2026.11.19
秋田道路維持支援センター

鋼橋の腐食に対する点検・診断・対策

一般社団法人　日本鋼構造協会
土木鋼構造診断士　更新・広報小委員会

中日本高速道路(株)　服部 雅史

目次

1. 鋼橋の腐食の問題

2. 防食に対する点検・診断・対策

3. 腐食減肉に対する点検・診断・対策

1. 鋼橋の腐食の問題

2. 防食に対する点検・診断・対策

3. 腐食減肉に対する点検・診断・対策

塗装された鋼橋によくある腐食

雨洗いのない箇所



塗膜下腐食



ボルト部



桁端部



添接板隙間腐食



毛管現象



耐候性鋼材を用いた鋼橋によくある腐食

雨洗いのない箇所



濡れ時間の長い箇所



凍結防止剤の飛散



植生，湿気



床版からの漏水



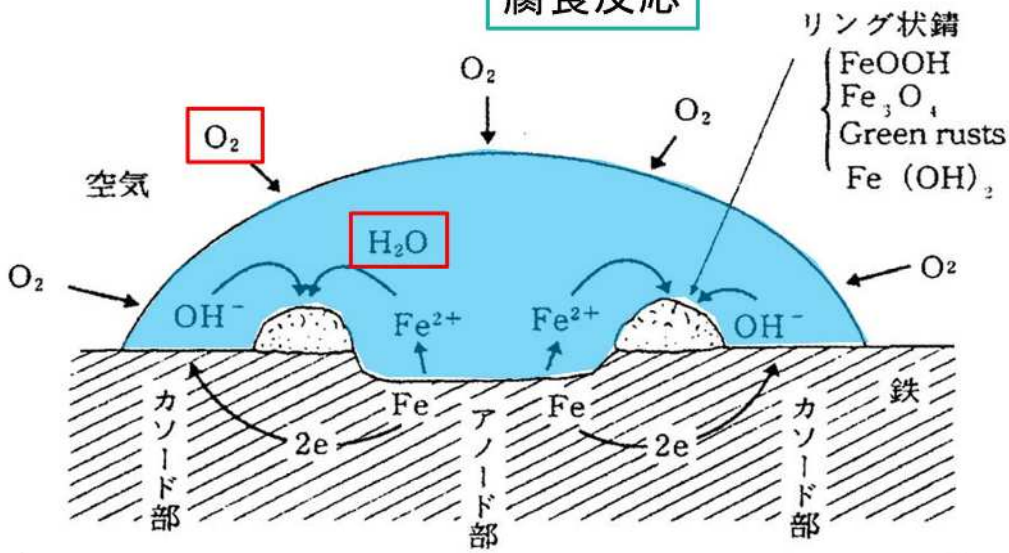
不適切な流末処理



腐食のメカニズム

鉄(Fe)は鉄鉱石(酸化鉄)を還元して作ったもので不安定な状態 → 安定な状態に戻ろうとするFe→(酸化鉄)

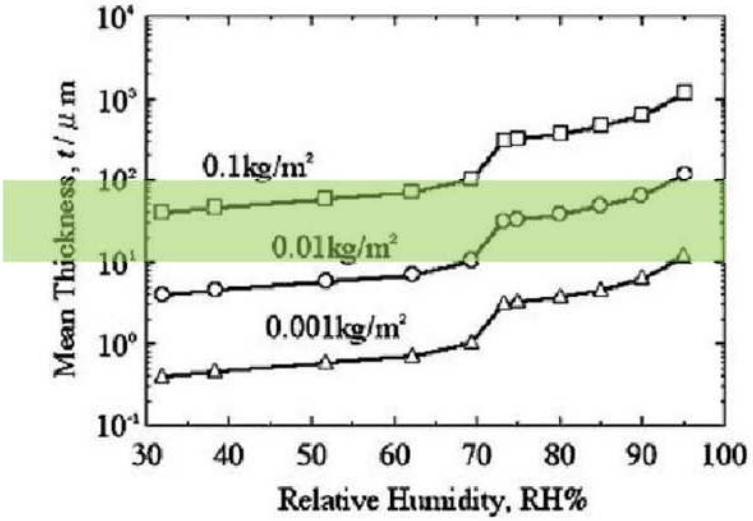
腐食反応



・アノード(陽極、酸化反応)：$Fe \rightarrow Fe^{2+}+2e^-$
・カソード(陰極、還元反応)：$2H_2O+O_2+4e^- \rightarrow 2OH^-$

