

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

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 報告

長岡技術科学大学 岩崎英治

部会メンバー

主査	岩崎 英治	長岡技術科学大学	
幹事長	下里 哲弘	琉球大学	
連絡幹事	高木 優任	日本製鉄	
幹事	石川 敏之	関西大学	
幹事	斉木 功	東北大学	
幹事	中村 聖三	長崎大学	
幹事	佐々木 栄一	東京科学大学	
委員	荒牧 聡	建設技術研究所	
委員	石川 裕一	中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋	
委員	梶田 太一	川田工業	2022年2月から
委員	加瀬 駿介	阪神高速道路	2024年3月まで
委員	加藤 真志	J F E スチール	2024年3月まで
委員	井上 凌	J F E スチール	2024年4月から
委員	木村 雅昭	東京ファブリック工業	2024年10月まで
委員	久慈 茂樹	東京ファブリック工業	2024年11月から
委員	志村 保美	日鉄ステンレス	2023年3月まで
委員	江目 文則	日鉄ステンレス	2023年4月から
委員	武野 正和	日本製鉄	
委員	田中 俊介	日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所	
委員	田中 裕明	J F E エンジニアリング	
委員	玉城 喜章	沖縄しまたて協会 技術環境研究所	
委員	永井 政伸	首都高速道路	2023年3月まで

委員	副島 直史	首都高速道路	2023年4月から2024年6月まで
委員	石橋 正博	首都高速道路	2024年7月から
委員	長坂 康史	川田工業	
委員	永谷 秀樹	宮地エンジニアリング	
委員	秀熊 佑哉	日鉄ケミカル&マテリアル	
委員	日和 裕介	首都高技術	
委員	藤川 敬人	日鉄エンジニアリング	
委員	政門 哲夫	日本エンジニアリング	
委員	松下 裕明	日立造船	
委員	松下 政弘	神戸製鋼所	
委員	三浦 進一	J F E スチール	
委員	矢ヶ部 菜月	I H I	
委員	八木 孝介	横河ブリッジホールディングス	2023年12月まで
委員	加藤 健太郎	横河ブリッジホールディングス	2024年1月から
委員	山下 修平	宮地エンジニアリング	
委員	湯瀬 文雄	神戸製鋼所	2024年3月まで
委員	阪下 真司	神戸製鋼所	2024年4月から
オブザーバー	鎌田 将史	国土技術政策総合研究所	2022年3月まで
オブザーバー	塚原 宏樹	国土技術政策総合研究所	2022年4月から2023年3月まで
オブザーバー	青野 拓也	国土技術政策総合研究所	2023年4月から
オブザーバー	坂本 佳也	土木研究所	2023年3月まで
オブザーバー	小野 健太	土木研究所	2023年4月から

部会報告の構成

A. 多様な腐食特性に対する合理的な防食使用の提案（新設，既設）

- 架設環境と腐食部位別の腐食特性に応じた防食仕様（新設）
- 腐食しやすい構造部位の高防食技術（既設）

B. 腐食損傷の生じた鋼構造・部位の合理的な診断技術，補修法

- 合理的な点検・診断の提案のための構造冗長性評価
- 腐食損傷の生じた鋼部材の健全度評価の検討
- 補修法の力学メカニズムと合理的な断面補修法の検討

鋼橋の構造性能と耐久性能研究委員会

腐食耐久性研究部会

サブテーマ：合理的防食方法の提案

琉球大学 下里 哲弘

—合理的防食方法の提案（新設・既設）—

【目的】

鋼橋強靱化へ向けて、腐食環境と構造部位にマッチングした合理的な防食仕様の開発を目的とする。

支点上補剛材の腐食



＜桁端部＞

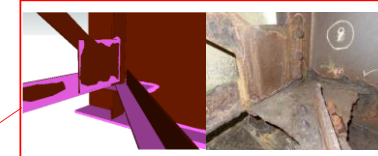
桁端部の腐食



主桁端部の腐食



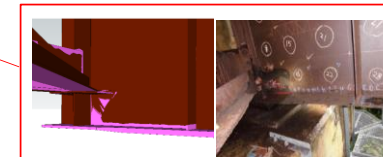
下横構ガセットの腐食



下横構ガセットの腐食

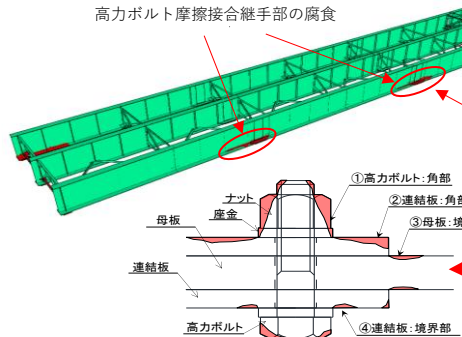


垂直補剛材下縁の腐食

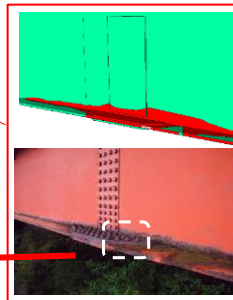


＜高力ボルト継手＞

高力ボルト摩擦接合継手部の腐食

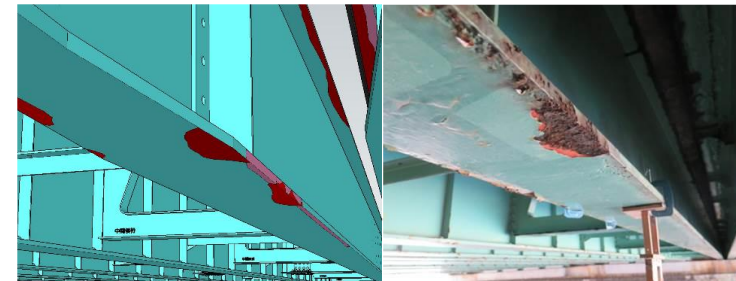


連結板の腐食

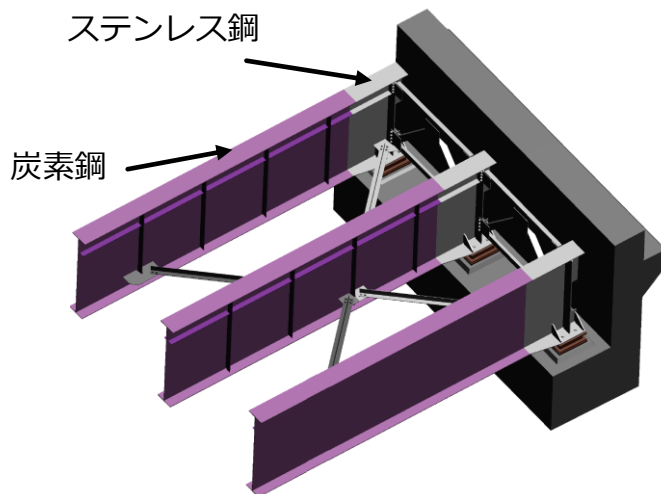


■ 腐食しやすい部位

＜エッジ部＞



【新設橋テーマ1】 ステンレス鋼を用いたハイブリッド桁端構造の開発

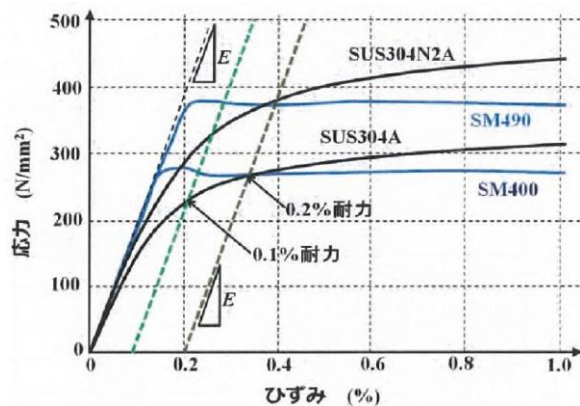


【研究内容】

- 使用材料と組合せ
- 溶接性
- 組合せ材料特性（引張強度と応力-ひずみ特性）
- 耐久性（鋼材腐食, 疲労強度）

＜桁端部へのステンレス鋼の適用＞

【組合せ材の検討】



※ステンレス鋼構造物の設計・施工指針（案）より

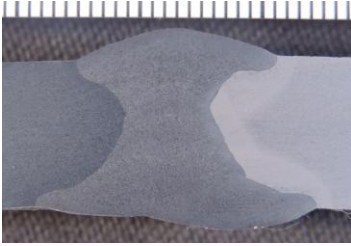
炭素鋼とステンレス鋼の応力ひずみ関係の例

- ・炭素鋼は一般的な鋼材
- ・ステンレス鋼は製作性および炭素鋼の強度と市場性を考慮
- ・溶接金属は炭素鋼による希釈と強度を考慮
- ・炭素鋼の強度に合わせたステンレス鋼を選定

組合せ	炭素鋼	溶接金属	ステンレス鋼
①	SM400	309L	SUS304
②	SM490Y	309L	SUS821L1

【溶接性】

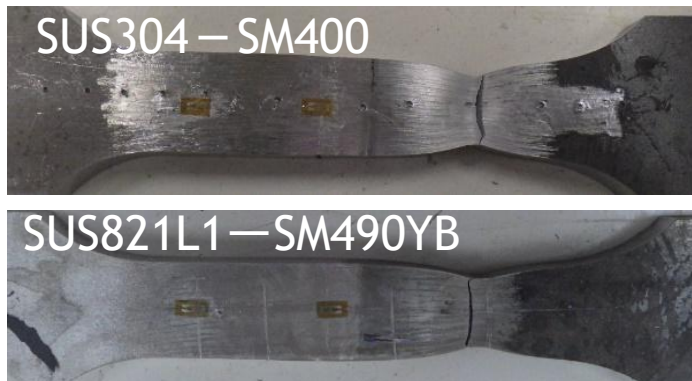
■ マクロエッチング



■ 曲げ試験，放射線透過試験

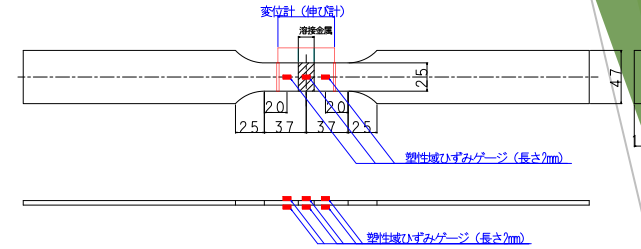
組合せ	結果
SUS304－SM400	欠陥なし
SUS821L1－SM490YB	欠陥なし

