

腐食した溝形鋼および山形鋼の圧縮挙動に関する一考察

新日鐵住金(株) 正会員 ○久積 和正 富永 知徳 今福 健一郎 菅野 良一

1. 目的

近年、構造物の老朽化に伴う事故や損傷事例が多く報告されており、その構造物を構成する部材レベルでの健全性を正しく把握することは維持管理上の重要課題の一つとなっている。しかしながら、外部環境に晒されることが多い産業用鋼構造物に用いられる溝形鋼や山形鋼が腐食した場合の耐力評価法に関する研究例は限られている。これまでに腐食した溝形鋼および山形鋼の中心軸圧縮試験を実施し、最小断面積と最大耐力に一定の関係があることが把握できたが^[1]、最大耐力に至るまでの詳細な挙動や最大耐力を決定した座屈モードなどのメカニズムは理解できておらず、腐食部材の座屈現象についての精緻な分析ができていないのが現状である。そこで、本論文では、腐食形状を詳細に反映したFEMモデルにより、腐食した溝形鋼や山形鋼の圧縮時における力学挙動を明らかにする。

2. FEMによる再現解析と座屈モード分析

2.1 FEMモデル概要

FEMモデルには3次元レーザー変位計から得た1mmピッチの幾何情報を基に、数値計算の効率性の観点から、10mmサイズのシェル要素を基本として解析することとした。また、各要素の板厚は一定としており、1mmピッチで与えられる板厚データを平均化して与えた(図1)。なお、初期たわみや残留応力を導入していない。これは、計測データには部材軸や板厚軸の局所的な変化や初期たわみが含まれていることによる。解析には汎用有限要素解析コードMARCを用い、応力-ひずみ関係は完全弾塑性とした。

本検討では、実験^[1]に用いた全ての試験体を対象として、大別して2種類の解析を行った。第1の解析ケースは実験の再現解析であり、実験と同じ両端固定の境界条件を適用した解析である。第2の解析ケースは座屈モードを判定するためのものであり、第1のケースに対して全体座屈が生じないように部材軸直角方向の変位を仮想的に追加拘束したものである。第2のケースの耐力が第1のケースのそれよりも大きければ、全体座屈モードが耐力を支配したことを意味し、第1と第2のケースの耐力が大きく変わらない場合に

は、局部座屈あるいは断面塑性化が耐力を支配したことを示す。第2のケースで導入した拘束条件を図2に示す。断面内の板要素の接合点と自由端において、局部座屈の発生を阻害しない程度に、板要素幅の5倍間隔で部材軸直角方向の変位を拘束した。

2.2 FEMの妥当性検討

表1には実験と解析の結果一覧を示すが、両者は比較的明確な対応を示しており、解析は総じて良好な精度を持つ。ただし、最大耐力が小さい範囲での精度は必ずしも良くない。これは、図1に示した板厚の平均化操作の影響であり、要素寸法よりも小さな孔食を有する試験体ではその孔食を表現できないことに起因する。よって、いくつかのケースではモデル化上の問題により実挙動を正しく模擬できていないため、ここでは実験値/解析値が±10%以下となったケースを、実挙動を妥当に評価したケースと見みなすこととする。これに該当した17ケース(表1中の(1)/(2)の値が0.9~1.1の範囲にあるケース)のみを用いて、座屈モードの詳細な検討を進めることとした。

2.3 座屈モードの分析

表1の(3)の欄には、妥当な評価を与えていると判断した17ケースに対して部材軸直角方向の変位拘束を与えた結果を示す。表1の(3)/(2)の欄の値は変位拘束の有無による耐力比を示したものである。本検討では、表1の(3)/(2)の値が1.1以上のケースを「全体座屈」、それ以外で実験における σ_{max}/σ_y (σ_{max} :座屈応力度=実験での最大荷重/最小断面積、 σ_y :降伏応力度)の値が概ね1以上のものを「全断面降伏」、残りを「局部座屈」とみなした。また、局部座屈の発生時点と位置を特定するために、板要素の表裏のひずみ

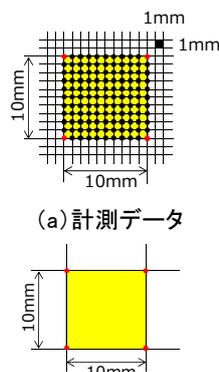


図1 板厚の平均化イメージ

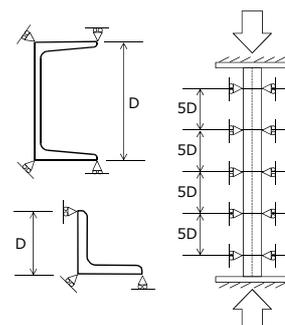


図2 全体座屈を拘束した解析の拘束条件

キーワード: 座屈, 腐食部材, 溝形鋼, 山形鋼, FEM

連絡先: 〒293-8511 千葉県富津市新富 20-1 新日鐵住金(株)

TEL: 0439-80-3086 FAX: 0439-80-2745

差に着目し、FEM モデルのいずれかの節点において表裏の平均ひずみ ϵ_{ave} に対するひずみ差 $\Delta\epsilon$ の比率が 20%以上となる点 ($\Delta\epsilon/\epsilon_{ave} \geq 0.2$) を局部座屈発生と定義した。

以上の定義に基づいて最大耐力時の座屈モードを整理すると、大別して、(1)全断面降伏(Yield)に支配されるケース、(2)全体座屈(Global)に支配されるケース、(3)局部座屈(Local)に支配されるケースの3パターンが確認された。以下では、(2)のパターンについて概説する。本パターンは C-1、C-3、L-1 の3ケースで確認された。図3は代表的な C-1 の結果であり、(a)荷重-軸方向変位の関係と座屈発生点、および(b)代表的な板要素の表裏のひずみを示す。