相対湿度と付着塩分との関係

腐食速度の速い
平均水膜厚さ



片山、野田、山本、小玉：人工海水液薄膜下での鋼の腐食速度と水膜厚さの関係、日本金属学会誌

塩が表面に付着していれば相対湿度が低くてもさびやすい

さびがさびを呼ぶ（ケース1）

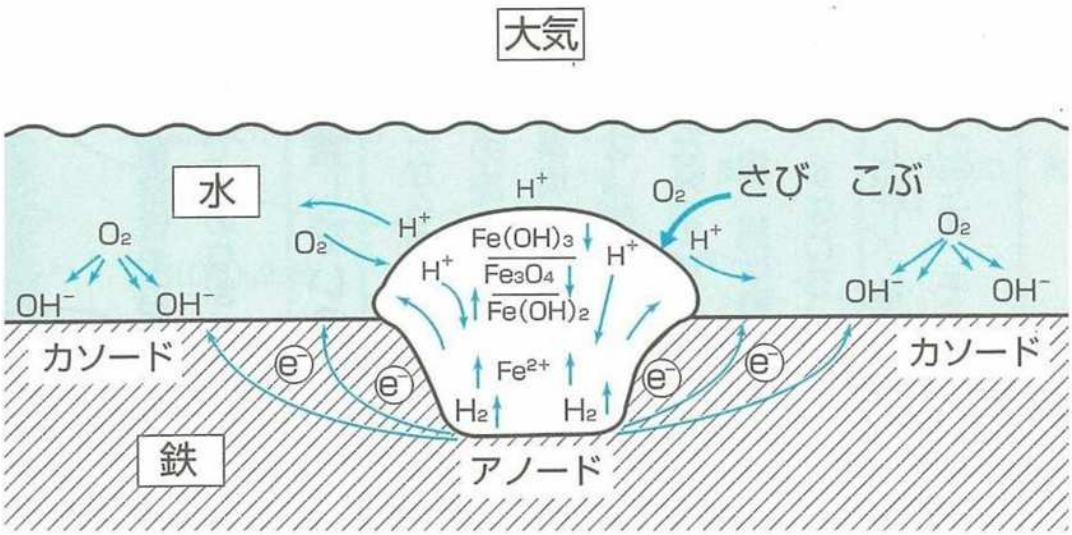
アノードで酸化反応に伴い
腐食生成物が出来る

→ 腐食生成物の中で
酸素の量に濃淡が出来る

↓

その濃淡により電池が形成され
錆底部が選択的に酸化反応する

→ さびの部分はどんどんさびる



長野、松村：よく分かる最新さびの基本と仕組み

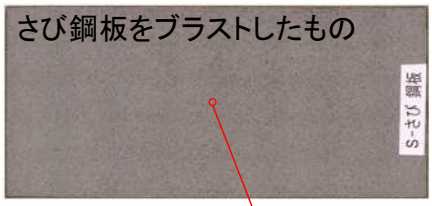
さびがさびを呼ぶ（ケース2）

塩分の多い地域では
さびがClを含んだ状態で存在する
（塩化鉄：$FeCl_2$）（アカガネイト：β -FeOOH）

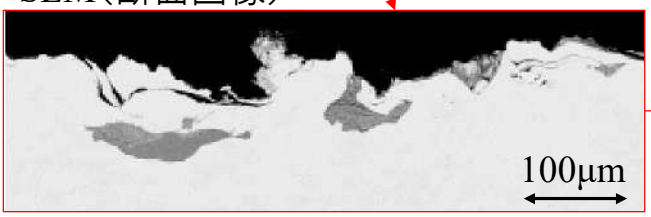
→ 酸化反応に伴いさびの先頭に
Clが集まりやすい
（塩化物イオンネスト）

塩化物イオンネストの部分は安定なFe_3O_4となる過程で体積減少するため、空隙が多くなり酸素や水を通しやすい

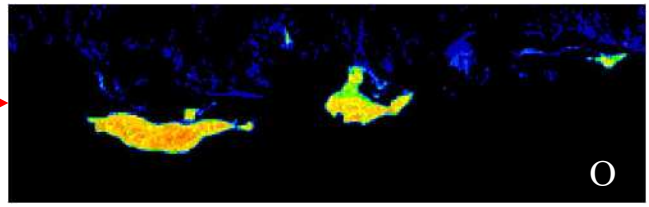
→ さびの部分はどんどん錆びる

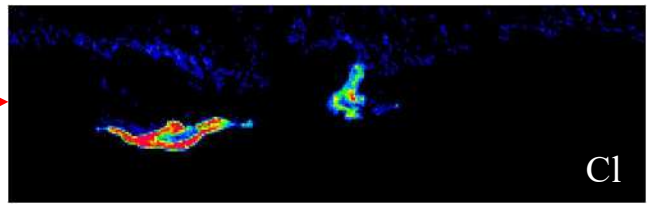


SEM（断面画像）

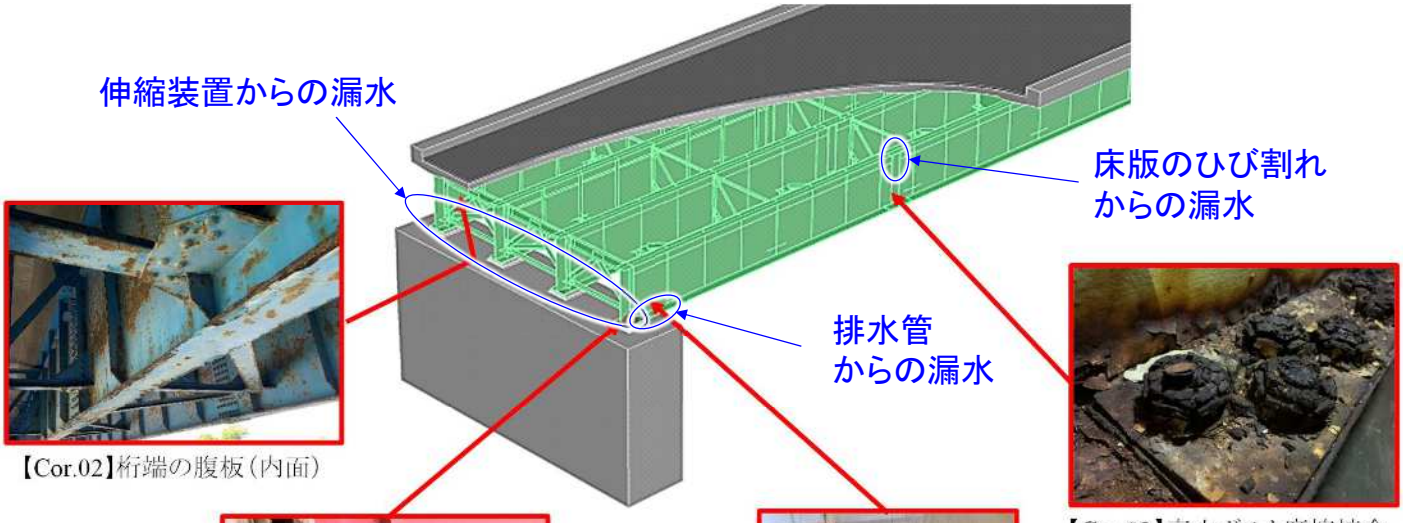


EPMA





腐食しやすい＋耐荷性能に影響する部位（鈑桁）



【Cor.02】桁端の腹板（内面）



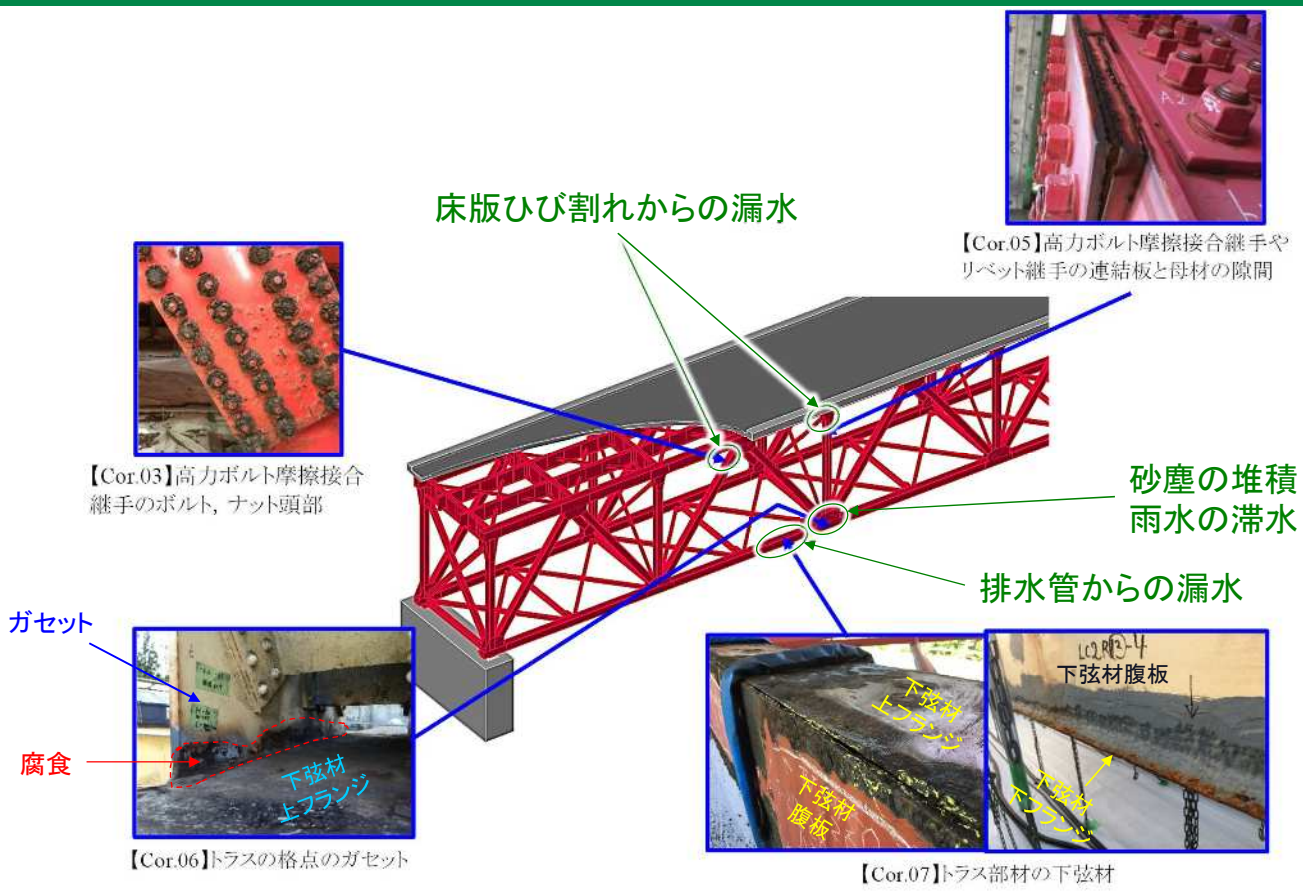
【Cor.01】桁端の支点の十字柱



【Cor.02】桁端の腹板（外面）

【Cor.03】高力ボルト摩擦接合継手のボルト，ナット頭部
【Cor.04】高力ボルト摩擦接合継手の連結板

腐食しやすい＋耐荷性能に影響する部位（トラス）



1．のまとめ

- 腐食には水，塩分，酸素が関係する
- 一度，腐食すると，その部位がより腐食しやすくなる
- 鋼橋では腐食しやすい部位がある
- 鋼橋では腐食すると耐荷性能に問題が生じる部位がある
- 腐食しやすい部位と，腐食すると耐荷性能に問題が生じる部位が重なるところが維持管理上の重要部位になる

1. 鋼橋の腐食の問題

2. 防食に対する点検・診断・対策

3. 腐食減肉に対する点検・診断・対策

鋼橋の防食方法

- 被覆による防食（水，塩分，酸素から遮断）
  - 非金属被覆・・・塗装等
  - 金属被覆・・・溶融亜鉛めっき，金属溶射等
- 耐食性材料による防食・・・耐候性鋼材，ステンレス等
- 環境改善による防食・・・構造の改善，除湿等
- 電気防食・・・流電陽極方式，外部電源方式

防食性能回復は塗装が主に用いられる

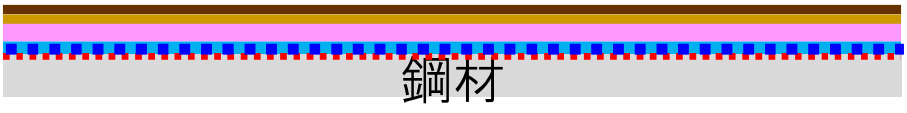
鋼橋で主に用いられる防食方法

① 塗装・・・・・・・・・・・・・最も実績の多い防食法，近年は重防食塗装が標準
② 耐候性鋼材・・・・・・近年，実績が増え続けている

防食性能が上手く維持されないと…

鋼部材が腐食減肉する

【塗装】 構成 （道路橋の新設の場合）



工　　程		塗料または素地調整程度
前処理	素地調整	G－a
	プライマー	無機ジンクリッチプライマー
工場塗装	2次素地調整	G－a
	下塗　第1層	無機ジンクリッチペイント
	ミストコート	エポキシ樹脂塗料下塗あるいは厚膜形エポキシ樹脂塗料下塗（120μm）
	下塗　第2層	厚膜形エポキシ樹脂塗料下塗（120μm）
	中　　塗	ふっ素樹脂塗料用中塗
	上　　塗	ふっ素樹脂塗料上塗

- 製作の間の防錆のため
- 清掃と塗膜の付着性向上ため
- 防錆のため（**防食下地**）
- 封孔のため
- 水、酸素、塩分の浸入抑制のため
- 付着性や色の隠蔽のため
- 耐候性や景観のため

【塗装】 構成 （道路橋の塗替えの場合の例）

強い塗膜により水、空気の供給をしにくくする

悪 ↑ 塗膜の程度 ↓ 良

素地調整程度	工　　程	塗料または素地調整程度
1種	素地調整	1種
	下塗　第1層	有機ジンクリッチペイント
	下塗　第2層	変性エポキシ樹脂塗料下塗
	下塗　第3層	変性エポキシ樹脂塗料下塗
	中　　塗	ふっ素樹脂塗料用中塗
	上　　塗	ふっ素樹脂塗料上塗
3種	素地調整	3種
	タッチアップ　1回目	有機ジンクリッチペイント
	タッチアップ　2回目	有機ジンクリッチペイント
	タッチアップ　3回目	変性エポキシ樹脂塗料下塗
	下塗　第1層	変性エポキシ樹脂塗料下塗
	下塗　第2層	変性エポキシ樹脂塗料下塗
	中　　塗	ふっ素樹脂塗料用中塗
	上　　塗	ふっ素樹脂塗料上塗
4種	素地調整	4種
	下　　塗	変性エポキシ樹脂塗料下塗
	中　　塗	ふっ素樹脂塗料用中塗
	上　　塗	ふっ素樹脂塗料上塗

