移動荷重を受ける 鋼I桁面外ガセット溶接部の疲労強度

森 猛¹・松井 喜昭²・佐藤 歩³・原田 英明⁴・村越 潤⁵

¹フェロー会員 法政大学教授 都市環境デザイン工学科 (〒160-0004 東京都新宿区市谷田町2-33)

E-mail: mori@hosei.ac.jp

²学生会員 法政大学大学院 デザイン工学研究科都市環境デザイン工学専攻 修士課程 (同上)

[現在, 株式会社東京鐵骨橋梁 (〒302-0038 茨城県取手市下高井1020)]

E-mail: yoshiaki_matsui@tk-corp.co.jp

³正会員 土木研究所 構造物メンテナンス研究センター (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

E-mail: a-satou@pwri.go.jp

⁴正会員 土木研究所 構造物メンテナンス研究センター (同上)

E-mail: h-harada55@pwri.go.jp

⁵正会員 土木研究所 構造物メンテナンス研究センター (同上)

[現在, 首都大学東京教授 大学院 都市環境科学研究科 (〒103-0015 東京都八王子市南大沢1-1)]

E-mail: murakos@tmu.ac.jp

荷重の移動に伴い主応力方向が変化する主桁・横桁交差部の主桁ウェブ側溶接止端からの疲労き裂の発生・進展性状と疲労強度を明らかにする目的で, ウェブに面外ガセットを有するI断面桁試験体の定点荷重(4点曲げ)疲労試験と移動荷重疲労試験(輪荷重走行試験)を行っている. そして, 移動荷重下の疲労強度は, 定点荷重下よりも25%程度低い, 移動荷重下での疲労き裂は溶接止端に沿って進展する領域が長い, 主応力直角方向ではなくさらに傾いた方向に進展する, などの結果を示している.

Key Words : moving load, variation in principal stress direction, web-gusset joint, fatigue strength

1. はじめに

1980年代から疲労が原因と考えられる損傷事例が数多く報告されるようになり¹⁾⁵⁾, 「道路橋示方書・II鋼橋編」では2002年3月の改訂版⁶⁾より疲労安全性照査を行うように規定された. そして, その具体的な方法は同時に発刊された「鋼道路橋の疲労設計指針」⁷⁾を参考にするとよいとされた. この指針にしたがって鋼橋に含まれる各溶接継手の疲労照査を行うと, 横桁などの横部材が取り付けられた主桁ウェブ溶接部で, 疲労安全性が確保できないという結果となることが少なくない. 事実, この部位に疲労き裂が生じたという事例も報告されている⁸⁾.

横桁などが取り付けられた主桁ウェブ溶接部の疲労強度は, 面外ガセット溶接継手にモデル化した試験体に軸方向応力を繰返し作用させる1軸疲労試験により求めるのが通常である⁹⁾. しかし, この位置では荷重の位置によってせん断力の方向が反転することから主応力の方向が変化する. したがって, 合理的な疲労設計を行うため

には, このような主応力方向が変化する応力場における疲労強度を明らかにすることが重要である.

第1著者らは, 面外ガセット溶接を有する十字形の小型試験体を用いた逆位相と同位相の2軸疲労試験により面外ガセット溶接継手の疲労強度に対する主応力方向の変化の影響について検討している. そして, その影響を主応力範囲(最大主応力とその方向の最小応力の差)で整理することを提案している⁹⁾. また, 桁試験体の2か所にアクチュエータを設置し, それらで交互に載荷する疲労試験を行い, それぞれのアクチュエータ載荷時の主応力範囲の等価主応力範囲を用いれば, 従来の定点荷重の疲労試験で得られた疲労試験データとはほぼ一致するという結果を示している¹⁰⁾. しかし, これら2つの実験では, 実橋で想定される主応力方向の変化を再現することはできない. このような応力場を再現するためには, 移動荷重試験が必要と考えられる. 著者らは, 主応力方向が変化する応力場にある面外ガセット溶接継手の疲労強度を明らかにするためには, 移動荷重下での面外ガセット溶

図-1 B試験体の形状・寸法

表-1 供試鋼材の機械的性質

	材質	適用	降伏点	引張強さ	伸び
			N/mm ²		%
A試験体	SS400	H形鋼	368	428	33
	SM400A	ガセット	316	447	30
	SM400A	スティフナ	316	447	30
	SM400A	支点上補剛材	291	445	32
	SM400A	ソールプレート	298	433	33
B試験体	SS400	H形鋼	272	454	29
	SM400A	ガセット	297	446	36
	SM400A	スティフナ	297	446	36
	SM400A	支点上補剛材	296	446	31
	SM400A	ソールプレート	277	435	32

接部の応力性状を明らかにすることが重要と考え、輪荷重走行試験機を用いた桁試験体の応力測定試験とそれを対象とした弾性有限要素応力解析を行っている¹¹⁾。そして、最も大きい最大主応力が生じる位置は、荷重の移動とともに面外ガセット溶接止端に沿って移動する、という結果を示している。

ここでは、荷重の移動に伴い主応力方向が変化する応力場にある面外ガセット溶接継手の疲労強度とそのような応力場での疲労き裂の発生・進展性状を明らかにすることを目的として、面外ガセットを有する桁試験体の移動荷重（輪荷重走行）疲労試験と従来から行われている定荷重（4点曲げ）疲労試験を行った結果を報告する。

2. 試験体

H形鋼に面外ガセットを溶接した2種類の桁試験体（A試験体：4体、B試験体：2体）を製作した。これらの試験体のH形鋼の断面寸法は340×250×9×14mmであ

り、その長さは4500mmである。H形鋼には、面外ガセットに加えてソールプレートと垂直スティフナを溶接している。それらのミルシートによる材質と機械的性質を表-1に示す。なお、溶接桁では面外ガセット端部ではなく、首溶接部から疲労き裂が生じることもある¹⁰⁾。そのため、ここではH形鋼を用いている。

