

腐食や補修の影響を考慮した長期間の 力学性能評価のための構造解析法の開発

後藤芳顯¹・川西直樹²

¹正会員 工博 名古屋工業大学教授 工学部社会開発工学科 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

²正会員 工修 豊田工業高等専門学校助手 環境都市工学科 (〒471-8525 豊田市栄生町2-1)

ライフサイクルを考慮した性能照査設計や既存構造物の維持管理や補修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評価する必要がある。本論文では、腐食や補修による部材断面の変化に起因した鋼構造物の供用期間における力学性能変化を直接的に評価するため、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。この解析手法によると、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。

Key Words: corrosion, retrofitting, life cycle, performance-based design, structural analysis

1. まえがき

ライフサイクルを考慮した性能照査設計や既存構造物の維持管理や補修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評価する必要がある。構造物のある時点で力学性能を正確に評価するためには、その構造物が過去に受けた各種損傷とその補修の履歴を考慮することが重要である。既存構造物の力学性能を評価するより直接的な方法としては現場計測や載荷実験等があるが、近年、各種の計測手法が開発されている¹⁾。しかしながら、現状においてはこのような計測だけで既存構造物の力学性能を正確に評価するのは難しく、補完するための何らかの解析的な手法を開発する必要がある^{2,3)}。とくに、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ためには、解析的な手法の開発はより重要である。従来、腐食した構造物の耐力を評価する場合、単に、腐食による断面減少分を考慮した初期形状を与え、通常の荷重増分法や変位増分法などの耐力力解析により評価されている^{4,5)}。しかしながら、実際には供用開始時から常に死荷重が載荷されたまま腐食による断面減少が進行し、さらに補修もこの状態で行われる場合が多いため、構造物の構成部材が受ける荷重履歴はかなり異なったものになっており、従来の耐力評価法が妥当であるか必ずしも明らかでない。

ここでは、鋼構造物の劣化の要因として重要な腐食による耐力低下の過程および補修による耐力復元の過程等の履歴を正確に考慮し、建設の初期状態から将来に至る

まで構造物の力学性能の変化を時系列的に追跡しうる解析手法を検討する。このような解析手法として矛盾のないものであるためには、制御パラメータとして従来の構造解析で用いられている荷重や変位の他に腐食や補修による部材断面の変化量を新たなパラメータとして用いる必要があるが、このような断面変化量を制御パラメータとした解析法は著者の知る範囲ではない。本研究の特徴は、腐食や補修による部材断面の変化量をそのまま荷重や変位などと同等の制御パラメータとして扱う全く新しい構造解析手法を提案することにある。この解析手法によると、腐食や補修による鋼構造物の力学性能変化の履歴を時系列的に直接かつ正確に把握できる。さらに、構造物の供用期間における地震などの大きな外乱による損傷の補修などの履歴も正確に考慮できる。本解析手法におけるこれらの機能により、腐食などの日常的な劣化とともに、まれな事象である大地震による損傷や補修などの履歴も考慮した鋼構造物の全供用期間における統一的な力学性能の評価が可能となる。

2. 腐食・補修の履歴と構造物の力学性能評価

図-1 は鋼橋の供用開始時から腐食進行時、補修時の耐力(保有性能)の変化を模式的に図示したものである。供用開始時から常に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による部材断面減少が進行し、その耐力が徐々に低下していく。供用開始時の耐

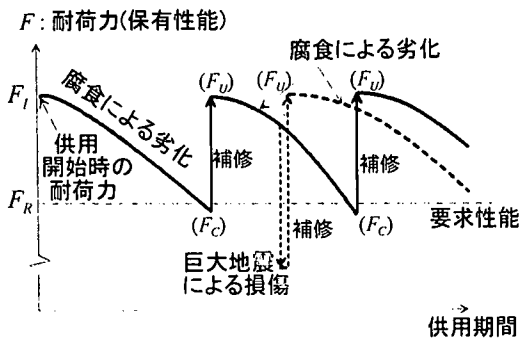


図-1 腐食の進行と補修による耐荷力の変化

荷力を F_1 とし、腐食進行時の耐荷力を F_C とすると、 $F_1 > F_C$ となる。腐食による劣化が進行し、耐荷力 F_C が要求性能 F_R 以下になり、安全性に問題が生じると想定されるときに腐食箇所に対する補修が施される。補修時には、それまで構造物が受けた腐食や荷重の履歴が影響するため、部材断面を幾何学的に建設当初の状態に復元しても補修後の耐荷力 F_U が建設当初の状態 F_1 に復元しているか否かは必ずしも明らかではない。構造物が現在保有している力学性能を正確に把握するためには、過去の腐食や補修履歴さらに荷重履歴を、時系列的に考慮し、力学性能の評価に反映させる必要がある。しかしながら、現状の力学性能の評価法においては以下のような問題点を有している。

- ①腐食進行時の耐荷力 F_C については、単に、腐食による断面減少分を考慮した初期形状を与え^{9), 5)}、供用開始時の耐荷力 F_1 の評価と同様に、通常の荷重増分法や変位増分法などの耐荷力解析により評価されている。実際には死荷重が存在した状態で部材断面が減少していくので、荷重履歴が異なっている。
- ②地震等の大きな外乱による損傷を補修するとき、構造物中には損傷に起因した残留応力や残留変形が存在しているが、これらが補修後の力学性能に与える影響は無視されている。
- ③死荷重が載荷した状態で補修する場合には、補修部分の材料に関しては、補修後における初期応力は零で、その他の部分には死荷重による応力および変形が発生しているが、これらが力学性能に与える影響は無視されている。

このような腐食や補修による力学性能の変化を正確に評価するためには、腐食や補修による部材断面の変化を荷重や変位などとともに構造解析の制御パラメータとして考慮することが重要であり、これにより直接的、かつ統一的に構造物の供用期間中における性能の変化を評価することができる。

3. 腐食および補修による部材断面変化を考慮した平面骨組の複合非線形解析

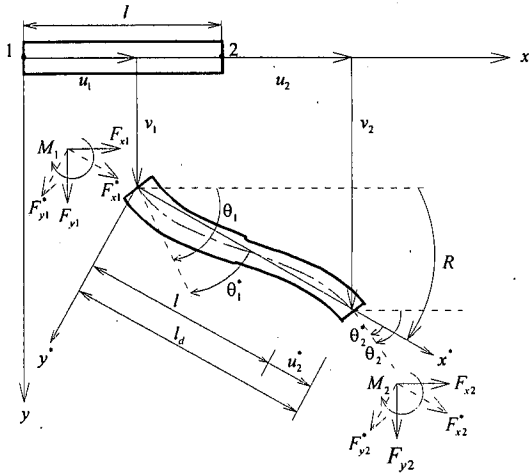
ここでは、最も基本的な平面骨組を対象に、腐食や補修による部材断面の変化を荷重や変位などとともに構造解析の制御パラメータとした新しい複合非線形解析法（幾何学的非線形解析+材料的非線形解析）を示す。本解析は有限要素法に基づくもので、幾何学的非線形解析は有限ひずみ・有限変位の解析解に収束する剛体変位除去の手法(Co-rotational Method)⁶⁾を用い、材料的非線形解析は要素内での塑性領域の進展を塑性領域理論(Plastic zone theory)で考慮している。

(1) 部材断面変化を考慮した要素接線剛性方程式

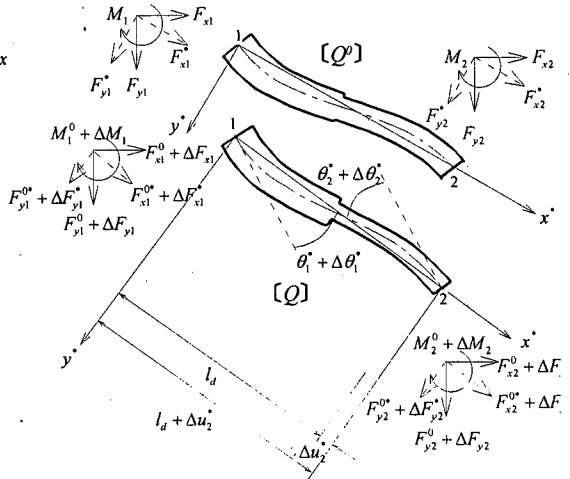
平面骨組要素の幾何学的非線形解析には剛体変位除去の手法を用いる⁶⁾。このとき、図-2(a)に示すように2つの座標系を導入する。座標系 (x, y) は初期状態での骨組要素の節点1の断面図心を原点に軸線方向に x 軸を選ぶ空間固定直交直線座標であり、以後この座標系を空間固定要素座標系と呼ぶ。 (u, v) はそれぞれ要素断面図心の x, y 方向並進変位成分、 θ はたわみ角であり、 (F_x, F_y, M_i) はそれぞれ、節点 i における節点力の x, y 方向成分、および節点モーメント成分を表す。もう一つの座標系 (x^*, y^*) は要素の剛体変位とともに移動する直交直線移動座標系(Co-rotational coordinates)であり、変形後の要素に対して定義される。すなわち、座標の原点は変形後の節点1にとり、 x^* 軸の方向は変形後の節点1, 2を結ぶ方向に選ぶ。以後この座標系を移動要素座標系と呼ぶ。移動要素座標系に関する剛体変位を除去した要素断面図心の変位成分を (u^*, v^*, θ^*) と表す。

図-2(b)のように既知のつり合い状態 (Q^0 状態) から、部材の断面形状、節点力ならびに節点変位が変化し、新たなつり合い状態 (Q 状態) に至った場合を考える。このとき、 Q^0 状態の断面形状、節点力、節点変位を $A^0, (F_{xi}^0, F_{yi}^0, M_i^0), (u_i^0, v_i^0, \theta_i^0)$ 、また Q 状態の対応する諸量を $A, (F_{xi}, F_{yi}, M_i), (u_i, v_i, \theta_i)$ とする。 Q^0 および Q 状態において系はつり合い状態にあるので、それぞれ以下のような仮想仕事の原理が成立する。

$$\begin{aligned}
 [Q^0] \delta \Pi^0 &= \int_0^l \int_A \sigma_x^0 \delta e_x^0 dA dx \\
 &\quad - \sum_{i=1}^2 (F_{xi}^0 \delta u_i^0 + F_{yi}^0 \delta v_i^0 + M_i^0 \delta \theta_i^0) = 0 \\
 [Q] \delta \Pi &= \int_0^l \int_A \sigma_x \delta e_x dA dx \\
 &\quad - \sum_{i=1}^2 (F_{xi} \delta u_i + F_{yi} \delta v_i + M_i \delta \theta_i) = 0
 \end{aligned}
 \tag{1.a,b}$$



