

線形破壊力学の応用による鋼構造柱梁接合部の靱性評価

Toughness Evaluation on Beam-Column Joints of Steel Structure by Application of Linear Fracture Mechanics

○千葉光平¹, 石鍋雄一郎², 半貫敏夫³

*Kohei Chiba¹, Yuichiro Ishinabe², Toshio Hannuki³

Abstract: Brittle fracture of Beam-Column Joints in steel structures was observed in Hyogo-ken Nanbu Earthquake. In a traditional method to prevent brittle fracture, Charpy impact test is generally used. However, there is a gap between the actual fracture of building joint and the Charpy impact test. The purpose of this study is to propose a new method to evaluate the toughness of beam-column joint by the application of linear fracture mechanics. In this paper, the toughness of the full-scale experiments is evaluated by applications of linear fracture mechanics.

1.はじめに

1994 年米国ノースリッジ地震及び 1995 年兵庫県南部地震において、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。脆性破壊防止の簡便な評価方法として Charpy 衝撃試験結果を利用するの一般的であるが、Charpy 衝撃試験と建築構造物の破壊との間には、載荷速度や断面寸法に隔たりがあり、Charpy 衝撃試験結果をそのまま適用するには不安が残る。

そこで本研究では、建築構造物に適した新たな靱性評価手法を提案することを目的とする。本研究で提案する靱性評価手法は、建築構造物の脆性破壊を模擬した平鋼の切欠き入り引張試験と線形破壊力学の応用を用いる手法である。既往の研究において、線形破壊力学の応用により、平鋼の切欠き入り引張試験の靱性評価が可能であることが示されている¹⁾。

本報告では線形破壊力学を応用して、既往の鋼構造柱梁接合部の実大破壊実験^{2)~4)}を対象にした靱性評価を行い、線形破壊力学の応用による柱梁接合部の靱性評価の可能性を検討する。

2.線形破壊力学⁵⁾

単軸応力下の切欠きモデルとして、両側に切欠きがある平鋼試験片を考える。両側に切欠きのある試験片の切欠き先端の応力拡大係数 K は式(1)で示される⁵⁾。

$$K = \gamma \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad (1)$$

K : 応力拡大係数 σ : 公称応力 a : 切欠き深さ γ : 形状係数

線形破壊力学の場合、応力拡大係数が破壊靱性値に達した時点で脆性破壊が発生すると評価する。脆性破壊発生条件は式(3)で与えられる。

$$K \geq K_c \quad (3) \quad K_c: \text{破壊靱性値}$$

この場合、脆性破壊応力度は式(1)の K に K_c を代入し、 σ について解いた式(4)で示される。

$$\sigma_a = \frac{K_c}{\gamma \cdot \sqrt{\pi \cdot a}} \quad (4)$$

σ_a : 脆性破壊応力度

破壊靱性値 K_c はき裂進展の抵抗性とも言え、Charpy 衝撃試験から得られる、Charpy 吸収エネルギー E から CTOD 変位 δ_c を推定し、その値から破壊靱性値 K_c を式(5)で求める。

$$K_c = \sqrt{\frac{2 \cdot \delta_c \cdot \sigma_{yT} \cdot E}{1 - \nu^2}} \quad (5)$$

なお、CTOD 変位 δ_c は式(6)、(7)より求める⁶⁾。

$$\delta_c(T) = 0.004 \cdot \nu \cdot E(T + \Delta T) \quad (6)$$

$$\Delta T = 87 - 0.10 \cdot \sigma_{yRT} - 6 \cdot \sqrt{W} \quad (7)$$

σ_{yT} : 試験温度 T (°C)での降伏応力

E : ヤング率(=205000N/mm²) σ_{yRT} : 常温の降伏応力

ν : ポアソン比(=0.3) W : 板幅

$\nu \cdot E(T + \Delta T)$: 温度 $(T + \Delta T)$ °C 時の Charpy 吸収エネルギー

3.実大柱梁接合部破壊実験概要^{4)~6)}

Table1 に実大柱梁接合部破壊実験^{4)~6)}の比較を示す。これらの実験は、試験温度をパラメーターとしており、接合部の破壊と温度の関係を検討したものである。

