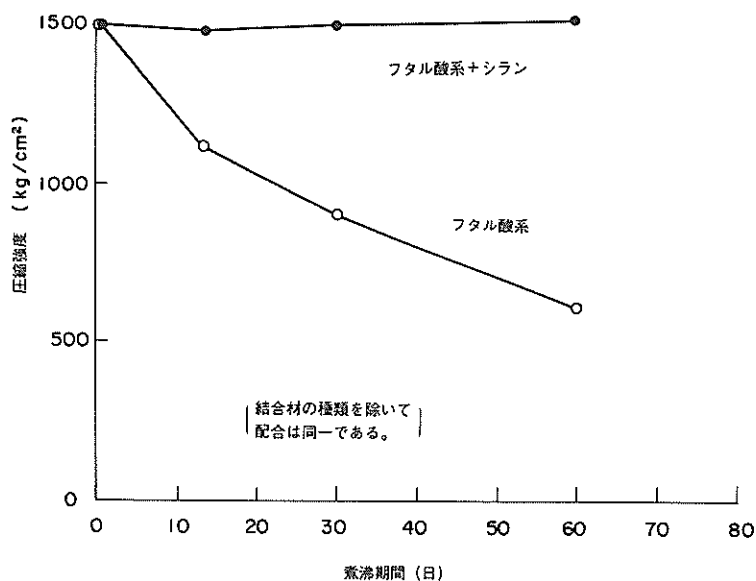


図-3 フタル酸系ポリエステルを用いたレジコンクリートのシランカップリング剤混入効果<sup>2)</sup>

PCパイプなどに将来応用することを意図したためである。

(g) ガラス繊維層積物 (FRP)

レジコンクリートはそれ自体高強度であるが、金属や熱可塑性樹脂のような延性はない。構造材としてレジコンクリートを利用する場合、何らかの補強材が必要である。補強材として考えられる材料には、鋼材またはガラス繊維層積物（以下 FRP と略記する）がある。FRPは母材との接着性がよく、また耐食性にもすぐれていると言われており、また鋼材と異なり母材外部に配置できるという特色がある。

本実験で使用したFRPは、ガラスクロスにポリエステル樹脂を注入成型したヤング係数  $200,000 \text{ kg/cm}^2$ 、引張強度  $3300 \text{ kg/cm}^2$  程度のものである。

3.3 レジコンクリートの配合および成型手順

表-2は、本実験に用いたレジコンクリートの重量配合を示している。なお、フタル酸系+シランに関して

表-2 レジコンクリートの配合

結合材	細骨材		粗骨材		炭酸カルシウム
	<1.2mm	1.2~5mm	5~10mm	10~20mm	
270	931	230	345	345	270

(単位:  $\text{kg/m}^3$ )

は、シランは全結合材に対し重量比で1%混入した。また、反応促進剤としてはナフテン酸コバルトを用いた。供試体の成型手順は、図-4に示す通りである。



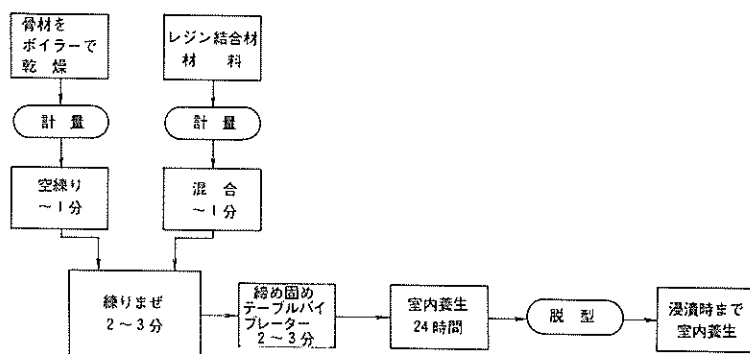


図-4 レジンコンクリート成型手順

### 3.4 暴露条件

供試体の暴露条件は、次の通りである。

試験場所：神奈川県横須賀市運輸省港湾技術研究所構内実験用循環水槽および屋外暴露試験場

供試体の暴露条件：陸上部、感潮部、海中部の3水準

試験材令：供試体暴露後、1か月、3か月、6か月、2年および5年の5水準

このうち、感潮部の潮位は、1日2回人工的に上下を繰り返すものである。また、陸上部は海岸線より5~10 m程度離れ常時潮風にさらされて荒天時には波しぶきをうける屋外である。

なお、表-3に海水循環水槽内海水の分析試験結果の1例を示す。

表-3 海水循環水槽内海水分析試験結果

比重 (20℃)	pH (20℃)	濁度	化学成分 (mg/l)						
			Na	K	Ca	Mg	Cl	SO <sub>4</sub>	CO <sub>3</sub>
1.019	7.70	1以下	7,925	320	293	1,011	14,683	2,050	110

(試料採取：1974年10月12日)

## 4. 試験方法の概要

### 4.1 レジンコンクリートの試験

#### (1) レジンコンクリートの圧縮強度試験

供試体は  $\phi 10\text{cm} \times 20\text{cm}$  の円柱供試体とし、レジンコンクリートの結合材は、フタル酸系、イソフタル酸系、およびフタル酸系+シランの3種を用いた。また、暴露条件は、陸上部、感潮部、海中部の3水準とした。

200t耐圧試験機を用い圧縮強度を求め、同時にワイヤストレインゲージ(ゲージ長30mm)を用いてヤング係数およびポアリン比を測定した。図-5に概要を示す。

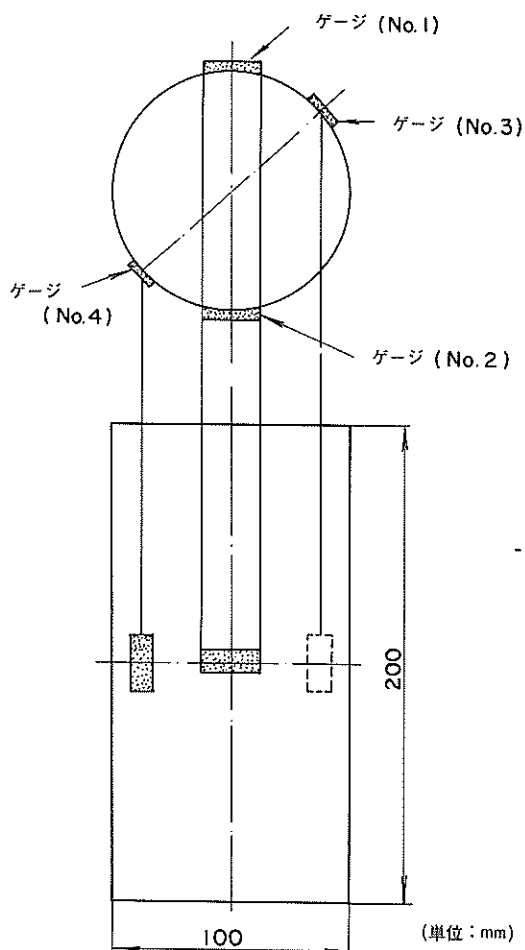


図-5 ヤング係数試験用供試体

#### (2) レジンコンクリートの曲げ強度試験

供試体は  $10\text{cm} \times 10\text{cm} \times 40\text{cm}$  の角柱供試体で、レジンコンクリート結合材としては、フタル酸系、イソフタル酸系、およびフタル酸系+シランの3種を用いた。また、暴露条件は、陸上部、感潮部、海中部の3水準とした。

