

引張力を受ける腐食鋼板の力学特性と残存強度

愛媛大学大学院 学生会員 ○池田 裕幸
愛媛大学大学院 正会員 大賀 水田生
愛媛大学大学院 正会員 全 邦釘

1. 序論

引張力を受ける腐食鋼板の残存強度評価は、JIS5 号試験片を用いた引張強度実験結果に基づき、最小平均板厚（荷重軸直角方向における最小断面の平均板厚）を有効板厚として導入した残存強度評価法が提案されている。しかし、様々な腐食状況を考慮した一般性のある残存強度評価法を確立するためには、実構造物レベルに近い腐食鋼板を用いた引張強度実験及び FEM 残存強度解析を実施し、腐食鋼板の非線形挙動、残存強度及び破断性状などの力学特性について実験的・理論的考察を行い、残存強度評価のための基礎データを蓄積する必要がある。

そこで本研究では、異なる 2 つの橋梁から様々な腐食形態を有する板幅 60～80mm の腐食供試体を作成し、腐食表面形状測定及び引張強度実験を行う。併せて、本供試体を用いた FEM 残存強度解析を行い、種々の板厚統計量が力学特性に及ぼす影響について考察するとともに、より一般性のある腐食鋼板の残存強度評価のための有効板厚推定式を提案する。

2. 実験供試体及び表面形状測定の概要

本研究で用いた供試体は 47 年間（船越運河橋）及び 102 年間（穴内川橋）供用後撤去された鋼橋から 34 体切り出し、鋼材 SM490A を供試体両側に全面溶け込み溶接にて接合し作成する。本供試体の内訳はフランジ 21 体（穴内川橋：初期板厚 $t_0=10.5\text{mm}$ ）、対傾構 13 体（船越運河橋：初期板厚 $t_0=8.0\text{mm}$ ）である（図-1）。

表面形状測定には高精度レーザー変位計測システムを採用した（写真-1）。この計測システムでは、非接触式レーザーヘッドを鋼表面に手動で沿わせて、照射したレーザー光により座標データを取得する。また、供試体の板厚は表裏の座標値を差し引いて求める。本研究では、供試体の腐食状態を全面腐食タイプ、孔食タイプ、局所腐食タイプの 3 つの腐食形態に分類し、腐食鋼板の非線形挙動、残存強度及び破断性状に着目した引張強度実験及び FEM 残存強度解析を実施する。

3. 実験結果の考察

図-2 には腐食形態ごとの板厚等高線図を示している。図-2(a)の全面腐食タイプは表面全体に小さな孔食を有しているものの、腐食程度は極めて軽微である。図-2(b)の孔食タイプは直径数十mm程度の孔食が点在しており、孔食及びその周辺のみで腐食が進展している。最後に、図-2(c)の局所腐食タイプは直径 30 mm 程度のいくつかの孔食が重なりあって大きな孔食が形成されている。

図-3 に引張強度実験から得られた荷重－変位関係を示す。腐食程度が軽微な全面腐食タイプは、無腐食供試体とほぼ同様の力学挙動を有しており、明確な降伏棚が認められるが、孔食タイプや局所腐食タイプではその力学特性は全面腐食タイプと全く異なっており、降伏棚が不明となるだけでなく、腐食の激しい箇所における変形が大きくなっている。腐食鋼板の表面凹凸による応力集中が及ぼす影響は荷重の初期段階では認められないが、荷重が降伏強度付近に達するとその影響が急激に現れる。また、供試体の破断形態として最小板厚位置からクラックが発生し、破断に至ることが実験から明らかとなった。

