

## 腐食鋼材のじん性評価法に関する検討

トピー工業 正会員 ○藤原 英之 愛知県 正会員 横井 龍也 名古屋工業大学 フェロー会員 後藤 芳顕

## 1. 目的

腐食した鋼部材は、錆として欠損する断面積(剛性)の減少と、それに伴う耐力低下だけではなく、鋼材表面形状の不整による局所的な応力、ひずみ集中の結果、じん性の低下を引き起こす。とくに、地震時においては腐食欠損部の延性破壊を起点としたき裂が観察されており、腐食鋼材のじん性を評価することは重要である。しかしながら、腐食した鋼材の幾何学的形状のばらつきは大きく、サンプルによる引張り試験では実物のじん性を精度良く評価することは難しい。ここでは、鋼材のじん性が延性き裂発生に支配されると考え、腐食した鋼材の幾何学的形状から延性き裂発生を解析的に予測する一般性のある手法について検討する。

## 2. 腐食板の単調引張試験

(1) 実験概要：腐食板の破断までの力学挙動を知るため、変位制御による腐食板の単調引張試験を実施する。試験片を採取する鋼板は、供用期間約 70 年を経て撤去された桁橋のフランジ材を使用する。試験片は除錆後、図-1に示すように左右に長さ 100mm の掴み部を溶接により接合する。また、標点は、腐食部で生じる破断やその周辺の絞りの全域を追跡できるように腐食部の端点付近に設定する。

試験片は全部で 14 体製作し、うち 8 体は腐食が激しい部分を含み、5 体は比較的腐食の少ない箇所から採取した。残る 1 体は比較用に腐食部分を切削して表面を平滑にした平板とした。フランジ材の元の板厚は 14mm で、腐食面を切削した結果、平板試験片の板厚は 10mm となった。試験は破断まで十分に静的な変位速度で載荷し、表面のき裂発生を目視により観察しながら、荷重一標点間伸びを計測する。

(2) 実験結果：荷重一標点間伸び曲線を図-2に示す。図-2から、いずれの試験片も荷重一標点間伸び曲線は平板と同様に降伏挙動を示した後にひずみ硬化に伴う荷重の上昇が見られ、最大荷重に達した後に軟化して破断に至る。降伏および最大荷重は、各試験片の腐食による断面欠損や応力集中の程度により相違が現れる。伸び性状は、試験片の内部からき裂が発生したNo.11~14が平板と同等程度の伸びを伴い破断に至るのに対して、表面からき裂が生じたその他の試験体は、平板に比較して平均で 20%程度伸びが低下する結果となった。

## 3. 延性き裂の発生予測式

延性き裂の発生予測式は、鋼材内部にき裂が生じる場合と

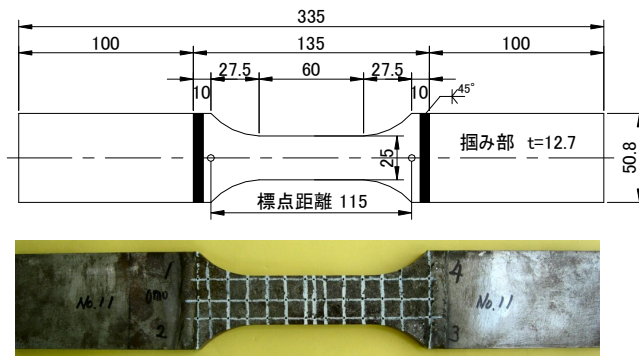


図-1 腐食板試験片 (単位 mm)