200t耐圧試験機を用い図-6に示す要領で3等分載荷を行ない、同時にワイヤストレインゲージを用いて曲げ剛性を測定した。

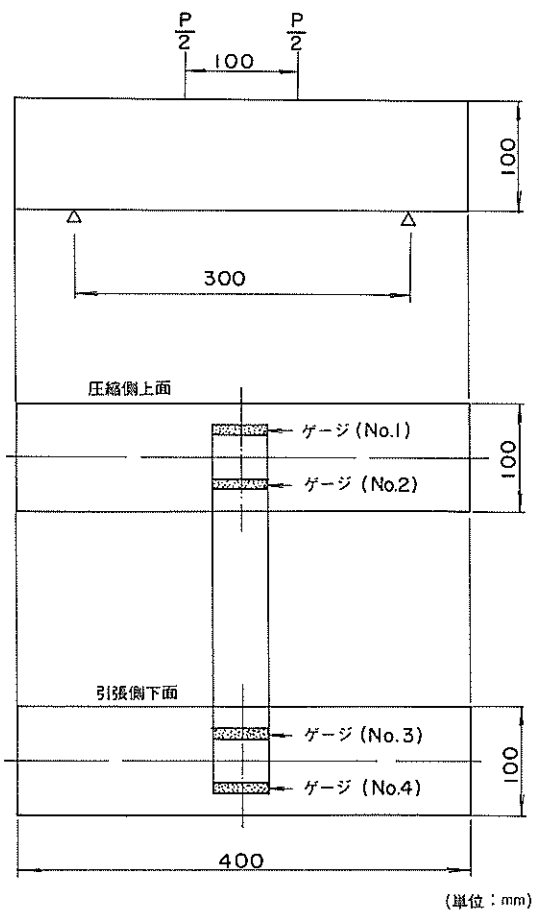


図-6 曲げ強度試験方法

(3) レジンコンクリート中に埋設した PC 鋼棒の腐食試験

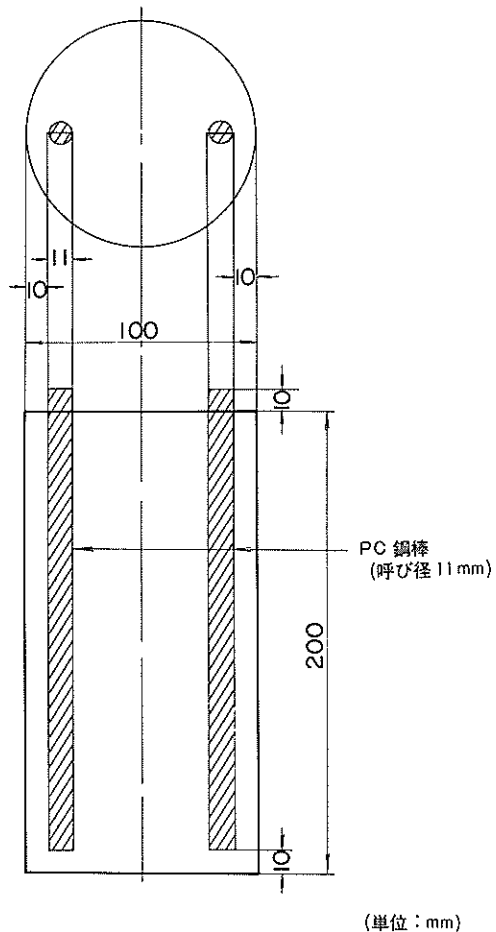
φ10cm×20cm 円柱供試体に、図-7 に示すように PC 鋼棒を埋設した。レジンコンクリート結合材としては、フタル酸系のみを用い、暴露条件は、陸上部、感潮部、海中部の3水準とした。

コンクリートの引張強度試験方法 (JISA 1113) と同一の方法で供試体を半割りさせて、埋設 PC 鋼棒を取り出し外観を調査した。特に5年試験については展開図を作成した。

(4) レジンコンクリート中に埋設した PC 鋼棒の付着力試験

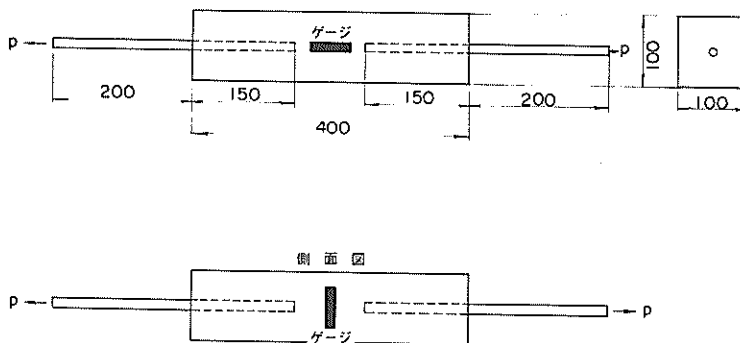
供試体は図-8 に示すように 10cm×10cm×40cm の角柱供試体である。供試体中央には、PC 鋼棒 (異形 PC 鋼棒 2 種、呼び径 11mm) を埋設した。レジンコンクリート結合材としてはフタル酸系のみを用い、また暴露条件は感潮部のみとした。

アムスラー 100 t 万能試験機により PC 鋼棒の両端を引張り、その破壊荷重により付着力を検討することを試みた。また、5年試験については、図-8 に示すように供試体中央にワイヤストレンゲージを貼付し、引張ヤング係数を求めた。



(単位: mm)

図-7 埋設 PC 鋼棒腐食試験用供試体



注. ゲージはゲージ長 60 mm のワイヤストレンゲージである。

図-8 付着力試験用供試体

#### 4.2 複合材の曲げ強度試験

供試体は5cm×10cm×40cmの角柱供試体とし、図-9に示すように、レジンコンクリート下面に補強材として厚さ5mmのFRPを貼付したものである。レジンコンクリート結合材としてはフタル酸系のみを用い、また暴露条件

は感潮部のみとした。

200t耐圧試験機を用い図-9に示す要領で3等分載荷を行ない、同時にワイヤストレインゲージにより曲げ剛性を求めた。

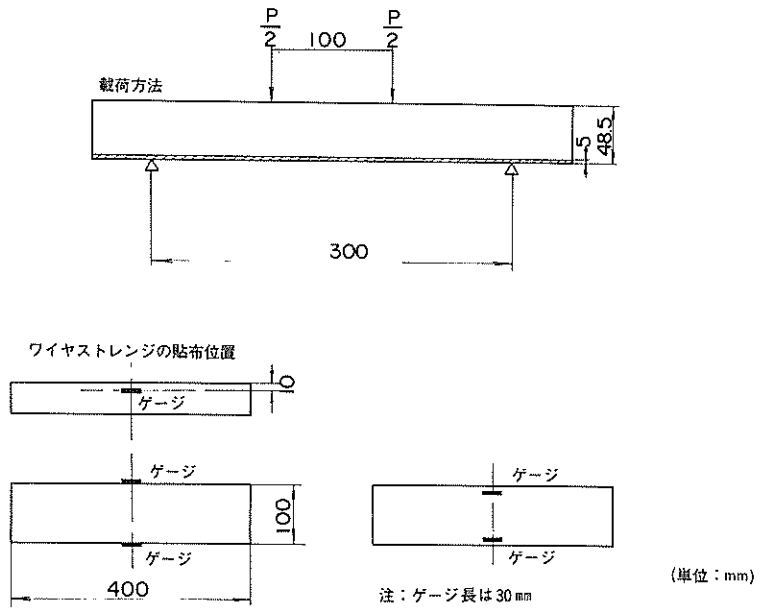


図-9 複合材曲げ強度試験方法

## 5. 試験結果

### 5.1 圧縮強度およびヤング係数

#### (1) 圧縮強度の経年変化

試験結果を暴露条件別に整理すると次のとおりである。陸上部について結合材別に示すと図-10のようになる。これによれば、バラツキはあるものの材令5年までの段階では、強度低下はほとんどないと思われる。

