

可動橋の老朽化調査

と補修設計について

奈留島可動橋の補修設計事例

株式会社三洋コンサルタント
設計部 下川 雅史

内 容

- 1.対象施設
- 2.検討の概要
- 3.現地調査結果
- 4.原因推定
- 5.補修設計
- 6.業務を終えて感じたこと

可動橋とは

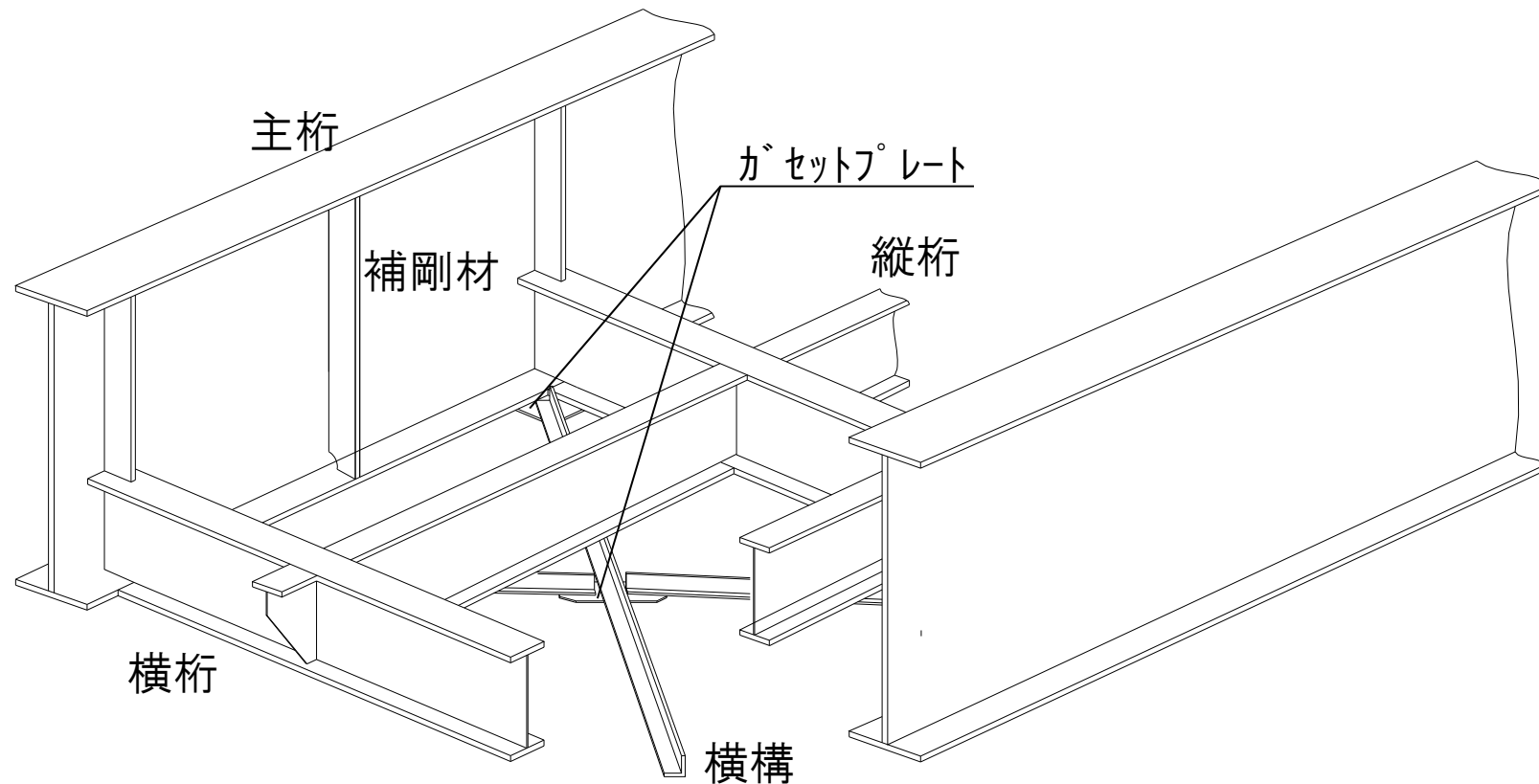
- フェリーと岸壁を結ぶ車両乗降用の連絡橋



- 潮位により変動する乗降口に合わせ、油圧シリンダーにより連絡橋の勾配を変化させることができる橋梁



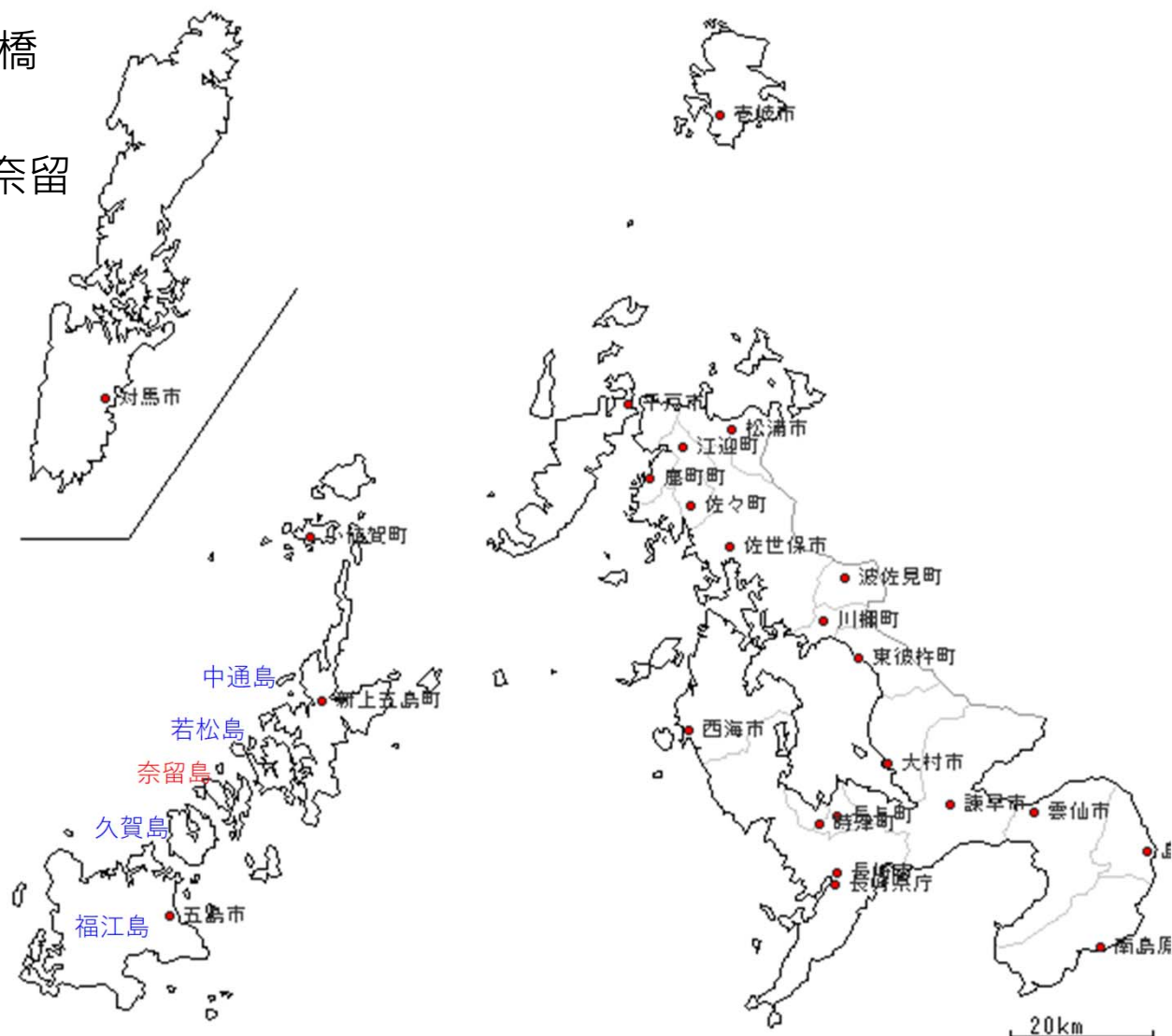
部材名称



主桁：自重や車両の荷重をささえ、橋台及び油圧シリンダーに伝達する。
横桁：縦桁を支持し、路面に作用する荷重を主桁に伝える床組。
縦桁：床版を支持するため、橋軸方向に配置される桁。横桁で支持される。
横構：風など橋に作用する水平荷重に抵抗する水平に組まれた骨組み構造。
ガセットプレート：格点に集まる部材を連結するための鋼板。

