

繰返し大ひずみを受けた鉄骨構造溶接継手の実働応力疲労 Actual Stress Fatigue of Welded Joint of a Steel Structure Subjected to Large Cyclic Strain

奥屋 和彦, 山浦 真一

Kazuhiko Okuya and Shin-ichi Yamaura

Earthquakes sometimes give damages to steel structures. The structures which have not been seriously damaged are still used after an earthquake. The fatigue strength of these structures, however, might have been decreased due to the cyclic loads during an earthquake. In order to clarify the effect of seismic loading on the fatigue strength of the welded joint of a steel structure, varying loading fatigue test of welded joint after large straining was performed. However, few researches have been done on the residual fatigue strength after large strain cycling which enters into gross plasticity. The objective of this study is to clarify the integrity evaluation method of steel structures which experienced seismic loading. The varying loading fatigue test of a welded joint which had been subjected to a large cyclic strain as a simulation of a seismic loading was conducted and the residual fatigue strength was investigated.

Key Words: Welded Joint, Earthquake, Actual Stress Fatigue, Cyclic Strain, Fatigue Strength, Fatigue Limit

1. はじめに

地震の多い我が国では、長期間にわたって使用されている鉄骨構造物に地震の影響を受けて倒壊する被害がみられることがある^[1~5]。気象庁の地震情報によると、国土面積は全世界の0.25%と狭いがM6以上の大きな地震の発生回数は世界中の地震の20%を占めている。2011年3月に発生した東北地方太平洋沖地震および、その後の余震によって引き起こされた大規模地震被害や、2016年4月に発生した熊本地震においても構造物に多大な被害が生じている。

熊本地震では気象庁震度階級において最も大きい震度7を観測する地震が2回発生したほか最大震度が6強の地震が2回、6弱の地震が3回発生している。さらに一連の地震回数においてM3.5以上は内陸型地震では1995年以降で最多となっており、地震活動は、全体として引き続き減衰しつつも活動は継続している。

図1、図2は、兵庫県南部地震において被害を受けた直後に撮影した鉄骨構造物である。鉄骨構造物に損傷が生じると鉄骨構造躯体、接合部、二次部材等が調査される。兵庫県南部地震被害報告書によると大型地震による極低サイクル疲労を受けて倒壊した例が報告されている^[1~5]。倒壊の原因は部材ではなく応力集中の生じる溶接止端部に生じるケースが報告されている。

鉄骨構造接合部の構造安全性について溶接継手の疲労に関する研究^[6~8]が行われているが地震を経験した溶接継手部の疲労に対する安全性は重要である。これまで行った

研究^[9~10]で、地震時の繰返し大ひずみ負荷によって微小き裂が発生すると、鋼構造溶接継手の疲労限度は竣工時



図1 崩壊した構造物（兵庫県南部地震）



図2 崩落した外装仕上げ材（兵庫県南部地震）

点よりも著しく低下することを明らかにした。これに加えて、鉄骨構造物においては供用中に応力が頻繁に変動する実働応力を受ける。実働応力下の疲労の場合には疲労限度以下の応力も疲労損傷に寄与するので、地震後も継続使用される鉄骨構造物に対する健全性評価が必要である。

地震に対する現行の溶接継手部の基準・指針^[11~12]の大部分は、建設される鉄骨構造物に対して安全性を確保するための設計・製作・施工が示されている。基準に従って製作や施工された鉄骨構造物は大型地震を受けた場合、最悪なケースでも倒壊は防止できるが、地震による損傷に対して適切な判断を示している指針は少ない。大型地震による倒壊の主な原因は応力集中が生じる個所の溶接継手に存在していることが多くの調査結果に示されているが、損傷や地震後の余寿命を適切に予測したうえで対策を講じる方法を示している指針も少ない。

本研究では、鉄骨構造溶接継手に対して地震のような低サイクル疲労を想定した大ひずみを繰返し負荷して初期き裂を発生させた試験片に対して、その後も継続供用を模擬した疲労限度をはさむ2段多重変動応力を負荷する疲労試験を行い、変動応力によって疲労限度以下でも破損するかどうか検討する。

