

## 腐食減厚に伴う合成I桁及びI断面柱の残存耐力評価に関する一考察

EVALUATION OF CAPACITY LOSS DUE TO CORROSION DAMAGES IN  
COMPOSITE I GIRDER AND STEEL COLUMNS

野上邦栄\*・山沢哲也\*\*・小栗友紀\*\*\*・加藤美幸\*\*\*\*

Kunieo NOGAMI, Tetsuya YAMASAWA, Tomoki OGURI and Miyuki KATO

\*工博 東京都立大学大学院助教授 工学研究科土木工学専攻 (〒 192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

\*\*工修 東京都立大学大学院助手 工学研究科土木工学専攻 (〒 192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

\*\*\*東京都立大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (〒 192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

\*\*\*\*建設技術研究所 大阪支社情報技術部 (〒 540-0008 大阪府大阪市中央区大手前 1-2-15)

A corrosion damage model is developed for steel I girder and steel columns. Their load-carrying capacity is determined with regard to bending and compression, respectively. The capacity loss depends on the location, shape and rate of corrosion. By considering their corrosion factors with members, load-carrying capacity of corroded members is evaluated by using elasto-plastic finite displacement analysis. From this analysis, the following conclusions are clear; 1) the bending strength of the corroded girder can be evaluated in linear formula about the damage ratio  $\beta_c$  in the corroded cross-section of span center. 2) The remained ultimate strength of columns is given by the formula of the minimum section-loss ratio and the slenderness ratio.

**Key Words :** corrosion, load-carrying capacity loss, ultimate strength, column, girder, elasto-plastic finite displacement analysis

## 1. はじめに

社会基盤の成熟化につれて、維持管理システムが注目されてきている。橋梁は、これから15～20年後には供用期間が50年を超える老朽橋の数が急激に増加する<sup>1)</sup>。このような老朽橋およびその構成部材の維持管理をする上では、疲労とともに腐食による劣化・損傷が問題になる。この腐食による劣化・損傷現象の進行に伴って部材断面は欠損し、部材および構造物としての耐荷性能は低下する。したがって、腐食による部材のもつ残存耐力を適切に評価することは、腐食損傷度評価、耐荷性能評価、さらに維持補修および架替えを検討する上で極めて重要になる<sup>2)</sup>。

現在、橋梁の維持管理のための検査・点検には、道路構造物の良好な保全のために日常的に行う日常点検と、道路構造物の健全度を把握し、機能低下の原因となる損傷の早期発見と評価のために道路構造物に近接して定期的に行う定期点検、さらに外的な異常事態や重大な損傷が生じた場合あるいはそれが予測される場合、必要に応じて臨時に行う臨時点検がある<sup>3)</sup>。橋の腐食では、どこがどういう理由でさびているのか、どの程度さびているのかを検査することになるが、建設省ではこれまで橋の形式ごとにさびマップあるいは腐食マップと呼ばれるものを作成し、橋梁ごとにさびの生じやすい部位とその理由などをまとめた点検・検査記録のデータベース化を進めている。この点検マニユア

ルの確立により、日常点検や定期点検において橋全体を点検するのではなく、腐食しやすい部位を集中的に見れば良く、効率化が図れることになる。さらに、点検・検査は橋梁構造や材料について十分な知識と経験を持った者が行うことで信頼性の高い結果を得ることができる訳で、現在そのための点検員の資格制度および教育システムに関する検討が行われている<sup>3)</sup>。

ところで、これまで腐食に関する研究は、どちらかと言えば腐食を防止するための防食方法の開発、腐食の程度を評価するための非破壊検査などによる測定方法の開発<sup>4)</sup>、および腐食鋼材の機械的性質の変化<sup>5)~7)</sup>に関する研究などが中心であり、腐食を受けた圧縮平板<sup>8)~11)</sup>、圧縮部材、曲げ部材<sup>12)</sup>、および構造物<sup>13)</sup>の現有する耐力評価について検討した研究は極めて少ない。そのため、腐食劣化した鋼橋あるいは部材に対してどのような維持補修方法をとるべきか、あるいは新橋に架けかえた方が経済的になるかなどを判断する評価指標が明確にされていない。

以上のことを踏まえ、ここでは劣化・損傷に伴う代表的な桁および部材として合成I桁<sup>14)</sup>、および圧延I型断面柱<sup>15)</sup>を取り上げ、腐食による終局強度特性、および耐荷力の低下に影響を及ぼすパラメータ因子を解析的に明らかにするとともに、各々の残存耐力の評価式を提案することにより、圧縮部材および曲げ部材の残存耐力評価法の提案に向けた基礎的資料を提供するものである。

## 2. 腐食形態

大気中の鋼材の腐食は、金属がそれを取り巻く環境物質によって電気化学的に侵食される現象であることは周知の通りであり、水と酸素の存在で発生する。大気中の腐食因子としては、湿度と温度、さらに汚染物質である海塩粒子および亜硫酸ガスなどがあり、腐食をより促進することになる。そのため、種々の防食対策が採られる。最も広く使用されている方法に塗装があるが、塗膜が劣化して防食機能を失ったまま放置すると鋼材の腐食は進行することになる。

腐食形態は、分布状況から全面腐食と局部腐食に大別でき、前者は鋼材の表面がほぼ均一に消耗する現象であり、海岸に面した位置や河口部の橋梁に海塩粒子の付着により発生することが多い。一方、後者は材質や腐食環境、腐食機構が不均一なときに局部的に腐食が進行する現象であり、橋梁形式を問わず腐食発生箇所は、床版ひび割れ損傷部や打継ぎ不良部からの漏水、伸縮装置部や床版端部からの雨水の落下・漏水、さらには継手部からの雨水などの進入しやすい桁端部、路面からの雨水や泥の跳ね返りによる滞水、ごみの堆積しやすい部位などに発生する。鋼桁橋では、特に主桁下フランジの減厚、フランジ幅の欠落、また腹板の開孔および減厚による腐食状態となる場合が多い。

以上のような実際の腐食形態を踏まえ、本論文ではその代表的腐食形態として、部材のフランジ上面が全面腐食した場合と局部腐食を生じた場合について検討する。

## 3. 解析モデル

### 3.1 合成 I 桁

#### (1) モデル諸元

解析対象とした合成 I 桁は、図-1 のように支間長  $\ell=33\text{m}$  の単純活荷重合成 I 桁橋 (4 主桁)<sup>16)</sup> の外桁断面であり、鋼桁は水平補剛材を 1 段配置とし、断面変化は考慮していない。表-1 に鋼桁の断面諸元を示す。上下フランジおよび腹板の材質は SM490Y、鉛直および水平補剛材の材質は SM400 である。床版は図-2 のように有効幅分の断面 ( $2270 \times 220\text{mm}$ ) を考慮している。また、荷重は床版上に等分布荷重を載荷する。初期不整は、支間中央の  $z$  軸方向下向き初期たわみ  $v_0$  として、支間長  $\ell$  の  $1/1000$  を最大値に持つ半波形式の正弦波として与える<sup>17)</sup>。なお、残留応力は考慮していない。

