

競争力の強い超耐久性・極低LCC鋼橋の
開発と沖縄での取り組み



琉球大学
下里 哲弘

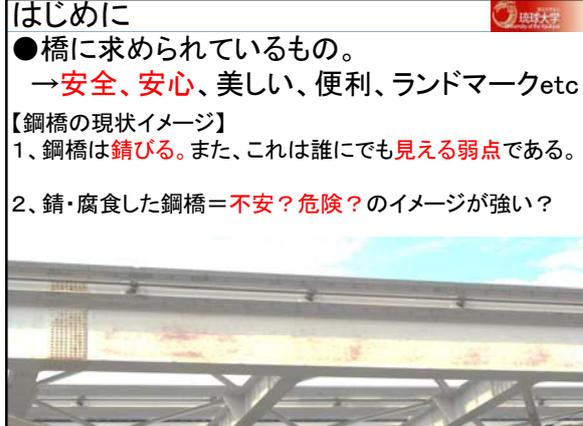
はじめに

●橋に求められているもの。
→安全、安心、美しい、便利、ランドマークetc

【鋼橋の現状イメージ】

1、鋼橋は錆びる。また、これは誰にでも見える弱点である。

2、錆・腐食した鋼橋＝不安？危険？のイメージが強い？



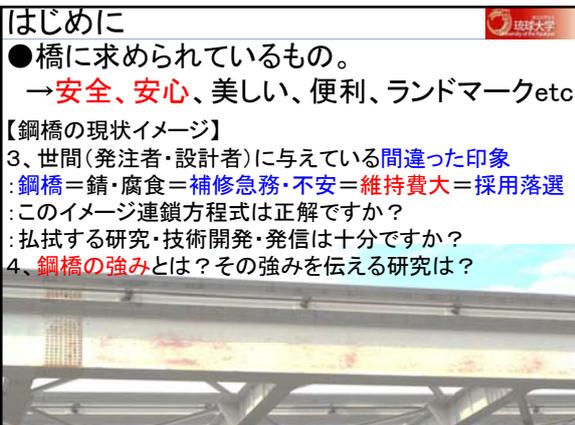
はじめに

●橋に求められているもの。
→安全、安心、美しい、便利、ランドマークetc

【鋼橋の現状イメージ】

3、世間（発注者・設計者）に与えている間違った印象
：鋼橋＝錆・腐食＝補修急務・不安＝維持費大＝採用落選
：このイメージ連鎖方程式は正解ですか？
：払拭する研究・技術開発・発信は十分ですか？

4、鋼橋の強みとは？その強みを伝える研究は？



講演内容

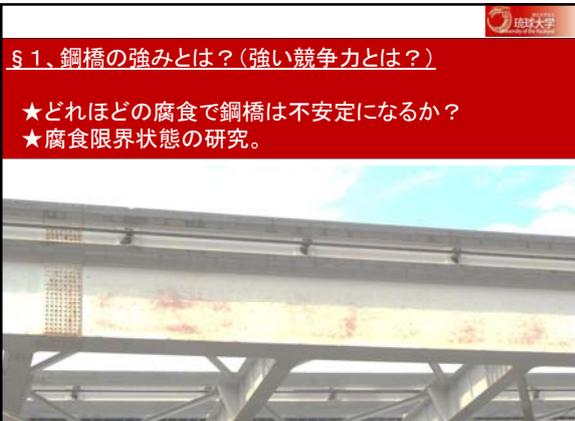
§ 1： 鋼橋の強みとは？（強い競争力とは？）
★どれほどの腐食で鋼橋は不安定になるか？
★腐食限界状態の研究。

§ 2： 超耐久性鋼橋の開発とは？
★鋼橋の真の弱点が明確にわかれば、超耐久性鋼橋の開発へと必ず繋がる。
★防錆防食部位の明確化。

§ 3： 沖縄地区での鋼橋の防食技術開発の取り組みの紹介

§ 1、鋼橋の強みとは？（強い競争力とは？）

★どれほどの腐食で鋼橋は不安定になるか？
★腐食限界状態の研究。



腐食により崩落に至った橋

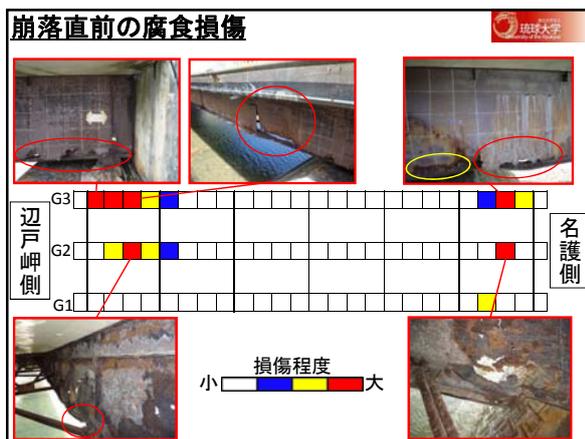
◆1981年建設、橋長35m
◆鋼単純合成桁橋（3主桁・RC床版）。
◆無塗装仕様の耐候性鋼橋。
★約50mの離岸距離 2～3mdd(NaCl)



