

鋼部材の破壊解析における延性破壊パラメータと材料パラメータの 統一的簡易決定法の提案

名城大学大学院 学生会員 池田 修斗
名城大学 正会員 劉 巖
名城大学 フェロー 葛 漢彬

1. 目的

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での一つであり、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。既往の研究¹⁾において延性破壊をシミュレーションするために提案された延性破壊パラメータ χ および材料パラメータ n の決定は、実験と解析の同定を行うことで決定され、膨大な時間を要しているのが現状である。そこで本研究では、延性破壊パラメータ χ および材料パラメータ n の決定方法の簡略化および一般化を行う。

2. 延性破壊モデルおよび PLT 法について

用いた延性破壊モデル²⁾は3つの段階と2つのパラメータによって構成されている3段階2パラメータ延性破壊モデルである。本研究では、損傷発生基準である延性破壊パラメータ χ に着目して解析を行う。また、 χ は次式のように定義される。

$$\chi = \int_0^{\varepsilon_{eq}^{di}} \frac{d\varepsilon_{eq}}{\exp(-1.5\eta)} \quad (1)$$

また、ネッキング後の荷重-変位曲線を精度良くシミュレーションするため、ネッキングを考慮する手法である PLT 法を用いている。PLT 法は次の式を用いている。

$$\sigma = \begin{cases} \left(\frac{\sigma_{neck}}{\varepsilon_{neck} \varepsilon_{neck}} \right) \cdot \varepsilon^{\varepsilon_{neck}} & (\varepsilon \leq \varepsilon_{neck}) \\ \sigma_{neck} \cdot (1 + \varepsilon - \varepsilon_{neck}) - \frac{\sigma_{neck}}{1+n} (\varepsilon - \varepsilon_{neck})^{n+1} & (\varepsilon < \varepsilon_{neck}) \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 n は硬化率の減少速度によって決定される材料パラメータであり、前述した χ と合わせて試行錯誤的に決定される。

3. 解析概要

解析には汎用有限要素プログラム ABAQUS 6.13 を用いる。図-1 に試験片設計図を、図-2 に解析モデルを示す。解析モデルは実験結果との比較を行うため、試験片寸法と同様にモデル化を行い、境界条件は実験と同様に、片側固定の単調引張载荷である。要素タイプは6面体1次の低減積分要素(C3D8I)のソリッド要素を用いている。材料特性は各鋼種の材料試験より応力-ひずみ関係を用いている。

4. 結果

表-1 に本研究において実験および解析を新たに行った SM490, SM570, SBHS500 に加えて、既往の研究²⁾⁻⁶⁾で用いられた母材を追加した材料特性、延性破壊パラメータ χ および硬化率の減少速度を表す

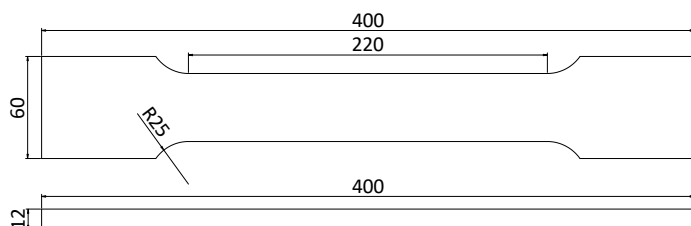


図-1 試験片寸法 (単位: mm)

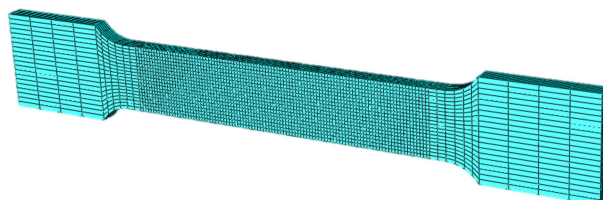


図-2 解析モデル

材料パラメータ n の値を示す．また，各鋼種のも材料特性は母材試験片より平均した値を用いている．延性破壊パラメータ χ の値はヤング率などの材料特性との関係において定式化には至らなかったが，8 つの鋼材において延性破壊パラメータは 2.4 であることから， $\chi=2.4$ と定めることができる．図-3 に横軸を硬化率の減少速度を表す材料パラメータ n ，縦軸を降伏強度としてプロットした関係図を示す．材料パラメータ n は，降伏強度が大きいほど小さくなる傾向があることがわかる．次に，プロットの結果より最小二乗法を用いて回帰曲線の算出を行うことで以下の式を得た．

$$\sigma_y=-198\ln(n)+338$$

(3)