#### (2) 腐食モデル

腐食形態のモデル化には、腐食する場所およびその腐食範囲、腐食形状、腐食の深さなどを考慮することが必要になる。ここでは、2. でも述べたように腐食箇所は鋼桁下フランジの上面を対象とし、表-2 に示すよ

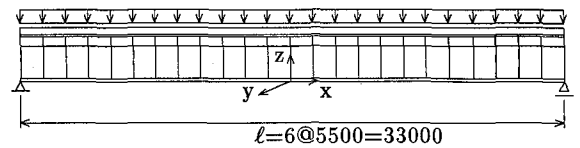


図-1 合成 I 桁の基本モデル (mm)

表-1 断面諸元

| 部材    | 寸法     |
|-------|--------|
| 上フランジ | 310×19 |
| 腹板    | 1700×9 |
| 下フランジ | 530×32 |
| 垂直補剛材 | 110×9  |
| 水平補剛材 | 100×9  |

(mm)

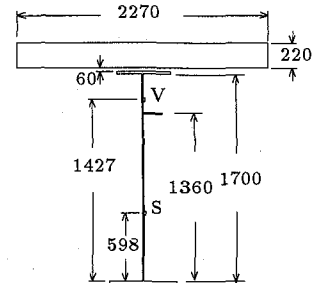


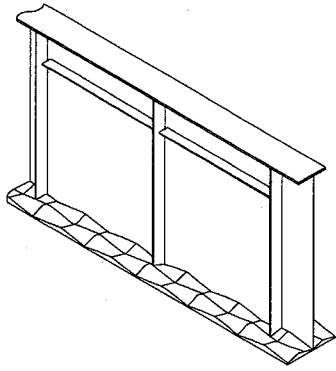
図-2 基本モデル断面形状 (mm)

表-2 合成 I 桁の腐食モデル

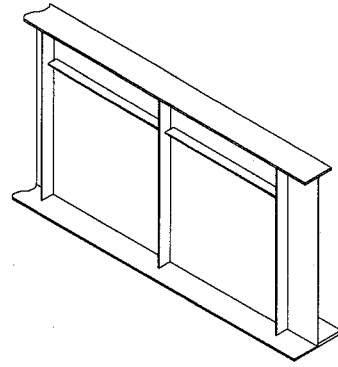
| 腐食モデル    | 体積欠損率<br>$\alpha$ | 最大腐食深さ<br>$d_{max}$ (mm) | 腐食形態     |
|----------|-------------------|--------------------------|----------|
| b0-00-00 | 0.00              | 0.0                      | 基本モデル    |
| a1-00-10 | 0.10              | 3.2                      | ①全面均一腐食  |
| a1-61-10 | 0.10              | 3.2                      | ②全面不均一腐食 |
| a1-62-10 | 0.10              | 6.4                      | ②全面不均一腐食 |
| a3-00-10 | 0.10              | 1.6/4.8                  | ③全面均一腐食  |
| pc-00-10 | 0.10              | 6.4                      | ④中央部局部腐食 |
| a1-00-20 | 0.20              | 6.4                      | ①        |
| a1-61-20 | 0.20              | 12.8                     | ②        |
| a1-62-20 | 0.20              | 12.8                     | ②        |
| a3-00-20 | 0.20              | 3.2/9.6                  | ③        |
| pc-00-20 | 0.20              | 12.8                     | ④        |
| pe-00-20 | 0.20              | 25.6                     | ⑤桁端部局部腐食 |
| a1-00-40 | 0.40              | 12.8                     | ①        |
| a1-61-40 | 0.40              | 25.6                     | ②        |
| a1-62-40 | 0.40              | 25.6                     | ②        |
| a3-00-40 | 0.40              | 6.4/19.2                 | ③        |

うに① 全面均一腐食、②全面不均一腐食、③ 桁下フランジの外側と内側で異なる全面均一腐食、④ 支間中央部の局部腐食、および⑤ 桁端部の局部腐食の 5 種類の腐食モデルを設定する。なお、表中の腐食モデル記号 ([ [ [ ] ] ]-[ [ [ ] ] ]-[ [ [ ] ] ]) は、[全面腐食 (a)、あるいは局部腐食 (p)] [桁内側外側の下フランジ板厚比、あるいは腐食位置 (中央部 c、端部 e)]-[ $n_x$  モード次数][ $n_y$  モード次数]-[体積欠損率 ( $\alpha\%$ )] を意味する。

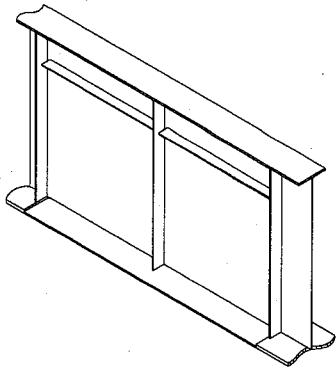
①の全面均一腐食モデル (a1-00- $\alpha$ ) は、腐食のない基本モデル (b0-00-00) に対して、下フランジを一定に減厚したモデルである。②の全面不均一腐食モデル (a1-



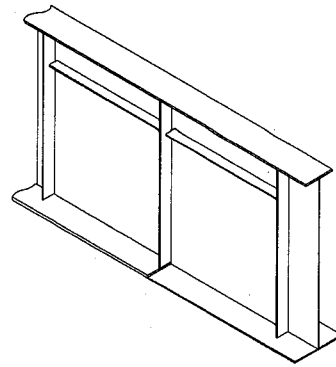
(a) 全面不均一腐食②



(b) 桁の内側・外側で異なる全面均一腐食③



(c) 支間中央部局部腐食④



(d) 桁端部局部腐食⑤

図-3 合成I桁の腐食概念図

$n_x n_y - \alpha$  は、下フランジの上面を次式のような二重正弦波とすることで擬似的に腐食を表現したモデルである。

$$t_{lf} = t_{lf0} - \frac{d_{max}}{2} \left\{ 1 + \cos\left(\frac{2n_x \pi x}{\ell}\right) \cos\left(\frac{2n_y \pi y}{b_{lf}}\right) \right\} \quad (1)$$

