

道路政策の質の向上に資する技術研究開発

【研究状況報告書（2年目の研究対象）】

①研究代表者	氏名（ふりがな）		所属	役職
	しもぎと てつひろ 下里 哲弘		琉球大学	准教授
②研究 テーマ	名称	鋼橋の腐食劣化メカニズムの解明と耐久性診断に関する研究		
	政策 領域	[主領域]「大切な道路資産の科学的な 保全」	公募 タイプ	タイプII
		[副領域]「コスト構造を改革し、道路 資産の効率的な形成」		
③研究経費（単位：万円）	平成21年度	平成22年度	平成23年度	総合計
※H21は精算金額、H22は受託 金額、H23は計画額を記入。 端数切り捨て。	800	1,200	1,200	3,200
④研究者氏名	（研究代表者以外の主な研究者の氏名、所属・役職を記入。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。）			
氏名	所属・役職			
有住 康則	琉球大学・教授			
押川 渡	琉球大学・准教授			
小野 秀一	(社)日本建設機械化協会 施工技術総合研究所・次長			
玉城 喜章	(社)沖縄しまたて協会 技術環境研究所・研究員			
⑤研究の目的・目標	（提案書に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入。）			
<p>本研究では、腐食劣化した鋼桁橋に対する実用的な耐久性診断法の提案を目的に、過酷な腐食促進環境下で約30年間曝された極限の腐食状態にある鋼I桁橋（以下、「暴露橋」）を研究対象に、実橋スケールでの腐食減厚調査、腐食環境調査、および暴露橋から採取した腐食鋼材を用いた構造実験を行い、腐食劣化した鋼I桁橋の腐食分布特性と腐食環境特性を評価する。また、構造部位の腐食分布特性に応じた耐荷力・耐久性能を評価する。以下に研究内容を示す。</p> <p>(1) 暴露橋の腐食減厚調査結果より、鋼I桁橋の腐食分布特性を明確に示した腐食マップを用いて、合理的な腐食診断法を提案する。</p> <p>(2) 暴露橋の腐食環境調査結果を用いて、鋼I桁内における海塩粒子の飛来特性と腐食特性を解明し、鋼I桁の腐食環境を緩和できる対策法や防錆技術資料を目指す。</p> <p>(3) 暴露橋から回収した腐食鋼材を用いて、構造実験（疲労試験、耐荷力実験、疲労／静的試験）およびFEM解析を行い、腐食劣化レベルに応じた鋼I桁橋の耐久性診断法を提案する。</p>				

⑥これまでの研究経過 (研究の進捗状況について、必要に応じて図表等を用いながら具体的に記入。)

1. 構造部位別の腐食劣化メカニズムの解明

(1) 鋼I桁橋の構造部位別の腐食診断法の提案

鋼I桁橋の構造部位別の腐食分布特性を明確にすることを目的に、撤去された暴露橋に対して超音波厚さ計を用いた腐食減厚調査を行い、図1に示す鋼I桁橋の腐食分布特性を示した腐食マップを作成した。この腐食マップより、桁端部の腐食減厚は桁中間部に比べて著しく激しいという既知の腐食特徴の他に、主桁位置 (G1, G2, G3) によって腐食減厚分布形状が大きく異なるという特徴が得られた。以下に要点を示す。

- a) G1桁 (耳桁) の腐食特性は、一般的に腐食速度が速いことで知られている主桁ウェブ下端部に加え、水平補剛材上面と主桁ウェブ中央部近傍で腐食減厚が顕著となる腐食分布特性が得られた。特に水平補剛材上面の腐食減厚は下フランジ近傍の腐食と同様に著しく、点検時の留意事項や耐荷力にも影響を及ぼす重度な腐食減厚特性を示した。
- b) G3桁 (耳桁) の腐食特性は、これまでの知見どおり、主桁ウェブ下端部での腐食減厚が特に激しかったが、G1桁同様に水平補剛材下面近傍の腐食減厚も見られたが、G1桁ほど腐食減厚とはなっていない。
- c) G2桁 (中桁) の腐食特性は、調査桁数が少ないが、概ねG1桁とG3桁の腐食減厚特性の両方の特性を有していると推測される。
- d) 暴露橋のような過酷な腐食環境で長期間にわたり無塗装で曝された場合でも、G1,G2桁の中間部は腐食減厚がほとんど発生していない。このことは合理的な点検調査や腐食診断を考える上で貴重な結果である。

