

## 塑性拘束を受ける構造用鋼材の破壊プロセスと破壊規準に関する研究

横浜国立大学大学院 学生員 ○田村 洋 横浜国立大学大学院 正会員 佐々木 栄一

横浜国立大学大学院 フェロー会員 山田 均 横浜国立大学大学院 正会員 勝地 弘

横浜国立大学大学院 正会員 Theeraphong CHANPHENG

### 1. 背景と目的

1994年1月17日の早朝に発生したNorthridge地震, 1995年1月17日の早朝に発生した兵庫県南部地震では, 数多くの高層鉄骨建築物および土木鋼構造物に, 従来確認されることのなかった塑性変形を伴う形式の破壊が生じた. これまでこのような形式の破壊に関して, 破壊靱性に着目した破壊力学的アプローチと塑性拘束に着目した材料力学的アプローチから破壊メカニズムの解明が試みられてきたが, 破壊に至るまでのプロセスの検討や, 延性的に破壊するか脆性的に破壊をするかといった破壊性状を判別できる破壊規準の確立などの課題が未だ残されている. 材料力学的アプローチを採るSchaferら<sup>1)</sup>は, 塑性拘束の程度を表す応力三軸度 $T_2 = \sigma_{\max} / \sigma_{\text{eff}}$ と鋼材の終局応力で最大主応力を一般化した $\sigma_{\max} / \sigma_{\text{ult}}$ の関係に着目し,  $T_2$ と $\sigma_{\max} / \sigma_{\text{ult}}$ の関係図における破壊時の応力状態を表すプロット点(破壊点)がFailure Bandsと呼ぶ2曲線の内部に分布する(図-1)という鋼材の破壊規準を提案している. 本研究では, Schaferらが破壊時における $T_2$ と $\sigma_{\max} / \sigma_{\text{ult}}$ の関係に着目したのに対し, 同様の手法を用い破壊に至るまでの $T_2$ と $\sigma_{\max} / \sigma_{\text{ult}}$ の関係の変化を追い, 塑性拘束下における破壊プロセスを観ることを第一の目的とした. また, 材料力学的アプローチを採った場合も, 破壊プロセスにおいて破壊靱性の違いが及ぼす影響は無視できないと考え, この影響を見ることを第二の目的とした.

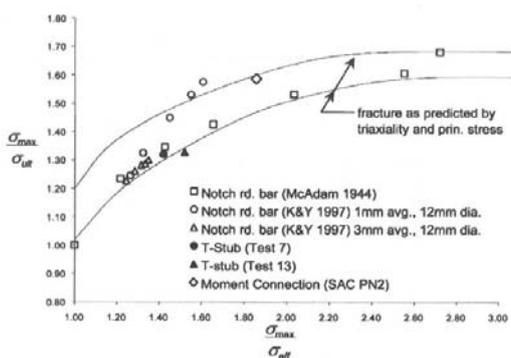


図-1 Failure Bandsと破壊点<sup>1)</sup>

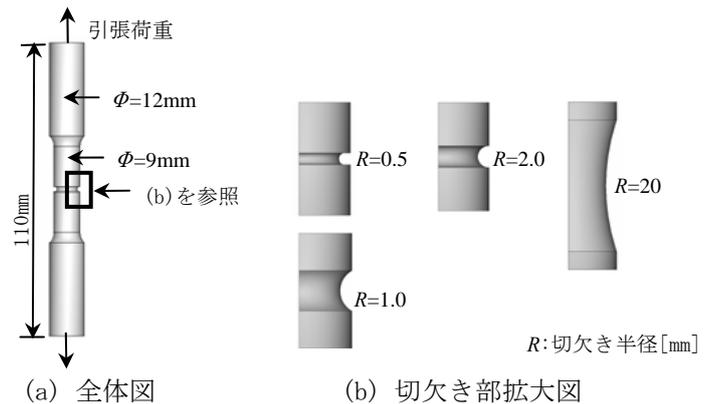


図-2 切欠き付き丸棒試験片

### 2. 方法

Schaferらと同様に, 異なるレベルの塑性拘束の影響を観るため, 図-2に示す4種類の切欠き付き丸棒試験片(切欠き半径; 0.5mm, 1.0mm, 2.0mm, 20mm, 切欠き深さ; いずれも1.0mm)を対象とした. 材料は, 490MPa級構造用鋼材の素材と破壊靱性を低減させた同鋼材の10%予ひずみ材の2種類とした. それぞれ, FEM弾塑性解析を用いて引張破壊試験を再現し, 塑性拘束の影響を最も強く受ける切欠き部最小断面における応力状態の変化を調べ, 実際の破壊実験で破壊性状とFEM解析の再現性を確認した. また最大主応力の一般化にあたっては, Schaferらの報告<sup>1)</sup>に $\sigma_{\text{ult}}$ の具体的な定義が述べられていないことから, 図-3に示す各材料の真応力-真ひずみ関係における真応力の最大値 $s_B$ (真の引張強さと称する)を用いた.