図-1にB試験体の形状と寸法を示す。B試験体のH形鋼には、ウェブ両面にガセット板を図-1に示す8か所に設置している。ウェブの下側のガセットを、図-1に示すように、S（南）側からWG1下、WG2下、WG3下、WG4下、またウェブ上側のガセットをWG1上、WG2上、WG3上、WG4上と呼ぶ。さらに、各ガセットの両端をS（南）、N（北）で区別する。また、2つのウェブ面をE（東）、W（西）で区別する。例えば、WG2の南側のウェブ下側東面のガセット端をWG2下-SEと呼ぶ。A試験体では、ウェブの下側のみ、B試験体と同じ寸法の形鋼の同じ位置にガセットを溶接している。なお、B試験体で圧縮応力場となるウェブの上側にもガセットを設置しているが、これは既報¹¹⁾において、荷重位置に近いウェブ上部に位置するガセット溶接部では、ウェブ下部に比べて鉛直方向応力が大きくなるため、主応力方向の変化が大きくなる、また桁軸方向応力と鉛直方向応力の符号が同じとなるため、最小主応力の大きさがウェブ下部の最大主応力に比べて大きくなることが確かめられていることによる。このような応力性状が疲労強度に及ぼす影響を明らかにする目的で、B試験体では圧縮側にもガセットを設けた。

ガセットの溶接は、直径1.2mmのフラックスコアードワイヤ（JIS Z 3312, YGW11）を用いた1パスのCO₂法で行った。その際の電流、電圧、溶接速度は、それぞれ260A, 34V, 32～36cm/minである。棒継ぎは、ガセット

写真-1 定点荷重疲労試験の状況

写真-2 疲労き裂とストップホール

端の回し溶接部から離れた位置で行っている。溶接は水平姿勢で行い、目標脚長は 6mm とした。溶接後に測定した回し溶接部の平均脚長は、ウェブ側で 10.7mm、ガセット側で 7.3mm であった。また、疲労き裂の起点となる H 形鋼ウェブ側の溶接止端の曲率半径は 1.0mm 程度、開き角は 130 度程度であった。

3. 定点荷重疲労試験

(1) 試験方法

定点荷重疲労試験は、支間を 4000mm、荷重点間距離を 600mm として、左右対称な 4 点曲げ荷重下で行った。その際、支点の一方はピン支持、もう一方はローラー支持としている。用いた試験体は、A 試験体 2 体 (A-1 試験体、A-2 試験体) と B 試験体 1 体 (B-1 試験体) である。A-1 試験体は荷重範囲を 230kN (下限荷重 10kN)、繰返し速度を 0.65Hz、A-2 試験体と B-1 試験体は荷重範囲を 210kN (下限荷重 10kN)、繰返し速度を 0.80Hz として疲労試験を行った。用いた試験機は、動的能力 300kN の電気油圧サーボ式材料試験装置である。荷重点はガセット板 WG2 と WG3 中央の直上であり、200×200mm で厚さ 25mm の鋼板と厚さ 6mm のゴム板を介して荷重を上フランジに加えている。このような繰返し荷重により等モーメント区間の下フランジ下面に生じる公称応力範

表-2 定点荷重疲労試験の結果

位置	公称主 応力範囲 (N/mm ²)	荷重繰返し数	き裂長さ	処置	試験終了時の 相対ひずみ範囲
A-1試験体(10-240kN) 荷重総繰返し数:150万回					
WG1下-S	68.9	150万回	き裂なし		E面:100% W面:100%
WG1下-N	82.0	150万回	27mm		
WG2下-S	93.0	80万回	52mm	補修	
WG2下-N	84.7	105万回	54mm	補修	
WG3下-S	84.7	90万回	58mm	補修	
WG3下-N	93.0	81.5万回	46mm	補修	
WG4下-S	82.0	150万回	36mm		
WG4下-N	68.9	150万回	き裂なし		E面:100% W面:100%
A-2試験体(10-220kN) 荷重総繰返し数:532.5万回					
WG1下-S	62.9	377.3万回	52mm	補修	
WG1下-N	74.9	396.5万回	46mm	補修	
WG2下-S	84.9	151.4万回	67mm	補修	
WG2下-N	77.3	193.1万回	60mm	補修	
WG3下-S	77.3	124万回	55mm	補修	
WG3下-N	84.9	138.8万回	55mm	補修	
WG4下-S	74.9	201.6万回	42mm	補修	
WG4下-N	62.9	532.5万回	40mm		
B-1試験体(10-220kN) 荷重総繰返し数:312万回					
WG1下-S	62.9	312万回	21mm		E面:135% W面:20%
WG1下-N	74.9	182.4万回	56mm	補修	
WG2下-S	84.9	123.1万回	53mm	補修	
WG2下-N	77.3	96.1万回	54mm	補修	
WG3下-S	77.3	132.9万回	56mm	補修	
WG3下-N	84.9	123.1万回	61mm	補修	
WG4下-S	74.9	236.0万回	50mm	補修	
WG4下-N	62.9	283.7万回	47mm	補修	
WG1上-S	62.9	312万回	き裂なし		E面:100% W面:100%
WG1上-N	74.9	229.2万回	98mm	補修	
WG2上-S	84.9	275.8万回	50mm	補修	
WG2上-N	77.3	256.0万回	58mm	補修	
WG3上-S	77.3	215.7万回	57mm	補修	
WG3上-N	84.9	312万回	き裂なし		E面:100% W面:100%
WG4上-S	74.9	304.2万回	55mm	補修	
WG4上-N	62.9	312万回	き裂なし		E面:100% W面:100%

囲は、A-1 試験体で 159N/mm²、A-2 試験体と B-1 試験体で 145N/mm² である。また、等モーメント区間のガセット板厚中心部での公称応力範囲は、A-1 試験体で 85N/mm²、A-2 試験体と B-1 試験体で 77N/mm² である。定点荷重疲労試験の状況を写真-1 に示す。