ここに、 $t_{lf0}$  (=32mm) は基本モデル下フランジ厚、 $d_{max}$  は最大腐食量、 $n_x, n_y$  は各々支間中央の下フランジ縁端部を座標原点とする x-y-z 座標系における x 方向 (橋軸方向) および y 方向 (橋軸直角方向) のモード次数、 $b_{lf}$  は下フランジ幅である。なお、ここでのモード次数には  $n_x=6, n_y=1, 2$  を用いている。

さらに、③の全面均一腐食モデル (a3-00- $\alpha$ ) は鋼桁下フランジの内側・外側で異なる全面均一腐食である。桁の内側の腐食量を外側の3倍とし、桁の内側と外側にそれぞれ均一腐食を下フランジに減厚して与える。④および⑤の局部腐食モデルは、各々支間中央部を部分的に減厚した局部腐食モデル (pe- $n_x n_y - \alpha$ ) と桁端部を部分的に減厚した局部腐食モデル (pe- $n_x n_y - \alpha$ ) である。支間中央部局部腐食モデルの腐食範囲は支間中央部12パネル分 (1パネルは鉛直補剛材間隔1375mm) とし、両端部局部腐食モデルの腐食範囲は桁端部3パネル分である。この範囲の腐食形状は均一腐食 ( $n_x = n_y = 0$ ) として一定減厚している。いま、②~⑤の腐食モデルの概念図を図-3に示す。

以上の5種類の腐食モデルの腐食量を表す基本パラメータとして、ここでは次式のような下フランジの体積欠損率  $\alpha$  を導入し、 $\alpha=0, 0.1, 0.2, 0.4$  の4ケースについて計算する。

$$\alpha = \frac{V_{lf0} - V'_{lf}}{V_{lf0}} \quad (2)$$

ここに、 $\alpha$  : 体積欠損率

$V'_{lf}$  : 腐食モデルの下フランジ体積

$V_{lf0}$  : 基本モデルの下フランジ体積

### (3) 数値計算手法

弾塑性有限変位解析の数値計算には、汎用有限要素法解析ソフトウェア MARC K7.3<sup>18)</sup> を使用する。腐食を考える鋼桁のフランジおよび腹板には腐食形態を的確に表現するために8節点ソリッド要素を、鉛直補剛材および水平補剛材にはシェル要素を用いる。また、床版は有効幅分を考慮した断面積と、ハンチ高さを考慮した剛性を有する弾性梁要素として上フランジ上面に配置する。床版要素の節点と、上フランジの節点は共有している。解析モデルの両端部は単純支持とし、横桁と対傾構の取付位置に相当する節点は面外方向変位を拘束している。

具体的な腐食及び減厚の与え方は、腐食の全くない健全モデルの下フランジ上面の節点を移動させること

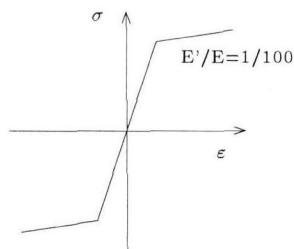


図-4 鋼材の応力-ひずみ関係

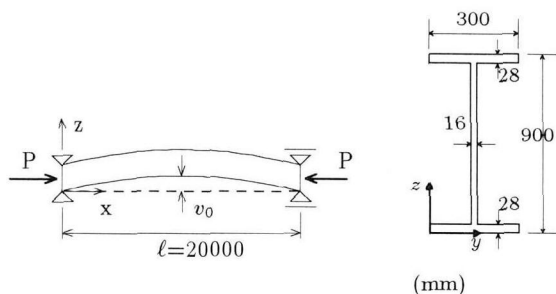


図-5 柱の基本モデル

図-6 断面形状

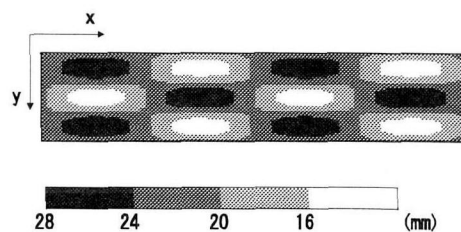
によって実現した．そのため要素分割数は，正弦波状の腐食を表現するために，正弦 1 波モードで 5 節点以上を確保するように設定した．なお，ソリッド要素でモデル化したフランジおよび腹板の要素分割は，板厚方向に 2 分割とし，シェル要素は板厚方向に 5 つの積分点を有する．総節点数は 7174，総要素数は 5172 である．

鋼部材の材料構成則は，図-4 に示すようなひずみ硬化係数 ( $E'/E=1/100$ ,  $E$ ,  $E'$  はヤング率および接線弾性係数) を有する移動硬化型バイリニアモデルである．鋼部材の降伏判定は von-Mises の降伏条件を適用している．また，非線形数値解析には弧長増分法を用いる．

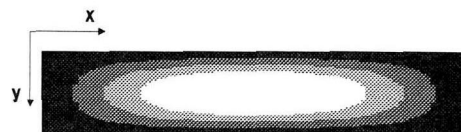
## 3.2 柱

### (1) モデル諸元

対象とした柱の基本モデルは，図-5 に示すような単純支持された部材長  $l=20\text{m}$  ( $l/r=55$ ,  $r$  は断面 2 次半径) の鋼圧縮部材である．なお，面外方向変位は拘束している．断面形状は，図-6 に示すような圧延 H 形断面であり，材質は SM490Y ( $P_y=10700\text{kN}$ ) を用いている．初期不整については，柱の耐力力にとって最も厳しい初期たわみ形状として，支間中央において  $v_0 = l/1000$  の大きさを持つ正弦波形を腐食のないフランジ側に導入する．残留応力は考慮していない．なお，以後本文中では腐食しているフランジを下フランジ，腐食していないフランジを上フランジと呼ぶ．さらに，全面均一腐食モデルを対象にして，部材長  $l=10\sim 50\text{m}$  に変化した場合の残存耐力への腐食の影響を検討する．



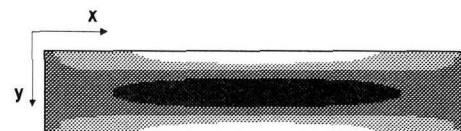
(a) 全面不均一腐食②



(b) 支間中央部局部腐食④



(c) 支間 1/4 点部腐食⑥



(d) 縁端部局部腐食⑦

図-7 柱の腐食概念図

### (2) 腐食モデル

腐食形態は，3.1 (2) の①全面均一腐食モデル，②全面不均一腐食モデルおよび④支間中央部局部腐食の 3 種類の他に，新たに⑥部材長の 1/4 点部分の局部腐食モデル ( $pq\text{-}n_x n_y\text{-}\alpha$ ) と⑦縁端部局部腐食 ( $pe\text{-}n_x n_y\text{-}\alpha$ ) を加えた 5 種類である．これらの腐食形状は，下フランジの上面を次式のような二重正弦波により擬似的に表現している．ここに， $t_{lf0}=28\text{mm}$  である．

$$t_{lf} = t_{lf0} - \frac{d_{max}}{2} \left\{ 1 - \sin\left(\frac{n_x \pi x}{\ell}\right) \sin\left(\frac{n_y \pi y}{b_{lf}}\right) \right\} \quad (3a)$$

$$t_{lf} = t_{lf0} - \frac{d_{max}}{2} \left\{ 1 + \sin\left(\frac{n_x \pi x}{\ell}\right) \cos\left(\frac{n_y \pi y}{b_{lf}}\right) \right\} \quad (3b)$$

$$t_{lf} = t_{lf0} - d_{max} \sin\left(\frac{n_x \pi x}{\ell}\right) \sin\left(\frac{n_y \pi y}{b_{lf}}\right) \quad (3c)$$

