

## 無補剛箱形断面鋼製橋脚の延性き裂の発生・進展評価法に関する一検討

名城大学大学院 学生会員 ○池尾 光慶  
名城大学 正会員 劉 巖

名古屋大学大学院 学生会員 河村 佳奈  
名城大学 フェロー 葛 漢彬

## 1. 緒言

1995年に発生した兵庫県南部地震で、鋼製橋脚の基部や隅角部などに延性き裂を起因とした脆性的な破壊が確認された。脆性的な破壊の第一段階である延性き裂発生の防止を目的とする観点から、延性き裂発生に着目する検討が多くされてきているが、き裂進展まで考慮した研究は少ないのが現状である。これまでき裂進展を考慮した鋼材や鋼部材の研究では、3段階2パラメータ延性破壊モデルを用いた損傷進展エネルギーの簡易推定法<sup>1)</sup>や損傷開始パラメータ補正方法<sup>2)</sup>が提案され、既往の研究で無補剛箱形断面鋼製橋脚の実験供試体の繰り返し載荷実験<sup>3)</sup>を対象とした場合、き裂進展状況のある程度模擬することができたが、載荷パターンによってき裂進展の評価に課題がある<sup>4)</sup>。そこで本研究では、損傷進展エネルギーの代わりに要素破壊時変位<sup>5)</sup>を用いて延性き裂およびき裂進展の評価を試みる。

## 2. 解析概要

図-1に解析モデル概要を示す。解析対象は、頂部に一定圧縮力および繰り返し水平変位を受ける無補剛箱形断面橋脚<sup>3)</sup>とし、beam要素とsolid要素からなるハイブリッドモデルで、基部を完全固定とした。今回は紙面の都合上UB35-35シリーズの3ケースを示す。解析はABAQUSを用いて、メッシュ分割はき裂の進展が予想される最下部から鉛直方向に6mm、フランジ方向およびウェブ方向に39mmの範囲を1mm角および0.5mm角で分割した。鋼種はSM490YA材で、構成則は材料試験を基に真応力-真塑性ひずみ関係に加え、混合硬化則を適用した。水平変位の載荷パターンは、1Cycleごとに $1\delta_y$ ずつ増加させる漸増変位振幅繰り返し載荷（以降、C1と称する）、3Cycleごとに $1\delta_y$ ずつ増加させる漸増変位振幅繰り返し載荷（以降、C3と称する）、 $5\delta_y$ の一定変位振幅を繰り返し載荷（以降、CCと称する）の3種類である。

## 3. 3段階2パラメータ延性破壊モデル

本研究では、塑性域から軟化域に移行する損傷開始パラメータ $D_{ini}=1$ に達した時損傷進展パラメータ $D_{prop}$ が導入される。 $D_{prop}$ が1に達した時に要素が削除され、延性き裂の発生・進展を模擬する。損傷進展パラメータ $D_{prop}$ は次式に示す。

$$D_{prop} = \frac{G}{G_f} = \frac{u_{eq}}{u_{eq}^f} \quad (1)$$

3段階2パラメータ延性破壊モデルで導入される損傷進展エネルギー $G_f$ を以下に示す。

$$G_f = \frac{\sigma_{ini} \cdot \varepsilon_{eq}^f \cdot L_e}{2} \quad (2)$$

ここで、 $\sigma_{ini}$ は損傷開始応力（ $D_{ini}=1$ に達した時のミーゼス応力）、 $L_e$ は要素特性長さ（solid要素では体積の立方根）、 $\varepsilon_{eq}^f$ は要素破壊時の相当塑性ひずみである。要素破壊時変位 $u_{eq}^f$ は次式より算出する。

表-1 各解析パラメータ

供試体名	$G_f$ (mJ/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{ini}$ (MPa)	$\varepsilon_{eq}^f$	$L_e$ (mm)	$u_{eq}^f$
UB35-35C1P1	170	688	0.426	1	0.426
UB35-35C3P1	360	647	1.155	1	1.155
UB35-35CCP1	60	750	0.155	1	0.155

Note:  $G_f$ =損傷進展エネルギー、 $\sigma_{ini}$ =損傷開始応力、

$\varepsilon_{eq}^f$ =要素破壊時の相当塑性ひずみ、

$L_e$ =要素特性長さ、 $u_{eq}^f$ =要素破壊時変位

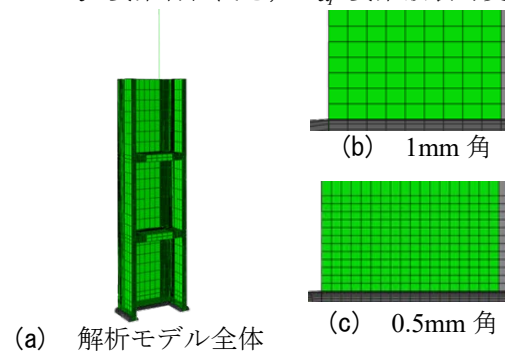


図-1 解析モデル概要

キーワード 延性き裂、延性き裂進展、要素破壊時変位、鋼製橋脚、無補剛断面

連絡先 〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口1-501 名城大学理工学部社会基盤デザイン工学科 TEL 052-838-2342

