

## 腐食減肉を有する短柱鋼部材の局部座屈挙動に関する解析的検討

新日鐵住金(株) 正会員 ○久積 和正 菅野 良一 富永 知徳

### 1. 背景と目的

鋼構造物の構造性能を低下させる主な損傷原因の一つとして腐食が挙げられる。近年、構造物の腐食劣化に伴う事故や損傷事例が多く報告されており、構造物を構成する部材レベルで健全性を評価することは維持管理上の重要課題となっている。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の基本部材である溝形鋼や山形鋼が腐食減肉した場合の挙動に関する研究は少なく、鋼構造物の健全性評価に向けた十分な知見が整っているとは言いがたい。筆者らは、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と FEM 解析を通じて腐食した鋼部材の長柱座屈に関する耐力評価方法<sup>[1]</sup>を提案したが、腐食の増加と共に顕著化する局部座屈の挙動については明確にできていない。本論文では、腐食形状を詳細に反映した数値解析を試み、腐食減肉によって局部座屈が卓越する短柱鋼部材の圧縮挙動のメカニズムを明らかにする。

### 2. 三次元形状を反映した腐食短柱部材の FEM 解析

#### 2.1 FEM 解析概要

屋外で約 40 年間供用されたベルトコンベアフレームから切り出した、腐食した溝形鋼 10 体と山形鋼 17 体を対象とする(表 1)<sup>[1]</sup>。全ての部材について三次元レーザー変位計 (REVscan<sup>TM</sup>, 分解能 0.1mm) で表面形状を縦横 1 mm ピッチで計測しており、その三次元幾何データを使って弾塑性大変形 FEM 解析を実施する。部材の最大腐食率(元断面積に対する欠損断面積の比)は 8~74%と広範囲に渡っている。FEM のモデル化は、減肉部での局所的な腐食や孔食を再現するために、形状計測から得た 1mm ピッチの幾何情報を基に 2mm×2mm サイズのシェル要素で構成した。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。なお、この三次元幾何データには、腐食により生じる部材や板要素の中心軸の変化や腐食前から存在した初期たわみなどの情報も含まれる。

本解析では、短柱として十分に短く、加えて端部の拘束条件が影響を及ぼさないように、部材長 L が断面の最大幅 B の 3 倍となるように設定し(図 1)、腐食部材の最小断面積

$A_{min}$  が短柱の中心に位置するように解析モデルを構成した。ただし、切り出した腐食部材の端部付近に最小断面積が存在する場合は、端部から部材幅 B の 3 倍の長さを取り出してモデル化した。部材端部には平押し条件になるような拘束を与えつつ、部材軸方向に逐次強制変位を与えて、汎用有限要素解析コード MARC を用いた中心軸圧縮解析を行った。材料特性は引張試験結果から求めた真応力-真ひずみ関係を適用した。

#### 2.2 FEM 解析結果

FEM 解析結果の一覧を表 1 に、解析結果の中で代表的な挙動を示した 3 ケース(L-16, C-3, C-7)の荷重/降伏荷重-変位/軸降伏変位 ( $P/P_y - \delta/\delta_y$ ) を図 2 に示す。図 2 には、最小断面位置での断面を構成する板要素 (Flange-R, Flange-L, Web) の負担荷重も併せて示している。なお、断面内の板要素は、図 1 に示すように角部(斜線部)を除いて定義した。図 2 中の▼と○印は最大耐力を示し、特に短柱の最大耐力を決定づけたと考えられる各板要素の最大耐力には●印を記して区別した。

図 2(a) に示す山形鋼 L-16 は、最大腐食率が 8% と比較的小さいケースである。最小断面位置において断面全体が降伏した後に塑性域で局部座屈を生じて耐力劣化に至った。図 2(b) の溝形鋼 C-3 は、最大腐食率が約 40% であり、かなり腐食が進行したケースである。幅厚比パラメータが比較的大きい Flange-R が先行して最大耐力に至っているが、同一断面内の Web と Flange-L に応力再配分されることで部材全体としては荷重が増加し続け、最大耐力に到達した。図 2(c) の溝形鋼 C-7 は、最大腐食率が約 40% であり、Web に孔食を有するケースである。まず Flange-R が最大耐力に達し、続いて Web が局部座屈を生じることで部材全体