各ガセット回し溶接部中心の止端から 5mm 離れた位置に 1 軸のゲージレンジス 3mm のひずみゲージを貼付し、疲労試験中に所定の荷重繰返し数間隔で動ひずみ測定を行い、荷重繰返しにともなうひずみ範囲の変化を調べた。これは、溶接止端に生じる疲労き裂の発生と進展を監視することを目的としたものである¹⁰⁾。ひずみ範囲が初期値の 20% 程度まで低下した後は、磁粉探傷試験を行い、主桁ウェブ表面でのき裂の進展を監視した。そして、表面のき裂長さ(鉛直方向投影長さ)が 40mm 以上となった後、き裂先端がその中に含まれるように直径 10mm の円孔(ストップホール)を開け、その孔を F10T-M10 の高力ボルトで締め付けることにより補修した。その際のボルトの締め付けは、モーメントアーム 300mm のトルクレンチを用いて人力で行った。そのため、ボルトの締め付け力は管理できていない。疲労き裂の一例とそ

(a) A-2試験体 WG3 下-NE

(b) A-2試験体 WG3 下-NW

図-2 ひずみ範囲－荷重繰返し数関係の例

のき裂の先端にストップホールを空けた状況を写真-2に示す。補修後、疲労試験を再開し、多くの箇所での疲労き裂を観察できるようにした。

(2) 試験結果

各試験体の疲労試験結果を表-2に示す。A-1試験体では荷重繰返し数150万回、A-2試験体では532.5万回、そしてB-1試験体では312万回で試験を終了した。なお、疲労試験の終了は、ボルト締めしたストップホールから疲労き裂が生じたことによる。表中には、梁理論から求めた直応力と力の釣合いから求めたせん断応力より計算される公称の主応力範囲、磁粉探傷試験により測定したき裂長さ（鉛直方向投影長さ）、そのときの荷重繰返し数、補修の有無を示している。なお、ここではウェブの両面で観察されたき裂のうち、長いほうのき裂の長さを示している。き裂が磁粉探傷試験では検出されなかった箇所については、試験開始時のひずみ範囲に対する試験終了直前に計測されたひずみ範囲の比（相対ひずみ）も示している。

A-1試験体では、磁粉探傷試験により8箇所あるガセット端の内6箇所での疲労き裂を検出した。主応力範囲が最も小さく、き裂を検出することができなかったWG1下-SとWG4下-Nでは、試験終了時のひずみ範囲が初期ひずみ範囲と変化がないため、これらの位置での疲労き裂

写真-3 A-2試験体の疲労き裂の例

は生じなかったものと推測される。A-2試験体では、8箇所あるガセット端のすべてにおいて磁粉探傷試験により疲労き裂が検出された。

B-1試験体においても、下側にある8箇所のガセット端のすべてで疲労き裂が検出された。下側のガセット端では引張応力が生じる。対応する上側のガセット端では圧縮応力が生じ、公称主応力範囲は下側と同じとなる。上側のガセット端では8箇所のうち5箇所での疲労き裂が検出された。磁粉探傷試験でき裂が検出されなかったWG1上-S、WG3上-NとWG4上-Nでは、ひずみ範囲に変化がないため、き裂は生じなかったものと推察される。

(3) 疲労き裂の発生・進展挙動

A-2試験体のWG3下-NEとWG3下-NWの溶接止端近傍に貼付したひずみゲージより求めた荷重繰返しに伴う相対ひずみ範囲の変化を図-2に示す。なお、ひずみ範囲は試験開始直後に測定したひずみ範囲で無次元化している。WG3下-NWのひずみ範囲は荷重繰返し数25万程度から下がり始めている。疲労き裂はこの時点で発生したと考えられる。そして110万程度で初期の10%程度となっている。一方、WG3下-NEでは、100万程度までひずみ範囲は一定であり、その後大きくなっている。これは、W面から生じた疲労き裂が深くなることによって、E面にひずみが集中するためと考えられる。そして、120万回程度で急激にひずみ範囲が小さくなっており、この時点でき裂がウェブを貫通したものと推察される。このき裂は、荷重繰返し数138.8万回の時点で表面での長さ55mmの貫通き裂が磁粉探傷試験により検出されており、その時点でき裂先端にストップホールを空け、ボルト締めしている。ただし、せん断区間にあるガセット端では、回し溶接中央ではなく、そこから離れた位置で最大主応力が生じ、そこから疲労き裂が生じるものと考えられる。この場合、疲労き裂が回し溶接中央まで進展しないとひずみ範囲に明確な変化は生じない。したがって、き裂発生とひずみ範囲減少が対応しない場合もある。

写真-3にA-2試験体のWG2下-NWとWG3下-NWで観察された疲労き裂を示す。これまでの研究から知られ

図3 A-1試験体・WG2下-Sでのひずみ範囲変化，疲労き裂と疲労破面

図4 A-2試験体・WG1下-Sでのひずみ範囲変化，疲労き裂と疲労破面

ているように，等モーメント区間に位置するWG2下-NWでの疲労き裂はほぼ鉛直方向に進展しているのに対し，せん断区間に位置するWG3下-NWではせん断応力の影響で主応力方向とほぼ垂直に疲労き裂が進展している。このような傾向は，他の部位・他の試験体においても同じであった（後掲の表-5参照）。

疲労試験終了後，各き裂の疲労破面を暴露した。疲労破面の暴露は，き裂の周辺の部分（長さ200mm程度，高さ70～120mm程度）を試験体から切り出し，さらにストップホールを空けるまで進展していないき裂が生じている部分については，のこで切り込みを入れたうえで，液体窒素で冷却してハンマーで打撃することによって行

図-5 B-1試験体・WG1 下-Sでのひずみ範囲変化, 疲労き裂と疲労破面

図-6 B-1試験体・WG2 下-Nでのひずみ範囲変化, 疲労き裂と疲労破面

った。

各試験体のいくつかの部位で測定・観察した荷重繰返しに伴うひずみ範囲の変化, 疲労き裂とその破面を図-3～図-7に示す。図-3は, A-1試験体・WG2 下-Sでの測定・観察結果を示している。疲労き裂は, E面から発生

し, 止端に沿って進展している。このき裂が進展し, W面へ貫通したと推察される。W面においても溶接止端に沿ったき裂も観察されるが, その一部は溶接ビード内に進展している。そのため, W面で溶接ビード内に疲労破面が観察される。図-4に示すA-2試験体・WG1 下-S