桁端部の腐食破断

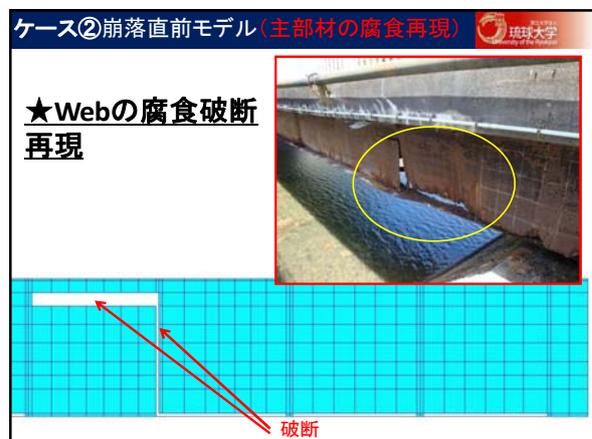
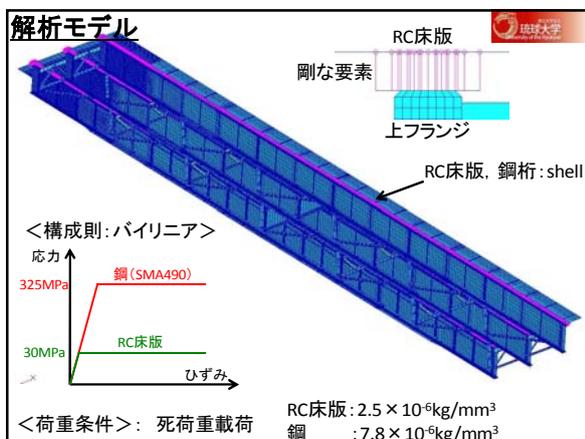
橋梁内部の激しい塩害劣化