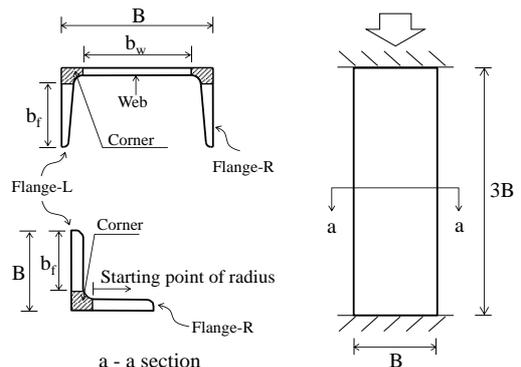


図 1 モデル化と拘束条件

キーワード: 腐食, 鋼部材, 局部座屈, 数値解析, 有効断面積  
 連絡先: 〒293-8511 千葉県富津市新富 20-1 新日鐵住金(株)  
 TEL: 080-4602-1349 FAX: 0439-80-2745

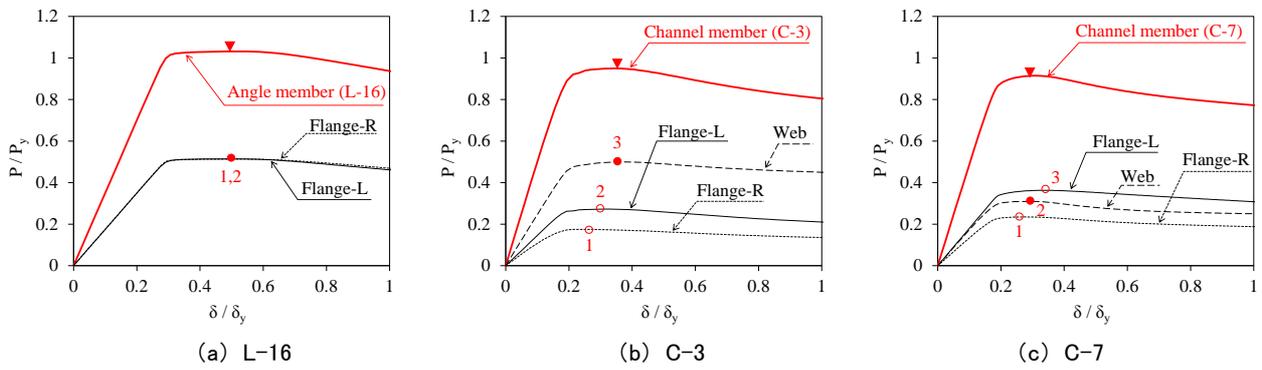


図2 代表ケースの荷重(P/Py)と変位(delta/delta\_y)の関係

としての最大耐力に至った。このとき、Flange-Lは最大耐力に達していないが、最終的に全ての板要素が最大耐力を発揮している。孔食を伴うような腐食の程度が大きなケースでも断面内で応力再分配される様子が確認できた。

2.3 有効幅理論に基づく局部座屈挙動の評価

FEM 解析結果の観察に基づいて、断面内の応力再分配によって有効幅領域が全面降伏して最大耐力に至るとする有効幅理論、ここでは AISI 基準による耐力評価の可能性を検討する。局部座屈挙動は幅厚比の影響を強く受けることが知られている。腐食部材の幅厚比パラメータλpは、腐食した板要素内の平均板厚 t\_ave をベースに次式により求めることとした。

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{\sigma_y}{\sigma_{cr}}} = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{b}{t_{ave}} \cdot \sqrt{\frac{12(1-\nu^2) \cdot \sigma_y}{kE}} \quad (1)$$

ここで、座屈係数 k は、溝形鋼と山形鋼のフランジに対して 3 辺単純支持の k=0.425 を適用し、溝形鋼のウェブでは 4 辺単純支持の k=4 とした。孔食を有するウェブは孔食側を自由端とする 3 辺単純支持板として k=0.425 を適用した。

