

腐食した耐候性H形鋼の残存曲げ強度試験

周南市建設部河川港湾課 ○正会員 中原 啓太
徳山工業高等専門学校 正会員 海田 辰将

1. はじめに

耐候性鋼材を使用した橋梁の撤去や架け替え事例は少ないことから、実環境下で実際に著しい腐食減肉を生じた場合の詳細な板厚測定事例も乏しく、その腐食形態の特徴を把握するための基礎データの蓄積が必要である。一方、曲げ部材の残存強度評価については、腐食表面を模擬した桁のFEM解析に基づく研究例がベースとなっており、実際に供用後に撤去された桁を用いた曲げ載荷試験^{1),2)}が行われた事例は少ない。

以上のことから、本研究では、四国の山間部で歩道橋の縦桁として約20年間供用後、著しい腐食により撤去された耐候性H形鋼の残存板厚測定および曲げ載荷実験を行い、腐食損傷と残存強度、崩壊性状の関係および腐食後の桁の中立軸位置について考察する。

2. 実験供試体

本研究で供試体として使用するH形鋼は、四国の山間部で歩道橋（2 径間連続斜張橋）として供用されていた縦桁の一部である。縦桁の材質は SMA490W、寸法は 100mm×100mm×6mm×8mm の耐候性 H 形鋼である。縦桁の寸法図を図-1 に示す。本研究では、補修工事の際に撤去された縦桁の 1 スパン分（長さ約 1400mm）を 10 体入手し、そのうちの 4 本を実験供試体に用いた。供試体はそれぞれ供試体 A, B, C, D と記す。

写真-1 に本供試体の腐食状態を示す。本供試体は、上下フランジ、ウェブ全ての鋼表面において、**写真-1(a)**のような板状の剥離錆が生じていた。この剥離錆の表面は赤茶色で小さな錆こぶを生じているが、その内部は黒色で硬く、緻密な層状を成している。**写真-1(b)**は、上フランジに生じた板状の剥離錆を一部取り除いた状況を示す。この剥離錆は手で簡単に除去できるが、剥離錆の下には赤茶色の浮き錆と黒色の緻密な鱗状の錆（以下、鱗錆）が固着している。さらにこれらをワイヤブラシやタガネで除去すると小さな孔食を有する地金が露出することが確認できた。孔食などの著しい減肉は、主に鱗錆の下で生じており、その一部は貫通孔にまで進展していた。このことから、表面を覆う板状の剥離錆とその下の表面錆の間で生じる隙間腐食および凍結防止剤に含まれる塩分が減肉をより加速させたと推察される。

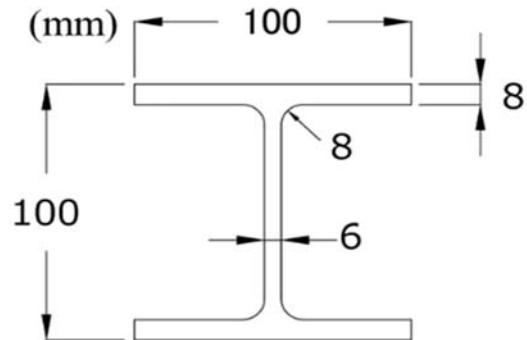
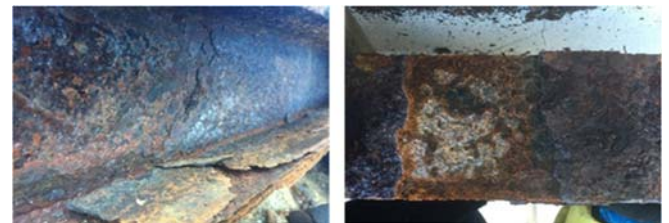


図-1 供試体寸法



(a) ウェブ・下フランジ上面 (b) 上フランジ上面

写真-1 各部位の腐食状態

表-1 板厚統計量

	測定箇所	平均板厚	最大板厚	最小板厚	標準偏差	板厚減少率
		tavg [mm]	tmax [mm]	tmin [mm]	σ [mm]	R[%]
供試体A	上フランジ	6.29	7.75	3.00	0.63	21.4
	ウェブ	3.33	4.95	0.80	0.63	44.5
	下フランジ	5.05	7.20	2.30	0.79	36.9
供試体B	上フランジ	6.60	8.00	3.70	0.68	21.1
	ウェブ	5.43	5.60	4.50	0.12	40.7
	下フランジ	7.21	7.80	6.55	0.15	36.5
供試体C	上フランジ	6.64	8.00	4.70	0.49	17.0
	ウェブ	5.27	5.65	3.90	0.24	12.1
	下フランジ	6.91	8.00	5.40	0.32	13.7
供試体D	上フランジ	6.31	7.50	4.50	0.45	17.5
	ウェブ	3.56	6.00	1.40	0.57	9.4
	下フランジ	5.08	6.60	2.30	0.55	9.9