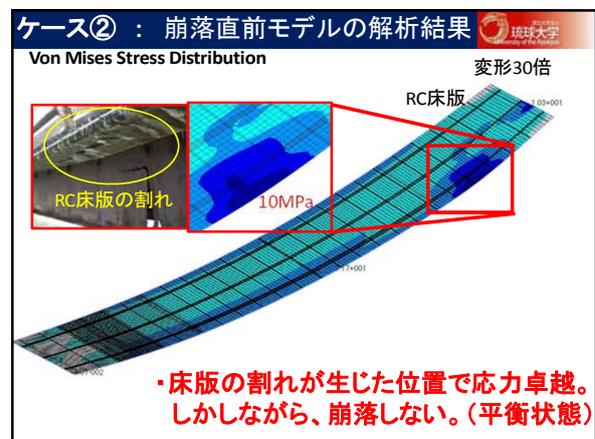
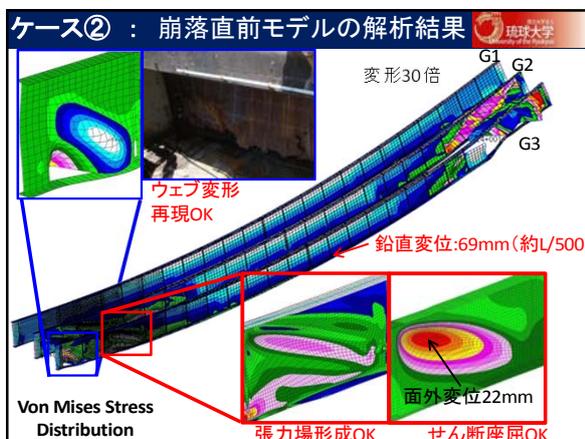
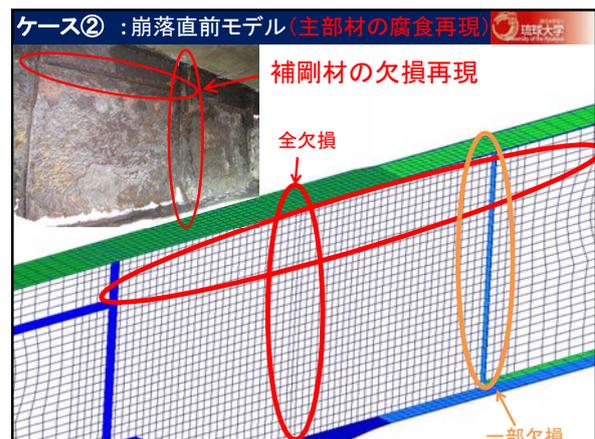
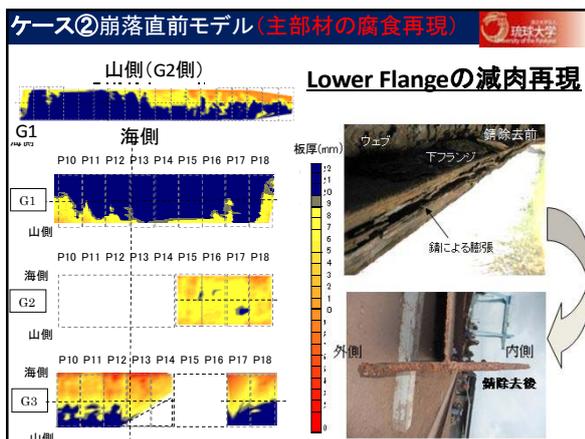
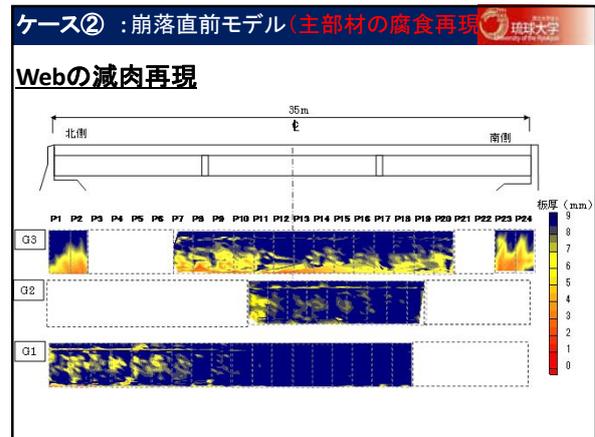
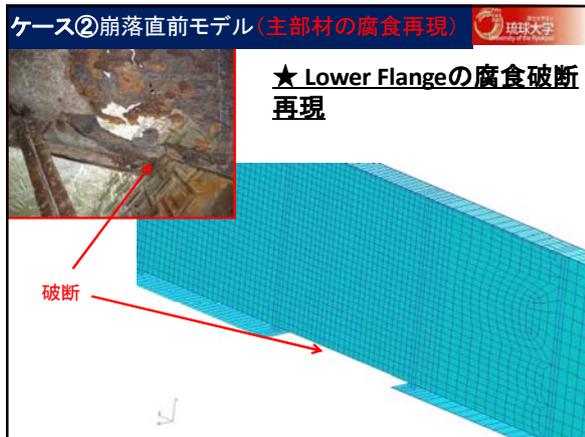
桁端部の破断、座屈

