

鋼橋の腐食・耐久性研究部会 報告

—耐候性鋼橋適用課題と鋼橋の腐食補修法—

部会主査：岩崎英治（長岡技術科学大学）

委員構成(Ⅱ期)

WG-A: 耐候性鋼橋研究WG、WG-B: 鋼橋の腐食に関する対策工法研究WG

	WG	氏名	所属		WG	氏名	所属
主査、WG長	A B	岩崎 英治	長岡技術科学大学	委員	B	松岡 充	宮地エンジニアリング(株)
幹事長、WG長	B	下里 哲弘	琉球大学	委員	B	山下 修平	宮地エンジニアリング(株)
連絡幹事、WG幹事	A B	藤井 康盛	日本製鉄(株)	委員	B	八木 孝介	(株)横河ブリッジホールディングス
WG幹事	B	田井 政行	琉球大学	委員	B	前田 博	宇部興産機械(株)
委員	A	山口 栄輝	九州工業大学	委員	B	花輪 務	日本鉄塔工業(株)
委員	B	麻生 稔彦	山口大学	委員	B	長坂 康史	川田工業(株)
委員	B	佐々木 栄一	東京工業大学	委員	B	玉城 喜章	(一社)沖縄しまたて協会
委員	A B	小林 裕介	(公財)鉄道総合技術研究所	委員	B	藤川 敬人	日鉄エンジニアリング(株)
委員	A B	原田 拓也	(株)高速道路総合技術研究所	委員	B	木村 雅昭	東京ファブリック工業(株)
委員	A B	仲田 晴彦	阪神高速技術(株)	委員	B	日和 裕介	首都高速技術(株)
委員	A	三浦 正純	(一財)土木研究センター	委員	B	松下 裕明	日立造船(株)
委員	A	坂井田 実	大日コンサルタント(株)	委員	B	荒牧 聡	(株)建設技術研究所
委員	A	鈴木 克弥	(株)横河ブリッジ	委員	B	岩本 達志	(株)IHI
委員	A	石原 一伸	日立造船(株)	委員	B	秀熊 佑哉	日鉄ケミカル & マテリアルズ(株)
委員	A	志賀 弘明	JFEエンジニアリング(株)	委員	B	平野 秀一	首都高速道路(株)
委員	A	石本 圭一	(株)IHI インフラシステム	委員	B	志村 保美	日鉄ステンレス(株)
委員	A	長澤 慎	日本製鉄(株)	委員	A	壺岐 浩	日本製鉄(株)
委員	A	三浦 進一	JFEスチール(株)	委員	A	加藤 亮太	(株)神戸製鋼所
委員	A	今井 篤実	日鉄防食(株)	オブザーバー	A B	大西 諒	国土交通省国土技術政策総合研究所
委員	A	岡本 隆	JFEテクノリサーチ(株)	オブザーバー	A B	坂本 佳也	(国研)土木研究所
委員	A	砂田 理	(株)コベルコ科研	オブザーバー	A	加藤 真志	JFEスチール(株)

検討内容

- 腐食環境の多様性に起因する鋼構造の耐食・防食性能のばらつき
→ 腐食環境評価法, 診断方法, 補修方法の整備
- 損傷劣化後の健全性の不明瞭さ
→ 診断方法, 健全度の評価方法の整備
- 経年劣化に伴う補修事案の増加
→ 合理的で簡易な補修技術の整備

テクニカルレポート No.121 の目次構成

第1編: 耐候性鋼橋の適用性・維持管理技術(WG-A)

1. 耐候性鋼橋の橋梁定期点検に関する提案
2. 橋梁定期点検データに基づく耐候性鋼橋の健全度の傾向分析
3. 凍結防止剤散布地域での耐候性鋼橋の適用性評価と飛来量の低減法
4. 耐候性鋼橋のさび状態判定方法と異常さび時対応措置方法に関する参考資料

第2編: 腐食に対する点検診断および補修技術(WG-B)

1. 腐食鋼橋の耐力診断
2. 腐食鋼橋の補修・補強
3. 鋼橋桁端部の耐食性向上
4. 鋼橋の防食技術
5. 腐食マップを活用した腐食鋼橋の点検シミュレータの開発

第1編 第1章 耐候性鋼橋の橋梁定期点検に関する提案

国の定期点検要領の考え方に基づいて、耐候性鋼材の実際の点検診断が適正に行われるように、「橋梁定期点検要領」をそのまま準用しても問題のない箇所、耐候性鋼橋用の特記や補足、追加記述が必要な箇所を検証し、追記すべき記述の案を示す。

【背景・目的】

- 現状の点検要領の耐候性の箇所の記述が、不明確な箇所がある。
- 現状の評価区分等を見直すと、今までの点検結果との不整合が生ずるため、基本的には変更しない
- 耐候性鋼橋の点検において追記すべき項目のみを示す。

【主な追記項目・目的】

①「5.状態の把握」

- ・点検の標準的方法を追記（さびサンプル、必要に応じて、さび厚測定、セロファンテープ試験）
- ・特に慎重に点検すべき個所を追記（桁端部や排水装置・床版の漏水部）
- ・点検記録の残し方を追記（異常さび分布、漏水等発生位置、近隣の植生状況、桁端の堆積物状況）

②「付録-1」

- ・耐候性鋼橋の場合の腐食の扱い方を追記（さびの状態が一様でない場合の扱い）
- ・耐候性鋼橋の対策区分判定の扱い方を追記（漏水起因の異常さびについて、漏水対策後の措置）

③「付録-2」

- ・腐食の損傷程度を追記（層状剥離さび、うろこ状さび、こぶ状さびについて、損傷深さの大・小の区分）
- ・表面処理仕様の損傷程度の評価区分を追記（d-2:こぶ状のさびが生成している）

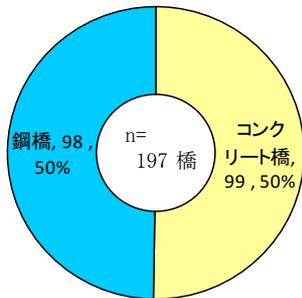
第1編第2章 橋梁定期点検データに基づく耐候性鋼橋の健全度の傾向分析

2.1 点検調書サンプルからの事例分析

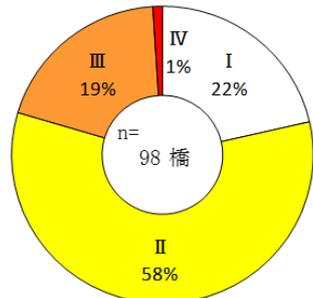
内陸部の積雪寒冷地に位置するある県の地区事務所：197橋（鋼橋）

防錆仕様	健全性診断結果(判定区分)								積雪寒冷特別地域区分	伸縮装置					水抜管	排水管			床版端部の水切		
	道路橋毎	上部構造		下部構造	支承部	路上	その他	形式①			形式②		横引	漏水		不具合					
		主桁	横桁					伸縮装置形式		漏水	路肩止水	伸縮装置形式					漏水	路肩止水			
アルミ塗装	III	II	I	II	III	III	II	II	積雪寒冷地	非排水フィンガー	有	止水有	有	荷重支持型	有	不完全	導水不良	横引無	無	不具合無	不備無
C系塗装	III	III	II	II	III	II	IV	II	積雪寒冷地	荷重支持型	有	止水無	---	---	---	---	導水不良	横引無	無	不具合無	不備無
アルミ塗装	III	III	I	III	II	II	II	II	積雪寒冷地	非排水フィンガー	有	止水無	荷重	---	---	---	---	---	---	---	不備無
A系塗装	I	I	I	I	I	I	I	II	積雪寒冷地	非排水フィンガー	無	止水有	---	---	---	---	---	---	---	---	不備無
A系塗装	II	I	I	I	II	I	I	II	積雪寒冷地	非排水フィンガー	有	止水有	---	---	---	---	---	---	---	---	不備無
耐候性裸使用	II	II	II	II	I	I	II	II	積雪寒冷地	非排水フィンガー	無	止水有	---	---	---	---	---	---	---	---	不備無
耐候性裸使用	I	I	I	I	I	I	I	II	積雪寒冷地	非排水フィンガー	無	止水有	---	---	---	---	---	---	---	---	不備無
耐候性裸使用	I	I	I	I	I	I	I	II	積雪寒冷地	非排水フィンガー	無	止水有	---	---	---	---	---	---	---	---	不備無
耐候性裸使用	I	I	I	I	I	I	I	II	積雪寒冷地	非排水フィンガー	無	止水有	---	---	---	---	---	---	---	---	不備無

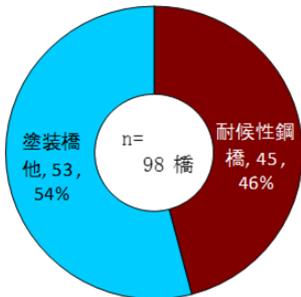
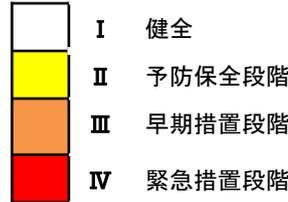
健全な耐候性鋼橋の割合
伸縮装置の形式と異常腐食の関係
排水横引有無と異常腐食の関係
問題は鋼橋共通か耐候性特有か
等々の分析結果を想定



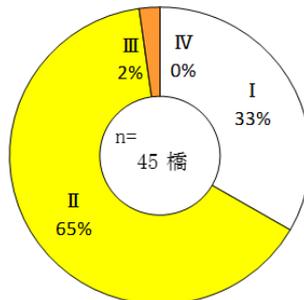
鋼橋数の割合



鋼橋の健全性判定区分



耐候性鋼橋数の割合



耐候性鋼橋の健全性判定区分



竣工後15年経過。A1端部の床版および排水管取付部ボルト孔から漏水(健全度II)により、主桁および横桁に粗いさびが見られる(健全性II)

第1編第2章 橋梁定期点検データに基づく耐候性鋼橋の健全度の傾向分析

2.2 全国の耐候性鋼橋の健全度傾向分析 対象：橋建協・耐候性鋼橋DBから1073橋

サンプル数

	国交省		道路会社		自治体		合計	
	サンプル数	検索ヒット	サンプル数	検索ヒット	サンプル数	検索ヒット	サンプル数	検索ヒット
H26	8,812	46	5,341	3	54,239	276	63,719	348
H27	8,630	45	4,817	4	54,239	276	63,719	348
H28	7,259	49	4,633	4	54,239	276	63,719	348
H29	5,844	47	3,636	25	54,239	276	63,719	348
合計	30,545	187	18,424	61	541,897	1,036	590,866	1,284

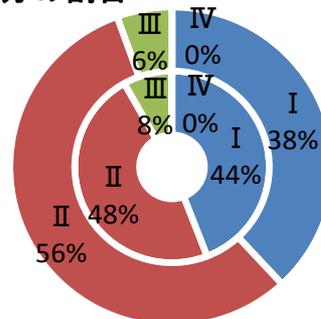
定期点検データと耐候性鋼橋DBの照合により耐候性鋼橋の点検データを抽出

- ・橋梁毎の健全性は耐候性鋼の特性によるものと見做して分析
- ・耐候性鋼橋の劣化は突出していない
- ・耐候性鋼橋活用の地域性がわかる等々

施主別 経過年数別の評価区分分布

管理者	橋数	評価区分	経過年数	橋数	割合(管理者ごと)	割合(全体)
国交省	169	I	4-10年	55	32.5%	5.1%
国交省		I	10-20年	38	22.5%	3.5%
国交省		I	20年以上	2	1.2%	0.2%
国交省		II	4-10年	30	17.8%	2.8%
国交省		II	10-20年	38	22.5%	3.5%
国交省		II	20年以上	3	1.8%	0.3%
国交省		III	4-10年	1	0.6%	0.1%
国交省		III	10-20年	2	1.2%	0.2%
国交省		III	20年以上	0	0.0%	0.0%
道路会社	39	I	4-10年	3	7.7%	0.3%
道路会社		I	10-20年	1	2.6%	0.1%
道路会社		I	20年以上	0	0.0%	0.0%
道路会社		II	4-10年	10	25.6%	0.9%
道路会社		II	10-20年	15	38.5%	1.4%
道路会社		II	20年以上	9	23.1%	0.8%
道路会社		III	4-10年	0	0.0%	0.0%
道路会社		III	10-20年	0	0.0%	0.0%
道路会社		III	20年以上	1	2.6%	0.1%
自治体	865	I	4-10年	56	6.5%	5.2%
自治体		I	10-20年	144	16.6%	13.4%
自治体		I	20年以上	110	12.7%	10.3%
自治体		II	4-10年	42	4.9%	3.9%
自治体		II	10-20年	235	27.2%	21.9%
自治体		II	20年以上	223	25.8%	20.8%
自治体		III	4-10年	0	0.0%	0.0%
自治体		III	10-20年	21	2.4%	2.0%
自治体		III	20年以上	34	3.9%	3.2%
				1073		100.0%