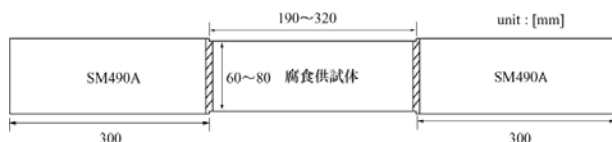


図-1 腐食供試体概略



写真-1 測定状況

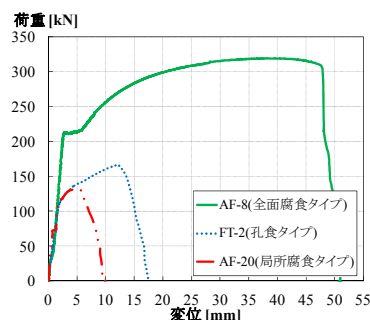


図-3 荷重-変位関係

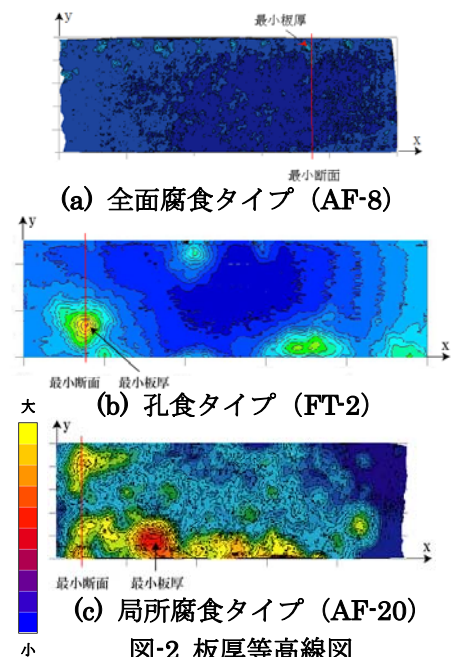


図-2 板厚等高線図

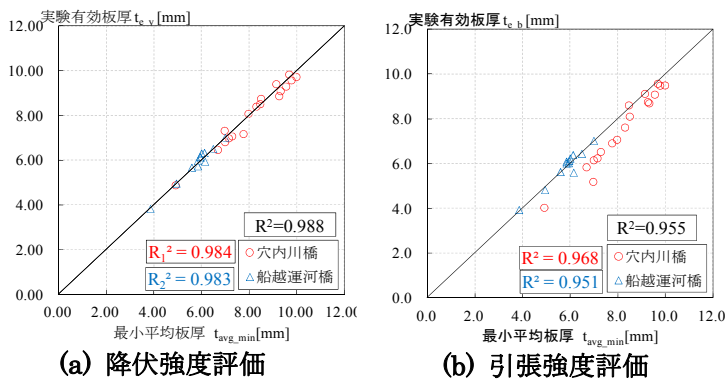


図-4 残存強度評価（最小平均板厚）

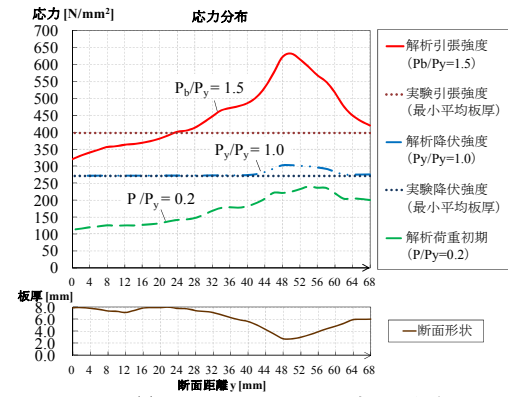


図-5 最小断面における応力分布図

4. 引張力を受ける腐食鋼板の残存強度評価

本研究における降伏強度評価及び引張強度評価のための有効板厚 (t_{e_y}) 及び (t_{e_b}) は、式(1)で定義される。

$$\text{降伏: } t_{e_y} = P_y / (B \times \sigma_y) \quad \text{引張: } t_{e_b} = P_b / (B \times \sigma_b) \quad \cdots (1)$$

$\left[\begin{array}{l} P_y, P_b: \text{実験から得られた降伏及び引張荷重, } B: \text{供試体幅} \\ \sigma_y, \sigma_b: \text{材料特性試験から得られた降伏及び引張強度} \end{array} \right]$

板厚統計量が降伏強度に及ぼす影響： 引張強度実験から得られた実験有効板厚と3種類の板厚統計量（平均板厚，最小板厚，最小平均板厚）との相関を比較した結果，最小平均板厚 (t_{avg_min}) を有効板厚として用いることにより，他の統計量と比較して精度の高い残存強度評価が可能であることが明らかとなった。

