

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 17 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06629

研究課題名(和文) 溶接継手の疲労性能に基づく建築鉄骨架構の多数回繰り返し载荷下での構造信頼性評価

研究課題名(英文) Structural reliability assessment of high-rise steel buildings on the basis of low-cycle fatigue performance of welded joints

研究代表者

原田 幸博 (Harada, Yukihiko)

千葉大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：10272791

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：溶接継手の低サイクル疲労性能の既往研究調査を行い、一定振幅低サイクル疲労での破断サイクル数と変動振幅下での累積損傷度は概ね対数正規分布に従い変動係数は10%と30%程度であることがわかった。せん断ひずみ下での溶接継手の低サイクル疲労試験を実施し、せん断ひずみを等価な直ひずみに変換すれば直ひずみ下での疲労曲線からせん断ひずみ下での疲労性能が評価できることがわかった。梁端をファイバー要素でモデル化した骨組構造の地震応答解析結果と有限要素解析で得た梁端部フランジのマクロレベルひずみ-鉄骨梁端のhot-spotの局所ひずみ関係を組み合わせ、鉄骨架構の梁端ごとの疲労破壊確率を算出する手法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、溶接継手レベルの低サイクル疲労性能と数値シミュレーション(有限要素解析・骨組応答解析)を組み合わせることで鉄骨架構内の全ての梁端での疲労破壊発生確率を推定する手法を提示した。同手法の最大の利点は、必要な実験データが溶接継手レベルの低サイクル疲労性能のみで、部材・架構レベルでの大規模な構造実験が不要なことである。さらに、数値シミュレーション部分の精緻化によってさらなる高精度の信頼性評価ができる拡張性の高さも同手法の特色である。本研究の手法によって梁端ごとの破壊確率を得られれば、高層鉄骨架構の合理的な補強方法の検討に活用することができるだろう。

研究成果の概要(英文)：According to a previous research review on low-cycle fatigue performance of steel structures, it was found that the low-cycle fatigue lives under constant amplitude and the cumulative damage indices under variable amplitudes were log-normally distributed and that their coefficients of variation were approximately 10% and 30%, respectively. The low-cycle fatigue tests of the welded joints under shear strain were conducted, and the results revealed that the fatigue performance under shear could be evaluated from the fatigue curve under normal strain by converting the shear strain to an equivalent normal strain. The assessment method of fatigue failure probabilities of beam-ends in steel building structures was proposed, by combining the seismic response analysis of the frame model with fiber elements and the finite element analysis of 3D solid models of beam-end portions, which provided the relation between macro and local strain (fiber element's and hot-spot strain) at the beam-end.

研究分野：建築鋼構造

キーワード：建築構造・材料 鋼構造 低サイクル疲労

# 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

近年、国土交通省建築基準整備促進事業(以下、基整促)で長周期地震動を想定した多数回の繰り返し荷重を受ける鉄骨造建築物の安全性に関する一連の研究が進められ、多数回繰り返し載荷時の安全性検証法が提案されている(図1)。この安全性検証法の流れは、

- (A) 鉄骨部分架構や部材の(塑性化を伴う)多数回の繰り返し載荷実験結果に基づいて、部材または架構の塑性率振幅-破壊サイクル数関係( $\mu$ - $N$ 曲線)を求め
- (B) 架構モデルの地震応答解析結果から累積疲労損傷比を算定し、その値から鉄骨架構の破壊が起こるかどうかを判定する

というものである。この検証法の流れは、一般的な構造物の疲労照査の流れと同様で、妥当なものである。その一方で、さらなる検討が必要と申請者が考える点は、

- (A) 実験結果のばらつきが大きい割に、参照する実験結果の数が少なすぎる
- (B) 破壊発生判定の指標とする累積疲労損傷比の境界値が小さすぎる(安全側すぎる)