以上のことを踏まえ、この腐食マップは鋼I桁橋の腐食特徴を明確に示し、効率的かつ確実な点検・調査・診断へ活用ができる。特に腐食環境の厳しい沿岸部などでは貴重な資料となる。以下に維持管理ステップに対する腐食マップの活用点をまとめる。



- ① 定期点検計画：腐食点検マップや腐食が発生しやすい構造部位の事前講習資料など
- ② 点検結果の照査：見落とし防止チェック資料など
- ③ 詳細調査計画：腐食減厚調査計画へ反映など

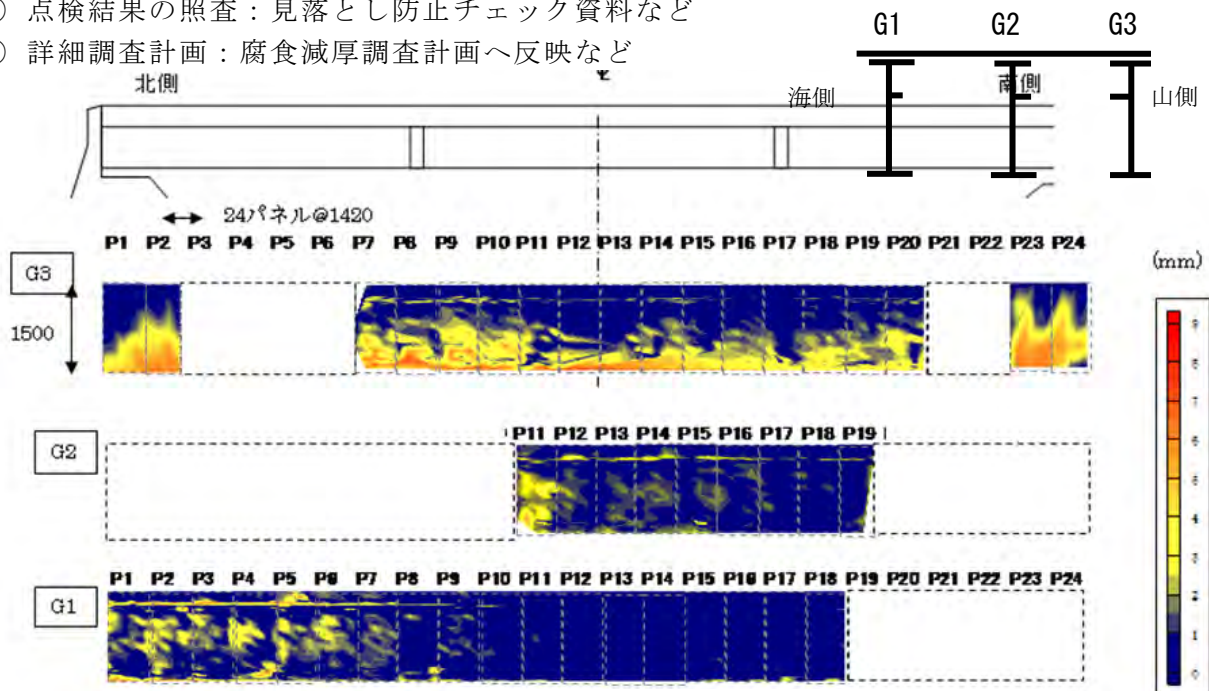


図1 腐食マップ (板厚減少量: mm)

