

鋼鉄道橋の防食設計

池田 学

((公財) 鉄道総合技術研究所)

鋼鉄道橋の防食設計

(公財)鉄道総合技術研究所
構造物技術研究部 鋼・複合構造
池田 学

目次

- (1)鋼鉄道橋の腐食の現状**
- (2)防食設計の基本的な考え方**
- (3)新設構造物の防食**
- (4)既設構造物の防食**
- (5)まとめ**

(1)鋼鉄道橋の腐食の現状

塗装によって長期間防食された事例



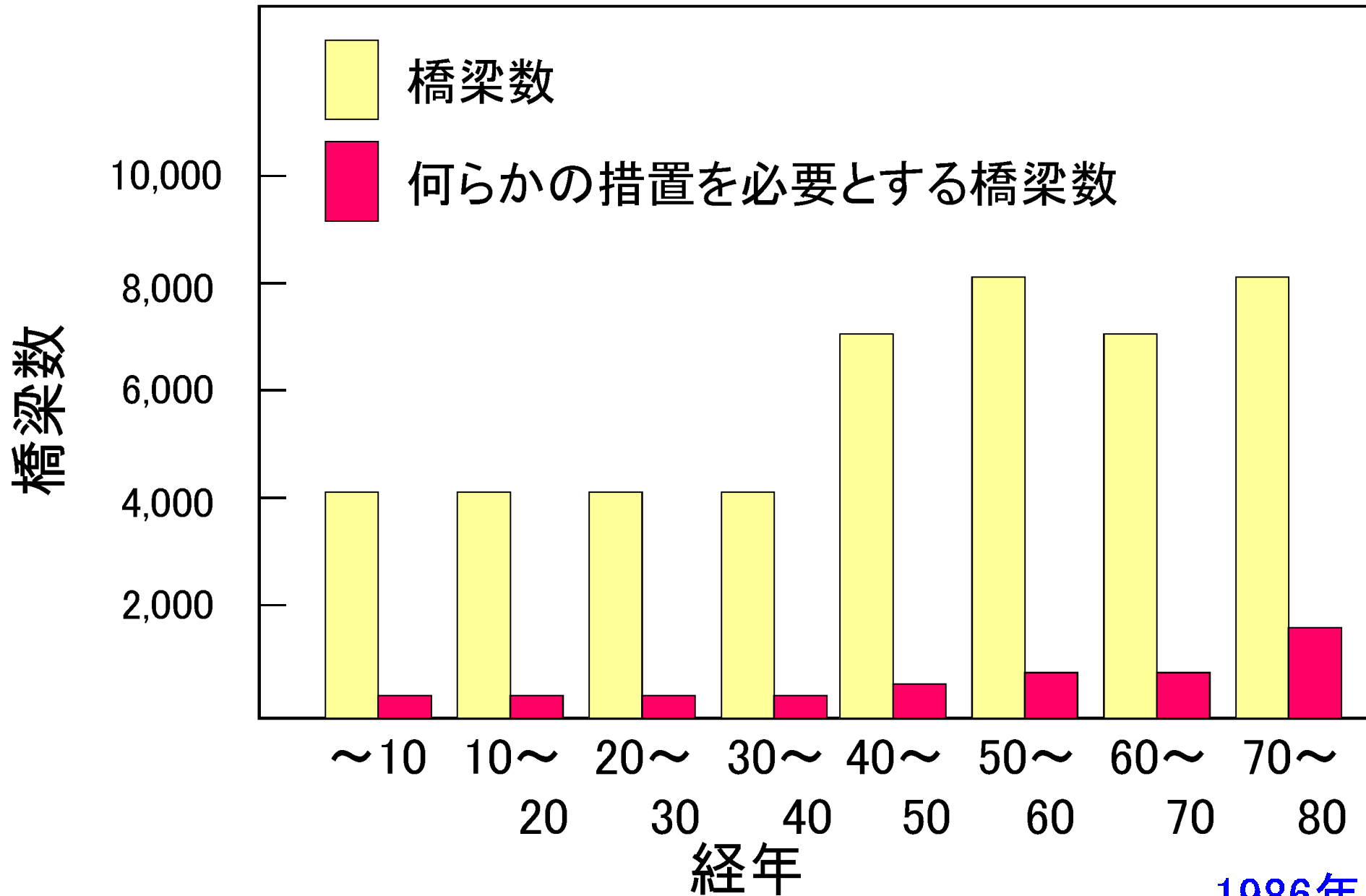
JR山陰本線 余部橋梁
1912年～2010年(約100年間供用)