全面不均一腐食および部材長の 1/4 点部分の局部腐食は式 (3a) を，縁端部局部腐食は式 (3b) を，さらに支間中央部局部腐食は式 (3c) を用いて腐食形状を与える．これらの腐食モデルの概念図を図-7 に示す．この図は，下フランジ上面を表している．なお， $x$ - $y$ - $z$  座標系の座標原点は桁端部の下フランジ縁端部である．解

表-3 柱の腐食モデル

| 腐食モデル    | 体積欠損率<br>$\alpha$ | 最大腐食深さ<br>$d_{max}(mm)$ | 腐食形態        |
|----------|-------------------|-------------------------|-------------|
| b0-00-00 | 0.0               | 0.00                    | 基本モデル       |
| a1-00-10 | 0.1               | 2.8                     | ① 全面均一腐食    |
| a1-43-10 | 0.1               | 5.6                     | ② 全面不均一腐食   |
| a1-85-10 | 0.1               | 5.6                     | ② 全面不均一腐食   |
| pc-11-10 | 0.1               | 6.9                     | ④ 中央部局部腐食   |
| pe-12-10 | 0.1               | 5.6                     | ⑥ 縁端部局部腐食   |
| pq-21-10 | 0.1               | 5.6                     | ⑦ 1/4 点局部腐食 |
| a1-00-20 | 0.2               | 5.6                     | ①           |
| a1-43-20 | 0.2               | 11.2                    | ②           |
| a1-85-20 | 0.2               | 11.2                    | ②           |
| pc-11-20 | 0.2               | 13.8                    | ④           |
| pe-12-20 | 0.2               | 11.2                    | ⑥           |
| pq-21-20 | 0.2               | 11.2                    | ⑦           |
| a1-00-30 | 0.3               | 8.4                     | ①           |
| a1-43-30 | 0.3               | 16.8                    | ②           |
| a1-85-30 | 0.3               | 16.8                    | ②           |
| pc-11-30 | 0.3               | 20.7                    | ④           |
| pe-12-30 | 0.3               | 16.8                    | ⑥           |
| pq-21-30 | 0.3               | 16.8                    | ⑦           |

析対象とした具体的な腐食モデルを表-3に示す．なお，局部腐食形状は合成 I 桁の場合と異なり，局部腐食領域表面に不均一な腐食を与えている．また，数値計算は 3.1 (3) で述べた手法により解析する．要素分割は，板厚方向に 2 分割しており，最大要素数は 6720(全自由度数 10449) である．

#### 4. 弾塑性挙動と耐荷力

##### 4.1 合成 I 桁

まず，腐食のない健全な合成 I 桁である基本モデルの弾塑性挙動について述べる．図-8 は，荷重と支間中央部の  $z$  軸方向変位  $v$  の関係を示したものである．図中，縦軸は全塑性モーメント  $M_p (=22690\text{N}\cdot\text{mm})$  に対する作用曲げモーメント  $M$  の無次元量を，横軸は支間長  $\ell$  に対する  $z$  軸方向変位  $v$  の無次元量を表している．基本モデルでは，図-9 から明らかなように面外方向への変形がほとんどなく，下フランジ中央部が初期降伏し，腹板，上フランジの順に降伏領域が広がっている．本解析では，床版を弾性体と仮定してモデル化しているため，鋼桁部の全断面が塑性化した後も床版部分で荷重に抵抗し続けることになる．そこで，ここでは上フランジの降伏開始時点の曲げモーメントを曲げ耐力  $M_{max0}$  と定義する．このとき，基本モデルの曲げ耐力は  $M_{max0} = 0.955M_p$  となる．

同様に，基本モデル，全面均一腐食モデルおよび局部腐食モデルの荷重一変位関係をまとめたのが図-10

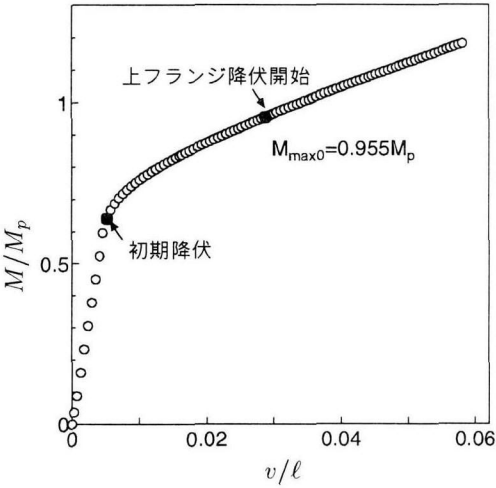
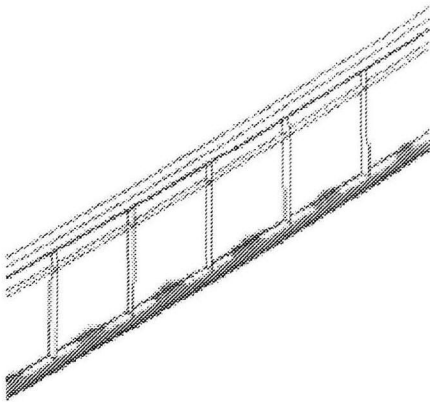
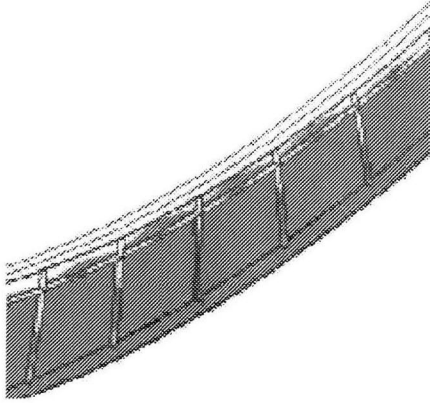


図-8 基本モデルの荷重-変位関係



(1) 初期降伏状態 (灰色部分：降伏した領域)



