

論文

[1078] 海洋環境下における鋼-コンクリート接合ハイブリッド部材の鋼材部の腐食特性

正会員 ○浜田秀則 (運輸省港湾技術研究所)
 正会員 福手 勤 (運輸省港湾技術研究所)
 阿部正美 (運輸省港湾技術研究所)
 正会員 山本邦夫 (運輸省港湾技術研究所)

1. はじめに

防波堤用ケーソン等の港湾構造物を鋼-コンクリート接合ハイブリッド部材によって建設することが考えられている。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、港湾技術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⁾ しかしながら、港湾構造物のみならず海洋構造物としてハイブリッド部材を用いる場合、その鋼材の腐食が重要な問題となってくる。

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データが得られている。²⁾ 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、腐食特性も上記の鋼管杭等とは異なってくることも予想される。筆者らは、ハイブリッド部材の腐食特性を把握するため、実験施設における暴露試験を実施した。本文は、これらの試験の結果を取りまとめ、ハイブリッド部材の腐食特性について考察するものである。

2. 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 -

2. 1 試験概要

暴露試験に供した供試体の形状を図-1に示す。形状 (両面鋼板、片面鋼板)、寸法の違いによりHR1、HR2、HS1、HS2型の4種に別れている。HR型には4本、HS型には3本の鉄筋が埋設されている。なお、鉄筋は各々独立の状態であり、鋼板とも接続されていない。なお、「2」型とは「1」型と断面形状は全く同様であるが、供試体の長さが1mと短くなっているものである。(図は割愛) また、HR1型、HS1型に電位の経時変化測定用のモニター鉄筋 (長さ30cm) が3本埋設されている。今回暴露試験を行った供試体の一覧を表-1に示す。HR2型の一部の供試体の鋼板には図-2および表-2に示す塗装様式により防錆塗装を行った。コンクリートの製作に使用した材料は、セメントが普通ポルトランドセメント (比重3.16) および高炉B種セメント (比重3.04) であり、粗骨材は碎石 (F.M 6.68)、細骨材は砕砂 (F.M 3.08) である。コンクリートの配合および圧縮強度を表-3に示す。また、使用した埋設鉄筋は

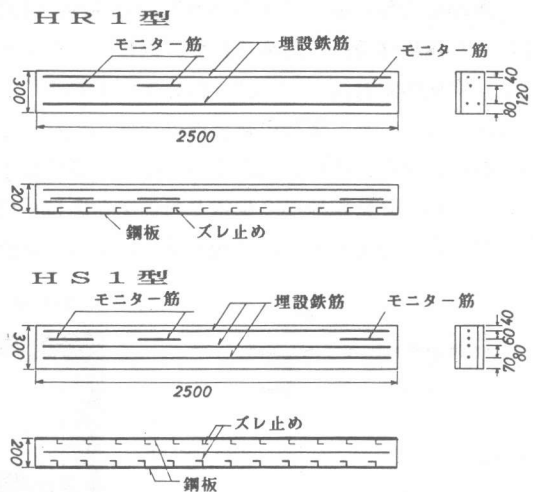


図-1 供試体形状

(HR2、HS2型は長さが1mである)

SD30のD16、鋼板はSS41

のt=10mm、ズレ止め鋼はL型鋼の40×40×3mm

である。以上示した4型式14体の供試体を飛沫部および海中部に、鋼板が上面あるいは下面になるように設置した。また、比較用として裸鋼材2枚を飛沫部に設置した。ここで言う飛沫部とは、当研究所構内にある暴露装置のことであり、1日2回、3時間ずつ供試体に海水がスプレーされるものである。暴露材令1年において表-4に示す試験を実施し、

同表に示す検討を行った。

2. 2 試験結果

(1) 供試体の外観性状

鋼板の露出面は飛沫部、海中部ともに全面にわたって発錆していた。また、大部分の供試体において図-3に示すようにズレ止め鋼から約数cm、ひびわれ幅0.5mm程度のひびわれが発生していた。ただし、防錆塗料を塗付した鋼板は発錆も認められず、同様のひびわれも認められなかった。

(2) 鋼板の腐食状況およびそれに及ぼす影響

前述したとおり、鋼板の露出面は全面にわたって発錆していた。図-4に鋼板裏面の腐食状況の一例を示すが、これよりわかるとおり、鋼板の裏面は、端から数cmのところまで発錆が進んでいた。図-5に鋼板厚減少量と裏面発錆面積率の関係を示すが、比較的良い相関性が認められた。これより鋼板厚減少量(表-5)に基づき各種要因の影響度合の検討を行った。表-6にそ