3. 残存板厚測定および腐食形態の特徴

残存板厚測定に先立ち、本研究で使用する供試体はサンドブラスト処理を施し、鋼表面の錆を除去した。残存板厚測定では、供試体スパン中央部の 560mm（曲げ試験区間）における板厚を計測した。本研究で板厚測定に使用し、鋼表面にけがいた 5mm メッシュの格子点上で測定した。**表-1** に板厚統計量の一覧を示す。表中の板厚減少率は各部位の平均板厚から求めた値であり、フランジで最大 37%、ウェブで最大 45%の減肉が確認できる。

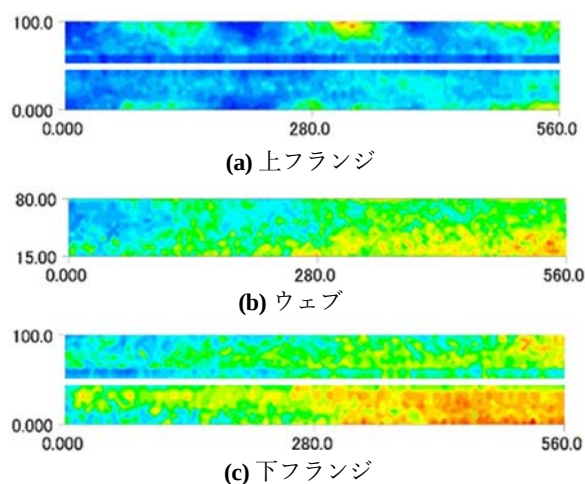


図-2 減肉量等高線図（供試体 A）

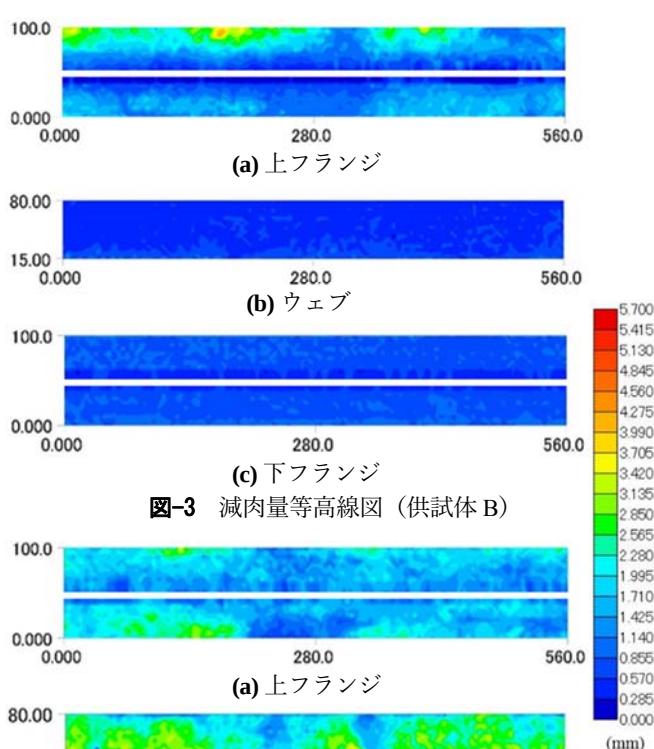


図-3 減肉量等高線図（供試体 B）

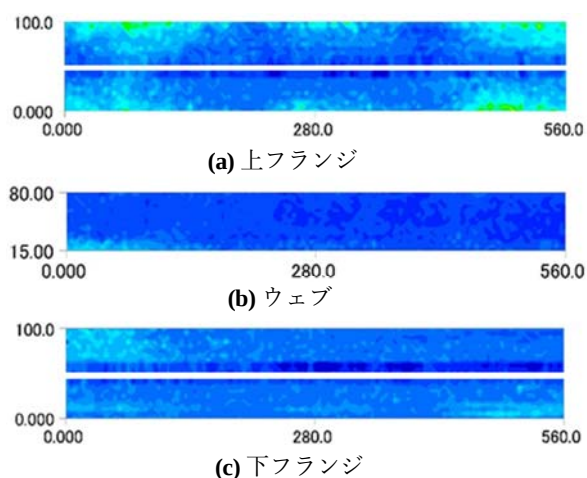


図-4 減肉量等高線図（供試体 C）

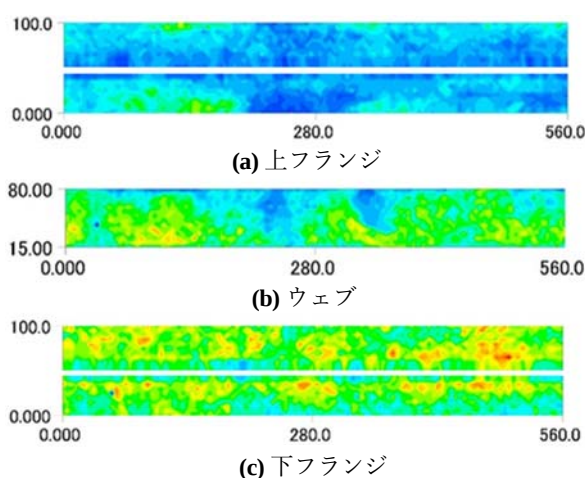


図-5 減肉量等高線図（供試体 D）

また、板厚標準偏差 σ_t が大きいほど鋼表面の凹凸が激しいことを意味している。

図-2～5 に供試体ごとの減肉量等高線図を示す。各図(a)に示す上フランジでは、全ての供試体において自由端付近に約 220mm 間隔で生じている局所的な減肉が確認できる。これは、縦桁の上に設置されていた床板の幅とほぼ一致していることから、床板の継ぎ目部分からの漏水が原因と考えられる。また、各図(b)に示すウェブでは、全ての供試体において上フランジ側よりも下フランジ側が減肉している。特に、図-2(b)に示す供試体 A のウェブでは、スパン中央より右側の方が相対的に大きな減肉が生じている傾向にある。本橋では橋床にキャンバーが設けられていることから、下フランジ上面を流れた雨水が床桁上にある垂直補剛材によって遮水されるため、このような腐食の偏りが生じたと考えられる。

4. 曲げ載荷試験