図3(a)に示すように、荷重の増大と共に腐食率がまずは左フランジで局部座屈が発生し、その後も右フランジとウェブで局部座屈が発生している。ただし、これら局部座屈は耐力の低下に直接にはつながっておらず、最終的には全体座屈(曲げ座屈)により最大耐力が決定されている。図3(b)に示すひずみの変化からは、約100kNを超えた付近で左フランジ表裏のひずみの乖離が大きくなっており、局部座屈を生じたことが確認できる。このように各板要素で局部座屈が生じたものの、最大荷重時には全体座屈が発生していたと推察され、局部座屈の発生が必ずしも最大荷重の決定要因にはなっていない。この理由は、腐食部材における局部座屈が板厚の薄い部分で生じても、断面内で応力再配分されることで耐力が上昇したと推察される。

2. 4 実験における座屈モードの整理

図4に全試験体に対する実験値と全体座屈強度の算定に用いるJohnsonの放物線式に最小断面諸元(断面積および断面二次モーメント)を用いた計算値(=提案式)との比と最大腐食率の関係を示す。最大腐食率40%付近を境にして計算値の評価精度および座屈モードが異なり、両者の関係は最大腐食率が約40%以下で腐食部材の座屈耐力を概ね安全側に評価できるが、一方、最大腐食率が約40%以上では危険側の評価となる傾向を示す。これは、腐食率の増大に伴って局部座屈が発生し、その影響がより強くなるためであり、局部座屈によって曲げに抵抗する有効な断面が減少し、結果として全体座屈強度の算定を対象としたJohnsonの放物線式と実験結果との乖離が大きくなる。図4からは最大腐食率が約40%以下の範囲において実用的な耐力評価式として利用することが可能と言える。

3. 結論

(1)腐食部材の最大耐力の決定要因となる座屈モードを大別すると、全断面降伏後に全体座屈するモード、全断面降

伏に至る前に全体座屈が生じるモード、局部座屈のみにより終局に至るモードの3つのパターンが確認された。

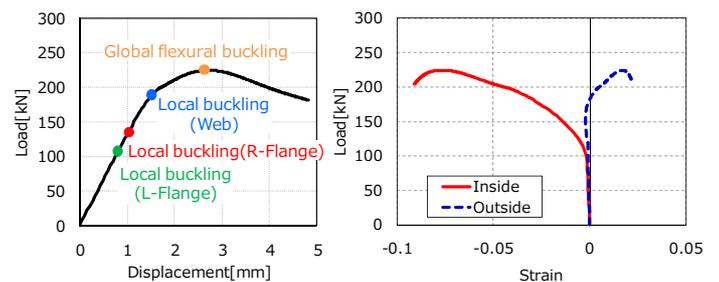
(2)最大腐食率が約40%以下の範囲では、Johnson放物線式による全体曲げ座屈耐力評価式に基づいて腐食した溝形鋼および山形鋼の最大耐力を安全側に評価できる。

参考文献

[1]今福健一郎, 久積和正:腐食劣化したチャンネルおよびアングル部材の圧縮耐力評価検討(その1), 土木学会第66回年次学術講演会, I-671

表1 実験と解析の結果一覧

Name	Ratio of max. area loss to original area [%]	Maximum strength [kN]			(1)/(2)	(3)/(2)	Controlling failure mode
		Experiment (1)	FEM				
			No fixed (2)	Fixed (3)			
C-1	49	204	225	250	0.91	1.11	Global
C-2	43	240	250	260	0.96	1.04	Local
C-3	42	278	308	386	0.90	1.25	Global
C-4	51	209	258	-	0.81	-	-
C-5	50	162	207	-	0.78	-	-
C-6	74	47	89	-	0.53	-	-
C-7	41	305	284	288	1.08	1.02	Local
C-8	49	172	225	-	0.76	-	-
C-9	47	260	266	286	0.98	1.07	Local
C-10	73	109	113	121	0.97	1.07	Local
L-1	57	31	33	39	0.92	1.19	Global
L-2	52	17	50	-	0.33	-	-
L-3	13	150	161	164	0.93	1.02	Yeild
L-4	12	152	162	168	0.94	1.04	Yeild
L-5	59	81	84	86	0.97	1.03	Yeild
L-6	71	31	44	-	0.70	-	-
L-7	22	155	136	-	1.14	-	-
L-8	27	191	190	191	1.01	1.01	Yeild
L-9	12	222	225	227	0.99	1.01	Yeild
L-10	13	231	221	223	1.04	1.01	Yeild
L-11	34	297	294	298	1.01	1.01	Yield
L-12	13	368	312	-	1.18	-	-
L-13	46	186	207	207	0.90	1.00	Yeild
L-14	11	423	349	-	1.21	-	-
L-15	37	237	251	252	0.94	1.00	Yeild
L-16	8	402	362	-	1.11	-	-
L-17	43	210	226	227	0.93	1.01	Yeild



(a)荷重-変位関係と座屈発生点 (b)左フランジの表裏のひずみ

図3 全体座屈に支配されるパターン(C-1)

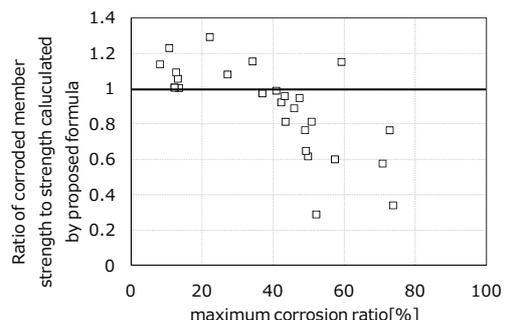


図4 実験値と提案式の比と最大腐食率との関係