

1 研究背景・目的

兵庫県南部地震で鋼構造柱梁接合部における梁端破断が発生してから、柱梁接合部の破断防止や、破断によって決まる塑性変形能力に関する多くの研究が行われてきた。これまでの研究では、長周期地震動を想定した弾性範囲に近い小振幅での実験や、連続地震を想定した比較的大きな振幅と小振幅の载荷が繰り返されるような実験は行われておらず、これらの载荷履歴を受ける場合では、既往の研究で提案された評価方法の精度が急激に落ちる可能性も考えられる。本研究では、長周期地震動を想定した弾性範囲に近い振幅が小さい繰り返し载荷履歴と、小振幅と大振幅交替で現れる多数回の地震を想定した载荷履歴を含めて、様々な地震荷重を受ける柱梁接合部の塑性変形能力を精度良く評価する方法を提案することを目的とする。

鋼構造柱梁接合部において、変位振幅と破断までの繰り返し回数 N_f の関係を求め、接合部の塑性変形能力を Manson-Coffin 式で評価する方法は一般に使われている。しかし、この評価法を使う場合、異なるパラメータを持つ柱梁接合部ごとに実験を行う必要がある。そこで、本研究では、歪振幅に着目し、鋼材や形状などのパラメータが異なる柱梁接合部がランダムな载荷を受ける場合の塑性変形能力を統一した方法で評価する。

2 柱梁接合部の繰り返し载荷実験と数値積分による部材の面内解析

図1及び表1に試験体の詳細及び実験セットアップを示す。すべての試験体は、フランジスカラップ底から延性亀裂が進展し破断に至った。そして、既往の実験データを収集し、データベースを構築する。表1にデータベース全試験体の情報を示す。データベースのもとで、数値積分による鋼梁部材の面内解析を行い、梁全体挙動を示す荷重-変形関係及び局所の応力-歪関係を求める。

解析方法としては、まず、素材の応力-歪関係を用いて、梁断面内の力の釣り合いから、断面のモーメント-曲率関係を求める。そして、材長方向を微小区間に分割し、得られたモーメント-曲率関係を梁スパン方向に積分することで、梁のモーメント-部材角関係や、局所の応力-歪関係を求める。また、図2に示すように、梁端接合部におけるモーメント伝達率の低下の影響を梁端部に曲げ応力伝達の無効領域を設けることでモデル化する。図3には、解析方法の妥当性を確認するため、NB-6試験体のモーメント-部材角関係と歪履歴の実験値と解析値の比較を例示する。

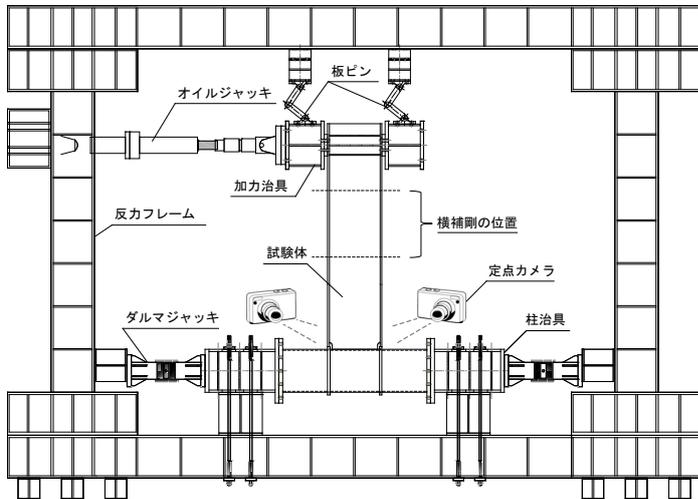


図1 試験体と実験装置

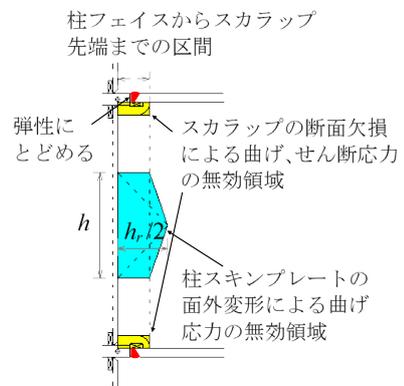


図2 梁端解析モデル

3 研究結果

解析によって得られた破断したフランジの歪履歴から全ての試験体の破断箇所における歪振幅を求め、実験より得られた破断回数 N_f との関係性を両対数グラフでプロットしたものを図4に示す。グラフより、梁端フランジ破断箇所における歪履歴と破断回数との間に、Manson-Coffin 形式の相関関係 (式 (1)) があることが分かった。

$$\Delta \varepsilon = 0.0581 N_f^{-0.246} \quad (0.013 < \Delta \varepsilon < 0.044) \quad (1)$$