上式の決定係数は 0.97 であり，降伏強度と硬化率の減少速度を表す材料パラメータ n は強い相関があることが示された．また，図-4 に一例として SM570 鋼材の荷重－変位曲線を示す．解析結果より，実験の挙動を精度良く模擬できていることから，本研究の提案式は妥当であると言えよう．

表-1 各材料パラメータ

鋼種	E	ν	σ_y	χ	n	試験片本数
SMA400AW ⁴⁾	217	0.30	322	2.4	1.7	3
SMA490AW ⁴⁾	215	0.27	473	2.4	0.6	3
SM490Y ²⁾	216	0.27	365	2.4	1.1	4
SM490Y ⁶⁾	213	0.27	388	2.4	1.1	3
SM570 ⁶⁾	216	0.28	597	2.4	0.4	3
SBHS500 ⁶⁾	208	0.27	578	2.2	0.4	3
Q235 ⁵⁾	217	0.27	305	2.5	1.2	2
Q345 ⁵⁾	211	0.27	377	2.5	0.9	2
Q690 ³⁾	217	0.29	758	2.4	0.2	3

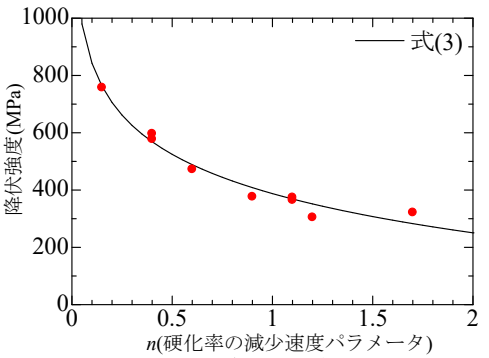


図-3 n と降伏強度の関係

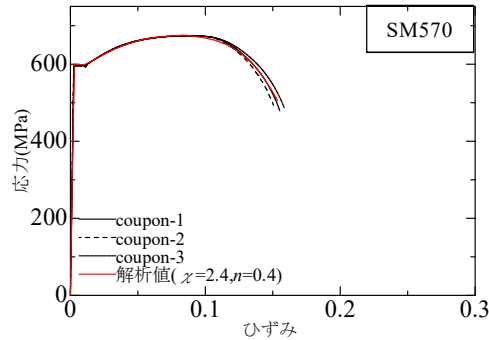


図-4 荷重－変位曲線の比較

4. おわりに

硬化率の減少速度を表す材料パラメータ n は鋼材の降伏強度と強い相関性があり，本研究の提案式を用いることでその値を決定することができる．また，延性破壊パラメータ χ は 2.4 と一定とした．今後，より多くの鋼種を対象に実験を行い本研究提案式の適用性の検討および延性破壊パラメータ χ の決定方法を再検討する必要がある．

参考文献

1) 加藤友哉，葛漢彬：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，土木学会全国大会平成 27 年度研究発表会，I-546，pp.1091-1092，2015.

2) 劉巖，葛漢彬，康瀾：低応力三軸度下における鋼材の延性破壊条件の提案に関する研究，土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)，Vol.75，No.4，pp.I_333-I_344，2019.

3) 劉巖，池田修斗，葛漢彬：高応力三軸度における高強度鋼材 (Q690) の破断特性に関する実験的研究，土木学会全国大会令和 2 年度研究発表会，I-305，2020.

4) Shao, F., Gu, T., Jia, L. J., Ge, H.B., & Taguchi, M.: Experimental study on damage detectable brace-type shear fuses, *Engineering Structures*, Vol.225, 111260, 2020.

5) Sun, J., Zhang, Q., Wang, Z., Li, H., & Ge, H.B: Experimental and numerical study on steel ring restrainers with rectangular section, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol.177, 106458, 2021.

6) 池田修斗，劉巖，葛漢彬，康瀾：高応力三軸度領域における高強度鋼材の延性破壊挙動に関する実験的検討，土木学会第 41 回地震工学研究発表会講演論文集，論文番号 2343，2021.