健全性区分の割合



外：耐候性鋼橋
n=1,073橋

内：全体※
n=192,619橋
※全体は橋長2m以上の全ての橋

地方別耐候性鋼橋梁数(地域の定義：橋建DBの管轄による分類とした)

	点検結果			国交省			道路会社			自治体			全数
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	
北海道	43	34	7	14	15	0	0	3	1	29	16	6	84
東北	36	69	9	9	17	1	0	0	0	27	52	8	114
関東	59	85	3	4	1	0	3	7	0	52	77	3	147
北陸	18	22	3	6	0	0	0	0	0	12	22	3	43
中部	87	166	12	4	14	2	1	13	0	82	139	10	265
近畿	52	76	4	15	10	0	0	0	0	37	66	4	132
中国	60	51	7	26	5	0	0	3	0	34	43	7	118
四国	12	68	7	6	7	0	0	4	0	6	57	7	87
九州	41	34	7	11	2	0	0	4	0	30	28	7	82
沖縄	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
	409	605	59	95	71	3	4	34	1	310	500	55	1073

第1編第3章 凍結防止剤散布地域での耐候性鋼橋の適用性評価と飛来量の低減法

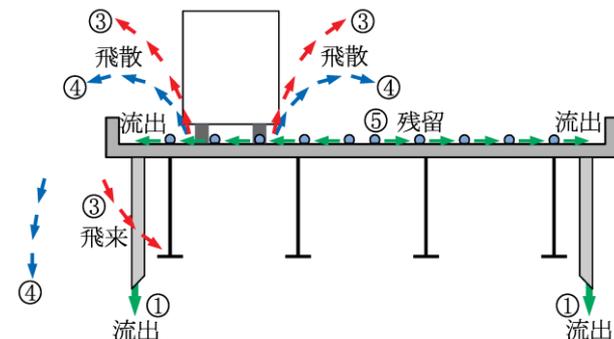
路面上の凍結防止剤の飛散による腐食

- 高低差のある並列橋での事例
- 地山に接近した橋梁での事例

高知道での無塗装鋼橋の事例(鋼道路橋防食便覧)があるが、定量的な知見が得られていない。

高速道路(長野道・上信越道, 高知道, 北陸道・東海北陸道)の橋梁を対象に、凍結防止剤の路面への散布量, 桁部への飛来量, 鋼材の腐食量の定量的な調査を実施。

散布された凍結防止剤の飛散・流出イメージ



調査対象地点

地域	地点 (断面)	周辺環境	高速道路上の区間	全交通量 (台/日)	大型車 混入率(%)	散布量 (kg/m)	調査 年度
長野北	A,B,C	高低差なし,間隔1.1m	信州中野IC-須坂長野東IC	17,700	33.6	59.3	2014 (2009)
長野南	D,(D2)	高低差なし,間隔0.25m	長野IC-更埴JCT	35,800 (39,700)	24.7 (17.4)	53.5 (40.0)	
	E	高低差なし,間隔14m					
	F,G,H	高低差なし,間隔なし					
松本	I	高低差なし,間隔なし	麻績IC-安曇野IC	27,200	28.2	32.3	
	J	高低差なし,間隔1.1m	安曇野IC-松本IC	33,700	25.1	43.0	
	K	高低差なし,間隔1.1m	松本IC-塩尻北IC	35,400	22.9	46.0	
高知	L	高低差なし,間隔20m	新宮IC-大豊IC	13,800	19.0	36.3	2016
	M,N	地山接近					
	O,P,Q,R	高低差あり,間隔2.5m					
	S	高低差なし,間隔2.6m					
北陸	T,U	高低差なし,間隔1.1m	鯖江IC-福井北IC	30,000	29.5	46.5	2018
	V	単独橋	福光IC-小矢部砺波JCT	7,100	24.0	21.3	
新潟	W	高低差なし,間隔1.1m	西山IC-長岡JCT	19,500	29.2	63.4	
	X	高低差なし,間隔0.1m	長岡JCT-中之島見附IC	32,000	28.7	57.5	
	Y	高低差なし,間隔なし	中之島見附IC-三条燕IC	36,500	23.5	51.9	

※長野南地域のカッコ内は、D地点で2009年調査時の値

測定器具の設置状況

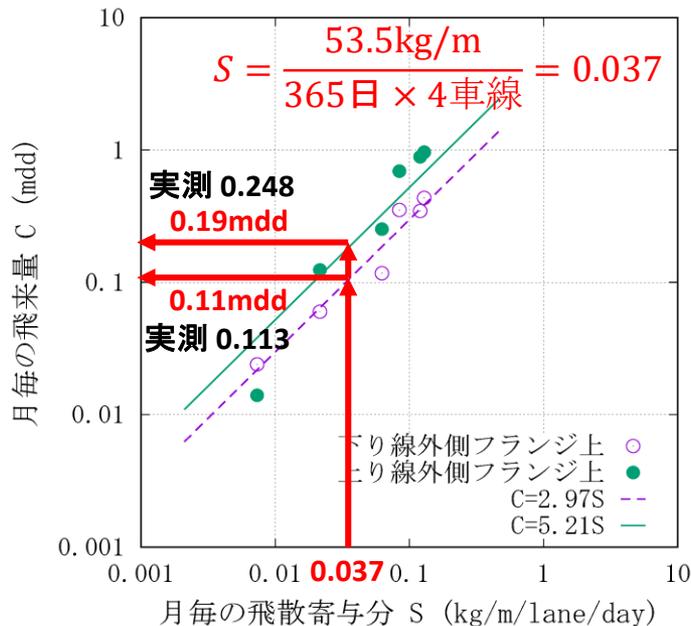


- ドライガーゼ式塩分捕集器具
- ワッペン式曝露鋼材試験片

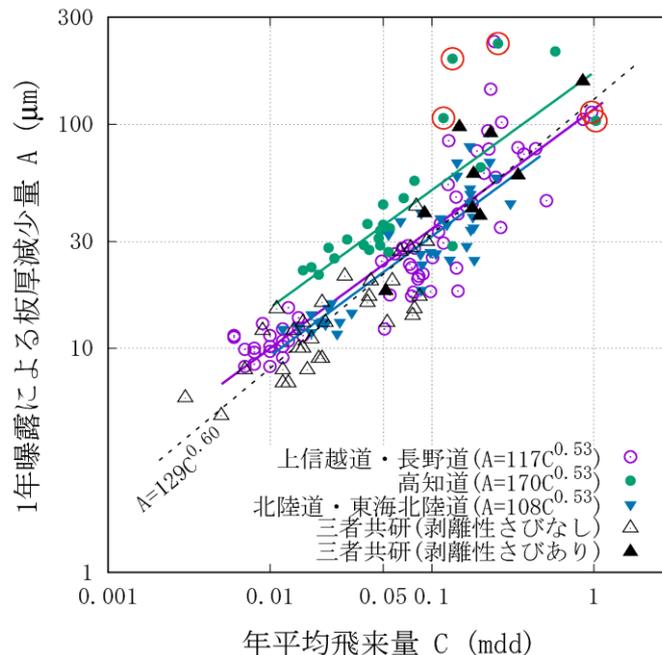
第1編第3章 凍結防止剤散布地域での耐候性鋼橋の適用性評価と飛来量の低減法

凍結防止剤の散布量と桁部への飛来量の関係

$C = kS$ k : 飛来寄与率

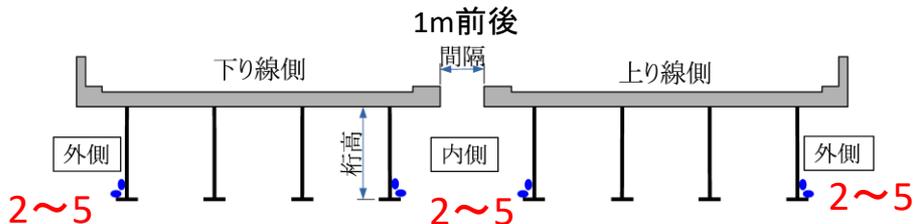


凍結防止剤の飛来量と鋼材板厚減少量の関係



下フランジ上面の飛来寄与率の標準値

(特殊なケースは除く) ←漏水や水塊の飛散, トンネル出口

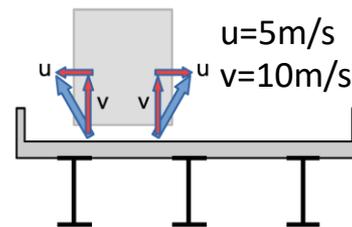
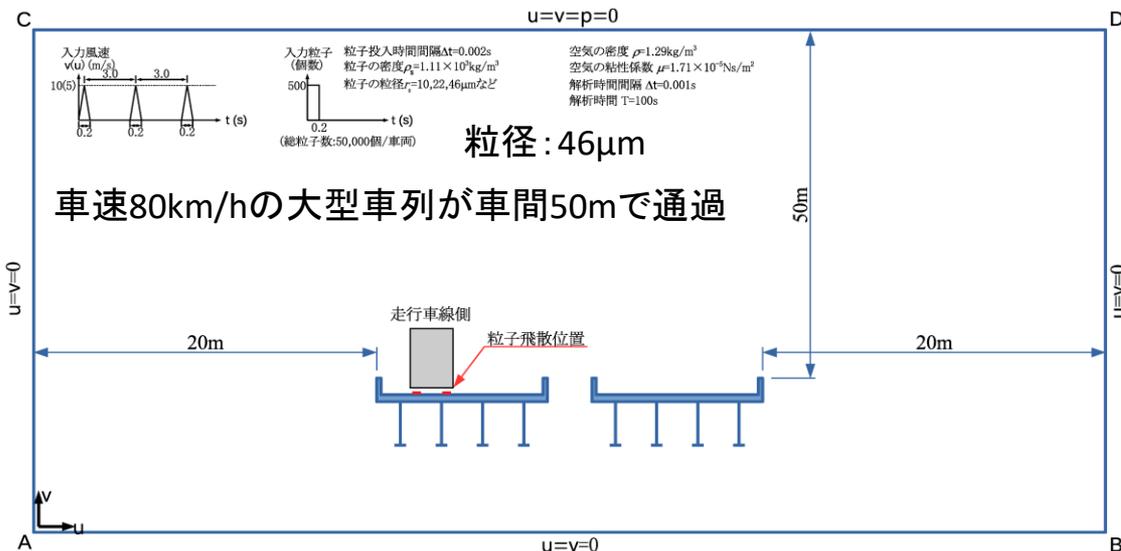


飛来寄与率の地域による違いは少ない.

