

運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 29 NO. 4 DEC. 1990

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第29巻 第4号 (Vol. 29, No. 4) 1990年12月 (Dec. 1990)

目 次 (CONTENTS)

1. Field and Laboratory Measurements of Shear Modulus Profile in Seabed
.....Mohsen BADIEY, Kouki ZEN, Hiroyuki YAMAZAKI and Hideo SUZUKI... 3~ 26
(海底地盤の剛性率に関する現地および室内実験
.....モーセン・バティ・善 功企・山崎浩之・鈴木英男)
2. Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility
.....Susumu IAI, Yasuo MATSUNAGA and Tomohiro KAMEOKA... 27~ 56
(ひずみ空間における塑性論に基づくサイクリックモビリティのモデル
.....井合 進・松永康男・亀岡知弘)
3. Parameter Identification for a Cyclic Mobility Model
.....Susumu IAI, Yasuo MATSUNAGA and Tomohiro KAMEOKA... 57~ 83
(サイクリックモビリティのモデルのパラメータの同定
.....井合 進・松永康男・亀岡知弘)
4. ハイブリッドパラメータ法による波浪推算モデル (第1報)
—東京湾における検討—
.....永井紀彦・後藤智明・小舟浩治... 85~118
(Wave Hindcast Model Using the Hybrid-parameter Method (1st report)
—Application to the Tokyo Bay—
.....Toshihiko NAGAI, Chiaki GOTO and Koji KOBUNE)
5. 鋼—コンクリート接合ハイブリッド部材の海洋環境下における耐久性
.....濱田秀則・福手 勤・阿部正美...119~164
(Durability of Steel-Concrete Composite Hybrid Members in Marine Environments
.....Hidenori HAMADA, Tutomu FUKUTE and Masami ABE)

5. 鋼—コンクリート接合ハイブリッド部材の 海洋環境下における耐久性

濱田秀則*・福手 勤**・阿部正美***

要 旨

鋼板とコンクリートを接合したハイブリッド部材の海洋環境下における耐久性を検討した。特に鋼板の腐食の特性を把握することを目的として、基本的ハイブリッド供試体の暴露試験ならびに既存構造物の調査を実施した。また、それに加えて各種防食対策の有効性についても検討した。以上の実験、調査より以下に示すことがわかった。

1. ハイブリッド部材の劣化はその鋼材の腐食が主因であり、それに伴いコンクリートのひびわれへとつながる場合もある。
2. ハイブリッド部材の腐食速度と鋼材のみの場合の腐食速度はほぼ同等の値である。
3. 海中部に位置する部材に対しては電気防食は有効である。
4. 鋼板への防食塗装は、使用する塗装材料によりその効果に差があるものの、その効果が認められる。

キーワード：ハイブリッド部材，耐久性，暴露試験，腐食，防食，電気防食

*材料研究室
**材料研究室長
***構造部主任研究官

5. Durability of Steel-Concrete Composite Hybrid Members in Marine Environments

Hidenori HAMADA*

Tsutomu FUKUTE**

Masami ABE***

Synopsis

Durability of Steel-concrete composite Hybrid members in marine environments is investigated. In order to gather data on corrosion characteristics of steel plates, exposure tests of elemental Hybrid beam specimens in marine environments and field corrosion survey of actual structure are carried out. From these studies, the following results are obtained;

1. The main cause of the deterioration of Hybrid members is corrosion of steel plates. This corrosion of plates causes cracks in concrete occasionally.
2. The typical corrosion rates of steel plates of Hybrid members are nearly equal to them of steel pipe piles or sheet piles investigated formerly.
3. The cathodic protection is effective for the members in the submerged zone.
4. Anti-corrosive paintings are effective, however the effectiveness varies depending on the kinds of painting materials.

Key words : Hybrid member, Durability, Exposure test, Corrosion, Cathodic protection

*Member of Materials Laboratory, Structures Division

**Chief of Materials Laboratory, Structures Division

***Senior Research Engineer, Structures Division

目 次

要 旨	119
1. ま え が き	123
2. 研究概要ならびに本文の構成	123
3. 部材の暴露試験 I —部材の基本的劣化性状の把握を目的とする試験—	125
4. 部材の暴露試験 II —鋼材部の腐食特性の把握を目的とする試験—	133
5. 部材の暴露試験 III —鋼材部が直接海洋環境に触れない場合の腐食特性の把握を目的とする試験—	146
6. 実構造物調査	150
7. 鋼材部の腐食防止対策に関する試験 —防錆塗装, 電気防食—	153
8. 鋼材の腐食速度に関する考察	159
9. 結 論	159
10. あ と が き	160
参 考 文 献	160
付図-1 鋼板のコンクリートとの接着面の状況	161
付図-2 暴露後の鋼板の内部の状況と残存肉厚 (暴露 1.5 年後)	163
付図-3 暴露後の鋼板の内部の状況と残存肉厚 (暴露 2 年後)	164

1. まえがき

鋼板とコンクリートを一体化（サンドイッチ構造）した合成部材、いわゆるハイブリッド部材はこれまで陸上構造物で多く採用されてきた。しかし、最近ではこれを港湾構造物へ適用していくことが考えられている。図-1にハイブリッド部材を用いた港湾構造物の一例を示す。また、沈埋トンネル、浮き桟橋といった構造物に当部材を使用することが既に計画されている。ハイブリッド部材の力学特性に関する研究は、ここ数年来当研究所においても実施されてきており、設計法等に資するデータはかなり蓄積されてきている^{1),2),3)}。しかしながら、港湾構造物のみならず海洋環境下で当部材を用いる場合、その鋼材の腐食が重要な問題となってくる。安全かつ高耐久性の構造物を建設するためには、その鋼材の腐食の特性を十分に把握し適切な防食対策を施すことが重要である。

海洋環境における鋼材の腐食に関しては、これまで鋼管杭、鋼矢板等に関して調査、研究が進められており、

その腐食量、腐食特性についてはかなりの知見が得られている^{4),5)}。しかし、ハイブリッド部材は鋼材とコンクリートが接合された特殊な構造であるため、腐食特性も鋼管杭等とは異なってくることも予想される。筆者等は、ハイブリッド部材の劣化特性（特に鋼材部の腐食特性）を把握するため、一連の実験ならびに調査を実施した。

本文は、これらの実験、調査の結果を踏まえ、ハイブリッド部材の劣化特性について考察し、その耐久性向上対策について取りまとめるものである。

2. 研究の概要ならびに本文の構成

まず初めに、ハイブリッド部材が海洋環境下に置かれた場合、どのような劣化性状を示すのかを把握することを目的とした部材の暴露試験を実施した。最も基本的な形状のハイブリッド部材を当研究所構内の海水循環水槽に暴露し、材令1年時にその劣化性状を試験した。この結果を3章にまとめる。

ハイブリッド部材の基本的特徴は、コンクリートと鋼

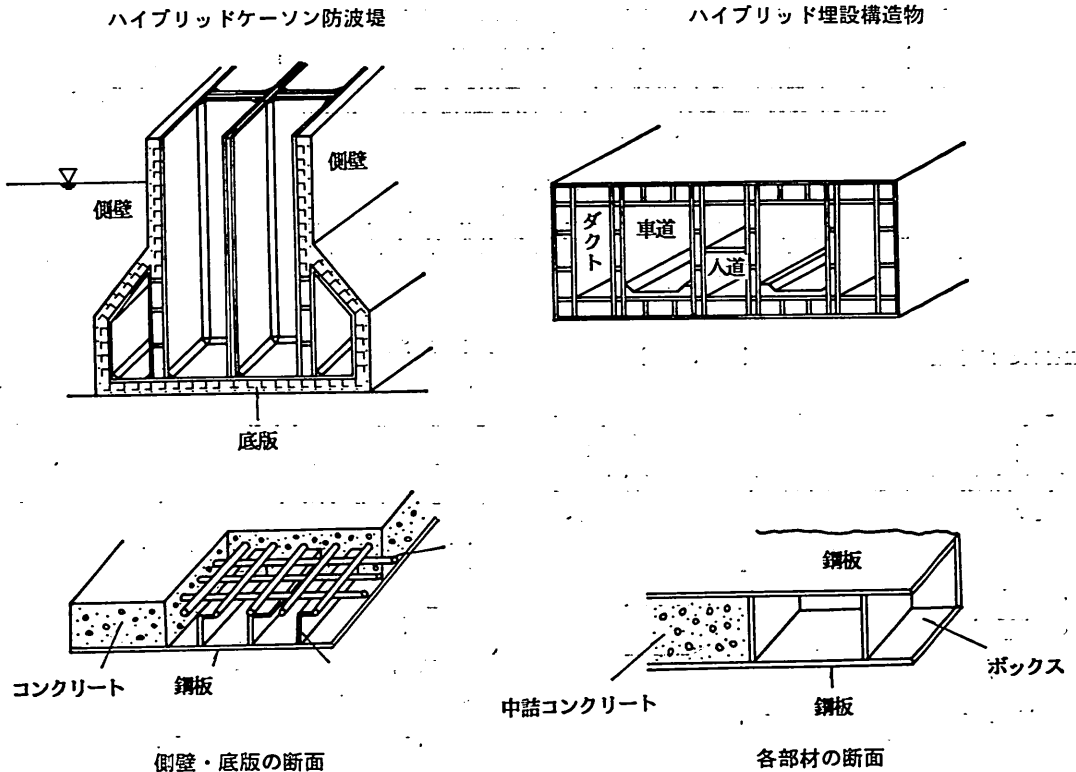


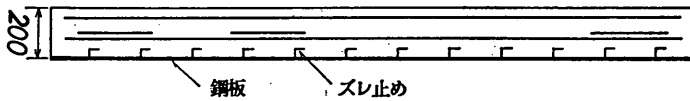
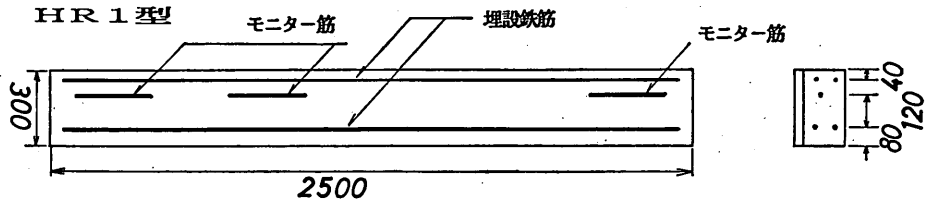
図-1 港湾構造物でのハイブリッド部材の応用例

材が接合されていることである。このために、鋼管杭、鋼矢板とはその電気化学的環境が異なるものとなる。このハイブリッド部材の特徴に起因する鋼材の腐食の特性を把握することを目的に、比較的小型のモデル供試体を

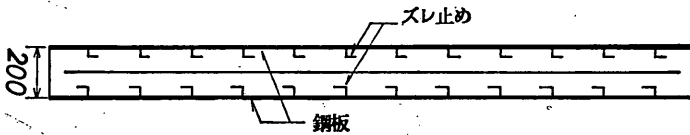
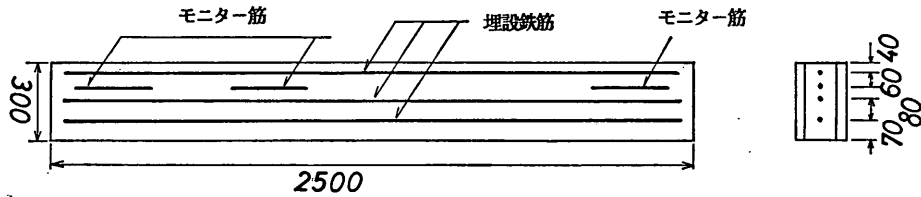
用いた暴露試験を実施した。この結果を4章にまとめる。

3章と4章ではハイブリッド部材の鋼材部が直接海洋環境に接する状態を想定して試験を実施した。しかし、

(単位: mm)

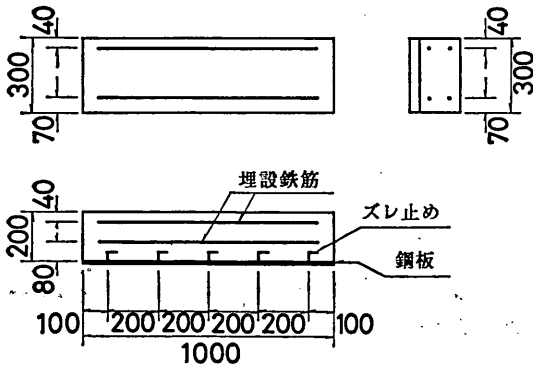


HS 1型



HR 2型

(単位: mm)



HS 2型

(単位: mm)

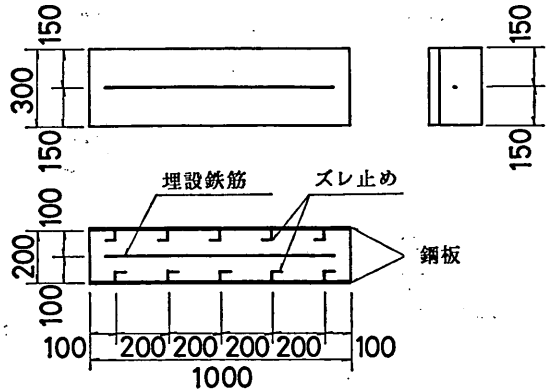


図-2 供試体概要

構造物の型式，設置される場所等の条件次第ではハイブリッド部材の鋼材部が直接海洋環境に接しない場合もある。そのような場合を想定した供試体の暴露試験を実施した。この結果を5章にまとめる。

一方，港研構内の暴露試験の場合，暴露試験を実施したとしても，種々の制約もありその暴露期間は長くて1～2年であり，鋼材の腐食傾向については有用な知見が得られるものの，腐食速度等を考察する事は難しい。また，海水循環水槽のような海洋環境シミュレーション装置と実環境とではその条件が完全に同一という訳ではない。したがって，既存構造物のうち，ハイブリッド部材とはほぼ同一条件（鋼材とコンクリートが接合したもの）のものを選び，その鋼材の腐食状況の調査を実施した。この結果を6章にまとめる。

3章から6章までの実験，調査を踏まえて，これまでに既存の鋼構造物に対して適用されている防食法のうち代表的な2種類の防食法（防食塗装，電気防食）のハイブリッド部材に対する適用性に関する実験を行った。この結果を7章にまとめる。

一連の試験および調査を通じて得られたハイブリッド部材の鋼材の腐食量を，これまでに鋼管杭，鋼矢板等の研究より得られている腐食速度と総括的に比較し，ハイブリッド部材の腐食速度について考察する。この結果を8章にまとめる。

最後に，3章から8章までの結果を総括整理して，ハイブリッド部材の劣化の特徴（鋼材部の腐食特性）および適切な耐久性向上対策（腐食防止対策）について取りまとめ，これを本文の結論とする。

3. 部材の暴露試験 I

一部材の基本的劣化性状の把握を目的とする試験—

3.1 概要

(1) 供試体

本暴露試験においては，基本的なハイブリッド部材が海洋環境下でどのような劣化性状を示すのかを把握することを目的としている。

暴露試験に用いた供試体の形状を 図-2 に示す。供試体はその型式，寸法の違いによりHR 1型，HS 1型，HR 2型，HS 2型の4型式に大別される。HR 1型とHR 2型ははりの一面が鋼板と接合されている型式のものであり，HS 1型とHS 2型ははりの向かい合う2面が鋼板と接合されている型式のものである。また，HR 1型とHS 1型は寸法が，200×300×2500mm と比較的大型の供試体であり，HR 2型とHS 2型は寸法が，

200×300×1000mm と，HR 1型，HS 1型に比べて小型の供試体である。

使用した鋼板は全供試体共通であり，ss 41 の t=10 mm である。また，図-2 に示すように，コンクリートと鋼板の接合は 200mm おきに配置されたズレ止め鋼により成されており，このズレ止め鋼として使用したL型鋼の寸法は 40×40×3mm である。また，HR 1型に4本，HS 1型に3本，HR 2型に4本，HS 2型に3本の鉄筋が供試体軸方向に埋設されている。これは，載荷試験に対する引張補強のためではなく内部鉄筋の腐食を調べるためのものである。いずれの供試体においても，埋設鉄筋は1本ずつが独立しており他の鉄筋との電気的な接続はない。また，外部鋼板との接続もない。この埋設鉄筋としては，SD30 の D16 を使用した。また，HR 1型とHS 1型には各々3本ずつSD30，D16，l=200mm の電位モニター用鉄筋が埋設されている。これは，暴露期間中経時的に電位の測定を行うためのものであり，各々の電位モニター用鉄筋には電位測定用のリード線が接続されている。

表-1 に製作，試験を行った供試体の一覧を示す。HR 1型，HS 1型がそれぞれ4体ずつ，HR 2型，HS 2型がそれぞれ4体ずつである。また，比較用として裸鋼板も2枚準備した。

表-1 供試体一覧

型式	セメント種類	暴露環境	備考
HR1	普通ポルトランドセメント	飛沫部	2体
	高炉B種セメント	〃	2体
HS1	普通ポルトランドセメント	飛沫部	2体
	高炉B種セメント	〃	2体
HR2	普通ポルトランドセメント	〃	4体
	〃	海中部	
	高炉B種セメント	飛沫部	
HS2	〃	海中部	4体
	普通ポルトランドセメント	飛沫部	
	〃	海中部	
	高炉B種セメント	飛沫部	
裸	〃	海中部	4体
	鋼材	飛沫部	
	〃	〃	2枚

(2) コンクリート用使用材料およびその配合

コンクリートの製作に使用したセメントは普通ポルトランドセメントと高炉B種セメントである。使用したセ

表-2 セメントの試験成績

	比重	比表面積 (cm ² /g)	凝 結			酸化 マグネシウム (%)	三酸化 硫 黄 (%)	強熱減量 (%)
			水 量 (%)	始 発 (時一分)	終 結 (時一分)			
普通ポルトランドセメント	3.16	3260	27.8	2-31	3-32	1.6	1.8	0.9
高炉B種セメント	3.04	3760	29.6	3-38	4-58	3.5	1.9	1.0

表-3 骨材の試験成績

記号	試験項目	単位	細 骨 材		粗骨材 (5~13mm)		粗骨材 (13~20mm)	
			規格値	試験値	規格値	試験値	規格値	試験値
1	比 重	—	2.5以上	2.63	2.5以上	2.67	2.5以上	2.66
2	吸 水 率	%	3以下	1.09	3以下	0.301	3以下	0.553
3	粗 粒 率	—	—	3.08	—	—	6.68	—
4	単位容積重量	kg/m ³	1500~1860	1,690	1420~1880	—	1,570	—
5	実 績 率	%	60~70	65.0	55以上	—	59.3	—
6	洗 い 試 験	%	5以下	3.2	1.5以下	—	0.19	—
7	粘 土 塊 量	%	1以下	0.48	0.25以下	—	0.18	—
8	有 機 不 純 物	—	うすい	うすい	—	—	—	—
9	安 定 性 試 験	%	10以下	7.7	12以下	—	1.6	—
10	比重1.95に浮く粒子	%	1以下	0	1以下	—	0	—
11	すりへり減量	%	—	—	40以下	—	10.3	—
12	軟石量試験	%	—	—	5以下	—	1.6	—

表-4 コンクリートの配合および圧縮強度

	G _{max} (mm)	Slump (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)						圧縮強度 σ ₂₈ (kgf/cm ²)
						W	C	S	G	減水剤	A E 剤	
普通	20	8±2.5	4±1	65	49	164	252	922	972	5.04	1.67	285
高炉B	20	8±2.5	4±1	65	49	164	252	919	970	5.04	1.67	309

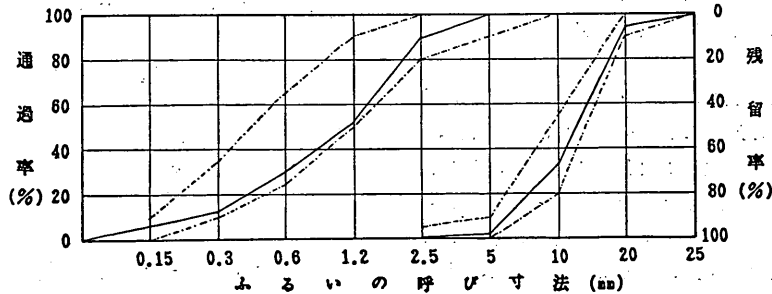


図-3 骨材のふるい分け試験結果

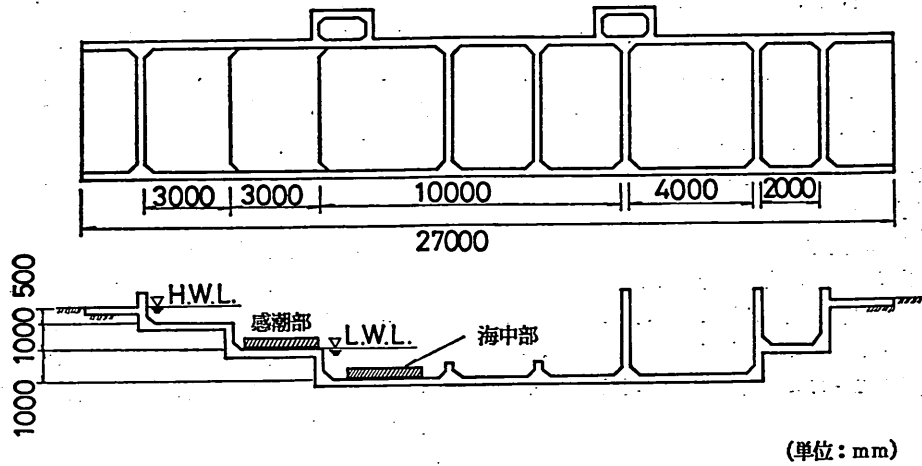


図-4 海水循環水槽の形状

メントの試験成績を表-2に示す。また、使用した骨材は、粗骨材が八王子産砕石、細骨材が八王子産砕砂である。骨材の試験成績を表-3に、またふるい分け試験結果を図-3に示す。これらの材料を用いて、表-4に示す配合によりコンクリートの製作を行った。また、同表に材令28日でのコンクリートの圧縮強度を示す。なお、この圧縮強度の値は6本の平均値である。

(3) 供試体の養生および暴露方法

コンクリートの打設後1日で脱型を行い、その後約1か月間は自然環境下(気温約20℃、湿度50%前後の実験室内)にて気中養生を行った。その後、当研究所構内にある海水循環水槽および飛沫部シミュレーション暴露場において暴露を開始した。海水循環水槽というのは、海洋環境のうちの海中部と感潮部をシミュレートする装置のことであり、1日に2回ポンプにより海水の給排水を行い、タイダルアクションを再現するものである。図-4に海水循環水槽の形状を示す。この海中部に供試体の鋼板が上面もしくは下面になるように供試体を設置した。また、飛沫部シミュレーション暴露場というのは、1日に2回、1回につき3時間の海水のスプレーがなされる暴露装置であり、構造物の塩害に対する飛沫環境としてはかなり厳しい環境を再現することができるものである。この場合も供試体の鋼板が上面もしくは下面になるように設置した。飛沫部における供試体の設置状況を写真-1に示す。