板厚統計量が引張強度に及ぼす影響： 引張強度実験から得られた実験有効板厚と3種類の板厚統計量との関係から，最小平均板厚 (t_{avg_min}) を有効板厚として用いると，他の統計量と比べて良い評価結果が得られている。しかし，図-4(b)に示すように，特に腐食の激しい供試体において危険側に評価されており，腐食鋼板の表面凹凸による応力集中が残存強度評価に大きな影響を与えていると推察される。

FEM 残存強度解析を用いた各荷重段階における応力分布特性：

FEM 残存強度解析結果に基づき，最小断面における降伏強度及び引張強度時の応力分布特性から理論的考察を行う。図-5に最小断面における各荷重段階の応力分布を示している。図-5から解析降伏強度時（降伏強度に対する荷重比： $P/P_y=1.0$ ）の応力分布が腐食鋼板の表面凹凸に関係なくほぼ一定であることが確認できることから，最小断面の板厚統計量である最小平均板厚を用いて降伏強度を評価するのは妥当である。しかし，解析引張強度時 ($P/P_y=1.5$) においては腐食鋼板の表面凹凸による応力集中が顕著であるため，最小平均板厚を用いると応力集中が及ぼす影響を考慮できないことが明らかとなった。そのため本研究では，腐食表面凹凸を表現する標準偏差 σ_{st} を導入して，表面凹凸の影響を考慮した腐食鋼板の引張強度評価のための有効板厚推定式を提案する。

有効板厚推定式：

引張強度実験結果及びFEM 残存強度解析結果に基づき，本研究では残存降伏強度及び残存引張強度評価のための有効板厚推定式 (t_{eff_y}) 及び (t_{eff_b}) を提案する。

$$\text{降伏強度評価式: } t_{eff_y} = t_{avg_min} \quad \text{引張強度評価式: } t_{eff_b} = t_0 - 3.2\sigma_{st} \quad \cdots (2)$$

$\left[\begin{array}{l} t_{avg_min}: \text{最小平均板厚, } t_0: \text{初期板厚, } \sigma_{st}: \text{標準偏差} \end{array} \right]$

以上から，本研究で提案する有効板厚推定式を用いることにより，より一般性のある腐食鋼板の残存強度評価が可能となった。（図-4(a)，図-6）

5. 結論

(1) 腐食鋼板の表面凹凸による応力集中が及ぼす影響は，荷重の初期段階では確認できないが，降伏荷重付近で急激に現れる。その後，局所的に発生した降伏域が荷重軸直角方向に進展することで，供試体として降伏に至ることが実験的に確認された。

(2) 腐食鋼板の降伏強度は最小平均板厚を有効板厚として用いることにより精度の良い評価が可能であり，FEM 残存強度解析から得られた応力分布特性からも最小平均板厚を採用することの妥当性が確認された。

(3) 引張強度は腐食による表面凹凸の応力集中が強度評価に大きな影響を及ぼすため，腐食を表現する標準偏差を導入した推定式を提案した。

(4) 本研究で提案する有効板厚を導入した残存強度評価式を用いることで，一般性のある引張力を受ける腐食鋼板の残存強度評価が可能となった。

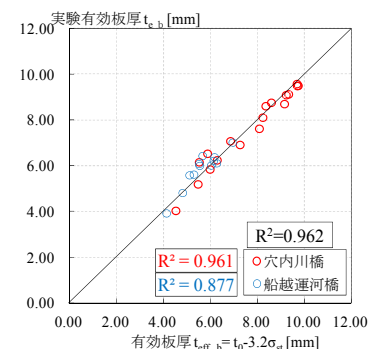


図-6 引張強度評価

表-1 有効板厚推定式

	評価式	備考
降伏強度	$t_{eff_y} = t_{avg_min}$	t_{avg_min} : 最小平均板厚 [mm]
引張強度	$t_{eff_b} = t_0 - 3.2 \times \sigma_{st}$	t_0 : 初期板厚 [mm] σ_{st} : 標準偏差 [mm]