

部分塗替え塗装橋の管理に向けた無塗装普通鋼材の腐食速度の把握 Verification of a corrosion speed of non-coating steel for the partial repainting bridge

久野 悟志* 渡邊 英** ○入山 祐一*** 羽田野 英明**** 村上 茂之*****
Satoshi KUNO Ei WATABAE Yuichi IRIYAMA Hideaki HATANO Shigeyuki MURAKAMI

ABSTRACT Exposure test and elastic buckling analyses are carried out to discuss the effectiveness of bridge maintenance with partial re-painting of steel girder. 10 target bridges of exposure tests are selected in consideration of environmental condition and exposure tests have been carried out in 4 years. According to the results, corrosion rates of non-coating steel plate are comparable with that of weathering steel plate in the beginning and the depletion thickness in 100 years can be estimated 0.84 mm at best. Referring to the numerical results on elastic buckling analyses of partially corroded steel girders, 20% thickness decreasing can derive over 50% decreasing of buckling stress.

Keywords:部分塗替え塗装橋, ワッペン式暴露試験, 無塗装普通鋼材

Partial repainting bridge, Exposure tests using attachable small test pieces, Non-coating steel

1. はじめに

愛知県管理道路の鋼橋に対する塗替塗装費は平成28年度において約4.5億円であり、全橋梁修繕費の約27%と高い割合を占めている。このため、鋼橋の合理的な塗装塗替え手法として桁端部のみを塗替える部分塗替え塗装¹⁾について試験施工等を行い、検討を進めている。

部分塗替え塗装を採用した橋梁では、定期的に塗替えられる桁端部の健全性は確保されるが、桁端部以外の塗替えを行わない部材(以下、「一般部」という)については、管理手法が確立されていない。そのため、愛知県では、部分塗替えの試験施工を行った橋梁は、5年毎の法定点検により点検・診断を行い、劣化が認められた際に対策を行う事後保全型の管理を行っている。

一方、既往の文献^{2) 3)}によれば、無塗装の普通鋼材(以下「普通鋼材」という)の自己防食性を示すデータが報告されている。そこで、愛知県においても部分塗替え塗装橋の一般部の管理手法として、耐候性鋼材裸使用と同様に、普通鋼材の自己防食性に期待した塗装の管理手法の適用について検討を進め

ている。

ここでは、海岸部から山間部まで幅広い環境条件を有する愛知県の三河地区(図-1)において実施した普通鋼材によるワッペン式暴露試験結果、および桁の腐食が極端に進行した場合を想定した簡易的な残存耐力解析結果について述べる。



図-1 ワッペン試験片設置橋梁位置図

*愛知県建設部道路維持課 (〒460-0001 愛知県名古屋市中区三の丸3-1-2)

**愛知県西三河建設事務所西尾支所 (〒445-0073 愛知県西尾市寄住町下田13)

***中日本建設コンサルタント株式会社 (〒460-0003 愛知県名古屋市中区錦1-8-6)

****工博 岐阜大学工学部附属インフラマネジメント技術研究センター (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

*****工博 岐阜大学情報連携統括本部 教授 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1) 第2種正会員

2. ワッペン式暴露試験方法と回収状況

ワッペン式暴露試験は、近年、耐候性鋼橋梁の耐久性に大きく影響する腐食減耗量を簡便に予測できる手法として適用が進んでいる。具体的には、ワッペン試験片と称する薄く軽量の板状の試験片（50mm×50mm、t=2mm、質量精度0.001g）を実橋に接着し、質量変化を計測することで、腐食減耗量を算定する試験方法である（写真-1, 2）。一般的には暴露したワッペン試験片を1年後、3年後、5年後と順次回収することで、腐食減耗量の経年変化を把握することができる。

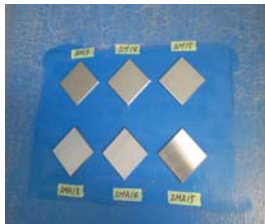


写真-1 ワッペン試験片



写真-2 設置状況

本研究では、三河地区(図-1)における10橋を対象に平成24年度から普通鋼材を用いたワッペン式暴露試験を実施している。現在までの回収状況は表-1とおりであり、植田橋と野川下橋の2橋のみ、2回目の試験片の回収が完了している。