Case1 はノンスカラップ工法試験体、Case2,3,4 は従来型スカラップ工法試験体である。Case1 と Case2 でスカラップの有無が破壊形状に与える影響、Case2, 3,4 で鋼種が破壊形状に与える影響を検討している。また低

Table 1 Characteristics of specimen

Variation of connection-shape.			Validation of material.
Non-Scallop	1/4 arc Scallop		
Case1 ²⁾ 27°C, 0°C, -37°C	Case2 ³⁾ 60°C, 0°C, -33°C		↑
	Case3 ⁴⁾ 25°C, 0°C, -20°C	SM490A	
	Case4 ⁴⁾ -20°C, -45°C, -50°C×2, -55°C	SS400	

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.

靱性特殊鋼材は化学成分を調整し、靱性が低下するように製造された鋼材である。

Fig. 1 に試験体素材の靱性破壊応力度 σ_a - 試験温度 T 関係を示す。いずれの鋼材も試験温度 $T(^{\circ}\text{C})$ が大きくなるに従い、靱性破壊応力度 σ_a は大きくなっている。

4. 鋼構造柱梁接合部の靱性評価

β を用いて実大破壊実験の靱性評価を行う。 β は靱性破壊応力度を破断起点の破断応力で除した値であり、式(8)で表される。

$$\beta = \sigma_a / \sigma_f \quad (8)$$

σ_a : 靱性破壊応力度 σ_f : 破断起点の破断応力

破断起点の破断応力は、梁端の破断モーメントを塑性断面係数で除し、応力集中係数を乗じて求めた。応力集中係数は断面に作用する平均応力に対する破断起点の応力であり、FEM 解析により求めた。切欠き入り引張試験については、 β を用いて靱性破壊した試験片と延性破壊した試験片を分ける事ができた¹⁾。

Fig. 2 に $M_u/M_y - \beta$ 関係を示す。 M_u/M_y は梁端の最大モーメント M_u と降伏モーメント M_y の比であり、降伏後の耐力の上昇率を表しており、塑性変形能力の指標の一つである。Fig.2 より、 $\beta \leq 1.0$ では、 M_u/M_y が概ね 1.2~1.4 に分布しており、 $\beta > 1.0$ では概ね 1.4~1.8 に分布していることが分かる。この事から、 β が 1.0 を超えると、部材が延性的な挙動をしていると考えられる。

Fig. 3 に $M_u/M_a - \beta$ 関係を示す。 M_u/M_a は梁端の最大モーメント M_u を、素材引張試験結果を用いて算出した予測終局モーメント M_a で除すことにより無次元化した値である。 M_a は式(9),(10)を用いて算出した²⁾。

$$M_a = \sigma_{uf} \cdot Z_{pf} + \gamma_w \cdot \sigma_{yw} \cdot Z_{pw} \quad (9)$$

$$\gamma_w = M_w' / M_w \quad (10)$$

M_a : スカラップによる断面欠損を考慮した梁端終局モーメント

σ_{uf} : フランジの引張強さ Z_{pf} : フランジの塑性断面係数

Z_{pw} : ウェブの塑性断面係数 σ_{yw} : ウェブの降伏応力

γ_w : ウェブの負担モーメントの低減係数

M_w' : 実際にウェブが負担するモーメント

M_w : 全断面有効とした場合のウェブの負担するモーメント

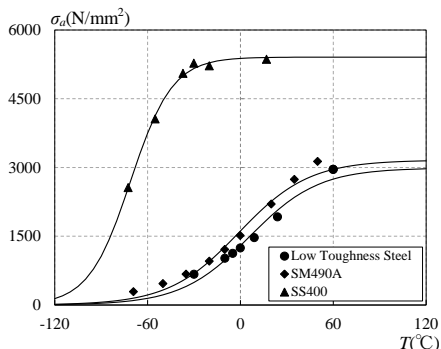


Fig.1 $\sigma_a - T$ relation.