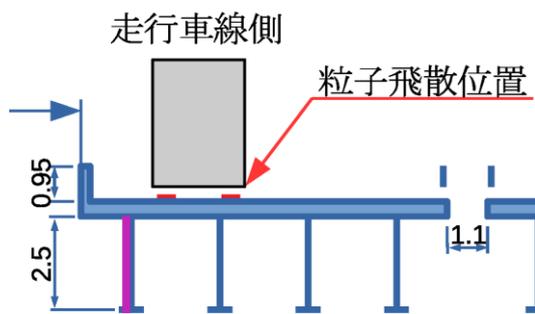
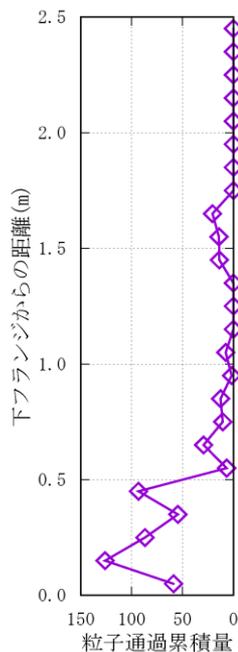
下フランジ上面

- 同一の飛来量に対して, 板厚減少量は, 高知県の方が長野や北陸より大きい
- 三者共研による海塩の飛来量と板厚減少量の関係に近い関係が得られている

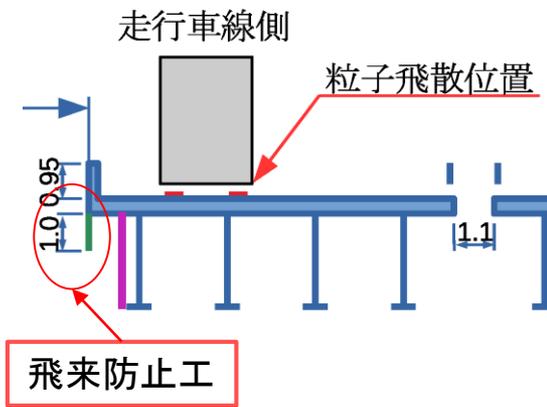
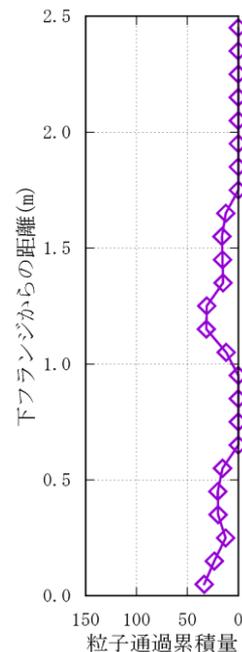
第1編第3章 凍結防止剤散布地域での耐候性鋼橋の適用性評価と飛来量の低減法



床版外側から下方に飛来防止工(遮蔽板)を設置することで、桁部への飛来量の低減効果が認められる。



(a) 飛来防止工なし



(b) 飛来防止工あり

第1編第4章 耐候性鋼橋のさび状態判定方法と異常さび時対応措置方法に関する参考資料 セロファンテープ試験画像を用いたさびの外観評価支援

1 はじめに

【背景】

耐候性鋼材は、その表面に緻密なさび(保護性さび)を生成することで、さびの進行を抑制する。しかしながら、設置環境によっては保護性さびが生成されず、その機能を発揮しないことがある。そのため、耐候性鋼橋梁の供用期間中、さび状態の点検と健全度評価が必要である。

表 さびの外観評価

評点	さびの状態の例
5	さび粒子は細かいが均一性に欠ける
4	さびの大きさは1mm程度以下で細かく均一である
3	さびの大きさは1mm~5mm程度で粗い
2	さびの大きさは5mm~25mm程度のうろこ状である
1	さびは層状の剥離がある

評点が3以上であれば、想定した耐食性能が期待できる。一方、評点1または2の場合、何らかの注意が必要となる。そのため、発生しているさびが、評点2以下か、評点3以上であるかの判断が、維持管理上、重要となる。

【目的】

セロファンテープ試験をもとに、維持管理上注意が必要なさびか否かを判別する二項分類の技術開発。

2 画像解析による判定

【粒子解析の概要】

セロファンテープ試験で取得したさびのスキャン画像(以下、さび画像)を粒子解析ソフトで解析する。この解析により、さび粒径に関する種々の情報が得られる。ここでは、さび粒子の最大径、最小径、面積に着目する。

【粒子切断】

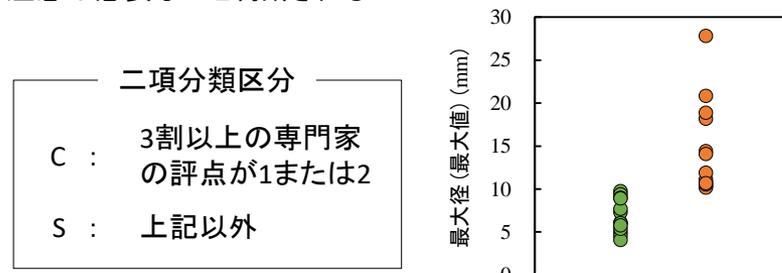
粒子解析では、複数のさび粒子が1つのさび粒子として認識される場合がある。そのようなさびは、粒径や面積が過大評価され、正しいデータが得られない。この問題を解決するため、二値化した画像において、粒子切断を実行するプログラムを作成した。

【二項分類について】

専門家21人により、セロファンテープ試験をもとにさびの外観評価が行われた。この結果を用い、画像解析による二項分類の可能性を検討する。ここでは評価結果を次によりC、Sに分類した。Cは維持管理上、注意が必要なさび、Sは特に注意を必要としないさびである。

【結果】

専門家による二項分類結果と画像解析結果の関係を示す。緑がS、オレンジがCのさびである。画像解析による判定では、さび粒子の最大径の最大値が9mm以下であれば、維持管理上、特に注意は必要ないと判断される。



第1編第4章 耐候性鋼橋のさび状態判定方法と異常さび時対応措置方法に関する参考資料 セロファンテープ試験画像を用いたさびの外観評価支援

3 AIによる判定

【AIの概要】

「畳み込みニューラルネットワーク」という学習手法により、「学習モデル」と呼ばれるAIの構築を行う。評価判定の際、学習モデルへの入力データはさび画像、得られる出力データは二項(C, S)あるいは五項(評点1~5)の分類結果である。

【データ】

使用するさび画像は、長岡技術科学大学で取得されたセロテープ試験の1980枚である。外観評価を九州工業大学で行い各さび画像の評点を決めた。

【分類結果】

表 二項分類用のデータセットと分類精度

データセット	トレーニング用データ(枚)		評価用データ(枚)	分類精度 (%)
	C	S		
2-1	20	140	160	91.9
2-2	60	420	160	93.1
2-3	100	700	160	94.4
2-4	140	980	160	94.4
2-5	220	1540	160	92.5
2-6	220	220	160	93.8
2-7	1540	1540	160	95.6
2-8	1540	3080	160	93.8

トレーニング用データが少ないデータセット2-1で作成された学習モデルでも、分類精度は90%を超えている。最も精度がよい学習モデルはデータセット2-7によるもので、分類精度は95.6%である。

表 五項分類用のデータセットと分類精度

データセット	トレーニング用データ(枚)	評価用データ(枚)	分類精度 (%)
5-1	1880	100	69.0
5-2	4500	100	55.0

五項分類は、二項分類に比べると精度はかなり低い。トレーニング用データの数を増やしても、精度は改善していない。専門家に評価依頼したさび画像27枚も、この学習モデルで分類した。分類結果として、評点ごとの確率を以下に示している。

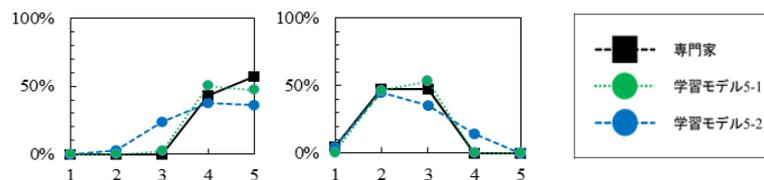


図 評点の確率分布(代表例)

4 まとめ

1. 画像解析による判定では、さび粒子の最大径の最大値が9mm以下であれば、維持管理上、特に注意は必要ないと判断される。
2. AI(学習モデル)では、さびを90%以上の精度で二項に分類できる。
3. AIによる判定では五項(評点1~5)分類も試みた。専門家による分類でもばらつきが見られるが、その傾向を概ねとらえることはできた。しかしながら、五項分類の精度は、二項分類に比して、かなり低い。

今後、さらに改善を加え、安心して使用可能な技術を開発していく予定である。



第2編第1章 腐食鋼橋の耐力診断

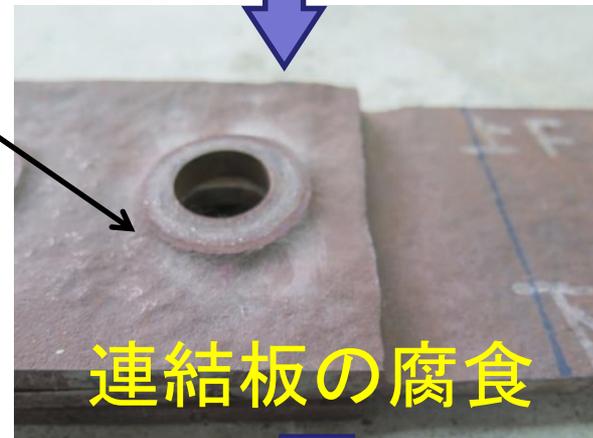
【目的】

腐食減肉が進行し易い「**高力ボルト**」「**連結板**」それぞれの**腐食**が**すべり耐力へ与える影響**を明らかにし、実橋での診断に用いた適用事例を示す。



ボルトの腐食

ボルト交換の診断



連結板の腐食

連結板交換の診断
(ボルトのみ交換)