次に、提案した式 (1) 及び線形累積損傷則(Miner 則)によるランダムな振幅荷を受ける柱梁接合部の塑性変形能力を評価する。図5に式 (1) と Miner 則より算出された全試験体の累積損傷 (D 値) を示す。本評価法を用いて、異なるパラメータを持つ柱梁接合部の塑性変形能力を概ね評価できることが確認できた。

4 まとめ

本研究では、柱梁接合部の繰り返し荷実験を行い、データベースを構築した。そして、実験で計測することができない梁端フランジ破断箇所の歪履歴を解析によって求め、破断箇所の歪振幅と梁の破断回数との間に、素材や柱梁接合部の形状の違いによらず Manson-Coffin 形式の相関関係があることを解明し、Manson-Coffin 型の評価式を提案した。更に、線形累積損傷則を用いることで、変動変位振幅下における鋼構造柱梁接合部の塑性変形能力を概ね評価できることを確認した。今後、データベースを充実させ、式 (1) を改良し、地震のようなランダムな外乱を受ける鋼構造柱梁接合部の塑性変形能力を精度良く評価する。

表1 データベース

試験体名	梁					接合部詳細		柱		破断回数
	断面 W-H×B×t _w ×t _f (mm)	スパン (mm)	鋼種 SN	フランジ σ _y (N/mm ²)	ウェブ σ _y (N/mm ²)	スカラップ S _y (mm)	断面 □×D×t _c (N/mm ²)	σ _y (N/mm ²)		
J-08B-1'	W-400×200×8×13	1900	SN400B	282	352	35	□-400×19	324.5	漸増	26.5
J-08B-3'									3σ _p	
J-08B-4'									4σ _p	
J-08B-5'									5σ _p	
K-01	W-400×200×8×13	1900	SN400B	309	363	30	□-400×19	358	漸増	
K-13	W-400×200×8×13	3000	SN490B	337	364	35	□-500×25	370	1.3σ _p	83
K-20									2σ _p	20
K-30									3σ _p	7
NB-3'	W-400×200×8×13	2200	SN490B	346	421	34	Endplate		1.5σ _p	266
NB-4'									2σ _p	126
NB-5'									2.5σ _p	70
NB-6'									3σ _p	44
NB-漸増									漸増	
NB-八戸									ランダム	

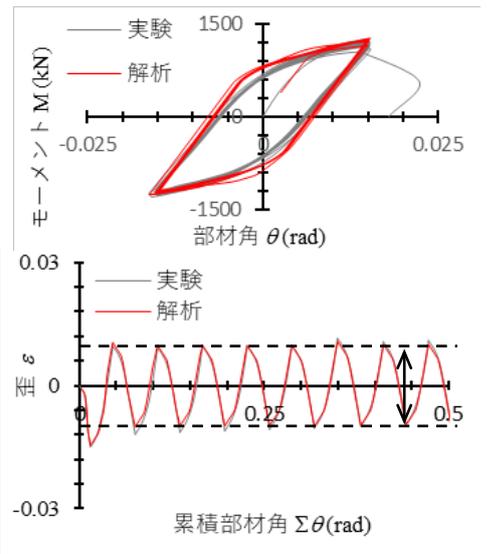


図3 実験と解析結果

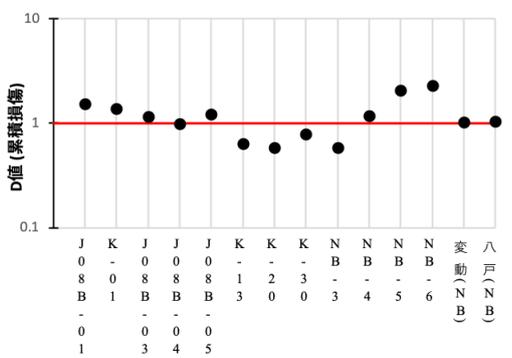


図5 累積損傷値 (D 値)