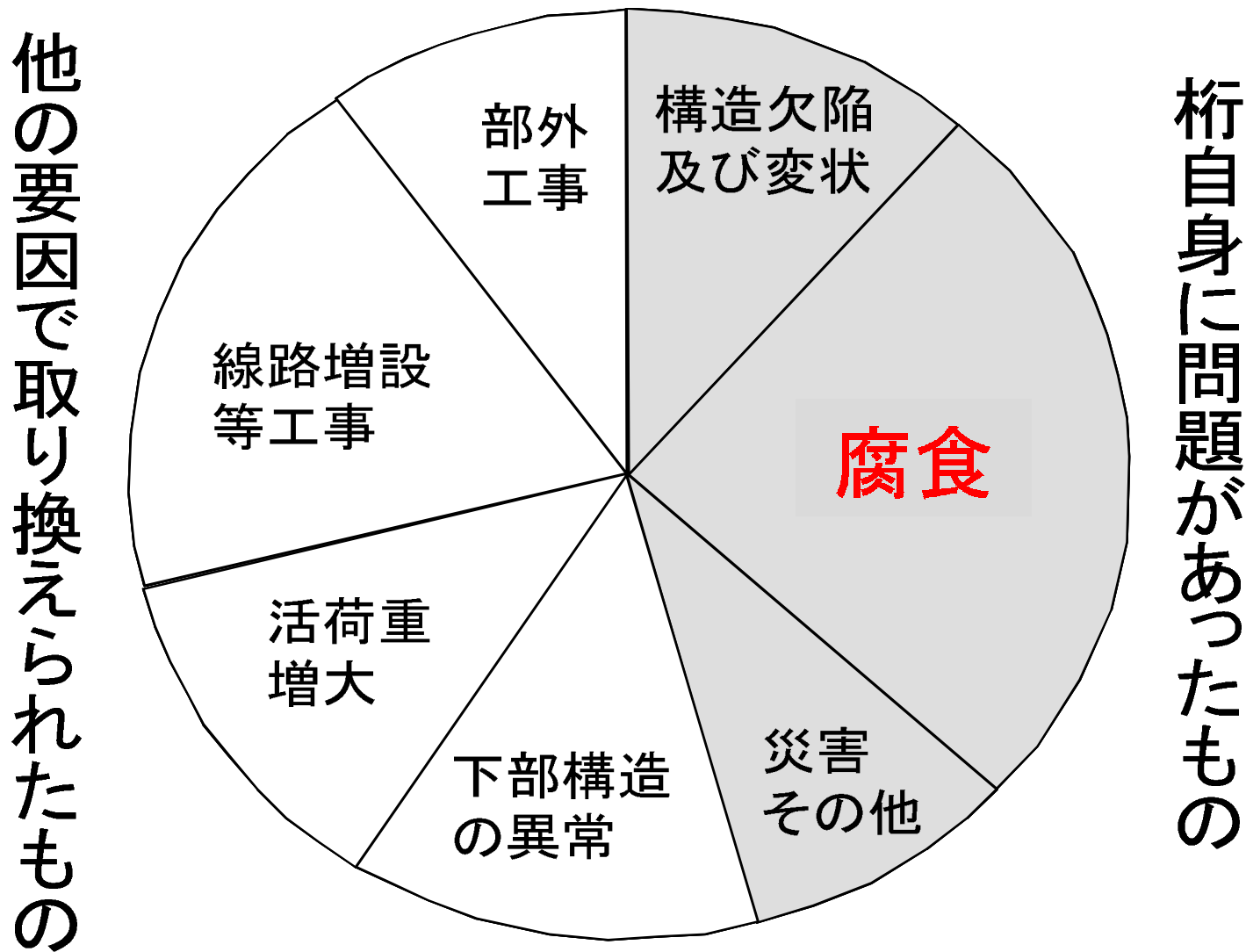
JR関西本線 木津川橋梁
1907年～(100年以上供用)
※1, 3連目

適切な維持管理により、長期間にわたって供用することが可能

鋼鉄道橋の総数と対策数



鋼鉄道橋の現状



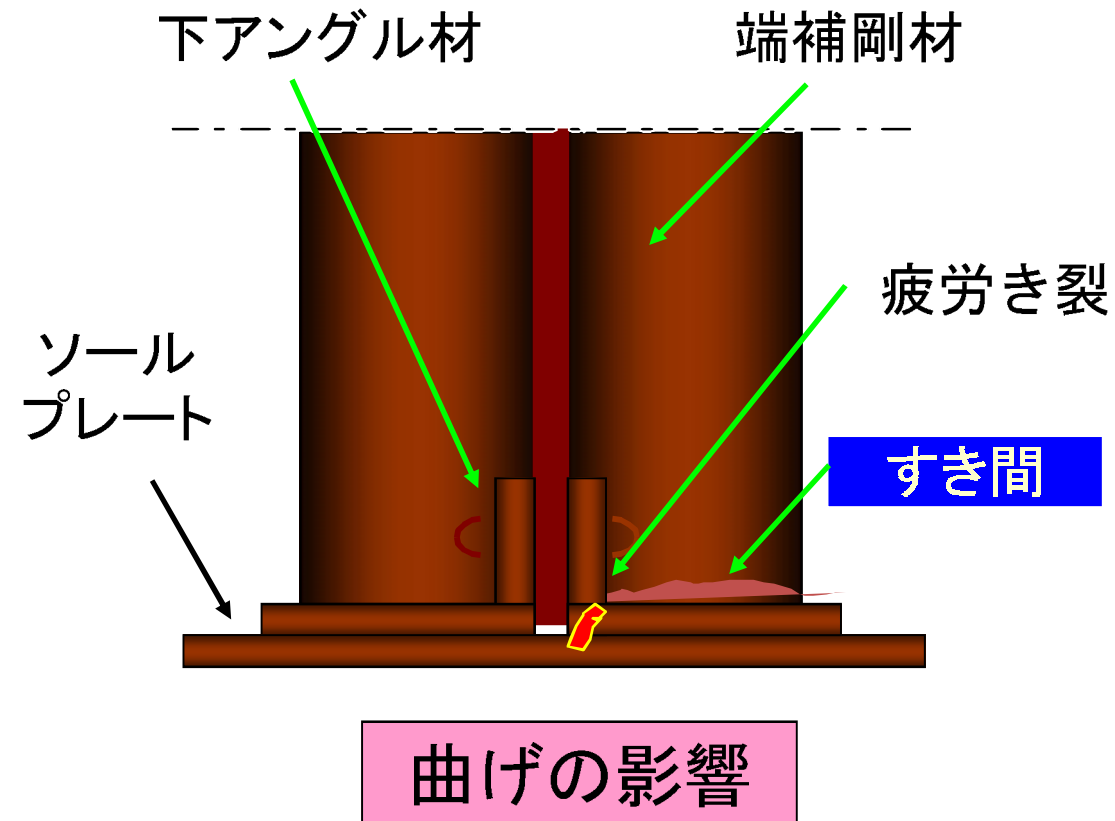
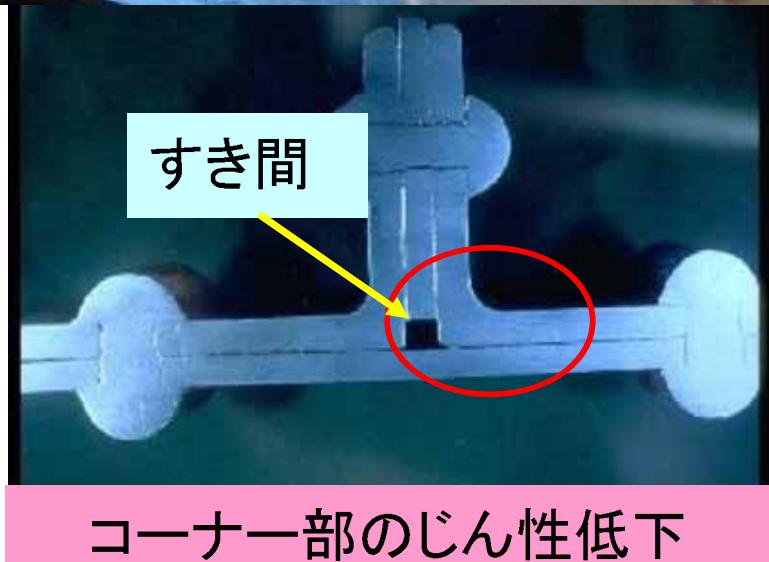
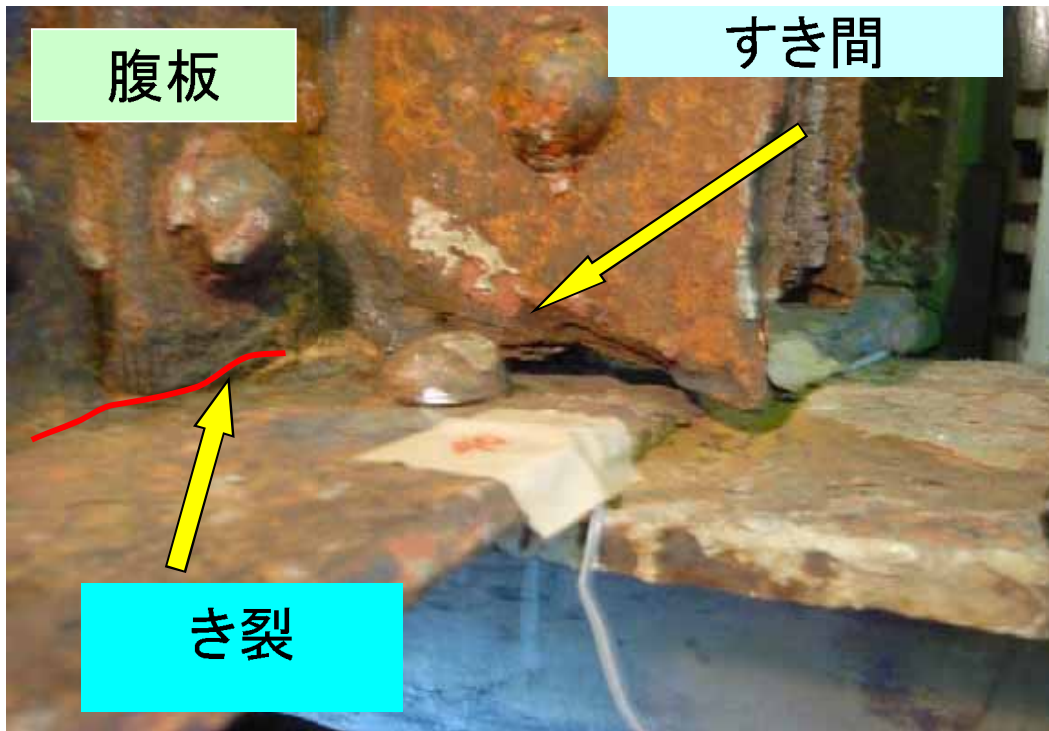
橋梁の取り換え原因の比率（昭和61年以前）

腐食した桁の事例（塗装桁）



まくらぎ下の上フランジの腐食事例多い

腐食箇所から生じた疲労き裂の例



(2)防食設計の基本的な考え方

防食の最適設計とは、「さび発生に伴う直接の損失」と、
「防食のために必要とする費用」の和が最小になるようにすること
「さびのおはなし」(日本規格協会)より

防食とは？

・防食技術 = 対象物の腐食を抑制するための技術

鋼橋の一般的な防食技術

- ・鋼材表面の塗装
- ・金属皮膜の被覆(溶射、めっき)
- ・腐食しにくい材料の適用(耐候性鋼材)



塗装橋梁の例



無塗装橋梁の例

鋼橋の塗装に求められる主な性能

- ① 防食性(長期耐久性)
- ② 景観性(美観性、耐候性)



鋼橋(防食性がメイン)



汎用塗装(景観性がメイン)

技術基準の性能規定化



鉄道構造物等設計標準
(鋼・合成構造物)
[2009年]



鉄道構造物等維持管理標準
(鋼・合成構造物)
[2007年]

設計標準における要求性能の定義

要求性能を設定する時期	要求性能	定義
供用時	安全性	想定されるすべての作用のもとで、構造物が使用者や周辺の人々の生命を脅かさないために保有すべき性能
	使用性	想定される作用のもとで、構造物の使用者が快適に構造物を使用するための性能、および周辺の人々が快適に生活するための性能
	復旧性	想定される作用のもとで、構造物が損傷を受けないための性能、または損傷を受けた場合に性能拡張が容易に行えるための性能
	耐久性	想定される作用のもとで、時間の経過に伴う構造物あるいは部材の性能の低下に対する抵抗性

各要求性能の照査項目の例

要求性能	性能項目	照査指標の例
安全性	耐荷性	断面力, 応力度, 変位・変形
	耐疲労性	断面力, 応力度 疲労に配慮したディテール
	走行安全性	変位・変形, 振動数
	安定性	桁の転倒モーメント, 上揚力
	公衆安全性	ボルト強度 応力度, 断面力 中性化深さ, 塩化物イオン濃度 (合成桁)
使用性	乗り心地	変位・変形, 振動数
	外観	塗膜劣化度, 塗装系の選定 (塗装橋梁) ひび割れ幅, 応力度 (合成桁)
復旧性	損傷	断面力, 応力度, 変位・変形
耐久性	鋼材の耐腐食性	腐食環境, 塗装仕様

防食の方法の例

	防食法	対策例
新設	塗装による防食	塗装、部分塗装
	鋼材による防食	耐候性鋼材、高耐候性鋼材
	構造ディテールの改良による防食	排水勾配、防水処理
	板厚増による防食	腐食しろ
	被覆による防食	めっき
既設	塗装による防食	塗り替え塗装、部分塗装
	ボルト覆いによる防食	ボルトキャップ
	湿潤環境の改善	支承部周りの排水性向上
	[補強、改造]	当て板、支点部の改造
	[部材交換]	上フランジの交換