- 除錆と塗膜の付着性向上ため
- 防錆のため（**防食下地**）
- 水、酸素、塩分の浸入抑制のため
- 付着性や色の隠蔽のため
- 耐候性や景観のため

【塗装】 塗替え時の素地調整の重要性

さび板
↓
素地調整
↓
塗装
↓
暴露7年後

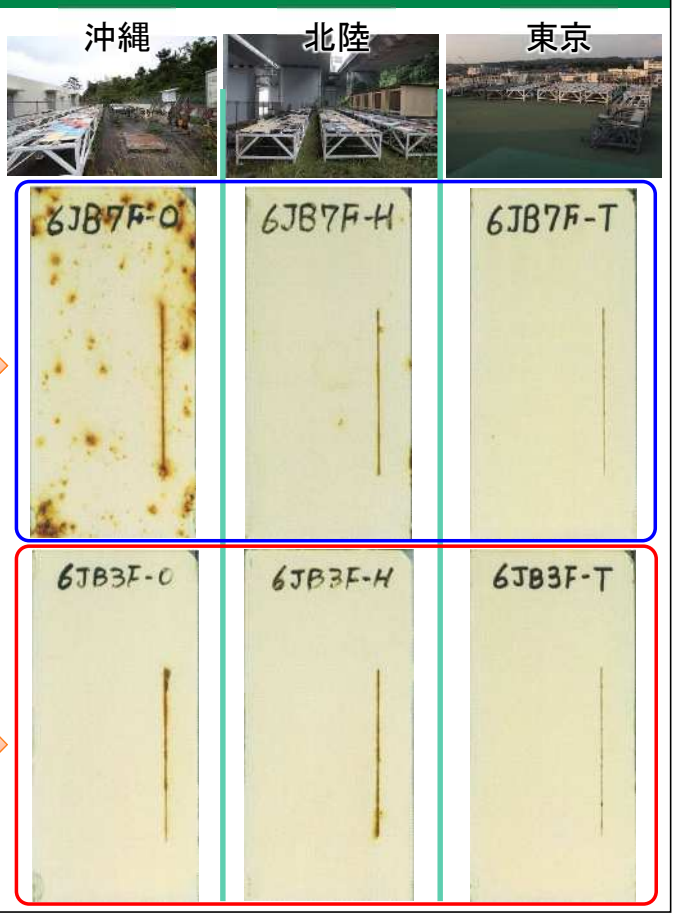


素地調整程度3種



素地調整程度1種





【塗装】 塗替え時の素地調整

塗装に備えて表面を処理する全ての方法

現地調査
↓
作業計画
↓
使用塗料･機器手配
↓
足場･防護工架設
↓
素地調整
↓
塗装
↓
防護工･足場撤去
↓
廃棄物処理

素地調整面の評価

- 除錆度
- 汚染度
- 表面粗さ

素地調整
- 水洗い
- 塗膜除去
- 除錆

【塗装】 除錆度　 ISO 8501



さびがこの程度の鋼板を素地調整した場合



見本と現場を比べて判断



さび度D
鋼材表面は既にさび、かなりの孔食が肉眼で認められる

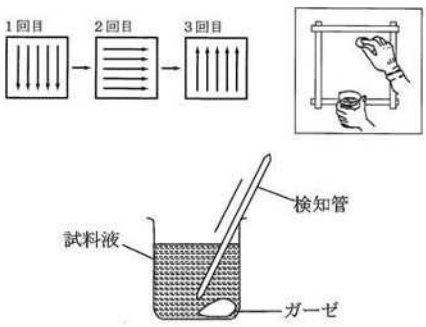
St3	Sa1	Sa2	Sa2・1/2
			
パワーツール	浮きさび除去	除錆率　2/3	除錆率　95%

【塗装】 汚染度　 付着塩分量の計測

50mg/㎡以上の塩分付着があると早期の塗膜欠陥に繋がると言われている

電導度法	ガーゼ拭き取り法	ブレッセル法







その他

- 表面付着粉塵…セロファンテープによる評価方法
- 結露の可能性…気温、相対湿度、鋼材表面温度の測定

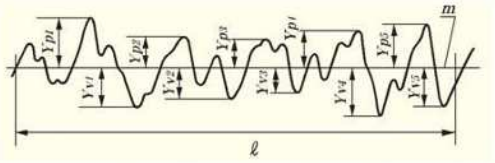
【塗装】 表面粗さ

凹凸の程度が塗膜厚さに影響するため，80μmRz_{jis}以下で管理するのが望ましい

Rz_{jis}とは

十点平均粗さのこと

$$RZ_{JIS}=\frac{(Yp_1+Yp_2+Yp_3+Yp_4+Yp_5)+(Yv_1+Yv_2+Yv_3+Yv_4+Yv_5)}{5}$$



$Yp_1, Yp_2, Yp_3, Yp_4, Yp_5$：基準長さℓに対する抜取り部分の、最も高い山頂から5番目までの山頂の標高

$Yv_1, Yv_2, Yv_3, Yv_4, Yv_5$：基準長さℓに対する抜取り部分の、最も低い谷底から5番目までの谷底の標高

www.mmc-hitachitool.co.jp/j/technique/tech_info/tec_info/c60.pdf



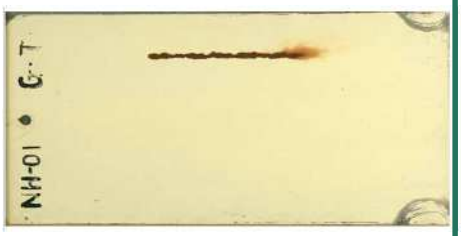
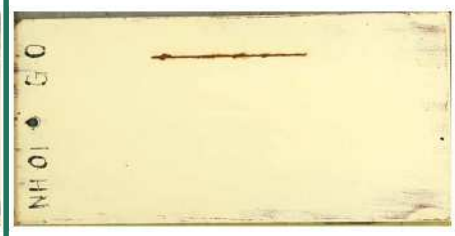
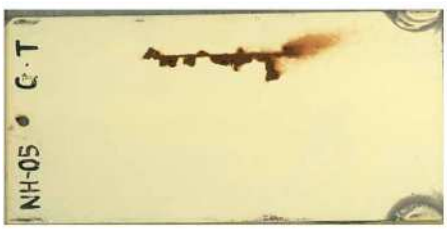
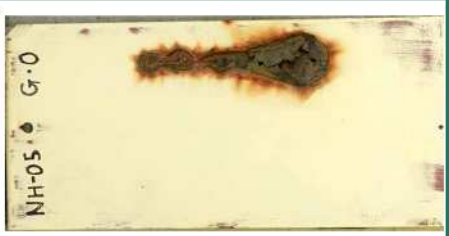
㈱ミツトヨ　ＨＰ



㈱サンコウ電子研究所　ＨＰ

【塗装】 防食下地の違い

エポキシ樹脂120μm，暴露30年

	無機ジンクリッチペイント	有機ジンクリッチペイント	防食下地なし
東京			
沖縄			
北陸			

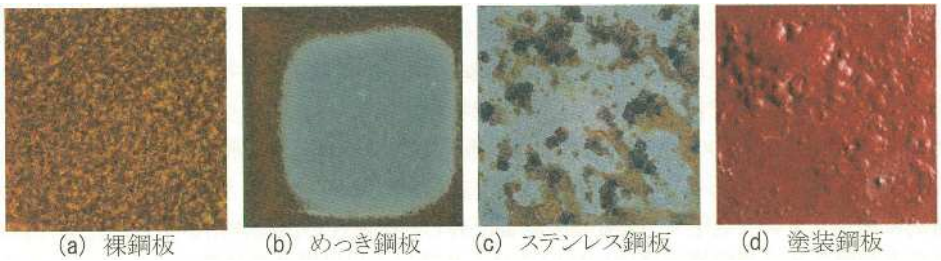
【塗装】 塗膜劣化の点検や調査

- 鋼橋の塗膜劣化の測定・計測
  - 塗膜の状態の把握
    - 目視調査
      - さび
      - はがれ
      - 割れ
      - 膨れ
      - 傷
      - 白亜化（チョーキング）
      - 変退色
      - 消耗
      - 汚れ
    - 計器を用いた調査
      - 光沢度測定
      - 色差測定
      - 付着性測定（アドヒージョン）
      - 膜厚測定
      - 電気抵抗測定
      - ピンホール測定
      - 画像解析（Paint View）
      - 付着塩分量測定
  - 環境の把握