■ 引張試験

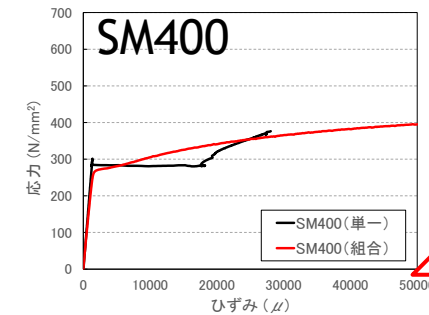


- ・溶接の溶込み良好
- ・その他試験でも内部欠陥無
- ・引張試験で炭素鋼側母材破断（炭素鋼母材強度以上）

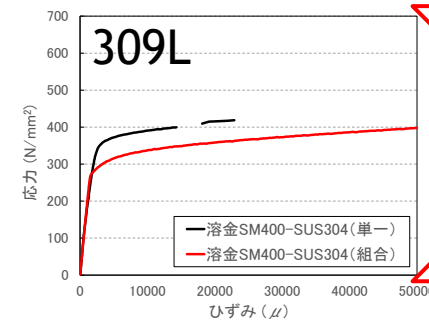
【組合せ材料特性】



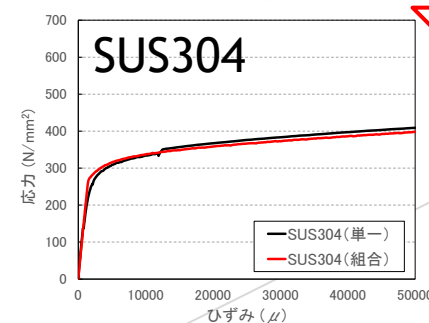
各部位の応力ひずみ関係の単一材との比較



・接続材で降伏点不明瞭

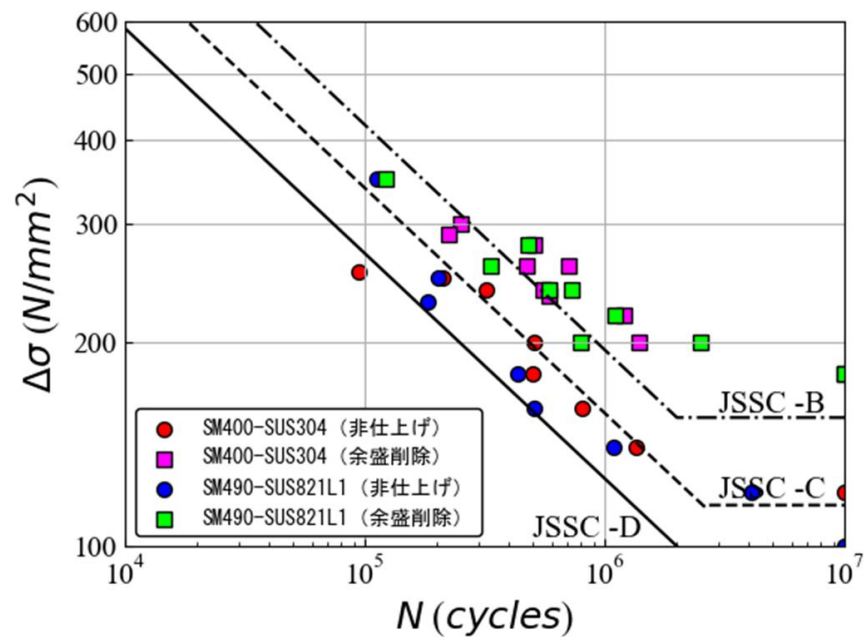
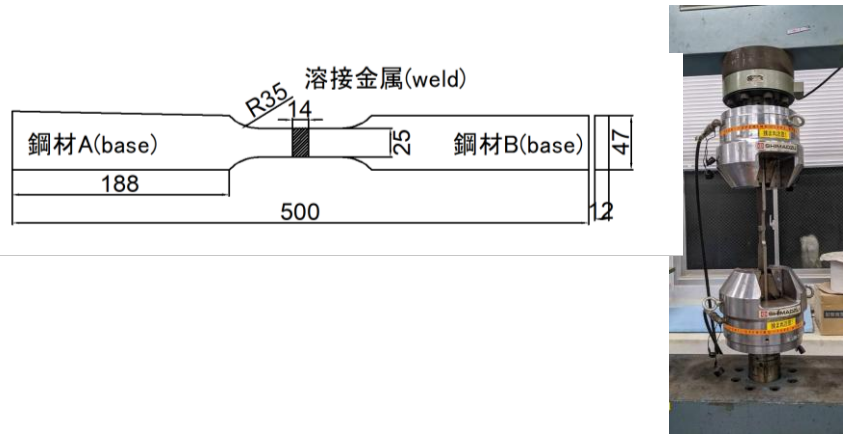


・炭素鋼の先行降伏の影響



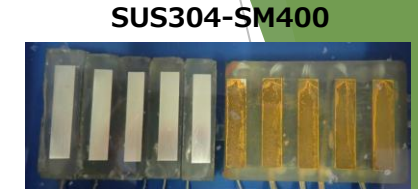
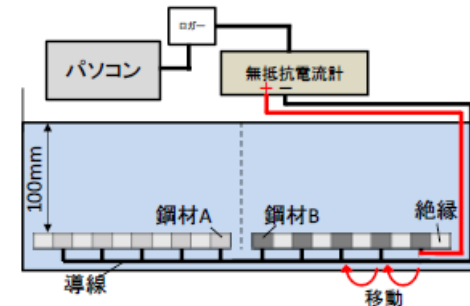
・炭素鋼の影響が少ない

【横突合せ溶接継手の疲労試験】

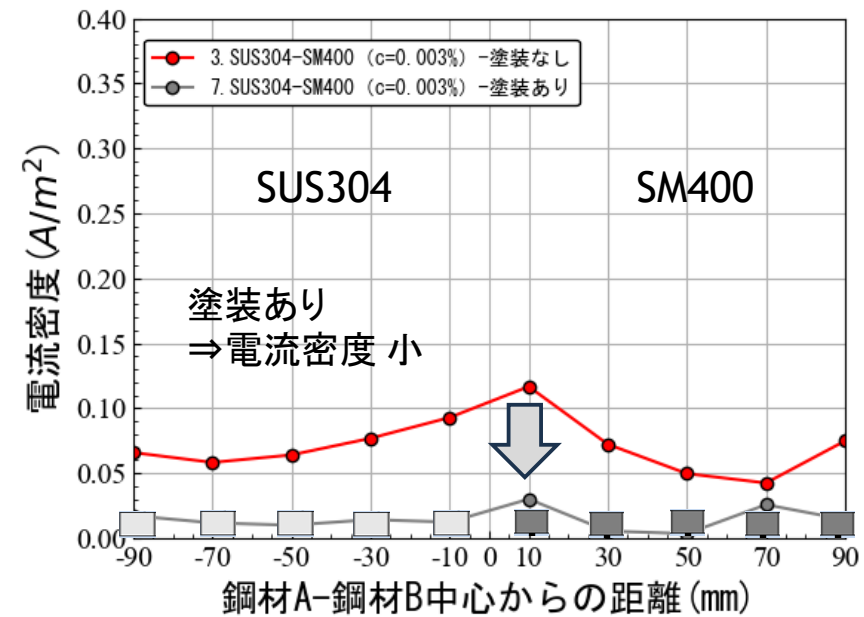
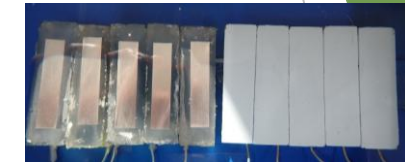


- ・強度による差は見られない
- ・炭素鋼と同程度の疲労強度（B等級・D等級）
- ・高応力範囲で疲労強度がやや低くなる傾向

【異種金属接触腐食試験】

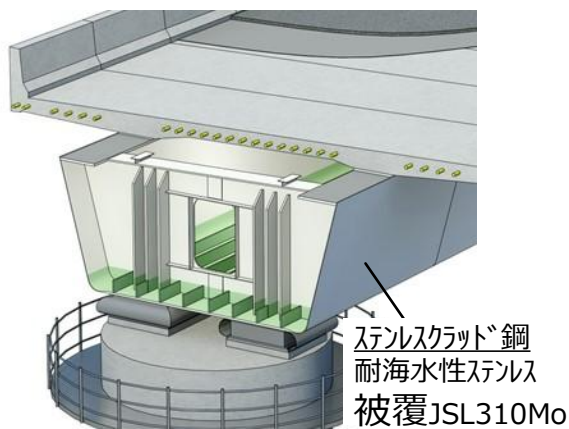


SUS304-SM400 (塗装あり)



- ・異種金属境界で電流密度は大きい
- ・炭素鋼に塗装することで電流密度は抑えられる

【新設橋テーマ2】 ステンレスクラッド鋼を用いた鋼橋の研究開発



ステンレスクラッド鋼の適用

【研究内容】

＜合せ材材質＞
SUS304、SUS316L、
SUS329J3L、JSL310Mo

ステンレスクラッド鋼

ステンレス鋼
炭素鋼

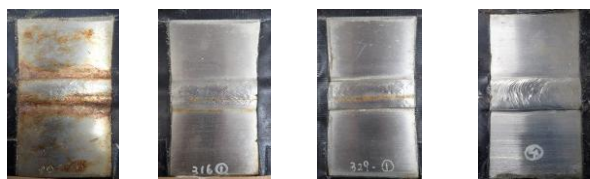
炭素鋼にステンレス鋼板(合せ材)を
接合した複合鋼板

塩化第二鉄腐食試験：溶接部の耐食性の把握
複合サイクル腐食促進試験：腐食進展傾向の把握

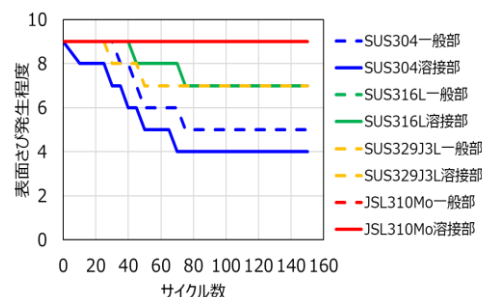
【複合サイクル腐食促進試験】

- ・JASO M609に準拠した試験を実施
- ・試験体表面のさび発生程度をレイティングナンバーに準拠して整理

試験完了時(155サイクル)の試験体表面状態



SUS304 SUS316L SUS329J3L JSL310Mo



【塩化第二鉄腐食試験(JIS G 0578)】

- ・耐孔食指数と相関性ある臨界孔食発生温度(CPT)を把握

試験片



試験結果

合せ材材質	孔食発生臨界温度	
	一般部	溶接部
SUS304	5℃で孔食発生	5℃で孔食発生
SUS316L	15℃で孔食発生	20℃で孔食なし
SUS329J3L	50℃で孔食なし	40℃で孔食発生
JSL310Mo	70℃で孔食発生	75℃で孔食なし