[] : 構造的な対策で防食が主ではない対策

(3)新設構造物の防食

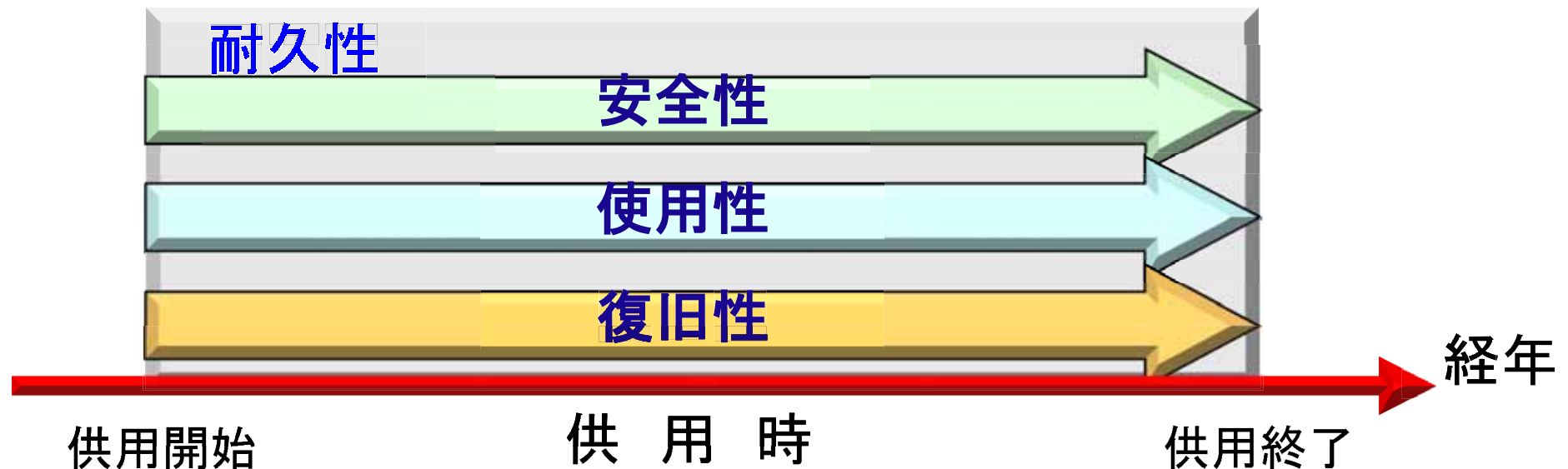
設計標準における耐久性の検討

耐腐食性の検討

- 塗装構造物の耐腐食性の検討
- 無塗装構造物の耐腐食性の検討
- その他の防せい・防食方法を用いた
構造物の耐腐食性の検討

耐久性の検討の位置付け

耐久性は、安全性、使用性、復旧性と密接に関連した性能。



各要求性能の位置づけ

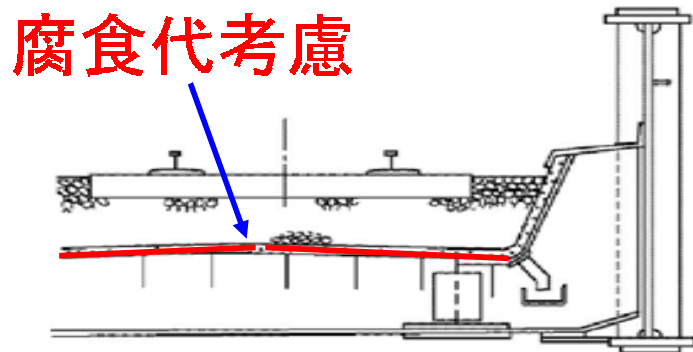
耐久性の検討を行うことにより、安全性、使用性、復旧性の各照査では、性能の経時変化(劣化)を考慮しない照査方法としている。

時間の経過に伴う構造物の性能の低下を一定レベルに留めることを目的に検討を行う。

耐腐食性の検討

- 架設環境や維持管理の方法を考慮して使用する鋼材の材料特性や防せい・防食方法に応じて行う。
- 構造上の配慮が重要
 - ・ 水はけが悪い部位には鋼材の腐食代を考慮
 - ・ 鋼材とコンクリートの境界面では防水対策を実施

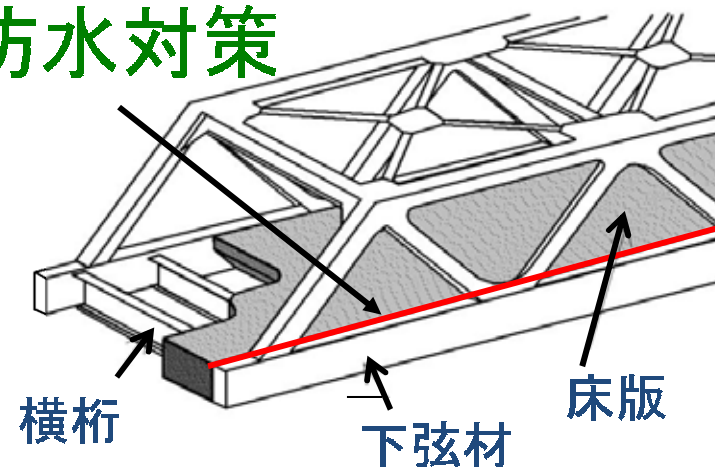
腐食代の例



道床式鋼床版上面: **3mm**
上フランジ上面: **1mm**

防水対策の例 (SRC床版トラス)

防水対策



塗装構造物の耐腐食性の検討

- 架設環境, 維持管理の方法や部位に応じて,
「鋼構造物塗装設計施工指針」等から適切な塗装系の
の選定により行う.

<例>

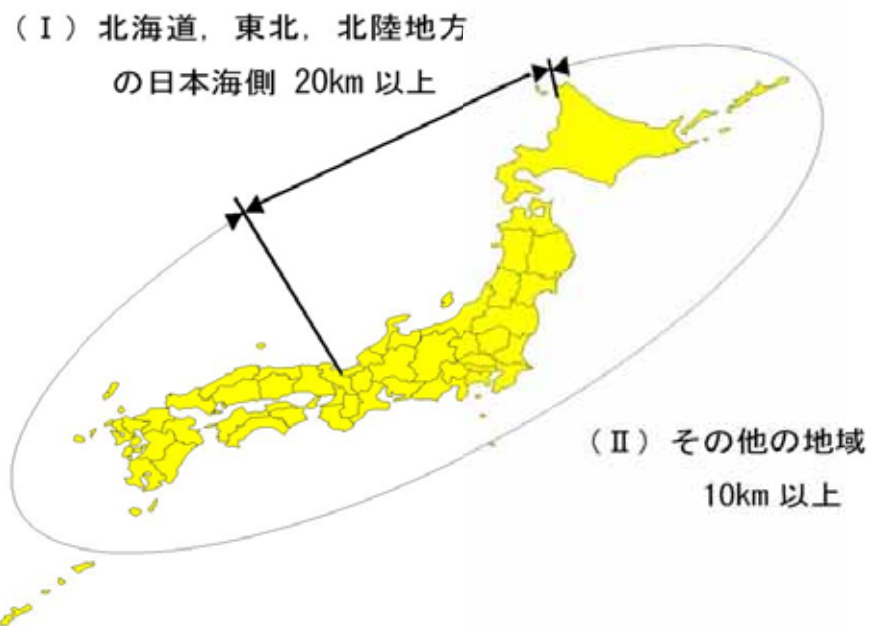
- ・一般外面: **L-2**塗装系
- ・箱桁内面: **LN-2**塗装系



無塗装構造物の耐腐食性の検討

- ▶ 架設環境や維持管理の方法を考慮して、適切な耐候性鋼材の選定により行う。
- ▶ **JIS**耐候性鋼材の選定：過去の実績から離岸距離により適否判定を行ってよい。

- 飛来塩分量を測定して適否判定することを推奨
- 凍結防止剤が散布される場所は注意が必要



地域	離岸距離	適用範囲の目安
(I) 北海道、東北、北陸地方の日本海側	20km 未満	飛来塩分測定を行い、0.05mdd 以下であれば適用してよい
	20km 以上	適用してよい
(II) その他の地域 (沖縄を除く)	10km 未満	飛来塩分測定を行い、0.05mdd 以下であれば適用してよい
	10km 以上	適用してよい

無塗装構造物の耐腐食性の検討

- **JIS耐候性鋼材以外の鋼材**を適用する場合：
飛来塩分量が**0.05mdd**を超える場合：
→ **累積腐食減耗量**による評価

$$Y=A \cdot X^B$$

ここに

Y: **累積腐食減耗量(mm)**

X: 暴露期間(年)