表-1 ワッペン試験対象橋梁と試験片回収状況

橋梁名	橋梁形式	試験片暴露期間	
		1回目	2回目
植田橋	3径間連続鈹桁	1年 (355日)	3年 (1091日)
野川下橋	単純鈹桁(2連)	1年 (357日)	3年 (1093日)
柑子橋	単純鈹桁(3連)	2年 (659日)	—
金沢橋	単純鈹桁(5連)	1年 (370日)	—
新城橋	3径間連続鈹桁	4年 (1413日)	—
田原橋	単純鈹桁	4年 (1413日)	—
津川橋	単純鈹桁	4年 (1414日)	—
洲山橋	単純鈹桁	4年 (1414日)	—
笹戸橋	単純鈹桁(2連)	2年 (737日)	—
犬伏橋	単純鈹桁(3連)	2年 (735日)	—

既設橋へのワッペン試験片設置位置は、一般部の腐食進行度合いを把握することを目的として、桁端

部を避けた雨がかりの影響のない中桁位置とし、腹板(上流側, 下流側), 下フランジ上面(上流側, 下流側), 下フランジ下面の計5箇所を設置した(図-2)。また、比較のため耐候性鋼材の暴露試験片も同時に設置しており、普通鋼材の回収時に合わせて回収している。

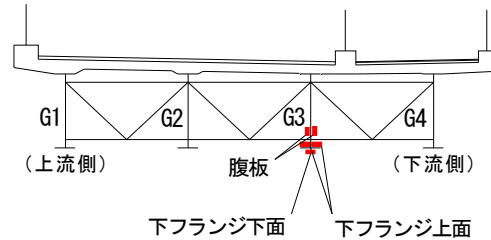


図-2 ワッペン試験片設置位置(断面図)

10橋の普通鋼材および耐候性鋼材のワッペン式暴露試験片の成分表は表-2のとおりである。

表-2 ワッペン試験片成分表

鋼種	化学成分(%)							
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni
SM400A	0.18	0.20	0.55	0.015	0.005	0.03	0.04	0.02
SMA400AW	0.10	0.19	0.71	0.017	0.005	0.32	0.51	0.22

3. ワッペン式暴露試験の結果と考察

3.1 腐食減耗量の算出

回収した試験片の除錆後の腐食減少量(試験前後の質量差)を用いて、腐食量, 腐食減耗量, 腐食速度を以下の式により算出した。なお, 下式において, 鋼材密度は7.86(g/cm³), 試験片暴露面積は0.0029m²とした。

$$\text{腐食量 (g/m}^2\text{)} = \frac{\text{腐食減少量 (g)}}{\text{ワッペン試験片暴露面積 (m}^2\text{)}}$$

$$\text{腐食減耗量 (mm)} = \frac{\text{腐食量 (g/m}^2\text{)}}{\text{鋼材の密度 (g/m}^3\text{)}} \times 10^{-3}$$

$$\text{腐食速度 (mm/y)} = \frac{\text{腐食減耗量 (mm)}}{\text{暴露日数 (日)}} \times 365 \text{ (日)}$$

3.2 植田橋および野川下橋における試験結果

2回目の試験片の回収が完了している植田橋および野川下橋の試験結果を以下に述べる。

3.2.1 腐食量

試験片暴露期間約1年(植田橋: 355日, 野川下橋: 357日)と約3年(植田橋: 1091日, 野川下橋: 1093日)における普通鋼材の腐食量調査結果を図-3, 図-4に示す。