感潮部については(図-11参照)材令3ヶ月において若干強度の強加が認められるが、その後は材令の増加と共に強度が減少する傾向が認められる。材令1ヶ月の強度を基準として材令5年での強度低下率を求めると、フ

タル酸系で23%、イソフタル酸系で18%、フタル酸系+シランで13%であった。

海中部については(図-12参照)いずれの結合材においても若干の強度低下を示した。強度自体については、フタル酸系+シランが他の結合材に比べて2割程度低いことが注目される。

上述した結果から、圧縮強度の経年変化の傾向は、結合材の種類による相違は少ないようである。暴露条件の影響に関しては、陸上部では圧縮強度の経年変化はほとんどなく、感潮部で10~20%の低下を示し、海中部では数%の低下を示した。

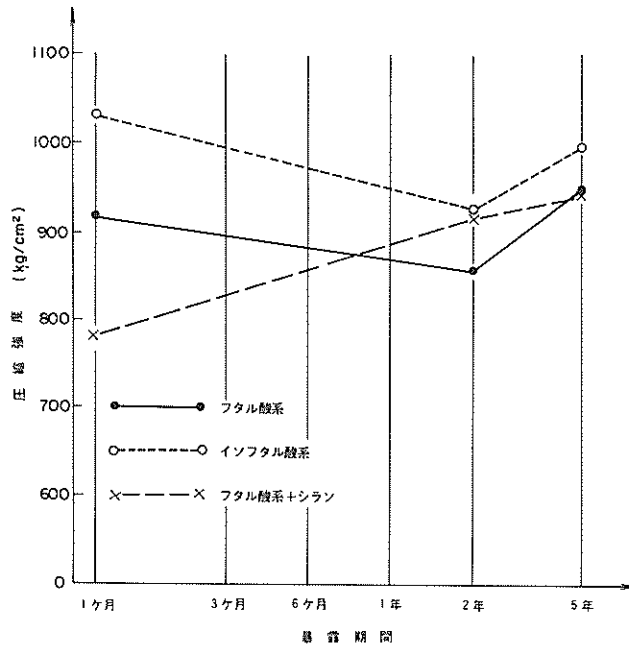


図-10 圧縮強度の陸上部における経年変化

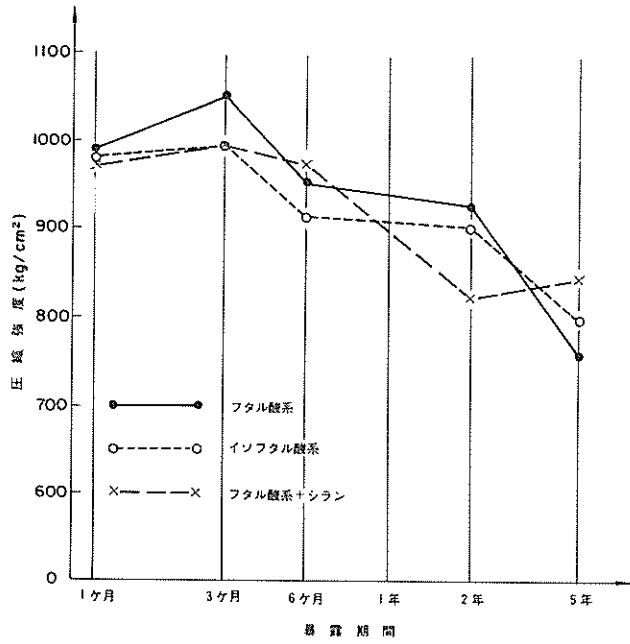


図-11 圧縮強度の感潮部における経年変化

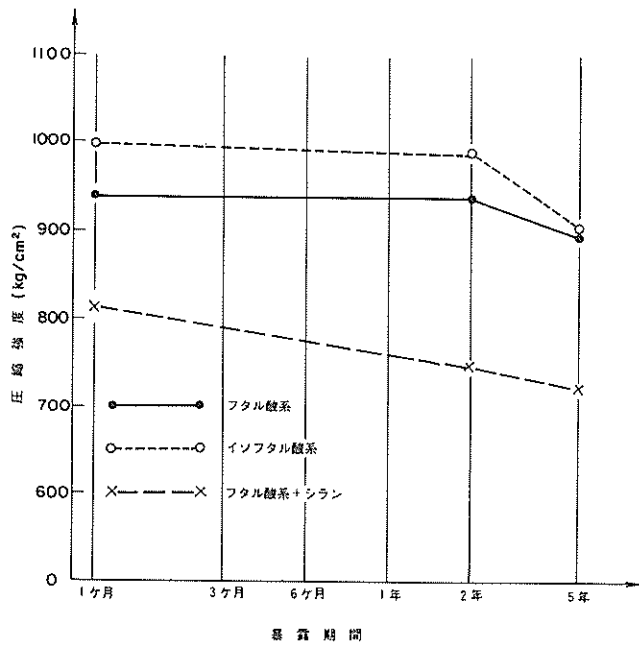


図-12 圧縮強度の海中部における経年変化

(2) ヤング係数の経年変化

表-4は、ヤング係数の測定結果を示したものである。なお、ヤング係数としては圧縮強度の $\frac{1}{2}$ の応力度における値 ( $E_{\frac{1}{2}}$ ) を用いた。測定したデータが、暴露条件、材令、結合材別に1回であり、明確な傾向は把握で

きないが、材令5年におけるヤング係数は、ほぼ  $20 \times 10^4 \sim 24 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$  の範囲となり、5年間におけるヤング係数の経年変化はほとんどないと判断される。なお、図-13に感潮部に暴露したフタル酸系の応力-ひずみ曲線の1例を示す。

表-4 ヤング係数の経年変化

( $\times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ )

浸漬期間	フタル酸系			イソフタル酸系			フタル酸系+シラン		
	陸上部	感潮部	海中部	陸上部	感潮部	海中部	陸上部	感潮部	海中部
1 か月	16.9	21.8	24.2	27.3	25.8	28.7	25.5	32.6	23.9
3 か月	—	27.5	—	—	28.3	—	—	26.8	—
6 か月	—	24.9	—	—	25.7	—	—	24.8	—
2 年	18.1	23.9	13.3	18.7	23.2	22.9	17.8	21.8	13.8
5 年	23.8	23.6	21.9	22.6	19.8	21.5	24.0	21.2	19.9