(4) 試験項目およびその方法

a) 埋設鉄筋の自然電極電位および発錆面積率

先にも述べたが、供試体HR1型とHS1型には1供

試体につき3本ずつ電位モニター用鉄筋が埋設されている。この鉄筋の自然電極電位を経時的に測定した。測定方法を図-5に示す。参照電極として銀-塩化銀電極を

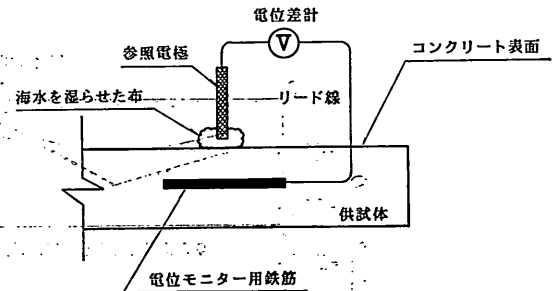


図-5 埋設鉄筋の自然電極電位の計測システム

を使用した。参照電極の先端部に海水を十分湿らせた布を巻き付け、埋設鉄筋の直上部にあたるコンクリート表面にそれを押し当てた状態で電位差計により参照電極と鉄筋の間の電位差を求めた。この電位の測定は供試体の暴露期間中経時的に実施した。また、供試体の破砕に際しコンクリート中の鉄筋を取り出し腐食状況の観察を行った。発錆している鉄筋表面の面積を測り発錆面積率を算出した。

b) 供試体の劣化状況の観察

まず、供試体の外観性状を観察し写真撮影を行った。外観性状の観察にあたっては、鋼板の腐食状況、錆び汁の状況、またコンクリートの表面劣化やクラックの有無

に特に注意した。その後、削岩機によりコンクリートの破碎を行い、鋼板とコンクリートを分離し、コンクリートとの接触面の鋼板の状況を観察した。コンクリートと接触している鋼材面の腐食状況をスケッチし、それをもとに発錆面積を測定し発錆面積率を求めた。なお、発錆面積率として鋼板全表面積に対する腐食面積の比率をパーセントで表示した。

c) 鋼板厚の測定

鋼板厚の測定は、超音波式厚み計により行った。暴露1年を経過した供試体の鋼板は何れも発錆がひどく腐食生成物(いわゆる錆)が表面に付着していた。まず、ハンマーで軽打することにより大きな錆を落とした。次い

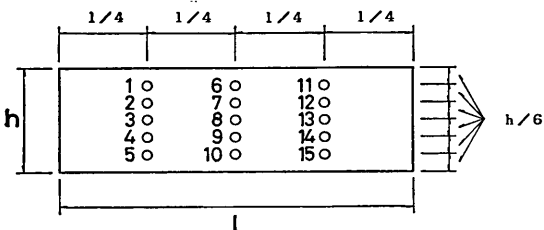


図-6 鋼板厚の測定箇所

で、紙やすりを使用し光沢が生じるまで表面を磨いた後に鋼板の残存肉厚の測定を行った。1枚の鋼板につき15箇所まで肉厚の測定を行い、1箇所につき3回の測定を実施した。図-6に鋼板厚の測定箇所を示す。

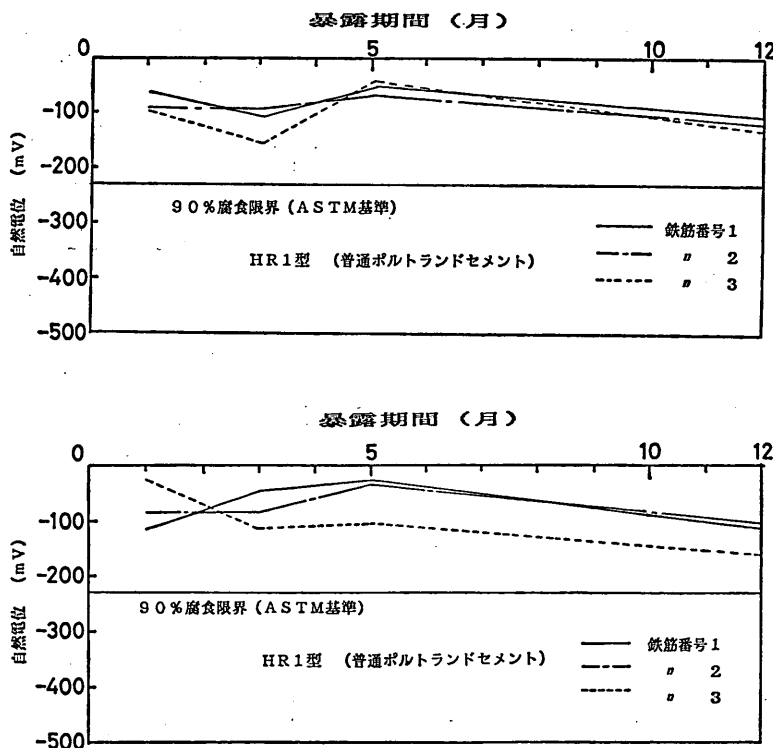
3.2 試験結果

(1) 埋設鉄筋の自然電極電位および発錆面積率

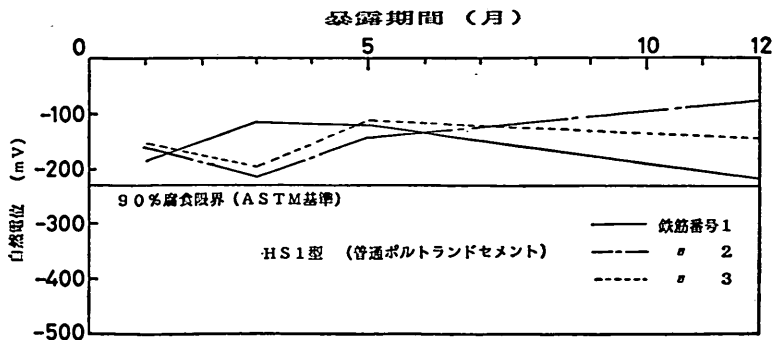
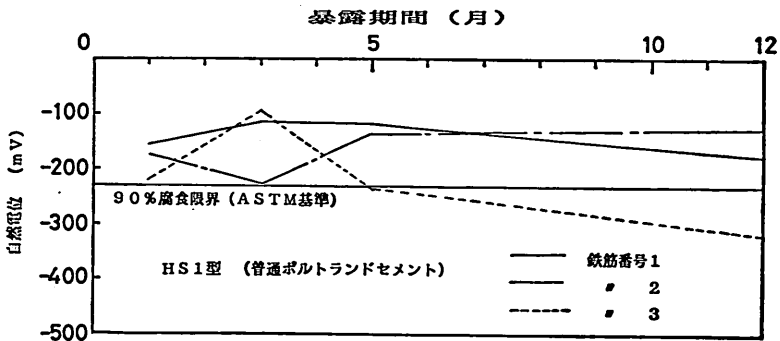
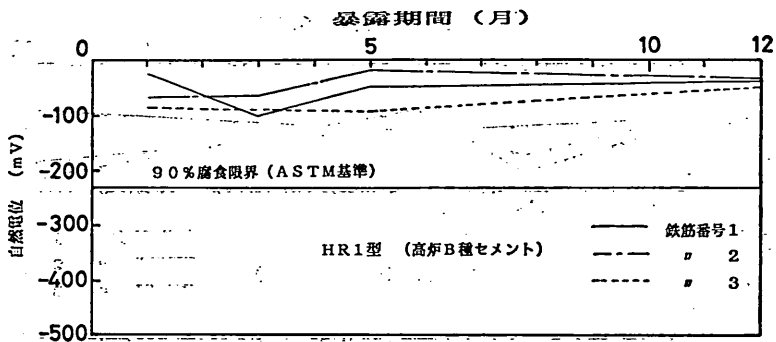
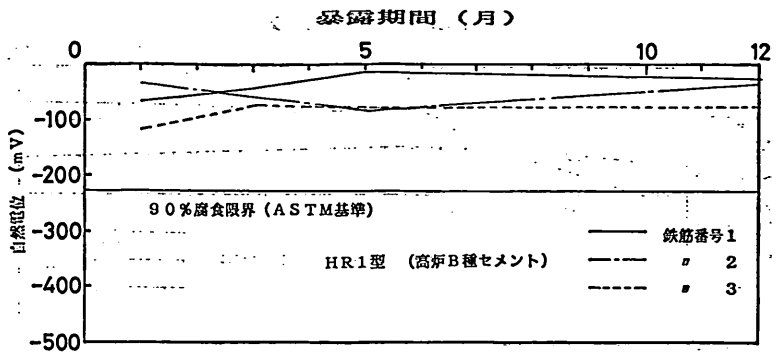
図-7((a)~(h))に供試体中に埋設された電位モニター用鉄筋の自然電極電位の経時変化を示す。また、同表にASTM (American Standard for Testing Materials) による自然電極電位を用いた鋼材の腐食の判定基準(腐食が生じている可能性が90%以上)を示す。全体的に鉄筋の電位の変化は小さく、また値自身も貴であり非腐食領域に分布している。わずかに、HS 1型の No.1 供試体の鉄筋 No.3 のみ暴露12か月で腐食領域へと移行しているものの、総じて言えば埋設鉄筋の腐食はほとんど生じていないものと判断される値であった。また、表-5に埋設鉄筋の発錆面積率を示す。主鉄筋も電位モニター用鉄筋も1.0%前後の非常に小さなものであり、暴露1年では埋設鉄筋の腐食はほとんど無視できる範囲であった。

(2) 供試体の劣化状況の観察

写真-2 および 写真-3 に暴露1年後の供試体の状況の



鋼-コンクリート接合ハイブリッド部材の海洋環境下における耐久性



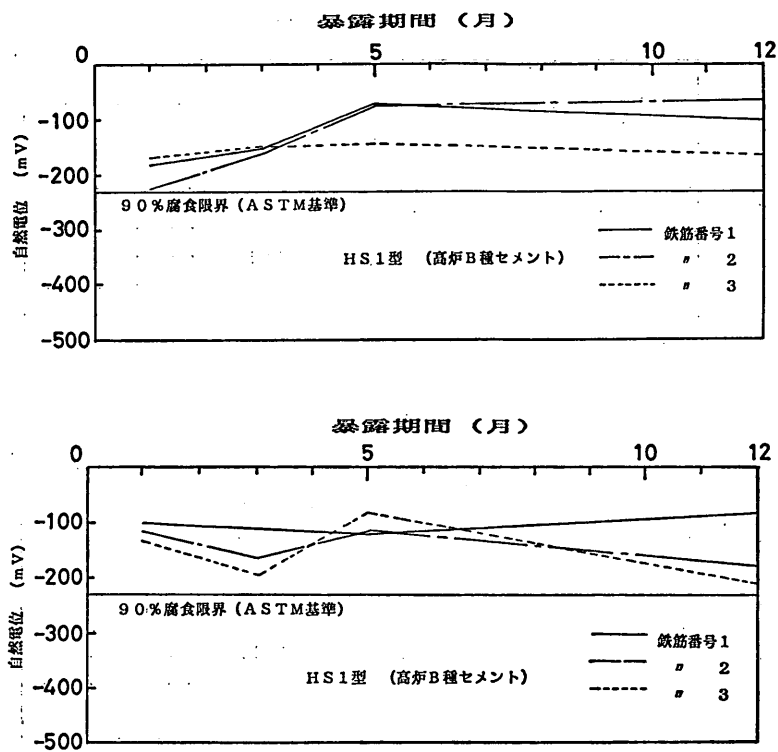


図-7 (a)~(h) 埋設鉄筋の自然電極電位の経時変化

表-5 埋設鉄筋の発錆面積率 (暴露1年後)

形式	セメント	暴露環境	埋設鉄筋 (%)					電位モニター用鉄筋 (%)			
			No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	Ave	No. 1	No. 2	No. 2	Ave
HR 1	普通ポルト 高炉B種	飛沫	1.0	-0.9	0.5	0.8	0.8	1.0	0.3	2.4	1.2
		飛沫	0.4	1.5	1.2	2.0	1.3	0.7	1.0	0.7	0.8
HS 1	普通ポルト 高炉B種	飛沫	2.5	0.2	1.5		1.4	1.5	0.9	0.5	1.0
		飛沫	0.4	1.2	1.2		0.9	1.0	0.6	1.1	0.9
HR 2	普通ポルト	飛沫	0.1	0.6	1.9	0.2	0.7				
		海中	0.1	0.8	0	0.5	0.4				
	高炉B種	飛沫	0.1	1.0	0	0.6	0.4				
		海中	0	0.1	0.1	0.2	0.1				
HS 2	普通ポルト	飛沫	0.3	0.1	0		0.1				
		海中	0	0.3	0.1		0.1				
	高炉B種	飛沫	0.1	0	0.4		0.2				
		海中	0.1	0.8	0		0.3				

一例を示す。写真は何れも鋼板が上面と下面になるように供試体を設置した状態で側面から撮影を行ったものである。これを見てわかるとおり、鋼板の表面は全面的に発錆し、その際生じた錆び汁でコンクリート表面がかなり汚れている状態であった。写真-4 に鋼板表面の状況を示す。全面的に発錆しており、表面はかなり不均質であった。また、大部分の供試体では写真-5、写真-6 および図-8 に示すように、ズレ止め鋼を起点とするクラ

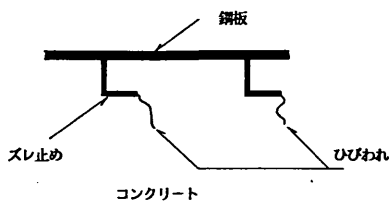
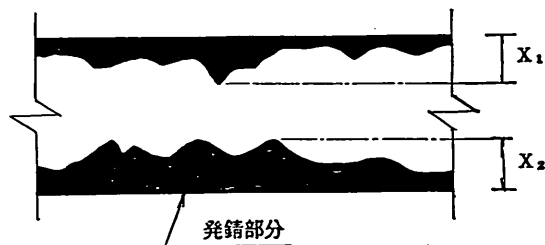


図-9 ズレ止め鋼より発生したコンクリートのクラック

ックがコンクリートに発生していた。クラックの形状、寸法は様々であるが、1つのズレ止め鋼より通常2~3本の錆び汁を伴ったクラックが生じており、長さは約2~3cm (最も長い場合で約5cm)、幅約0.2~0.3mm程度であった。

写真-7 および写真-8 に、コンクリートとの接触面の鋼板の状況を示す。これよりわかるとおり、端部から数cmのところまで腐食が進んでいた。しかし、鋼板中央部は発錆は生じていなかった。また、端部より生じていた腐食も比較的表面的なものであり、肉厚の減少はさほど大きなものではないことが推察された。図-9 にコンクリートと接着している鋼板の状況の一例を示す。また、参考のために付図-1 に全鋼板の裏面の発錆状況のスケッチ図を示す。いずれの供試体もその性状に大差はなく、鋼板端部より徐々に腐食が内部へと進んでいる様子がわかる。図-10 に示すように「最大侵食深さ」を定義し、各鋼板ごとにその値を求めた。その結果を表-6 に示す。最大で18.2cmであった。また、同表に裏面(コンクリートとの接触面)発錆面積率を示すが、最大

鋼板のコンクリートとの接触面(裏面)のモデル



X_1 と X_2 のうち大きい方をその鋼板の最大侵食深さと定義する

図-10 「裏面最大侵食深さ」の定義

表-6 裏面(コンクリートとの接触面)最大侵食深さおよび発錆面積率

型式	セメント	暴露環境	暴露時の状態	裏面最大侵食深さ (cm)	裏面発錆面積率 (%)
HR 1	普通高炉B	飛沫	上面	6.6	30.0
			下面	11.4	33.1
HS 1	普通高炉B	"	下面	6.6	26.8
			上面	6.3	25.1
			下面	10.4	32.4
HR 2	普通高炉B	海中	上面	18.2	30.4
			下面	6.3	30.4
			上面	5.1	11.4
HS 2	普通高炉B	海中	上面	5.7	33.9
			下面	3.1	16.0
			上面	4.6	24.9
HS 2	普通高炉B	海中	下面	6.8	29.7
			上面	2.6	14.3
			下面	2.9	9.9
			上面	8.6	30.0
			下面	9.7	36.3
			上面	6.0	22.0
		下面	3.4	16.5	



HR1型 高炉B種セメント使用 飛沫部暴露

図-9 鋼板のコンクリートとの接着面の状況の一例

で 36.3% であった。

(3) 鋼板厚減少量

表-7 に暴露1年での鋼板厚減少量を示す。残存肉厚

表-7 鋼板厚減少量

型 式	セメント	暴 露 環 境	暴露時 の状態	鋼板厚減少量 (mm)
HR 1	普 通 高 炉 B	飛沫 "	上面	0.44
			"	0.42
HS 1	普 通 " 高 炉 B "	" " " "	"	0.72
			下面	0.56
			上面	0.77
			下面	0.56
HR 2	普 通 " 高 炉 B "	" 海中 飛沫 海中	上面	0.62
			下面	0.15
			上面	0.70
			下面	0.31
HS 2	普 通 " " " 高 炉 B " " " "	飛沫 " " " " 飛沫 " " "	上面	0.51
			下面	0.56
			上面	0.40
			下面	0.08
			上面	0.72
			下面	0.50
			上面	0.45
			下面	0.22
裸 鋼 材	"	飛沫 "		0.62
				0.81

の測定値を初期肉厚 10mm より減じたものを鋼板厚減少量とした。なお、表中の1つの数字は45データの平均値である。同表に裸鋼材（飛沫部暴露）の鋼板厚減少量も示すが、ハイブリッド部材の場合（飛沫部暴露）もそれとほぼ同等もしくは幾分小さめの値となった。

3.3 考 察

(2) 部材の劣化性状

図-11 に裏面最大侵食深さと裏面発錆面積率の関係を、また、図-12 に裏面発錆面積率と鋼板厚減少量の関係を示す。いずれも飛沫部暴露の場合と海中部暴露の場合でその領域が明確に分けられ、かつ相関係数 0.7~0.8 程度の比較的よい相関関係が得られた。すなわち、表面の鋼板の腐食が大きいもの程裏面の腐食も大きくなる傾向があると言える。この相関性を踏まえ、以後ハイブリッド部材の鋼材の腐食の程度を示す指標としては主に鋼

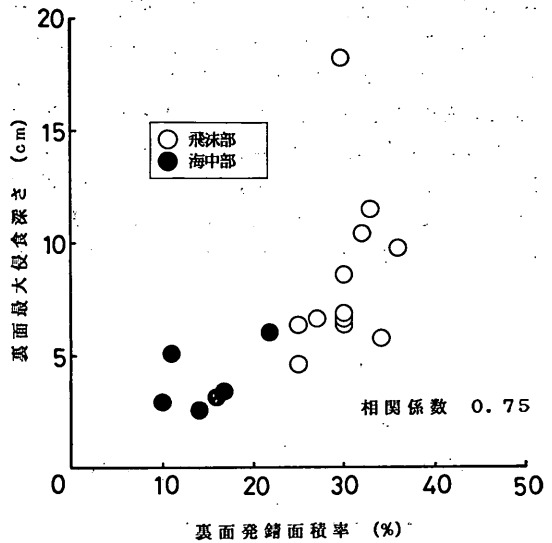


図-11 裏面最大侵食深さと裏面発錆面積率の関係

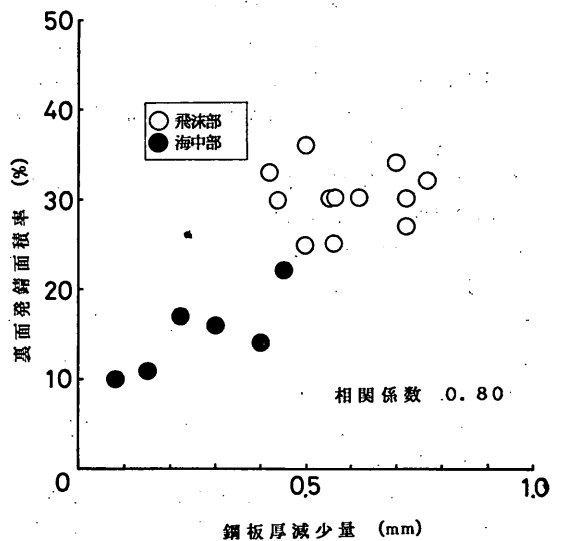


図-12 裏面発錆面積率と鋼板厚減少量の関係

板厚減少量を用いることとした。

(2) 鋼板の腐食に及ぼす各種要因の影響

表-8 に鋼板厚減少量に及ぼす各種要因の影響度合いの評価結果を示す。鋼板厚減少量の差が 0.3mm 以上の場合を影響「大」、0.3~0.1mm の場合を影響「中」、0.1mm 未満の場合を影響「小」と判定した。これによると、暴露環境（飛沫部と海中部の相違）の影響が非常に大きく、また、設置状態（上面設置と下面設置）の影

表-8 鋼板厚減少量に及ぼす各種要因の影響

要因	試験結果 (鋼板厚減少量) —平均値—		影響度合		
			大	中	小
供試体寸法	大 (0.58 v.s 0.60)	小			○
暴露環境	飛沫	海中	○		
セメント種	普通	高炉B			○
部材型式	両面鋼板	片面			○
設置状態	上面	下面		○	
	(0.68 v.s 0.55)				

響が若干認められた。今回の試験結果より判断すると、供試体の製作時に設定した要因（供試体寸法、セメント種、部材型式）よりも供試体の置かれている環境の要因の方がその影響が大きかった。

(3) コンクリートに生じるクラック

先にも述べたが、ズレ止め鋼近傍のコンクリートに微細ではあるがクラックが生じた。図-13 にそのクラックの簡単なモデルを示す。コンクリートからズレ止め鋼を

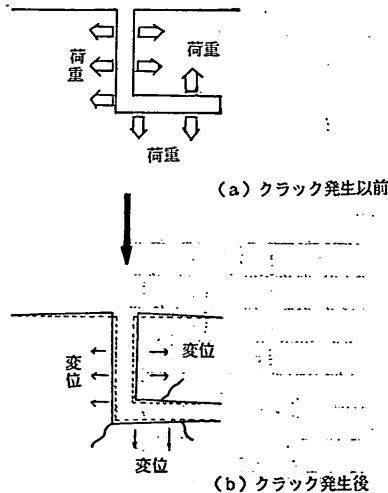


図-13 ズレ止め鋼の腐食によるコンクリートのクラック

取り除いたとすると図-13(a)のようになり、コンクリートに「L」字型の切れ込みが入った状態となる。ズレ止め鋼が腐食するとその体積膨張によりコンクリートは荷

重を受けることになる。その方向を図中に矢印で示す。「L」字型の切れ込みが押し広げられる形となりコンクリートにクラックが発生する。その状態のモデルが図-13(b)である。過去の、清宮等の実験²⁾によると、ハイブリッド部材の破壊は、まずズレ止め鋼の近傍にクラックが発生し、それが部材中央へと進展することにより生じている。したがって、部材の鋼材部に腐食が生じた後の部材の耐力は腐食前の耐力より幾分低下しているとも考えられる。

4. 部材の暴露試験 II

—鋼材部の腐食特性の把握を目的とする試験—

4.1 概要

本暴露試験はハイブリッド部材の鋼板の腐食特性を把握することを目的として実施した。ハイブリッド部材の鋼板と鋼管杭や鋼矢板等との相違点は鋼板の一面が塩分環境（腐食環境）である海洋環境にさらされ、もう一方の面がアルカリ環境（非腐食環境）であるコンクリートと接するという点である。したがって、鋼板の両面間に電位差が生じ、図-14 に示すように海洋環境に接する表

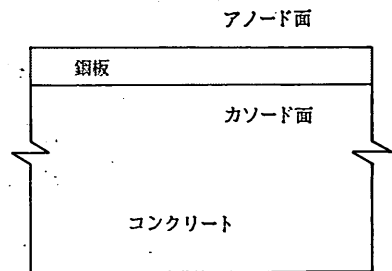


図-14 ハイブリッド部材の特徴

面（自由面）がアノード、一方、コンクリートに接する表面（裏面）がカソードとなる腐食電池が形成されることが考えられる。本章で述べる暴露試験においては、このような腐食電池は実際に出来るのか、また出来るとすればどの程度の腐食電流が生じるのかを確認することを主目的としている。

(1) 供試体

本暴露試験に用いた供試体の形状を図-15 に示す。150×100×300mmの角柱型であり、暴露試験 I に用いた供試体に比べるとかなり小型のものである。図に示すように、2枚の鋼板をエポキシ樹脂系接着剤（絶縁物）により接着一体化したものをコンクリートと接合させたものである。ここで、2枚の鋼板を接着したのはハイブ