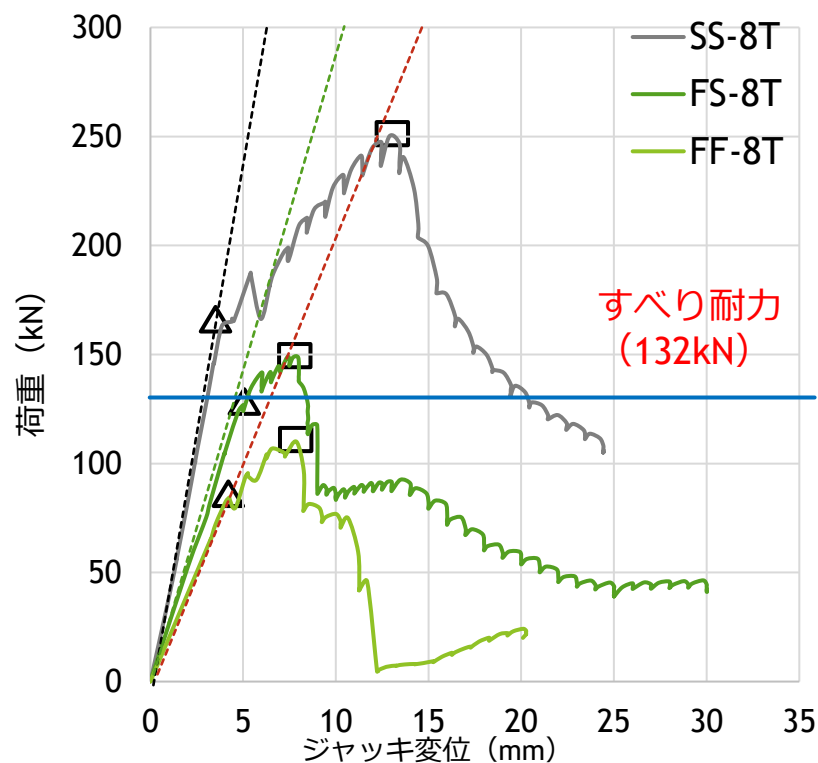
【新設橋テーマ3】

ハイブリッドFRPを用いた端対傾構構造の開発

端対傾構としてのハイブリッドFRPの圧縮・引張性能を実験的に検証。ガセット部が耐力のポイント。



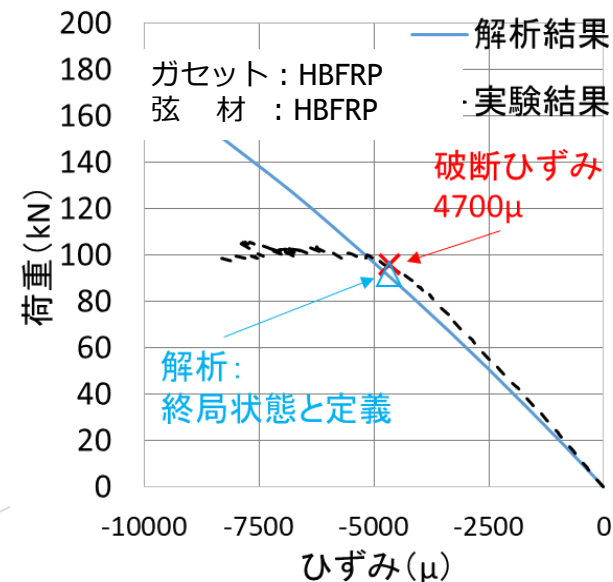
FRPガセットの板厚、繊維構成の最適化



破壊形態 FF

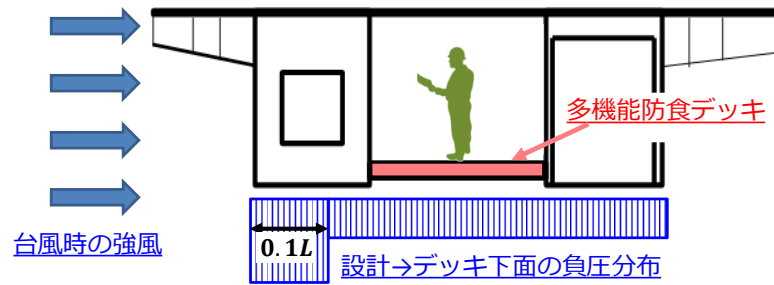


試験機の最大荷重: 300kN
変位制御で荷重を載荷



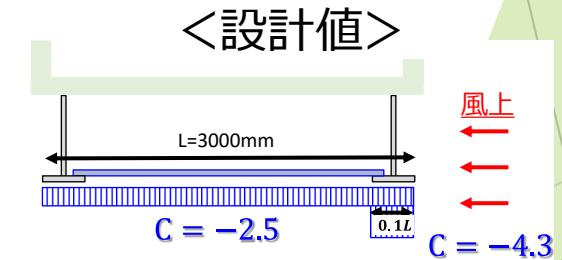
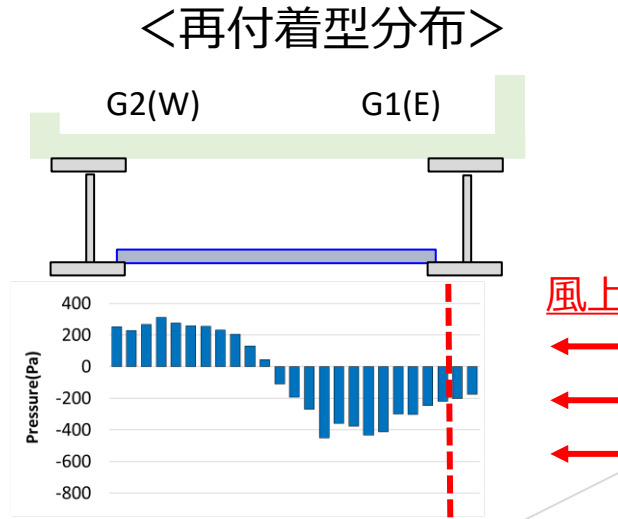
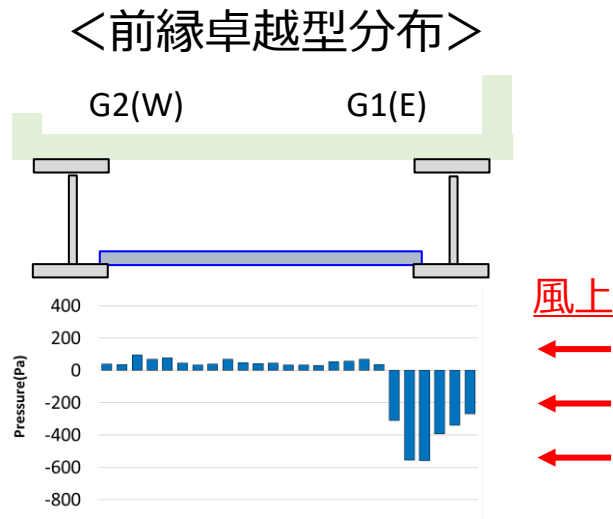
【新設橋テーマ4】 多機能防食デッキの耐風性能の研究

鋼桁間の腐食耐久性向上のために設置した多機能防食
デッキの巨大耐風下での安全性を実物試験橋で確認



【風圧分布特性】

【ピーク外圧係数の検証】



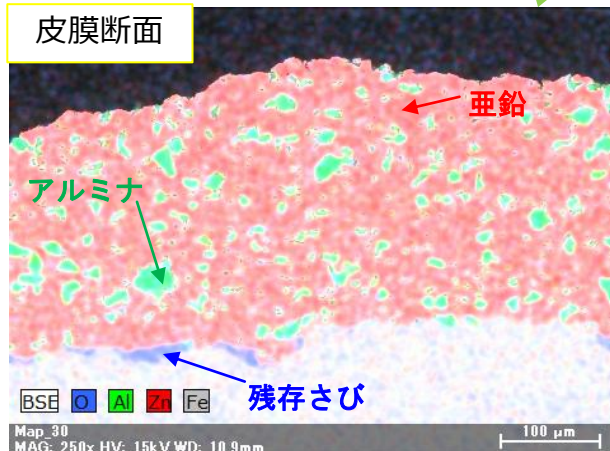
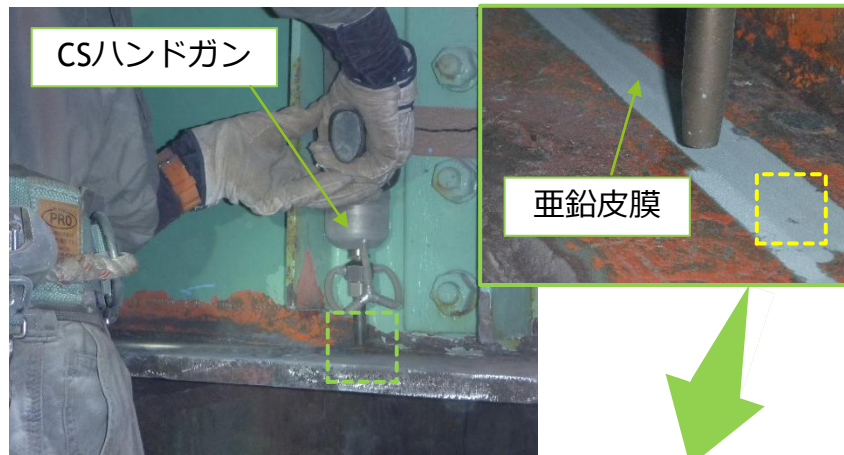
	台風時		
	最大値	最小値	平均値
風上側端部	-5.0	-1.8	-2.6
桁間中央部	-3.4	-1.2	-1.9
風下側端部	-4.1	-0.7	-1.7

【既設橋テーマ1】

残さび面上におけるコールドスプレーの防食性能

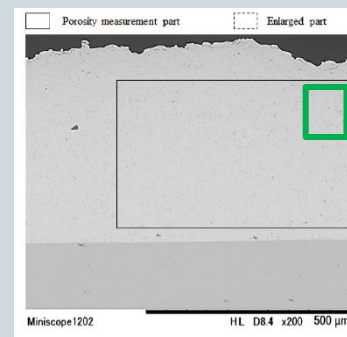
コールドスプレー（CS）皮膜の防食機構検証 及び実橋モニタリングによる実証

【コールドスプレー工法概要】



【残さび上のCS皮膜の防食機構検証】

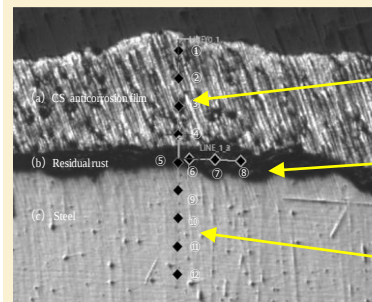
CS皮膜気孔率 平均気孔率：1.8% (Gas flame：10.1%)



二値化処理画像

気孔率が低く緻密であるため、腐食因子の透過を阻止する環境遮断層として有効

CS皮膜のさび面密着特性 マイクロビッカース硬さ試験



計測平均値

CS皮膜：51.0Hv

残さび：288.3Hv

母材：195.3Hv

さびと基材は同程度

硬度差

亜鉛<残存さび

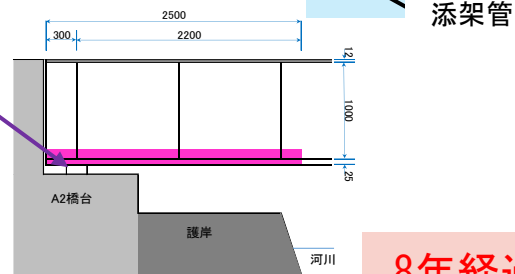
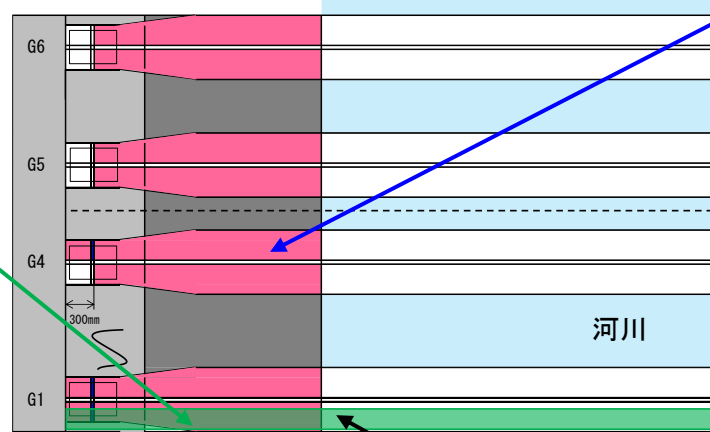
成膜条件が成立し
亜鉛粒子がさびに密着

【実橋モニタリング（8年目）】

施工障害部-添架物干渉部



モニタリング着目部位



施工一般部

下向き施工

1. 上面



横向き施工

2. 角部



施工障害部-支承周り

3. 支承上



4. 支点上VS

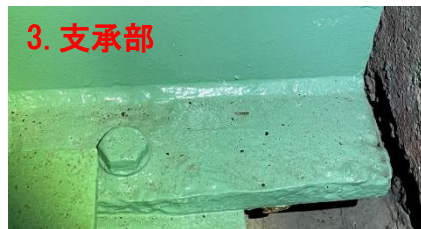


8年経過後状況（一例）

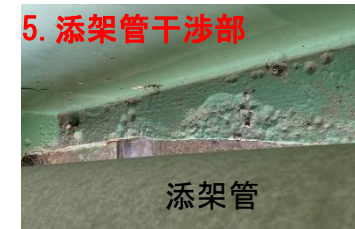
1. 上面, 2. 角部



3. 支承部



5. 添架管干渉部



4. 支点上VS



8年経過後も大きな再発は生じていないことを確認

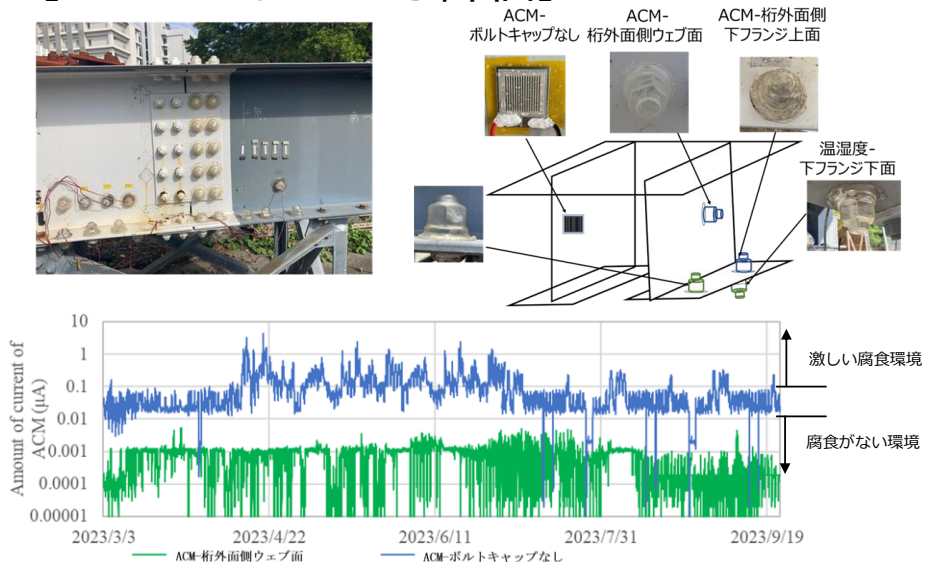
【既設橋テーマ2】 局所部位における防食技術の開発

1. 高力ボルト： 透明ボルトキャップ

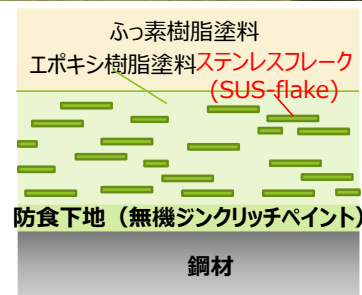
【実橋モニタリング】



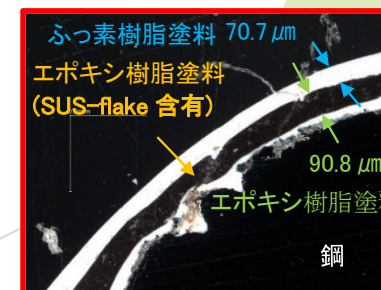
【ACMセンサによる評価】



2. 板エッジ： SUS-flake含有塗装系



上フランジ平坦部膜厚 212 μm (標準膜厚 250 μm)

