

令和 5 年 6 月 29 日現在

機関番号：32678

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2022

課題番号：17K14762

研究課題名(和文) 任意の載荷履歴を受ける鉄骨梁端接合部の塑性変形能力評価法及び履歴モデルの提案

研究課題名(英文) Modeling of hysteretic behavior & evaluation on the plastic deformation capacity of steel beam-to-column connections under random loading histories

研究代表者

焦 瑜 (JIAO, YU)

東京都市大学・建築都市デザイン学部・准教授

研究者番号：40632493

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,800,000円

研究成果の概要(和文)：鋼構造柱梁接合部の変形性能を評価する際には、一定振幅繰り返し載荷を受ける鋼構造柱梁接合部の塑性変形能力を変位振幅と破断までの繰り返し回数間のManson-Coffin型の相関関係を用いて評価する方法が用いられている。本研究では、まず既往の接合部実験結果を用いて、部材面内解析による梁端フランジ危険断面における平均歪振幅に着目し、柱梁接合部の塑性変形能力のManson-Coffin型評価式を提案した。そして、実大接合部実験を行い、提案評価式の有効性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

梁降伏型骨組では、梁端接合部の塑性化により地震入力エネルギーを吸収する。梁端接合部の塑性変形能力を精度良く評価することが、骨組の耐震性能を正確に評価することに結びつく。梁部材の耐震性能を評価する際には、地震動及び構造物の特性を考慮した、振幅が小さいものから振幅が大きいものまで、様々な振幅を持つ載荷履歴の影響を考慮しなければならない。これまで梁の変形性能に関する研究では、変位振幅に着目したものがほとんどであり、本研究では、大振幅から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載荷履歴を受けた鉄骨梁の梁端フランジにおける歪振幅に着目し、歪振幅-繰返し回数(寿命)の関係を解明した。

研究成果の概要(英文)：Ductile fracture is one of the most typical steel component failure modes during earthquakes. For most structural steels, the strain-life relationship can be expressed using a Manson-Coffin-type equation. The current study proves whether there is a similar Manson-Coffin relationship between the average flange strain amplitude at the critical cross-section and the number of loading cycles until fracture. Shop welded beam-to-column connections made of 400 N/mm² class structural steel with conventional or improved types of weld access holes are discussed in this study. Moreover, cyclic in-plane beam analysis is conducted to obtain the strain histories at the beam-end flanges. Based on the strain histories, it is found that, similar to the material level, the Manson-Coffin relationship between the average flange strain amplitude at the critical cross-section and the number of loading cycles until fracture is confirmed on the component level.

研究分野：鋼構造の耐震設計

キーワード：柱梁接合部 繰返し載荷実験 数値解析 低サイクル疲労 歪履歴

1. 研究開始当初の背景

地震力を受ける鋼構造骨組では、柱梁接合部の塑性変形によってエネルギーを吸収する為、その塑性変形能力を正確に把握することが骨組の耐震性能を正確に評価することに繋がる。既往の研究では、一定振幅繰り返し载荷を受ける鋼構造柱梁接合部の塑性変形能力を変位振幅と破断までの繰り返し回数との間に確認されている Manson-Coffin 型の相関関係を用いて評価している¹⁾。しかし文献(1)によると、鋼材や接合部詳細の違いによって接合部は3つのグループに分類でき、それぞれ評価式が異なっている。一方、鋼材においては歪振幅に着目することで、異なる鋼材においても1つの統一された式で評価できることが明らかになっている²⁾。

2. 研究の目的

本研究では、まず鋼梁の数値面内解析を行い、実験で計測できない柱梁接合部の梁端フランジ破断箇所における歪履歴を求め、一定振幅繰り返し载荷を受ける柱梁接合部の塑性変形能力を評価する。さらに、ランダムな载荷を受ける鋼構造柱梁接合部の静的载荷実験を行い、接合部の塑性変形能力を評価することで求めた評価式の有効性を確認する。