(2) 上フランジ降伏開始状態

図-9 基本モデルの支間中央部付近の変形と降伏状態

である．これらの腐食モデルの弾塑性挙動は基本モデルの曲線と同じ傾向を示しているが，体積欠損率  $\alpha$  が増大するにしたがい曲げモーメントは低下していることがわかる．また，桁端部局部腐食モデルの曲げモーメント (●曲線) は基本モデルの曲線 (○曲線) と一致していることから，この荷重条件のもとでは桁端部局部腐食が終局耐力に影響していないことになる．なお，

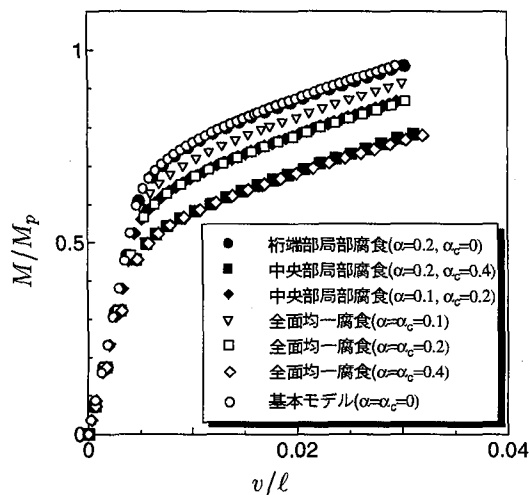


図-10 腐食モデルの荷重-変位関係

図示していない全面不均一腐食モデルの荷重-変位関係は、各々体積欠損率 $\alpha$ の等しい全面均一腐食モデルの曲線にほぼ重なっている。また、腐食モデルの塑性進展状況は図示していないが図-9と同様な挙動を示している。

以上の解析結果をもとに、全腐食モデルの体積欠損率 $\alpha$ が曲げ耐力に与える影響を明らかにしたのが図-11である。図中の横軸は体積欠損率 $\alpha$ を、縦軸は基本モデルの曲げ耐力に対する腐食モデルの曲げ耐力比( $M_{max}/M_{max0}$ )を表している。全面腐食モデルの曲げ耐力比は、同一体積欠損率 $\alpha$ に対してほぼ重なっている。しかも、 $\alpha$ の増大に伴って曲げ耐力は比例的に低下し、 $\alpha=0.4$ では基本モデルの約82%耐力に低下している。この結果から、全面腐食モデルの残存耐力は $\alpha$ に依存することが明らかであり、次式のように表すことができる。

$$\frac{M_{max}}{M_{max0}} = 1 - 0.468\alpha \quad (4)$$

一方、局部腐食モデルの曲げ耐力比(▲, △印)は $\alpha$ との間に全面腐食モデルに見られたような相関関係は認められない。しかし、図-10を見ると、前述したように $\alpha=0.2$ の桁端部腐食モデルは、基本モデルの曲げ耐力に一致している。さらに、 $\alpha=0.2$ の支間中央部腐食モデルでは、 $\alpha=0.4$ の全面均一腐食モデルの曲げ耐力に、さらに $\alpha=0.1$ の支間中央部腐食モデルでは、 $\alpha=0.2$ の全面均一腐食モデルの曲げ耐力に一致している。そこで、ここで対象とした合成I桁の局部腐食モデルの曲げ耐力は、部材の終局耐力を支配する塑性化の著しい断面位置と一致する支間中央部断面の腐食減厚状況によって表すことが可能であると考え、新たに次式のよ

