

大阪大学大学院工学研究科 学生員 ○SYPHAVANH Songkeo
 大阪大学大学院工学研究科 正会員 奈良 敬

1. はじめに

現在、日本で利用されている橋梁は、1950 年代後半から 1970 年代にかけての高度経済成長期に建設されたものが多く、損傷や老朽化が進んでいるものが少なくない。特に、建設後 50 年以上の鋼橋は全体の 40% を占める。鋼橋の損傷のうち、腐食による損傷の場合、力学的根拠に基づく健全度を適切に評価する手法の確立が求められている。既往の研究では、腐食被害を受けた鋼板を対象として、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、実際のかつ精度の高い残存耐荷力評価法が提案¹⁾されているが、この評価法は縦横比 $\alpha=1$ の場合のみ適用が限定され、縦横比が変化した場合に、適用できるかどうかは不明である。よって、本研究では縦横比の変化が腐食損傷を有する鋼板の終局圧縮強度特性を明らかにしつつ、その評価法の適用範囲の拡大を図ることを目的とする。

2. 解析手法

初期たわみと残留応力を同時に考慮した圧縮板を対象として、腐食による残留応力の再分配を考慮できる、本研究のために開発された弾塑性有限変位解析プログラム CYNAS を用いて、数値計算を行った。

2.1 解析モデル

(1) 構造諸元

鋼板の終局圧縮強度は幅厚パラメータ R や縦横比 α などの力学的パラメータにより左右される。無補剛板の幅厚比パラメータ R は次式で表される。

$$R = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_Y}{E}} \cdot \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 k}} \quad (1) \quad \begin{cases} \sigma_{rc} = \sigma_Y \\ \sigma_{rc} = -0.3\sigma_Y \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 b : 板幅、 t : 板厚 $k=4$ は座屈係数である。

表-1 に示すように鋼種は、SM400 を用い、完全弾塑性体として応力-ひずみ曲線を仮定し、各材料値は公称値を用いる。表-2 に示すように、数値計算で用いる幅厚比パラメータ ($R=0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3$ の 11 ケース)、最大減厚率 ($C_f=10\%, 20\%, 30\%$ の 3 ケース)、腐食パターン (12 ケース) の合計 396 の解析モデルについて数値計算を行った。

表-1 機械的性質

Steel Grade		SM400
Yield Stress	σ_Y (N/mm ²)	235
Poisson's Ratio	ν	0.3
Young's Modulus	E (N/mm ²)	2.1×10^5

(2) 板厚減少形態

図-1 に本解析で仮定した腐食の板厚減少形態を示す。TYPE1-a, TYPE1-b, TYPE2-a, TYPE2-b, TYPE3-a, TYPE3-b 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。TYPE4-a, TYPE4-b, TYPE5-a, TYPE5-b, TYPE6-a, TYPE6-b 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。板厚の減少形態は、最大減厚量を最大値となるように 1 半波の正弦波、余弦波を長さ方向および幅方向に掛け合わせる二重三角級数により与える。最大減厚率は $C_f=10\%, 20\%, 30\%$ を用いて数値解析を行った。

2.2 初期不整

(1) 初期たわみ

道路橋示方書で規定されている許容値を参考に、最大値が板幅 b の $1/150$ となる、長さ方向に正弦 3 半波形の初期たわみを考慮する。

(2) 残留応力

残留応力は腐食前に板の載荷方向のみに、自己平衡になるように矩形分布として導入する。残留引張応力度 σ_{rc} および残留圧縮応力度 σ_{rc} は式(2)に示す値とする。