### 3. 結果および考察

破壊プロセスに関しては, 応力三軸度と応力の変化(応力経路)を追うことで, 図-4に示すようにすべての対象試験片において素材が降伏時に高い塑性拘束を経験することが判明した. 破壊靱性の違いが及ぼす影響に関しては, 10%予ひずみ材の最大耐力発現点の方が $S$ ,  $T_2$ の高い領域に現れるという傾向が全試験片に共通すること

キーワード 塑性拘束, 破壊靱性, 延性破壊, 破壊規準

連絡先 〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-7 横浜国立大学大学院工学府構造研究室 Tel 045-339-4041

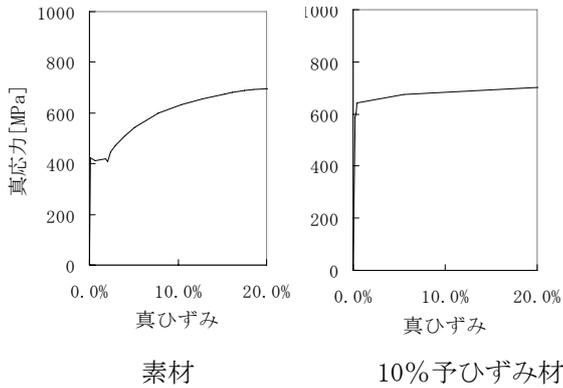


図-3 真応力 - 真ひずみ関係

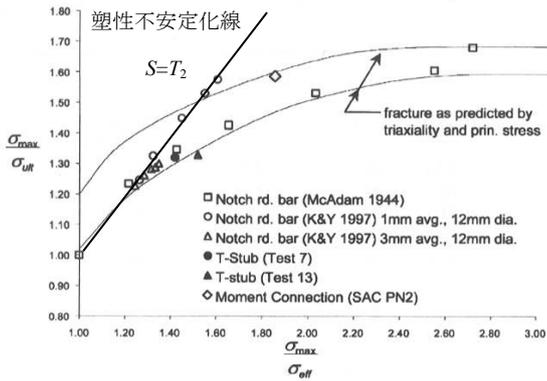


図-5  $S=T_2$ とFailure Bands<sup>1)</sup>の対応

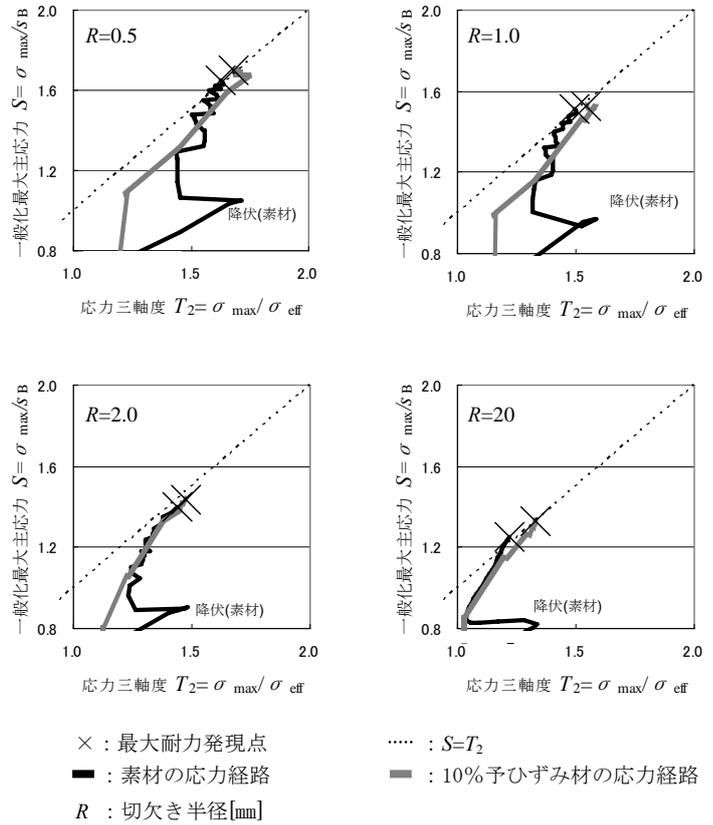


図-4 応力経路と最大耐力発現点の分布

から、応力経路への影響のみならず最大耐力発現点への影響も認められ、材料力学的アプローチを採った際も破壊靱性の違いが及ぼす影響を無視できない場合があることが確認された。また、全試験片において、応力経路が塑性不安定時に直線 $S=T_2$ に漸近し、最大耐力発現点がこの直線付近に分布した。破壊実験においてすべての試験片が延性破壊したことも考慮すると、塑性不安定時に最大耐力が発現することが延性破壊の特徴の一つであることから、直線 $S=T_2$ （塑性不安定化線と称する）を破壊条件とする延性破壊に関する破壊規準の提案に至った。図-5は本延性破壊規準とSchaferらの破壊規準の対応を表すものだが、本延性破壊規準は図の左方領域に存在するFailure Bands内に収まらない破壊点まで説明できるものである。また、右方領域の破壊点に関しては、本研究の破壊実験で確認された破壊性状が延性破壊に限られていることから、本研究で未確認の領域に分布するこれらが脆性破壊に該当するものである可能性が考えられる。その場合、さらに脆性材料に対して適合性の高い既存の最大主応力説に対応する直線 $S=const$ （ただし、鋼種、温度等に依存）でこれら右方領域の破壊点が説明できれば、 $S=const$ を脆性破壊規準に関する限界最大主応力線とすることができ、二直線 $S=T_2$ 、 $S=const$ によって破壊性状の判別が可能で、塑性拘束を受ける鋼材の破壊規準確立への展望を示すに至った。

#### 4. 結論

本研究から得られた結論は以下の通りである。

- 素材の対象試験片は降伏時に高い塑性拘束を経験することが判明した。
- すべての対象試験片の応力経路および最大耐力発現点において、破壊靱性の違いが及ぼす影響が確認された。
- 塑性拘束を受ける鋼材に関する、塑性不安定化に着目した新たな延性破壊規準を提案した。
- 塑性破壊規準に関する仮説から、破壊性状を判別できる新たな鋼材破壊規準確立への展望を示した。

#### 参考文献

- 1) B.W.Schafer, Associate Member,ASCE,R.P.Ojdrovic, Member,ASCE,M.S.Zarghamee, Fellow,ASCE: Triaxiality and Fracture of steel moment connections.:Journal of Structural Engineering;pp1131-1139:October,2000.