

Ⅱ型ラーメン橋の腐食による耐力劣化挙動と補強設計に関する一考察

豊田工業高等専門学校 正会員 川西直樹 名古屋工業大学 正会員 後藤芳顕

1. まえがき ライフサイクルコストを考慮した今後の性能照査型設計においては構造物の長期間にわたる力学性能の変化を定量的に予測する必要がある。すでに著者らは、腐食や補修による部材断面の変化に起因した供用期間における力学性能変化を直接的に予測するため、部材断面の変化量を荷重や変位などと同等の制御パラメータとして扱う新しい構造解析手法を開発した^{1),2)}。これによると、腐食や補修による鋼構造物の力学性能変化を建設当初から時系列的に直接かつ正確に把握できるうえ、地震などの大きな外乱による損傷や補修などの履歴も考慮でき、構造物の全供用期間における統一的な力学性能評価が可能となる。図-1 は供用期間中における鋼橋の耐力の時系列的な変化を模式的に示したものである。このように、供用開始時より死荷重が載荷された状態において時間の経過とともに腐食などにより橋全体の耐力は徐々に低下する。一般にはこの腐食による劣化が進行し通常の使用時において問題が生じると想定される時に補強が施される。ただし、この補強を施すための判断基準となる腐食進行時の耐力の算定が現在までのところその決定的な手法が確立していない。これまでのところ腐食状態の実測結果を基に、断面欠損した部位の断面積と設計時の断面積との比から発生応力を類推し、その値をもって補強の必要性の判断をしているのが現状である。さらに、このために施される補強の考え方としては、腐食断面部が当初設計時の断面積や断面二次モーメントなどの断面性能を確保するという程度である。しかしながらこのような簡易的な手法では、①腐食の進行時に常に作用する死荷重が存在し、この影響により応力の再配分が生じるが、上記手法では死荷重載荷後に生ずる腐食過程の影響を考慮していないこと、②補強材の初期応力は零であるが、供用当初の部材には死荷重による初期応力が作用するが、上記の補強設計ではこの点を無視していること、③腐食の進行が著しい場合にはこれによる部材の塑性化や大変形による幾何学的な非線形性の影響が生じるが、上記手法はこの点を無視していることなどの問題点が挙げられる。そこで本研究では、文献 1),2)で示した死荷重載荷状態から腐食による断面減少過程およびその後の補強材の効果を正確に取り扱うことのできる弾塑性有限変位理論に基づいた有限要素法を利用して、Ⅱ型ラーメン橋を対象とした腐食による断面減少が生じるときの耐力の劣化挙動を解析し、そのメカニズムについて考察する。さらに、補修を施した場合の耐力を算定し、これと従来までの補強による結果を比較することで、一般の補強設計の妥当性について考察する。

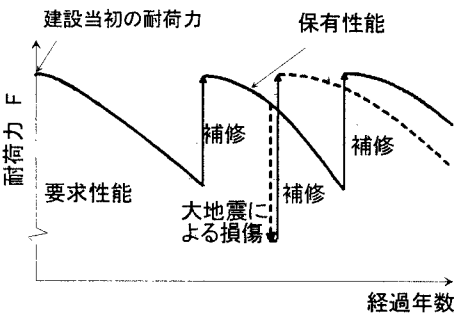


図-1 耐力の経年変化

2. 腐食過程を考慮した弾塑性有限変位解析 文献 1),2)に示した腐食過程を考慮した弾塑性有限変位解析手法について簡単に述べる。死荷重載荷状態における応力、ひずみ、変位、断面積および外力をそれぞれ $\sigma_{ij}, \epsilon_{ij}, u_i, A, f_i$ とする。この状態から断面積が ΔA 減じ、さらに同時に外力が Δf_i だけ増加したとき、弾塑性有限変位解析の基礎方程式となる増分型仮想仕事の原理を表現すると次のようになる。