(2) 鋼I桁内における海塩粒子の飛来特性と腐食分布特性の解明

暴露橋で得られた主桁位置および構造部位毎に異なる腐食特性現象の解明として、流体実験を行い、鋼I桁内の粒子の飛来特性を検証した。検証には暴露橋（3主桁）を対象とした桁モデルを作製し、風速をパラメータとした流体実験（琉球大風洞試験室）を行った。実験にはオイルミスト粒子を噴霧し飛来させ、高速カメラにより桁内の粒子移動を観測した。図2に実験結果を示す。図より、中桁であるG2桁のウェブに当たった粒子が方向を反転し、G1-G2間で渦を巻き、G1主桁内面ウェブ方向へ流れているのがわかる。これは、図1で示したG1の腐食分布特性である水平補剛材上面の腐食減厚現象を説明できる。G3桁では主桁ウェブに粒子があたり反転し、水平補剛材下面近傍まで粒子が流れた後に渦を巻き、G2桁ウェブ方向へ流れる傾向が得られた。これはG3桁の主桁ウェブの腐食減厚が主桁ウェブ下端部および水平補剛材下面で発生する現象を説明できる。また、桁下空間を変化させた際、桁内の渦の流れが変化する現象もみられた。この原因については継続的に検証中である。なお、桁高、桁幅、桁下空間及び桁本数をパラメータとした桁モデルの流体実験も実施している。H23年度は、これらの実験結果を踏まえたパラメトリック解析を行い、桁配置と桁下空間などに対する鋼I桁の飛来粒子特性を解明し、桁配置、構造形式および細部構造など鋼I桁の腐食環境を緩和できる対策法を研究する。