の二点である。実際、繰り返し変形が柱梁接合部の変形能力に及ぼす影響についての研究は多数あるが、長周期地震動下で想定される数百サイクルに及ぶ多数回の小振幅繰り返し載荷履歴を用いた実験研究は、基整促によるものを含めても多くない。これは参照できる実験結果が少ないことに原因があり、解決するにはより多くの実験結果を参照して確率・統計的な議論を行う必要がある。しかし、部分架構の繰り返し載荷実験をさらに多数実施することは、時間と費用の面から現実的ではない。そこで、申請者は、架構中の溶接継手のみに着目し、溶接継手の多数回繰り返し載荷時の性能(低サイクル疲労性能、 $\varepsilon$ - $N$ 曲線)から架構全体の性能を推定する手法を提案したい。

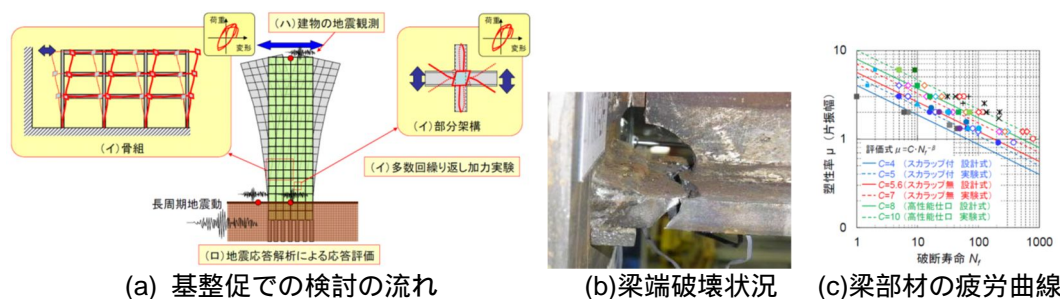


図1 基整促での検討の流れ

(長谷川 他: 長周期地震動に対する超高層鉄骨造建築物の耐震安全性に関する検討, 建築研究資料, No. 160 より)

## 2. 研究の目的

本研究課題では、溶接継手の低サイクル疲労性能(ひずみ振幅 $\varepsilon_a$ -破壊サイクル数  $N_f$ 曲線)から鉄骨架構全体の多数回繰り返し載荷下での保有性能を推定する手法を具体的に提示することを目指す(図2)。提案手法の特色は、部材・架構実験を経ずに継手実験結果と数値シミュレーションを組み合わせることで、鉄骨架構の低サイクル疲労性能をそのばらつきも含めて評価できることである。

## 3. 研究の方法

### (1) 溶接継手の低サイクル疲労性能の統計的性質についての分析

(材料レベルの)低サイクル疲労曲線については、平滑試験片を用いた材料レベルの低サイクル疲労試験結果は豊富だが、その統計的性質を論じたものは少ない。まとまった知見を述べているものの一つとして、飯田・井上「低サイクル疲労寿命の分布形状に基づいた疲労設計曲線の一考察」(日本造船学会論文集, Vol. 1973, No. 133, 235-247, 1973)が挙げられる。同論文では、砂時計形の多数の丸棒試験片を用いた一連の低サイクル試験結果の統計的性質を論じている。破断サイクル数  $N_f$ の分布は(既往研究結果と同様に)対数正規分布・Weibull分布が良くあてはまること、対数正規分布へのあてはめが(疲労曲線が両対数グラフ上にプロットされることから)最も好都合と指摘している( $N=10$ 程度の短寿命の場合には分布形の決定が困難と指摘)。  $N_f$ 基準での変動係数は9-16%で、高サイクル疲労性能のそれよりはるかに小さいと述べている。