A: 局部環境腐食性指標

B: 保護性さび形成指標

累積腐食減耗量の制限値の目安

50年後	0.3mm
100年後	0.5mm

<事例>

ニッケル系高耐候性鋼材の適用可否を累積腐食減耗により評価

その他の防せい・防食方法を用いた構造物の耐腐食性の検討

➤ 溶融亜鉛めっき・金属溶射

- 架設環境や維持管理の方法を考慮して、適切な付着量や皮膜厚の選定により検討を行う。

留意点

- 海岸近く等の過酷な腐食性環境下では、皮膜の消耗が激しいため注意が必要。
- 構造の細部に十分な配慮が必要。

＜例＞溶融亜鉛めっき：変形に対する構造上の配慮

➤ 最近、亜鉛・アルミ常温溶射＋ポリウレタン塗装の事例あり

鋼構造物塗装設計施工指針

鋼橋の塗装系の種類

鋼構造物用塗装系...各業界、団体等で規定される

「鋼構造物塗装設計施工指針」

① 仕様規定（塗装系記号で区別）

- ・1965年以降における国鉄時代の塗装系の流れを組む

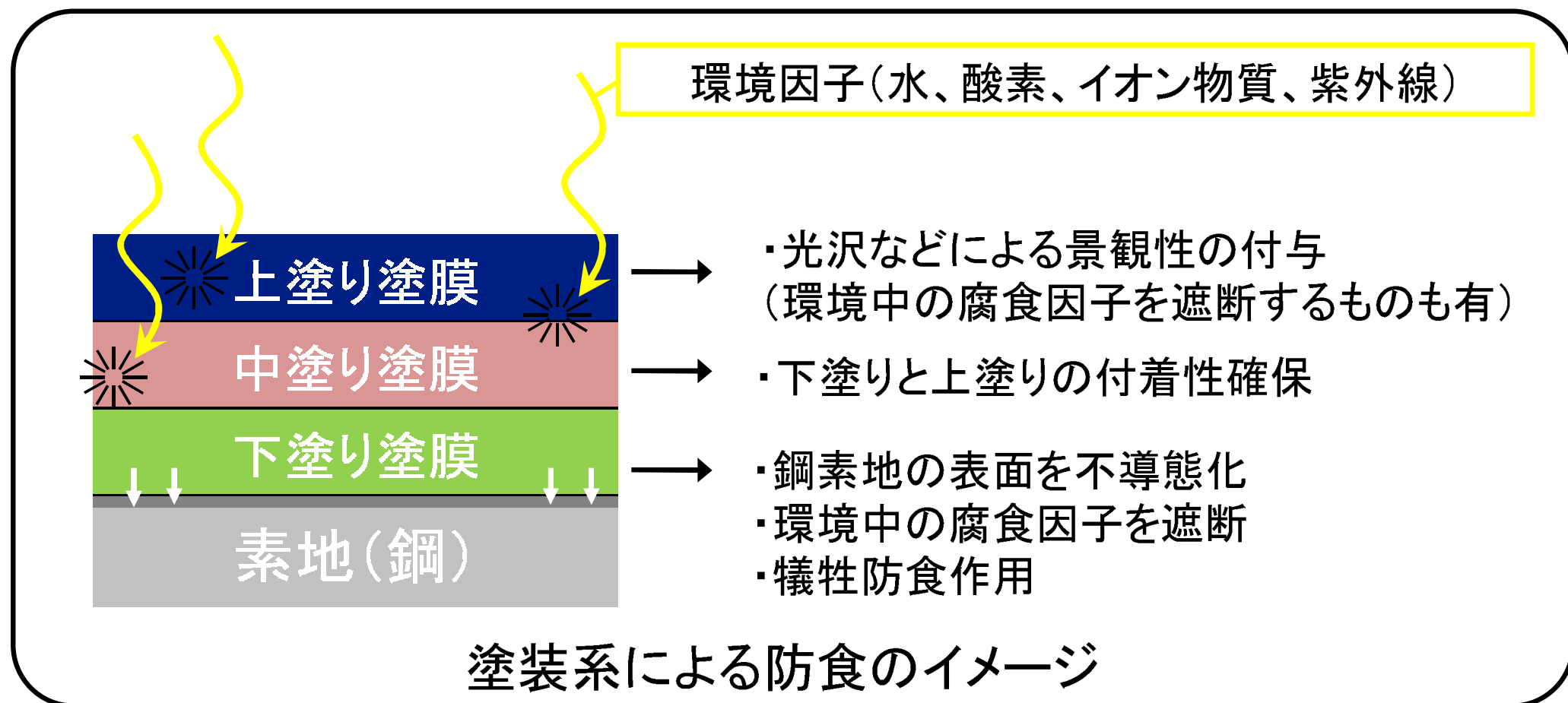
② 性能規定

- ・2005年以降に策定
- ・新規材料の早期導入に寄与



鋼橋の塗装系

目的の異なる塗料の重ね塗りによって防食性(+景観性)を確保
これらを組み合わせたものを塗装系と呼ぶ



下塗り塗料

・下塗り塗料① 鋼素地の表面を不動態化させる塗料

→配合された防錆顔料の作用により鋼表面を不動態化

- ・鉛丹さび止めペイント
- ・鉛系さび止めペイント
- ・鉛・クロムフリーさび止めペイント

2015年現在、JISから削除

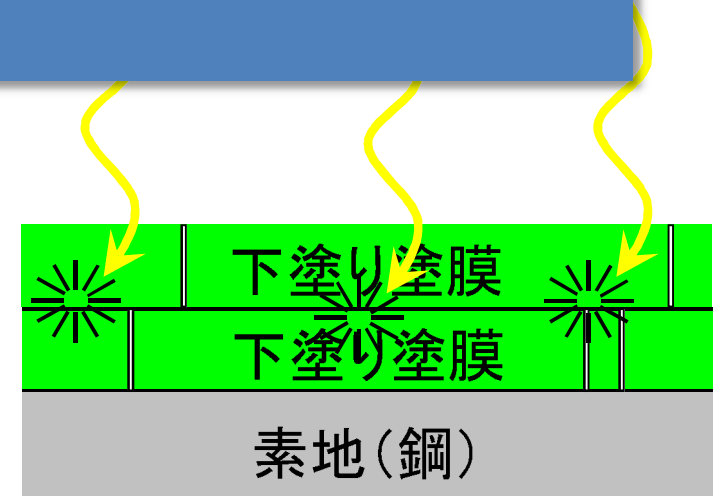
・下塗り塗料② 環境因子の侵入を抑制する塗料

→樹脂の構造を緻密にすることにより水、酸素などの侵入を抑制

- ・エポキシ樹脂塗料
- ・ポリウレタン樹脂塗料



ピンホール
塗料が硬化中に
気泡がはじけた際に
そのまま孔が残る
ことで生成



下塗り塗料

・下塗り塗料③ 犠牲防食作用の期待できる塗料

- ・無機ジンクリッチペイント
- ・有機(エポキシ樹脂)ジンクリッチペイント
- ・(金属溶射皮膜、溶融亜鉛めっき皮膜)

- ・基本的に新設時の塗装仕様として適用
→入念な素地調整が要求されるため

※無機ジンクリッチペイントの塗装作業要件

- ・素地調整程度...ブラスト面
- ・相対湿度...50%RH以上 (一般塗料...85%RH以下)
- ・過度な過膜厚の禁止

上塗り塗料

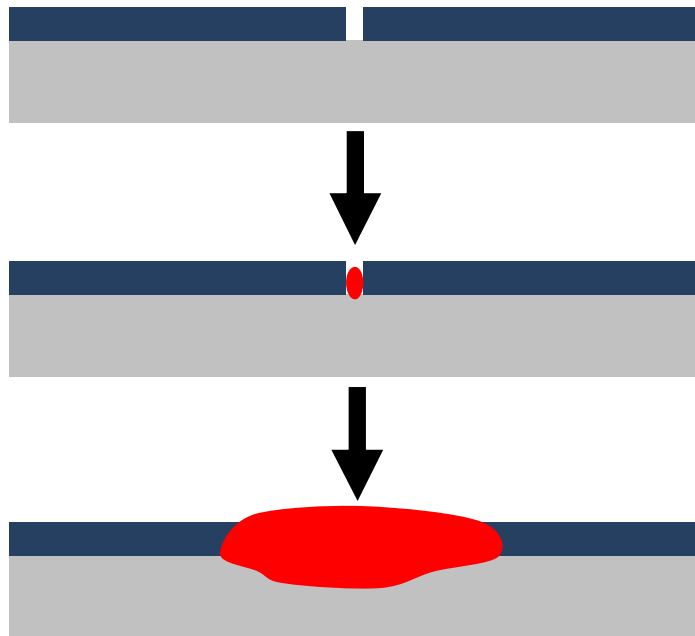
- ・ポリウレタン樹脂塗料
- ・ふっ素樹脂塗料

・景観性は防食性と関係しない

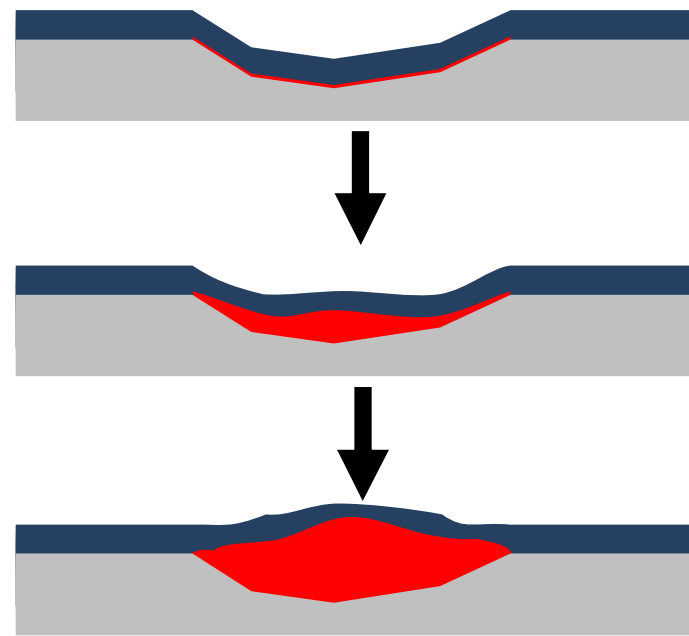
→「光沢性が長期間保持される」=「防食性が高い」ではない

例) 一般的な新設時塗装系の膜厚... 下塗り+中塗り 220 μ m 上塗り 30 μ m

塗膜欠陥部



素地調整不足箇所(塗替え時)



新設時の塗装系

記号	概要	記号	概要
BSU	性能範囲LR相当	LN	箱桁内面用仕様
BMU1	性能範囲MR相当	WW	箱桁・箱型部材内添接部表面仕様
L	性能範囲HR相当 中景観仕様	RR	防錆処理ができないボルト・ナット・平座金用仕様
J	性能範囲HR相当 高景観仕様	S	まくらぎ下仕様
JECO	性能範囲HR相当 高景観・環境負荷低減型仕様	R	桁端部等の局部腐食個所用仕様
ZP1	新設亜鉛めっき面用仕様	WS1	新設耐候性鋼板仕様

塗装に関する要求性能

性能項目（次スライド）

- 塗装系の施工性
- 塗装系の構造物検査性
- 塗装系の構造物補修・補強性
- 塗装系の環境適合性
- 塗膜の耐久性（防食性）
- 塗膜の耐久性（景観維持性）

- ・基本性能：
各構造物に等しく要求
- ・参考性能：
各々の構造物に個別に要求

	性能範囲	適用範囲
LR	5年間程度の短期使用目的の構造物に適用でき、環境にやさしく、一般環境での5年間の使用に耐える。	工事桁、定期交換部材などの短期仕様
MR	15年間以内の中期使用目的の構造物、定期的塗替えの構造物に適用でき、環境にやさしく、一般環境での15年間の使用に耐える。	中期使用の工事桁などや定期的塗替え桁などの中期仕様
HR	15年以上の長期使用の構造物に適用でき、環境にやさしく、一般環境での15年間以上の使用に耐える。	長期仕様

塗装に対する要求性能・性能項目

要求性能	要求内容	項目
構造物に適用できること	鉄桁等の鋼構造物の架設環境及び施工における制約のもとで、鉄桁等の鋼構造物に施工できること	塗装系の施工性
	鉄桁等の鋼構造物の維持管理において実施される検査に悪影響を与えないこと	塗装系の構造物検査性
	鉄桁等の鋼構造物の維持管理において実施される補修・補強作業に悪影響を与えないこと	塗装系の構造物補修・補強性
環境にやさしいこと	現場塗替えにおいて、塗装系の環境・作業者に与える影響が、塗装系 ECO の性能値以下であること	塗装系の環境適合性
一般環境での○年間（以上）の使用に耐えること	塗膜劣化状態の検査で「塗替えの適正時期」と判定されるまでの期間が当該年数以上であること	塗膜の耐久性（防食性）
	塗膜表面の劣化で、塗膜外観（光沢及び色）が景観性維持の観点から耐えられない状態に至るまでの期間が当該年数以上であること	塗膜の耐久性（景観維持性）