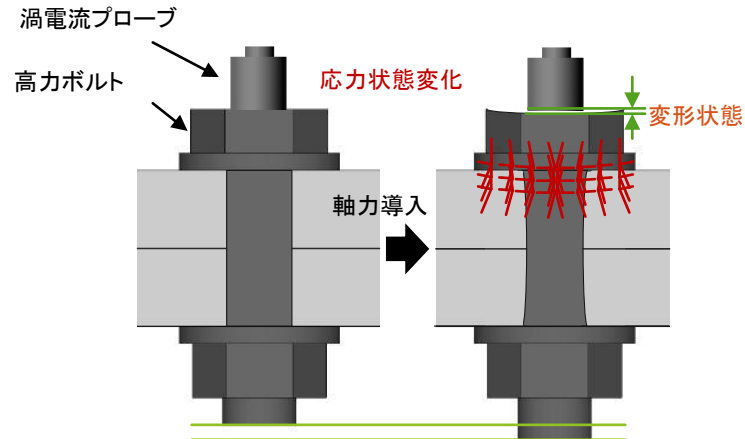


【非破壊技術】

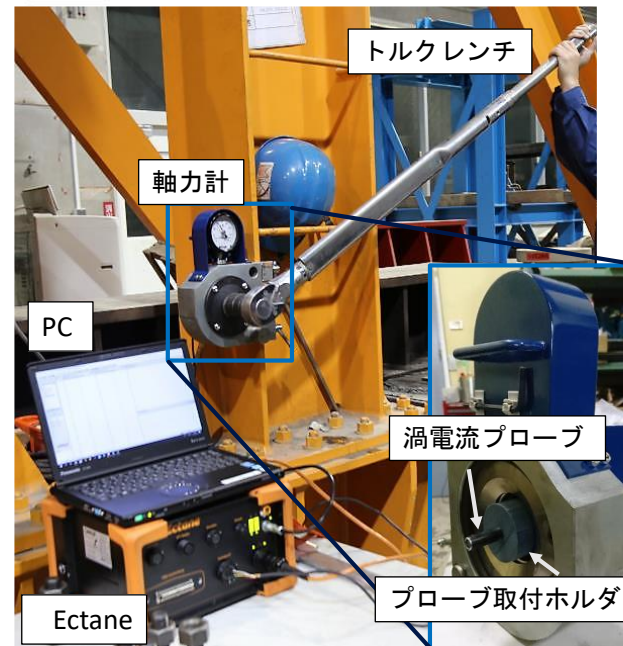
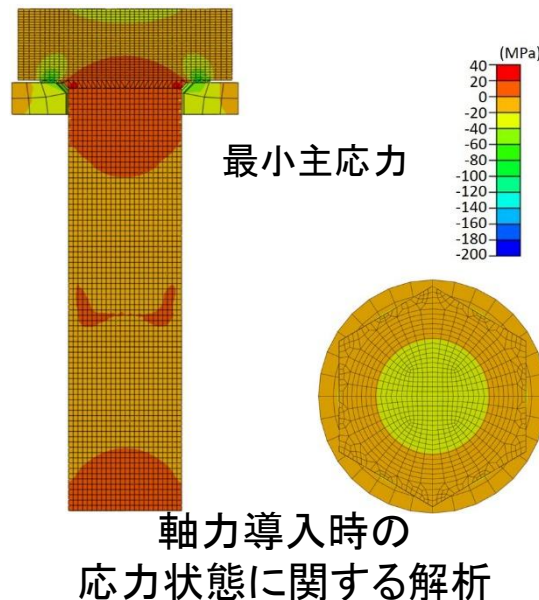
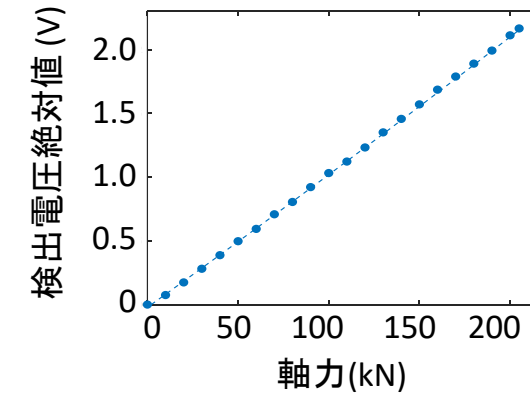
状態把握のための計測・非破壊評価の検討

○非破壊計測を利用したボルト軸力評価の試み

東京科学大学
佐々木栄一研究室



ボルト軸力導入に伴う、ボルト頭部の変形に関連したリフトオフの影響、応力分布の影響を検討。



計測の効率化
のため治具の
3Dプリンタによる
製作を実施

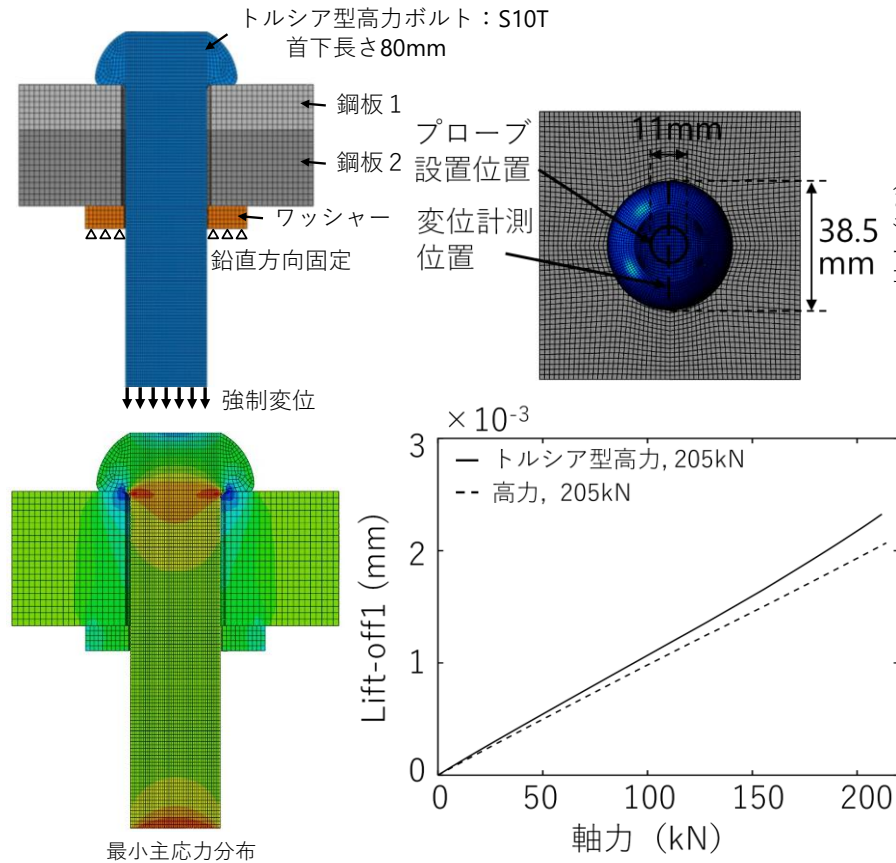
超音波計測
による方法
も提示

状態把握のための計測・非破壊評価

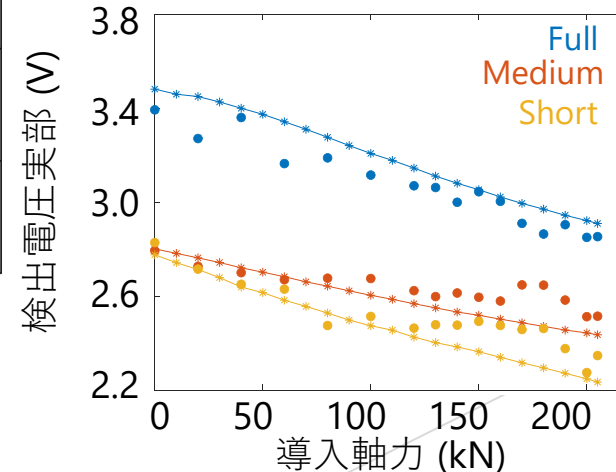
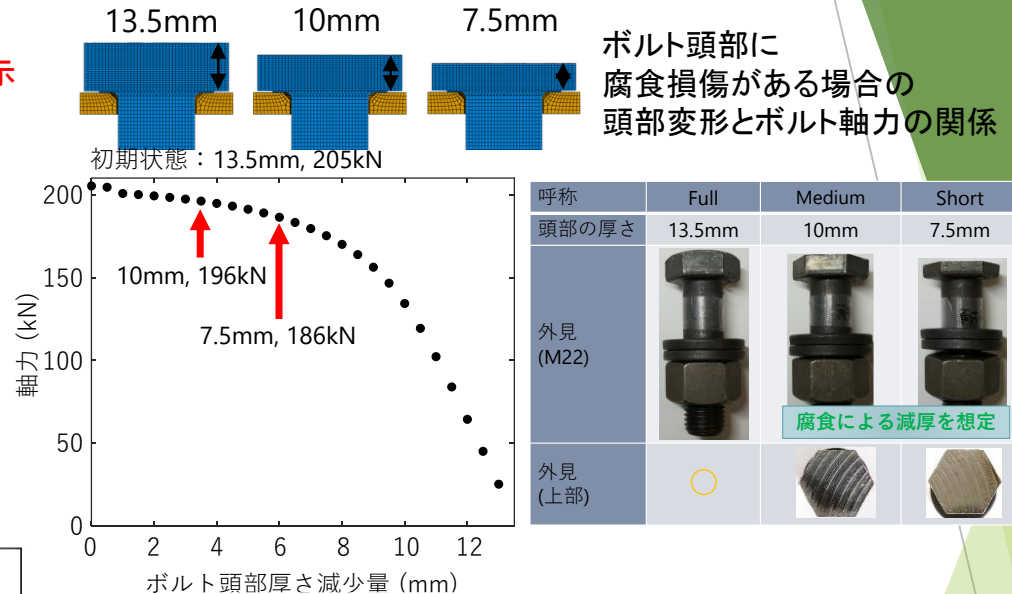
○トルシアボルトの場合のボルト軸力

非破壊評価手法の検討 (渦電流計測) ○ボルト頭部に損傷がある場合の軸力への影響

ボルト頭部の変形によるリストオフの変化を評価する手法を提示



軸力変化に伴い生じる頭部変形の変化により、リフトオフは通常の高力ボルトと同様の傾向で変化するため、軸力の評価できると考えられる。



渦電流計測による軸力評価への影響を分析

健全(Full)の場合とは異なる検知レベルとなるが、軸力による変化は確認出来る。

省工程重防食塗装の検討

- 目的

短工期で施工でき，長期耐久性を確保できる，省工程重防食塗装（下塗り・上塗り各1層まで）仕様の確立

- 検討対象塗装仕様

Case	下 塗 り	膜厚 μm	上 塗 り	膜厚 μm
①	超厚膜無溶剤形セラミックエポキシ樹脂塗料	750	水性ふっ素樹脂塗料	25
②	厚膜無溶剤形セラミックエポキシ樹脂塗料	500	水性ふっ素樹脂塗料	25
③	高遮断形変性エポキシ樹脂塗料弱溶剤形塗料	120	高耐久厚膜ふっ素樹脂塗料	55
④	高遮断形変性エポキシ樹脂塗料弱溶剤形塗料	120	弱溶剤厚膜ふっ素樹脂塗料	55
⑤	高遮断形厚膜変性エポキシ樹脂塗料弱溶剤形塗料	300	弱溶剤厚膜ふっ素樹脂塗料	55

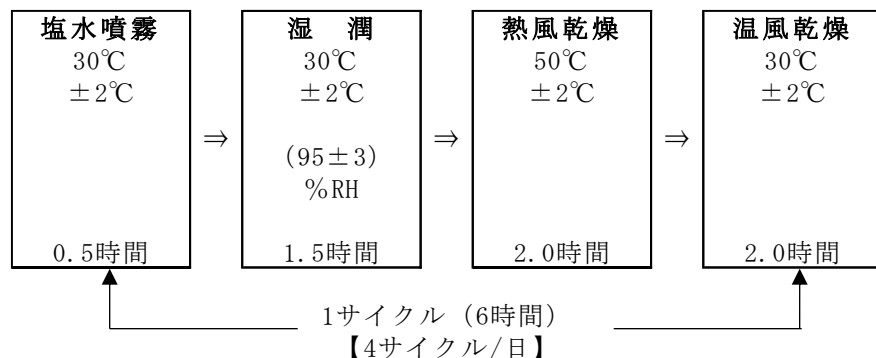
- 実施項目

- 促進試験（単膜，複膜での複合サイクル試験）
- 屋外暴露試験

実施試験（試験片〈150mm×75mm×3.2mm、1種ケレン（ブラスト）〉）

① 促進試験（目視，付着力で評価）

- ・ 単膜の複合サイクル試験（JIS K5600-7-9サイクルD）：1.5年間（12,960時間）
6か月のフッペン試験片腐食減耗量：11.3g



- ・ 複膜の複合サイクル試験（ISO12944-9改定版）：1.0年間（8,640時間）
6か月のフッペン試験片腐食減耗量：21.3g



実施試験（試験片〈150mm×75mm×3.2mm、1種ケレン（ブラスト）〉）

② 屋外暴露試験（目視，付着力で評価）：最低2年間

暴露場所	腐食減耗量*
【寒冷積雪地域】 東日本高速道路(株) 新潟支社 親不知海岸高架橋下	3.2g
【一般的な地域】 長崎大学構内	0.8g
【亜熱帯地域】 琉球大学構内	0.9g
【都市地域】 首都高速道路	0.7g（神奈川） 0.5g（東京）