注：試験本数は各々1本である。

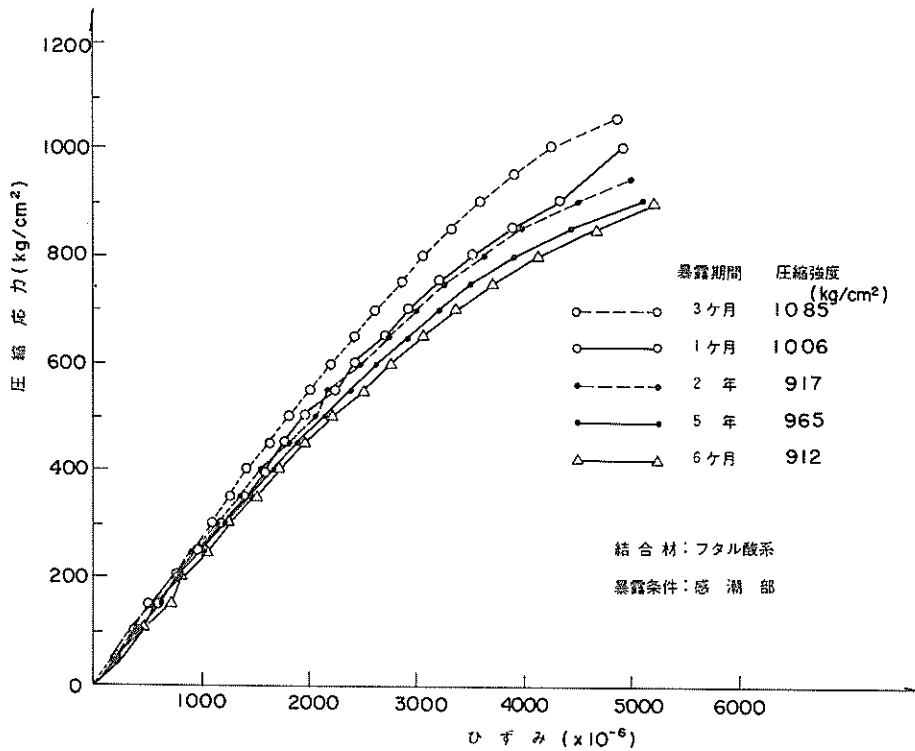


図-13 応力-ひずみ曲線の1例

### (3) ボアソン比および破壊性状

ヤング係数測定と同時にボアソン比を測定したが、経年変化の傾向は捉えることができなかった。値としては、ほぼ0.2～0.3の範囲であった。

破壊性状は、高強度のセメントコンクリートと同様に、本耐圧試験機においてはかなり急激な破壊を示し、破片が半径2 m程度に飛散した。また、ひびわれは骨材内部を通過しており、破壊は骨材より開始したものと思われる。

## 5.2 曲げ強度および曲げ剛性

### (1) 曲げ強度の経年変化

曲げ強度試験結果を暴露条件別に整理すると以下の通りである。

陸上部について結合材別に示すと図-14のようになるこれによると、いずれも材令と共に強度が低下しており、材令5年における強度は材令1か月の強度に比べて14～16%低下している。

感潮部については(図-15参照)インフタル酸系およびフタル酸系+シランの材令1か月における強度がフタル酸系に比較して40%近く低いのが注目されるが、材令3か月、材令6か月となるにつれて3種とも同様の傾向を示す。その場合の強度の低下は激しく、材令3か月から材令5年までの低下率はフタル酸系30%、インフタル酸系17%、フタル酸系+シラン46%であった。

海中部については(図-16参照)、バラツキはあるものの、陸上部と感潮部との中間程度の強度低下を示し、材令1か月から材令5年までの低下率は24～30%であった。

結合材別には、いずれも似たような傾向を示しているが、強度としては材令2年または5年において、フタル酸系海中部、フタル酸系+シランの感潮部、海中部が比較的小さく、その点インフタル酸系が良好であった。

また、シランカップリング剤の効果は認められなかった。

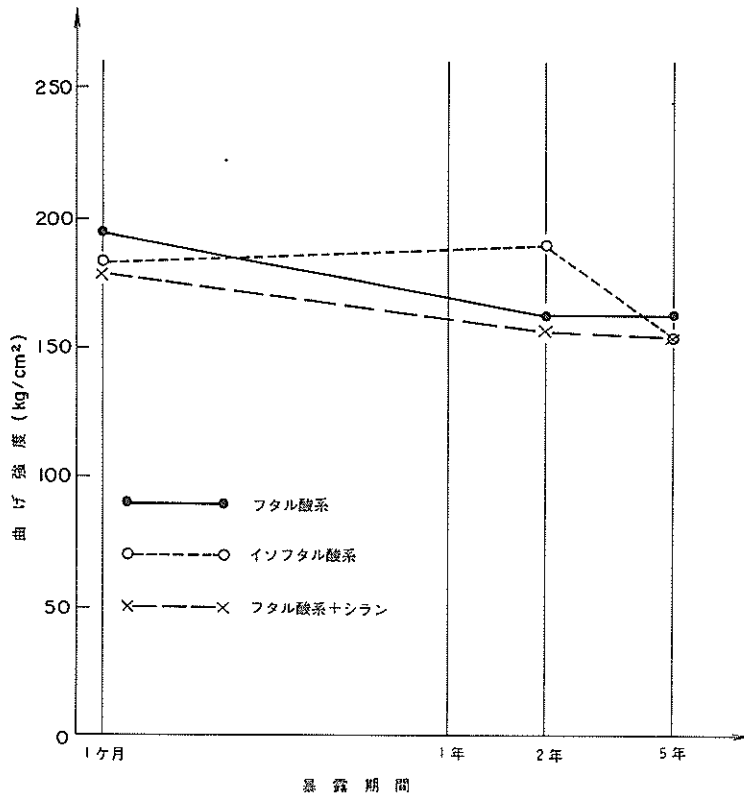


図-14 曲げ強度の陸上部における経年変化



(2) 曲げ剛性の経年変化

曲げ強度試験と同時に、供試体の引張側、圧縮側に各々2枚計4枚のコイヤストレインゲージを貼布し、曲げ剛性を求めた。曲げ剛性としては、破壊荷重の $y$ におけるものとし、ひずみ $\epsilon$ として4枚のゲージの平均値を

とり、 $EI = M \cdot y / \epsilon$ より算出した。実験結果を表-5に示す。これによれば、曲げ強度経年変化と同様に曲げ剛性においても、イソフタル酸系の経年変化は比較的少ないことが認められる。フタル酸系は、陸上部においては経年変化は少ないが、感潮部、海中部における経年変

表-5 曲げ剛性の経年変化

( $\times 10^7 \text{kg} \cdot \text{cm}^2$ )

浸漬期間	フタル酸系			イソフタル酸系			フタル酸系+シラン		
	陸上部	感潮部	海中部	陸上部	感潮部	海中部	陸上部	感潮部	海中部
1 か月	30.3	27.4	23.5	21.5	—	24.3	25.9	21.7	26.3
3 か月	—	23.8	—	—	23.5	—	—	25.6	—
6 か月	—	19.8	—	—	21.2	—	—	23.2	—
2 年	24.1	21.1	13.5	14.6	—	24.2	22.8	24.2	24.1
5 年	23.5	19.4	12.4	25.4	22.2	22.6	16.4	20.2	13.7

注：試験本数は各々1本である。

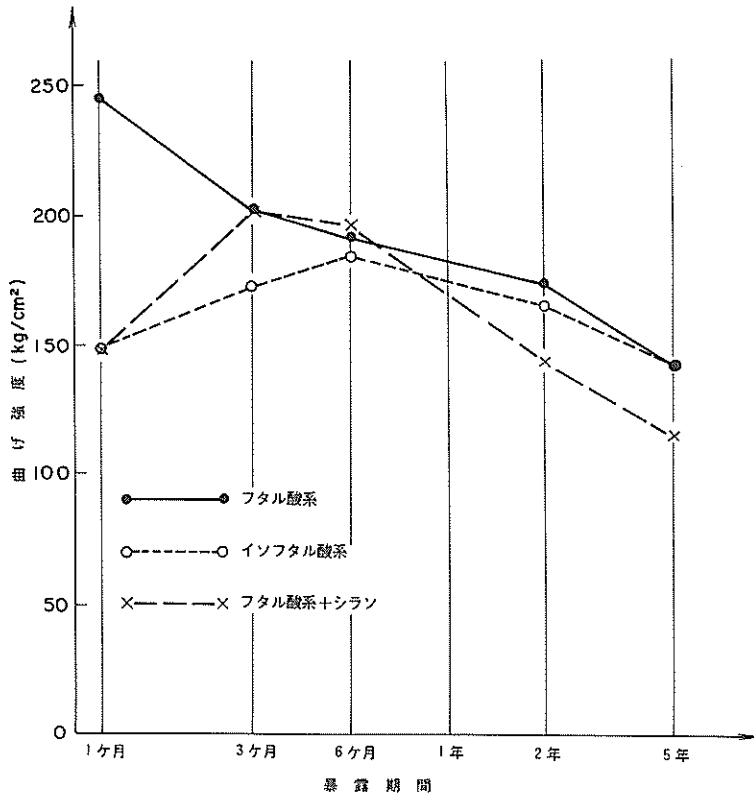


図-15 曲げ強度の感潮部における経年変化

化は著るしい。フタル酸系+シランは、材令2年から材令5年にかけての曲げ剛性の変化は陸上部および海中部において著るしく、フタル酸系と比較し、シランカップリング剤の効果は認められなかった。