(a) 座標系と物理量の定義



(b) 増分量の定義

図-2 平面骨組要素の定義

なお、ここでは静的に断面変化が生じる場合について考慮しているが、断面変化速度の影響を考慮する場合には、慣性力および減衰力の項を式(1.b)に追加すれば、その影響を考慮することは可能である。一般に腐食による断面変化速度は非常に遅く、時間効果は無視できるので、静的な扱いで実用上十分である。

断面形状、節点力および変位の変化が微小である場合、 Q 状態の諸量は Q^0 状態の諸量を用い、次のように表現することができる。なお、 Q^0 から Q への変化が微小でない場合は、この変化区間を分割し、各分割区間での変化が微小と見なせるようにすれば良い。

$$\begin{aligned} F_{xi} &= F_{xi}^0 + \Delta F_{xi}, F_{yi} = F_{yi}^0 + \Delta F_{yi}, M_i = M_i^0 + \Delta M_i \\ u_i &= u_i^0 + \Delta u_i, v_i = v_i^0 + \Delta v_i, \theta_i = \theta_i^0 + \Delta \theta_i \\ \sigma_x &= \sigma_x^0 + \Delta \sigma_x, e_x = e_x^0 + \Delta e_x \\ A &= A^0 + \Delta A, \delta \Pi = \delta(\Pi^0 + \Delta \Pi) = \delta \Delta \Pi \end{aligned} \quad (2.a \sim j)$$

ここで上記における Δ は微小変化量を表す。そして、式(2.a~j)を式(1.b)に代入し、整理すると下式が得られる。

$$\begin{aligned} \delta \Delta \Pi &= \int_0^l \int_{A^0 + \Delta A} \Delta \sigma_x \delta(e_x^0 + \Delta e_x) dA dx \\ &+ \int_0^l \int_{\Delta A} \sigma_x^0 \delta(e_x^0 + \Delta e_x) dA dx \\ &- \sum_{i=1}^2 (\Delta F_{xi} \delta \Delta u_i + \Delta F_{yi} \delta \Delta v_i + \Delta M_i \delta \Delta \theta_i) \\ &- \left\{ \sum_{i=1}^2 (F_{xi}^0 \delta \Delta u_i + F_{yi}^0 \delta \Delta v_i + M_i^0 \delta \Delta \theta_i) \right. \\ &\left. - \int_0^l \int_{A^0} \sigma_x^0 \delta(e_x^0 + \Delta e_x) dA dx \right\} = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、軸方向ひずみ e_x を移動要素座標系の変位成分で表すと剛体回転の除去によりたわみ角は $\theta^0 \ll 1$ であるから次のようになる。

$$e_x \cong u' - yv'' \quad (4)$$

ここで、 $(\cdot)'$ 、 $(\cdot)''$ はそれぞれ x に関する1階および2階微分を表す。上式より、式(3)のひずみの変分量は、以下のように表される。

$$\delta(e_x^0 + \Delta e_x) = \delta \Delta u' - y \delta \Delta v'' \quad (5)$$

式(5)を式(3)に代入して整理する。

$$\begin{aligned} \delta \Delta \Pi &= \int_0^l \int_{A^0 + \Delta A} \Delta \sigma_x (\delta \Delta u' - y \delta \Delta v'') dA dx \\ &+ \int_0^l (\Delta N_{\Delta A} \delta \Delta u' - \Delta M_{\Delta A} \delta \Delta v'') dx \\ &- \sum_{i=1}^2 (\Delta F_{xi} \delta \Delta u_i + \Delta F_{yi} \delta \Delta v_i + \Delta M_i \delta \Delta \theta_i) \\ &- \left\{ \sum_{i=1}^2 (F_{xi}^0 \delta \Delta u_i + F_{yi}^0 \delta \Delta v_i + M_i^0 \delta \Delta \theta_i) \right. \\ &\left. - \int_0^l (N^0 \delta \Delta u' - M^0 \delta \Delta v'') dx \right\} \\ &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、

$$N^0 = \int_A \sigma_x^0 dA, M^0 = \int_A \sigma_x^0 y dA \quad (7.a,b)$$

$$\Delta N_{\Delta A} = \int_{\Delta A} \sigma_x^0 dA, \Delta M_{\Delta A} = \int_{\Delta A} \sigma_x^0 y dA \quad (8.a,b)$$

$\Delta N_{\Delta A}$, $\Delta M_{\Delta A}$ はそれぞれ部材断面積の変化により生ずる断面力の変化分であり、いままでの骨組要素の定式化では考慮されなかった項である。 ΔA は、腐食により断面が減少する場合は負の値をまた補修により断面が増加する場合は正の値をとる。また、 σ_x^0 は腐食により断面が減少する場合は断面減少前における減少部分の作用応力に対応し、補修により断面が増加する場合は、増加部分にプレストレスを導入しない場合はゼロとなる。

式(6)を離散化するために、移動座標系における変位成分(u^* , v^*)には文献7)に提示した次のような変位関数を用いる。

$$u^* = \varphi u_2^* \quad , \quad v^* = \phi_1 \theta_1^* + \phi_2 \theta_2^* \quad (9.a,b)$$

$$\phi_1 = -\frac{3}{2l}x^2 + x, \quad \phi_2 = -\frac{1}{2l}x^2 \quad \left(0 \leq x \leq \frac{l}{2}\right)$$

$$\phi_1 = \frac{l}{2}\left(\frac{x}{l}-1\right)^2, \quad \phi_2 = \frac{l}{2}\left(\frac{x}{l}-1\right)\left(3\frac{x}{l}-1\right) \quad \left(\frac{l}{2} \leq x \leq l\right)$$

$$\varphi = x/l \quad (10.a\sim e)$$

これらの関数により、軸方向ひずみは要素内の長手方向の1/2領域でそれぞれ一定ひずみになるので、要素断面がこの領域でそれぞれ一定とすると x 方向の数値積分が不要になる。

材料の接線係数を E_i とすると応力増分とひずみ増分間の構成則は以下のように表される。

$$\Delta \sigma_x = E_i \Delta e_x \quad (11)$$

式(9),(11)を式(6)に代入し、整理すると次のようになる。

$$\begin{aligned} \delta \Delta \Pi &= \delta \Delta d_i^* (K_{ij}^* \Delta d_j^* + \Delta f_{\Delta A_i}^*) \\ &\quad - \delta \Delta d_i (F_i^0 + \Delta F_i) + \delta \Delta d_i^* \cdot f_i^{*0} = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

ここに、

$$\{\Delta d_i^*\} = \{\Delta \theta_1^*, \Delta u_2^*, \Delta \theta_2^*\}$$

$$\{\Delta d_i\} = \{\Delta u_1, \Delta v_1, \Delta \theta_1, \Delta u_2, \Delta v_2, \Delta \theta_2\}$$

$$\{\Delta f_{\Delta A_i}^*\} = \left\{ -\int_0^l \Delta M_{\Delta A} \phi_1'' dx, \int_0^l \Delta N_{\Delta A} \varphi' dx, -\int_0^l \Delta M_{\Delta A} \phi_2'' dx \right\}$$

$$\{f_i^{*0}\} = \left\{ -\int_0^l M^0 \phi_1'' dx, \int_0^l N^0 \varphi' dx, -\int_0^l M^0 \phi_2'' dx \right\}$$

$$\{F_i^0\} = \{F_{x1}^0, F_{y1}^0, M_1^0, F_{x2}^0, F_{y2}^0, M_2^0\}$$

$$\{\Delta F_i\} = \{\Delta F_{x1}, \Delta F_{y1}, \Delta M_1, \Delta F_{x2}, \Delta F_{y2}, \Delta M_2\} \quad (13.a\sim f)$$

$K_{ij}^*(3 \times 3)$ は式(6)の右辺第一項から求められる移動要素座標系における接線剛性マトリックスである。

固定要素座標系と移動要素座標系における変位成分の増分量間の関係は図-2の簡単な幾何学的考察により、

$$\Delta d_i^* = T_{Rij} \Delta d_j \quad (14)$$

$$T_{Rij} = \begin{bmatrix} \frac{\sin R}{l_d} & \frac{\cos R}{l_d} & 1 & \frac{\sin R}{l_d} & -\frac{\cos R}{l_d} & 0 \\ -\cos R & -\sin R & 0 & \cos R & \sin R & 0 \\ \frac{\sin R}{l_d} & \frac{\cos R}{l_d} & 0 & \frac{\sin R}{l_d} & \frac{\cos R}{l_d} & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\cos R = (u_2 - u_1 + l) / l_d \quad (16.a,b)$$

$$\sin R = (v_2 - v_1) / l_d$$

$$l_d = \sqrt{(u_2 - u_1 + l)^2 + (v_2 - v_1)^2} \quad (17)$$

また、固定要素座標系と移動要素座標系における変位増分成分に対する変分量の間の関係は次のようになる。

$$\delta \Delta d_i^* = \left\{ T_{Rij} + \left(\frac{\partial T_{rik}}{\partial R} \frac{\partial R}{\partial d_j} + \frac{\partial T_{rik}}{\partial l_d} \frac{\partial l_d}{\partial d_j} \right) \Delta d_k \right\} \delta \Delta d_j \quad (18)$$

式(14),(18)を式(12)に代入し、 Δd_i^* , $\delta \Delta d_i^*$ を Δd_i , $\delta \Delta d_i$ で表した後、 $\delta \Delta d_j \neq 0$ であることを考慮すると、次のような増分形の要素剛性方程式が得られる。

$$\begin{aligned} \Delta F_i &= \left\{ T_{Rki} K_{ki}^* T_{Rij} \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{\partial T_{Rkj}}{\partial R} \frac{\partial R}{\partial d_i} + \frac{\partial T_{Rkj}}{\partial l_d} \frac{\partial l_d}{\partial d_i} \right) f_k^{*0} \right\} \Delta d_j \\ &\quad + T_{Rji} \Delta f_{\Delta A_j}^* - (F_i^0 - T_{Rji} f_j^{*0}) \end{aligned} \quad (19)$$