表-1 供試体一覧

型式	セメント種類	暴露環境	ペイントの有無
HR1	普通ボルト 高炉B種	飛沫部 "	無 "
HS1	普通ボルト 高炉B種	" "	" "
HR2	普通ボルト " " 高炉B種 "	海中部 飛沫部 海中部 飛沫部 海中部	防錆ペイント " " 無 "
HS2	普通ボルト " " 高炉B種 "	飛沫部 海中部 飛沫部 海中部	" " " "
	裸鋼材 "	飛沫部 "	" "

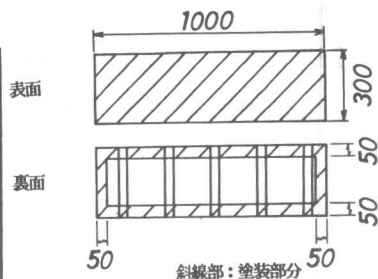


図-2 鋼板の塗装箇所

表-2 鋼板の塗装様式

工程	塗料一般名	膜厚(μ)
素地調整	サンドブラストSSIS-Sa3	
下塗り	厚膜型ジンクリッチペイント	75
ミスコート	タールエポキシ樹脂塗料	10
上塗り1層	"	200
" 2層	"	200
" 3層	"	200

表-3 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	AE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

表-4 試験項目ならびに検討項目

試験項目	検討項目
1. 外観性状の観察	1. ハイブリッド部材の腐食性状
2. 鋼板裏面の腐食状況観察	2. 埋設鉄筋の腐食状況
3. 埋設鉄筋の電位 (モニター筋により経時的に)	3. 鋼板腐食に及ぼす下記要因の影響
4. 埋設鉄筋の腐食状況の観察	(1) セメント種
5. 鋼板厚の減少量 (超音波式測定器により)	(2) 部材寸法
	(3) 暴露環境(海中、飛沫)
	(4) 部材型式
	(5) 防錆ペイントの効果

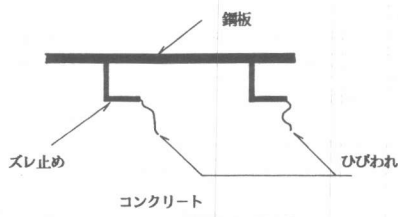


図-3 ズレ止め鋼付近のひびわれ

HS2型: 高炉B種: 飛沫部暴露



図-4 鋼板裏面の発錆状況の一例

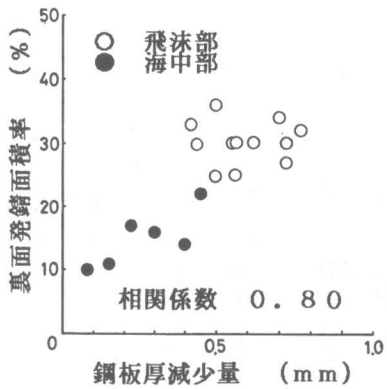


図-5 鋼板厚減少量と裏面発錆面積率の関係

の結果を示す。暴露環境の影響は大きく、海中部に比較して飛沫部では2倍の減少量であった。その他の条件の影響はさほど大きくなかった。

(3) 鋼板の腐食量

飛沫部の暴露供試体の鋼板の腐食量は平均で0.6mmであった。これは、裸鋼材の腐食量(平均で0.72mm)と同等の値である。長年の調査より、一般に鋼管杭の腐食速度は最大で0.3~0.6mm/yearであるということが報告されている。²⁾ これより、本暴露試験に供したハイブリッド部材の腐食量はかなり大きいものと推察される。

(4) 埋設鉄筋の腐食

暴露1年時における埋設鉄筋の発錆面積率は、0~3% (平均0.6%) と極めて小さく、また錆自体も極めて軽微なものであった。

3. 暴露試験(II) - 鋼板の腐食特性の把握を目的とする試験-

3.1 試験概要

前述した暴露試験(I)においては、比較的大型の供試体を使用し、ハイブリッド部材の劣化性状、鋼材の腐食量等の基本性状を把握することを目的とした。本暴露試験(II)においては、比較的小型の供試体を用いて、ハイブリッド部材の鋼材腐食の特性を、電位および腐食電流(流入、流出)を測定することにより把握することを目的としている。図-6に示すように、本試験に用いた供試体は、300×150×100(mm)の角柱形である。エポキシ樹脂系接着剤(絶縁物)により接着された2枚の鋼板とコンクリートが一体となった構造である。なお、各々の鋼板には電位、電流測定用のリード線が接続されている。ここで、2枚の鋼板を使用したのは、ハイブリッド部材の鋼板の2面(コンクリートに接する面と自由面)をモデル化するためである。コンクリートの製作に使用した材料は、セメントが普通ポルトランドセメント(比重3.16)、粗骨材は普通骨材(F.M 6.87)と碎石(F.M 6.56)の混合、