図-7 B-1 試験体・WG3 上-Sでのひずみ範囲変化、疲労き裂と疲労破面

では、W面から疲労き裂が発生・進展し、E面へ貫通している。そのため、E面での疲労き裂の一部は溶接止端ではなく、溶接ビード上にあり、A-1 試験体・WG2 下-Sと同様に、溶接ビード内に疲労破面が観察される。

B-1 試験体・WG1 下-Sで測定・観察した結果を図-5に示す。疲労き裂はW面から発生・進展し、半楕円形き裂となっている。破面から判断すると、疲労き裂は、W面での疲労き裂の状況を示した写真の矢印で示した位置で生じたものと考えられる。また、同写真の上側で止端から離れた2~3mmのき裂が観察されるが、そのき裂が破面においても観察される。この写真のように、止端に沿ったき裂の存在は磁粉探傷試験によっても確認することが難しい。

図-6は、B-1 試験体・WG2 下-Nの測定・観察結果である。主たる疲労き裂は、E面の溶接止端から発生・進展し、W面の溶接ビードへ貫通している。そのため、W面側では溶接ビードにも疲労破面が観察される。E面でのひずみ範囲は疲労試験を開始した後早い段階で下がり始めており、この時点で疲労き裂が生じたものと考えられる。そして75万回程度でほぼ0となっている。その後、ひずみ範囲が上昇している。一方、W面では30万回までひずみ範囲に変化はなく、その後75万回まで増加している。これは、E面からのき裂が大きくなったことによるものと考えられる。75万回以降のE面でのひずみ範囲の上昇は、磁粉探傷試験からは明確ではないが、W面の溶接止端からも疲労き裂が生じ、このき裂が大きくなることにより生じたものと考えられる。

圧縮の繰返し応力を受けたB-1 試験体・WG3 上-Sの測定・観察結果を図-7に示す。疲労き裂はE面から発生・進展し、W面へ貫通している。疲労破面には、き裂が回し溶接部を超えた付近から錆が生じている。これは引張残留応力の存在のために圧縮繰返し応力下であっても開口していた疲労き裂が残留応力の開放・低下に伴い閉口するようになり、破面が接触して擦られたためと考えられる。

(4) 疲労強度

各面外ガセット溶接止端部の桁軸方向の公称応力範囲で整理した疲労試験結果を図-8に示す。図の横軸の疲労寿命は、き裂長さ(鉛直方向投影長さ)が40mmとなった時点の荷重繰返し数である。表-2に示したように、試験終了時に40mm未満の疲労き裂が観察されたものもあるが、それらについては他の部位で測定したき裂長さー荷重繰返し数関係と応力範囲を考慮して、40mmに達するときの荷重繰返し数を推定した。図中には、JSSC 指針で示されている各疲労強度等級に対応する疲労設計曲線も示している。図中に示す()を付した数値はデータ数を示している。面外ガセット溶接継手の疲労強度等級はGとされているが、ここでのデータは概ねG等級の疲労設計曲線よりも上に位置している。等モーメント区間の疲労試験データに比べて、せん断区間のデータが下に位置している。これはせん断区間では、せん断応力が作用するために、最大主応力範囲が大きくなるためと考えられる。

図-8 桁軸方向応力で整理した定点荷重疲労試験結果

図-9 最大主応力で整理した定点荷重疲労試験結果

写真-4 移動荷重疲労試験の状況

写真-5 ボルト締めストップホールによる疲労き裂の補修

最大主応力範囲で整理した疲労試験結果を図-9に示す。このような整理をすることにより、疲労試験データは等モーメント区間、せん断区間によらず、疲労試験データはほぼ同じ線上にプロットされている。したがって、従来から知られているように、組み合わせ応力場では最大主応力範囲で疲労強度評価を行うのがよいといえる。また、このような整理を行うと、小型試験体の面外ガセット溶接継手の軸方向疲労試験結果⁸⁾と同様に、試験データの下限が疲労強度等級Fの疲労強度曲線とほぼ一致している。図中のマークは引張繰返し応力を受けるか、圧縮繰返し応力を受けるかによって変えている。両者の疲労試験データはほぼ同じ位置にあり、引張・圧縮による疲労強度の明確な差はない。ただし、圧縮繰返し応力では引張繰返し応力に比べて未破断データが多い。

4. 移動荷重疲労試験

(1) 試験方法

移動荷重疲労試験は、土木研究所所有の載荷能力50tonf(490kN)の輪荷重走行試験機を用いて行った。用いた試験体はA試験体2体(A-3, A-4試験体)、B試験

体1体(B-2試験体)である。移動荷重の走行範囲は支点間距離4000mmの桁の中央の3000mmであり、一方の支点をピン支持、もう一方をローラー支持として試験を行っている。A-3試験体では輪重を250kN、荷重速度を13rpm、A-4とB-2試験体では輪重を200kN、繰返し速度を10rpmとしている。移動荷重試験を安定させるために用いた載荷ブロック等は、既報¹⁾で用いたものと同じである。なお、載荷ブロックの幅は300mmである。載荷ブロックが桁の応力性状に及ぼす影響が小さいことは既報¹⁾において確かめている。なお、桁中央下フランジ下面でその直上に輪荷重が位置したときに測定した応力と梁理論から計算される応力は、A-3試験体で176N/mm²と175N/mm²、A-4試験体で139N/mm²と140N/mm²であり、測定値と梁理論値はほぼ一致していた。したがって、前報¹⁾で示したように、載荷治具が桁の応力性状に与える影響は小さいものと考えられる。

定点荷重疲労試験と同じように、ひずみゲージを溶接止端から5mm離れた位置に貼付し、繰返し荷重走行に伴うひずみ範囲の変化を測定することにより疲労き裂の発生・進展を監視した。また、磁粉探傷試験を行い、ウェブ表面でのき裂長さを測定した。き裂の鉛直方向投影長さが40mm程度以上伸びた後の処置も定点荷重疲労