### 5.3 埋設PC鋼棒の腐食

φ10cm×20cmの円柱供試体に埋設したPC鋼棒は、材令6か月では全く腐食が認められなかった。しかし、材令2年においては、表-6に示すように、キャッピング上面よりレジンコンクリート内部に向かって腐食が進行していた。なお、腐食長とは供試体上面キャッピング面よりのPC鋼棒の腐食した長さを表わしている。

材令5年の時点では、図17~19に示すような腐食が観察された。この図よりおよびその傾向としては、感潮部の腐食がもっとも大きいと思われる。

表-6 材令2年における埋設PC鋼棒の腐食

浸漬条件	供試体	腐食長
陸上部	M-22	2本 3cm
	M-23	2本 3cm
	M-24	2本 5.5cm
感潮部	M-10	1本 1cm
	M-11	2本 2.5cm
	M-12	2本 7.5cm
	M-13	2本 2cm
	M-14	2本 3.5cm
	M-15	2本 4cm
海中試	M-34	1本 9cm
	M-35	1本 5.5cm
	M-36	1本 5cm

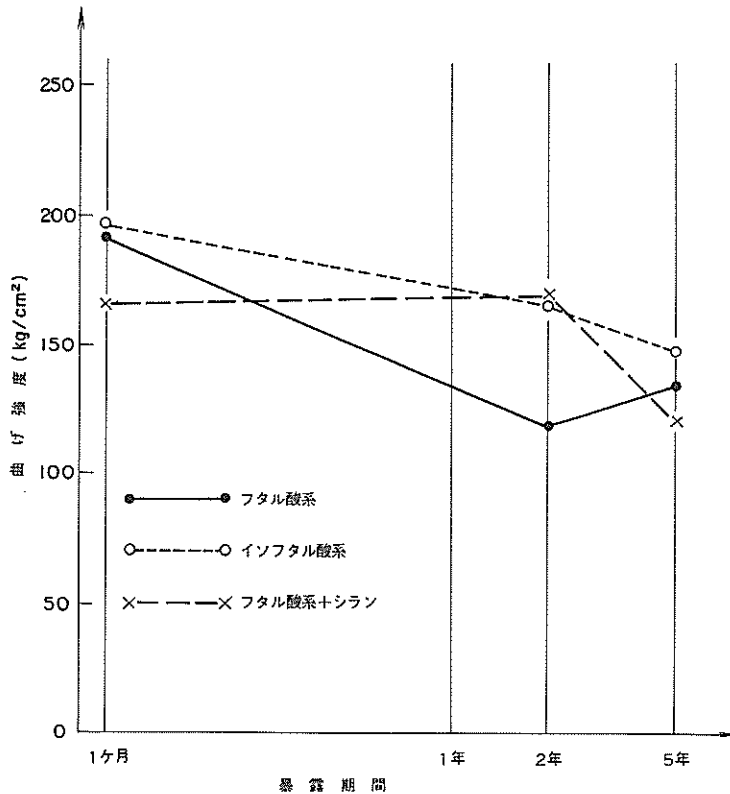
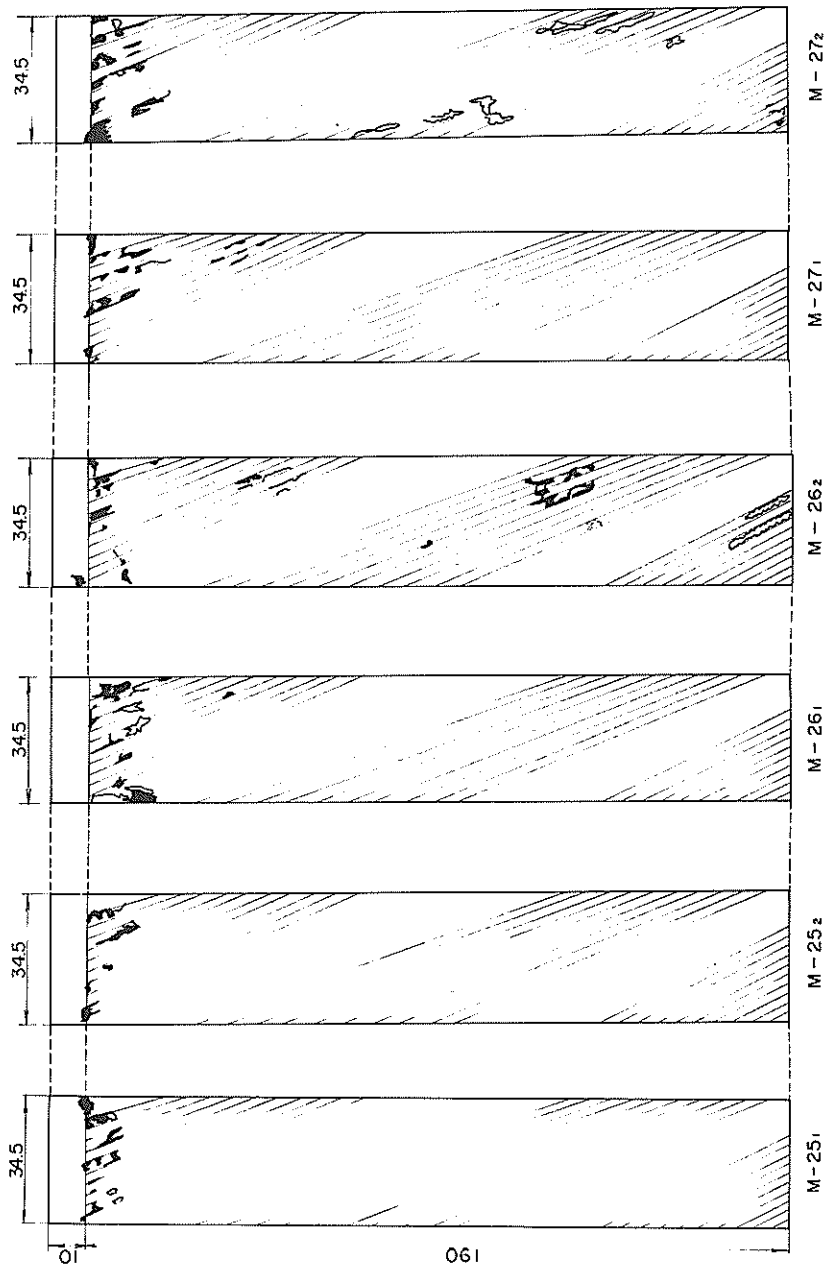


図-16 曲げ強度の海中部における経年変化



○ うすいまび  
 ◻ 浮きさび  
 △ うすい点食  
 埋設PC鋼材  
 呼び径 11 mm  
 異形PC鋼棒2環使用  
 (単位: mm)

図一17 材令5年における埋設PC鋼材の腐食状況 (陸上部)