【塗装】 環境の把握

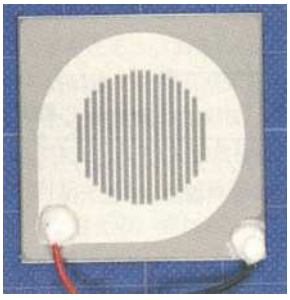
腐食進行性の評価　小片鋼板を対象部位に貼付し，重量減少量などを計測する

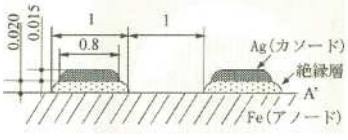




腐食環境の評価

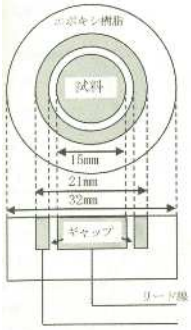
ガルバニック電流を計測する
（ACMセンサ）





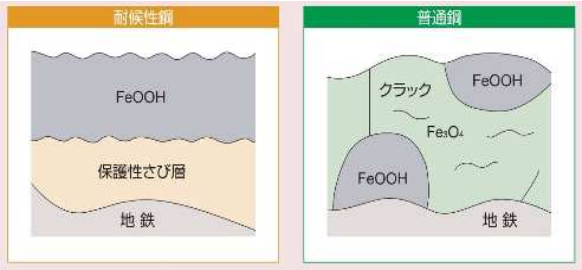
電気化学インピーダンスを計測する
（同心リング型腐食センサ）



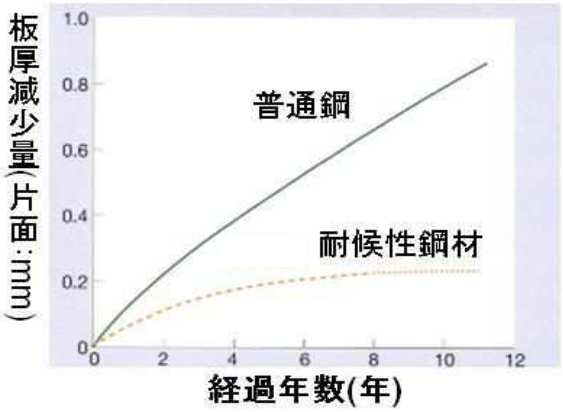


土木学会：鋼構造シリーズ30，大気環境における鋼構造物の腐食性能回復の課題と対策，2019

【耐候性鋼材】 防食の原理



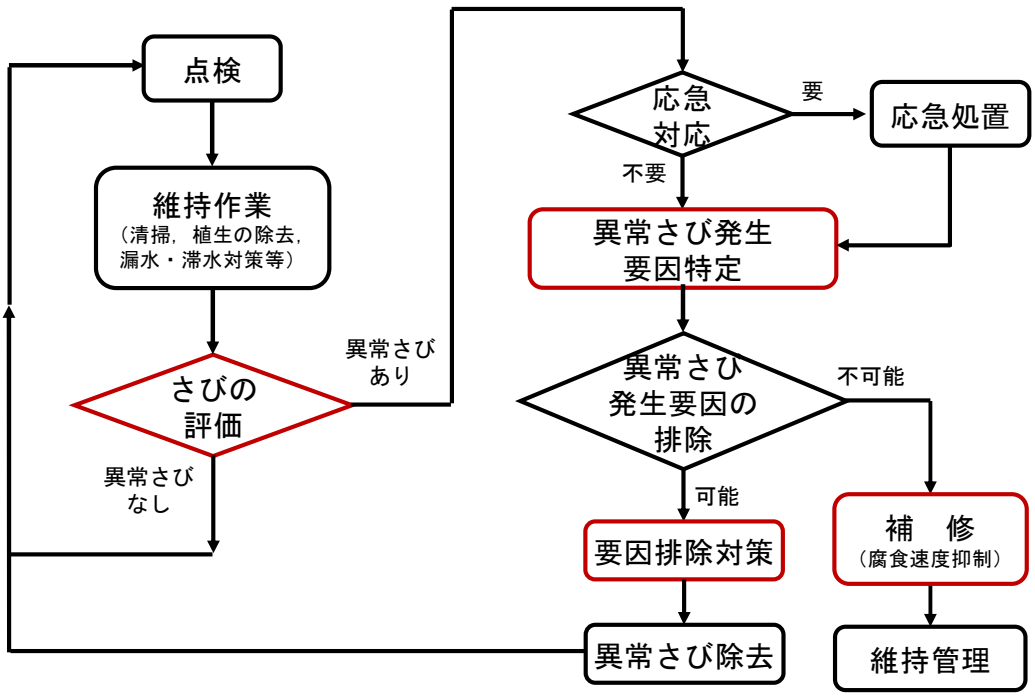
Cu,Cr,Niなどを添加することにより，緻密な保護性さびを生成し，鋼材表面を保護する
→腐食速度を大幅に抑制





【耐候性鋼材】 点検や調査

- 緻密なさび層が形成され，腐食速度を制御できているか？
- 飛来塩分量や凍結防止剤の飛散量は十分小さいか？
- 植生，堆積物がないか？漏水・滞水はないか？



【耐候性鋼材】 さびの点検や調査

外観

- 外観目視調査
  変状の有無の確認
- 近接目視調査
  変状の有無の確認
- 鋼材外観調査
  耐候性鋼材の状態評価
- セロファンテープ試験
  耐候性鋼材の状態評価

腐食量

- ワッペン試験
  腐食速度測定
- 残存板厚測定
  補修･補強判断
- さび厚測定
  目視点検の補足

環境

- 付着塩分量測定
  腐食環境調査

さび構造と物性

- イオン透過抵抗値測定
  さびの状態確認
- フェロキシル試験
  さびの状態確認
- さび成分分析
  X線回析、EPMA

その他

【耐候性鋼材】 鋼材外観調査



暴露初期のさび

評点3～5：防食機能は目標通りに保たれている
評点2（うろこ状さび）：腐食速度は100年間で0.2～2mm程度，要観察．
評点1（層状剥離さび）：急激に腐食が進行する場合があることから，何らかの対策が必須

