腐食した圧縮鋼補剛板の終局強度評価法

Evaluation of Ultimate Compressive Strength of Corroded Stiffened Steel Plates

奈良　敬*　　井上　尚也**　　松永　光示***　　竹内　正一****
Satoshi NARA　　Naoya INOUE　　Kohji MATSUNAGA　　Shoichi TAKEUCHI

*工博　大阪大学大学院工学研究科教授　工学研究科地球総合工学専攻（〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1）
**　大阪大学大学院博士前期課程　工学研究科地球総合工学専攻（〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1）
***工修 鹿島建設（株）関西支店　国道 9 号京都西工事事務所（〒615-8085　京都市西京区桂千代原町 65）
****　日本橋梁（株）橋梁本部　大阪設計部（〒675-0164　兵庫県加古郡播磨町東新島 3）

In order to estimate the ultimate strength of corroded steel members, FEM analysis is one of the most effective tool. On the other hand, however, it is required to show a simple and precise method to estimate existing ultimate strength of steel structural members making use of measured data on corrosion. This paper proposes a useful method of evaluating the ultimate compressive strength of corroded stiffened steel plates. At first, numerical analysis is carried out based on the following parameters, corroded plate thickness, corroded positions in the plate, and plate slenderness parameter, and so on. Secondary, equivalent plate thickness of the corroded plate, which is obtained by an original weighted function, is modified. Finally, proposed is a convenient column approach for predicting the ultimate strength of the corroded stiffened steel plate with a longitudinal stiffener, and validity of this proposal is demonstrated.

Keywords：corroded stiffened steel plate, ultimate compressive strength, evaluation method
キーワード：腐食補剛鋼板，終局圧縮強度，評価法

１．概要

鋼橋の老朽化の加速と延命化の要請により，腐食した鋼橋の残存強度評価が重要となっている．残存強度の評価は，実際の腐食状況に基づいて行われなければならないが，数値計算を用いるにしろ簡単な照査法を利用するにしろ，局部的な腐食による板座屈の影響を把握していくことが不可欠である．これまで，腐食パターンを想定していくつかの評価法が提案されている[1-11]が，全面腐食や特定の腐食ケースが主で，種々のケースについて精度の高い評価法が見られないのが現状であると思われる．

そこで，本研究は，トラス橋などの柱部材を構成する縦補剛材を１本有する圧縮補剛板を対象として，板座屈挙動に影響を与える座屈パラメータや初期不整に加えて，腐食位置をパラメータとして数値計算を実施し，腐食位置が終局強度に与える影響について定量的に明らかにし，実際的かつ精度の高い残存強度の評価法を提案することを目的として実施したものである．

２．解析モデル

２．１　解析手法

初期たわみと残留応力を考慮した圧縮補剛板を対象にして，腐食による残留応力の再分配を考慮した弾塑性有限変位解析プログラム CYNAS[9]を用いて，数値計算を行った．本研究の残留応力再分配の精度に関しては，文献 9)に基づいている．

腐食により断面が減少すれば，板の断面において，腐食による断面の減少部分が持っていた残留応力が解放され再分配される．この残留応力の再分配により，初期たわみ量も変化すると考えられる．

本研究では 8 節点アイソパラメトリックシェル要素を用いて，滑らかな板厚欠損を表現するとともに，板厚欠損部が有していた残留応力を残存部の節点に等価節点力として作用させることにより腐食板のモデル化を行っている．

２．２　構造諸元

鋼板の極限強度は幅厚比パラメータ R や縦横比 α などの力学的パラメータにより左右され，次式で表される幅厚比パラメータを変化させて解析モデルを設定する．

$$R = \frac{b}{t}\sqrt{\frac{\sigma_Y}{E}} \cdot \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 k}} \qquad (1)$$

ここに，R : 幅厚比パラメータ，b : 板幅，t : 板厚，σ_Y : 降伏応力, E : ヤング率, ν : ポアソン比, k : 座屈係数 (=4)，である．座屈係数 k は周辺単純支持板の場合には 4.0 である．

鋼種は溶接用鋼材 SM490Y を用い，表 - 1 に機械的性質を示す．各材料定数は公称値を用いる．構成式は完全弾塑性体と仮定する．

表-2 には構造諸元を示し, 図-1 に縦方向に補剛された補剛板の平面図及び断面図を示す．幅厚比パラメータを 0.3 から 0.8 まで変化させ，板幅は一定とし，板厚は幅厚比パラメータより算出した．縦横比は補剛板全体で 2.5, 板パネルで 5.0 とする．補剛材について，道路橋示方書に定める必要剛比を満たす剛度とし，局部座屈を先行させないよう幅厚比パラメータを 0.3 とした．さらに，腐食による最大減厚が初期板厚の 10%, 20%, 30% となるように最大減厚率（以下、最大腐食率と呼ぶ）を設定した．