1.対象施設

- ✓ 施設名：奈留島港可動橋
- ✓ 場 所：
長崎県五島市奈留町奈留



✓ 航 路：

長崎（長崎）～五島（福江）～上五島（奈良尾）（1便/日）

五島（福江）～上五島（若松）（6便/日）

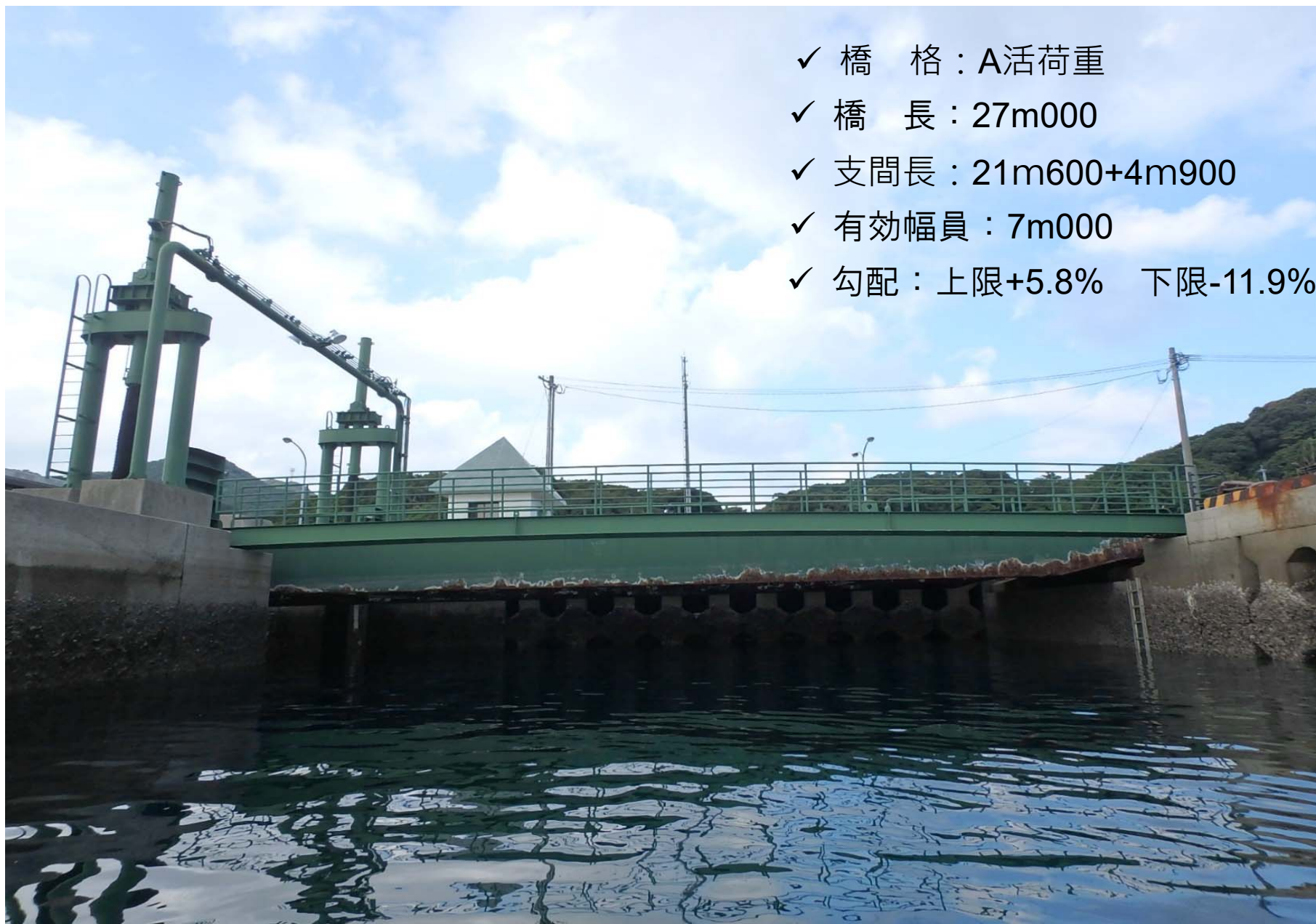
福岡（博多）～五島（福江）（1便/日）



奈留島可動橋

- ✓ 橋梁形式：油圧シリンダ吊下げ式鋼製プレートガーダー
- ✓ 竣工年：2004年（平成16年）経過13年（調査時点）



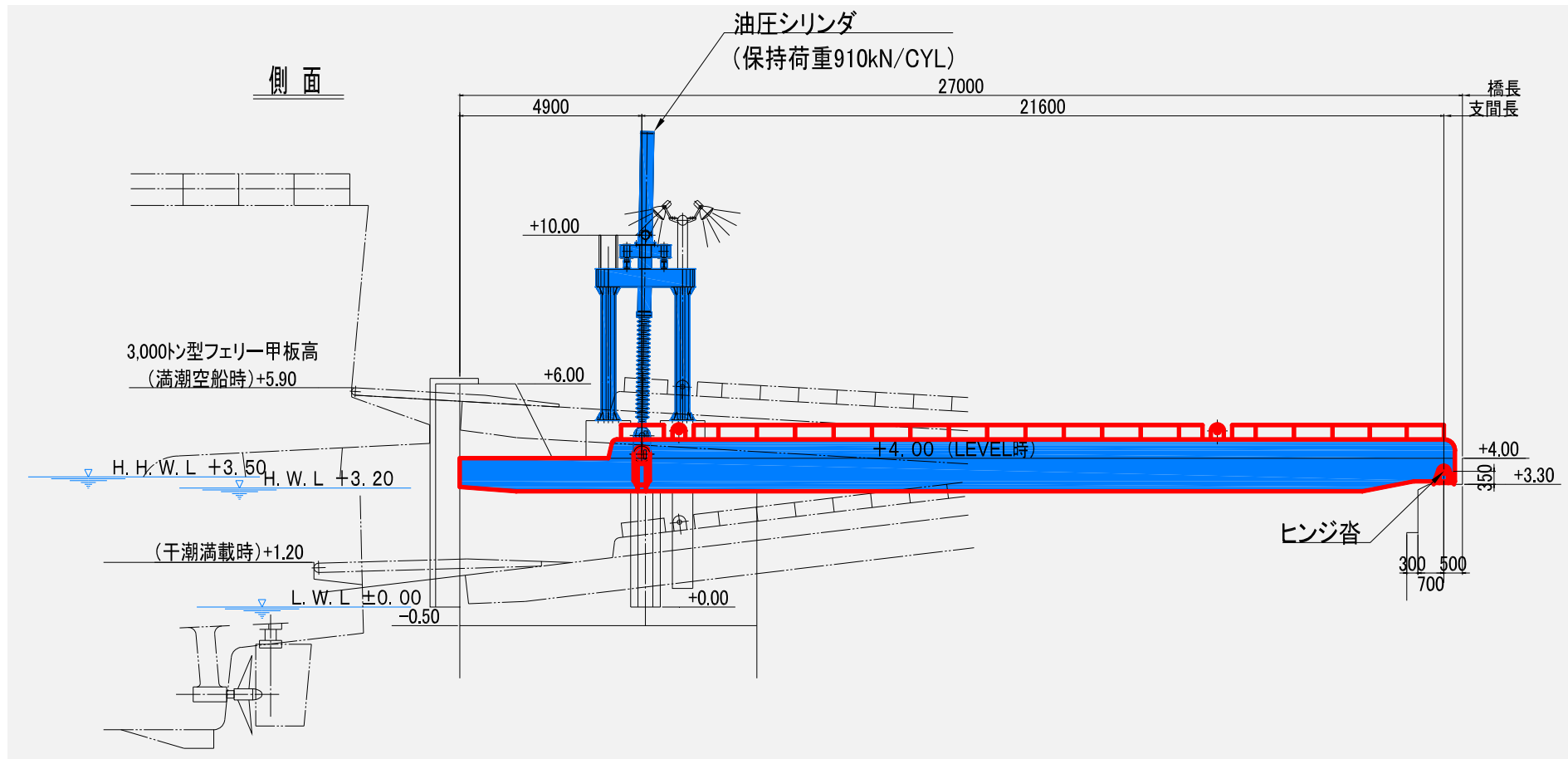


- ✓ 橋 格 : A活荷重
- ✓ 橋 長 : 27m000
- ✓ 支間長 : 21m600+4m900
- ✓ 有効幅員 : 7m000
- ✓ 勾配 : 上限+5.8% 下限-11.9%