3. 研究の方法

(1) 梁部材の面内解析

1) データベース

梁の面内解析に用いる試験体データベースを表1に示す。本研究で対象とする試験体には全てスカラップが設けてある。パラメータは鋼材の力学特性、部材の形状、接合部形式、载荷履歴、破断回数となる。表1に全試験体の情報を示す。なお、全ての試験体でスカラップ底の母材に亀裂が生じ、载荷に伴い亀裂が進展し破断に至った。

2) 解析方法

【解析方法】：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³⁾⁴⁾。また、文献5)で提案されたバウシinger効果を考慮した鋼材の履歴モデルを用いる。

【梁端モデル】：梁端接合部におけるモーメント伝達率の低下の影響を曲げ応力伝達の無効領域を設けることでモデル化する。スカラップによる断面欠損は、スカラップと外接する長方形の領域を曲げ応力もせん断応力も伝達しない領域と設定する。そして、柱スキンプレートの面外変形については長さ h_r を求め(式1)、スカラップの断面欠損を考慮して柱フェイスからスカラップ先端までの区間で変化しないものとし、長方形になる。この長方形と柱フェイスから高さ $h_r/2$ を頂点とした直角二等辺三角形に外接する五角形をせん断応力は伝達するが曲げ応力は伝達しない無効領域と設定した。(図1)

$$h_r = \sqrt{1 - m} \cdot (H - 2t_f - 2S_r) \tag{1}$$

H :梁せい t_f :フランジ板厚 S_r :スカラップによる断面欠損の梁成方向長さ m :「鋼構造接合部設計指針」による梁ウェブ接合部の無次元化曲げ耐力

3) 解析結果

試験体の実験結果と解析結果を比較し、解析方法の妥当性を確認する。図1には一部試験体のモーメント-部材角関係、及び歪履歴の実験値と解析値の比較を例示する。モーメント-部材角関係及び歪履歴はほぼ一致していることから解析方法の妥当性を確認できた。

表1 データベース

試験体名	梁					接合部詳細 スカラップ S_r (mm)	柱		载荷履歴	破断回数
	断面 W-H×B× t_w × t_f	スパン (mm)	鋼種	フランジ σ_v (N/mm ²)	ウェブ σ_v (N/mm ²)		断面 $\square \times D \times t_c$	σ_y (N/mm ²)		
J-08B-3	W-400×200× 8×13	1900	SN400B	282	352	35R+10R	\square -400×19	324.5	30 _p	26.5
J-08B-4									40 _p	10
J-08B-5									50 _p	3.5
NB-3	W-600×200× 11×17	2200	SN490B	346	421		Endplate	/	1.50 _p	266
NB-4									20 _p	126
NB-5									2.50 _p	70
NB-6						30 _p			44	
K-13	W-600×200× 12×19	3000	SN490B	337	364	35R	\square -500×25	370	1.30 _p	83
K-20									20 _p	20
K-30									30 _p	7