ここで、 $-T_{Rji} \Delta f_{\Delta A_j}^*$ は断面形状の変化に伴う等価節点力増分を表し、 $(F_i^0 - T_{Rji} f_j^{*0})$ は Q^0 状態におけるつり合い力を表す。

(2) 断面変化パラメータの数値計算における取扱方法

図-3のように要素の初期断面の状態を $[A_0]$ 、腐食により断面が減少した状態を $[A_1]$ 、および補修により再び断面が増加した状態を $[A_2]$ と表現する。ここでは、

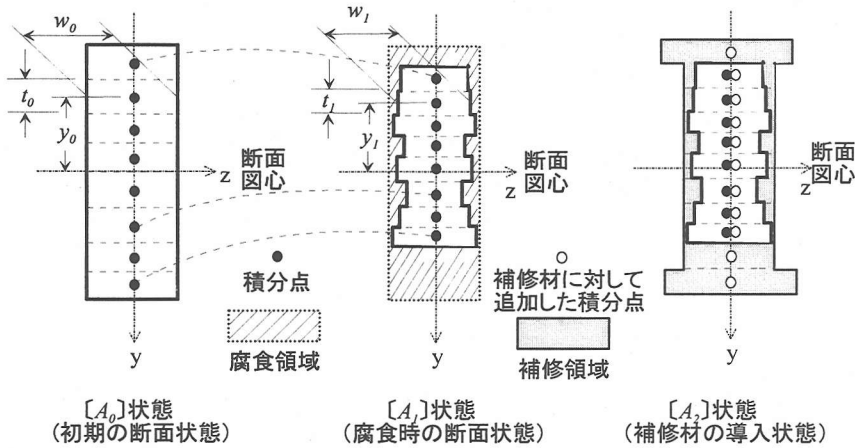


図-3 腐食および補修断面の取り扱い方

[A₀]→[A₁]に対応する腐食による断面減少過程と [A₁]→[A₂]に対応する腐食断面の補修過程の数値計算での扱い方を説明する。

a) 腐食による断面減少過程

[A₀]状態から[A₁]状態へ至る断面減少過程を、逐次増分により検討することを考える。いま、現在の部材断面の状態を[A]とする。各断面状態に対応して、(1)で示した要素剛性方程式の定式化に必要な各積分点の位置や積分領域の寸法などの断面に関する諸量をシンボリックに c_0, c_1, c と表す。

ここでは、平面骨組要素を対象とする場合において、任意の断面変化のパターンを取り扱えるようにすること、その数値計算法が極力複雑にならないことに配慮する。そのため、図-3のように、初期の断面[A₀]で定義した積分点は変化した[A]の状態でもその総数に変わらないようにする。このため、断面制御パラメータ λ_A ($0 \leq \lambda_A \leq 1$)に関する線形の補間関数を利用し、現在の断面状態[A]に関する諸量 c を初期の状態[A₀]の諸量 c_0 と最終の状態[A₁]の諸量 c_1 を用いて次のように表す。

$$c = (1 - \lambda_A)c_0 + \lambda_A c_1 \quad (20)$$

平面骨組要素の場合、積分点 i に関する必要な諸量は図-3のように、この積分領域の幅 w_i 、高さ t_i 、積分点の y 座標値 y_i である。なお、図-3のように積分点の諸量を定義すると t_i と y_i には従属関係が成り立つが、ここでは表示を簡単化するため、あえて[A₀]および[A₁]の状態におけるそれぞれの値を別々に表記する。

$$\begin{Bmatrix} w_i \\ t_i \\ y_i \end{Bmatrix} = (1 - \lambda_A) \begin{Bmatrix} w_{0i} \\ t_{0i} \\ y_{0i} \end{Bmatrix} + \lambda_A \begin{Bmatrix} w_{1i} \\ t_{1i} \\ y_{1i} \end{Bmatrix} \quad (21)$$

これより、式(7)で定義した断面力 N^0 、 M^0 は以下のように数値積分できる。

$$N^0 \cong \sum_{i=1}^n \sigma_i^0 w_{0i} t_{0i}, M^0 \cong \sum_{i=1}^n \sigma_i^0 w_{0i} t_{0i} y_{0i} \quad (22.a,b)$$

さらに、上式の増分を計算することにより、要素断面の変化により生ずる断面力の変化分 $\Delta N_{\Delta A}$ 、 $\Delta M_{\Delta A}$ は以下のように計算できる。

$$\begin{aligned} \Delta N_{\Delta A} &\cong \Delta \lambda_A \sum_{i=1}^n \sigma_i^0 \{t_i (w_{1i} - w_{0i}) + w_i (t_{1i} - t_{0i})\} \\ \Delta M_{\Delta A} &\cong \Delta \lambda_A \sum_{i=1}^n \sigma_i^0 \{t_i y_i (w_{1i} - w_{0i}) \\ &\quad + y_i w_i (t_{1i} - t_{0i}) + w_i t_i (y_{1i} - y_{0i})\} \end{aligned} \quad (23.a,b)$$

式(13)に式(23)を考慮すると断面制御パラメータの増分 $\Delta \lambda_A$ を用いた以下の表現が可能となる。

$$\Delta f_{\Delta A}^* = \Delta \lambda_A f_{A_i}^{*0} \quad (24)$$

ここに、 $f_{A_i}^{*0}$ は定数であり、式(19)の荷重増分ベクトル ΔF_i に対して荷重制御パラメータ λ_F を用いて次式のように定義した場合の荷重パターンベクトル f_i^0 に対応するもので、断面変化パターンベクトルと表現できるものである。

$$\Delta F_i = \Delta \lambda_F f_i^0 \quad (25)$$

式(24)、(25)を式(19)に代入すると、次のような断面変化の過程を考慮した解析の基礎式となる増分形の剛性方程式が得られる。

表-1 基本的な解析ケース

Case	step1	step2	step3	step4	備考
0	死荷重 A_0	死荷重 $A_0 - (1 - \beta)A_0$ (腐食)			腐食に関する終局挙動の解析
1	死荷重 A_0	死荷重 $A_0 - (1 - \beta)A_0$ (腐食)	死荷重 + 活荷重 $(1 - \beta)A_0$		腐食のある場合の残存耐力の計算
2	死荷重 A_0	死荷重 $A_0 - (1 - \beta)A_0$ (腐食)	死荷重 $(1 - \beta)A_0 \rightarrow A_0$ (補修)	死荷重 + 活荷重 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
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
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

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

$$\Delta \lambda_f f_i^0 = K_{ij} \Delta d_j - \Delta \lambda_A T_{Rij} f_{Aj}^{*0} + b_i \quad (26)$$

ここに,

$$K_{ij} = T_{Rki} K_{kl}^* T_{Rlj} + \left(\frac{\partial T_{Rkj}}{\partial R} \frac{\partial R}{\partial d_i} + \frac{\partial T_{Rkj}}{\partial l_d} \frac{\partial l_d}{\partial d_i} \right) f_k^{*0}$$

$$b_i = F_i^0 - T_{Rij} f_j^{*0} \quad (27.a,b)$$

式(26)には増分パラメータとして従来の構造解析法での荷重増分パラメータ $\Delta \lambda_f$, 変位増分 Δd_j に加えて, 断面増分パラメータ $\Delta \lambda_A$ が含まれているのが特徴である。この場合, 通常増分法では増分パラメータ $\Delta \lambda_A, \Delta \lambda_f$ を与え, 変位増分 Δd_j を解くこととなる。しかしながら, このような方法で構造物の崩壊挙動を解析する場合, 終局点近傍の収束解を得るのが困難になる。この問題を解決するために, ここでは, 未知増分 $(\Delta \lambda_f, \Delta d_j)$ あるいは $(\Delta \lambda_A, \Delta d_j)$ で表される弧長方程式を追加し, これを式(26)と連立させて解くいわゆる弧長増分法を適用する。このような弧長増分法により解析するとき, $(\Delta \lambda_f, \Delta d_j)$ で弧長方程式が与えられる場合は $\Delta \lambda_A$ と弧長増分を規定し, また $(\Delta \lambda_A, \Delta d_j)$ で弧長方程式が与えられる場合は, $\Delta \lambda_f$ と弧長増分を規定することにより, それぞれ未知増分量 $(\Delta \lambda_f, \Delta d_j)$ あるいは $(\Delta \lambda_A, \Delta d_j)$ を求めることができる。

b) 補修による断面の増加過程

構造物に死荷重などの外力が作用しているときに補修が施されると, 既存の部材断面には外力の影響により初期応力 σ_x^0 が発生している。一方, 補修により増加した断面部分に関しては, プレストレスが導入されない場合には, ほぼ無応力状態であるという点に注意する。そして, この無応力の補修断面部分に対応するように, 図-3の $[A_2]$ のごとく解析途中で平面骨組の断面に新たな積分点を追加し, 補修部分を表現する。またここでは,

補修断面に追加した積分点の初期応力は0とする。この手法によれば, 補修した瞬間における全体のつり合い条件を崩すことはなく, 補修材の荷重履歴を正確に再現することが可能となる。

4. 解析例による腐食や補修の影響を考慮した橋梁の力学特性の検討

ここでは3.で提示した手法を用い, 腐食や補修の影響により橋梁の挙動がどのように変化するかについて検討する。基本的な解析ケースを表-1に示す。ここで表中における β は, 次式で定義される断面減少率である。

$$\beta = \frac{\Sigma \Delta A}{A_0} \quad (28)$$

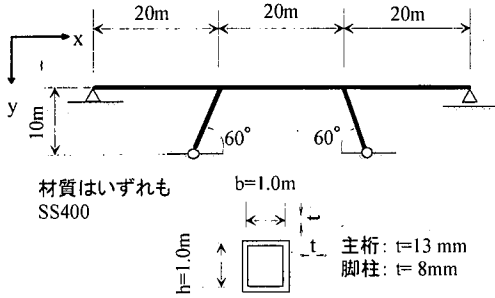
ここに A_0 は腐食前のある部材の断面積, $\Sigma \Delta A$ は最終状態でその部材が腐食により失った断面積の総和を表す。

