

海洋構造物の保守管理技術

在田正義*、田村兼吉*、内藤正一**、

柴田俊明**、岩井勝美***、高井隆三***、勝又健一****

At-Sea Experiment of a Floating Offshore Structure

Maintenance Technology of Floating Offshore Structures

By

Masayoshi ARITA, Kenkichi TAMURA, Shouichi NAITO,

Toshiaki SHIBATA, Masami IWAI, Ryuzo TAKAI and Kenichi KATSUMATA

Abstract

Experimental investigations into inspection and maintenance of offshore structure were carried out, using a floating offshore structure POSEIDON. Surface of eleven columns out of twelve and a part of side wall of deck house of POSEIDON were carefully coated by experimentally specified heavy duty paints.

During four-year operation of POSEIDON, changes of plate thickness and coating film characteristics were observed. Amount and species of marine fouling animals on coating surfaces around submerged parts of columns were also measured and observed.

After the end of experimental operation, POSEIDON was broken, in order to make thorough investigation of welded joint parts and paint coated parts of columns and deck house wall.

Conclusions obtained are as following;

1. In order to maintain safety operation of offshore structures, proper maintenance and repair should be performed. Choice of maintenance system should be made at initial stage of structural design.
2. For proper maintenance of offshore structure, initial conditions and values of structural details such as penetration of weld joint metals, properties of paint coating and local deformations of structural parts are to be measured before operation.

目次

1. はじめに
2. 海洋構造物の保守管理
 - 2.1 海洋構造物の保守管理の特徴
 - 2.2 保守管理システムの考え方
3. 実験計画の概要
 - 3.1 ポセイドン号稼動中検査
 - 3.2 ポセイドン号解体後の検査
 - 3.3 試験片による実験
4. 実験結果
5. 実験結果の考察
6. 結論及び保守管理システムのあり方について

1. はじめに

海洋構造物の安全を保つためには、保守管理を適切に行なうことが必須の条件になる。これは海洋が構造物にとって極めて厳しい環境であるためである。うねり、波浪、風は、構造物各部に繰り返し荷重として作用する。日射、海

水、潮気を含む風は、構造物を構成する材料の劣化を促進する。特に、構造物の主要部分を構成する鉄鋼にとっては、厳しい腐食環境条件である。こうした環境で、稼働する海洋構造物は、外的条件に十分耐えるよう設計され、設計時の条件に従って稼働するよう保守管理されなければ安全は保てないことになる。

この観点から海洋構造物の実海域実験を行う場合、稼働期間、その期間内に稼働海域で構造物が受けるうねり、波浪、風、温度による荷重によって構造物各部に生ずる応力の頻度分布、施した防食の効果、腐食の程度等を想定し、経済性と安全性が適切にバランスするよう、また当初想定したことが適切であったか否かを常に有効に実験的に実証できるよう、構造物を設計し、建造しておくことが必要である。このようにすることによって、当初予測と実際に生じた現象とを比較・分析し、より信頼性の高い保守管理システムを構築するための資料を得ることが出来る。しかし、実際にはこうした実験を行うことには大きな困難が伴う。ポセイドン号の場合、実験を行える期間が4年間であったことが困難の第一に挙げられよう。次に様々な制約から、保守管理に関して必要十分な考慮を払った設計を行

*水海技術部、**装備部、***海洋開発工学部、****材料加工部

い、製作することは出来なかったことである。しかし、他の多くの項目の研究を安全に遂行するため、必要最小限の保守管理は必要であった。防食に関しては、塗料工業会の協力によって、12本のコラム中11本のコラム外面及び甲板室側面に重防食塗装を施し、その防食性を調べることが出来た。また、ポセイドン号解体時には、コラム、プレース、甲板室側壁鋼板の必要部分を取り取り、き裂発生の有無、塗膜の劣化状況、腐食の進行状況等を観察することが出来た。

本報告では、先ず、海洋構造物の保守管理システムの特徴を船舶の保守管理との関係で示し、更に保守・管理の考え方を分類し各々の特徴を示した。次いで、ポセイドン号での諸実験の計画、実験の結果及び考察を示した。最後に保守管理システムの考え方との関係で実験結果を評価した。

2. 海洋構造物の保守管理

2.1 海洋構造物の保守管理の特徴

海洋構造物の保守管理は、船舶の場合と比較して、次の2点で大きく異なっているといえよう。第1の特徴は、船舶の検査はドックに入れて行なえるのに対して、海洋構造物の場合は稼働している現場で行わざるをえないことである。このため、検査や修理の際に、大規模な臨時の足場や検査装置を搬入することは困難である。建造の段階で検査や修理を容易に行えるようにしておかなければ、検査や修理自体が困難なことになる。船舶に較べて海洋構造物の構造形態が多様であることからも、構造に応じた対策を講じておく必要性は高くなる。飛沫部・没水部の保守は特に問題が多い。この部分の防食は、塗膜と電気防食を併用することが多いが、塗膜や電気防食用陰極金属の点検・補修・取り替えとも潜水夫による作業が必要となる。このことを考えて、長期の防食を工夫したり、こうした作業が容易に出来るよう構造上の工夫をしておくことが大切である。また損傷の発生、き裂の進展を知る手段を講じておくことも必要である。

第2は、生物付着の問題である。海洋構造物は、長期間にわたって静止した状態で使用されるため、海域によっては極めて多量の海洋生物が付着する。その量は、稼働している船舶への付着量に比して、比較にならないほど多い。この生物の付着は、見掛けの寸法増大による波力の増加、重量増加による浮体構造物の沈下、生物の石灰質部分の塗膜への食い込みや生物除去時の塗膜破損による塗膜の防食機能低下を引き起す。また、海洋構造物外面の飛沫部・没水部の点検、修理のためには、付着生物の除去が必要になる。生物付着を防ぐための防汚塗料や導電性塗料などが開発されつつあるが、これまでのものでは長期の有効性に問題があり、また環境汚染の心配もある。そこで、生物付着の可能性がある部分に対しても一般の防食塗料が使われることになる。この場合、前述の付着生物の除去が必要となる。どの部分の付着生物を、どういう間隔で、いかなる

手段で除去するか、除去する際の生じる塗膜への悪影響をいかに防ぐかが問題である。

2.2 保守・管理システムの考え方

海洋構造物を含めて構造物は、想定される稼働期間にわたり、安全が保たれねばならない。このため、構造物の全稼働期間について、構造物が環境から受ける荷重や諸影響、構造物を構成する部材・材料の劣化の程度を、設計・製作段階で予測することが必要になる。この予測を100%正確に行なうことは不可能であるから、いかなる設計・製作を行ったにせよ、維持管理は必要である。

