



道路政策の質の向上に資する技術研究開発
成果報告レポート
No. 21-5

研究テーマ

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

研究代表者：	琉球大学准教授	下里	哲弘
共同研究者：	琉球大学教授	有住	康則
	琉球大学准教授	押川	渡
	日本建設機械化協会	小野	秀一
	沖縄したまて協会	玉城	喜章

平成24年6月

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」(平成21年度採択)
研究概要**

番号	研究課題名	研究代表者
No.21-5	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	琉球大学 准教授 下里哲弘

腐食損傷橋に対する安全安心に持続できる維持管理技術の構築を実現するため、腐食劣化した鋼橋に対する実用的な耐久性診断法の提案を研究目的として、過酷な腐食促進環境下で約30年間曝され極限の腐食状態にある無塗装仕様の耐候性鋼プレートガーダーを研究対象に、実橋での腐食減厚調査、腐食環境調査、および実腐食鋼材を用いた耐荷力実験により、鋼プレートガーダー橋の構造部位別の腐食減厚分布特性の解明、腐食減厚分布と海塩粒子の飛来特性との相関評価、および構造部位別の腐食減厚分布に対するせん断耐荷力評価法を開発する研究。

1. 研究の背景・目的

我が国は1960年代の高度経済成長期に膨大な数の橋梁を建設しており、今後、経年とともに増加が予測される腐食損傷橋に対して安全安心に持続できる維持管理技術の構築が求められている。また、架け替えや新設橋梁への財源も限定的である状況を踏まえ、低LCCで長期耐久性を有する新設橋梁の開発が求められる。そのような背景の下、本研究では腐食劣化鋼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無塗装仕様の耐候性鋼プレートガーダー橋（以下、「暴露橋」）を研究対象に、実橋での腐食減厚調査、腐食環境調査、および暴露橋から採取した腐食鋼部材を用いた耐荷力実験により、腐食劣化した鋼桁橋の腐食減厚分布特性を明らかにする。また、腐食減厚分布と海塩粒子の飛来特性との相関を評価する。さらに、構造部位別の腐食減厚分布が鋼プレートガーダーの耐荷力に及ぼす影響について評価する。

2. 3カ年の研究内容

- (1) 本研究では過酷な腐食促進環境下において、28年間自然暴露された暴露橋に対する腐食環境調査（風向風速、温湿度、飛来塩分量、飛来塩分粒径）および腐食減厚調査（腐食外観、残存板厚計測、鍍分析）を行った。
- (2) 暴露橋での腐食減厚調査より、鋼プレートガーダーの構造部位の腐食減厚分布特性を解明した。また、その腐食減厚分布（腐食マップ）を活用して、鋼橋の維持管理上の重点構造部位や留意事項などに着目した検討を行い、より合理的な腐食診断法を提案した。
- (3) 暴露橋での腐食環境調査より、鋼プレートガーダーの桁内における海塩粒子の飛来特性を解明し、腐食減厚分布との関係を分析した。また、暴露橋の模型桁を用いた流体実験を行い、海塩粒子の飛来特性を実験的に検証した。
- (4) 暴露橋から採取した腐食鋼材を用いて製作した大型実験桁を用いて、せん断耐荷力実験および弾塑性FEM解析を行った。その結果より、腐食減厚分布と残存せん断耐荷力の関係を分析評価し、腐食劣化した鋼プレートガーダー橋の耐久性診断法を検討した。

3. 研究成果

- (1) 暴露橋の腐食環境調査及び腐食減厚計測より、鋼プレートガーダーの構造部位別の腐食減厚分布特性を明確にした(図1)。また、桁内の飛来塩分流入特性と構造部位別の腐食減厚特性との関係を明らかにした(図2)。なお、腐食減厚計測には、本研究で提案した実橋で簡便に行える計測点数で且つ構造部位別の腐食減厚分布特徴を捉えられる超音波板厚計測法を適用した。
- (2) 腐食減厚分布特性を活用して、腐食環境の厳しい沿岸部の既設鋼橋に対する効率的かつ信頼性の高い点検、調査、診断技術および塩害リスクの低減を目指した維持管理上の留意点について示し、より合理的な腐食診断法を提案した。
- (3) 実腐食減厚分布を有する鋼桁腹板(図3)を用いて、実大試験体を製作し、大型載荷実験を行った。実験結果(図4)より、腐食鋼桁のせん断耐荷力特性は実腐食減厚分布の影響を受け、腹板下部腐食タイプは平均板厚を用いて座屈設計ガイドラインのせん断座屈評価式で評価が可能であるが、水平補剛材上部や腹板中央近傍の腐食タイプは評価できないことを示した。

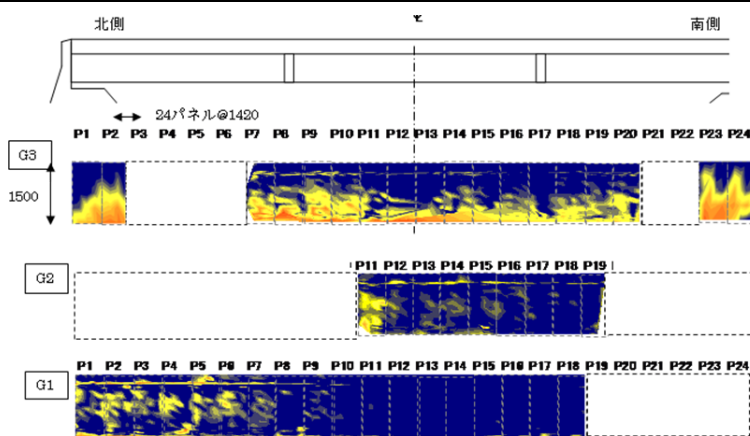


図1 構造部位別の腐食減厚分布

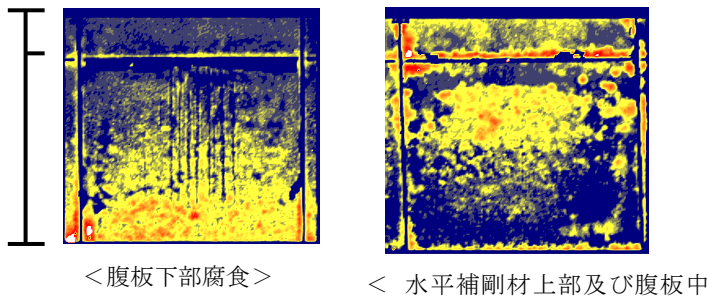


図3 特徴的な腐食減厚分布

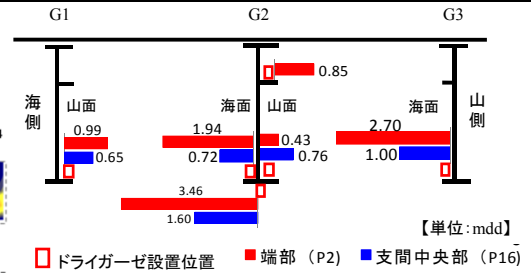


図2 海塩粒子の飛来特性



図4 せん断座屈強度と腐食減厚

4. 今後の展望

- (1) 腐食劣化した鋼プレートガーダー橋のせん断耐荷力評価に関して、平均板厚を用いて評価できない水平補剛材上部近傍及び腹板中央腐食に対する新たなせん断耐荷力評価法の構築が求められる。
- (2) 腐食劣化した鋼プレートガーダー橋のせん断耐荷力実験および弾塑性 FEM 解析において、水平補剛材上部近傍及び腹板中央腐食のせん断座屈強度が著しく低下したが、その構造部位の腐食減厚量がどの程度減厚したら、せん断耐荷力が著しく低下するかを明らかにする必要がある。今後、増加が予測される腐食損傷鋼橋の補修補強の判定に重要なデータとなる。

5. 道路政策の質の向上への寄与

- (1) 本研究で得られた鋼プレートガーダーの腐食減厚分布（腐食マップ）は点検や調査時の見落とし防止、腐食減厚の予測および残存耐荷力診断時の参照データとして活用でき、効率的かつ信頼性の高い点検、調査、および診断法の構築へ寄与でき、現行橋梁点検マニュアルの質の向上に反映できると思われる。特に腐食環境の厳しい沿岸環境に建設された鋼プレートガーダーの維持管理への活用は有効である。
- (2) 本暴露橋は過酷な塩害環境下で激しく腐食減厚していたが、外桁外面は付着塩分の雨洗浄効果により約 30 年前の建設当初の表面処理材がそのまま残存していたことから、付着塩分を洗浄することは橋梁の長寿命化にとって効果的である。また、暴露橋の支間中央部では著しい腐食減厚は生じていなかったことより、洗浄や塗替え等の維持管理は桁端部付近でも橋梁の長寿命化には効果的である。よって、上記のことを維持管理業務に反映させるべきと考える。
- (3) 本研究対象の暴露橋は無塗装仕様で約 30 年間塩害環境下にあり、飛来塩分量も現行道示で規定する 0.05mdd よりかなり多い状態であったが、支間中央付近では腐食減厚が少ない状態であった。この結果は LCC に優れる耐候性鋼橋の適用範囲や技術開発へ反映できると思われる。また、道示で求めている架橋地点の飛来塩分計測法とその適用可能な飛来塩分量の検討にも反映できると思われる。

6. 主な発表論文

・玉城喜章, 下里哲弘, 有住康則, 矢吹哲哉: 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.

目次

第1章	序論	1
1-1	研究の背景と目的	1
1-2	研究内容	1
(1)	構造部位別の腐食劣化メカニズムの解明	2
(2)	腐食劣化鋼プレートガーダーの耐荷力評価	2
(3)	本レポートの構成	2
第2章	鋼プレートガーダーにおける構造部位別の腐食減厚特性と維持管理への活用	4
2-1	まえがき	4
2-2	暴露橋の腐食促進環境と腐食減厚特性	4
(1)	暴露橋の概要	4
(2)	暴露橋の腐食促進環境	4
(3)	構造部位別の腐食状態	7
2-3	暴露橋の海塩粒子特性	9
(1)	実験概要	9
(2)	実験結果	10
2-4	腐食減厚計測法	12
(1)	腐食減厚の計測機器の選定	12
(2)	超音波板厚計の計測間隔の検討	12
(3)	腐食減厚特性の確認	13
2-5	鋼プレートガーダーの腐食減厚特性	13
(1)	主桁ウェブ	13
(2)	主桁下フランジ	14
2-6	腐食減厚特性の維持管理への活用	15
(1)	点検・調査・診断時の重点範囲	16
(2)	点検・調査・診断時の重点構造部位	16
(3)	実橋での腐食減厚計測	16
(4)	桁内への付着塩分対策	16
2-7	結論	16
第3章	実腐食分布を考慮した鋼プレートガーダー橋のせん断耐荷力特性	18
3-1	まえがき	18
3-2	実橋における鋼プレートガーダー橋の腐食特性	18
3-3	解析手法	19
(1)	解析の概要	19
(2)	鋼板の材料特性	21
3-4	解析結果	21
(1)	せん断力-変位関係	21
(2)	せん断力-面外変形関係	22
(3)	せん断力-最大主ひずみ関係	23
3-5	腐食減厚や腐食形状と相当応力の関係	25
3-6	腐食減厚や腐食形状とせん断力の関係	26
3-7	まとめ	27
第4章	実腐食減厚分布を有する鋼プレートガーダー腹板のせん断耐荷力特性に関する実験的研究	28
4-1	まえがき	28

4-2	対象橋梁の概要	28
4-3	実験概要	28
	(1) 試験体の特徴	28
	(2) 試験体の製作	30
4-4	実験方法	32
4-5	実験結果及び考察	32
	(1) せん断力-変位特性	32
	(2) せん断座屈特性	34
	(3) 最大最小主ひずみ特性	35
	(4) 塑性域の拡がり	40
	(5) せん断耐荷力特性	41
4-6	結論	41
第5章	弾塑性 FEM 解析を用いた腐食鋼プレートガーダーの耐荷力評価	43
5-1	まえがき	43
5-2	実験供試体モデルによる解析	43
	(1) 解析手法	43
	(2) 解析パラメータ	44
5-3	解析結果	45
	(1) 荷重-変位特性	45
	(2) せん断座屈特性	45
5-4	せん断耐荷力評価	47
	(1) せん断座屈	47
	(2) 斜張力場降伏(せん断強度)	48
	(3) せん断耐力	49
5-5	腐食劣化した鋼プレートガーダーのせん断耐荷力評価法の検討	50
5-6	まとめ	51
第6章	結論	52

第1章 序論

1-1 研究の背景と目的

我が国は1960年代の高度経済成長期に膨大な数の橋梁を建設しているが、近年、鋼トラス部材の腐食破断による通行規制¹⁾や塩害で激しく腐食した鋼プレートガーダーの崩落²⁾など重大な腐食損傷が発生している。今後、経年とともに増加することが予測される腐食損傷橋に対し、安全安心に持続できる維持管理技術の構築を求められている。特に、腐食環境の厳しい沿岸部の鋼橋において、効率的かつ信頼性の高い点検、調査、および診断技術の構築が急務である。

1960～1970年代に建設された多数の鋼プレートガーダーにおいて、腐食損傷事例も多く報告されている^{3),4),5)}。その年代に建設された鋼プレートガーダーは薄板のI型断面主桁が標準構造であり、主桁ウェブには垂直と水平補剛材が設けられ、対傾構を取り付けるガセットプレートを接合している。よって、下フランジとウェブとの接合部位や2次部材との接合部位などは腐食原因の付着塩分や土砂などを堆積しやすい構造形式となっており、その部位は局部的に著しい腐食減厚を生じる環境にある。また、鋼プレートガーダーは桁端部で腐食損傷しやすく、腐食減厚の進行によっては支点部の座屈、桁端ウェブ部のせん断座屈などによる耐荷力の低下が懸念されている^{6),7),8),9),10)}。

したがって、今後、更なる経年とともに腐食損傷の進行の予測される鋼プレートガーダーにおいて、主桁の端部と支間中央部、外桁と中桁、主要構成部材の主桁ウェブと下フランジの接合部、および補剛材などの2次部材の接合部といった構造部位別の腐食減厚特性を明確にすることは、点検や調査時の見落とし防止、腐

食減厚の予測および残存耐荷力の診断に貴重なデータとなり、今後の鋼プレートガーダーに対する効率的かつ信頼性の高い点検、調査、および診断法の構築に大きく寄与できる。

そこで、本研究では、高温多湿で海塩粒子の飛来量が多く、過酷な腐食促進環境にある沖縄地域の沿岸部において、28年間自然暴露された無塗装仕様の耐候性鋼プレートガーダー（以下、「暴露橋」という。）を調査し、鋼プレートガーダーの構造部位別の腐食減厚特性を明確にすることを目的とする。また、暴露橋で得られる構造部位別の腐食減厚特性の維持管理への活用についても検討する。さらに、実腐食減厚分布が鋼プレートガーダー腹板のせん断耐荷力特性に及ぼす影響を解明する。

1-2 研究内容

本研究では、腐食促進環境下において約28年間自然暴露された無塗装仕様の耐候性鋼プレートガーダー橋（図1-1）を対象に、実橋スケールでの腐食減厚調査、腐食環境調査を行い、鋼プレートガーダーの構造部位別の腐食減厚分布特性と腐食促進環境因子である飛来塩分の桁内への流入特性との関係を解明することを目的とし、鋼プレートガーダー橋の腐食耐久性向上のための維持管理の留意点について示すことを目標とした。また、腐食劣化した鋼プレートガーダーを用いて製作した試験桁によるせん断耐荷力実験および弾塑性FEM解析を行い、実用的な既設鋼プレートガーダーの耐久性評価に提案することを目標とした。以下に研究内容を示す。



<暴露橋の外桁の腐食>



<暴露橋の内桁の腐食>

図 1-1 暴露橋の腐食状況

(1) 構造部位別の腐食劣化メカニズムの解明

過酷な腐食促進環境において、28年間自然暴露された無塗装仕様の耐候性鋼プレートガーダー橋に対する腐食環境および腐食減厚調査により、桁内への飛来塩分流入特性と実橋スケールでの構造部位別の腐食減厚特性を明らかにする。また、上記の腐食環境の厳しい沿岸部の鋼橋で得られた桁内の飛来塩分流入特性と構造部位別の腐食減厚特性を活用して、既設鋼プレートガーダーに対する効率的かつ信頼性の高い点検、調査、診断技術および腐食耐久性向上のための維持管理上の留意点について示す。

(2) 腐食劣化鋼プレートガーダーの耐荷力評価

既往研究において、腐食鋼プレートガーダーのせん断耐荷力は、一般的に腹板の平均的な残存板厚を用いれば、概ねせん断耐荷力を評価することができるかとされている。本研究では、28年間厳しい腐食促進環境下にさらされた結果、桁位置、水平補剛材近傍や腹板の高さ方向で異なる腐食減厚分布を有していた鋼プレートガーダー腹板を用いて、実大試験体を製作し、大型載荷試験機を用いて載荷実験を行った。その実験結果から、腐食鋼プレートガーダーのせん断耐荷力特性は、実腐食減厚分布の違いの影響を受けることを明らかにする。

また、その原因究明として、実験結果と弾塑性 FEM 解析を用いて、変形特性、ひずみ分布特性、塑性域の拡がり特性などを詳細に分析した。その結果から、桁内への飛来塩分流入特性と腐食減厚の程度と耐荷力の低下との相関について検討する。

(3) 本レポートの構成

本論文は、全 6 章から構成されている。以下に各章の内容について概説する。

「第 1 章 序論」では、本研究の背景と目的、研究内容、本レポートの構成を示している。

「第 2 章 鋼プレートガーダーにおける構造部位別の腐食減厚特性と維持管理への活用」では、まず、高温多湿で海塩粒子の飛来量が多く、過酷な腐食促進環境にある沖縄地域の沿岸部において、28年間自然暴露された無塗装仕様の耐候性鋼プレートガーダーを調査し、鋼プレートガーダーの構造部位別の腐食減厚特性を明確にする。また、暴露橋で得られる構造部位別の腐食減厚特性の維持管理への活用についても検討する。

「第 3 章 実腐食分布を考慮した鋼プレートガーダー橋のせん断耐荷力解析」では、実環境下で腐食分布が明確に得られている鋼プレートガーダーを対象に、腹板の実腐食分布が鋼プレートガーダーのせん断耐荷力特性に及ぼす影響について検討する。検討に際して、腐食した腹板板厚は超音波厚さ計の実測結果を用いて、補剛材板厚は腐食減厚相当の一定板厚とし、下フランジ厚さは設計板厚として有限要素解析モデルを作成し、弾塑性有限要素法による耐荷力解析を行った。

「第 4 章 実腐食減厚分布を有する鋼プレートガーダー腹板のせん断耐荷力実験」では、実腐食減厚分布が鋼プレートガーダー腹板のせん断耐荷力特性に及ぼす影響を解明する。解明に際して、その実腐食減厚分布が顕著に発生している実橋腹板を使用して実大供試体を作製し、大型載荷試験機を用いて載荷実験を行った。

「第 5 章 弾塑性 FEM 解析を用いた腐食鋼プレートガーダーの耐荷力評価」では、鋼プレートガーダー橋の実腐食分布がせん断耐荷力特性に及ぼす影響を検討する。検討に際して、

レーザー変位計による実腐食分布形状の計測結果を用いて、有限要素解析モデルを作成し、弾塑性有限変位理論に基づく耐荷力解析を行った。

「第6章 結論」では、構造部位別の腐食劣化メカニズムの解明と腐食劣化鋼プレートガーダーの耐荷力評価について述べる。

参考文献

- 1) 山田健太郎：国道23号木曾川大橋の斜材の破断，橋梁と基礎，Vol.41，No.9，2007.
- 2) 下里哲弘，村越潤，玉城喜章，高橋実：腐食により崩落に至った鋼橋の変状モニタリングの概要と崩落過程，橋梁と基礎，Vol.43，pp.55-60，2009.11.
- 3) 土木学会鋼構造委員会・鋼橋の余寿命評価小委員会：鋼橋における劣化現象と損傷の評価，土木学会鋼構造シリーズ7，1996.
- 4) 名取暢，西川和廣，村越潤，大野崇：鋼橋の腐食事例調査とその分析，土木学会論文集，No.668/I-54，pp.299-311，2001.1.
- 5) 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：腐した鋼構造物の耐久性照査マニュアル，土木学会鋼構造シリーズ18，2009.
- 6) Vo Thamh Hung，佐々木栄一，市川篤司，三木千壽：腐食を模擬した模型桁のせん断耐力に関する実験および解析，構造工学論文集，Vol.48A，2002.3.
- 7) Vo Thamh Hung，永澤洋，佐々木栄一，市川篤司，名取暢：腐食が原因で取り替えられた実鋼橋支点部の載荷実験および解析，土木学会論文集，No.710/I-60，pp.141-15，2002.7.
- 8) 海田辰将，藤井堅，原孝志，中村秀治，上野谷実：腐食鋼板のせん断耐力とその評価法，構造工学論文集，Vol.50A，pp.121-130，2004.3.
- 9) 海田辰将，藤井堅，宮下雅史，上野谷実，中村秀治：腐食したプレートガーダーの残存曲げ強度に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.51A，pp.139-148，2005.3.
- 10) 中山太士，木村元哉，石川敏之，松井繁之：ウェブ孔食を持つ鋼桁のせん断耐荷力，構造工学論文集，Vol.52A，pp.49-56，2006.3.

第2章 鋼プレートガーダーにおける構造部位別の腐食減厚特性と維持管理への活用

2-1 まえがき

一般に、鋼橋の腐食は、橋の支間中央部より端部の損傷劣化が激しく、ボルト添接部や下フランジ付近でも腐食損傷が激しく起こる¹⁾。つまり、同じ橋でも構造部位および構造細部で腐食の進行度は著しく異なる。腐食環境の激しい橋梁の構造部位別に腐食減厚分布を明確に示せば、沿岸部の実橋において構造部位別の腐食劣化の把握に有効である。

支間中央部へのアプローチは、桁端部に比べ足場などの施設が必要となり、点検、調査などに多大な費用を要する。また、桁端部と支間中央部における腐食環境と腐食特性を利用した実用的な維持管理手法を構築することは、十分な財源が確保できない現況において有効な手段である。

そこで、本章では、高温多湿で海塩粒子の飛来量が多く、過酷な腐食促進環境にある沖縄地域の沿岸部において、28年間自然暴露された無塗装仕様の耐候性鋼プレートガーダー（以下、「暴露橋」という。）を調査し、鋼プレートガーダーの構造部位別の腐食減厚特性を明確にすることを目的とする。また、暴露橋で得られる構造部位別の腐食減厚特性の維持管理への活用についても検討する。

2-2 暴露橋の腐食促進環境と腐食減厚特性

(1) 暴露橋の概要

図 2-1 に暴露橋の橋梁一般図、写真 2-1 に暴露橋の全景を示す。同橋は橋長 35.0m、3 主桁、幅員 6.4m の単純支持の RC 床版合成の鋼プレートガーダー橋である。使用鋼材は旧 JIS 表示で

SMA50A、SMA50B、SMA41A の耐候性鋼材であり、建設当初に表面処理剤が施され、28 年間無塗装仕様であった。架橋位置は沖縄本島北部地方の西側沿岸であり、離岸距離 50m、桁下は河川である。本橋は 1981 年に架設され、桁端部の著しい腐食損傷のため 2004 年通行止め、2009 年 7 月に崩落した²⁾。本研究では 2008 年 11 月から 2009 年 7 月の崩落前までは暴露橋で現地調査を実施した。その調査内容は、風向風速、温湿度、飛来塩分計測、腐食外観調査および一部の桁端部の残存板厚計測である。崩落以降は、回収できた腐食桁に対して、接近外観目視、残存板厚計測、錆分析を行った。

(2) 暴露橋の腐食促進環境

a) 気象環境

図 2-2 に暴露橋で計測した月平均気温 (°C)、月平均湿度 (%) および濡れ時間割合 (%) を示す。なお、濡れ時間は ISO9223³⁾ に準拠して、温度 0°C 以上、湿度 80% 以上の計測時間を月別に積算し、月別の計測総時間との割合いで示した。計測期間は 2008 年 11 月から 2009 年 6 月の 8 か月である。計測位置は海側に位置する G1 主桁の端部であり、主桁内面側と外面側の下フランジ上面で計測した。計測結果より、月平均気温はほぼ同等であり、平均気温は桁内面側で 19.9°C、桁外面側で 20.1°C であり、最大の月平均気温 26.2°C、最小の月平均気温 15.8°C であった。また、月平均湿度は桁内面で 78.6%、桁外面で 78.5%、最大湿度は 84.4%、最小湿度 75.3% であり、外内面で若干差があり変動する傾向を示した。濡れ時間の割合は、2 月と 6 月で 60% を超える厳しい濡れ環境³⁾

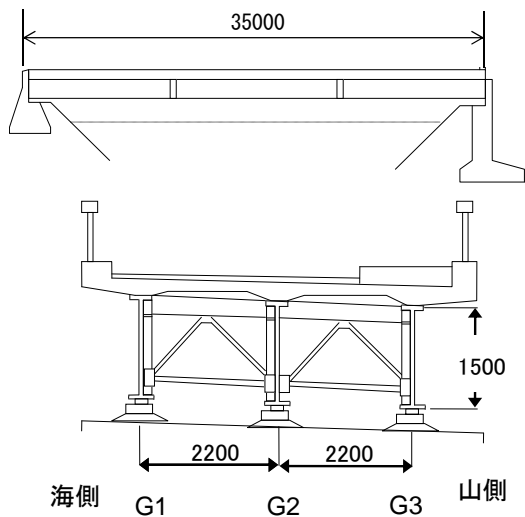


図2-1 対象橋梁

となった。また、気温が低い冬季（11月～2月）での濡れ時間の割合は、外面側が内面側より大きくなり、気温が高くなる春季・梅雨季（4月～6月）では内面側が大きくなった。

以上のことより、暴露橋の架橋環境は亜熱帯島嶼環境の特徴である高温多湿状態であること、桁内面と桁外面の気温は同程度であるが、湿度と濡れ時間は、気温が低い冬季では桁外面が大きく、気温が高い春季・梅雨季では桁内面が大きくなる環境であった。

図2-3に暴露橋架橋地点で計測した風向風速を示し、暴露橋の方角を合わせた平面図も示す。崩落前の2009年6月は橋上の支間中央部で計測し、崩落後の2010年11月～2011年8月は暴露橋の橋台跡で計測した。計測結果より、主風向の北西方向（NW）の月平均風速は最大5m/sと強風環境であった。また、風向頻度は海岸方向のNWと河川上流方向のSEが卓越していた。以上のことから、暴露橋は強風環境下にあり、主風向はほぼ河川に沿った方向の海岸から橋軸直角方向であった。

b) 桁内の海塩粒子の飛来特性

暴露橋の桁内面側においてドライガーゼ法（JIS Z 2381）を適用して飛来塩分の計測を行った。計測期間は2008年12月から2009年6月の7か月である。計測用ガーゼの設置位置は、桁端部と支間中央部の2断面とし、図2-4に示すように3主桁の内面側の下フランジ上面に4箇所、G2水平補剛材上に1箇所設置した。また、桁下空間を通過する飛来塩分を計測する目的で中桁G2の下フランジ鉛直下方に1箇所吊り下げて設置した。写真



<橋梁全景>



<桁下からの腐食状況>

写真2-1 暴露橋

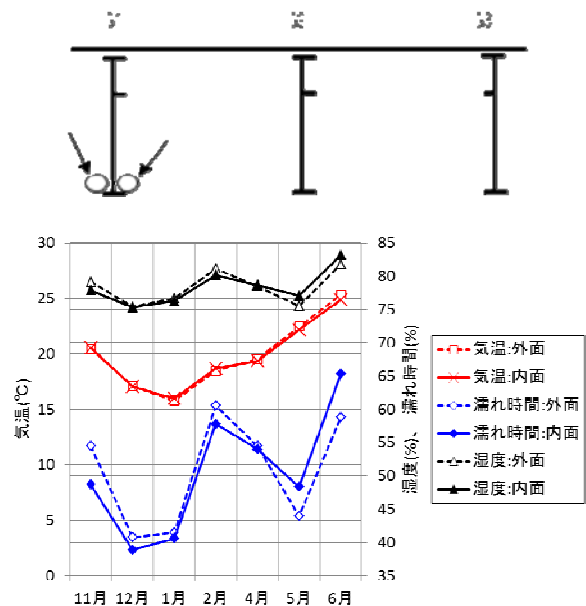
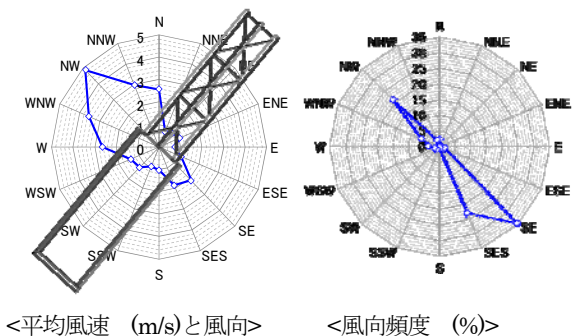


図2-2 温度、湿度および濡れ時間



<平均風速 (m/s)と風向> <風向頻度 (%)>

図2-3 風向風速

2-2にガーゼの設置状況を示す。ここで飛来塩分は、ガーゼを約1か月間曝した後に回収し、硝酸銀滴定法により塩分量NaCl (mdd : mg/dm²/day) を算定した。

図2-4に月別の飛来塩分をmdd表示で示す。図より、計測された飛来塩分は非常に多く、季節により変化することがわかる。月別の最大値はG2下フランジ下方(桁下空間を通過する量)の桁端部で4mdd、支間中央部で2mddを超え、桁内の最大値はG2とG3海面で3mddを超え、いずれも1月であった。また、桁端部の飛来塩分が支間中央部より多く、特に、海風を直接受けるG2とG3の海面でその傾向が顕著である。なお、今回の飛来塩分の計測期間は約7か月であるが、暴露橋近くの琉球大暴露場で2002年～2008年まで計測した結果⁴⁾においても非常に多い飛来塩分が同様に計測されている。これより、暴露橋は建設から崩落までの約28年間、同様な腐食環境下に曝されていたと推察される。

図2-5に桁位置別の平均飛来塩分量を示す。図より、支間中央部の桁内においては、G3海面が1.00mddと最も多く、G2は両面とも0.7mdd程度、G1山面が0.65mddであり、海塩粒子が飛来する方向で反対面の山面にも相当量の飛来塩分が計測され、G1-G2間ではほぼ同等であったと言える。また、桁端部においては、G3海面が2.70mdd、G2海面が1.94mddと両者ともに非常に多い飛来塩分であった。一方、G1山面が0.99mdd、G2山面が0.43mddの飛来塩分であった。これより、当然の結果であるが、海面が受ける飛来塩分は多いが、支間中央部と同様に山面、つまり、海から飛来する海塩粒子の飛来方向とは逆の桁面でも相当量の飛来塩分が計測されている。さらに、図2-5のG2山面の水平補剛材上面の平均飛来塩分でも0.85mddとなっており、G2下フランジ上面の0.43mddより多くなった。これはG1-G2間およびG2-G3間の桁内に流入した飛来塩分が、各桁内で渦を巻く渦流現象が生じた結果と推察される。なお、既往の研究^{5),6),7)}でも桁内の流入粒子の渦流特性について示されている。

次に、図2-5のG2下フランジ下方の支間中央部の飛来塩分1.60mddを基準にして、各桁内に流入し、桁内面で捕集される飛来塩分との比を用いて考察する。まず、桁端部のG2下フランジ下方の飛来塩分は支間中央部より約2.2倍多くなっている。本暴露橋の風況が図2-3で示したように、主風向がほぼ橋軸直角方向であることから、桁端

