

解析条件の異なりが延性破壊パラメータ χ に及ぼす影響の検討

名城大学大学院 学生会員 ○加藤 友哉
 名城大学総合研究所 賈 良玖
 名城大学 フェロー 葛 漢彬

1. 緒言

1995年の兵庫県南部地震において多くの溶接鋼構造物や橋梁にて脆性的な破壊が確認された。被害原因の調査より、過大な塑性ひずみが生じたことで延性き裂が発生し、き裂発生箇所を起点として脆性的な破壊が生じていたことが明らかとなった¹⁾。延性き裂発生により引き起こされる脆性的な破壊は、鋼構造の重要な破壊現象の一つであり、脆性的な破壊を防止するためには、延性き裂発生メカニズムの解明は重要である。そこで、本研究では延性破壊現象をシミュレーションするために提案された延性破壊モデル²⁾のパラメータ χ の値が解析条件（ネッキング考慮の有無や解析コード）の異なりにより及ぼされる影響の有無を検討した。

2. 解析概要

本研究では汎用有限要素法プログラム ABAQUS Ver.6.11 を用いて数値解析を行う。試験片設計図と解析モデルを図-1、図-2 に表す。解析コードは ABAQUS/Standard, ABAQUS/Explicit の二種類を用いている。引張試験データとの比較を行うため、試験片寸法と同様にモデル化を行っている。要素タイプは6面体1次の低減積分要素（C3D8R）のソリッド要素を用いている。材料特性は鋼種 SS400 の引張試験データより得られた応力-ひずみ関係を用いている。得られた材料特性を表-1 に示す。

3. 延性破壊モデルおよび応力-ひずみ関係

本研究で用いている延性破壊モデル²⁾では、Rice と Tracey によるボイド成長モデルをベースとしている。応力三軸度 T が一定であると仮定しており、破壊ひずみ ϵ_f と応力三軸度 T の関係は次の式で表される。

$$\epsilon_f = \ln \frac{R_f}{R_0} / (0.283e^{2T}) = \chi \cdot e^{-\frac{3}{2}T} \quad (1)$$

ここで、 R_f = 破壊時のボイドの等価半径、 R_0 = ボイドの初期半径、 $\chi = R_f$ と R_0 の比による破壊パラメータである。しかし、応力三軸度 T は载荷中連続的に変化するため、損傷指数 D を微小増分で表し、微小増分内の応力三軸度を一定とすると、 dD は次の式で表される。

$$dD = \frac{d\epsilon_{eq}^p}{\epsilon_f^p(T)} = \frac{d\epsilon_{eq}^p}{\chi \cdot e^{-\frac{3}{2}T}} \quad (2)$$

ここで、 $d\epsilon_{eq}^p$ = 相当塑性ひずみの増分である。異なる応力三軸度下で、損傷が線形であるとして D が 1 に達したとき破壊すると定義している。

応力-ひずみ関係については、引張試験より得られた公称応力-公称ひずみ曲線を真応力-真ひずみに変換することで入力している。しかし、試験より得られたひずみゲージの値（約 20%）のみしか入力していない場合、20%以降は 2 次勾配が 0 となり応力が入力した最終値のままで一定となる。そのため、ネッキング後の実験挙動を模擬するため、ネッキングを考慮する手法