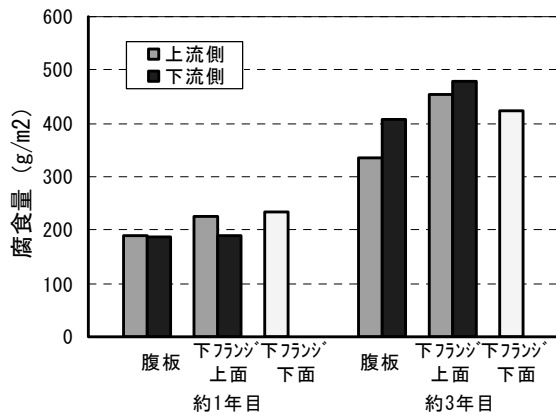


図-3 植田橋の腐食量

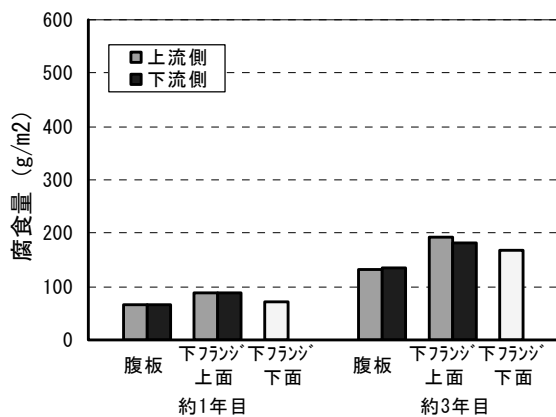


図-4 野川下橋の腐食量

植田橋(写真-3), 野川下橋(写真-4)はいずれも海岸線から約2kmに位置しているが, 約1年目, 約3年目ともに植田橋の腐食量は, 野川下橋に比べ2倍~3倍の値となっている. この理由として, 架橋地点の気候等の環境の違いが挙げられる. 2橋の架橋位置は1年を通して南東の風が吹く地域であるが, 植田橋の架橋位置は三河湾からの潮風により飛来塩分の影響を受けやすい環境下にある. 一方, 野川下橋は三河湾からの潮風を受けにくい架橋位置である. また, 両者の護岸構造の違い(植田橋:コンクリート, 野川下橋:多自然護岸)も影響していると考えられる.



写真-3 植田橋

※前回塗替えから31年経過, 部分塗替え塗装施工済



写真-4 野川下橋

※前回塗替えから24年経過

3.2.2 腐食速度

普通鋼材の約1年目と約3年目における腐食速度の変化を図-5, 図-6に示す.

2橋とも全設置箇所の計測結果平均値として比較した場合, 約3年目の腐食速度は, 約1年目の腐食速度の約6割に低下している. このことから普通鋼材においても自己防食性が発揮されていると考えられる.

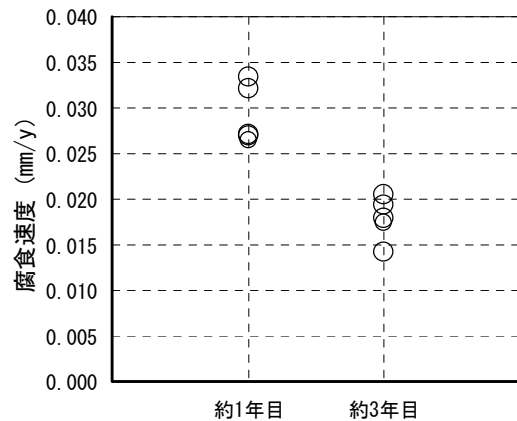


図-5 植田橋の腐食速度

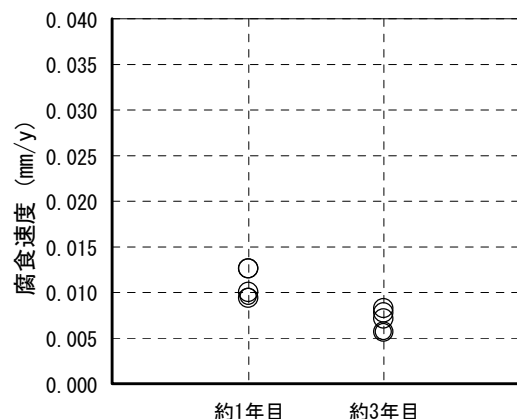


図-6 野川下橋の腐食速度

3.3 全対象橋梁における試験結果

対象橋梁10橋のうち, 植田橋, 野川下橋を除く8橋は2回目の試験片回収が現時点で未実施である.

このため、植田橋および野川下橋の2回目までの試験結果と、その他の8橋の1回目の試験結果を用いて、愛知県三河地区における全体的な腐食環境の傾向を整理した。

3.3.1 普通鋼材の腐食速度

腐食速度の高い結果となった植田橋を除く9橋の腐食速度を設置期間別に整理したものを図-7示す。

腐食速度は概ね0.01mm/y未満であり、今回調査した橋梁全体の傾向として、緩やかに腐食が進行する環境にある。

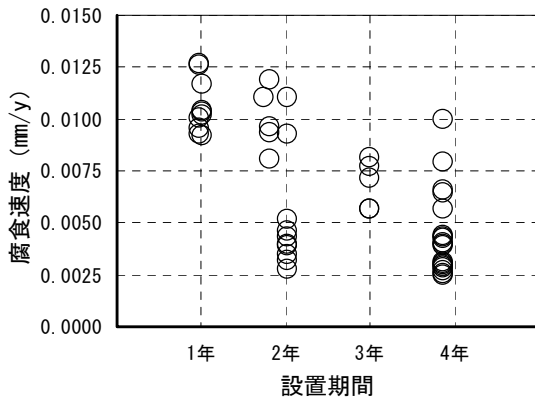


図-7 腐食速度調査結果

3.3.2 鈹桁における設置位置の影響

今回対象とした橋梁の形式は、すべて鈹桁であり、前述したとおり、試験片は内桁の下フランジ上面と腹板の両側に設置している。

設置位置と腐食速度の関係を図-8に示す。なお、笹戸橋と犬伏橋は一部の試験片を外桁に設置しており、それ以外の橋は中桁に設置しているが、データ数も少ないため中桁・外桁の区分は行っていない。