2. 地震時の変動ひずみ頻度分布

溶接継手部の疲労強度を評価するには作用する応力の値を採取する必要がある。応力を採取する方法には外力や加速度を計測して応力を解析によって求めたり、あるいは直接対象部位にひずみゲージを貼付して測定する。地震を受けた溶接継手部は一定振幅のひずみ波形ではなく極めて複雑な波形のひずみが負荷され、かつその最大のひずみは降伏点を超える繰返し大ひずみを発生していることが予測される。

溶接継手部の疲労寿命は疲労強度と溶接継手部が受けるひずみ範囲の各成分とそれに対応する繰返し回数によって決定される。地震時のひずみ挙動を調べるために、大地震を模擬した地震波形を大型振動装置に入力した後、波形データに等しい加速度応答を一軸方向の制御点において再現させ試験片に変位負荷を与えた。負荷は、試験片に貼付けた塑性ひずみゲージのひずみのピーク値が1%のひずみを生じるように設定して行った。地震のようなたえずひずみ振幅の変わる変動荷重を両振り波形に置き換えて波形カウント法を用いて変動ひずみ頻度分布解析を行った。

疲労被害のカウント法には、レインフロー法、ピーク法、レンジペア法など種々の方法が提案されている。本研究では、最大・最小・振幅値を適切に評価しているレインフロー法によるカウント法を用いた。レインフロー法を用いて解析した場合、時刻暦変動からひずみ振幅および繰返し数を算出することができる。図3に1923年に発生した関東大地震の模擬波形を用いて地震を受けた溶接継手部のひずみ波形の一例、図4に、関東大地震波形を基にピークひずみを1%に調整したひずみ波形の頻度分布解析

の結果の一例を示す。

我が国では地震が多発しているが、ひずみ頻度情報より大型地震によって倒壊に至るような降伏点を大きく超えるような繰返し大ひずみの極低サイクル疲労や降伏点以下のひずみ成分、疲労限度を下回るような高サイクル疲労の小さなひずみ成分を含んでいることがわかる。

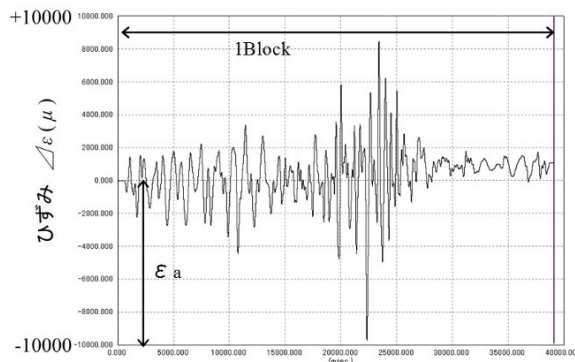


図3 地震を模擬した疲労試験のひずみ波形
(関東大地震のデータを基に最大ひずみの値を1%に調整した例)

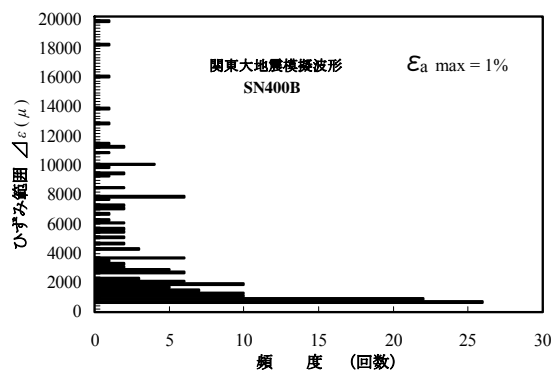


図4 関東大地震波形を基にピークひずみを1%に調整したひずみ波形の頻度分布 (レインフロー法)