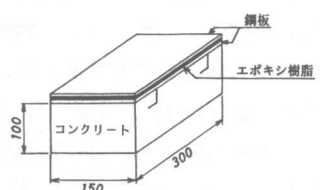


図-6 供試体形状

表-5 鋼板厚減少量 表-6 鋼板厚減少量に及ぼす各種要因の影響

型式	セメント	暴露環境	暴露時の状態	鋼板厚減少量 (mm)
HR1	普通	飛沫	上面	0.44
	高炉B		下面	0.42
HS1	普通	#	下面	0.72
			上面	0.56
	高炉B		上面	0.77
			下面	0.56
HR2	普通	#	上面	0.62
			下面	0.15
	高炉B		上面	0.70
			下面	0.31
HS2	普通	#	上面	0.51
			下面	0.56
	海中		上面	0.40
			下面	0.08
	高炉B	#	上面	0.72
			下面	0.50
	飛沫		上面	0.45
			下面	0.22
裸鋼材	#	飛沫	上面	0.62
			下面	0.81

要因	試験結果 (鋼板厚減少量) - 平均値 -		影響度合		
	大	小	大	中	小
供試体寸法	大 (0.58 v.s 0.60)	小 (0.60 v.s 0.27)			○
暴露環境	飛沫 (0.60 v.s 0.27)	海中	○		
セメント種	普通 (0.45 v.s 0.52)	高炉B			○
部材型式	両面鋼板 (0.50 v.s 0.44)	片面			○
設置状態	上面 (0.68 v.s 0.55)	下面	○		

表-7 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	
25	8±2.5	4±1	55	42.4	154	280	790	1095	2.80	285

一体となった構造である。なお、各々の鋼板には電位、電流測定用のリード線が接続されている。ここで、2枚の鋼板を使用したのは、ハイブリッド部材の鋼板の2面(コンクリートに接する面と自由面)をモデル化するためである。コンクリートの製作に使用した材料は、セメントが普通ポルトランドセメント(比重3.16)、粗骨材は普通骨材(F.M 6.87)と碎石(F.M 6.56)の混合、

また、細骨材は海砂 (F.M 2.60) である。コンクリートの配合および圧縮強度を表-7に示す。使用した鋼材はSS41の $t=3.2\text{mm}$ 、ズレ止め鋼はL型鋼の $30\times 30\times 3\text{mm}$ である。この小型供試体を図-7に示す要領で暴露した。図に示すように、「接続シリーズ」及び「単独シリーズ」に大別される。接続シリーズというのは各供試体の鋼板が全て電氣的に接続されたものであり、1つのハイブリッド部材が感潮部、海中部、海泥部にまたがって設置された状態をモデル化している。一方、単独シリーズというのは各供試体の2枚の鋼板は電氣的に接続されているものの、個々の供試体は電氣的に接続されておらず、1つのハイブリッド部材が感潮部、海中部、海泥部に単独で存在する状態をモデル化している。また、比較用として鋼板のみのもの(2枚の接着鋼板)も各環境下に設置した。図に示すような状態で供試体を1年間暴露し、その間、鋼板の電位ならびに流出入電流の測定を行った。また、暴露1年後に供試体を破碎し鋼板厚の測定を行い1年間の腐食量を求めた。

3. 2 試験結果

(1) 供試体の外観性状

全ての供試体において鋼板の露出面は全面的に発錆していた。一方、鋼板とエポキシ樹脂の接着は概ね良好であった。本試験においては、暴露試験 (I) において見られたようなズレ止め鋼からのひびわれは認められなかった。また、いずれの供試体においても鋼板のコンクリートとの接着面は端から数cmの位置まで発錆が進んでいた。

(2) 鋼板の腐食電流

図-8~10に潮位変動に伴う各鋼板の腐食電流の測定結果の一例を示す。なお、ここで示したものは最も典型的な傾向である。ある鋼板の腐食電流が流入方向であるときはその鋼板がアノードとなった場合の電流の方向であり、その鋼板の腐食が進んでいることを意味する。単独シリーズ (鋼板のみを含む) の