Case0 は死荷重載荷状態から極限状態まで腐食を進行させ, その挙動を追跡するものである。

Case1 は死荷重載荷状態で腐食による部材断面の減少過程の計算を行い, その後, B 活荷重⁹⁾のみを漸増載荷していく。これは, 腐食過程を正確に考慮した橋の残存耐力の算定法である。

Case2 は, 腐食による断面減少過程(step2)までは Case1 と同様である。その後, 死荷重作用下で腐食断面を当初設計断面と幾何学的に等価になるように補修し, B 活荷重を漸増載荷していくものである。これは, 腐食過程と補修過程を忠実に考慮した残存耐力の正確な算定法である。

Case3 は腐食時の残存耐力を推定する場合に, Case1 の代わりに従来から用いられている近似的な方法である。すなわち, 初期形状として腐食した断面の構造を無応力



主桁および脚柱の断面図

図-4 Π型ラーメン橋の寸法諸元

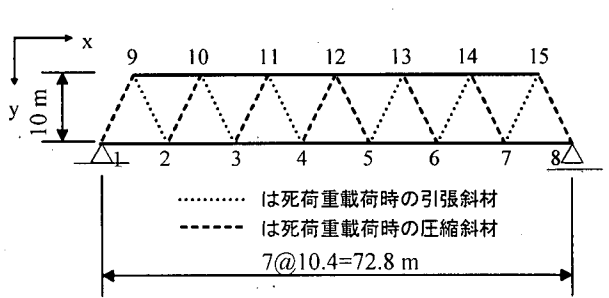


図-5 トラス橋の寸法諸元

表-2 トラス橋の断面諸元

部材番号	部材名	断面形状	ウェブ	上フランジ	下フランジ	断面積(cm ²)	材質
1 - 9	圧縮斜材	BOX	400 × 15	450 × 14	360 × 13	229.8	SM50
2 - 9	引張斜材	H	326 × 9	360 × 12	-	115.7	HT50
2 - 10	圧縮斜材	BOX	360 × 13	332 × 13	332 × 13	179.9	SS41
3 - 10	引張斜材	H	322 × 9	300 × 13	-	107.0	SS41
3 - 11	圧縮斜材	BOX	340 × 12	300 × 9	300 × 9	135.6	SS41
4 - 11	引張斜材	H	330 × 9	250 × 11	-	84.7	SS41
4 - 12	圧縮斜材	BOX	230 × 9	340 × 9	340 × 9	102.6	SS41
1 - 2	下弦材	BOX	360 × 9	360 × 11	450 × 9	144.9	SS41
2 - 3	下弦材	BOX	360 × 9	360 × 11	450 × 9	144.9	SM50
3 - 4	下弦材	BOX	360 × 12	360 × 14	450 × 11	186.3	SM50
4 - 5	下弦材	BOX	360 × 14	360 × 14	450 × 11	200.7	SM50
9 - 10	上弦材	BOX	400 × 12	450 × 13	360 × 12	197.7	SS41
10 - 11	上弦材	BOX	400 × 16	450 × 18	360 × 17	270.2	SM50
11 - 12	上弦材	BOX	400 × 19	450 × 22	360 × 22	330.2	SM50

注1) ウェブ、上フランジ、下フランジの寸法の単位はmm、寸法は(長さ) × (板厚) で表示

注2) H型断面の部材は、高さ方向の板要素を上フランジ、図心にある幅方向の板要素をウェブとして表示

状態を与え、その後死荷重を載荷した上でB活荷重を漸増していくものである。

Case4 は腐食のない場合の一般的な耐力の算定法であり、Case2 で算定される腐食橋梁を補修した場合の残存耐荷力との比較対象にもなる。

腐食過程の解析では各部材断面における腐食進行パターンを特定しておく必要があるが、現在まだ実測データが不足しているため、ここでは適当な仮定をすることでこれに対応する。材料構成則としては、いずれもBi-Linear 型移動硬化則とし、2次弾塑性性勾配は弾性係数Eの1/100として解析を行う。板要素の局部座屈は考慮していない。

(1) 解析モデル

解析対象とするΠ型ラーメン橋およびトラス橋の寸法諸元を図-4、5に示す。

図-4のΠ型ラーメン橋は、主桁および脚柱材とも箱型断面とし、材料はいずれもSS400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)

とする。載荷荷重のうち、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て載荷し、 p_2 は主桁に満載する。また、幾何学的な初期不整としては、図-6に示すような最大で部材長比1/1000となる正弦波を脚柱に関する初期たわみとして、構造に対して非対称となるように与える。このような初期たわみは、Π型ラーメン橋が横移動型の座屈で終局状態に到達することを考慮したためである。初期残留応力に関しては無視する。数値計算での要素分割は、解の収束性を考慮し、柱部材を均等に10分割、主桁の1スパンあたり均等に14分割とし、断面は主桁および柱とも高さ方向に12分割とする。

もうひとつの解析対象とするワーレントラス橋は、昭和30年代に実際に架設されたトラス橋である。図-5にその寸法諸元を示し、表-2には各部材の断面諸元を示す。死荷重作用下で引張力が作用する斜材(引張斜材)はフランジ面がx-y面に平行に配置されたH型断面であり、残りの部材は箱型断面となっている。SS41材の降伏

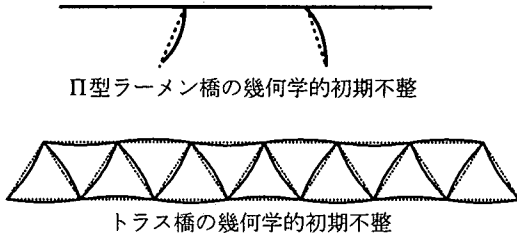
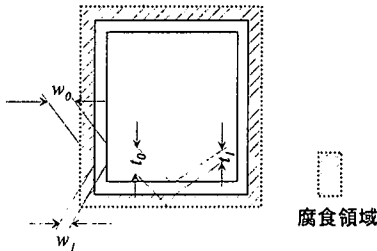
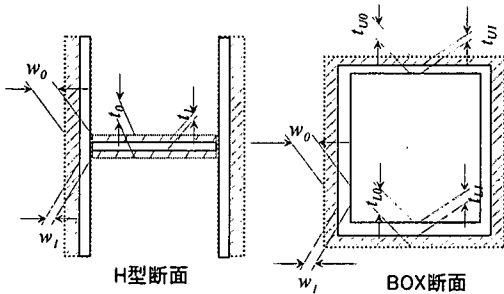


図-6 幾何学的初期不整



(a) Π型ラーメン橋の部材断面



(b) トラス橋の部材断面

図-7 断面の腐食パターン

応力は 235(MPa), SM50 および HT50 の降伏応力は 317(MPa)とし、いずれの材料のヤング係数も 206000(MPa)とする。荷重に関して、死荷重強度は 0.0358 (MN/m)とし、活荷重は B 活荷重とする。活荷重の載荷方法は下弦材および上弦材の検討では、支間中央の部材がクリティカルとなるように影響線載荷し、斜材の検討を行う場合には、スパン中央付近の引張部材 4-11 とこれと隣接する圧縮部材 3-11 がクリティカルとなる 2 ケースについて影響線載荷する。なお、死荷重、活荷重とも下弦材の格点部へ作用する集中荷重に換算して載荷する。

トラスの格点は一般の設計ではヒンジで取り扱う場合が多く、このように扱う場合には、本トラス橋は静定構造物である。ここでは、トラス橋の終局挙動をより正確に扱うためトラス格点を剛結とし、トラス部材のすべてを平面骨組要素でモデル化することで、トラス部材自身の後座屈領域の挙動を追跡できるよう配慮する。各トラス部材には、最大で部材長比 1/1000 となる正弦波の初

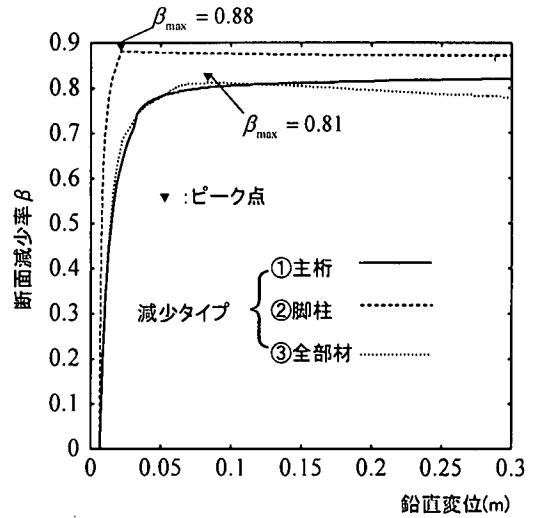


図-8 Π型ラーメン橋の断面減少率-鉛直変位曲線

期たわみを考慮している。荷重が対称の場合も本トラス橋は、非対称変形モードへ分岐し終局状態に到達することが予測されるので、図-6 に示すように上弦材の幾何学的初期不整は非対称とする。なお、初期残留応力に関しては考慮しない。要素分割は、解の収束性を考慮し、引張斜材および下弦材は 10 分割、圧縮斜材および上弦材は 30 分割とし、断面は高さ方向に 21 分割とする。

本解析法では一様に腐食しない場合も扱えるが、今回は各部材の断面の腐食パターンは簡単のため、図-7 のような断面全体が一様に腐食する場合を扱う。

(2) 腐食による構造物の崩壊過程の解析 (Case0)

ここでは、死荷重載荷条件下において、腐食が進行して構造物が崩壊する表-1 の Case0 の過程を解析する。このような構造物の挙動は従来の解析法では全く解析できない。