鉄骨構造の地震被害の大部分は、柱梁仕口部、柱脚、柱、ブレースに生じている。柱梁仕口溶接継手部やブレース端部溶接継手部などには、最大応力が生じ塑性域に達することもある。溶接継手は、このような応力を伝達する役割を担っている。鉄骨構造の安全性を確保するには、繰返し大ひずみを受け初期き裂が発生した溶接継手の低サイクル疲労に対する評価を行ったうえで管理する必要がある。

3. 供試材

供試材は、鉄骨建築物固有の要求性能を考慮して規格化され鉄骨溶接継手部に多用される建築構造用圧延鋼材^[3](以後、SN400B)を用いた。SN400Bの化学成分を表1に、機械的性質を表2に示す。疲労試験片は、全長400mmで板厚がそれぞれ32mmと12mmの2枚の鋼板を全自動炭酸ガスアーク溶接法にて溶接を行い試験素材とした。

表 1 化学成分 (wt %)

Material	C	Si	Mn	P	S	Ceq
SN400B (12mm)	0.14	0.13	0.71	0.018	0.008	0.27
SN400B (32mm)	0.11	0.24	1.22	0.013	0.003	0.33

表 2 機械的性質

Material (Thickness)	Yield Stress (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)
SN400B (12mm)	288	431	29
SN400B (32mm)	302	440	31

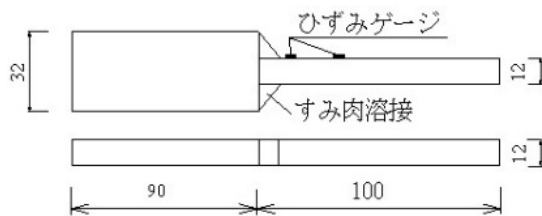


図 5 疲労試験片

溶接は 1 層 1 パス仕上げの両面すみ肉溶接である。溶接後に帯鋸盤で図 5 の形状に切出して試験片とした。SN400B で用いた溶接ワイヤはソリッドワイヤ JIS Z 3312, YGW18, 溶接姿勢は下向き溶接, 溶接電流 300 A, 溶接電圧 31V, 溶接速度 245mm/min, チップ母材間距離 20mm, 炭酸ガス流量 20 l/min, トーチ角 90 度, ワイヤ突出し長さ 15mm の条件で行った。なお, 本研究では疲労試験片はいずれの材料の場合も溶接のままの状態での疲労試験に供した。

4. 疲労試験装置・実験方法

実働応力を模擬した 2 段多重変動応力疲労試験に用いた試験装置を図 6 に示す。これは動電型加振器を駆動源としたもので, コンピューターからの制御プログラムによりアームを介して試験片に変動荷重を与えるもので, 周波数 28Hz で疲労試験を行った。地震により降伏強度を超えるひずみが負荷された状態での強度特性を調べることを目的とするため, 試験片に大きな平均ひずみを与えた上で振幅が変動する応力を与えることとし, 図 7 に示す変動応力波形を用いた。疲労試験時の公称ひずみ測定用にゲージ長 1mm の弾性用ひずみゲージを溶接止端部より 20mm の位置に貼付け, 疲労き裂検出用に溶接止端部より 5mm の位置に 1mm の弾性用ひずみゲージを貼付け, 試験中のき裂深さの変化は目視等による測定が困難なため, 疲労き裂の検出用としてき裂発生箇所の近傍に貼付けたひずみゲージ出力の振幅が, き裂成長とともに応力開放されて低下することを利用したコンプライアンス法を用い