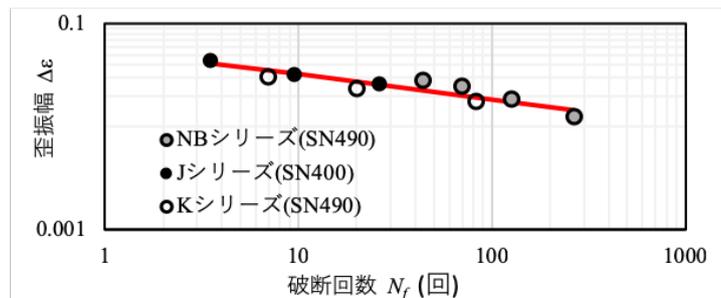


図4 歪振幅-破断回数関係

関連発表論文

ジャーナル

- 1) Shoichi Kishiki, Dong-Seok Lee, Satoshi Yamada, Takanori Ishida, and Yu Jiao; Low-Cycle Fatigue Performance Assessment of Current Japanese Steel Beam-to-Column Connections Determined by Ductile Fracture, Engineering Structures, Vol 182, 2019.3, pp 241-250
- 2) Randy Tenderan, Takanori Ishida, Yu Jiao, and Satoshi Yamada. Seismic Performance of Ductile Steel Moment-Resisting Frames Subjected to Multiple Strong Ground Motions, Earthquake Spectra, Volume 35, No. 1, pages 1–21, February 2019; © 2019, Earthquake Engineering Research Institute

査読付き論文

- 3) 焦 瑜、吉敷祥一、山田哲、三木徳人、長谷川 隆；繰り返し荷を受ける梁端フランジの亀裂長さとの耐力低下の関係、鋼構造年次論文報告集、vol.26、2018年11月、P694-p700
- 4) 李東錫、石田孝徳、焦 瑜、吉敷祥一、山田哲；現場混用接合形式の低サイクル疲労性能評価に関する解析的検討、鋼構造年次論文報告集、vol.26、2018年11月、P686-p693

国際会議

- 5) Yu Jiao、Satoshi Yamada ; Loading Protocols for Steel Beam Tests in Seismic Performance Evaluation, 11th National Conference on Earthquake Engineering, LA, June. 2018.
- 6) Yu Jiao、Satoshi Yamada ; Low Cycle Fatigue Behaviour of Structural Steel in the Form of Modified Manson-Coffin Equation, 12th International Fatigue Congress, Poitiers, France, May. 2018.

国内大会

- 7) 山田哲、李東錫、焦瑜、吉敷祥一、石田孝徳; Numerical Analysis of Welded Flange-Bolted Web Beam to Column Connection, Part 1 A Concise Hysteresis model of high performance 590MPa steel grade considering the Bauschinger effect, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 1193-1194,2018.9
- 8) 焦瑜、李東錫、山田哲、吉敷祥一、石田孝徳; Numerical Analysis of Welded Flange-Bolted Web Beam to Column Connection, Part 2 Introduction of numerical analytical model of WFBW connection considering bolts slip, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 1195-1196, 2018.9
- 9) 青柳智、Wenlei Yu、三木徳人、吉敷祥一、石田孝徳、焦瑜、長谷川隆、山田哲；Cyclic Loading Test on Beam-to-Column Connection with Low Moment Transferring Efficiency in Web、Part1 Experiment, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 1197-1198, 2018.9
- 10) Wenlei Yu、三木徳人、吉敷祥一、石田孝徳、焦瑜、長谷川隆、山田哲；Cyclic Loading Test on Beam-to-Column Connection with Low Moment Transferring Efficiency in Web、Part1 Evaluation, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 1199-1200, 2018.9
- 11) 李東錫、山田哲、吉敷祥一、焦瑜、石田孝徳; Prediction of Cyclic Deformation Capacity of Beam-to-Column Connection determined by Ductile Fracture, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 1201-1201, 2018.9

発表予定

- 12) 近野裕樹、焦 瑜、山田 哲；歪振幅に着目した変動振幅繰り返し荷を受ける鋼構造柱梁接合部の塑性変形能力評価、鋼構造年次論文報告集、2019年11月
- 13) Yu Jiao, Hiroki Konno, and Satoshi Yamada; Evaluation of plastic deformation capacity of steel beam-to-column connections based on flange strain amplitudes, PSSC19, 2019.11, Tokyo
- 14) Yu Jiao, and Satoshi Yamada; Study on cumulative deformation capacity of steel beam-to-column connections based on numerical analysis, 10th ISSS, 2019.11, Jeju
- 15) 近野裕樹、焦 瑜；歪振幅に着目した鋼構造柱梁接合部の塑性変形能力評価、日本建築学会大会学術講演梗概集, 2019.9