まず、Π型ラーメン橋について、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腐食で均一に減少する 3 種類のタイプについてその終局挙動を解析する。解析結果として、各部材断面減少タイプに対応して、断面減少率 β と主桁スパン中央の鉛直変位の関係を図-8 に示す。ここでは、腐食により、構造物が崩壊する場合の断面減少率を求めるため断面増分パラメータ $\Delta \lambda_i$ と変位増分ベクトル Δd_j を用いた弧長法によっており、断面減少率-鉛直変位関係においてピーク以降の解が得られる。このピーク以降の領域の挙動は、物理的な意味を特別に持っているわけではないが、構造物が崩壊時の断面減少率 β に対応するピーク点での値を正確に求めるためには、必然的にピーク以降の領域までの解析が必要となる。図-8 より、①主桁断面のみが減少す

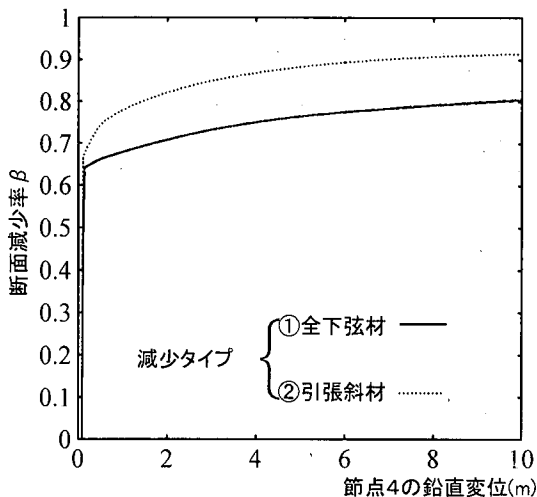


図-9 トラス橋の断面減少率-鉛直変位曲線
(全下弦材および引張斜材の腐食)

るタイプでは、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。③全部材の断面が減少するタイプでは、①主桁断面が減少するタイプと $\beta = 0.5$ 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。②脚柱断面が腐食するタイプでは、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、変位が増加する前に③全部材断面が減少するタイプ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 Π 型ラーメン橋は大きな変位が生ずる前に急激に不安定現象が生じ、崩壊に至る可能性のあることがわかる。

つぎに、トラス橋に関して死荷重作用下で、引張材である①全下弦材あるいは②引張斜材の断面が腐食で均一に減少した場合の解析結果として、各部材断面減少タイプに対応して、断面減少率 β とスパン中央付近の格点 4 の鉛直変位の関係を図-9 に示す。同様に、圧縮材である③全上弦材あるいは④圧縮斜材が均一に断面減少した場合の挙動を図-10 に示す。図-9、10 を見ると、明らかに、 Π 型ラーメン橋と同様、図-10 の圧縮部材に関するものの方が変位の小さな領域で断面減少率のピークを迎えていることが分かる。これは、断面減少していく過程で圧縮部材断面が塑性化し、それに起因して分岐型の座屈が生じると、それとほぼ同時に構造系全体が急激に

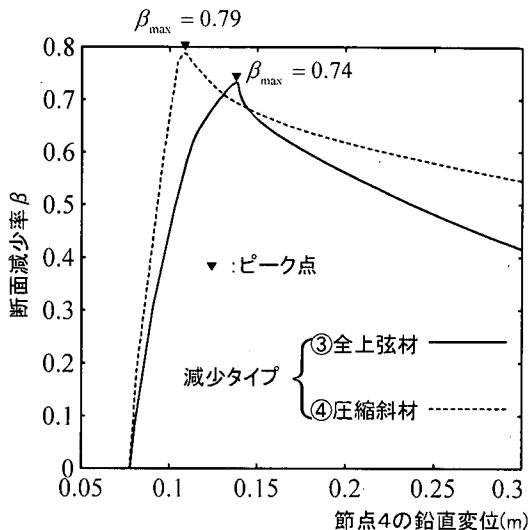


図-10 トラス橋の断面減少率-鉛直変位曲線
(全上弦材および圧縮斜材の腐食)

不安定となるためである。逆に、引張材に関しては部材の座屈が生じないため、腐食の進行とともに大きく変位した上で崩壊する。

以上から、不安定現象の発生しにくい引張材や横倒れ座屈が生じない曲げ材が腐食する場合には崩壊に至るまでの変形や剛性の低下が顕著であり、現場計測による変位の経時変化データに基づき、その構造物の危険性を予測しうる可能性があることが分かる。一方、圧縮材が腐食し、分岐型の座屈により構造物が崩壊する場合、崩壊までの変位の増加や剛性の低下が明確に現れないため、現場の変位計測により崩壊を予測することはかなり難しいと考えられる。

(3) 腐食した構造物の残存耐力評価(Case1)

腐食した構造物の残存耐力の評価法として、死荷重載荷条件下での腐食過程を正確に解析した後、B 活荷重を漸増して残存耐力を計算する方法 (Case1) と、初期形状として腐食した断面の構造を無応力状態で与え、その後死荷重を載荷した上で B 活荷重を漸増し耐力を計算する近似的な方法 (Case3) を用い、両手法により得られる結果の比較を行う。

まず、 Π 型ラーメン橋について (2) で検討したのと同じく、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腐食で均一に減少する 3 種類の断面減少タイプを対象とする。残存耐力を計算する腐食による断面減少率 β はいずれの場合も 0.5 と 0.75 の 2 種類である。各腐食タイプに対する解析結果を荷重-変位曲線として図-11~13 に示す。これらの荷重変位曲線において、縦軸は死荷重と活荷重の合計値であり、横軸は主桁スパン中央の鉛直たわみを示している。

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。このため、荷重-変位曲線は一定の死荷重下で変位のみが増加している。ただし、圧縮材である脚柱の断面のみが減少する場合は変位の増加が小さい。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、死荷重満載時においては、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。さらに、図-14 には、③全部材の断面に断面減少率 0.75 の腐食を考慮した場合の Case1 と Case3 における断面減少後の死荷重満載状態での部材の塑性化と変形の状態を示す。この図からも Case1 と Case3 の差は認められない。

つぎに、トラス橋に関しても同様に引張材である①全下弦材あるいは②引張斜材の断面が腐食で均一に減少した場合と圧縮材である③全上弦材あるいは④圧縮斜材の断面が均一に減少した場合について、腐食による断面減少率 β が 0.5 と 0.75 の 2 種類の残存耐荷力を計算する。ただし、③全上弦材が減少する場合については断面減少率が $\beta=0.75$ に到達以前にトラス橋が崩壊するので $\beta=0.5$ の場合のみを計算対象とする。Case1 と Case3 の方法による解析結果として、 Π 型ラーメン橋と同様に鉛直荷重の合計と格点 4 の鉛直変位の関係を①~④の腐食タイプについて、図-15~18 に示す。これらの図より、トラス橋の場合も厳密な残存耐荷力の計算法である Case1 と近似的な計算法である Case3 の荷重-変位曲線は死荷重満載以降においてほぼ完全に一致し、残存耐荷力も数値的には同一の値となる。とくに、図-15 に示す①全下弦材の断面減少率が 0.75 の場合は、腐食による変形が非常に大きいにもかかわらず、下弦材の断面減少後の死荷重満載状態以降、Case1 と Case3 による荷重-変位曲線はすべて一致している。さらに、図-19 には、この場合について、断面減少後の死荷重満載状態での Case1 と Case3 における部材の塑性化と変形の状態を示す。この図からも Case1 と Case3 の塑性化状態や変形状態に差がないことが確認され、断面が減少した以後、活荷重下で両者の荷重-変位曲線に差が生じないことを裏付けている。

以上の解析より、死荷重載荷条件下での腐食過程を正確に解析した後、活荷重を漸増して残存耐荷力を計算する厳密な方法 (Case1) と、初期形状として腐食した断面の構造を無応力状態で与え、その後死荷重を載荷した上で活荷重を漸増し耐荷力を計算するという従来から用いられてきた近似的な方法 (Case3) とは数値的には等価な結果を与えることが判明した。

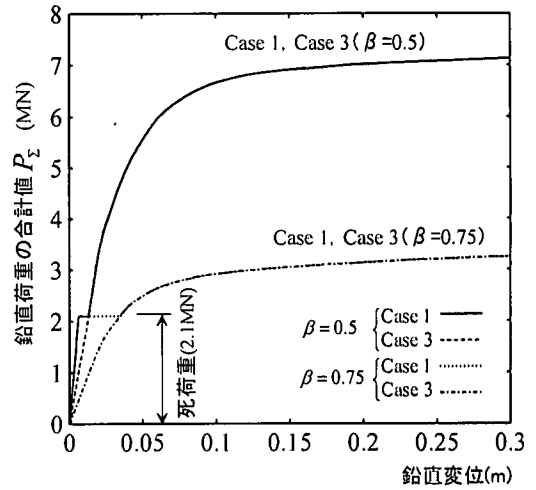


図-11 Π 型ラーメン橋の荷重-変位曲線 (①主桁の腐食)

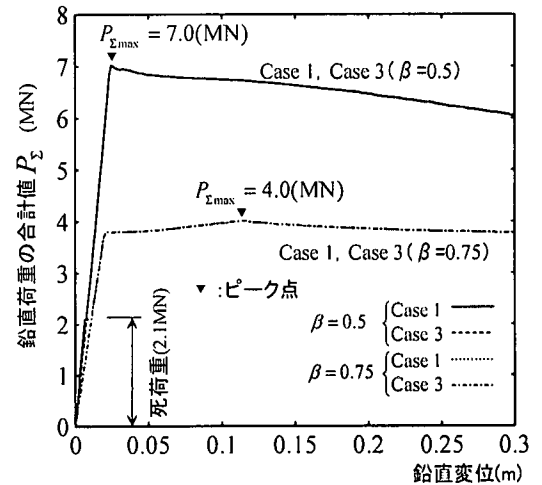


図-12 Π 型ラーメン橋の荷重-変位曲線 (②脚柱の腐食)

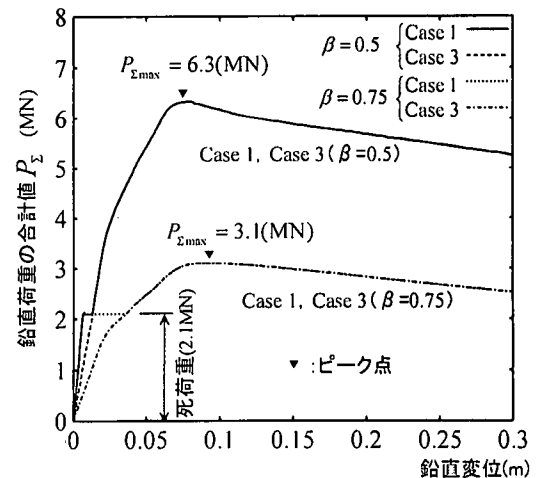


図-13 Π 型ラーメン橋の荷重-変位曲線 (③全部材の腐食)