屋外暴露試験

2年間では全ての試験片に変状なし ⇒ 試験を継続

* ワッペン試験片2年間暴露の結果

① 促進試験結果

JIS K5600-7-9 サイクルD 1.5年間

ISO12944-9改定版 1.0年間

No	12960時間 (1.5年)			
	平板		凹凸板	
①	優	優	良	優
②	不可	不可	良	良
③ ④	優	不可	優	不可
⑤	良	優	優	優

No	8640時間 (1.0年)			
	平板		凹凸板	
①	優	優	不可	優
②	不可	不可	優	良
③	優	優	優	優
④	優	優	優	優
⑤	優	優	優	優

促進試験

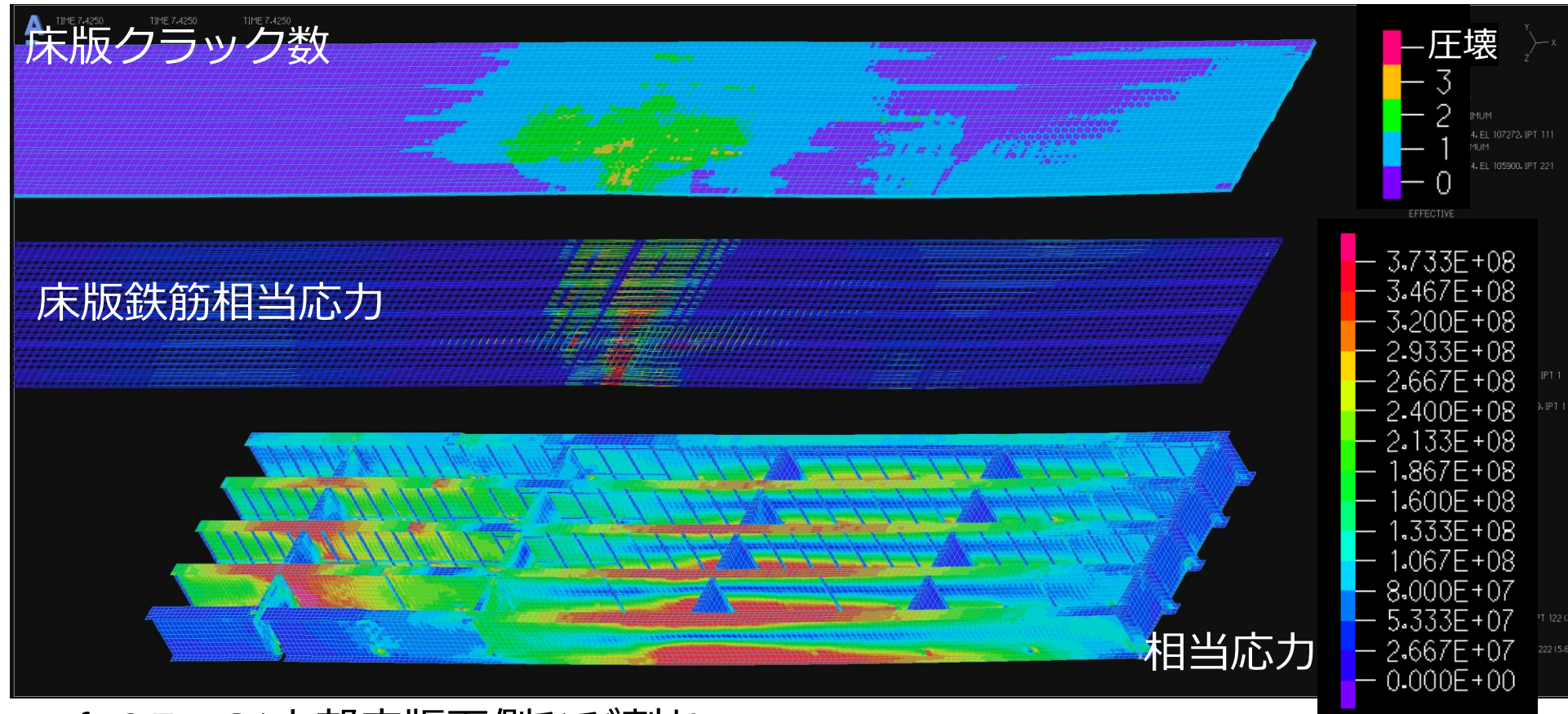
①③④⑤は優れており、重防食塗装と扱える。但し、同じ仕様でも試験片により差があり、コバ面部の薄い塗膜から腐食が発生

⇒ コバ面のR加工、増し塗りによる設計塗膜厚の確保が必要

サブテーマ2：構造冗長性評価に基づいた合理的な診断技術の提案

- 冗長性評価の事例・手法調査
 - ✓ 形式別の冗長性評価事例
 - ✓ 連続多主鈑桁橋の冗長性評価
 - 主桁数が冗長性に及ぼす影響
 - 床版の進行性破壊を考慮した桁橋の損傷程度と冗長性の関係
 - ✓ 鋼トラス橋における立体機能保持に関する検討
 - 2次部材が立体機能・冗長性に及ぼす影響

4径間連続5主鈑桁橋G1桁中間支点損傷時の崩壊過程 (f=6.8まで)



f=0.7 : G1上部床版下側ひび割れ

f=0.9 : 主桁降伏

f=2.5 : 対傾構降伏

f=3.0 : G2G3上部床版下側ひび割れ

f=4.8 : 主桁の塑性ひずみ0.5%

G1端支点損傷に比べて破壊の進展が早い (主桁降伏2.9, 塑性ひずみ0.9)

主桁降伏に関する冗長性（中間支点損傷）

損傷桁	G1	G2	G1G2	G2G3	G1G2G3
主桁降伏時の f	0.90	1.30	0.50	0.90	0.50

69% 56%

- 主桁降伏限界は，損傷桁の数が同じとき外桁に損傷のある場合は中桁に損傷がある場合のおよそ55-70%
- 主桁降伏限界は，外桁に損傷があるとき，損傷桁の数が増えるとおよそ55-70%となる．
- 中間支点損傷時は，主桁降伏限界が端支点損傷時よりも小さい．この理由は，中間支点ではせん断力・曲げモーメントともに大きいため．（局所的な降伏も生じる）

鋼トラス橋における立体機能保持に関する検討

橋が立体的に機能する構造となるようにしなければならない

道示Ⅱ15.4.1(1)



立体的な機能の確保

- 定量的な要求水準や評価方法は示されていない
- 実質的に仕様規定に近い形の規定となっている

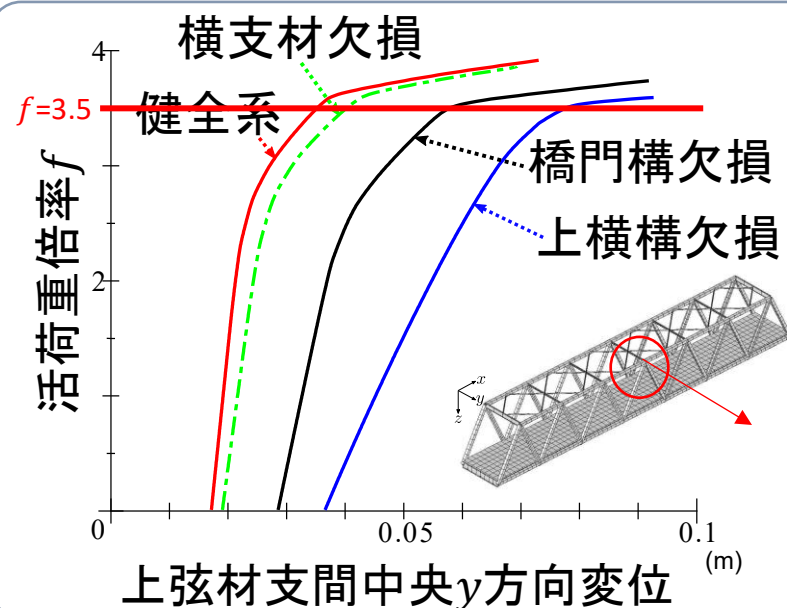
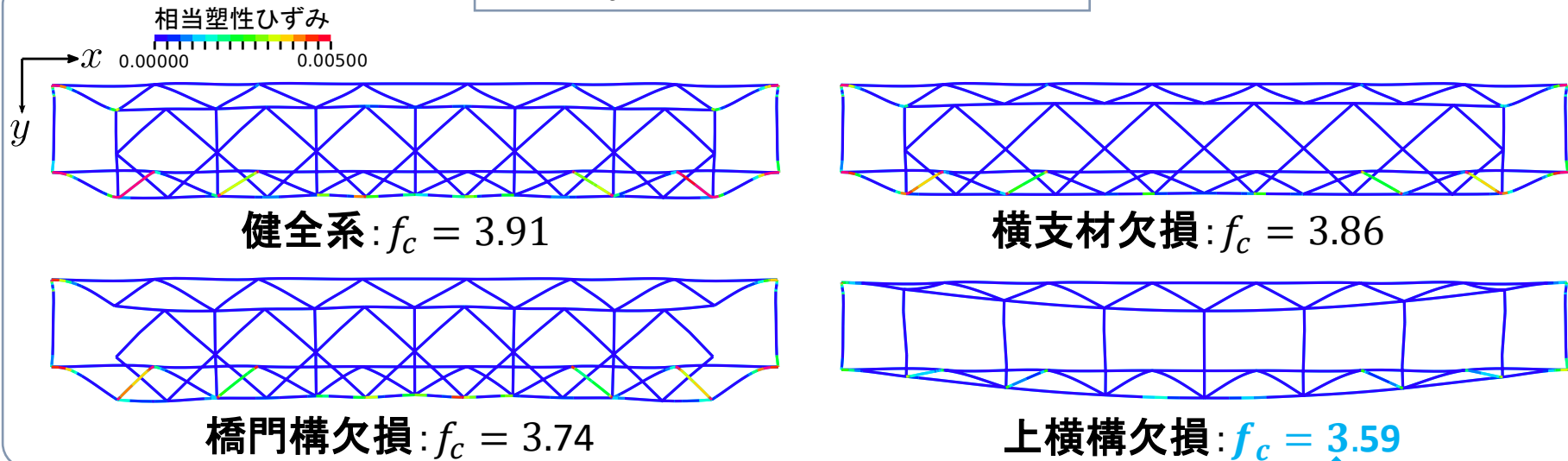
横構やストラットの腐食はどこまで許容できるか？



横構やストラットがない場合の耐荷力の低下を定量的に評価する

2次部材欠損時の立体機能・冗長性評価

$f = f_c$ 時の変形(変形倍率30倍)



・ $f = 3.5$ (降伏点付近)

健全系 : $2.70 \times 10^{-2} \text{m}$

橋門構欠損: $4.71 \times 10^{-2} \text{m}$

横支材欠損: $3.09 \times 10^{-2} \text{m}$

上横構欠損: $6.61 \times 10^{-2} \text{m}$

最も小さい
(8%減少)

2.4倍

橋門構欠損: 1.7倍

横支材欠損: 1.1倍

上横構欠損: 2.4倍 (健全系比)

サブテーマ③ 腐食損傷の生じた鋼部材の健全度評価の検討

○ 構造部位で異なる腐食進行度に対応した健全度評価法の提案

(1) 健全性評価法の検討対象部位の選定

→ 冗長性の低い構造部位, 損傷の発生事例の多い部位など

(2) 腐食損傷の程度に応じた措置判断に寄与する健全度評価法の検討

→ 腐食減肉の生じた部位・部材の応力状態を簡易に評価

→ 健全度・損傷度のレベル分け

● トラスガセット下部の腐食:

ガセット両側に斜材のあるトラス形式

ガセット片側に斜材のあるトラス形式

● トラス圧縮斜材を構成する板の溶接部の腐食:

板の1辺に腐食切れを生じた場合

板の相対する2辺に腐食切れを生じた場合

● 桁橋下フランジの腐食:

正曲げを受ける下フランジが腐食減肉した場合

負曲げを受ける下フランジが腐食減肉した場合



トラスガセット部の腐食

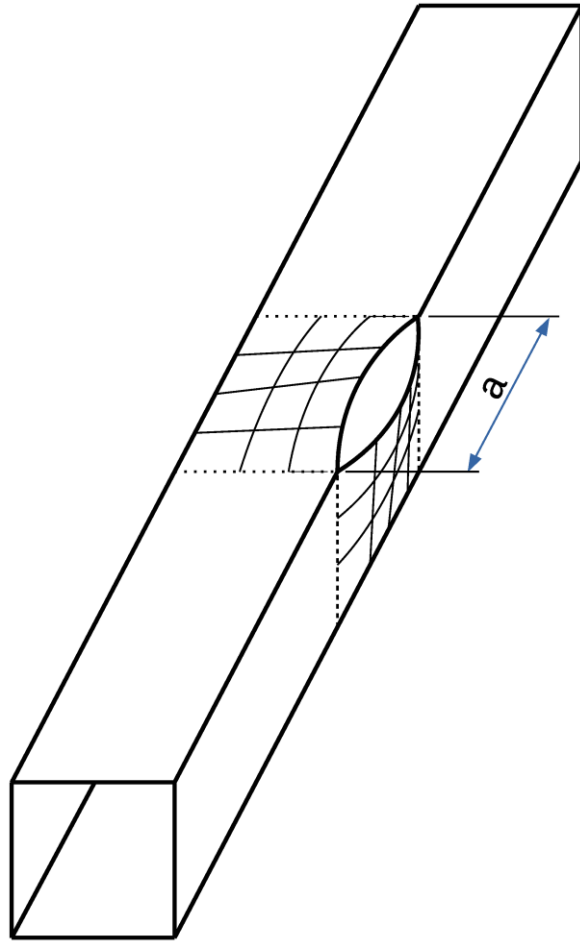


トラス斜材の溶接部の腐食



I桁橋下フランジの腐食

圧縮斜材の一部に腐食による溶接部の分離(腐食切れ)を生じた場合の座屈強度の検討

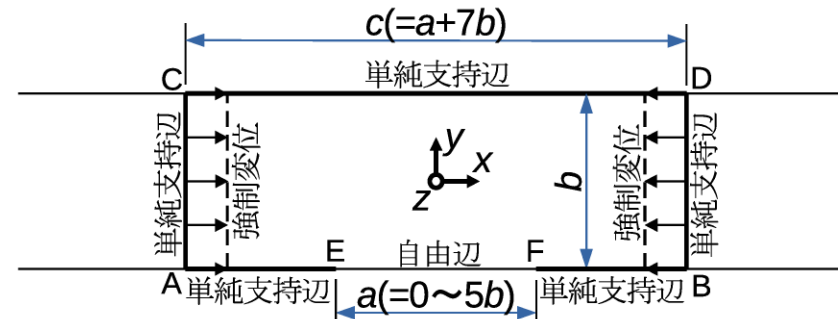


腐食切れによる局部座屈



トラス斜材の溶接部の腐食

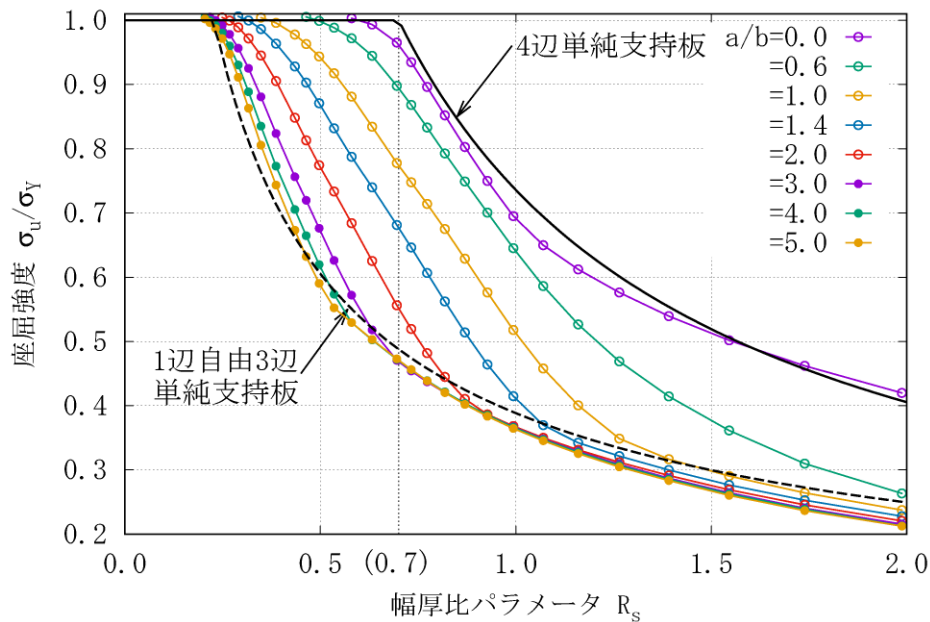
● 一部に自由辺を有する板の座屈強度式の検討



一部に自由辺を有する板

● 圧縮斜材の連成座屈強度式の検討

一部に自由辺を有する板の座屈強度式の検討



既往の座屈強度式

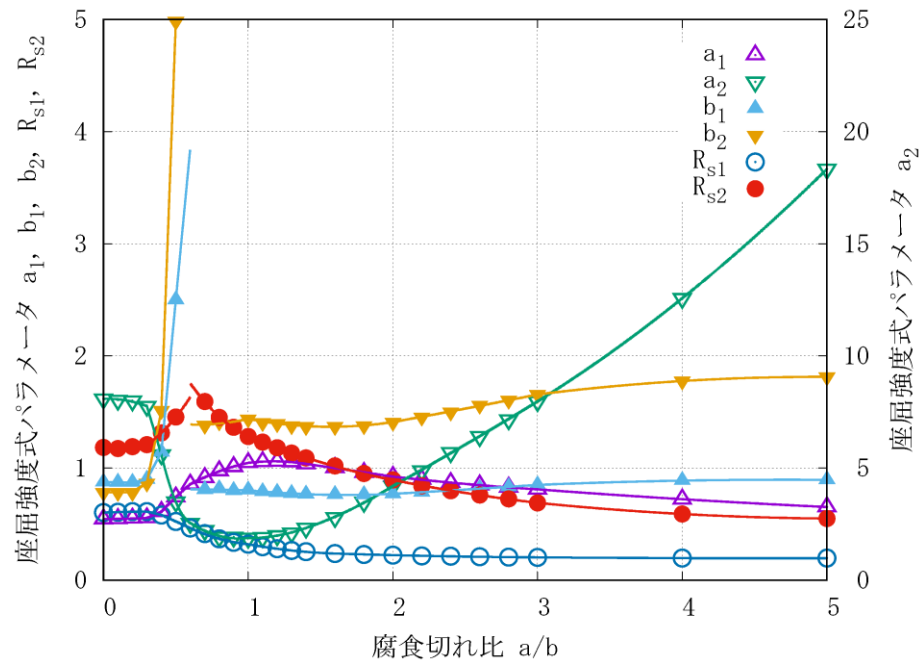
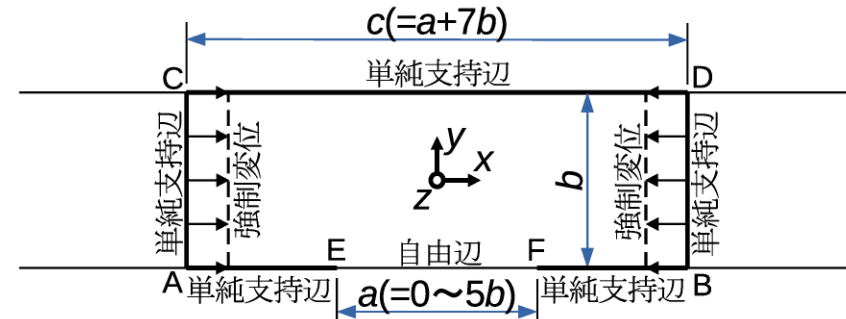
- $\frac{\sigma u}{\sigma_Y} = \left(\frac{a_1}{R}\right)^{a_2}$
- $\frac{\sigma u}{\sigma_Y} = a_1 + a_2 R + a_3 R^2 + a_4 R^3$
- $\frac{\sigma u}{\sigma_Y} = a_1 + \frac{a_2}{R} + \frac{a_3}{R^2} + \frac{a_4}{R^3}$
- $\frac{\sigma u}{\sigma_Y} = \frac{1}{2R} \left(\beta - \sqrt{\beta^2 - 4R} \right) \quad \beta = a_1 + a_2 R$

座屈強度の提案式

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_Y}=1 \quad (R_s \leq R_{s1})$$

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_Y} = 1 - a_1 + \frac{a_1}{1 + a_2(R_s - R_{s1})^2} \quad (R_{s1} < R_s \leq R_{s2})$$

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_Y} = \frac{b_1}{1 + b_2(R_S - R_{S1})} \quad (R_{S2} < R_S)$$



斜材の全体座屈と板の局部座屈の連成座屈強度式の検討

積公式

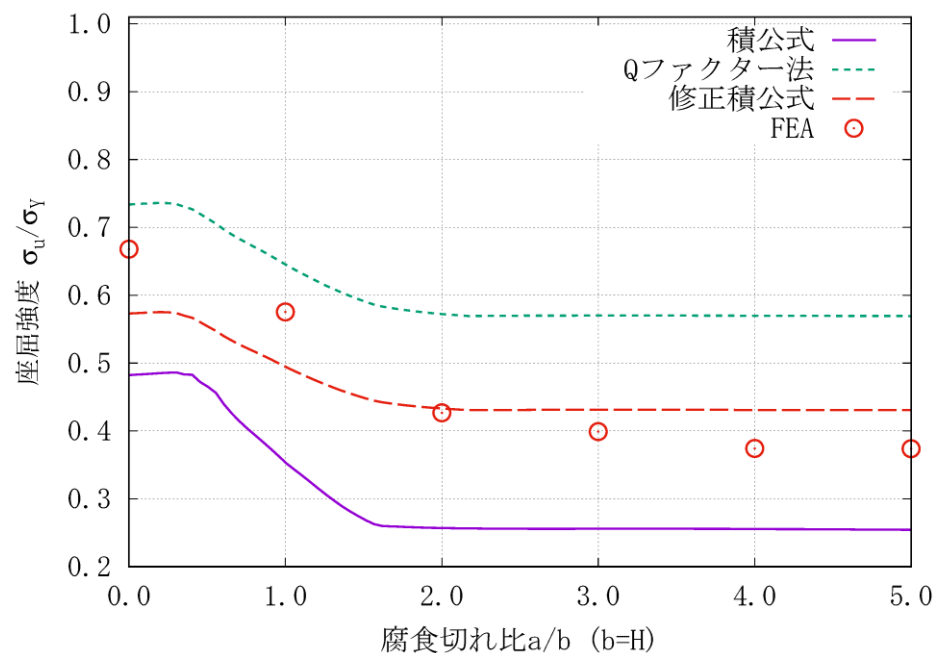
連成座屈応力 = 全体座屈
応力 × 局部座屈応力

Q-factor 法

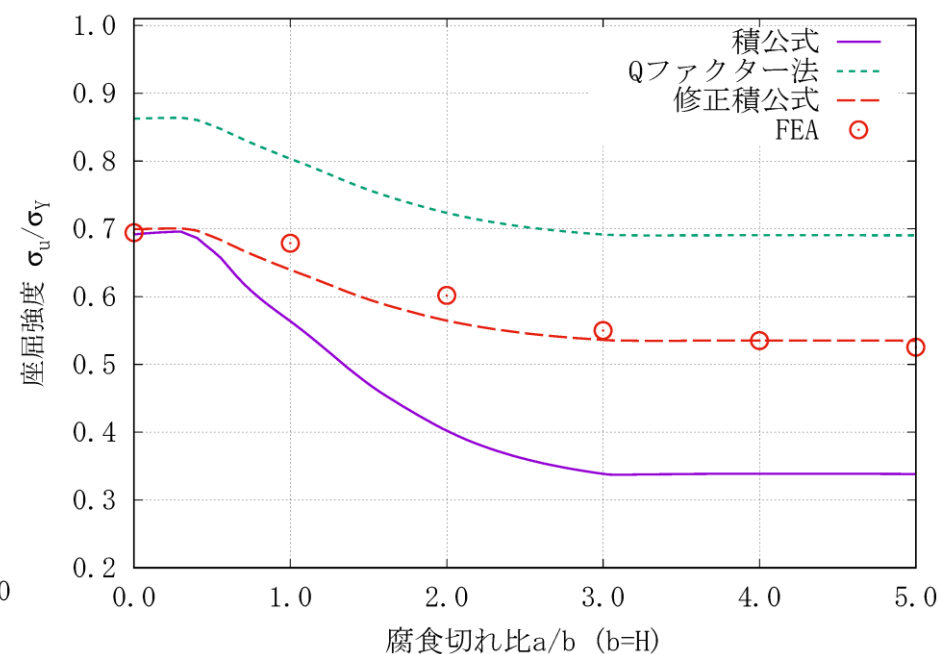
板要素ごとの局部座屈応力の合計と降伏応力の比をQとし、降伏応力の低減係数とする方法。