ボルト継手部
全体の評価

※母板は腐食減肉した板の降伏耐力で評価可能⇒検討対象から除外

腐食高力ボルトの残存軸力（高力六角ボルト）

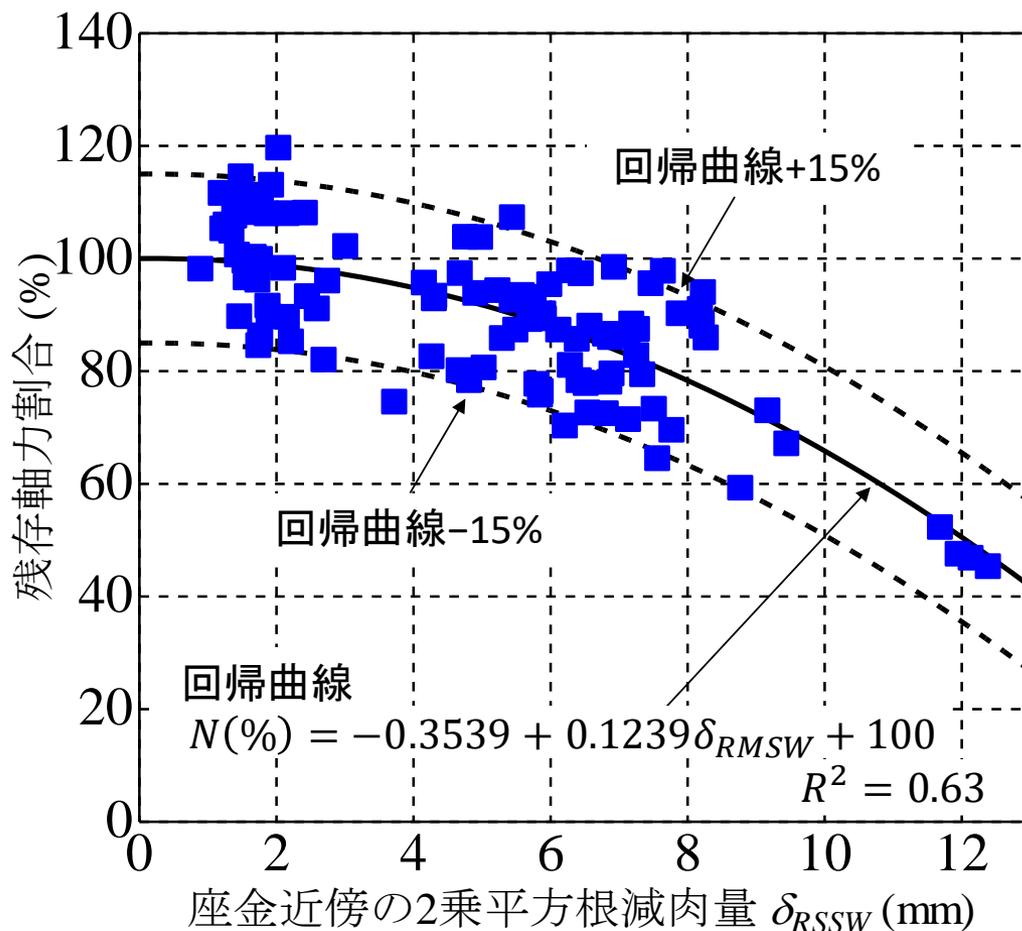
実腐食ボルトの軸力計測実験



軸力計測方法: コア抜き
+ ひずみゲージ法

ボルト数 : 104本

腐食高力六角ボルトの軸力評価

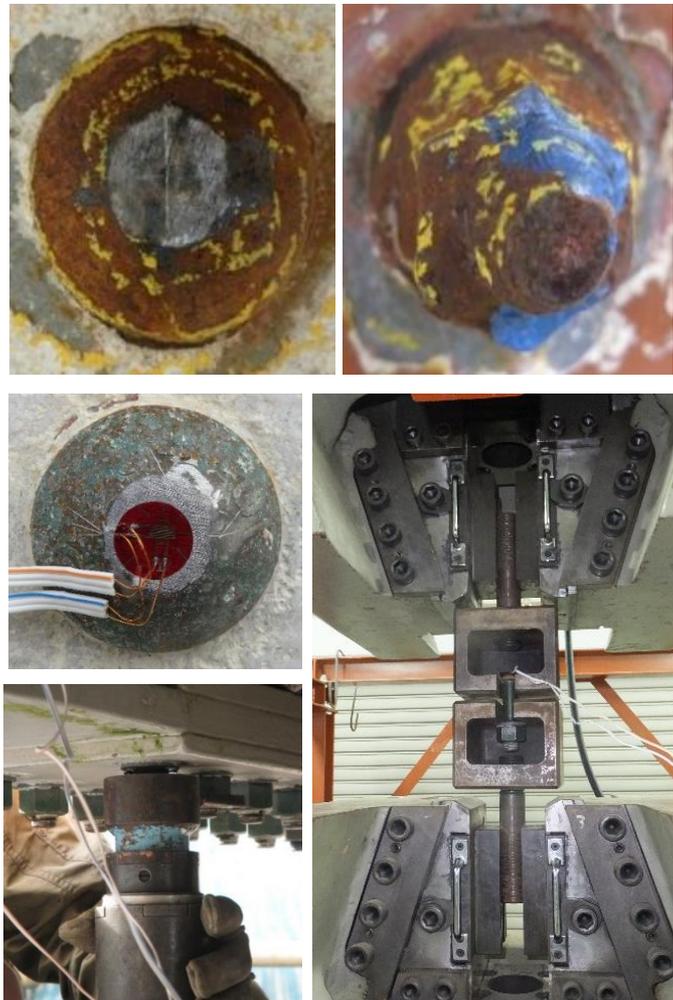


横軸: 2乗平方根減肉量

$$\delta_{RSSW} = \sqrt{(\delta_{NW})^2 + (\delta_{HW})^2}$$

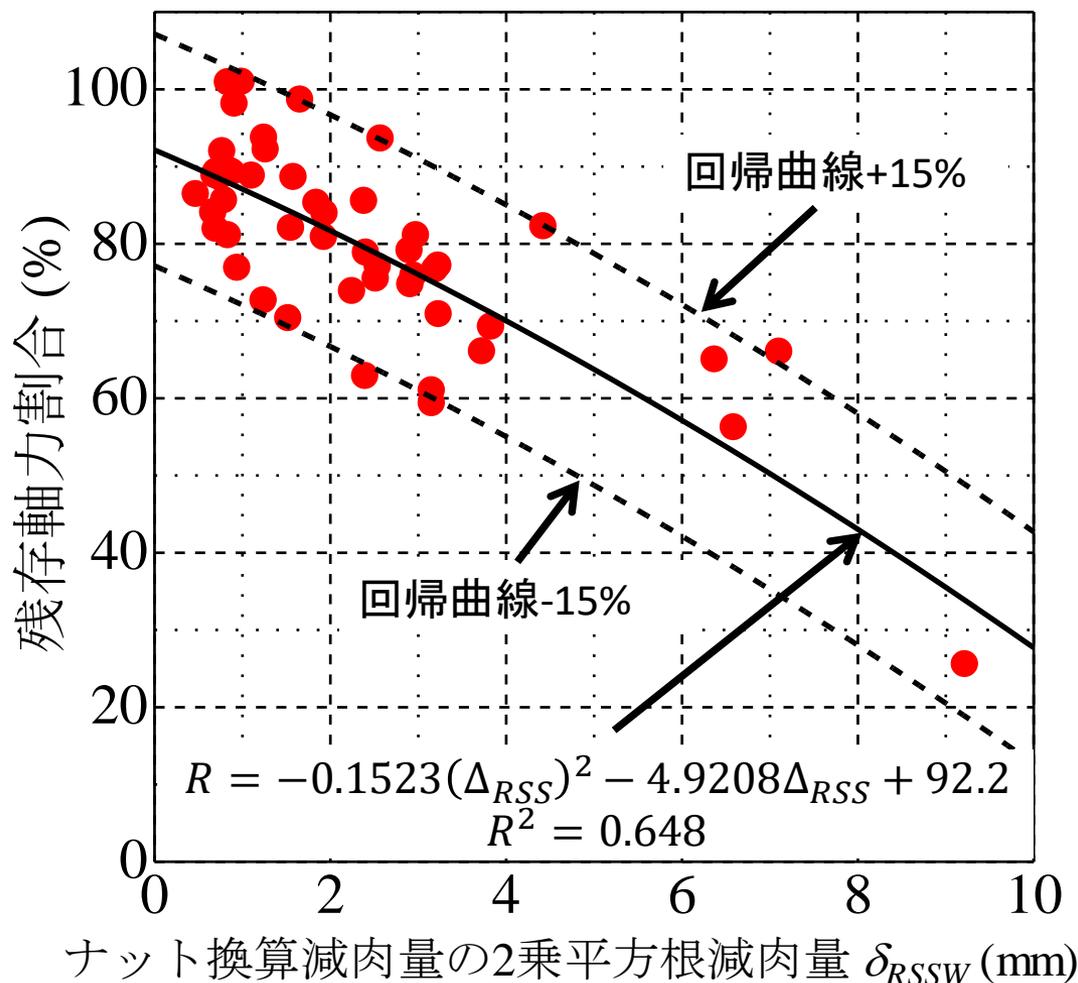
腐食高力ボルトの残存軸力 (トルシアボルト)

実腐食ボルトの軸力計測実験



- ・ 軸力計測方法: ひずみゲージ法
- ・ ボルト数 : 50本

腐食トルシアボルトの軸力評価



横軸: 2乗平方根減肉量

$$\delta_{RSSW} = \sqrt{(\delta_{NW})^2 + (\delta_{HSmod})^2 + (\delta_{HHmod})^2}$$



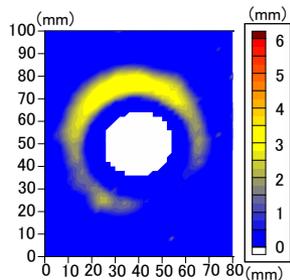
腐食連結板のすべり耐力

腐食性状

<環状型>



座金との接触面
【写真】

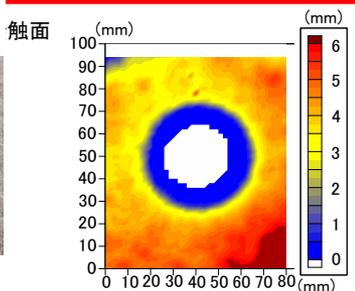


【減肉深さのコンター】

<全面型>



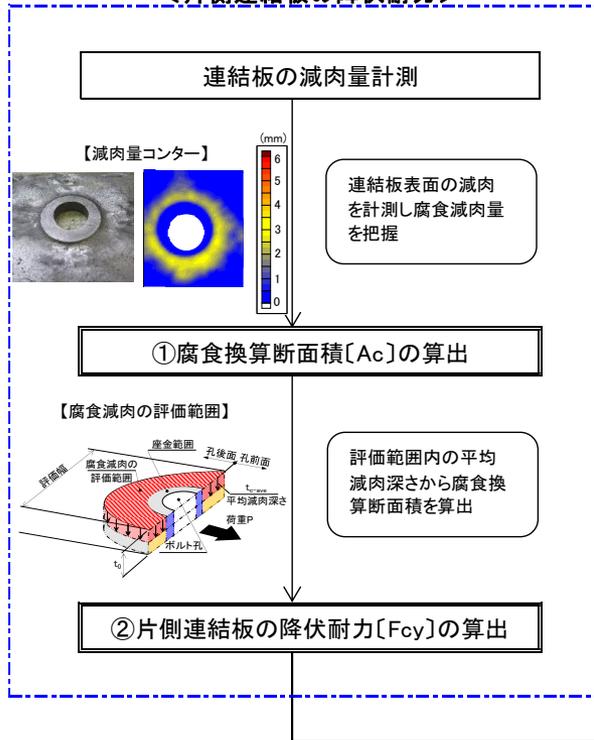
全面凹凸
【写真】



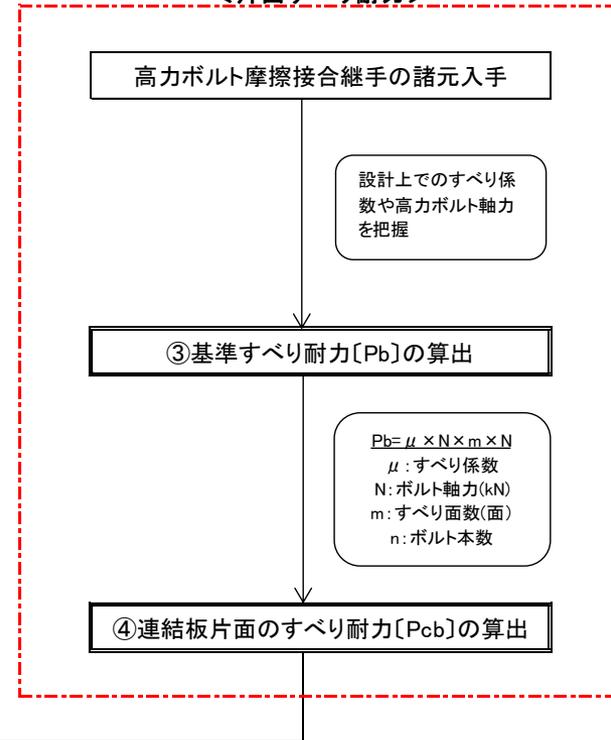
【減肉深さのコンター】

腐食連結板のすべり耐力評価フロー

<片側連結板の降伏耐力>



<片面すべり耐力>



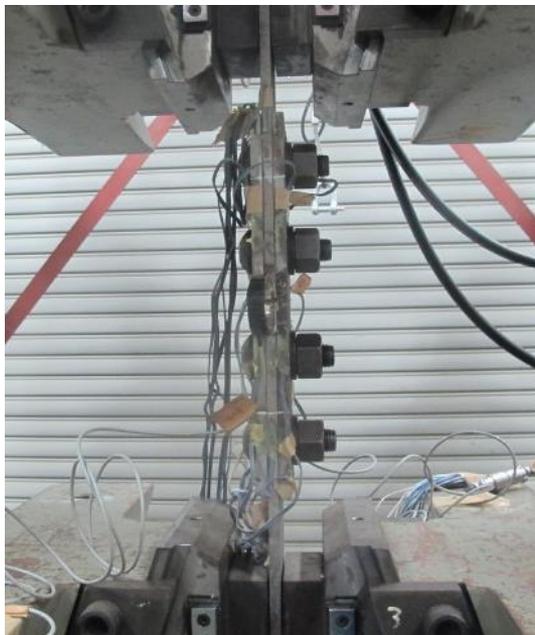
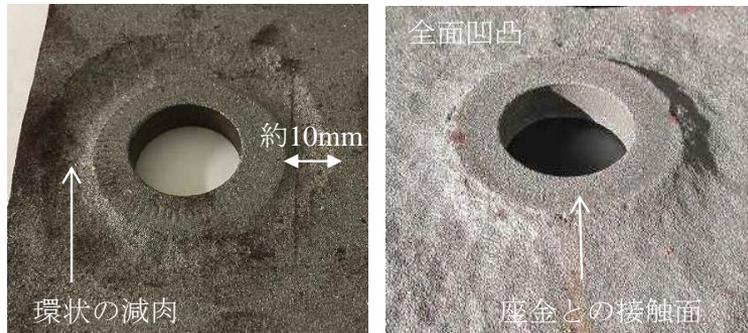
⑤片側降伏耐力/片面すべり耐力比
 $\beta_{cs} [= P_{cb} / F_{cy}]$ の算出

腐食連結板のすべり耐力[Ph]の評価 (図1.2.*)