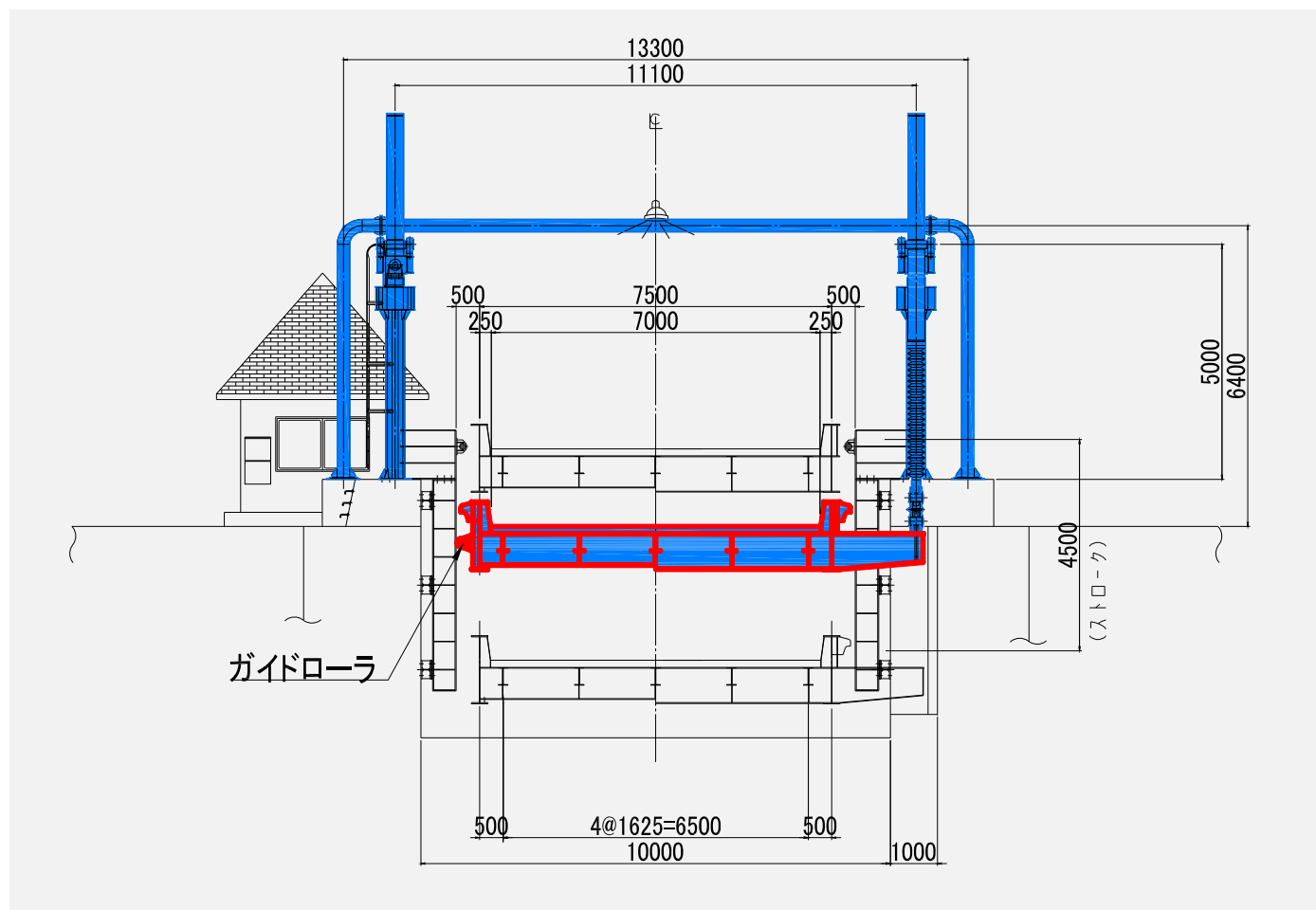


- ✓ 材質：SM490Y、SM400
- ✓ 防食法：アルミ溶射（As160）+ポリウレタン樹脂塗料
- ✓ 腐食代：片側0.5mm

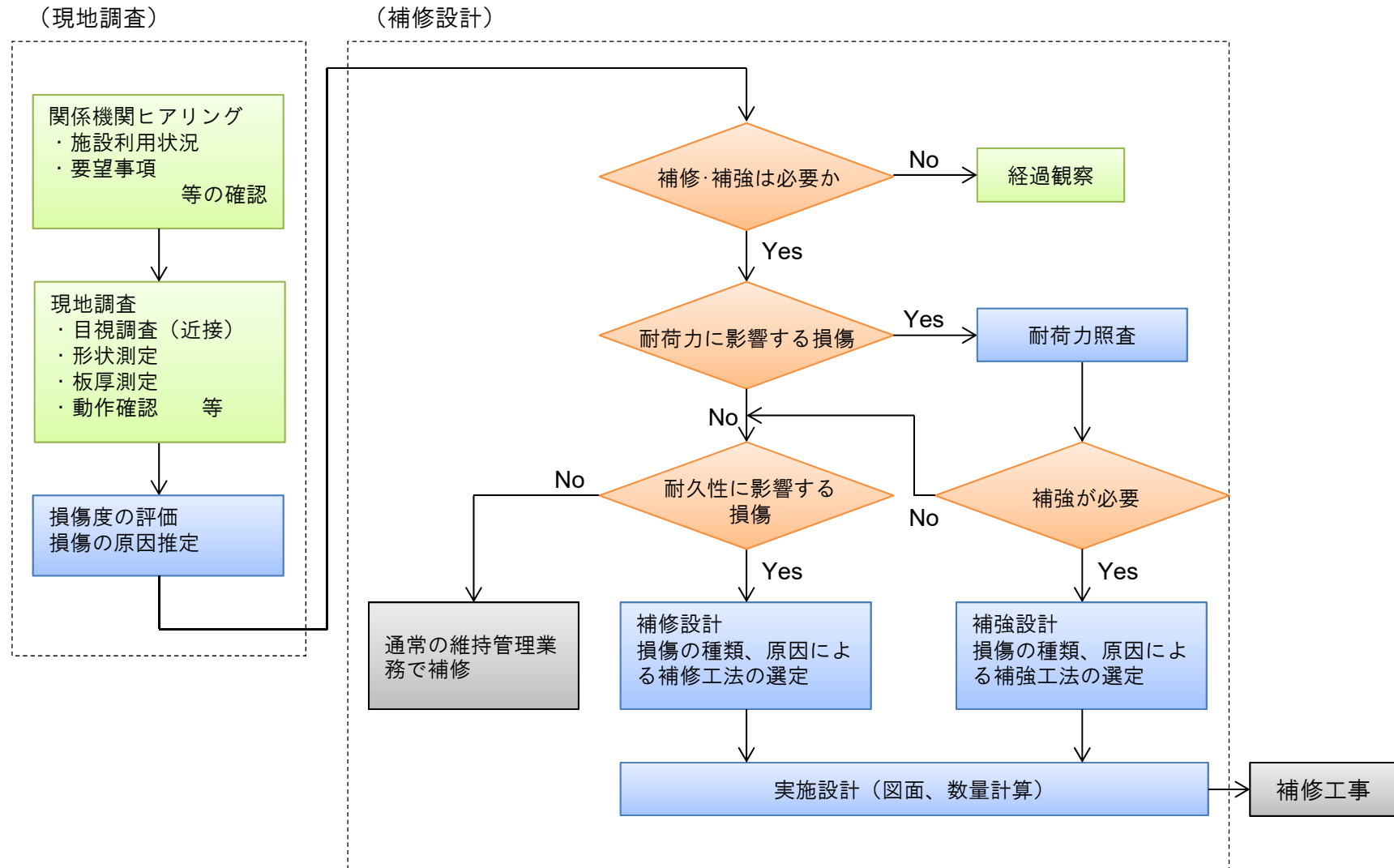
可動橋側面図



可動橋断面図



2.検討の概要



3.現地調査結果

目視調査結果

(1) 床 版

- 先端部でタイヤ走行位置に腐食や亜鉛の溶出に伴う白さびが確認された。
- その他、衝突等による変形、損傷は確認されていない。



先端グレーチング

目視調査結果

(2) 主 桁

- 橋台側の主桁下フランジ上面に、腐食が発生している。
- その他、衝突等による変形や損傷は確認されなかった。
- 腐食部は、防食下地が溶出し、鋼材面が露出している。
- 腐食部周辺には、アルミニウムの溶出による水酸化アルミニウムの白い粉が確認された。



主 桁

目視調査結果

(3) 横桁・横構

- 二次部材は、横桁、横構とも塗膜がなくなり、腐食が発生している。
- 部材を連結するガセットプレートに多く腐食が発生し、一部亀裂が生じている。



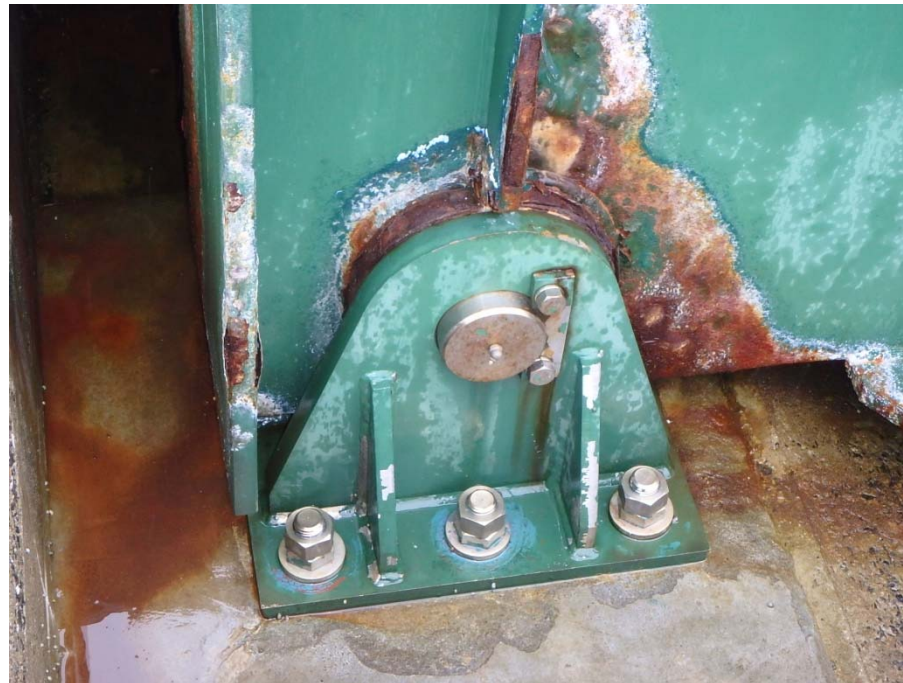
横桁・横構



目視調査結果

(4) ヒンジ沓

- 部分的な塗装の剥がれやさびが確認されたが、変形、損傷は確認されなかった。



ヒンジ沓

目視調査結果

(5) サイドローラ

- 変形、損傷は認められず、ローラからの異音も認められなかった。



サイドローラ

肉厚測定結果

超音波厚み計を用い、各部位、部材の肉厚（板厚）の測定を行った。

1箇所あたりの測定点は以下のとおり実施。

- ・ 測定点は5点（10cm×10cm）
- ・ 測定回数は、1点あたり3回



肉厚測定表

測定地点	測定箇所	初期肉厚	測定 No.	残存肉厚 t2(mm)				腐食量	残存肉厚	腐食量	腐食速度 (mm/y)
		t1(mm)		1回目	2回目	3回目	平均		t2(mm)	t1-t2(mm)	
G1	L-Flg	28	1	25.13	25.10	25.46	25.23	最大	25.23	2.77	0.213
			2	27.33	27.39	27.36	27.36				
			3	26.68	26.77	26.68	26.71	平均	26.54	1.46	0.112
			4	26.72	26.68	26.74	26.71				
			5	26.68	26.65	26.66	26.66	最小	27.36	0.64	0.049

肉厚測定結果

- 主桁下フランジ・横構が、許容腐食量（片面0.5mm）を上回っていた。
- 主桁下フランジは、耐荷力の照査を行った結果、現時点で耐荷性能に問題はなかった。

腐食後の作用応力度 $\sigma_b=183(\text{N/mm}^2) < \sigma_{ba}=186(\text{N/mm}^2) \cdots \cdots \text{!!OK!!}$

- 横構については、**亀裂**が認められたことから**部材交換**とした。

肉厚測定結果

(Unit in mm)