190  
 061  
 埋設部—コンクリート

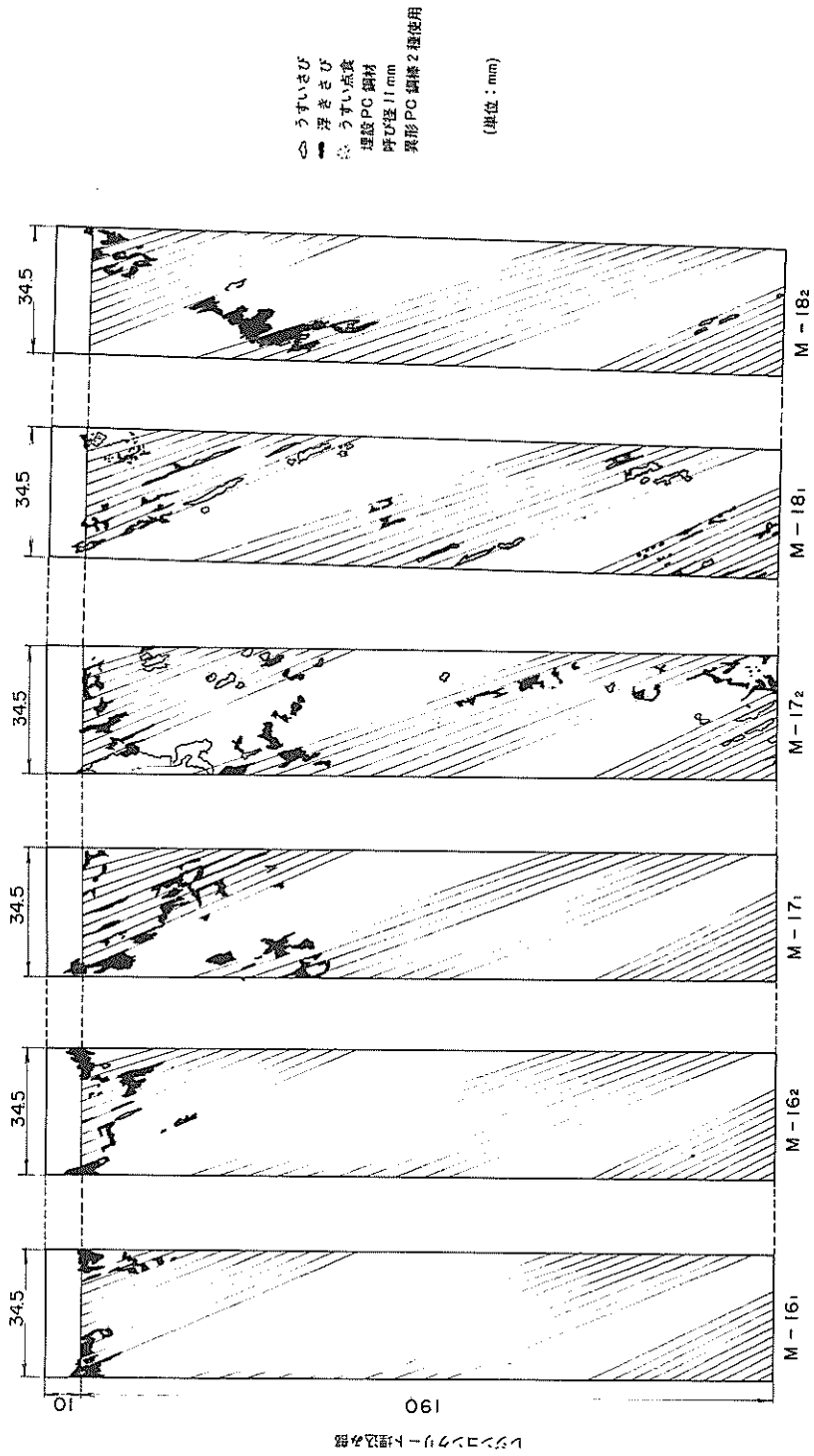


図-18 材令5年における埋設PC鋼材の腐食状況(感潮部)

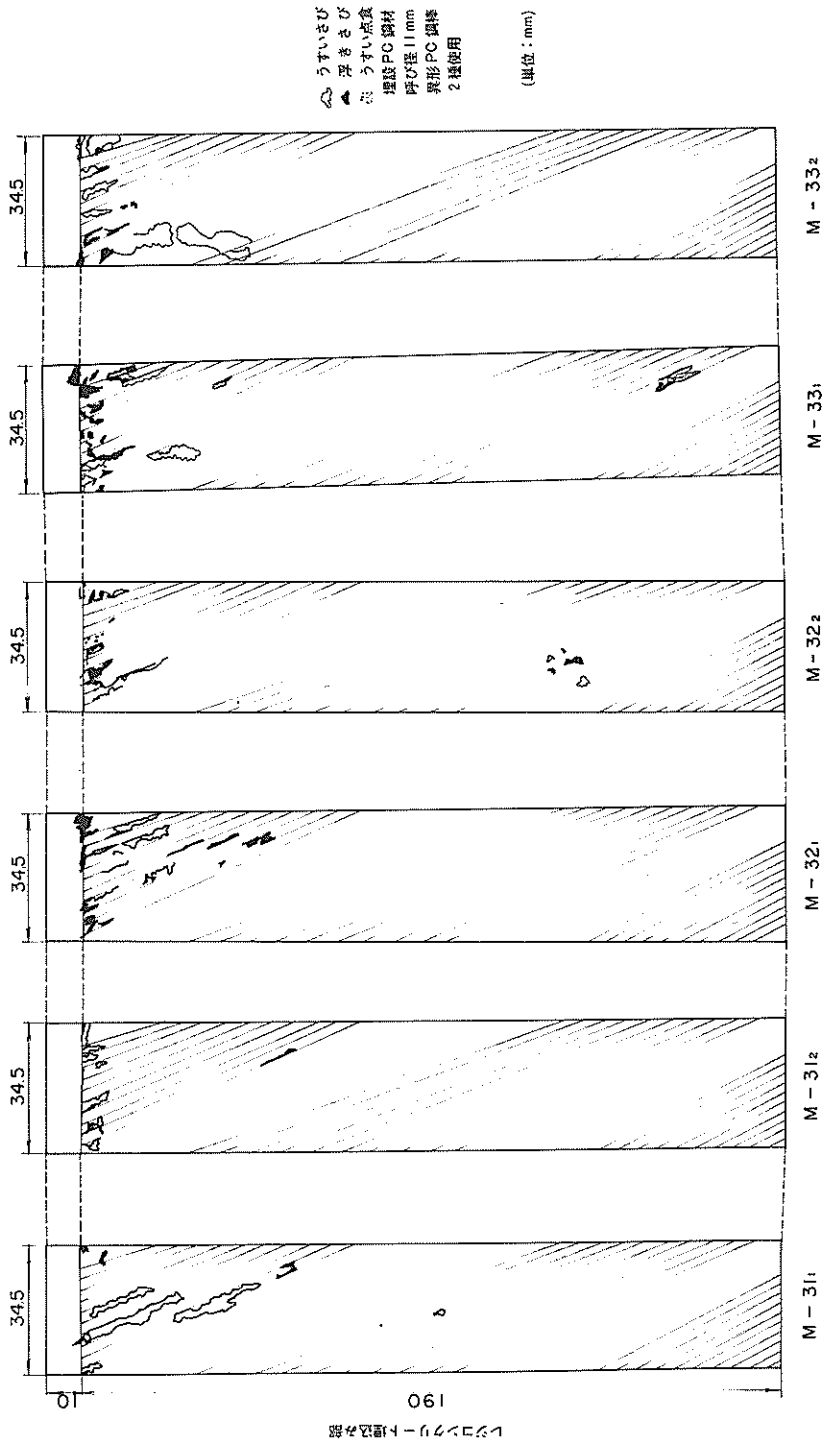


図-19 材令5年における埋設PC鋼材の腐食状況(海中部)