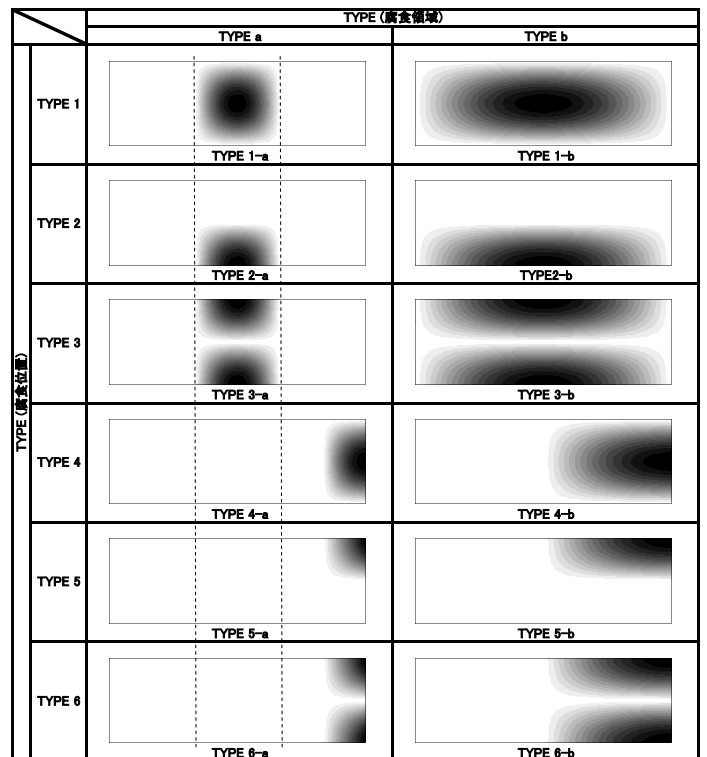


図-1 腐食形態

表—2 構造諸元

Plate Slenderness Parameter	R	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3
Initial Thickness	t_0 (mm)	41.052	30.789	24.631	20.526	17.594	15.394	13.684	12.316	11.196	10.263	9.473
Width-Thickness Ratio	β	17.052	22.735	28.419	34.103	39.787	45.471	51.155	56.839	62.523	68.206	73.890
Width of Plate	b (mm)						700					
Aspect ratio of Plate	α						3					
Length of Plate	a (mm)						2100					
Maximum Rate of Reduced Thickness	C_i						10%, 20%, 30%					

3. 解析結果と考察

図—2と図—3に、得られた終局強度曲線 (TYPE3-a,TYPE3-b) を示す。赤色で示す曲線は本研究で得られた腐食のない圧縮板の終局強度である。青、緑、紫色の各曲線は腐食損傷を受けた曲線を示す。本解析で得られた腐食鋼板の終局圧縮強度曲線は、腐食のない圧縮板の終局強度よりも低下しているが、板減厚 (腐食量) の影響による終局強度の低下は、最大減厚率に従って大きくなるものの、幅厚比パラメータや最大減厚率、腐食パターンにより、大きく異なることが明らかになっている。

図—2と図—3により、最大減厚率 $C_i=10\%$ の場合は終局強度 TYPE3-a と TYPE3-b の低下量はあまり差異が現れない。しかし、最大減厚率 $C_i=20\%, 30\%$ の場合、TYPE3-a の終局強度の低下量は TYPE3-b の低下量より小さくなっている。これは TYPE3-b の腐食領域が TYPE3-a の腐食領域よりも大きく広がっているため、側辺部の板厚欠損により、板中央部が降伏後、側辺部での支持力が低下するためである。このことから腐食形状が終局強度に影響を与え得ると言える。

4. 腐食鋼板の残存耐荷力評価法

既往の研究で提案された等価板厚による終局強度評価式を次式で表す。

$$\left(\frac{N_u}{N_Y}\right) = \left(\frac{\sigma_u}{\sigma_Y}\right)_{plate} \cdot \frac{A_{eq}}{A_0} = \left(\frac{\sigma_u}{\sigma_Y}\right)_{plate} \cdot \frac{t_{eq}}{t_0} \quad (3)$$

4 辺単純支持板の圧縮強度曲線には、下限値曲線を示す。

$$\left(\frac{\sigma_u}{\sigma_Y}\right)_{plate} = \begin{cases} 1 & R_{eq} \leq 0.435 \\ \left(\frac{0.453}{R_{eq}}\right)^{0.495} & R_{eq} \geq 0.435 \end{cases} \quad (4)$$