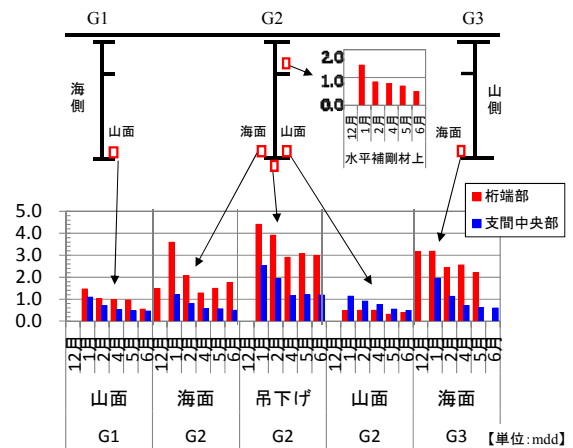


図2-4 月別飛来塩分



写真2-2 飛来塩分計測装置

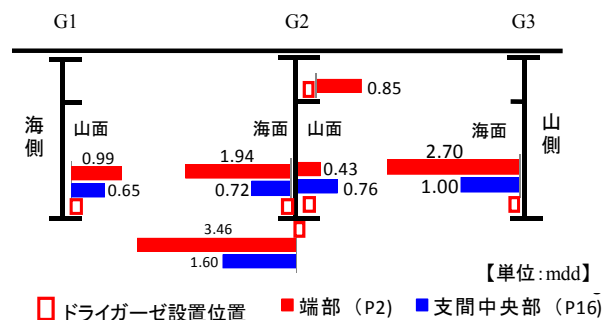


図2-5 海塩粒子の飛来特性

部の飛来塩分が桁端部周辺の橋台や河川護岸の影響を受けて増大したと推定される。次に、桁端部の桁内の飛来塩分流入は、海から山へ順にG1山面の0.6倍、G2海面の1.2倍、G2山面の0.3倍、G3海面の1.7倍となった。また、桁端部の海面では桁内に流入する飛来塩分が支間中央部での桁下下方を通過する飛来塩分より多くなった。支間中央部桁内の飛来塩分流入率は、G1山面で0.4倍、G2海面で0.5倍、G2山面で0.5倍、G3海面で0.6倍とほぼ一定となり、桁内へ流入する飛来塩分は、桁下を通過する飛来塩分の約0.5倍であった。

以上のことより、鋼プレートガーダーの桁内には飛来塩分の流入と渦流が生じ、海塩粒子の飛来方向と逆方向の桁面にも付着する特性を有する。

また、桁内流入は支間中央部の全ての桁面で桁下を通過する飛来塩分の約0.5倍であった。桁端部の海面は桁下空間を通過する飛来塩分量より多くなり、さらに桁面で大きくばらつく特性を示した。

また、無塗装仕様耐候性鋼材の適用可能な飛来塩分が 0.05mdd^(8),9),10)、塩害環境の厳しい日本海沿岸の飛来塩分が約 0.7mdd¹¹⁾ であり、いずれも支間中央部の桁内での年平均値であることを考えると、本暴露橋の架橋位置の飛来塩分環境が厳しいことがわかる。よって、本暴露橋で得られた約30年経過後の腐食減厚特性は他地域の沿岸部鋼橋に対する維持管理上の留意点を示し、さらに腐食減厚状態の予測などに活用することができると思われる。

(3) 構造部位別の腐食状態

a) 桁端部と桁支間中央部の比較

図2-6のa), b)に崩落前の実橋における桁端部と支間中央部のG2ウェブ内面の腐食外観写真の一例を示す。図より、桁端部では著しい腐食が観察される一方、支間中央部では発錆はみられるものの激しい腐食はみられないと言える。図2-6のc), d)に崩落後に回収した部材に対して、外観目視評価⁽¹²⁾を行った一例を示す。桁端部では層状剥離錆(評点1)の発生が相当範囲で確認された。一方、支間中央部では建設当初の錆安定化補助材も相当範囲で残存しており、評点3~5の判定であった。よって、桁端部と支間中央部での腐食状態は著しく異なり、過酷な飛来塩分環境下(G2桁内で0.72mdd)に約30年間曝されても、支間中央部のウェブ面は顕著な腐食の発生はみられなかった。この現象は今後の無塗装仕様耐候性鋼材の適用部位や耐食鋼材の開発研究に貴重な知見を与えている。

b) 桁外面側と内面側の比較(雨洗浄効果)

図2-7に海側に位置するG1端部の外面側と内面側の腐食状態を示す。図より、外面側は建設当初の表面処理剤が大部分で残存していることがわかる。一方、内面側は層状剥離錆が広範囲に確認される激しい腐食状態である。これは、外面側が雨によって付着塩分が洗われた結果と推察される。なお、図2-7で確認されるように外面側においても、雨があたりにくい床版直下のウェブ面に腐食がみられた。このことから、鋼橋、特に無塗装仕様耐候性鋼橋の腐食耐久性向上には、付着塩分の洗浄は効果的であるといえる。

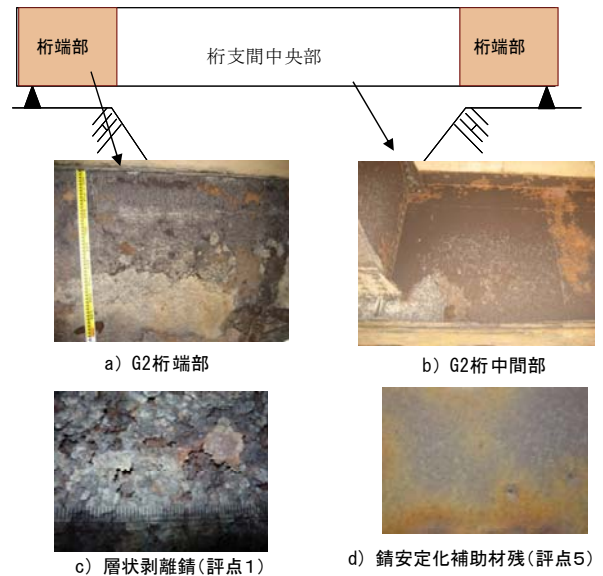


図2-6 桁端部と支間中央部の腐食比較 (G2 海面)

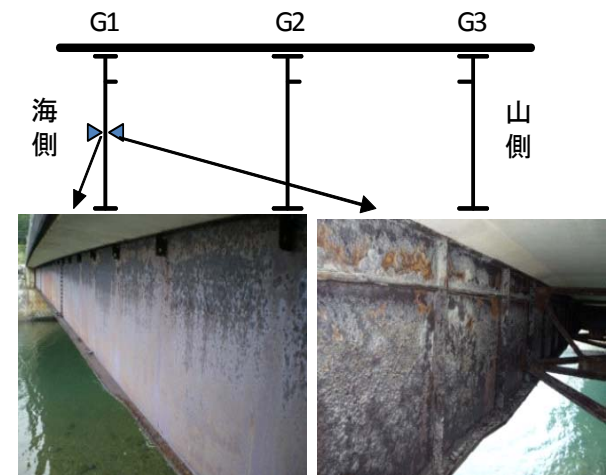


図2-7 外桁の外面と内面の腐食状況



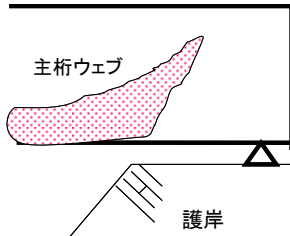
<山面 : G1>

<海面 : G3>

写真 2-3 山面と海面の腐食状態



a) 支点部(内面側) b) 支点部(外面側)
写真2-4 支点部の腐食状況



a) 護岸構造物の直上(外桁) b) 護岸構造物の直上(中桁)
図2-8 桁端部の腐食破断状況

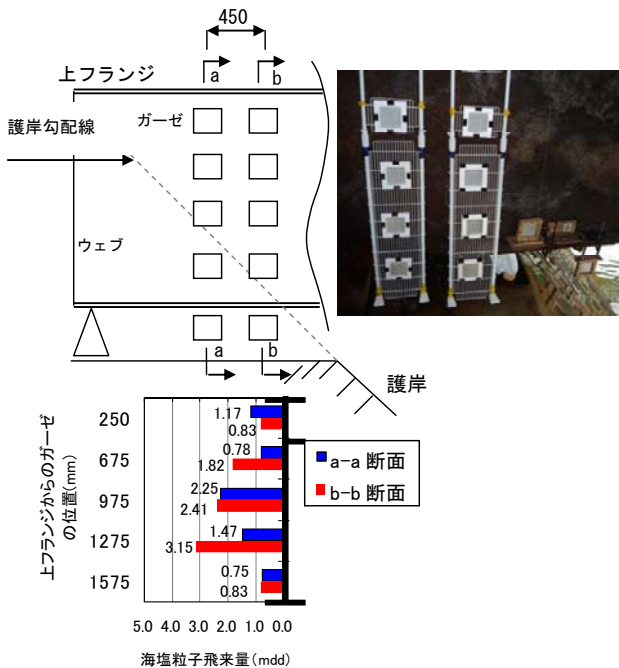


図2-9 護岸線直上(桁端部近傍)の海塩粒子の飛来特性

c) 桁の海面と山面の比較

写真2-3にG1山面とG3海面の腐食の特徴を示す。写真中の垂直補剛材に着目すると、G1ウェブに設置されている垂直補剛材はウェブ高の中

間付近で激しい部材欠損となっている。一方、G3の垂直補剛材はウェブ下端付近で激しい部材欠損となっている。これは図2-5を用いて考察したように、桁間(G1-G2間、G2-G3間)で生じる海塩粒子の流入と渦流現象に起因すると推察される。

写真2-4に支点部の腐食外観を示し、図2-8に桁端部の腐食状況を示す。一般的に最も腐食環境の厳しい支点部の腐食は本暴露橋でも発生しているものの、図2-8に示すように河川護岸法面の直上の下フランジおよびウェブにおいて、腐食損傷が最も激しく発生し、3主桁の内、海側のG1を除いた2主桁で下フランジとウェブとの溶接部近傍のウェブで破断していた。なお、海側のG1のみ腐食破断が生じなかった理由は桁外面側の付着塩分の雨洗浄効果と桁内面側の直接飛来塩分を受けない環境であると推察される。

図2-9に橋台上で計測した1カ月の飛来塩分量を示す。計測はガーゼを鉛直方向に5個並べた計測治具を用いて護岸線直近(b-b断面)と支点側へ450mmずらした位置(a-a断面)で行った。計測結果より、飛来塩分量が多くなる位置は下フランジとウェブとの溶接部近傍ウェブ(a-a断面の下から2番目)に相当しており、3.15mddであった。よって、この局部的に集中作用した飛来塩分量が腐食破断の原因の一つであると推定される。

以上のことより、鋼プレートガーダーの腐食は、飛来塩分環境の異なる桁端部と支間中央部、付着塩分の雨洗浄効果の影響を受ける桁外面と桁内面、桁内へ流入する飛来塩分特性の影響を受ける桁海面と山面で異なる腐食特性を示した。また、桁端部では一般的に腐食が厳しい支点部より桁端部周辺の構造物(河川護岸)の影響を受け、飛来塩分量を局部的に集中作用される部位が最も激しく腐食する特性を示した。

2-3 暴露橋の海塩粒子特性

前節において、暴露橋桁内の飛来塩分量から、海面ウェブ下端、G2山面水平補剛材上面、山面ウェブ下端の順に飛来塩分量が多いという結果が得られた。さらに、腐食状況から、G1桁山面では、ウェブ高中間付近で顕著な部材欠損が見られ、G3桁海面では、ウェブ下端部で顕著な部材欠損が見られ、桁の部位や構造部位により腐食形状が異なる現象が得られている。そこで、本節では、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）を対象とした橋梁模型を作製し、桁下高さを試験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流れを可視化して、ハイスピードカメラにより桁内の粒子移動を観測した。

(1) 実験概要

鋼桁橋周辺の流体特性を再現するために、風洞試験機による橋梁模型周辺の風の流れをハイスピードカメラで撮影する。また、カメラ画像解析手法にPIV（Particle Image Velocimetry）を適用した。本実験のフローチャートを図2-10に示す。

a) 対象橋梁モデル

表2-1に実験で使用した橋梁模型寸法を示す。橋梁模型は、暴露橋の1/15縮小モデルをアクリル板で作成したものである。

b) 試験装置

写真2-5、および写真2-6に示すように、ゲッチングン型大型風洞装置にアクリル橋梁模型、ハイスピードカメラ等を設置し、流れ観測およびPIV解析を行った。図2-11に示すように、模型下に設

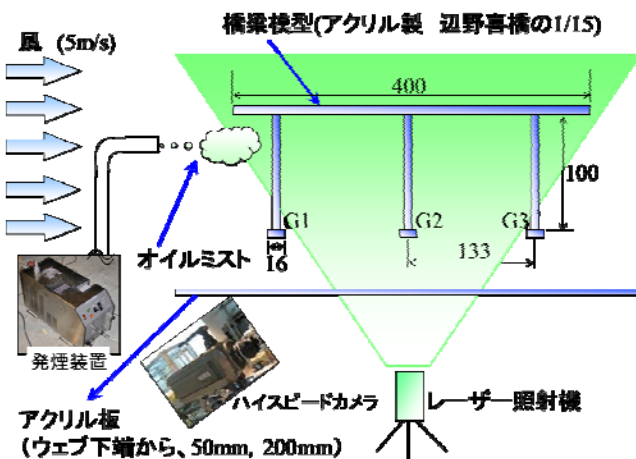


図2-11 風洞試験流れ観測概略図(例:暴露橋モデル)

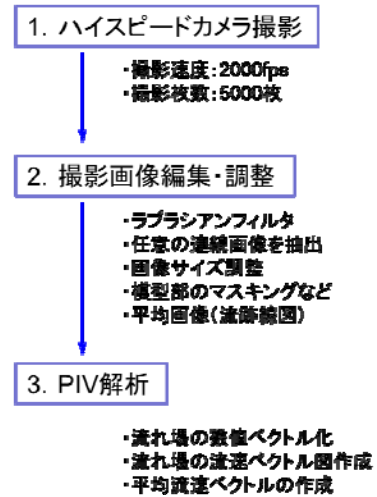


図2-10 風洞装置実験フローチャート

表2-1 想定橋梁および暴露橋モデル寸法

モデル	主桁数	桁間隔	桁高さ	下フランジ幅
想定橋梁	3主桁	2000	1500	240
暴露橋モデル		133	100	16

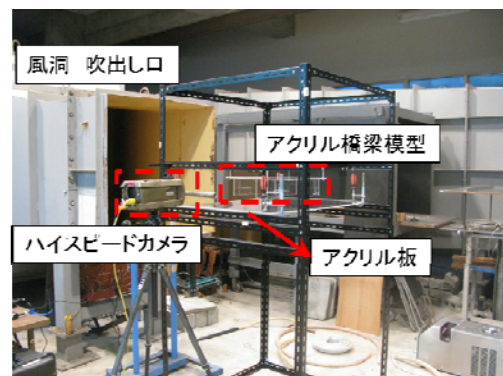


写真2-5 大型風洞装置による実験状況

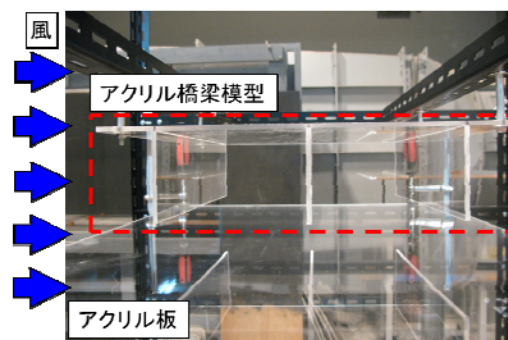


写真2-6 模型設置状況

表2-2 試験パラメータ

	風速(m/s)	桁下高さ(mm)
試験パラメータ	5	50, 200
実橋梁相当	0.33	750, 3000

置したアクリル板によって桁下高さを試験パラメータとして変化させた。これは、暴露橋架橋地点における満潮時と干潮時の水面を模擬している。桁間流れは、発煙装置によりオイルミストを流し、これに模型下からレーザーを照射することで流れの可視化を行い、ハイスピードカメラにより撮影を行った。

試験条件パラメータを表2-2に示す。風速を5.0m/sとし、桁下高さを50mm, 200mmとした。

c) PIV解析

PIV解析では、撮影した動画に処理を施し、桁間の空気の流れをオイルミスト粒子の移動を解析することでベクトル化し、平均流速ベクトルを画像化した。

(2) 実験結果

図2-12に桁下高50mmの瞬間画像、瞬間流速ベクトル図の一例を示す。図より、桁間の流れはG2風上側、G3風上側のウェブ下端に衝突し、ウェブを這うように反時計回りの流れしている。

図2-13に桁下高さが200mmの瞬間画像、瞬間流速ベクトル図の一例を示す。図より、G2-G3間では桁下高さ50mmと同様にG3ウェブ下端に

衝突しウェブを這うように反時計回りに流れを生じた。G1-G2間では、G1ウェブ中間に衝突し、時計回りに流れが逆転する現象が確認された。

図2-14に暴露橋モデルの桁下高さの相違によるハイスピードカメラ観測スケッチと平均流速ベクトル図を示す。

図より、桁下高さを変えることでG1桁下を通り抜ける風が剥離渦を生じるなど大きく変化し、G1-G2桁間の流れの向きが異なる。G2-G3桁間では桁下逆さに関係なく一方向の渦流れを生じていた。このことから、G3風上側では常にウェブ下端に風が衝突し、塩分が多く付着し腐食が促進されると推測され、暴露橋でのG3桁のような腐食形状を形成すると考えられる。G1桁では潮の干満により水位が変化し、桁下高さがある高さ以上になると流れが逆転してウェブ中間部に飛来塩分が多く付着し腐食が促進されると推測され、暴露橋のG1桁の腐食形状を形成すると考えられる。

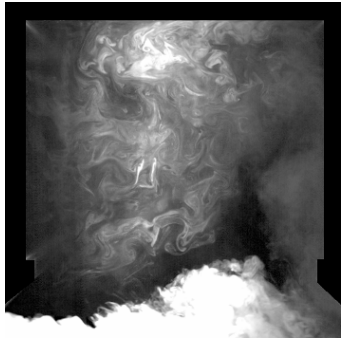
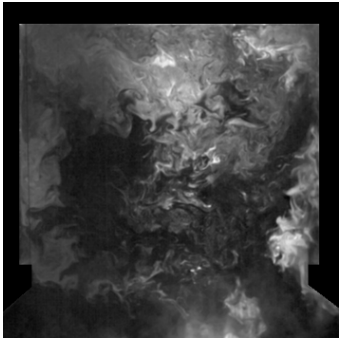
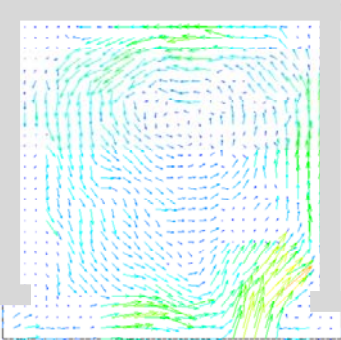
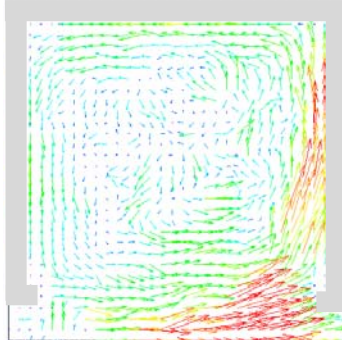
暴露橋 モデル	下フランジ有り 風速 5m/s 桁下 50mm (実環境 風速 0.33m/s, 桁下 750mm 相当)	
	G1-G2 間	G2-G3 間
瞬間 画像		
瞬間 流速ベクト ル図		

図2-12 画像観察結果 暴露橋モデル (下フランジ有り 桁下高さ 50mm)

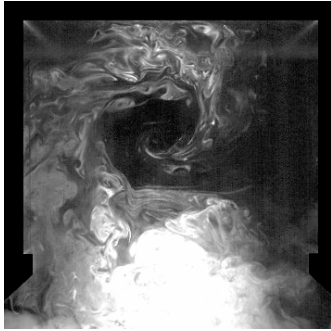
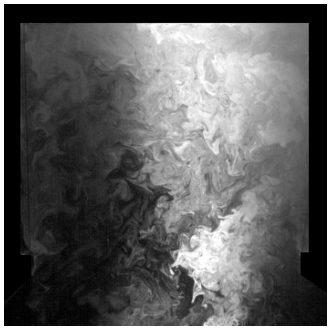
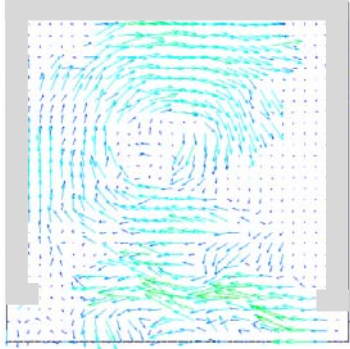
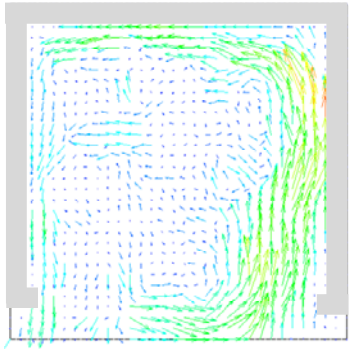
暴露橋モデル	下フランジ有り 風速 5m/s 桁下 200mm (実環境 風速 0.33m/s, 桁下 3000mm 相当)	
	G1-G2 間	G2-G3 間
瞬間画像		
瞬間流速ベクトル図		

図2-13 画像観察結果 暴露橋モデル (下フランジ有り 桁下高さ 200mm)

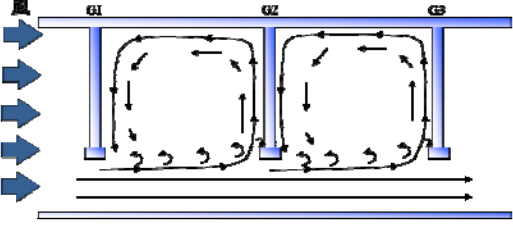
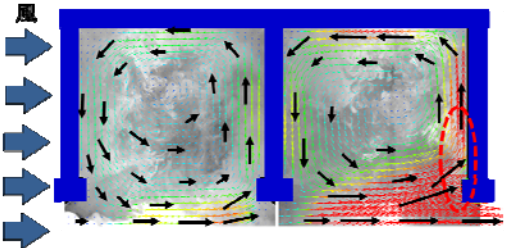
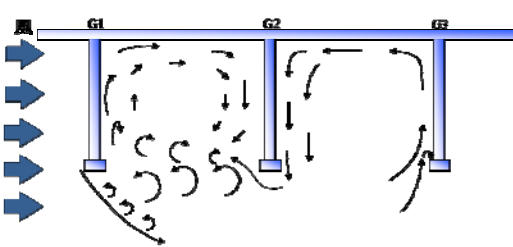
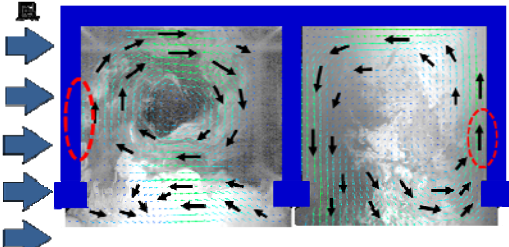
暴露橋モデル	経路観察(ハイスピードカメラより)	平均流速ベクトル図
桁下 50mm (実橋: 750mm相当)		
桁下 200mm (実橋: 3000mm相当)		

図2-14 動画観察と平均流速ベクトル図(風速5.0m/s, 実橋相当0.33m/s)

2-4 腐食減厚計測法

本章では崩落した暴露橋から回収した腐食鋼部材を用いて、実橋スケールで簡便に計測可能で且つ鋼プレートガーダーの構造部位別の腐食減厚分布の特徴を得られる腐食減厚計測法を検討した。

(1) 腐食減厚の計測機器の選定¹³⁾

一般に腐食減厚の計測機器には接触型と非接触型がある。接触型の代表的な板厚計測機器は、ノギス、マイクロメータ、キャリパーゲージ、および超音波板厚計などがあり、非接触型としてレーザー式変位計などがある。ノギス、マイクロメータおよびキャリパーゲージは腐食鋼板を直接挟み込み計測する方法のため、板エッジ部付近のみで適用可能な方法であり計測部位が限定される。超音波板厚計は腐食鋼板の片面からの計測であり、実橋での腐食減厚計測法として最も適用が多い方法である。ただし、超音波厚計は超音波探触子の接触面（超音波入射面）の腐食表面凹凸の影響を受けやすい¹⁾。レーザー式変位計は腐食表面凹凸形状を高精度に計測できるが、鋼板の両面からの計測が必要であり、実橋スケールで計測機器の設置も容易でない。

以上のことより、実橋スケールで簡便に計測でき、鋼プレートガーダーの構造部位別の腐食減厚分布の特徴を捉えることが可能な超音波板厚計を選定した。なお、下フランジは直接挟み込んで計測可能であるため、キャリパーゲージを適用した。

(2) 超音波板厚計の計測間隔の検討

計測間隔の検討では、主桁ウェブの高さ方向の計測間隔として、20mm、100mm、および300mmの3ケースとした。なお、検討に使用した腐食ウェブは暴露橋のG1、G2、およびG3である。なお、G1とG3の腐食ウェブの探傷面は、雨による洗浄効果で円滑面となっている外面（片面）とし、G2中桁は両面腐食のため、片面をグラインダーで研磨した面を探傷面とした。なお、使用した超音波板厚計はパルスエコー方式、5MHz、厚さ分解能0.01mm、探触子径11mmの仕様である。

図2-15に各計測間隔の腐食減厚分布を示す。ここで、図の縦軸は上フランジから計測点までの位置を距離表示し、横軸は残存板厚量を示す。図より、20mm間隔（赤印）の場合、水平補剛

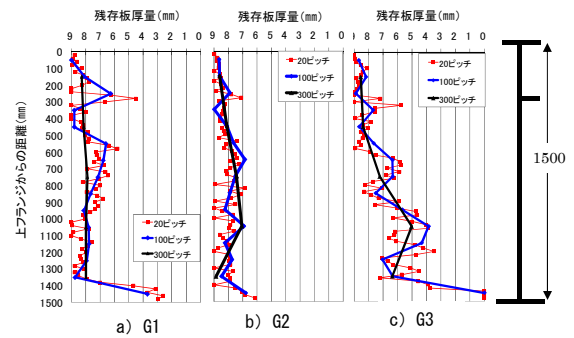


図2-15 各計測間隔での腐食減厚分布

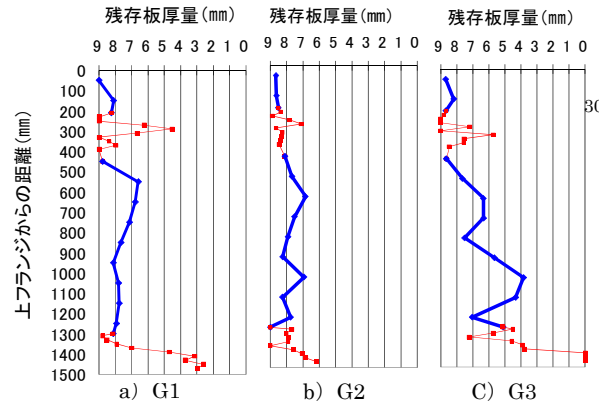
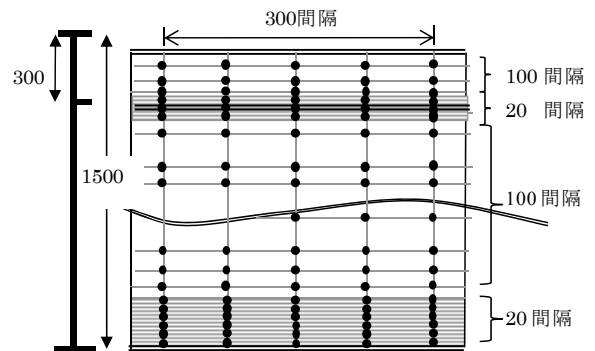


図2-16 選定した超音波板厚計測法での腐食減厚分布



(単位: mm)

図2-17 腐食減厚計測 (1ウェブパネル 160計測点)

材近傍や下フランジ近傍で局所的な減厚ピークが得られている。また、腐食凹凸の影響と考えられる変動が連続してみられるが、概ねその平均値はウェブの高さ方向に変化する減厚分布特性を捉えている。100mm間隔（青印）の場合、20mm間隔の平均的な減厚分布を示す傾向にあった。しかし、水平補剛材近傍や下フランジ近傍の局所的な腐食減厚ピークは20mm間隔ほど明確に捉えていない。300mm間隔（黒印）の場合は腐食減厚分布特性を捉えるまでには至っていなかった。

以上のことより、本研究では、ウェブ高さ方向の計測間隔として100mm間隔を基本として、局所的な腐食減厚ピーク部位を示した水平補

剛材の上下100mm範囲と下フランジから鉛直上方の200mm範囲は20mm間隔とした。また、橋軸方向（水平方向）の計測間隔は、腐食外観調査より、水平方向の腐食分布特性は明確な差がみられなかったこと、実橋スケールで計測可能な計測間隔を考慮して、ウェブ1パネル約1500mmを5分割する300mm間隔とした。

(3) 腐食減厚特性の確認

図2-16に100mmと20mmの混合間隔で計測した腐食ウェブの残存板厚分布の1例を示す。図より、構造部位別の腐食減厚特性が得られていることを確認できる。以下にその特性を示す。

- ・海側の桁G1は水平補剛材近傍と下フランジ近傍に減厚ピーク、ウェブ高さ方向の中央位置およびウェブ下フランジ近傍の3箇所で腐食減厚が大きくなる特性を示した。
- ・山側の桁G3は上フランジ部から下フランジ方向へ腐食減厚が大きくなる特性を示した。
- ・両面腐食の中桁G2はG1、G2ほど明確な傾向はみられないが、下フランジ近傍やウェブ高の中央付近で腐食減厚が大きくなる傾向を示した。

図2-17に本研究で適用した超音波板厚計を用いたウェブ面の腐食減厚計測の計測間隔（160計測点）を示す。

2-5 鋼プレートガーダーの腐食減厚特性

(1) 主桁ウェブ

a) 対象試験体

2-4で検討した超音波板厚計を用いた腐食減厚計測を適用して、崩落後に回収できた暴露橋のウェブを対象に残存板厚を計測した。計測対象のウェブパネルは、片面腐食状態のG1が18

パネル（P1～P18）、両面腐食状態のG2が9パネル（P11～P19）、片面腐食状態のG3が14パネル（P7～P20）の計41ウェブパネルである。なお、回収した腐食桁は崩落の衝撃で層状錆などはほぼ剥落した状態であった。片面腐食状態のG1およびG3は、建設時の表面処理材が残置している外面の平滑面から超音波を入射し、両面腐食状態のG2は探触子が接触する腐食凹凸点をグラインダーで研磨処理し超音波を入射した。また、G3の端部ウェブパネルP1、P2、P23、P24は回収不能であったが、崩落前の実橋にて300mm×300mm間隔で超音波板厚計測を行った。

b) 構造部位別の腐食減厚特性

図2-18に各主桁ウェブ面の腐食減厚分布を示す。ここでは腐食減厚後の残存板厚をコンター表示し、設計板厚9mmを青色表示している。図より得られた主桁ウェブ面の構造部位別の腐食減厚特性を以降に示す。