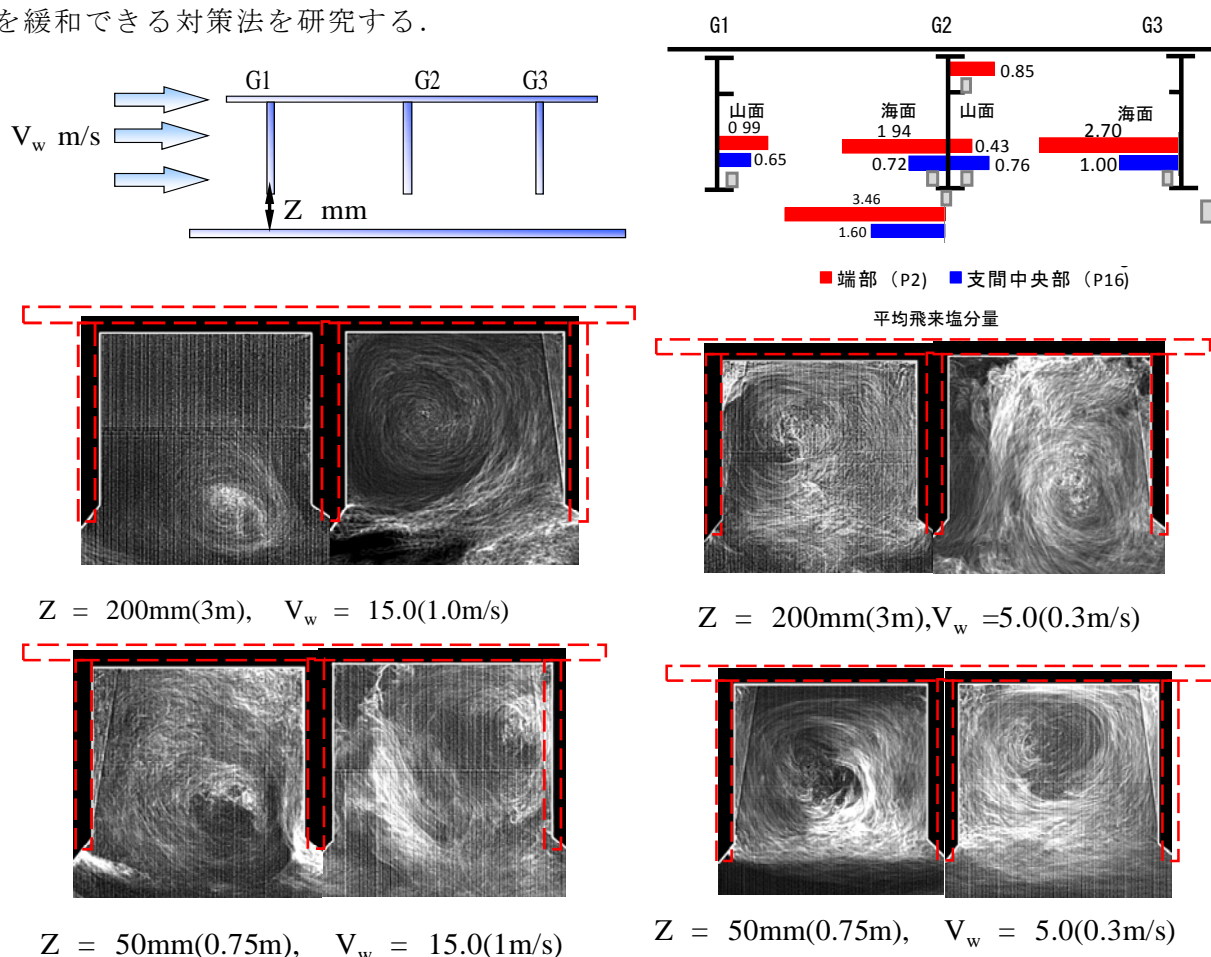


図2 I桁内の流体特性（右上：暴露橋の飛来塩分分布）

※ () の数字は実橋換算値である。

2. 腐食劣化した鋼I桁橋の耐荷力評価

(1) 弾塑性FEM解析を用いた腐食鋼I桁の耐荷性能評価

鋼I桁橋の腐食で最も腐食しやすい構造部位はせん断力の卓越する支点近傍であり、暴露橋の崩落要因点でもあった。本研究では図1で示した腐食分布特性とせん断耐荷力特性の評価を目的に、暴露橋で実測した腐食減厚データを用いた弾塑性FEM解析を実施した。図3に解析モデル、図4に特徴的な腐食減厚分布を示す。図5に荷重-変位関係を示す。図5より、G3(くさび形腐食形状)よりG1(W形腐食形状)の方が耐荷力は低くなっている。図6に実測板厚10ケースと一様減厚ケースにおけるせん断耐荷力特性を示し、図7にせん断座屈モードの一例を示す。図6の横軸は健全モデルの板厚を基準にした平均残存板厚率を示す。図6より、腐食分布特性に関わらず、腐食減厚に伴い耐荷力は低下するが、G1(W形)では腐食減厚に伴う耐荷力の低下がより大きくなっている。これより、一般的に残存耐荷力の評価に適用される平均板厚および最小板厚ではなく、桁位置や構造部位で異なる腐食分布特性を考慮した耐荷力解析が必要である。次年度は上記の耐荷力特性を考慮した腐食鋼桁の耐荷性能評価を提案する。

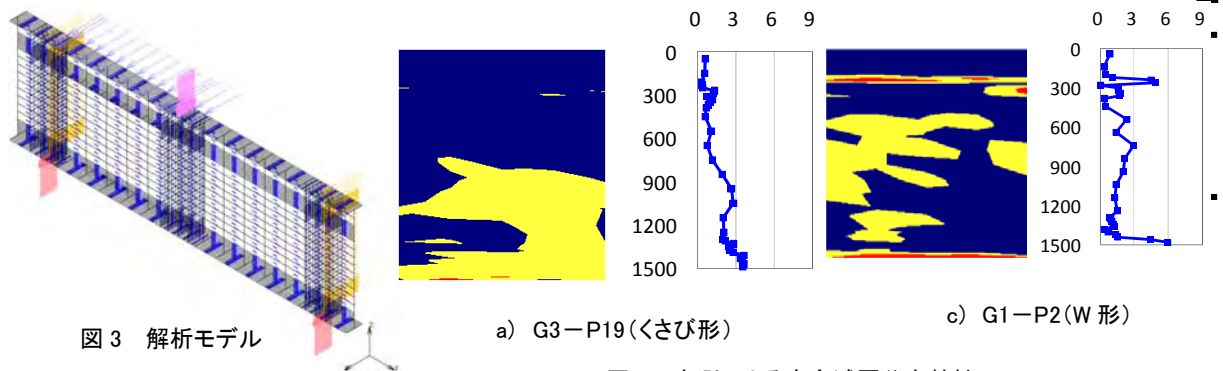


図3 解析モデル

a) G3-P19(くさび形)

c) G1-P2(W形)