有効幅理論(AISI 基準)に基づく耐力推定値 Pe は次のように計算した。まず、部材軸方向に 2mm ピッチで与えられる幾何情報より幅厚比パラメータ λp (最大値を λp^max とする)を求め、板要素毎の有効断面率 ρ を算出する。次に、有効断面率を基に算出した各板要素の有効断面積に角部面積の合算値を有効断面積 Ae とする。最後に、部材軸方向の有効断面積の最小値 Ae^min と降伏強度 σy を乗ずることで Pe を求める。図 3 には、FEM 解析の最大耐力 PFEM を Pe で除した比率 PFEM/Pe と最大腐食率 Rmax との関係を示す。孔食に伴う抵抗機構の変化により過度に安全側となるケースもあるが、PFEM/Pe の平均値 1.06、変動係数 12.2% であり、概ね最大耐力を評価可能である。この事実、腐食した部材に対しても有効幅理論が適用できることを示している。

3. まとめ

(1) 腐食の無い健全部材と同様に、腐食した短柱部材にお

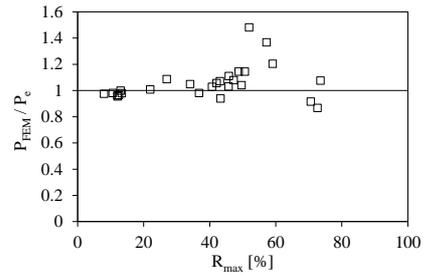


図3 有効幅理論を適用した耐力推定精度

表1 実験と解析の結果一覧

Case	Yield stress [N/mm <sup>2</sup> ]	Original members					Corroded members				Calculated strength [kN]
		Section size [mm]					Min. cross-section [mm <sup>2</sup> ]	Max. corrosion ratio [%]	Max. width-thickness ratio	Max. strength [kN]	
		bw	bf	tw	tf	A <sub>min</sub>					
C-1	307	125	65	6	8	876	49	2.51	246	215	
C-2	307	125	65	6	8	970	43	2.01	262	279	
C-3	307	125	65	6	8	991	42	1.63	299	283	
C-4	307	125	65	6	8	845	51	2.20	244	213	
C-5	307	125	65	6	8	861	50	1.47	221	213	
C-6	307	125	65	6	8	452	74	1.12	91	84	
C-7	307	125	65	6	8	1,014	41	1.85	296	288	
C-8	307	125	65	6	8	872	49	1.73	255	230	
C-9	307	125	65	6	8	903	47	3.07	267	248	
C-10	307	125	65	6	8	468	73	4.06	102	117	
L-1	325	50	50	-	4	167	57	2.22	49	36	
L-2	325	50	50	-	4	187	52	2.20	39	27	
L-3	304	50	50	-	6	489	13	0.55	153	156	
L-4	304	50	50	-	6	496	12	0.53	153	159	
L-5	304	50	50	-	6	231	59	2.06	75	62	
L-6	304	50	50	-	6	166	71	1.84	35	38	
L-7	304	50	50	-	6	440	22	0.66	137	136	
L-8	338	65	65	-	6	549	27	0.98	183	168	
L-9	327	65	65	-	6	662	12	0.74	205	215	
L-10	327	65	65	-	6	655	13	0.75	210	211	
L-11	311	75	75	-	9	837	34	0.85	270	258	
L-12	311	75	75	-	9	1,110	13	0.57	346	358	
L-13	311	75	75	-	9	689	46	1.20	203	197	
L-14	311	75	75	-	9	1,134	11	0.55	358	365	
L-15	311	75	75	-	9	802	37	0.77	242	247	
L-16	311	75	75	-	9	1,167	8	0.52	365	374	
L-17	311	75	75	-	9	722	43	1.00	224	209	

いても断面内で応力再分配挙動を示すことが分かった。

(2) 有効幅理論(AISI 基準)に基づいて腐食短柱の最大耐力の評価を試みた。部材中の有効断面積の最小値に基づくことで、概ね耐力評価が可能であることを確認した。

参考文献

[1] 久積ら: 自然腐食した溝形鋼および山形鋼の中心軸圧縮挙動とその強度評価, 鋼構造論文集, 第23巻第91号, pp.1-15, 2016.9