環境によりどう移行するのか？



保護性さび



うろこ状さび

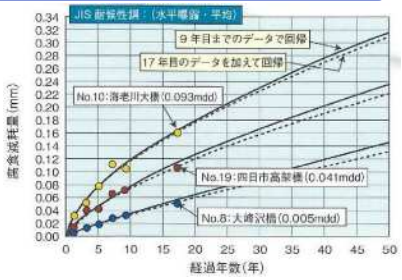


層状剥離さび

良 ← 環境 → 悪

【耐候性鋼材】 腐食量やさび構造と物性の調査

ワッペン試験
腐食速度測定



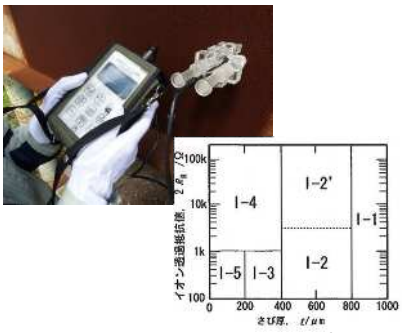
耐候性鋼材の累積腐食減耗量 Y（mm）：

$$Y = AX^B$$

AおよびBは腐食速度パラメータ，Xは暴露期間（年）

環境が厳しい場合は，直線に近くなる

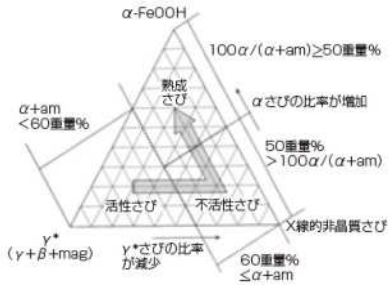
イオン透過抵抗値測定
さびの状態確認



電気化学的交流インピーダンス法により，さび層のイオン透過抵抗を測定

現地測定可

さび成分分析
X線回析



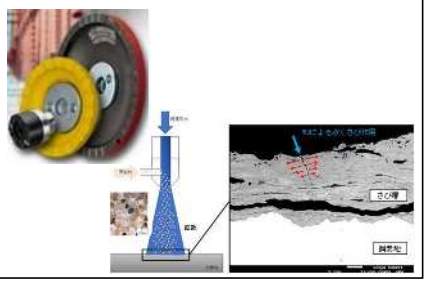
さび層を介した鋼の電極電位を測定

研究室で分析が必要

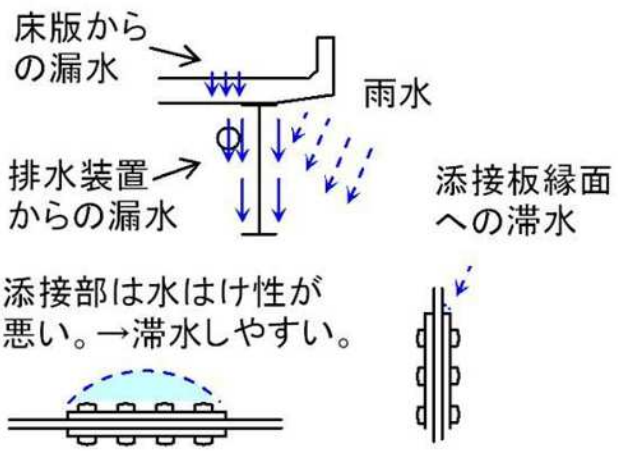
異常腐食した耐候性鋼材



- ビッカース硬さが1000HV を超える硬い錆が形成されることがある
- ダイアモンドツールやアブレイシブ・ウォータージェット工法を用いることがある

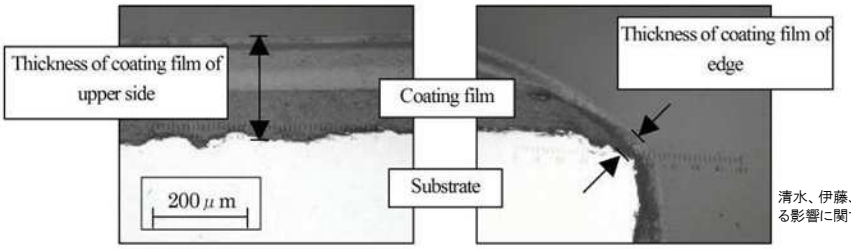


【防食性能に配慮した塗装】 塗装橋の腐食原因



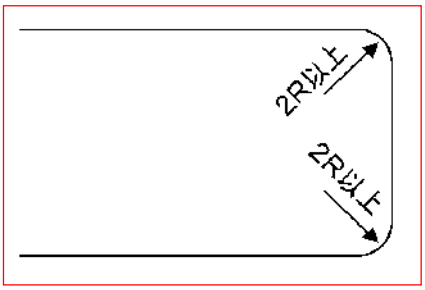


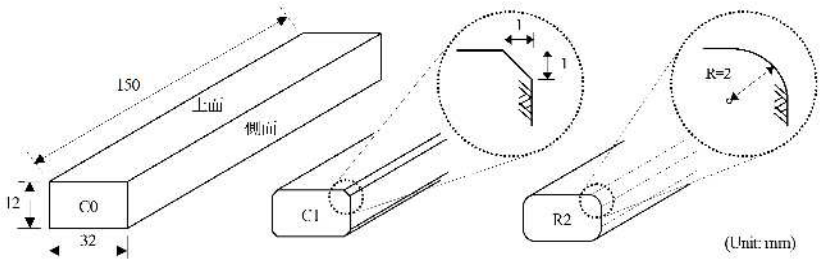
角部は塗装がのりにくい



清水、伊藤、金：角部形状が鋼橋防食性能に与える影響に関する基礎的研究、構造工学論文集

【防食性能に配慮した塗装】 主部材縁端加工

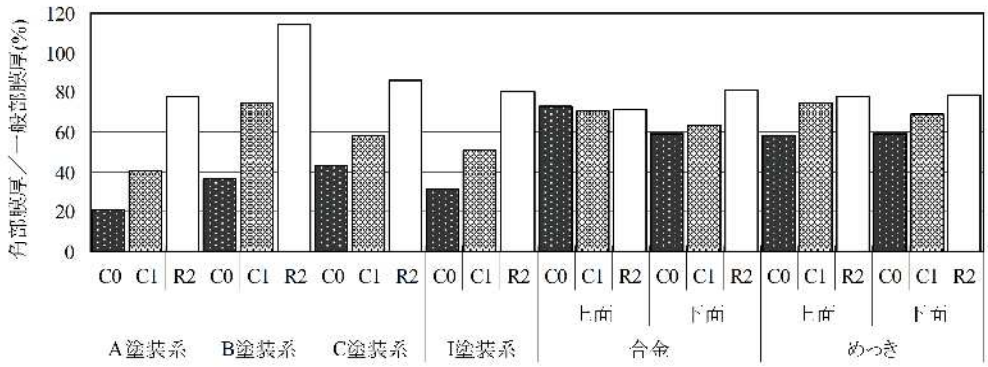




先行塗装



鋼道路橋防食便覧



清水、伊藤、金：角部形状が鋼橋防食性能に与える影響に関する基礎的研究、構造工学論文集

【防食性能に配慮した塗装】 高力ボルト部の防食

（構造的問題）
角部が多い



（施工的問題）
現場塗装しないと
いけない

※トルシア形高力ボルトの場合

ピンテール仕上げ



平滑仕上げなし　平滑仕上げあり

鋼道路橋防食便覧

ピンテール仕上げ専用の工具あり



膜厚対応

一般部

工程		塗料または素地調整程度	標準使用量 (g/m²)	塗装間隔	標準膜厚 (μm)
前処理	素地調整	G～a	—	2hr 以内	—
	プライマー	無機ジンクリッチプライマー	※240	～6ヶ月	(15)
工場塗装	2次素地調整	G～a	—	2hr 以内	—
	下塗 第1層	無機ジンクリッチペイント	※240	1～10日	75
	ミストコート	エポキシ樹脂塗料下塗あるいは厚膜型エポキシ樹脂塗料下塗 (120μm)	※240	1～10日	—
	下塗 第2層	厚膜型エポキシ樹脂塗料下塗 (120μm)	※240	1～10日	120
	中 塗	ふっ素樹脂塗料用中塗	※140	1～10日	30
	上 塗	ふっ素樹脂塗料上塗	※120		25

ボルト頭部

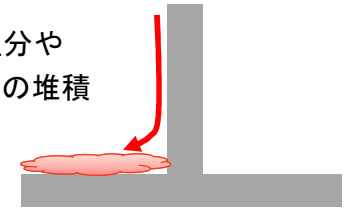
工程		塗料または素地調整程度	標準使用量 (g/m²)	塗装間隔	標準膜厚 (μm)
現場塗装	素地調整	G～c	—	2hr 以内	—
	下塗 第1層	有機ジンクリッチペイント	※240	1～10日	30
	下塗 第2層	〃	※240	1～10日	30
	下塗 第3層	厚膜形変性エポキシ樹脂塗料下塗 (120μm)	(※1～360) ※300	1～10日	90
	下塗 第4層	〃	(※1～360) ※300	1～10日	90
	中 塗	ふっ素樹脂塗料用中塗	(※1～170) ※140	1～10日	30
	上 塗	ふっ素樹脂塗料上塗	(※1～140) ※120		25

遮断層　120μm　→　遮断層　180μm

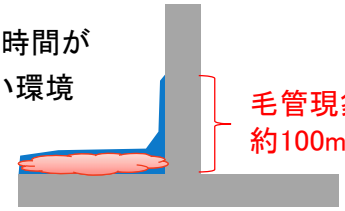
1．5倍

【防食性能に配慮した塗装】 腐食しやすい部位の増塗り

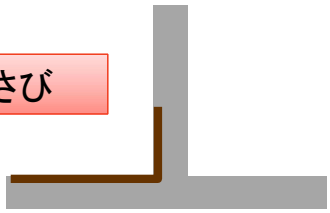
塩分や
ごみの堆積

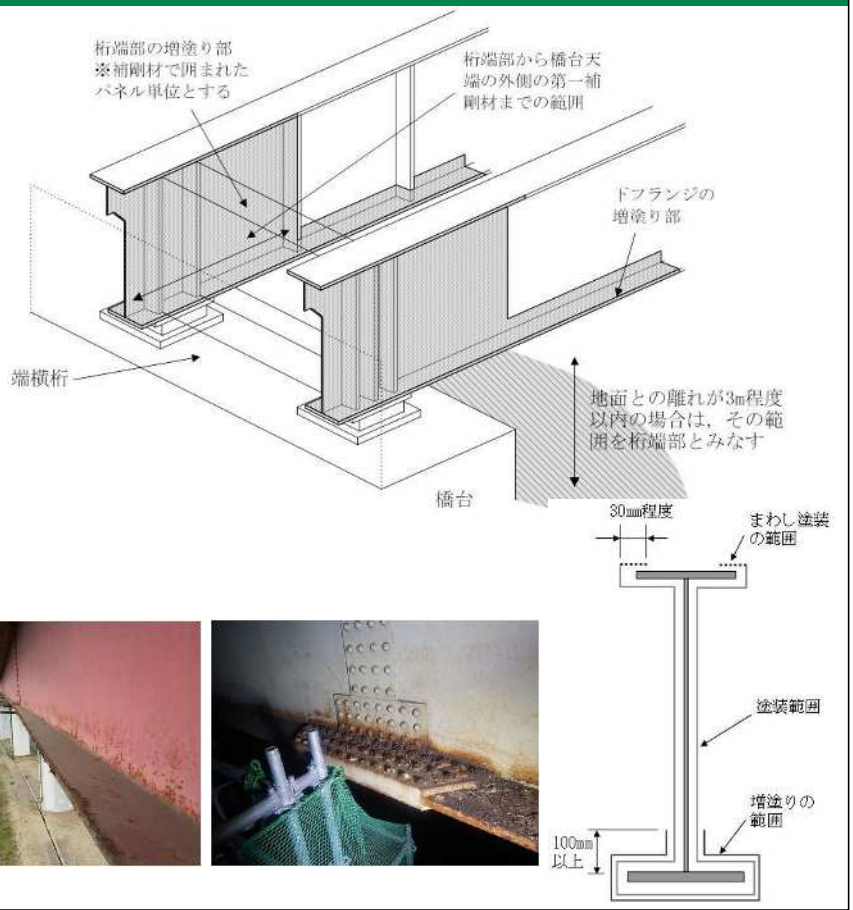


濡れ時間が
長い環境



さび





簡易で効果的な環境改善

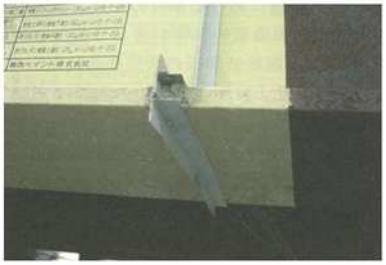
スラブドレーンの
排水処理



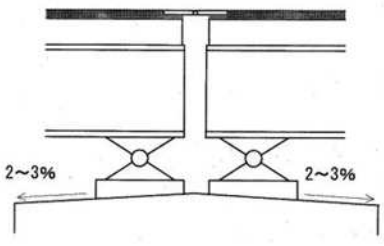
床版からの
排水対策



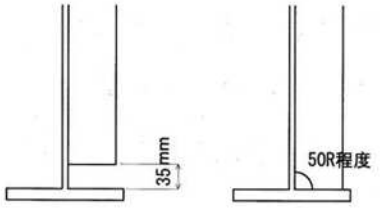
簡易水切りの設置



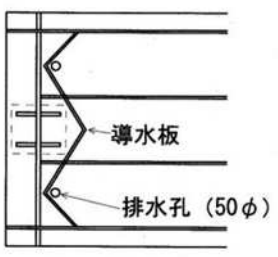
橋台の排水勾配設置



切欠き、スカラップの設置



導水板、排水孔設置



2. のまとめ

- 防食方法は主に「塗装」と「耐候性鋼材」がある
- 防食性能を回復する場合は，「塗装」が用いられる
- 「塗装」では素地調整，防食下地，環境遮断性が重要である
- 「耐候性鋼材」では，腐食が抑制されていることを確認することが重要である
- 各々の防食方法に対して，点検・診断・対策の代表的な方法を紹介した