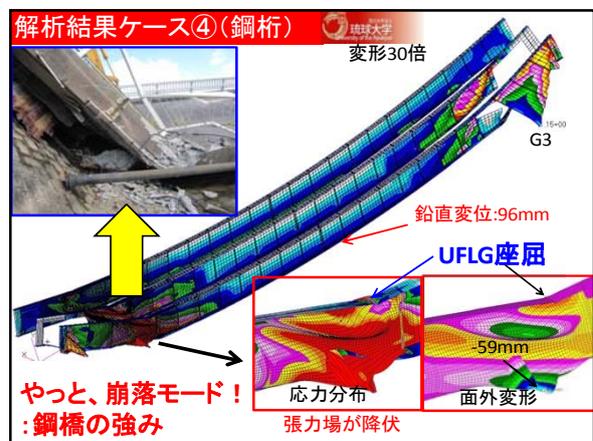
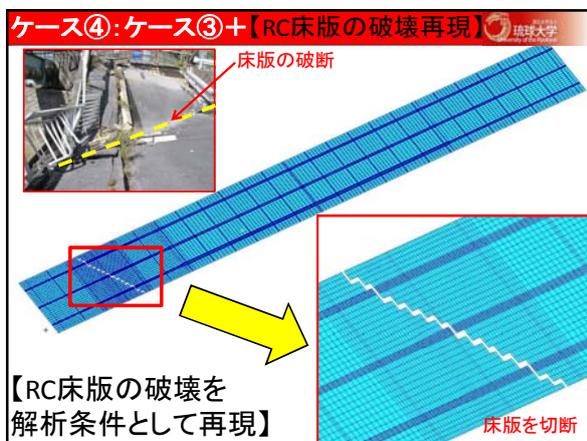
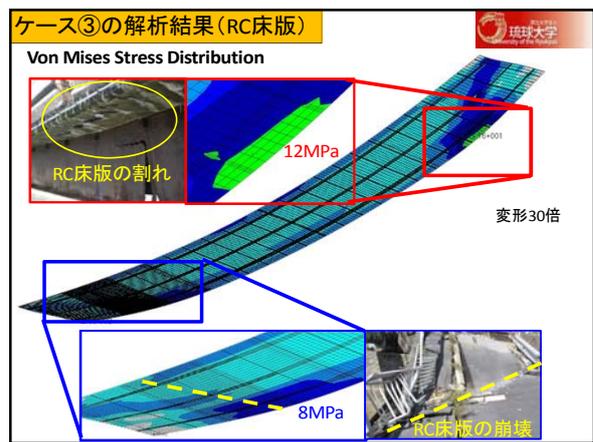
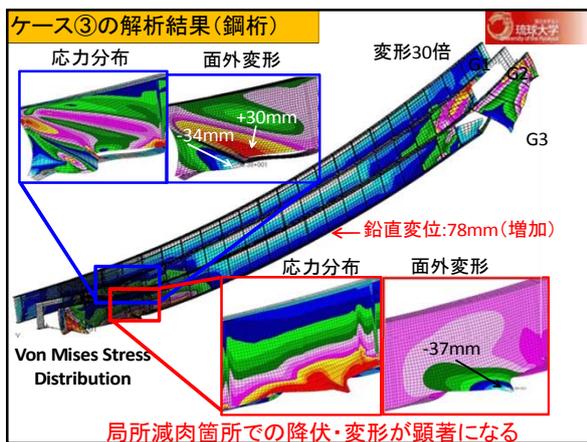
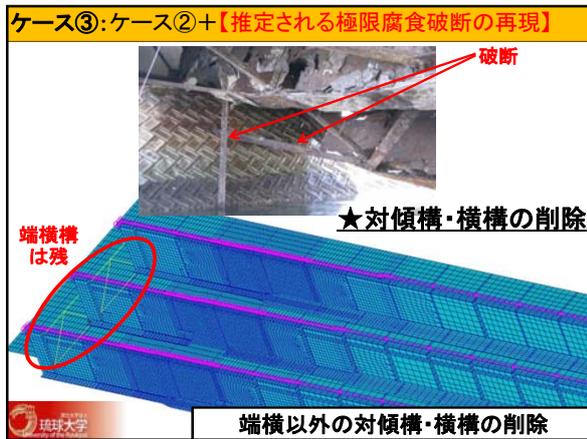


解析方法

解析ケース	モデル概要
ケース①	健全時
ケース②	崩落直前モデル(主部材の腐食再現) ・Web, LFLG, HS, VSの平均腐食減肉量 及び腐食断面欠損を再現
ケース③	ケース②+【推定される極限腐食の再現】 ・対傾構・横構なし(端横と分配横桁は有り) ・G2桁端部近傍のWeb削除







腐食高力ボルトの残存軸力

腐食高力ボルトの残存軸力に関する研究



実腐食橋梁より切り出したパネル
(4パネル×40本の総数160本)

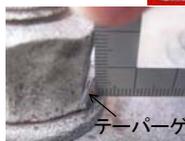



腐食減肉量の計測

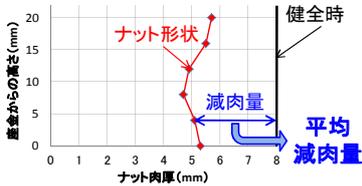
平均残存肉厚量の計測



ノギス
ナット上面の肉厚tを計測



テーパーゲージ
座金から高さ4mmピッチで隙間計測
(合計6箇所)



健全時
ナット形状
減肉量
平均減肉量
座金からの高さ(mm)
ナット肉厚(mm)

腐食減肉形状の分類

一様型



砂時計型



台形型

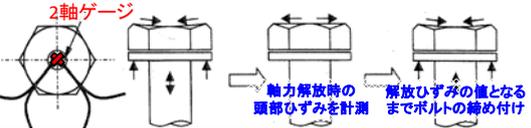


逆台形型



コア抜き残存軸力の推定(ひずみゲージ法の応用)

ボルト頭に貼り付けたひずみゲージより軸力を推定
ひずみゲージ法とは?