塗装系の選択

適用する構造物の要求性能に応じて選択

- 耐久性(塗替え塗装周期)
→(例) 塗装系B or 塗装系T
- 架設環境(腐食性の高い環境ほど高耐久性が要求)
→(例) 塗装系T or 塗装系J
- 構造物構造(外面、内面、端部など)
→(例) 塗装系T or 塗装系R
- 環境影響への配慮(有害成分の低減した塗料)
→(例) 塗装系T or 塗装系ECO
- 新設時、塗替え時
→(例) 塗装系T or 塗装系J

(4)既設構造物の防食

維持管理における検査の種類

初回検査

新設工事，改築・取替工事の完成時に行なわれる検査（初期データを得るために行われる）

通常全般検査

一定期間ごとに定期的に行なう検査（変状を発見するために行われる）

2年を超えない範囲で実施

全般検査

特別全般検査

構造種別や線区の実態に合わせて，必要に応じて定期的に行なう検査（塗装足場を利用した検査等）

個別検査

全般検査・随時検査の結果「健全度A」と判定された場合に行なう検査

随時検査

災害による変状が発生した場合，変状を生じた構造物と同様の変状発生のある場合に行なう検査

維持管理標準における標準的な健全度の判定区分

健全度	構造物の状態
A	運転保安，旅客および公衆などの安全ならびに列車の正常運行の確保を脅かす，またはそのおそれのある変状等があるもの
	AA 運転保安，旅客および公衆などの安全ならびに列車の正常運行の確保を脅かす変状等があり，緊急に措置を必要とするもの
	A1 進行している変状等があり，構造物の性能が低下しつつあるもの，または，大雨，出水，地震等により，構造物の性能を失うおそれのあるもの
	A2 変状等があり，将来それが構造物の性能を低下させるおそれのあるもの
B	将来，健全度 A になるおそれのある変状等があるもの
C	軽微な変状等があるもの
S	健全なもの

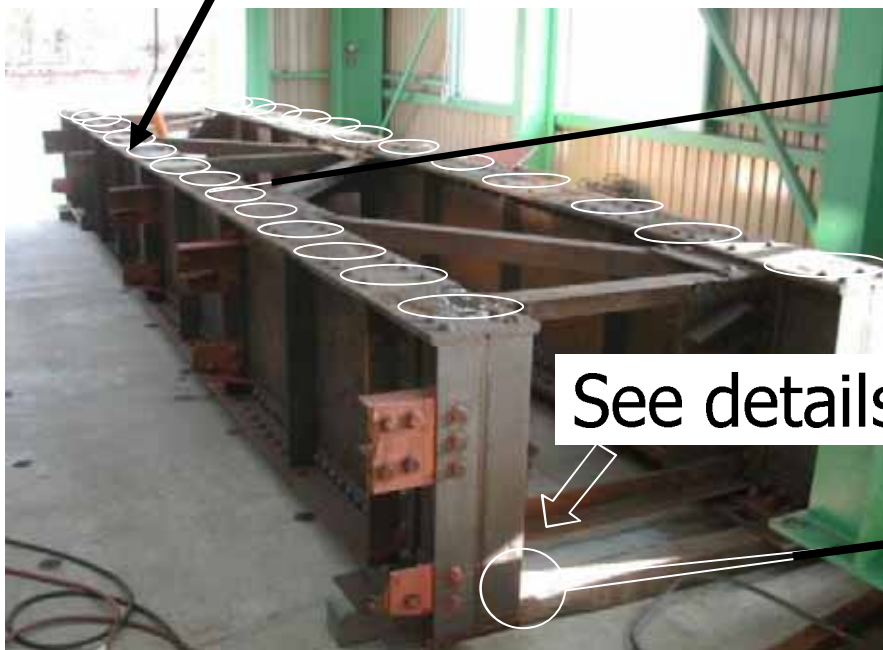
注：健全度 A1，A2，および健全度 B，C，S については，各鉄道事業者の検査の実状を勘案して区分を定めている。

鋼橋の腐食事例

腐食によって取り替えられた鋼鉄道橋

橋梁名	A橋梁
橋梁種別	リベット桁
長さ(支間)	7.063m (6.656m)
桁高	0.8 m
幅	1.487m
架設年	1909 (明治42年)
架設箇所	〇〇県沿岸部

まくらぎ位置



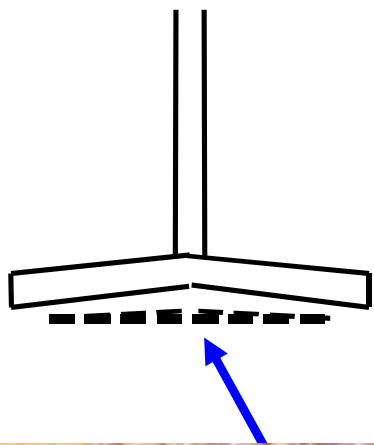
まくらぎ下面の上フランジの腐食状況



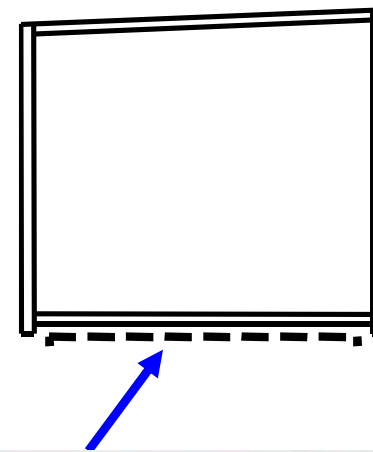
ソールプレート[°]の腐食

耐候性鋼材の適用

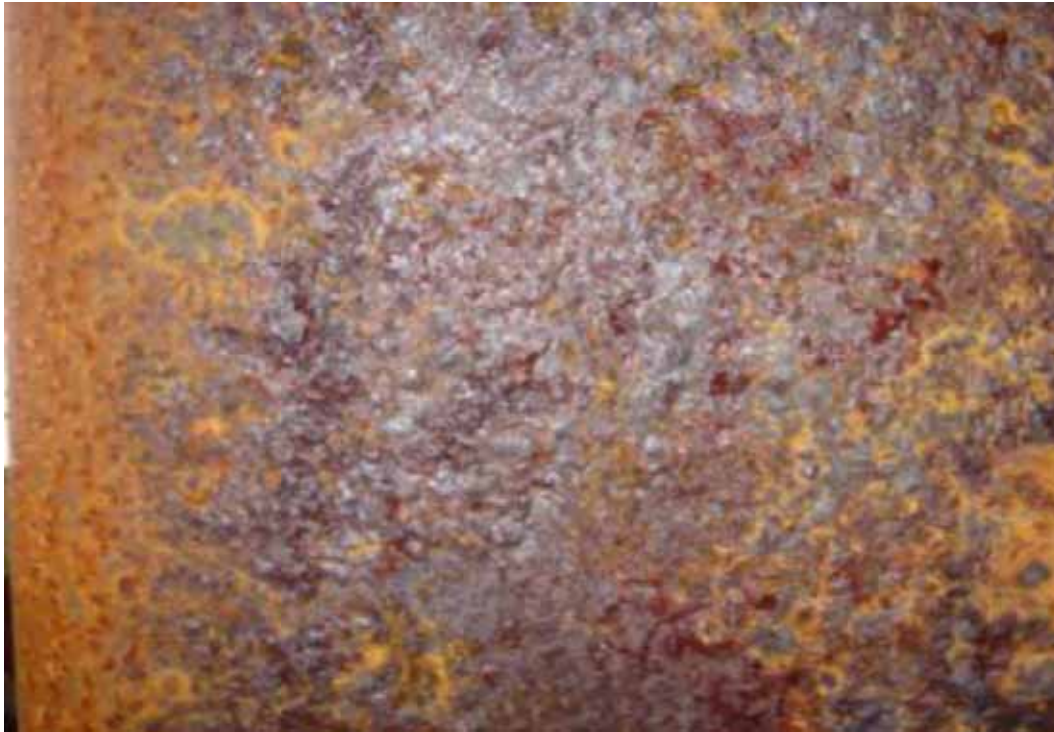
鉄道橋の一部の部材に層状さびが発生



うろこ状さび
層状さび



耐候性鋼材のさび



うろこ状はく離さびの事例



層状はく離さびの事例

耐候性鋼材のさび外観の状態と健全度判定の目安

外観の状態	さび厚	健全度の判定例
層状剥離のあるさびが発生している	800 μ m 程度以上	B
架設後 3 年程度までに、うろこ状剥離のさびが生じている。	400~800 μ m 程度	
架設後 3 年以降、外観粒径 1~25mm 程度のうろこ状剥離のあるさびが生じている		C
平均外観粒径 1~5mm 程度のさび	400 μ m 程度未満	S
平均外観粒径 1mm 程度以下で均一なさび		
腐食が進まずさびも薄い	200 μ m 程度未満	

