

鋼部材の地震時脆性破壊発生限界への修正ワイブル応力の適用

東京工業大学大学院 学生会員 ○富永 理史  
 東京工業大学大学院 正会員 田村 洋  
 東京工業大学大学院 正会員 佐々木 栄一

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震では、鋼製橋脚や鉄骨建築などの鋼構造物に地震時脆性破壊と呼ばれる損傷がみられた。これは、部材の溶接止端部などに発生した先行き裂（延性き裂や低サイクル疲労き裂）を起点とする脆性破壊で、地震時に受ける塑性ひずみ履歴等の影響により深さ 1mm 以下のごく浅い先行き裂からも発生する特徴がある。これまで Bordet ら<sup>1)</sup>の提案する修正ワイブル応力を用いて、ごく浅い段階からの脆性破壊発生限界評価が田村ら<sup>2)</sup>により試みられているが、評価対象が SS400 と SM570Q の 2 鋼種に限定されていることから、本研究では、実際に被害が発生した鋼製橋脚隅角部で使用実績の高い SM490YB の鋼材を用いて脆性破壊実験を行い、修正ワイブル応力によって地震時脆性破壊発生限界を評価し、地震時脆性破壊に対する評価法の確立を目指す。

2. 修正ワイブル応力

通常のワイブル応力においては、脆性マイクロクラックの進展挙動のみに着眼点をおいているが、Bordet らは、塑性ひずみの増加によって後から発生するマイクロクラックの重要性を指摘し、マイクロクラックの発生挙動も考慮し、修正ワイブル応力を以下のように定義した。

$$\sigma_w^* = \left\{ \int_0^{V_p} \left( \int_0^{\varepsilon_u^p} \frac{\sigma_{ys}(T, \dot{\varepsilon})}{\sigma_{ys,0}} (\varepsilon^p)^{\alpha(T)} \times \max(\sigma_1^m - \sigma_{th}^m, 0) d\varepsilon^p \right) \frac{dV}{V_0} \right\}^{1/m} \quad (1)$$

ここに、 $\varepsilon_u^p$ は付与塑性ひずみ、 $\sigma_{ys}(T, \dot{\varepsilon})$ は温度 $T$ 、ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}$ における材料の降伏応力、 $\sigma_{ys,0}$ は基準温度 $T_0$ における静的な降伏応力、 $\sigma_1$ は最大主応力、 $\sigma_{th}$ はマイクロクラックの不安定進展が起こる応力のしきい値、 $m$ はワイブル係数、 $V_p$ は破壊に関与する領域の体積、 $V_0$ はスケーリングのための係数である。 $\alpha(T)$ については、Bordet らは 0 として扱っているが、文献 2)を参考にして $-196^\circ\text{C}$  のときに 2 とし、 $-100^\circ\text{C}$  のとき 1.11 とした。

3. 脆性破壊実験

図 1 に示す供試体の形状は文献 2)を参考に決定しており、载荷条件と合わせて橋脚隅角部の破壊起点と同様の負荷状態が再現されるよう考慮している。供試体中央の切欠き（切欠き半径  $R$  は 0.5mm と 5.0mm）は破壊起点位置の溶接止端形状を再現したもので、その先端には 0.36mm から 2.71mm の比較的浅めの疲労き裂を先行き裂として導入した。供試体の载荷は、地震時における破壊靱性劣化状態を想定し、液体窒素で満たした $-196^\circ\text{C}$ の冷却槽中に行い、準静的な曲げ载荷で脆性破壊させることで、各供試体の限界荷重を測定した。図 2 に実験装置を示す。靱性の異なる場合について検討するために、エタノールと液体窒素によって温度を約 $-100^\circ\text{C}$ に保った場合でも実験を行った。実験で使用した供試体の内訳を表 1 に示す。

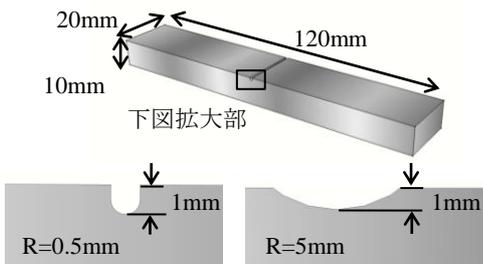


図 1 供試体の形状



図 2 低温 4 点曲げ実験装置

温度を約 $-100^\circ\text{C}$ に保った場合でも実験を行った。実験で使用した供試体の内訳を表 1 に示す。

表 1 供試体の内訳

	$-100^\circ\text{C}$	$-196^\circ\text{C}$
	R=0.5mm	
	R=5mm	
	14 体	15 体
		15 体

※いずれも SM490YB を使用

キーワード 修正ワイブル応力, 地震時脆性破壊, 破壊靱性, 先行き裂深さ, 溶接止端  
 連絡先 〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1 東京工業大学大学院理工学研究科土木工学専攻  
 TEL: 03-5734-3099, FAX: 03-5734-3577

4. き裂先端の局部応力解析

各供試体の限界荷重測定時のき裂先端負荷状態を明らかにするため、汎用解析プログラム Abaqus を用いて複合非線形解析を行った。供試体と治具の間の滑りと摩擦力を考慮するために、図3に示すような、対称性から1/4部分をソリッド要素でモデル化した有限要素モデルを用いた。先行き裂は、対称面の鏡面条件を部分的に解除して表現した。き裂先端付近は、文献3)を参考に、最小サイズ30μmと細かく要素分割した。供試体と治具の応力-ひずみ関係は別途行った曲げ試験と有限要素解析から得た図4に示すものを用いた。载荷は、鉛直方向の強制変位を治具に与えることで再現し、接触面の摩擦係数は文献2)を参考に0.21とした。