表-1 基本的な解析ケース

	step1	step2	step3	備考
Case 0	死荷重 A_0	死荷重 $A_0 \rightarrow (1-\beta)A_0$ (断面減少)		腐食に関する終局挙動の解析
Case 1	死荷重 A_0	死荷重 $A_0 \rightarrow (1-\beta)A_0$ (断面減少)	死荷重 + 活荷重 $(1-\beta)A_0$	腐食後のある場合の残存耐力の計算
Case 2	死荷重 A_0	死荷重 $A_0 \rightarrow (1-\beta)A_0$ (断面減少)	死荷重 + 活荷重 $(1-\beta)A_0 \rightarrow A_0$ (補修)	腐食前と幾何学的に等価な断面に補修したときの耐力計算
Case 3	死荷重 $(1-\beta)A_0$	死荷重 + 活荷重 $(1-\beta)A_0$		従来の手法による腐食のある場合の残存耐力の近似計算
Case 4	死荷重 A_0	死荷重 + 活荷重 A_0		腐食のない場合の耐力の計算

注 1) A_0 : 腐食前の断面積

注 2) β : 断面減少率, $\beta = \frac{\text{腐食により減少した部材断面積}(\Delta A)}{\text{腐食前の部材断面積}(A_0)}$

$$\int_0^L \int_{A-\Delta A} (\sigma_{ij} + \Delta\sigma_{ij}) \delta(e_{ij} + \Delta e_{ij}) dAdL = (f_i + \Delta f_i) \delta(u_i + \Delta u_i) \quad (1)$$

上式に変位関数を代入し、整理すると荷重載荷状態から腐食による断面変化を連続的に考慮した接線剛性方程式が得られる。ここでは平面骨組要素を対象に離散化を行い、この要素を用いて検討を行う。

3. 数値計算例 図-2に検討対象とするII型ラーメン橋を示す。材料はいずれも SS400 とし、Bilinear 型の構成則とする。このときの降伏応力 σ_y は 235(MPa)、ヤング係数 E は 206000(MPa) とし、降伏後の 2 次勾配は $E/100$ とする。主桁に載荷する死荷重は 0.035(MN/m) とし、脚柱にはこれを考慮しない。活荷重は B 活荷重とし、 p_1 を脚柱と主桁の左側接合部直上に集中荷重とし、 p_2 は主桁に満載する。基本的な解析ケースを表-1 に示す。考慮する腐食タイプは、①主桁全域の断面、②脚柱全域の断面、③全部材の断面がそれぞれ均一に腐食により減少する 3 種類のタイプについてその終局挙動を解析する。

4. 解析結果 各部材断面減少タイプに対応して、断面減少率 β (腐食により減少した部材断面積/腐食前の部材断面積) と主桁スパン中央の鉛直変位の関係を図-3 に示す。これより、腐食タイプ①では、この図の範囲において明瞭なピーク点は認められず、断面減少により徐々に変位が増加して崩壊に至る。腐食タイプ③では、タイプ①と $\beta = 0.5$ 程度まではその経路は類似している。しかし、断面減少率 β が 0.8 を少し越えたところで断面減少のピークを迎えている。これ以上断面が減少すると、構造物は圧縮部材である脚柱の不安定挙動で崩壊に至る。腐食タイプ②では、減少率 β が約 0.87 付近まで構造物は安定であり、剛性の低下も少ない。しかしながら、変形が増加する前にタイプ③でのピーク点変位の 30% 程度の変位でピーク点に到達している。これは、圧縮部材である脚柱の断面減少で、分岐型の座屈による急激な不安定挙動が生じたことによると考えられる。これらの結果から、腐食による断面減少が主桁のみに生ずる場合には不安定挙動は生じにくい、脚柱に腐食が及ぶと、この II 型ラーメン橋は大きな変形が生ずる前に急激な不安定崩壊に至る可能性のあることがわかる。図-4 に Case1,3 の荷重-変位曲線を示す。Case1 の解析では死荷重載荷までは断面減少が無く死荷重が満載後、断面を減少させているため、一定の死荷重下で変位のみが増加している。一方、Case3 では初期形状として腐食により減少した断面の構造を無応力状態で与え、その後死荷重を漸増しているため死荷重満載までの荷重-変位曲線が Case1 と異なっている。しかしながら、死荷重満載時には、いずれの腐食タイプ、断面減少率においても Case1 と Case3 のつり合い点は数値的には一致しており、その後の荷重-変位曲線も一致している。この結果、得られる残存耐荷力も数値的には同一である。図-5 に Case2,4 の荷重-変位曲線を示す。腐食による断面を補修した構造では、荷重-変位曲線は腐食による断面減少で生じた変位増分のずれが生じる以外、活荷重を付加したときの荷重-変位曲線は腐食のない構造物のそれとほとんど差は生じておらず、耐荷力の差はない。