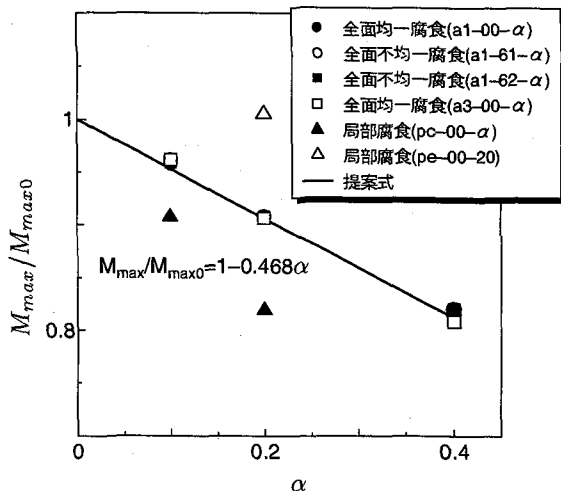


図-11 体積欠損率 $\alpha$ と曲げ耐力の関係

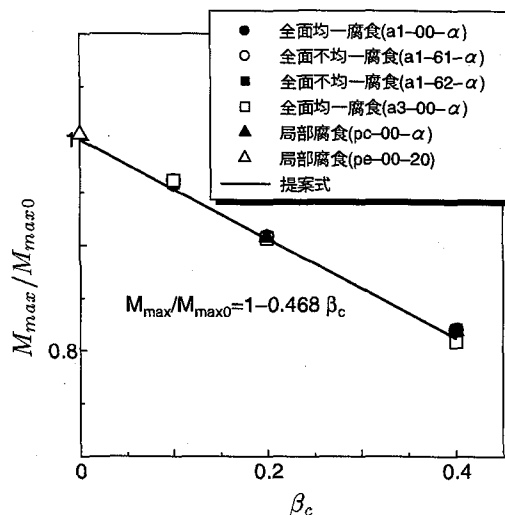


図-12 断面欠損率 $\beta_c$ と曲げ耐力の関係

うな断面欠損率 $\beta_c$ を定義する。

$$\beta_c = \frac{A_{lfc0} - A'_{lfc}}{A_{lfc0}} \quad (5)$$

ここに、

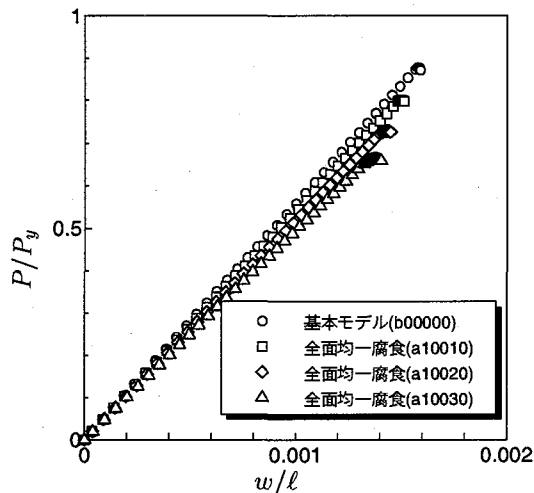
$\beta_c$ : 支間中央部断面欠損率

$A'_{lfc}$ : 腐食モデル支間中央部下フランジ断面積

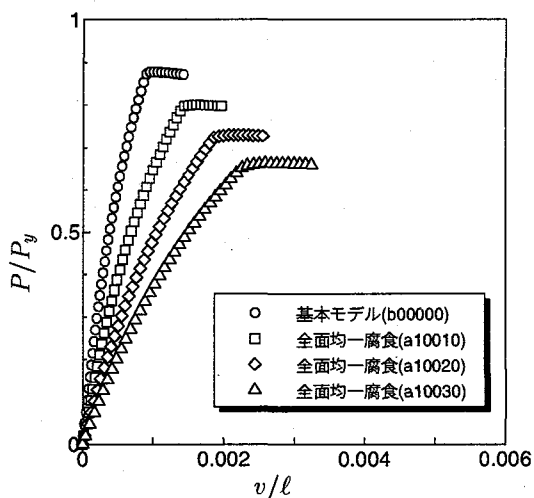
$A_{lfc0}$ : 基本モデル支間中央部下フランジ断面積

この $\beta_c$ を用いて、曲げ耐力の相関関係をまとめ直したのが図-12である。 $\beta_c$ をパラメータとして導入することにより、局部腐食モデルにおいても曲げ耐力比と $\beta_c$ の間に相関性が現れることがわかる。このとき、両者の関係は、式(4)において $\alpha$ を $\beta_c$ に置き換えた次式で表すことができる。

$$\frac{M_{max}}{M_{max0}} = 1 - 0.468\beta_c \quad (6)$$



(1) P-軸方向変位  $w$



(2) P-z 軸方向変位  $v$

図-13 全面均一腐食モデルの荷重-変位関係

ところで、支間中央部の下フランジ幅に欠落がなければ、今回の腐食モデルでは下フランジ腐食断面積 ( $A'_{lfc}$ ) を橋軸直角方向の平均板厚 ( $t_{lfa}$ ) を用いて  $A'_{lfc} = b_{lf} t_{lfa}$  と表すことができるので、式 (5) は、

$$\beta_c = 1 - \frac{t_{lfa}}{t_{lfo}} \quad (7)$$

と書き直すことができる。

したがって、支間中央部断面の橋軸直角方向の腐食板厚を測定することにより平均板厚  $t_{lfa}$  が求まるので、得られる式 (7) の  $\beta_c$  を式 (6) に代入することにより合成 I 桁の残存曲げ耐力を評価することが可能になる。

## 4.2 柱

次に、柱の基本モデルと全面均一腐食モデルの弾塑性挙動を示す。まず、軸方向変位  $w$  および  $z$  軸方向変位  $v$  と荷重の関係を表したのが図-13 である。図-13 (1) および (2) の横軸は各々部材長に対する軸方向変位

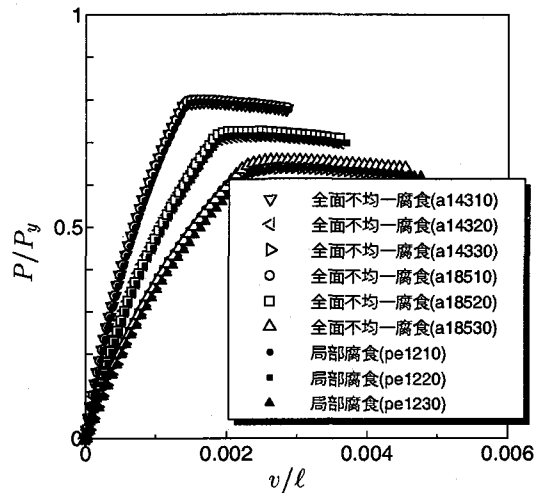


図-14 全面不均一腐食モデルと縁端部局部腐食モデルの荷重-変位関係

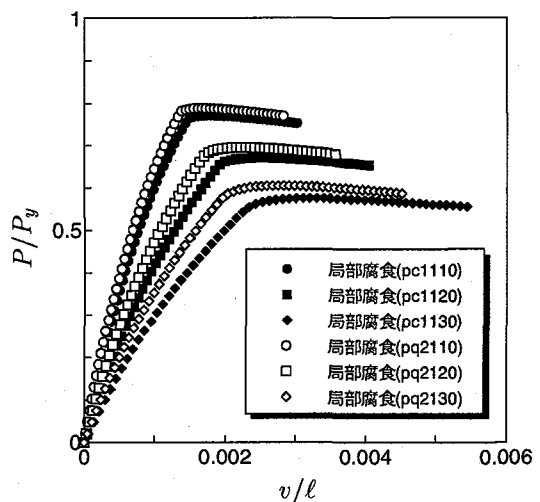


図-15 支間中央部局部腐食モデルおよび 1/4 点局部腐食モデルの荷重-変位関係

の無次元量  $w/l$  および  $z$  軸方向変位の無次元量  $v/l$ 、縦軸は降伏荷重に対する圧縮荷重の無次元量  $P/P_y$  である。図-13 (1) の軸方向変位  $w$  は、荷重の増加に伴い線形的に増大して終局状態になる。図-13 (2) の  $z$  軸方向変位挙動において、基本モデルの挙動は軸方向変位と同様に線形的に増加するが、他の腐食モデルに比べてその大きさは小さい。その後限界荷重に達した後変位のみが急増している。一方、全面均一腐食モデルは、 $\alpha$  の増大にともない初期勾配も低下している。その後、荷重の増加にともない限界荷重に達した後上フランジ中央部の塑性化の進行に伴い、 $z$  軸方向変位  $v$  が急激に増加して終局状態になる。 $\alpha$  の増大にともない圧縮耐力も低下している。基本モデルの圧縮耐力  $P_{cr0}$  は、 $P_{cr0} = 0.878 P_y$  である。

同様に、全面不均一腐食モデルおよび縁端部局部腐

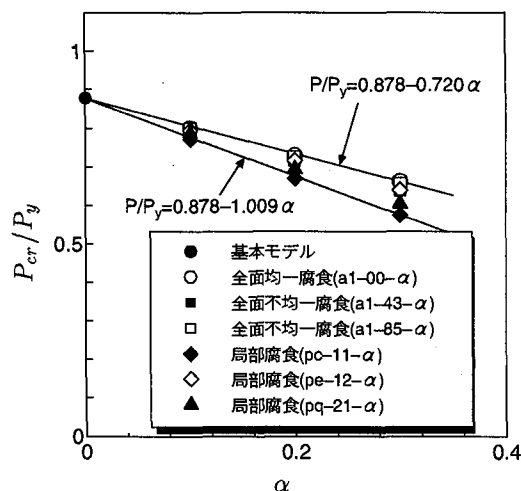


図-16 体積欠損率  $\alpha$  と圧縮耐力の関係

食モデルについて示したのが図-14である。図から明らかなように、全面不均一腐食モデルの挙動は全面均一腐食モデルに比べて変位が増大しているが、全体的な挙動は同様の傾向を示している。モード次数の違いによる全面不均一腐食モデルの荷重変位曲線は、各  $\alpha$  に対して重なっていることから圧縮耐力の相違はほとんどみられない。それでも、詳細に見てみるとモード次数の多い全面不均一腐食モデルは表面の波が細くなるため、中立軸位置の変化が少なく全面均一腐食モデルに近づくことから、モード次数の少ない全面不均一腐食モデルの圧縮耐力に比べて高めの値を示す傾向にある。また、支間中央部の縁端部で腐食が激しい縁端部局部腐食モデルの圧縮耐力は、全面不均一腐食モデルに比べて多少低い値となる。