表-3 移動荷重疲労試験の結果

位置	橋軸方向公称応力			荷重繰返し数 (1往復を2回と計数)	き裂長さ	処置	試験終了時の 相対ひずみ範囲	疲労き裂の発生・進展性状の観察結果
	500mm	直上	3500mm					
N/mm ²								
A-3試験体(輪重:250kN)								
WG1下-S	41.3	78.5	12.9	29万回	き裂なし*		E面:100% W面:30%	磁粉探傷試験ではき裂を検出することがはできなかったが、深さ3mm・幅11mm程度のき裂がW面から生じている。き裂は止端に沿って進展している。
WG1下-N	37.2	93.1	16.9	29万回	き裂なし*		E面:110% W面:20%	磁粉探傷試験ではき裂を検出することができなかったが、深さ11mm・幅33mm程度のき裂がW面から生じている。き裂は止端に沿って進展している。止端の位置がW面とE面でずれているため、き裂深さはウェブ板厚よりも大きくなっている。
WG2下-S	33.2	102.8	30.0	29万回	86mm			表面での疲労き裂は、回し溶接部を巻き込むように進展している。き裂はW面とE面から生じている。
WG2下-N	29.1	107.7	25.1	29万回	き裂なし*		E面:35% W面:15%	磁粉探傷試験ではき裂を検出することはできなかったが、W面から深さ5.5mm、E面から深さ3.5mmのき裂が2つ生じている。
WG3下-S	25.1	107.7	29.1	29万回	78mm			表面では傾いたほぼ真直ぐなき裂が生じている。分岐したき裂もある。
WG3下-N	30	102.8	33.2	29万回	32mm		E面:35% W面:20%	W面から深さ8.5mm、幅34mmの半楕円形き裂が生じている。ただし、き裂先端は多少波打っている。
WG4下-S	16.9	93.1	37.2	29万回	き裂なし*		E面:20% W面:20%	W面・E面の双方からき裂が生じ、ウェブ板厚中央でこれらのき裂が合体している。表面の長さは、W面で28mm、E面で20mmである。
WG4下-N	12.9	78.5	41.3	29万回	き裂なし		E面:110% W面:60%	破面暴露試験を行っても、疲労き裂は観察できなかったが、ひずみ範囲の変化からW面から疲労き裂が生じているものと推察される。
A-4試験体(輪重:200kN)								
WG1下-S	33.0	62.8	10.3	75万回	き裂なし		E面:10% W面:110%	磁粉探傷試験と破面暴露試験によっても疲労き裂は観察されなかったが、ひずみ範囲の変化からE面から疲労き裂が生じているものと推察される。
WG1下-N	29.8	74.5	13.5	75万回	き裂なし*		E面:25% W面:20%	磁粉探傷試験ではき裂を検出することはできなかったが、W面から深さ7mm、E面から深さ6.5mmのき裂が生じている。2つのき裂面は同一平面上にはないため、破面の一部のみが破面写真に写されている。
WG2下-S	26.5	82.3	16.8	64.5万回	63mm	補修		疲労き裂は回し溶接止端に沿ってガセットを巻き込むように進展している。
WG2下-N	23.3	86.2	20.0	60.5万回	66mm	補修		疲労き裂は回し溶接止端に沿ってガセットを巻き込むように進展している。
WG3下-S	20	86.2	23.3	55.5万回	78mm	補修		疲労き裂は回し溶接止端に沿ってガセットを巻き込むように進展している。
WG3下-N	16.8	82.3	26.5	55.5万回	67mm	補修		疲労き裂は回し溶接止端に沿ってガセットを巻き込むように進展している。
WG4下-S	13.5	74.5	29.8	62万回	63mm	補修		疲労き裂は回し溶接止端に沿ってガセットを巻き込むように進展している。
WG4下-N	10.3	62.8	33.0	75万回	き裂なし*		E面:10% W面:15%	磁粉探傷試験では検出できなかったものの、W面から深さ6mmの得意な形状の疲労き裂が生じている。
B-2試験体(輪重:200kN)								
WG1下-S	33.0	62.8	10.3	72万回	き裂なし*		E面:40% W面:**	W面から深さ5mmのき裂が生じている。き裂の発生点は少なくとも2つ以上である。
WG1下-N	29.8	74.5	13.5	72万回	き裂なし*		E面:35% W面:35%	磁粉探傷試験では検出できなかったものの、W面から2つの深さ7mmと8mmのき裂が生じ、E面からも深さ3mmのき裂の生じている。
WG2下-S	26.5	82.3	16.8	72万回	87mm			疲労き裂は回し溶接止端に沿ってガセットを巻き込むように進展している。
WG2下-N	23.3	86.2	20.0	58万回	68mm	補修		疲労き裂は回し溶接止端に沿ってガセットを巻き込むように進展している。
WG3下-S	20	86.2	23.3	57.6万回	88mm	補修		疲労き裂は回し溶接止端に沿ってガセットを巻き込むように進展している。
WG3下-N	16.8	82.3	26.5	61.3万回	55mm	補修		疲労き裂は回し溶接止端に沿ってガセットを巻き込むように進展している。
WG4下-S	13.5	74.5	29.8	72万回	66mm			疲労き裂は回し溶接止端に沿ってガセットを巻き込むように進展している。
WG4下-N	10.3	62.8	33.0	72万回	き裂なし		E面:110% W面:90%	磁粉探傷試験と破面暴露試験によっても疲労き裂は観察されなかった
WG1上-S	-33.0	-62.8	-10.3	72万回	き裂なし		E面:80% W面:125%	磁粉探傷試験と破面暴露試験によっても疲労き裂は観察されなかった
WG1上-N	-29.8	-74.5	-13.5	72万回	き裂なし*		E面:85% W面:100%	磁粉探傷試験では検出できなかったものの、E面から少なくとも3つのき裂が合体した深さ3mmのき裂が生じている。
WG2上-S	-26.5	-82.3	-16.8	72万回	き裂なし*		E面:115% W面:25%	磁粉探傷試験では検出できなかったものの、W面から深さ6mmの特異な形状の疲労き裂が生じている。
WG2上-N	-23.3	-86.2	-20.0	72万回	き裂なし		E面:100% W面:100%	磁粉探傷試験と破面暴露試験によっても疲労き裂は観察されなかった
WG3上-S	-20.0	-86.2	-23.3	72万回	き裂なし*		E面:100% W面:35%	磁粉探傷試験では検出できなかったものの、W面から深さ6mmの特異な形状の疲労き裂が生じている。
WG3上-N	-16.8	-82.3	-26.5	72万回	き裂なし		E面:100% W面:100%	磁粉探傷試験と破面暴露試験によっても疲労き裂は観察されなかった
WG4上-S	-13.5	-74.5	-29.8	72万回	き裂なし		E面:100% W面:110%	磁粉探傷試験と破面暴露試験によっても疲労き裂は観察されなかった
WG4上-N	-10.3	-62.8	-33.0	72万回	き裂なし		E面:120% W面:95%	磁粉探傷試験と破面暴露試験によっても疲労き裂は観察されなかった
								* 破面暴露試験により疲労き裂検出 ** ゲージ破壊