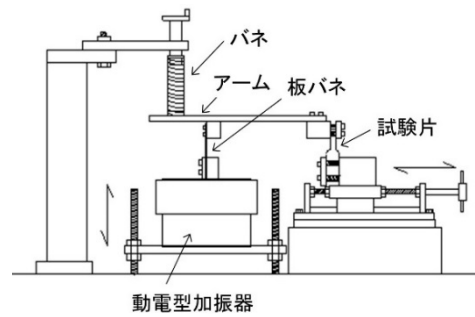


図 6 変動応力波形疲労試験装置

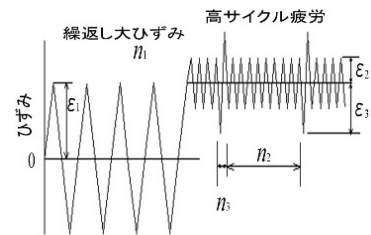


図 7 実働応力疲労試験で用いたひずみ波形

てき裂進展を監視して自動測定した。変動応力疲労試験の疲労き裂発生寿命は, 鋼構造物の非破壊検査 (超音波探傷検査, UT, 浸透探傷検査, PT) の検知能力を考慮して, き裂深さ 1mm になるときの繰返し数とした。試験環境は室温大気中である。

低サイクル疲労試験は大ひずみのみを繰返し負荷する

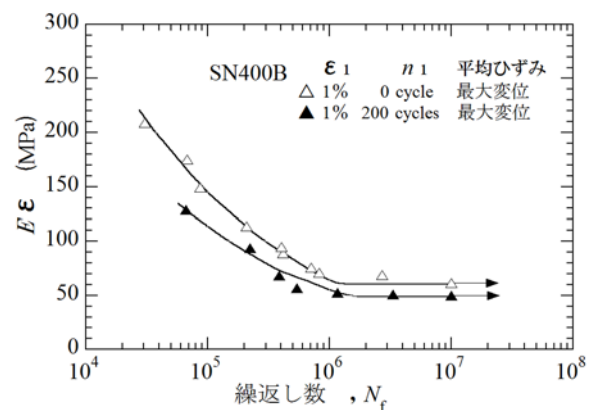
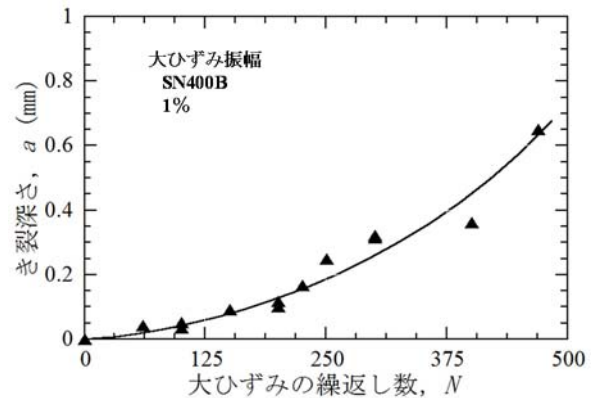


図 9 1%の繰返し大ひずみ負荷後の高サイクル疲労試験の S-N 線図

試験を行った。試験は複数の試験片を用い、1個のプロット点ごとに1本の試験片を用いて実施した。き裂深さは電気炉を用い酸化着色を行い破面開放して光学顕微鏡を用いて破面上で求めたものである。ひずみ振幅1%を200サイクル負荷して疲労き裂成長挙動を求めた試験結果を図8に示す。試験は、約0.1mm深さの予き裂を導入した試験片を用いた。なお、大ひずみの繰返しにより発生させたき裂を本研究では予き裂と呼び、その後の高サイクル疲労で生じたき裂をき裂と呼ぶ。図9に平均ひずみ $\epsilon_m = 1\%$ を与え、その値を平均ひずみとして高サイクル疲労試験を行った結果と、繰返し大ひずみ負荷後に正の平均ひずみを与えて行った高サイクル疲労試験^[9]の結果を示す。実働応力疲労試験で用いたひずみ波形の高レベル応力 E_{ϵ_3} は同じ深さの予き裂試験片の一定振幅疲労限度より若干高い70MPaに設定し、低レベル応力 E_{ϵ_2} を疲労限度以下の領域で複数のレベルに設定した。高レベル応力の繰返し数は $n_3 = 1$ とし、高低応力の頻度比を $n_3/n_2 = 1/20, 1/50, 1/100$ とした。