維持・管理の程度は、想定する維持・管理システムの方式によって大きく異なる。これを整理して示すと付表（文書末尾に示す）のようになる。

ここでは、保守・管理システムのうち、(1)いわゆるメンテナンスフリーといわれる、建造時に十分なコストをかけることによって、稼働中はあまり手をかけないで安全性を維持するシステムと、(2)点検・補修システムといわれ、建造時に余分なコストをかけず、点検・補修によって安全性を維持するシステムの場合を示した。この2つのシステムを組み合わせたシステムも考えられる。このどのシステムを選択するかは、経済性との関連で決められることである。

構造物の安全性を保つためには、保守・管理システムに関し次のことを考慮することが必要であることが分かる。

- ・設計段階で保守・管理システムをどれにするかを決めておくこと。保守・管理システムとの関係で、大きく仕様が変わる主要な項目として、防食仕様（塗装仕様、電気防食の併用）、腐食予備厚、点検用足場の設置の有無等がある。
- ・稼働中は、当初の保守・管理システムからの逸脱はないか、あったとしたら許容できる程度のものかについて、点検しておくこと。

ポセイドン号での実験では、設置場所との関係で、十分な安全性を保つ必要があった、設計時に保守・管理システムをどれにするかの明確な選択をしなかった、点検用の足場についての検討は行ったが予算の関係で実施しなかった、実験期間が、実構造物の稼働期間に比べ、かなり短期間であった（保守・管理システム研究の立場からは、これが大きなネックとなる）等、保守・管理の実験という立場からは、相當に制約のあるものとなった。

3. 実験計画の概要

実験は、(1)ポセイドン号稼働中の検査・結果の評価・補修 (2)ポセイドン号解体後の検査・結果の評価 (3)防食塗膜についての試験片による実験の3種に分類できる。この分類に従い、実験した全項目を示すと以下のようになる（図2参照）。

- (1) ポセイドン号稼働中検査（法定、自主定期検査は、全体を約3m浮上させて実施した）

- 法定検査—設置後2年の1988年7月5日に定期検査として実施（非自航船として検査した）。
- 自主定期検査—毎年コラム、フーティング、プレース、係留チェーンの外観、板厚、付着生物、塗膜の状態を検査した。
- 特別検査—1987年8月31日～9月1日の台風12号通過後、1987年10月18日の台風19号通過後の2回実施した。台風12号時の最大波高は9.7mであった。
- 日常検査—上甲板部、手すり等の塗装、航路標識灯等を乗船毎に実施した。

- (2) ポセイドン号解体後の検査（解体時に試験板を切り出し、船舶技術研究所に運搬後、試験を実施した）
- 係留チェーンの衰耗量測定—種々のチェーン位置でのリング寸法を測定した。
 - コラムとプレース交差部の溶接継手部の超音波検査及び切斷による断面の観察を行った。
 - プレース没水部及び大気部の腐食量を測定した。
 - 試験塗装コラムの塗膜劣化程度測定—試験片のガスカット部から十分離れた塗膜面について、付着力（アルミ製のドーリーを付着し、手動の付着力測定器で測定）及び、交流インピーダンス（塗膜面にアルミ箔を電導性の糊で接着し、LCRメーターで、周波数300Hz～10kHzでの抵抗、容量を測定）を測定した。また、外観の観察を行うと共に、塗膜剥離腐食部について、外観から判る腐食面積と塗膜下で進行している腐食の面積との関係を計測した。

(3) 試験片による実験

コラムに塗布したと同一仕様の塗膜を試験片に施し、東京都三鷹市、船舶技術研究所構内の3階建て建屋屋上で暴露試験を行い、定期的に付着力、インピーダンス等を測定した。

上記項目のうち、主要項目の実験方法は、次の通りである。

法定検査 進水後検査、建造地（徳島県の神例造船）から設置海域（由良）への回航直前臨時検査、解体場所への回航に先立つ撤去直前の臨時検査及び、運輸省新潟運輸局酒田海運支局による第1種中間検査を行った。この第1種中間検査では、船体内外部の目視検査、鋼板板厚測定、非常用発電機の外観検査・運転検査の他、電気機器・電路の絶縁抵抗試験、標識灯の効力試験、錨鎖の径測定・衰耗状態確認、救命設備・消防設備の検査を行った。

自主定期検査 上甲板、コラム、フーティング、プレースの板厚、係留チェーンの各部寸法の測定、甲板室上及び甲板上の構造物・機器の外観検査、ボックスガーダー内部材、昇降用階段、コラム、フーティング没水部の外観検査等を行った。

コラムの板厚測定は、コラムの内部から超音波式の板厚測定器により行った。板厚の測定精度は0.1mmである。

3m浮上によって露出したコラムの付着生物について、

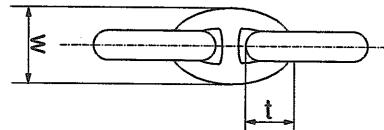
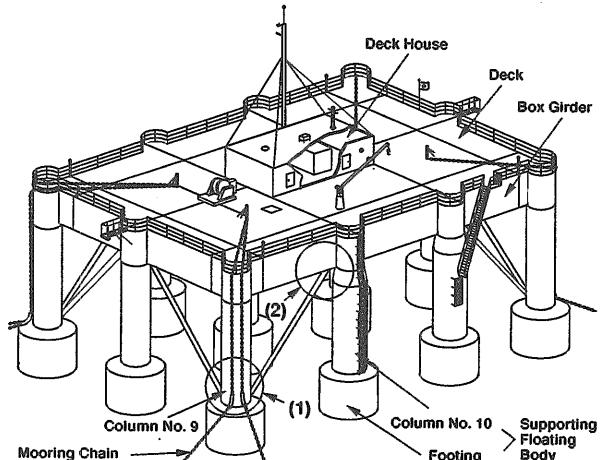
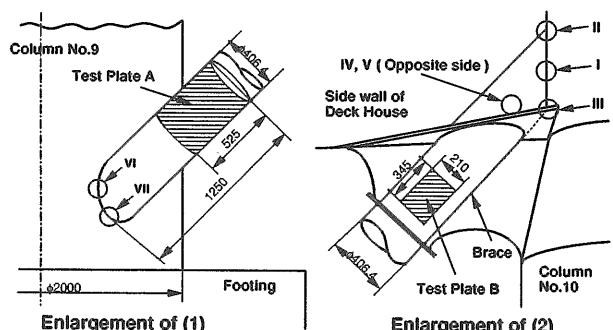


Fig. 1 Measured items of mooring chain ring



(a) Birds-eye view



(b) Detail of measured parts

Fig. 2 POSEIDON

種、量の観察及び測定を行った。量は、生物の付着が平均的と思われるコラムの面100mm×100mm程度について、生物をはぎ取り、適当な濃度のホルマリン液に浸して船研に持ち帰り、湿重量を測定した。はぎ取った面積は、はぎ取り後に撮影した写真から測定した。

係留チェーンの衰耗量測定 係留チェーンの中間支持治具付近について、リングの幅W及び隣接鎖の接触部寸法t（図1参照）をノギスで計測した。解体後は、リング各部の寸法を詳しく測定した。

