

FEM 解析による鋼構造柱梁接合部の応力集中と破断起点の予測

Prediction of Stress Concentration and Fracture Origin of Steel Beam-Column Connection by FEM Analysis

○千葉光平¹, 石鍋雄一郎², 半貫敏夫³, 秋山宏⁴

*Kohei Chiba¹, Yuichiro Ishinabe², Toshio Hannuki³, Hiroshi Akiyama⁴

Abstract: Brittle fracture is very dangerous in the sense of causing poor plastic deformation. In tensile test, generally steel material shows ductile fracture after large plastic strain. However, in such steel material, a defect like a notch can be a cause of brittle fracture due to the rise of maximum principal stress. Thus, it is very important to understand the property between the local stress concentration and the development of the maximum principal stress. In this study, the main purpose is to check the state of stress and strain of steel beam-column connection by FEM analysis.

1. はじめに

1994 年米国ノースリッジ地震及び 1995 年兵庫県南部地震では、鋼構造柱梁接合部を中心に大規模な脆性破壊が確認された。一般的な耐震設計では、部材が十分に塑性変形することで、地震エネルギーを吸収し構造物の崩壊を防いでいる。これは、部材が引張強さ相当の耐力を発揮し、延性的に挙動することを期待したものである。一方、脆性破壊は塑性変形能力に乏しく、エネルギー吸収能力の低い危険な破壊である。

一般の鋼素材引張試験では大きな塑性歪を生じた後に延性破壊する。しかし、同じ鋼材でも切欠き等の形状的不連続がある場合は局所的に拘束力が強まり、最大主応力が上昇し、脆性破壊へと遷移してしまうケースがある。そこで、破断が想定される位置の応力と歪の状態を把握することにより、脆性破壊発生条件の推定が可能となると考えられる^[1]。

新井らは、実大柱梁接合部実験によりスカラップの有無や、試験体の温度が破壊形式に与える影響を検討している^[2]。本報告では、新井らの実験を対象に有限要素法解析を行う。梁端の破断起点の応力と歪の状態を確認し、柱梁接合部の力学的特性を把握する。

2. 解析概要

有限要素法解析エンジン NEi Nastran を用いて、新井らの実大柱梁接合部破壊実験に対応する大変形解析を行った。Tab.1 に素材引張試験より得られた素材特性を示す^[2]。材質は等方等質とし、von Mises の降伏条件を用いた。応力-歪関係は、公称応力、公称歪を真応力、真歪に変換したものをを用いた。

Fig.1 に解析モデル、Fig.2 にスカラップ近傍のメッシュ分割を示す。実験を模擬し、解析モデルの端部に垂直荷重を与えた。境界条件は、一端を固定支持とし、

荷重端では水平方向及び捩れに対して単純支持とした。要素は、8 節点で構成される 3 次元ソリッド要素を用いた。分割数は、板厚方向にウェブでは 2 分割、フランジにおいては 3 分割とした。スカラップ近傍では、スカラップ底に応力集中が予想される為、ウェブ及びフランジのメッシュ分割を細かくした。また、Fig.2 に示すように、スカラップ形状は実験を模擬した従来型である。本解析では溶接・溶接熱影響部は考慮せず、部材は単一の素材とした。なお、き裂の発生は再現していない。

Table1 Material Properties.^[2]

Steel type	Young's modulus $E(N/mm^2)$	Nominal stress		True stress	
		Yield stress $\sigma_y(N/mm^2)$	Maximum stress $\sigma_u(N/mm^2)$	Yield stress $\sigma_y(N/mm^2)$	Maximum stress $\sigma_u(N/mm^2)$
SM490A	201000	358	540	361	648

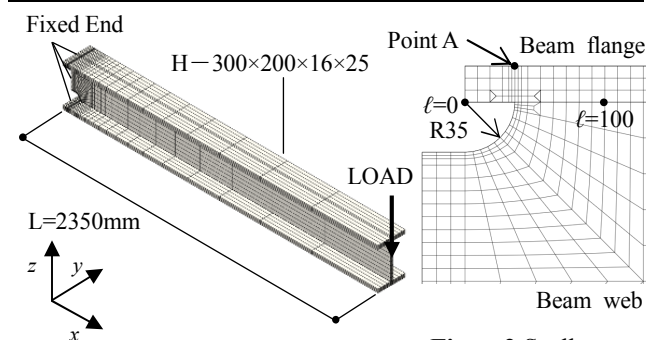


Figure1 Analysis Model.