* 破面暴露試験により疲労き裂検出 ** ゲージ破損

試験と同じである。試験の状況を写真-4に、き裂先端に空けたストップホールをボルト締めした状況を写真-5に示す。疲労試験終了後、定点荷重疲労試験を行った試験体と同様に疲労破面を暴露した。き裂が磁粉探傷試験によって検出されなかった部位についても、同様に破面を暴露することを試みた。

(2) 疲労試験結果

各試験体の疲労試験結果を表-3に示す。A-3試験体では輪荷重走行29万回(14.5万回往復)、A-4試験体では

75万回、そしてB-2試験体では72万回で試験を終了した。表中には、表-2と同様の内容に加え、各部位で観察した疲労き裂の発生・進展性状も示している。また、表-3中には、各荷重位置での各ガセット端における公称軸方向応力も示している。図-10に輪荷重走行1往復時のA-4試験体・WG3下-Nにおける桁軸方向公称応力の変動を示す(B-2試験体も同じ)。図の横軸は荷重位置であり、その原点はS側支点としている。したがって、1往復時の荷重位置は500mmからはじまり、3500mmまで移動して500mmに戻ってくることになる。図-10に示すよ

うに、荷重が着目点直上に位置するとき(2450mm)に応力は最大となり、右端(3500mm)で極小となる。このような応力変動にレインフロー法⁸⁾を適用すると、2つの応力範囲(55.8, 65.5 N/mm²)が求められる。他のガセット端においても、荷重が一往復することによって2つの応力範囲が得られる。

A-3 試験体では、磁粉探傷試験により8箇所あるガセット端の内4箇所で疲労き裂を検出した。WG1 下-S, WG1 下-N, WG2 下-N, そしてWG4 下-Sにおいては磁粉探傷試験ではき裂を検出できなかったものの、ひずみ範囲の変化が大きく、破面暴露試験を行った結果、疲労き裂が検出された。最も応力範囲が小さく、き裂を検出することができなかったWG4 下-Nにおいても、W面においてひずみ範囲が60%まで低下しているため、その面から疲労き裂が生じているものと考えられる。ただし、破面暴露試験には疲労き裂を検出することができなかった。

A-4 試験体では、8箇所のガセット端の内、5箇所において磁粉探傷試験により疲労き裂を検出した。磁粉探傷試験で疲労き裂が検出されなかった3箇所の内、2箇所では破面暴露試験により疲労き裂の存在を確認することができた。破面暴露試験によってもき裂を検出することができなかったWG1 下-SにおいてもE面でのひずみ範囲が初期の10%まで低下しているため、き裂が生じていたと考えられる。

B-2 試験体ウェブ下側の8つのガセット端からのき裂発生状況は、A-4 試験体とほぼ同じである。上側の8つのガセット端では、磁粉探傷試験で疲労き裂を検出することはできなかった。その内の3箇所では、破面暴露試

験によって疲労き裂が検出された。

(3) 疲労き裂の発生・進展挙動

いくつかの試験体のガセット端で測定・観察された荷重繰返しに伴うひずみ範囲の変化、疲労き裂とその破面を図-11～図-13に示す。図-11は、A-3 試験体・WG3 下-Sでの測定・観察結果を示している。ひずみ範囲-荷重繰返し数関係から判断して、疲労き裂はE面から発生し、進展したものと推察される。そして、荷重繰返し数22万回程度でW面へ貫通したと推察される。E面・W面とも、鉛直方向に対して30～45度程度傾いた方向に進展している。また、E面では回し溶接の下側で、主たるき裂とは90度程度異なる方向にも分岐したき裂が認め

図-10 移動荷重による公称応力の変動

図-11 A-3 試験体・WG3 下-Sでのひずみ範囲変化、疲労き裂と疲労破面

図-12 A-4試験体・WG2下-Sでのひずみ範囲変化，疲労き裂と疲労破面

図-13 B-2試験体・WG4下-Sでのひずみ範囲変化，疲労き裂と疲労破面

られる。

A-4試験体・WG2下-Sでの測定・観察結果を図-12に示す。ひずみ範囲と荷重繰返し数の関係より，疲労き裂はE面から発生・進展し，W面へ貫通したものと推察される。E面では移動荷重疲労試験開始直後からひずみ範囲が減少し始めており，疲労き裂は移動荷重疲労試験開

始直後に生じたものと考えられる。その後，45万回程度で15%程度まで減少し，50万回から上昇し始め58万回程度で100%まで戻っている。60万回程度になると再度15%程度まで減少している。一方，W面では35万程度からひずみ範囲が減少し始め，55万回程度まで減少を続け20%程度となっている。E面でのひずみ範囲の上

写真-6 A-3試験体の疲労破面の例

昇は、W面からのき裂がE面よりも遅く発生・進展し、このき裂がE面近くまで進展したことにより生じたものと考えられる。疲労き裂は溶接止端に沿って進展した後、上側では鉛直方向に対して45度、下側では25度程度傾いて、ガセットの内側へと進展している。このように、疲労き裂はガセットの回し溶接止端に沿って進展した後、回し溶接部止端を離れ、回し溶接部を包み込むように進展しており、梁理論から計算される主応力直角方向よりもさらに傾いた方向に進展している。進展方向の詳細については(6)項で述べる。比較的長い疲労き裂が観察された部位(表-3参照)では、試験体によらず回し溶接部を包み込むような進展が観察された。このような挙動と異なる進展経路が観察されたのは、先に示したA-3試験体・WG3下-Sのみであった。