1. 鋼橋の腐食の問題

2. 防食に対する点検・診断・対策

3. 腐食減肉に対する点検・診断・対策

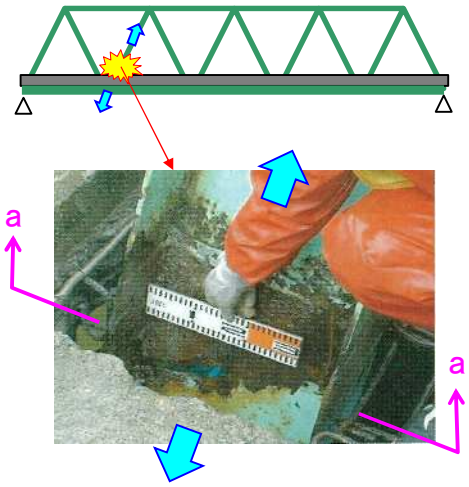
腐食減肉で生じる耐荷性能の低下（引張部材）

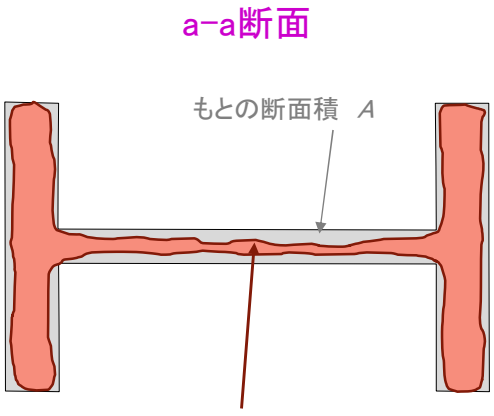
引張部材の耐力

$$P_t = A_e \cdot \sigma_t$$

ここに，P_t :引張部材の耐力，A_e: 有効断面積，σ_t: 許容応力

腐食減肉により，有効断面積A_eが減少していくと，引張耐力が低下していく





腐食減肉で生じる耐荷性能の低下（柱部材）

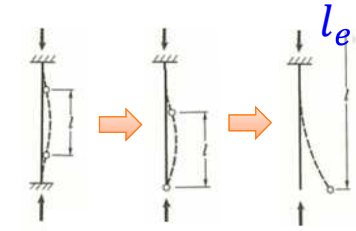
柱部材の耐力（オイラーの座屈荷重）　$P_{cr} = \dfrac{\pi^2 E I}{l_e{}^2}$

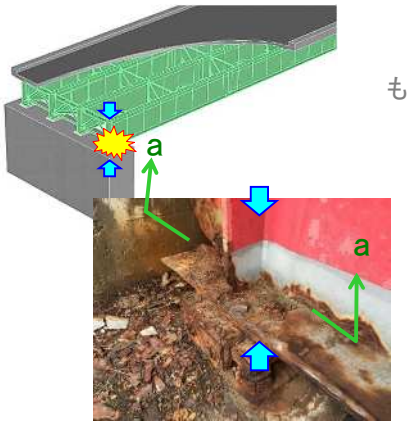
ここに，P_{cr}:柱部材の耐力（オイラーの座屈荷重），E:弾性係数，I: 断面二次モーメント，l_e: 有効座屈長

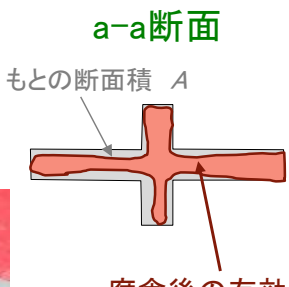
腐食減肉により，断面減少に伴い断面二次モーメントIが減少していく or/and 境界条件が変わり有効座屈長l_eが増加していと，柱部材の耐力が低下していく

境界条件と有効座屈長

$l_e = \beta L$







板厚が半分に減った場合の試算

			① 健全	② 断面半分	③ 境界ピン	④ ②+③
腹板高さ	L	mm	2000	2000	2000	2000
腹板厚		mm	10	5	10	5
補剛材幅		mm	120	120	120	120
補剛材厚		mm	10	5	10	5
断面二次モーメント	I	mm^4	1.3.E+07	6.5E+06	1.3.E+07	6.5E+06
座屈係数	β		0.5	0.5	0.7	0.7
有効座屈長	l_e	mm	1000	1000	1400	1400
座屈耐力	P_{cr}	kN	**25,742**	**12,856**	**13,133**	**6,559**
健全からの耐力低下率			―	**49.9%**	**51.0%**	**25.5%**

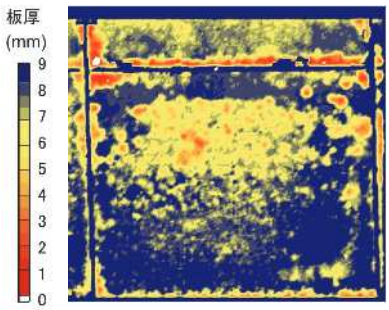
腐食減肉で生じる耐荷性能の低下（板要素）

板要素の座屈耐力
（圧縮やせん断力を受ける場合）　$\sigma_{cr} = k\dfrac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)}\left(\dfrac{t}{b}\right)^2$

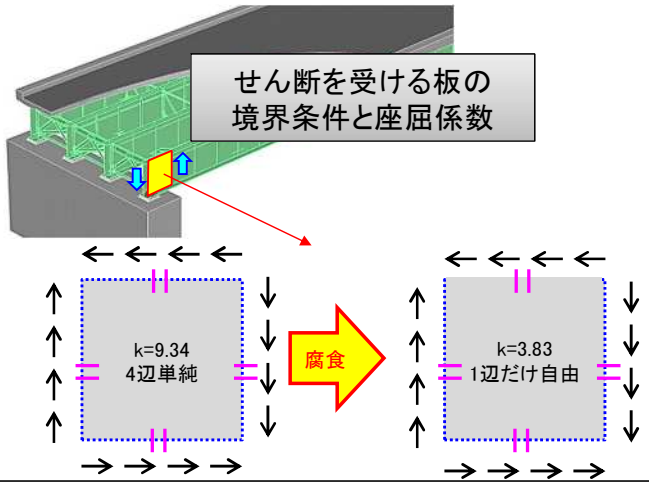
ここに，σ_{cr}:板要素の耐力（座屈応力），ν:ポアソン比，t: 板厚，k: 座屈係数，
b: 板幅

腐食減肉により，板厚tが減少していく or/and 境界条件が変わり座屈係数kが減少していくと，板部材の耐力が低下していく

腐食減厚分布の例



下里ら，土木学会論文集A1，Vol.70，No.3，pp.359-376，2014



板厚が半分に減った場合の試算

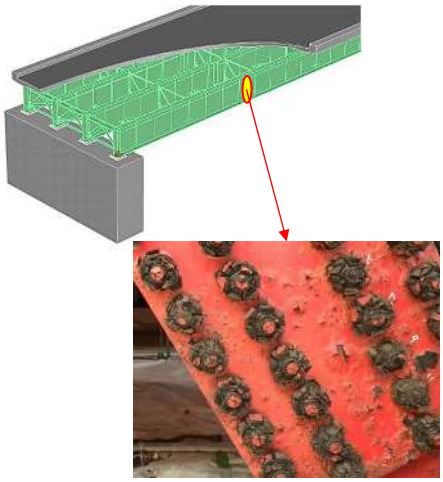
			①	②	③	④
			健全	板厚半分	境界変化	②+③
腹板1パネルの高さ	L	mm	1000	1000	1000	1000
腹板厚	t	mm	10	**5**	10	**5**
腹板1パネルの幅	b	mm	1000	1000	1000	1000
座屈係数	β		9.34	9.34	**3.83**	**3.83**
座屈耐力	σ_{cr}	N/mm^2	**169**	**42**	**69**	**17**
健全からの耐力低下率			－	**25.0%**	**41.0%**	**10.3%**

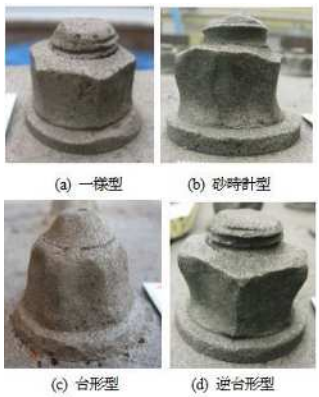
腐食減肉で生じる耐荷性能の低下（ボルト）

摩擦接合継手のすべり耐力　$P_b = \mu \cdot m \cdot n \cdot N$

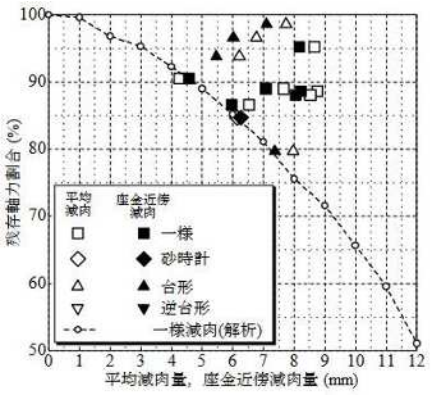
ここに，P_b:すべり耐力，μ:すべり係数，m: 摩擦面数，n: ボルト本数，N:ボルト軸力