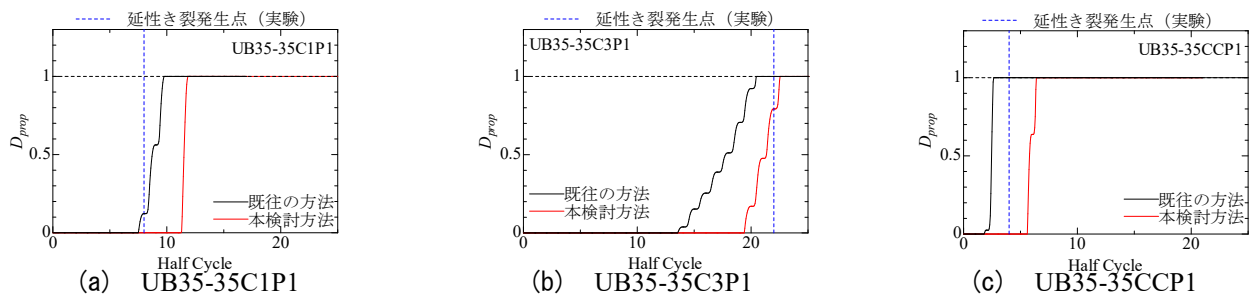
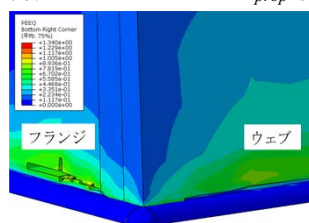


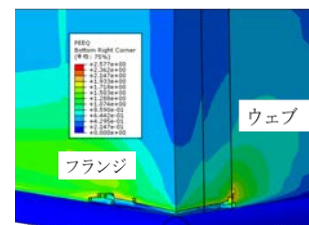
図-2 損傷進展パラメータ  $D_{prop}$  履歴



(a) 実験



(b) 既往の方法の解析



(c) 本検討方法の解析

図-3 UB35-35CCP1 におけるき裂進展状況

$$u_{eq}^f = L_e \times \varepsilon_{eq}^f \quad (3)$$

これまでの研究では、解析に用いる破壊パラメータは損傷進展エネルギー  $G_f$  を使用していた<sup>1), 2), 4)</sup>。しかし、初期段階で大きな変位が生じる荷重パターン（例えば、上述の CC の荷重パターン）の場合、き裂進展が実験よりかなり早くなってしまうことが判明した<sup>4)</sup>。そこで、本研究では要素破壊時変位を用いて破壊解析を行う。また、本検討の方法の場合、表-1 に各解析パラメータを示す。

#### 4. 解析結果

損傷進展エネルギーを用いて破壊解析を行う方法と、要素破壊時変位を用いて破壊解析を行う方法のき裂発生時の比較を行った。図-2 に既往の方法と本検討方法の損傷進展パラメータ  $D_{prop}$  履歴を示す。UB35-35C1P1 は実験でのき裂発生は 8Half Cycle だったのに対し、既往の方法は 9.8Half Cycle、本検討方法は 11.85Half Cycle でき裂発生しており、C1 のケースは既往の方法より評価が悪くなるが、どちらも実験より大きく評価した。UB35-35C3P1 は実験でのき裂発生は 22Half Cycle だったのに対し、既往の方法は 20.05Half Cycle と安全側（小さめ）に評価し、本検討方法は 22.55Half Cycle でき裂発生とわずかに大きく評価した。UB35-35CCP1 の実験では 4Half Cycle でき裂発生としたが、既往の方法では、2.65Half Cycle とかなり小さめに評価し、本検討方法は 6.4Half Cycle でき裂発生しており、実験より遅いき裂発生したことがわかる。しかし、既往の研究で行われた実験での延性き裂発生点は 1~2Half Cycle 安全側へ評価するように定義されている<sup>3)</sup>。実験では、例えば UB35-35CCP1 の場合  $5\delta_y \rightarrow -5\delta_y$  (6Half Cycle 目) でき裂が発生していることから、0.4Half Cycle 大きめの評価となり、概ね実験結果を模擬できているといえる。次に、図-3 に UB35-35CCP1 のき裂進展状況を示す。既往の研究の方法では、ウェブの最下段がすべて削除されており実験結果を模擬することができなかった。しかし、本検討方法では、フランジ方向はやや実験より進展しているものの、ウェブ方向は実験結果を概ね模擬できているといえる。

#### 5. 結言

本研究では、無補剛箱形断面鋼製橋脚を対象に要素破壊時変位を用いて延性き裂発生およびき裂進展の評価を試みた。その結果、き裂発生点は実験結果よりも若干遅く発生する結果となった。き裂進展については、既往の研究での方法の場合、ウェブ方向の最下段の要素がすべて削除され、フランジ方向も進展が若干早く実験結果を模擬することができていなかったが、本検討の方法の場合、フランジ方向は進展が早いものの、ウェブ方向のき裂進展は概ね模擬することができた。今後は、き裂発生時の精度向上について検討する予定である。

参考文献：1) 藤江ら：土木学会論文集 A2, Vol.74, No.2, pp.I-591\_I-602, 2018. 2) 田口ら：令和2年度土木学会中部支部研究発表会, I-24, 2021. 3) 葛ら：構造工学論文集, Vol.55A, pp.605-616, 2009. 4) 河村ら：令和3年度土木学会中部支部研究発表会, I-3, 2022. 5) 劉ら：土木学会論文集, Vol.74, No.4, pp.I\_546-I\_557, 2018.