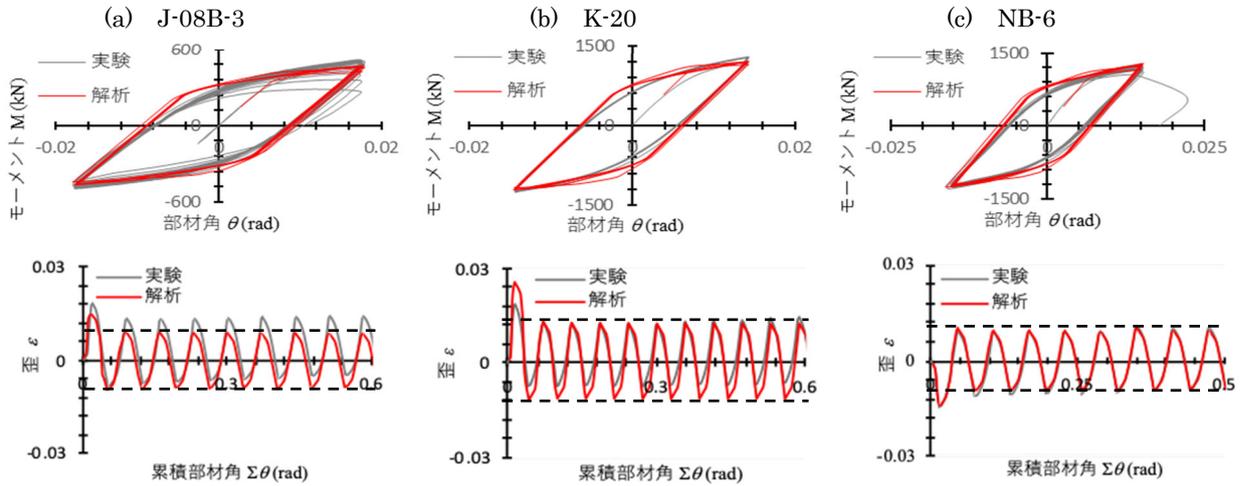


図1 実験と解析結果の比較

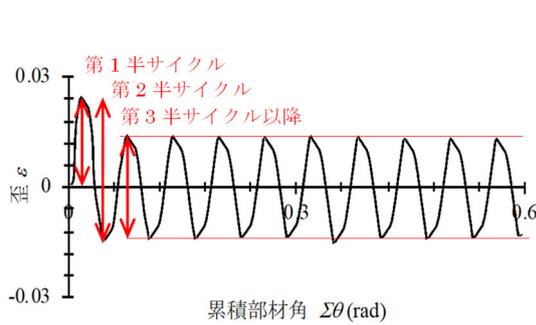


図2 歪振幅半サイクルの定義

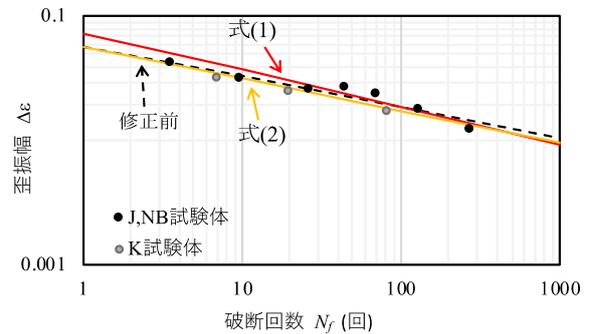


図3 Manson-Coffin 型評価式

4) 歪振幅-破断回数の関係

解析で得られた梁破断箇所の歪履歴の例として NB-6 試験体を図 2 に示す(最初の 10 サイクル)。本研究ではより精度を上げるために、歪振幅の定義を最初の半サイクル、第 2 半サイクル、第 3 半サイクル以降の 3 種類に分類して破断箇所の歪振幅を定義する。本研究では Miner 則によって求まる D 値のばらつきと誤差が少なくなるように D 値の平均値が 1 になり、かつ D 値の標準偏差が最小になるような式を逆算によって求める。求めた 35R+10R のスカラップを設けた接合部に用いることのできる式を式(1)に、R35 のスカラップを設けた接合部に用いることのできる式を式(2)に示す(図 3)。

$$35R+10R \text{ スカラップ: } N_f = 1.9 \times 10^{-4} \Delta \epsilon^{-3.3} (0.0109 \leq \Delta \epsilon \leq 0.0528) \quad (1)$$

$$R35 \text{ スカラップ: } N_f = 1.15 \times 10^{-5} \Delta \epsilon^{-3.9} (0.0173 \leq \Delta \epsilon \leq 0.05) \quad (2)$$

(2) 柱梁接合部の繰返し载荷実験

次に、作成した評価式の汎用性を確認するためにランダムな载荷を受ける改良型 35R+10R スカラップを有する鋼構造柱梁接合部の静的载荷実験を行い、式(1)と Miner 則によって柱梁接合部の塑性変形能力を評価する。

1) 試験体とセットアップ

本実験で対象とする試験体は SN400B を鋼材とした RH-500×200×10×16 の梁、BCR295 材角形鋼管 400×400×12 をスカラップ形式で接合された柱梁試験体(全 2 体)とする。スカラップについては両試験体で 35R+R10 の改良型スカラップを用いる。実験セットアップを図 4 に示す。試験体は梁材を鉛直に、柱材を水平に設置し、オイルジャッキによって梁自由端を加力する。そして、柱治具とスクリージャッキを通して反力をとる。又、加力治具上部に取り付けた板ピンと試験体中央付近に設置した横補剛によって横座屈防止を図った。