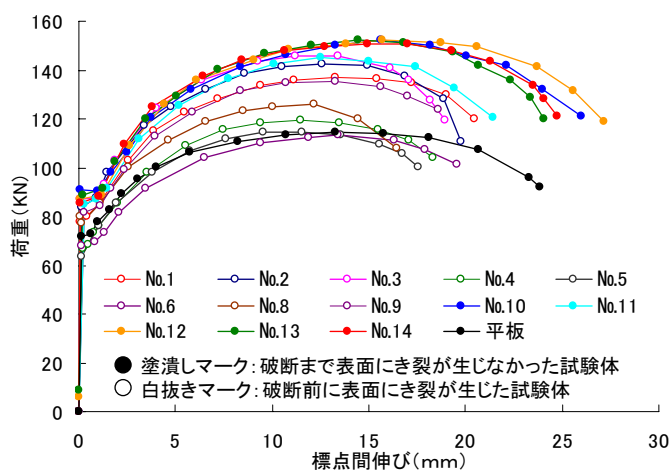


図-2 腐食板試験結果

表面にき裂が生じる場合とを区別して、それぞれ式(1)、式(2)を用いる。<sup>1), 2)</sup>

$$\varepsilon_{eq} = \alpha \exp(\beta \sigma_m / \bar{\sigma}) \quad (1)$$

$$\varepsilon_{eq} = C : const \quad (2)$$

ここに、 $\varepsilon_{eq}$ ：相当塑性ひずみ、 $\sigma_m$ ：相当応力、 $\bar{\sigma}$ ：静水圧応力、 $\sigma_m / \bar{\sigma}$ ：応力三軸度である。 $\alpha$ 、 $\beta$ および $C$ は材料定数で材料固有の値となるため、腐食板試験体と同じフランジ材から採取した各種円周切欠きを有する丸鋼試験片(以下、切欠き丸鋼という)を用いた引張試験とその解析結果により回帰する<sup>3)</sup>。

切欠き丸鋼の形状を図-3に示す。試験方法は2.(1)と同様に単調引張載荷し、切欠き底での延性き裂の発生を目視確認しながら破断までの荷重一標点間変位を計測する。き裂発生箇所の局所的な応力、ひずみは、弾塑性有限変位解析で評価した。材料構成則は R20 試験体の実験結果から逆解析で同定したべき乗側を使用する。

図-4に各試験体の延性き裂発生箇所における応力三軸

キーワード 腐食, じん性, 延性き裂, 吸収エネルギー

連絡先 〒441-8510 愛知県豊橋市明海町1番地 トピー工業(株)鉄構事業部 TEL 0532-25-1111

度と相当塑性ひずみの解析値に実験でき裂を確認した時点をおおよび×印として示す。なお、○印は断面中心部、×印は切欠き底でそれぞれき裂が生じたことを表わす。また、図には実験結果から求めた式(1)および式(2)のき裂発生予測線と、90%信頼区間(破線)を合わせて示す。

図に示すように、断面中心部でき裂が生じた切欠き半径1mm～20mmの試験体では、応力三軸度が大きいほどき裂発生時の相当塑性ひずみが低下しており、式(1)でき裂発生予測線と概ね一致する。また、切欠き半径1mm以下の試験体は、実験結果のばらつきが大きいものの、90%信頼区間を合わせて見れば、おおよそ式(2)での予測は妥当であるといえる。

#### 4. 腐食板の延性き裂発生予測 とじん性評価法

3. で求めた延性き裂発生予測式の腐食板への適用を試みる。ここでも切欠き丸鋼と同様、き裂発生部の局所的な応力、ひずみ状態を弾塑性有限変位解析により求めて2. (2)の実験での延性き裂発生時点の応力、ひずみ状態を特定する。解析モデルの要素は8節点ソリッドを使用し、標点間の要素サイズはおおよそ1mm立方体とする。

結果を延性き裂発生予測線(図-4)とともに図-5に示す。図中の×印、○印はき裂発生時点であり、図-4と同様、それぞれ表面、断面内部の発生を表わす。図に示すように、実験で表面にき裂が生じた試験体では、1例を除いて予測基準線の近傍にほぼ分布しており、予測線は妥当といえるものの、断面中心部でき裂が生じる試験体では、予測線の90%信頼区間上限線上、あるいはそれを超える結果を示す。

この原因として、断面中心部で生じる延性き裂は直接目視できないことから、き裂発生時点の判定が遅れたためと考えられる。また、今回使用した鋼材は製造年代が古く、延性き裂の発生に強い影響を及ぼすMnS等の介在物を多く含むことも、実験結果のばらつきの要因として挙げられる。このように延性き裂が極めて局所的な現象であり、視認精度や材料的なばらつきを含むことを考慮すれば、本手法は妥当な精度でき裂発生を予測できるといえる。

図-6には、以上の予測式で解析的に求められる延性き裂発生までの吸収エネルギーと実験での破断までの吸収エネルギーを比較して示す。図に示すように解析予測値は実験値に比べて同等か若干低い結果を示し、全体では7%程度の余裕を残す評価を与える。よって本手法によれば、延性き裂の発生箇所を問わず、腐食板のじん性を妥当に評価することが可能である。