Figure2 Scallops neighborhood.

3. 解析結果

3.1 解析の妥当性

Fig.3 に実験及び解析で得られた、モーメント $M(kNm)$ - 回転角 $\theta(rad)$ 関係を示す。新井らの実験は繰り返し载荷である為、実験値に関しては、 $M-\theta$ 関

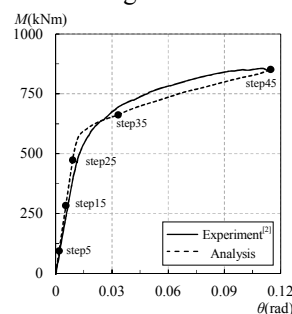


Figure3 $M-\theta$ curves.

1: 日大理工・院(前)・建築, Student, Graduate School of Nihon Univ.

2: 日大理工・教員・建築, Nihon Univ., Dr. Eng.

3: 日大名誉教授, Prof. Emeritus, Nihon Univ., Dr. Eng.

4: 東大名誉教授, Prof. Emeritus, Tokyo Univ., Dr. Eng.

係の履歴から加力サイクルによる影響を排除した骨格曲線を用いた。Fig.3 より初期剛性に関して、実験値が解析値を下回っている事が分かる。これは、固定梁の弾性挙動を無視した境界条件設定の影響と考えられる。降伏後の 2 次勾配は、解析値と実験値の挙動は概ね一致しており、本解析は妥当であると判断した。

3.2 スカラップ周辺の最大主応力と最大主歪の状態

Fig.4 に各 step 毎の $\sigma_p/\sigma_y - \ell$ 関係, Fig.5 に $\varepsilon_p - \ell$ 関係を示す。 σ_p , ε_p とは解析によって得られた最大主応力, 最大主歪である。 σ_p/σ_y は, 最大主応力を真降伏応力 σ_y で除した無次元化応力である。 ℓ はフランジ端からの距離であり, $\ell=0$ がフランジ端, $\ell=35$ がスカラップ底である(Fig.2)。 また, 高さレベルは全て上フランジの下端である。

Fig.4, Fig.5 より, 荷重が大きくなるに従い破断点であるスカラップ底の応力, 歪が局所的に大きくなっている事が分かる。破断時の σ_p/σ_y は, スカラップ底に極端に集中している。また, 最大主歪に関しても応力同様, スカラップ底に大きな歪が集中している。ただし, この解析結果はき裂の進展を考慮していないものであり, ピーク値は実験事実と対応していない可能性があるが, 塑性変形があまり進んでいない step35 でもかなりの集中が確認できる。

3.3 最大主応力-相当塑性歪関係

脆性破壊の評価では, 限界破壊応力説に基づいた最大主応力による評価が従来から行われている^[3]。そこで, Fig.6 に無次元化応力 $\sigma_p/\sigma_y -$ 相当塑性歪 ε_{eq} 関係を示す。 $\sigma_p/\sigma_y - \varepsilon_{eq}$ 関係は破断点であるスカラップ底と比較する為に, スカラップによる形状変化の影響が無いと考えられる Fig.2 に示す Point A と, $\ell=100$ の節点解析値も併せて示した。相当塑性歪 ε_{eq} に関しては, 文献[4]を参考に式(1)を用いて求めた。

$$\varepsilon_{eq} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2} \quad (1)$$

ε_{eq} :相当塑性歪 ε_1 :最大主歪 ε_2 :中間主歪 ε_3 :最小主歪

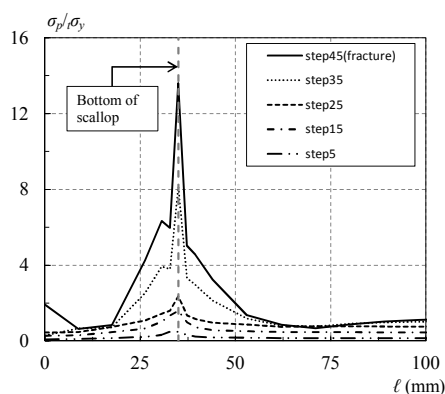


Figure4 $\sigma_p/\sigma_y - \ell$ curves.