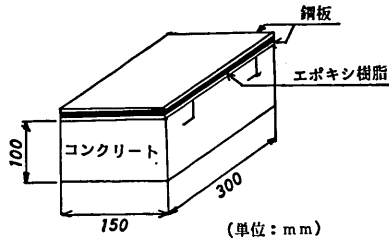


図-15 供試体の形状

リッド部材の鋼板の2表面（海洋環境に接する自由面とコンクリートに接する裏面）をモデル化するためであり、2枚のうちの1枚は自由面の環境に置かれることになり、他の1枚は裏面の環境に置かれることになる。使用した鋼板はSS41のt=3.2mmである。また、図に示すように鋼板とコンクリートの接合はズレ止め鋼により成されており、このズレ止め鋼に使用したL型鋼は30×30×3mmである。また、各鋼板には腐食電流および電位を測定するためのリード線が接続されている。

(2) コンクリート用使用材料およびその配合
 コンクリートの製作に使用したセメントは普通ポルト

表-10 骨材の試験成績

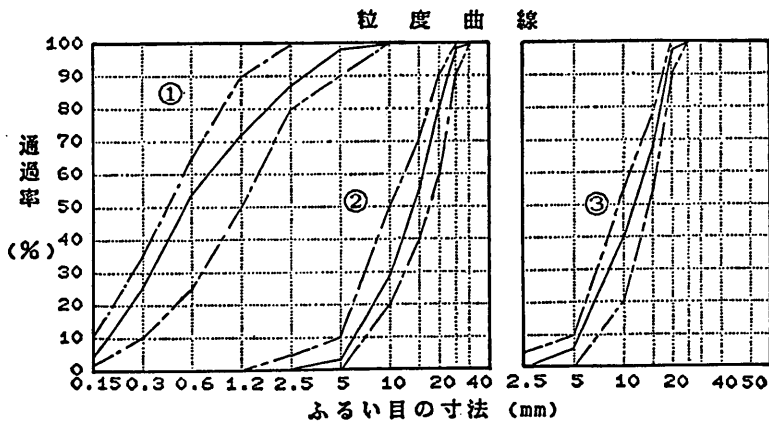
	種類	産地・品名
骨材①	普通	千葉県君津市
骨材②	普通	福島県いわき市
骨材③	普通	山口県伊佐

項目	骨材①	骨材②	骨材③
種類又は最大寸法 (mm)	5	25	20
絶乾比重	2.55	2.58	2.69
表乾比重	2.60	2.60	2.70
吸水率 (%)	1.70	0.904	0.515
単位容積質量 (kg/ℓ)	1.71	1.68	1.67
実積率 (%)	—	65.0	62.2
粒形判定実積率 (%)	—	—	61.7
粘土塊量 (%)	0.4	0.1	0.0
軟石量 (%)	—	3.1	0.0
有機不純物	合格	—	—
塩分含有量 (%)	0.00	—	—
洗い試験 (%)	1.5	0.50	0.91

ランドセメントである。使用したセメントの試験成績を表-9に示す。また、使用した骨材は、細骨材が千葉県

表-9 セメントの試験成績

	比重	比表面積 (cm ² /g)	凝 結			酸化マグネシウム (%)	三酸化硫黄 (%)	強熱減量 (%)
			水量 (%)	始発 (時-分)	終結 (時-分)			
普通ポルトランドセメント	3.16	3,230	27.7	2-32	3-32	1.7	2.0	0.9



①千葉県君津市産 ②福島県いわき市産 ③山口県伊佐産

図-16 骨材のふるい分け試験結果

鋼-コンクリート接合ハイブリッド部材の海洋環境下における耐久性

君津市産の普通骨材，粗骨材が福島県いわき市産の普通骨材と山口県伊佐産の碎石の混合（容積比1：1で混合）である。骨材の試験成績を表-10に，またふるい分け試験結果を図-16に示す。これらの材料を用いて表-11に示す配合によりコンクリートの製作を行った。また，同表に材令28日でのコンクリートの圧縮強度を示す。なお，この圧縮強度は6本の平均値である。

また，鋼板接着用に用いた接着剤は，ビスフェノールA型エポキシ樹脂を主剤，ポリアミドアミン樹脂を硬化剤とする2液混合型のエポキシ樹脂系接着剤である。

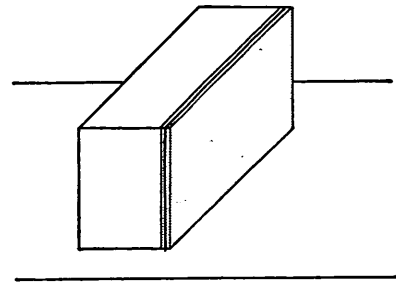


図-17 供試体の設置方法（鋼板を側面に）

表-11 コンクリートの配合および圧縮強度

	G _{max} (mm)	Slump (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)					圧縮強度 σ ₂₈ (kgf/cm ²)
						W	C	S	G	AE減水剤	
普通	25	8±2.5	4±1	55	42.4	154	280	790	1095	2.80	285

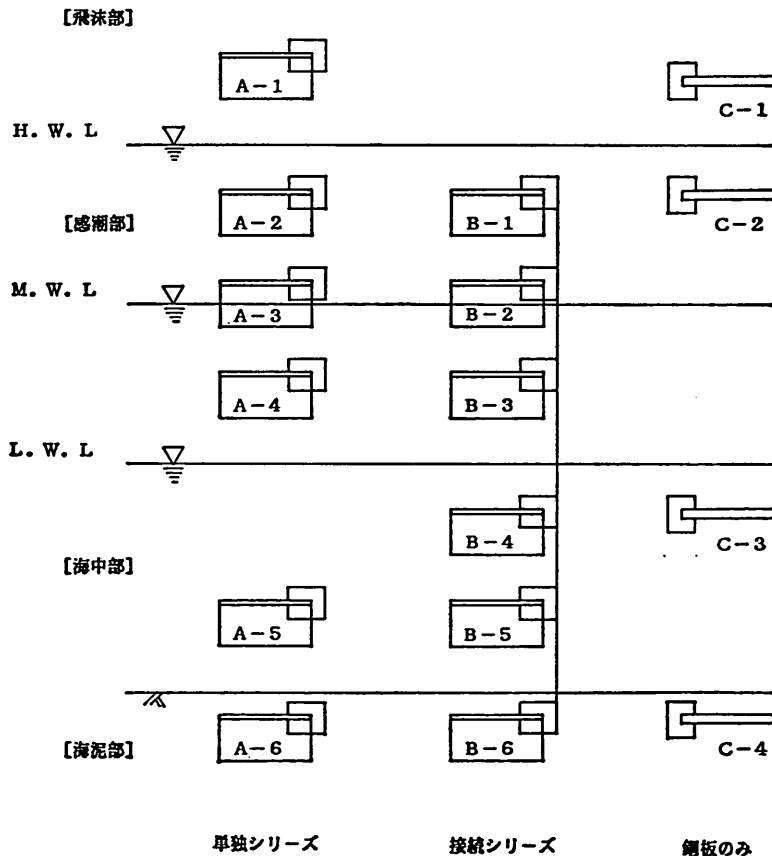


図-18 供試体の設置方法

(3) 供試体の養生および暴露方法

コンクリートの打設後1日で脱型を行い、その後約1か月は自然環境下(気温約20℃, 湿度50%前後の実験室内)において気中養生を行った。その後、当研究所構内の海水循環水槽および飛沫部シミュレーション暴露場において暴露を開始した。なお、供試体は鋼板が側面になるように設置した。図-17および図-18に供試体の設置方法を示す。大別して「単独シリーズ(Aシリーズ)」と「接続シリーズ(Bシリーズ)」の2種類に分かれる。単独シリーズというのは個々の供試体の2枚の鋼板は電氣的に接続されているものの、他の供試体の鋼板との接続はないものであり、図-19に示すように1つのハイブリッド部材が1つの海洋環境に単独に存在する場合をモデル化しているものである。一方、接続シリーズというのは個々の供試体の2枚の鋼板が電氣的に接続され、かつ感潮部から海泥部にいたるまで全ての鋼板が電氣的に接続されているものであり、図-19に示すように、1つのハイブリッド部材が複数の海洋環境にまたがって存在する場合をモデル化しているものである。また、ハイブリッド部材に対する比較用として2枚の鋼板を接着し、それらを電氣的に接続したもの(Cシリーズ)も各環境に単独で設置した。

(4) 試験項目およびその方法

a) 各鋼板への流出入電流(腐食電流)の測定

図-20に各シリーズの測定回路図を示す。単独シリーズ(Aシリーズ, Cシリーズ)の場合は表鋼板と裏鋼板

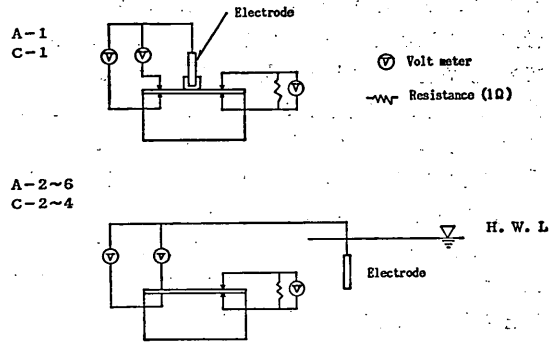


図-20(a) 設置供試体の電気回路図(単独シリーズ)

をリード線で接続し、その間に1Ω(オーム)の抵抗を挿入し、その両端の電位差を測定した。この電位差を用い、一般にオームの法則と呼ばれる次式、 $V(\text{電圧})=I(\text{電流}) \times R(\text{抵抗})$ より流れる電流を算出した。なお、本法は一般に電位降下法と呼ばれている。接続シリーズ(Bシリーズ)の場合も、基本的には同様の考え方で腐食電流の測定を行った。なお、単位抵抗(1Ω)の両端の電位差の測定は打点記録計により経時的に行い、タイダルアクションに伴う腐食電流の傾向の変化も連続的に計測した。

b) 各鋼板の電位の測定

図-20に電位の測定回路を示す。飛沫部に位置する供試体(A-1, C-1)の場合は参照電極(銀-塩化銀電

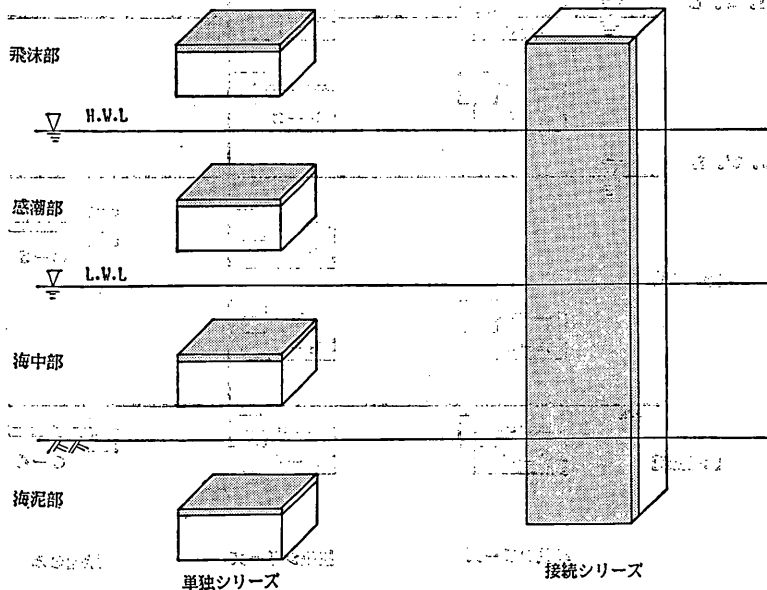


図-19 供試体の存在モデル(単独シリーズと接続シリーズ)

B-1~6

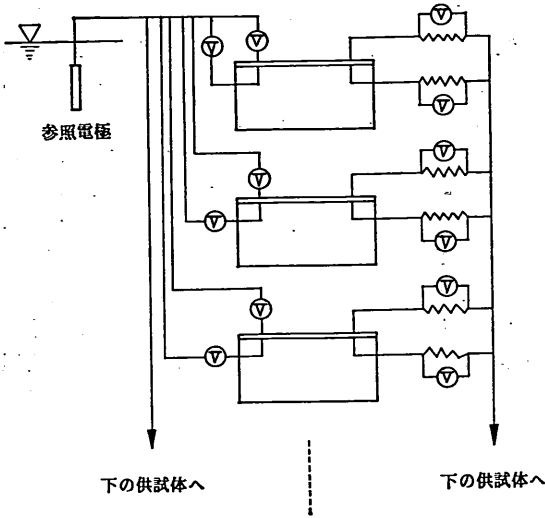


図-20(b) 供試体の電気回路図 (接続シリーズ)

極)の先端を海水で十分湿らせた布で巻き付け、これを鋼板に押し付けた状態で、かつ海水が噴霧されている間に測定を行った。感潮部、海中部、海泥部に位置する供試体については、図に示すように鋼板と参照電極をリード線で接続し、その間の電位差の測定を行った。測定は満水位 (H.W.L.) の状態で、参照電極および供試体が十分海水に浸せきした状態の時に実施した。電位の測定も電流の測定と同様に打点記録計により連続的に行った。

c) 暴露後の供試体の外観観察

暴露開始後1年を経過した時点で暴露施設より全ての供試体を回収した。海水および海泥で汚れた表面を水洗した後に外観性状の観察を行った。鋼板の腐食状況、コンクリートの表面劣化、クラックの有無等に特に注意して観察を行い、併せて写真の撮影を行った。

d) 鋼板の腐食量の測定

外観観察を行った後に、供試体を削岩機により破碎し、コンクリートより鋼板を取り外した。取り外した鋼板表面に付着しているコンクリート塊をハンマー等で軽打することにより全て取り除いた後、火力による鋼板の加熱と水による冷却を数回繰り返して(フレーム除去法)表面の鋼板を分離させ、エポキシ樹脂を取り除くと同時に、鋼板表面の錆生成物も大部分除去した。その後、鋼板を10%クエン酸二アンモニウム溶液に24時間浸せきし、その後鋼板を水洗し表面の錆生成物を完全に除去し

た。このように光沢が戻るまで錆を除去した鋼板表面に1cm格子で測定点を設定し、マイクロメーターにより鋼板の残存肉厚の測定を行った。この残存肉厚を初期肉厚3.2mmより減じることにより鋼板の腐食量を求めた。

4.2 試験結果

(1) 腐食に際しての腐食電流の方向

図-21に鋼材の腐食反応の概要を示す。鋼材の腐食

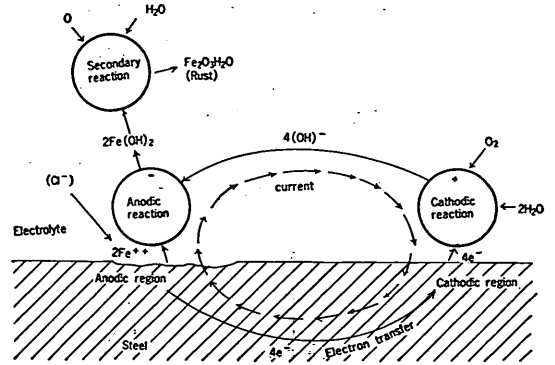


図-21 鋼材の腐食反応と電気の流れ (不動態が破壊された状態)

は、鋼材表面にアノード部(電位が比較的卑)とカソード部(電位が比較的貴)が生じその間に電池(電気化学的回路)が形成されることにより進行する。アノード部において鉄は鉄イオンとして溶出し、カソード部において酸素と水から水酸基イオンが生成される。図中に実線で示されているのが電子および水酸基イオン(負の荷電粒子)の移動方向であり、電流の方向はそれとは反対の点線で示される方向となる。したがって、電流の方向は金属中においてはカソードからアノードへと向かうことになる。図-22に今回の実験の腐食方向と電流の関係を

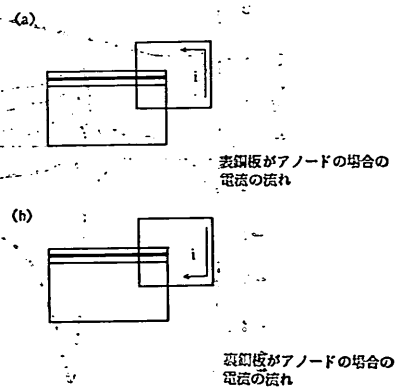


図-22 腐食傾向と電流の方向の関係

示す。図(a)のように裏鋼板から表鋼板への電流が測定されれば表鋼板がアノードとなる腐食電池が形成されているものと考えられ、逆に(b)のように表鋼板から裏鋼板への電流が測定されれば表鋼板がアノードとなる腐食電池が形成されているものと考えられる。

(2) 腐食電流の傾向

a) 単独シリーズ (Aシリーズ)

図-23 に潮位変動に伴う腐食電流の傾向を示す。図に示したものは最も典型的な傾向である。天候、気温等の気象条件、その他の影響により、腐食電流の絶対値は幾分(約 10% 程度)変動するものの流れの傾向は常に同一である。飛沫部に位置する供試体の場合、スプラッシュがある時と無い時で電流の方向に変動はなく常に表鋼板から裏鋼板(すなわち裏鋼板がアノード、図-22(b)に

相当)へ 0.2mA ($0.22\mu\text{A}/\text{cm}^2$, ただし鋼板表面積を 900cm^2 で計算)程度の電流が流れている。これに対して感潮部に位置する供試体の場合、潮位が上昇するに伴い電流の方向の変動が生じているのが特徴である。感潮部の上方と中央に位置する供試体(A-2とA-3)の場合、潮位の上昇に伴い裏から表への電流が生じる。A-2とA-3を比べるとA-2の方が電流値は大きい、これはA-2の方が感潮部の上方に位置していることの影響と考えられる。一方、感潮部の下方に位置する供試体(A-4)の場合はその逆である。潮位が満潮位に達するこの電流の変動も次第に収束し、いずれの場合も表鋼板から裏鋼板へ 0.1mA ($0.11\mu\text{A}/\text{cm}^2$)以下の微小電流がコンスタントに流れる。いずれの供試体の場合も測定される電流値自体は 0.2mA ($0.22\mu\text{A}/\text{cm}^2$)以下の

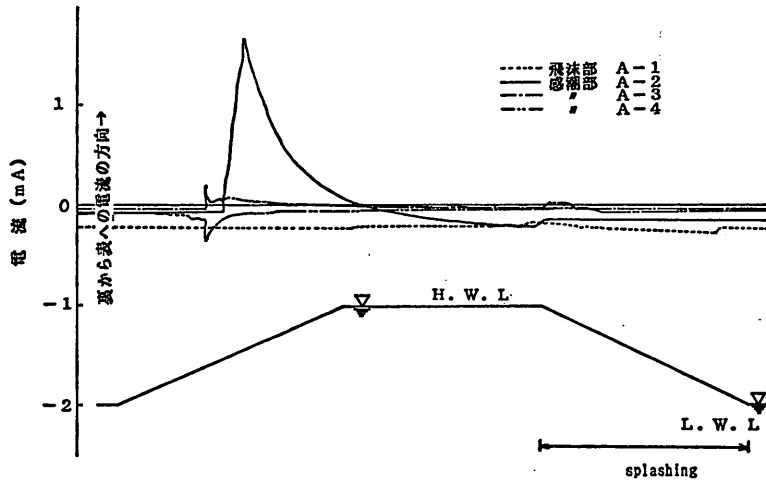


図-23 潮位変動に伴う腐食電流の変化(単独シリーズ)

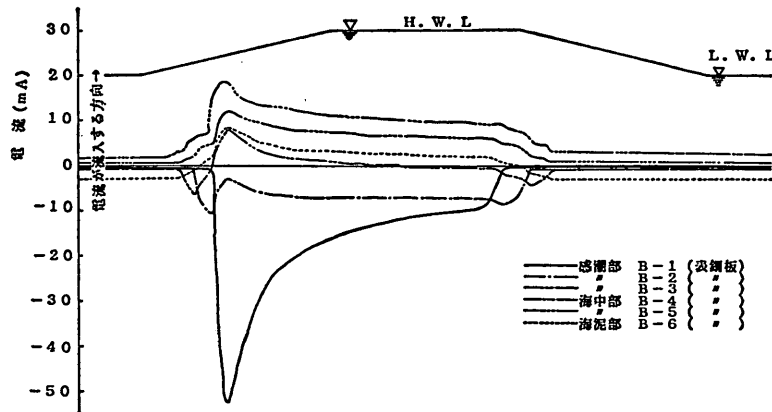


図-24 潮位変動に伴う腐食電流の変化(接続シリーズ)

極めて小さなものである。

b) 接続シリーズ (Bシリーズ)

図-24 に潮位変動に伴う腐食電流の傾向を示す。この図の場合も図-23 と同様に最も典型的な傾向を示している。図中に示されているのは表鋼板への電流の流出入であり、裏鋼板への電流の流出入はほとんど測定されなかった。図よりわかるとおり、潮位の上昇に伴い各供試体間にマクロセルが生じる。基本的には、電流は B-1 から B-6 の供試体で構成される「接続シリーズ」という閉じた系の中で生じるため各供試体への流出入電流の総和は零である。図-25 にそのマクロセル電流の方向を示すが、感潮部の上方と中央に位置する供試体 (B-1, B-2) が電流が流出する方向 (すなわちカソード)、その他の供試体 (B-3 ~ 6) が電流が流入する方向 (すなわちアノード) となっている。また、その規模は数 10mA のオーダー (最大で B-1 の 50mA ($55.56\mu\text{A}/\text{cm}^2$)) であり、単独シリーズにおいて測定された腐食電流 (0.1mA ($0.11\mu\text{A}/\text{cm}^2$) 程度) に比べてかなり大きなものとなっている。

c) 鋼板のみ (Cシリーズ)

図-26 に鋼板のみの場合の、潮位変動に伴う腐食電流の経時変化を示す。感潮部に位置する鋼板の場合、潮位の上昇に伴い電流の変動が生じるのが特徴である。この変動の傾向は図-23 で示した単独シリーズの腐食電流の傾向と同一である。本シリーズ (鋼板のみ) の場合、2枚の鋼板にその置かれている環境に差はなくいずれも同一条件下と見なせる。これより、図-23 で見られた潮位変動に伴う腐食電流の変動は必ずしもハイブリッド部材の特異性に起因するものではないものと考えられる。飛

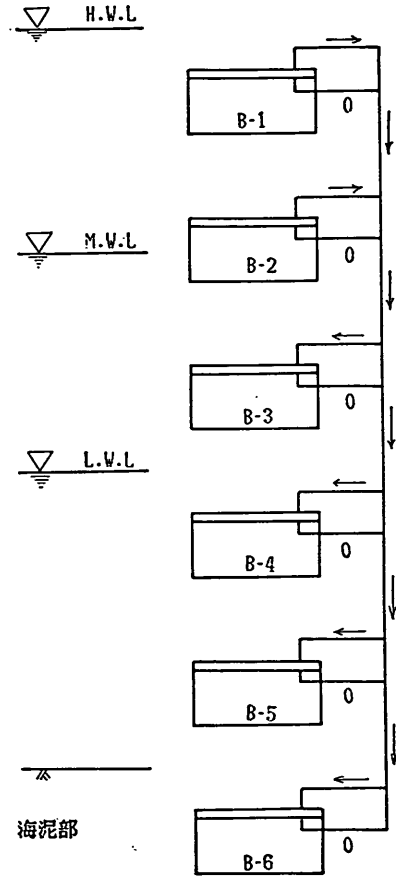


図-25 潮位の上昇に伴い発生するマクロセル電流の方向 (接続シリーズ)

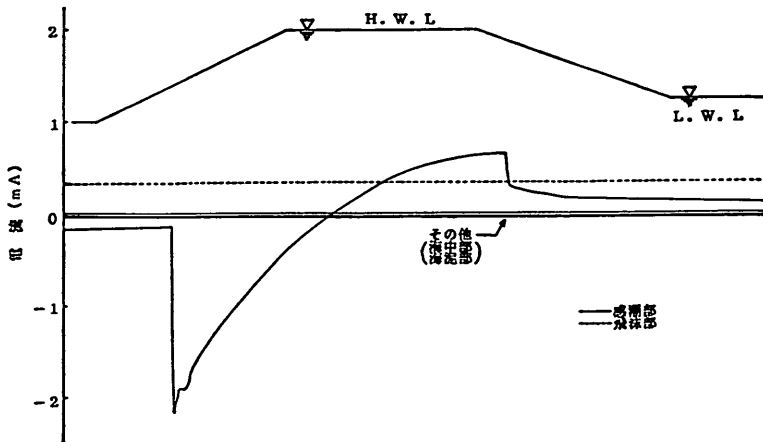


図-26 潮位変動に伴う腐食電流の変化 (鋼板のみ)