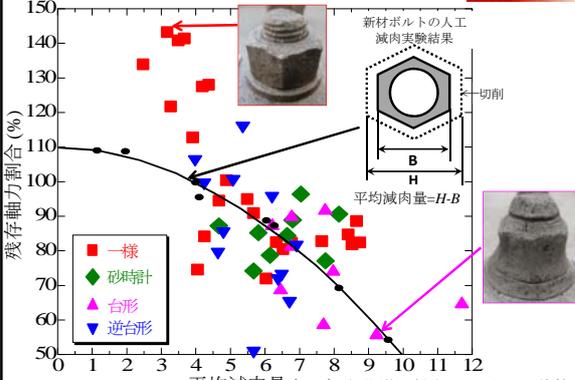
2軸ゲージ
軸力解放時の頭部ひずみを計測
解放ひずみの値となるまでボルトの締め付け

コア抜き



ボルトを緩めたり再び締め付けることは困難
ドリルを用いてコア抜きし、その際に解放されるひずみより軸力を推定

残存軸力測定結果(コア抜き)



新材ボルトの人工減肉実験結果

平均減肉量=H-B

初期導入軸力225kNとして換算

残存軸力割合(%)

平均減肉量(mm)

切削

■ 一様型
◆ 砂時計型
▲ 台形型
▼ 逆台形型

§ 1:まとめ

琉球大学
University of the Ryukyus

1. 鋼橋の強みとは？(強い競争力とは？)

- ★腐食鋼橋は高い安定性を保有している。
- ★腐食鋼橋の耐荷力評価は算定可能である。

↓

- ★腐食限界評価法の研究成果を発信し、
鋼橋の強さ・高い安全性・安心感を伝える。

31

§ 2. 超耐久性鋼橋の開発とは？

琉球大学
University of the Ryukyus

- ★鋼橋の真の弱点が明確にわかれば、超耐久性鋼橋の開発へと必ず繋がる。
- ★防錆防食部位の明確化。



鋼橋の腐食減厚分布特性

琉球大学
University of the Ryukyus

★実橋における簡易かつ実用的な腐食減厚計測法の提案

【計測法検討コンセプト】

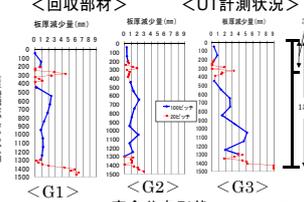
- 桁橋の腐食形状特徴を表現
- 実橋で計測可能な方法
- 腐食桁の耐力評価が可能




20mm & 100mmの混合間隔

＜回収部材＞

＜UT計測状況＞



腐食分布形状

1パネル160点

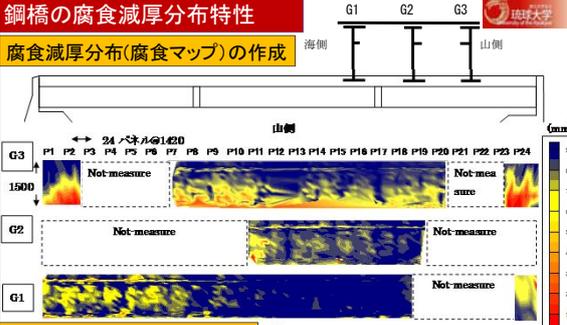
33

国土交通省新道路技術会議「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」委託研究成果

鋼橋の腐食減厚分布特性

琉球大学
University of the Ryukyus

腐食減厚分布(腐食マップ)の作成



腐食マップから得られた主な知見

- ・G1桁(海側): 水平補剛材と下フランジ近傍の腐食は激しく、ウェブ中央も顕著。
- ・G3桁(山側): ウェブ下端部が激しく、水平補剛材近傍の腐食も顕著である。
- ・G1桁(海側): 桁中間部の腐食減厚はほとんど発生していない。

34

国土交通省新道路技術会議「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」委託研究成果

腐食減厚分布(腐食マップ)の維持管理への活用

琉球大学
University of the Ryukyus



＜桁中間と桁端の腐食の違い(中桁)＞

過酷な塩害環境下でも桁中間部の腐食減厚は少なかった。

●維持管理重点部位: **桁端部の内面**。 → **桁端部の範囲とは？**

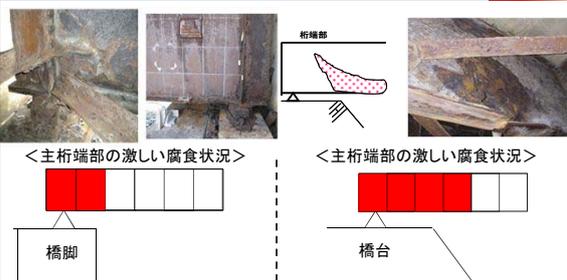
●暴露橋の飛来塩分: 道示規定0.05mddよりかなり多いが、約30年後でも支間中間では腐食減厚が少なかった。
⇒LCCに優れる耐候性鋼橋の適用範囲や技術開発へ反映。