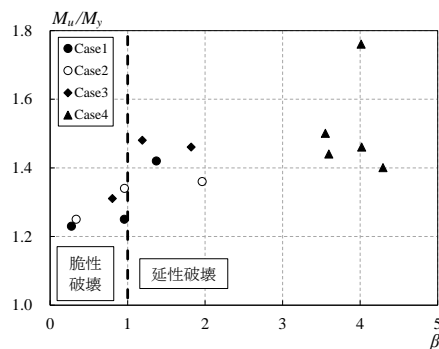


Fig.2 $M_u/M_y - \beta$ relation.

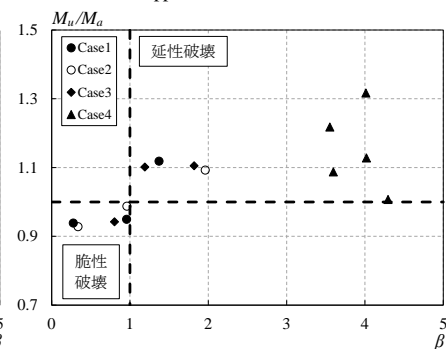


Fig.3 $M_u/M_a - \beta$ relation.

実際にウェブが負担するモーメント M_w' は、スカラップによる断面欠損、柱ウェブの面外変形等を考慮して求めたモーメントである。Fig. 3 より、 $\beta \leq 1.0$ では、全てのケースで M_u/M_a は 1.0 未満となっており、実験値は式(9)で求めた予測終局モーメントに達していないことが分かる。一方で、 $\beta > 1.0$ では、全てのケースで M_u/M_a が 1.0 以上になっていることが確認でき、実際の耐力が予測終局モーメントを上回っている。以上の事から、 $\beta \leq 1.0$ では降伏後に耐力が十分に上昇せず予測値を下回って破断しているため、脆性的な破壊と評価できる。一方で、 $\beta > 1.0$ では降伏後も耐力が十分に上昇し、予測値を上回っていることから延性的な破壊と判断できる。よって、線形破壊力学の応用による鋼構造柱梁接合部の靱性評価が可能であると考えられる。

5. まとめ

(1) $\beta \leq 1.0$ では部材が降伏後に耐力が上昇せず、終局モーメントの予測値を下回って破断しているため、脆性的な破壊と評価できる。

(2) $\beta > 1.0$ では降伏後も耐力が十分に上昇し、終局モーメントの予測値を満たしている事から延性的な破壊と評価できる。

(3) 線形破壊力学の応用により、鋼構造柱梁接合部の靱性評価が可能であると考えられる。

【参考文献】

- 1) 千葉光平, 石鍋雄一郎, 半貴敏夫, 秋山宏: 線形破壊力学の応用による切欠き入り引張試験の靱性評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), pp.1095-1096, 2012.9
- 2) 岩佐州絃, 新井佑一郎, 半貴敏夫, 秋山宏: 実大鋼構造柱梁接合部の延性破壊-靱性破壊遷移実験, 日本鋼構造協会 鋼構造論文集 No.50, pp.45-56, 2006.6
- 3) 新井佑一郎, 半貴敏夫, 秋山宏: 従来型スカラップ工法による実大鋼構造柱梁接合部の延性破壊-靱性破壊遷移実験, 日本建築学会構造系論文集 第 631 号, pp.1649-1656, 2008.9
- 4) 新井佑一郎, 小中孔明, 半貴敏夫, 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 第 648 号, pp.357-365, 2010.2
- 5) 下川弘海, 中込忠男, 岡本晴仁, 森田耕次: 線形破壊力学の応用による鉄骨部材の破断荷重推定方法, 日本建築学会構造系論文集 第 585 号, pp.169-175, 2004.4
- 6) (社)日本溶接協会: 溶接継ぎ手のぜい性破壊発生及び疲労き裂進展に対する欠陥の評価方法, 2011.10
- 7) 松本由香, 山田哲, 岡田健, 土井匡俊, 竹内徹, 竹内悦男, 小川信行, 秋山宏: 実大振動台実験における鋼構造柱梁接合部の破壊性状と変形能力評価, 日本建築学会構造系論文集 第 560 号, pp.181-188, 2002.10