腐食連結板のすべり耐力

腐食連結板の実験

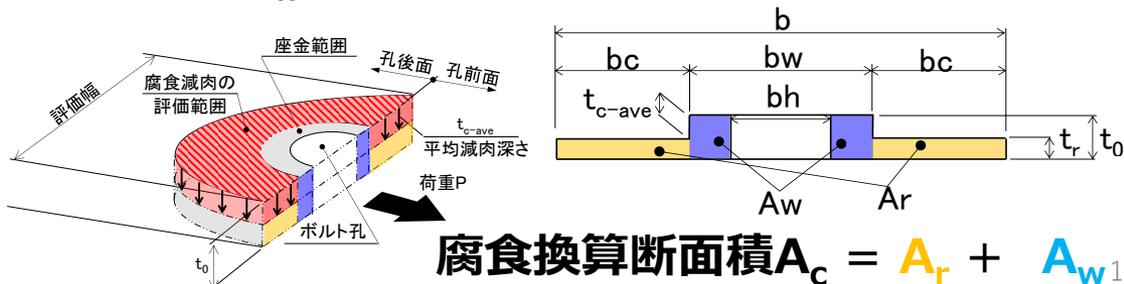
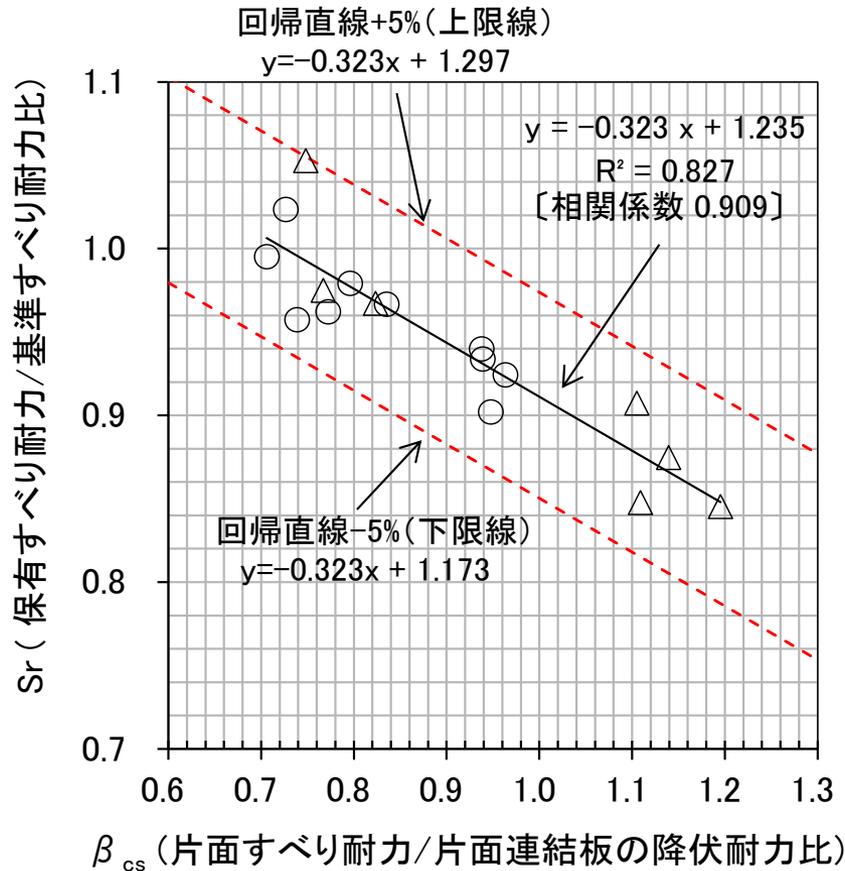


試験体数

模擬腐食 : 14体

実腐食 : 11体

腐食連結板のすべり耐力評価



第2編第2章 腐食鋼橋の補修補強

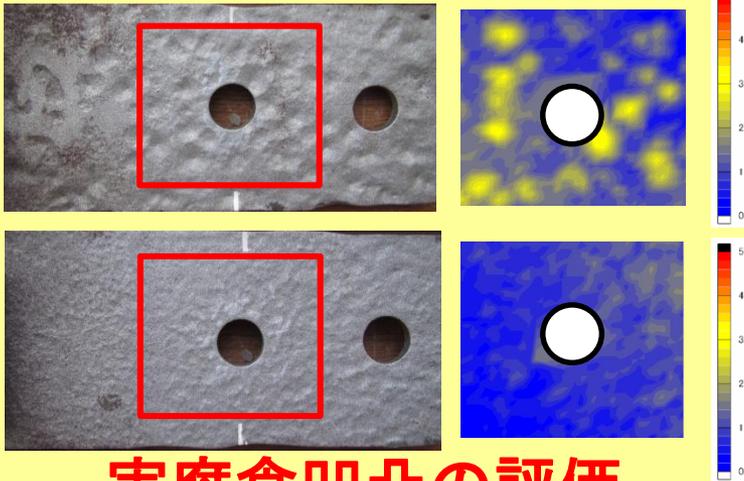
腐食凹凸面に対する当て板補修に関する実験的研究事例

1. 実腐食試験体の表面の計測

- レーザー変位計
(精度:0.2 μ m, 範囲:±15mm)



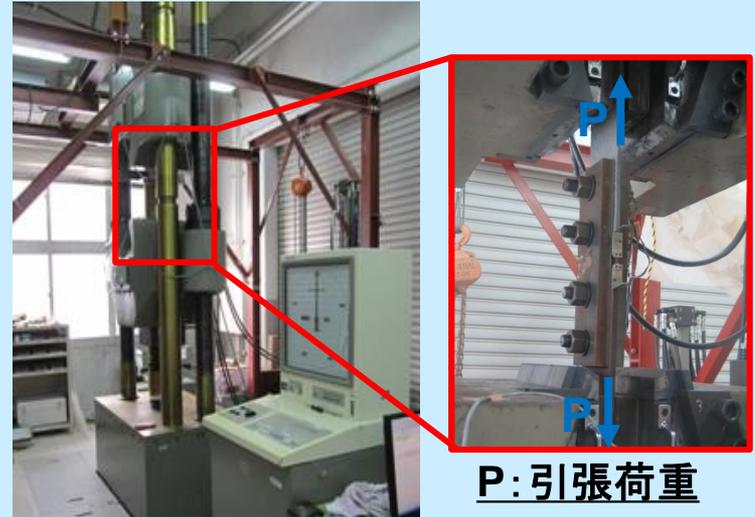
- 腐食表面コンタ図



実腐食凹凸の評価

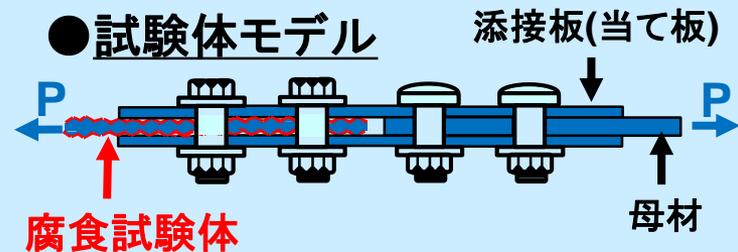
2. すべり試験

- 2000kN万能試験機

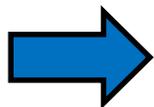


P: 引張荷重

- 試験体モデル



すべり耐力の評価



腐食凹凸とすべり耐力の相関を評価する

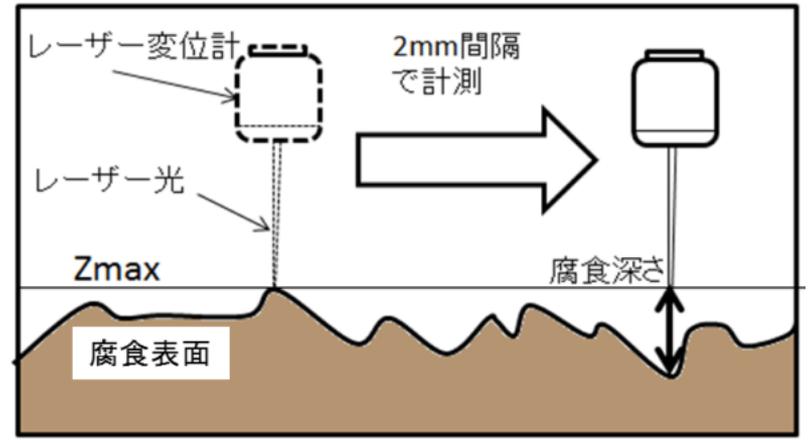
腐食凹凸面に対する当て板補修に関する実験的研究

試験体形状

縦と横2mm間隔で計測

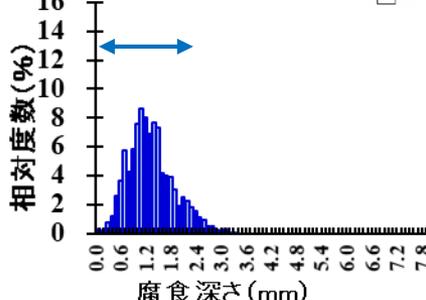
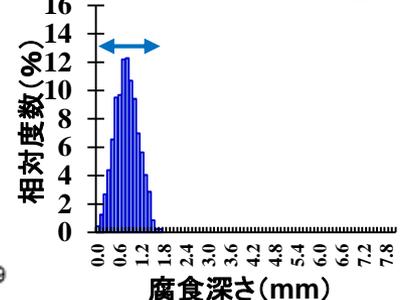
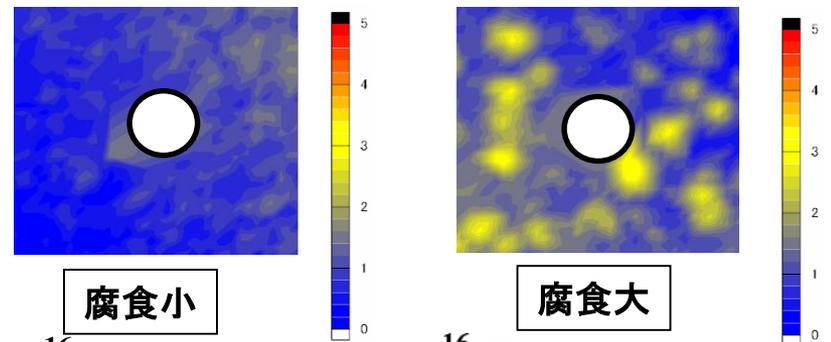