本供試体の曲げ載荷試験は、万能載荷試験機（載荷能力 1000kN）を用いて実施し、荷重は 0.5mm/min の変位制御で載荷した。実験は、供試体のスパン中央 560mm の部分を試験区間とした 4 点曲げ載荷試験として、終局



写真-2 曲げ載荷試験

に至るまで荷重を増加させた。写真-2 に 実験状況を示す。変位計（LF・UF）は、上フランジと下フランジに計 6 箇所設置した。ひずみゲージについては、上下フランジの最小断面および試験区間全体での最小断面の 3 断面に着目し、梁理論等を用いてそれぞれの断面で崩壊することを想定した予想曲げ耐荷力を予め算出した後、耐荷力の小さい 2 断面に対して図-6 に示すように 11 枚のゲージを貼り付けた。

本実験では、まず 4 体の中で最も腐食減肉の激しい供試体 A の曲げ載荷試験を実施した。しかし、供試体 A

は、試験区間外のウェブにせん断座屈を生じたことで終局を迎えた。このウェブ区間では予想以上に激しく腐食しており、わずなか貫通孔に応力が集中してアンカーの起点となり、せん断座屈を誘発したと考えられる。

供試体 B～D は、3 供試体ともに、圧縮フランジの座屈により終局に至った。図-7(a)に供試体Bにおける荷重－鉛直ストローク変位の関係を示す。図より、最高荷重 P_{max} の近くまでほぼ線形に荷重が増加するものの、 $P=140\text{kN}$ 付近から急激に変位が大きくなり、緩やかに荷重を増大させながら終局を迎えることがわかる。これは $P=140\text{kN}$ 付近で圧縮フランジに写真-3 に示すような、高次の座屈モードを伴う局部座屈が発生（図-7(a)中に赤丸で示す）し、フランジ全体のねじれを誘発したことに起因する。また、図-7(b)に示した荷重－ひずみ（下フランジ）関係より、下フランジの最小断面が $P=140\text{kN}$ 付近でほぼ全断面降伏していることから、引張フランジの降伏と圧縮フランジの局部座屈が密接に関係していることが理解できる。つまり、下フランジの降伏が先行して桁の変形が増大したことにより、上フランジの負担が増加し、局部座屈が発生したことを示している。