図4 実測による腐食減厚分布特性

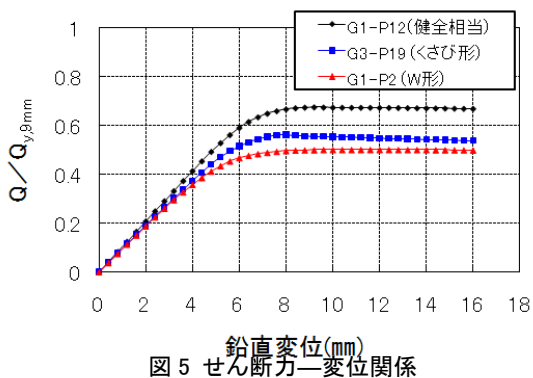


図5 せん断力-変位関係

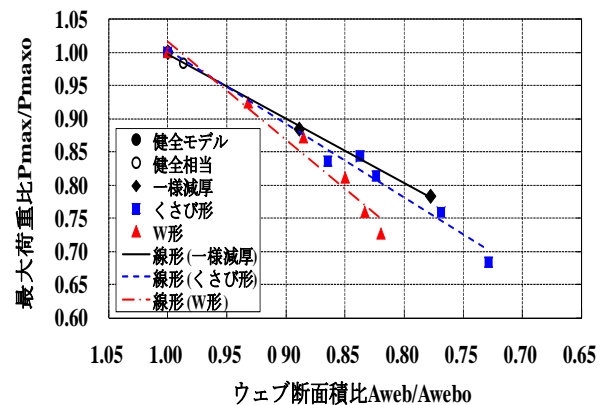


図6 腐食鋼I桁のせん断力耐荷力

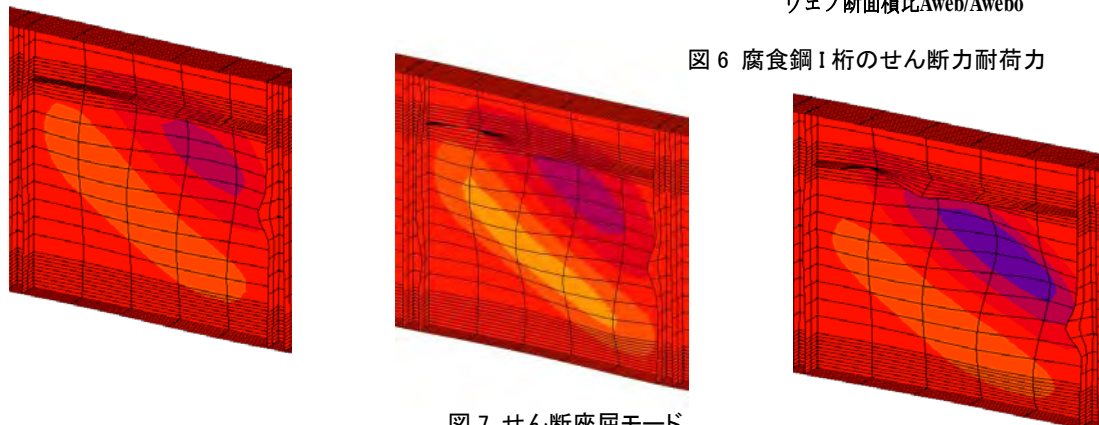


図7 せん断座屈モード

(2) 腐食鋼I桁の残存せん断耐荷力実験

鋼I桁の腐食分布形状とせん断耐荷力解析結果の検証を目的に、写真1に示す実腐食桁を用いた耐荷力実験を行った。実験ケースは、健全相当モデル、G1桁モデル、G2桁モデルおよびG3桁モデルの4ケース実施した。図8に実験とFEM解析に対する荷重鉛直変位関係を示す。図より、G2桁およびG3桁の荷重変位関係は良好な一致となった。G1桁モデルは実験結果が解析結果より低い耐荷力を示した。