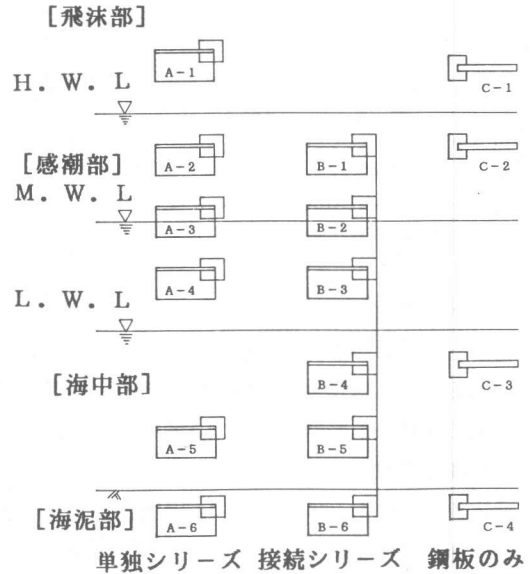


図-7 供試体の設置方法

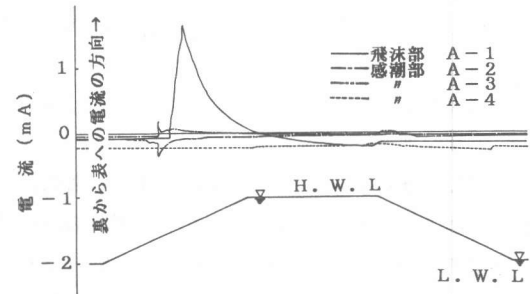


図-8 腐食電流の傾向 (単独シリーズ)

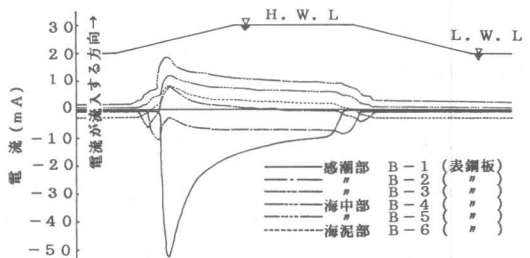


図-9 腐食電流の傾向 (接続シリーズ)

電流の傾向で特徴的なのは、感潮部に位置する供試体において、潮が満ちてくると表裏の鋼板間に電流が生じることである。時間の経過とともにその電流は次第に小さくなり次第に一定値に落ち着いてくる。接続シリーズの電流の傾向で特徴的なのは、干潮時には各鋼板への電流の流出入は比較的小さいものの、潮が満ちてくると各表鋼板間にかかなり大きな電流（数10mAのオーダー）が発生することである。ただし、裏鋼板にはそのような電流は発生しない。海中部、海泥部に位置する鋼板には電流の流入（腐食方向）が生じ、一方、感潮部の鋼板には電流の流出（腐食方向とは反対）が生じてくる。これらの電流は、単独シリーズにおいて生じる電流（1～2 mA）に比べてかなり大きなものである。

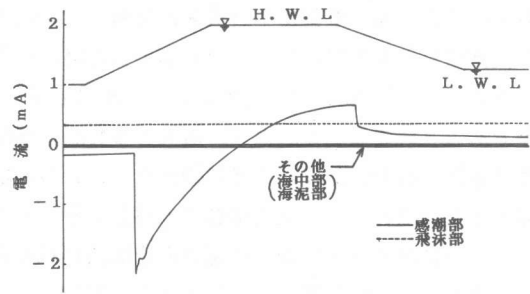


図-10 腐食電流の傾向（鋼板のみ）

(3) 鋼板の電位

鋼板の電位は潮の変動に伴い最大で100mV程度の変動があるものの、表-8に示す値でほぼ落ちついた状態にある。表中の値は、飛沫部の場合はスプラッシュ時に測定したものであり、その他の場合は満水位時に測定したものである。飛沫部に比べて、感潮部、海中部、海泥部のほうが「卑」となっている。

表-8 鋼板の電位

	単独シリーズ	接続シリーズ	鋼板のみ
飛沫部	-500		-350
感潮部 (上)	-590	-590	-580
(中)	-610	-620	
(下)	-640	-660	
海中部 (上)	-690	-690	-700
(下)		-680	
海泥部	-690	-670	-700

(mV v.s. Ag-AgCl)

(4) 鋼板の腐食量

表-9に鋼板の腐食量の測定結果を示す。単独シリーズと接続シリーズでは腐食傾向は全く異なるものとなった。単独シリーズの場合は飛沫部および感潮部の上部に位置するものほど腐食量は大きく、海中部、海泥部の方が腐食量は小さい。また、腐食量の値は、暴露試験 (I) において求めた値とほぼ同程度であった。一方、接続シリーズの場合、全体的に腐食量は単独シリーズ程大きいものでなく、海中部の方が感潮部よりも若干大きめの値であるものの両者で大差はなかった。また、ハイブリッド供試体の単独シリーズと鋼板のみの場合では腐食量に大差はなく、いずれもかなり大きな値を示した。