35

国土交通省新道路技術会議「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」委託研究成果

腐食減厚分布(腐食マップ)の維持管理への活用

琉球大学
University of the Ryukyus



＜主桁端部の激しい腐食状況＞

橋脚

橋台

・一般的な橋脚の場合
【市街地などに多い構造形式】
:ジョイント漏水の影響を受け、支点部を含む端部2パネル。

・護岸施設などがある場合
【沿岸部や河川部に多い構造形式】
:護岸の影響を受ける範囲を提案。
＜飛来塩分の集中作用＞

36

国土交通省新道路技術会議「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」委託研究成果

腐食減厚分布(腐食マップ)の維持管理への活用

維持管理の重点構造部位 ⇒ **下フランジ-ウェブ溶接部周辺**

<主桁外面の腐食破断> <主桁内面の腐食状況>

- この部位は接近目視でないと見えない。
- ⇒ 点検計画等において接近方法の検討などの事前準備が重要。
- 腐食減厚進行⇒溶接部上部のウェブで破断。【耐荷力低下】。
- 特に橋台や護岸構造物の直近では、最も速く腐食減厚し破断する。
- ⇒ **点検時の最重要部位。**

国土交通省新道路技術会議「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」委託研究成果 37

腐食減厚分布(腐食マップ)の維持管理への活用

維持管理の重点構造部位 ⇒ **補剛材-ウェブ溶接部周辺**

水平補剛材 ウェブ

<水平補剛材近傍> <垂直補剛材近傍>

垂直補剛材 水平補剛材位置

<水平・垂直補剛材近傍のウェブ破断>

- 補剛材溶接部近傍のウェブ母材で局部的に腐食減厚する。
- 腐食進行に伴ってウェブ母材の破断する。⇒【耐荷力低下】

国土交通省新道路技術会議「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」委託研究成果 38

腐食鋼橋の残存耐荷力評価に関する研究

試験桁A 均一腐食 平均板厚8.13mm	試験桁B 腹板下部腐食 平均板厚7.47mm	試験桁C1 HS・腹板中央腐食 平均板厚7.93mm	試験桁C2 HS・腹板中央腐食(卓越) 平均板厚7.46mm
----------------------------	------------------------------	----------------------------------	--------------------------------------

国土交通省新道路技術会議「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」委託研究成果

腐食鋼橋の残存耐荷力評価に関する研究

実験方法

6000kN大型試験機(施工技術総合研究所) 変位計の設置状況

国土交通省新道路技術会議「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」委託研究成果

実験結果(荷重-変位)

せん断耐力V(kN) 鉛直変位 δ_v(mm)

実験結果(最大せん断力)

$V_{max}/N_{cr}(t=9mm)$ $t_{ave}/t_{(9mm)}$

最大せん断力-平均板厚減少

国土交通省新道路技術会議「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」委託研究成果 41

実験結果(せん断座屈強度)

$V_{gr}/N_{cr}(t=9mm)$ $t_{ave}/t_{(9mm)}$

座屈設計ガイドライン計算式

試験桁B(腹板下部腐食) 平均板厚7.47mm

試験桁C2(HS・腹板中央腐食・卓越) 平均板厚7.46mm

<せん断座屈-平均板厚減少>

国土交通省新道路技術会議「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」委託研究成果 42

§ 2:まとめ

2、超耐久性鋼橋の開発とは？

- ★鋼橋の耐荷力・腐食環境上の真の弱点は端部のみ。
- ★端部の防食のみで長寿命を満たす。
- ★LCC思想は鋼橋にとって最大のチャンス
- ：劣化程度が計算できる強み。
- ：錆・腐食は表面から進行。見える損傷・わかるダメージ度
- ：鋼の強みを活用した新メンテ思想
- 例えば、
- 塗膜劣化→発錆→腐食過程を許容する設計思想の導入。

⇒ 腐食を許容するMaintenance Strategyの研究



沖縄地区での鋼橋防食技術開発の取組み

① 部材エッジ部の防食技術

- ・2R加工基準の開発 (工場:新設、現場:塗替)
- ・膜厚検査機器、方法の開発

④ 水洗い技術

- ・水洗い機械の開発
- ・**試験施工** (効率化、汎用性、環境配慮)

② ボルト適合部の防食技術

- ・膜厚検査機器、方法の開発
- ・ボルトキャップの評価、開発
- ・**全断面溶接橋梁**の適用検討

⑤ 桁端部の防食技術

- ・非排水型伸縮装置の開発
- ・排水構造の開発
- ・支承構造の防食構造の開発

③ 飛来塩分防護構造

- ・**防護板構造**の開発
- ・合理化橋梁形式の開発 (箱桁、2次部材の省略)