沫部, 海中部, 海泥部に位置する鋼板の場合, 潮位変動に伴う腐食電流の変化は認められず常に一定の電流が測定された。その規模は飛沫部の場合で約 0.3mA (0.33 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$), 海中部, 海泥部の場合で約 0.02mA (0.02 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$) であり, いずれの場合も極めて微小なものであった。

(3) 鋼板の電位の傾向

a) 単独シリーズ (Aシリーズ)

図-27 に満水位時(電位測定可能時間)における鋼板の電位の時間変化を示す。ここで示したものはその最も典型的な傾向である。これを見ると, 海中部, 海洗部に位置する供試体の場合その電位にほとんど変動がない。一方, 感潮部に位置する供試体の場合, 満水位になった初期は比較的貴の電位(-500mV程度)を示すが次第

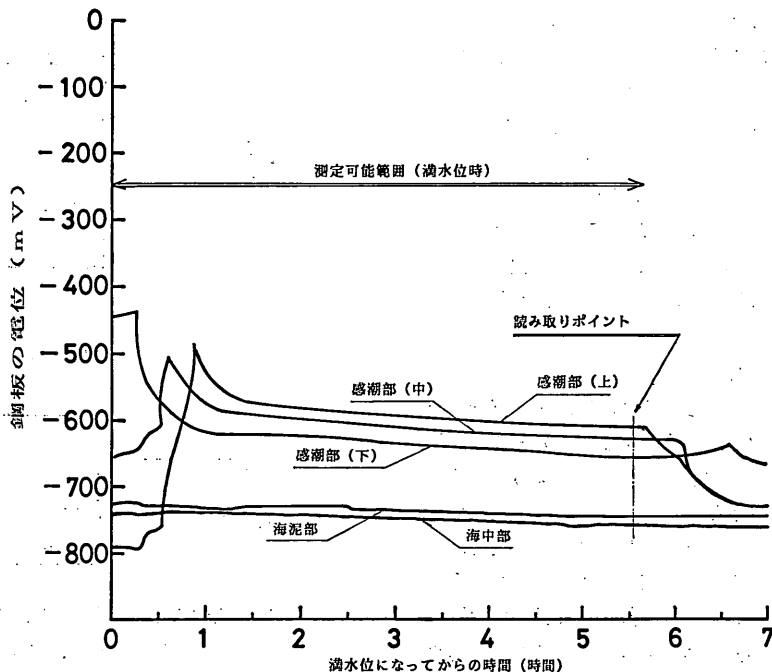
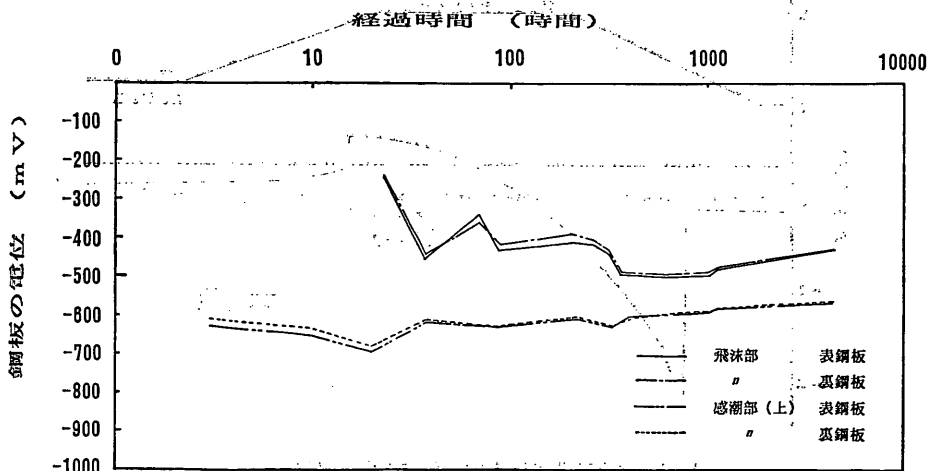


図-27 満水位時における鋼板の電位の時間変動(単独シリーズ)



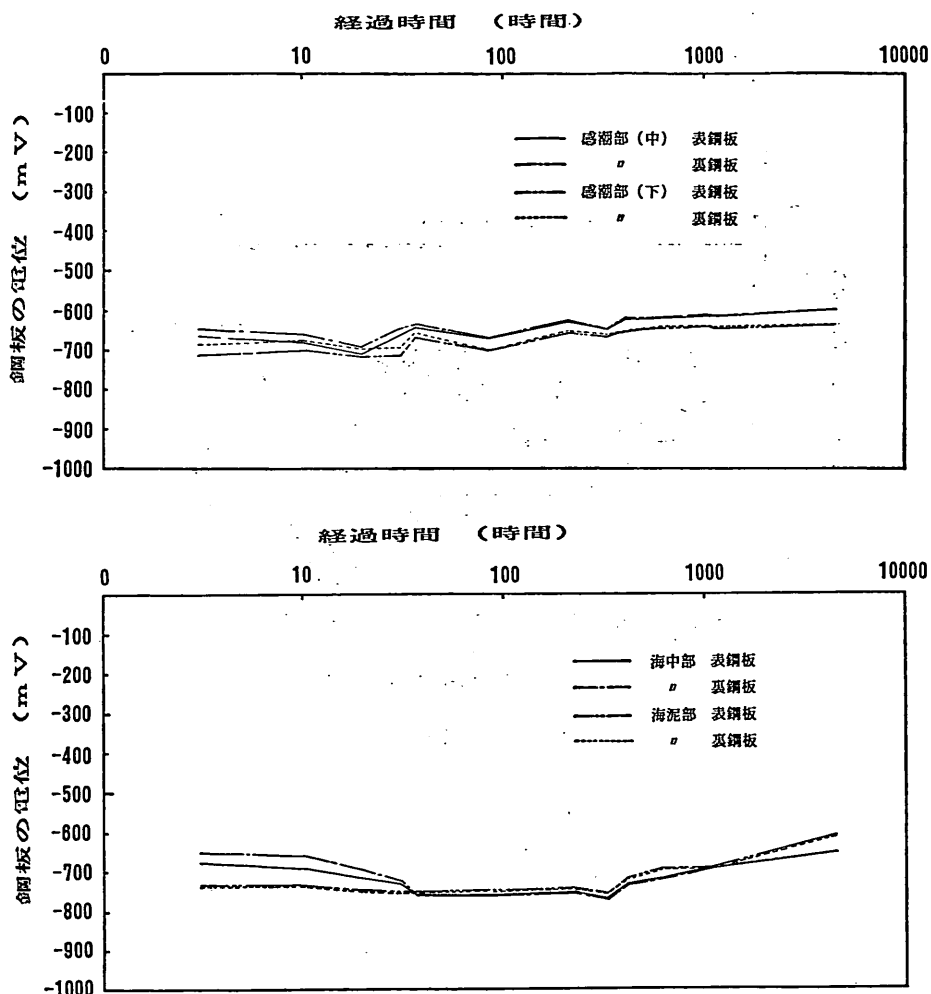


図-28(a)~(c) 電位の長期的な経時変化 (単独シリーズ)

にその電位は単方向にシフトしていく。図-28に鋼板の電位の長期的な経時変化(5000時間まで)を示す。なお、図中に示すデータは図-27に示す読み取りポイント(満水位時より排水に移行する直前、すなわち満水位になって十分時間が経過した時点)において読み取ったものを使用している。これによると、感潮部、海中部、海泥部に位置する供試体の電位(-600~-700mV)よりも飛沫部に位置する供試体の電位の方が負であり、-400~-500mVの範囲にある。また、感潮部、海中部、海泥部に位置する供試体は比較的電位の変動も小さく、若干負化する傾向があるのに対して、飛沫部の場合はそれらに比べて電位の変動も大きく全体的に見れば単化する傾向にある。

b) 接続シリーズ(Bシリーズ)

図-29に満水位時(電位測定可能時間)における鋼板の電位の経時変化を示す。ここで示したものはその最も典型的な傾向である。これを見ると、時間の経過とともに僅かに単化(10~20mV程度)する傾向があるが大きく変化することはない。また、全体的に見て、海中部、海泥部に位置する供試体の方が感潮部に位置する供試体に比べて電位は単である。この電位の傾向は、先に示した腐食電流の傾向(図-24)を裏付けるものとなっている。図-30に鋼板の電位の長期的な経時変化(5000時間まで)を示す。なお、図中に示すデータは図-29に示す読み取りポイント(満水位より排水に移行する時刻)において読み取ったものを使用している。これによると、

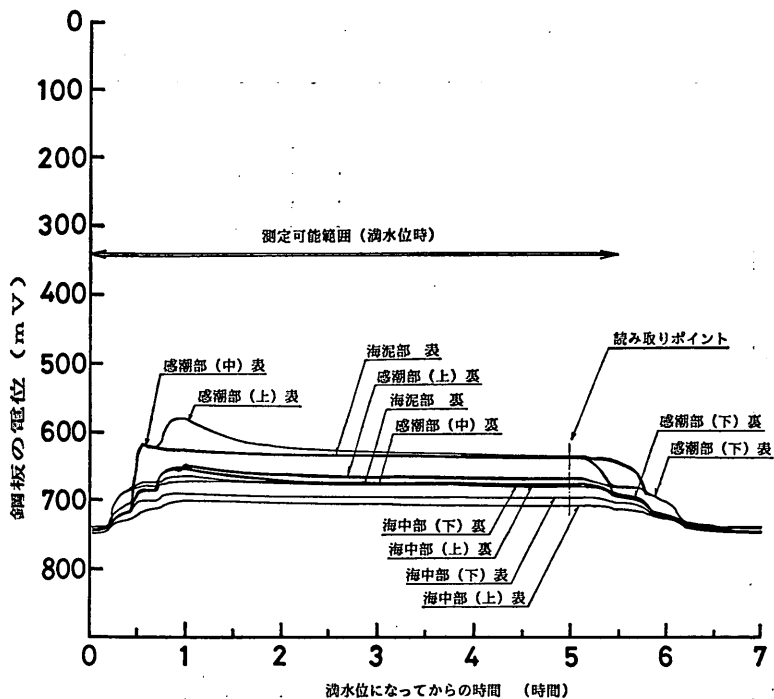


図-29 満水位時における鋼板の電位の時間変動 (接続シリーズ)

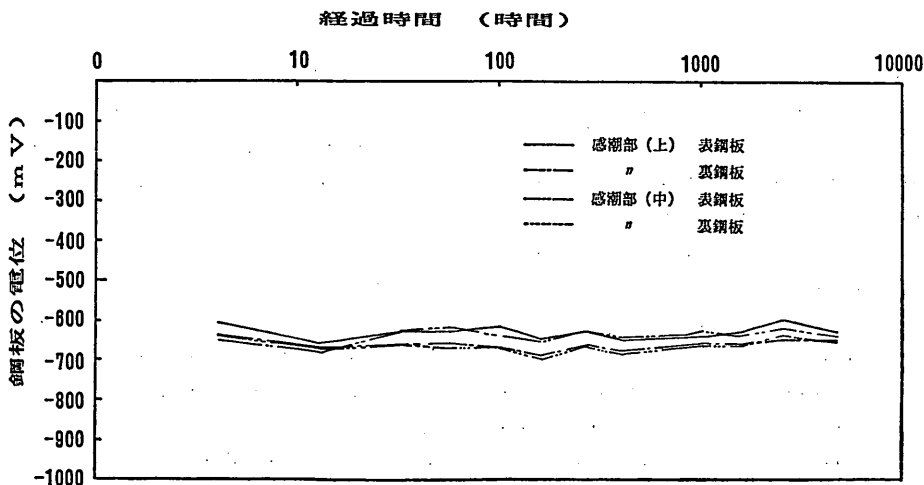
いずれの鋼板も比較的卑の電位 (-600~-700mV) を示し、かつ変動がほとんど無い。海泥部、海中部に位置する供試体よりも感潮部に位置する供試体の方がわずかに貴である。

c) 鋼板のみ (Cシリーズ)

鋼板のみの場合もA、Bシリーズ同様満水位時間内の変動はほとんど無かった。図-31 に鋼板の電位の長期的

な経時変化 (4700 時間まで) を示す。飛沫部に位置する供試体は比較の変動幅が大きく、かつ全体的に見れば卑化する傾向にある。これに対し、感潮部、海中部、海泥部の鋼板は比較の変動幅が小さく、全体的に見れば貴化する傾向がある。また、海中部、海泥部の鋼板の方が感潮部の鋼板より電位は卑である。

(4) 暴露後の供試体の劣化性状



鋼-コンクリート接合ハイブリッド部材の海洋環境下における耐久性

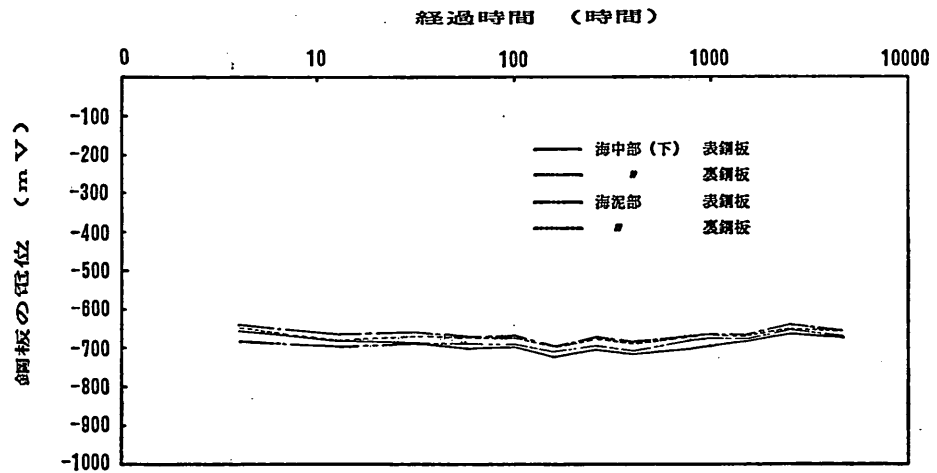
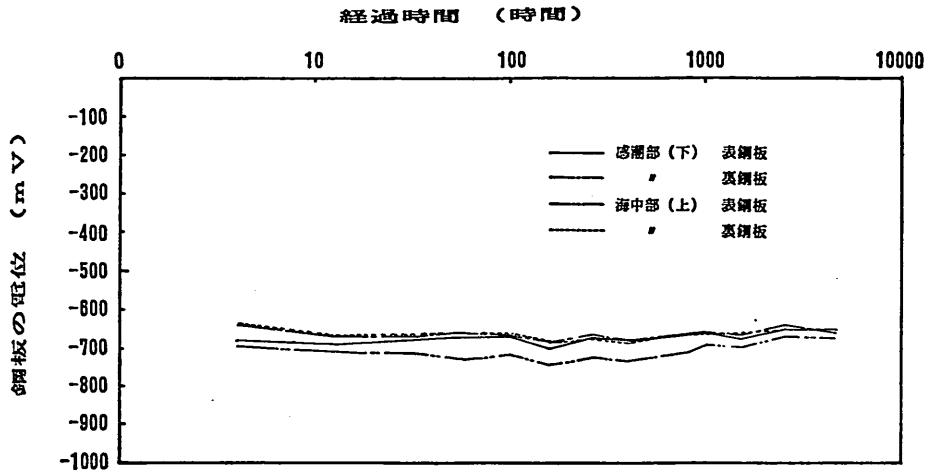


図-30(a)~(c) 電位の長期的な経時変化 (接続シリーズ)

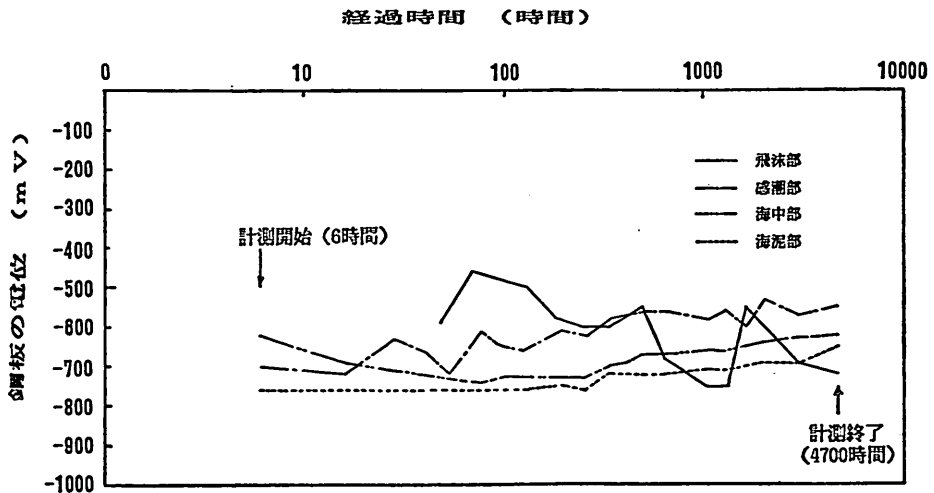


図-31 電位の長期的な経時変化 (鋼板のみ)

写真-9 および 写真-10 に暴露1年後の供試体の外観性状の一例を示す。露出している鋼板は全面的に発錆しており、ズレ止め鋼も暴出している面は発錆していた。(写真-9 参照)しかし、暴露試験Iで見られたようなズレ止め鋼近傍のクラックは生じていなかった。これは本シリーズの供試体が小型のものであり、使用したズレ止め鋼のサイズも小さかったためとも考えられるが、明らかではない。また、一体だけ鋼板とエポキシ樹脂が剝離しているものもあったが、総じて2枚の鋼板の接着状況は良好であった。コンクリート表面は錆汁、海水の汚れ等のためにかかなり汚れていたものの表面劣化は認められず、強度性状には全く変化が無かったことが推察された。

写真-11 にコンクリートとの接触面の鋼板の状況の一例を示す。暴露試験Iの場合と同様に端から数cmのところまで発錆が進んでいた。この裏面の錆自体は比較的軽微であり表面的なものであった。また、写真-12 に錆を除去した後の鋼板表面の一例を示す。それを見てわかるとおり、表面は極めて不均一なものとなっており、表面で極めてランダムに腐食が進行したことが見受けられる。

(5) 鋼板の腐食量

表-12 に鋼板の腐食量の測定結果の一覧を、また 図-32~34 に平均腐食量についてこれをグラフ化したものを示す。表に示すように、一枚の鋼板につき約30~40箇所測定を行い、その最大値、最小値、平均値を求めた。図-32~34 を見てわかるとおり、単独シリーズと接

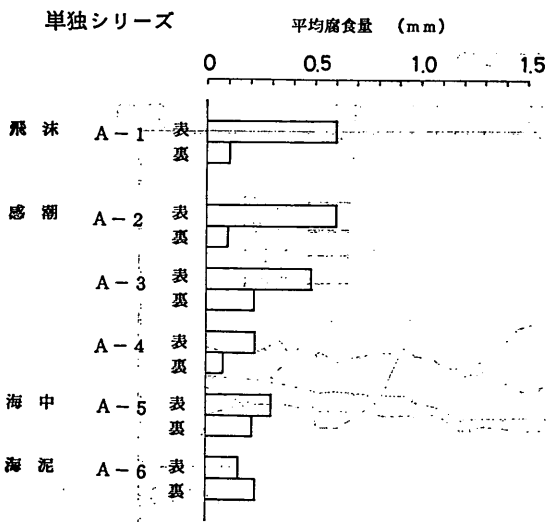


図-32 鋼板の腐食量 (単独シリーズ)

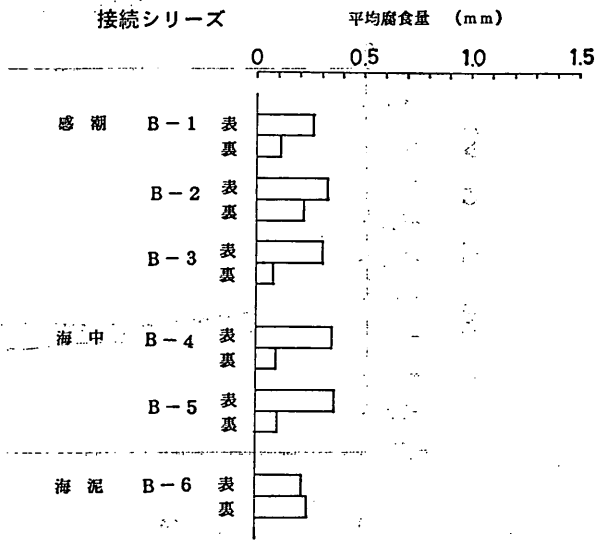


図-33 鋼板の腐食量 (接続シリーズ)

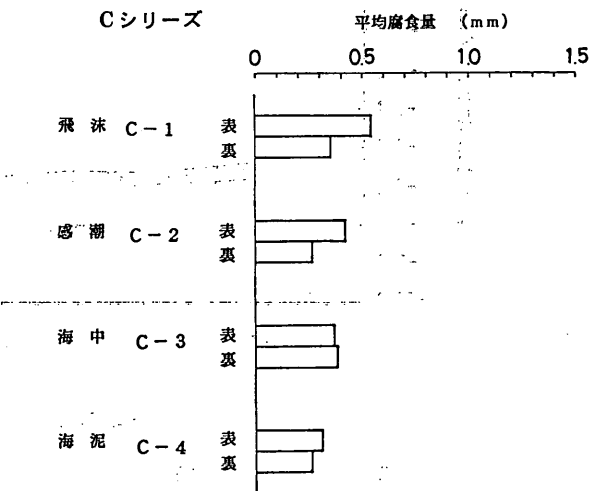


図-34 鋼板の腐食量 (鋼板のみ)

続シリーズでその腐食の傾向は全く異なるものとなった。単独シリーズの場合、図-32 より明らかなとおり設置環境の相違が腐食量を大きく支配していた。飛沫部および感潮部の上方に位置する供試体(表鋼板)の腐食量は0.6mmにも達していた。感潮部から海中部、海泥部と下方に移るにつれ腐食量は小さくなっていき、海中部、海泥部の表鋼板で約0.2mmであった。この腐食量の傾向は暴露試験Iで得られた結果とほぼ一致するものであった。一方、図-33 よりわかるとおり、接続シリーズの場合設置環境の相違による腐食量の違いはほとんど

表-12 鋼板の腐食量

No.	初期肉厚 (mm)	現 有 肉 厚 (mm)			腐 食 量 (mm)			データ数
		最大値	最小値	平均値	最小値	最大値	平均値	
A-1	3.2	2.897	2.347	2.599	0.303	0.853	0.601	38
		3.160	3.015	3.099	0.040	0.185	0.101	30
A-2	3.2	2.794	2.255	2.599	0.406	0.945	0.601	38
		3.163	3.023	3.102	0.037	0.177	0.098	30
A-3	3.2	2.879	2.543	2.718	0.321	0.657	0.428	38
		3.117	2.951	2.981	0.083	0.249	0.219	30
A-4	3.2	3.091	2.816	2.979	0.109	0.384	0.221	38
		3.192	3.108	3.125	0.008	0.092	0.075	30
A-5	3.2	3.041	2.753	2.901	0.159	0.447	0.299	42
		3.121	2.965	2.988	0.079	0.244	0.212	30
A-6	3.2	3.157	2.938	3.057	0.043	0.262	0.143	42
		3.086	2.950	2.977	0.114	0.250	0.223	30
B-1	3.2	3.128	2.614	2.950	0.072	0.586	0.250	38
		3.153	3.036	3.094	0.047	0.164	0.106	30
B-2	3.2	3.093	2.703	2.879	0.107	0.497	0.321	38
		3.141	2.955	2.980	0.059	0.245	0.220	30
B-3	3.2	3.113	2.661	2.898	0.087	0.539	0.302	38
		3.180	3.102	3.124	0.020	0.098	0.076	30
B-4	3.2	3.073	2.715	2.861	0.127	0.485	0.339	42
		3.160	3.097	3.113	0.040	0.103	0.087	30
B-5	3.2	3.067	2.574	2.839	0.133	0.626	0.361	42
		3.177	3.081	3.108	0.023	0.119	0.092	30
B-6	3.2	3.075	2.911	2.986	0.125	0.289	0.214	42
		3.048	2.932	2.965	0.152	0.268	0.235	30
C-1	3.2	2.903	2.362	2.662	0.297	0.838	0.538	38
		2.981	2.662	2.847	0.219	0.538	0.353	30
C-2	3.2	2.933	2.573	2.777	0.267	0.627	0.423	38
		3.068	2.778	2.939	0.132	0.422	0.261	30
C-3	3.2	2.951	2.734	2.835	0.249	0.466	0.365	38
		2.969	2.532	2.820	0.231	0.668	0.380	30
C-4	3.2	3.101	2.752	2.889	0.099	0.448	0.311	42
		3.042	2.911	2.944	0.158	0.289	0.256	30