２．３　板厚減少形態

図-2 に本解析で仮定した腐食の板厚減少形態を示す．TYPE 1～4 はトラス橋の上下弦材や水平材などの部材中央での滞水を想定し，長さ方向の中央に最大腐食位置がくるような片面腐食形態を考える． TYPE 5～8 はトラス橋の斜材における端部への滞水など想定し，長さ方向の端部の片面に最大腐食位置がくるような腐食形態を考える．また，本研究では板パネルにおける局部的な腐食の影響を定量的に評価できる手法を提案することを目的としているため，補剛材に腐食が生じるケースは考慮していない．板厚の減少形態は，最大減厚量を腹とするように正弦波，余弦波を長さ方向および幅方向に掛け合わせることにより考慮する．

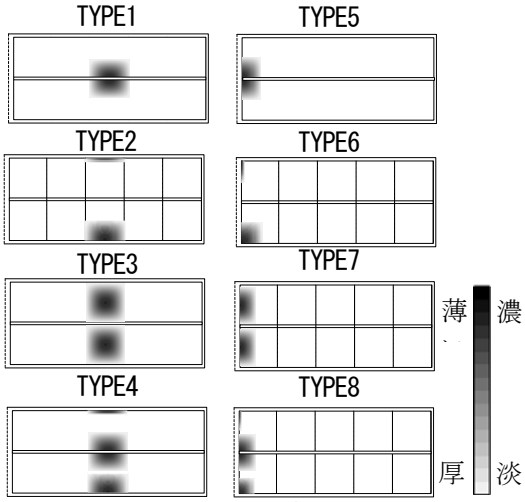


図-2 腐食モデル

２．４　初期不整

（１）初期たわみ

最大値が補剛板全体で a/1000，板パネルで b/150 で表現される正弦波形を橋軸・橋軸直角方向に導入する．縦補剛材の初期たわみの最大値は h_r/150 とする．

（２）残留応力 [12)]

圧縮残留応力 σ_{rc}＝－0.3σ_Y とし，図-3 に解析で導入す

表－1　機械的性質

鋼種		SS400
降伏点	σ_Y	245 N/mm^2
弾性係数	E	2.0×10^5 N/mm^2
ポアソン比	ν	0.3

表-2　構造諸元

項目	記号	値					
幅厚比パラメータ	R	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
幅厚比	$b\ /\ t$	27.1	36.1	45.1	54.2	63.2	72.2
板厚	t	51.7	38.8	31.0	25.9	22.2	19.4
板幅	b	1400					
板長	a	3500					
縦横比	α	2.5(板パネル5.0)					
補剛材高	hr	160	211	225	193	170	152
補剛材厚	tr	35.0	47.0	50.0	43.0	38.0	34.0
断面積比	δs	0.08	0.18	0.26	0.23	0.21	0.19
補剛材幅厚比パラメータ	Rs	0.3					
補剛材剛比	$\gamma\ /\ \gamma req$	1					
腐食率	$(t_0 - t_{min})/t_0$	10%, 20%, 30%					

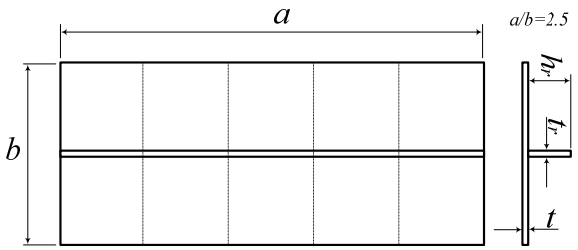
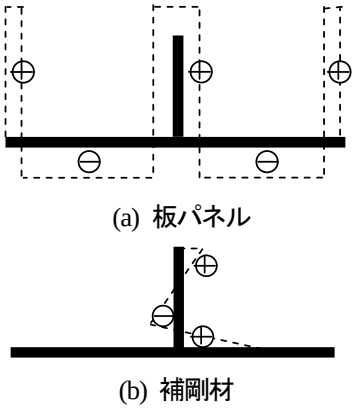


図-1　解析対象とした補剛板（周辺単純支持）



残留応力	
σ_{rt}/σ_Y	1.00
σ_{rc}/σ_Y	−0.30
$\sigma_{rt,\ r}/\sigma_Y$	0.60
$\sigma_{rc,\ r}/\sigma_Y$	−0.20