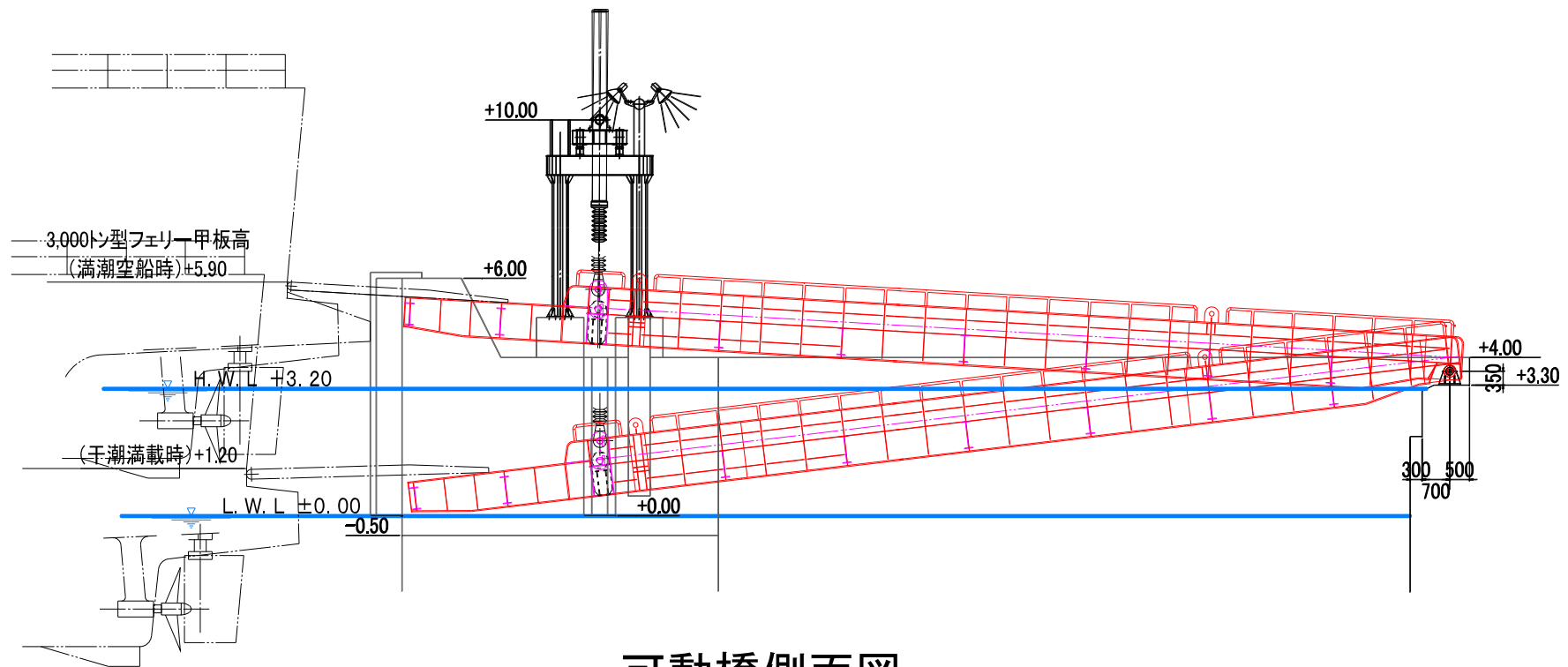
部位	部材	初期肉厚	必要肉厚	測定値	腐食量
陸側主桁	U-FLG	28.0	27.0	27.41	0.59
	WEB	9.0	8.0	8.35	0.65
	L-FLG	28.0	27.0	26.54	1.46
沖側主桁	WEB	9.0	8.0	8.25	0.75
	L-FLG	28.0	27.0	27	1.00
縦桁	WEB	9.0	8.0	8.65	0.35
	L-FLG	14.0	13.0	13.94	0.06
横桁	WEB	9.0	8.0	8.99	0.01
	L-FLG	16.0	15.0	15.48	0.52
下横構		10.0	9.0	8.39	1.61
				許容腐食量	1.00

※測定値は、面平均値

4.原因推定

4-1.架橋環境

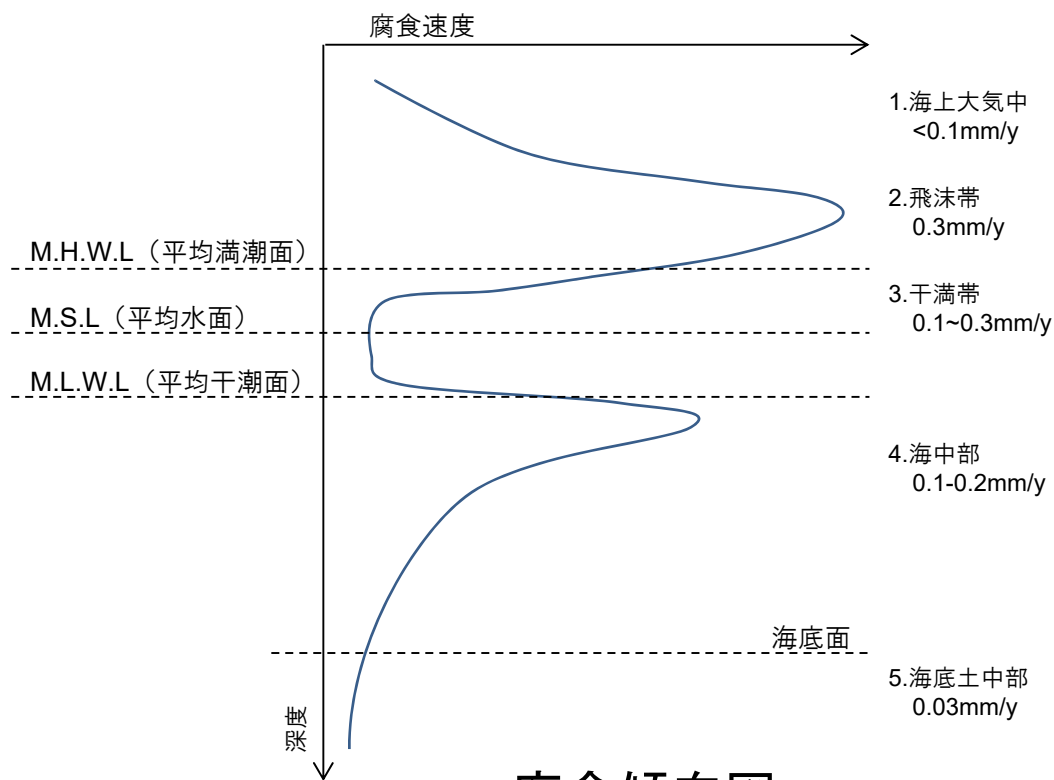
- 可動橋は、潮位にあわせて上下させており、可動橋下面は常に海面から約0.5m～2.0m上位に位置している。



可動橋側面図

4-1. 架橋環境

- 腐食傾向図の**飛沫帯**に位置している。
- 飛沫帯は、腐食の原因となる**海水と酸素の供給が多い**。
- さらに、波や浮遊物の衝撃による鋼材表面の錆層の物理的剥離も生じるため、**最も厳しい腐食環境**にある。



腐食傾向図



参考文献

※海洋鋼構造物の防食技術、2010、p25

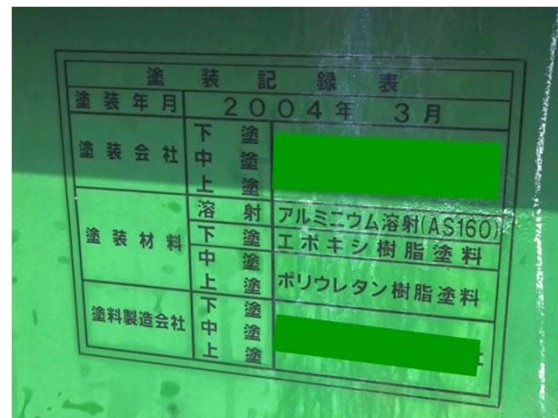
4-2.補修前の塗装仕様

- 補修前の塗装は、金属溶射の上にC-2系の塗装が施されている。

※C-2塗装系：鋼道路橋塗装便覧、平成2年6月
pp18-28

塗装仕様

工 程	塗料名	使用量 (g/m ² /回)	塗装方法	目標膜厚 (μm)
素地調整	ブラスト処理 SIS Sa3 SPSS Sd3 Sh3	-	-	-
金属溶射	アルミニウム溶射 (As160)	-	溶射	160
封孔処理	金属溶射封孔処理剤 (エポキシ系)	-	-	-
下塗	エポキシ樹脂塗料	540	スプレー	120
中塗	ポリウレタン樹脂塗料用中塗	170	スプレー	30
上塗	ポリウレタン樹脂塗料上塗	140	スプレー	25



4-3.アルミ溶射の適用可能範囲

(1)鋼道路橋防食便覧

下表に示す適用可能範囲から飛来塩分量が多い環境での適用は可能。

鋼道路橋の代表的な防食法の適用環境比較

防食法		劣化因子/劣化促進因子	環 境	
			飛来塩分量が少ない環境	飛来塩分量が多い環境
塗装	一般塗装	紫外線, 水, 酸素/ 塩分, 亜硫酸ガス等	適用可能範囲	
	重防食塗装	紫外線, 水, 酸素/ 塩分, 亜硫酸ガス等	適用可能範囲	
耐候性鋼材		水, 酸素/ 塩分, 亜硫酸ガス等	適用可能範囲	
溶融亜鉛めっき		水, 酸素/ 塩分, 亜硫酸ガス等	適用可能範囲	
金属溶射	封孔処理	水, 酸素/ 塩分, 亜硫酸ガス等	適用可能範囲	
	重防食塗装	紫外線, 水, 酸素/ 塩分, 亜硫酸ガス等	適用可能範囲	