図-13は、B-2試験体・WG4下-Sの測定・観察結果である。ひずみ範囲と荷重繰返し数の関係から、主たる疲労き裂は、E面の溶接止端から発生・進展し、W面へ貫通したものと判断される。E面とW面で溶接止端位置が異なるため、W面側では溶接ビードに疲労き裂と疲労破面が観察される。E面でのひずみ範囲は疲労試験開始直後から下がり始めており、48万回程度で初期の20%程度となっている。その後、ひずみ範囲が上昇している。このことから、磁粉探傷試験からは明確ではないが、W面の溶接止端からも疲労き裂が生じていたものと推察される。

写真-6にA-3試験体で観察された代表的な疲労破面を

示す。写真(a)に示すWG1下-Nの破面には2つの明確な段差が生じており、少なくとも3つのき裂が合体してほぼ半楕円形のき裂になったものと考えられる。写真(b)に示すWG2下-Nの主たる疲労き裂は、W面から生じており、その形状は半楕円形となっている。E面からも深さ3mm程度の独立した2つのき裂が生じている。

写真-6(c-1)に示すWG3下-Nでも、WG1下-Nと同程度の大きさ・形状のき裂が生じている。写真(c-2)は、破面を斜めから撮影したものである。正面からの写真では明確ではないものの、斜めからの写真では止端に沿った2つのき裂が生じ、進展して合体していることがわかる。このように、移動荷重疲労試験で観察された疲労き裂は、複数の位置からき裂が発生し、止端に沿って進展する領域が長くなっているものが多い。写真(d-1)に示すWG4下-Sの疲労破面は、E面から生じたき裂とW面から生じたき裂が、ほぼ板厚の中央で合体して形成されている。E面からは、2つの独立したき裂が生じている。写真(d-2)からは、W面からも2つの独立したき裂が発生し、それらが合体していることがわかる。

写真-6(c-2)に示す破面では、2つの疲労き裂が合体している位置で、オーバーラップのように溶接金属が突き出ている。ただし、疲労き裂の起点は溶接止端であり、溶接止端の内側に潜り込むようにき裂が進展し、溶接金属が突き出たような疲労破面になったものと推察される。このように溶接金属が突き出た破面が認められたのは、移動荷重疲労試験を行ったA-3試験のWG1下-S、WG1

写真-7 A-4試験体の疲労破面の例

写真-8 B-2試験体の疲労破面の例

下-N, WG2 下-N, WG3 下-N, WG4 下-S, A-4 試験体の WG1 下-S, WG1 下-N, WG2 下-S, WG2 下-N, WG3 下-N, WG4 下-S, そして B-2 試験体の WG2 下-N, WG3 下-S であり, 移動荷重疲労試験で破面を観察できた 24 箇所のうち 13 箇所であった。溶接金属が突き出た破面においても, 写真-6(c-2)のように, 疲労き裂の起点は溶接止端と思われるものであった。定点荷重疲労試験を行った A-1 試験体, A-2 試験体と B-1 試験体では, 上記のような破面は観察されなかった。

写真-7 に A-4 試験体で観察されたいくつかの疲労破面を示す。写真(a)に示す WG1 下-N では, 疲労き裂の先端

形状から判断して W 面から少なくとも 3 つの疲労き裂が生じている。E 面からも溶接止端に沿った回し溶接の端部近傍から生じた半楕円形の疲労き裂が観察される。

写真(b)に示す WG4 下-N では, W 面から特異な形状の疲労き裂が生じている。4 つ程度のき裂が合体して, このような形状のき裂となったものと推測されるが, 面外ガセット溶接部の定点荷重疲労試験で観察される疲労き裂と比較すると, 幅に比べて深さが大きくなっている。写真(c-1)は WG3 下-S のガセット側での疲労破面, 写真(c-2)は母板側の疲労破面を示している。先述のように, 疲労き裂がまわし溶接止端に沿って進展する領域が長い

表-4 溶接止端に沿った疲労き裂の長さ (mm)

	A-1(定点)	A-2(定点)	B-1(定点)	A-3(移動)	A-4(移動)	B-2(移動)
WG1 下-S	×	139	17.7	17.6*	×	13.3*
WG1 下-N	10.5	13.3	21	36.7*	31.4*	24.8
WG2 下-S	23.8	25.4	20.4	43.9	39.4	30.8
WG2 下-N	26.9	15.8	24.4	27.8*	34	36.9
WG3 下-S	25.2	21.9	20.2	39.4	32.5	47.8
WG3 下-N	25.2	26.8	23.5	34	41.8	37.8
WG4 下-S	24.1	20.3	18.1	32.9*	34.5	30.3
WG4 下-N	×	21.6	19.5	×	20.8*	×
WG1 上-S	—	—	×	—	—	×
WG1 上-N	—	—	23.8	—	—	17.5*
WG2 上-S	—	—	16.2	—	—	27.1*
WG2 上-N	—	—	22.7	—	—	×
WG3 上-S	—	—	20.1	—	—	28.8*
WG3 上-N	—	—	×	—	—	×
WG4 上-S	—	—	22.4	—	—	×
WG4 上-N	—	—	×	—	—	×

*疲労き裂が止端に沿った段階であり、さらに長くなる可能性がある。 × き裂検出できず

(a) 全体図

(b) ガセット溶接部 (上面図)

(c) ガセット溶接部 (鳥瞰図)

図-14 試験体モデルの要素分割図

めに、(c-1)のガセット側では破面が凸となって板厚が大きく、(c-2)の母材側では凹となって板厚が小さく撮影されている。

B-2 試験体で観察された疲労破面のいくつかを写真-8に示す。写真(a)に示す WG1 下-N では、W 面に溶接止端に沿った深さ 6mm を超える 2 つの半楕円形の疲労き裂が生じている。さらに、E 面からも複数の位置から生じ