図-3　残留応力分布図

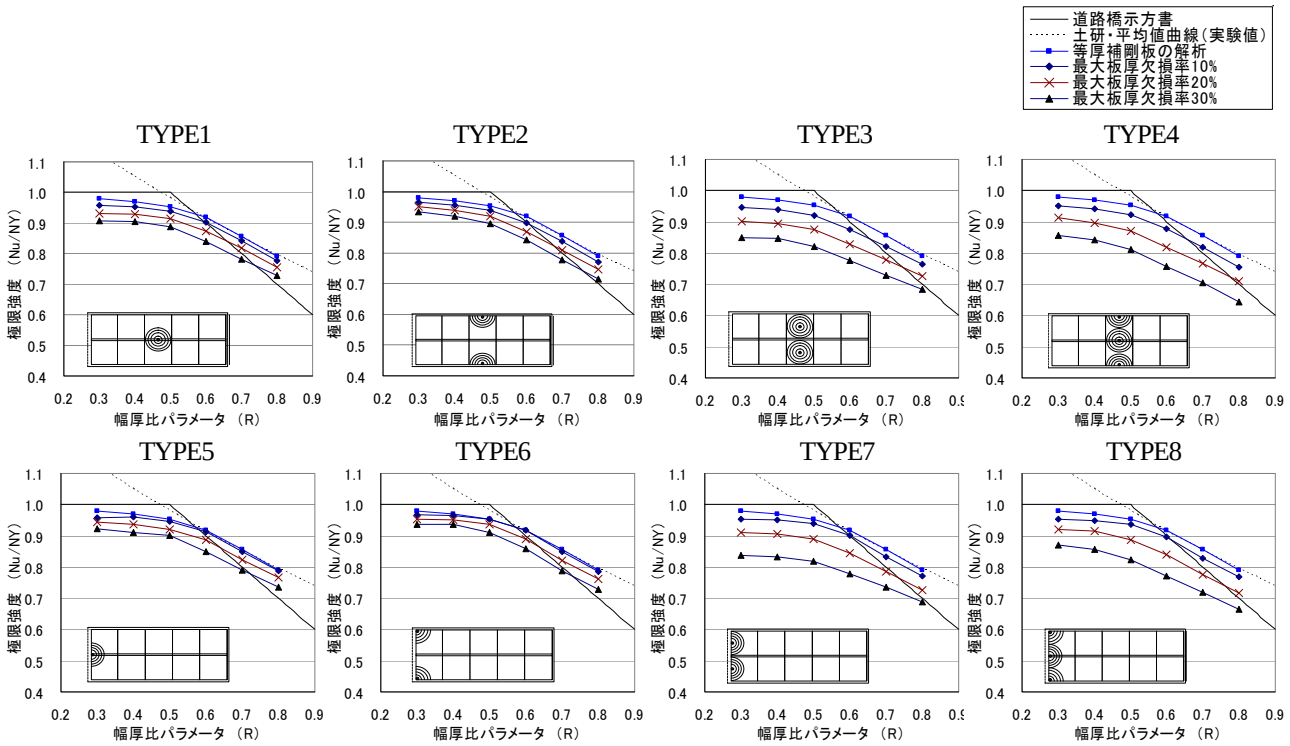


図-4　圧縮強度曲線（TYPE1～TYPE8）

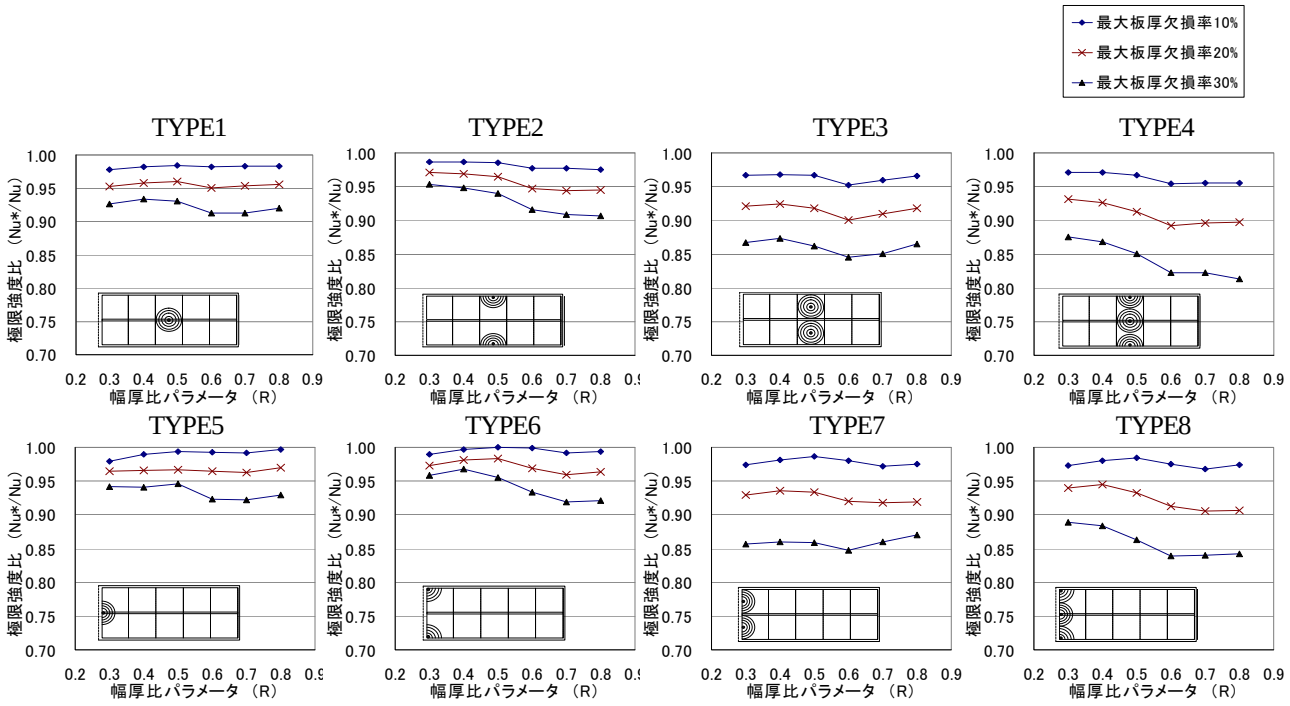


図-5　圧縮強度比曲線（TYPE1～TYPE8）

る残留応力分布を示す．これは，補剛板全体で自己平衡を満たすように定めた．

3．　数値計算結果と考察

3．1　腐食補剛板の圧縮強度特性

図-4 に，TYPE1~TYPE8 の圧縮強度曲線を示す．横軸は腐食前の板厚を用いて算出した幅厚比パラメータ R，縦軸は終局強度を降伏強度で無次元化した値 N_u/N_Y を示している．幅厚比パラメータの十分小さなモデルでは，どの TYPE の腐食モデルも，座屈の影響がないため，極限強度は最大腐食断面の断面積の減少量により決まる．一方，幅厚比パラメータが大きくなるに従って，最大腐食の位置により強度低下の度合いは異なっており，側辺部に最大腐食位置があるモデルの方が，中央部に最大腐食位置があるモデルと比べて強度低下が大きい．これは，

座屈後は側辺部の応力負担が増大するため，側辺部での板厚の減少は補剛板の終局強度に大きな影響を与えるためである．

また，図-5 に 圧縮強度比曲線を示す．縦軸は腐食前の強度に対する腐食後の強度比 N_u^*/N_u，横軸は幅厚比パラメータ R を示す．図から中央腐食モデルと端部腐食モデルを比較すると，最大板厚欠損量を与える断面が同じモデル（例えば TYPE1 と TYPE5）では強度低下の傾向が似ていることがわかるが，わずかに中央腐食モデルよりも端部腐食モデルの方が強度上昇している．よって，初期たわみが最大となる中央に腐食が生じると，強度低下が最大となることがわかる．