#### 5.4 付着力の経年変化

レジンコンクリートをPC鋼棒、FRP等との複合材として用いる場合、重要な問題の1つとして付着力が挙げられる。本試験では、図-8に示すような方法で試験を行なった。この場合、表-7に示すような種々の破壊性状を示した。破壊荷重および計算上の付着応力は理論的な意味はないが、この表より概略の傾向を述べる事ができる。

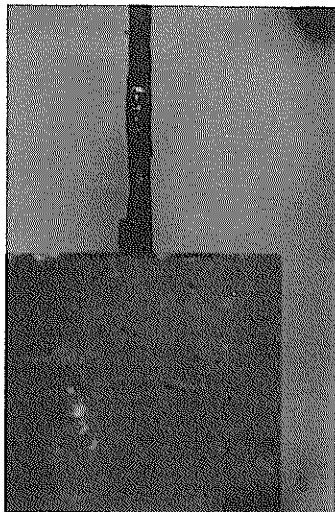
すなわち、感潮部において材令6か月までは、付着力がレジンコンクリートの引張強度などに比較しまさっており、材令2年以上になると低下すると思われる。この

付着力の低下はレジンコンクリートに埋設されたPC鋼棒が供試体の上層部分において腐食したことによるものであって付着力の総合的な評価は、このデータからは難しいと思われる。特に、材令5年においては、レジンコンクリートの破壊前に埋設PC鋼棒が引き抜けたが、その抜き出た部分は写真-1に示すように、かなりの腐食を示していることが認められた。また、ワイヤストレーンゲージによる荷重-ひずみ曲線の1例を図-20に示した。本図中に示したように、破壊荷重の $\frac{1}{3}$ におけるレジンコンクリートの引張りヤング係数 $E_{\frac{1}{3}}$ は $20.7 \times 10^4$  kg/cm<sup>2</sup>であり、圧縮ヤング係数を若干下廻る値であった。

表-7 付着力試験による破壊荷重及び破壊状況

暴露条件	暴露期間	平均破壊荷重 (t)	平均付着応力 (kg/cm <sup>2</sup> )	破壊状況
感潮部	1 か月	4.26	82.2	コンクリートはくり
	3 か月	8.20	160.7	コンクリートはくり
	6 か月	9.46	183.5	供試体中央引張破壊
	2 年	4.43	85.6	付着部破壊
	5 年	3.86	74.6	PC鋼棒が引抜け、コンクリートにひびわれの後、破壊。
陸上部	1 か月	5.09	98.3	コンクリートはくり

注：数値は供試体3本の平均値  
ただし感潮部2年のみ6本の平均値である。



付着力試験により引抜けた埋設PC鋼棒断面変化が認められる。  
腐食位置

写真-1 付着力試験供試体の埋設PC鋼棒腐食状況

#### 5.5 複合材としての曲げ強度

破壊荷重の試験結果を表-8に示す。破壊形式は図-21に示すようなレジンコンクリートでのせん断破壊をおこし、単純な比較はできないが、同一形状のレジンコン

表-8 複合材の破壊荷重 (t)

暴露期間	陸上部	感潮部	海中部
1 か月	10.5	10.9	10.4
3 か月	—	10.6	—
6 か月	—	8.5	—
2 年	8.7	9.2	8.3
5 年	9.7	9.6	7.0

注：数値は供試体3本の平均値。  
ただし感潮部1か月と2年のみ6本の平均値である。

クリートに比較し約5倍破壊荷重が大きくなっている。また、材令5年の範囲では、複合材の破壊荷重の低下はレジンコンクリートの曲げ強度の低下に比べてかなり小さく、海中部において若干低下しているのが認められる程度である。

次に、図-22に示す計算方法で弾性範囲における曲げ

剛性を求めたが、その値は、断面2次モーメントにレジンコンクリートのヤング係数を乗じたものにほぼ等しい。また、その経年変化はレジンコンクリートの曲げ剛性の変化に比べるとかなり少ないことが認められるが、海中部での低下が顕著であった。

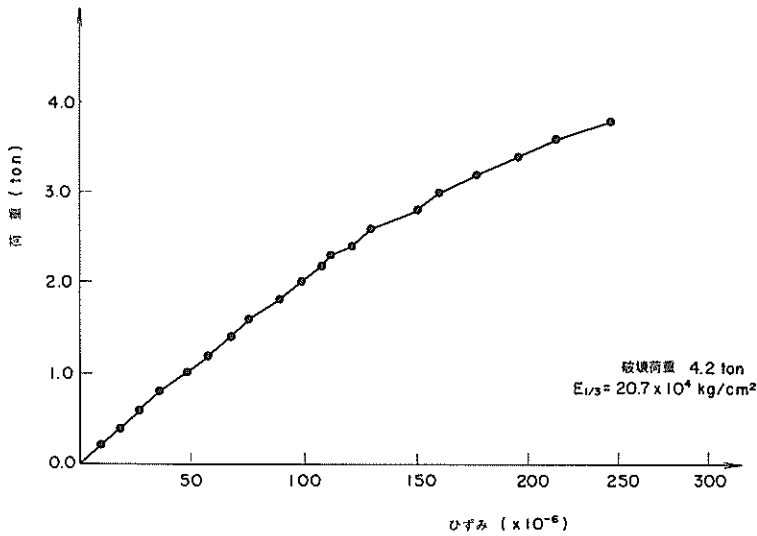
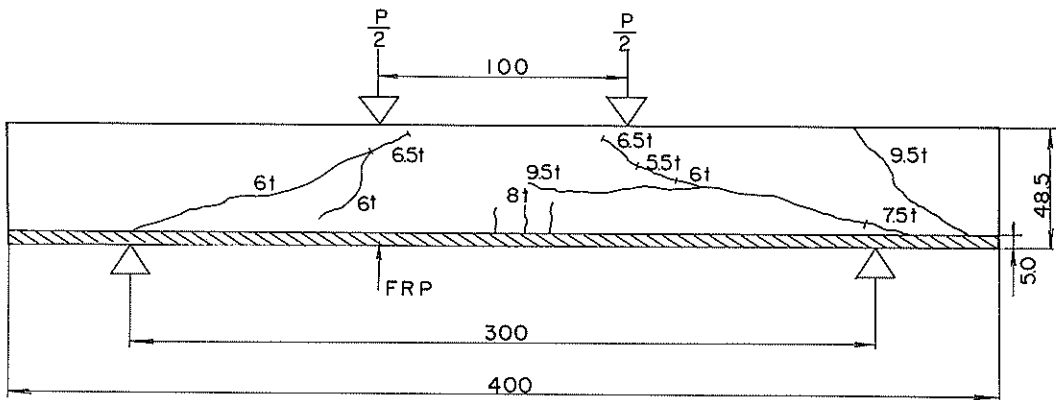


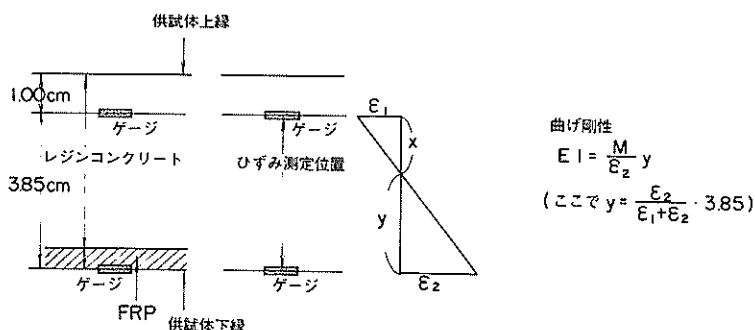
図-20 レジンコンクリート引張試験における荷重-ひずみ曲線



(感潮部：暴露期間6ヶ月、破壊荷重：9.50 t)