コラムとプレース交差部のき裂等の非破壊検査 解体時にコラムとプレースとが交差する溶接継手部から切り取った試験片（図2の上図○印に相当、詳細は拡大図に示す）について、目視検査、磁気検査を行った。また、超音波による探傷（コラム内側から垂直探触子使用）を行うとともに

に、欠陥検出部等を切断（幅5mmに切断し、片面研磨）しての顕微鏡観察を行い、超音波探傷との比較を行った。

プレース没水部等の衰耗量測定 図2の拡大図に示す試験片A、B、C（A—プレース没水部、B—プレース大気部、C—コラムNo.9の没水部）について、10mm間隔の格子点での板厚をポイントマイクロメータにより測定した。

試験塗装部の塗膜劣化度測定 8番コラムを除く11本のコラム及び甲板室垂直壁面に、重防食塗装を施した。塗装仕様を表1に示す。ポセイドン号稼働中は、毎年目視による外観検査と、没水部付着生物の部分除去、種の観察、量の測定を行った。解体時には、甲板室壁面、コラムの大気中部、飛沫帶部、没水部から各々500mm×500mm程度の塗膜付き鋼板を、ガスカッティングにより切り出して試験片とし、塗膜の外観検査、塗膜の付着力及び交流インピーダンスの測定、塗膜劣化—腐食進行部についての腐食量測定を行った。

防食塗膜試験片の暴露試験と定期的な塗膜劣化程度の測定

表1の塗装仕様のうち代表的なものを、鋼板試験片（300mm×100mm×7mm）に塗布し、船舶技術研究所内の3階建て建屋屋上暴露台（JIS規格品）に取り付けて暴露試験を行い、暴露期間1年毎に回収して外観検査、塗膜の付着力・交流インピーダンスを測定した。

4. 実験結果

法定検査によって、特に重大な指摘を受けることはなかった。また、自主点検等による判断から行った最大の補修は、設置から2年後に行った上甲板、手摺の塗装工事であった。表2に、自主定期検査時に測定したコラム部の板厚計測結果を示す。表中のコラムNO.8は、フーティング部がコンクリート製であるために、フーティング部の測定値は無い。欄中の一印は、測定を行わなかったことを示す。

図3に、コラムNO.9、NO.10間のプレースから取った試験片A、B（図2参照）の板厚測定結果を示す。試験片Aは、塩ゴム系防錆下塗塗料RABACOAT A/Cの上に塩ゴム系防汚塗料RABACOAT A/F（下塗、上塗塗料とも日本ペイント製）が塗布してあったが、ポセイドン号設置後約2年で効力を失い、目視で、相当に激しい局部腐食を生じていたものである。試験片Bは、試験片Aを採取したと同一のプレースの上端付近（大気部）からの試験片である。この部分は、塩ゴム系防錆塗料RABACOAT A/Cの上に、油性系上塗塗料CR MARINE TOPSIDEが塗布してあったが、腐食はほとんど生じていなかった。図2中の試験片Cは、コラムNO.9没水部（塗装仕様は、表1のH欄の没水部）から採取したものであるが、後にコラムの防食塗膜の観察結果で述べるように、相当に局部腐食が進行していた。

図4(b)に、ポセイドン号解体後、係留チェーン各部（同図(a)にP=0、P=1等で示す部分の数字を横軸にとっている）で採取したリングの径（同図(a)のリングの図中の $(DB+DT)/2$ を縦軸にとった）の腐食量測定結果を示す。測

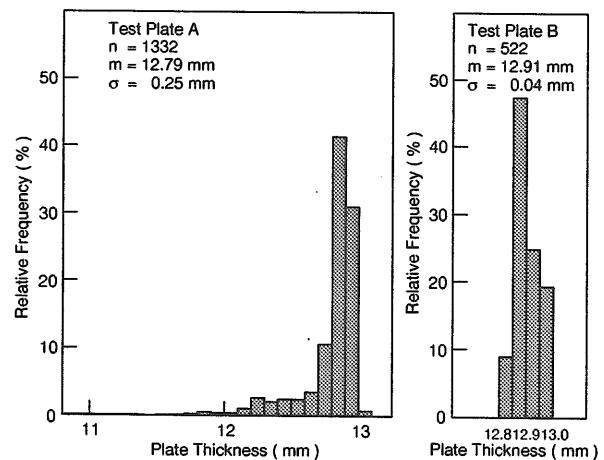
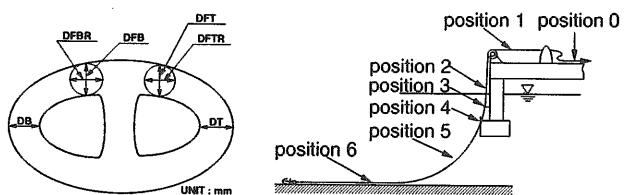
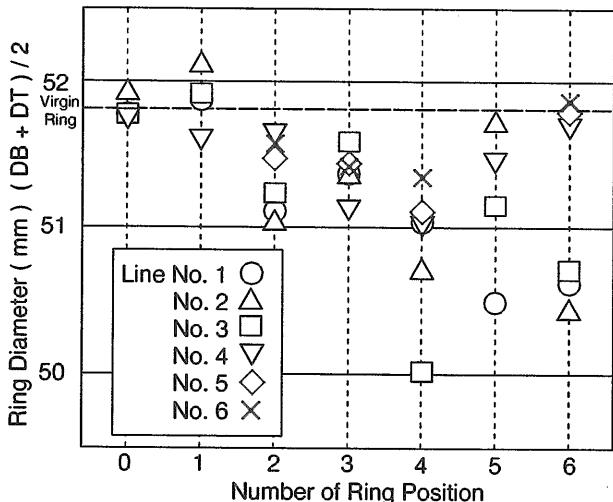


Fig. 3 Plate thickness distribution of test plate A and B



(a) Positions of mooring chain rings and configuration of a ring



(b) Relation between ring position and reduction in ring dimension

Fig. 4 Mooring chain

定したリングの初期値は測定していない。そこで、図4(a)の上図のP=0付近（荷重はかからず腐食の進行もほとんど無かった）のチェーンについて、20個のリングを取り、DB、DTを測定した結果を表3に示す。この値をリングの初期値と考えることにする。

自主点検中に発見したボックスガーダー底板の変化位置

Table 1 Specifications of coating film for columns and deck side wall (ref. Fig. annex)