【海側の外桁G1】

- ・水平補剛材近傍、ウェブ中央部付近および下フランジ近傍の3か所で腐食減厚が顕著になる特性を示した。また、その腐食減厚特性は端部P1からP6付近まで現れている。
- ・支間中央部のP10～P18付近の腐食減厚はほとんど発生していない。

【山側の外桁G3】

- ・腐食減厚が最も広範囲であり、ほぼ桁全長にわたり腐食している。
- ・上フランジから下フランジへ向かって増加する腐食減厚特性を示した。下フランジ近傍が最も著しく腐食している。
- ・水平補剛材近傍の局所的な腐食減厚も伺えるがG1より顕著ではない。

【中桁G2】

- ・回収できたウェブパネルが桁支間中央付近の

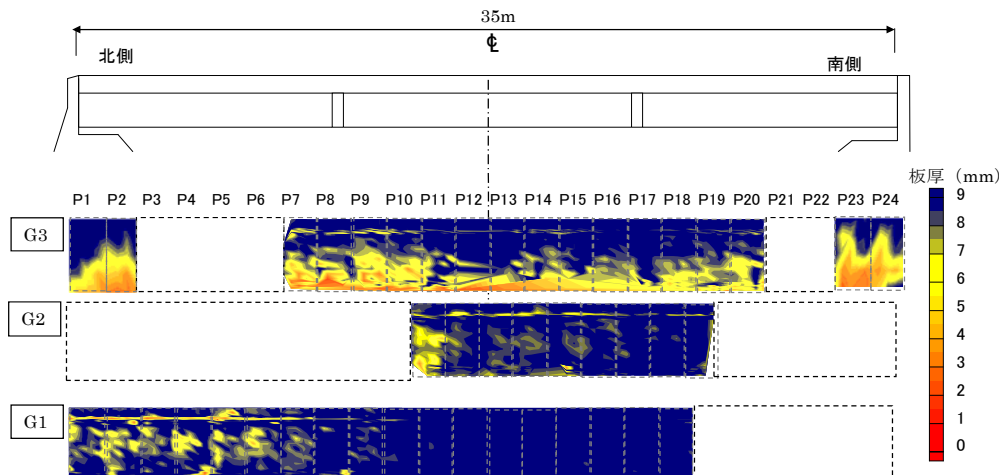


図2-18 ウェブ面の腐食減厚分布

みであるが、3主桁共通でデータのある P11～P18 の腐食減厚を比較してみると、G2 は G1 より大きく、G3 より小さい傾向を示した。

- ・ G1 と同様に水平補剛材近傍の局部的な腐食も伺える。
- ・ 崩落前の G2 は写真 2-7 に示すように桁端部の腐食が 3 主桁中で極めて著しい状態であった。これより、付着塩分の雨洗浄効果が両面とも期待できない中桁の桁端部は外桁より激しく腐食減厚していたと推察される。

以上のことより、主桁ウェブ面の構造部位別の腐食減厚特性は、桁端と支間中央部、海側の外桁と山側の外桁、外桁と中桁、ウェブの高さ方向および水平補剛材近傍で異なる腐食減厚特性を示す。

c) 補剛材近傍の腐食減厚特性

図 2-19 に水平補剛材近傍ウェブに着目した腐食減厚特性を示す。図には G1 全 19 パネルの水平補剛材とウェブとの溶接部周辺の残存板厚計測値を赤丸印でプロットし、その平均を黒色実線で示した。図より、図 2-18 で考察したように飛来塩分の桁内流入後の渦流の影響を受ける G1 内面側のウェブは、水平補剛材上部で局部的に腐食減厚が大きくなっているのがわかる。また、同図右の暴露橋から切出した断面写真からも、水平補剛材上部のウェブは局部的に著しく腐食減厚していることがわかる。

図 2-20 に垂直補剛材近傍ウェブの腐食減厚特性を示す。図より、水平補剛材と同様にウェブと垂直補剛材との溶接部近傍は腐食減厚が著しくなる特性を示している。また、写真 2-8 に暴露橋において発生していた水平補剛材および垂直補剛材設置背面のウェブの破断状況を示す。

以上のことより、補剛材が設置されたウェブは、その補剛材の溶接部近傍で局部的に腐食減厚し、腐食進行に伴ってウェブ母材の破断に至る特性を有する。

(2) 主桁下フランジ

a) 対象試験体

下フランジの腐食減厚の計測は、キャリバーゲージを用いて、フランジ板エッジからウェブ中心方向に 20mm 間隔、橋軸方向に 300mm 間隔で行った。G1 は 18 ブロック (P1～P18)、G2 は 4 ブロック (P15～P18)、G3 は 7 ブロック (P10～P14、P17～P18) の計 29 ブロック単位で計測した。



G2-P23～P24

回収後の G2 の桁端部

写真 2-7 中桁 G2 の激しい腐食損傷

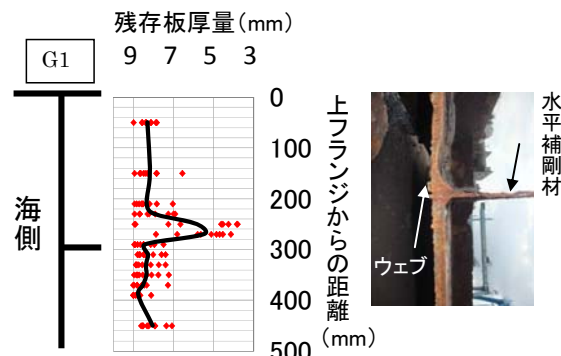


図 2-19 水平補剛材近傍の腐食減厚特性 (G1 桁)

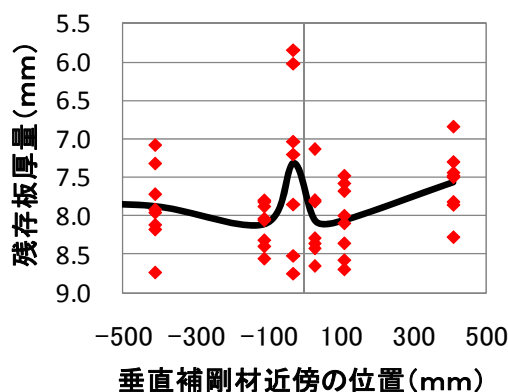


図 2-20 垂直補剛材近傍の腐食減厚特性



写真 2-8 水平・垂直補剛材の裏面ウェブの破断

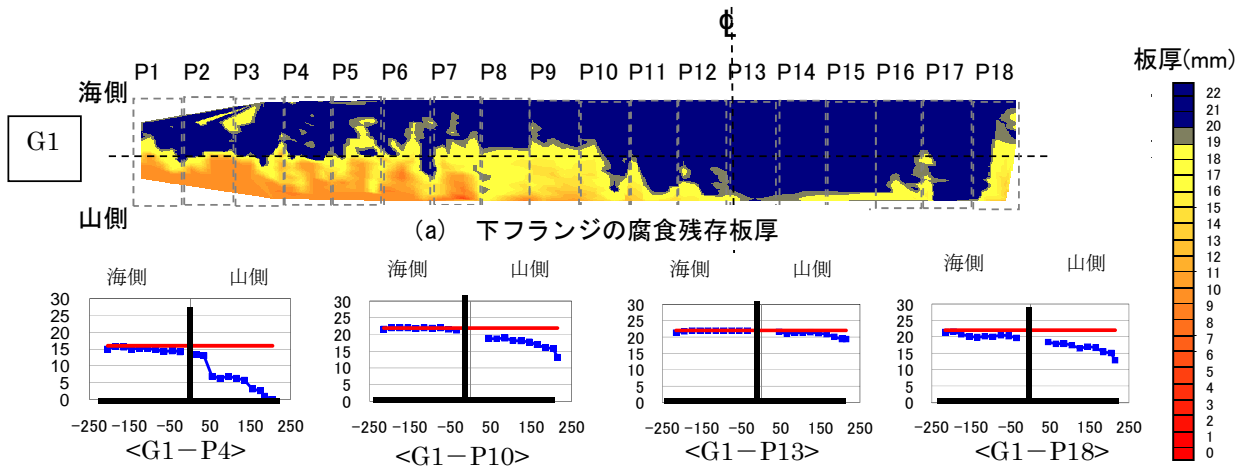


図 2-21 下フランジの腐食減厚分布 (G1 桁)

b) 構造部位別の腐食減厚特性

図 2-21 に海側の G1 下フランジの腐食減厚特性を示す。また、図中には代表断面での下フランジの残存板厚の断面分布を示す。ここで、残存板厚の断面分布は、1 ブロック当たり 5 計測ラインの平均値であり、赤ラインが設計板厚である。以下に得られた主桁下フランジの構造部位別の腐食減厚特性を示す。

- 腐食減厚は山側（内側）で顕著に発生し、雨がかり下の海側（外側）のフランジはほとんど減厚しない特性を示した。なお、写真 2-9 上に実橋でみられた錆膨張状況、写真 2-9 下に回収後の暴露橋で確認された山側と海側で著しく異なる腐食減厚状態を示す。
- P11 から P17 の支間中央部の腐食減厚は少ない特性を示した。
- 腐食減厚している山側に着目すると、支間中央部より桁端部の腐食は多い特性を示した。

以上のことより、下フランジの腐食減厚特性は、海塩粒子の飛来経路と雨がかりの影響を顕著に受け、桁端と支間中央部、および外桁と中桁の構造部位で異なる腐食減厚特性を示す。

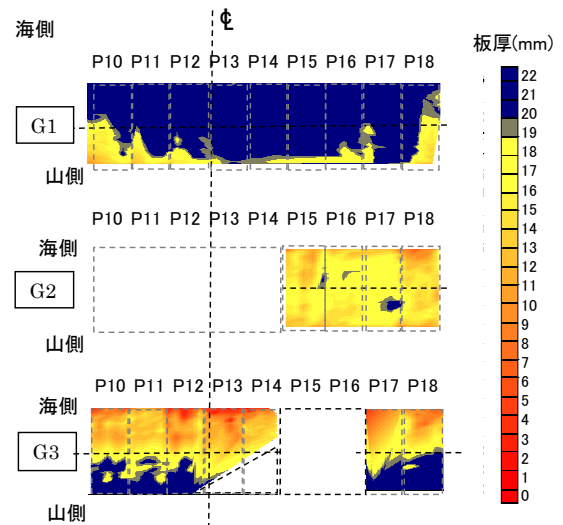


図 2-22 各主桁位置での下フランジの腐食減厚分布

2-6 腐食減厚特性の維持管理への活用

本章では、過酷な塩害環境下で約30年間曝された無塗装仕様の耐候性鋼プレートガーダーで得られた図2-18、図2-21および図2-22の構造部位別の腐食減厚特性を用いて、一般的な沿岸環境に建設された鋼プレートガーダーの点検、調査、および診断時の重点範囲、重点構造部位および腐食進行形態などの維持管理への活用について検討する。



写真 2-9 下フランジの腐食状況

(1) 点検・調査・診断時の重点範囲

- ・重点範囲は桁端部の内面である。
- ・桁端部とは一般的にジョイント漏水などの影響を受ける支点部または支点部を含む端部2パネルと考えるのが妥当である。ただし、桁端部に橋台護岸がある場合、その護岸前面は飛来塩分の集中作用を誘起しやすく、下フランジやウェブなどに局部的に激しい腐食減厚を引き起こす。よって、そのような橋梁端部周辺に飛来塩分の集中作用を誘起する付帯施設（護岸、排水管、ライフラインなど）がある場合は、その範囲までを桁端部とすることを提案する。
- ・桁外面は、管理者および橋の利用者に頻繁に目視される環境にあり、更に付着塩分が雨により洗浄され一般的に腐食減厚が緩やかな環境にある。一方、桁内面は一般的に定期点検時の接近目視のみで腐食状態を確認される環境であり、雨洗浄効果も期待できないことから、厳しい腐食環境となる。

(2) 点検・調査・診断時の重点構造部位

a) 下フランジ－ウェブ溶接部周辺

- ・著しい腐食減厚の発生部位は、下フランジとウェブとの溶接部上部のウェブ板である。また、下フランジ上面でも発生する。この部位の腐食減厚は飛来海塩粒子が直接当たる桁内面で著しく発生する。なお、この部位は接近しないと見えないので、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となる。
- ・腐食減厚が進行すると、溶接部上部のウェブが破断に至る。その破断が相当範囲に発生した場合、せん断耐荷力の低下が懸念される。
- ・特に橋台護岸構造物がある場合、その直近の構造部位が最も速く腐食減厚する特徴を示す。よって、点検、調査時には護岸構造物近傍の局部構造部位に激しい腐食が発生していないかを接近目視により確認する必要がある。

b) 水平補剛材－ウェブ溶接部上部周辺

- ・著しい腐食減厚の発生部位は、水平補剛材とウェブとの溶接部上部のウェブ板である。また、水平補剛材の減厚も発生する。なお、この部位は接近しづらいので、点検計画等において接近方法の検討など事前準備が重要となる。
- ・腐食減厚が進行すると、水平補剛材自体の減厚とその上部のウェブが局部的に減厚し、最終的には破断に至る。その破断が相当範囲で

発生した場合、ウェブのせん断耐荷力の低下が懸念される。

- ・この腐食減厚が明確に発生するのは、海塩粒子の飛来と反対面のウェブ面であり、その面に水平補剛材が設置されている場合である。これは桁内に流入した飛来塩分が桁間空間で渦流し、ウェブ高さの上部に位置する水平補剛材上部付近に付着し堆積するためである。

c) 垂直補剛材－ウェブ溶接部周辺

上記 a), b), c)と同様な腐食減厚環境にあると考えられる構造部位として、ガセットプレート周辺、高力ボルト継手周辺、横桁取り合い部、横構取り合い部および排水施設の周辺がある。これらにおいても、付着塩分や土砂等が堆積しやすく、局部的に腐食減厚しやすい環境にあるため、点検・調査・診断時の計画段階から十分考慮する構造部位である。

(3) 実橋での腐食減厚計測

実橋における腐食減厚の計測には、超音波板厚計が有効であり、ウェブ面の鉛直方向の計測間隔は水平補剛材および下フランジ近傍ウェブ 100mm 範囲は 20mm 間隔、それ以外は 100mm 間隔が有効である。また、橋軸方向の計測間隔は鉛直補剛材間を 300mm 間隔程度で、鋼プレートガーダーの構造部位別の腐食減厚特性を捉えることが可能である。

(4) 桁内への付着塩分対策

- ・桁内の付着塩分や土砂などの堆積物の洗浄は、腐食耐久性の向上を期待できる。特に、無塗装仕様の耐候性鋼橋には効果的である。なお、塗膜の耐久性向上との因果関係については、今後の研究課題である。
- ・桁内に流入する飛来塩分対策として、下フランジ間に飛来塩分を遮断する版を設置し、擬似1ボックス形式にする方法が考えられる。
- ・新設において、腐食環境の厳しい沿岸部では1ボックス形式や前述した擬似1ボックス形式は効果的である。また、鋼プレートガーダーの場合、付着塩分や土砂等が堆積する水平補剛材、鉛直補剛材、ガセットプレート極力適用しない構造上の配慮は有効である。

2-7 結論

本章では過酷な腐食促進環境の沿岸部において、28年間自然暴露された無塗装仕様の耐候性鋼プレートガーダー橋について、海塩粒子の

飛来特性及び構造部位別の腐食減厚特性を調査した。また、暴露橋で得られた構造部位別の腐食減厚特性の維持管理への活用について検討した。以下に本研究で得られた主な結論を示す。

- (1) 鋼プレートガーダーの桁内には飛来塩分の流入と渦流が生じ、海塩粒子の飛来方向と逆方向の桁面にも付着する特性を有する。また、桁内流入は支間中央部の全ての桁面で桁下を通過する飛来塩分の約 0.5 倍であった。桁端部の海面は桁下空間を通過する飛来塩分量より多くなり、さらに桁面で大きくばらつく特性を示した。
- (2) 桁外面は雨による付着塩分の洗浄効果により、腐食減厚は発生しづらい特性を有する。
- (3) 暴露橋モデルの G1-G2 桁では、桁下空間が大きくなると風上側に向かう時計回りの渦が見られる。これは G1 桁ウェブ中間の顕著な腐食形状との相関が見られる。
- (4) 暴露橋モデルの G2-G3 桁での渦の発生は、常に反時計回りで、G3 桁下フランジ付近に頻繁に風が吹き付けていたことから、暴露橋 G3 桁ウェブ下端部の顕著な腐食形状との相関が見られる。
- (5) 海側の外桁ウェブは桁端部付近において、水平補剛材近傍、ウェブ中央部付近および下フランジ近傍の 3 か所で腐食減厚が顕著になる特性を示した。また支間中央付近ではほとんど腐食減厚しない特性を示した。これは桁内への飛来塩分の流入と渦流特性の影響であると推定される。
- (6) 山側の外桁ウェブは、ほぼ桁全長にわたり腐食し、上フランジから下フランジへ向かって増加し、下フランジ近傍が最も著しくなる腐食減厚特性を示した。
- (7) 付着塩分の雨洗浄効果が両面とも期待できない中桁は、外桁より激しく腐食減厚する特性を有する。
- (10) 下フランジは、海塩粒子の飛来経路と雨がかりの影響を顕著に受け、外桁外側と内側で著しく異なる腐食減厚特性を示す。
- (11) 河川護岸などの付帯施設により、飛来塩分量が集中的に作用する構造部位は、腐食減厚が著しく速くなる特性を有する。
- (12) 補剛材の設置されたウェブは、その補剛材溶接部近傍で局部的に腐食減厚し、腐食進行に伴ってウェブ母材の破断に至る特性を有する。
- (13) 本章で得られた腐食減厚特性を活用し、沿岸部に建設された鋼プレートガーダーの点

検・調査・診断時の重点範囲、重点構造部位および腐食進行形態を推察するとともに、維持管上の留意点について示した。

以上のように、腐食損傷の厳しい沿岸付近の鋼プレートガーダーの腐食減厚は、海塩粒子の飛来特性と構造部位の影響を強く受ける。よって、鋼プレートガーダーの腐食耐久性の向上には、海塩粒子の飛来特性、桁位置、構造部位および桁端部の周辺施設などに十分配慮した維持管理や構造設計を行うことが重要である。

参考文献

- 1) 名取暢, 西川和廣, 村越潤, 大野崇: 鋼橋の腐食事例調査とその分析, 土木学会論文集, No.668/I-54, pp.299-311, 2001.1.
- 2) 下里哲弘, 村越潤, 玉城喜章, 高橋実: 腐食により崩落に至った鋼橋の変状モニタリングの概要と崩落過程, 橋梁と基礎, Vol.43, pp.55-60, 2009.11.
- 3) ISO9223: Corrosion of metals and alloys Corrosively of atmospheres Classification, 1992. 02. 15.
- 4) 東條良太, 山田義智, 湯浅昇, 富山潤: 沖縄本島における飛来塩分量の測定, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), 2009.8.
- 5) 加藤真志, 武田勝昭: 飛来塩分量の数値解析的評価技術の橋梁への適用—耐候性鋼材適用拡大への試み—鋼構造論文集, Vol.7, No.28, 2000.12.
- 6) 中西克佳, 加藤真志, 岩崎英治: 風洞実験による橋梁断面の部位別付着塩分布評価手法に関する基礎的研究, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.67, No.2, pp.326-335, 2001.1.
- 7) 淵脇秀晃, 下里哲弘, 有住康則, 矢吹哲哉, 瀬名波出石川正明, 松田昇一: プレートガーダー橋における海塩粒子の飛来塩分特性に関する研究, 土木学会第 66 回年次学術講演会(平成 23 年度), 2011.9.
- 8) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 I 共通編 II 鋼橋編, 2012.3.
- 9) (社)日本道路協会: 鋼道路橋塗装・防食便覧, 2007. 12.
- 10) 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 (XX) —無塗装耐候性橋梁の設計・施工要領(改訂案), 共同研究報告書第 88 号, 1993.3.
- 11) 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, 1988.1.
- 12) 紀平寛, 塩谷和彦, 幸英明, 中山武典, 竹村誠洋, 渡辺祐一: 耐候性鋼さび安定化評価技術の体系化, 土木学会論文集, No.745/I-65, 2003.
- 13) 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: 腐した鋼構造物の耐久性照査マニュアル, 土木学会鋼構造シリーズ 18, 2009.

第3章 実腐食分布を考慮した鋼プレートガーダー橋のせん断耐荷力特性

3-1 まえがき

腐食減厚した腹板に関するせん断耐荷力の研究として、例えば、腹板下部の腐食を模擬した模型桁を製作して、載荷実験と弾塑性有限変位解析による腐食減厚と腹板のせん断耐荷力についての検討¹⁾や、腹板全面が腐食減厚した鋼板モデルを対象に載荷実験とパラメトリック解析による腹板のせん断耐荷力評価法²⁾の検討などが行われている。しかし、これらの腐食を模擬した実験や解析では、実橋における腐食減厚の状態や構造部位別に異なる実腐食分布を有する鋼プレートガーダーのせん断耐荷力を十分評価しているとは言い難い。

28年間厳しい腐食環境にさらされていた鋼プレートガーダー橋を対象に、腐食部材について超音波厚さ計による板厚測定を行った^{4),5)}結果、海側の桁と山側の桁において、明確な腐食減厚分布の違いが見られた。そこで本章では、実環境下で腐食分布が明確に得られている鋼プレートガーダーを対象に、腹板の実腐食分布が鋼プレートガーダーのせん断耐荷力特性に及ぼす影響について検討する。検討に際して、腐食した腹板板厚は超音波厚さ計の実測結果を用いて有限要素解析モデルを作成し、弾塑性有限要素法による耐荷力解析を行った。

3-2 実橋における鋼プレートガーダー橋の腐食特性

写真 3-1 に対象となる実橋を示す。架設 1981 年 (2009 年崩落)、橋長 35.0m、単純活荷重合成鋼桁無塗装仕様の耐候性鋼橋である。本橋は、離岸距離 50m、飛来塩分量は平均 2.6mdd (2008 年 12 月～2009 年 6 月)の腐食促進環境下にあり、主桁位置、腹板高さ方向及び補剛材周りなどの

構造部位別において、異なった腐食特性が顕著に発現していた³⁾。図 3-1 に G1 桁と G3 桁の桁内部の腐食状況を示す。図より、G3 桁海側面の腹板の腐食は、G1 桁山側面の腐食より著しく進行している様子が伺える。腐食分布を把握するために、板厚計測を行った。板厚計測は、一般的に実橋で腐食減厚調査に用いられる超音波厚さ計を使用した⁴⁾。超音波厚さ計は、厚さ表示分解能 0.01mm、パルスエコー方式を使用した。図 3-2 に超音波厚さ計による腹板 1 パネルの計測間隔を示す。計測では、実物大スケールでの計測を考慮して、鉛直方向の分割数は 100 mm 間隔を標準とし、腐食減厚の変化が激しく見られる水平補剛材近傍 200 mm と下フランジから上方向の腹板 200 mm は、20 mm 間隔として細かくした。また、水平方向の分割数は、鉛直方向に比較して板厚減少の変化量が少ない状態であったことから 300 mm 間隔とした。以上より、腹板 1 パネルあたりの計測点数は、160 点である。

表 3-1 に、腐食減厚調査⁵⁾から得られた腹板 11 パネルの平均板厚を示す。ここで、平均板厚は図 3-2 に示す計測間隔での腹板 1 パネル計測点数の平均値であり、腹板の設計板厚は 9mm である。平均板厚 t_{ave} を次式に示す。

$$t_{ave} = (\sum t_i \times A_i) / \sum A_i \quad (3-1)$$

ここで、 t_i は各計測点 (160 点) における板厚、 A_i は t_i を中心とした長方形の面積である。

図 3-3 に、表 3-1 に示した腹板 11 パネルの板厚分布を示す。ここで断面方向の板厚分布は、図 3-2 の腹板センターライン (C ライン) の計測値である。また、等高線で表示した板厚分布を併記した。等高線は、図 3-2 の計測点 (160 点) を用いて作成している。図 3-3 の測定結果から、板厚分布の特徴を以下のように整理し

た.

- ①Type A: 腐食減厚が少ない健全相当の板厚分布.
- ②Type B: 水平補剛材近傍の腹板に腐食減厚が見られ, 平補剛材下部から下フランジに近づくほど腹板の腐食減厚が激しくなるような板厚分布 (G3 桁の特徴).
- ③Type C: 水平補剛材上面近傍の腹板の腐食減厚が激しく, さらに腹板中央・下端部の腐食減厚が激しくなるような板厚分布 (G1 桁の特徴).

以上の結果より, 本研究では板厚分布を, 表 3-1 に示すように Type A, Type B (G3 桁 5Type), Type C (G1 桁 5Type) に分類した.



写真 3-1 対象橋梁の全景

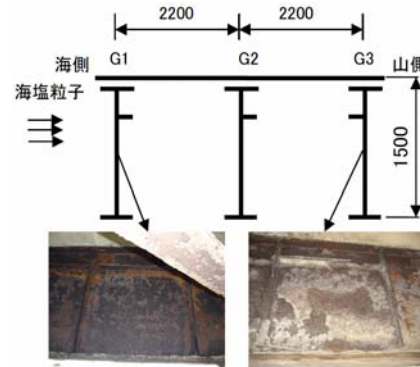


図 3-1 断面図及び腐食状況

3-3 解析手法

(1) 解析の概要

実橋の腐食減厚調査結果を基に, 実腐食減厚モデルを作成した. 実腐食減厚モデルは, Type A: 健全相当タイプ (1 ケース), Type B: 腹板下端部卓越腐食タイプ (5 ケース), Type C: 水平補剛材上部近傍と腹板中央・下端部卓越腐食タイプ (5 ケース) である.

図 3-4 に解析モデルを示す. 解析モデルは, 実腐食減厚モデルと健全部の腹板 2 パネルからなる単純支持の I 型桁モデルとした. 腹板 1 パネルの寸法は, 実橋と同じ幅 1500mm, 高さ 1500mm とし, 要素分割は計測間隔と一致させた. 着目パネルである実腐食減厚モデルの各要素の板厚は各測点 (160 点) の板厚とし, 健全部は, せん断座屈を生じないように板厚 30mm とした. また, 腹板の腐食形状の影響だけを検討するために, 補剛材板厚は腐食減厚相当の一定の板厚とし, 下フランジ厚さは設計板厚とした. また, 上フランジ厚さについては, RC 床版厚さの合成を考慮し 50mm とした. 支点及び荷重点の補剛材は, 30mm とした. 残留応力は考慮していない. また, 初期たわみは, 水平補剛材から下の単一パネルに正弦波を仮定し, 最大初期たわみ W_0 は道路橋示方書より $b/150=10\text{mm}$ を用いた. 初期たわみの波形 W を次式に示す⁶⁾.

$$W = W_0 \sin(\pi x/a) \cdot \sin(\pi y/b) \quad (3-2)$$

ここで, a は垂直補剛材の間隔, b は水平補剛材と下フランジ間の間隔である. 解析には, 汎用構造解析プログラム MSC Marc2007 を使用し,

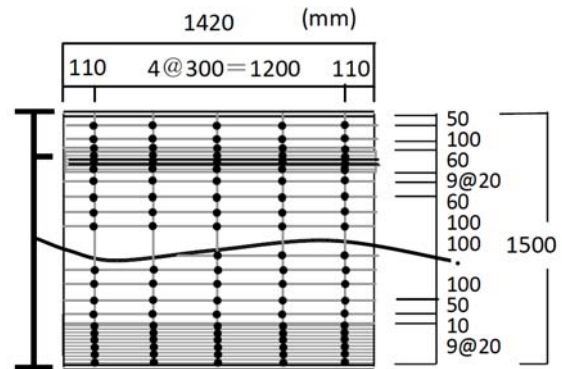


図 3-2 腹板 1 パネルあたりの計測箇所

表 3-1 腐食形状別平均板厚

パネル番号	平均板厚 (mm)	平均板厚減少量 (mm)	計測パネル	板厚分布の腐食形状
1	8.881	0.119	G1桁支間中央部	Type A
2	7.782	1.218	G3桁腹板	Type B1
3	7.536	1.464	G3桁腹板	Type B2
4	7.413	1.587	G3桁腹板	Type B3
5	6.919	2.081	G3桁腹板	Type B4
6	6.558	2.442	G3桁腹板	Type B5
7	8.387	0.613	G1桁腹板	Type C1
8	7.966	1.034	G1桁腹板	Type C2
9	7.648	1.352	G1桁腹板	Type C3
10	7.498	1.502	G1桁腹板	Type C4
11	7.375	1.625	G1桁腹板	Type C5

要素は 8 節点のシェル要素を用いた. 支点上はピン及びピンローラーの単純支持とした. 荷重方法は, 中央点に鉛直方向の強制変位を与えるものとした.