(単位：mm)

図-21 複合材の破壊性状



図一22 複合材における曲げ剛性の計算法

## 6. 考 察

### (1) レジンコンクリート強度の経年変化について

本試験におけるレジンコンクリート強度変化の一般的な傾向として、材令2年、材令5年となるにつれて圧縮強度、曲げ強度ともに強度低下を示している。特に、曲げ強度の低下が大きく、陸上部、海中部、感潮部の順に大きくなる傾向が認められる。これより、一般に言われている海中部での加水分解による劣化<sup>3)</sup>のほか、感潮部での乾湿の繰り返しの影響等も大きいことが認められる。

一方、ノルウェーにおいて実施されたセメントコンクリートの長期耐海水性試験（海中部）結果<sup>4)</sup>によると、セメントコンクリートは材令5年では、ほとんど圧縮強度および曲げ強度の低下は認められないようである。このようにレジンコンクリートにおいては、海中部に暴露した供試体の強度の低下は、セメントコンクリートに比較して早い材令から生ずるものようである。これは、セメントの水和反応が比較的早期にわたるのに対し、不飽和ポリエステル樹脂の反応が比較的早期に終る事を考えると当然ではある。

また、材令5年における材令1か月に対する圧縮強度の低下率の平均は6%であるのに対し曲げ強度の低下率の平均は22%であった。レジンペーストの圧縮強度は骨材の圧縮強度より大きく、また、破壊したレジンコンクリートではひびわれが骨材内部を通過していることより、レジンコンクリートの圧縮強度は、骨材の圧縮強度によって支配されると考えられること、および、曲げ強度はレジンペーストと骨材との界面性状により決定されると考えれば、次のように説明される。すなわち、骨材強度の経年変化はほとんどないと考えられるので、骨材強度に支配される圧縮強度の経年変化は少ないが、曲げ強度は、レジンペーストさらには樹脂自体の経年変化の影響および欠陥の影響を直授受けるので、経年変化は大きく

なると考えられる。

### (2) 結合材の相違による耐海水性

(1)で述べたように、結合材の種別が圧縮強度あるいはヤング係数に及ぼす影響は、曲げ強度あるいは曲げ剛性に及ぼす影響に比較して小さい。したがって、ここでは、曲げ強度、曲げ剛性の経年変化を中心として考察を加えた。

総合的に考えると、イソフタル酸系の曲げ強度、曲げ剛性経年変化は比較的小さい。特に曲げ剛性についてはフタル酸系およびフタル酸系+シランでは、イソフタル酸系に比べ海中部において低下が著るしいようである。

### (3) 埋設PC鋼棒の腐食について

材令2年までの観察では、レジンコンクリートの側面あるいは下面から進行した腐食はなく、レジンコンクリートの水密性の良さを裏づけた。ただし、材令2年においては、キャッピング面とPC鋼棒との間隙より腐食が進行していた。材令5年では、間隙より進行した腐食とは別に、側面あるいは下面より浸透した海水等によって腐食したと思われる箇所が観察された。それらの大部分は点食であるが、まれに浮き錆も観察された。また、レジンコンクリートにはセメントコンクリートのようにアルカリ雰囲気によって埋設PC鋼棒あるいは鉄筋等を保護するという作用はないので、レジンコンクリートとPC鋼棒あるいは鉄筋との複合材のひびわれ安全率はセメントコンクリートよりも大きな値とすることが必要であろう。このような観点に立てば、レジンコンクリートのひびわれを押えるためにFRP等の補強材を利用して耐海水性にすぐれた材料とすることは効果的と考えられる。

### (4) FRPの補強効果

本試験における複合材の破壊性状は以下の通りである。下縁に生ずる曲げ引張応力がレジンコンクリートの曲げ引張強度を若干上回った段階で、下縁に曲げひびわれが発生する。この後、荷重-ひずみ曲線の傾きは減少、すなわち、曲げ剛性が低下する。さらに荷重を増加させる



と、せん断スパン中立軸近傍にせん断ひびわれが発生し、曲げ剛性はさらに低下する。せん断ひびわれが発生した時点では破壊せず、さらに荷重を増加させると、スタールップがないにもかかわらず、比較的延性的なせん断破壊を示した。なお、図-23に荷重-ひずみ曲線の1例を示す。

せん断破壊の場合、骨材のかみ合い効果、あるいは、ひびわれが骨材内部を通過している事から、破壊は骨材の強度に大きく影響される。このため、圧縮強度と同様に、複合材の破壊荷重の経年変化は比較的少ないと考えられる。このように破壊性状がせん断破壊であるため、破壊荷重の経年変化が小さいと考えられる。

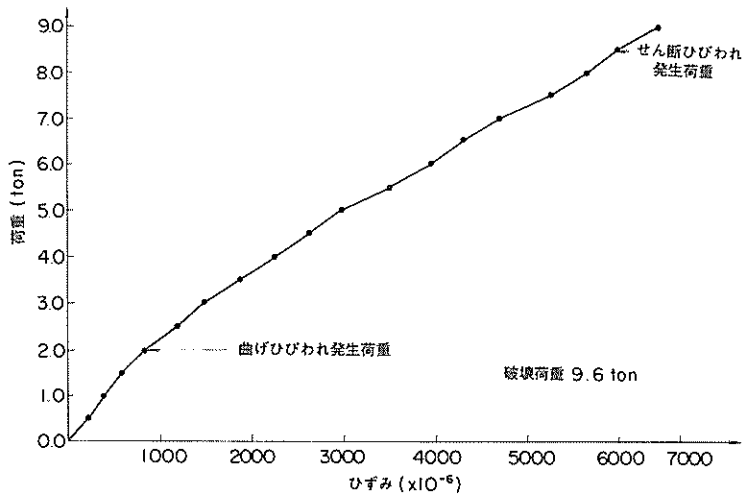


図-23 複合材における荷重-ひずみ曲線 (下線ひずみ)

## 7. 結 論

レジンコンクリートの耐海水性を材令5年までという期間で述べた。供試体数が少なく、また期間も耐海水性を論ずるに十分といったものではないが、次のような結論が言えよう。

- (1) レジンコンクリートの劣化は、陸上部、海中部、感潮部の順に大きくなる傾向が認められる。
  - (2) レジンコンクリートの劣化は、曲げ強度および曲げ剛性に顕著に表われる。
  - (3) イソフタル酸系の耐海水性がオルソフタル酸系に比べて比較的優れている。
  - (4) シランカップリング剤の効果は、ほとんど認められない。
  - (5) レジンコンクリートに埋設したPC鋼棒は、かぶり1cmのときには材令5年では点食が認められる。
- このように、レジンコンクリートの耐海水性には問題点はあるが、レジンコンクリートはセメントコンクリー

トに比べて多くの利点を有しており、今後の研究により、海洋構造物材料として使用されることを期待する。

## 参 考 文 献

- 1) 村橋 俊介他：プラスチックハンドブック 朝倉書店 1966年7月 pp. 212～221
- 2) 温泉地におけるレジンコンクリートパイルの適用性に関する報告書、ユニック社資料、1971年。
- 3) 井上 貞弘：プラスチックコンクリートの耐久性、コンクリートジャーナル、Vol. 11, No. 4, 1973年4月号, pp. 60～67
- 4) Gjorv, O. E: Long-time durability of Concrete in seawater, ACIJournal. Vol. 68, No. 1, Jan, 1971, pp. 60～67

港 湾 技 研 資 料      No. 275

1977・9

編集兼発行人      運輸省港湾技術研究所

発 行 所      港 湾 技 術 研 究 所  
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印 刷 所      阿部写真印刷株式会社