３．２　終局状態の挙動

腐食補剛板の破壊モードとして，座屈を起こさずに最大腐食断面が降伏して終局状態に至るのか，座屈を起こしてから終局状態に至るのか，あるいは座屈と降伏がほぼ同時に起こって終局状態に至るのかの 3 種類に大別できる．一例として腐食 TYPE3・腐食率 30%の幅厚比パラメータが 0.4，0.8 のモデルで示す．

図-6 は図中に示した着目点である板パネル中央での荷重たわみ関係を示す．横軸は着目点のたわみを初期たわみ許容値である 150/b で無次元化した値を表す．図-7 には，図中に示した着目点における板パネルの表側のひずみ（$\varepsilon_{c,u}$）および裏側のひずみ（$\varepsilon_{c,l}$）と，荷重との関係を示し，横軸はひずみを降伏ひずみで無次元化した値を示す．R=0.4 では板パネルの表側，裏側のひずみが終局状態に至るまで圧縮方向に推移しているのに対し，R=0.8 では表側のひずみが終局状態に近づくにつれて圧縮から引張に推移しているのが見て取れる．さらに，R=0.8 の板パネル中央のたわみが R=0.4 に比べ，途中から急増していることから，R=0.8 では腐食位置で局部座屈を起こし，そして最大腐食断面において座屈後に応力を負担する支持辺が降伏したことによって終局状態に至っている．また，R=0.4 では，座屈を起こす前に，最大腐食断面が降伏し終局状態に至っている．