高力ボルトは腐食による断面欠損で軸力が低下するため，ボルト継手としての耐力が低下していく





腐食した高力ボルトの残存軸力割合と座金付近の減肉量の関係



下里ら，構造工学論文集A，Vol.59A，pp.725-735，2013

腐食減肉に対する調査

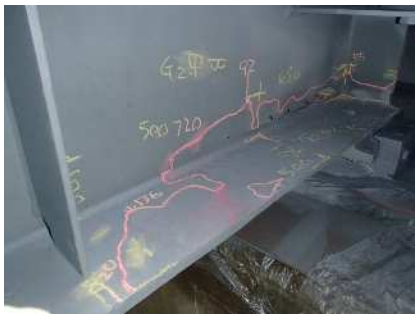
- 腐食損傷と防食機能の測定・計測
  - 構造物の状態の把握
    - 腐食減厚測定
      - ノギスによる測定
      - マイクロメータによる測定
      - デプスゲージによる測定
      - レプリカ法
      - 超音波厚さ計による測定
      - レーザースキャナによる測定
    - 塗膜劣化度測定
    - 防食電位測定
  - 荷重作用および環境作用の把握
    - 劣化因子測定と環境計測
      - 付着塩分量測定
      - 付着物質の分析
      - さびの分析
      - ACMセンサーによる腐食環境の計測
      - ワッペン式暴露試験による腐食環境の計測
    - 活荷重の計測
      - 軸重計による計測
      - BWIM（Bridge-Weigh-In-Motion）

腐食状況の把握例

錆を除去し，デプスゲージで腐食減肉量を把握
（錆の除去が困難な場合はさび厚を把握）

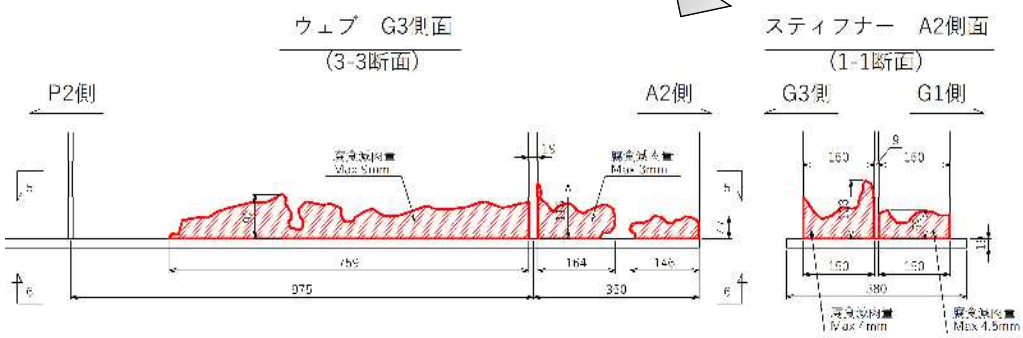


腐食減肉範囲をマーキング

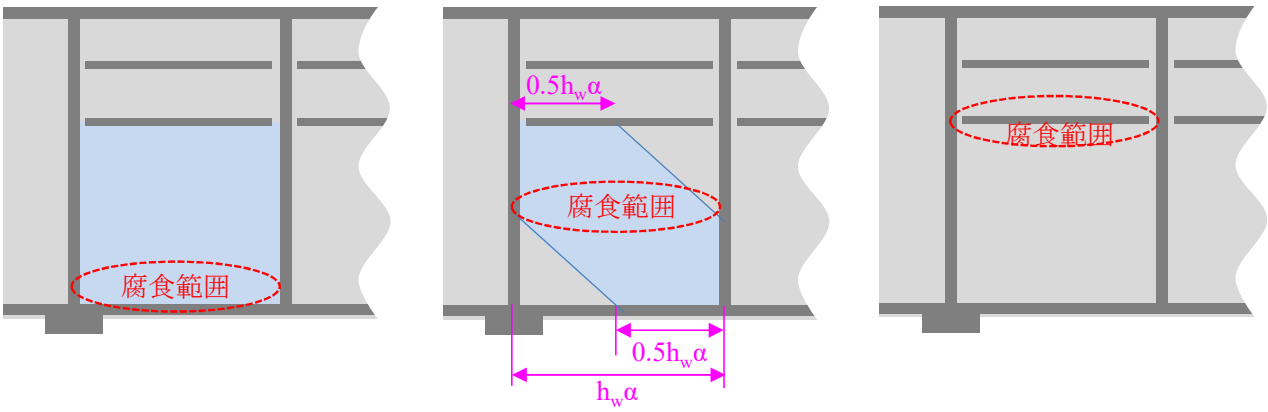




スケッチを作成し，腐食状況を把握



【参考】現有耐荷性能の評価の具体例（桁端の腹板，JSSCテクニカルレポート No.116）



A. 腹板下部腐食タイプ　　B. 腹板中央腐食タイプ　　C. 補剛材近傍腹板腐食タイプ

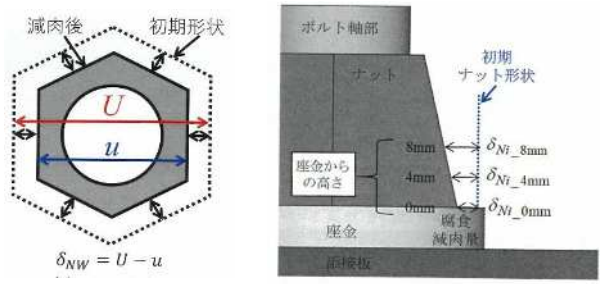
青色部分の現有平均断面積を用いてBasler式で評価

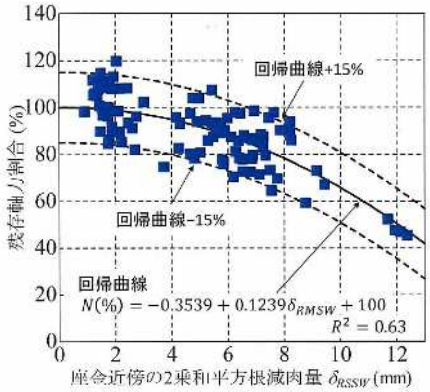
青色部分の現有平均断面積を用い，境界条件を3辺単純支持1辺自由としてBasler式で評価