全体の傾向では、下フランジ上面の腐食速度が、他の部位に比べて若干速いことがわかる。これは、

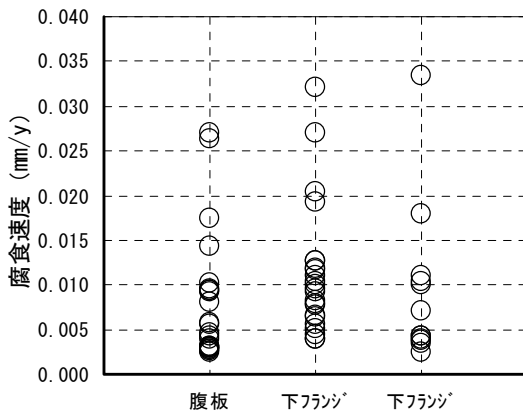


図-8 部材位置での腐食速度

下フランジ上面が他の部位に比べて滞水しやすいためと考えられる。

3.3.3 普通鋼材と耐候性鋼材の比較

調査対象橋梁において、比較のため耐候性鋼材の試験片も設置し、同時に回収している。同一箇所を設置した耐候性鋼材の試験片と普通鋼材の試験片の腐食量の関係を図-9に示す。図中の直線は耐候性鋼材と普通鋼材における腐食量の1:1の関係を示したものである。

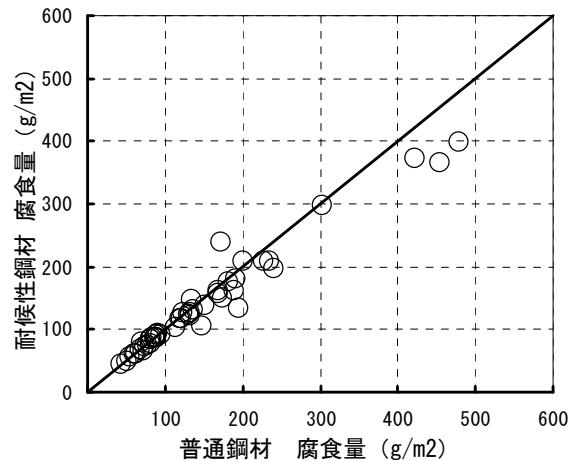


図-9 耐候性鋼材と普通鋼材の関係

結果から腐食量が100g/m²程度以下の範囲内ではほとんど差異がなく、それを超えると若干耐候性鋼材が優位となり400g/m²程度を超えると明らかに優位となる傾向を示している。

次に試験片設置期間と腐食速度を指標とした結果を図-10に示す。

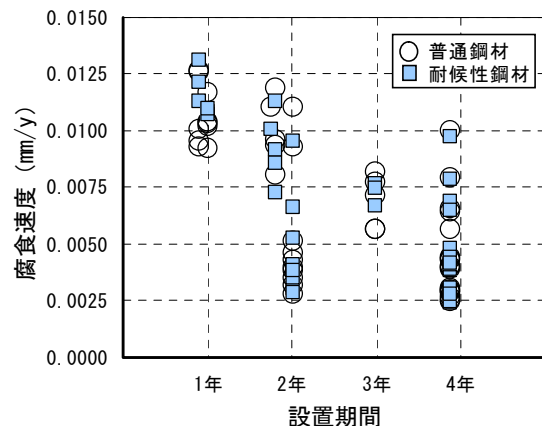


図-10 普通鋼材と耐候性鋼材の腐食速度

全体の傾向では、普通鋼材と耐候性鋼材の差異は少ない。最大値に着目すると1年目においてはわず

かに耐候性鋼材の腐食速度が速く、2年目以降では普通鋼材の方が高くなっている。これは設置当初では、耐候性鋼材は普通鋼材より腐食が早く進み、保護性さびを形成後に、次第に腐食速度が遅くなっているものと考えられる。

