

## 第4章 健全度評価

### 4.1 一般

点検及び調査結果、劣化機構及び劣化予測の推定結果によって、腐食損傷や腐食劣化の進行状況を評価する。それらを総合的に評価・判定し、鋼構造物の保有している性能を評価しなければならない。

#### 【解説】

鋼構造物に腐食が生じると、部材断面が減少して強度及び剛性が低下する。また、腐食が進行している環境中でその部材に繰り返し応力が作用すると、通常の疲労破壊強度より小さい応力で破壊する時がある。鋼構造物の腐食に関しては、発生部位あるいは進行状態によって要求される性能に著しい影響を及ぼすことがある。

鋼構造物の変状としては、供用直後から発生する「初期欠陥」、塗膜表面の浅いきずなどの、時間経過によって進行しない「損傷」、時間経過に伴って進行する「劣化」に分類することができる。このうち、「初期欠陥」は、製作時に使用した鋼材の材料不良、防食材料の不良、施工時の欠陥等で、変状を進行させる要因となったり、最悪、鋼材が腐食し、断面欠損となる場合もある。

損傷は、車両や船舶の衝突、地震などの特殊な外力によって防食機能が破壊し、防食機能を失う結果となる。このように、供用直後、供用中に発生する変状や損傷について、鋼構造物の腐食に関係する劣化機構及び劣化予測の推定を行い、損傷や劣化の進行状況を評価することが必要である。これによって、鋼構造物の耐久性能や耐荷性能を総合的に評価し、判定することが安全性、使用性に富んだ鋼構造物を維持管理していく必要な事項である。

### 4.2 残存耐荷力評価

#### 4.2.1 一般

- (1) 腐食した構造物の残存耐荷力の評価・推定においては、計測されたデータの精度や緻密さを考慮し、評価解析手法の特性や解析精度、構造物の重要度等を考慮して、適切な安全率を設定しなければならない。
- (2) 腐食した構造物の残存耐荷力は、構造物を構成する要素あるいは部材の耐荷力を用いて評価してよいが、要素あるいは部材の耐荷力低下が構造物全体の耐荷力におよぼす影響を把握するために、構造物全体の残存強度評価解析を行って検証しておくことが望ましい。
- (3) 構造物を構成する要素あるいは部材の残存耐荷力を評価するには、腐食している領域と形態および作用外力を考慮して、適切な評価法を選ばなくてはならない。

#### 【解説】

- (1) 腐食した構造物の残存耐荷力を評価するためには、構造物の腐食状態を把握する必要がある。計測は、腐食箇所、腐食領域、腐食表面の腐食深凹凸形状、板厚などについて行うが、腐食深凹凸形状あるいは板厚はできるだけ正確かつ密に測定するのが、その後の残存強度解析の実施のためには望ましい。しかしながら、実務においては、密な計測ができない場合が多いと考えられ、このような場合には、計測結果から得られる代表値(平均板厚、板厚の標準偏差、偏心などの耐荷力評価に必要な統計値)の誤差は大きくなることが予想さ

れる。また、耐荷力解析手法に依存する精度誤差もある。したがって、腐食した構造物の残存強度を評価する場合には、上記の誤差や構造物の重要度を勘案して適切に安全率を決めて評価することとした。

- (2) 構造物の維持管理において最も重要なことは、腐食した構造物の現有保有性能(残存耐荷力)を把握することであるが、一般に、構造物全体の耐荷力を正確に把握することは極めて難しいことを勘案し、部材あるいは板要素の強度評価を行って、構造物の残存耐荷力を求めてよいとした。これは、一般に、構造物全体の耐荷力は、部材強度に対応する構造物の耐力よりも大きくなるので、要素あるいは部材強度評価によって安全側になることを考慮したものである。しかし、主部材などでは、腐食による耐荷力低下が構造物全体の残存耐荷力に大きく影響する場合も予想されるため、全体解析を行ってその影響度を把握しておくことが望ましい。また、構造物によっては、構造物の残存耐荷力を比較的容易に評価することが可能な場合もある。このような場合には、板要素や部材の強度評価を省略して、有限要素法などにより構造物全体の耐荷力解析を行う方が望ましい。
- (3) 部材あるいは板要素の残存耐荷力評価には、腐食領域、腐食形態を正確に把握し、作用外力と発生応力をふまえて、適切な評価手法を用いる必要がある。有限要素法による残存耐荷力解析を行って評価する場合、解析で使用する有限要素は、作用外力と予想される崩壊形式に応じて適切な要素を採択しなくてはならない。たとえば、腐食凹凸表面形状による応力集中が残存耐荷力を決定する要因となる場合には、腐食表面の凹凸を表現できる程度の細かな立体要素を適用する必要がある。一方、板の座屈によって耐荷力が決まる場合には、板要素やシェル要素を使用できる。このように、作用外力に対応して予想される崩壊形式が解析において表現可能な要素を選択する必要がある。