2) 载荷履歴

本研究では、鉄骨ラーメン骨組の応答解析⁹⁾の結果を用いて連続地震動を模擬したランダムな载荷履歴を作成する。解析モデルは 3 層の無限均等ラーメンで梁スパン 4m、階高 3.5m、各層の重量は 400kN である。又、各部材の断面は試験体と同様である。入力地震動には表 2 に示すように前震、本震、余震を連続に入力したものを 1 セットとし、計 2 セットの応答解析を行う。解析で得られた梁端変形の中で最も応答が大きい梁の変形履歴から弾性範囲を取り除くことで柱梁接合部の载荷履歴を作成した。作成した载荷履歴を図 5 に示す。

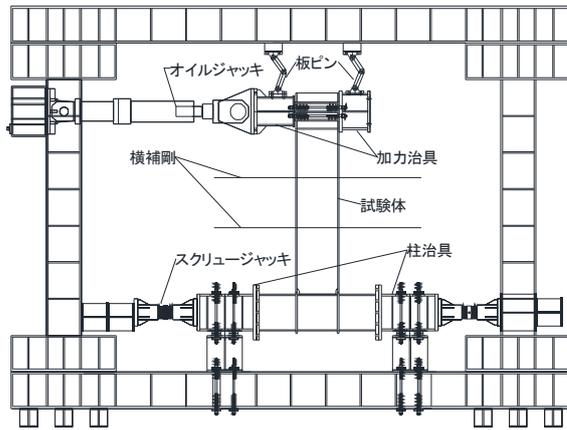


図4 実験セットアップ

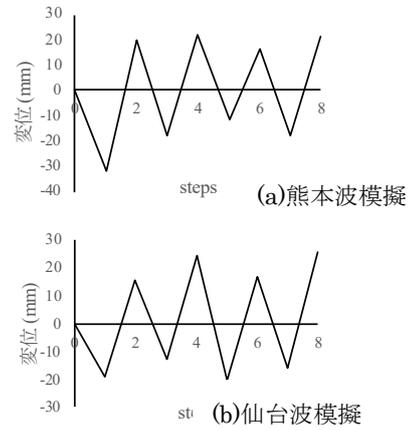


図5 実験載荷履歴

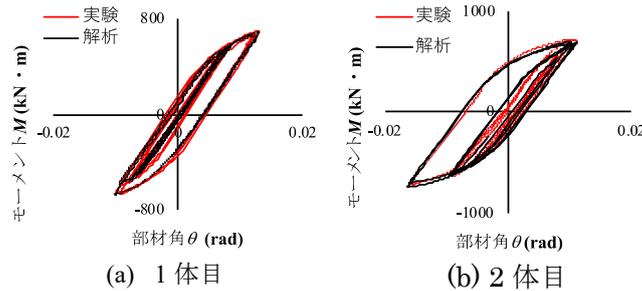


図6 荷重-変形関係の比較

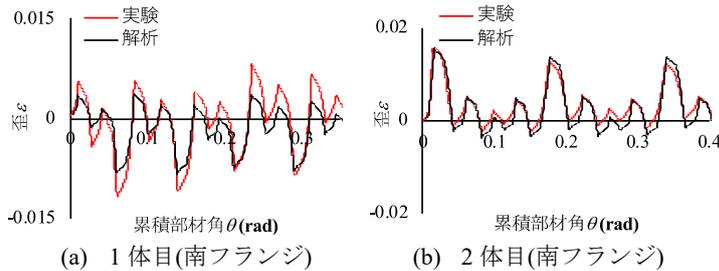


図7 歪履歴の比較

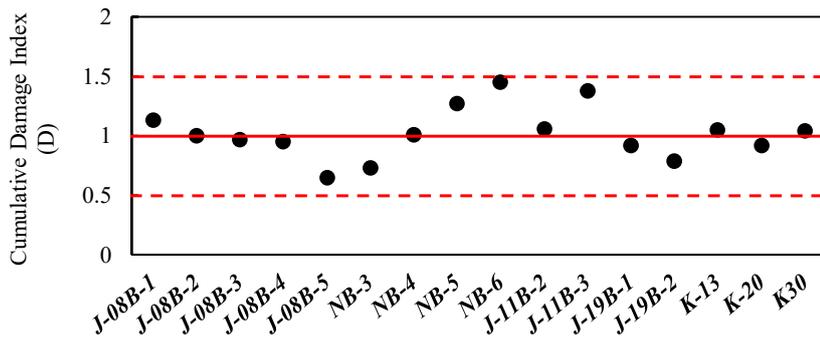


図8 全試験体の累積損傷値 (D 値)

3) 実験結果

熊本波を模した載荷履歴(a)で加力した試験体は、16セット5サイクル目で南フランジ内側スカラップ底及び溶接止端部に亀裂が確認され、27セット5サイクル目で南側フランジ溶接部に近いところにおいて延性破断した。仙台波を模した載荷履歴(b)で加力した試験体は10セット4サイクル目で北側フランジ内側スカラップ底と溶接止端部に亀裂が確認され、19セット2サイクル目で北側フランジ溶接止端部からスカラップ底にかけて亀裂が進展し、延性破断した。図6にモーメント-部材角関係、図7に1載荷セットにおける歪履歴の比較を示す。図6、7より、解析値は概ね実験を追跡できていることが確認できた。

4. 研究成果

(1) 塑性変形能力評価

各試験体の面内解析を行い、式(1)によって柱梁接合部の塑性変形能力評価を行う。まず解析の妥当性を確認する為に、実験で得たモーメント-部材角関係と、歪ゲージを貼り付けた断面の歪履歴を解析値と比較する。