4. 植田橋と野川下橋における腐食減耗量予測

2回目の回収が完了している植田橋と野川下橋について、将来腐食減耗量の予測を行った。

4.1 腐食減耗量予測方法

一般的にワッペン式暴露試験結果からの予測式は、耐候性鋼材について適用可能とされている。普通鋼材の試験結果からの予測式は確立されたものがないため、既往の文献⁵⁾を参考に以下の手順で設定した。

植田橋および野川下橋における普通鋼材の暴露1年後、3年後における腐食減耗量を用いて、腐食減耗量の経年予測式 $Y = A \cdot X^B$ のAとBを累乗近似回帰式にて求めた(表-3, 4)。ここで、Yは片側平均腐食減耗量(mm)、Xは時間(年)を表す。この回帰式で表される腐食減耗量予測曲線を用いて、将来腐食減耗量の予測を行う。なお、表-3, 4の予測式は、1年目と3年目の2回の試験結果から求めたものであり、今後の試験結果によっては、予測結果が大きく変わる可能性がある。

表-3 植田橋腐食減耗量予測式

部位	腐食減耗量(mm)		予測式
	1年目	3年目	
腹板(上流側)	0.027	0.043	$Y=0.027X^{0.418}$
腹板(下流側)	0.026	0.052	$Y=0.026X^{0.620}$
下フランジ上面(上流側)	0.032	0.058	$Y=0.032X^{0.537}$
下フランジ上面(下流側)	0.027	0.061	$Y=0.027X^{0.746}$
下フランジ下面	0.033	0.054	$Y=0.033X^{0.438}$

表-4 野川下橋腐食減耗量予測式

部位	腐食減耗量(mm)		予測式
	1年目	3年目	
腹板(上流側)	0.009	0.017	$Y=0.009X^{0.548}$
腹板(下流側)	0.010	0.017	$Y=0.010X^{0.529}$
下フランジ上面(上流側)	0.013	0.024	$Y=0.013X^{0.600}$
下フランジ上面(下流側)	0.013	0.023	$Y=0.013X^{0.553}$
下フランジ下面	0.010	0.021	$Y=0.010X^{0.687}$

4.2 植田橋の腐食減耗量予測結果

表-3に示す植田橋における普通鋼材の腐食減耗量予測式から求めた部位毎の腐食減耗量予測曲線を図-11に示す。

片面腐食減耗量は、部位によって異なり、腐食減

耗量が最も大きい下フランジ上面(下流側)において、50年後に0.50mm、100年後に0.84mmとなる。その他の部位では、50年後に0.14~0.30mm程度、100年後に0.19mm~0.46mm程度となる。

また図より、下フランジ上面の腐食進行が他の部位に比べて速いことがわかる。これは、前述したように下フランジ上面が他の部位に比べて滞水しやすいためと考えられる。

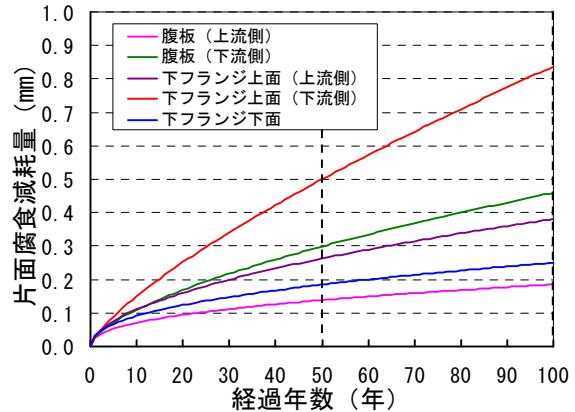


図-11 植田橋 腐食減耗量予測

4.3 野川下橋の腐食減耗量予測結果

表-4に示す野川下橋における普通鋼材の腐食減耗量予測式から求めた部位毎の腐食減耗量予測結果を図-12に示す。

片面腐食減耗量は、部位によってやや異なり、50年後に0.08~0.15mm程度、100年後に0.10~0.24mm程度となる。植田橋に比べ腐食量は小さく、腐食しにくい環境にあるといえる。