5. 2 段多重変動応力疲労における低レベル応力の効果についての実験結果

図10に2段多重変動応力疲労試験結果を示す。疲労限度以下の低レベル応力 E_{ϵ_2} に対する破損繰返し数 N_2^* は、高レベル応力 E_{ϵ_3} に対しては変動応力の場合にも一定振幅の場合と同じ損傷が発生すると考える線形累積損傷則を仮定し、高レベル応力に対する破損繰返し数を N_1 、寿命までのブロック数を N_B として、次式により推定した。

$$N_2^* = \frac{N_B \times n_2}{\left(1 - N_B \times \frac{n_3}{N_1}\right)}$$

図10に示すように、一定振幅の疲労限度以下の低レベル応力も、変動応力疲労では疲労に寄与する。疲労限度以下の応力に対する損傷評価線は破線で示す有限寿命領域のS-N線図を疲労限度以下まで直線延長した修正マイナー則よりも長寿命側で若干勾配の低い直線と与えられる。予き裂発生後の損傷評価線には低レベル応力による頻度比効果があり、頻度比1/50程度が最大を示し、1/100となると小さくなる傾向があり、これまでの知見と同様の傾向が得られている^[14]。き裂の生じた溶接止端部断面のマクロ写真を図11に示す。全ての試験片で溶接止端部からき裂が発生した。図12に、 $\epsilon_1 = 1\%$, $n_1 = 200$ cycles, 低レベル応力 $E_{\epsilon_2} = 30$ MPa, 高レベル応力 $E_{\epsilon_3} = 70$ MPa, 頻度比 $n_3/n_2 = 1/50$ の条件におけるき裂の破面写真を示す。

変動応力疲労の場合に疲労限度以下の応力が損傷に寄与することは周知の事実として認識されている^[14]、疲労損傷を与える応力レベルに下限が存在するののかについては未だ明確にはされていない。すなわち、図10の疲労限度以下の領域に対する損傷評価線がいつまでも低下し続けるのか、あるいは変動応力に対して疲労限度が存在する