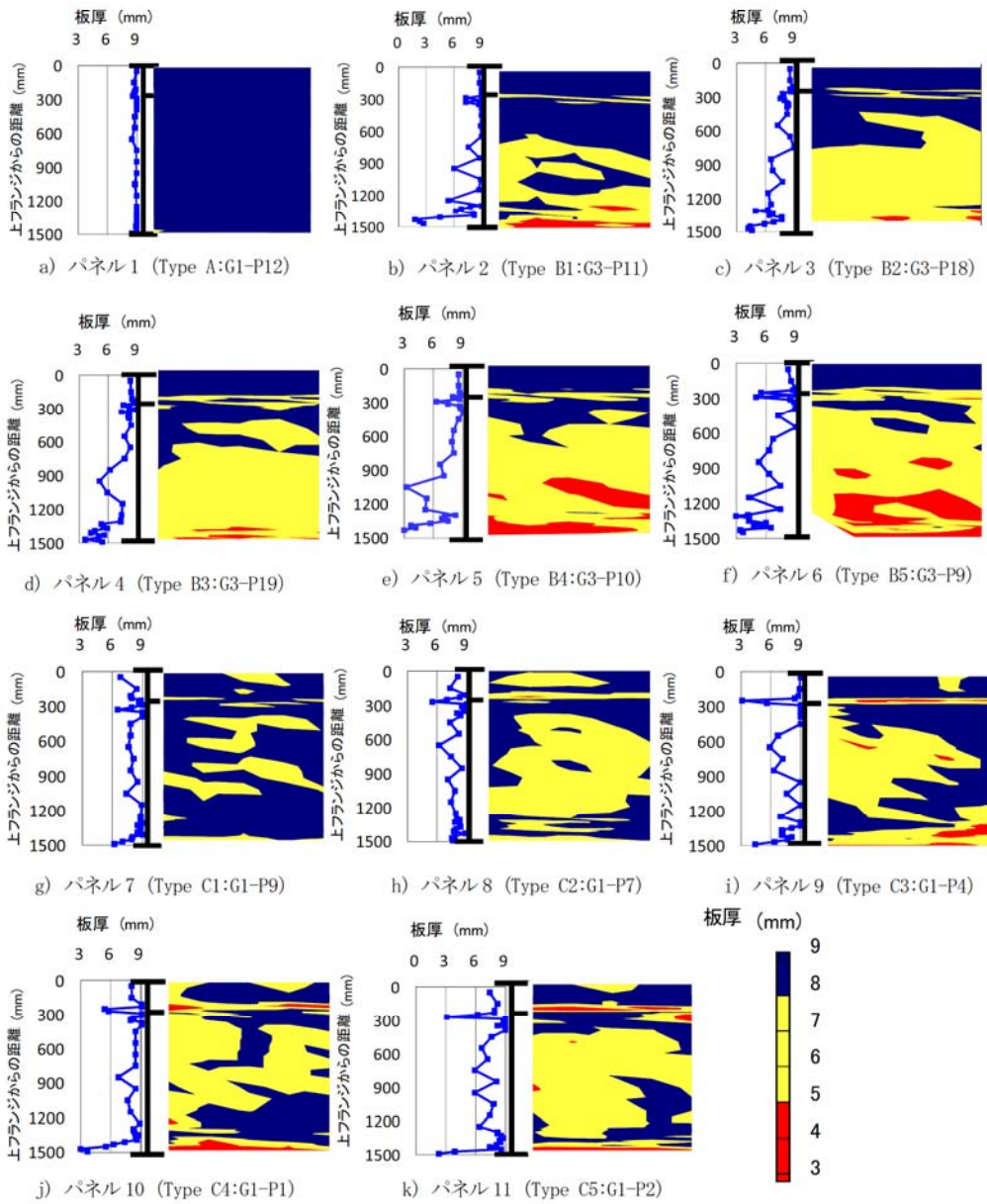
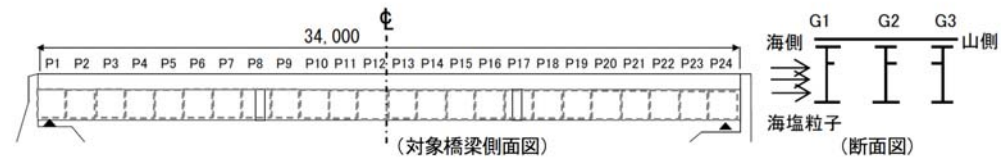


図 3-3 板厚分布

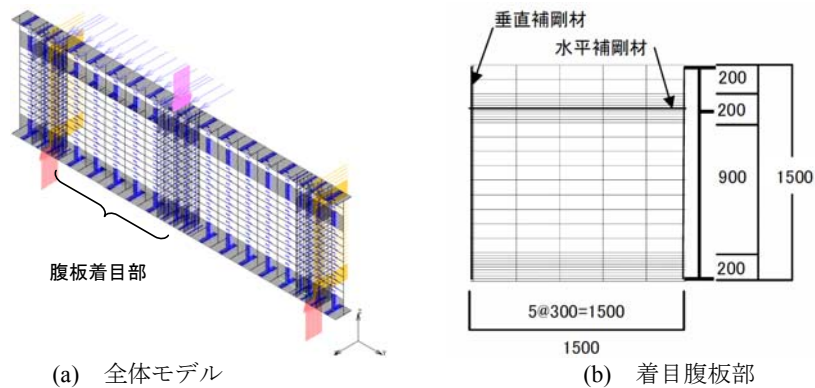


図 3-4 せん断試験解析モデル

(2) 鋼板の材料特性

図 3-5 に実橋腹板から取り出した腐食鋼材 (SMA490) の引張試験結果を示す. 図中の応力は, 腐食減厚した板厚を用いて算定した. 本研究では, 実腐食分布がせん断耐荷力に及ぼす影響を比較検討することを目的としているため, 鋼材のひずみ硬化域を考慮せず, 完全弾塑性体と仮定した. また, 降伏条件は von-Mises の降伏条件式に従うものとした. なお, 降伏応力度と降伏ひずみは, 腐食鋼材の引張試験結果から, それぞれ $\sigma_y=454 \text{ N/mm}^2$, $\varepsilon_y=0.227\%$ を用い, 弾性係数, ポアソン比は, それぞれ $E=2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$, $\nu=0.3$ とした.

3-4 解析結果

(1) せん断力-変位関係

図 3-6 に, 実腐食減厚タイプ別のせん断力-鉛直変位 (δ_v) の関係を示す. 鉛直変位の位置は,

図 3-4 の(a)に示す全体モデルスパン中央の下面である. 図中縦軸は, 載荷荷重 P から求めた着目パネルのせん断力 Q を健全モデルの降伏せん断力 $Q_{y,9\text{mm}}$ で除して無次元化した. せん断力 Q と降伏せん断力 $Q_{y,9\text{mm}}$ は, 次式で表わされる.

$$Q = P/2 \quad (3-3)$$

$$Q_{y,9\text{mm}} = \tau_y \times A_w \quad (3-4)$$

ここで, τ_y はせん断降伏応力 ($\sigma_y/3^{0.5}$), A_w は設計断面積 ($9 \text{ mm} \times 1500 \text{ mm}$) である. 図より, Type B と Type C とも, 平均板厚が小さくなると最大せん断力も小さくなっている.

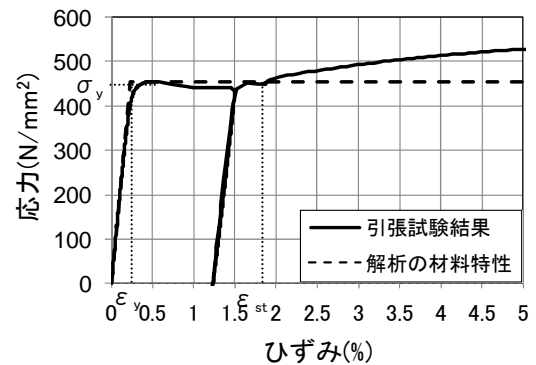
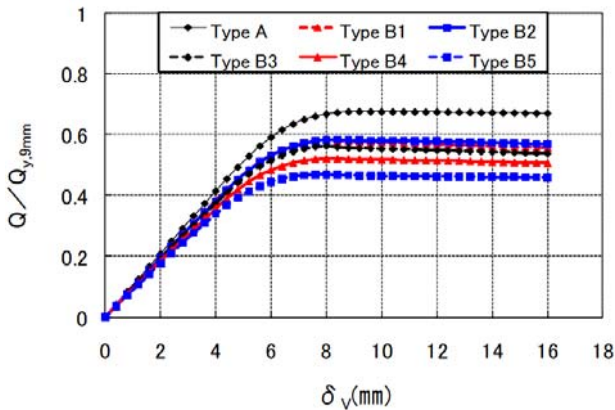
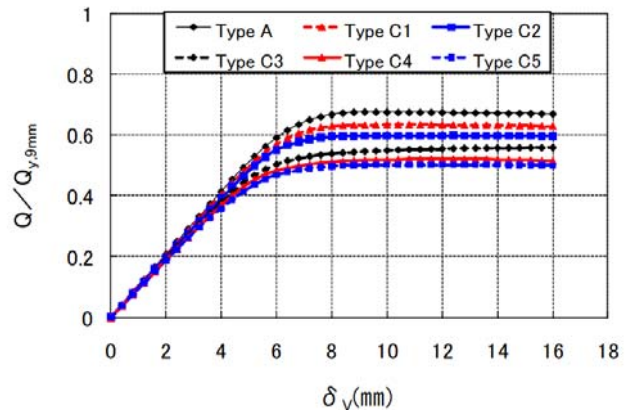


図 3-5 腐食鋼材の引張試験結果



(a) Type B



(b) Type C

図 3-6 実腐食減厚タイプ別せん断力-鉛直変位関係

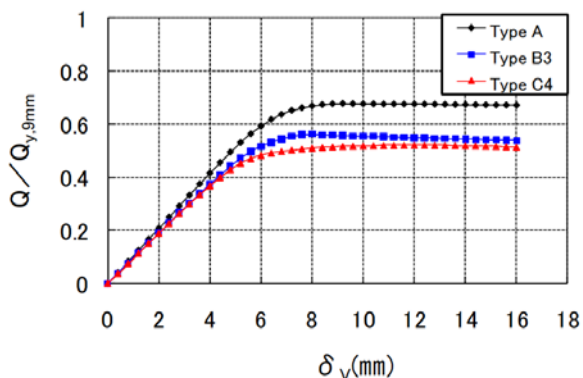


図 3-7 せん断力-鉛直変位関係

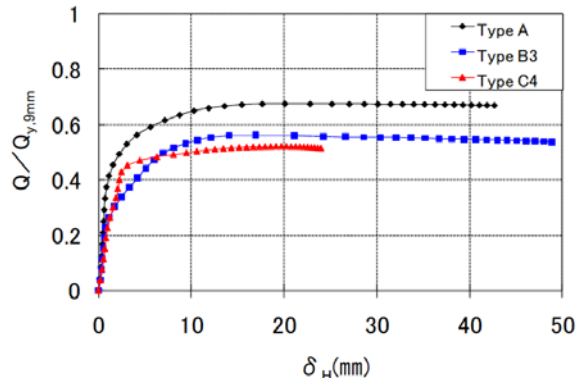


図 3-8 せん断力-中央面外変位関係

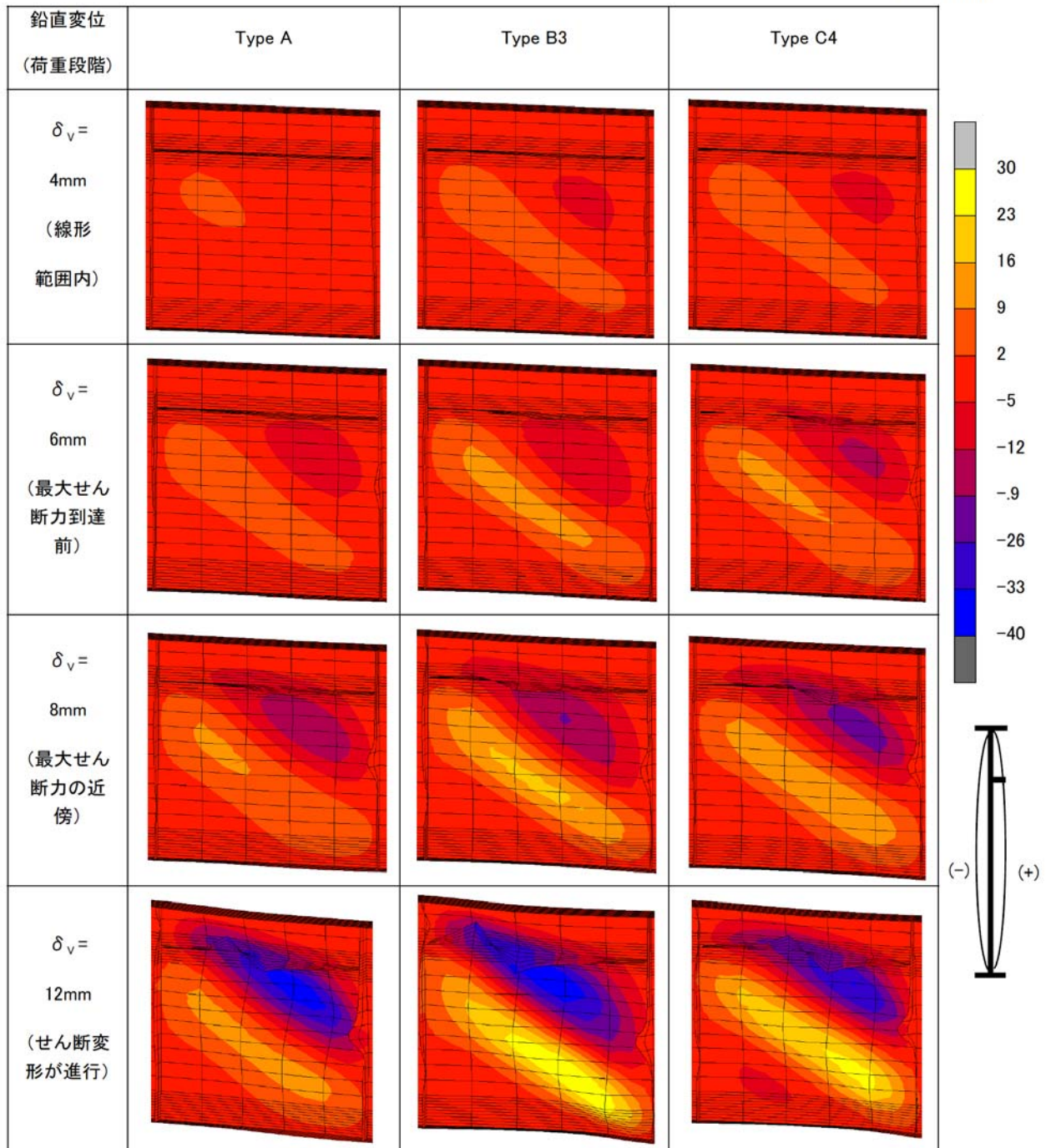


図 3-9 解析モデルの板厚

図 3-7 に、平均板厚がそれぞれ同程度である Type B3 (7.41mm) と、Type C4 (7.50mm) のせん断力-鉛直変位の関係を示す。なお、同図には腐食減厚が少ない Type A も併記した。図より平均板厚が同程度の Type B3 及び Type C4 の最大せん断力は、Type C、すなわち水平補剛材上部近傍と腹板中央・下端部卓越腐食タイプが低くなる傾向を示した。

図 3-8 に、Type A, Type B3, Type C4 のせん断力-中央面外変位の関係を示す。中央面外変位 δ_H の位置は、下フランジから 1000mm の位置

とした。腹板の中央面外変位は、3Type とも最大せん断力に到達後増加している。Type C4 は、 $Q/Q_{y, 9mm}=0.4$ を超えたあたりから、Type B3 と比較して中央面外変位の増加が顕著である。これより、中央面外変位は、平均板厚だけでなく腐食形状の影響を受けていると思われる。

(2) せん断力-面外変形関係

図 3-9 は、鉛直変位 δ_v が 4mm, 6mm, 8mm, 12mm 時点の変形モード (表示倍率 5 倍) を示す。ここで、図 3-7 から δ_v が 4mm とは線形範

囲内、6mm は最大せん断力到達前、8mm は最大せん断力の近傍、12mm はせん断変形が進行した時点を概ね示している。図 3-9 より、各 Type と最終時にはせん断座屈が生じて張力場を形成し、腹板の面外変形が顕著となっている。また、 δ_v が 4mm 及び 8mm の時、Type A に比べ Type B3 と Type C4 の面外変形が大きい。 δ_v が 8mm の時、Type C4 の面外変形は、腐食減厚の大きい水平補剛材近傍が他の 2Type に比べ大きくなっている。 δ_v が 12mm の時、Type B3 の面外変形は、腹板中央部から腐食減厚の激しい下部に向かって拡大している。以上より、面外変形は、腐食減厚の激しい部位に近い箇所が増加する傾向が見られる。

図 3-10 に、解析における腹板の面外変形及び主ひずみの着目位置を示す。なお、着目位置は、実腐食減厚モデルの腐食減厚の激しい水平補剛材上部近傍と腹板下部と腹板中央部に着目し決定した。また、同図には一般的な張力場方向とせん断座屈方向を併記している。

図 3-11 に図 3-10 に示す C ラインのそれぞれの荷役段階における面外変形分布を示す。初期たわみは、面外変形の正の方向に導入しており、図中黒の実線で示した。図 3-11 より面外変形は、全ての Type で S 字カーブを描いている。また、Type B3 は水平補剛材下部及び腹板中央部から下部方向の面外変形が δ_v の増加とともに増大している。Type C4 は水平補剛材近傍の腹板の面外変形が δ_v の増加とともに増大している。なお、Type A は δ_v の増加に伴い、水平補剛材下部の面外変形が増大している。これから、面外変形は腐食減厚が激しく板厚の小さい Type B3 の腹板下部や Type C4 の水平補剛材近傍が δ_v の増加とともに増大している。

(3) せん断力-最大主ひずみ関係

図 3-12 に L, C, R ラインのせん断力-最大

主ひずみの関係の結果の一例を Type A, Type B3, Type C4 について示す。図中縦軸は、せん断力 Q を降伏せん断力 Q_y 、9mm で除して無次元化し、横軸は、ひずみ ε を降伏ひずみ ε_y で除して無次元化した。なお、ひずみの範囲は、各実腐食分布と初期のひずみ特性を比較できるように $\varepsilon/\varepsilon_y=3.0$ 以下とした。図より、せん断力と最大主ひずみの関係は、最大せん断力に達するまでは比例関係にあり、最大せん断力付近に達すると最大主ひずみが降伏ひずみを超え急激に増加する場合と弾性域にある場合に分けられる。また、Type B3 では張力場付近の腹板中央から下部の C4 や R6 の最大主ひずみが増大し、Type C4 では水平補剛材上部近傍の L1, R1, C1 の最大主ひずみが増大しており、その箇所はそれぞれ腐食減厚の激しく板厚の小さい部位に対応している。また、Type C4 は、せん断力が $Q/Q_y, 9mm=0.2$ から $Q/Q_y, 9mm=0.4$ の間で L1, C1, R1 の主ひずみが急激に増大しており、図 3-8 において、Type C4 のせん断力が $Q/Q_y, 9mm=0.43$ を超えると中央面外変位が急激に増加したこ

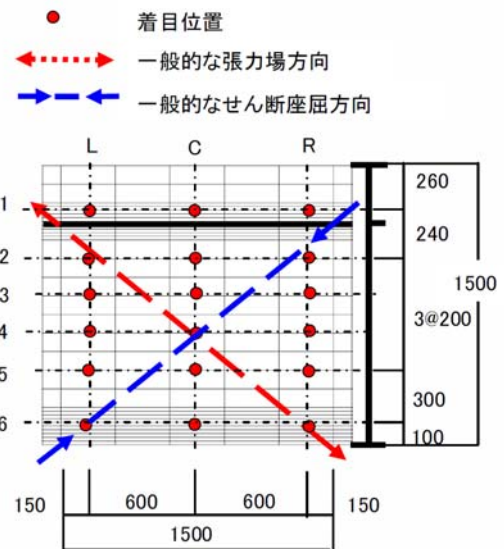


図 3-10 解析における腹板の着目位置

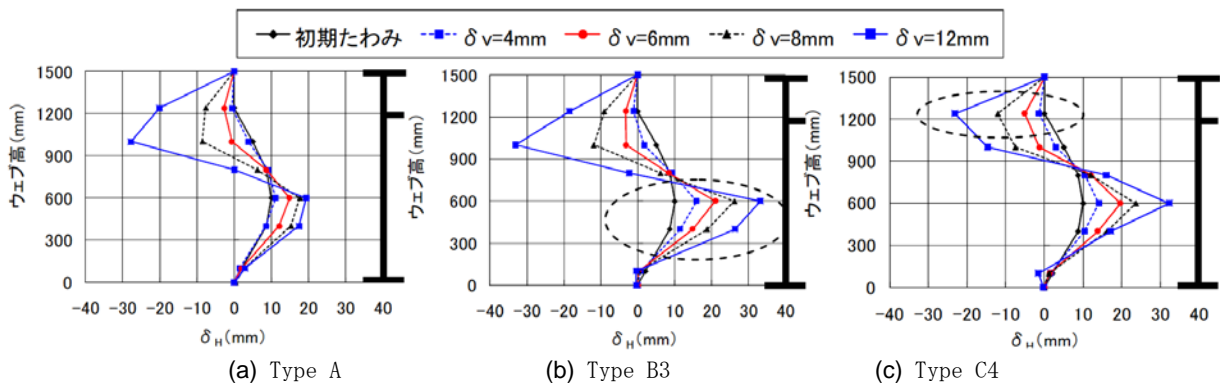


図 3-11 面外変形分布 (C ライン)

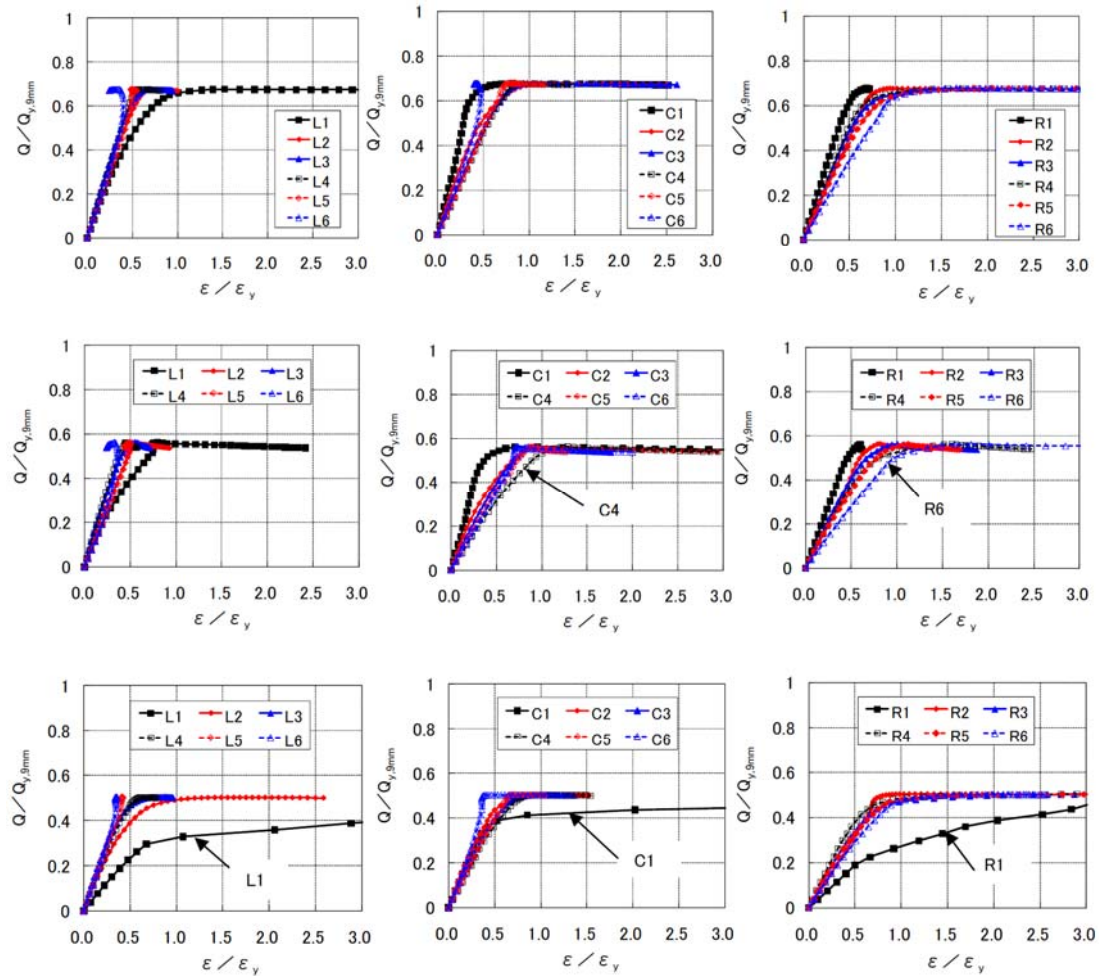


図 3-12 セン断力-最大主ひずみ関係

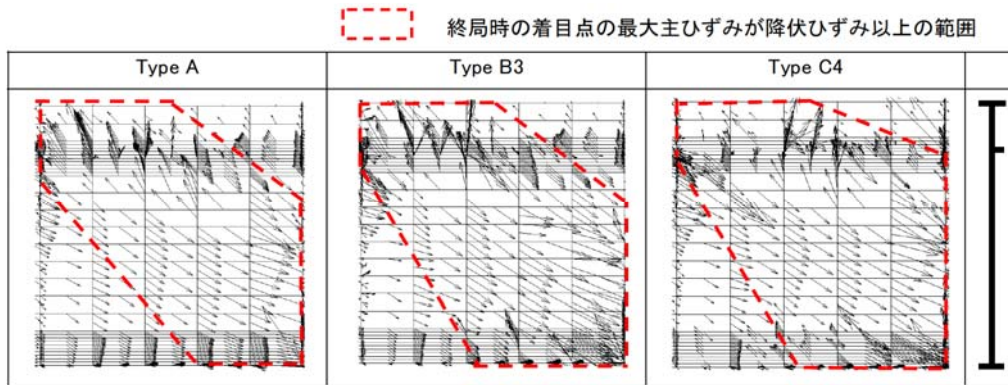


図 3-13 最大主ひずみの方向 ($\delta_v=8\text{mm}$)

とも考慮すると、腐食減厚の激しい水平補剛材近傍の腹板に応力集中が発生し、急激に面外たわみが大きくなったものと考えられる。

図 3-13 に、最大せん断力近傍である δ_v が 8mm の時の最大主ひずみの方向の一例を示す。最大主ひずみの方向は、各 Type とも腹板全体に亘って一般的な張力場方向になっており、最大主ひずみの大きさは、周辺部に比べて図 3-10 に示した一般的な張力場方向の矢印周辺部に近い領域が大きくなっている。また、図 3-13

より終局時に最大主ひずみが降伏ひずみ以上にある範囲を赤の破線で囲むと、概略的にこの範囲が張力場の領域と考えられる。図から、Type A は標準的な張力場分布を示しており、Type B3 は板厚の小さい腹板下部で張力場の領域が拡大している。一方、Type C4 では板厚の小さい水平補剛材近傍と腹板下部の領域で張力場が拡大している。これは、断面積の減少による耐荷力の低下のため、板厚が小さくなる部位ほど張力場の領域が大きくなっていると考

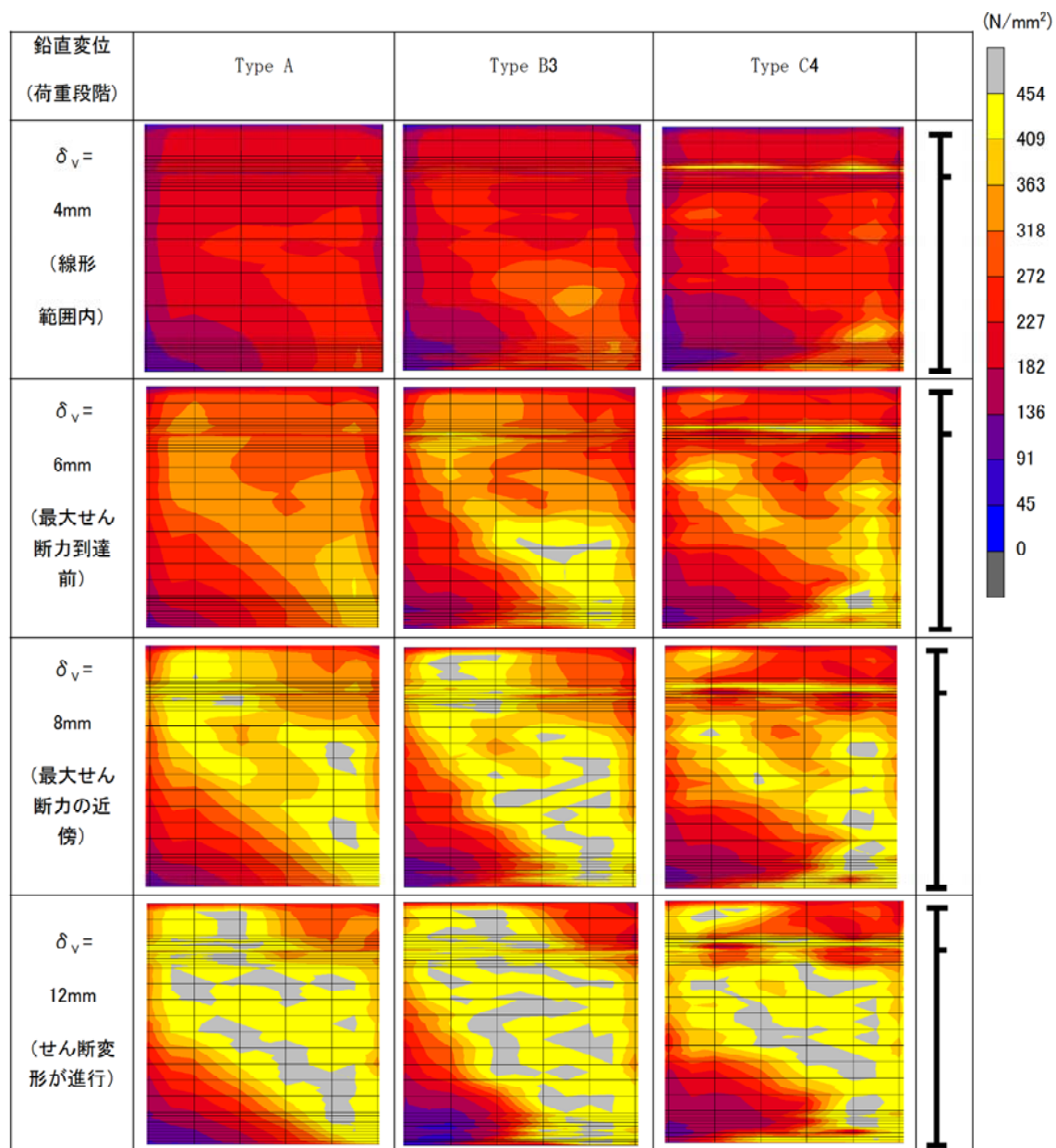


図 3-14 相当応力の進行

えられる。

3-5 腐食減厚や腐食形状と相当応力の関係

図 3-14 に、Type A、Type B3、Type C4 における相当応力 (von-Mises) の進行過程の一例を示す。図には、鉛直変位 δ_v が 4mm、6mm、8mm、12mm の場合の相当応力の分布を示している。線形範囲内である δ_v が 4mm の時、Type C4 の水平補剛材上部近傍の腹板に降伏応力に近い相当応力が見られる。その部位は、腐食減厚の激しい板厚の小さい部位である。最大せん断力に近い δ_v が 6mm の時、Type B3 は腹板下部の広い範囲に相当応力が発生するとともに一部

は降伏応力に達している。その部位も、腐食減厚の激しい板厚の小さい部位である。Type C4 は、水平補剛材上部近傍の腹板において相当応力の高い領域が拡大するとともに、腹板下部に一部降伏応力に達した相当応力が発生している。最大せん断力近傍の δ_v が 8mm の時、Type A と Type B3 は、腹板全面に亘って高い相当応力が見られる。しかし、Type C4 は主に水平補剛材より下部の腹板と水平補剛材上部近傍の腹板に、それぞれ降伏応力に近い相当応力が発生している。最大せん断力到達後せん断変形が進行している δ_v が 12mm の時、Type A は、腹板の腐食減厚が少ない場合の相当応力分布を示している。Type B3 は下フランジ付近の腹板の

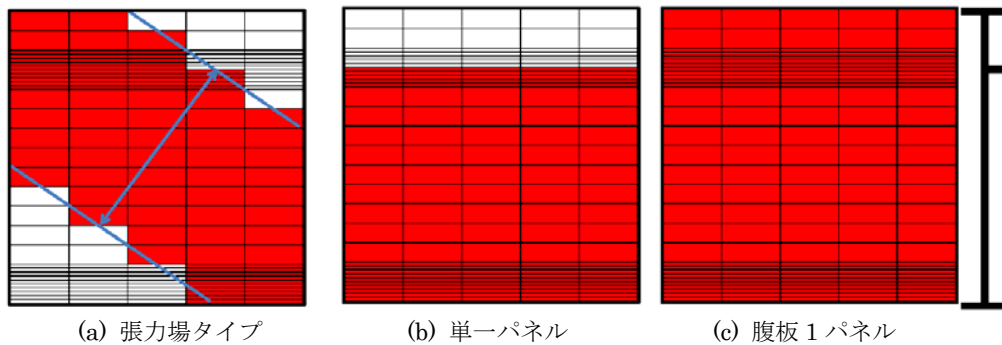


図 3-15 腐食減厚評価範囲

表 3-2 平均板厚と最大せん断力の関係

解析ケース	Qu	Qu/Qdesign	t ave./t design			備考
			張力場	単一パネル	ウェブパネル	
健全	4,851	1.00	1.00	1.00	1.00	Qdesign, t design (=9mm)
Type A	4,787	0.99	0.98	0.99	0.99	
TypeB1	4,124	0.85	0.88	0.84	0.86	
TypeB2	4,124	0.85	0.86	0.81	0.84	
TypeB3	3,981	0.82	0.82	0.80	0.82	
TypeB4	3,683	0.76	0.78	0.72	0.77	
TypeB5	3,316	0.68	0.74	0.68	0.73	
TypeC1	4,484	0.92	0.93	0.93	0.93	
TypeC2	4,229	0.87	0.88	0.88	0.89	
TypeC3	3,947	0.81	0.84	0.84	0.85	
TypeC4	3,686	0.76	0.84	0.83	0.83	水平補剛材近傍の腐食が特に激しいタイプ
TypeC5	3,552	0.73	0.83	0.81	0.82	