腐食断面の耐力の評価（耐荷性の照査）

現有応力比率による評価

$$\text{現有応力比率 (SR}_s\text{)} = \sigma_m / \sigma \times 100\%$$

σ_m : 保守限応力度

鋼材の製作年代や溶接/非溶接等から設定

σ : 部材に発生する最大応力度

腐食した断面（最小断面）で計算

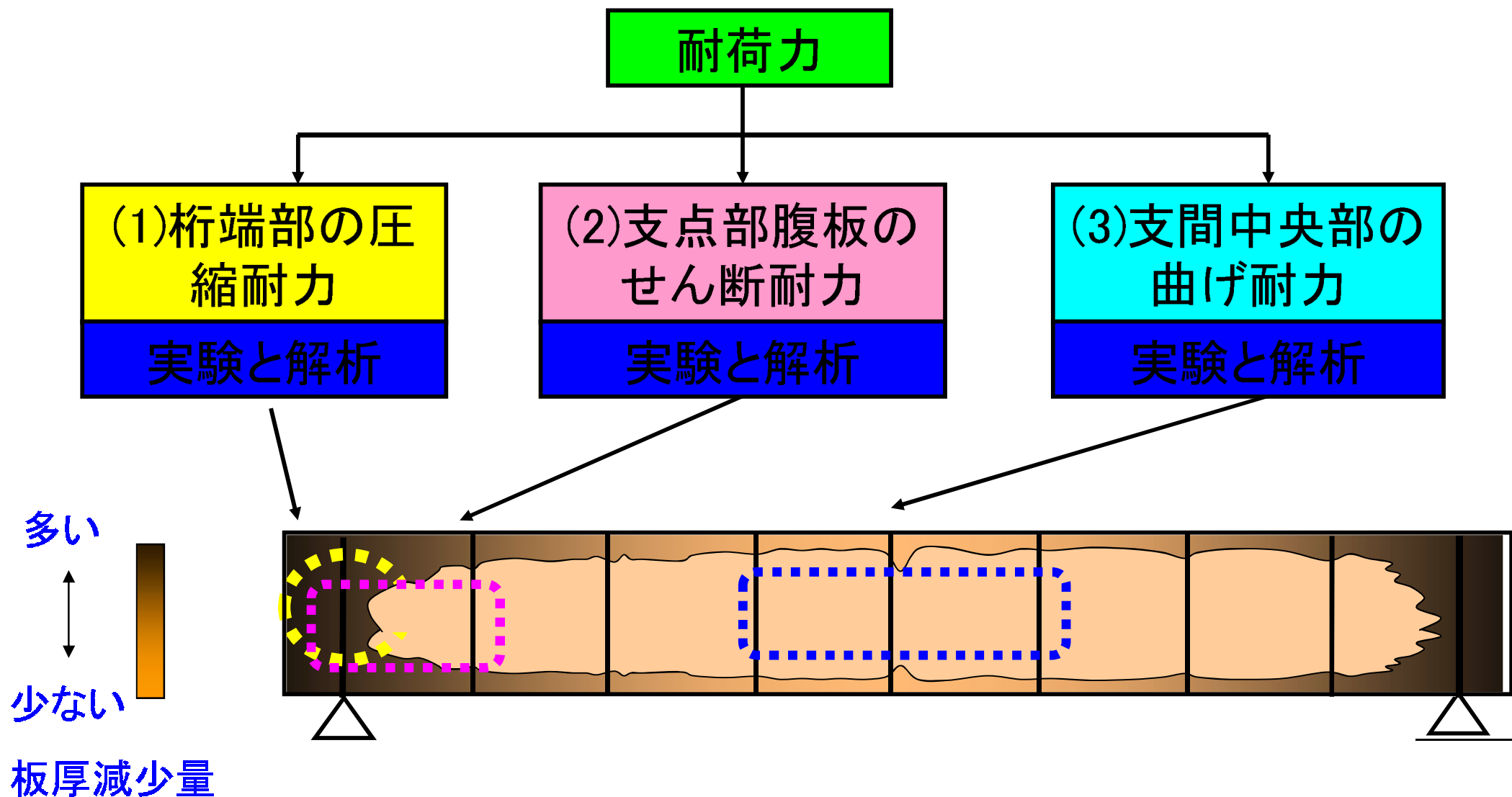
評価

SR_s ≤ 100% AA

100 < SR_s ≤ 120% A1 or A2

※設計時と同様に部分係数による評価も可

腐食断面の耐力の詳細評価（耐荷性の照査）



代表的な腐食マップ

支間中央部の曲げ耐力

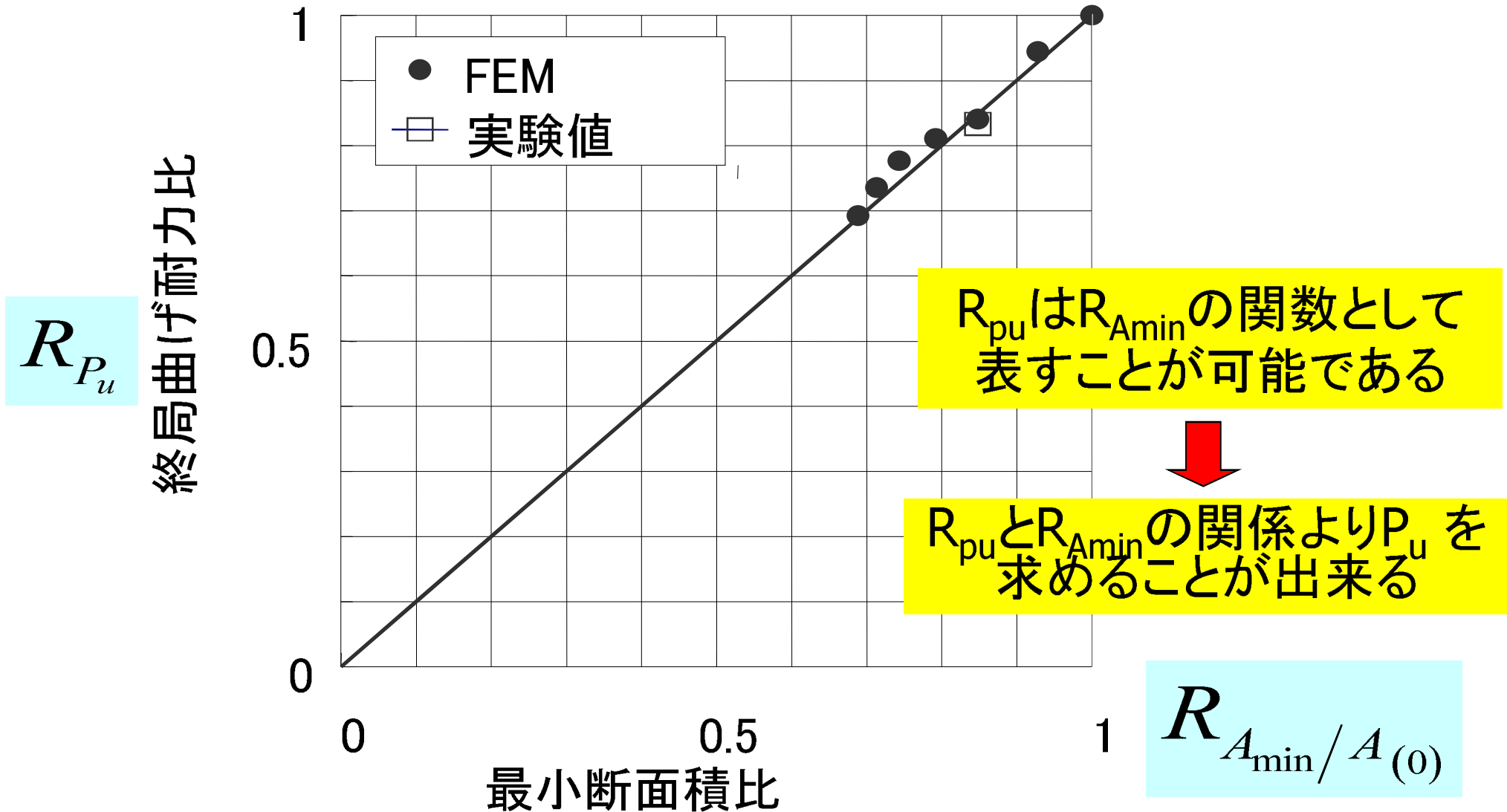
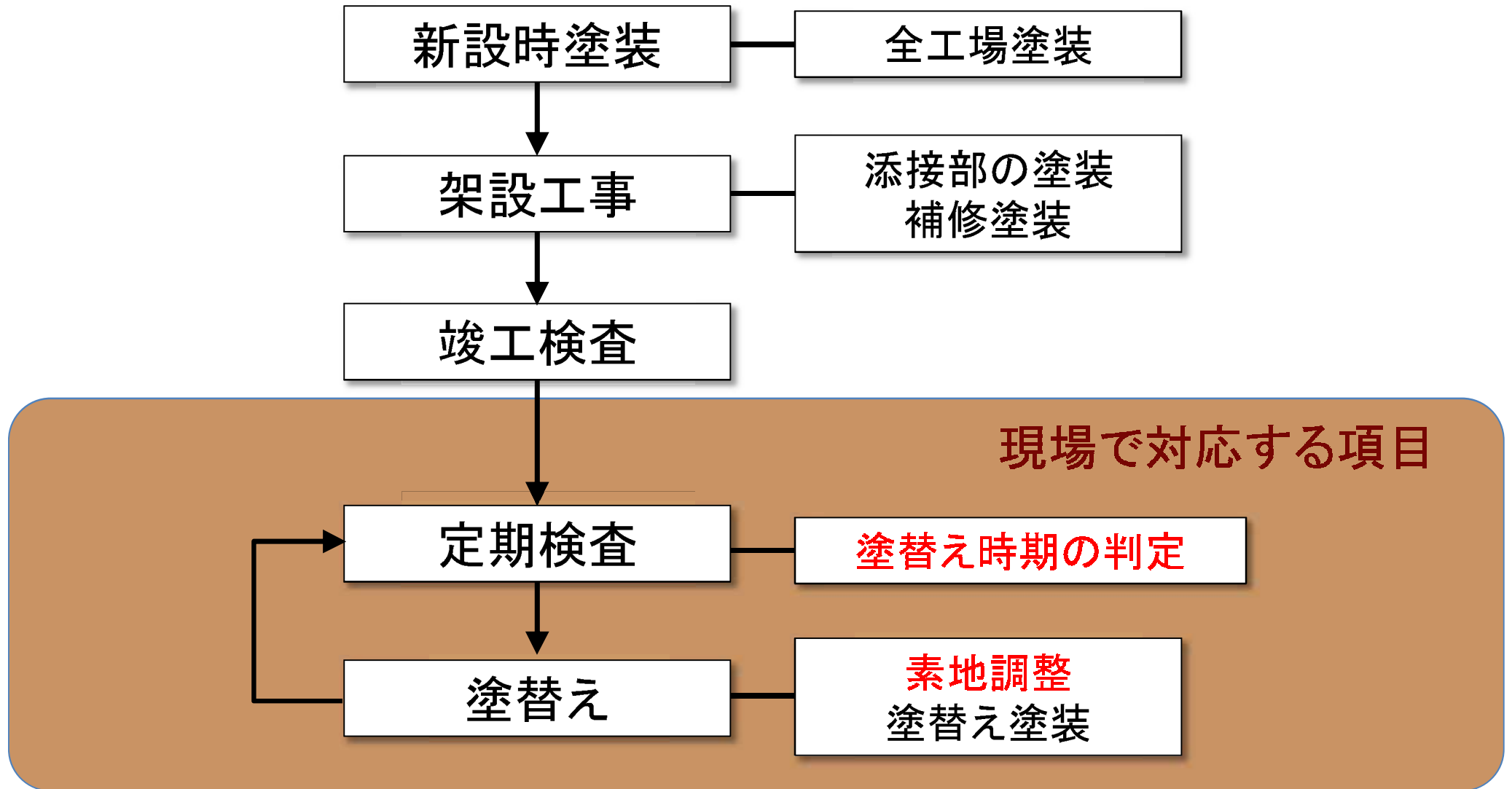