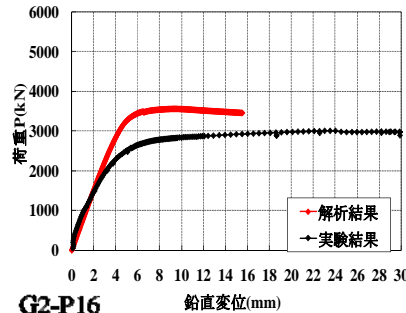
写真1 せん断力耐荷力実験

また、図8には実験終了後のせん断座屈状態も示す。いずれのケースもFEM解析と同様な座屈モードが得られている。

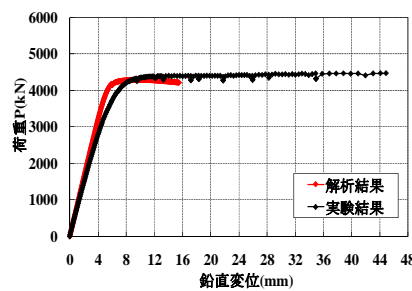
図9に腐食鋼桁のせん断耐荷力特性を示す。図の縦軸は健全モデルの最大荷重と各ケースの最大荷重との比を示し、横軸は健全モデルのウェブ断面積に対する腐食ウェブの平均断面積との比を示す。また、同図にはFEM解析結果とそれを直線近似した耐荷力低下を併記している。図より、実験結果は、既往研究と同様に腐食減厚によりウェブ断面積が小さくなる程、耐荷力も低下する傾向を示す一方で、その耐荷力の低下度はG1,G2,G3の順で低くなる特徴を示した。これは解析結果でも同様な結果となった。ただし、G1桁の実験結果は解析結果より著しく低い結果となった。

これはG1桁の腐食分布特性である水平補剛材上面の激しい腐食減厚が影響しているものと推測される。以上のことより、鋼I桁橋のせん断卓越パネルの残存耐荷力評価には、桁位置や構造部位で異なる腐食分布特性を考慮する必要があるといえる。なお、次年度は耐荷力の低下が大きかったG1桁モデルの追加実験、下フランジ腐食の影響度合いの確認実験などを行ない、腐食劣化レベルに応じた鋼I桁橋の耐久性診断法を提案する。

G1-P2



G2-P16



G3-P14

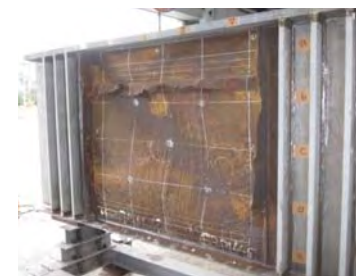
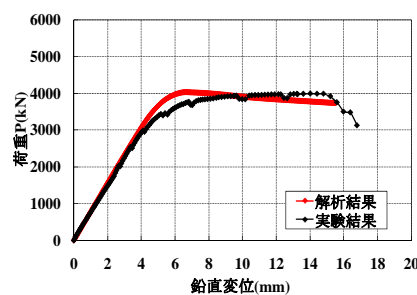


図8 荷重変位関係とせん断力座屈モード

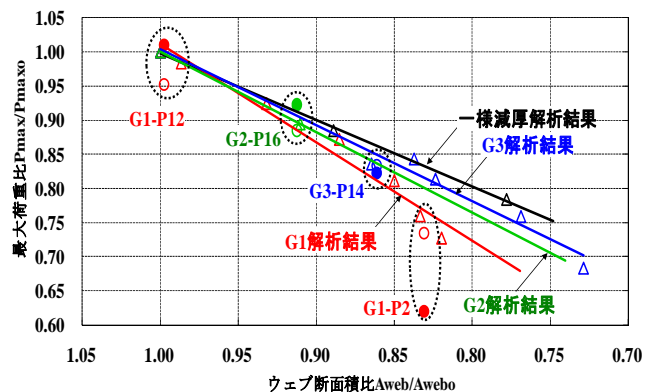


図9 腐食鋼桁のせん断力耐荷力

⑦研究成果の発表状況

(本研究から得られた研究成果について、学術誌等に発表した論文及び国際会議、学会等における発表等があれば記入。)

1. Y.Tamaki, T.Shimozato, Y.Arizumi,T.Yabuki, S.Ono: Evaluation of corrosion deterioration of weathering steel bridge under the environmental corrosiveness, IABMAS, 2010.7.
2. 玉城喜章,下里哲弘, 有住康則, 小野秀一ほか：長期自然曝露された鋼I桁橋の構造部位別の腐食特性（その1）～実用的な腐食減厚量の調査方法の検討～，土木学会第65回年次学術講演会，I-157，pp.313-314，2010.9.
3. 丸山直人，下里哲弘，有住康則，玉城喜章，小野秀一ほか：長期自然曝露された鋼I桁橋の構造部位別の腐食特性（その2）～鋼I桁橋の腐食度マップと残存板厚分布特性～，土木学会第65回年次学術講演会，I-157，pp.315-316，2010.9.
4. 山田昌樹，下里哲弘，有住康則，玉城喜章，小野秀一ほか：長期自然曝露された鋼I桁橋の構造部位別の腐食特性（その3）～腐食特性と腐食残存耐荷力特性～，土木学会第65回年次学術講演会，I-157，pp.317-318，2010.9.
5. 下里哲弘，玉城喜章，有住康則：過酷な腐食環境で長期暴露された鋼I桁橋の構造部位別の腐食分布特性の解明，土木学会論文集（2011.2月投稿予定）
6. 玉城喜章，下里哲弘，有住康則：鋼I桁橋の腐食分布特性とせん断耐荷力特性に関する解析的研究，鋼構造論文集（2011.2月投稿予定）