#### 4.2.2 残存耐荷力評価法

構造物あるいは部材や板の残存耐荷力は以下の評価法を用いてよい。

- (1) 腐食形態を考慮した有限要素法による方法
- (2) 発生応力と予想される崩壊形式を考慮した適切な評価指標を用いて、既存の耐荷力評価式により評価する方法

##### 【解説】

- (1) 腐食形態を考慮した有限要素法による方法

有限要素法による残存耐荷力解析では、材料学的および幾何学的非線形性を考慮した複合、非線形解析にともなう境界条件や荷重条件の与え方には、十分に注意を払う必要がある。使用する有限要素は、作用する外力と目的とする耐荷力(予想される崩壊形式)に応じて適切に選択・採用するとともに、腐食形態と崩壊形式を精度よく評価できる大きさ(要素分割)を設定する必要がある。たとえば、腐食凹凸表面形状による応力集中が残存耐荷力を決定する要因となる場合には、腐食表面の凹凸を表現できる程度の細かな立体要素を適用する必要がある。一方、板の座屈によって耐荷力が決まる場合には、板要素やシェル要素を使用してよい。この場合の板厚は、要素の領域の平均板厚を用いてよい。また、片面のみが腐食している場合には、中央面の偏心を考慮する必要がある。

溶接による初期不整(初期たわみと残留応力)は腐食にともなって変化するが、腐食していない構造物の耐荷力解析で仮定されるものを使用してよい。

- (2) 発生応力に対応する評価指標を用いて、既存の耐荷力評価式により評価する方法

3.2に示す統計値を基に評価指標を求め、適当な既存の耐荷力評価式に代入して残存耐荷力を評価する試みがなされている。これらの結果を、表-解4.2.1にまとめて示す。

表-解4.2.1 耐力評価のための評価指標と評価式

評価耐力	評価式と評価指標	文献	取出した部材	備考
引張強度	$P_u = t_e \cdot b \cdot \sigma_b$ 有効板厚: $t_e' = t_{lm} - \alpha \cdot S$	(1)	水力発電所ゲート	実験 (最小板厚,もしくは局所的な最小平均板厚を含む断面近傍で破断)
降伏荷重	$P_y = A_e \cdot \sigma_y, A_e = t_e \cdot B$ 有効板厚: $t_e = t_{avg} - 0.7 \cdot \sigma$	(2)	フェリー渡橋(デッキ), ダム洪水吐ゲート(スキンプレート,横桁腹板)	実験 (ほぼ最大腐食位置で破断, 平均断面積は最小の位置)
引張伸び	(塑性変形能力) $\delta / \delta_y = 1 / (0.03 + 0.7 \cdot V)$	(2)	フェリー渡橋(デッキ), ダム洪水吐ゲート(スキンプレート,横桁腹板)	実験
曲げ耐力	(全腐食モデルの曲げ耐力比) $M_{max} / M_{max0} = 1 - 0.468 \cdot \alpha$ (局部腐食モデルの曲げ耐力比) $M_{max} / M_{max0} = 1 - 0.468 \cdot \alpha_c$	(5)	合成I桁	解析(腐食形態を5モデルに分類)
疲労強度	腐食鋼板S-N関係: $K_t \times S_{mr} - N_c$ 理論弾性応力集中係数 : $K_t = 2.919 + 0.379 \cdot \ln(V)$	(2)	フェリー渡橋(デッキプレート)	実験 (き裂は板厚変動係数の高い領域で発生, 優先的に進展)
圧縮強度	(座屈耐力曲線) $\sigma_u / \sigma_y = (0.628 / \lambda)^{1.04} - 0.083$ 有効板厚: $t_e = t_{avg} - \sigma$	(3)	可動橋横桁(ウェブ,下フランジ,鋼床版縦リブ)	実験 (著しい局部腐食( $\sigma \geq 0.7$ )→局部座屈,一様腐食( $\sigma \leq 0.7$ )→全体座屈)
	(幅厚比パラメータ) $R = \frac{b}{t_R} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \cdot \sqrt{\frac{12 \cdot (1 - \nu^2)}{\pi^2 \cdot k}}$ 代表板厚: $t_R = t_{avg} + 2 \cdot \sigma_t$	(6)	板(圧縮フランジ想定)	解析 (空間自己相関モデルにより腐食模擬)
	代表板厚: $t_R = t_{avg} + \sigma_t$	(7)	板(圧縮フランジ想定)	解析 (経時変化モデルにより腐食模擬)
	等価板厚: $t_{eq} = t_{avg}$	(4)	板(SS400想定)	解析 (二重sin級数波, 正規分布乱数により)