記号	大気部	飛沫帯	没水部	甲板室外板
A	MAP(40)*1 MA(300)*1	MAP(40)*1 MA(300)*1	MAP(40)*1 MARM(2000)*1	
B	IZP(75)*1 PE・M/C(100)*1 U(30)*1	PEM(5000)*1	TE(125)*2	
C	IZP(75)*1 PE(80)*2 U(30)*1	PEM(400)*2	IZP(50)*1 TE(150)*2	
D	IZP(75)*1 PEP(100)*2 PE・T/S(75)*1	IZP(75)*1 PEF(250)*2	IZP(75)*1 TE(200)*2	IZP(75)*1 PE・A/C(60)*2 U・S/F(30)*1 F・T/S(25)*1
E	EZP(25)*1 PEF(450)*2 PEF・T/S(100)*1	EZP ME(200)*2		IZP(ES)(75)*1 FP・M/C(100)*1 F・S/F(50)*1 F・T/S(30)*1
F	IZP(75)*1 PEP・M/C(40)*1 PEP(180)*1 V・S/F(60)*1 V・T/S(30)*2	IZP(75)*1 TE・M/C(40)*1 TE(100)*3	TE(150)*2	
G	EZP PE(100)*2 PE・T/S(35)*1	PE(2000 -3000)*1	EZP PE・A/C(100)*2	
H	IZP(15)*1 PE(100)*2 U・T/S(40)*1	IZP(15)*1 TE(100)*2 VT(50)*1 A/F(SPN-2)(100)*2 A/F(SPN-3)(100)*1		
K	MEF(250)*1	PEP(30)*1 PEF(250)*1	TEF(250)*1	
L	PEFP(40)*1 PEF(300-500)*1 U・A/C(40)*1 U・T/S(40)*1	PEFP(40)*1 PEF(500- -750)*1	PEFP(40)*1 TEF(500 -750)*1	
M		PEF(750)*1		

EZP:エボキシジンクフライマー F:弗素系ペイント IZP:無機ジンクフライマー
 MA:メタクリレート系ペイント MAP:メタクリレート系フライマー MARM:メタクリレート系レジンモルタル
 ME:変成エボキシペイント MEF:変成エボキシ(ガラスフレーク) PE:ヒュアルエボキシペイント
 PEM:エボキシ系レジンモルタル PEP:エボキシフライマー TEF:タールエボキシペイント
 TEF:タールエボキシガラスフレーク U:ウレタンペイント V:ビニールペイント VT:ビニールタールペイント
 A/C:下塗 M/C:ミストコート S/F:中塗 T/S:上塗
 AF(SPN-2, -3)防汚塗料

Table 2 Measured plate thickness of columns

コラム NO	年度	コラム 喫水線 (公称板厚10.0mm)		フーティング側面 (公称板厚8.0mm)		フーティング底面 (公称板厚12.0mm)		備考	
		1回	2回	1回	2回	1回	2回		
NO.1	1988	10.0	9.9	7.7	7.8	—	—	パラストタンクとして使用	
	1989	10.0	10.0	7.8	7.9	—	—		
	1990	9.9	10.0	7.7	7.8	—	—		
NO.2	1988	9.8	9.9	7.8	7.9	11.9	11.8		
	1989	9.8	9.7	7.7	7.8	11.7	11.7		
	1990	9.8	9.8	7.8	7.8	11.7	11.7		
NO.3	1988	10.1	10.1	7.8	8.0	11.8	12.0		
	1989	—	—	—	—	—	—		
	1990	10.0	10.1	7.8	7.8	11.7	11.7		
NO.4	1988	9.9	9.9	7.7	7.8	—	—	パラストタンクとして使用	
	1989	9.8	9.9	7.7	7.8	—	—		
	1990	9.8	9.7	7.7	7.7	—	—		
NO.5	1988	10.1	10.1	7.8	8.0	11.7	11.7		
	1989	10.0	9.9	7.7	7.8	11.8	11.7		
	1990	10.0	10.1	7.8	7.8	11.7	11.7		
NO.6	1988	9.9	9.9	7.7	7.8	11.9	11.8		
	1989	9.8	9.8	7.7	7.7	11.9	11.9		
	1990	9.7	9.8	7.7	7.8	11.7	11.7		
NO.7	1988	9.9	9.8	7.8	7.8	11.9	11.9		
	1989	—	—	—	—	—	—		
	1990	9.8	9.9	7.7	7.7	11.7	11.8		
NO.8	1988	9.8	9.6					フーティングは コンクリート製	
	1989	—	—						
	1990	9.8	9.8						
NO.9	1988	9.7	9.8	7.8	7.7	—	—	パラストタンクとして使用	
	1989	9.8	9.9	7.9	7.8	—	—		
	1990	9.7	9.7	7.7	7.7	—	—		
NO.10	1988	10.1	10.2	7.8	7.9	11.9	12.0		
	1989	—	—	—	—	—	—		
	1990	9.9	10.0	7.8	7.8	11.8	11.8		
NO.11	1988	10.0	9.8	7.7	7.8	11.8	11.9		
	1989	—	—	—	—	—	—		
	1990	9.8	9.8	7.7	7.7	11.8	11.8		
NO.12	1988	9.9	9.9	7.7	7.8	11.8	11.8	パラストタンクとして使用	
	1989	9.9	9.9	7.7	7.8	—	—		
	1990	9.9	9.9	7.7	7.7	—	—		

Table 3 Initial dimensions of mooring chain rings

リンク NO.	DB	DT	(DB+DT)/2	リンク No.	DB	DT	(DB+DT)/2
1	52.85	52.20	52.53	11	51.95	51.60	51.78
2	51.30	51.30	51.30	12	51.60	51.10	51.35
3	51.45	52.85	52.15	13	51.50	51.45	51.48
4	51.45	51.45	51.45	14	52.85	51.75	52.30
5	51.95	50.95	51.45	15	51.85	51.60	51.73
6	51.85	51.15	51.50	16	51.65	52.40	52.03
7	51.65	51.95	51.80	17	51.35	51.35	51.35
8	52.05	52.70	52.38	18	52.00	51.35	51.68
9	51.30	52.20	51.25	19	51.65	51.65	51.65
10	52.20	52.35	52.28	20	52.30	51.65	51.98

DB、DT 40データの 平均値=51.79 標準偏差= 0.487 単位 mm

及び変化量を、図5に示す。

図には、底板の全体的なたわみ、縦スティッフナー（ロンジ）が横桁を貫通する位置での変化を示す。ロンジが大きく変化した2箇所で、浸透法により欠陥検査を行ったが、き裂等の欠陥は検出されなかった。

図2の(2)拡大図のコラムとプレースとの継手部超音波検査では、I、II、IIIの3ヶ所のエコーから、欠陥の存在が推測された。そこで、この3ヶ所、及び同図のIV、V（Vは、IVの裏側に相当）の2ヶ所及び、下図左のVI、VIIの2ヶ所（没水部）の合計7ヶ所について、切断・試料切り出し・研磨、顕微鏡観察を行った結果を表4に示す。

表5は、コラム没水部に付着した生物の種及び量（100cm²当たりに換算）を示す。表6は、解体時にコラム及び甲板室外壁から切り出した塗膜付き試験片の外観の観察結果を示す。表中、塗膜の白亜化（表面層の劣化による粉体化、目視及び触指により程度が判定できる）、塗膜に生じたピンホール、塗膜表層の層状剥がれ及び塗膜の全般的劣化状況が、5点法（5点：劣化の進行が殆ど認められない、1点：劣化が進行、使用に耐えない状態）で評価してある。