上述のような考察に基づき，TYPE 1～8 の腐食率 30%の腐食補剛板がどのような破壊モードを示すかをまとめて整理した結果を表-3 に示す．この表から，幅厚比パラメータが 0.5 以下では，どの腐食タイプでも座屈せず最大腐食断面が降伏し終局状態となり，幅厚比パラメータが 0.7 以上では，どの腐食タイプでも腐食損傷を受ける板パネルにおいて，局部座屈し最大腐食断面が降伏し終局状態になり，幅厚比パラメータが 0.6 では腐食タイプによって破壊モードが異なることがわかる．よって，本研究で仮定した腐食量の範囲内では，座屈変形の影響の小さい厚板では最小断面が他の断面より先行して全断面降伏し終局に至るため，腐食形状が耐荷力低下に与える影響は小さいといえるが，座屈変形の影響が顕著に見られる薄板では，座屈変形後は支持辺部が応力を負担する

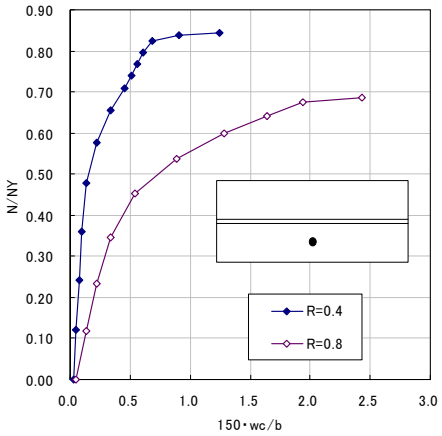


図-6　荷重-たわみ関係

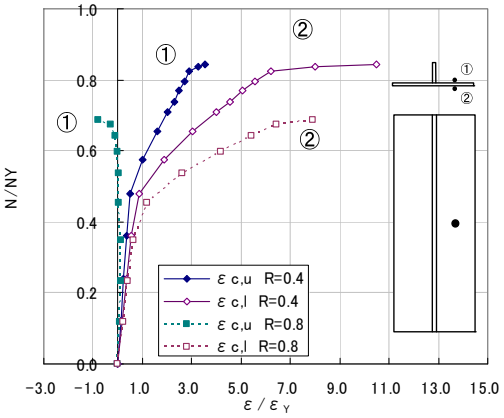


図-7　荷重-ひずみ関係

表-3　破壊モード

	R					
	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
type1	Y	Y	Y	Y	B	B
type2	Y	Y	Y	Y	B	B
type3	Y	Y	Y	C	B	B
type4	Y	Y	Y	C	B	B
type5	Y	Y	Y	Y	B	B
type6	Y	Y	Y	Y	B	B
type7	Y	Y	Y	B	B	B
type8	Y	Y	Y	B	B	B