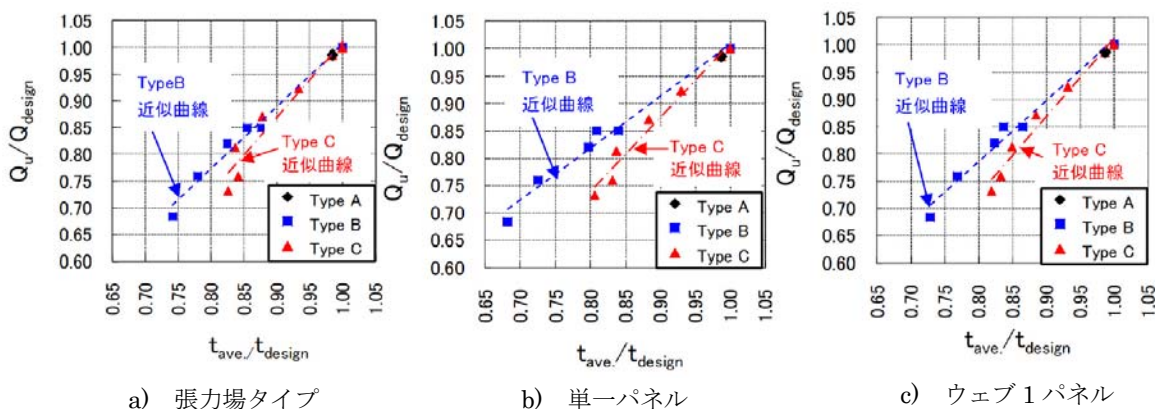


図 3-16 最大せん断力ー平均板厚の関係

相当応力が高くなっている。Type C4 は水平補剛材上部の腹板に降伏応力が発生するとともに、水平補剛材近傍腹板に不連続な相当応力分布が形成されている。このことから、降伏応力に達するような相当応力は、板厚が小さくなる部位に発生しやすい傾向にあるとともに、水平補剛材近傍のように激しい腐食減厚が見られると、高い相当応力が早期に発生しているといえる。

3-6 腐食減厚や腐食形状とせん断力の関係

腐食減厚が最大せん断力に及ぼす影響について、最大せん断力を平均板厚で評価する既往の手法^{1,2,7)}を用いて検討を行った。平均板厚を求める範囲は、図 3-15 に示すように、a) 張力場タイプ⁷⁾、b) 水平補剛材より下の単一パネル⁸⁾、c) 腹板 1 パネルの 3 種類を用いた。ここで、a) 張力場タイプの張力場の幅は、図 3-13 の Type A を参考に、1000mm と仮定した。平均板厚は、図 3-15 の赤色の範囲の板厚から求めた。

最大せん断力の評価にあたっては、11 ケースの実腐食減厚モデルの最大せん断力 Q_u を、設計板厚 t_{design} が 9mm の場合の最大せん断力

Q_{design} で除して無次元化して示した。ここで、最大せん断力 Q_{design} は、腹板が設計板厚 9mm の時の解析結果から算出した値である。

3 種類の腐食減厚評価範囲における無次元化した平均板厚 t_{ave}/t_{design} と最大せん断力 Q_u/Q_{design} との関係を、表 3-2 及び図 3-16 に示す。腹板の実腐食減厚モデル Type A と Type B の場合、腐食減厚の評価範囲の取り方に関わらず、最大せん断力と平均板厚はほぼ比例関係にある。Type C は、特に、Type C4 や Type C5 の腹板パネルにおいて、腐食減厚の評価範囲を 3 種類で評価しても、Type B の最大せん断力と平均板厚との関係と一致しない。これは、Type C4 や Type C5 の実腐食減厚モデルでは水平補剛材近傍の腐食が著しく、その部位で変位、最大主ひずみ、相当応力が増大しせん断力の低下に至ったことが一因と考えられる。

3-7 まとめ

鋼プレートガーダーの腹板に対して実腐食の板厚を用いて解析モデルを作成し、弾塑性有限要素解析を行い、実腐食形状の腹板を有する鋼プレートガーダーのせん断耐荷力について検討を行った。実腐食減厚タイプは、実測結果に基づき、健全相当タイプを Type A、腹板下端部卓越腐食タイプを Type B、水平補剛材上部近傍と腹板中央・下端部卓越腐食タイプを Type C として検討した。以下に、本章で得られた主な結果を示す。

- (1) Type B 及び Type C では、平均板厚の減少に伴い最大せん断力は低下する。また、2 つの実腐食減厚タイプで平均板厚が同じ場合の最大せん断力は、Type C、すなわち水平補剛材上部近傍と腹板中央・下端部卓越腐食タイプが低くなる。
- (2) Type B に比べ Type C は、腐食減厚の激しい水平補剛材近傍の腹板の面外変形、最大主ひずみ及び相当応力が、せん断荷重の初期段階から発生し、せん断荷重の増加とともに増大する傾向を示した。
- (3) 最大せん断力は、Type A 及び Type B においては、腹板の平均板厚の減少に比例して低下する。しかし、Type C では、水平補剛材近傍の腹板の最大主ひずみや相当応力が増大し、最大せん断力が腹板の平均板厚の減少に比例せず極端に低下する場合がある。

本研究では、実橋で腐食した腹板のせん断耐荷力の基本的な特性について解析的に検討を

行った。今後、実腐食した腹板についてせん断耐荷力実験を実施し、腐食減厚や腐食形状がせん断耐荷力、変形モード、ひずみや相当応力の進行にどのような影響を与えるのかを実験的に検討する。また、実橋の腐食形状に基づきパラメトリック解析を行うとともに、初期たわみの影響、腐食した腹板や補剛材がせん断耐荷力に与える影響などを検討する。さらに、適切な維持管理手法の構築に向けて、腐食した鋼プレートガーダー橋への実用的な耐久性診断法を検討する。

参考文献

- 1) ボータンフン, 佐々木栄一, 市川篤司, 三木三壽: 腐食を模擬した模型桁のせん断耐力に関する実験および解析, 構造工学論文集 Vol.48A, pp1099-1105, 2002.3.
- 2) 海田辰将, 藤井堅, 原考志, 中村秀治: 腐食鋼板のせん断耐力とその評価法, 構造工学論文集 Vol.50A, pp.121-130, 2004.3.
- 3) 下里哲弘, 村越潤, 玉城喜章, 高橋実: 腐食により崩落に至った鋼橋の変状モニタリングの概要と崩落過程, 橋梁と基礎, Vol.43, pp.55-60, 2009-11.
- 4) 玉城喜章, 下里哲弘, 有住康則, 矢吹哲哉, 小野秀一, 長嶺由智: 長期自然暴露された鋼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, pp313-314, 2010.9.
- 5) 丸山直人, 下里哲弘, 有住康則, 矢吹哲哉, 玉城喜章, 小野秀一: 長期自然暴露された鋼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-158, pp315-316, 2010.9.
- 6) 葛西昭, 渡辺智彦, 天野麻衣, 宇佐美勉: 繰り返しせん断力を受ける補剛板の強度と変形能評価, 構造工学論文集 Vol.47A, pp761-770, 2001.3.
- 7) 土木学会: 腐食した鋼構造物の耐久性照査マニュアル, pp.1-262-270, 2009.3.
- 8) 土木学会: 座屈設計ガイドライン改訂第2版[2005年版], 丸善, pp.193-198, 2005.10.

第4章 実腐食減厚分布を有する鋼プレートガーダー腹板のせん断耐荷力特性に関する実験的研究

4-1 まえがき

腐食桁の残存耐荷力は、今後老朽化を迎える鋼橋の長寿命化に向けて適切な性能回復手法を検討するために有用である。これまでの研究では、腐食した主桁や鋼材の引張、せん断、曲げ試験や数値解析が行われており、腐食減厚の様々な評価手法と残存耐荷力との関連性が示されている。しかし、残存耐荷力を明らかにするためには、実物大の実橋から切り出した実腐食の構造体から試験体を作成し、載荷実験を行うことが重要である。第3章では、28年間激しい腐食環境にさらされていた鋼プレートガーダー橋の腐食部材について超音波厚さ計により板厚計測を行い、有限要素解析モデルを作成し、弾塑性有限要素法によるせん断耐荷力の解析的検討を行った。その結果、腐食分布形状によってせん断耐荷力が異なる場合があることがわかった。

本章では、実腐食減厚分布が鋼プレートガーダー腹板のせん断耐荷力特性に及ぼす影響を解明することを目的として、その実腐食減厚分布が顕著に発生している実橋腹板を使用して実大供試体を作製し、大型載荷試験機を用いて載荷実験を行った。

4-2 対象橋梁の概要

写真 4-1 及び図 4-1 に対象とした橋梁を示す。図には、垂直補剛材と上下フランジで囲まれる腹板を1パネルとした腹板パネルの割付を示した。本橋は、架設1981年(2009年崩落)、橋長35.0m、単純活荷重合成鈹桁、無塗装仕様の耐候性鋼橋である。使用鋼材は、旧 JIS 表示で、

SMA50A, SMA50B, SMA41A, SS41 である。離岸距離 50m、飛来塩分量が平均 2.6mdd の腐食促進環境下であり、主桁位置、腹板高さ方向及び補剛材周りなどの構造部位別において、異なった腐食特性が顕著に発現していた¹⁾。図 4-2 に一例として G2 桁と G3 桁間の桁端部の腐食状況を示す。G2 桁山側面と G3 桁海側面を比較すると、G3 桁海側面の腹板は全体的に腐食しており、下フランジと腹板境界に破断箇所も見られた。G2 桁山側面は腹板下部に比べて腹板上部が激しく腐食していた。なお、腐食減厚分布の詳細については、後述する試験体製作時に行ったレーザー変位計測結果で述べる。

4-3 実験概要

(1) 試験体の特徴

試験体は、腐食劣化で崩落した実橋の3主桁から特徴的な腐食減厚分布を有する4パネルの腹板を採取し製作した。写真 4-2 に、試験体の一例を示す。試験体の腐食減厚分布の計測には写真 4-3 に示すレーザー変位計測を用いた。計測はレール上を自走するアルミ製の架台にレーザー変位計(標準距離 400mm, 測定誤差 $\pm 0.002\text{mm}$) をセットし、試験体の両面から計測を行った。計測間隔は縦横 10mm の約 23800 点とした。水平補剛材及び垂直補剛材の板厚は、キャリパーゲージ(最小目盛り 0.05mm) で計測した。

図 4-3 に、レーザー変位計測による各試験体の腐食減厚分布を等高線で示し、表 4-1 に腹板の平均板厚を示す。計測結果より得られた試験体の腐食減厚分布の特徴を以下に示す。

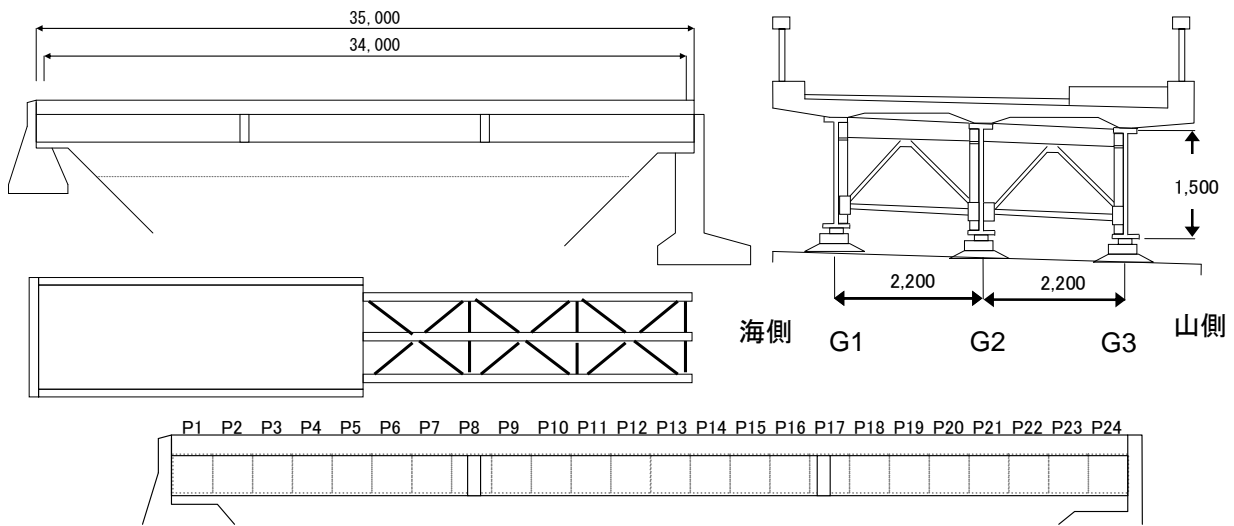


図 4-1 調査対象橋梁一般図及び腹板パネル割付



写真 4-1 対象橋梁全景

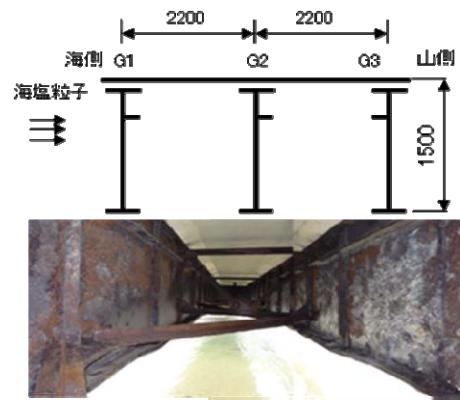


図 4-2 主桁間の腐食状況



写真 4-2 試験体 A



写真 4-3 レーザー計測実施状況

- ①試験体 A:均一に腐食減厚が生じている。最小板厚 4.46mm, 平均板厚 8.13mm である。(均一腐食)
- ②試験体 B:下フランジ近傍の腹板下部の腐食減厚が激しい。最小板厚 0.05mm, 平均板厚 7.47mm である。(腹板下部腐食)
- ③試験体 C1:水平補剛材近傍の腹板と腹板中央に著しい腐食減厚が生じている。最小板厚 0.05 mm, 平均板厚 7.93mm である。(水平補剛材近傍腹

板腐食)

- ④試験体 C2:水平補剛材近傍の腹板, 腹板中央や下フランジ近傍腹板の腐食減厚が試験体 C1 より著しく生じている。最小板厚 0.05mm, 平均板厚 7.50mm である。(水平補剛材近傍腹板腐食)

なお水平補剛材自体の平均板厚は, 試験体 A が 7.12mm, 試験体 B が 4.08mm, 試験体 C1 が 3.34mm, 試験体 C2 が 2.32mm である。

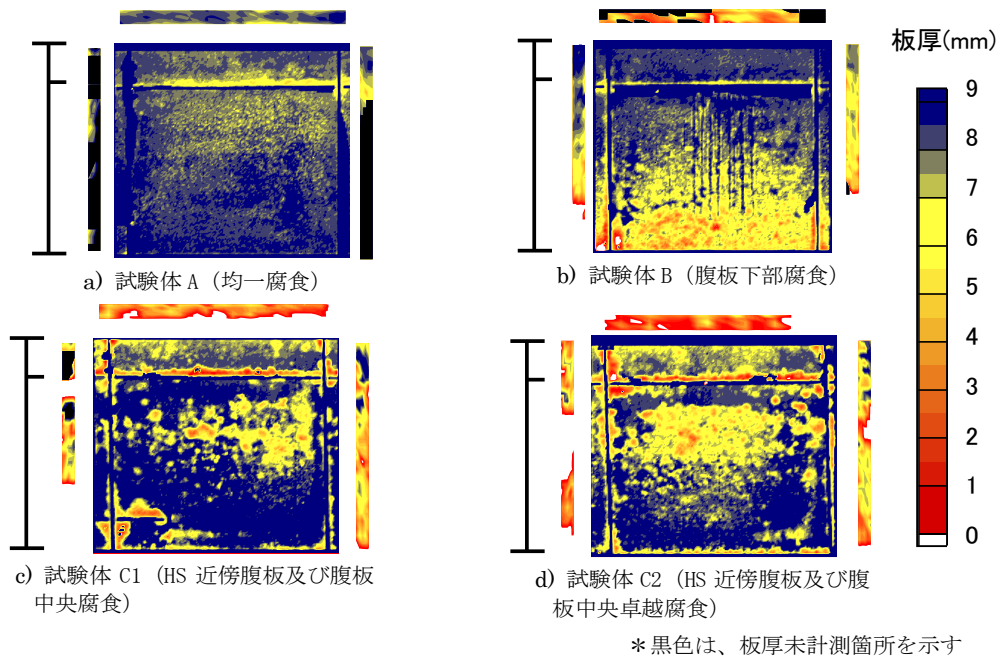


図 4-3 腐食減厚分布

表 4-1 試験体諸元

試験体	平均板厚(mm)										せん断幅厚比パラメータ R_t
	腹板全面		腹板下部パネル		水平補剛材		垂直補剛材(左)		垂直補剛材(右)		
	設計	実測	設計	実測	設計	実測	設計	実測	設計	実測	
試験体A	9	8.13	9	8.21	9	7.12	9	8.53	8	7.33	1.90
試験体B	9	7.47	9	7.27	9	4.08	8	7.06	8	6.21	2.15
試験体C1	9	7.93	9	8.09	9	3.34	9	6.30	8	5.48	1.93
試験体C2	9	7.50	9	7.62	9	2.32	8	4.10	8	5.66	2.05

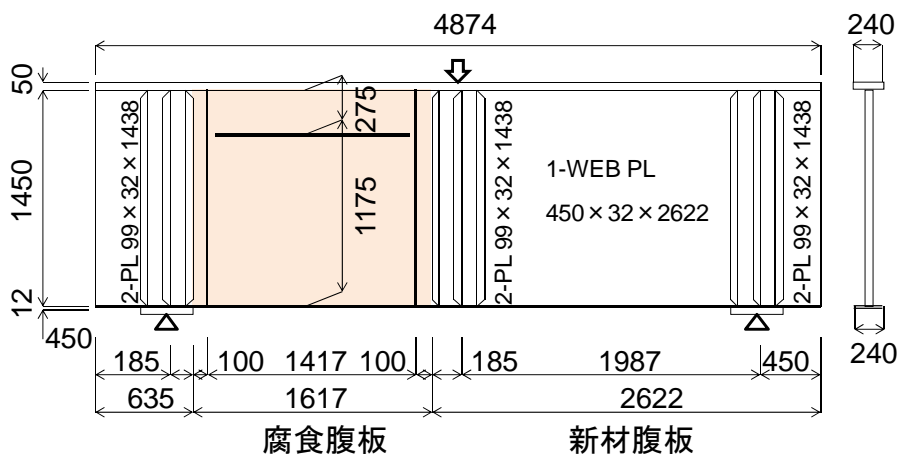


図 4-4 試験桁の寸法

(2) 試験体の製作

図 4-4、写真 4-4 に腐食腹板を用いた鋼プレートガーダー試験体を示す。試験体は、実腐食鋼プレートガーダーから取り出した実腐食腹板 1 パネル及び新材の腹板 1 パネルを新材下フランジと溶接接合し製作した。上フランジ厚さは、RC 床版厚さ相当を考慮して 50mm とし、下フランジは設計板厚 12mm とした。表 4-1 に試験体の着目腐食パネルの諸元を示す。なお、表中のせん断幅厚比パラメータ R_t は、次式で算



写真 4-4 試験桁

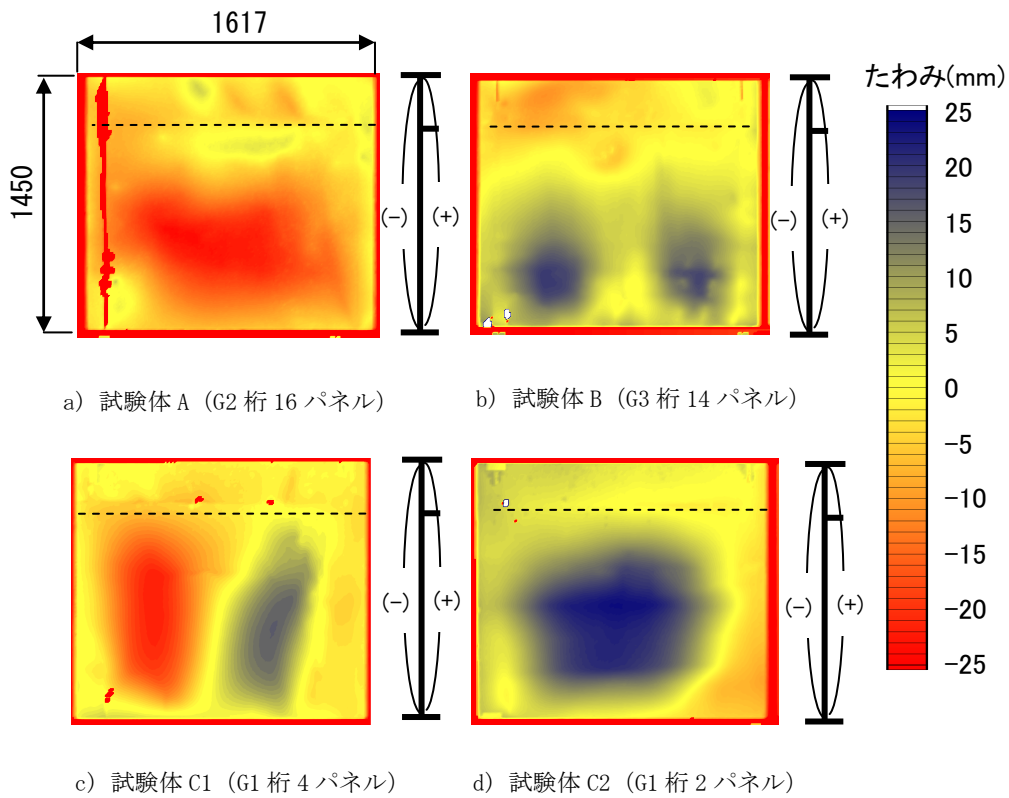


図 4-5 初期たわみ形状

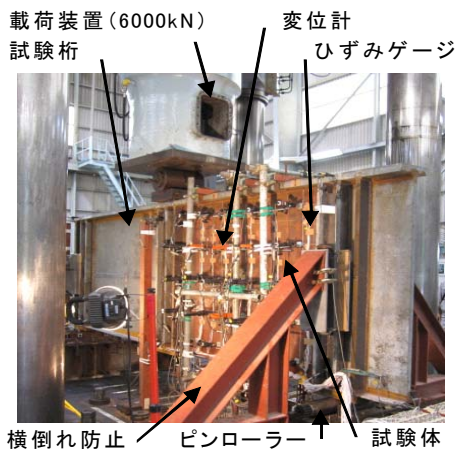


写真 4-5 せん断試験実施状況



写真 4-6 せん断試験セットアップ

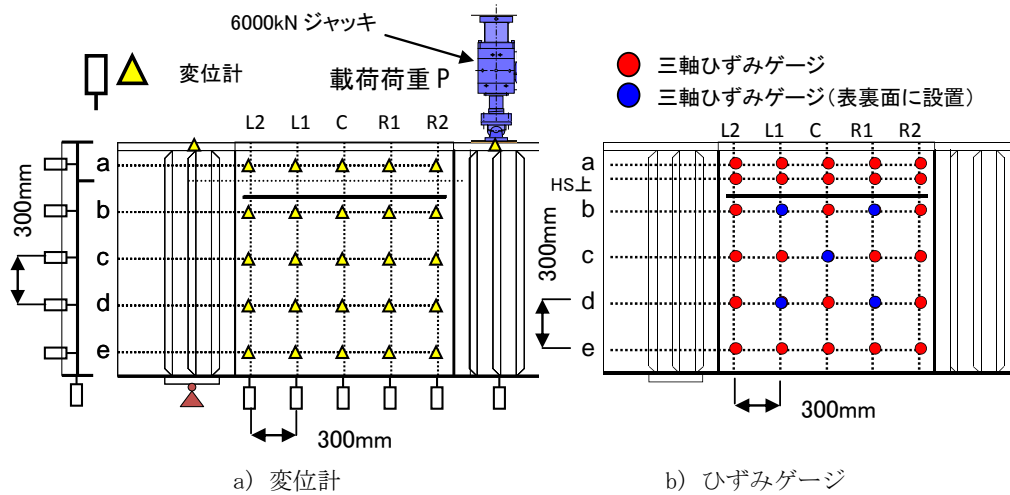


図 4-6 計測機器設置位置

表 4-2 腐食材料試験片 SMA490 の引張試験結果 (平均)

鋼種	平均板厚 (mm)	降伏応力度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	初期弾性係数 (N/mm ²)	破断伸び (%)
腐食材料試験片1	7.57	457	572	2.07 × 10 ⁵	29.4
腐食材料試験片2	6.42	450	577	1.99 × 10 ⁵	30.0
腐食材料試験片3	7.88	454	565	2.00 × 10 ⁵	35.2
腐食材料試験片4	7.30	429	548	1.95 × 10 ⁵	27.2
平均	7.29	447	566	2.00 × 10 ⁵	30.5

定した。

$$R_{\tau} = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\tau_y}{E} \frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 k}} \quad (4-1)$$

$$k = 4.00 + 5.34/\alpha^2 \quad (\alpha \leq 1) \quad (4-2)$$

$$= 5.34 + 4.00/\alpha^2 \quad (\alpha > 1)$$

$$\tau_y = \sigma_y / \sqrt{3} \quad (4-3)$$

ここで、b、t はそれぞれ水平補剛材より下方の腹板の高さと平均板厚、 τ_y は腹板のせん断降伏応力度、 α はアスペクト比 ($\alpha=1.2$)、k は座屈係数 (四辺単純支持条件、 $k=8.1$) である。 σ_y は降伏応力度、E は弾性係数、 ν はポアソン比であり、 σ_y 、E は、後述する材料実験の値を用いた。

初期たわみの計測は、前述のレーザー変位計測装置を用いた。図 4-5 に、各試験体の初期たわみ形状を示す。図中、水平補剛材取り付け面方向のたわみを正、逆方向を負で示した。

4-4 実験方法

写真 4-5、写真 4-6 に試験体のセットアップ状況を示す。試験体は、ピン及びピンローラーの単純支持とし、横倒れ防止を支点部近傍にセットした。载荷は、6000kN サーボ油圧ジャッキを使用して、試験桁の中央点に鉛直载荷した。

変位計の設置位置を図 4-6a) に示す。変位計は腹板の面外変形方向に 25 点、下フランジの鉛直方向について 11 点、実験中の横倒れ変位監視用に 3 点設置した。ひずみの計測位置を図 4-6b) に示す。三軸ひずみゲージは、腹板の変位計設置個所の近傍に 25 点、水平補剛材から 40mm 上方に 5 点、合計 30 点設置した。なお、腹板の分岐座屈挙動を捉える目的で、表裏面の 3 軸ひずみを図中青丸印 5 点の位置で計測した。

表 4-2 に、腐食腹板から切り出して作製した腐食材料試験片 4 本の引張試験結果を示す。腐食材料試験片は、写真 4-7 に示すように板厚が均一になるまで表面を研磨処理した。図 4-7 に

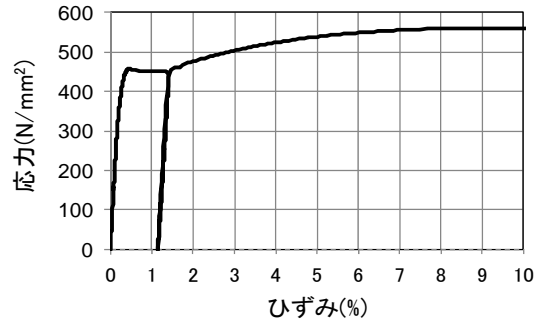


図 4-7 腐食材料の応力-ひずみ曲線 (試験片 1)



写真 4-7 腐食腹板から採取し加工研磨した腐食材料試験片

引張試験結果より得られた応力-ひずみ曲線の一例を示す。引張試験結果から、降伏応力度は $\sigma_y=447\text{kN/mm}^2$ 、弾性係数は $E=2.00 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ であった。

4-5 実験結果及び考察

(1) せん断力-変位特性

図 4-8 に、せん断力 V と鉛直変位 δ_v の関係を示す。ここで、せん断力は、図 4-6 に示す载荷荷重 P を用いて $V=P/2$ で算出した。また、鉛直変位 δ_v は、試験桁スパン中央下フランジの変位である。図より、試験体 B (平均板厚 7.47mm) の最大せん断力 V_{\max} は、試験体 A (平均板厚 8.13mm) より低下したことがわかる。また試験体 C1 (平均板厚 7.93mm) 及び試験体 C2 (平均板厚 7.50mm) の V_{\max} は、試験体 B より更に低下した。

図 4-9 に最大せん断力と平均板厚減少率の関係を示す。なお、図には、腹板を設計板厚 9mm から一様減厚させた場合の FEM 解析²⁾も併記した。図の縦軸は実験で得られた最大せん断力 V_{\max} を設計板厚 9mm として解析で求めた最大せん断力 $V_{(t=9\text{mm})}$ で除して無次元化し、横軸は表 4-1 に示す腐食腹板全面の平均板厚を設計板厚

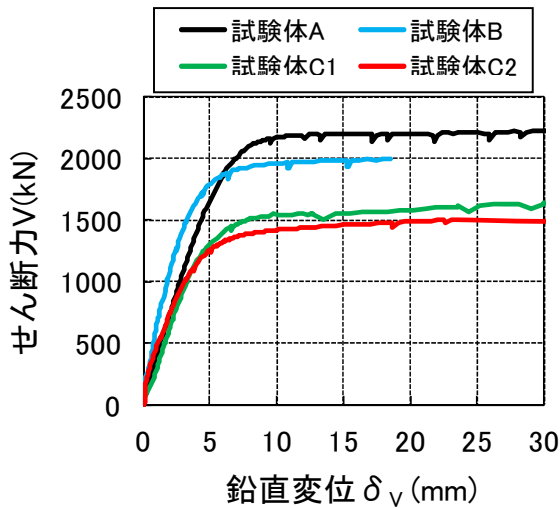


図 4-8 せん断力-鉛直変位の関係

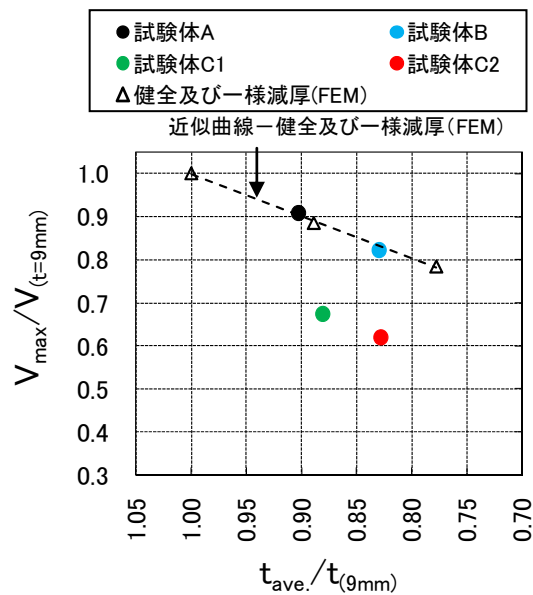


図 4-9 最大せん断力-平均板厚減少率の関係

9mm で除して無次元化した。図より、均一腐食である試験体 A と腹板下部の腐食が激しい試験体 B の場合、最大せん断力は、腹板の板厚減少量に応じて低下する。一方、水平補剛材近傍腹板の腐食が激しい試験体 C1 及び試験体 C2 の場合、最大せん断力は、板厚減少量に応じて減少する最大せん断力よりも大きく低下した。これより、均一腐食や腹板下部に腐食が生じた腹板の最大せん断力は、平均板厚で評価できるが、水平補剛材近傍腹板が腐食した腹板の最大せん断力は、平均板厚で評価できなかった。