⑧研究成果の活用方策（本研究から得られた研究成果について、その活用方法・手段・今後の展開等を記入。）

1. 構造部位別の腐食劣化メカニズムの解明

- ①鋼I桁橋の構造部位の腐食特性が明確に現れた暴露橋を対象に、腐食減厚調査を行い作成した腐食マップは、効率的な点検・調査計画や点検照査に活用できるものと考えており、特に、腐食環境の厳しい沿岸部や湾岸部の鋼橋に活用できる。
- ②腐食マップは、腐食上の構造弱点部が明確になっている。これは予防保全時の重要ポイントや新設設計法に関して重要な技術資料として活用できると考えている。
- ③鋼I桁内における海塩粒子の飛来特性と腐食分布特性の原因解明として、研究対象の暴露橋をモデル化した風洞試験を行い、桁位置で異なる腐食分布特性の現象を検証した。今後は、この検証結果を踏まえ、海塩粒子と鋼桁モデルを用いた潮風促進試験を行い、桁位置で異なる腐食分布特性の現象再現を行う予定である。
- ④腐食度と強い関連性のある海塩粒子の飛来特性と、桁間隔、桁本数、桁下空間および風向風速などをパラメータとした流体実験および解析を行い、鋼I桁の腐食環境を緩和できる対策法や防錆設計に対する技術資料の提供を目指す。

2. 腐食劣化した鋼I桁橋の耐荷力評価

- ①暴露橋で計測した腐食減厚をモデル化した弾塑性解析により、耐荷力は桁位置により異なる腐食減厚分布の影響を受ける結果が得られた。これは、鋼I桁のせん断卓越パネルの残存耐荷力評価法としては、これまでの残存耐荷力解析で用いられている平均減厚や最小減厚ではなく、桁位置や構造部位で異なる腐食分布特性を考慮した解析モデルを適用する必要があることを示している。
- ②解析結果の検証として、暴露橋から切り出した実腐食桁を用いたせん断耐荷力実験を行い、解析と良好な一致が得られた。H23年度は実腐食桁実験で耐荷力の低下が大きかったG1桁腐食モデル、下フランジ腐食の影響度合いの確認実験などを行い、解析結果の検証を行う。H23年度は、腐食劣化レベルに応じた鋼I桁橋の耐久性診断法の提案を目的に、腐食分布や腐食量をパラメータとした弾塑性FEM解析を行う。

⑨特記事項

(本研究から得られた知見、学内外等へのインパクト等、特記すべき事項があれば記入。また、研究の目的・目標からみた、研究成果の見通しや進捗の達成度についての自己評価も記入。)

○本研究で得られた知見

・実腐食桁を用いたせん断耐荷力実験と弾塑性FEM解析の結果は、概ね良好の一致となったが、本解析モデルは、実腐食桁で実施可能な板厚計測（UT計測）データを用いたシェル要素モデルを適用しており、比較的簡易な解析法である。H23年度は、別途実験前にレーザー計測した腐食形状を考慮したソリッド要素モデルを用いて弾塑性解析を行い、H22年度に行ったシェル解析法および実験結果との比較評価を行い、実用的な腐食桁のせん断耐荷力評価に用いる解析法を提案する。

○研究の見通し

・腐食度と強い関連性のある海塩粒子の飛来特性と、桁間隔，桁本数，桁下空間および風向風速などをパラメータとした流体実験および解析の実施にあたり，流体実験は琉大風洞試験室を使用できる。また，流体解析については，琉球大学工学部機械システム工学科熱流体工学研究室の支援を受けて実施できる研究体制にある。

・回収腐食部材を用いた試験体は橋梁会社に外注して製作し，大型の実験供試験体を用いる実験では共同研究者である建設機械化協会所有の大型試験機を使用して実施する。