Y:Yielding（座屈せずに断面が降伏し終局状態になる）

B:Buckling（座屈して断面が降伏し終局状態になる）

C:Combined（座屈と断面降伏がほぼ同時に起こり終局状態になる）

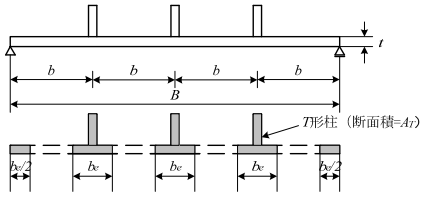


図-8　多リブモデルアプローチ

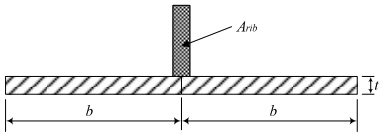


図-9　少数補剛板多リブモデル

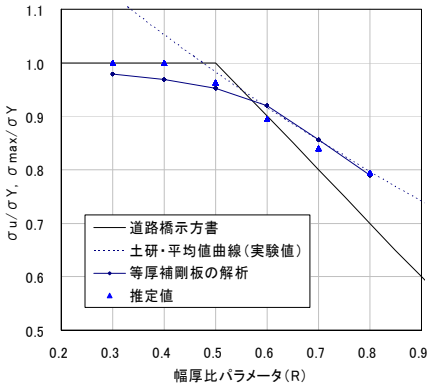


図-10　等厚補剛板の圧縮強度曲線

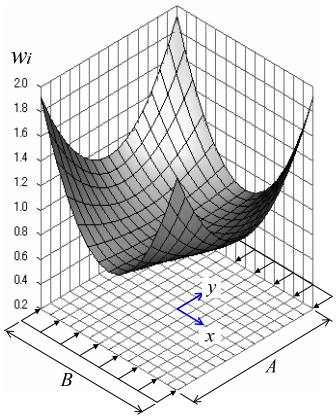
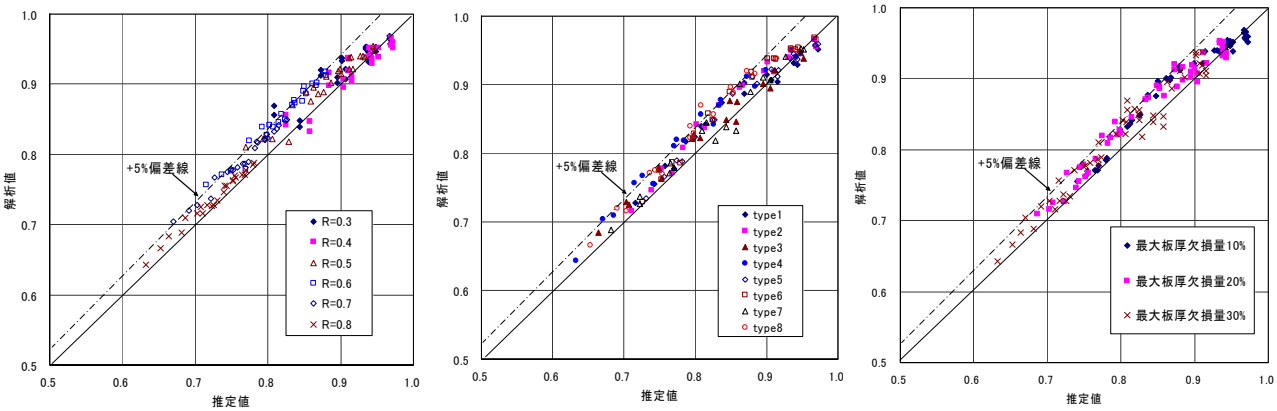


図-11　重み関数曲面



(a)　幅厚比パラメータによる分類　　(b)　腐食形態による分類　　(C)　腐食率による分類

図-12　残存強度推定値と解析値の比較

ため，側辺部の板厚欠損は終局強度を大きく低下させることになり，腐食形状が終局強度に与える影響は大きいといえる．

4．腐食補剛板の残存強度評価法の提案

4．1　多リブモデル

補剛板の残存強度評価には多リブモデルアプローチ[13]を用いる．多リブモデルアプローチは図-8 に示すように補剛板を板パネルの有効幅部分と縦補剛材の有効部分からなる T 形柱の集合とみなして，耐荷力を求める方法である．多リブモデルアプローチによると，同じ縦補剛材が等間隔に配置された補剛板が一様圧縮を受ける場合の終局強度は次式で与えられる．

$$(\tilde{N}_u)_{n_l>2} = \left\{ \frac{\sigma_u}{\sigma_Y} n_l A_T + bt \left(\frac{\sigma_u}{\sigma_Y} \right)_{plate} \right\} \sigma_Y \qquad (2)$$

ここに，$(\tilde{N}_u)_{n_l>2}$：推定強度，σ_u：多リブモデルの終局応力，σ_Y：降伏応力，n_l：縦補剛材本数，A_T：図-8 に示す T 形柱の断面積，b：縦補剛材間隔，t：板厚，$(\sigma_u/\sigma_Y)_{plate}$：幅厚比 b/t）の単純支持板の終局圧縮強度．

しかし，この手法は，縦補剛材が 3 本以上の補剛板（以下，多補剛板と呼ぶ）の場合に有効な手法であり，補剛材本数が 2 本以下の補剛板（以下，少補剛板と呼ぶ）の耐荷力評価法が提案されていない．そこで，まず，多リブモデルアプローチを拡張して 1 本の縦補剛材で補剛される圧縮板の極限強度を推定できる手法を検討する．

4．2　多リブモデルによる強度評価法の拡張

多補剛板での耐荷力評価手法が少補剛板で有効な手法でない理由は，多補剛板と少補剛板とでは，終局状態における縦補剛材の応力レベルが，側辺の支持条件の影響により，異なるためである．多補剛板は終局状態における縦補剛材の応力レベルが比較的低いが，少補剛板の場合には縦補剛材が降伏応力まで達し終局状態を迎えるためである．よって，本研究では，次の仮定を設定することにより 1 本の縦補剛材で補剛される圧縮板の耐荷力評価手法とする．