供試体 B～D のように、圧縮フランジの自由端付近に局所的な腐食減肉が存在する場合には、必ずしもフランジの最小断面で座屈するとは限らず、局所的な減肉がフランジの局部座屈を引き起こし、これによりフランジ全体のねじれ座屈が誘発されることで桁全体が崩壊することが明らかになった。表-3 に、供試体 B～D の曲げ載荷試験結果をまとめて示す。どの供試体も、崩壊性状は同じであったが、フランジに比較的激しい凹凸と減肉を有する供試体 D の残存強度が最も小さいことがわかる。

5. フランジの減肉による中立軸位置の変化

上下フランジの減肉量が大きく異なる場合には、断面の中立軸位置がフランジの腐食減肉によって変化することが予想される。中立軸位置が変化すると、部材の断面 2 次モーメントや縁端距離などの幾何的パラメータも変わるため、腐食後の曲げ強度や座屈耐荷力推定、たわみなどの計算にも大きな影響を及ぼす。特に、本供試体のような桁高の低い形鋼部材において上下フランジに著しい板厚差が生じる場合には、中立軸位置の変化が曲げ応力の計算結果に与える影響も無視できないと考えられる。

そこで、本研究では上下フランジおよびウェブの平均板厚から腐食後の断面形状を上下非対称の H 形断面として求めた中立軸位置（予想値）と供試体のウェブに貼り付けたひずみゲージから求めた中立軸位置（実験値）を比較した。表-3 には、供試体 B～D の中立軸位置をまとめて示している。

図-8 に、供試体 B の弾性域におけるウェブのひずみ

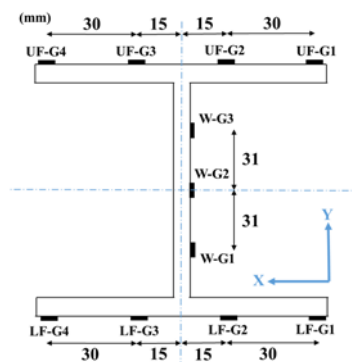
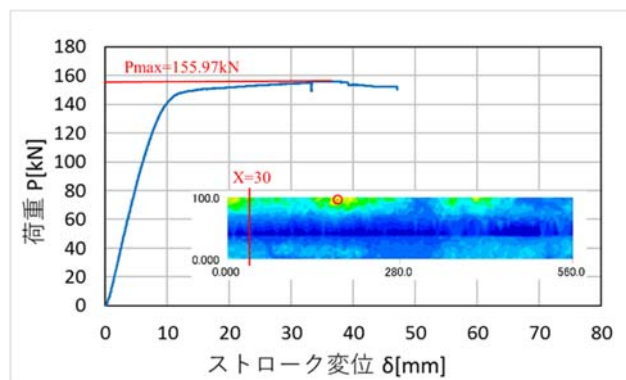
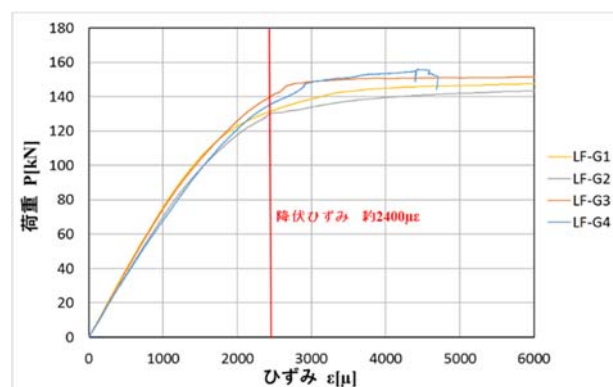


図-6 貼り付け箇所



(a) P- δ 曲線



(b) P- ϵ 曲線：下フランジ

図-7 供試体 B



写真-3 上フランジの座屈形状(供試体 B)

分布を示す。腐食前の中立軸位置は、ウェブ高さの中心である。供試体 B は上フランジの方が下フランジより

表-2 曲げ載荷試験結果（供試体 B～D）

	最高荷重	破壊箇所	崩壊性状	中立軸位置(予想)	中立軸位置(実験)
	Pmax[kN]			[mm]	[mm]
供試体B	155.97	圧縮フランジ	ねじれ座屈	-2.57	-6.00
供試体C	161.32	圧縮フランジ	ねじれ座屈	0.25	-5.00
供試体D	124.68	圧縮フランジ	ねじれ座屈	3.68	5.00