継手・部材レベルの低サイクル疲労性能のばらつきを論じた既往研究はさらに少なく、後藤他「構造用鋼材の塑性疲労破壊に関する確率統計的考察」(京大防災研究所年報, 第18号B, 377-393, 昭和50年4月)が唯一と言える。同研究では、多数のH形鋼梁の変動振幅繰り返し三点曲げ試験を実施し、破断サイクル数  $N_f$ と破断時の(線形累積損傷則による)累積損傷度  $D$ のばらつきを調べている。その結果、  $N_f$ の変動係数が7-13%と(素材レベルの結果と同様に)比較的小さいが、  $D$ の変動係数は8-31%と大きい。  $D$ の変動係数が大きい理由として、一部試験体で発生した局部座屈の影響があると述べている。

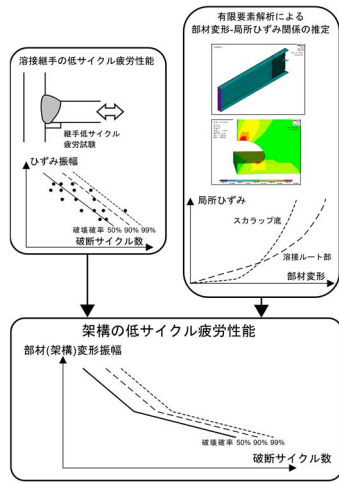


図2 架橋の低サイクル疲労性能検証の概要

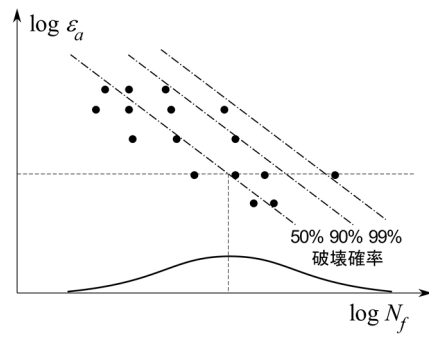


図3 対数正規分布を仮定した確率疲労曲線

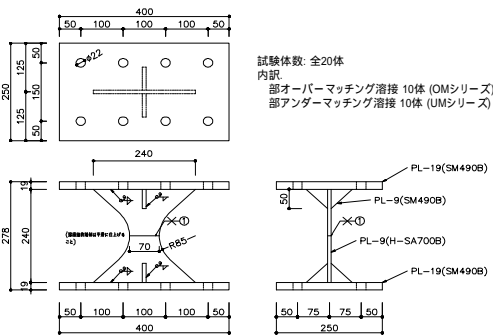
## (2) 鋼管柱シーム溶接の低サイクル疲労特性の解明

低サイクル疲労破壊の起点となる可能性のある溶接継手のうち、繰返しせん断応力が作用する鋼管柱のシーム溶接は、その疲労性能に関する知見は整備されていない。そこで、鋼管柱に現れるシーム溶接継手のせん断応力下での低サイクル疲労試験を実施した。

低サイクル疲労試験に用いた継手試験体は建築用高強度鋼材 H-SA700(t=9)を用いた鋼管柱のシーム溶接を想定した溶接継手を含む(図 4a)。溶接部は母材に対してオーバーマッチ(OM)またはアンダーマッチ(UM)となるよう溶接条件を設定し、各 10 体製作した。この試験体に繰返しせん断力を作用させひずみ制御低サイクル疲労試験を実施した(図 4b)。与えるせん断ひずみ振幅は一定両振りで、振幅は 3.46%、2.60%、1.73%、1.30% ( $= 2.0 \times \sqrt{3}$ 、 $1.5 \times \sqrt{3}$ 、 $1.0 \times \sqrt{3}$ 、 $0.75 \times \sqrt{3}$ ) の 4 種類とした。与えるひずみ振幅は、溶接部近傍の母材部の表・裏面に貼付した 3 軸ひずみゲージから得られる最大せん断ひずみの平均値を参照し、振幅の制御は試験機変位で行った。