⑥ 耐食性に優れた橋梁

- ・ステンレス橋梁の開発、適用
- ・**金属溶射橋梁**の開発、適用
- ・**新箱桁橋梁**の開発、適用

沖縄地区鋼橋塗装マニュアル(平成20年8月)
：沖縄総合事務局開発建設部・沖縄県土木建設部監修

沖縄マニュアルの特色：超厚膜化

【超厚膜塗装仕様】
鋼道路橋塗装・防食便覧で規定された塗装仕様(C-5、ふっ素樹脂塗料)をベースに、下塗りの膜厚を厚くした塗装仕様を規定している。

一般外面(新設)	
【C-5塗装(※17塗装便覧)】	【沖縄版新マニュアル(M20)]
①無機ゾル 75μm	①無機ゾル 75μm
②エポキシ下塗 120μm	②エポキシ下塗1層 100μm
③ふっ素用中塗 30μm	③エポキシ下塗2層 100μm
④ふっ素上塗 25μm	④ふっ素用中塗 30μm
	⑤ふっ素上塗 25μm
計 250μm	計 330μm

厚膜化による効果検証が必要。⇒ 桁模型の暴露試験中

沖縄マニュアルの特色：洗浄

【洗浄】 新設の現場塗装時と維持管理時の洗浄規定
：付着塩分量50mg/m²以下

< 桁内: 雨洗浄なし >

< 桁外: 雨洗浄効果 >

洗浄効果は実証済。効率的で持続可能な洗浄方法を試験中

● 洗浄後の腐食速度モニタリング (試験鋼板)

横置き(下フランジ面) 膜厚変化

⇒

耐食性鋼センサ発錆状況

●ナノバブル水を用いた腐食鋼材中の付着塩分洗浄

水道水での洗浄試験

- 表面塩分量: 378mg/m²
- 平均錆厚初期値: 428.5μm
- 表面塩分量: 134.2mg/m² (64.5%減)
- 平均錆厚: 409.6μm

ナノバブル水での洗浄試験

- 表面塩分量: 399mg/m²
- 平均錆厚: 474.4μm
- 表面塩分量: 54.9mg/m² (86.2%減)
- 平均錆厚: 484.3μm

沖縄マニュアルの特色：塗装の弱点克服

塩害対策：高力ボルト継手⇒溶接継手を推奨

★過酷な塩害環境の沖縄でチャレンジ
全断面溶接接合の箱桁 → ●飛来塩分の付着を防止、
②塗装の寿命は塗膜の寿命、③大型車の少ない沖縄に適合

高力ボルト継手の防食技術の課題

通称：花が咲いているボルト

ボルト添接部のみ錆び・腐食

原因は何か?対策は?

通称：バラが咲いているボルト

高力ボルト継手の防食技術の課題

原因は何か?対策は?

土木学会西部支部沖縄会 技術研究討論会(9月25日)

論点①:発錆原因は何か?現行仕様でOK?

- ⇒ 塗装仕様?(膜厚、耐紫外線等)
- ⇒ 施工品質?(膜厚確保、付着性等)
- ⇒ 沖縄の環境?(紫外線、塩分、湿気)
- ⇒ ボルト添接構造?(角部、材質?)

論点②:高耐久防錆技術とは?

- ⇒ 防錆・防食ボルトの開発状況
- ⇒ 施工品質向上技術とは?

高力ボルト継手の防食技術の課題

沖縄版と塗装防食便覧(全国版)の高力ボルト接合部の塗装系比較

工程	新沖縄新設塗装系		便覧新設塗装系	
	塗料または素地調整	標準膜厚(μm)	塗料または素地調整	標準膜厚(μm)
素地調整	プラスト処理 ISO Sa2 1/2	—	プラスト処理 ISO Sa2 1/2	—
防食下地	無機ジンクリッチペイント	75	無機ジンクリッチペイント	75
素地調整	動力工具 ISO St3	—	動力工具 ISO St3	—
ミストコート	変性エポキシ樹脂塗料下塗	—	変性エポキシ樹脂塗料下塗	—
下塗第1層	超厚膜形エポキシ樹脂塗料下塗	300	超厚膜形エポキシ樹脂塗料下塗	300
下塗第2層	超厚膜形エポキシ樹脂塗料下塗	300	—	—
中塗	ふっ素樹脂塗料用中塗	30	ふっ素樹脂塗料用中塗	30
上塗	ふっ素樹脂塗料上塗	25	ふっ素樹脂塗料上塗	25

沖縄マニュアル：対策として厚膜塗装の採用

原因＝膜厚不足? 対策＝厚膜化?