解析で求めた歪履歴より各サイクルの歪振幅を求め、提案した式(1)及び Miner 則によって試験体が破断するまでの D 値を算出する。1 体目 (J-19B-1) の値は 0.66、2 体目 (J-19B-2) の値は 0.78 となり、両試験体の D 値が概ね 1 付近で試験体が破断していることが確認できた。以上より提案した評価方法の精度が確認できた。本実験の試験体を含めたデータベースにおいて、全試験体の累積損傷値 D の値を図 8 に示す。対象とする試験体全てがおおよそ 0.65~1.45 のばらつきになっており、許容範囲内の誤差を示している。本研究で提案した評価式によって塑性変形能力を十分評価できていることが確認できた。

(2) 結論

耐震設計において、梁-柱接合部の塑性変形能力は、骨組の耐震能力に大きな影響を与えることが知られている。これまでの研究では、部材の実験と解析に基づく接合部の損傷評価法が多数提案された。よく使われている構造用鋼について、Manson-Coffin 型疲労評価式が報告されている。本研究では、400 N/mm²クラスの溶接柱梁接合部を対象に、危険断面の平均フランジ歪振幅と破壊までの繰返しサイクル数の間に Manson-Coffin 関係が存在するかを検討する。このため、R35+R10 または R35 スカラップを持つ 10 つの柱梁接合部の実験データベースを用いて、繰返し面内解析を行い、延性破壊が発生するまで梁端フランジの歪履歴を得た。解析結果から、接合部が一定変位振幅で繰返し载荷を受ける場合、接合部の危険断面における歪履歴に基づき、材料レベルと同様に、破断面フランジの平均歪振幅と破壊までの繰返し回数に Manson-Coffin 型関係が存在することが確認された。さらに、R35+R10 スカラップを持つ 2 体の柱梁接合部試験体に対してランダムな繰返し载荷を行い、提案された方程式の妥当性を確認した。Miner の法則と提案された Manson-Coffin 式を用いて、16 体試験体の累積損傷値は 0.65~1.45 の範囲内にあることがわかった。本研究の結果より、歪振幅に着目することで、ランダムな载荷履歴を受ける鋼構造柱梁接合部の塑性変形能力を、解析と限られた数の実験より評価できることが確認出来た。

[参考文献]