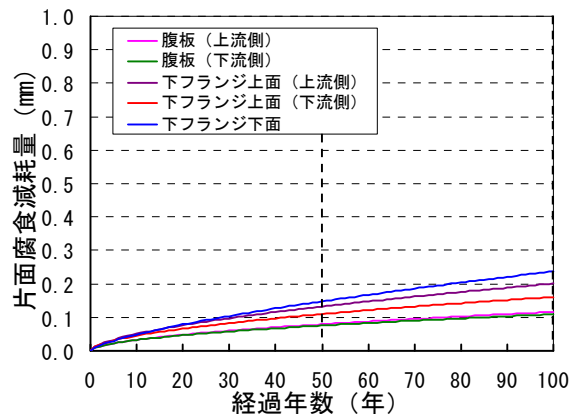


図-12 野川下橋 腐食減耗量予測

5. 腐食を想定した簡易的な残存耐力解析

5.1 解析条件

腐食した構造物の残存耐力評価方法については、

様々な方法が提案されている。^{6) 7)} また、特に雨水が滞りやすく狭隘な箇所として桁端における腐食が耐荷力に及ぼす影響検討によれば、桁端部の腐食が耐荷力低下に及ぼす影響は小さいとされている。⁸⁾

部分塗装替え塗装では、桁端部は塗装替えを実施するため健全性が確保されるが、一般部のみ腐食が進行する。そこで、一般部の腐食が進行したケースを想定し、汎用有限要素解析ソフト(MSC.Nastran2010)を用いて線形座屈解析を実施し、腐食のない健全時に対する座屈固有値の低減率、および座屈位置の把握を行った。

解析モデルは、3径間連続非合成RC床版鋼桁を対象とし、文献⁹⁾を参考に主桁1本をモデル化し、等分布の鉛直方向荷重に対する線形座屈解析を行った。解析モデル図を図-13に示し、解析条件を表-5に示す。主桁腹板、上下フランジ、垂直補剛材はシェル要素、水平補剛材は梁要素でモデル化し、要素サイズは100mm×100mmを基本とした。支点部の拘束条件は支点位置の下フランジ幅方向の全節点を表-4に示す境界条件とした。なお、床版による拘束は考慮していないが、横桁及び対傾構位置の仕口部については橋軸直角方向変位を拘束した。

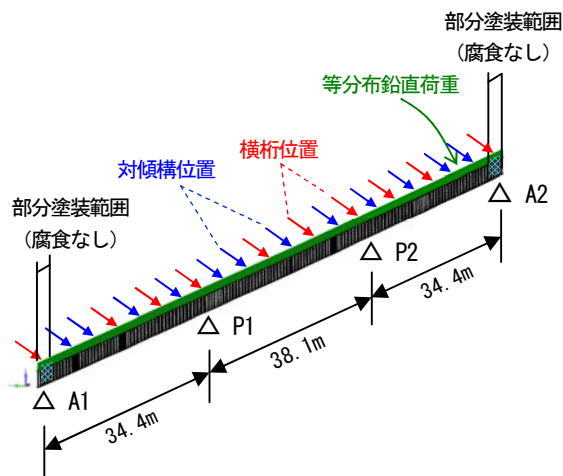


図-13 解析モデル図 (全体)

表-5 解析条件

ヤング係数	鋼材 (主桁) : 2.0×10^5 N/mm ²					
ポアソン比	鋼材 (主桁) : 0.3					
境界条件	橋軸方向	橋軸直角方向	鉛直方向	橋軸回り	橋軸直角回り	鉛直軸回り
固定支承 (P2)	拘束	拘束	拘束	自由	自由	自由
可動支承 (P2以外)	自由	拘束	拘束	自由	自由	自由

実橋における腐食形態は様々なケースが考えられる。今回は調査区域の内、東三河地区における鋼橋84橋を対象に実施した腐食形態調査結果¹⁰⁾などを参

考に、図-14および表-6に示す3パターンの主桁下部の腐食を想定した。鋼桁全体の断面積に対する平均腐食量は12% (case1), 22% (case2) および36% (case3) となる。なお、腹板高は1800mm、腐食前の腹板厚は11mmである。下フランジの腐食は、上下面で発生するが、片面で両面分の腐食を考慮した。

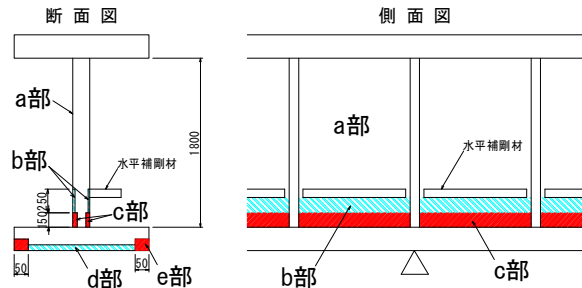


図-14 腐食パターン

表-6 各検討ケースの腐食量

	case1	case2	case3	
腹板平均板厚	9.7mm	8.5mm	7.1mm	
腹板平均板厚減少量	12%	22%	36%	
腹板	a部	5%	10%	25%
	b部	10%	25%	50%
	c部	20%	50%	75%
下フランジ	d部	10%	25%	50%
	e部	20%	50%	75%