提案手法(修正積公式)

連成座屈応力 = 全体座屈応力 × Q値

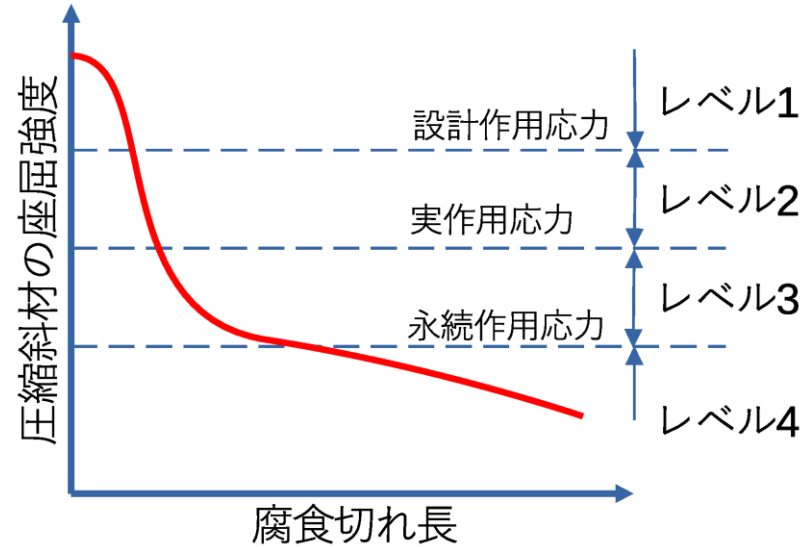


Dm2斜材



Dt3斜材

健全性レベルの提案



レベル	座屈強度	対応方針例
1	設計時作用応力以上	腐食の進行を抑える措置
2	実作用応力以上，設計時作用 応力以下	補修計画を立て，数年以内に 補修
3	永続作用応力以上，実作用応 力以下	通行制限を実施し，速やかに 補修
4	永続作用応力以下	通行止めを実施し，緊急補修

JSSC腐食耐久性部会V期(2020年から5年間)研究計画案

サブテーマ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

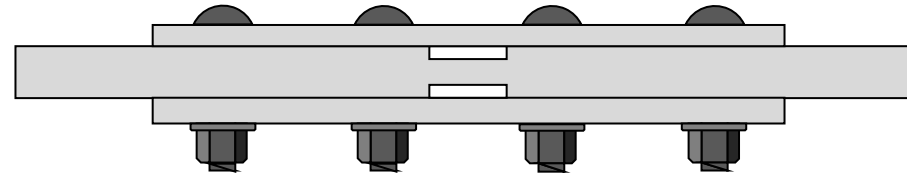
→ 腐食部位の力学特性を考慮した補修技術の評価

: 荷重伝達、座屈耐荷力、防食持続性、疲労耐久性の検証（実験、解析）

（当て板高力ボルト接合，CFRP接着接合，その他接着併用接合に対して，引張部材，圧縮部材，曲げ部材などの荷重伝達メカニズム，耐荷力向上メカニズム）

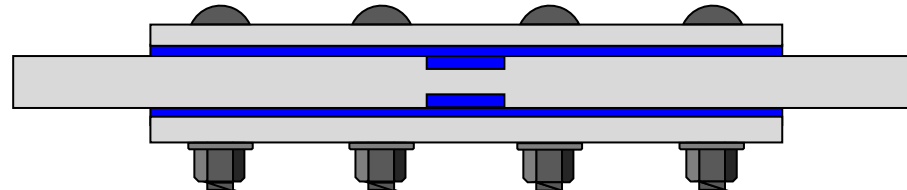
: 腐食凹凸面、残存さびを除去できる技術又は許容する技術
（文献調査，現場調査）

腐食損傷部材の高力ボルト
当て板補修

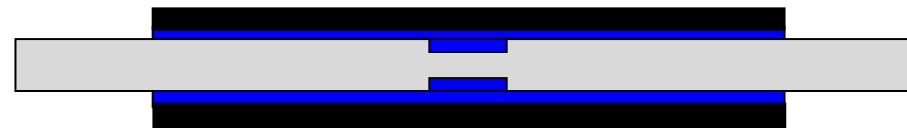


この成果を紹介する。

腐食損傷部の接着補修の併用



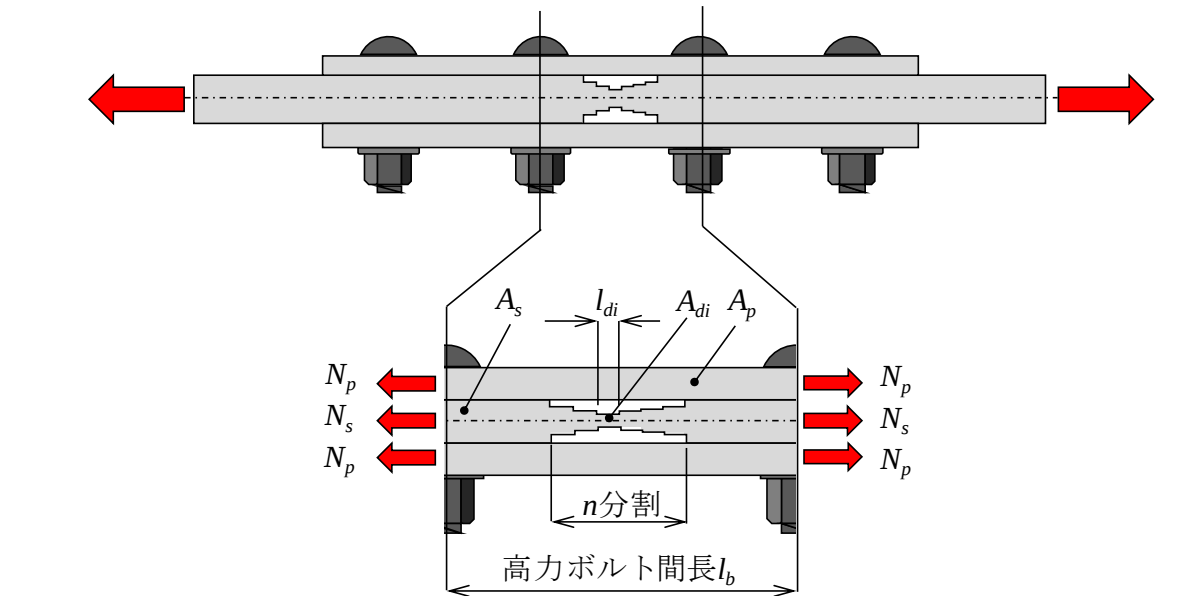
腐食損傷部材のCFRP接着補修



腐食損傷部材の高力ボルト当て板補修の力学メカニズム

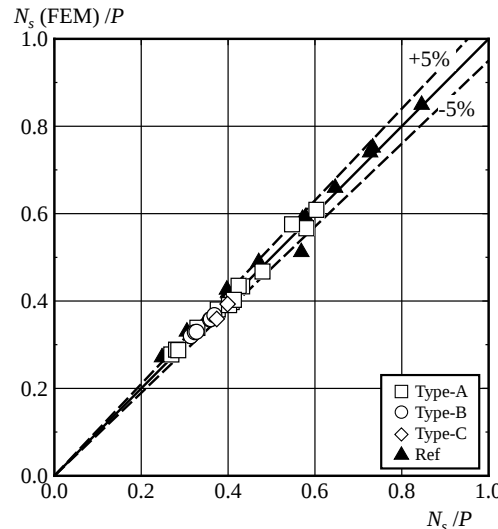
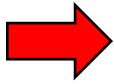
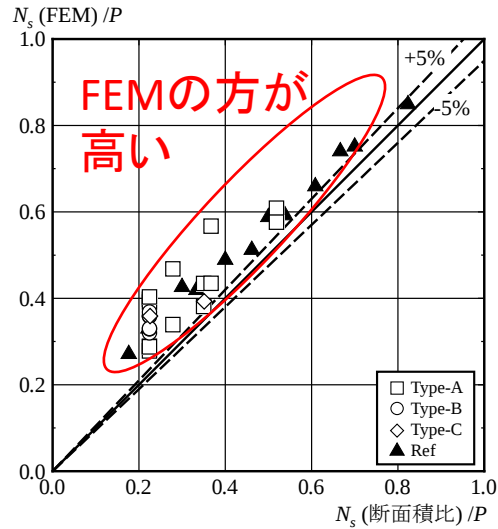
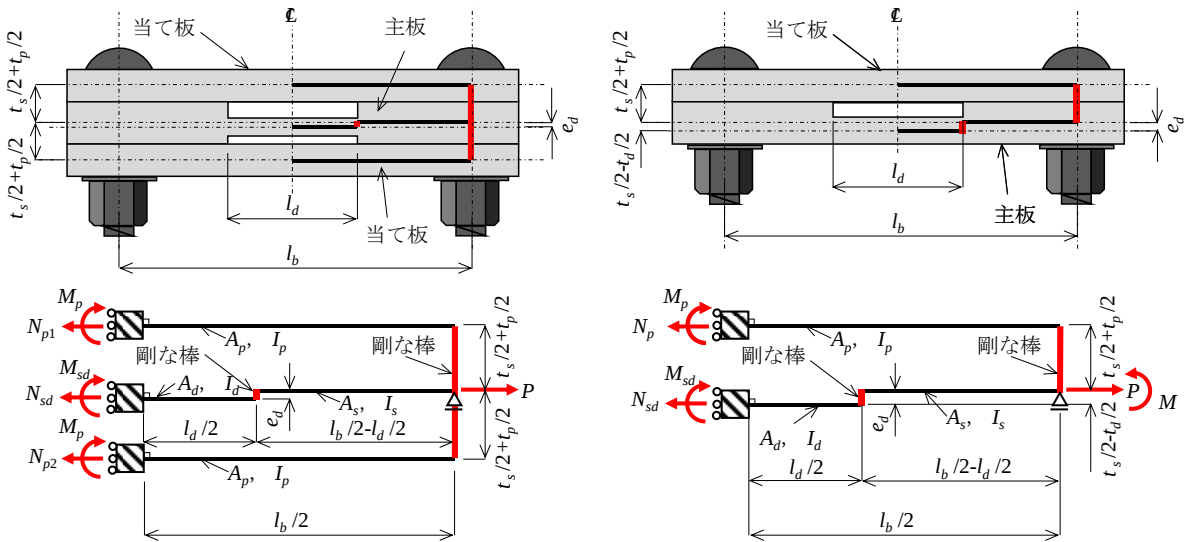
(2022年までに解明)

欠損部を跨ぐボルト間で変位の適合条件を与えて断面欠損部の母材の応力を推定
(断面欠損長が影響)