【参考】現有耐荷性能の評価の具体例（ボルト頭部，JSSCテクニカルレポート No.121）

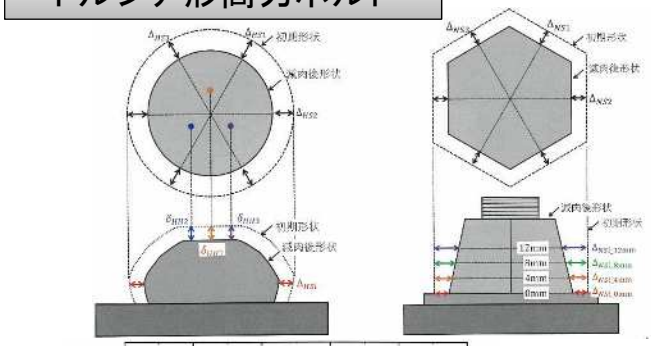
ナットとボルト頭部の座金付近の減肉量の2乗和平方根から現有軸力を推定

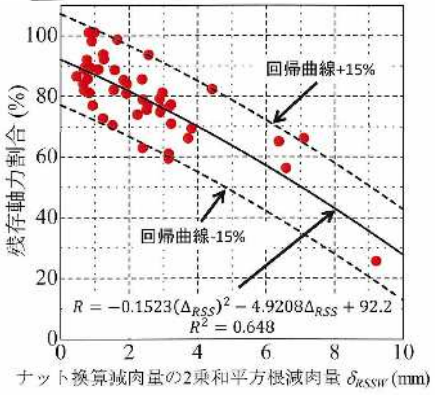
高力六角ボルト





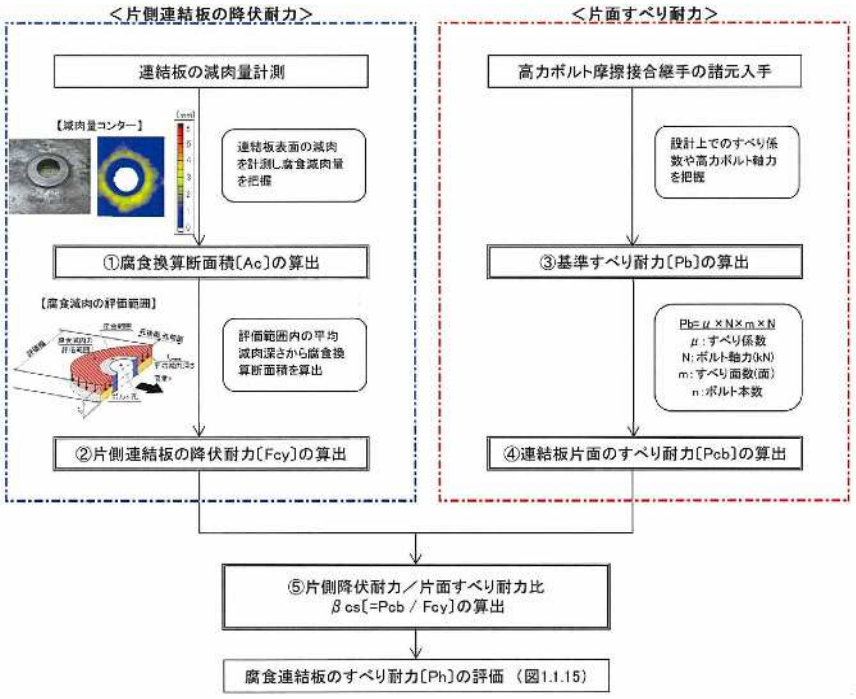
トルシア形高力ボルト

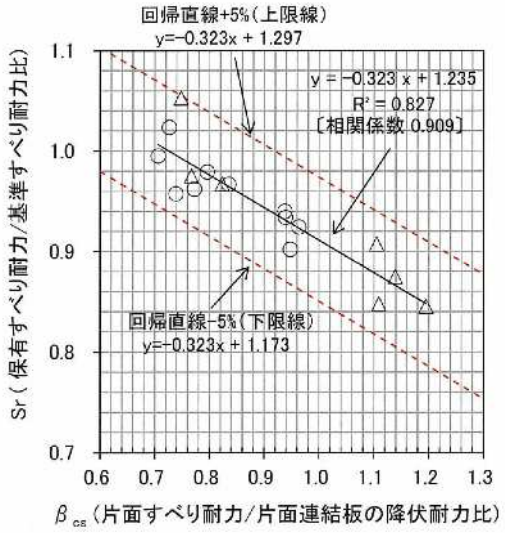




【参考】現有耐荷性能の評価の具体例（ボルト継手の連結板，JSSCテクニカルレポート No.121）

降伏耐力とすべり耐力から現有耐力を推定

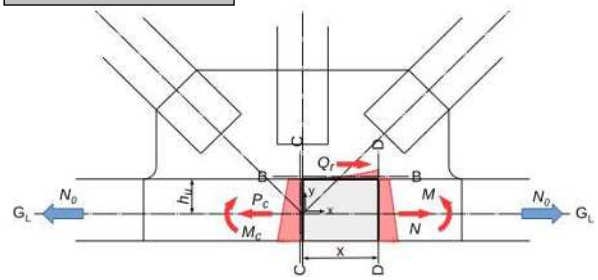




【参考】現有耐荷性能の評価の具体例（トラスの格点）

3D-FEM結果を正とし，部材軸力や断面緒元から簡易にガセットの応力を推定する方法を提案

引張力

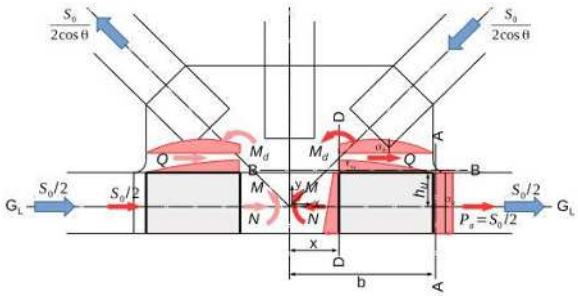


$$\sigma_{n,x}(x) = \frac{N_n}{A_L} - \frac{M_n}{I_L} h_u$$

$$\sigma_{n,y}(x) = 0$$

$$\tau_{n,xy}(x) = \frac{2(P_c - N_0)}{(1+\alpha) b \cdot t(x)} \left\{ \alpha \left(\frac{x}{b}\right) + (1-\alpha) \left(\frac{x}{b}\right)^3 \right\}$$

せん断力



$$\sigma_{s,x}(x) = \frac{N_q}{A_L} - \frac{M_q}{I_L} h_u + \nu \cdot \sigma_y(x)$$

$$\sigma_{s,y}(x) = \begin{cases} \dfrac{p_b}{t(x)} \left(\dfrac{3x}{2a} - \dfrac{x^3}{2a^3} \right) & (-a < x < a) \\ \dfrac{p_b}{t(x)} \left\{ 1 - \gamma \left(\dfrac{x-a}{b-a} \right)^2 \right\} & (a < x) \\ -\dfrac{p_b}{t(x)} \left\{ 1 - \gamma \left(\dfrac{x+a}{b-a} \right)^2 \right\} & (x < -a) \end{cases}$$

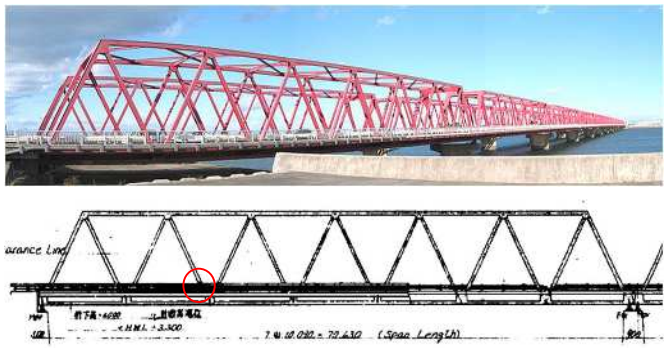
$$\tau_{s,xy}(x) = -\frac{(n+1) S_0}{4(n+\beta) b \cdot t(x)} \left\{ \beta + (1-\beta) \left(1 - \left(\frac{|x|}{b} \right)^n \right) \right\}$$

$$\sigma_{eq}(x) = \sqrt{\{\sigma_{n,x}(x) + \sigma_{s,x}(x)\}^2 + \{\sigma_{s,y}(x)\}^2 - \{\sigma_{n,x}(x) + \sigma_{s,x}(x)\}\{\sigma_{s,y}(x)\} + 3\{\tau_{n,x}(x) + \tau_{s,x}(x)\}^2}$$

岩崎，長井，橘，石川，戎家：腐食減肉の生じたトラス橋の下弦材直上ガセット部の応力評価と維持管理方針の提案，土木学会論文集A1，2018

対策例（鋼板当て板補強）

トラス斜材のコンクリート埋込部において，腐食による破断
→交通規制、ベントでの仮受け
→当て板による補修



損傷状況





補修後

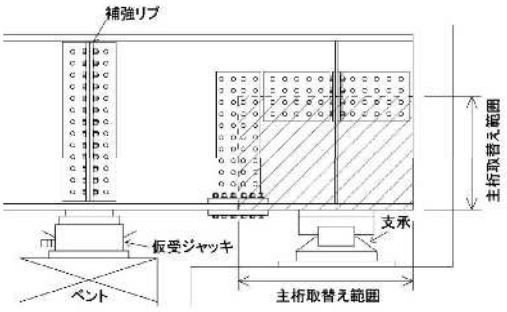


出展：国土交通省ホームページより

対策例（部材取替え）





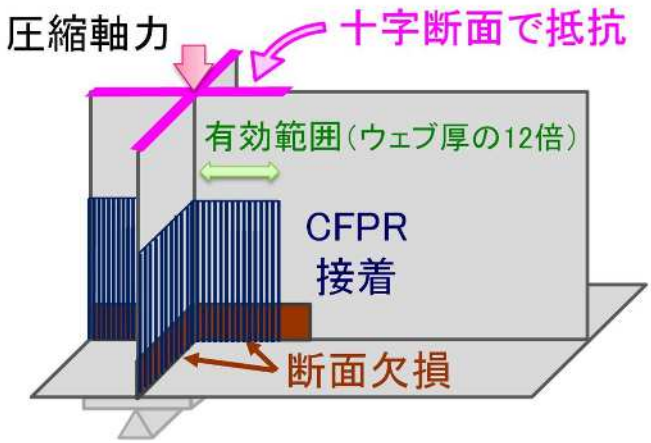


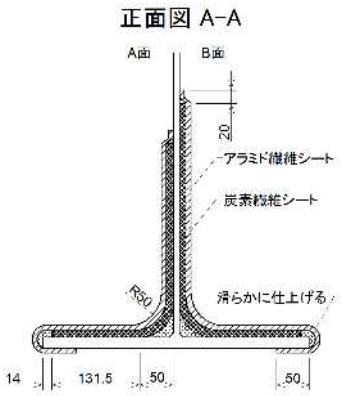


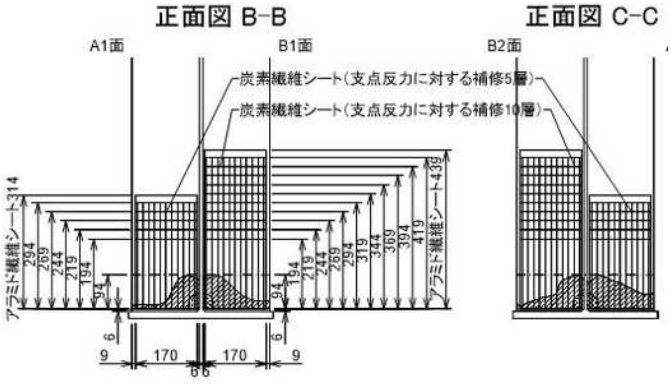
出典：国交省HP

対策例（その他の補強）

炭素繊維シートを用いた支点の補強例







【補修量算定式】
十字断面の最大欠損面積
≦ CFRP断面積（鋼換算）

3．のまとめ　総まとめ

- 腐食減肉は部材の断面が減ることから，耐荷性能が低下する恐れがある
- 耐荷性能を把握するために，減肉範囲や深さを調査する必要がある
- 腐食部位に応じて，耐荷性能を評価する方法が一部提案されている
- 対策として，減った断面を補うことが行われる（鋼板当て板補強，部材取替え）

腐食減肉すると対策が煩雑となるので，防食性能を適切に維持管理するのが望ましい