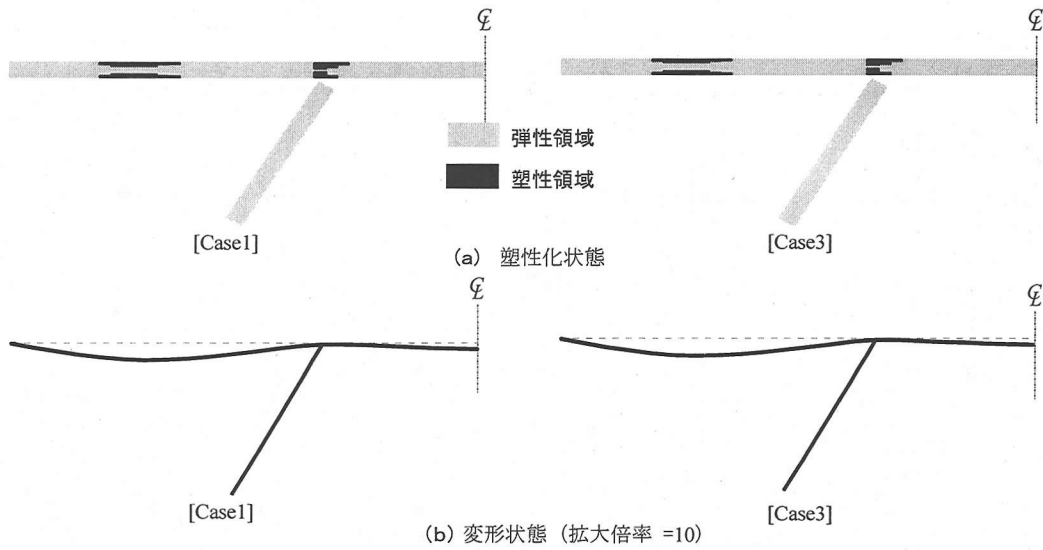


図-14 死荷重満載状態でのI型ラーメン橋のCase1とCase3での塑性化状態と変形状態 (③全部材腐食 $\beta=0.75$)

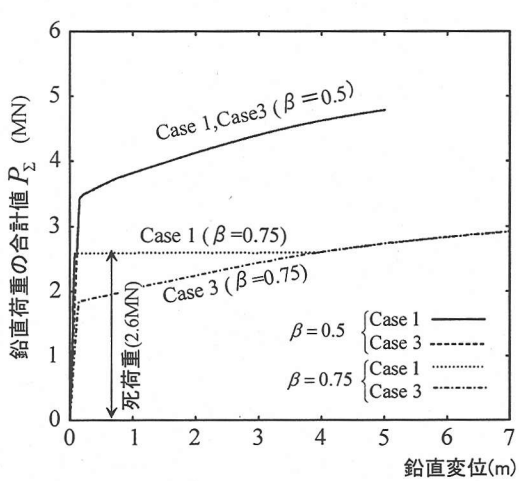


図-15 トラス橋の荷重-変位曲線 (①全下弦材の腐食)

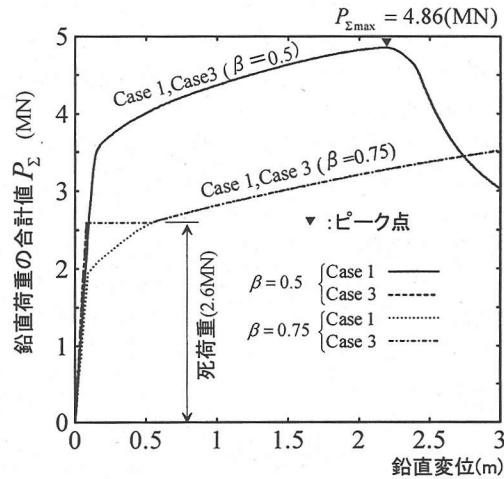


図-16 トラス橋の荷重-変位曲線 (②全上弦材の腐食)

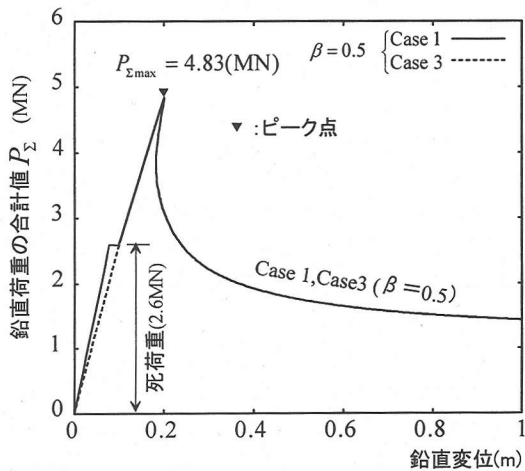


図-17 トラス橋の荷重-変位曲線 (③引張斜材の腐食)

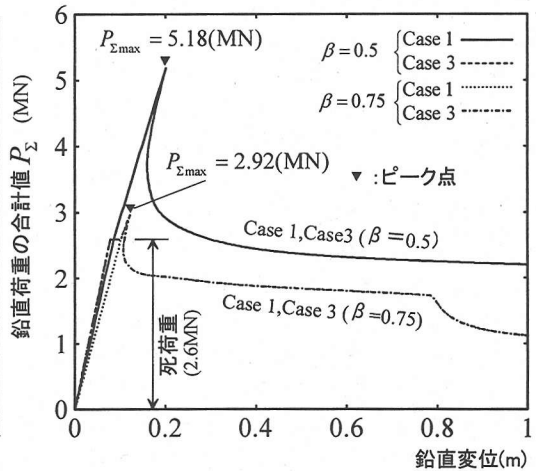


図-18 トラス橋の荷重-変位曲線 (④圧縮斜材の腐食)

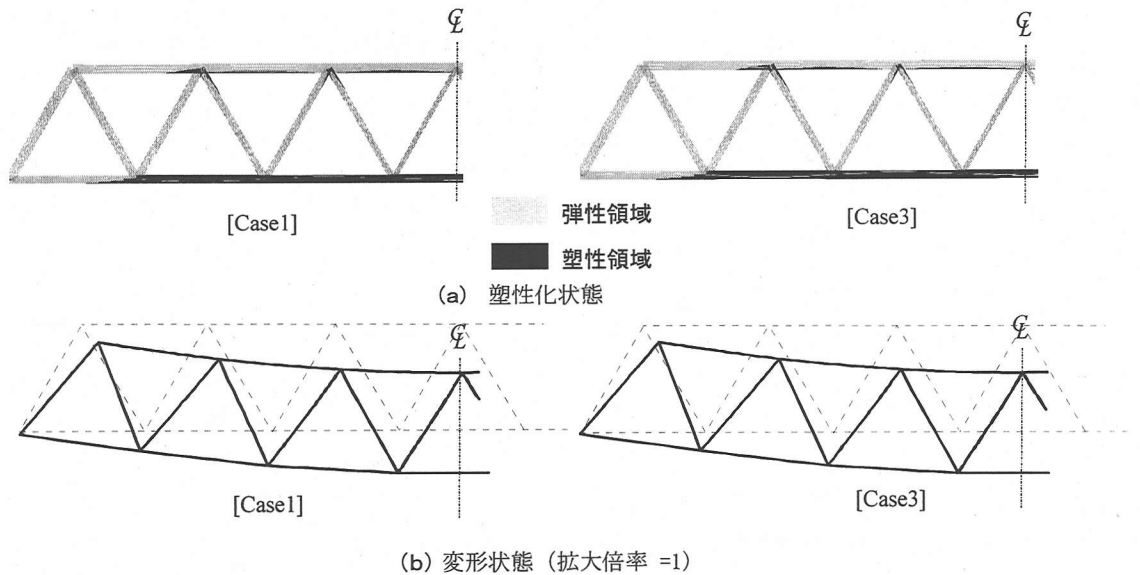


図-19 死荷重満載状態でのトラス橋の Case1 と Case3 での塑性化状態と変形状態 (①全下弦材腐食 $\beta=0.75$)

(4) 死荷重の作用下で腐食部分を補修した構造物の耐力評価(Case2)

死荷重の作用下で腐食による部材断面減少が生じた構造物を、この状態で腐食前の部材の断面と幾何学的に等価となるように補修した場合の耐力を死荷重作用下で B 活荷重を漸増することにより計算し、この耐力 (Case2) を腐食前の構造物の耐力 (Case4) と比較する。ここで考慮する腐食率 β は 0.5 と 0.75 の 2 種類である。

II 型ラーメン橋に関して、(3)と同様に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腐食で均一に減少する 3 種類の断面減少タイプについて死荷重満載状態で腐食部分を腐食前と幾何学的に等価な断面に補修した構造の耐力解析の結果(Case2)として、全鉛直荷重-主桁スパン中央の鉛直変位の関係を腐食のない構造物に対する耐力解析の結果 Case4 と比較する形で図-20~22 に示す。これらより、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、結果として耐力の差もほとんどない。図-23 には③全部材の断面が腐食($\beta=0.75$)し、これを死荷重満載状態で補修した時の塑性化と変形状態 (Case2) を腐食のない構造に死荷重を満載した Case4 の解析結果と比較する。図-23 より、Case4 では死荷重満載状態では塑性化が生じておらず、変形も小さい。これに比べ Case2 では主桁の一部に塑性化が生じ、変形も生じている。この死荷重満載状態での差はその後の活荷重