表-9 鋼板の腐食量

(単位: mm)

	単独シリーズ		接続シリーズ		鋼板のみ	
	表鋼板	裏鋼板	表鋼板	裏鋼板	表鋼板	裏鋼板
飛沫部	0.601	0.101			0.538	0.358
感潮部 (上)	0.601	0.098	0.250	0.106	0.423	0.261
(中)	0.482	0.219	0.321	0.220		
(下)	0.221	0.075	0.302	0.076		
海中部 (上)	0.299	0.212	0.339	0.087	0.365	0.380
(下)			0.361	0.092		
海泥部	0.143	0.223	0.241	0.235	0.311	0.256

4. 考察

(1) 腐食電池に関して

ハイブリッド部材の特徴はその鋼材の一面は自由面として外部環境と直接接するものの、他の一面はアルカリ環境であるコンクリートと接するという点である。従って、図-11に示すように、鋼材の一面（自由面）がアノード、反対面（コンクリートとの接触面）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。単独シリーズの腐食電流の傾向（図-8）を見ると、1mA以下の電流が表裏の鋼板間に流れており、予想された腐食電池が形成されていることが分かる。し

かしながら、0.2mAの腐食電流が1年間コンスタントに流れるものと考え、鉄の電気化学当量を0.289mg/C、使用した鋼材の単位体積重量を7.85g/cm³として算出した鋼材の溶出量は1.8gとなる。これは鋼板厚約0.005mmにしか相当せず、極めて微量な量であるといえる。これより、鋼板の表裏間に発生する腐食電池は鋼板の腐食にはほとんど影響がなく、むしろ鋼板の表面に発生するマイクロセルが鋼板腐食の大部分であると考えられる。

一方、接続シリーズの場合の腐食電流は数10mAのオーダーであり腐食量に及ぼす影響は極めて大きく、鋼板の表面に発生するマイクロセルに加えて潮位の変動に伴い発生する腐食電流が鋼板の腐食に多大な影響を及ぼすものと考えられる。

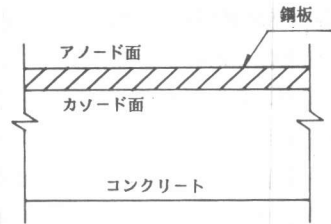


図-11 ハイブリッド部材の特徴

(2) 腐食速度に関して

一連の試験を通じてハイブリッド部材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。一方、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が報告されている。³⁾ 今回の試験が暴露1年で実施されたことを考えるとその腐食量はかなり大きめにでたものとも考えられる。また、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ため、短期間の試験ではその影響も無視できない。したがって、長年の試験より得られた鋼管杭等の腐食速度と今回得られたハイブリッド部材の腐食量を直接比較することは困難である。設計法の体系の中にハイブリッド部材の腐食速度を導入するためには更にデータを積み重ねることが不可欠と考えられる。

(3) 腐食発生後の部材の耐荷力に関して

これまでに実施されてきたハイブリッド部材の載荷試験結果によると、いずれの場合もまず初めにズレ止め鋼よりひびわれが生じそのひびわれが進展することにより部材の破壊へとつながっている。¹⁾ 一方、本暴露試験(I)によると、わずか暴露1年でズレ止め鋼より微細なひびわれが生じている。これより、腐食発生後の部材の耐荷力は腐食が発生する前に比べて低減していることも考えられる。

5. まとめ

一連の試験より得られたことを以下にまとめる。

- (1) ハイブリッド部材の腐食量は同一条件下の裸鋼材と同等であった。
- (2) 飛沫部もしくは感潮部に単独に位置する場合は腐食が最も進み、海中部、海泥部に単独に位置する場合は腐食量は比較的小さい。
- (3) 部材が感潮部と海中部にまたがっている場合は、海中部においても感潮部と同等の腐食が生じる。しかし、飛沫部、干潮部単独の場合に比べて腐食量は小さい。
- (4) ズレ止め鋼の近傍のコンクリートにひびわれが生じることより、腐食発生後の部材の力学特性は今後に残された課題であると考えられる。

(参考文献)

- 1) 例えば、横田弘、清宮理；鋼・コンクリート合成ばりの疲労特性、コンクリート工学年次論文報告集、11-2、1989
- 2) 例えば、横井聰之、阿部正美；港湾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、1989.3
- 3) 例えば、金属防食技術便覧、pp178~181、日刊工業新聞社