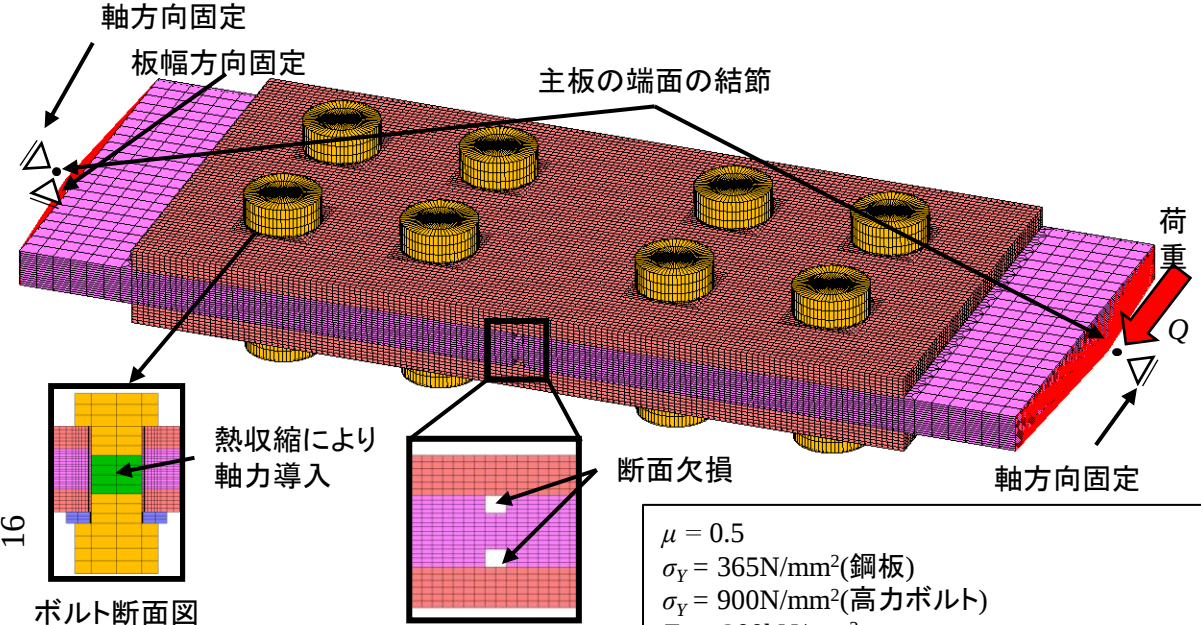
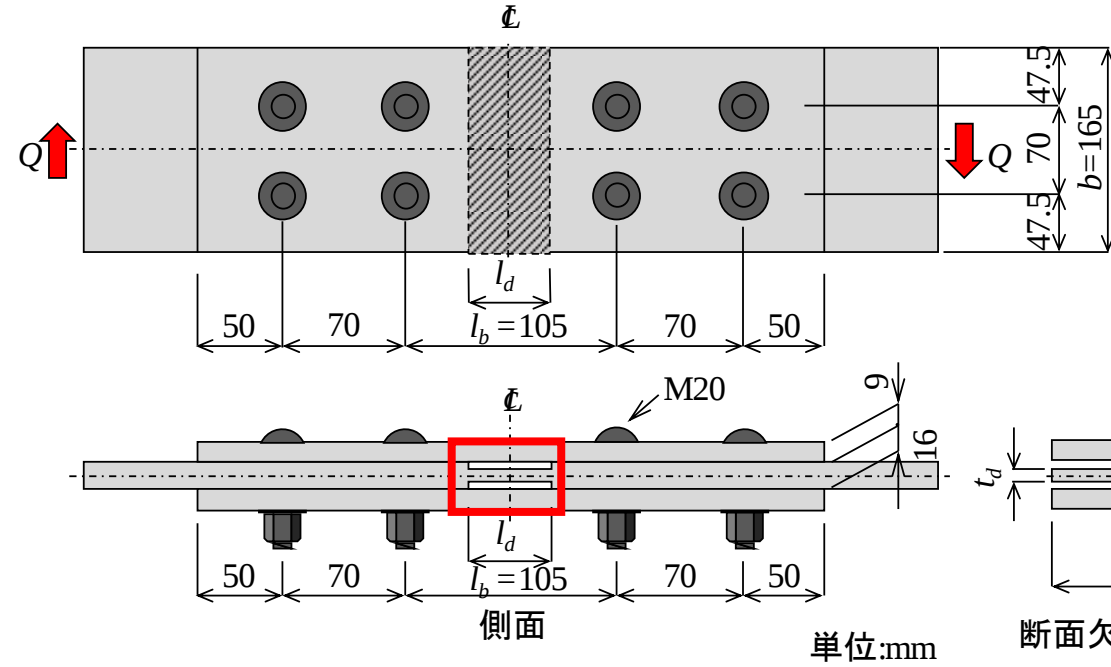
$$\frac{N_p l_b}{E_s A_p} = \frac{N_s}{E_s A_s} \left\{ l_b - \sum_{i=1}^n (l_{di}) \right\} + \frac{N_s}{E_s} \sum_{i=1}^n \left(\frac{l_{di}}{A_{di}} \right)$$

当て板の伸び ボルト間の健全部の母材の伸び 断面欠損部の母材の伸び

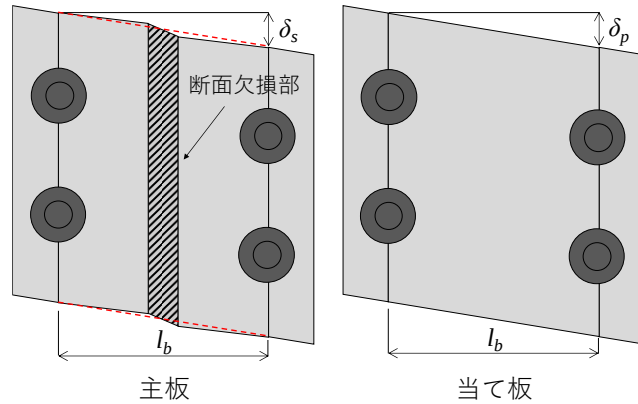


弾性範囲内の断面欠損部の分担軸力が推定できた 32

断面欠損当て板部材に対する分担するせん断力の評価 (2023年までに解明)

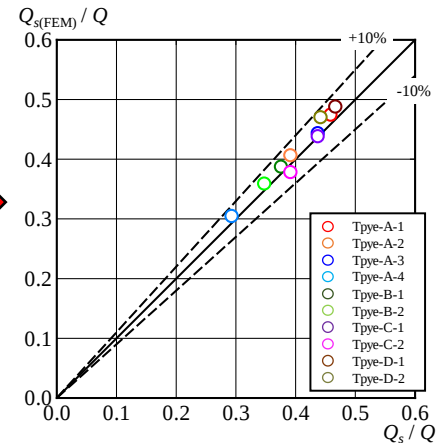
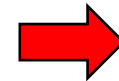
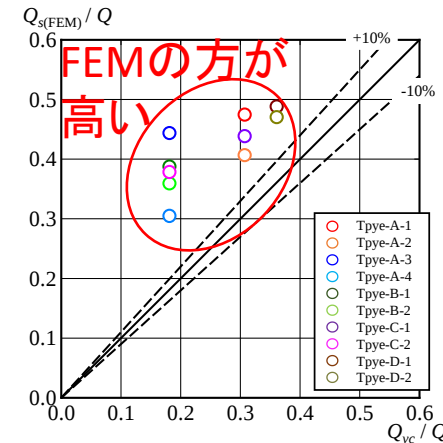


$\mu = 0.5$
 $\sigma_Y = 365\text{N/mm}^2$ (鋼板)
 $\sigma_Y = 900\text{N/mm}^2$ (高力ボルト)
 $E_s = 200\text{kN/mm}^2$
 $\nu = 0.3$
 M20の設計ボルト軸力 165kN (熱収縮)



欠損部を跨ぐボルト間でせん断変位の適合条件を与えて断面欠損部の母材の分担せん断力を推定(断面欠損長が影響)

$$\frac{Q_s}{G_s A_s} \left\{ l_b - \sum_{i=1}^n (l_{di}) \right\} + \frac{Q_s}{G_s} \sum_{i=1}^n \left(\frac{l_{di}}{A_{sdi}} \right) = \frac{Q_p l_b}{G_s A_p}$$

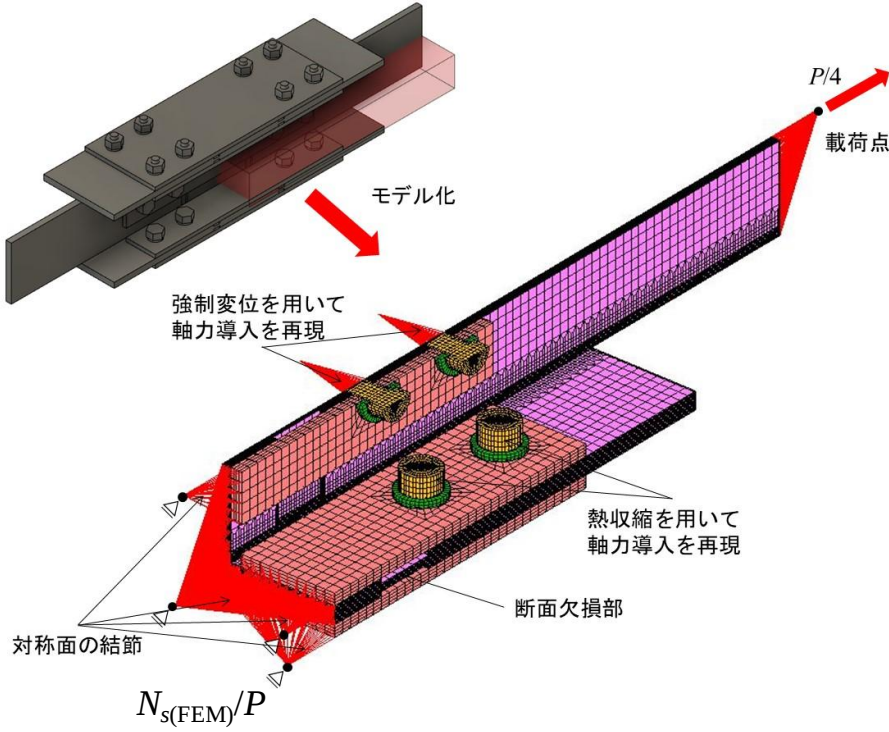
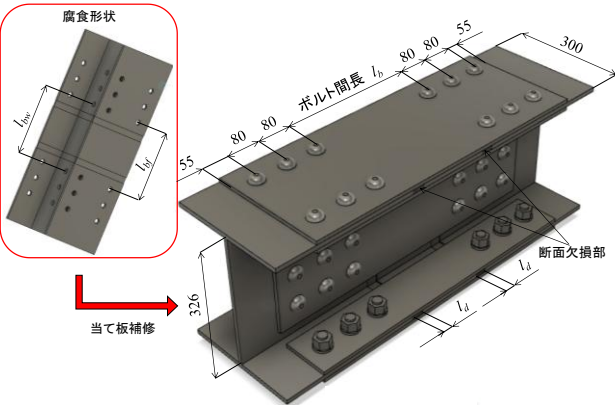


弾性範囲内の断面欠損部の分担せん断力が推定できた

腐食損傷部材の高力ボルト当て板補修の力学メカニズム (2024-2025年)

トラス部材など，部材レベルを対象に，断面欠損部の分担断面力を評価する。

2024年までに解明



ボルト間長での変位の適合条件

$$\frac{N_{pw} l_b}{EA_{pw}} = \frac{N_{pf_1} l_b}{EA_{pf_1}} = \frac{N_{pf_2} l_b}{EA_{pf_2}}$$

当て板の伸び

$$= \frac{N_w (l_b - l_d)}{EA_w} + \frac{N_w l_d}{EA_{wd}}$$

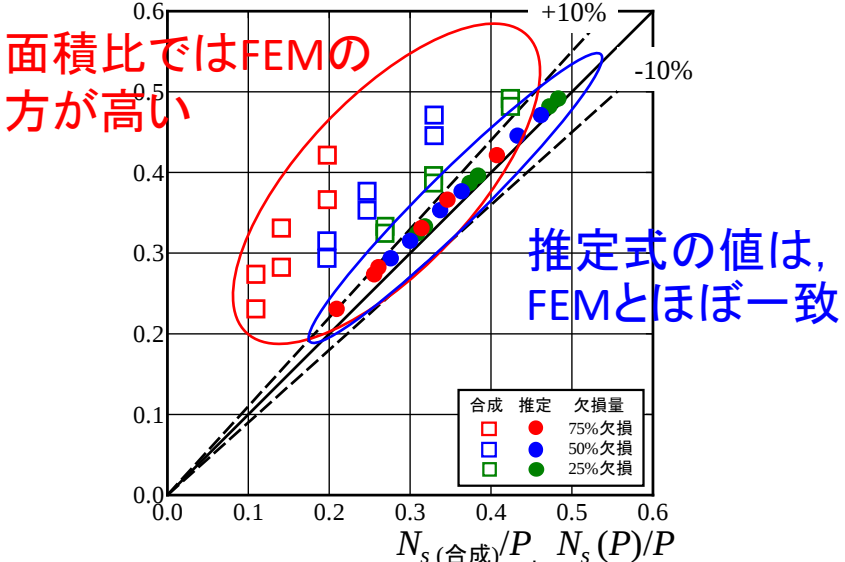
ウェブの伸び
(欠損含む)

$$= \frac{N_f (l_b - l_d)}{EA_f} + \frac{N_f l_d}{EA_{fd}}$$

フランジの伸び
(欠損含む)

トラス部材の分担軸力

$$N_s(P) = \frac{(1 + 2z_w/z_f) l_b}{(1 + 2z_w/z_f) l_b + z_w A_p} P$$



腐食損傷部材の高力ボルト当て板補修の力学メカニズム

(2024-2025年)

桁など、部材レベルを対象に、断面欠損部の分担断面力を評価する。

主桁ウェブからフランジに荷重の再分配があるため、せん断遅れ理論(4階の微分方程式)を用いた評価を実施。