適用文献

鋼道路橋防食便覧、平成26年3月、ppl-33～l-34

4-3.アルミ溶射の適用可能範囲

(2)港湾鋼構造物防食・補修マニュアル

以下の記載から、飛沫帯を含む大気中での適用は可能。

金属溶射およびめっきは、溶融した金属を鋼材表面に被覆するもので、防食用としては亜鉛、アルミニウムおよび亜鉛・アルミニウム合金が使用される。

これらは、**大気中※では優れた耐食性を示す**が、厳しい環境である海洋環境では封孔処理した溶射皮膜やめっき皮膜単独で使用されることは殆どなく、使用する場合は、塗装を施したうえで海上大気中に限定している。

※大気中：ここでは飛沫帯を含めた海面から上の大気中を表す。

適用文献

・港湾鋼構造物防食・補修マニュアル、平成21年11月、p51

4-4.防食法の適合性

- 補修前の塗装仕様は、二つの基準書に記載されている事項を満足する塗装仕様であった。
- 但し、可動橋の腐食環境は、アルミ溶射＋封孔処理＋塗装の適用可能範囲内でも最も厳しい側に位置するものである。



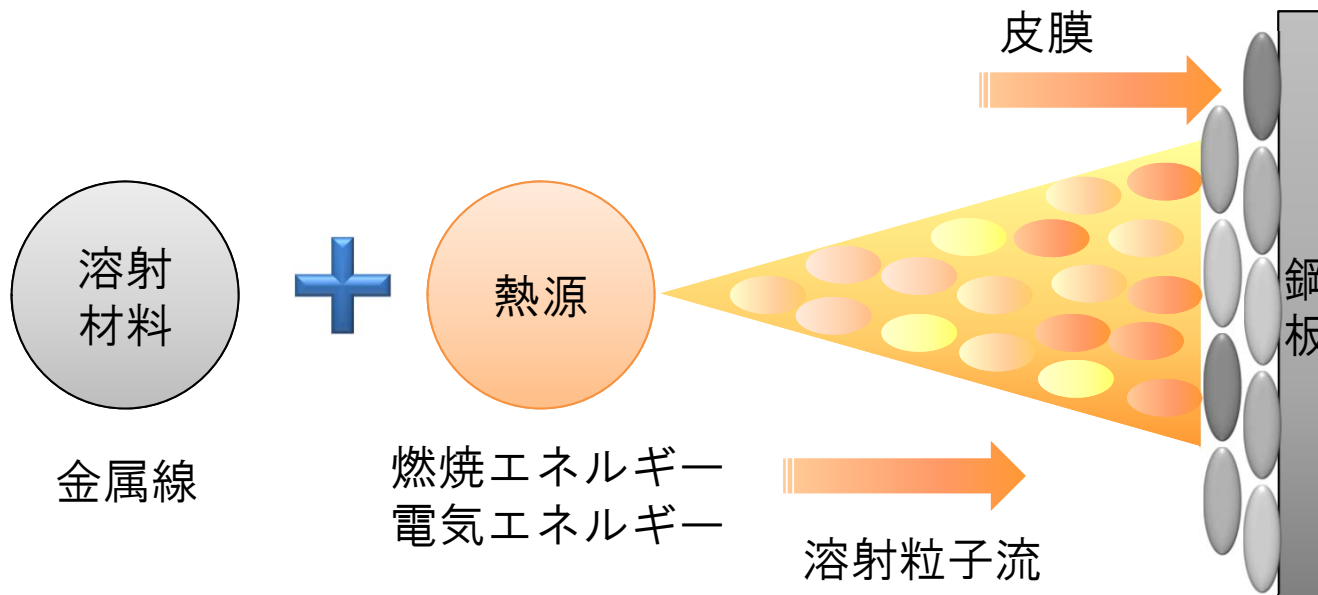
- ◆ 同じ塗装仕様で同年に隣接して施工された浮棧橋の連絡橋に、著しい防食機能の低下は認められない。

4-5. フランジや腹板面に発生している腐食の要因

○溶射の概要

(1) 溶射

溶射は、電気化学的に卑な電位を示す亜鉛やアルミを電気エネルギーを用いて溶融し、圧縮空気を用いて溶滴を微細化して鋼材面に吹き付け溶射被膜を形成する。



溶射法の構成と成膜機構の模式図

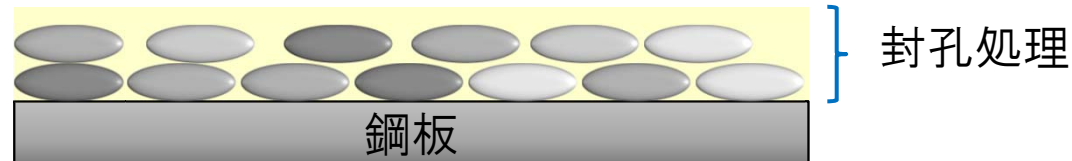
参考文献

鋼道路橋防食便覧、平成26年3月、ppV-34~V-35

4-5. フランジや腹板面に発生している腐食の要因

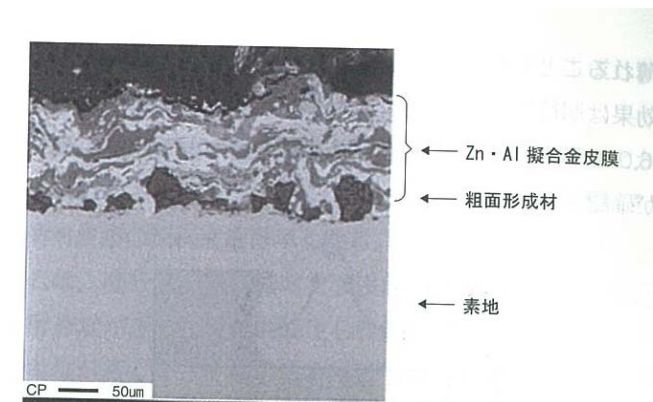
(2) 封孔処理

亜鉛、アルミの溶滴は、積層となって被膜を形成するが、溶滴の積層であるため、その溶滴間に**極微細孔**が発生する。



この微細孔は鋼材面まで達するものもあり、この微細孔を塞ぐために**エポキシ系の材料を溶剤で希釈し封孔処理**を行っている。

封孔処理を行っても希釈した塗料が浸透できない**極微細孔**や封孔処理剤のシンナーが蒸発する際に発生する微小な気孔が残り、**微細孔を完全に塞ぐことは困難**である。

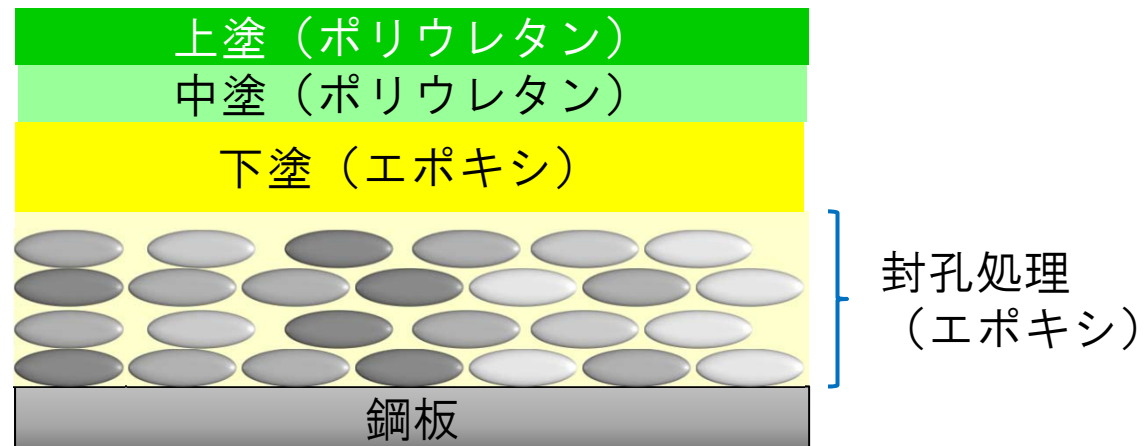


金属溶射被膜の断面
(鋼道路橋防食便覧より)

4-5. フランジや腹板面に発生している腐食の要因

(3) 塗装

封孔処理を補い、美装性を付与するため、溶射被膜にポリウレタン塗料を用いたC塗装系が施されている。

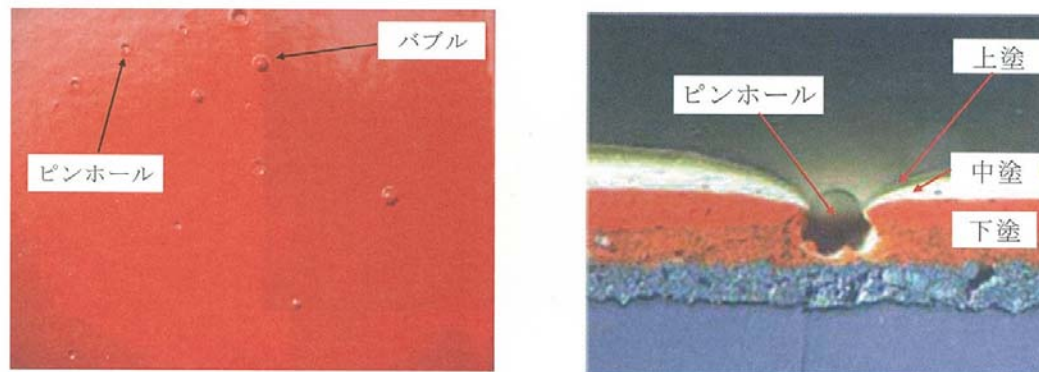


4-5. フランジや腹板面に発生している腐食の要因

○腐食の過程

(1) 塗膜劣化

溶射被膜にある微細孔が原因で、中上塗りの塗膜にピンホールが発生。



ピンホールの状態
(鋼道路橋塗装・防食便覧資料集より)