表6のF欄に示すように、塗装仕様Fの没水部塗膜の評価は極めて低く、稼働4年で防食性を失い、大小の腐食孔が生じた。腐食孔とその周囲の塗膜を詳しく観察したところ、見掛けの塗膜欠陥・腐食孔が比較的小さい場合でも、欠陥周辺の塗膜の下に腐食が進行していることが観察された。そこで、見掛けの塗膜欠陥面積A_iと塗膜下腐食を含む全腐食面積Aとの関係を、横軸にA_iをとり、縦軸にA/A_iをとって示したのが、図6である。

塗膜試験片による暴露試験のうち、図7にインピーダンスの経年変化を測定周波数との関係で示す。表7に付着力の経年変化を示す。表7には、ポセイドン号コラムからの試験片での測定結果を併せて示した。

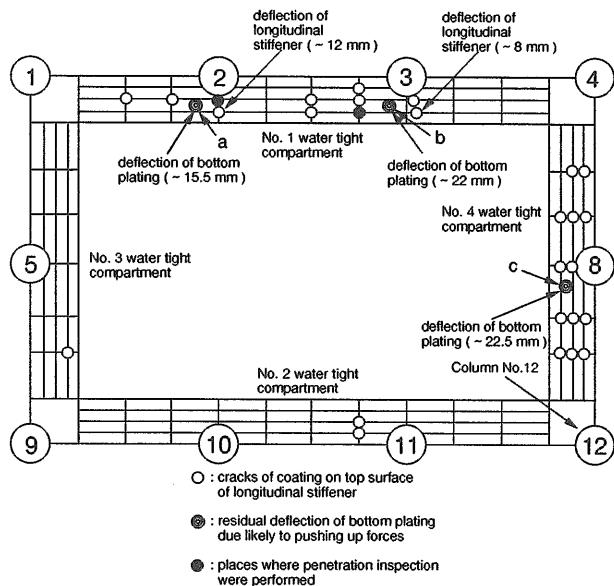


Fig. 5 Deformed positions of box girder bottom plates

5. 実験結果の考察

実験を行った項目のうち、結果を示した主要なものについて、維持管理の立場から考察する。

コラム、フーティング、プレース等の耗減について

一般的な腐食量測定（表2）では、4年間の稼働で耗減が問題になることは無いと思われた。しかし、A/F塗料の効力喪失後（図2のA試験片）の腐食の進行は相当早いことが判った。この部分に補修を施さない場合、さらに数年の稼働によって、貫通腐食孔が生じる可能性があることが推定される[1]。

係留チェーンのリング径の経年変化について

Table 4 Weld metal penetration in welded joints

試料番号		溶接溶込み量	き裂等の有無(位置)	き裂長さ(mm)等
I T型継手 空気中	1	部分溶込み 70%	き裂、スラグ巻込み (DEP)*)	試料No. I-1は確実にき裂と判明
	2	部分溶込み 70%	欠陥無し	
	3	部分溶込み 70%	欠陥無し	
	4	部分溶込み 70%	欠陥無し	
	5	部分溶込み 70%	欠陥無し	
II T型継手 空気中	1	完全溶込み	擬き裂、プロホール (DEP)	長さ 1.5mm
	2	完全溶込み	擬き裂、プロホール (DEP)	長さ 2.0mm
	3	完全溶込み	擬き裂、プロホール (DEP)	長さ 0.5mm以下
	4	完全溶込み	擬き裂、プロホール (DEP)	長さ 1.0mm
	5	完全溶込み	欠陥無し	
III T型継手 空気中	1	部分溶込み 20%	擬き裂、プロホール (DEP)	長さ 0.5mm
	2	部分溶込み 20%	スラグ巻込み	
	3	部分溶込み 20%	欠陥無し	
	4	部分溶込み 20%	欠陥無し	
	5	部分溶込み 20%	擬き裂 (DEP)	長さ 0.5mm以下
IV 十字継手 空気中	1	部分溶込み 30%	欠陥無し	
	2	部分溶込み 30%	プロホール	
	3	部分溶込み 30%	プロホール	
	4	部分溶込み 30%	欠陥無し	
	5	部分溶込み 30%	スラグ巻込み	
V 十字継手 空気中	1	部分溶込み 60%	スラグ巻込み、プロホール	
	2	部分溶込み 60%	スラグ巻き込み	
	3	部分溶込み 60%	欠陥無し スラグ巻き込み	
	4	部分溶込み 60%	擬き裂、プロホール (DEP)	長さ 0.5mm以下
	5	部分溶込み 60%	擬き裂、プロホール (DEP)	長さ 1.5mm
VI 十字継手 没水部	1	部分溶込み 10%	融合不良 (境界)**)	長さ 1.0mm
	2	部分溶込み 10%	欠陥無し	
	3	部分溶込み 10%	スラグ巻き込み	
	4	部分溶込む 10%	融合不良 (境界)	長さ 0.5mm以下
	5	部分溶込み 10%	スラグ巻込み	
VII 十字継手 没水部	1	部分溶込み 50%	融合不良2 スラグ巻込(境界)	長さ 4/1.5mm***)
	2	部分溶込み 50%	融合不良2 プロホール (境界)	長さ 2/0.5mm以下
	3	部分溶込み 50%	融合不良1 プロホール (境界)	長さ 6.5mm
	4	部分溶込み 50%	融合不良3 プロホール (境界)	長さ 4/0.5mm以下
	5	部分溶込み 50%	融合不良2 プロホール (境界)	長さ 4/0.5mm以下

*) き裂、擬き裂が溶着金属部で見つかったことを示す。

**) 融合不良が溶着金属と母材との境界で見つかったことを示す。

***) 融合不良2カ所のうち1つは4.0mm、他は1.5mm であったことを示す。

Table 5 Amounts and numbers of species of fouling marine animals(not measured for columns No.7, 8 and 9)

コラム 番号	塗装 仕様	付着量 g/100cm ²		
		2年目	3年目	4年目
1	A	147	305	228
2	B	248	360	256
3	C	324	496	442
4	D	145	183	262
5	G	169	156	250
9	H	347	227	218
10	K	54	590	280
11	L	185	261	159
12	M	175	241	262
平均		199	313	261
生物種		サンカクフジツボ、アカフジツボ、カキ、ムラサキイガイ	前年と同一種カキとイガイが成長	前年と同一種カキとイガイが更に成長