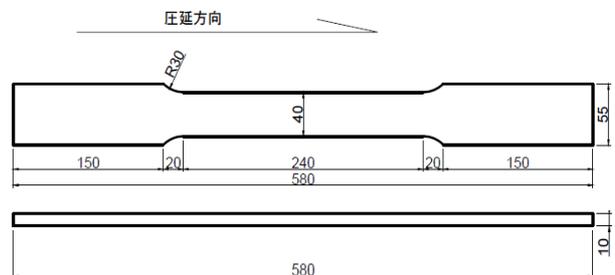


図-1 試験体設計図

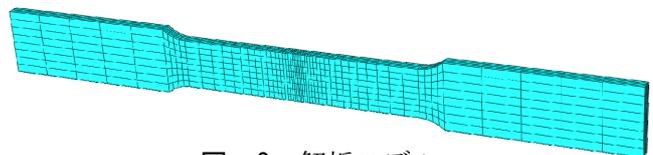


図-2 解析モデル

表-1 材料特性

鋼種	ヤング率 (GPa)	ポアソン比	降伏応力 (MPa)
SS400	204.0	0.3	287.6

キーワード 延性き裂, 破断, ネッキング, 相当塑性ひずみ, 応力三軸度

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

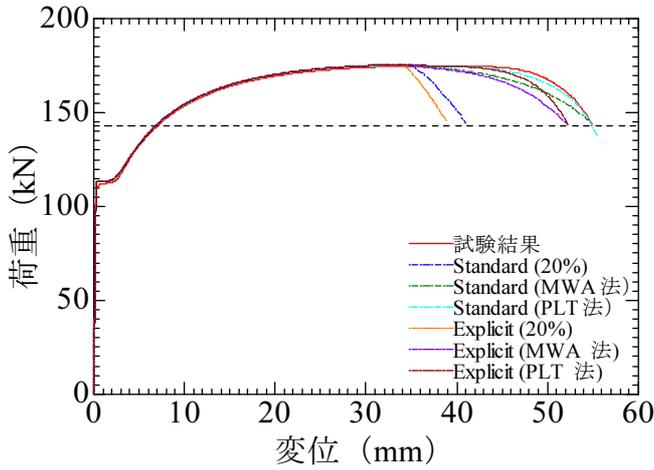


図-3 荷重-変位関係

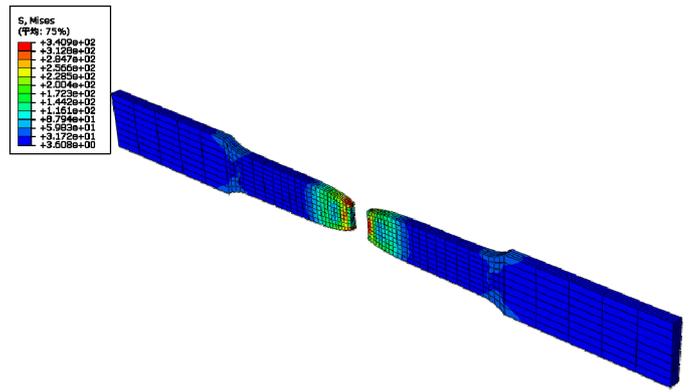


図-4 破壊モード(PLT法, Standard)

表-2 延性破壊パラメータ χ

解析コード	ネッキング考慮なし(20%)	ネッキング考慮あり(MWA法)	ネッキング考慮あり(PLT法)
Standard	$\chi=1.2$	$\chi=2.1$	$\chi=2.1$
Explicit	$\chi=1.5$	$\chi=2.4$	$\chi=2.4$

として 1) 加重平均法 (MWA 法, 最大荷重後が線形となる), 2) PLT 法 (ネッキング後の硬化率が指数則に従う) の 2 つの手法についても検討した. ネッキングの考慮を線形的に行う MWA 法では次の式を用いている.

$$\sigma = \sigma_{neck} + w \cdot \sigma_{neck} (\varepsilon - \varepsilon_{neck}) \tag{3}$$

このとき, w はネッキング後の重み係数であり, 本研究では $w=450$ としている.

また, ネッキングの考慮が指数則に従う PLT 法は次の式を用いている.

$$\sigma = \begin{cases} \left(\frac{\sigma_{neck}}{\varepsilon_{neck}} \right) \cdot \varepsilon^{\varepsilon_{neck}} & (\varepsilon \leq \varepsilon_{neck}) \\ \sigma_{neck} \cdot (1 + \varepsilon - \varepsilon_{neck}) - \frac{\sigma_{neck}}{1+n} (\varepsilon - \varepsilon_{neck})^{n+1} & (\varepsilon > \varepsilon_{neck}) \end{cases} \tag{4}$$

ここで, n はひずみ硬化率の減少速度によって, 試験結果と解析結果の兼ね合いより $n=1.3$ と決定している.

4. 解析結果

本研究では, 解析結果と試験結果の破断時の荷重に着目して, 各条件における延性破壊パラメータ χ を定めた. 荷重-変位関係を図-3 に示す. ネッキング後の変位は変動するため, 変位による断定は難しい. そのため, 破断荷重で延性破壊パラメータ χ を定めている. PLT 法を用いた破壊モデルは図-4 に示すような破壊モードが得られ, 荷重-変位関係も一致するため試験結果を精度よく模擬できると言える.

本解析手法にて解析コード, ネッキング考慮の有無による影響を踏まえて定めた延性破壊パラメータ χ を表-2 に示す. 解析は準静的 (全エネルギーと動的エネルギーの比が 5%以内) で行っているが, Explicit を用いる場合, Standard を用いる場合よりも χ の値が大きくなる結果となった.

5. 結言

延性き裂発生基準式に用いる延性破壊パラメータ χ は, ネッキング考慮を行った場合では, 解析コードの異なりによる影響を踏まえても大きな変動はなく, 平均して $\chi=2.25$ であると定めることができた.

参考文献

- 岡下勝彦, 大南亮一, 道場康二, 山本晃久, 富松 実, 丹治康行, 三木千壽: 兵庫県南部地震による神戸港港湾幹線道路 P75 橋脚隅角部におけるき裂損傷の原因調査・検討, 土木学会論文集, No.591/I-43, pp.243-261, 1998 年 4 月.
- 篠原一輝, 賈 良玖, 加藤弘務, 葛 漢彬: セン断応力と引張応力が作用する鋼材の延性破壊メカニズムの解明に関する研究, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.71, No.4, 2015 年 (掲載予定).