- 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, pp.241-250, 2019
- 2) 小野徹郎、加古康也、佐藤篤司、岩田衛：金属系素材の低サイクル疲労特性に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第 532 号，pp.193-199，2000.6
- 3) 加藤勉、秋山宏、内田直樹：鋼構造部材の耐力（その 1），日本建築学会論文報告集第 119 号 pp.22-30,1966.1
- 4) 山田稔、坂恵一己、田所敏幸、白川潔：軸圧を受ける H 型断面鋼柱の弾塑性曲げ変形性状に関する研究(I：一方载荷時における曲げモーメント曲率関係並びに曲げ変形性状)、日本建築学会論文報告集第 127 号,PP8-14,1966.9
- 5) S. Yamada, Y. Jiao. A concise hysteretic model of structural steel considering the Bauschinger effect. *Int. J. Steel Struct.* 16 (2016) 671–683.
- 6) Randy Tenderan, Ishida Takanori, Yu Jiao, Satoshi Yamada: Seismic Performance of Ductile Steel Moment-Resisting Frames Subjected to Multiple Strong Ground Motions, *Earthquake spectra*, Vol.35, pp.289-310

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yu Jiao, Satoshi Yamada	4. 巻 41
2. 論文標題 Cumulative deformation capacity of structural steel subjected to extremely large amplitude strain histories	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Building Engineering	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jobe.2021.102649	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 近野 裕樹、焦 瑜、山田 哲	4. 巻 28
2. 論文標題 ランダム載荷を受けるスカラップを有する 鋼構造柱梁接合部の塑性変形能力評価	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 鋼構造年次論文報告集	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 近野 裕樹、焦 瑜、山田 哲	4. 巻 27
2. 論文標題 歪履歴に着目した鋼構造柱梁接合部の塑性変形能力評価	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 鋼構造年次論文報告集	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件／うち国際学会 5件）

1. 発表者名 焦瑜
2. 発表標題 小振幅繰返し載荷を受けるスカラップを有する鉄骨梁の限界性能 その3 亀裂長さ と残存耐力の関係
3. 学会等名 日本建築学会年度大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 北村莉菜
2. 発表標題 スカラップを有する鋼構造柱梁接合部の塑性変形能力評価 その1評価式の修正
3. 学会等名 2020年度日本建築学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 近野裕樹
2. 発表標題 スカラップを有する鋼構造柱梁接合部の塑性変形能力評価 その2柱梁接合部の繰り返し載荷実験
3. 学会等名 2020年度日本建築学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 近野裕樹
2. 発表標題 ランダム載荷を受けるスカラップを有する鋼構造柱梁接合部の塑性変形能力
3. 学会等名 2019年度日本建築学会関東支部研究報告会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 近野裕樹
2. 発表標題 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
3. 学会等名 2019年度日本建築学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 焦瑜
2. 発表標題 Study on cumulative deformation capacity of steel beam-to-column connections based on numerical analysis
3. 学会等名 10th International Symposium on Steel Structures (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 焦瑜
2. 発表標題 EVALUATION OF PLASTIC DEFORMATION CAPACITY OF STEEL BEAM-TO-COLUMN CONNECTIONS BASED ON FLANGE STRAIN AMPLITUDES
3. 学会等名 12th Pacific Structural Steel Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yu Jiao, Satoshi Yamada
2. 発表標題 Low Cycle Fatigue Behaviour of Structural Steel in the Form of Modified Manson-Coffin Equation
3. 学会等名 12th International Fatigue Congress (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yu Jiao, Satoshi Yamada
2. 発表標題 LOADING PROTOCOLS FOR STEEL BEAM TESTS IN SEISMIC PERFORMANCE EVALUATION
3. 学会等名 Eleventh U.S. National Conference on Earthquake Engineering (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 焦瑜, 吉敷祥一, 山田哲, 三木徳人, 長谷川隆
2. 発表標題 繰り返し載荷を受ける梁端フランジの亀裂長さと耐力低下の関係
3. 学会等名 2018年度鋼構造シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yu Jiao, Satoshi Yamada
2. 発表標題 LOADING PROTOCOLS FOR STEEL BEAM TESTS IN SEISMIC PERFORMANCE EVALUATION
3. 学会等名 Eleventh U.S. National Conference on Earthquake Engineering (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関