上段が表鋼板, 下段が裏鋼板

見られない。感潮部から海泥部に至るまでその腐食量に大差はなく0.2~0.3mmである。これは先に示した潮位変動に伴い発生するマクロセルの影響によるものと考えられる。また、鋼板のみの場合は図-34よりわかるとおり、単独シリーズの場合と同様に設置環境の影響が大きく、また腐食量も単独シリーズと同程度であった。

4.3 考 察

(1) 腐食電池

a) 単独シリーズ (Aシリーズ)

ハイブリッド部材の表面(海水に接する面)と裏面(コンクリートに接する面)の間に形成されるマクロセルについて考察する。単独シリーズ(Aシリーズ)の結果(図-23)を見ると、表鋼板から裏鋼板の方向(図-22(b)に相当)に電流が流れている。これは裏鋼板がアノードとなる方向であり、当初筆者等が立てた予想とは全く異なるものである。暴露1年後の供試体観察より、鋼板のコンクリートとの接触面は端部から徐々に錆の進行が認められている。したがって、この裏面の錆はこの表裏

の鋼板間に形成されるマクロセルの影響を受けていることが考えられる。次にその規模について考察する。ここで仮に、 0.2mA ($0.22\mu\text{A}/\text{cm}^2$) の腐食電流が1年間コンスタントに流れるとした場合の鉄の溶出量を、鉄の電気化学当量を $0.289\text{mg}/\text{C}$ (クーロン) として算出すると 1.8g (グラム) となる。また、鋼材の単位体積重量を $7.85\text{g}/\text{cm}^3$ として平均鋼板厚減少量を算出してみるとわずか 0.005mm にしか相当しない。実際には最大で約 0.6mm 程度の鋼板厚の減少が生じていることを考えると、このマクロセルが全体の腐食に占める割合は非常に小さいと言える。したがって、ハイブリッド部材の特異性に起因するマクロセルは形成されることは確認されたが、その規模は極めて小さく特に考慮を要するものではない。また、鋼板の腐食はその大部分が鋼板表面に無数に生じるマイクロセルによるものであると考えられ、これに対する腐食防止対策を講ずることが重要であると思われる。

b) 接続シリーズ (Bシリーズ)

本シリーズの場合も表裏の鋼板間に形成される腐食電池は極めて微小なものである。しかし、潮位の変動に伴い、異なる環境下に設置されている鋼材間に生じるマクロセル (図-25 参照) の影響は無視できない。先に a) で示した計算と同様の考え方で 20mA ($22.2\mu\text{A}/\text{cm}^2$) の電流が1年間コンスタントに流れるとしてその腐食量を計算すると 0.5mm にも相当する。このことより、本シリーズのように1つの部材の鋼板が数種の異なる海洋環境下を貫いて存在する場合は、その表面に形成されるマイクロセルに加えて潮位変動に伴い形成されるマクロセルが全体の腐食量に大きな影響を及ぼすことになる。

c) 鋼板のみ (Cシリーズ)

本シリーズの場合もAシリーズの場合と全く同様であり2枚の鋼板間に形成されるマクロセルは極めて小さく鋼板表面に無数に形成されるマイクロセルがその腐食の大部分である。

(2) 鋼板の電位

鋼板の電位に関し、各シリーズを通じて共通して言えることは、飛沫部に位置する鋼板は約 -500mV 程度でかつ若干の変動を示すのに対し、海中部、海泥部に位置する鋼板は約 -700mV でかつその変動は極めて小さいという点である。また、感潮部の供試体は両者の中間的な傾向を示した。これよりわかるとおり、電位の貴卑と腐食量の傾向は必ずしも一致していない。言い換えれば、電位の貴な飛沫部の鋼板の方が電位の卑な海中部、海泥部の鋼板より腐食量は大きかった。これは鋼板への酸素の供給量が各環境毎に大きく異なるためと考えられ

る。このように、鋼板の電位はその腐食の状況のみにより決まるものではなく、鋼材の置かれた環境により変動する。

(3) 鋼材の腐食速度

本暴露試験および前章でまとめた暴露試験Iを通じて、ハイブリッド部材の鋼材部の腐食量は同一条件の裸鋼材と同等の極めて大きなものとなった。しかし、この1年間の腐食量をハイブリッド部材の腐食速度とするには2~3の問題がある。1つは海洋環境の場合も含めて鋼材の腐食は初めの1~2年が最大であり、その後種々の要因により時間の経過とともに漸減していくことである。また、もう1つは製造時の鋼板はその厚さにある範囲の許容誤差を有する点である。前者の要因による誤差は試験期間を長く設定すれば必ず小さくなるが、短期間の試験ではこれを補正する事は難しい。一方、後者の要因による誤差は採取するデータ数を多くすれば短期間の試験でもその影響を小さくすることが可能である。したがって、今回のように暴露1年時での試験では、得られたデータに幾分の誤差を含み、かつどちらかという腐食量は大きめに算出されていることが考えられる。したがって、ハイブリッド部材の腐食速度については後章で述べる実験、調査の結果も踏まえ、8章において改めて鋼矢板、鋼管杭等に関する長年の調査結果との比較を行い考察することとする。

5. 部材の暴露試験 III

—鋼材部が直接海洋環境に触れない場合の腐食特性の把握を目的とする試験—

5.1 概要

これまで述べてきた3章と4章の暴露試験では、ハイブリッド部材の鋼板が直接海洋環境に接する状態を想定していた。ハイブリッド部材の実用化の先駆となった欧州では、主に石油掘削用プラットフォームの流水に対する耐衝撃性の向上を目的として当部材を使用した⁹⁾。その場合は、鋼板を海洋環境に直接配置するのは必須であった。ところが、我が国において当部材を使用する目的はこれとは異なり、必ずしも鋼板を外面に露出させる必要はない。沈埋トンネル、浮き桟橋等の構造物では鋼材はその内側に配置することになる。こうした場合は、鋼材の腐食がかなり低減されることが予想される。本章においては、そのような場合を想定して実施した供試体の暴露試験結果を取りまとめる。

(1) 供試体

供試体の概形および寸法を、図-35、36に示す。本図よりわかるとおり、供試体は2つのふたコンクリートと

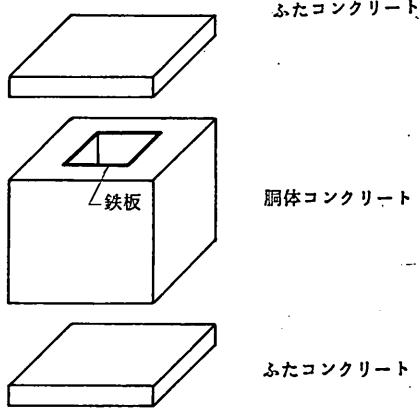
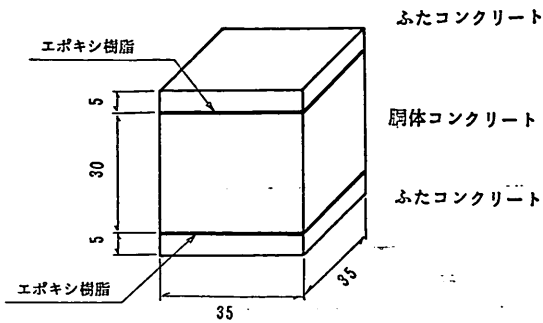


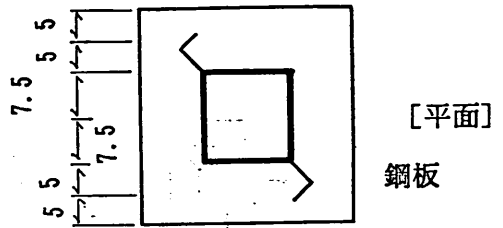
図-35 供試体の概要

1つの胴体コンクリートより成っている。胴体コンクリートは角筒型になっており、内側の4面に鋼板が接合されている。なお、ふたコンクリートと胴体コンクリートはエポキシ樹脂系接着剤（後に詳述）により接着されている。図に示すとおり外寸は $350 \times 350 \times 400\text{mm}$ であり、胴体コンクリートの厚さは 55mm である。使用した鋼板はss41の $t=10\text{mm}$ である。1枚の鋼板を90度に折り曲げ加工したものを2つ溶接することにより、角筒型鋼板を作成した。コンクリートと鋼板の接合は等辺山型鋼（ $3 \times 3 \times 30\text{mm}$ ）により成されている。この角筒型供試体の中空内部に海水および砂を導入した。その導入方法を図-37に示す。

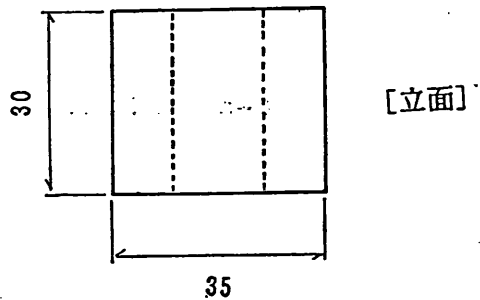
(2) コンクリート用材料およびその配合

コンクリートの製作に使用したセメントは普通ポルトランドセメントである。使用したセメントの試験成績を表-13に示す。また、使用した骨材は暴露試験IIで使用した骨材と同じものである。これらの材料を用いて、表-14に示す配合によりコンクリートの製作を行った。また、同表に材令28日でのコンクリートの圧縮強度を示

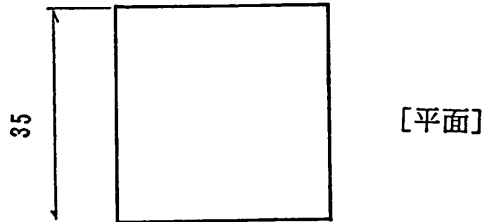
胴体コンクリート



鋼板



ふたコンクリート



鋼板

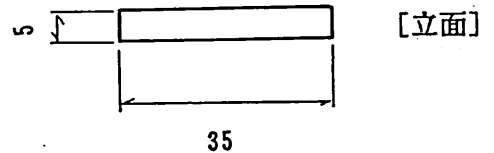


図-36 供試体形状、寸法

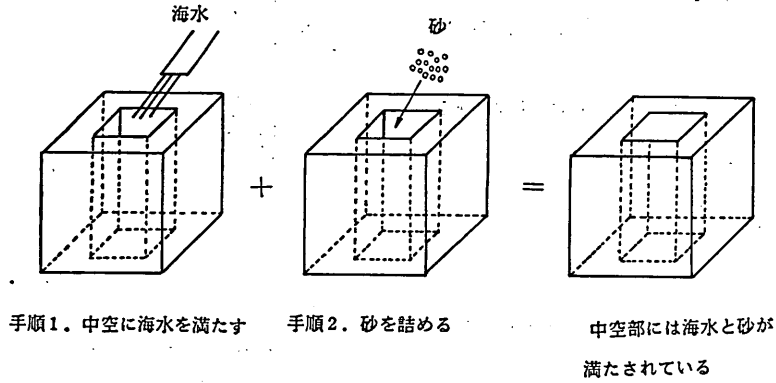
す。なお、この圧縮強度は6本の平均値である。

また、ふたコンクリートと胴体コンクリートの接着に用いた接着剤は土木建築用2液混合型エポキシ樹脂系接着剤であり、JIS A 6024に適合するものである。

(3) 供試体の養生および暴露方法

ふたコンクリートおよび胴体コンクリートは、打設後約1か月間自然環境下において気中養生を行い、その

ケース1 砂+海水の導入



ケース2 海水の導入

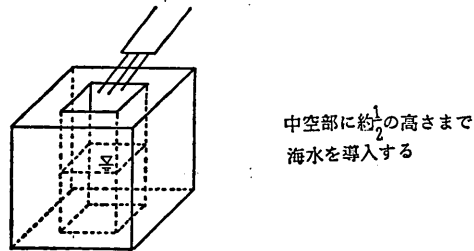


図-37 鋼板内部への海水および砂の導入

表-13 セメントの試験成績

	比重	比表面積	凝 結		酸 化 マグネシウム (%)	三酸化硫黄 (%)	強熱減量 (%)
			始 発 (h-m)	終 結 (h-m)			
普通ポルトランドセメント	3.16	3,230	2-32	3-48	1.7	2.0	0.9

表-14 コンクリートの配合および圧縮強度

G _{max} (mm)	Slump (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)					圧縮強度 σ_{28} (kgf/cm ²)
					W	C	S	G	A E 剤	
25	8	4.0	55	42.4	154	280	790	1095	2.8	340

後、先に示したように砂および海水の導入を実施した。
供試体の暴露は当研究所構内の飛沫部シミュレーション暴露場装置において実施した。図-38 に供試体の暴露

時の状況を示す。これよりわかるとおり、供試体内部の鋼板は、供試体製作時に導入した海水砂もしくは海水に直接接するものの、外部環境である海水のスプレーは直

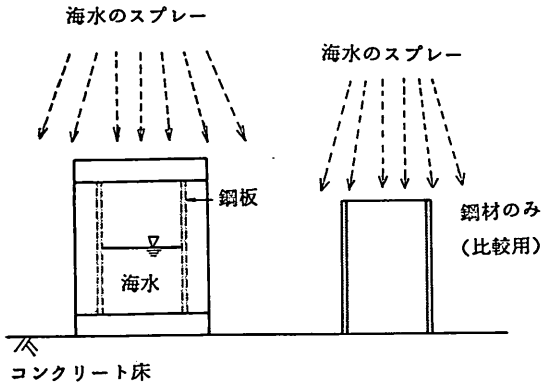


図-38 供試体の暴露方法

受けられないようになっている。これより、外部環境からの塩素イオンおよび酸素の供給はコンクリートにより遮断されていることになる。この状況は沈埋トンネルの内側のような状況をシミュレートしている。また、同図に示すように裸鋼板も比較用として暴露した。

(4) 試験項目およびその方法

a) 暴露後の供試体の外観観察

所定の期間を経過した供試体を暴露場所から取り出し、その外観性状の観察を行った。コンクリート表面の表面劣化、クラック等に特に注意して観察を行い、写真

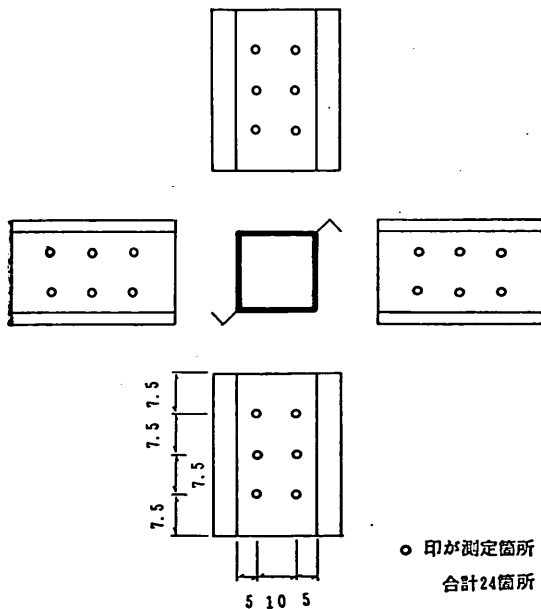


図-39 鋼板厚測定箇所

撮影を行った。その後、コンクリートカッターにより上部ふたコンクリートと胴体コンクリートを切り離し、鋼板内部の状況を観察した。内部に導入した海水および砂を取り出した後、削岩機によりコンクリートを破碎し鋼板とコンクリートを完全に分離した。最後に鋼板の状況を観察し、写真撮影を行った。

b) 残存鋼板肉厚の測定

取り出した鋼板の表面に付着しているコンクリートおよび錆生成物を完全に取り除いた後に、超音波式厚み計を用いて、図-39に示す要領で残存鋼板肉厚の測定を行った。図に示すように鋼板の各面につき6点の測点(合計24測点)を選び、1測点につき3回ずつ測定を行った。

5.2 試験結果

(1) 暴露後の供試体の外観性状

暴露2年を経た供試体の表面は海水によりかなり汚れていた。写真-13に暴露後の供試体の状況を示すが、いずれも緑色がかっていた。しかし、表面のクラック等の劣化、あるいはふたコンクリートと胴体コンクリートの

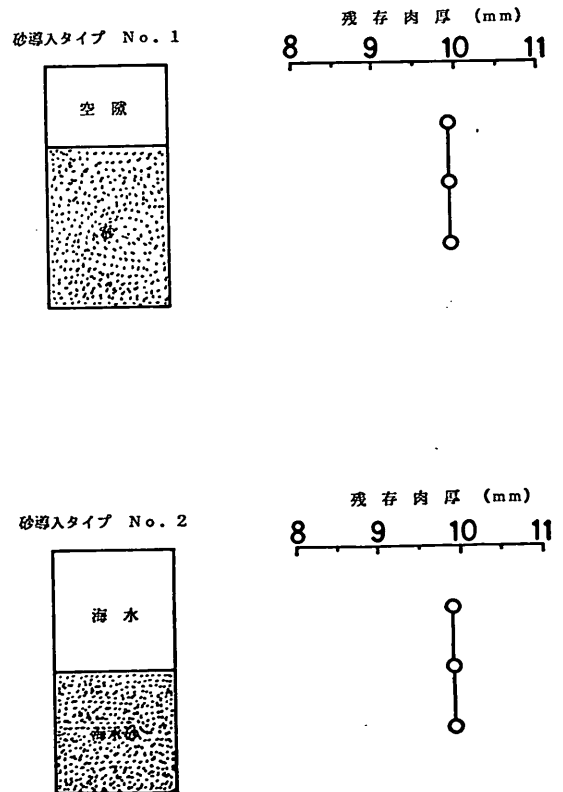


図-40 暴露後の鋼板内部の状況と残存肉厚の一例 (暴露1.5年後)

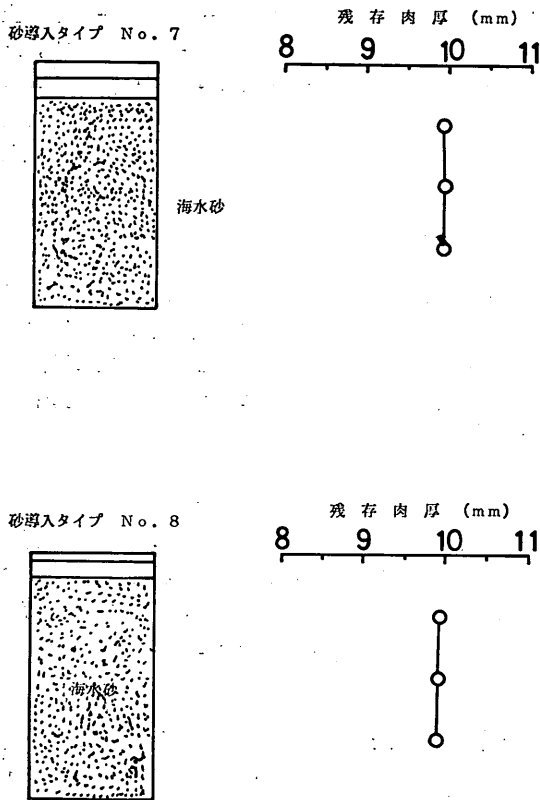


図-41 暴露後の鋼板内部の状況と残存肉厚の一例 (暴露2年後)

剥離などは見られず、コンクリートの強度は低下していないことが推察された。一方、鋼板のみのものは全面にわたって発錆が進んでいた。ふたコンクリートと胴体コンクリートを切り離した状態の一例を写真-14および写真-15に示す。また、写真-16に供試体より取り出した鋼板の状況の一例を示す。これよりわかるとおり、コンクリートと接していた表面はほとんど錆が見られず、一方、海水砂あるいは海水に接していた内側の表面は錆びていた。

(2) 鋼板の腐食量

図-40および図-41に暴露後(図-40が暴露1.5年、図-41が暴露2年)の鋼板内部の状況とそれに対応する鋼板の残存肉厚の測定結果の一例を示す。参考のため付図-2、付図-3に暴露後の鋼板内部の状況と鋼板厚の全測定結果を示す。また、鋼板厚測定点の状況別に鋼板の腐食量(mm/年)をまとめたものを表-15に示す。暴露2年時の腐食量の方が暴露1.5年時の腐食量よりも小さいという、一見納得し難い値を示す場合もあった。このような測定値が得られた理由の一つとして、測定機器

表-15 暴露後の残存鋼板厚

鋼板厚測定点の状況	暴露1.5年		暴露2年	
	腐食量(mm)	腐食速度(mm/年)	腐食量(mm)	腐食速度(mm/年)
海水と砂の混合	0.069	0.046	0.083	0.042
海水	0.079	0.052	0.062	0.031
砂(乾燥)	0.078	0.052	—	—
空隙	0.086	0.057	0.061	0.031
Ave.	0.078	0.052	0.069	0.034

による測定誤差が挙げられる。本測定は超音波式厚み計を用いたが、本機器は使用条件(初期調整の方法、計測実施者の違い、測定プローブと測定対象鋼板の接触状況、等)の違いにより測定データが微妙に異なってくる。また、今回測定を行ったのが、暴露1.5年と暴露2年と比較的接近しており、この両者の間の腐食量に有意な差が無かったとも考えられる。これらの理由を踏まえ、暴露1.5年と2年の比較は断念し、これらを総合的にとらえ考察するものとする。

5.3 考察

今回の暴露試験で得られた鋼板の腐食量は3章および4章で述べた暴露試験I、IIに比較して小さいものとなった。これは、酸素の供給条件が大きな理由であると考えられる。外側のコンクリートにより鋼板へ酸素が到達しにくくなったため、鋼板の腐食もそれだけ抑制されたものと思われる。また、鋼板の接触面の状況の違い(海水と砂、海水、乾燥砂、空隙)の影響はさほど大きなものでなく、暴露2年で腐食量0.06~0.08mm(腐食速度0.03~0.04mm/年)となった。

暴露1.5年と暴露2年でその腐食量に有意な差がないことを前節(5.2)で述べたが、これは暴露期間の経過とともに腐食速度が小さくなっていることを示しているとも考えられる。本暴露試験より得られた腐食量の絶対値に関する考察は、第8章で改めて述べることにする。

6. 実構造物調査

6.1 概要

3~5章において供試体の暴露試験結果についてまとめた。しかし、それらは長くても暴露期間2年までの結果であり、ハイブリッド部材の劣化状況の把握等については有意義な知見が得られても、腐食速度の考察を行うにはデータ不足である。これらの状況に鑑み、比較的長

鋼-コンクリート接合ハイブリッド部材の海洋環境下における耐久性

い供用期間を経た実構造物の中からハイブリッド部材と同一型式と考えられるものを選びその劣化状況の調査を実施した。

(1) 調査対象構造物

調査の対象とした構造物は名瀬港（鹿児島県）の栈橋式係船岸である。この栈橋は下部の鋼管杭と上部のコンクリートスラブを鋼板を介して連結する構造型式となっている。図-42 にその概要を示すが、これよりわかるとおり、鋼管杭と上部スラブをつなぐ鋼板はその片面がコンクリートに接しもう一方の面が海洋環境に直接接するようになっている。これは、まさしくハイブリッド部材