※腐食深さの算出方法
腐食深さ=最大値-腐食表面までの距離

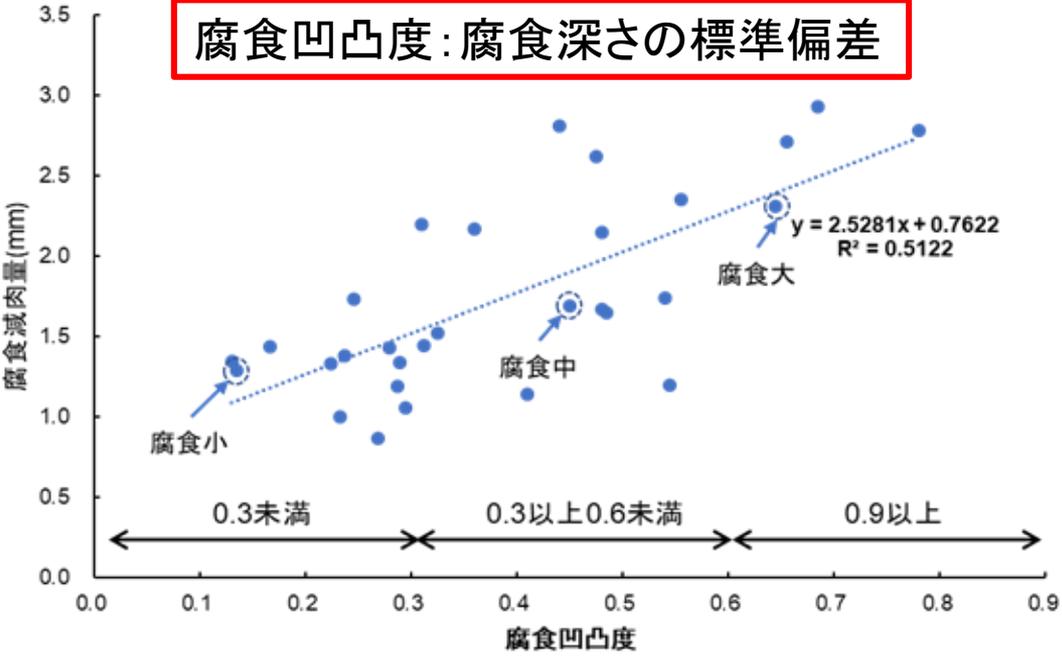


※計測の様子

●腐食表面のコンタ図

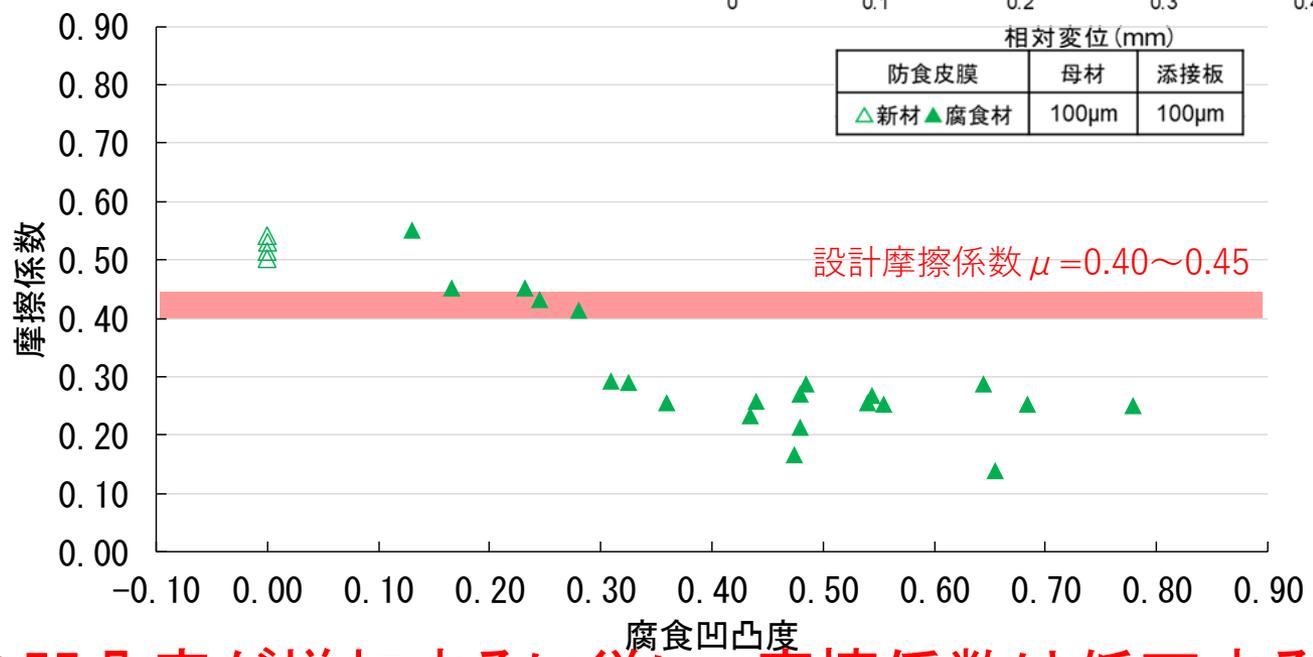
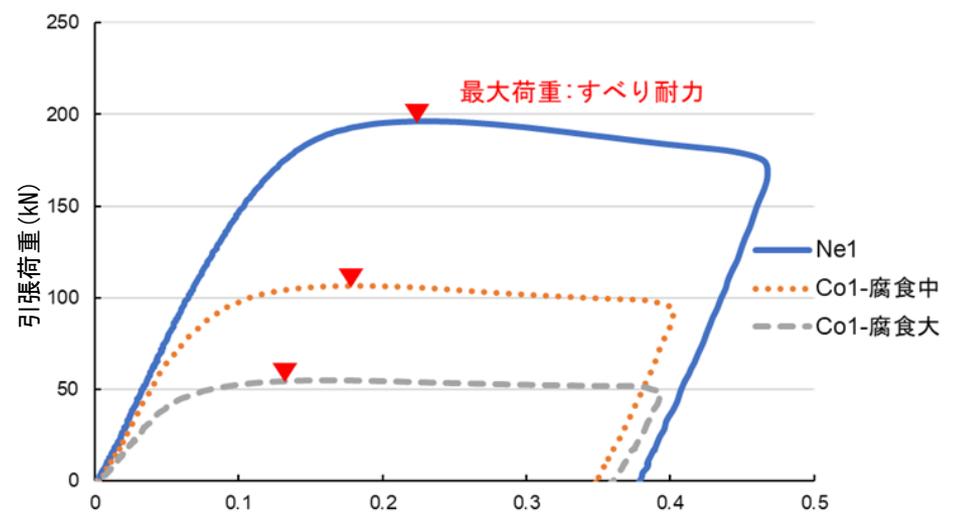
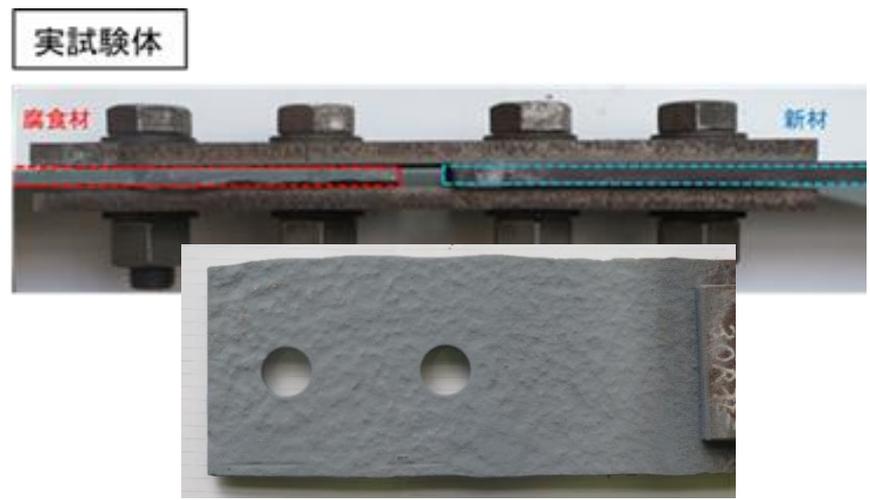


腐食凹凸度: 腐食深さの標準偏差



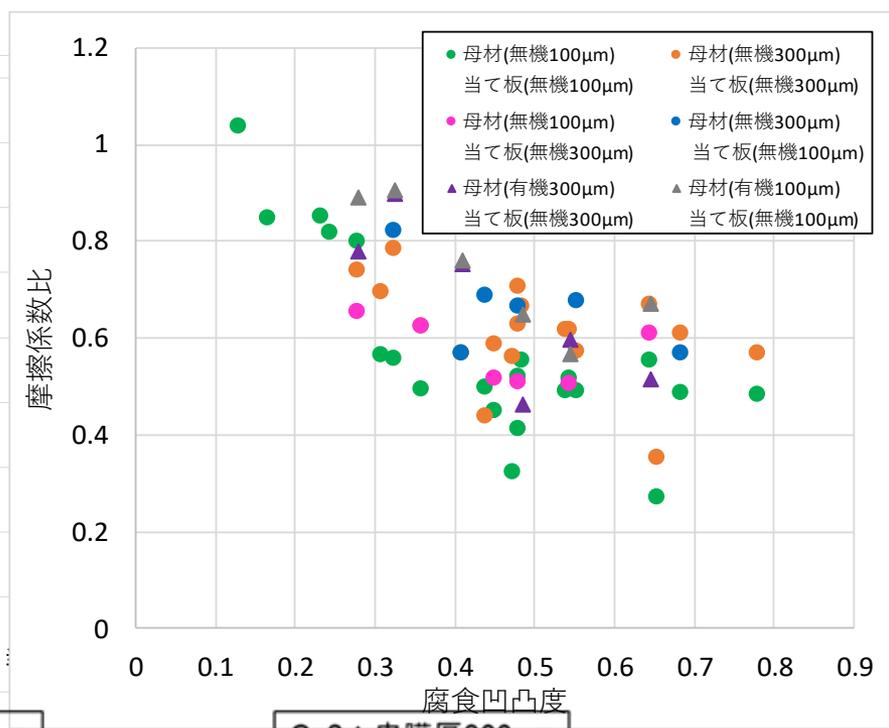
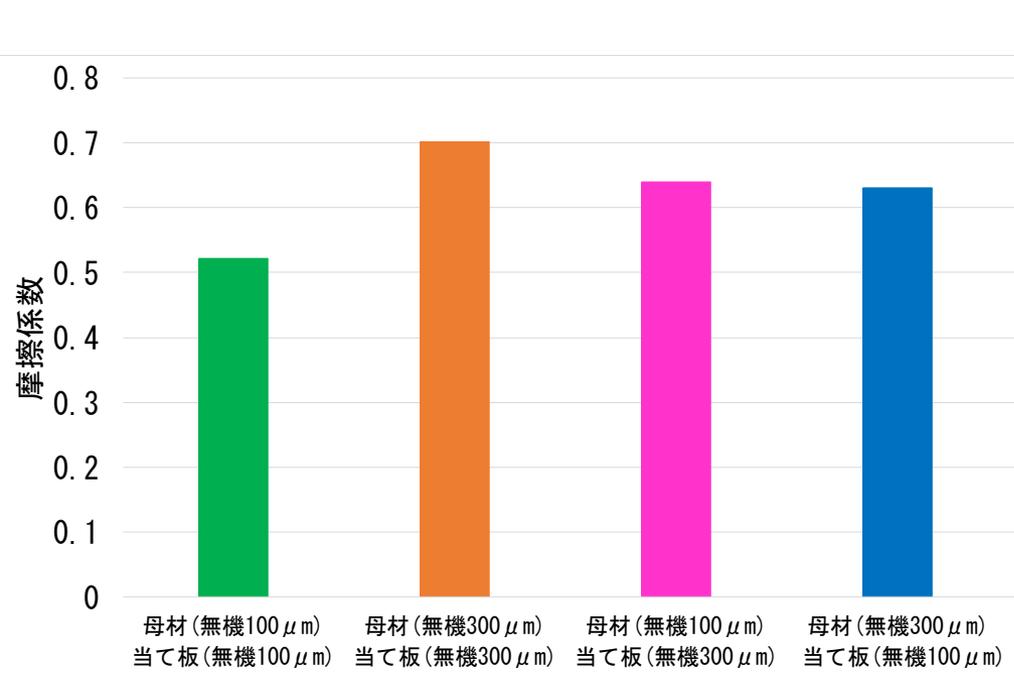
腐食評価は腐食凹凸度を採用する