参考文献

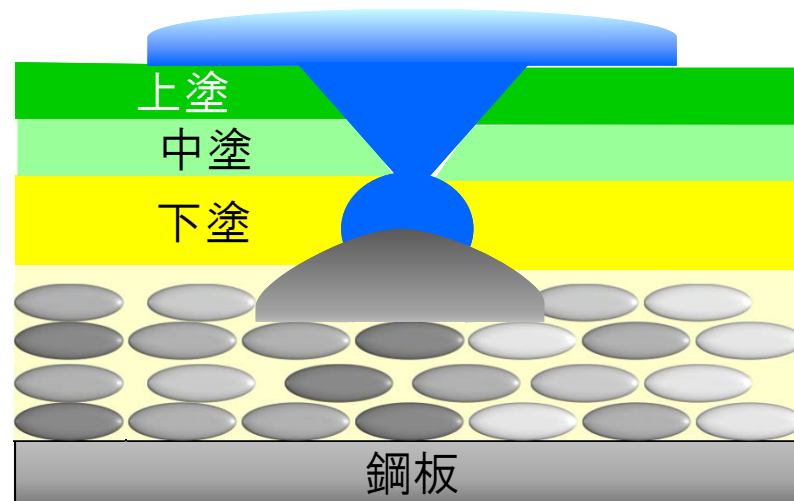
鋼道路橋塗装・防食便覧資料集、平成22年9月、pp.II-6~II-7

4-5. フランジや腹板面に発生している腐食の要因

(2) 溶射被膜の劣化

塗膜に生じたピンホールから海水が進入し、アルミニウムと反応（犠牲陽極作用）。

アルミニウムの犠牲陽極作用による水酸化物により腐食生成物が体積膨張。



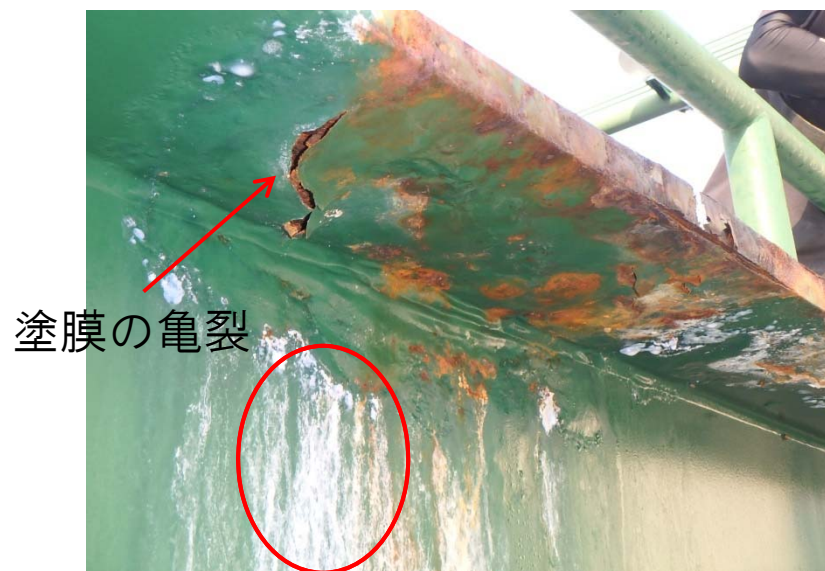
4-5. フランジや腹板面に発生している腐食の要因

(3) 鋼材面の腐食

腐食生成物の体積膨張により塗膜が膨れ、塗膜に亀裂が発生。

塗膜に発生した亀裂から腐食因子が侵入。

さらにアルミニウムと反応することで溶射被膜がなくなり、鋼材面が露出し母材が腐食。



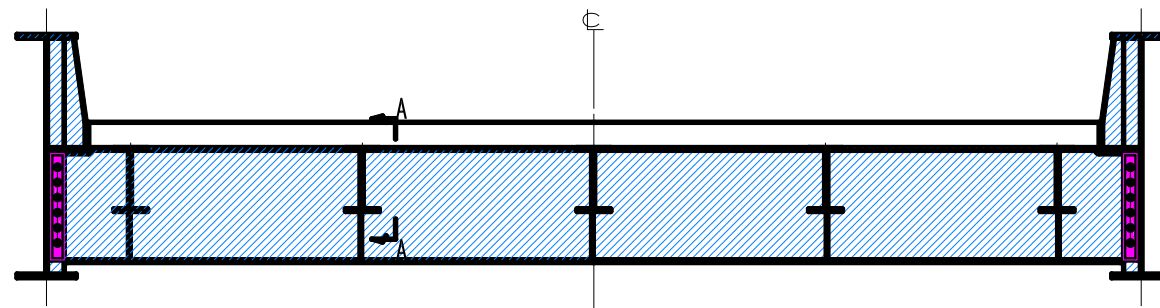
水酸化アルミニウムの結晶



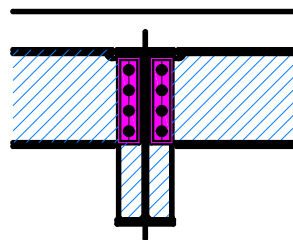
4-6. 二次部材のガセットプレートに発生している腐食の要因

(1) 二次部材の連結構造

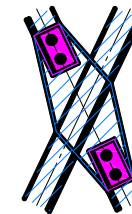
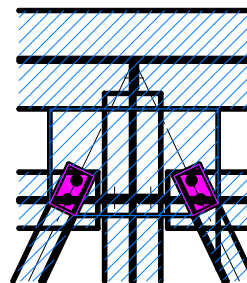
横桁や横構は、高力ボルトによる摩擦接合となっている。摩擦接合面は、摩擦係数を確保するため、溶射は行われず**無塗装**とされていた。



A-A断面



下横構Guss. PL



<凡例>

▨ : 一般部アルミ溶射

■ : ボルト接合部

4-6. 二次部材のガセットプレートに発生している腐食の要因

(2) 高力ボルト連結部の塗装

連結部も一般部と同様に、ポリウレタン樹脂塗料による中上塗り塗装が施されている。

高力ボルト連結部は、角部や側面の塗膜厚の確保が難しい。そのため塗膜厚を確保するために、添接部の平面部は過剰な膜厚となり、塗膜の収縮に伴う塗膜割れが生じ、そこから腐食因子が侵入した可能性が考えられる。



写真－Ⅱ. 2. 14 高力ボルト部の塗膜割れ(2)

高力ボルト部の塗膜割れ
(鋼道路橋塗装・防食便覧資料集より)

4-7. その他の要因

(1) 波及び浮遊物の衝突

波または、浮遊物の衝撃により、防食被膜の剥離が生じ腐食が発生した可能性が考えられる。



5.補修設計

損傷の概要と対策工法

部位	部材	材料
床版	床版	グレーチング

損傷の種類	発生原因
防食機能の低下	車両通行によるめっき層の摩耗

対策工法	使用材料
部材取り換え	グレーチング (溶融亜鉛めっき)

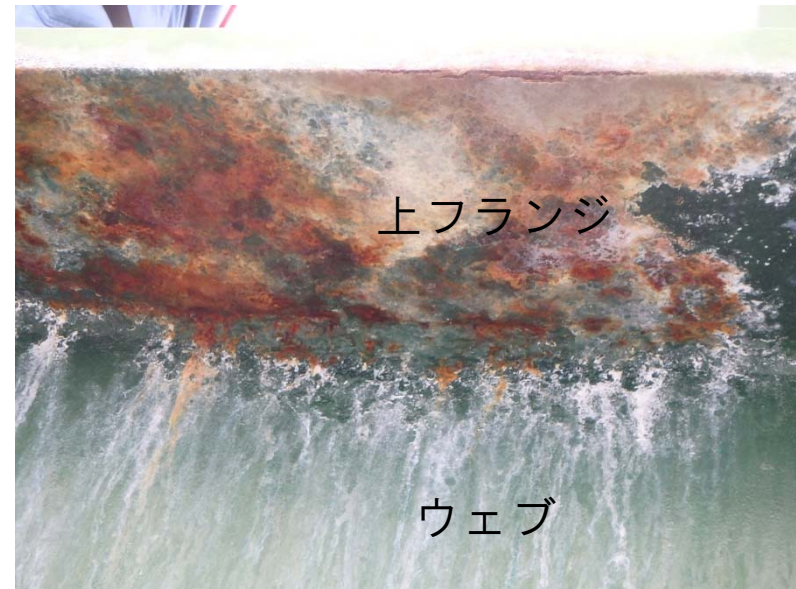


損傷の概要と対策工法

部位	部材	材料
主桁	上フランジ	SM490

損傷の種類	発生原因
腐食	保護塗装の経年劣化による溶射被膜の消失

対策工法	使用材料
塗装塗替	海洋厚膜エポキシ樹脂塗装 IM-A



肉厚測定結果

設計：28.00mm

実測：27.41mm (0.045mm/年)

腐食量=0.59mm<許容腐食量=1mm

損傷の概要と対策工法

部位	部材	材料
主桁	ウェブ	SM490

損傷の種類	発生原因
腐食	保護塗装の経年劣化による溶射被膜の消失

対策工法	使用材料
塗装塗替	海洋厚膜エポキシ樹脂塗装 IM-A



肉厚測定結果

設計：9.00mm

実測：8.25mm（0.058mm/年）

腐食量=0.75mm<許容腐食量=1mm

損傷の概要と対策工法

部位	部材	材料
主桁	下フランジ	SM490

損傷の種類	発生原因
腐食	防食機能の低下に伴う腐食

対策工法	使用材料
塗装塗替	海洋厚膜エポキシ樹脂塗装 IM-A



肉厚測定結果

設計：28.00mm

実測：26.54mm (0.113mm/年)

腐食量=1.46mm>許容腐食量=1mm

減厚後の耐荷力照査

曲げ応力度

$\sigma_b = 183 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{ba} = 186 \text{ N/mm}^2$ (SM490材)