図 4-10 に、せん断力 V と腹板の面外変位 δ_H の関係を示す。均一腐食である試験体 A の中央面外変位は他の試験体に比べて小さかった。図 4-10a) から図 4-10d) より、水平補剛材近傍腹板が腐食した試験体 C1 と試験体 C2 の面外変位は、せん断力の低い段階で腐食部位において急激

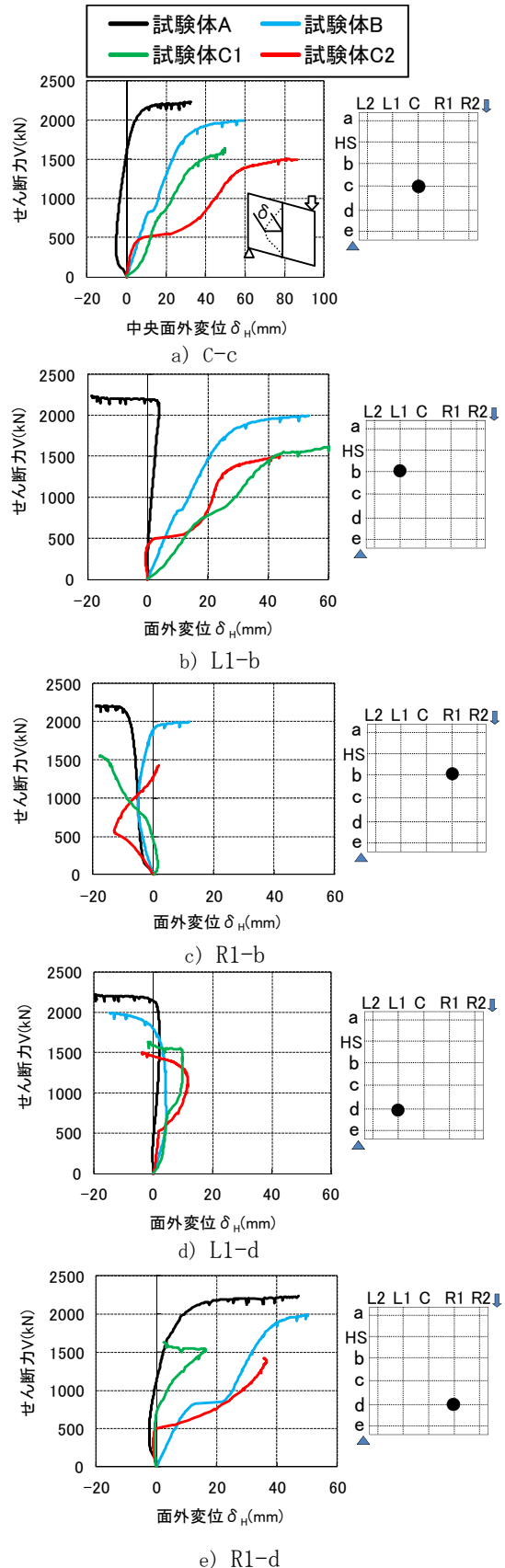


図 4-10 せん断力-面外変位の関係

に大きくなる傾向が見られた。特に、試験体 C2 は、他の 3 体とは異なる変位挙動を示した。図

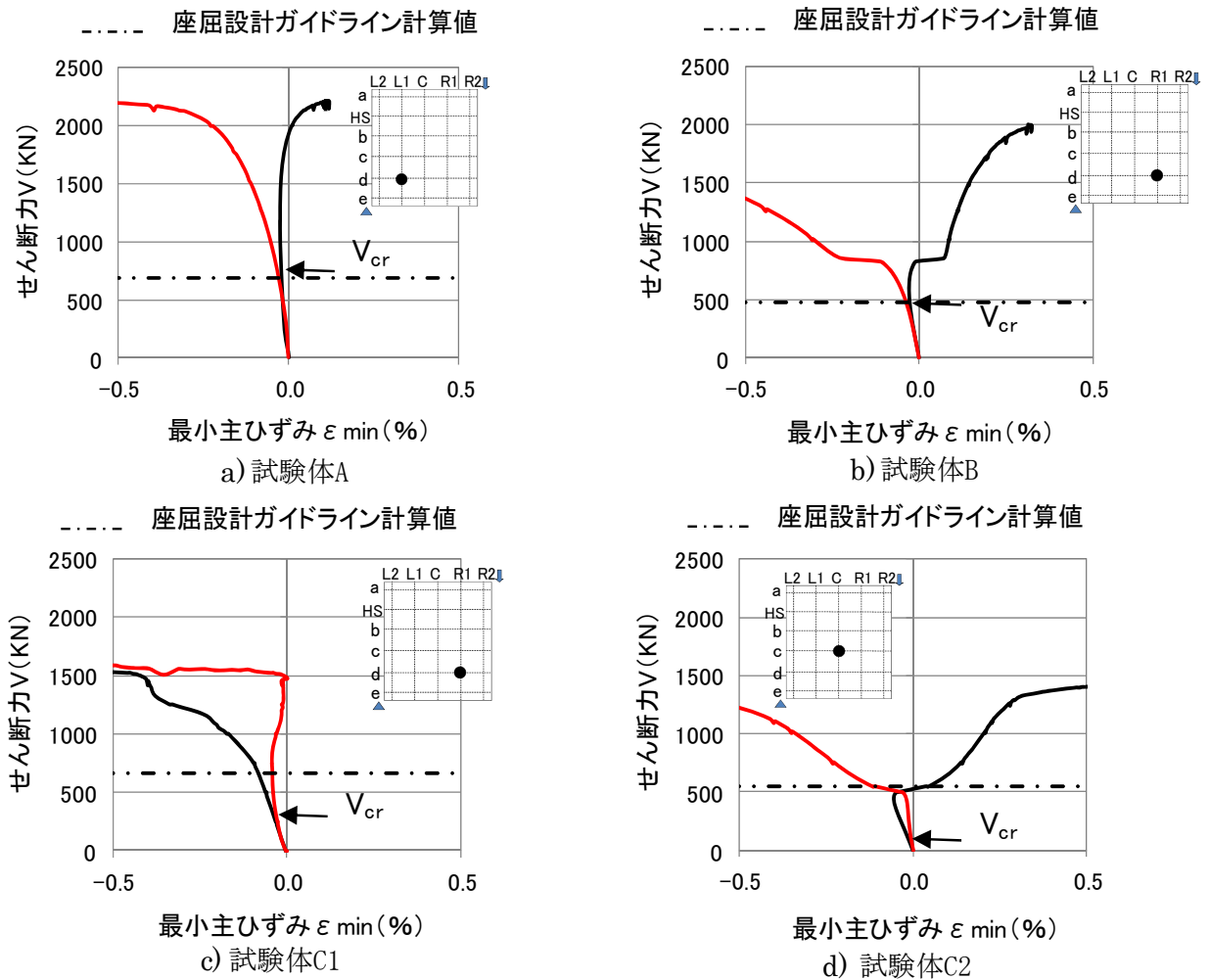


図 4-11 せん断力—腹板表裏の最小主ひずみ関係

4-10e)から、腹板下部が激しく腐食した試験体 B の面外変位は、せん断力の低い段階で腐食部位において急増した。これより、面外変形は、腐食減厚分布の影響を受け、激しく腐食減厚した部位で大きくなる傾向が見られた。

(2) せん断座屈特性

図 4-11 に、せん断力 V と表裏面の 2 つの最小主ひずみ ε_{\min} の関係を示す。本研究では、腹板の表裏面のひずみが分岐する時のせん断力をせん断座屈強度 V_{cr} とした³⁾。同図に、実験値と座屈設計ガイドライン⁴⁾を用いて算出したせん断座屈強度 $V_{cr,guide}$ を併記した。また、 $V_{cr,guide}$ は、次式で算定した。

$$V_{cr,guide} = \tau_{cr} bt \quad (4-4)$$

$$\tau_{cr} = \frac{k\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (4-5)$$

ここで、 τ_{cr} はせん断座屈応力度、 b 、 t はそれ

ぞれ水平補剛材より下方の腹板の高さと平均板厚、 k は座屈係数 (式 (4-2))、 E は弾性係数、 ν はポアソン比、 α はアスペクト比を示す。 E 及び ν は、それぞれ $2 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 、 0.3 を用いた。座屈係数 k は、四辺単純支持条件と仮定した。

実験で得られた V_{cr} と設計座屈ガイドライン算定値を比較すると、試験体 A と試験体 B はほぼ同程度であった。一方、試験体 C1 と試験体 C2 は、座屈設計ガイドライン算定値に比べて大きく低下した。

図 4-12 にせん断座屈強度と平均板厚減少率の関係を示す。縦軸は、実験値のせん断力を板厚が 9mm の座屈設計ガイドライン算定値 $V_{cr(t=9\text{mm})}$ で除して無次元化し、横軸は、腹板全体の平均板厚を設計板厚 9mm で無次元化した板厚減少率である。図には、4 辺単純支持によるせん断座屈強度算定式⁴⁾を併記した。試験体 A と試験体 B の V_{cr} は、腹板の板厚減少量に応じて低下した。一方、試験体 C1 と試験体 C2 の V_{cr} は、座屈設計ガイドライン算定式と比較して

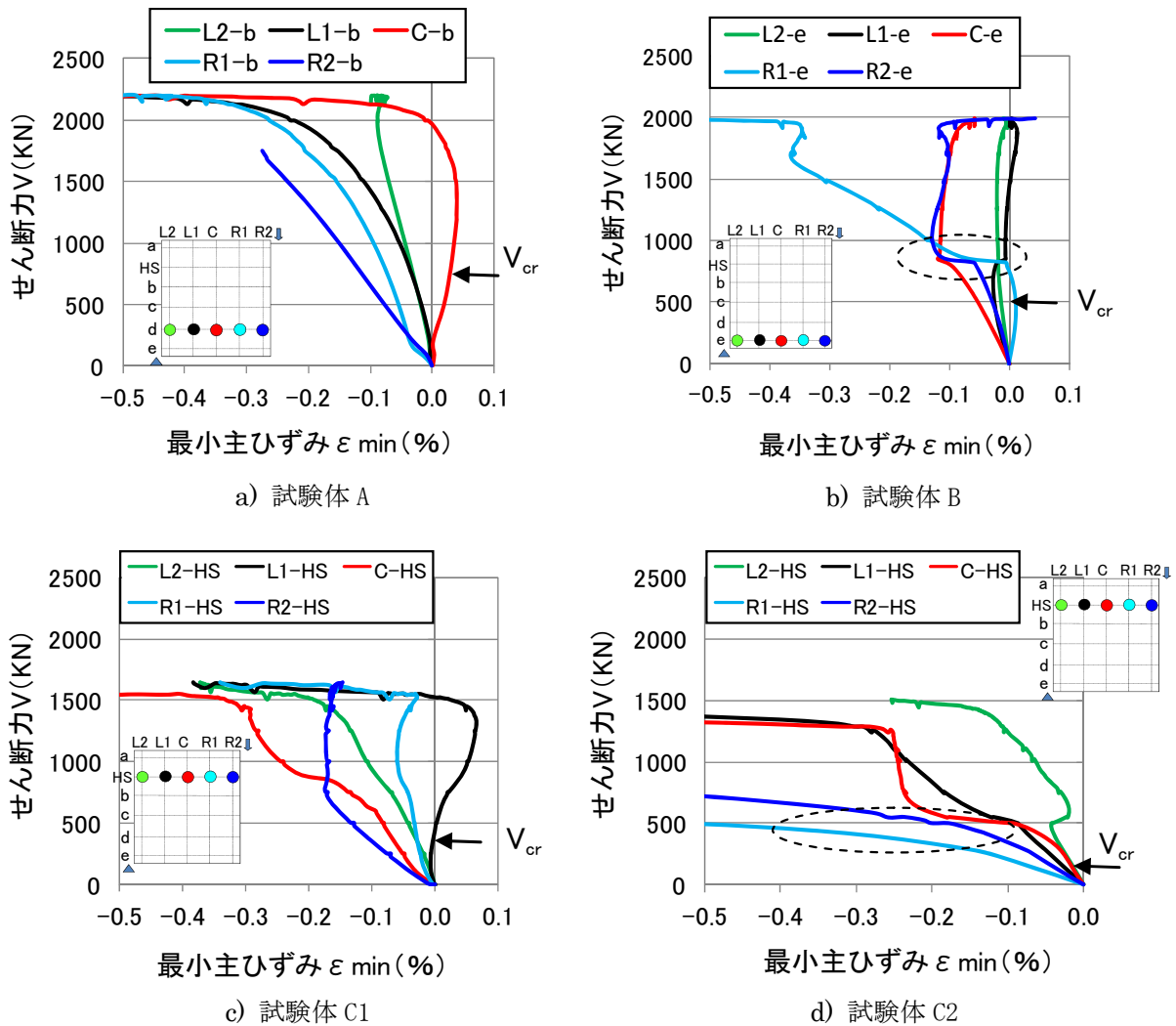


図 4-13 腐食減厚部位と最小主ひずみの関係

大きく低下した。これより、均一腐食や腹板下部に腐食が生じた腹板のせん断座屈強度は、最大せん断力と同様に平均板厚で評価できる。しかし、水平補剛材近傍腹板が腐食した腹板は、板厚減少量よりせん断座屈強度が大きく低下し、平均板厚で評価できない場合があることがわかった。

(3) 最大最小主ひずみ特性

図 4-13 にせん断力 V と最小主ひずみ ε_{\min} の関係を示す。試験体 A の最小主ひずみの表示位置は d ライン上、試験体 B、試験体 C1、試験体 C2 は腐食減厚の激しい部位近傍とした。図から、試験体 B、試験体 C1、試験体 C2 の最小主ひずみが、せん断座屈後に急増しているのが伺える。これより、最小主ひずみは、腐食減厚分布の影響を受け、せん断座屈後に腐食減厚の激しい腹板下部や水平補剛材近傍腹板で急増する傾向にある。

図 4-14 に、せん断座屈強度 (V_{cr})、鉛直変位の剛性が弾性範囲から非弾性に変化するせん

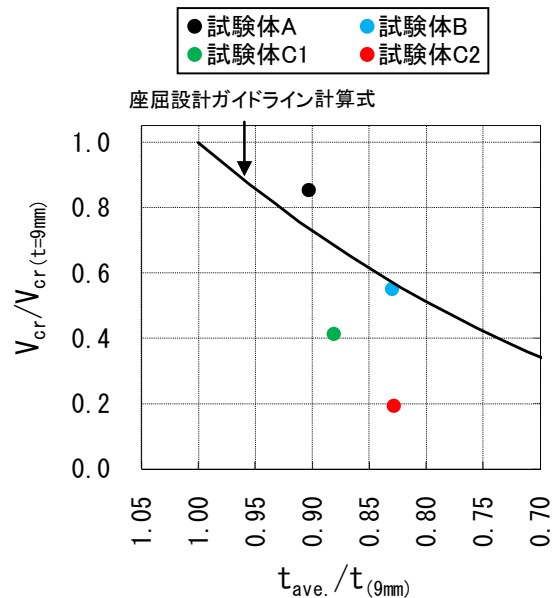


図 4-12 せん断座屈-平均板厚減少率の関係

断力 (V_e)、鉛直変位の剛性が低下し極小となるせん断力 ($V_{cr}+V_l$) の各载荷ステップにおける最大最小主ひずみ分布を示す。ここで、スケ

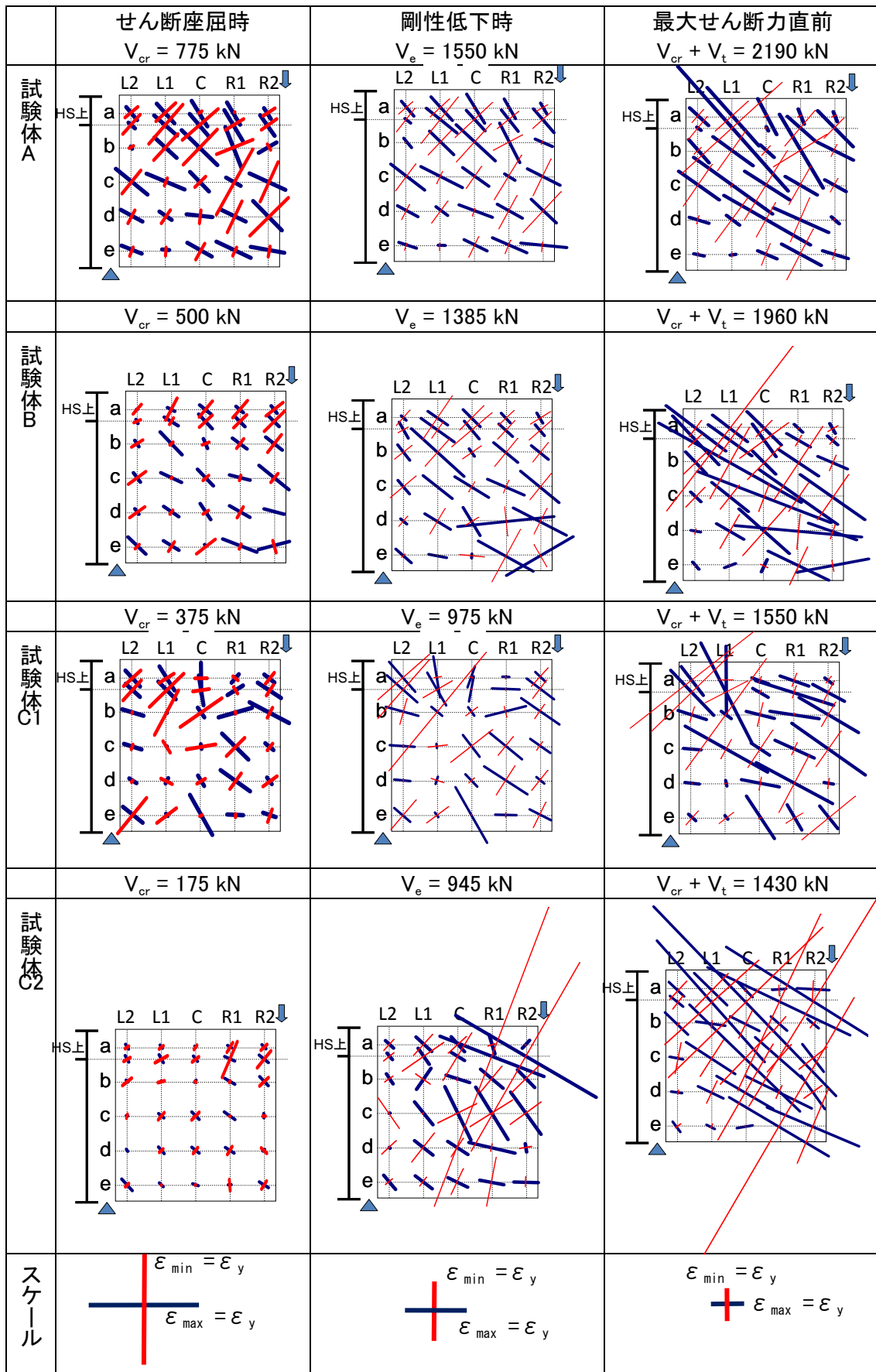


図 4-14 主ひずみ分布特性
(V_{cr} は倍率 4 倍, V_e は倍率 2 倍, $V_{cr} + V_t$ は倍率 1 倍)

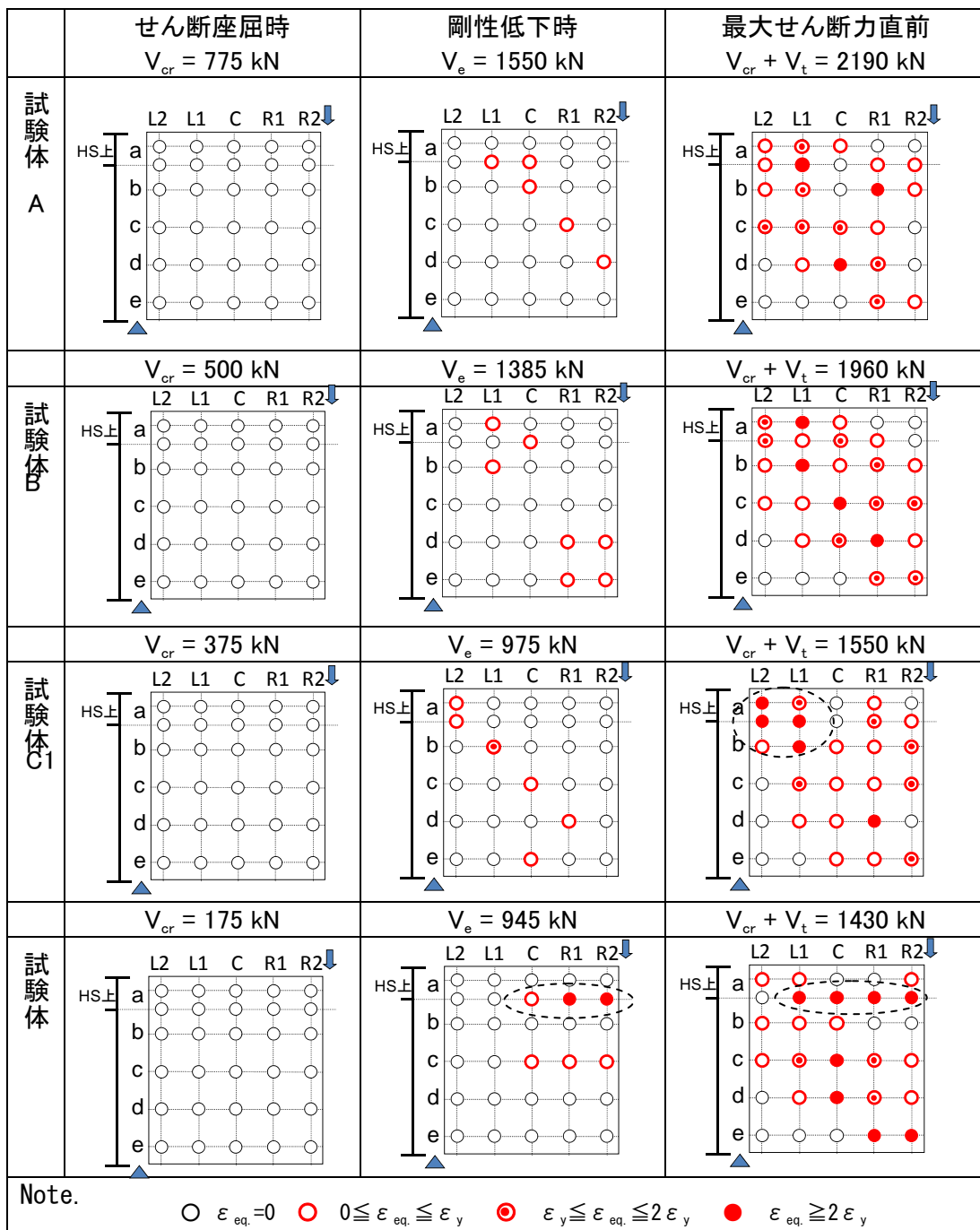


図 4-15 塑性域の分布

ールは各載荷ステップの主ひずみ特性が見られるように 4 倍, 2 倍, 1 倍に変化させて表記し, 引張試験で得られた降伏ひずみ $\varepsilon_y (=0.223\%)$ を大きさの基準として示した. せん断座屈時の載荷ステップにおいて, 試験体 A と試験体 B の圧縮と引張の主ひずみは, ほぼ対角方向に発生していた. また, 試験体 C1 と試験体 C2 の圧縮と引張の主ひずみはほぼ対角方向にあるが, 腐食の激しい水平補剛材近傍で対角方向と異なる向きと大きさを示す箇所も見られた. 次に V_e 時以降の載荷ステップにおいて最大主ひずみ

に着目すると, 試験体 A に一般的な斜め張力場の形成が確認できた. 試験体 B には, 試験体 A と同様に斜め張力場が確認できるが, 腐食減厚の激しい腹板下部には斜め張力場の向きと異なる主ひずみも見られた. 試験体 C1, 試験体 C2 には, 斜め張力場の形成は確認できるが, 対角方向とは異なる向きも混在していた. $V_{cr} + V_t$ 時の載荷ステップにおいて, 試験体 A と試験体 B に斜め張力場の形成が確認できた. 試験体 C1 と試験体 C2 には, 試験体 A に比べ斜め張力場の幅が広がる傾向が見られた. これより, 平均

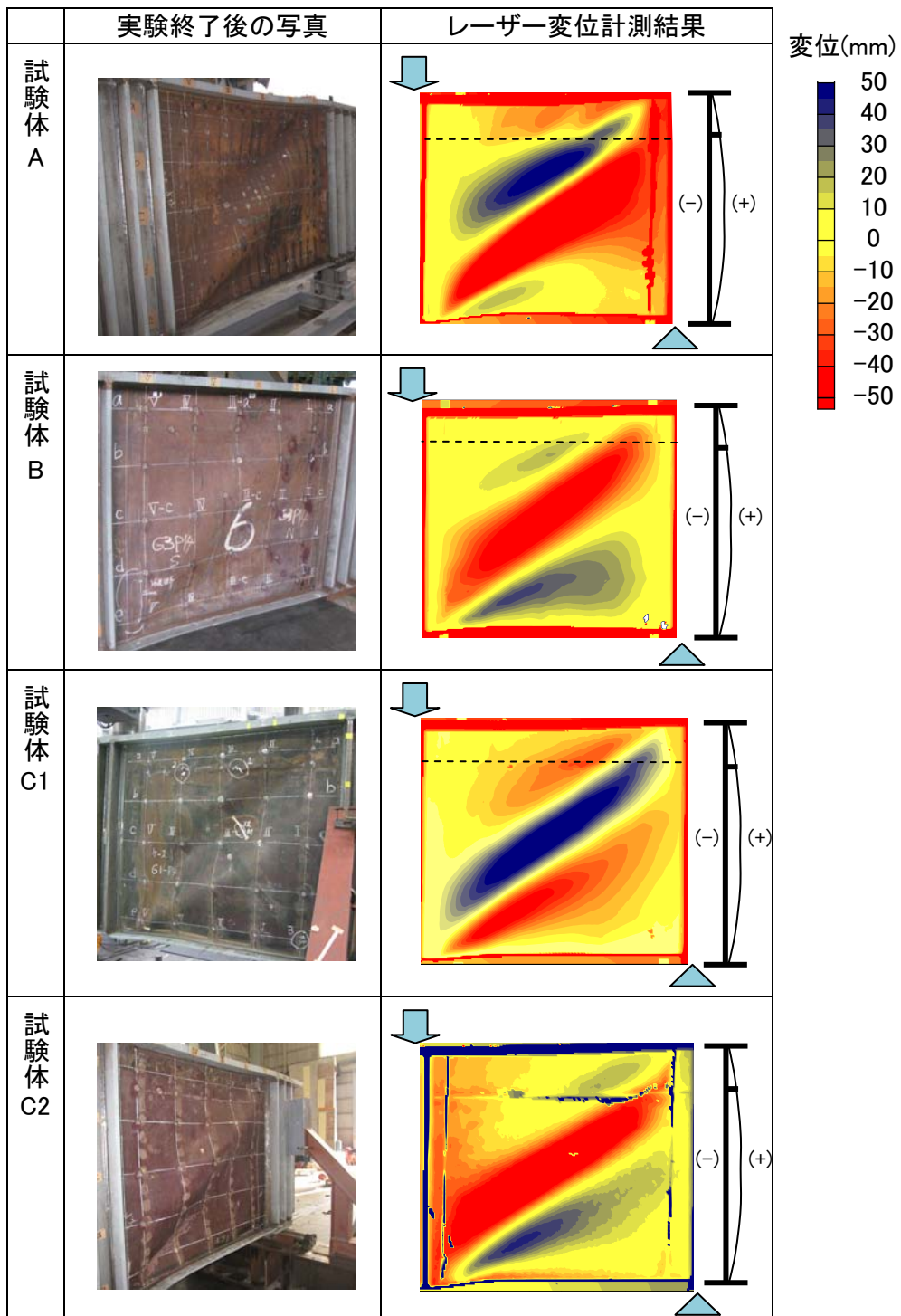


図 4-16 終局時の腐食腹板の面外変形モード

板厚でせん断座屈強度が評価できる均一腐食や腹板下部が腐食した腹板は、一般的な対角方向の主ひずみが確認できた。しかし、平均板厚でせん断座屈強度を評価できない水平補剛材近傍腹板に腐食が生じた腹板は、腐食部位の主ひずみ方向が対角方向と異なり、大きさも大きくなる箇所が見られ、早期にせん断座屈を生じた。

また、全ての試験体において斜め張力場の形成が確認でき、均一腐食の腹板に比べて水平補剛材近傍腐食腹板の斜め張力場の幅は大きくなる傾向を示した。

表 4-3 セン断耐荷力の比較

試験体種類	平均板厚		V_{cr}	V_t	$V_{cr}+V_t$	V_f	$V_{max}=V_{cr}+V_t+V_f$
	設計	実測					
試験体A	9	8.13 (1.00)	775 (1.00)	1415 (1.00)	2190 (1.00)	15	2205 (1.00)
試験体B	9	7.47 (0.92)	500 (0.65)	1460 (1.03)	1960 (0.89)	36	1996 (0.91)
試験体C1	9	7.93 (0.98)	375 (0.48)	1175 (0.83)	1550 (0.71)	86	1636 (0.74)
試験体C2	9	7.50 (0.92)	175 (0.23)	1255 (0.89)	1430 (0.65)	74	1504 (0.68)