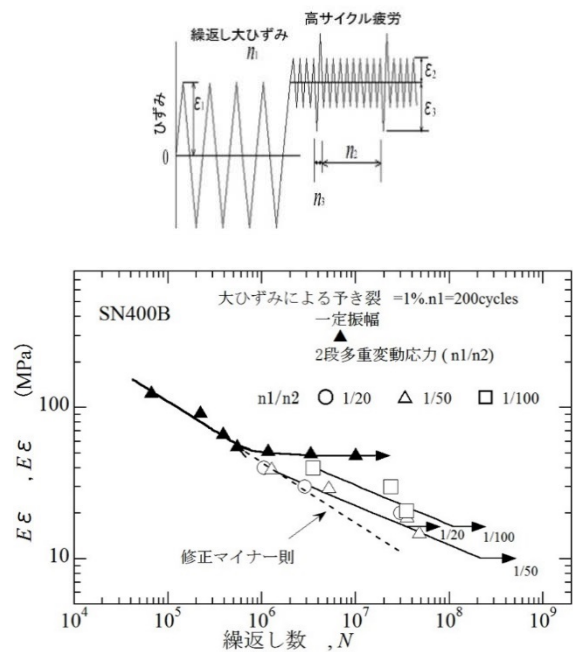


図10 2段多重変動応力疲労のS-N線図

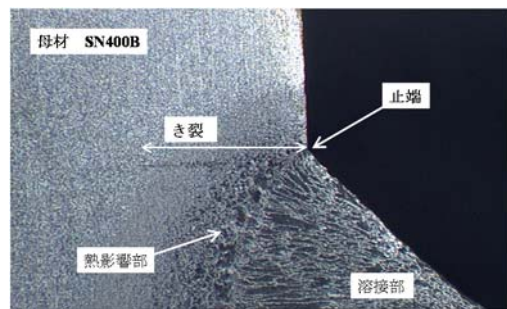


図11 溶接止端部に生じたき裂

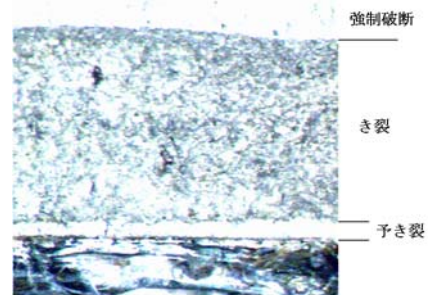


図12 変動応力疲労により生じたき裂

のかは明確にされていない。そこで、変動応力疲労において予き裂を反映して図14の損傷評価線にはそれぞれの下限の応力値で打ち切って水平とし、変動応力に対する疲労限度として矢印で表示した。変動応力の場合に疲労限度以下の応力も疲労損傷に寄与することは従来から知られた知見であり、また本研究でも同じ結果が得られた。しかし、これら発生後の累積損傷に寄与する最下限の応力値を検討するために、線形累積損傷仮定によって求めた低レベル応力に対する損傷 D_2 を図13に示した。その結果、累積損傷に寄与しなくなる低レベル応力

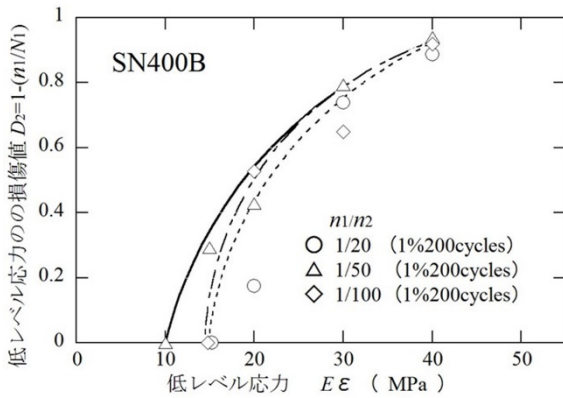


図 13 損傷度曲線

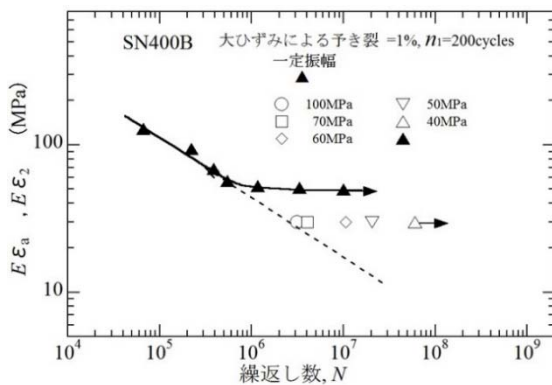


図 14 2 段多重変動疲労での低レベル応力による損傷に及ぼす高レベル応力の効果

存在することが示された。その下限値は頻度比に依存し、頻度比が 1/20 の場合は 15MPa、1/50 の場合は 10MPa、1/100 の場合は 15MPa において、低応力による予き裂発生後の損傷 D_2 が零となった。この結果の変動応力波形には疲労限度を超える応力を一部含んでいることが前提であり、全ての応力成分が疲労限度以下の場合に疲労損傷が生じうのか否かは未だ明確でない。そこで、低レベル応力 $E\epsilon_2$ を疲労限度以下の 30MPa 一定とし、高レベル応力 $E\epsilon_3$ を、疲労限度 (50MPa) をはさむように選定して種々に変えた結果を図 10 に示す。低レベル応力に対する疲労限度は各種の白抜き記号で示すように高レベル応力の影響を受けており、高レベル応力が疲労限度より十分高い \circ 印 (高レベル応力 100MPa)、 \square 印 (70MPa) は破線で示す修正マイナー則の直線にほぼ近い一定の値となるが、高レベル応力が疲労限度に近づくと低レベル応力による寿命は長くなって行き (\diamond 印, ∇ 印)、ついに高レベル応力が疲労限度以下となる \triangle 印 (高レベル応力 40MPa) では、疲労損傷が発生しないことが確認された。このことから、変動応力下においては疲労限度以下の応力も疲労損傷に寄与するのは応力波形の一部に疲労限度を超える応力が含まれることが前提であり、全ての応力が疲労限度以下の場合には疲労損傷は発生しないと判断してよいことが示された。ただしこの場合の疲労限度というのは、竣工時のき裂のない状態の疲労限度のことではなく、繰返し大ひずみによって微小き裂が発生している状態に対する疲労限度