Table 6 Evaluation of coating film deterioration after 4 years of operation

塗装 仕様	暴露部位			甲板室外板	
	コラム				
	大気中	飛沫帶	没水部		
A	評点3、白4 孔3、 鎔4	評点3、白3 孔3、 剥4	評点5、白5 MAP+MARM		
B	評点2、白4 孔2、 鎔2	評点2、白3 鎔2	評点2、剥2 鎔2、 TE		
C	評点3、白4 しわ3	評点3、白4 鎔3	評点2、鎔2 IZP+TE		
D	評点3、白4 鎔3	評点5、白4 骨材少々浮き	評点5、白4 IZP+TE	評点5、白亜化わずか、艶残り	
E	評点5、表面 に凹凸ある	評点4、骨材 光る	評点3、剥2 EZP+ME	評点5、白亜化わずか	
F	評点5、鎔5 艶残り	評点4、白4	評点1、鎔1 剥4 TE		
G	評点5、孔5 鎔5	評点5、	評点5、白4 EZP+PE+A/C		
H	評点4、白4 鎔5	評点4、白4 剥4	評点2、剥2 IZP+TE+VT+A/F		
K	評点3、白3 点鎔2	評点3、白5 孔4、骨材浮	評点3、鎔4 傷3、 TEF		
L	評点5、白4 剥5、 鎔5	評点3、鎔3	評点1、鎔1 剥4、 PEFP+TEF		
M	評点4、白5 割4、 鎔5	評点4、白5 割4	評点4、白5 鎔4、 PEF		

記号 評点:総合評点

白:白亜化

剥:表層剥がれ

鎔 :鎔の進行

孔:ピンホール

割:塗膜に発生した割れの程度

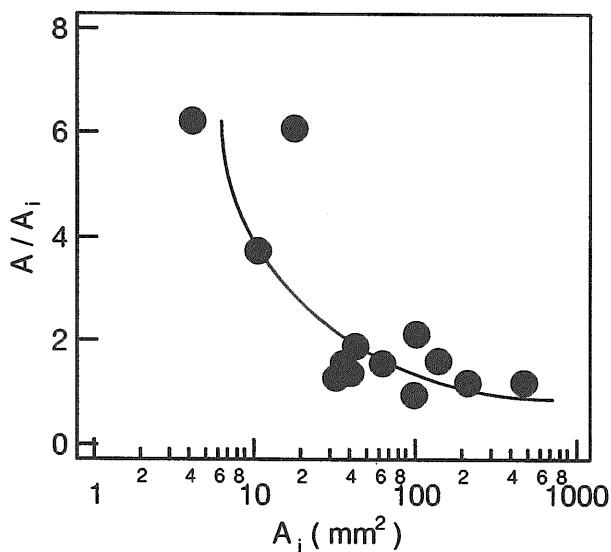


Fig. 6 Relation between virtual defect area of coating film A_i and total corroded area A

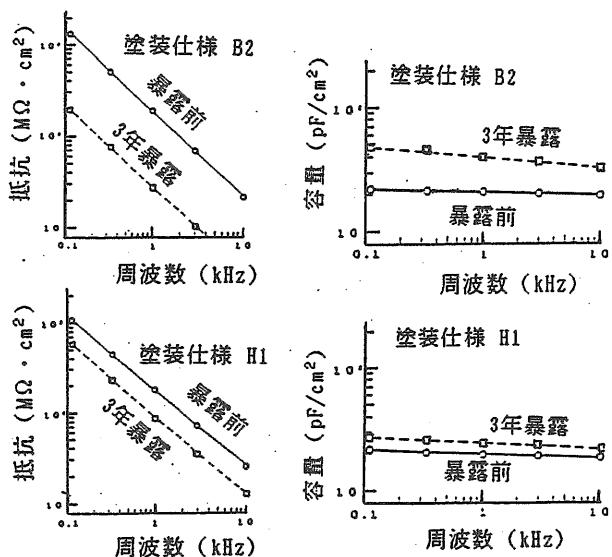


Fig. 7 Changes of alternating current impedance of coating film on test plates

図4(b)から、リングの衰耗は、チェーンの甲板側端部から海底接触部に降るにつれて増加することが判る。これは、飛沫帶(P=2)や、中間支持治具との接触部(P=3)での衰耗が最も著しいのではないかとの当初の予測に反するものであった。この図で全体的な衰耗量の傾向はつかめるものの、同じ位置であっても値に相当なバラツキがあることもわかる。このバラツキの原因が初期値のバラツキにもある可能性を示しているのが表3である。(DB+DT)/2の値で最大1.28mmの差が示されている。

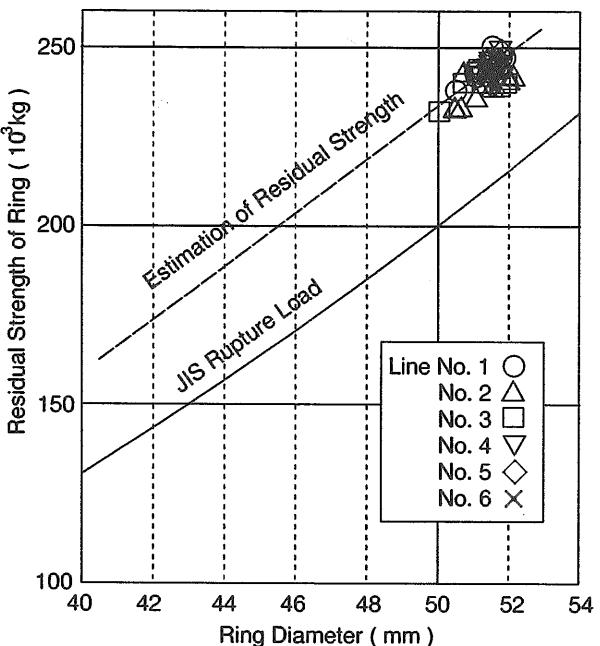


Fig. 8 Relation between reduction in radius of mooring chain ring and residual strength of it

リング径の最も著しい衰耗量は、4年間で約2mmであった。チェーン全体の強度は、設置当初の強度が設計値より十分高いため、稼働4年程度の衰耗によって強度上問題になる変化は起こっていない。使用したリング径は、52mmであったが、法定上は50mmでよかつたことから、使用したリングが、径寸法50mmのJIS強度に達する時をリングの衰耗限界と仮定すると、残存強度の推定(図8)から、今後8年程度は、このままで使用できるものと推定出来る。
ボックスガーダー内の変化について

ボックスガーダー内で測定された残存変化量15.5mm～22mmから、これを生じさせるに必要な波浪荷重を推定したところ、0.41MPa～0.46MPa(静水圧で42m～47m)であった。設計時の予想を相当に上回る波浪に見舞われたことが推測され、設計荷重の慎重な検討が必要なことがわかった。

コラムとプレースとの継手部の非破壊検査結果について

表4に示すように多数の溶接欠陥が、建造当初から存在していたことがわかった。さいわい、確実にき裂に発展していたのは、表3のうちでは、I-1試験片(き裂長さ3.5mm)のみであった。しかし、溶込み不足、融合不良による欠陥が多数存在していたことから、コラムとプレースとの継手部で、今回試験しなかった部分には、稼働4年で、相当数のき裂が存在していたことが推定される。これは、建造時の溶接設計(特に、斜交継手となる部分の溶接開先一溶着金属の溶け込みをよくするための鋼材端部の加工の設計)に原因がある。さらに建造後の溶接部非破壊検査が十分でなかったことは、保守管理上に多くの問題を生じさせる可能性があると思われる。