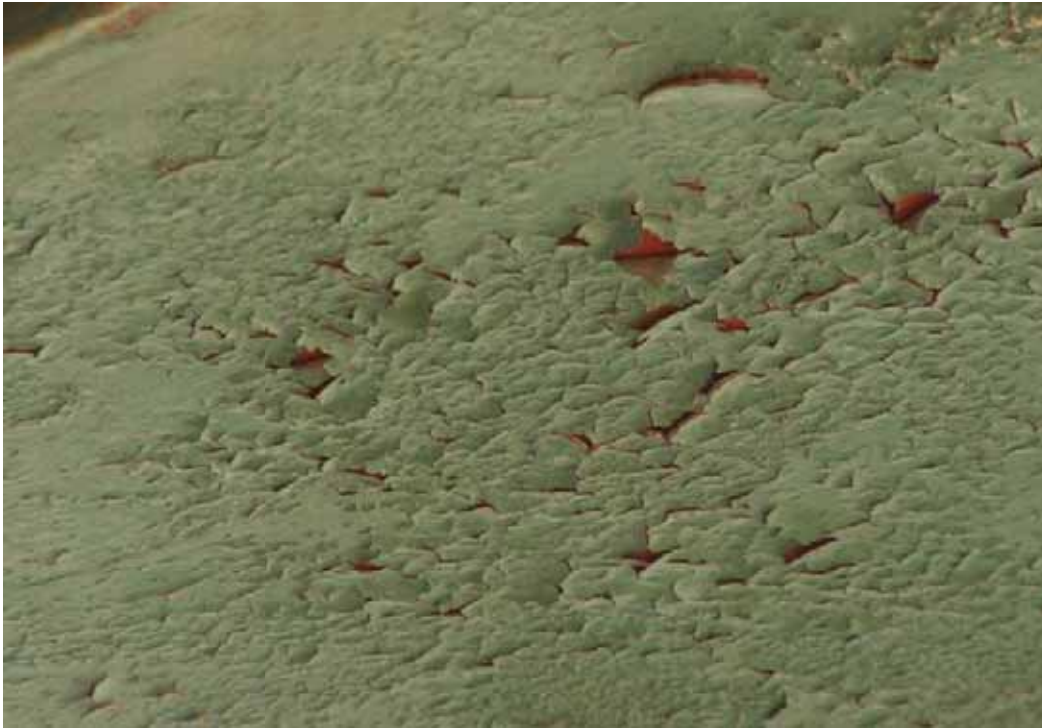
図 R_{P_u} と $R_{A_{min}}$ の関係

鋼鉄道橋の維持管理（塗装）



腐食した塗装桁

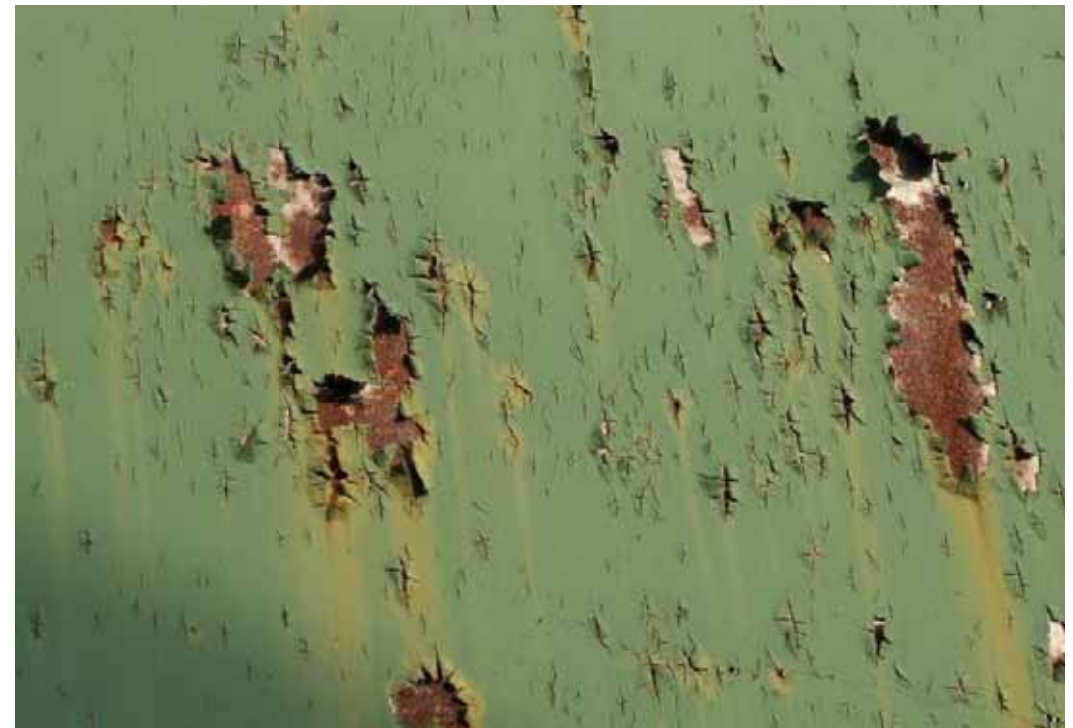
塗膜われ、はがれで高い劣化度となった例



塗膜われ、はがれ

架設後77年、塗替え後18年

離岸距離6km



塗膜われ、はがれ

架設後86年、塗替え後20年

離岸距離1km

塗替え時期の判定

鋼構造物塗装設計施工指針に記載される塗替え時期の判定方法

・**判定法P**: 鋼鉄道橋全体を塗替える場合に使用

耐久性の低い塗装系(=腐食性の低い環境に使用)を適用した鋼鉄道橋に適用することを原則

鋼材を腐食させないことを前提とした判定法

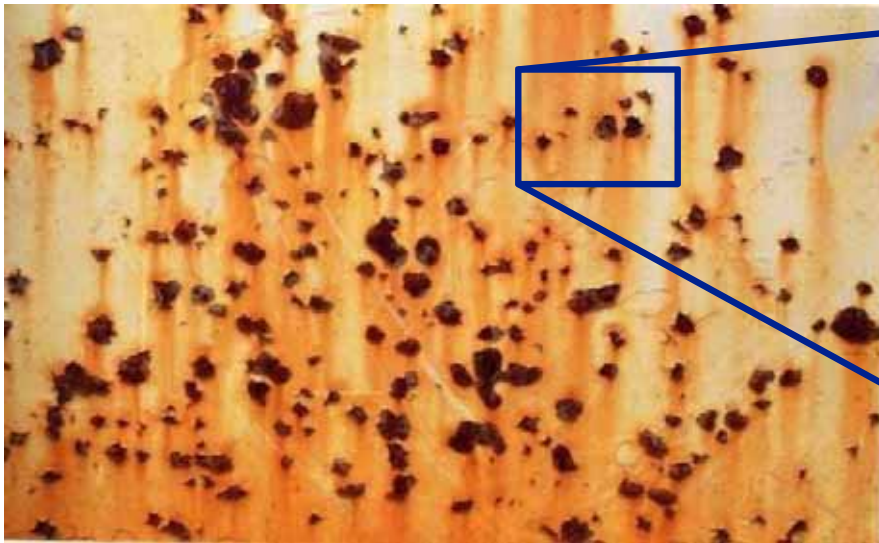
・**判定法Q**: 鋼鉄道橋を部分的に塗替える場合に使用

耐久性の高い塗装系(=腐食性の高い環境に使用)を適用した鋼鉄道橋に適用することを原則

(部分的に)腐食した鋼材に対する塗替え判定法

一般的には判定法Pが使用されている

素地調整の原則(さび部)



素地調整前



素地調整後

さびを完全に除去することを原則

遵守されない場合…期待される年数以下での塗膜劣化、腐食が発生

素地調整の原則(劣化塗膜部)

活膜以外の劣化塗膜（工具で容易に脱落する塗膜）を除去



除去しなければならない劣化塗膜

活膜の残存程度に応じたケレン種別の設定

- 替ケレン-1: さびおよび塗膜を70%以上除去(活膜はほとんど無い) → 劣化度P-I に対応
- 替ケレン-2: さびおよび塗膜を30~50%除去 → 劣化度P-II に対応
- 替ケレン-3: さびおよび塗膜を15~25%除去 → 劣化度P-III に対応
- 替ケレン-4: さびおよび塗膜を5%以下(ほとんどの塗膜が活膜) → 劣化度P-IV に対応