① 縦補剛材と側辺間のパネル（板パネル）の圧縮強度は，4 辺単純支持板の圧縮強度と等しい．

② 縦補剛材の幅厚比を 0.3 としてモデルを設定したこ

とから，終局状態では縦補剛材の全断面が降伏している．

以上の仮定を設定することにより，1 本の縦補剛材で補剛される圧縮板の終局強度は次式で表される．また，図-9 に少補剛板の多リブモデルを示す．

$$\tilde{N}_u = \left\{ A_s + 2bt\left(\frac{\sigma_u}{\sigma_Y}\right)_{plate} \right\}\sigma_Y \qquad (3)$$

ここに，$\tilde{N}_u$ ：推定強度，A_s：補剛材断面積である．

4 辺単純支持板の圧縮強度曲線には，下限値曲線 [14] を示す次式を用いる．

$$\left(\frac{\sigma_u}{\sigma_Y}\right)_{plate} = \begin{cases} =1.0 & (R \le 0.453) \\ =(0.453/R)^{0.495} & (R \ge 0.453) \end{cases} \qquad (4)$$

式(3)で得られる終局圧縮強度の推定精度を把握するため，他の基本強度曲線と比較した結果を図-10 に示す．数値計算結果とは，多少傾向が異なるが，実験結果と比較しても，精度よく推定できている．

４．３　等価板厚（重み付き平均板厚）算出方法

腐食補剛板の圧縮強度特性から，腐食位置によって強度低下量が異なることがわかった．よって，腐食損傷パネルの局部座屈強度を適切に評価することで，腐食補剛板の残存耐荷力を評価できると考える．よって，腐食損傷パネルの強度評価指標として，極限強度を最小断面平均板厚で整理した上で，幅厚比パラメータを等価板厚（重み付き平均板厚）により評価する手法を用いる．

腐食鋼板から n 個の任意の板厚測定データが得られたとき，任意の測定点 i の座標を(x_i,y_i)，板厚を t_i とする．残存強度は腐食位置に依存する仮定から，任意の座標の板厚欠損が残存強度に及ぼす影響を，任意点の板厚に重み付けすることで考慮する．位置の関数である重み w_i を掛け合わせて求められる板厚 $t_i \times w_i$ の平均板厚を等価板厚 t_{eq} と定義し，式(5)のように表される．

$$t_{eq} = \frac{\sum_{i=1}^{n} t_i \cdot w_i(x_i, y_i)}{n} \qquad (5)$$

重み関数は，等価板厚により求まる推定強度が等厚板の強度曲線に最も近くなるように，推定差の最小自乗和を最小とすることで決定した．重み関数曲面は式(6)で表され，図-11 に示すような曲面となる [15]．

$$w_i = 12.48\left(\frac{x}{A}\right)^2\left(\frac{y}{B}\right)^2 + 1.24\left(\frac{x}{A}\right)^2 + 0.12\left(\frac{y}{B}\right)^2 + 0.80 \qquad (6)$$

ここに，A：板長，B：板幅である．

４．４　腐食補剛板の残存強度評価法

以上から，腐食補剛板の残存強度評価式を以下のように提案する．

$$\tilde{N}_u = \left\{ A_s + 2bt_{eq}\left(\frac{\sigma_u}{\sigma_Y}\right)_{plate} \right\}\sigma_Y \qquad (7)$$

4 辺単純支持板の圧縮強度曲線には，導入した初期不整に相当する強度を与える下限値曲線 [14]として、次式を用いる．

$$\left(\frac{\sigma_u}{\sigma_Y}\right)_{plate} = \begin{cases} =1.0 & (R \le 0.453) \\ =(0.453/R)^{0.495} & (R \ge 0.453) \end{cases} \qquad (8)$$

式(8) 中の幅厚比パラメータ Rは，式(5) で与えられる等価板厚 t_{eq} を用いて，次式から計算する．

$$R = \frac{b}{t_{eq}}\sqrt{\frac{\sigma_Y}{E}\cdot\frac{12(1-\mu^2)}{\pi^2 k}} \qquad (9)$$

図-12 は推定値と解析値の比較を示している．図-12 から残存耐荷力の推定結果は，最大で+7.57%（安全側），最小で-2.83%（危険側），平均が+2.15%，標準偏差が2.0%となった．これらの結果から本手法を用いて残存耐荷力を推定できる可能性があることがわかった．今後更なるデータの蓄積，また，任意の全面腐食形状に対しても本手法がどこまで適用可能であるかを検討することが必要であると考えられる．