の鋼板とほぼ同一の条件である。また、この鋼板はH・W・Lより0.5m上方に位置している。この鋼板の一部(10×10cm)を切り出し残存肉厚の測定を行った。切り出した鋼板の位置を図-42 および 図-43 に示すが、これよりわかるとおり6ヵ所において切り出しを行った。係船岸のほぼ中央付近において、海側から陸側に向かって、一列(5ヵ所)となるように切り出し点を設定した。

(2) 鋼板厚の測定

以上に示す要領で切り出した鋼板を試験に供した。厚く硬い錆は火力による加熱と水による冷却を数回繰り返

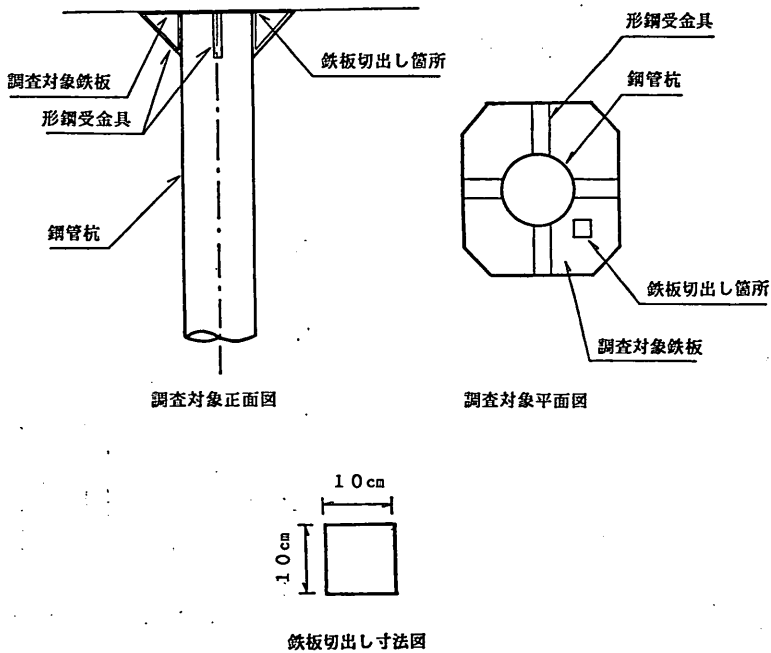


図-42 鋼板の切り出し位置

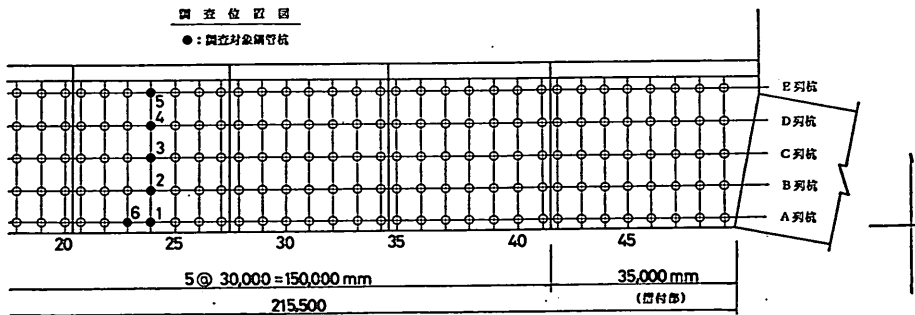


図-43 調査対象杭の位置（名瀬港栈橋）

して除去し、その後10%のクエン酸二アンモニウム溶液に浸せきし表面の錆を落とした。錆除去後、表面に1cm間隔の格子状の測定点を設け、マイクロメーターにより残存肉厚を測定した。以上の方法で求めた残存肉厚を初期肉厚6mm(ミルシート記載値)から減じることにより腐食減量を求めた。また、このようにして求めた腐食減量を構造物のこれまでの供用期間(7年)で除することにより腐食速度を算出した。

6.2 調査結果

(1) 構造物の状況

写真-17に調査対象の鋼板の腐食状況の一例を示す。これよりわかるとおり、調査の対象となった鋼板はすべてその全面にわたって発錆していた。また、海水のスプラッシュを浴びるためにその表面には無数の水滴が付いており、鋼板は常に湿度の高い状態に置かれていることが推定された。

また、写真-18に切り出した鋼板の状況を示す。鋼板は表面(海水のスプラッシュに接していた面)も裏面(コンクリートに接していた面)も発錆していたため、裏面もほとんど発錆が進んでいることが推察される。

(2) 鋼板厚減少量

写真-19に錆除去後の鋼板の表面状況を示す。表面は極めて不均質であり、非常にランダムに腐食が進んだことが分かる。表-16に鋼板厚の測定結果を示す。表中の最大値、最小値は一枚の鋼板の測定データ中の最大および最小という意味である。鋼板の腐食速度(1年あたりの腐食量)は0.1~0.4(mm/年)の間に分布しており、平均で約0.25(mm/年)程度であった。

6.3 考察

切り出した6枚の鋼板はいずれも表面のみならず裏面も発錆していたことを考えると、鋼板の裏面(コンクリートとの接触面)もほぼ全面的に発錆していることがわかる。これは2章および3章における暴露実験で得られた結果と一致するものである。今回の調査で得られた鋼

板の腐食速度は、平均で0.2~0.3(mm/年)と暴露実験の結果(0.6mm/年、程度)よりかなり小さいものとなった。このような結果が得られた理由の一つとしては、港研構内の飛沫部シミュレーション暴露場の方が塩分環境としての鋼材腐食に及ぼす影響の程度が厳しいということが考えられる。言い換えれば、シミュレーション装置では1日に6時間の海水のスプレーを受けるが、実環境でそれと同等の海水のスプラッシュを受けるとは考えられない。このため、シミュレーション装置において暴露を行った供試体の方が腐食速度が大きく得られたと思われる。また、もう一つの理由としては、鋼板の腐食速度が徐々に低下してきたことが挙げられる。従って、長期間の平均腐食速度を求めている本調査の方が、暴露期間1~2年の実験に比して腐食速度が小さくなったものと思われる。

図-44に各鋼板の平均腐食速度を図示したものを示

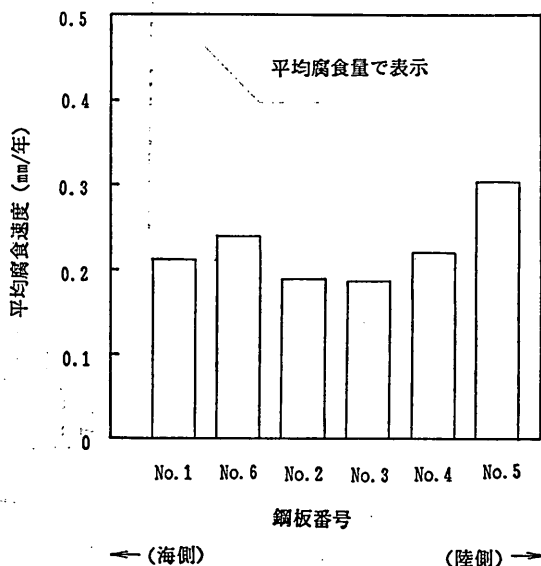


図-44 鋼板の平均腐食速度

表-16 鋼板の残存肉厚

鋼板 No.	現有肉厚 (mm)			腐食速度 (mm/年)			データ数
	最小値	最大値	平均値	最小値	最大値	平均値	
1	3.958	4.978	4.519	0.146	0.292	0.212	132
2	3.906	5.907	4.679	0.133	0.299	0.189	132
3	3.690	5.341	4.697	0.094	0.330	0.186	115
4	3.501	5.047	4.472	0.136	0.357	0.218	99
5	2.752	4.832	3.880	0.167	0.464	0.303	127
6	3.451	4.772	4.317	0.175	0.364	0.240	110

す。これによると、No. 1, No. 6 および No. 4, No. 5 (特に No. 5) が腐食速度が大きくなる傾向を示している。No. 1, No. 6 は海に面しているため波しぶきを受け易い環境にあると言える。一方、No. 4, No. 5 は栈橋の背面に打ち寄せられた波のしぶきを受け易い環境にあると言える。すなわち、鋼板が波しぶきを受け易い(波しぶきを受ける回数が多い)程鋼板の腐食量は多くなっているものと思われる。

なお、本調査を通じて得られた腐食速度の絶対値については第8章でさらに考察することにする。

7. 鋼材部の腐食防止対策に関する試験 —防食塗装・電気防食—

7.1 概要

3章から6章にかけてハイブリッド部材の劣化の特徴を、主に鋼材の腐食という点に着目して検討してきた。それによると、ハイブリッド部材の劣化は主に、その鋼

板の腐食により生じること、また、鋼板の腐食はその置かれた環境により異なる性状を示すこと等がわかった。本章において述べる実験は、ハイブリッド部材の鋼板の防食に視点を移し、既往の防食技術(鋼板への防食塗装, 電気防食)が、ハイブリッド部材に対しても効果があるのかを検討するために行ったものである。

防食塗装に関する試験に用いる供試体は、予め塗装を施した鋼板を用いてハイブリッド部材を製作したものである。塗装材としては、エポキシ樹脂をはじめ数種を選んだ。この部材を海洋環境に暴露しその性状の変化を観察した。

電気防食に関しては、アルミニウム合金の犠牲陽極をハイブリッド部材に取り付けたものを製作し、海中部, 感潮部および飛沫部に暴露した。暴露期間中の鋼板の電位および防食電流を経時的に測定しその防食効果を検討した。

7.2 防食塗装試験用供試体

表-17 塗装材料および仕様

No.	塗 装 材 名	塗 装 仕 様
1	エポキシ樹脂塗料	3層塗り 標準塗布量: 0.20kg/m ² /回
2	エポキシ樹脂塗料と ポリウレタン樹脂塗料	下塗り: エポキシ樹脂 1層 中塗り: 1層目: エポキシ樹脂 2層目: ポリウレタン樹脂 上塗り: ポリウレタン樹脂 1層 標準塗布量: エポキシ樹脂: 0.20kg/m ² /回 ポリウレタン樹脂: 0.12kg/m ² /回
3	エポキシ樹脂系厚膜 無溶剤型ライニング	下塗り: プライマー 標準塗布量: 0.11kg/m ² /回 上塗り: 厚膜ライニング剤 ローラー塗り
4	水中硬化型ライニング (ペイントタイプの薄膜型)	下塗り: プライマー 標準塗布量: 0.11kg/m ² /回 上塗り: 水中硬化型ライニング剤 ローラーもしくはウエットハンド法
5	エポキシ樹脂モルタル	エポキシ樹脂モルタル1層塗り ウエットハンド法
6	タールエポキシ樹脂系塗料	下塗り: 厚膜型ジnkリッチペイント 標準膜厚: 75μ 上塗り: (1層~3層) タールエポキシ樹脂塗料 標準膜厚: 250μ/層

防食塗装試験に用いた供試体は、3章で述べた暴露試験に用いたHR2型（小型供試体、片面鋼板）と全く同様（図-2 参照）である。供試体を組み立てる前に鋼板に防食塗装を施した。図-45 にその防食塗装の範囲を示

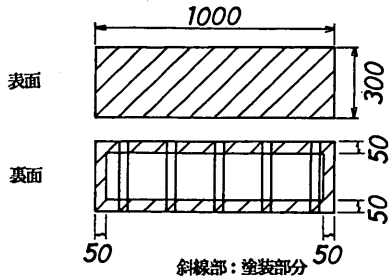


図-45 鋼板への防食塗装の範囲

す。この図に示すとおり、表面（海洋環境に接する面）は全面にわたって塗装を施し、裏面（コンクリートと接する面）は、端から5cmの内部まで塗装した。塗装材としては供試体製作時において市販され、かつ比較的広く使用されているものを選択した。選択した塗装材の種類と塗装仕様を表-17 にまとめて示す。塗装仕様は塗装材メーカーの標準仕様に則って決定した。

7.3 塗装材の評価

供試体は製作後直ちに港研構内の飛沫部シミュレーション装置に設置し暴露を開始した。暴露開始後経時的にその性状の観察を続け、暴露2年を経過した時点で暴露を打ち切った。各種塗装を施した供試体の外観性状の観察を通じて塗装効果ならびに異なる塗装材の比較検討を行った。

7.4 電気防食試験用供試体

電気防食試験に用いた供試体は、3章で述べた暴露試験に用いたHR1型およびHS1型（大型供試体、片面（両面）鋼板、図-2 参照）と全く同様である。この供試体の鋼板にアルミニウム合金の犠牲陽極を取り付けた。犠牲陽極の取り付け位置および取り付け方法を図-46 に示す。この図よりわかるとおり、犠牲陽極は鋼板のほぼ中央に位置するように取り付けられた。また、取り付けの際には防食電流の測定を行うために塩化ビニール（絶縁のため）により製作したボルトとナットを使用し、通常の状態では犠牲陽極と鋼板は非導通の状態となるように工夫した。このような犠牲陽極がセットされた供試体を海中部、感潮部および飛沫部に設置し、防食電流および鋼板の電位を経時的に測定した。

図-47 に防食電流の測定システムを示す。図に示すとおり、塩化ビニール板をはさむ両側の鋼板に測定用リード線を接続し、この両鋼板間の電位差を測定し電位降下法により流れる電流を算出した。また、図-48 に鋼板の

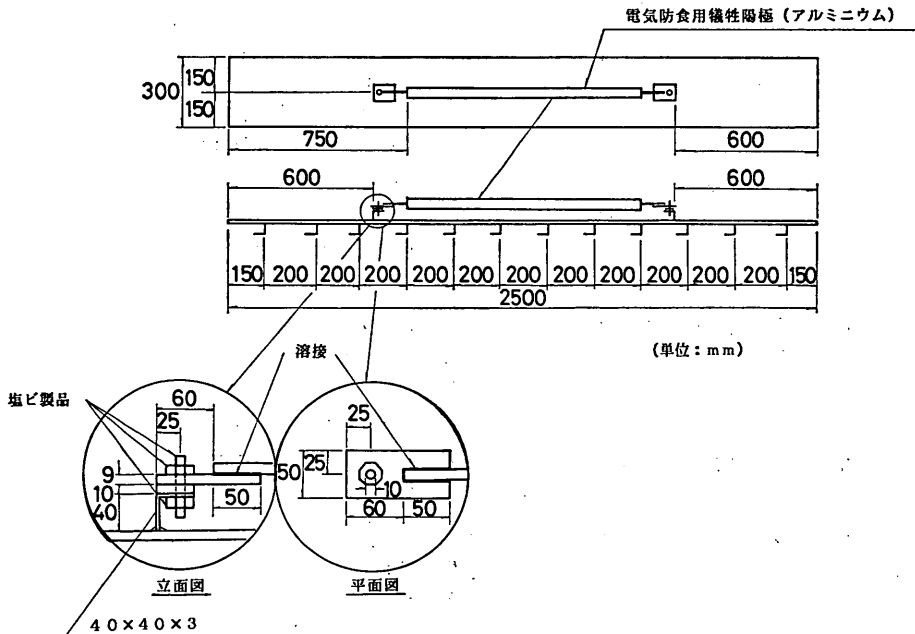


図-46 電気防食用犠牲陽極の取付方法

鋼-コンクリート混合ハイブリッド部材の海洋環境下における耐久性

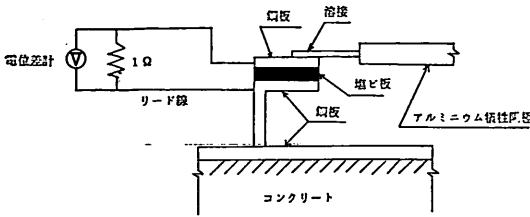
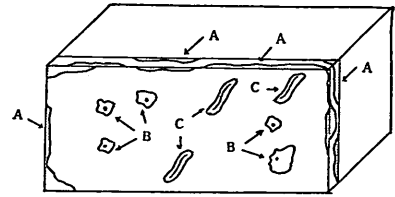


図-47 防食電流の計測システム



A : 鋼板隅内部の塗膜の薄い部分に生じる腐食
B : 塗膜の一部の膜厚が薄い部分に生じる腐食
C : 施工時に生じた塗膜の傷より生じる腐食

図-50 塗膜を施した鋼板に生じる腐食のモデル

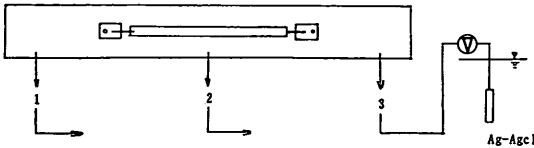


図-48 鋼板の電位の測定箇所

電位の測定ポイントを示す。図に示すとおり、両端2か所、中央1か所の計3か所に測定用リード線を接続し、参照電極として使用した銀-塩化銀電極との間の電位差を測定した。なお、腐食電流、鋼板電位の測定は打点記録計を用いて連続的に行った。

7.5 電気防食の評価

図-49に供試体の設置方法の概要を示す。図に示すとおり、海中部、感潮部および飛沫部の異なる3環境に設置した。この各々について防食電流、鋼板の電位の測定を実施し、既往の調査、研究より得られている所用防食電流密度および鋼材の防食電位と対比させることにより、電気防食の効果の検討を行った。

7.6 試験結果

(1) 塗装供試体暴露後の外観性状

飛沫部（環境的には最も厳しいと考えられる）に2年間暴露した供試体の外観性状を写真-20~24に示す。塗装を施した鋼板の腐食の形態を分類すると、図-50に示すような3つに分類される。すなわち、鋼板の隅角部の

塗膜の薄いとこが原因となる錆(図でAに相当)、鋼板表面で塗膜が一部薄くなっているところが原因となる錆(図でBに相当)、および供試体製作時(施工時)に何らかの理由により塗膜に傷が生じたところが原因となる錆(図でCに相当)の3つである。このような錆の3形態を念頭において暴露後の供試体の状況を総括すると表-18のようになる。塗装材料およびその仕様により防

表-18 暴露後の鋼板の腐食状況

塗装仕様番号	腐食形態*			備考
	A	B	C	
1	◎	◎	○	防食性はあまりよくない
2	◎	◎	○	防食性はあまりよくない
3	◎	○	○	鋼板端部に錆多し
4	◎	△	△	鋼板端部に錆多し
5	—	—	—	施工性が悪く、かつ膜厚が数mmにも達するため、使用不可と判断した
6	×	×	×	防食性良

* 腐食形態の分類は図-50参照
◎錆が非常に多い
○錆が多い
△錆が認められる
×錆が認められない

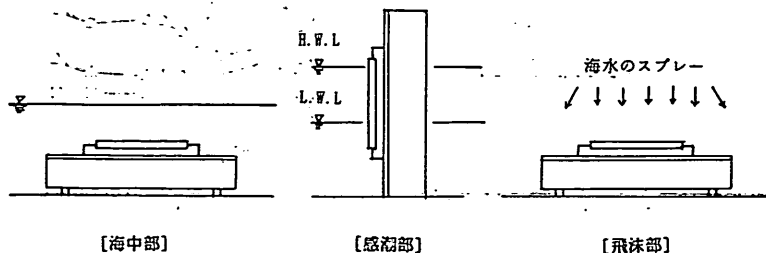


図-49 供試体の設置方法の概要

食効果はかなり差が出てくるのがわかる。今回試験を実施した中では塗装仕様6の挙動が最も優れており、塗装仕様1と2がその挙動が最も悪かった。塗装仕様3と

4は大まかに判断してその中間にあった。なお、塗装仕様5は施工段階においてその施工性が悪く、また塗膜も数 mm とかなり厚くなるのでハイブリッド部材への適

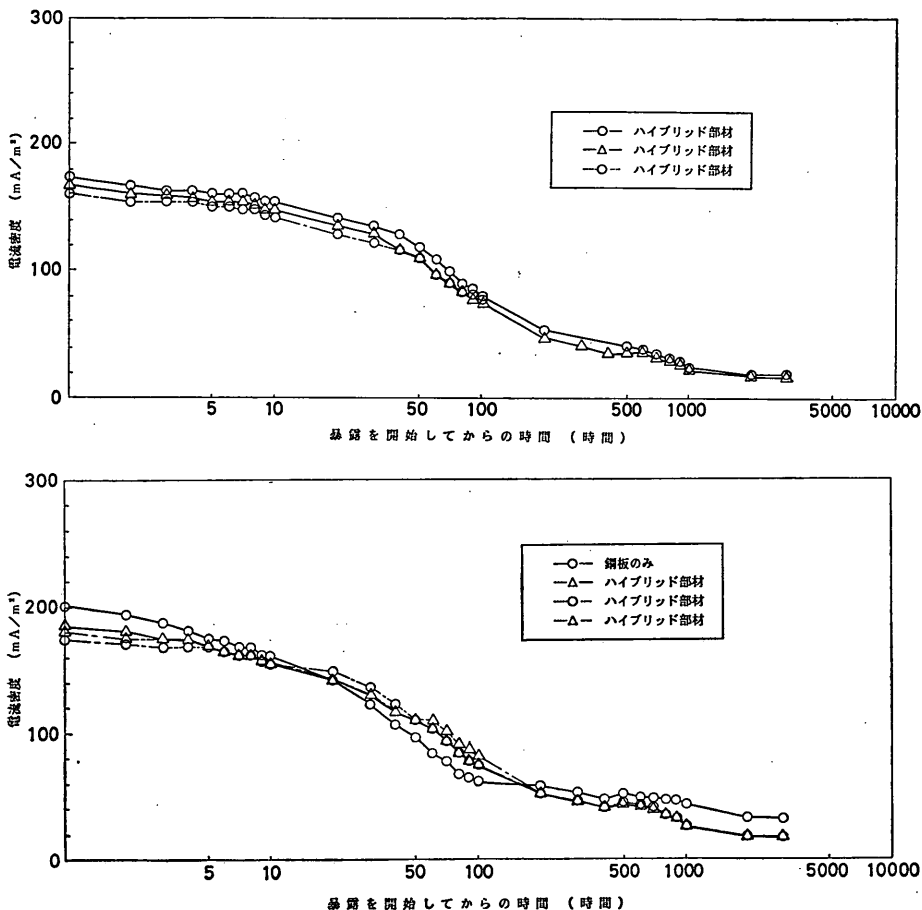


図-51(a)~(b) 電気防食供試体の電流密度の経時変化 (海中中部暴露)

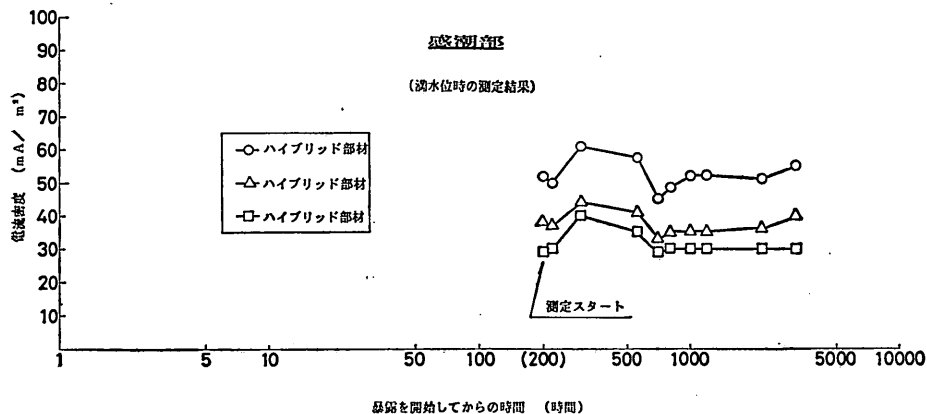


図-52 電気防食供試体の電流密度の経時変化 (感潮部暴露)

鋼-コンクリート接合ハイブリッド部材の海洋環境下における耐久性

用は難しいと判断し、検討対象外とした。

(2) 電気防食供試体の防食電流(密度)、防食電位
 図-51~53 に電気防食供試体の電流密度の経時変化を示す。図-51(a)~(b) は海中中部暴露の場合の経時変化を示している。これを見ると、ハイブリッド部材と鋼板のみ

の場合で経時変化の傾向ならびに防食電流密度の値に差異はほとんど認められない。横井等は既存の港湾構造物の調査より、防食電流密度の定常値は 15mA/m^2 から 70mA/m^2 の間にあり、 30mA/m^2 近辺が最も事例が多いことを報告している⁷⁾。このことを考慮すると、今回