次に、支間中央部局部腐食モデルおよび 1/4 点局部腐食モデルの弾塑性挙動を示したのが図-15である。支間中央部局部腐食モデルは基本モデルの圧縮耐力において最も厳しい断面である支間中央部に、さらに局部腐食が存在する場合である。このモデルは、全面均一腐食モデルに比べて  $z$  軸方向変位  $v$  が大きい。このモデルにおいて最も腐食減厚の大きな  $\alpha=0.3$  の場合、全腐食モデルの中で最小圧縮耐力  $(P_{cr}/P_y)_{min}=0.575$  を与える。また、支間長の 1/4 点に局部腐食を生じているモデルの圧縮耐力は、中央部局部腐食モデルに比べて高めの耐力となるが、全体的には同様の挙動を示している。

以上の解析結果をもとに、体積欠損率  $\alpha$  と腐食形態が残存圧縮耐力に及ぼす影響を示したのが図-16である。図中、横軸は体積欠損率  $\alpha$ 、縦軸は降伏荷重  $P_y$  に対する圧縮耐力  $P_{cr}$  の比である。全腐食モデルとも  $\alpha$  の増加に伴い線形的に残存耐力が低下しており、 $\alpha=0.3$  の中央部局部腐食モデルの圧縮耐力は基本モデルのその 65%まで低下している。また、同一体積欠損率  $\alpha$

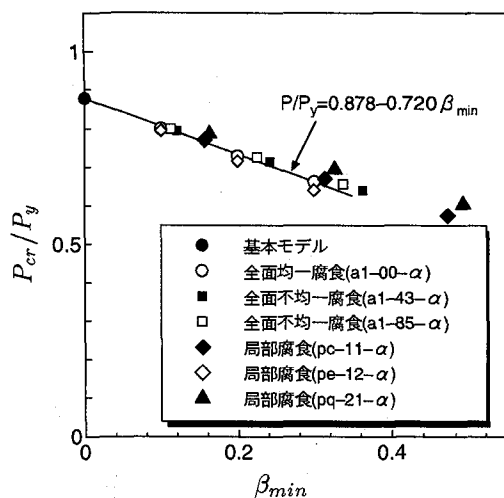


図-17 最小断面欠損率  $\beta_{min}$  と圧縮耐力の関係

に対する腐食モデル間の圧縮耐力の相違は  $\alpha$  の増加にしたがって大きくなり、全面均一腐食モデルの圧縮耐力の低下が最も小さく、以下全面不均一腐食、縁端部局部腐食、1/4 点局部腐食、中央部局部腐食の順で圧縮耐力の低下が大きい。圧縮耐力の上限値を示す全面均一腐食 ( $a1-00-\alpha$ ) およびその下限値を示す局部腐食 ( $pc-11-\alpha$ ) の圧縮耐力と体積欠損率  $\alpha$  の関係は、各々次のような直線近似式となる。

$$\frac{P_{cr}}{P_y} = 0.878 - 0.720 \alpha \quad (8)$$

$$\frac{P_{cr}}{P_y} = 0.878 - 1.009 \alpha \quad (9)$$

このように、腐食に関する基本パラメータ  $\alpha$  を用いた場合、同一体積欠損率  $\alpha$  において腐食形態の違いにより  $P_{cr}/P_y$  にバラツキが見られる。そこで、ここでは各腐食形態における最も腐食欠損の激しい位置の最小断面積に着目し、次式の最小断面欠損率パラメータ  $\beta_{min}$  を新たに定義する。

$$\beta_{min} = \frac{A_{f0} - A'_{min}}{A_{f0}} \quad (10)$$

ここに、 $A'_{min}$  は、各腐食モデルにおける下フランジの最小断面積である。

このパラメータを用いてまとめ直したのが図-17である。腐食モデルの圧縮耐力と最小断面欠損率にはかなり相関性が現れている。そこで、全面均一腐食モデルの圧縮耐力と体積欠損率  $\alpha$  の直線式において、 $\alpha$  を最小断面欠損率  $\beta_{min}$  に置き換えた次式

$$\frac{P_{cr}}{P_y} = 0.878 - 0.720 \beta_{min} \quad (11)$$

を柱の近似相関式として提案する。この式は図-17の実線と与えられる。また、上式は基準モデルの圧縮耐



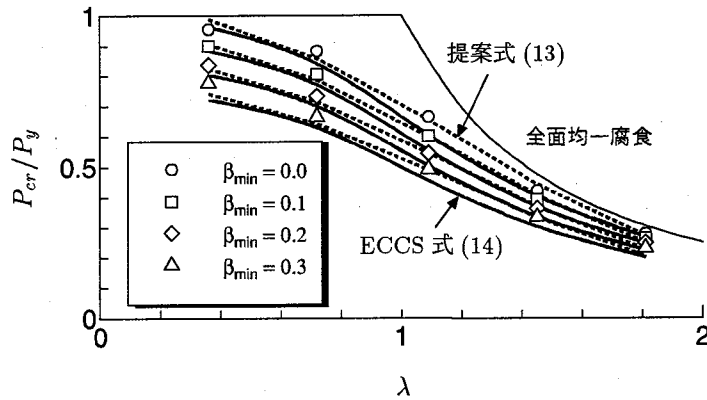


図-18 全面均一腐食した柱の強度相関曲線

力  $P_{cr0}$  を用いるならば

$$\frac{P_{cr}}{P_{cr0}} = 1 - 0.820 \beta_{min} \quad (12)$$

と表すこともできる。上式は、腐食のない健全な柱の耐力に最小断面欠損率  $\beta_{min}$  で表される腐食低減係数  $(1 - 0.820 \beta_{min})$  を乗ずることにより腐食した柱の残存耐力を評価できることを意味している。