を正しく評価した上でのものであり、予き裂が入った状態に対する疲労限度が正しく評価された上で全ての応力がその疲労限度以下であるならば疲労損傷は発生しないものと判断してよいことが示された。

6. 繰返し大ひずみを受けき裂が発生した溶接継手の暫定判断クライテリアについて

変動荷重の場合でも全ての応力振幅が、該当する予き裂材の疲労限度以下であれば疲労損傷が発生しないことが示された。これに基づいて非破壊検査能力を勘案した繰返し大ひずみによって初期き裂が発生した後の溶接継手の判断クライテリアを提案する。放射線検査または超音波探傷検査の非破壊検査能力を深さ 1mm のき裂とする。図 15 は、繰返し大ひずみによって発生した予き裂深さと疲労限度の関係を示している。深さ 1mm のき裂が存在する場合の疲労限度は図 15 から SN400B は 30MPa である。いま実働時応力がこれらの疲労限度を超えることが無いケースでは、繰返し大ひずみを受けた後のき裂検査でき裂指示が認められない部位は放置してもよい。

一方、実働時応力が一部でも 1mm き裂材の疲労限度を超えることがある場合は、たとえ繰返し大ひずみを受けた後の非破壊検査でき裂指示なしと判断されても、検出精度の問題で 1mm 未満ではあるがき裂が発生している可能性がある。そこで安全側処置として深さ 1mm のき裂が存在すると仮定して疲労き裂進展評価を行い、寿命判定することが望ましい。

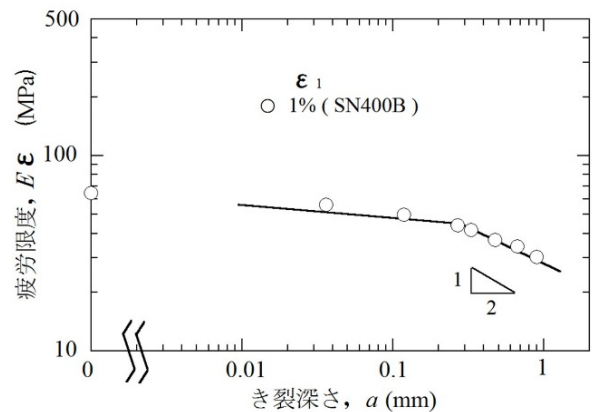


図 15 溶接継手の疲労限度と予き裂深さの関係

7. まとめ

低サイクル疲労によって施工時に比べて疲労強度の低下した構造物を継続使用するとき、実働応力疲労の問題がある。繰返し大ひずみによって微小き裂が発生し疲労強度が低下した構造物を、継続使用するときの実働応力疲労について検討するため、初期き裂を発生させた後、変動応力によって疲労限度以下の応力を含む 2 段多重変動応力波形による変動応力試験を行い疲労限度以下でも破