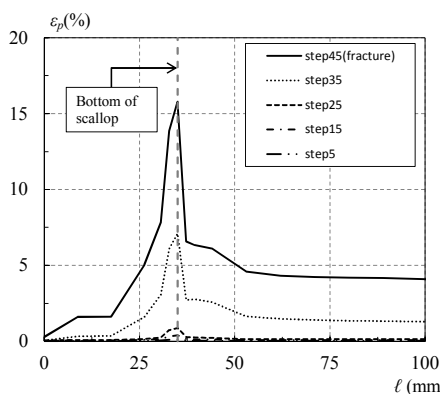


Figure5 $\varepsilon_p - \ell$ curves.

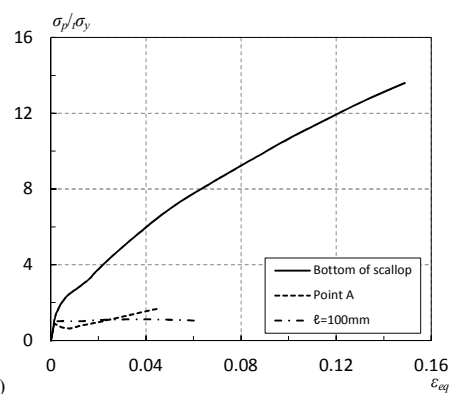


Figure6 $\sigma_p/\sigma_y - \varepsilon_{eq}$ curves.

Fig.6 より Point A や, $\ell=100$ の節点解析値では, 初期の傾きがスカラップ底と同等である事が分かる。しかし, 相当塑性歪が進行するに従い, Point A では, 応力が一度減少してから再び増加の傾向を示し, $\ell=100$ では, 一定のまま, 相当塑性歪のみが進行した。一方で, 破断点であるスカラップ底の σ_p/σ_y は, 相当塑性歪が進行していない状態でも, 大きな値を示しており, その後も増加を続けている。この事から, スカラップ底の拘束力が大きな状態が継続していると判断できる。延性破壊する場合には Point A や, $\ell=100$ の節点のように, 歪が進行していく。しかし, スカラップ底では, 拘束力が大きくなり, 変形能力が失われ, 脆性破壊に至ると考えられる。実験では, スカラップ底から破断しており, 以上の考察と結びつけることが可能であると思われる。

4. まとめ

- (1)破断点であるスカラップ底に局所的に応力, 歪が集中した。
- (2) $\sigma_p/\sigma_y - \varepsilon_{eq}$ 関係より, スカラップ底は ε_{eq} が小さい状態でも, σ_p/σ_y は大きな値を示し, スカラップ底の拘束力が大きいと判断できる。この事から, スカラップ底の変形能力が失われ, 脆性破壊に至ると考えられる。
- (3)実験では, スカラップ底から破断しており, 以上の考察と結びつけることが可能であると思われる。

5. 参考文献

- [1] 日本建築センター：鉄骨梁端溶接接合部の脆性的破断防止ガイドライン・同解説, pp.141-146, 2003.9
- [2]新井佑一郎, 小中孔明, 半貫敏夫, 秋山宏：Charpy 衝撃試験の特性が鋼構造部材の耐力に及ぼす影響, 日本建築学会構造系論文集, pp.357-365, 2010.2
- [3]萱森陽一, 鈴木孝彦, 下川弘海, 田淵基嗣, 中込忠男, 森田耕次：エレクトロスラグ溶接部の破壊性状に関する研究その12 シャルピー吸収エネルギーと限界最大主応力の相関, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.789-790, 2007.8
- [4]小野徹郎, 佐藤篤司, 横川貴之, 相川直子：構造用鋼材の延性き裂発生条件, 日本建築学会構造系論文集, pp.127-134, 2003.3