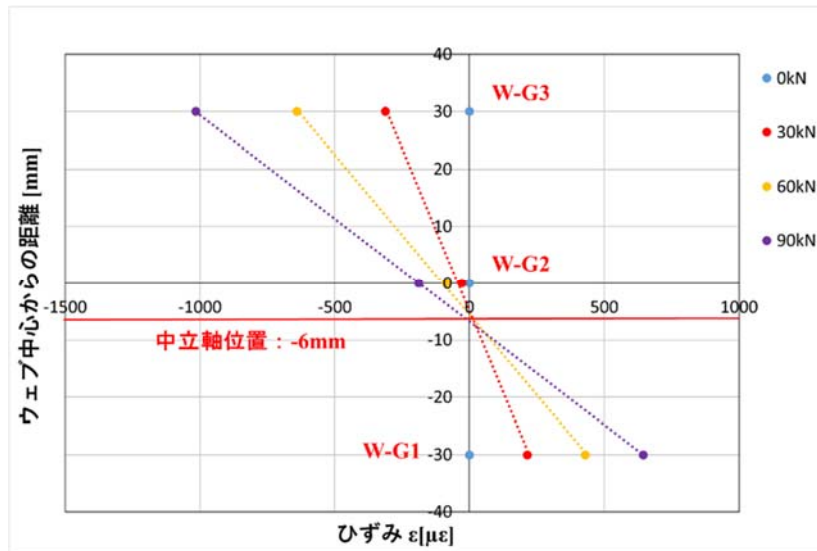


図-8 ウェブのひずみ分布の一例（供試体 B）

も平均板厚が小さいため、中立軸位置は下フランジ側に下がっており、表-3に示すようにその移動量は概ね6mm程度と推定される。ところが、予想値は-2.57mmとなっており、予想値と実験値が大きく異なる。このことは、表-3に示すように供試体 C, D の中立軸位置についても同様であった。特に、ウェブの板厚標準偏差が大きい供試体 B, C について両者の差は顕著である。このことから、中立軸位置の変化量は、ウェブの凹凸状況と何らかの相関があるようにも感じられるが、腐食によって変化する中立軸位置を平均板厚だけで正確に予測することは困難である。

今回の供試体については、実験結果から得た中立軸位置の変化量は、桁高の 1/2 (50mm) に対して 10~12%であった。強度評価の際に梁理論でフランジ縁端部における曲げ応力を算出する場合には、腐食による中立軸位置の変化を考慮するか否かによって、計算結果にも同程度の割合で違いが生じることが予想される。

6. おわりに

本研究では、著しい腐食により撤去された耐候性 H 形鋼 4 体の残存板厚測定を実施し、腐食形態とその統計的特徴を明らかにした。その後、曲げ載荷実験を実施して供試体の残存曲げ強度と崩壊性状の特徴を明らかにし、フランジの腐食減肉による中立軸位置の変化量等について考察した。本研究の主な成果は以下の通りである。

- 1) 耐候性 H 形鋼では、鋼表面全体に厚い板状の層状錆が生成され、地金と層状錆の間の隙間腐食によって減肉が進行する。この隙間における腐食環境によって鋼表面の凹凸状況や腐食速度が支配される。
- 2) 曲げ載荷実験より、圧縮フランジの自由端付近に局所的な腐食減肉が存在する場合には、必ずしもフランジ最小断面で座屈するとは限らず、局所的な減肉がフランジの局部座屈を引き起こし、これによりフランジ全体のねじれ座屈が誘発されることで桁全体が崩壊する。
- 3) 上下フランジの残存板厚差によって生じる中立軸位置の実際の移動量は、平均板厚を用いて上下非対称断面を仮定した断面計算の結果とは一致しない。中立軸位置の移動量は平均的な減肉量だけでなく、ウェブやフランジの凹凸状況にも影響を受けると考えられる。

【参考文献】

- 1) 建設省土木研究所構造橋梁部橋梁研究室，（社）日本橋梁建設協会：橋梁部材の腐食に対する健全度評価手法に関する共同研究報告書－腐食橋梁部材の耐荷力実験－，第 149 号，1996。
- 2) 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