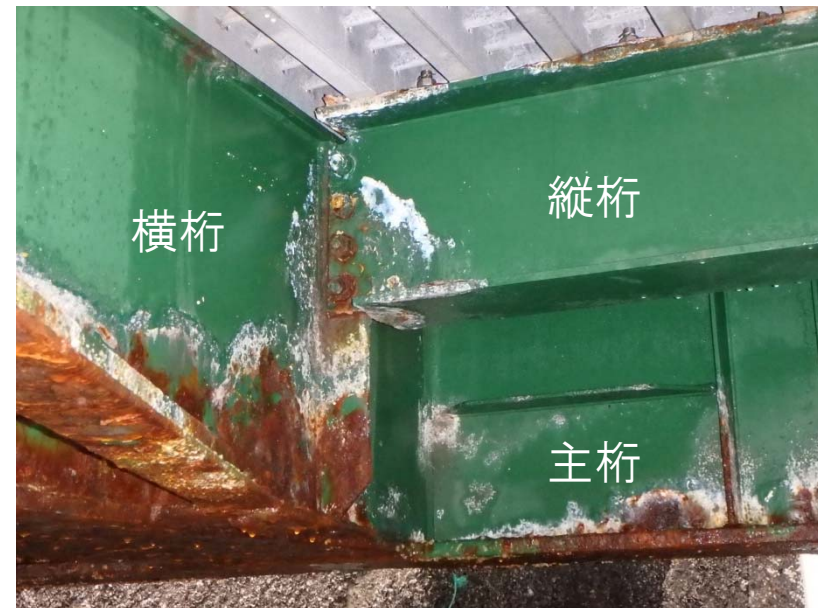
合成応力 (曲げ+せん断) $0.76 < 1.2 \cdots \text{!!OK!!}$

損傷の概要と対策工法

部位	部材	材料
横桁	フランジ ウェブ	SM400

損傷の種類	発生原因
腐食	保護塗装の経年劣化による溶射被膜の消失

対策工法	使用材料
塗装塗替	海洋厚膜エポキシ樹脂塗装 IM-A



肉厚測定結果

WEB

設計：9.00mm

実測：8.99mm (0.001mm/年)

腐食量=0.01mm<許容腐食量=1mm

FLG

設計：16.00mm

実測：15.48mm (0.040mm/年)

腐食量=0.52mm<許容腐食量=1mm

損傷の概要と対策工法

部位	部材	材料
縦桁	フランジ ウェブ	SM400

損傷の種類	発生原因
腐食	保護塗装の経年劣化による溶射被膜の消失

対策工法	使用材料
塗装塗替	海洋厚膜エポキシ樹脂塗装 IM-A



肉厚測定結果

WEB

設計：9.00mm

実測：8.65mm (0.027mm/年)

腐食量=0.35mm<許容腐食量=1mm

FLG

設計：14.00mm

実測：13.94mm (0.004mm/年)