高力ボルト継手の防食技術の課題

ナットの採取

膜厚検証実験

沖縄版	膜厚(μm)		
	実際	設計	差
1 上	30	25	5
2 中	—	30	-30
3 下2	52	300	-248
4 下1	250	250	0
5 建築防食便覧(全国版)	実際	設計	差
6 2	89	25	64
7 2	39	30	9
合計	498	388	110

対策の方向性:防錆・防食ボルトの開発状況



防錆処理ボルト

- 下地処理+ウオッシュプライマー30μm
- 本締めまでの6か月~1年の期間有効
- 沖縄塗装マニュアルで規定(F10T仕様)



溶融亜鉛メッキボルト

- HDZ55(付着550g/m²)
- F8T仕様(道路橋示方書規定)



高耐食性超高力六角ボルト (12G55)

- 55%アルミ・45%亜鉛合金
- F10T仕様対応
- 溶融亜鉛めっきより約3倍以上の耐食性(メーカー資料)



SGメッキボルト

- 5%Al-1%Mg-Zn(付着量は350g/m²以上)
- F8T仕様
- 溶融亜鉛めっきより約10倍以上の耐食性(メーカー資料)

海洋架橋の鋼橋で適用した防食技術



海上距離約4.3kmの離島架橋 (Miyako in Okinawa)

橋長: 420.0m(120.0m+180.0m+120.0)

伊良部大橋 (沖縄県宮古島市)

- 1ボックスの構造形式
- 外面部は全溶接を採用
- 吊金具省略⇒外面突起なし
- ⇒塗膜自体の寿命を100%期待

海洋架橋の鋼橋で適用した防食技術

一般外面仕様 (伊良部大橋主航路部仕様)

塗装工程	塗料名	方法	標準使用量 (g/m ²)	目標膜厚 (μm)	塗装期間 ^{①②}
表面調整	製品プラスト処理 ISO Sa2.5以上 ^{③④}				4時間以内 ^⑤
金属溶射 ^{⑥⑦}	アルミニウム(95%)・マグネシウム(5%)合金	プラズマ溶射	500	150以上	12時間以内
封孔処理	金属溶射封孔処理剤	エアレス	200	—	24時間以内
下塗り	エポキシ樹脂 下塗り	エアレス	540	120	16時間以上 7日以内
中塗り	ふっ素樹脂塗料用中塗り	エアレス	170	30	16時間以上 10日以内
上塗り	ふっ素樹脂塗料上塗り	エアレス	140	25	1~10日

海上部での100年耐用仕様

- 防食下地: ジンク塗装→アルマグ溶射
- 溶射上面: エポキシ塗装+フッ素塗装



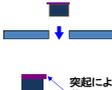
海洋架橋の鋼橋で適用した防食技術

足場吊金具の省略

足場設置時



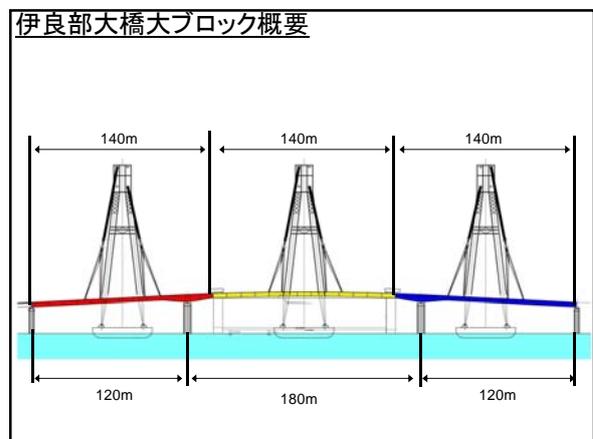
通常供用時



突起により落下しない



Nexco中日本高速、東京ゲートブリッジにも適用





回航体制

- 回航条件: 波高2.5m以下
- 回航時の疲労損傷の把握: ひずみ計測
- 回航後の損傷の確認: 疲労亀裂の有無の目視確認
部材の残留変位の計測

ひずみ計測

疲労損傷の確認

部材変形の確認

波高データ

波高予測値

ナウファス計測結果

曳船定時報告結果

輸送限界(波高: 2.5m, 風速: 19m/s)

波高予測値とナウファス計測結果、曳船の定時報告結果は良く一致

波高データ

千葉工場⇒志布志港

輸送限界(波高: 2.5m, 風速: 19m/s)

波高データ

志布志港⇒那覇港

輸送限界(波高: 2.5m, 風速: 19m/s)

波高データ

那覇港⇒平良港

輸送限界(波高: 2.5m, 風速: 19m/s)

ひずみデータ

- ひずみゲージ張付位置
 - 橋軸方向: デッキプレート下面と下フランジ上面
 - 橋軸直角方向: ダイアフラムのデッキプレート下面と下フランジ上面