#### 参考文献

- 1) J. W. Hancock and A. C. Mackenzie: On the mechanism of ductile failure in high strength steels subjected to multi-axial stress state, J. Mech. Phys. Solids, Vol. 45, No. 1, pp. 147-149
- 2) 石川信行ら:繰返し荷重下における構造用鋼の延性き裂発生挙動, 鉄と鋼, Vol. 85 No. 1, pp1-16, 1999
- 3) 横井ら: 腐食した鋼材のじん性評価手法の検討, 第61回土木学会年次学術講演会, 2006. 9

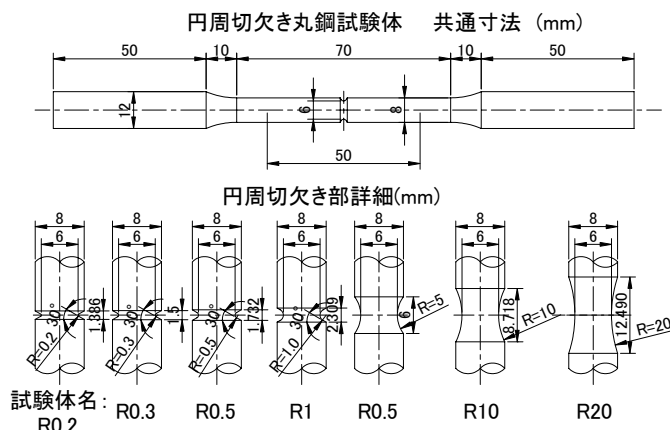


図 - 3 円周切欠き丸鋼試験片

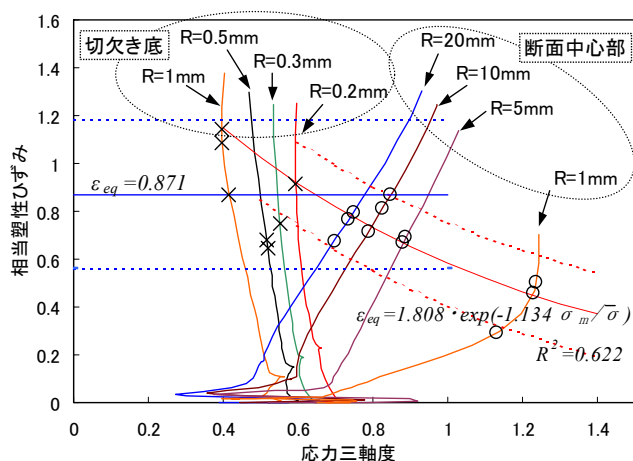


図 - 4 延性き裂発生予測線

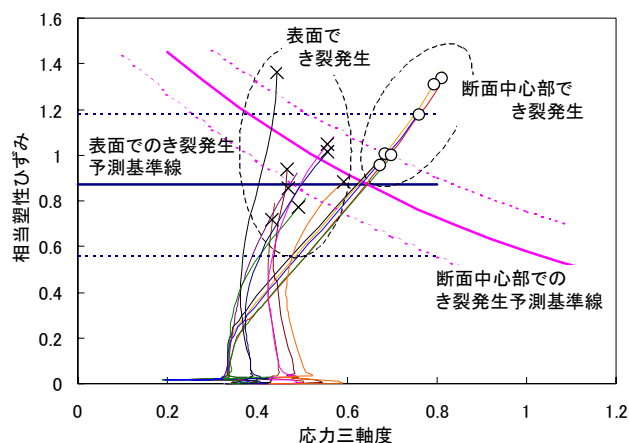


図 - 5 腐食板の延性き裂発生時の応力・ひずみ状態

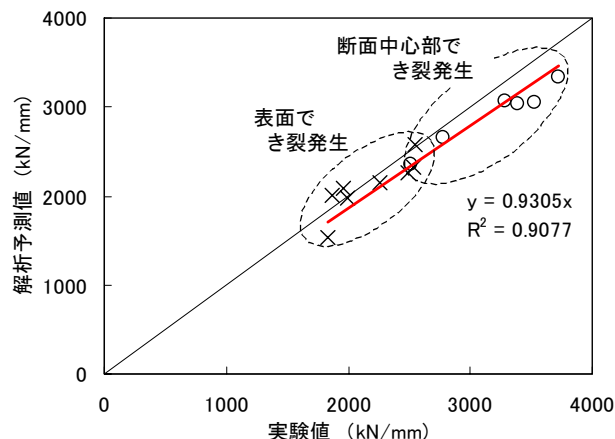


図 - 6 破断(実験)とき裂発生(解析予測)までの吸収エネルギーの比較