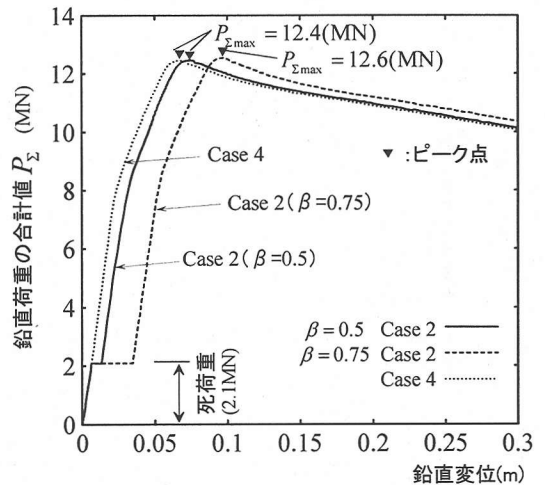


図-20 補修した II 型ラーメン橋の荷重-変位曲線 (①主桁の腐食)

付加による耐力解析の過程に対しては初期応力や初期変位の差として解析結果に何らかの影響を及ぼすはずであるが、この解析対象に関しては結果としてほとんど影響はないといえる。この結果から判断すると、活荷重を載荷したときの II 型ラーメン橋の終局挙動は脚柱の挙動に支配され主桁の影響は小さいといえる。

つぎにトラス橋に関して(3)と同様に引張材である①全下弦材あるいは②引張斜材の断面が腐食で均一に減少した場合と圧縮材である③全上弦材あるいは④圧縮斜材の断面が均一に減少し場合について、死荷重満載状態で断面を補修した構造の耐力解析結果(Case2)を全鉛

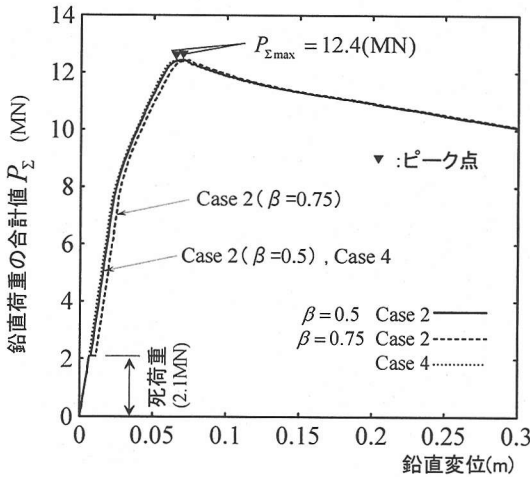


図-21 補修したI型ラーメン橋の荷重-変位曲線 (②脚柱の腐食)

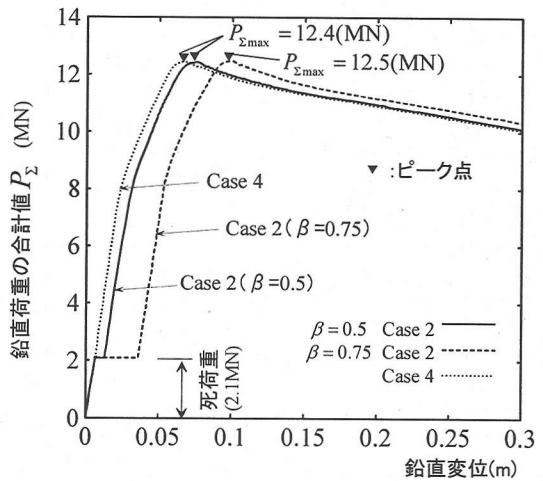


図-22 補修したI型ラーメン橋の荷重-変位曲線 (③全部材の腐食)

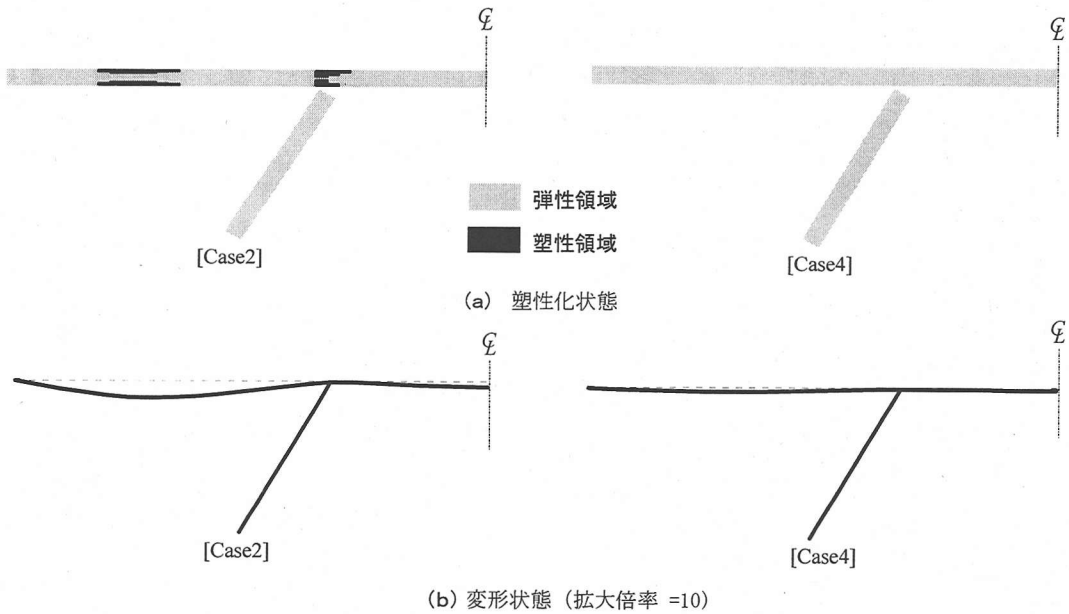


図-23 死荷重満載状態でのI型ラーメン橋のCase2とCase4での塑性化状態と変形状態 (③全部材腐食 $\beta=0.75$)

直荷重一格点4の鉛直変位の関係として腐食のない構造物に対する耐力解析の結果(Case4)と比較する形で図-24~27に示す。図-24より、下弦材に腐食が生じる場合、断面減少率 $\beta=0.5$ のときには断面減少による変位の増分も少なくCase2とCase4の間において荷重-変位曲線や耐力において差はほとんど生じていないが、 $\beta=0.75$ のときには、断面の腐食による変位増分が非常に大きく、補修した構造の最大荷重(Case2)は上昇せず、腐食のない構造の最大荷重(Case4)よりもかなり小さくなっている。この場合について、死荷重満載状態で補修した時の塑性化と変形状態(Case2)を腐食のない構造に

死荷重を満載したCase4の解析結果とを図-28に比較する。これより、腐食した断面を補修した構造(Case2)は死荷重載荷状態において大きな変形および塑性化が生じているが、Case4では塑性化は生じておらず、変形量も小さいことがわかる。このように、死荷重載荷状態で極端に大きな変形が生じるような腐食では、幾何学的に腐食前の部材断面と等価になるような補修を行っても、補修前の応力や変形が残留するため、補修後の耐力が腐食前の耐力まで十分に回復しない場合もあり得る。ただ、腐食により、大きく変形した構造物に対して、このような補修がなされることは現実問題としてはないと考えられ

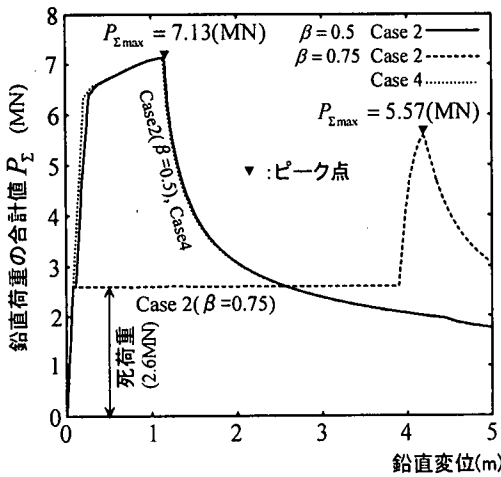


図-24 補修したトラス橋の荷重-変位曲線
(①全下弦材の腐食)

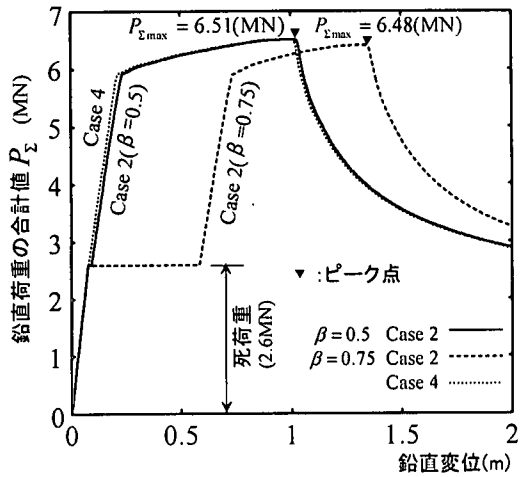


図-25 補修したトラス橋の荷重-変位曲線
(②引張斜材の腐食)

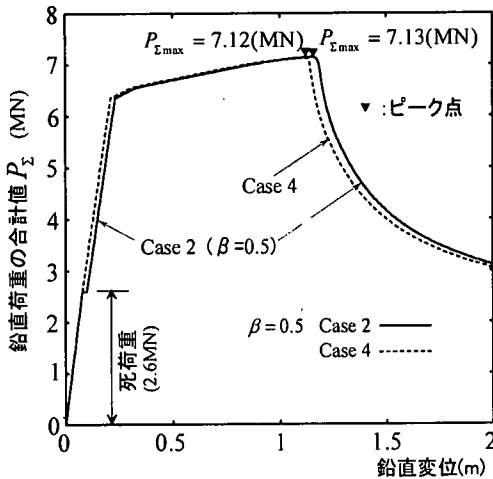


図-26 補修したトラス橋の荷重-変位曲線
(③全上弦材の腐食)

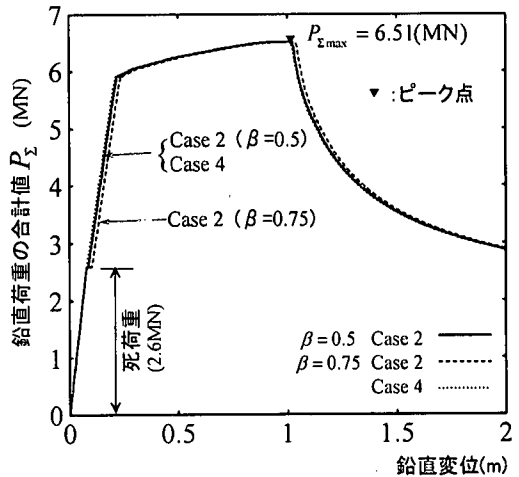


図-27 補修したトラス橋の荷重-変位曲線
(④圧縮斜材の腐食)