Table 7 Adhesion force of coating film on test plates and on POSEIDON columns and deck house wall (kg/cm²)

塗装 仕様	試験片						ポセイドン号	
	初期値	2年暴露	平均値	3年暴露	平均値	4年暴露	平均	
A 1	45.0	25.0	21.0	23.0	57.5	21.0	32.4	28.5 29.5 29.0***
A 2					24.0	27.0		
	81.5	35.0	29.0	38.1	70.5	75.5	57.2	32.5 29.0 30.8**
	83.0	29.0	34.0		28.5	41.0		35.0 27.5 31.3*
B 1	80.0	33.0	44.5		62.5	65.0		
	45.0	21.5	21.0	30.8	35.0	45.0	27.9	31.0 25.0 28.0***
		40.0	29.0		27.0	32.5		
B 2		23.5	29.5					
	60.0	60.5	39.0	50.8	41.5	32.0	50.4	60.0 41.5 50.8*
		48.0	41.5		68.0	60.0		
D 1		68.0	48.0					
	63.8	39.0	41.0	38.6	46.5	41.5	42.7	40.0 29.0 34.5**
		41.5	28.5		64.0	30.5		
D 2		37.5	42.0		36.0	37.5		
	49.8	20.0	19.5	22.1	36.5	32.5	36.5	
	43.5	20.5	20.5		47.0	30.0		
E 1	56.0	26.0	26.0					
	60.0	29.0	30.5	30.4	55.5	53.0	47.2	26.0 29.5 27.8***
		30.0	30.0		58.5	41.0		38.0 41.0 39.5**
E 2		31.5	32.0		36.0	40.0		
	66.0	32.0	37.0	39.3	49.0	59.0	50.0	62.5 49.0 50.8*
	70.0	55.5	35.0		38.0	41.5		
F 2	62.0	32.5	44.0		57.5	63.0		
	70.0	39.5	38.5	39.0	30.0	30.5	31.6	36.5 37.0 36.8*
	74.0				40.0	35.0		
H 1	66.0				30.0	24.0		
	35.0	19.5	19.5	22.8	25.0	28.0	21.5	39.0 58.0 48.5*
		28.5	28.5		18.5	14.5		
K 1		20.0	20.5					
	56.3	28.5	26.5	30.1	29.0	25.0	34.3	36.0 40.0 38.0***
		29.0	36.5		49.5	33.5		
K 2	96.3	43.0	60.5	58.6				46.0 29.5 37.8*
	77.5	53.0	71.0					
	15.0	76.0	48.0					
L 2	62.5	49.0	43.5	53.4	84.0	72.0	63.3	35.0 41.5 38.3*
	80.0	66.0	40.5		69.0	36.0		
	45.0	67.5	54.0		59.0	60.0		

*空気中 **飛沫部 ***没水部

コラム没水部への付着生物について

表5から、設置後ほぼ3年で、生物種、量とも飽和状態に達したことがわかる。生物種、量は、構造物の設置海域、対象部位の姿勢（垂直部、水平部、水深、太陽光の到着程度等）に影響を受ける。付着生物が浮遊式海洋構造物に及ぼす影響としては、波浪によって受ける荷重の増大[2]、構造物の沈下および塗膜劣化の促進が考えられる。このうち、構造物の沈下についての基礎データとして、カキ及びイガイの比重を調べたところ、カキ（3年程度で、個体重量72g～274g、由良産ではない）：平均比重1.31（最小1.11、最大1.51）、イガイ（2～3年程度の大きさで、個体重量16g～65g、由良産ではない）：平均比重1.33（最小1.08、最大1.43）であった。このことから、主要付着生物の種によっては付着生物による海洋構造物の沈下が問題になることがわかった。

塗膜の劣化について

表6からわかるように、防食仕様によって耐久性に大きな差があることがわかる。例えば没水部についてみると、塗装仕様B、C、D、F、H、K、Lでは、いずれも船底塗料として定評のあるTE（タールエポキシ系塗料、ガラスフレークの入ったTEFを含める）が含まれている。塗装仕様Dでは評点5であるが、塗装仕様F、Lでは、評点1となっている。この違いは、無機ジンクプライマーが下塗として塗布していないこと（仕様B、F、K、L）、または塗布してあっても十分な量でないこと（仕様H）によると思われる。塗装仕様Cは、このいずれにも該当しないが、評点2である。これは、塗布の施工上なんらかの問題があったものと思われる。

塗膜の大気中暴露結果については、試験片塗膜（三鷹市の船舶技術研究所、3階建て建屋の屋上で暴露）の結果と比較してみる。図7で、塗装仕様H1（下図）の方は、暴露期間3年での交流インピーダンス値（抵抗及び容量）が、暴露前の値と比較的近いのに対し、B2の方では、相当変化している。この図の解釈は色々あろうが、単純な事実としては、暴露環境、暴露期間が同じであれば、初期値からの変化が大きい方が劣化の進行が速いということが知られていることである。一方、表6の大気中暴露のB及びHの欄を見ると（付図に示すように、B1、H1は、コラムB及びコラムHの大気中の塗装仕様である）、Bの評点は2、Hの評点は4となっている。このように劣化速度の傾向に関しては、一般大気中と実海域で同じとなっている。このことは、実海域の劣化を、一般大気中で塗膜試験片を暴露し、この塗膜のインピーダンスを測定し続けることでモニター出来る可能性を示しているといえよう。

6. 結論及び維持管理システムのあり方について

ポセイドン号による維持管理に関する実験から、次のことがわかった。

1) 損傷、腐食等、構造物本体の維持管理に関して当初の予測とはずれのあったものとして、次のことがあった。

- ・波浪によると思われる変化が、ボックスガーダーに生じた。これは、設計段階での予測を上回る波浪があったことを推定させるものであった。
 - ・A/F塗膜は2年程度で防汚性及び防食性を失い、その後は局部腐食が急速に進行することがわかった。
 - ・コラムとプレースとの接合部は、斜交溶接継手となるため、溶込み不良や、融合不足が生じ易い。これが原因と考えられるき裂が発生した。建造後に、溶接部のNDI（非破壊検査）による欠陥検査及び必要な補修が必要である。
 - ・20年程度の耐久性を想定した重防食塗膜であっても、仕様・施工が適切でない場合、4年程度の使用で耐久性の限界に達する可能性が強いことがわかった。
- 2) 以上のことから、維持管理に関し次のことが必要である。
- ・設計時に、維持管理の方式を決め、それに沿った詳細設計、建造が行われること。必要に応じ、外力や構造物構成材料の劣化のモニタリング、点検用の足場の設置等についても検討しておくこと。
 - ・初期状態を十分把握するため、溶接部の非破壊検査、防食塗膜の初期値の測定等を調べておくこと。塗膜については、耐久性、塗布対象形状と膜厚分布特性との関係、経年劣化に関するデータベースの充実が必須である[3]。
 - ・維持管理方式、初期状態に基づいて、「維持管理マニュアル」を稼働開始前に作成し、稼働と同時にこれに基づいた維持管理をしなければならない。
- 3) 最近、老齢化した橋梁、航空機、船舶等大型構造物の寿命延長が話題になっている[4、5、6]。老齢化=老朽化ではない。老朽化程度の判定には、維持管理がどう行われてきたかが大きい影響を及ぼすことが判っている。老朽化の程度を精度良く推定するためにも適切な維持管理をすることが大切と思われる。