等価板厚の幅厚比パラメータ R_{eq} 、等価板厚 t_i 、重み関数 w_i を以下のように定義する。

$$R_{eq} = \frac{b}{t_{eq}} \sqrt{\frac{\sigma_Y}{E}} \cdot \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 k}} \quad (5) \quad t_{eq} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i \cdot w_i(x_i, y_i)}{n} \quad (6)$$

$$w_i(x, y) = f_1(\bar{C}_i, R) \left(\frac{x}{A}\right)^2 \left(\frac{y}{B}\right)^2 + f_2(\bar{C}_i, R) \left(\frac{x}{A}\right)^2 + f_3(\bar{C}_i, R) \left(\frac{y}{B}\right)^2 + f_4(\bar{C}_i, R)$$

$$f_1(\bar{C}_i, R) = 135.05R^2\bar{C}_i - 152.29R^2 - 191.95R\bar{C}_i - 41.59\bar{C}_i + 136.84R - 79.90$$

$$f_2(\bar{C}_i, R) = 18.82R^2\bar{C}_i + 0.63R^2 - 21.53R\bar{C}_i - 4.76\bar{C}_i + 4.64R - 1.22$$

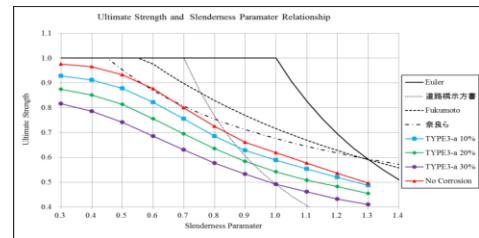
$$f_3(\bar{C}_i, R) = 15.04R^2\bar{C}_i - 6.03R^2 - 18.76R\bar{C}_i - 4.11\bar{C}_i + 8.02R + 9.26$$

$$f_4(\bar{C}_i, R) = -3.76R^2\bar{C}_i + 1.51R^2 + 4.69R\bar{C}_i + 1.03\bar{C}_i - 2.01R + 0.89 \quad (7)$$

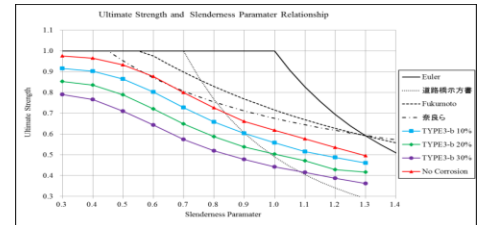
図—4には、数値計算により得られた終局強度と、既に提案された推定方法²⁾により得られた終局強度の推定値を比較した結果を示す。この図により、 $\alpha=3$ の場合でも残存耐荷力の推定値の誤差はほぼ 10%程度であるが、さらに精度の改善の可能性があると考えられる。

5. おわりに

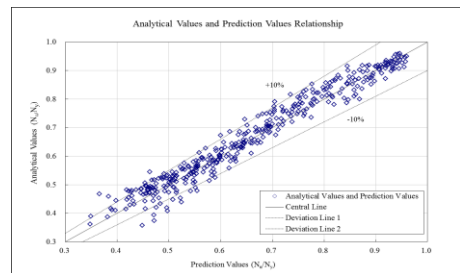
縦横比が腐食損傷を有する鋼板の終局強度に与える影響を把握し、既に提案済みの評価法で残存耐荷力を推定した。しかし、解析値と推定値の誤差を 5%程度以下に抑えることを目標として、重み関数の適用の改善を進めることが今後の課題と考えている。



図—2 終局強度の曲線 (TYPE3-a)



図—3 終局強度の曲線 (TYPE3-b)



図—4 推定結果 (等価板厚)

【参考文献】 1) 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, 鋼構造年次論文報告集, 第 16 巻, 2008 年 11 月。 2) 奈良 敬, 井上尚也, 松永光示, 竹内正一: 腐食した圧縮鋼補剛板の終局強度評価法, 構造工学論文集, Vol. 55A, 2009 年 3 月。