5.2 解析結果

変形図を図-15~図-17に示す。

いずれのケースにおいても腹板の座屈が先行する。

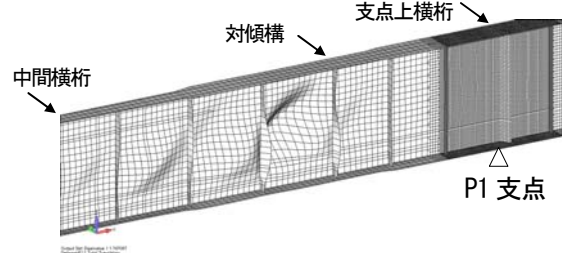


図-15 変形図 (P1 支点第2パネル座屈時: case1)

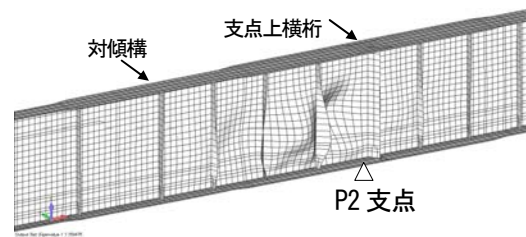


図-16 変形図 (P2 支点付近座屈時: case2)

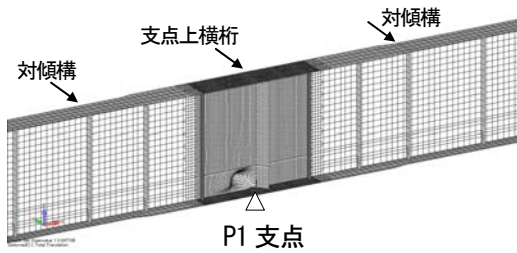


図-17 変形図 (P1 支点付近座屈時 : case3)

腐食後の鋼桁の平均板厚と座屈固有値の低減率との関係を図-18 に示す。

平均板厚が 12%減少した場合の座屈固有値は 2 割程度減少し、平均板厚が 22%減少した場合は 5 割程度に減少する結果となった。よって、一般部の腐食が進行した場合、部材厚の薄い腹板が座屈する可能性が高く、板厚の減少は腹板のせん断座屈強度の低下に大きく影響する。

なお、今回の解析では、表-6 に示す腐食量を想定したが、前述した「4. 2 植田橋の腐食減耗量予測結果」から予測される 50 年後の腐食量は最大でも 0.5mm 程度 (5%程度) である。したがって、50 年後の腐食量においても、安全性に大きく影響するようなことは無いものと考えられる。

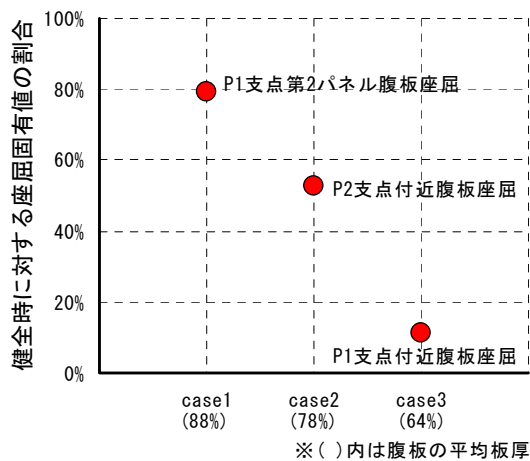


図-18 線形座屈解析結果

6. まとめ

部分塗替え塗装橋における一般部の管理手法検討のために実施した無塗装普通鋼材を用いたワッペン式暴露試験により、現在までに得られた試験結果、試験結果を用いた将来腐食減耗量予測結果および、簡易的な残存耐荷力解析結果から以下の結果を得た。