る。図-25に示す②引張斜材が腐食しこれを補修した場合においては、断面減少率 $\beta=0.5$ のとき、断面減少による変位の増分は少なく、Case2とCase4間の荷重-変位曲線の差はほとんどない。また、 $\beta=0.75$ の場合も、断面減少による変位増分量は大きいものの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いない。

圧縮部材である③全上弦材あるいは④圧縮斜材の断面が腐食しこれを補修した場合については図-26、27に示すように、断面減少による変位増分は小さく、補修した構造物と腐食のない構造物の荷重-変位曲線には大きな差はない。

以上のように、死荷重の載荷状態で腐食した部材断面を腐食前の部材断面と幾何学的に等価になるような補修

を行った場合、多くは腐食前の力学性能にほぼ回復しうるが、腐食箇所によっては補修後の力学性能が腐食前まで十分に回復しない場合もあり得ることが判明した。このような現象がどのような場合に生じるのかということ、現段階では明確に述べることは難しいが、少なくとも、死荷重載荷状態で腐食と補修過程により残留する応力や変形が関与していることは確実である。この影響を補修後の構造物の力学性能評価に反映するには腐食と補修過程を正確に扱うことが必要であり、本論文で提示した解析法の重要性が認識されよう。

なお、ここでは、補修した橋梁の静的荷重下における終局挙動特性の検討が中心で、極大地震下の動的な終局挙動についてはいまだ検討していない。動的な終局挙動には部材の塑性化による動特性の変化が非常に大きな影

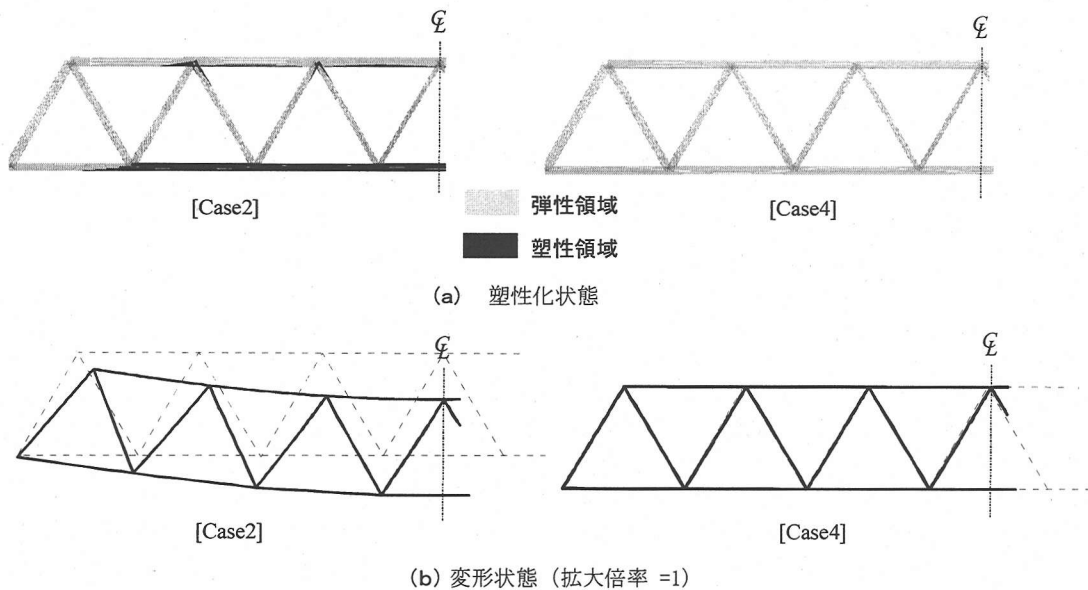


図-28 死荷重満載状態でのトラス橋の Case2 と Case4 での塑性化状態と変形状態 (①全下弦材腐食 $\beta=0.75$)

響を与えることが知られている。補修した橋梁では、死荷重載荷状態で補修前の大きな応力が残留しており、腐食のない橋梁に比べ、塑性化が早く生ずることが予想される。このため、その動的挙動が大きく変化することも考えられる。このような点については、今後の検討課題としたい。

5. まとめ

ここでは、従来の構造解析における荷重や変位などの制御パラメータの他に腐食や補修による部材断面の変化を制御パラメータに追加し、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変化を統一的かつ正確に評価するための新しい解析法を提示した。また、この解析手法を用いた数値計算例に基づき、腐食や補修による橋梁の力学特性の変化を検討した。本研究により得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 有限要素法に基づく構造解析において腐食や補修などによる部材断面変化を新たな制御パラメータとして考慮するための手法を示した。従来の荷重や変位などの制御パラメータに加えて、この新しい制御パラメータの導入により、腐食や補修などによる部材断面変化の影響を考慮した構造物の長期間にわたる力学性能の変化を正確かつ統一的に扱うことができる。
- 2) 数値計算例より死荷重載荷状態で純粋な腐食によ

る断面減少のみにより構造物が終局状態を迎える過程を解析し、本解析法の有効性を示した。

- 3) 腐食した橋梁の残存耐力を推定する方法として、死荷重載荷条件下での腐食過程を正確に解析した後、活荷重を漸増して残存耐力を計算する厳密な方法と、初期形状として腐食した断面の構造を無応力状態で与え、その後死荷重を載荷した上で活荷重を漸増し耐力を計算するという従来から用いられてきた近似的な方法とがある。ここでの検討により、両者は数値的には等価な結果を与えることが判明した。
 - 4) 死荷重の載荷状態で腐食した部材断面を幾何学的に腐食前の部材断面と等価になるような補修を行った場合、多くの構造物は、腐食前の力学性能に回復しうるが、腐食箇所によっては補修後の力学性能が腐食前まで十分に回復しない場合もあり得ることが判明した。これは死荷重載荷状態での腐食と補修過程により残留する応力や変形が関与しているためである。このような残留応力は地震などによる動的な終局挙動により大きな影響を与えることが予想される。腐食と補修過程により残留する応力や変形の影響を補修後の構造の力学性能評価に反映するには腐食と補修過程を正確に扱うことが必要であり、ここで提示した部材断面変化を新たな制御パラメータとして追加した解析法の重要性が認識された。
- いままでの構造解析法に部材断面変化量を新たな制御

パラメータとして追加すれば、地震などの大きな外乱に加えて腐食や補修が構造物の長期間の力学性能変化に与える影響を直接的かつ正確に評価することができる。つまり、今回の新しい解析法の提示により腐食や地震などが構造物の力学性能の変化に与える影響を統一的に評価できる。ただ、今回の解析においては腐食状態が既知であることを前提とし、しかも、非常に単純な腐食パターンを仮定したにとどまっており、実際に即した腐食パターンやその予測法については何ら言及していない。この意味で本解析法の有効な適用は現在までの腐食や補修履歴が既知である構造物の残存耐荷力評価の範囲に限られる。本解析による長期間の力学性能変化の予測精度を高めるためには、腐食パターンの把握と腐食進行の予測が重要であることは言うまでもない。今後、精度の良い腐食パターンの提示や腐食進行の予測法の早急な確立が必要である。また、今回の解析では平面骨組要素を対象とした計算によったため、当然ながら局部座屈までの領域は検討できない。今後は3次元連続体やシェルなどにここで示した解析法を適用することで局部座屈も検討できるよう研究を進める予定である。

謝辞:本研究を行うにあたり、建設省中部地方建設局名古屋国道工事事務所、三重工事事務所および財団法人道路保全技術センター中部支部より橋梁の腐食に関する貴重な資料をご提供いただいた。また、本研究の一部は鋼材倶楽部委託の日本鋼構造協会鋼橋の性能照査型設計対

応研究委員会・鋼橋の防食・LCC部会において援助を受けた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 土木学会:鋼橋における劣化現象と損傷の評価,土木学会,1996.10.
- 2) 西川和廣:道路橋の寿命と維持管理,土木学会論文集, No.501/I-29, pp.1-10,1994.10.
- 3) 土木学会:安全性と長寿命化にむけた性能評価型の設計基準をめざして,土木学会平成11年度全国大会研究討論会資料,1999.9.
- 4) 村中昭典,皆田理,藤井堅:腐食鋼板の表面性状と残存耐荷力,構造工学論文集,Vol.44A, pp.1063-1071,1998.3.
- 5) 西村宣男,竹内修治,村上茂之,竹下主義,軸屋一英,伏見義仁:断面に欠損を生じた円形鋼管部材の座屈強度特性,鋼構造論文集,第6巻,第21号, pp.55-66,1999.3.
- 6) 後藤芳顯,吉光友雄,小畑誠,西野文雄:平面骨組の有限ひずみ・有限変位理論の解に収束する2種類の数値解法と精度特性,土木学会論文集, No.428/I-15, pp.67-76,1991.4.
- 7) 後藤芳顯,鳥羽保行,小野聖久,小畑誠:円筒殻の軸対称座屈モードの局所化と繰り返し荷重下の挙動,土木学会論文集, No.543/I-36, pp.41-53,1996.7.
- 8) 日本道路協会:道路橋示方書(Ⅰ共通編・Ⅱ鋼橋編)・同解説,丸善,1996.12.

(2000.8.21 受付)

A NEW STRUCTURAL ANALYSIS METHOD TO ASSESS THE LONG-TERM MECHANICAL PERFORMANCE OF STEEL STRUCTURES CONSIDERING CORROSION AND REPAIR

Yoshiaki GOTO and Naoki KAWANISHI

A new structural analysis method is developed in order to take into account the effects of corrosion loss of material and repair on the long-term mechanical performance of steel structures. This new analysis method is characterized by the point that the cross sectional change of structural members due to corrosion or repair is adopted as a new controlling parameter in addition to the conventional controlling parameters such as load and displacement. The proposed analysis method can also consider the effects of the histories of the damage and repair resulting from excessive external loads, e.g. big seismic loads.