５．結論

腐食損傷を有する圧縮補剛板に対して弾塑性有限変位解析を行い，その結果より得られた事柄を列挙する．

(1) 腐食損傷を有する縦補剛材 1 本の補剛板の圧縮強度特性に関して

a) 補剛板の極限強度は幅厚比パラメータの小さい厚板の場合，最大腐食を有している最小断面積の断面が降伏することにより決まる．幅厚比パラメータの大きい薄板の場合，腐食を有している断面の板パネルにおける局部座屈による負担応力の減少と断面積の欠損による影響により，補剛板の極限強度に大きな影響を与える．

b) 板パネル中央の圧縮残留応力域に最大腐食を有している場合よりも，側辺や縦補剛材付近の引張残留応力域に最大腐食を有している場合，幅厚比パラメータが大きくなるにつれて強度が低くなる傾向がある．腐食位置の違いによる強度低下が確認できた．

(2) 腐食補剛板の残存強度評価に関して

c) 補剛板を縦補剛材と板パネルに分割し，補剛材は全断面降伏を仮定し，腐食した板パネルに関して，重み付け平均板厚（等価板厚）を用いて，残存強度を評価する手法を提案した．

d) 提案した本手法の解析により推定した結果，最大

+7.57%（安全側）, 最小-2.83%（危険側）, 平均+2.15%, 標準偏差2.0%となる. これらの結果から本手法を用いて残存耐荷力を推定できる可能性があることがわかった. 今後更なるデータの蓄積が必要であると考えられる.

参考文献

1) 松本勝，白井義朗，中村幾雄，白石成人：腐食鋼材の有効板厚評価法の一提案, 橋梁と基礎, Vol.23No12, pp19-25, 1989.12.
2) 亀井義典，西村宣男，村上茂之：板厚減少に伴う初期不整の変化を考慮した圧縮板の強度，土木学会第46回年次学術講演会概要集，pp.160-161. 1991.9.
3) 村上茂之，西村宣男，亀井義典：腐食被害を受けた周辺単純支持板および自由突出板の圧縮強度特性, 土木学会第47回年次学術講演会概要集，pp.232-233, 1992.9.
4) 村上茂之，西村宣男，亀井義典：腐食鋼板の等価板厚算定に関する一考察, 土木学会第48回年次学術講演会概要集，pp.220-221, 1993.9.
5) 西川和廣，村越潤，松木孝之，名取暢，照山修，橋本和夫，奥嶋猛：腐食部材の板厚測定法と静的強度の評価に関する検討, 土木学会第49回年次学術講演会概要集，Ⅰ，pp.522-523. 1994.9.
6) 羽島克利, 藤井堅:腐食した鋼板の残存耐荷力評価, 土木学会第 49 回年次学術講演会概要集，Ⅰ，pp.524-525, 1994.9.
7) 大野崇，名取暢，稲田育朗：腐食部材の健全度評価に関する研究，横河ブリッジグループ技報，No.27, pp.82-94, 1998.1.
8) 村上昭典，皆田理，藤井堅：腐食鋼板の表面性状と残存耐荷力，土木学会，構造工学論文集，Vol.44A, pp.1063-1071, 1998.3.
9) 西村佳大，竹内正一，村上茂之，西村宣男：腐食損傷を有する圧縮板の極限強度解析法，日本鋼構造協会, 鋼構造年次論文報告集, 第12巻, pp.123-128, 2004.
10) 海田辰将，藤井堅，中村秀治：腐食したフランジの簡易的な圧縮強度評価法，土木学会論文集，No.766/I-68, pp.59-71, 2004.
11) 杉浦邦正，田村功，渡邊英一，伊藤義人，藤井堅，野上邦栄，永田和寿：腐食鋼板の圧縮強度の簡易評価法に関する検討，土木学会論文集 A, Vol.63, No.1, pp.43-55,2007.
12) 小松定夫，北田俊之：初期不整を有する圧縮板の極限強度特性に関する研究，土木学会論文報告集，第270号，pp.1-14，1978.
13) 奈良敬：縦補剛材で補剛された連続圧縮板の極限強度の評価法，土木学会，構造工学論文集，vol.38A，pp.223-230，1992.3.
14) Nara, S. and Fukumoto, Y. : Evaluation of Ultimate Strength of Steel Plates under In-plane Combined Loading, Proc. of Pacific Structural Steel Conference, AISC, Gold Coast, pp.450-460, 28-31 May, 1989.
15) 松永光示，奈良敬，竹内正一：腐食した圧縮鋼板の終局強度評価法，日本鋼構造協会，鋼構造年次論文報告集，第16巻，2008年11月（掲載予定）.

（2008年9月18日受付）