参考文献：1)後藤芳顕，川西直樹：鋼構造物の腐食による断面減少と補強過程を考慮した耐力の解析法について，第 55 回土木学会年次講演会，I-A126，

2)後藤芳顕，川西直樹：腐食や補修の影響を考慮した構造物の長期間の力学性能評価のための構造解析法の開発，土木学会論文集投稿中

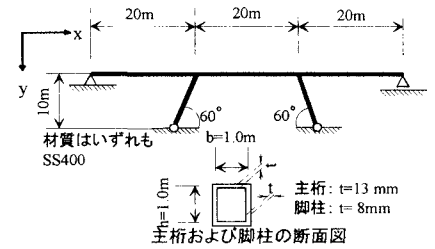


図-2 II型ラーメン橋の寸法諸元

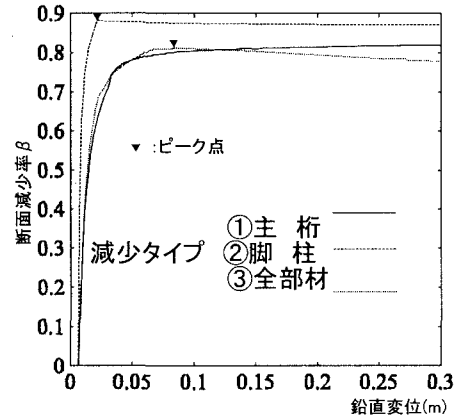


図-3 II型ラーメン橋の断面減少率-鉛直変位曲線

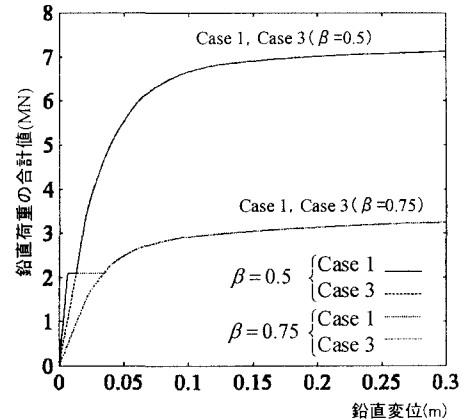


図-4 II型ラーメン橋の荷重-変位曲線(①主桁の腐食)

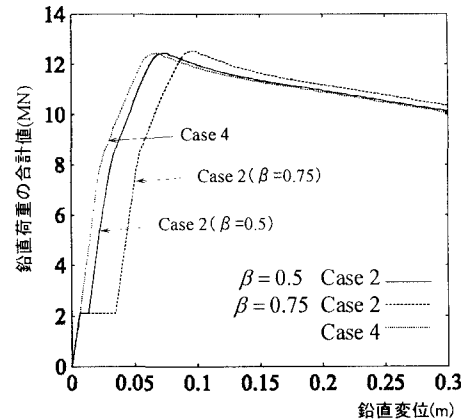


図-5 II型ラーメン橋の荷重-変位曲線(①主桁の腐食)