腐食凹凸面に対する当て板補修に関する実験的研究

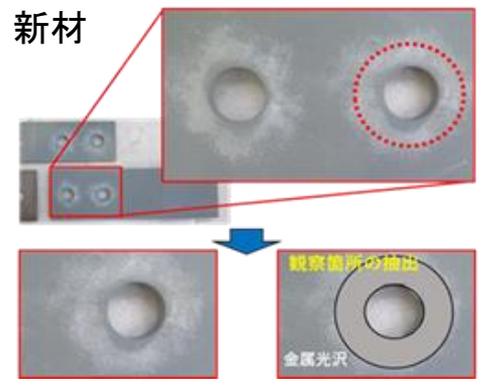


腐食面の凹凸度が増加するに従い、摩擦係数は低下する傾向にある

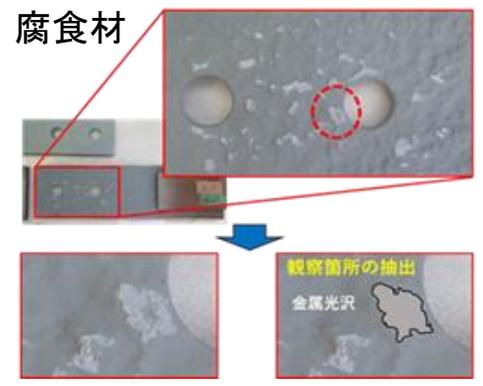
腐食凹凸面に対する当て板補修に関する実験的研究



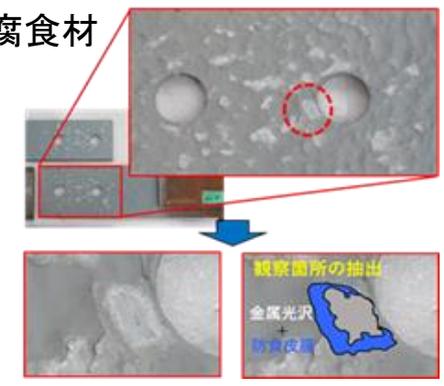
Ne1 : 皮膜厚100 μm



Co1 : 皮膜厚100 μm



Co2 : 皮膜厚300 μm



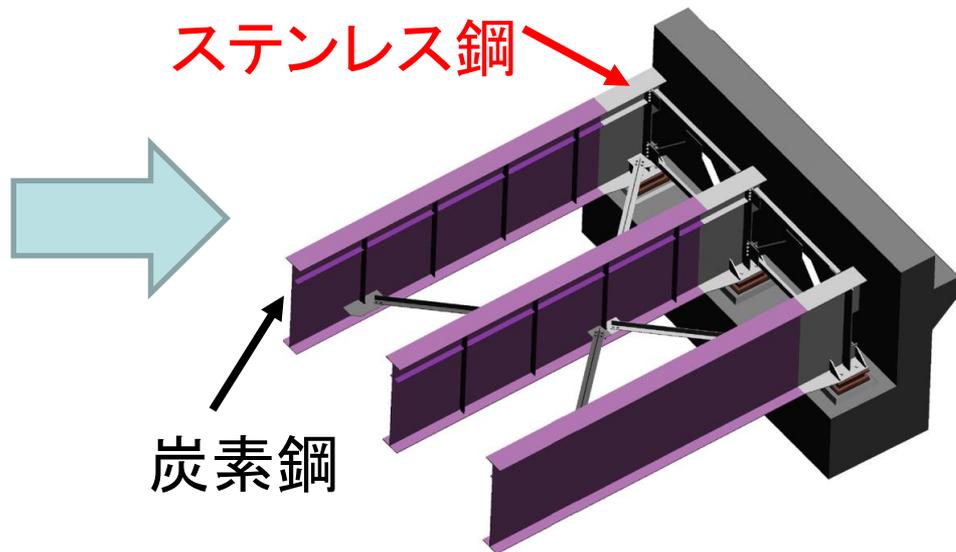
防食皮膜の膜厚増加により、摩擦係数は増加傾向を示す

桁端部へのステンレス鋼の適用

鋼橋の腐食弱点部：桁端部



桁端部へのステンレス鋼の適用
ステンレス鋼



ハイブリッド鋼橋の研究開発

：桁端部にステンレス鋼，桁間部に炭素鋼

⇒突合せ溶接接合

：引張強度、疲労強度の検証

：異種金属の防食検証（今後）

桁端部へのステンレス鋼の適用

炭素鋼とステンレス鋼の組み合わせ：耐食性・機械的性質より決定

●耐食性能

SUS821L1



SUS304



SUS430

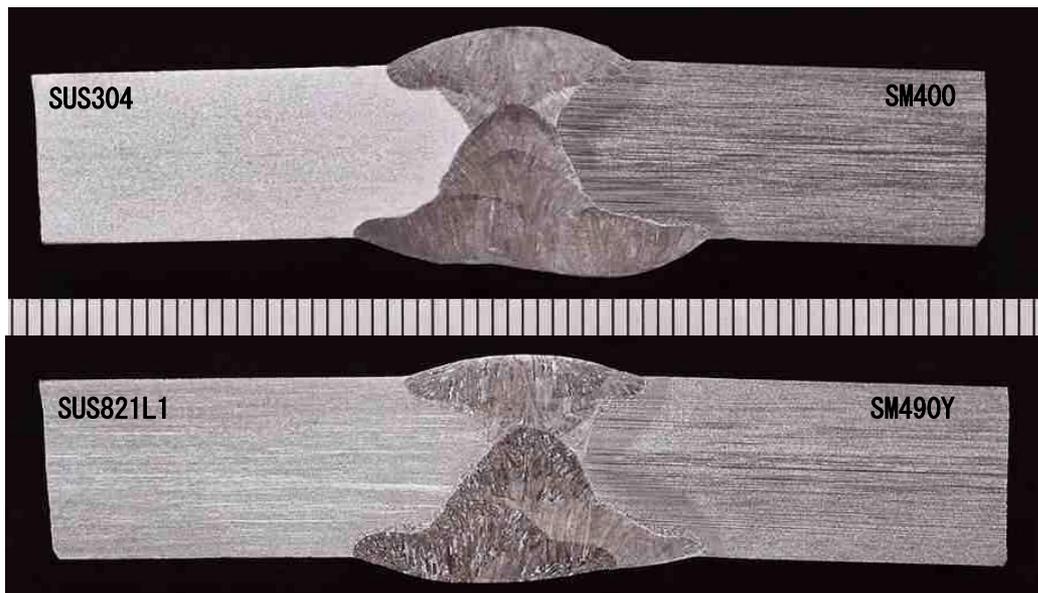


SM400 – SUS304

SM490 – SUS821L1

●鋼材の機械的性質

材料名	引張強度 (N/mm ²)	降伏強度 (N/mm ²)	伸び (%)
SM400	400~510	≧ 245	≧ 18
SUS304	≧ 520	≧ 205	≧ 40
SM490	490~610	≧ 365	≧ 15
SUS821L1	≧ 600	≧ 400	≧ 25



桁端部へのステンレス鋼の適用

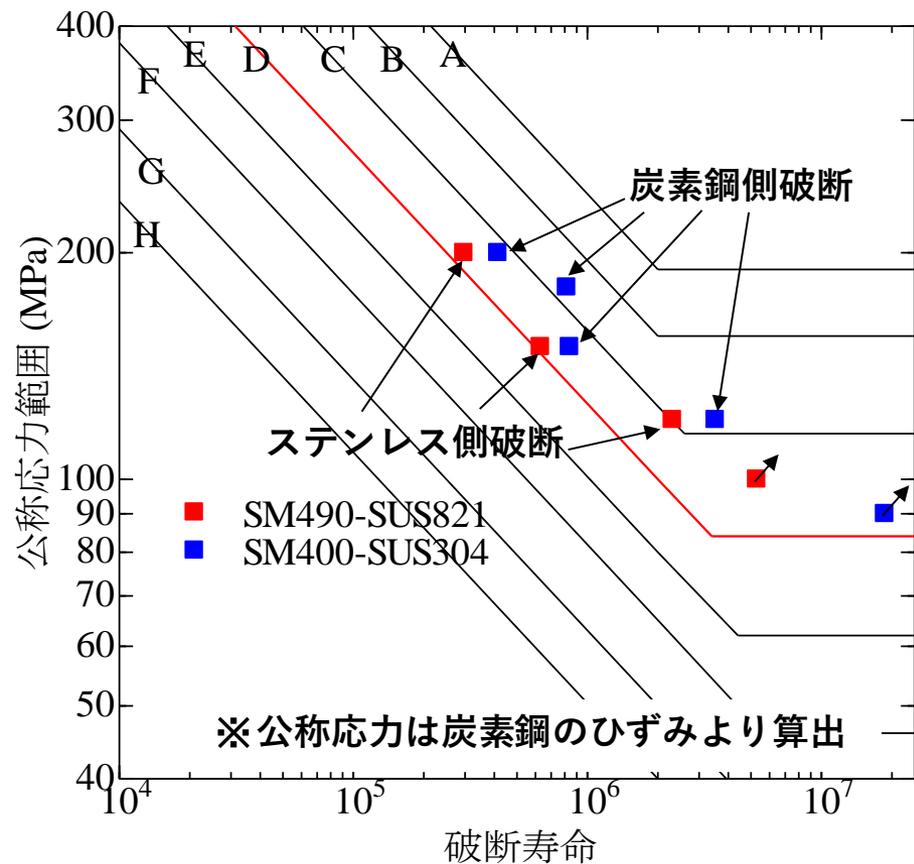
引張試験

試験体	引張強度(MPa)
SM400	439
SM490	542
SUS304	641
SUS821	712
SM400-SUS304	455
SM490-SUS821	448



いずれの組み合わせも炭素鋼母材で破断
継手位置での破断なし

疲労試験



炭素鋼の突合せ溶接継手の
疲労等級(D等級)を満たす

第2編第4章 鋼橋の防食技術

桁端部におけるColdSpray(CS)防食技術の試験施工とモニタリングによる耐久性評価

○腐食損傷を受けた実橋の桁端部のCS補修試験施工と3年後モニタリングの実施

試験施工概要

- ・3径間連続鋼2主箱桁橋，供用40年経過
- ・伸縮装置からの漏水により箱桁端部（桁尻）の下フランジ上面で著しい腐食
- ・素地調整，防食下地をCSへ置換え施工

桁端部塗替え塗装仕様

塗装工程	塗料名	塗料規格	標準使用量 (g/m ² /回)	目標膜厚 (μm)	塗装方法	塗装間隔
素地調整	2種ケレン	-	-	-	-	素地調整後直ちに
現場	下塗り第1層	有機ジンクリッチペイント	SDK P-412 600 (300×2)	75	吹付け (はけ)	1日～10日
	下塗り第2層	超厚膜形エポキシ樹脂塗料下塗り	SDK P-418 1100 (500×2)	300	吹付け (はけ)	1日～10日
	中塗り	ふっ素樹脂塗料用中塗り	SDK P-423 170 (140)	30	吹付け (はけ)	1日～10日
	上塗り	低汚染型ふっ素樹脂塗料上塗り	SDK P-434 140 (120)	25	吹付け (はけ)	1日～10日

上面エッジ部



下面エッジ部



側面および部材エッジ部のCS施工後3年経過後の外観状況

- ・全てのCS施工箇所において，さび発生や塗膜ふくれ，割れ等は，確認されず，外観良好状態を維持していた
- ・特に腐食の弱点部となる下フランジのエッジ部についても，外観良好状態を維持

腐食弱点部への防食補修技術として有用である



桁端部塗装仕様

ナット角部より発錆

エッジ部より発錆



同時期に通常の塗替え補修で施工された隣接桁との比較

- ・比較部は，CS施工部と伸縮継手を挟んで正対する位置
- ・隣接桁については，施工後3年において，下フランジエッジ部やナットの角部からさびの発生，塗膜の割れが見られ，塗替え塗装の劣化が見られる

通常の塗替え塗装より防食の耐久性の高い皮膜を生成することが可能

第2編第4章 鋼橋の防食技術

高力ボルトにおける防食技術の試験施工とモニタリングによる耐久性評価

○ 確実性の高い防食手法として、「有機ジンク塗布」「コールドスプレー(CS)処理による亜鉛皮膜形成」「透明防錆キャップによる環境遮断および維持管理性の向上」を提案するため、試験施工とモニタリング調査を実施

試験施工概要

- ・単純下路式鋼床版2主鈹桁橋, 供用17年経過
- ・ナット部(桁外面)は著しい腐食, 頭部はほぼ未腐食(滞水部は腐食)
- ・4パラメータで比較検証
- ①通常塗替え, ②CS処理+下塗り1層省略, ③CS処理+下塗り3層省略, ④有機ジンク省略+透明防錆キャップ

添接部塗替え塗装仕様

工程	塗料または素地調整	標準使用量 (g/m ²)	塗装間隔 (気温20℃の場合)	標準膜厚
				(μm)
現場 塗装	素地調整	2種ケレン	—	—
	防食下地	有機ジンクリッチペイント	2hr以内	30
	下塗り第1層	弱溶剤型変性エポキシ樹脂塗料下塗り	1~10日	60
	下塗り第2層	弱溶剤型変性エポキシ樹脂塗料下塗り	1~10日	60
	下塗り第3層	弱溶剤型変性エポキシ樹脂塗料下塗り	1~10日	60
	中塗り	弱溶剤型ふっ素樹脂塗料用中塗り	1~10日	30
	上塗り	弱溶剤型ふっ素樹脂塗料用上塗り	1~10日	25