試験体の破壊状況は、ひずみ振幅の大小によらず、いずれの試験体においても、余盛の溶接止端部からき裂が発生して、やがて全断面破断に至った(図 4c)。図 4d に、低サイクル疲労試験で得られた荷重-試験機変位関係と荷重-平均ひずみ関係の一例を示す。载荷の制御は、初载荷時に得られたひずみの計測値が所定のひずみ振幅に達するときの試験機変位によって行った。よって試験機変位の折り返し時の変位は概ね一定だが、ひずみゲージで計測されるひずみの全平均値は载荷が進むにつれて一方向にわずがずつシフトしている。これは、既往の引張・圧縮低サイクル疲労試験でも見られた現象である。

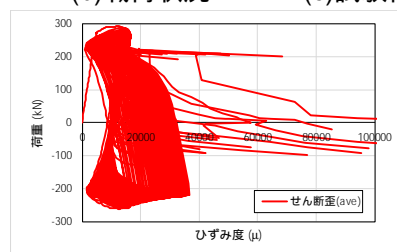
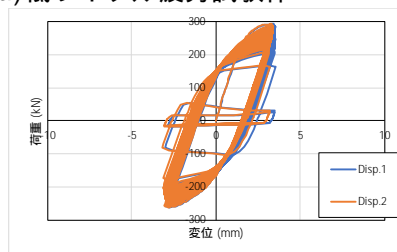
本せん断低サイクル疲労試験結果と既往の引張・圧縮低サイクル疲労試験結果をひずみ振幅-破断サイクル数  $N_f$  関係図上にプロットして比較すると(図 4e、せん断低サイクル疲労試験におけるせん断ひずみ振幅は $\sqrt{3}$ で除して等価な直ひずみに換算した)、ばらつきは大きいものの、両者は概ね対応していることがわかった。そして、既往の引張・圧縮試験結果と同様に、UM 継手の  $N_f$  が OM 継手の  $N_f$  より小さくなる傾向が見られた。



(a) 低サイクル疲労試験体

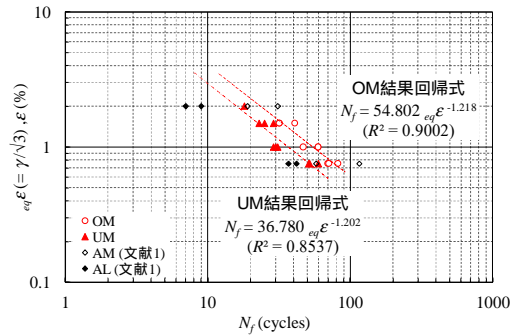
(b) 载荷状況

(c) 試験体の破壊状況



(d) 荷重-せん断変形・せん断ひずみ関係





(e)一定振幅低サイクル疲労試験結果  
 図4 鋼管シーム溶接部のせん断低サイクル疲労試験

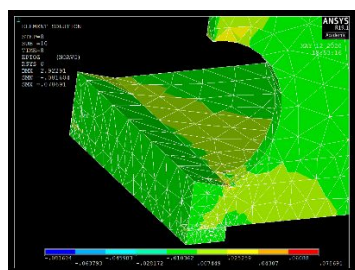
(3) 高層建築鉄骨架構の地震動下での低サイクル疲労破壊に関する信頼性評価法の提案

前述の図2に示した鉄骨架構の低サイクル疲労性能検証を行うにあたり、鉄骨梁端溶接部の幾何学的形状を比較的詳細に表現した解析モデルを用いた有限要素解析を実施した。これは、ファイバー要素を用いた骨組モデルの地震応答解析から得られる梁端部のマクロひずみ(ファイバーの応答ひずみ)と疲労破壊の起点(hot-spot)となり得る溶接止端縁の局所的なひずみを結びつける情報を得ることが目的である。