損するか検討した。得られた結果をまとめると以下の通りである。

- (1) き裂の入った溶接継手に疲労限度をはさむ2段多重変動応力を負荷すると、疲労限度以下の低レベル応力によっても疲労損傷が発生する。低レベル応力による損傷には頻度比効果があり、1/50程度の頻度比の場合に最大損傷となる。
- (2) 疲労限度以下の低レベル応力が疲労損傷に寄与するためには、変動応力の一部に疲労限度を超える高レベル応力が含まれることが前提であり、全ての応力が疲労限度以下の場合には、疲労損傷は発生しないことが確認された。
- (3) 深さ1mmのき裂の検知能力を有する非破壊検査法でき裂検査を行う場合、SN400Bの応力が深さ1mmのき裂材の疲労限度30MPaを超えることがない場合は、地震後のき裂検査でき裂が検出されない部位は放置してよい。一方、応力が1mmの予き裂材の疲労限度を超えることがある場合は、繰返し大ひずみを受けた後の検査でき裂が検知されなくても浅いき裂が発生している可能性があるため、安全側処置として深さ1mmのき裂が存在するとして疲労き裂進展評価をすることが望ましい。

参考文献

- [1] 渡邊英一,前川義男,杉浦邦征,北根安雄, 阪神・淡路大震災特集-第4回,鋼橋の被害と耐震性,土木学会誌,Vol.80,No.7, pp54-62,(1995).
- [2] 日本建築学会近畿支部鉄骨構造部会, 1995年兵庫県南部地震 鉄骨造建築物被害調査報告書,(1995).
- [3] 日本建築学会, 地盤工学会, 土木学会, 日本機械学会, 日本地震学会編, 阪神・淡路大震災調査報告, 鉄骨造建築物, pp13-19, 22-50, 68-99. (1997).
- [4] 土木学会, 兵庫県南部地震による神戸港港湾幹線道路 P75橋脚隅角部におけるき裂損傷の原因調査・検討,土木学会論文集,NO.591,I-43,pp.243-261,(1998).
- [5] 国土交通省 国土技術政策総合研究所,国土研究開発法人

建築研究所,平成28年熊本地震による建築物等被害第三次調査報告,(2016).

- [6] 堀江竜巳,矢部善嗣,葉師寺圭, 建築鉄骨における溶接継手の疲労特性に関する実験的研究,日本建築学会構造系論文集,第556号,pp.167-174(2002).
- [7] 成原弘之,泉満, 鋼構造柱梁仕口における梁端溶接部の疲労強度, 日本建築学会構造系論文集,第508号,pp.111-117(1998).
- [8] 杉本浩一,高橋泰彦, 阪神・淡路大震災の被災鉄骨を用いた鉄骨柱梁接合部の動的載荷重実験,大林組技術研究所報 特別号,pp.92-97(1996).
- [9] 奥屋和彦,近藤良之, 繰返し大ひずみが溶接継手の疲労強度に及ぼす影響,日本機械学会論文集,A-71 巻 705号,pp.763-768.(2005).
- [10] 奥屋和彦,近藤良之, 溶接構造シンポジウム, 繰返し大ひずみが溶接継手の疲労強度に及ぼす影響, Pp347-350,(2004).
- [11] 日本建築学会, 鋼構造接合部設計指針,丸善株式会社,(2006).
- [12] 日本建築学会, 建築工事標準仕様書 JASS6 鉄骨工事, (2015).
- [13] 岡本晴仁, 新しい建築鉄骨用鋼材とその利用,溶接学会誌, 第71巻,第7号,pp.15-17.(2002).
- [14] 疲労設計便覧,日本材料学会編,pp204-240.(1995).

(原稿受付 2017/01/31, 受理 2017/03/31)

*奥屋 和彦, 博士 (工学)

職業能力開発総合大学校, 能力開発院, 〒187-0035 東京都小平市小川西町2-32-1 email:okuya@uitec.ac.jp
Kazuhiko Okuya, Faculty of Human Resources Development, Polytechnic University of Japan, 2-32-1 Ogawa-Nishi-Machi, Kodaira, Tokyo 187-0035

*山浦 真一, 博士 (工学)

職業能力開発総合大学校, 能力開発院, 〒187-0035 東京都小平市小川西町2-32-1 email:s-yamaura@uitec.ac.jp
Shin-ichi Yamaura, Faculty of Human Resources Development, Polytechnic University of Japan, 2-32-1 Ogawa-Nishi-Machi, Kodaira, Tokyo 187-0035