() は板厚または各成分の試験体 A に対する割合

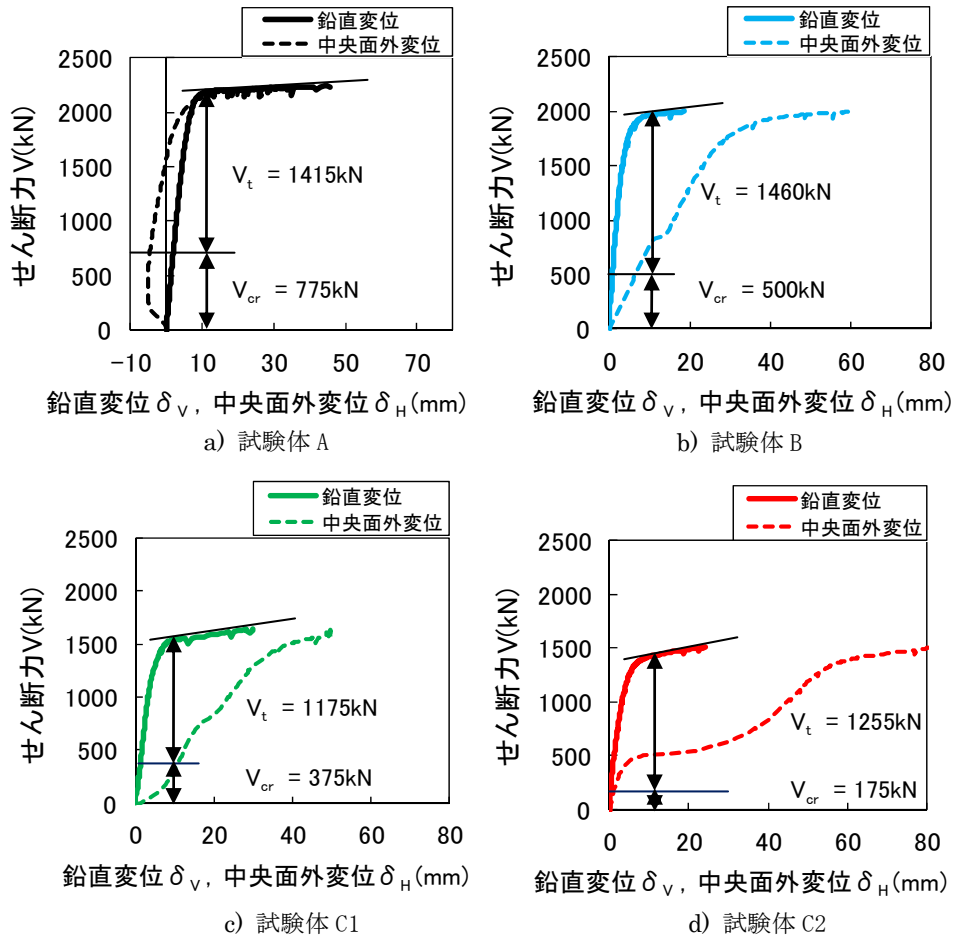


図 4-18 セン断力-鉛直変位, 中央面外変位の関係

(4) 塑性域の広がり

図 4-15 に, セン断座屈強度 (V_{cr}), 鉛直変位の剛性が弾性範囲から非弾性に変化するせん断力 (V_e), 鉛直変位の剛性が低下し極小となるせん断力 ($V_{cr}+V_t$) の各載荷ステップにおける塑性域の広がりを示す. 塑性域の範囲は, 実験より得られたひずみデータより算出した相当塑性ひずみ ϵ_{eq} から判定した. なお, 塑性域の大きさを示すために, 相当塑性ひずみが降伏ひずみ ϵ_y 未満, ϵ_y 以上 $2\epsilon_y$ 未満, $2\epsilon_y$ 以上の 3 段階に分けて標記した. 全ての試験体は弾性範囲でせん断座屈が生じた. V_e 時において, 試験体 A

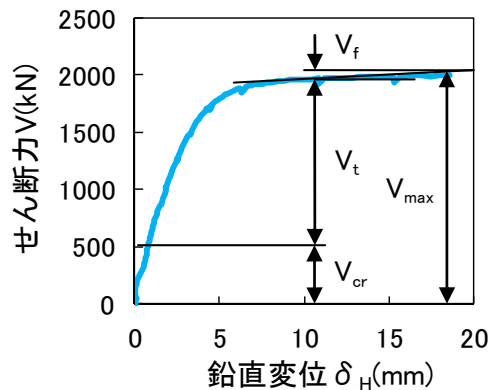


図 4-17 セン断耐荷力の成分

の塑性域は、着目腐食パネルの左上から右下方向の斜め張力場付近に発生した。試験体 B、試験体 C1 の塑性域も概ね斜め張力場付近に発生したが、試験体 C2 は、腐食減厚の激しい水平補剛材近傍腹板に塑性域の発生が見られた。 $V_{cr}+V_t$ 時において、試験体 A や試験体 B の相当塑性ひずみは斜め張力場付近が大きくなり、試験体 C1 と試験体 C2 の相当塑性ひずみは水平補剛材近傍腹板で大きくなった。また、全ての試験体の塑性域は、斜め張力場と想定される領域に広がっていた。これより、全ての試験体は弾性範囲でせん断座屈が生じた。また、均一腐食や腹板下部の腐食が激しい腹板は、斜め張力場付近の塑性域が大きくなったが、水平補剛材近傍腹板に腐食が生じた腹板は、腐食の激しい水平補剛材近傍腹板の塑性域が大きくなっており、斜め張力場の幅が広がる傾向を示した。

図 4-16 に、実験終了時の腐食腹板の面外変形モードを示す。同図には、レーザー変位計による面外変形計測結果を併記した。図より全ての試験体はせん断座屈が生じ、斜め張力場が腹板に形成されている性状が伺える。

(5) せん断耐荷力特性

せん断耐荷力は、一般的にせん断座屈強度 V_{cr} 、斜め張力場によって負担されるせん断力 V_t 、フランジと垂直補剛材で囲まれたフレームが負担するせん断力 V_f の和で表わされる⁴⁾。本章では、上記を踏まえて実験で得られた最大せん断力 V_{max} を、次式で示すように各せん断力の和で整理した。

$$V_{max} = V_{cr} + V_t + V_f \quad (4-6)$$

ここで、せん断座屈強度 V_{cr} は、前節に示した腹板の表裏面のひずみが分岐する時のせん断力とした。斜め張力場によって負担されるせん断力 V_t は、図 4-17 に示すせん断耐荷力の成分を表示したせん断力と鉛直変位の関係より鉛直変位の剛性が低下し極小となるせん断力から V_{cr} を除いたせん断力とした。なお、 $V_{cr}+V_t$ 時の腹板は斜め張力場の範囲全体が降伏している状態である。フレームが負担するせん断力 V_f は、 V_{max} と $V_{cr} + V_t$ の差とした。

図 4-18 に、 V_{cr} と V_t を併記したせん断力と鉛直変位及び中央面外変位の関係を示した。表 4-3 に、各試験体の各せん断耐荷力の成分を示す。本研究では、腐食した腹板のせん断耐荷力は、最大せん断力 V_{max} でなく、 V_{max} からフラン

ジと垂直補剛材で囲まれたフレームが負担するせん断力 V_f を除いた $V_{cr} + V_t$ で検討することが適切と考えられる。なお、 V_f は V_{max} に比べて非常に小さい値となった。 $V_{cr} + V_t$ において、後座屈強度特性を示す V_t は、板厚減少率に対して影響を受けず、各試験体とも同程度であった。これは、全ての試験体で斜め張力場が形成されたため、後座屈強度が変化しなかったものと思われる。よって、 $V_{cr} + V_t$ は、 V_{cr} の影響を受けるとともに腐食減厚分布によってせん断座屈特性が異なるため、均一腐食である試験体 A と腹板下部が腐食した試験体 B の場合、板厚減少率と同程度であり平均板厚によって評価できる。しかし、水平補剛材近傍腹板が腐食した試験体 C1 と試験体 C2 の場合、板厚減少率に比べて大きく低下しており、平均板厚によって評価できない。

4-6 結論

実腐食減厚分布が鋼プレートガーダー腹板のせん断耐荷力特性に及ぼす影響について解明するために、実腐食減厚分布が顕著に発生している実橋腹板を使用して実大供試体を作製し、大型載荷試験機を用いて載荷実験を行った。以下に、本章で得られた結果をまとめる。

- (1) 均一腐食や下部腹板が腐食した腹板は、平均板厚で最大せん断力を評価でき、せん断座屈強度も平均板厚で評価できる。しかし、水平補剛材近傍腹板が腐食した腹板は、腐食減厚分布の影響を受け、最大せん断力及びせん断座屈強度が平均板厚減少率より大きく低下し、平均板厚で評価できない場合があることを示した。
- (2) 最大せん断力は、せん断座屈強度、斜め張力場が負担するせん断力、フランジと垂直補剛材で囲まれたフレームが負担するせん断力の和として整理した。このとき、腐食腹板のせん断耐荷力は、フレームが負担するせん断力を除いてせん断座屈強度と斜め張力場が負担するせん断力の和で評価した。
- (3) 斜め張力場が負担するせん断力は、板厚減少率に対して影響を受けず、各試験体とも同程度であった。このため、せん断耐荷力は、せん断座屈強度の影響を受け、均一腐食や下部腹板が腐食した腹板のせん断耐荷力は、平均板厚で評価できるが、水平補剛材近傍腹板が腐食した腹板は、腐食減厚分布の影響を受け、平均板厚で評価できない

場合があることを示した。

- (4) 面外変位は、腐食減厚分布の影響を受け、腹板下部や水平補剛材近傍腹板が激しく腐食減厚した場合には腐食部位近傍で大きくなり、面外変位の急増したせん断力と腐食減厚部位の最小主ひずみの急増したせん断力が同程度であることから、腐食減厚分布と面外変形特性とは相関が見られた。
- (5) 平均板厚でせん断座屈強度が評価できる均一腐食や腹板下部が腐食した腹板は、一般的な対角方向の主ひずみが確認できたが、平均板厚でせん断座屈強度を評価できない水平補剛材近傍腹板に腐食が生じた腹板は、腐食部位の主ひずみ方向が対角方向と異なり、大きさも大きくなる箇所が見られ、早期にせん断座屈を生じた。また、全て弾性範囲内でせん断座屈を生じた。
- (6) 平均板厚でせん断耐荷力が評価できる均一腐食や腹板下部が腐食した腹板は、一般的な対角方向の主ひずみが発生し斜め張力場領域の降伏が確認できたが、平均板厚でせん断耐荷力が評価できない水平補剛材近傍腹板に腐食が生じた腹板は、腐食部位の主ひずみ方向が対角方向と異なり、大きさも大きく、均一腐食に比べ斜め張力場領域の降伏幅も大きくなった。しかし、全ての試験体で斜め張力場が形成されたため、斜め張力場が負担するせん断力は同程度の大きさとなったと思われる。

本章では、実腐食した腹板についてせん断耐荷力実験を実施し、腐食減厚や腐食分布形状がせん断耐荷力に与える影響を実験的に検討した。今後は、実腐食分布形状、初期たわみの影響、腐食量の偏心、補剛材の腐食減厚がせん断耐荷力に与える影響について解析的検討を行う必要がある。

参考文献

- 1) 丸山直人, 下里哲弘, 有住康則, 矢吹哲哉, 玉城喜章, 小野秀一: 長期自然暴露された鋼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 -158, pp315-316, 2010.9.
- 2) 玉城喜章, 下里哲弘, 有住康則, 矢吹哲哉: 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.
- 3) 松下裕明, 矢吹哲哉, 有住康則, 岩田節雄: ステンレス鋼を用いた I 形断面桁腹板のせん断

耐荷力に関する実験的研究, 鋼構造論文集, Vol.50A, pp799-808, 2004.3

- 4) 土木学会: 座屈設計ガイドライン(2005年度版), pp.193-198, 2005.10.

第5章 弾塑性 FEM 解析を用いた腐食鋼プレートガーダーの耐荷力評価

5-1 まえがき

実腐食した腹板についてせん断耐荷力実験を実施し、腐食減厚や腐食分布形状がせん断耐荷力に与える影響を実験的に検討した。その結果、腐食分布形状によってせん断耐荷力が平均板厚減少率によって評価できる場合と評価できない場合があることが明らかになった。

本章では、鋼プレートガーダー橋の実腐食分布がせん断耐荷力評価を検討することを目的とし、レーザー変位計を用いて実腐食分布形状の計測結果を用いて、有限要素解析モデルを作成し、弾塑性有限変位理論に基づく耐荷力解析を行った。

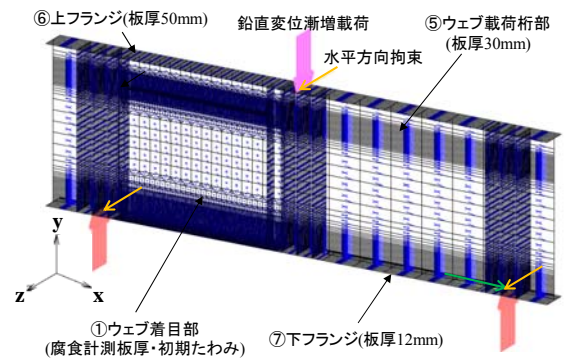


図 5-1 解析モデル全体図および境界条件

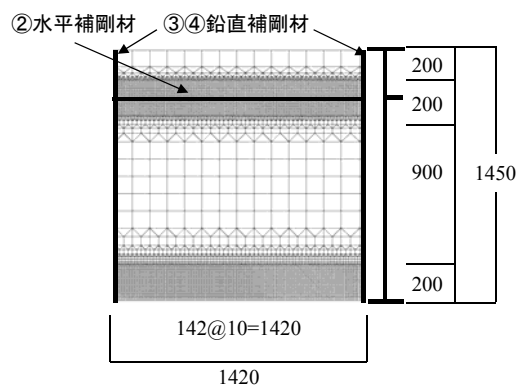


図 5-2 着目腹板

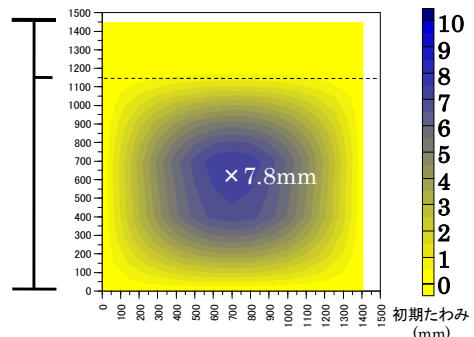


図 5-3 初期たわみ分布

5-2 実験供試体モデルによる解析

(1) 解析手法

a) 解析モデル

実腐食した腐食腹板、水平補剛材および鉛直補剛材の板厚計測結果を用いて、せん断耐荷力実験を行った 5 体の解析モデルを作成した。図 5-1 に解析モデル全体図および境界条件、図 5-2 に着目腹板を示す。解析モデルは、8 節点薄肉シェル要素を用いて作成した。腐食腹板部の寸法は、幅 1420mm、高さ 1450mm とし、腐食腹板部の要素分割は鉛直方向 100mm、水平方向 100mm 間隔を基準に、水平補剛材の上下 200mm と下フランジから上方 200mm の範囲は、鉛直方向 10mm、水平方向 10mm とした。

境界条件は、4 章の実験と同様に両端部はピン及びローラーの単純支持とし、中央部に鉛直方向の強制変位を漸増载荷とした。

腐食腹板の各要素に入力する腐食減少板厚は、レーザー変位計の計測結果を用いた。水平補剛材および鉛直補剛材に入力する腐食減少

板厚は、キャリパーゲージの計測値を用いた。また、上フランジ厚さは 50mm、下フランジ厚さは 12mm とした。また、腹板の初期たわみは

実験供試体の初期たわみではなく、道路橋示方書等に示されている理想形の正弦波の半波形を水平補剛材以下の単一パネルに入力した。最大たわみ量 W_0 は道路橋示方書の製作精度許容値 $b/150=7.8\text{mm}$ を用いた。図 5-3 に腹板の初期たわみの分布を示し、初期たわみの波形 W の算定式を以下に示す。

$$W = W_0 \sin(\pi x/a) \cdot \sin(\pi y/b) \quad (5-1)$$

b) 鋼材の材料特性

回収した腐食桁部材(SMA50A)より、引張試験片(5号: JIS Z 2201)を3体製作し、引張試験を行った。図 5-4 および表 5-1 に引張試験結果を示す。引張試験の結果、降伏応力度の平均は、 $\sigma_y=453.6\text{N/mm}^2$ であった。図 5-5 に解析モデルに入力した完全弾塑性体の応力-ひずみ関係を示す。降伏条件は von-Mises の降伏条件式に従うものとした。降伏応力度と降伏ひずみは、試験結果よりそれぞれ $\sigma_y=454\text{N/mm}^2$, $\epsilon_y=0.227\%$ を用いた。また、弾性係数、ポアソン比は、それぞれ $E=2.0 \times 10^5\text{N/mm}^2$, $\nu=0.3$ とした。

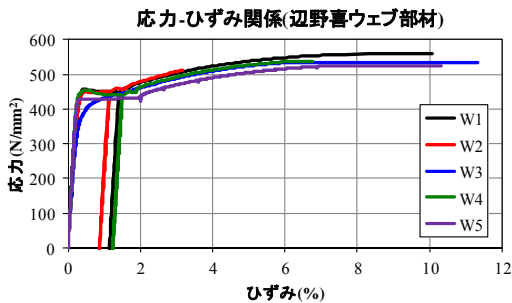


図 5-4 引張試験結果(応力-ひずみ関係)

表 5-1 引張試験結果

部材	No.	ヤング係数× 10 ⁵ (N/mm ²)	降伏応力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)
ウェブ	W1	2.1	457.4	569.4
	W2	2.0	449.8	577.9
	W4	2.0	453.7	563.3
	平均	2.0	453.6	570.2

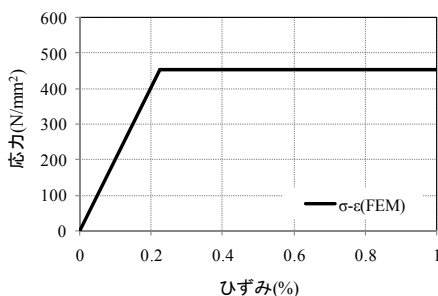


図 5-5 応力-ひずみ関係(完全弾塑性体モデル)

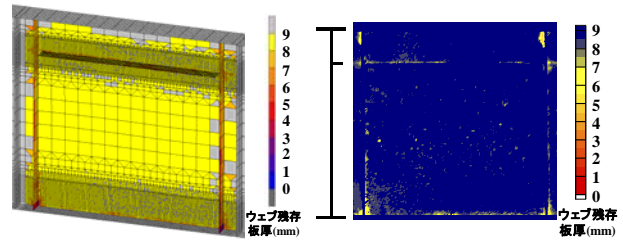
(2) 解析パラメータ

解析は、レーザー変位計およびキャリパーゲージの計測結果を基に各要素について腹板、鉛直補剛材、水平補剛材の板厚を用いてせん断耐力試験体 5 体の実腐食モデルをシェル要素を用いて作成した。なお、要素数は 21834、節点数は 63817 である。各解析モデルの腹板、鉛直補剛材、水平補剛材の腐食減厚分布を図 5-6、また解析モデル入力した板厚の平均値および、最小値を表 5-2 に示す。以下に解析 6 ケースを示す。

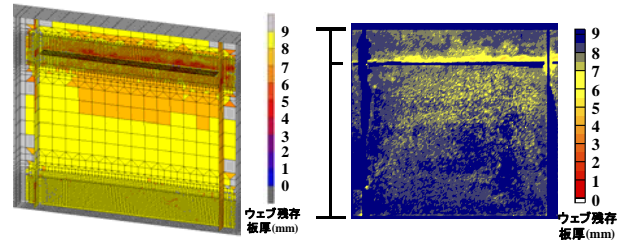
ケース a) 腹板 9mm モデル(基本モデル)

: 腹板は設計板厚 9mm の解析モデル。

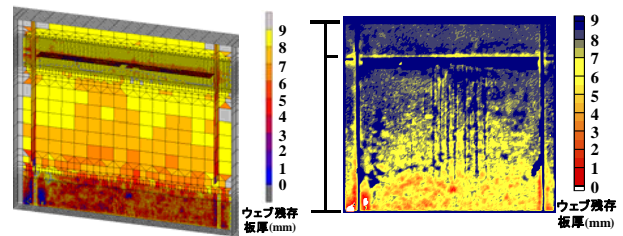
ケース b) 健全相当 Type



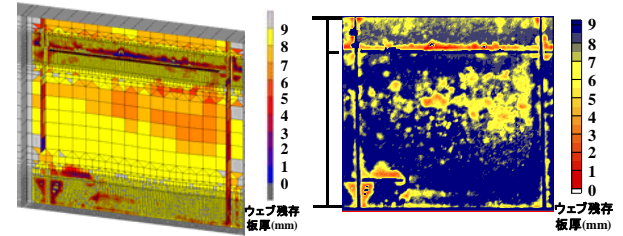
a) 健全相当 Type



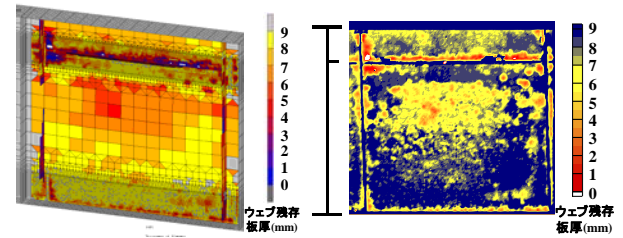
b) 両面腐食 Type



c) 腹板下部腐食 Type



d) HS 及び腹板中央部腐食 Type



e) HS 及び腹板中央部腐食(卓越)Type

図 5-6 腐食減厚分布

表 5-2 解析モデルの板厚

解析モデル	腹板厚さ		水平補剛材厚さ		鉛直補剛材厚さ(支点側)		鉛直補剛材厚さ(荷重載荷側)	
	平均値(mm)	最小値(mm)	平均値(mm)	最小値(mm)	平均値(mm)	最小値(mm)	平均値(mm)	最小値(mm)
腹板厚9mmモデル	9.00		9.00		8.00		8.00	
健全相当Type	8.88	4.51	7.89	5.75	7.76	1.20	7.00	1.25
両面腐食Type	8.13	5.22	7.12	4.75	8.53	4.45	7.33	4.20
腹板下部腐食Type	7.47	0.31	4.08	1.15	7.06	1.85	6.21	0.80
HS及び腹板中央腐食Type	7.93	0.24	3.33	0.65	6.30	1.60	5.48	0.90
HS及び腹板中央腐食(卓越)Type	7.49	0.25	2.72	0.61	4.10	1.10	5.66	1.00

: 腐食減厚が少ない試験体①(G1-P12)解析モデル。

ケース c)両面腐食 Type

: 両面から腐食し、水平補剛材上部近傍の腹板と、水平補剛材下部の腹板に腐食減厚が生じている試験体②(G2-P16)の解析モデル。

ケース d)腹板下部腐食 Type

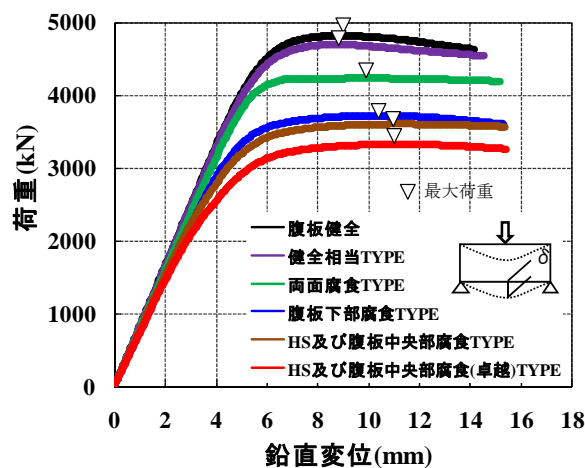
: 水平補剛材下部の腹板と下フランジ近傍の腹板に腐食減厚が生じている試験体③(G3-P14)の解析モデル。

ケース e)HS 及び腹板中央部腐食 Type

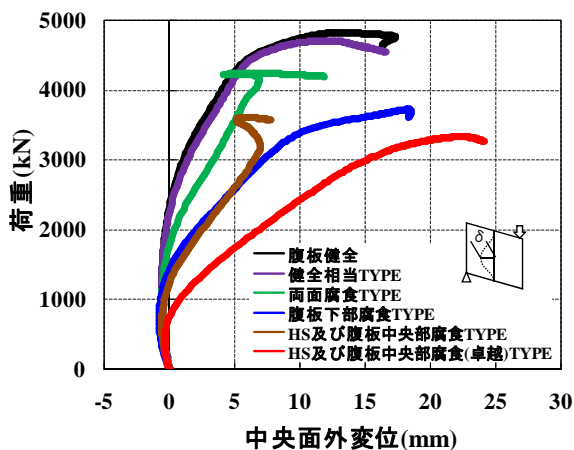
: 水平補剛材上部近傍の腹板と腹板中央に腐食減厚が生じている試験体④(G1-P4)の解析モデル。

ケース f)HS 及び腹板中央部腐食(卓越)Type

: 水平補剛材上部近傍の腹板、腹板中央や下フランジ近傍の腹板に腐食減厚が生じている試験体⑤(G1-P2)の解析モデル。



a) 荷重-鉛直変位関係



b) 荷重-腹板中央面外変位関係

図 5-7 荷重-鉛直変位および腹板中央面外変位関係

5-3 解析結果

(1) 荷重-変位特性

図 5-7 に 6 ケースの荷重と鉛直変位の関係および荷重と腹板中央部の面外変位の関係を示す。縦軸は荷重値を、横軸は桁中央部の下フランジ下面の鉛直変位および腹板中央の面外変位である。

図 5-7a)より、腹板 9mm モデル、健全相当 Type、両面腐食 Type、および腹板下部腐食 Type の最大荷重を比較すると腐食による平均板厚の低下に伴い低下した。HS 及び腹板中央部腐食 Type、HS 及び腹板中央部腐食(卓越)Type の平均板厚が他の Type と同程度であるにもかかわらず最大荷重値は腐食減厚量に比例せずに

低下した。

図 5-7b)より、HS 及び腹板中央部腐食(卓越)Type の腹板中央の面外変位は、低い荷重値で顕著に大きくなる。

(2) せん断座屈特性

図 5-8 に荷重と最小主ひずみの関係から推定したせん断座屈特性を示す。図 5-9 に示すように最小主ひずみは水平補剛材と鉛直補剛材に

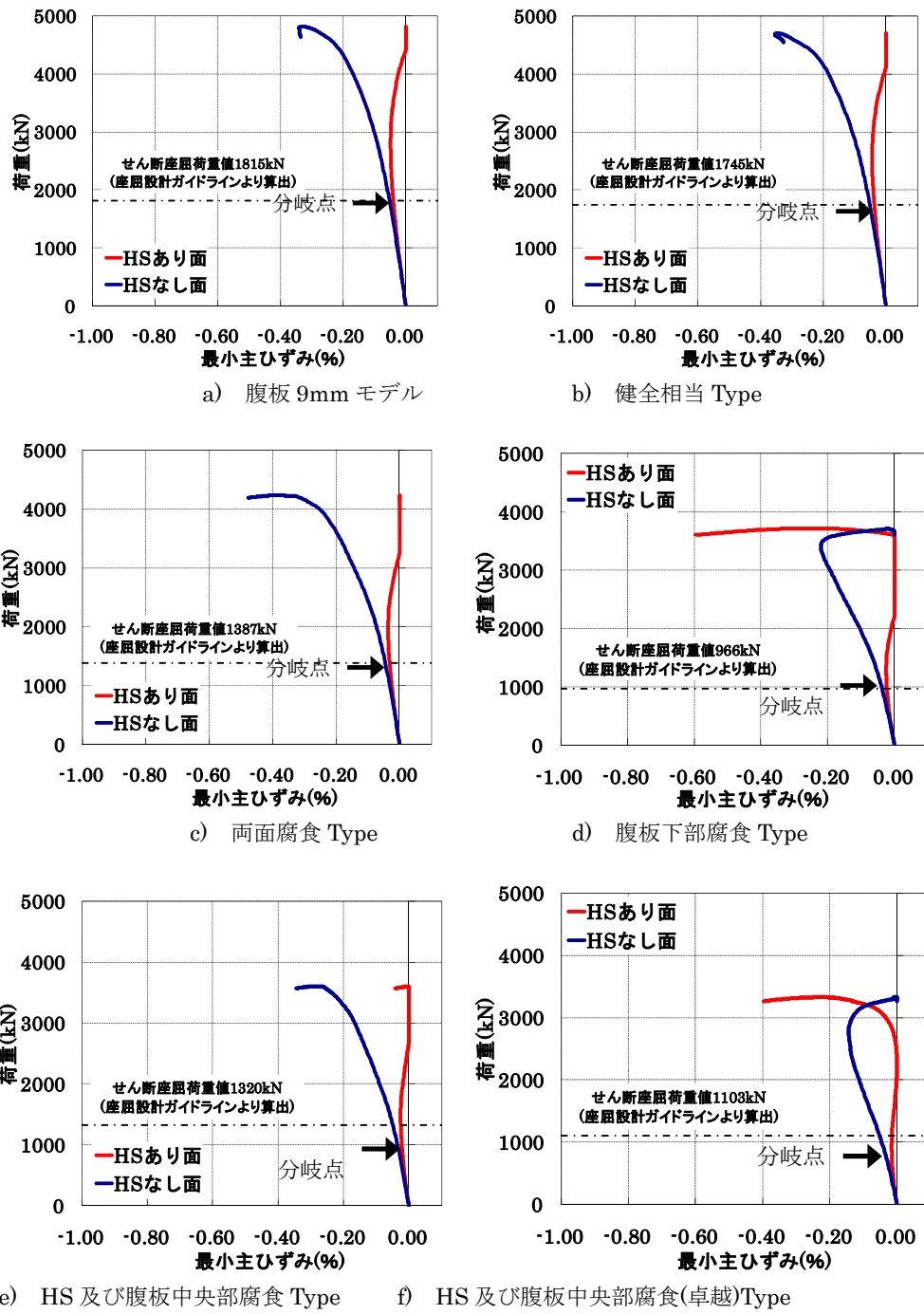


図 5-8 荷重-鉛直変位および腹板中央面外変位関係

囲まれた腹板に対角線を引き、中心を含む3点の表裏面にて評価する。表裏の最小主ひずみの分岐点を矢印で表示し、また、座屈設計ガイドラインより算出したせん断座屈荷重値を破線にて示す。ここで座屈設計ガイドラインのせん断座屈荷重 $P_{cr,guide}$ の算定式を以下に示す。

$$P_{cr,guide} = 2 \cdot V_{cr,guide} \quad (5-2)$$

$$V_{cr,guide} = \tau_{cr} \times b \times t_{ave} \quad (5-3)$$

$$\tau_{cr} = \frac{k\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (5-4)$$

$$k = 4.00 + 5.34/\alpha^2 \quad (\alpha \leq 1) \quad (5-5)$$

$$= 5.34 + 4.00/\alpha^2 \quad (\alpha > 1)$$

ここで、 $V_{cr,guide}$ はせん断座屈時の作用せん断力、 b は水平補剛材以下の腹板の高さ、 t_{ave} は水平補剛材以下の腹板パネルの平均板厚、 E はヤング係数、 ν はポアソン比、 k はせん断座屈係数(四辺単純支持条件)、 α は腹板の縦横比である。

表 5-3 に腹板の表裏のひずみ分岐時の荷重値と、せん断座屈荷重 $P_{cr, FEM}$ を示す。また、座屈設計ガイドラインより算出したせん断座屈荷重値 $P_{cr, guide}$ と比較する。なお、せん断座屈

荷重の評価位置を黄色で示した。

表 5-3 より、各解析結果におけるせん断座屈荷重 $P_{cr, FEM}$ と座屈設計ガイドラインより算出したせん断座屈荷重 $P_{cr, guide}$ の比較を示す。腹板 9mm モデルで 99.7%、健全相当 Type で 99.8%、両面腐食 Type で 97.2%、腹板下部腐食 Type で 99.9%であった。しかし、HS 及び腹板中央部腐食 Type, HS 及び腹板中央部腐食(卓越)Type はそれぞれ 74.6%、および 66.9%であった。