- ・植田橋、野川下橋の試験結果から、普通鋼材の自

己防食性が伺える。

- ・腐食環境の把握は海岸線からの離岸距離のみではなく、架橋環境 (風向きと架橋位置の関係や周辺状況) も影響していると考えられる。
- ・近接した部位であっても腐食進行は異なり、下フランジ上面の腐食進行が速い傾向がある。
- ・潮風の影響を受けやすい植田橋における将来腐食減耗量は、下フランジ上面 (下流側) において、50 年後に 0.50mm、100 年後に 0.84mm となる。その他の部位では、50 年後に 0.14~0.30mm 程度、100 年後に 0.19mm~0.46mm 程度と予測される。
- ・潮風の影響の少ない野川下橋における将来腐食減耗量は、50 年後に 0.08~0.15mm 程度、100 年後に 0.10~0.24mm 程度と予測される。
- ・鋼桁の平均腐食量が 2 割程度の場合でも座屈固有値は、5 割程度に低減する場合もある。

現在までのワッペン式暴露試験結果から得られた将来腐食減耗量予測結果と、腐食による耐荷力の低減傾向より、植田橋および野川下橋の桁端部を除く一般部においては、塗装による防錆効果が喪失した時点から 50 年程度経過しても、景観性の問題はあるものの、安全性に大きく影響することは無いものと考えられる。他橋においても、1 回目の調査結果から得られた腐食速度が植田橋や野川下橋よりも緩やかであることから、今後の調査結果次第ではあるが、植田橋や野川下橋と同様になることが考えられる。したがって、予算制約のある中での塗装塗替え計画の策定にあたり、従来、20 年程度としていた画一的な再塗装間隔では無く、桁端部を除く一般部では、20~50 年程度の幅をもたせるとともに、架橋環境を踏まえた優先順位も考慮した柔軟な塗装塗替え計画の策定が可能になると考えられる。また、部位によって腐食速度が異なることから、部位毎の塗り分けを考慮することで、更に合理的な計画とすることも可能と考えられる。

今後は、暴露試験結果をさらに回収して分析を進めると共に、飛来塩分量や濡れ時間の差異¹⁾などのデータも蓄積し、部分塗替え塗装に対する一般部の合理的な管理手法を確立していく予定である。

謝辞

本検討にあたり植田橋の部分塗替え塗装の試行については、土木研究センターの中野正則氏、落合盛人氏にご意見、ご協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 国土交通省中部地方整備局：道路設計要領（設計編），第11章維持修繕，2015.3
- 2) 安波博道，関慎一郎，中島和俊，中野正則：茨城県新長茂橋における部分塗替え塗装と経過観察，土木学会第69回年次学術講演会，平成26年9月
- 3) 平田 司，牧野高平，森田千尋，渡部祐介：長崎県内における小規模鋼橋の健全度評価と長期腐食予測について，土木学会第67回年次学術講演会，平成24年9月
- 4) 建設省土木研究所・(社)鋼材倶楽部・(社)日本橋梁建設協会：耐候性鋼材の橋梁への適用に関する共同研究報告書（Ⅷ）—無塗装耐候性橋梁の設計・施工要領（案）—，共同研究報告書第12号，1998.1
- 5) 建設省土木研究所・(社)鋼材倶楽部・(社)日本橋梁建設協会：耐候性鋼材の橋梁への適用に関する共同研究報告書（ⅧⅧ）—全国暴露試験のまとめ（概要編）—，共同研究報告書第86号，1993.3
- 6) (社)日本鋼構造協会・鋼橋性能向上研究委員会・耐候性橋梁部会：耐候性橋梁の可能性と新しい技術，JSSCテクニカルレポートNo.73，2006
- 7) 玉城喜章，下里哲弘，有住康則，矢吹哲也：実腐食分布を考慮したプレートガーダーのせん断耐荷力特性，鋼構造論文集，第19巻第73号，pp9-19，2012.3
- 8) 土木学会鋼構造委員会・鋼構造の残存耐荷性能評価と耐久性向上方策研究小委員会：腐食した鋼構造の耐久性照査マニュアル，土木学会鋼構造シリーズ18，2009.
- 9) 玉越隆史，中洲啓太，石尾真理，武田達也，水津紀陽：鋼道路橋の局部腐食に関する調査研究，国土技術政策総合研究所資料No.294
- 10) 愛知県東三河建設事務所：平成25年度橋梁修繕工事の内設計業務委託報告書，平成26年3月
- 11) 貝沼重信，山本悠哉，伊藤義浩，押川 渡：Fe/Ag 対 ACM 型腐食センサーを用いた降雨を受ける無塗装普通鋼板の平均腐食深さの予測方法，材料と環境，60，497-503，2011