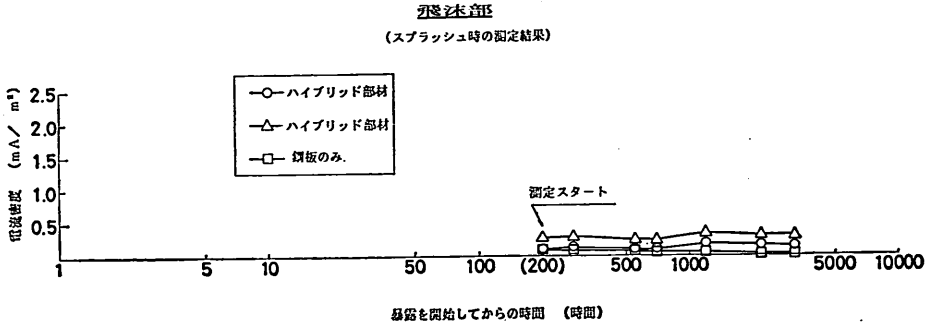


図-53 電気防食供試体の電流密度の経時変化(飛沫部暴露)

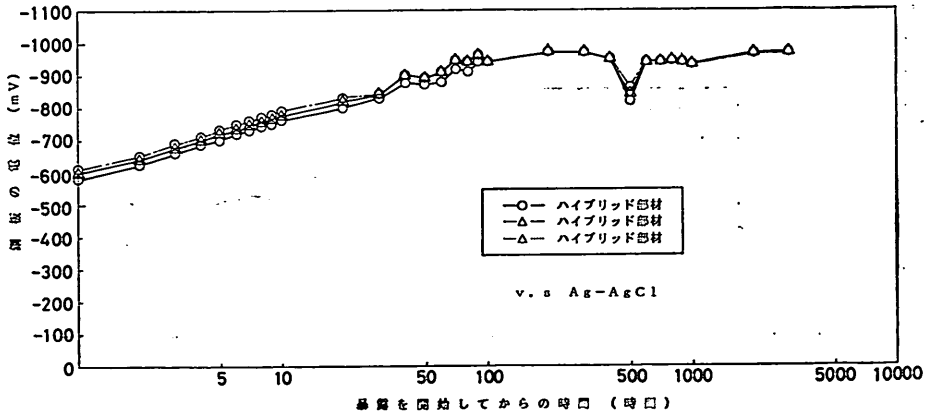
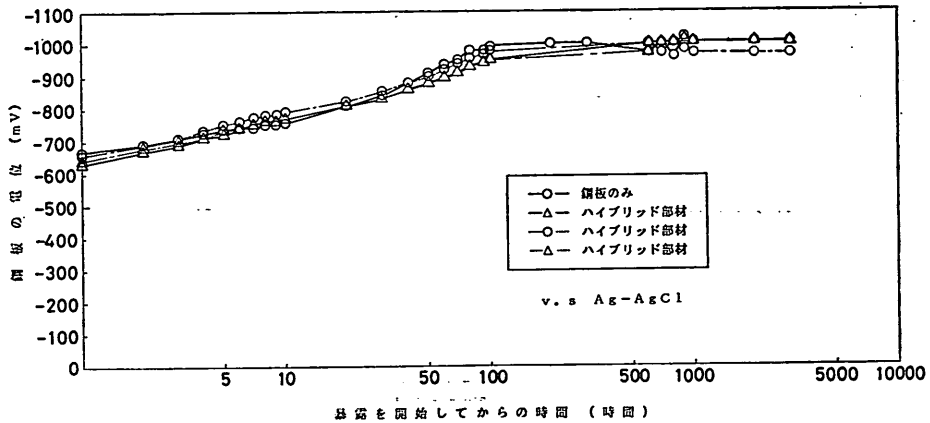


図-54(a)~(b) 電気防食供試体の電位の経時変化(海中中部暴露)

の海中部暴露の場合、暴露を開始して約 100 時間を経過すると防食電流密度はほぼ定常値となり、その後良好な防食状態が保持されていると推定される。また、図-54 (a)~(b) は鋼板電位の 経時変化を示す。鋼板の防食域が約 -800mV (v. s. Ag—AgCl) より卑であることを考えると、いずれも十分防食効果があるものと思われる。電位についても、ハイブリッド部材と鋼板のみの場合でその差異は全く認められない。

図-52 に感潮部暴露の場合の電流密度の経時変化を示す。なお、図中に示した値は満水位時の測定結果である。また、測定は供試体の暴露開始後 200 時間を経過した時点で開始した。測定を開始した時点では既に定常領域に入っており、その後値に大きな変動は認められな

った。満水位時においては、十分な防食電流が流れているものと考えられる。一方、図中には示していないが、干潮位のときは満水位時に比べて、いずれの供試体も約 $30\text{mA}/\text{m}^2$ の電流密度の低下が生じる。これは、犠牲陽極が海水より露出してくるためであるが、このような状態では十分な防食電流を確保することはできない。また、図-55 に感潮部暴露の場合の電位の 経時変化を示す。なお、図中に示す値は満水位時のものである。なお、干潮位時は参照電極が海水から露出してくるために測定データは得られていない。図-52 の場合と同様に測定開始時には既に定常領域に入っており、以後大きな変動は認められなかった。測定を実施した満水位時には、鋼板は十分な防食域に達していると言える。

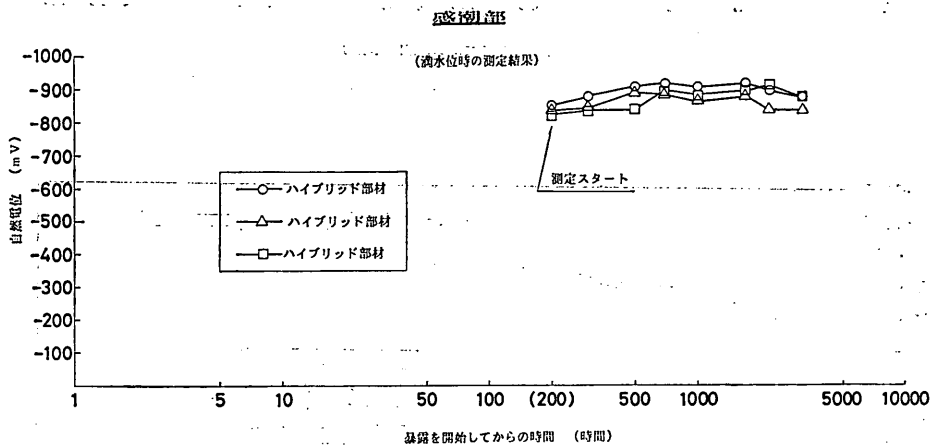


図-55 電気防食供試体の電位の経時変化 (感潮部暴露)

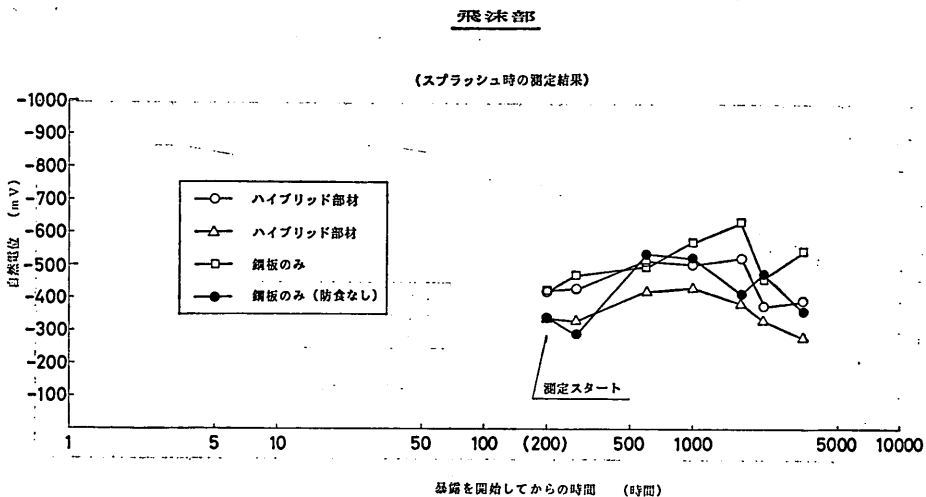


図-56 電気防食供試体の電位の経時変化 (飛沫部暴露)

図-53 に飛沫部暴露の場合の電流密度の経時変化を示す。この場合も暴露開始後約 200 時間を経過した後に測定を開始した。なお、図中に示した値は海水のスプレーが実施されているときに測定したものである。これによると、微小電流が流れているのは認められるものの、防食効果は全く期待できないレベルである。また、図-56 に電位の経時変化を示すが、防食を施している鋼材と無防食の鋼材で有意な差は認められず、またその値が -800mV より貴であることから、防食効果はないものと判断される。以上の結果を総合的に判断すると、海中部に位置する部材に対しては電気防食の効果が十分期待されるものの、感潮部においてはその効果が半減し、飛沫部においては全く期待できない。このことは、鋼構造物にかかる既往の研究結果と全く同様である。

7.7 考察

防食対策として、鋼板への防食塗装および電気防食を取り上げ、その適用性および効果の検討を行った。防食塗装については、今回試験の対象とした 6 種類の中でもその施工性、防食性には大きな差が認められ、防食性が十分であると判断されるのは僅かに 1 種類だけであった。その選択に際しては、他分野（主に鋼橋等）での実績等を十分調査することが重要であると思われる。また、電気防食はハイブリッド部材の場合もその効果（海中部の場合）があることが確認された。基本的には、これまでに鋼構造物に対して言われているように、「海中部に対しては電気防食、感潮部より上方に対しては防食塗装」という考え方でハイブリッド部材の防食対策を施すことが望まれる。

8. 鋼材の腐食速度に関する考察

港湾鋼構造物（鋼管杭、鋼矢板といった構造物）に対しては、その腐食量について長年の調査が実施され、現在では新設構造物の設計段階で腐食速度（1 年あたりの平均腐食量）が導入されるまでに至っている。腐食速度の標準値を表-19 に示す⁹⁾。この表の値は集中腐食を考えない場合である。一方、今回の実験、調査より得られたハイブリッド部材の平均腐食量の一覧を表-20 に示す。表に示したものは、今回の実験、調査により得られた腐食量の平均値である。この実験結果と腐食速度の標準値を比べてみると、比較的よく一致しているようである。当初、筆者等はハイブリッド部材の形状の特異性に起因するマクロセルの生成の可能性を想定し、その規模をモデル実験により確認したが、その腐食量は極めて微小なものであった。このことを考慮しても、ハイブリッド部材の腐食量は鋼材単独の場合の腐食量とは大きく異

表-19 港湾鋼構造物の腐食速度の標準値

腐食環境	腐食速度
1) H. W. L 以上	0.3
2) H. W. L から (L. W. L - 1.0m) まで	0.1 ~ 0.3
3) 海水中	0.1 ~ 0.2
4) 海底土中部	0.03
5) 背面土中部	
a. 残留水位より上	0.03
b. 残留水位より下	0.02

(腐食速度: mm/y)

表-20 鋼材の平均腐食量

暴露環境	平均腐食量 (mm/年)
飛沫環境 (シミュレーション装置) (1年)	0.60
海中部 (1年)	0.27
海水接触 (酸素の供給少の場合) (2年)	0.03
海水砂との接触 (酸素の供給少の場合) (2年)	0.04
飛沫環境 (実構造物調査) (7年)	0.23

なるものではないことが推察される。

9. 結論

前章までに述べた実験、調査により得られた結論を以下にまとめる。

(1) ハイブリッド部材の劣化は、その鋼材の腐食が主因であり、それに伴いコンクリートのひびわれへとつながる場合もある。ハイブリッド部材の耐久性向上のためには、鋼板に対して適切な防食対策を講じる必要がある。

(2) 当初予想された、ハイブリッド部材の特異性に起因するマクロセルはさほど大きな影響を持たない。

(3) 今回取り行った実験、調査の範囲内では、ハイブリッド部材の腐食速度と鋼材のみの場合の腐食速度はほぼ同等の値となった。これより、長年の調査より得られた鋼材の腐食に関するデータをハイブリッド部材へ応用することが可能である。

(4) 電気防食法（犠牲陽極式）は海中部に存在する部材に対しては、その効果が認められたが、感潮部、飛沫部に存在する部材に対してはその効果が期待できない。

(5) 鋼板への防食塗装はその種類により防食効果が異

なるものとなった。材料および仕様を選定するに際しては実績等を十分調査する必要がある。

以上の結果をもとに、以下に示すような基本的な防食対策を考えることができる。

(6) 感潮部および飛沫部は防食塗装、海中部は電気防食という基本的考え方で防食対策を講じる。

(7) 構造物の設計を行うにあたっては、部材の鋼板が直接海洋環境に接することを避ける構造とする。

10. あとがき

鋼板とコンクリートを合成したハイブリッド構造物が今後、港湾分野でも広く建設されていくことが予想される。ハイブリッド部材においては、RCあるいはPC部材に比べてより多くの鋼材が用いられることになるため、海洋環境下で当部材を使用するにあたっては、その腐食に対して十分な対策を施すことが不可欠である。

筆者等の最大の関心は、ハイブリッド部材の鋼材部の腐食性状を考えるにあたって、これまで長年にわたって蓄積されてきた、鋼管杭、鋼矢板に関する研究データが応用可能であるかということであった。本研究で得られた結果をもとに考察すれば、ハイブリッド部材と鋼管杭、鋼矢板とはその腐食性状（腐食速度）はほぼ同一と考えることができるという結論が得られた。また、基本的防食対策も両者で異なるものではないことも結論として得られた。したがって、今後この種のハイブリッド構

造物の建設にあたっては、これまでの鋼構造物に対する防食の考え方を基本にすればよいと思われる。

最後に本研究の実施から報文作成にいたるまで協力していただいた材料研究室の山本邦夫技官ならびに田中寛君に感謝の意を表します。（1990年9月29日受付）

参考文献

- 1) 横田 弘, 清宮 理: 鋼・コンクリート合成部材での形鋼によるズレ止めの耐荷力, 港湾技研資料 No. 595 Sept 1987
- 2) 横田 弘, 清宮 理: 鋼・コンクリートハイブリッド構造物の疲労特性, 港湾技研資料 No. 658 Sept 1989
- 3) 横田 弘, 清宮 理: 鋼・コンクリートハイブリッド構造のL型接合部の力学特性, コンクリート工学年次論文報告集, 12-2 1990
- 4) 善 一章: 港湾における既設鋼構造物の腐食に関する研究, 港湾技術研究所報告 第12巻 第1号 1973.3
- 5) 横井聰之, 阿部正美: 港湾鋼構造物の腐食の実態について, 土木学会論文集 第403号/VI-10 1989年3月
- 6) B. C. Gerwick, Jr and D. Berner: Thermal and Durability Considerations for Composite Steel/Concrete Sandwich Structures, SP 109-3 American Concrete Institute 1988
- 7) 横井聰之, 阿部正美: 電気防食調査に基づく防食電流密度の検討, 港湾技術研究所報告 第25巻 第1号 1986.3
- 9) 港湾鋼構造物防食マニュアル, 助沿岸開発技術研究センター



HS1型 普通ポルトランドセメント使用 飛沫部暴露 下面



HR1型 高炉B種セメント使用 飛沫部暴露



HS1型 普通ポルトランドセメント使用 飛沫部暴露 上面

鋼-コンクリート接合ハイブリッド部材の海洋環境下における耐久性



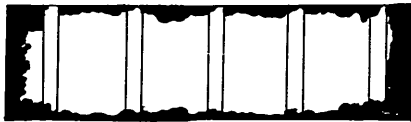
HS1型 高炉B種セメント使用 飛沫部暴露 下面



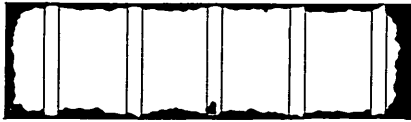
HS1型 高炉B種セメント使用 飛沫部暴露 上面



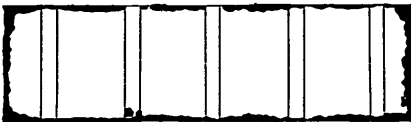
HS2型, 普通ポルトランドセメント使用、飛沫部暴露 (下面)



HS2型, 普通ポルトランドセメント使用、飛沫部暴露 (上面)



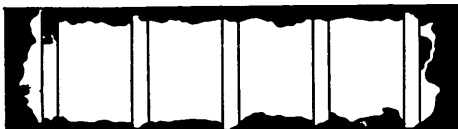
HS2型, 普通ポルトランドセメント使用、海中部暴露 (上面)



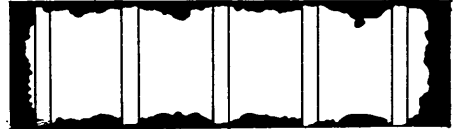
HS2型, 普通ポルトランドセメント使用、海中部暴露 (下面)



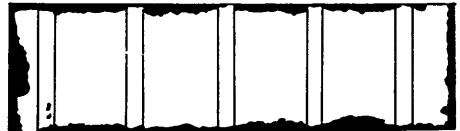
HS2型, 高炉B種セメント使用、飛沫部暴露 (下面)



HS2型, 高炉B種セメント使用、飛沫部暴露 (上面)



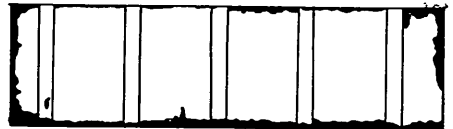
HS2型, 高炉B種セメント使用、海中部暴露 (上面)



HS2型, 高炉B種セメント使用、海中部暴露 (下面)



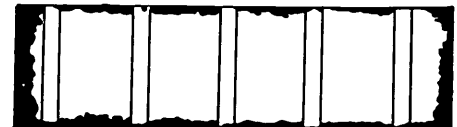
HR2型, 普通ポルトランドセメント使用、飛沫部暴露



HR2型, 普通ポルトランドセメント使用、海中部暴露



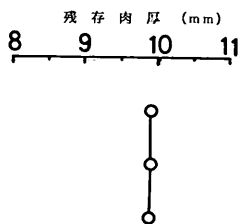
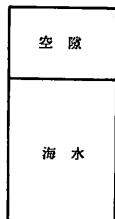
HR2型, 高炉B種セメント使用、飛沫部暴露



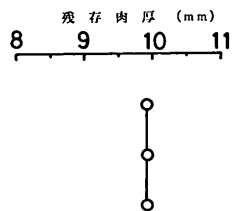
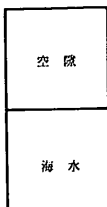
HR2型, 高炉B種セメント使用、海中部暴露

付図-1 鋼板のコンクリートとの接着面の状況

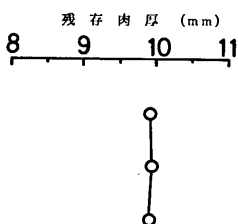
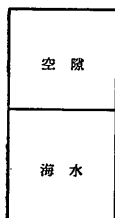
海水導入口タイプ No. 1



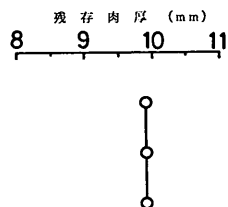
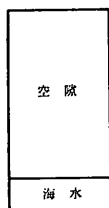
海水導入口タイプ No. 5



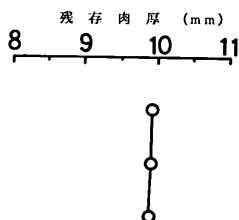
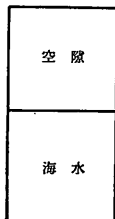
海水導入口タイプ No. 2



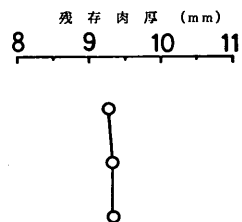
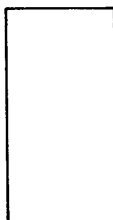
海水導入口タイプ No. 6



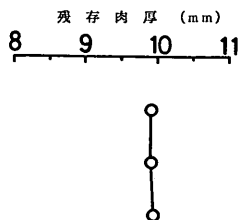
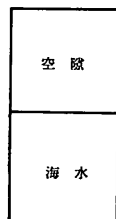
海水導入口タイプ No. 3



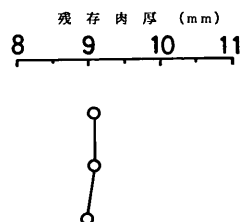
裸鋼板



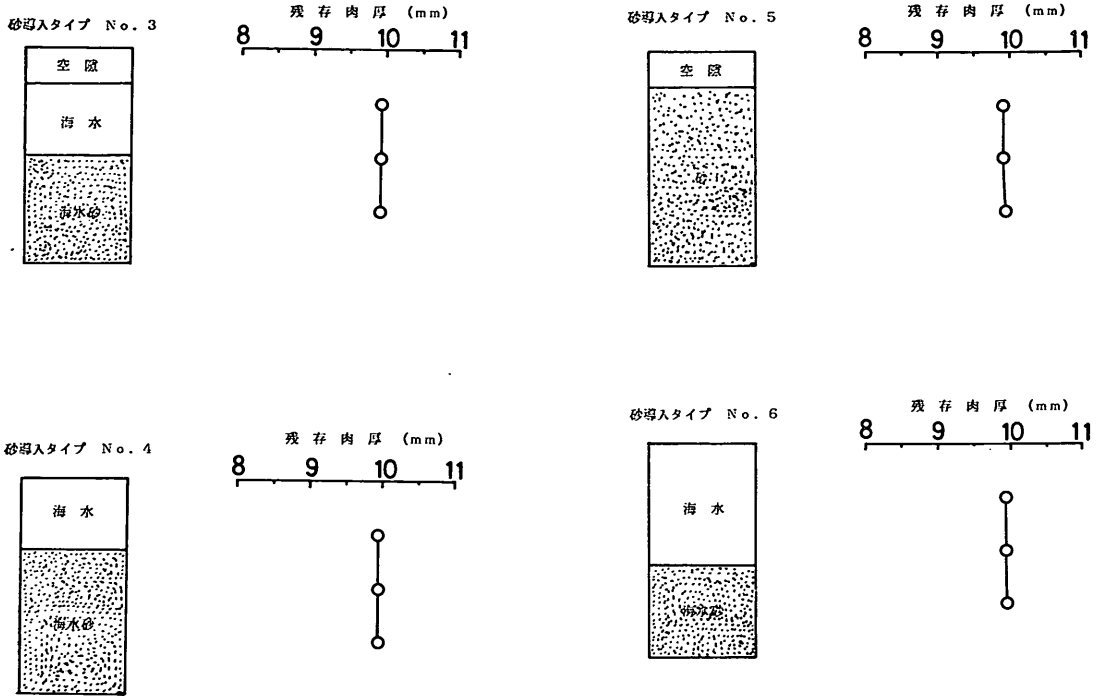
海水導入口タイプ No. 4



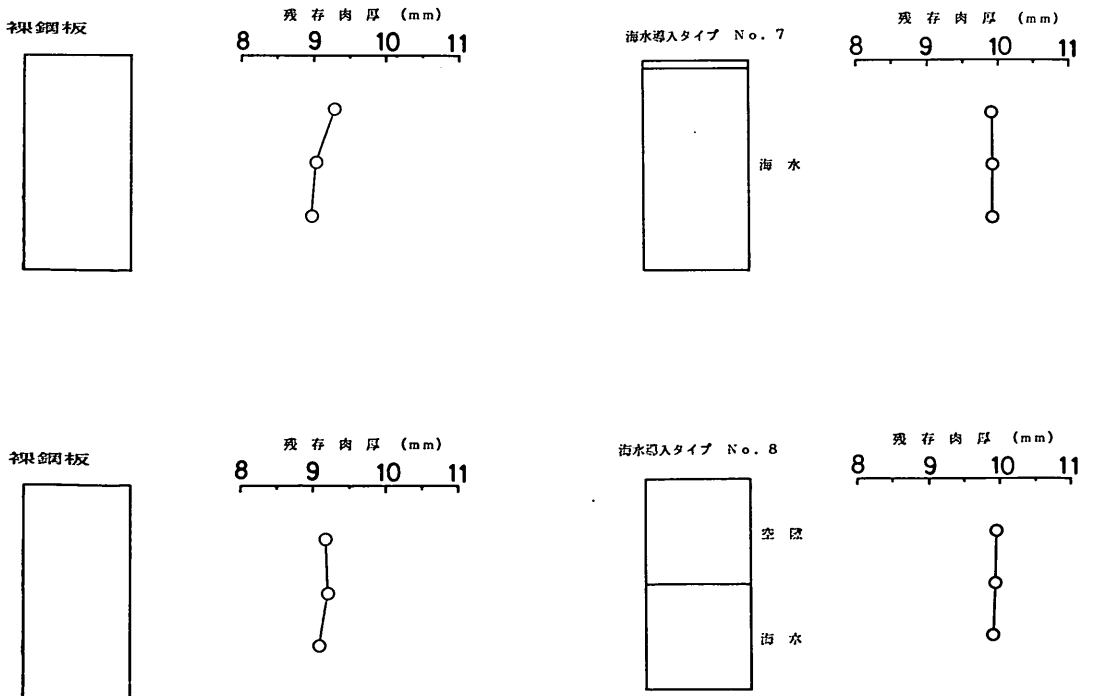
裸鋼板



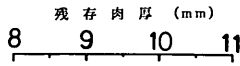
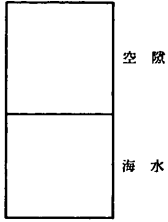
鋼-コンクリート接合ハイブリッド部材の海洋環境下における耐久性