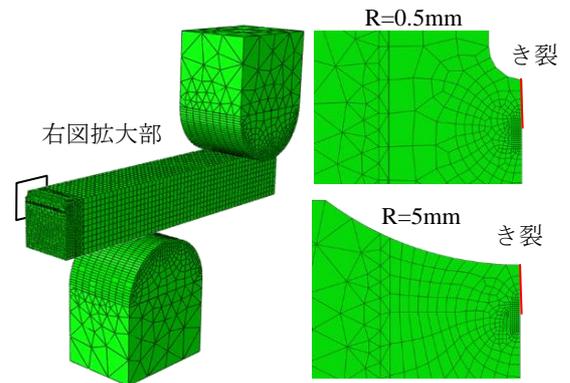


図3 有限要素モデル

5. 限界修正ワイブル応力の同定

ワイブル係数 $m$ の推定には、劈開破壊が支配的な-196°Cでの結果を用いて、最小二乗法に基づく収束計算により同定した。しきい値 $\sigma_{th}$ は、同定した $m$ を用いて-100°Cでの供試体の限界修正ワイブル応力 $\sigma_{w,cr}^*$ を求め、この変動係数が最小となるように定めた。その結果、今回対象としたSM490YBの( $m, \sigma_{th}$ )は(41.78, 1270MPa)となった。これを用いて式(1)から算定した各供試体の $\sigma_{w,cr}^*$ と先行き裂深さの関係を図5に示す。また、図中には $\sigma_{w,cr}^*$ が完全にワイブル分布に従うとしたときの破壊確率 $P_f = 0.05, 0.5, 0.95$ での $\sigma_{w,cr}^*$ を平行線で示す。図5では、ほとんどの供試体の $\sigma_{w,cr}^*$ が温度や切欠き半径、き裂深さによらず、ほぼ同じレベルの値を示している。これは修正ワイブル応力の算定値において、これらの因子の影響が考慮されているためである。

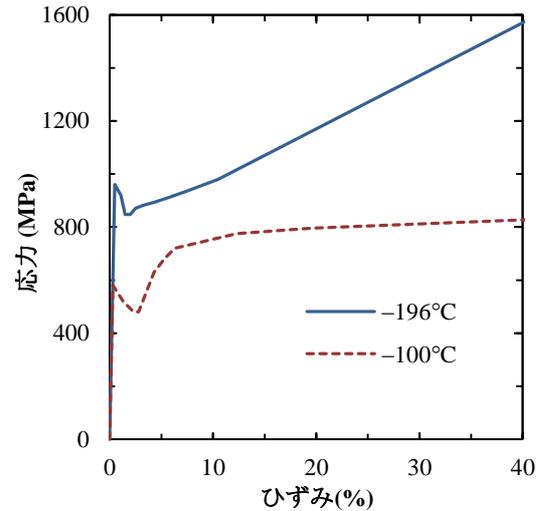


図4 応力-ひずみ関係

6. まとめ

SM490Y を用いて浅いき裂を有する供試体の低温破壊実験を行い、その破壊発生限界を修正ワイブル応力により評価したところ、SS400 や SM570Q に対する評価結果<sup>2)</sup>と同様、脆性破壊発生確率に対する温度や切欠き半径、き裂深さの影響が修正ワイブル応力を用いることで適切に考慮されていることが確認された。このことから、修正ワイブル応力は、浅いき裂からの脆性破壊における影響因子を考慮し得る指標であり、鋼部材の地震時脆性破壊発生限界評価に対して高い適用性を有していると考えられる。

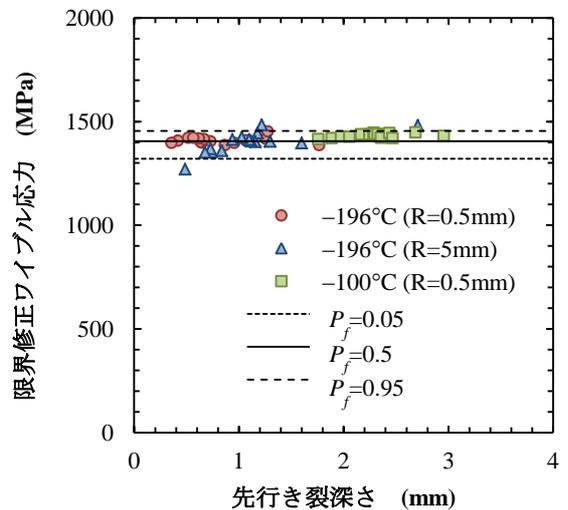


図5 限界修正ワイブル応力

参考文献

- 1) S. R. Bordet, A. D. Karstensen, D. M. Knowles, C. S. Wiesner : A new statistical local criterion for cleavage fracture in steel. Part I: model presentation, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 72, pp.435-452, 2005
- 2) 田村洋, 佐々木栄一 : 修正ワイブル応力に基づく鋼部材の地震時脆性破壊発生限界の評価, 土木学会論文集 A1, 2015 (登載決定)
- 3) 南二三吉 : ワイブル応力を用いた破壊評価手法 - Part I, 溶接学会誌, 第75巻, 第5号, pp.416-446, 2006