最後に、全面均一腐食モデルの  $l/r$  の変化が圧縮耐力に与える影響について解析した結果をまとめたのが図-18である。図中、横軸は換算細長比  $\lambda$ 、縦軸は限界圧縮耐力の無次元量  $P_{cr}/P_y$  である。各最小断面欠損率  $\beta_{min}$  の圧縮耐力は、換算細長比  $\lambda$  の増大にともない低下し、Euler 曲線に漸近している。また、各換算細長比  $\lambda$  における断面欠損率  $\beta_{min}$  の違いによる耐力間の低下の割合はほぼ同一である。

したがって、柱の残存耐力は基本モデルの耐力曲線が与えられれば式 (12) の右辺の低減係数との積によって評価できることになる。いま、初期不整として初期たわみのみを考慮した基本モデルの耐力曲線は、次式

$$\frac{P_{cr0}}{P_y} = (0.186\lambda^3 - 0.657\lambda^2 + 0.179\lambda + 1) \quad (13)$$

$$\lambda = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \frac{l}{r}$$

のように  $\lambda$  に関する 3 次関数式で近似できる。したがって、全面均一腐食減厚した柱の残存耐力の近似相関式は、式 (13) を式 (12) の相関式に代入することにより柱の残存耐力  $P_{cr}$  を求めることができる。図中における破線の曲線は、式 (13) を用いた近似耐力曲線である。

また、式 (13) に対して、ECCS で提案されている柱の基準耐力曲線<sup>19)</sup>の中で、次式で与えられる ECCS-a 曲線を用いた場合の残存耐力を参考までに記載する。

$$\frac{P_{cr0}}{P_y} = \frac{1}{2\lambda^2} \left( 1 + 0.206(\lambda - 0.2) + \lambda^2 - \sqrt{\{1 + 0.206(\lambda - 0.2) + \lambda^2\}^2 - 4\lambda^2} \right) \quad (14)$$

この曲線を式 (12) に代入して得られる残存耐力を示したのが図中の実線である。ECCS 曲線は残留応力をも考慮した近似式であるため、腐食モデルの結果に対して中間柱の領域において低めの評価をしているが、残存耐力を評価する上で準用できる可能性がある。

## 5. 結論

ここでは、腐食した合成 I 桁と柱を取り上げ、各々の残存耐力の評価式について解析的に検討した。得られた結果をまとめると以下ようになる。

- 1) 全面腐食モデルは腐食量が多いほど、局部腐食モデルは基本モデルにおいて最も塑性化の激しい断面位置と局部腐食領域が一致し、さらに腐食量が多いほど、健全な部材に比べて残存耐力の低下が著しい。
- 2) 今回の対象部材において、全面不均一腐食の残存耐力はモード次数の違いによる影響は小さいが、その中では同じ体積欠損率  $\alpha$  に対してモード次数の少なく、腐食波の深い腐食形態が耐力に影響する。
- 3) 合成 I 桁の曲げ耐力は、対象とした全腐食モデルの曲げ耐力を統一的に表すパラメータとして支間中央部の断面欠損率  $\beta_c$  を定義し、式 (6) により残存耐力を評価することができる。
- 4) 腐食減厚した柱の圧縮耐力は、最小断面欠損率  $\beta_{min}$  を用いることにより全腐食モデルの圧縮耐力を統一的に表すことができ、式 (12) により残存耐力を評価することが可能である。また、全面均一腐食モデルの柱の場合、細長比の違いによる残存耐力は、基本モデルの耐力曲線である式 (13) を用いた式 (12) で与えられる。この式は換算細長比  $\lambda$  と最小断面欠損率  $\beta_{min}$  の関数となる。

今回の合成 I 桁の解析では、主桁の断面変化を考慮していないために、腐食モデルの耐力は設計上応力の余裕の少ない支間中央部付近の腐食量に支配された。今

後主桁の断面変化、および柱の  $l/r$  の変化を考慮し、また局部腐食の形状およびその腐食領域をパラメータにした検討を行う予定である。

謝辞： 本研究をまとめるに当たり、日本鋼構造協会既設鋼構造物の耐久性評価と補修・補強に関する調査研究小委員会（森猛委員長）の委員の方々には多くのご意見をいただいた。ここに、記して感謝する次第である。

#### 参考文献

- 1) 西川和廣：道路橋示方書照査規定化とこれからの橋—耐久性・支持管理関連規定を中心として—，鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集，pp.39-48，1999
- 2) 名取暢・浅岡敏明・稲田育朗：鋼端の補修・補強，横河ブリッジ技報，No.21，pp.63-90，1992.
- 3) 土木学会鋼構造委員会橋の寿命評価小委員会：鋼橋の劣化現象と損傷の評価，鋼構造シリーズ 7，土木学会，1994.
- 4) 藤原博・菅野照造：鋼橋の塗膜劣化と塗膜下腐食との関連性に関する研究，土木学会論文集，No.537/I-35，pp.167-181，1996.
- 5) 村中昭典・皆田理・藤井堅：腐食鋼板の表面性状と残存耐力，構造工学論文集，Vol.44A，pp.1063-1071，1998.
- 6) 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.12，pp.19-25，1989.
- 7) 大野宗・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.
- 8) 村上茂之・西村宣男・亀井義典：腐食被害を受けた周辺支持板および自由突出板の圧縮強度特性，土木学会年次学術講演会講演概要集，第 47 回，I-A28，pp.232-233，1992.
- 9) 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，土木学会年次学術講演会講演概要集，第 48 回，I-A36，pp.220-221，1993.
- 10) A.F.Mateus and J.A.Wits：Post-buckling of corroded steel plates：An assessment of the design codes，Proc. of BOSS'97，Vol.3，pp.3-17，1997
- 11) 中沢正利：腐食鋼板の圧縮耐力特性，土木学会年次学術講演会講演概要集，第 55 回，CS-86，2000.
- 12) 吉野正兼・森猛：腐食を受けた鋼桁の曲げ耐力の解析と評価方法の検討，土木学会関東支部技術研究発表会講演会講演概要集，第 27 回，pp.192-193，2000.
- 13) J.R.Kayser and A.S.Nowak：Capacity Loss Due to Corrosion in Steel-Girder Bridges，Journal of structural engineering，Vol.115，No.6，pp.1525-1537，1989.
- 14) 加藤美幸・野上邦栄・山沢哲也：腐食減厚に伴う合成桁の残存耐力の評価法に関する基礎的研究，土木学会年次学術講演会講演概要集，第 55 回，CS-88，2000.
- 15) 小栗友紀・山沢哲也・野上邦栄：腐食した柱部材の残存耐力評価について，土木学会年次学術講演会講演概要集，第 55 回，CS-87，2000.
- 16) 日本橋梁建設協会：合成桁の設計例と解説，1995.
- 17) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，I 共通編，II 鋼橋編，1996.
- 18) MARC C 編 Program Input，1998.
- 19) 土木学会：座屈設計ガイドライン，1987.

(2000 年 9 月 14 日 受付)