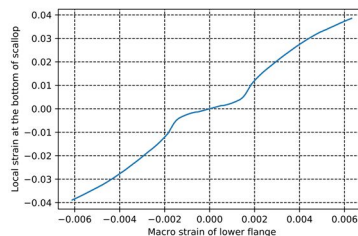
図5に、鉄骨梁端の有限要素解析の一例を示す(BH-850×250×16×22, SN490, 現場溶接ディテール, 梁下フランジ)。梁端ディテールは、高層鉄骨造建物で一般的な現場溶接型を仮定し、梁下フランジの下側に裏当て金を配するレ形開先の完全溶込み溶接として形状を決めて有限要素モデルを作成した(図5a)。解析には汎用有限要素解析ソフトウェアANSYSを用いた。梁端のhot-spotとしてはスカラップ底部と溶接ルート部の二通りが考えられるが、この例の場合はスカラップ底部の方が(梁部材の変形レベルによらず)局所ひずみが大きく(図5a)、検討を要するhot-spotがスカラップ底部となることが確認できた。梁端フランジのマクロひずみは、塑性ヒンジ想定部の長さの変化量から算出できる塑性ヒンジ想定部全体にわたる平均的なひずみとした。ここで、マクロひずみ算定に用いる塑性ヒンジ想定部長さは梁フランジ全幅と仮定した。

上述の有限要素解析結果から得られた梁端マクロひずみ・hot-spot局所ひずみ関係を用い、架構全体の低サイクル疲労破壊に対する安全性検証を行った。具体的には、基盤報告で検証例として用いられた30層6×4スパンの建築鉄骨架構モデルS30に準じた架構モデルを対象とし、疑似立体モデルの地震応答解析を行った。本検証の架構モデルでは、梁端部のひずみ応答を直接的に得るため、梁端塑性ヒンジ部をファイバー要素とした。このことは演算時間の増大につながるが、hot-spot局所ひずみを直接的に評価する上で不可欠である。梁部材はスラブ付き合成梁(スラブ厚180mm)、柱梁接合部パネルゾーンは剛とした。架構の一次固有周期は2.96秒である。応答解析の入力に用いた長周期地震動は、2011年3月11日東北地方太平洋沖地震のTKY07(新宿)記録NS成分の原波を用いた(継続時間300秒, 最大加速度192gal)。減衰は剛性比例型で減衰定数2%とした。解析には非線形動的応答解析プログラムTDAP IIIを用いた。

低サイクル疲労性能評価に用いる素材レベルの疲労曲線は、小野らによる切り欠き付き丸棒を用いた素材レベルの低サイクル疲労試験結果の回帰結果とした(小野他「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, No.532, Vol. 65, 193-199, 2000), 図6a)。地震応答解析で得られた梁端下フランジファイバーのひずみ応答から、上述のマクロ・局所ひずみ関係を介してhot-spotのひずみ応答が得られる。図6bに、架構中で最大の累積損傷度 $D=0.172$ を示した梁端でのスカラップ底部の局所ひずみの時刻歴を例として示す。ここで、架構中の全ての梁端の $D$ ならびに破壊規範 $D=1$ が、実応答値ならびに1を平均とする対数正規分布に従うと仮定すると、各梁端での疲労破壊確率 $P_f$ を算出できる。 $D$ の応答値が変動係数15%、破壊規範 $D=1$ が変動係数30%の対数正規分布に従うとして各梁端の疲労破壊確率を算出した結果を図6cに示す。 $P_f$ が大きい梁端は最下層に多いが、中央付近とそれより上層にも分布していることがわかる。