以上より、腐食減厚の少ない Type や腹板下部腐食に対しては、せん断座屈荷重は座屈設計ガイドラインを用いて評価することが可能である。しかし、水平補剛材や腹板中央部の腐食 Type については、せん断座屈荷重は座屈設計ガイドラインを用いて評価することが困難であり、せん断座屈は低い荷重値で発生する。

5-4 せん断耐荷力評価

腹板のせん断力と平均板厚の関係および各荷重段階における着目腹板に作用するせん断力について、解析値と座屈設計ガイドラインを算出値と比較した。なお、平均板厚の範囲は、水平補剛材より下方の腹板パネルとした。荷重段階については、座屈設計ガイドラインに示されている斜張力場理論より次式に基づき荷重段階を定義した。

$$V_{ult} = V_{cr} + V_t + V_f \quad (5-6)$$

ここで、 V_{ult} はせん断耐荷力、 V_{cr} はせん断座屈時腹板に作用するせん断力、 V_t はせん断座屈後、

斜張力場によって負担されるせん断力、 V_f はフランジと垂直補剛材で囲まれた枠組みが崩壊メカニズムとなる場合に負担するせん断力である。本節では、実腐食した腹板のせん断耐荷力の評価として、腹板にせん断座屈が生じる V_{cr} のせん断座屈時、 V_t の斜張力場降伏時、 V_{ult} のせん断耐力時に腹板の実腐食減厚とせん断力との関係を比較検討する。

(1) せん断座屈

図 5-10 に座屈設計ガイドラインより算出したせん断座屈荷重 $V_{cr, guide}$ と腐食減厚分布をモデル化し、シェル要素を用い、弾塑性 FEM 解析で求めたせん断力 $V_{cr, FEM}$ の比較を示す。ここで座屈設計ガイドラインより算出したせん断力 $V_{cr, guide}$ は式(5-3)より算出し、解析で求めたせん断力 $V_{cr, FEM}$ は表 5-3 に示すせん断座屈荷重 $P_{cr, FEM}$ より、次式で求めた。

$$V_{cr, FEM} = P_{cr, FEM} / 2 \quad (5-7)$$

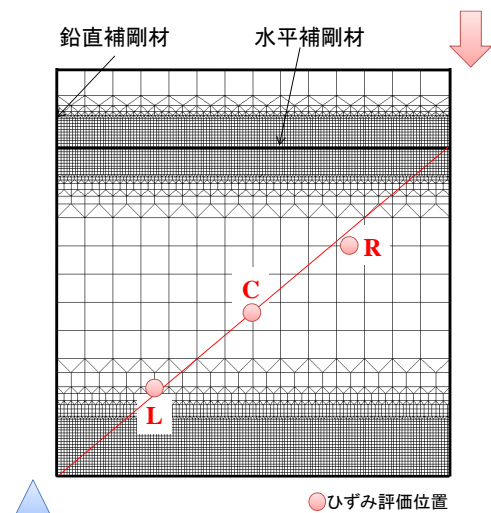


図 5-9 ひずみ評価位置

表 5-3 各評価点における腹板表裏のひずみ分岐時の荷重値

解析モデル	せん断座屈荷重値 $P_{cr, FEM}$ (kN)			せん断座屈荷重値 $P_{cr, guide}$ (kN)	P_{FEM}/P_{guide} (%)
	R	C	L		
腹板厚9mmモデル	1751.4	1809.7	1342.7	1815.1	99.7
健全相当Type	1683.1	1741.1	1334.8	1744.6	99.8
両面腐食Type	1291.8	1347.9	1010.9	1387.2	97.2
腹板下部腐食Type	910.7	964.2	749.8	965.7	99.9
HS及び腹板中央腐食Type	821.0	984.8	1255.9	1320.6	74.6
HS及び腹板中央腐食(卓越)Type	580.4	738.1	842.8	1103.3	66.9

各モデルのせん断座屈荷重

図 5-11 にせん断力と腹板の平均板厚の関係を示す。図中縦軸は、各解析におけるせん断力を腹板 9mm モデルのせん断力で除して無次元化し、横軸は各解析モデルの平均板厚を設計板厚の 9mm で除して無次元化した。なお、平均板厚の範囲は、水平補剛材より下方の腹板パネルとした。また、図 5-11 および図 5-10 には、腹板板厚を一様に 8mm, 7mm と減厚させた一様減厚モデルの結果も示した。

図 5-10 より、腹板 9mm モデル、健全相当 Type、両面腐食 Type、および腹板下部腐食 Type は $V_{cr,guide}$ と $V_{cr,FEM}$ は同程度である。一方、HS 及び腹板中央部腐食 Type、HS 及び腹板中央部腐食(卓越)Type、は $V_{cr,guide}$ に対して $V_{cr,FEM}$ は低いせん断力となっている。

図 5-11 より、健全相当 Type、両面腐食 Type、および腹板下部腐食 Type は一様減厚モデルと同様に腹板の平均板厚の減少に比例し、せん断力 $V_{cr,FEM}$ は低下している。一方、HS 及び腹板中央部腐食 Type、HS 及び腹板中央部腐食(卓越)Type は、一様減厚ラインよりせん断力 $V_{cr,FEM}$ は著しく低下している。

(2) 斜張力場降伏(せん断強度)

図 5-12 に斜張力場降伏時における座屈設計ガイドラインより算出したせん断力 $V_{t,guide}$ と各解析におけるせん断力 $V_{t,FEM}$ の比較を示す。ここで、各解析におけるせん断力 $V_{t,FEM}$ はせん断座屈時の荷重 $P_{cr,FEM}$ の差分として次式で算出した。

$$V_{t,FEM} = (P_{ult,FEM} - P_{cr,FEM})/2 \quad (5-8)$$

また、座屈設計ガイドラインより算出したせん断力 $V_{t,guide}$ の算出式を以下に示す。

$$V_{t,guide} = \sigma_t b t_{ave} (\sin \theta \cos \theta - \alpha_c \sin^2 \theta) \quad (5-9)$$

ここで σ_t は降伏引張応力であり、以下に示す。

$$\frac{\sigma_t}{\sigma_{Yw}} = \sqrt{1 - \left(\frac{\tau_{cr}}{\tau_{Yw}} \right)^2 \left(1 - \frac{3}{4} \sin^2 2\theta \right)} - \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\tau_{cr}}{\tau_{Yw}} \sin 2\theta \quad (5-10)$$

$$\alpha_c = \alpha \{ 1 - (C_c - C_t)/a \} \quad (5-11)$$

α は腹板の縦横比、 a は垂直補剛材間の長さである。崩壊メカニズムにおいて、上下フランジの断面が異なる場合、圧縮フランジと引張フランジの塑性ヒンジの位置 C_c 、 C_t は次式で与え

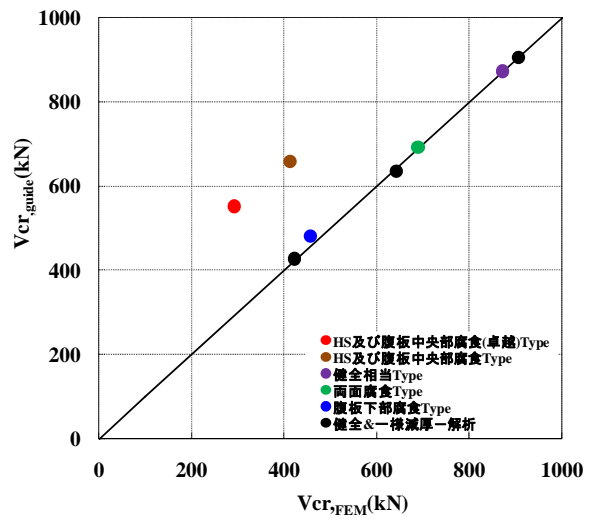


図 5-10 せん断座屈荷重の比較

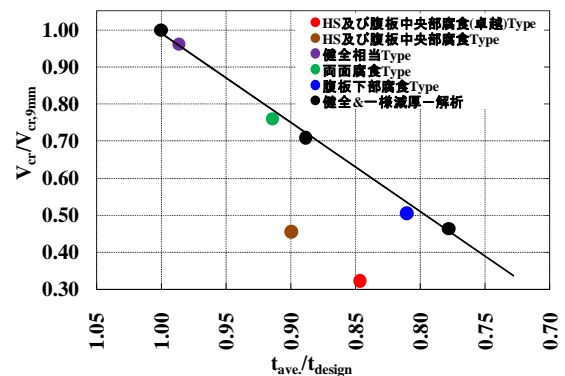


図 5-11 せん断座屈荷重・腹板平均板厚関係

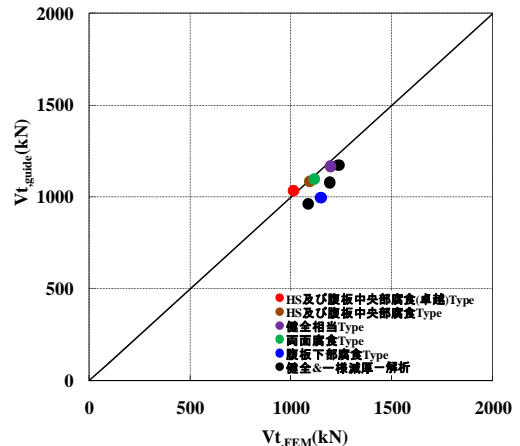


図 5-12 斜張力場降伏時のせん断力

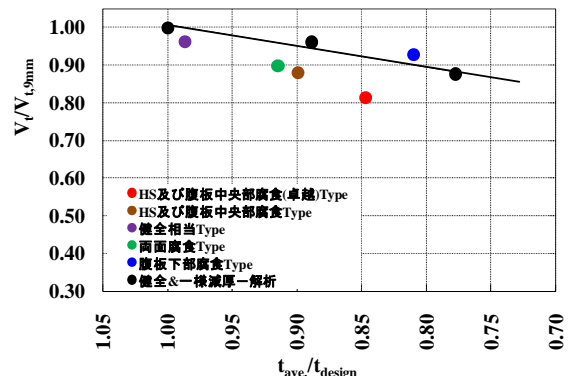


図 5-13 せん断力・腹板平均板厚関係(斜張力場降伏時)

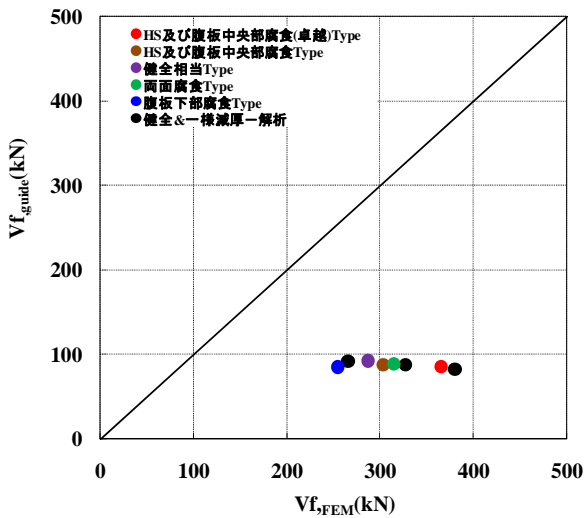


図 5-14 フレーム効果までのせん断力 V_f の比較

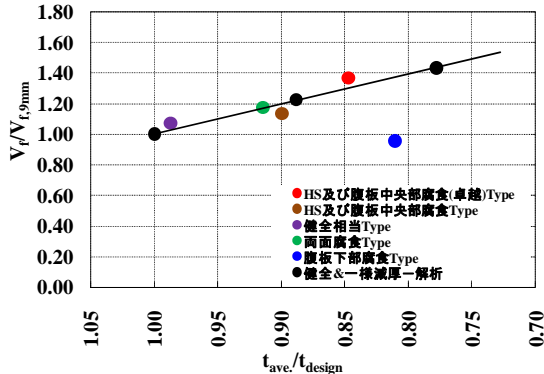


図 5-16 せん断耐力-腹板平均板厚関係 (フレーム効果まで)

られる。

$$C_c = \frac{2}{\sin \theta} \sqrt{\frac{M_{Pfc}}{\sigma_t t_{ave}}} \quad (0 \leq C_c \leq a/2) \quad (5-12)$$

$$C_t = \frac{2}{\sin \theta} \sqrt{\frac{M_{Pft}}{\sigma_t t_{ave}}} \quad (0 \leq C_t \leq a/2) \quad (5-13)$$

M_{Pfc} , M_{Pft} は圧縮および引張フランジの全塑性曲げモーメントで次式で与えられる。

$$M_{Pfc} = \frac{1}{4} \sigma_{yc} b_{fc} t_{fc}^2, \quad M_{Pft} = \frac{1}{4} \sigma_{yt} b_{ft} t_{ft}^2 \quad (5-14)$$

また、斜張力場の傾斜角 θ は次式で与えられる。

$$\theta = \frac{2}{3} \tan^{-1} \left(\frac{1}{\alpha} \right) \quad (5-15)$$

図 5-13 にせん断力と腹板の平均板厚の関係を示す。図中縦軸は、各解析におけるせん断力を腹板 9mm モデルのせん断力で除して無次元化し、横軸は各解析モデルの平均板厚を設計板

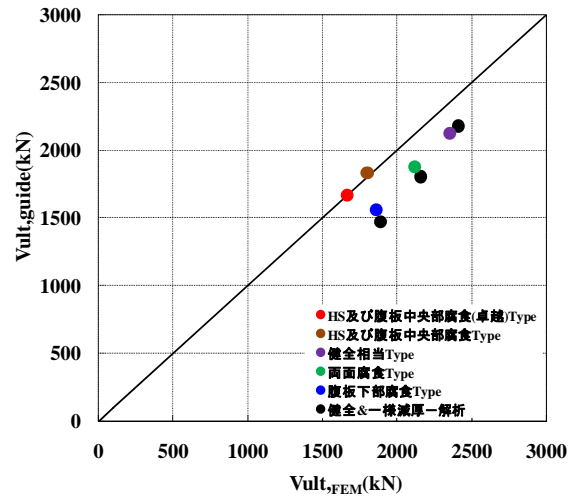


図 5-15 せん断耐力 V_{ult} の比較

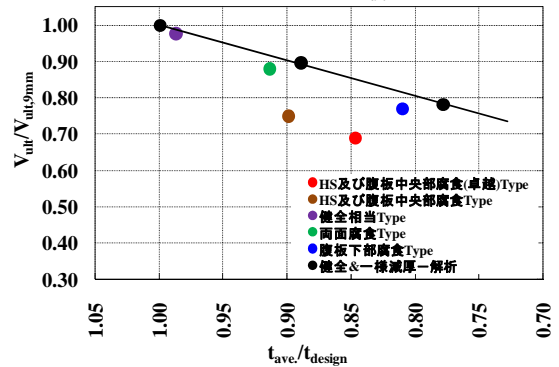


図 5-17 せん断耐力 V_{ult} -腹板平均板厚関係

厚の 9mm で除して無次元化した。なお、平均板厚の範囲は、水平補剛材より下方の腹板パネルとした。図 5-12 および図 5-13 の図中には、一様減厚モデルの斜張力場降伏時におけるせん断力 $V_{t,guide}$ および $V_{t,FEM}$ も示した。

図 5-12 より全ての解析モデルは、 $V_{t,guide}$ と $V_{t,FEM}$ は同程度である。図 5-13 より、健全相当 Type, 両面腐食 Type および、腹板下部腐食 Type は一様減厚モデルと同様に平均板厚の減少に比例して、せん断力は低下している。また、HS 及び腹板中央部腐食 Type, HS 及び腹板中央部腐食(卓越)Type はせん断座屈時には、一様減厚との相違が明らかであったが、斜張力場の形成から降伏までは一様減厚との差は小さい。

(3) せん断耐力

図 5-14, 図 5-15 にせん断耐力時における座屈設計ガイドラインより算出したフレーム効果として上下フランジが負担するせん断力 $V_{f,guide}$ を示す。また、せん断耐力 $V_{ult,guide}$ と各解析におけるせん断力 $V_{f,FEM}$, $V_{ult,FEM}$ の比較を示す。ここで、各解析におけるせん断耐力 $V_{ult,FEM}$ は最大荷重 $P_{max,FEM}$ を用いて次式で与えられる。

$$V_{ult,FEM} = P_{max,FEM} / 2 \quad (5-16)$$

また、フレーム効果として上下フランジが負担するせん断力 $V_{t,FEM}$ は次式で与えられる。

$$V_{f,FEM} = (V_{ult,FEM} + V_{t,FEM}) \quad (5-17)$$

$$V_{ult,gude} = (V_{cr,gude} + V_{f,gude}) \quad (5-18)$$

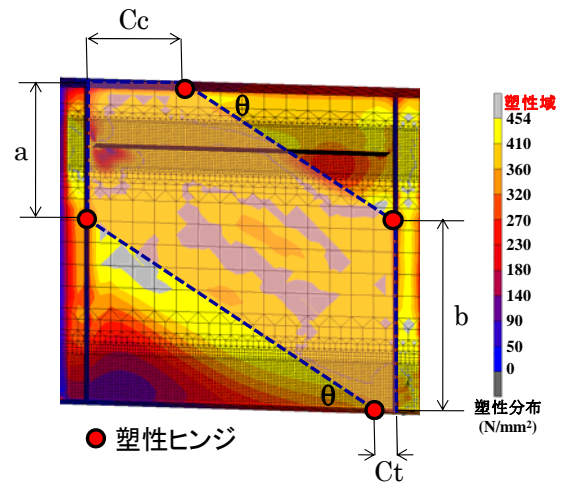
図 5-16、図 5-17 にせん断力と腹板の平均板厚の関係を示す。図中縦軸は、各解析におけるせん断座屈力を腹板 9mm モデルのせん断力で除して無次元化し、横軸は各解析モデルの平均板厚を設計板厚の 9mm で除して無次元化した。なお、平均板厚の範囲は、水平補剛材より下方の腹板パネルとした。また図中には、一様減厚モデルのせん断耐力時におけるせん断力 $V_{f,gude}$ 、 $V_{ult,gude}$ および $V_{f,FEM}$ 、 $V_{ult,FEM}$ も示した。

図 5-14 より、せん断耐力時に上下フランジが負担するせん断力 $V_{f,FEM}$ は、座屈設計ガイドラインより算出したせん断力 $V_{f,gude}$ よりも 200kN 程度大きくなった。その比率は、20%～30%程度である。図 5-16 よりせん断力 $V_{f,FEM}$ は平均板厚の減少に伴い、増加している。

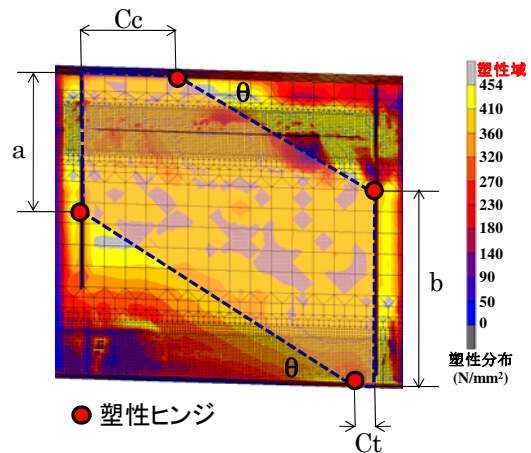
図 5-15 よりせん断耐力 $V_{ult,FEM}$ は、腹板 9mm モデル、両面腐食 Type、腹板下部腐食 Type において座屈設計ガイドラインより算出したせん断耐力 $V_{ult,gude}$ よりも解析値におけるせん断耐力 $V_{ult,FEM}$ が大きくなった。また、HS 及び腹板中央部腐食 Type、HS 及び腹板中央部腐食(卓越)Type のせん断耐力は、 $V_{ult,gude}$ と $V_{ult,FEM}$ とで同程度となった。図 5-17 より、健全相当 Type、両面腐食 Type、腹板下部腐食 Type は一様減厚モデルと同様に平均板厚の減少に比例し、せん断耐力 $V_{ult,FEM}$ は低下している。しかし、HS 及び腹板中央部腐食 Type、HS 及び腹板中央部腐食(卓越)Type はせん断座屈時と同様に一様減厚ラインとの差が明らかである。

5-5 腐食劣化した鋼プレートガーダーのせん断耐力評価法の検討

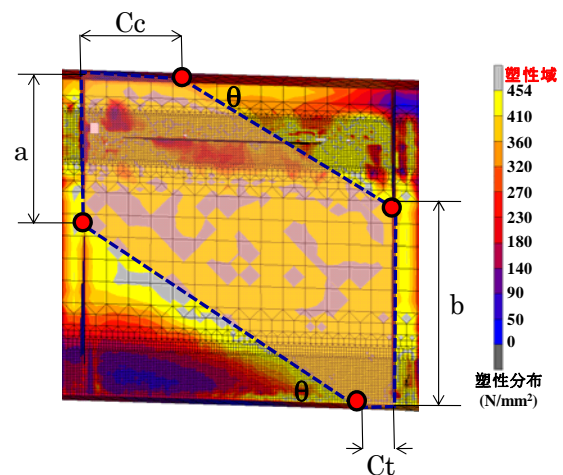
一様減厚や下フランジ近傍の腐食は、現行の座屈設計ガイドラインで評価できるが、HS 及び腹板中央部腐食 Type、HS 及び腹板中央部腐食(卓越)Type のせん断力は、座屈設計ガイドラインで算出した値よりも各解析で算出した値が小さくなった。本節では、これらの腐食 Type に対してせん断座屈荷重の評価法の検討を行った。検討として、腹板の腐食減厚評価範囲、お



a)腹板 9mm モデル



b)HS 及び腹板中央部腐食 Type



c)HS 及び腹板中央部腐食(卓越)Type

図 5-18 腐食減厚評価範囲(張力場タイプ)

よびせん断座屈後の斜張力場形成腹板を圧縮板として仮定し、せん断座屈の評価法の検討を行った。

前節では、座屈設計ガイドラインに従って水平補剛材以下の単一パネルにてせん断座屈を評価していた。本節では、せん断耐力時に腹板に形成された張力場範囲にて平均板厚を算出する張力場タイプにてせん断座屈時のせん断

力と腹板の腐食減厚の関係の検討を行う。

図 5-18 に張力場タイプの腐食減厚評価範囲を示す。評価範囲の決定は、座屈設計ガイドラインに基づき垂直補剛材から上下フランジに生じた塑性ヒンジの位置 C_c , C_t を式(5-12)及び式(5-13)にて算出した。また斜張力場の傾斜角 θ を式(5-15)にて算出し、上下フランジから垂直補剛材に生じた塑性ヒンジの位置 a , b を算出した。表 5-4 に塑性ヒンジの位置を示す。

図 5-19 に算出したせん断力と平均板厚の関係を示す。図中縦軸は、各解析におけるせん断力を腹板 9mm モデルのせん断力で除して無次元化し、横軸は各解析モデルの平均板厚を設計板厚の 9mm で除して無次元化した。図中、単一パネルにて算出したせん断力と平均板厚の関係も示した。

図 5-19 より、せん断力と平均板厚の関係は単一パネルで平均板厚を算出した場合よりも、張力場タイプで算出した場合において一様減厚との差が小さくなった。

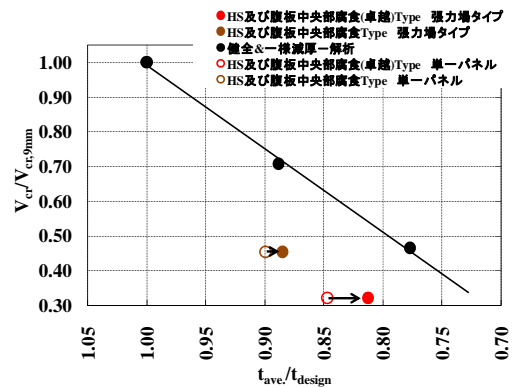


図 5-19 せん断力-腹板平均板厚関係 (せん断座屈時/張力場タイプ)

表 5-4 塑性ヒンジの位置

解析モデル	a(mm)	b(mm)	Cc(mm)	Ct(mm)	$\theta(^{\circ})$
腹板9mm	680.3	875.0	437.0	104.9	30.4
HS及び腹板中央部腐食Type	683.8	890.3	462.7	111.1	30.4
HS及び腹板中央部腐食(卓越)Type	764.5	897.9	476.3	114.3	30.4

5-6 まとめ

鋼プレートガーダー橋の実腐食分布がせん断耐荷力評価を検討するために、レーザー変位計を用いて実腐食分布形状の計測結果を用いて、有限要素解析モデルを作成し、弾塑性有限変位理論に基づく耐荷力解析を行った。

以下に、得られた成果を示す。

- (1) 健全モデル, 健全相当 Type, 両面腐食 Type, および腹板下部腐食 Type の最大荷重を比較すると腐食による平均板厚の低下に伴い低下した。HS 及び腹板中央部腐食 Type, HS 及び腹板中央部腐食(卓越)Type の平均板厚が他の Type と同程度であるにもかかわらず最大荷重値は腐食減厚量に比例せずに低下した。
- (2) 腐食減厚の少ない Type や腹板下部腐食に対しては、せん断座屈荷重は座屈設計ガイドラインを用いて評価することが可能である。しかし、水平補剛材や腹板中央部の腐食 Type については、せん断座屈荷重は座屈設計ガイドラインを用いて評価することが困難であり、せん断座屈は低い荷重値で発生する。

第6章 結論

本研究では腐食劣化鋼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無塗装仕様の耐候性鋼プレートガーダー橋を研究対象に、実橋での腐食減厚調査、腐食環境調査、および暴露橋から採取した腐食鋼部材を用いたせん断耐荷力実験により、腐食劣化した鋼プレートガーダー橋の腐食減厚分布特性を明らかにした。また、腐食減厚分布と海塩粒子の飛来特性との相関を評価した。さらに、構造部位別の腐食減厚分布が鋼プレートガーダーのせん断耐荷力に及ぼす影響について評価した。以下に本研究で得られた結論を示す。

(1)構造部位別の腐食劣化メカニズムの解明

- 1) 鋼プレートガーダーの桁内には飛来塩分流入と渦状の流れが生じる特性を有する。また、桁内への流入は支間中央部で桁下飛来塩分の約50%であった。また、桁端部付近では大きくばらついた。
- 2) 暴露橋モデルの模型を用いた流体実験より、桁内への飛来塩分流入特性と構造部位別の腐食減厚特性との相関性があることを示した。
- 3) 桁外面は雨による付着塩分の洗浄効果により、腐食減厚は発生しづらい特性を有する。
- 4) 実橋スケールで簡便に計測でき、鋼プレートガーダーの構造部位別の腐食減厚分布の特徴を捉えることが可能な超音波板厚計測法を提案した
- 5) 海側の外桁ウェブ内面は、桁端部付近において水平補剛材近傍、ウェブ中央部付近および下フランジ近傍の3か所で腐食減厚が顕著になった。一方、支間中央ではほとんど腐食減厚しなかった。
- 6) 山側の外桁ウェブ内面は、ほぼ桁全長にわ

たり腐食し、上フランジから下フランジへ向かって増加し、下フランジ近傍が最も著しくなる腐食減厚特性を示した。

- 7) 付着塩分の雨洗浄効果が期待できない中桁は外桁より激しく腐食減厚する特性を有する。
 - 8) 河川護岸などの付帯施設によって飛来塩分量が集中的に作用する構造部位は、腐食減厚が著しく速くなる特性を有する。
 - 9) 補剛材の設置されたウェブは、その補剛材溶接部近傍で局部的に腐食減厚し、腐食進行に伴ってウェブ母材の破断に至る特性を有する。
 - 10) 構造部位別の腐食減厚特性と上記考察を活用し、沿岸部に建設された鋼プレートガーダーの点検・調査・診断時の重点範囲、重点構造部位および腐食進行形態などの塩害リスクを示すとともに、洗浄効果や適切な補修範囲などの維持管理上の留意点や新橋設計上の塩害リスク回避上の配慮点についても示した。
- ### (2)腐食劣化鋼橋の耐久性評価
- 1) 腹板下部腐食の腹板は、平均板厚で最大せん断力を評価でき、せん断座屈強度も平均板厚で概ね評価できる。水平補剛材上部・腹板中央腐食の腹板は、腐食減厚分布の影響を受け、平均板厚減少率に応じて算出される最大せん断力及びせん断座屈強度より更に低下する。このことから、腐食減厚分布によっては、平均板厚でせん断耐荷力を評価できないことがわかる。
 - 2) 実橋で簡便に計測でき、構造部位別の腐食減厚分布の特徴を捉えることができた超音波板厚計測法の板厚データを用いて、弾塑性FEM解析を行った結果、実験値と同様に腐食減厚分布によっては、せん断耐荷力

低下に大きな影響を与えることを検証した。

- 3) 腐食減厚分布によらず全て弾性域でせん断座屈を生じ、最大荷重到達前で塑性域が概ね張力場の領域に発生した。しかし、水平補剛材上部・腹板中央腐食は斜め張力場の形成に影響を与えていた。

以上の研究成果を踏まえて、今後の展望と道路政策の質の向上への寄与について以下に示す。

- 1) 腐食劣化した鋼プレートガーダー橋のせん断耐荷力評価に対して、一様減厚および腹板下部腐食タイプは平均板厚を用いた座屈設計ガイドラインのせん断座屈算定式で概ね評価が可能であるが、水平補剛材上部近傍及び腹板中央腐食タイプの評価では適用できない。よって、水平補剛材上部近傍及び腹板中央腐食分布を有する腐食鋼プレートガーダーに対する新たなせん断耐荷力評価法を検討する必要がある。
- 2) 腐食劣化した鋼プレートガーダー橋のせん断耐荷力実験および弾塑性 FEM 解析において、水平補剛材上部近傍及び腹板中央腐食のせん断座屈強度が著しく低下したが、その構造部位の腐食減厚量がどの程度減厚したら、せん断耐荷力が著しく低下するかを明らかにする必要がある。今後、増加が予測される腐食損傷鋼橋の補修補強の判定に重要なデータとなる。
- 3) 本研究で得られた鋼プレートガーダーの腐食減厚分布（腐食マップ）は点検や調査時の見落とし防止、腐食減厚の予測および残存耐荷力診断時の参照データとして活用でき、効率的かつ信頼性の高い点検、調査、および診断法の構築へ寄与でき、現行橋梁点検マニュアルの質の向上に反映できると思われる。特に腐食環境の厳しい沿岸環境に建設された鋼プレートガーダーの維持管理への活用は有効である。
- 4) 本暴露橋は過酷な塩害環境下で激しく腐食減厚していたが、外桁外面は付着塩分の雨洗浄効果により約 30 年前の建設当初の表面処理材がそのまま残存していたことから、付着塩分を洗浄することは橋梁の長寿命化にとって効果的である。また、暴露橋の支間中央部では著しい腐食減厚は生じていなかったことより、洗浄や塗替え等の維持管理は桁端部付近でも橋梁の長寿

命化には効果的である。

- 5) 本研究対象の暴露橋は無塗装仕様で約 30 年間塩害環境下にあり、飛来塩分量も現行道示で規定する 0.05mdd よりかなり多い状態であったが、支間中央付近では腐食減厚が少ない状態であった。この結果は LCC に優れる耐候性鋼橋の適用範囲や技術開発へ反映できると思われる。また、道示で求めている架橋地点の飛来塩分計測法とその適用可能な飛来塩分量の検討にも反映できると思われる。
- 6) 本研究で得られた構造部位別の腐食減厚分布を参考に、腐食環境の厳しい沿岸部においても、塩害リスクを設計当初から回避できる構造形式、および局部的に著しい腐食減厚が生じない構造ディテール（補剛材、ガセットプレートなど）を検討する必要がある。