高力ボルトへのCS施工



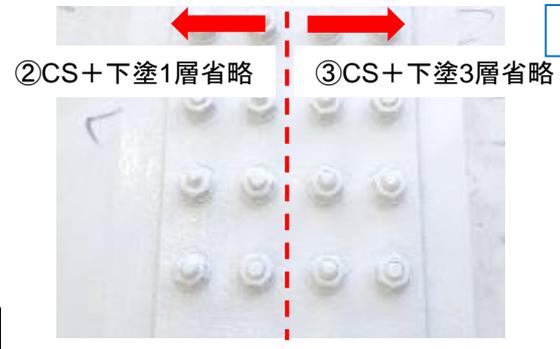
施工精度、施工角度等はクリア、小規模橋梁のボルト部と相性○

透明防錆キャップ施工

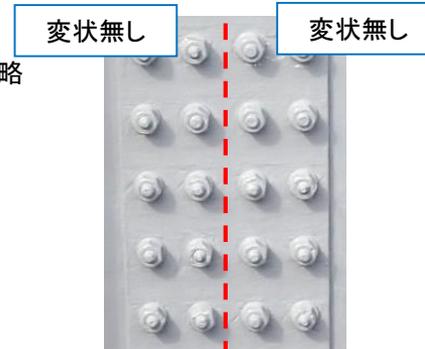


つば部だけの接着で内部を視認可能、塗装ボルトとの嵌め合いも良好

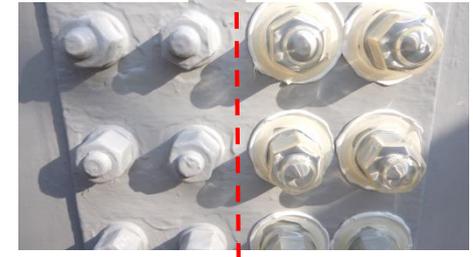
施工完了後(ウェブ)



1年後モニタリング(ウェブ)

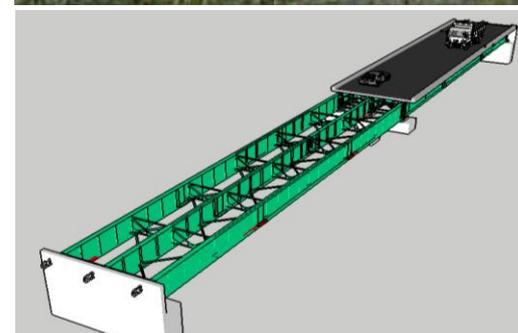


①通常塗替え ④透明防錆キャップ



第2編第5章 腐食マップを活用した腐食鋼橋の点検シミュレータの開発

3DCGによる可視化技術を用いた橋梁の腐食損傷マップにより鋼桁における点検技能を効率的に向上させる



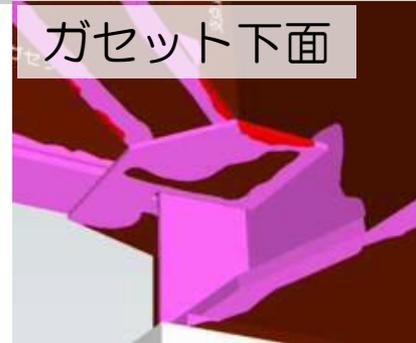
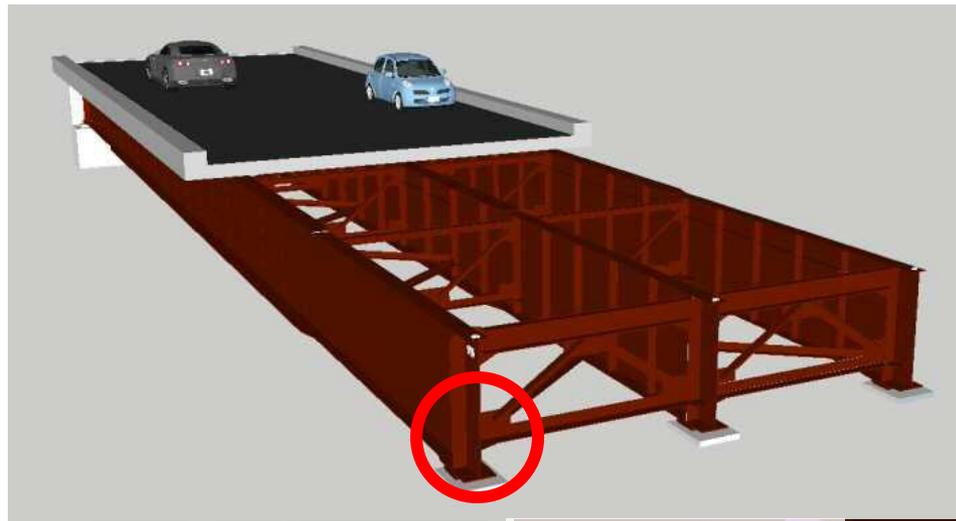
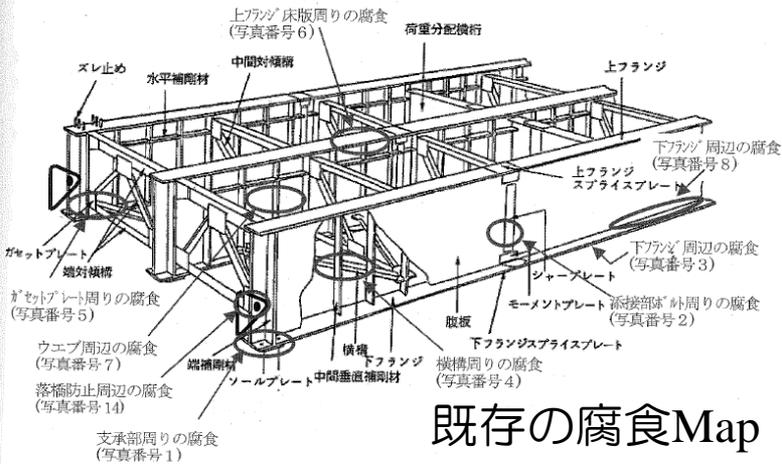
供用年数	44年(1975年)
離岸距離	約300m
周辺環境	沿岸部
橋長	25.0m
有効幅員	31.3m
主桁数	17本
上部工形式	単純合成鋼 桁
防錆処理	塗装

供用年数	36年(1983年)
離岸距離	約2.5km
周辺環境	山間部
橋長	31.0m
有効幅員	8.0m
主桁数	3本
上部工形式	単純合成鋼 桁
防錆処理	耐候性鋼材

供用年数	54年(1964年)
離岸距離	約20km
周辺環境	山間部
橋長	60.0m(2径間)
有効幅員	8.2m
主桁数	3本
上部工形式	単純合成鋼 桁2橋
防錆処理	塗装

3D腐食マップを活用した鋼橋点検ソフトウェア

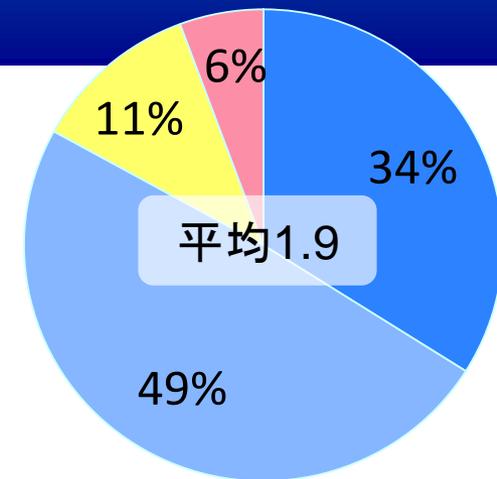
点検シミュレータ



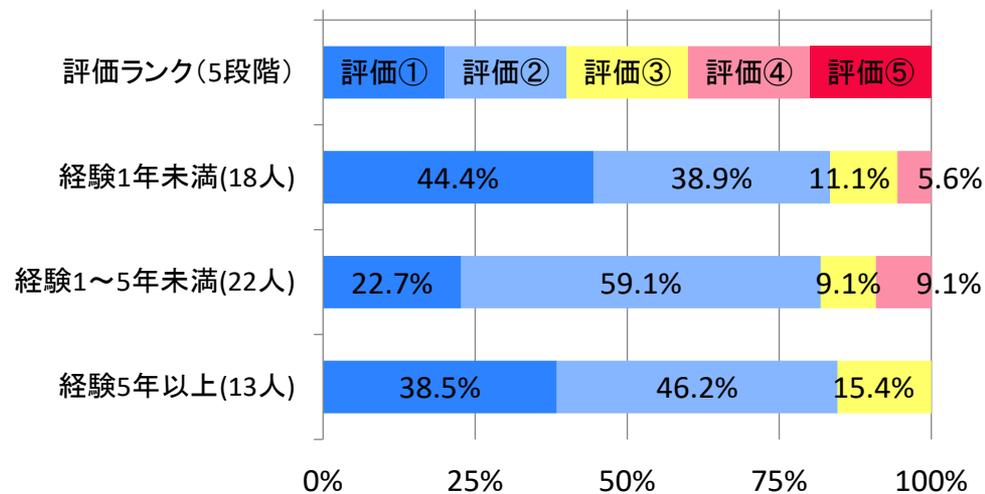
着色	状態	
元色	健全	腐食性の錆が生じていない
ピンク	板厚減少	腐食により板厚減少している
赤	断面欠損	断面欠損や部材破断

有効性の検証

学習システムの有効性の検証として、**実際の点検実施と教育指導に直面している実務者53名**を対象にアンケートを実施



質問(5段階評価)	
評価①: とてもそう思う, 評価②: そう思う, 評価③: どちらとも言えない, 評価④: そう思わない, 評価⑤: 全くそう思わない	
質問1:	本学習システム全般として、これまで実施されてきた点検技術者の教育方法に対し、腐食の知識と点検技能を効率的(現場に行かなくても良い)に習得できる教育システムだと思われますか?
質問2:	本学習システム全般として、これまで実施されてきた点検技術者の教育方法に対し、腐食の知識と点検技能を実践的(現場に近い条件)に習得できる教育システムだと思われますか?
質問3:	本学習システム全般として、これまで実施されてきた点検技術者の教育方法に対し、腐食部位へのアプローチや現場での視野の制限(視点の高さにより見えにくい部位など)をパソコン上で体験できる教育システムだと思われますか?
質問4:	本学習システムの「腐食の基礎知識に関する学習カリキュラム」について、交通規制を伴う重大な腐食や腐食しやすい構造の特徴を知るうえで有効なシステムだと思われますか?
質問5:	本学習システムの「腐食の点検技術に関する学習カリキュラム」について、点検通路の事前検討(点検通路から見える範囲の確認など)や点検資機材の選定(点検車、船上、移動足場など)点検を効率よくプランニングできる力を育成できる有効なシステムであると思われますか?
質問6:	その他、本学習システムをより良いツールにするため、ご意見を頂きたいと思えます。システムの利用により、学習方法の改良点、効率化に向けた改良点、点検の手戻り回避としての改良点など、お気づきの点をご自由にご記入ください。



凡例 : ■ 評価1 ■ 評価2 ■ 評価3 ■ 評価4 ■ 評価5

8割以上が評価1もしくは2としており、画面上での自由な可動により、**腐食点検に関する知識を効率的に習得**できる腐食点検学習システムとして評価が得られた。

鋼橋の構造性能と耐久性能研究委員会 腐食耐久性能研究部会

テーマ：鋼橋の頑強な防食技術及び合理的な腐食診断と補修技術に関する検討

現状課題

- 腐食環境の不明瞭さに起因する耐食・防食性能のばらつき
- 損傷劣化後の健全度の不明瞭さ
- 合理的な補修技術整備が不十分
- 高性能材料のコスト高

サブテーマ

1. 多様な腐食特性に対する合理的な防食仕様の提案（新設・既設）
 - ・新防食仕様
 - ・高防食補修技術
 - ・狭隘部の効果的な防食補修技術の提案
2. 構造冗長性評価に基づいた合理的な診断技術の提案
 - ・モデル化及び終局，使用限界状態診断検討
 - ・評価ガイドラインの作成
3. 腐食損傷の生じた鋼部材の健全度評価の検討
 - ・トラス橋格点部の腐食損傷に対する健全性評価
 - ・トラス橋圧縮斜材の腐食損傷に対する健全性評価
4. 補修法の力学メカニズムと合理的な断面補修法の検討
 - ・断面補修の応力伝達メカニズム解析&小型モデル実証実験
 - ・応力伝達メカニズムに基づく断面補修の実験検証（小型&大型）