腐食量=0.06mm<許容腐食量=1mm

損傷の概要と対策工法

部位	部材	材料
横桁 縦桁	添接部	高力ボルト S10T

損傷の種類	発生原因
腐食	保護塗装の経年劣化による溶射被膜の消失

対策工法	使用材料
ボルト取換	高力ボルト S10T



損傷の概要と対策工法

部位	部材	材料
横構	横構	SS400

損傷の種類	発生原因
腐食 亀裂	防食機能の低下に伴う 腐食

対策工法	使用材料
部材取換	SS400



肉厚測定結果

設計：10.00mm

実測：8.39mm（0.124mm/年）

腐食量=1.61mm>許容腐食量=1mm

損傷の概要と対策工法

部位	部材	材料
横構	添接部	高力ボルト S10T

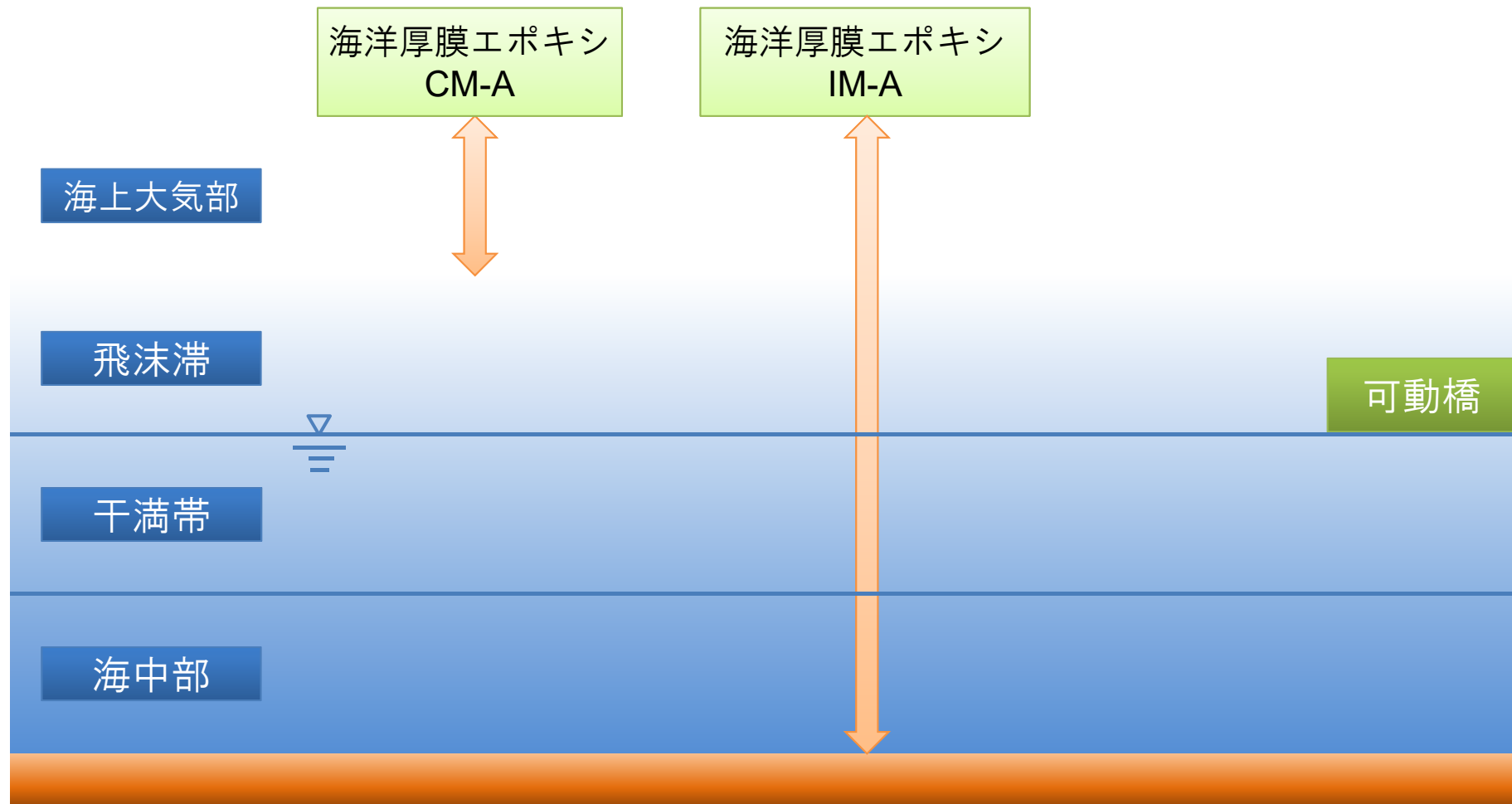
損傷の種類	発生原因
腐食	保護塗装の経年劣化による溶射被膜の消失

対策工法	使用材料
現場溶接	



補修塗装の塗装系

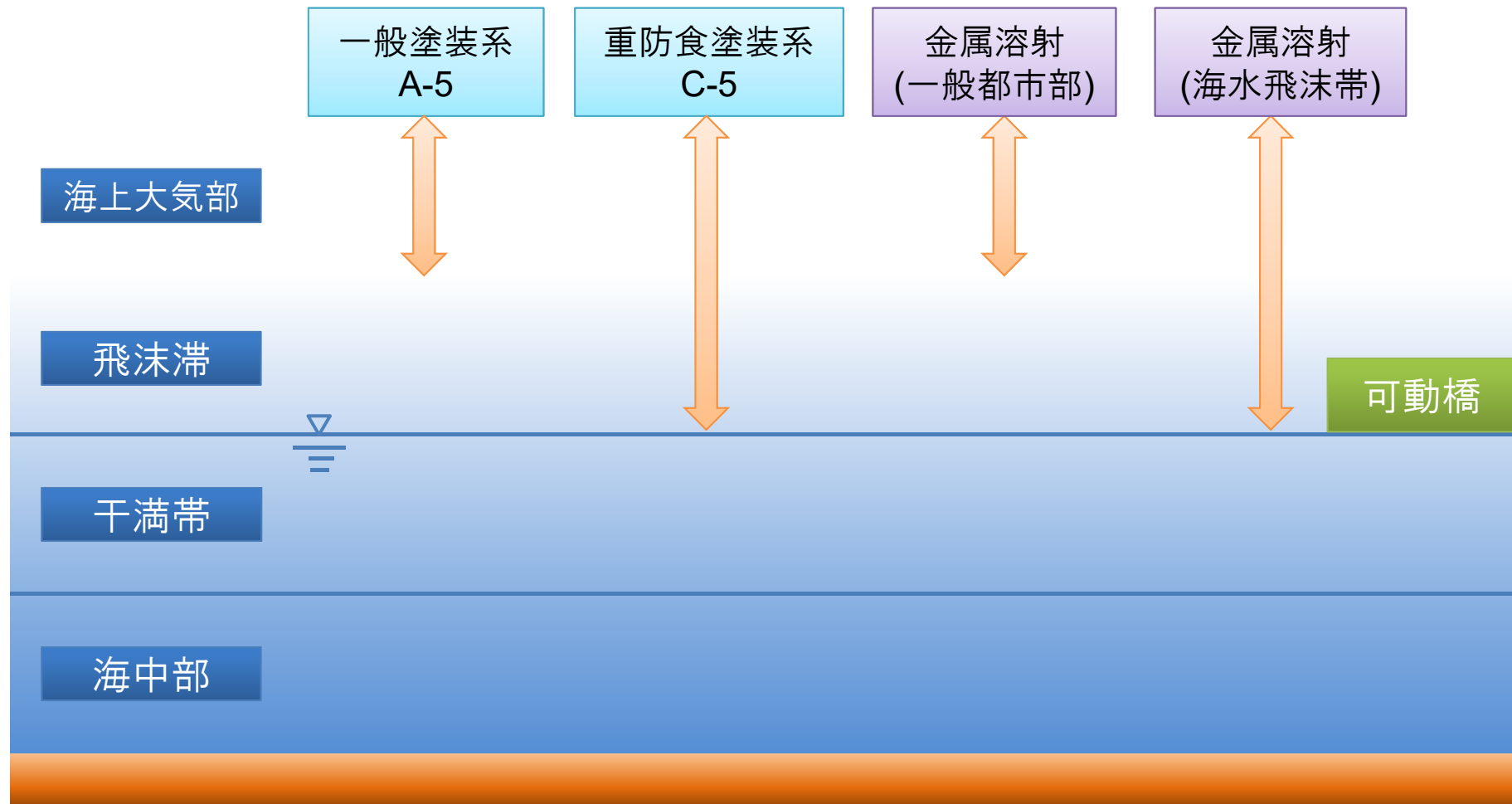
『港湾鋼構造物防食・補修マニュアル』



塗装の適用範囲

補修塗装の塗装系

『鋼道路橋防食便覧』



塗装の適用範囲

補修塗装の塗装系

防食機能の長期耐久性と可動橋の置かれる環境（飛沫帯）に着目し、「海洋厚膜エポキシ IM-A」、「重防食塗装系 Rc-I」、「金属溶射（海水飛沫帯に該当する場所）」について比較検討を行った。

海洋厚膜エポキシ IM-A		重防食塗装系 Rc-I		金属溶射（海水飛沫帯）	
塗膜厚	535μm	塗膜厚	175μm	塗膜厚	175μm
防食下地	75μm	防食下地	75μm	防食下地	160μm
ふっ素樹脂上塗				ふっ素樹脂上塗	
				25μm	
ふっ素樹脂中塗				30μm	
エポキシ樹脂塗料 下塗		ふっ素樹脂上塗		25μm	
		ふっ素樹脂中塗		30μm	
		エポキシ樹脂塗料 下塗		120μm	
有機ジンクリッチペイント		有機ジンクリッチペイント		金属溶射（アルミ）	
				160μm	
素地調整：ブラスト		素地調整：ブラスト		素地調整：ブラスト	
鋼材		鋼材		鋼材	

各塗装系の膜厚

補修塗装の塗装系

○施工条件の比較

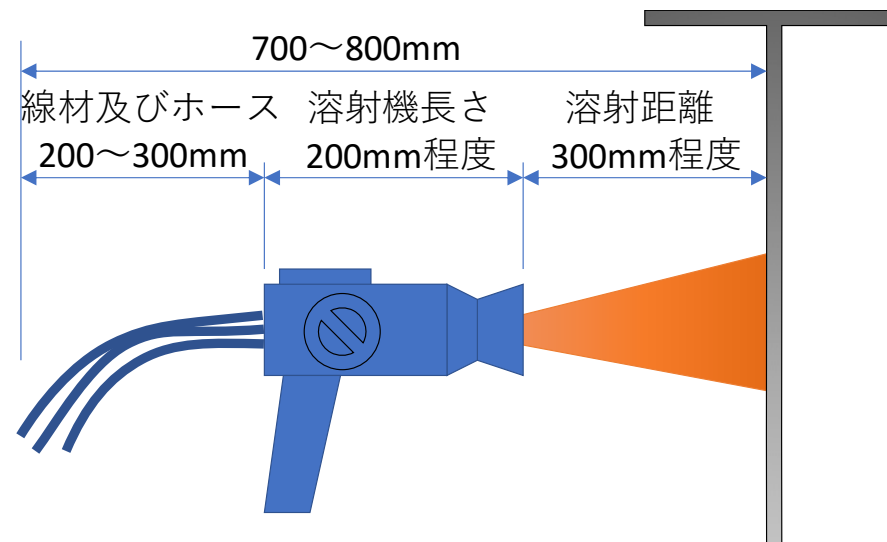
塗装系	海洋厚膜エポキシ IM-A	重防食塗装系 Rc-I	金属溶射 (海水飛沫帯)
施工	吊足場+シート防護	吊足場+シート防護	橋体移設
品質 確保	• 海水面が近いので、湿度が高く気象環境により制約がでる。 • 桁下面や支承周辺など作業空間が狭いため、施工性が悪い。	• 同左	• 施工品質を確保するためには、被処理面と一定の間隔を置いて正対する必要がある、作業空間を確保する必要がある。
社会的 影響	• 供用しながらの作業となるので、施設利用者への影響は小さい。	• 同左	• 橋体撤去による供用停止は、島民への社会的影響が大きい。
			離島航路のため 供用停止不可

補修塗装の塗装系

アルミ溶射の施工空間

被処理面と一定の間隔を置いて正対する必要がある、作業空間（1m³程度）を確保する必要がある。

- 溶射金属粒子は、直線的に飛行するため、溶射ガンが正対せず直接溶射金属粒子が当たりにくいところは、**溶射被膜の膜厚が確保できない**。
- 溶射角度が浅く距離が大きくなると、溶射金属の付着効率が低下する上、**溶射被膜が粗くなる**。
- 溶滴間の極微細孔を封孔処理により適切に封孔する必要がある。そのために、極微細孔に溜まった空気により塗膜に発生した**ピンホールを確認できる環境を整える**必要がある。



溶射の作業条件
（鋼道路橋防食便覧より）

補修塗装の塗装系

○維持管理

- 可動橋は、架橋位置が特に厳しい腐食環境にある。
- 防食下地であるジンクリッチペイントを健全に保つため、環境遮断機能を持つエポキシ樹脂塗料が消耗する前の段階で補修塗装を計画する。
- 膜厚に応じた耐用年数でライフサイクルコストを比較。

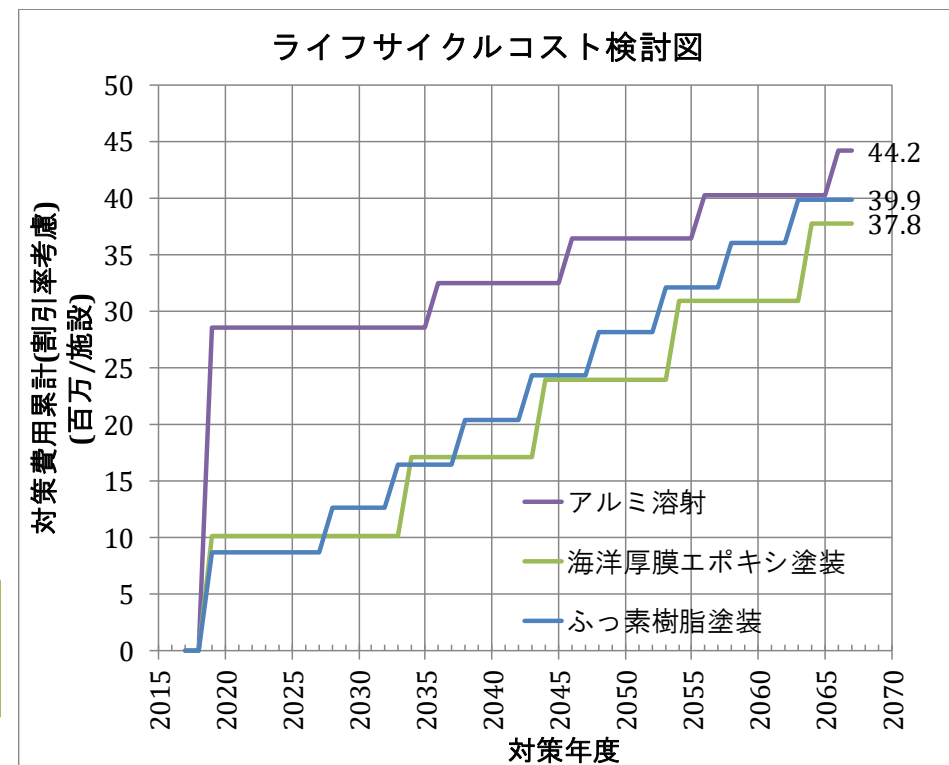
補修	IM-A	Rc-I	溶射
1回目	15年後	9年後	17年後
2回目～	10年毎	5年毎	10年毎

※2回目以降は、活膜が残った状態で3種ケレンによる補修を計画

※IM-A,Rc-Iは足場作業による品質低下を想定し、期待耐用年数の2/3で補修を計画



ライフサイクルコストの比較により
海洋厚膜エポキシ樹脂塗装を採用



6.業務を終えて感じたこと

- 防食法とその仕様の選定は、架橋地点の環境条件および使用条件を把握したうえで実施する必要がある。

フェリーから車両を乗降させるという可動橋の特性から、海水中に下フランジが没するような使用状況が発生する。

➡ 海水中でも適用可能な防食法及び仕様を選定する。



6.業務を終えて感じたこと

➤ 維持管理に配慮した細部の構造設計を行う。

離島の定期航路であり、維持補修工事に伴う社会的影響が大きい。

- ➡ すべて溶接構造にするなど、建設コストが増となっても、供用期間中の維持補修工事が最小となる構造設計を行う。
- ➡ 各部材角面の面取りや異種金属間の絶縁など防食性能確保のための条件を関連図面に記載する。