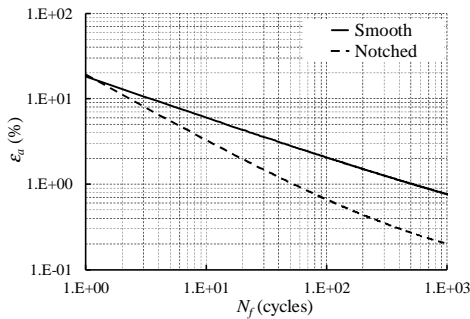


(a)有限要素解析結果の例

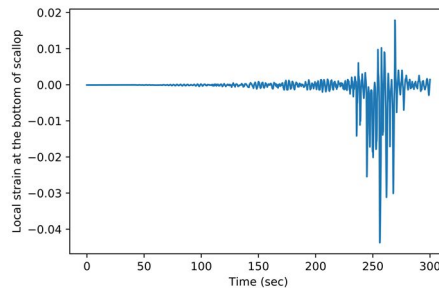


(b)梁端下フランジのマクロひずみ—スカラップ底部の局所ひずみ関係

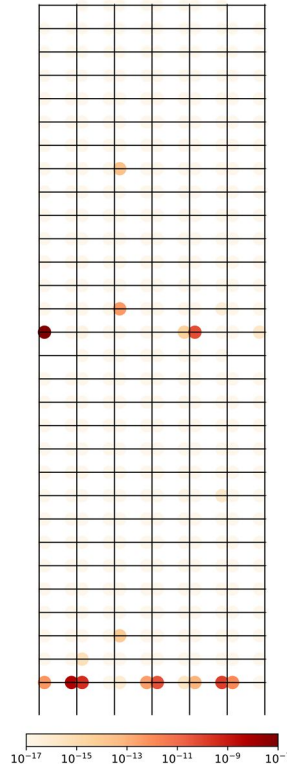
図5 有限要素解析による hot-spot ひずみ評価



(a)き裂付き丸棒試験片の疲労曲線



(b)梁端下フランジのスカロップ底部での局所ひずみ時刻歴の例 (外周架構, 第17層, 最左梁端,  $D = 0.172$ )



(c)梁端の低サイクル疲労破壊確率の分布の例(外周架構, 架構中の最大値  $P_f = 7.95 \times 10^{-8}$ )

図6 長周期地震動下での高層建築鉄骨架構の梁端における破壊確率評価

#### 4. 研究成果

・溶接継手の低サイクル疲労について、特にその統計的性質に着目した既往研究の調査を行った。その結果、一定ひずみ振幅低サイクル疲労性能(破断サイクル数)は概ね対数正規分布に従い、その変動係数は10%程度であることがわかった。変動振幅下での疲労性能を累積損傷度として評価すると、その変動係数はやや大きく30%程度であることがわかった。

・繰り返しせん断ひずみ下での溶接継手の低サイクル疲労試験を実施し、既往研究がほとんどない鋼管柱のシーム溶接の低サイクル疲労性能検証に活用できる知見を得た。その結果、せん断ひずみを等価な直ひずみに変換することで、既往の繰り返し直ひずみ下での疲労曲線からせん断ひずみ下での疲労性能が評価できることがわかった。

・梁端の塑性ヒンジ部をファイバー要素でモデル化し、有限要素解析で得られる梁端部フランジのマクロレベルのひずみ - 鉄骨梁端の溶接継手近傍の hot-spot の局所ひずみ関係を組み合わせることで、梁下フランジ hot-spot の局所ひずみを推定する手法を提案した。同手法によって、骨組モデルの地震応答解析結果から梁端部での低サイクル疲労破壊の発生確率を具体的に算出できることを示した。このように梁端ごとの破壊確率を得ることは、高層鉄骨架構の合理的な補強方法の検討に活用できるだろう。

本研究で提示した鉄骨架構の低サイクル疲労破壊に関する信頼性評価フローは、各段階でさらなる精緻化が可能である。例えば、低サイクル疲労試験結果の充実による疲労性能の統計的性質の更新、梁端のファイバー要素に梁フランジの局部座屈発生の影響を反映させること、多様な梁端溶接ディテールに対応した有限要素モデルの作成、などが可能である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 原田 幸博, 村上 行夫
2. 発表標題 建築構造用高強度鋼材H-SA700 の完全溶込み溶接部のせん断低サイクル疲労試験
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2019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
--	---------------------------	-----------------------	----