				腐食模擬)
圧縮耐力	(全面均一腐食モデル) $P_{cr} / P_y = 0.966 - 0.805 \cdot \alpha_{\min}$ $P_{cr} / P_{cr0} = 1 - 0.833 \cdot \alpha_{\min}$ $\alpha_{\min} : \text{最小断面欠損率}$ (耐荷力曲線) $P_{cr0} / P_y = (0.186 \cdot \lambda^3 - 0.657 \cdot \lambda^2 + 0.179 \cdot \lambda + 1)$	(5)	柱	解析 (腐食形態を5モデルに分類)
軸圧縮強度	(座屈強度曲線 径厚比パラメータ) $R = 1.65 \times (2R/t_R) \cdot (\sigma_y / E)$ $t_R = t_{ave}^* - 0.6 \cdot s^*$ $(t_{ave}^* : \text{最小断面平均板厚})$ $t_R = t_{ave}^{**} - 0.8 \cdot s^{**}$ $(t_{ave}^{**} : \text{座屈波形幅 } 3\sqrt{Rt} \text{ 区間平均板厚})$	(9)	鋼管	実験, 解析
せん断耐力	(せん断座屈強度曲線 幅厚比パラメータ) $R = \frac{h}{t} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \cdot \sqrt{\frac{12 \cdot (1 - \nu^2)}{\pi^2 \cdot k}}$ 代表板厚: $t = t_{avg}$	(8)	プレートガーダー橋	実験, 解析

#### 4.2.3 引張りを受ける腐食板の残存強度

引張りを受ける板の残存耐荷力は、板の引張力と直行する断面の断面積が最小となる断面積  $A_{\min}$  を用いて次式で耐荷力を評価してよい。

$$P_u = \sigma_y A_{\min} \quad (4.2.1)$$

ここに、 $P_u$  : 引張耐荷力

$\sigma_y$  : 降伏応力

#### 【解説】

腐食した板に引張力が作用する場合の研究成果は比較的多いので、上記条項を示した。板の最高引張荷重は、最小断面位置での平均板厚に降伏応力を乗じて求められる。ただし、伸び能力が要求されるような構造物では、

腐食にともなう、数%程度で破断する場合がありますので、注意する必要があります（図-解4.2.1参照）。

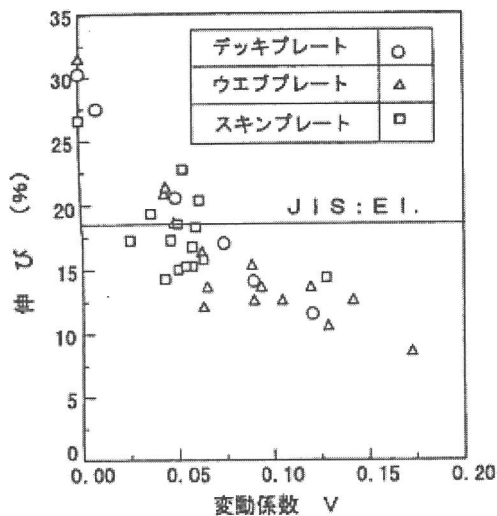


図-解4.2.1 伸びと変動係数

#### 第4章の参考文献

- 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提案, 橋梁と基礎, No. 12, 1989.
- 2) 村中昭典, 階田理, 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) 藤井堅: 腐食した鋼材の材料特性と残存耐荷力評価法, 第一回鋼構造物の維持管理に関するシンポジウム資料集, 1999.
- 4) 中沢正利: 腐食を受けた鋼板の圧縮耐荷力特性, 土木学会年次学術講演概要集, 第55回, CS-86, 2000.
- 5) 野上邦栄, 山沢哲也, 小栗友紀, 加藤美幸: 腐食減厚に伴う曲げ及び圧縮部材の残存耐力評価に関する一考察, 構造工学論文集, Vol. 47A, pp. 93-102, 2001.
- 6) 海田辰将, 藤井堅, 中村秀治: 腐食した圧縮フランジの圧縮強度評価, 土木学会論文集, No. 766, I-68, pp. 58-71, 2004.
- 7) 原考志: 腐食による鋼部材強度の経年劣化, 広島大学修士論文, 2006.
- 8) 海田辰将, 藤井堅, 原考志, 中村秀治, 上野谷実: 腐食鋼板のせん断耐力とその評価法, 構造工学論文集, Vol. 50A, pp. 121-130, 2004.
- 9) 藤井堅, 近藤恒樹, 田村功, 渡辺英一, 伊藤義人, 杉浦邦征, 野上邦栄, 永田和寿: 海洋環境において腐食した円形鋼管の残存圧縮耐力, 構造工学論文集, Vol. 52A, pp. 721-730, 2006.