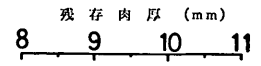
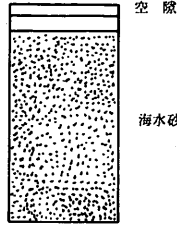
付図-2 暴露後の鋼板の内部の状況と残存肉厚（暴露 1.5 年後）



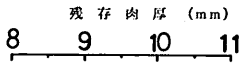
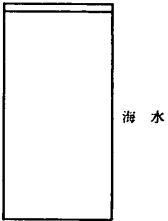
海水導入タイプ No. 9



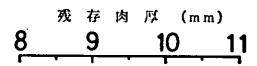
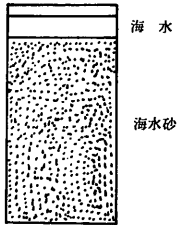
砂導入タイプ No. 9



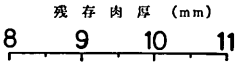
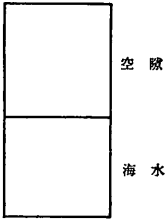
海水導入タイプ No. 10



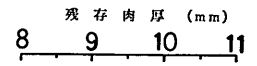
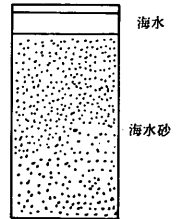
砂導入タイプ No. 10



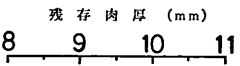
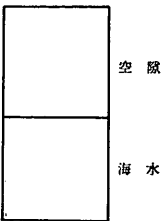
海水導入タイプ No. 11



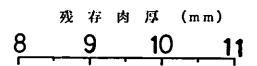
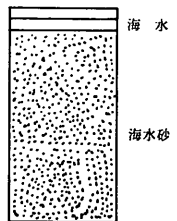
砂導入タイプ No. 11



海水導入タイプ No. 12



砂導入タイプ No. 12



付図-3 暴露後の鋼板の内部の状況と残存肉厚 (暴露 2 年後)



写真-1 供試体の設置状況（飛沫部）

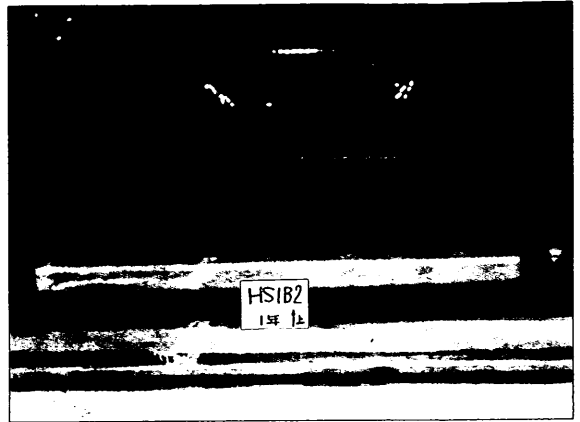


写真-2 暴露1年後の供試体の状況の一例
(HS1型、飛沫部暴露)



写真-3 暴露1年後の供試体の状況の一例
(HS1型、飛沫部暴露)

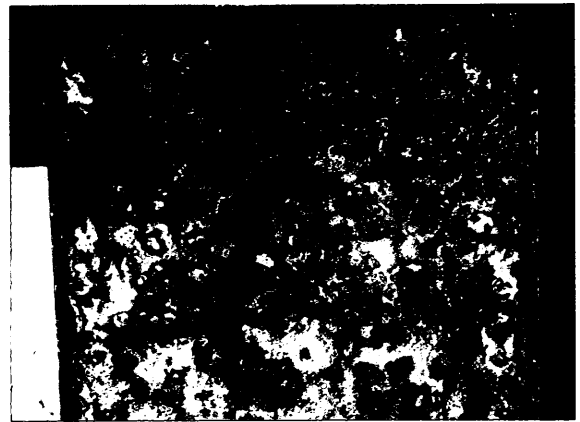


写真-4 鋼板表面の状況の一例



写真-5 ズレ止め鋼より発生したコンクリートのクラック

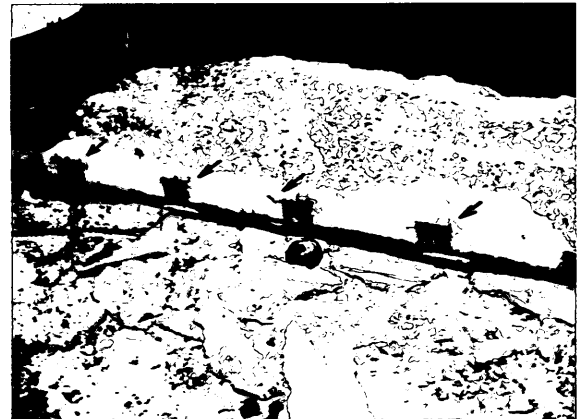


写真-6 ズレ止め鋼より発生したコンクリートのクラック(写真は供試体破砕中に撮影)



写真-7 コンクリートとの接着面の鋼板の状況の一例
(HS1型、飛沫部暴露)

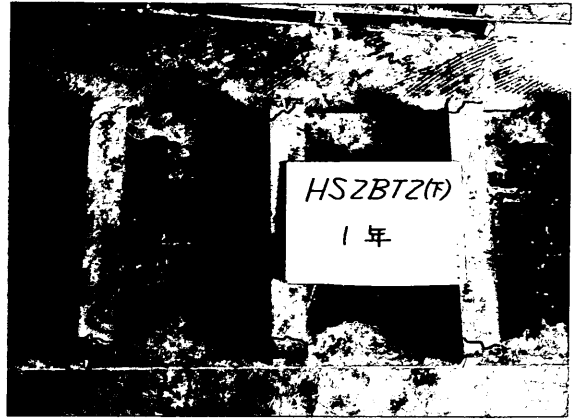


写真-8 コンクリートとの接着面の鋼板の状況の一例
(HS2型、飛沫部暴露)

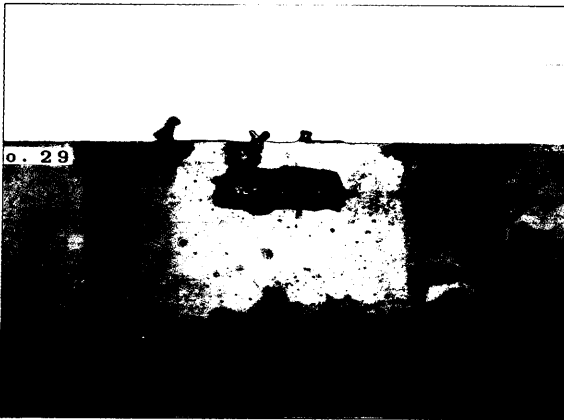


写真-9 暴露1年後の供試体の一例 (側面)

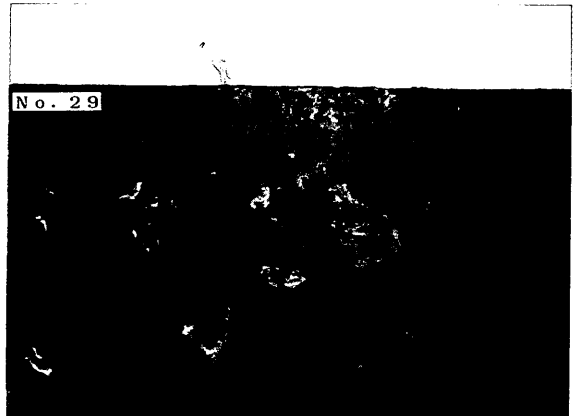


写真-10 暴露1年後の供試体の一例 (鋼板の表面)

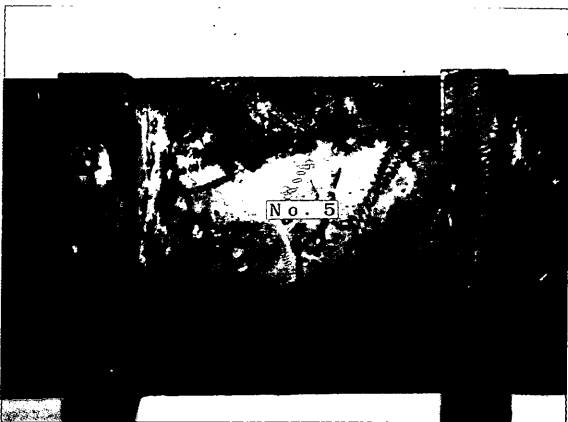


写真-11 コンクリートとの接着面の鋼板の状況の一例

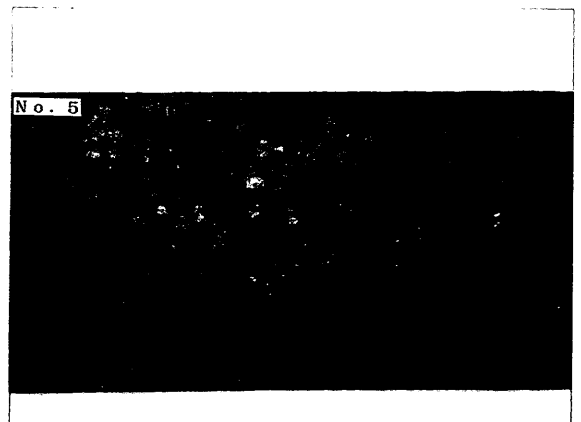


写真-12 錆除去後の鋼板表面の状況の一例

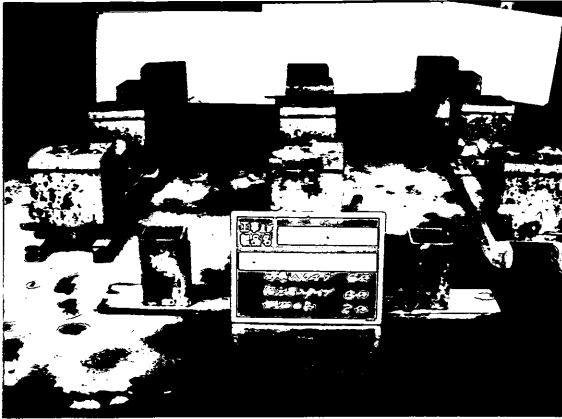


写真-13 暴露後の供試体の外観性状の一例
(暴露2年後)

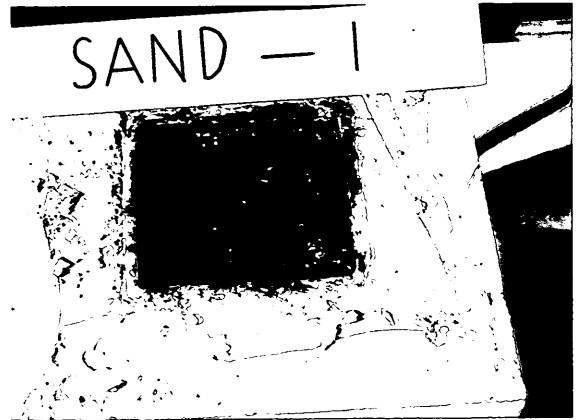


写真-14 暴露後の供試体内部の状況の一例
(海水砂導入タイプ)

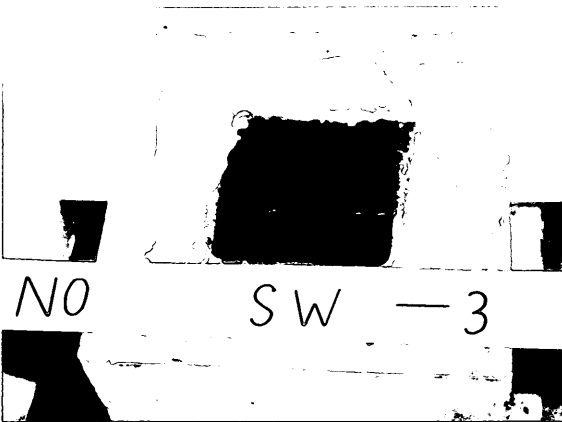


写真-15 暴露後の供試体内部の状況の一例
(海水導入タイプ)

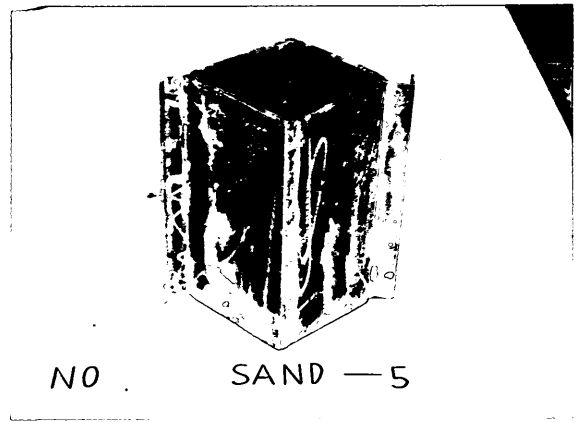


写真-16 コンクリートより取り出した鋼板の一例



写真-17 調査対象鋼板の腐食状況の一例
(名瀬港桟橋式係船岸)

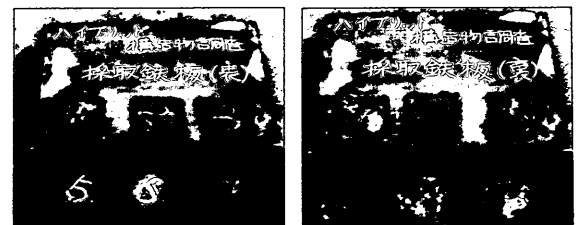


写真-18 切り出した鋼板の状況

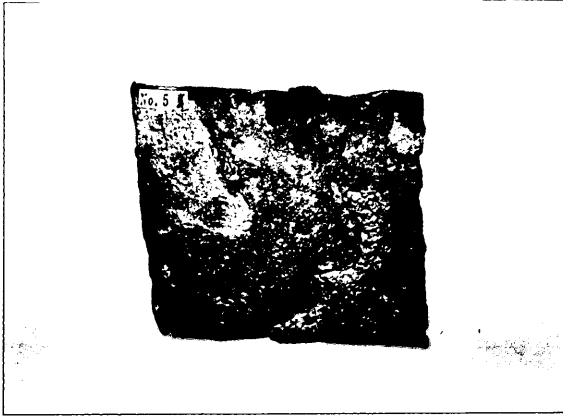


写真-19 錆を落とした鋼板の状況の一例

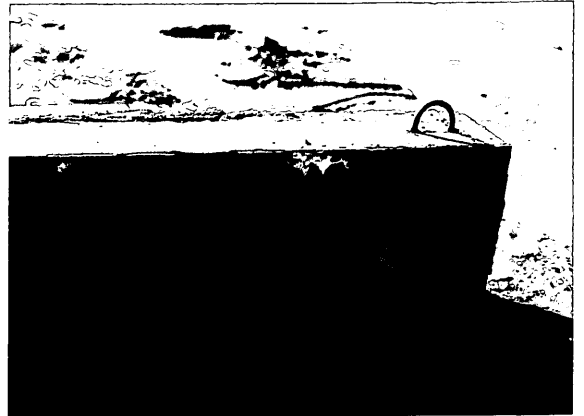


写真-20 暴露後の供試体の状況（塗装仕様1）



写真-21 暴露後の供試体の状況（塗装仕様2）



写真-22 暴露後の供試体の状況（塗装仕様3）



写真-23 暴露後の供試体の状況（塗装仕様4）

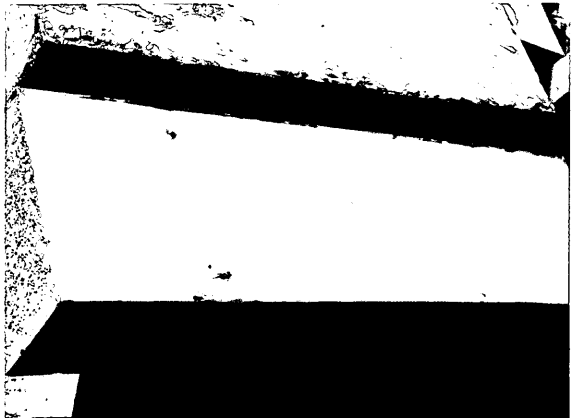


写真-24 暴露後の供試体の状況（塗装仕様6）

港湾技術研究所報告 第29巻 索引

論文名・著者名	巻号	頁
水工部		
消波ブロック被覆堤直立部の滑動安定性に対する波力とブロック荷重高橋重雄・谷本勝利・下迫健一郎	29. 1.	53~ 75
斜め入射波による混成堤マウンド被覆材の安定性に関する実験的研究高橋重雄・木村克俊・谷本勝利	29. 2.	3~ 36
砕波帯内の底質粒度の変動特性 一波崎海洋研究施設における現地調査一加藤一正・柳嶋慎一・栗山善昭・磯上知良・村上裕幸・藤田 誠	29. 2.	37~ 61
短フェッチ海域の波浪推算モデル.....後藤智明・末次広児・永井紀彦	29. 3.	3~ 26
海洋水理部		
多層レベルモデルによる港湾埋没の数値計算モデルの開発 一熊本港への適用例一鶴谷広一・村上和男・入江 功	29. 1.	3~ 51
ベイズ型モデルを用いた海洋波浪の非線型核関数の数値的推定橋本典明	29. 3.	27~ 56
ハイブリッドパラメータ法による波浪推算モデル (第1報) 一東京湾における検討一永井紀彦・後藤智明・小舟浩治	29. 4.	85~118
土質部		
粘性土の水平方向圧密係数の決定法小林正樹・水上純一・土田 孝	29. 2.	63~ 83
事前混合処理工法による処理土の強度・変形特性善 功企・山崎浩之・佐藤 泰	29. 2.	85~118
低置換率 SCP 工法により改良された粘性土地盤の支持力寺師昌明・北詰昌樹	29. 2.	119~148
海底地盤の剛性率に関する現地および室内実験モーセン・パティ・善 功企・山崎浩之・鈴木英男	29. 4.	3~ 26
構造部		
曲げおよびせん断を受けるハイブリッドはりの耐力特性横田 弘・清宮 理	29. 2.	149~175

ケーソンに作用する地震時土圧に関する模型振動実験とその解析	風間基樹・稲富隆昌・大塚幸治	29. 2.	177～217
海水を練り混ぜ水とした海洋コンクリートの耐久性に関する研究	福手 勤・山本邦夫・濱田秀則	29. 3.	57～ 93
ひずみ空間における塑性論に基づくサイクリックモビリティのモデル	井合 進・松永康男・亀岡知弘	29. 4.	27～ 56
サイクリックモビリティのモデルのパラメータの同定	井合 進・松永康男・亀岡知弘	29. 4.	57～ 83
鋼-コンクリート接合ハイブリット部材の海洋環境下における耐久性	濱田秀則・福手 勤・阿部正美	29. 4.	119～164

計画設計基準部

港の景観構成に関する研究	上島顕司・加藤 寛・斉藤 潮	29. 3.	95～118
-----------------------	----------------	--------	--------

Index of Report of P.H.R.I. Vol. 29

	Vol. No.	pp.
Hydraulic Engineering Division		
Wave and Block Forces on a Caisson Covered with Wave Dissipating Blocks Shigeo TAKAHASHI, Katsutoshi TANIMOTO and Ken'ichirou SHIMOSAKO	29. 1.	53~ 75
Stability of Armour Units of Composite Breakwater Mound against Oblique Waves Shigeo TAKAHASHI, Katsutoshi KIMURA and Katsutoshi TANIMOTO	29. 2.	3~ 36
Changes of Grain Distribution of Bed Material in the Surf Zone —Field Observation at Hazaki Oceanographical Research Facility— Kazumasa KATOH, Shin-ichi YANAGISHIMA, Yoshiaki KURIYAMA Tomoyoshi ISOGAMI, Hiroyuki MURAKAMI and Makoto FUJITA	29. 2.	37~ 61
Wave Hindcast Model for Short Fetch Sea Chiaki GOTO, Koji SUETSUGU and Toshihiko NAGAI	29. 3.	3~ 26
Marine Hydrodynamics Division		
Mathematical Modeling of Mud Transport in Ports with a Multi-Layered Model —Application to Kumamoto Port— Hiroichi TSURUYA, Kazuo MURAKAMI and Isao IRIE	29. 1.	3~ 51
Estimation of Secondary Nonlinear Kernel Function of Weakly Nonlinear, Quasi-Gaussian Irregular Sea Waves Noriaki HASHIMOTO	29. 3.	27~ 56
Wave Hindcast Model Using the Hybrid-parameter Method (1st report) —Application to the Tokyo Bay— Toshihiko NAGAI, Chiaki GOTO and Koji KOBUNE	29. 4.	85~118
Geotechnical Engineering Division		
Determination of the Horizontal Coefficient of Consolidation c_h Masaki KOBAYASHI, Jun-ichi MIZUKAMI and Takashi TSUCHIDA	29. 2.	63~ 83
Strength and Deformation Characteristics of Cement Treated Sands Used for Premixing Method Kouki ZEN, Hiroyuki YAMAZAKI and Yasushi SATO	29. 2.	85~118

Bearing Capacity of Clay Ground Improved by Sand Compaction Piles of Low Replacement Area RatioMasaaki TERASHI and Masaki KITAZUME	29. 2.	119~148
Field and Laboratory Measurements of Shear Modulus Profile in SeabedMohsen Badiy, Kouki ZEN, Hiroyuki YAMAZAKI and Hideo SUZUKI	29. 4.	3~ 26

Structural Engineering Division

Load Carrying Capacity of Hybrid Beams Subjected to Flexure and Shear Forces Hiroshi YOKOTA and Osamu KIYOMIYA	29. 2.	149~175
Model Vibration Tests for the Seismic Earth Pressure Acting on the Rigid Caisson Foundation and Its AnalysesMotoki KAZAMA, Takamasa INATOMI and Kohji OHTSUKA	29. 2.	177~217
Study on the Durability of Concrete Mixed with Sea WaterTsutomu FUKUTE, Kunio YAYAMOTO and Hidenori HAMADA	29. 3.	57~ 93
Strain Space Plasticity Model for Cyclic MobilitySusumu IAI, Yasuo MATSUNAGA and Tomohiro KAMEOKA	29. 4.	27~ 56
Parameter Identification for a Cyclic Mobility ModelSusumu IAI, Yasuo MATSUNAGA and Tomohiro KAMEOKA	29. 4.	57~ 83
Durability of Steel-Concrete Composite Hybrid Members in Marine EnvironmentsHidenori HAMADA, Tsutomu FUKUTE and Masami ABE	29. 4.	119~164

Planning and Design Standard Division

A Study on Composition of Portscape Kenji UESHIMA, Hiroshi KATO and Ushio SAITO	29. 3.	95~118
--	--------	--------