塗替え時の塗装系

記号	概要	記号	概要
BMU1	性能範囲MR相当	L	性能範囲HR相当 部分塗替え仕様
BMU2	性能範囲MR相当	J	性能範囲HR相当 部分塗替え仕様
ECO1	性能範囲HR相当 環境負荷低減型仕様	W	箱桁内面仕様
ECO2	性能範囲HR相当 環境負荷低減型仕様	S	まくらぎ下仕様
G	性能範囲HR相当	R	局部腐食個所用仕様
T	性能範囲HR相当	ZP	劣化亜鉛面用仕様
		WS	劣化耐候性鋼板仕様

各塗装系の概要(1)

塗装系BMU2

- ・中期耐久型塗装系
- ・定期的な塗替えを行なう場合に適用することを想定
- ・旧塗膜が過大膜厚となった場合に適用することを想定
- ・新幹線橋梁での使用実績有り

塗装系	工程	塗料名	標準使用量 (g/m ²)	区分 ^{注2}	塗装間隔 (20°C)
BMU2-7 替ケレン-4	第1層	厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料	はけ・ローラ 200 (スプレー 240)	補修	24H~7D
	第2層	長油性フタル酸樹脂塗料中塗	はけ・ローラ 110 (スプレー 140)	全面	
	第3層	長油性フタル酸樹脂塗料上塗	はけ・ローラ 105 (スプレー 130)	全面	24H~15D
BMU2-7 替ケレン-4以外	第1層	厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料	はけ・ローラ 200 (スプレー 240)	補修	24H~7D
	第2層	厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料	はけ・ローラ 200 (スプレー 240)	補修	24H~4D
	第3層	長油性フタル酸樹脂塗料中塗	はけ・ローラ 110 (スプレー 140)	全面	24H~15D
	第4層	長油性フタル酸樹脂塗料上塗	はけ・ローラ 105 (スプレー 130)	全面	

各塗装系の概要(2)

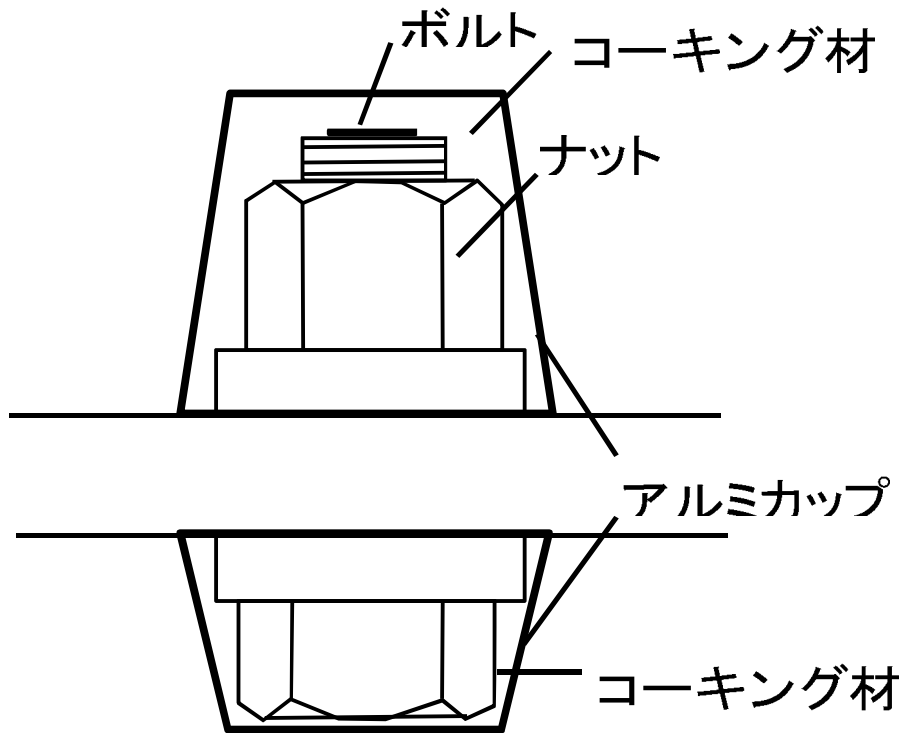
塗装系ECO1, 2

- ・長期耐久型塗装系
- ・専用の塗装道具が必要になる場合がある
- ・塗装禁止条件に敏感に反応し、塗膜変状を生じる場合がある
→施工条件をごまかすことができない

塗装系	工程	塗料名	標準使用量 (g/m ²)	区分 ^{注2}	塗装間隔 (20°C)
ECO1-7	第1層	厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料	はけ・ローラ 200 (スプレー 240)	補修	24H~7D
	第2層	厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料	はけ・ローラ 200 (スプレー 240)	補修	
	第3層	水系エポキシ樹脂塗料	はけ・ローラ 220 (スプレー 260)	全面	24H~7D
	第4層	水系ポリウレタン樹脂塗料上塗	はけ・ローラ 120 (スプレー 150)	全面	24H~7D
ECO2-7	第1層	厚膜型エポキシ樹脂ジンクリッチペイント	はけ・ローラ 500 (スプレー 700)	補修	2D~1M
	第2層	厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料	はけ・ローラ 200 (スプレー 240)	補修	24H~7D
	第3層	水系エポキシ樹脂塗料	はけ・ローラ 220 (スプレー 260)	全面	24H~7D
	第4層	水系ポリウレタン樹脂塗料上塗	はけ・ローラ 120 (スプレー 150)	全面	24H~7D

防錆キャップの適用例

腐食性の高い環境に架設されており、塗装系RR-3を適用しても早期の腐食が懸念される場合に適用



防錆キャップの一例



鋼素地が
腐食していない

ボルトキャップ適用事例
日本海沿岸で1年暴露

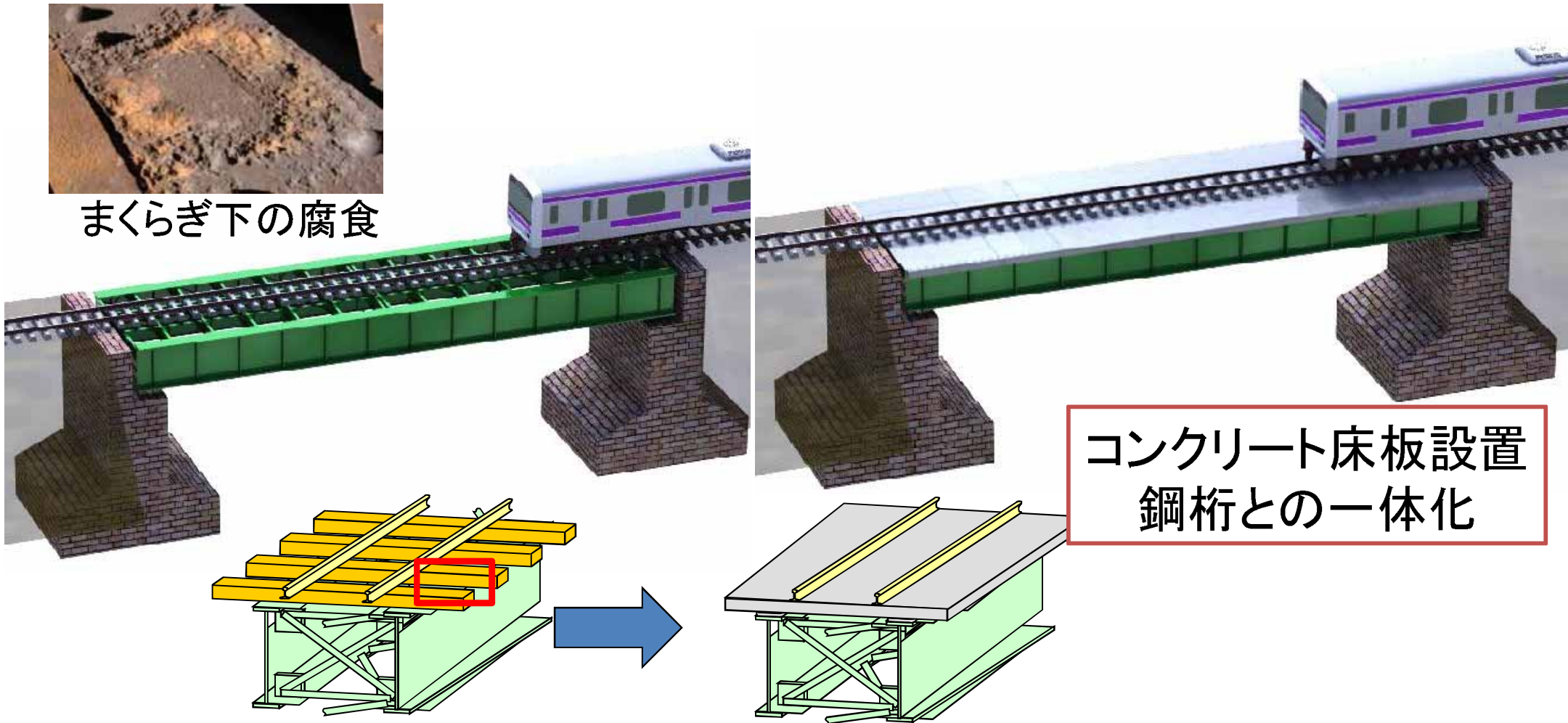
構造改築による腐食対策（開発中）

プレキャスト床版を用いた合成構造化

目的：腐食した鋼桁の補強&騒音の低減



まくらぎ下の腐食



コンクリート床板設置
鋼桁との一体化

(5)まとめ

まとめ

(1)鋼鉄道橋の腐食の現状

(2)防食設計の基本的な考え方

(3)新設構造物の防食の方法

- ・設計標準:耐久性(耐腐食性)の検討
- ・塗装指針:塗装系の選定

(4)既設構造物の防食の方法

- ・維持管理標準:検査内容、腐食に対する評価
- ・塗装指針:塗り替え時期判定、素地調整、塗り替え塗装系の選定