参考文献

- 1)在田、井上、藤井、小林、腐食と船体の安全について、西部造船会会報、No. 75、昭和63年3月。
- 2)加藤直三、付着生物の基礎調査と直立円柱に加わる波力への影響について、第6回海洋工学シンポジウム、日本造船学会、昭和57年12月、PP. 17-25。
- 3)M. Arita, K. Matuoka, K. Ohnaga, S. Naitou and T. Shibata, Corrosion Preventing System of Offshore Structure by Paint Coating, Proc. of Ocean Tech 88, Nov. 1988, pp. 43-49.
- 4)A. Toorn and A. W. F. Reij, A Systematic Approach to Future Maintenance, Bridge Manage, 1990, PP. 215 - 222.
- 5)N. J. Smith, Management of Bridge Maintenance in the UK, Manage, 1990, 223 - 230.
- 6)E. E. Murphy, Aging Aircraft, IEEE Spectrum, vol. 26, No. 6.

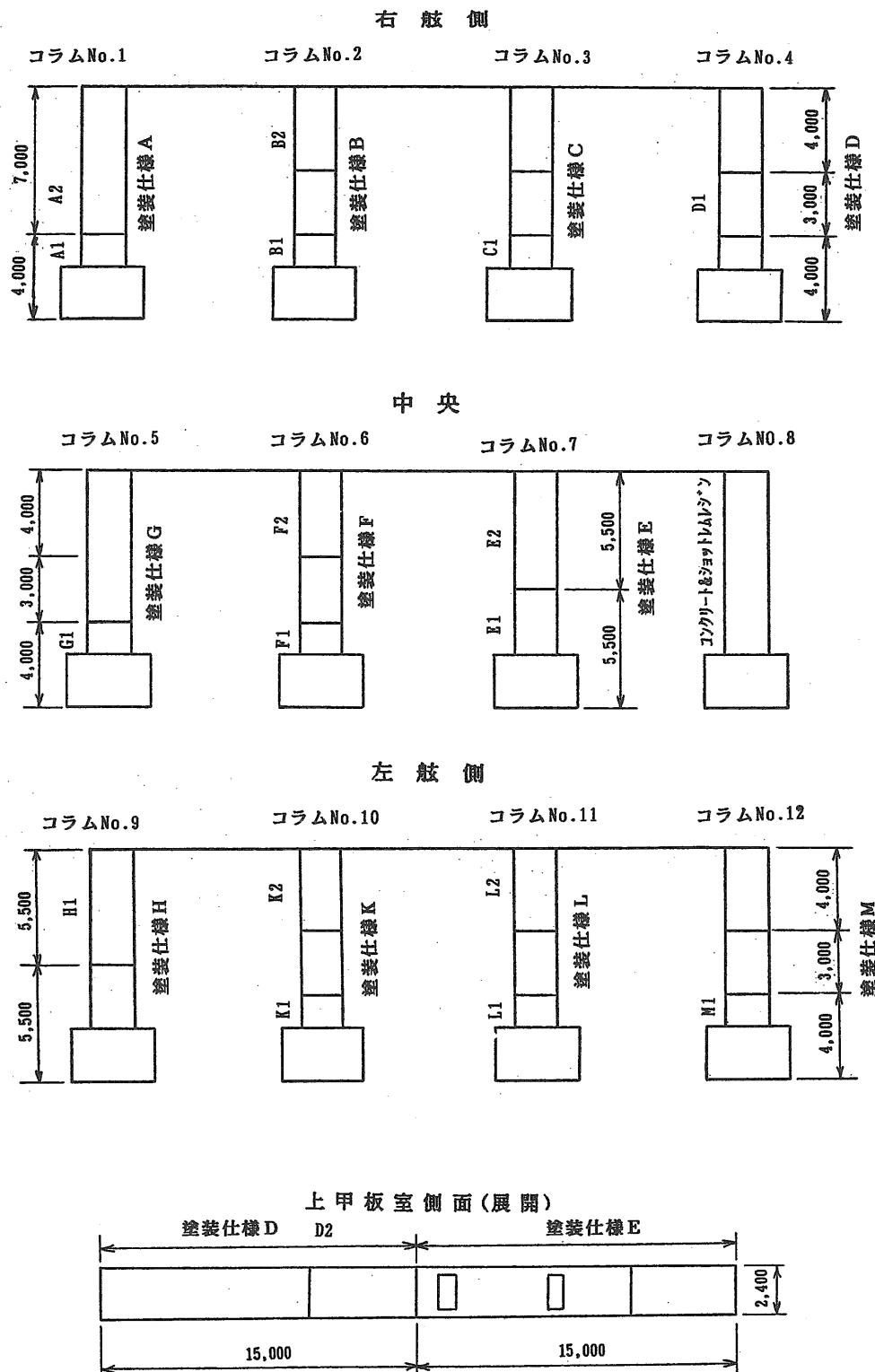


Fig. annex Coating film specifications for columns No.1 through No.12 and deck house side wall

Table annex Difference of design, inspection and repair due to maintenance systems

想定維持 管理システム 段階	メンテナンス フリー方式	検査・補修方式
設計・施工 段階	<ul style="list-style-type: none"> ・信頼性がある十分な強度 　　設計・防食設計が必要 ・慎重な施工が必要 	<ul style="list-style-type: none"> ・経済性を重視した強度 　　設計・防食設計が出来る ・十分な検査が出来る構造 や付帯設備の設置が必要
製造検査 補修段階	<ul style="list-style-type: none"> ・確実・詳細な検査の実施 ・十分な補修 	<ul style="list-style-type: none"> ・主要部の検査、副次的部 分の抜取り検査を実施 ・必要な補修
稼働中検査・ 補修段階	<ul style="list-style-type: none"> ・検査間隔が長い ・検査毎に足場を組む必要 ・修理は大々的になる 	<ul style="list-style-type: none"> ・検査期間が短い ・検査・補修を確実に行い ルーチン化する
稼働終了 の判断	<ul style="list-style-type: none"> ・当初予測を大幅に上回る 保守費（損傷・腐食修理） 等で稼働を停止する 	<ul style="list-style-type: none"> ・構造信頼性を確保するた めの補修経費が予定の上 限を上回った時点で稼動 を停止する