たと思われる疲労き裂が生じている。写真(b-1)に示す WG3 下-N では、主たる疲労き裂が W 面から生じており、E 面からも疲労き裂が生じ、W 面からのき裂と合体した跡（水平方向の段差）が生じている。写真(b-2)は、母板側の破面を示しているが、写真-7(c-2)と同様に板が薄く撮影されている。写真-8(b-3)には、ガセット側破面の鳥瞰写真を示しているが、疲労き裂が溶接止端に沿っている領域が長いことがわかる。写真(c)に示す WG1 上-N では、E 面から少なくとも 3 つの疲労き裂が生じており、それらが合体した跡（段差）が明確に認められる。写真(d)は WG2 上-S の疲労破面を示しているが、止端に沿った長い疲労き裂が生じている。左側のき裂の先端が破面写真からは確認することができないが、これは疲労き裂が進展した溶接止端が曲線状となっているために、脆性破壊させた際にき裂先端までを暴露できなかったためと考えられる。写真(e)に示す WG3 上-S も、WG2 上-S と同様の疲労破面となっている。

(4) 疲労き裂が溶接止端に沿って進展する長さ

前項で示したように、移動荷重疲労試験では、定点荷重疲労試験に比べて、疲労き裂が溶接止端に沿って進展する領域が長く、溶接止端を離れた後は主応力直角方向よりもさらに傾いた方向に進展する。ここでは、定点荷重疲労試験と移動荷重疲労試験での疲労き裂が溶接止端に沿って進展する長さの違いを明らかにする目的で、それぞれの止端に沿うき裂長さを測定した（止端内に潜り込むように進展した部分を含む）。測定は、磁粉探傷試験時の写真あるいは破断面の上部から撮影した写真を対象としてキルビメータを用いて行った。

測定結果を表-4に示す。表中で*の印がついた数値は、

試験終了時の止端に沿った段階で測定したき裂の長さであり、さらに疲労試験を続ければ止端に沿うき裂の長さはさらに大きくなる可能性のあるものである。止端を外れて平坦な母板（ウェブ）に進展したき裂は定点荷重疲労試験で 27 箇所、移動荷重疲労試験で 14 箇所である。これらの止端に沿うき裂長さの平均値は、定点荷重疲労試験で 20.9mm であるのに対し、移動荷重疲労試験では 36.3mm であり、定点荷重疲労試験に比べて 1.7 倍程度長くなっている。

(5) 回し溶接止端部の応力性状

定点荷重疲労試験および移動荷重疲労試験時の溶接止端での応力性状を調べる目的で文献 11)と同じ方法で弾性 FE 解析を行った。この解析では、試験体の対称性（桁軸直角方向）を考慮して、1/2 モデルを対象とした。試験体モデルの要素分割は、ガセット部近傍をソリッド要素、その他の部分をシェル要素で行った。シェル要素とソリッド要素の結合は、ウェブと同じ板厚のシェル要素をソリッド要素の端面に貼り付けることにより行っている。ソリッド要素でモデル化した範囲は、ガセット板を中心として長さ 600mm・高さ 80mm である。ソリッド要素は 8 節点要素であり、溶接止端近傍の要素寸法は 0.2mm としている。溶接脚長は 9.5mm の等脚とし、止端の曲率半径は 1.0mm とした。要素分割図の例を図-14(a)-

(c)に示す。図 (a)は、モデル全体を示したものである。図(b)と(c)は、ガセット溶接止端部を拡大して示している。図(b)はウェブ上面から見たものであり、溶接止端を太線で示している。この図に示すように、ガセット板前面および側面では、溶接止端をガセット板と平行に配置し、その間は 1/4 円の形状でモデル化している。移動荷重疲労試験を対象とした解析では荷重の大きさを 200kN とし、線荷重で与えている。移動荷重を対象する場合の荷重は、上フランジ上を 20~100mm 間隔で移動させた。なお、解析では載荷ブロック等の載荷治具は考慮していない。定点荷重疲労試験では、着目部の公称応力（桁軸方向）が移動荷重疲労試験と同じとなるように調整している。例えば、WG2 下-N では 234kN となる。

B 試験体・定点荷重疲労試験の WG2 下-N（等モーメント区間）と WG2 下-S（せん断区間）を対象とした解析より求めた最大主応力のコンター図を図-15(a), (b)に示す。図中には最も大きい最大主応力が生じる位置と、その方向も示している。その位置は、曲率を与えた溶接止端の溶接ビードに相当する位置である。等モーメント区間に位置する WG2 下-N での最大主応力は回し溶接のやや下で生じているものの、回し溶接中央前面に沿って高い最大主応力が生じている。一方、せん断区間にある WG2 下-S では、主応力の方向が傾くために回し溶接部の上部で最も大きい最大主応力が生じている。定点荷重疲労試験では、このような位置で疲労き裂が生じたものと考えられる。なお、最も大きい最大主応力は、WG2 下-N で 384 N/mm²、WG2 下-S で 409 N/mm²であった。また、それらの方向は、図-15 に示すように溶接止端に対してほぼ垂直である。

図-16 は、移動荷重を受ける際の WG2 下-S のいくつかの荷重位置での最大主応力のコンター図を示している。荷重位置は、S側支点を基準としており、WG2 下-N の直上に荷重がある場合の位置は 1550mm となる。初等理論ではこの位置を境としてせん断応力の向きと主応力の方向が変化することになる。荷重位置 1400mm では、高い主応力が回し溶接部の下部で生じている。荷重位置が

図-15 最大主応力のコンター図（定点荷重）

図-16 荷重移動に伴う最大主応力の変化 (WG2 下-S)

表-5 各試験体・各部位でのき裂進展方向

試験体	A-1(定点)		A-2(定点)		B-1(定点)		A-3(移動)			A-4(移動)			B-2(移動)		
ガセット位置	ア (イ)	ウ エ	ア (イ)	ウ エ	ア (イ)	ウ エ	前ア (イ)	後ア (イ)	ウ エ	前ア (イ)	後ア (イ)	ウ エ	前ア (イ)	後ア (イ)	ウ エ
WG1下-S	68.9 (27.4)	×	62.9 (27.4)	32 30	62.9 (27.4)	30 22	82.3 (-13.4)	114.9 (27.4)	×	65.9 (-13.4)	91.9 (27.4)	×	65.9 (-13.4)	91.9 (27.4)	×
WG1下-N	82.0 (24.1)	25 28	74.9 (24.1)	26 24	74.9 (24.1)	23 23	101.0 (-14.7)	121.8 (24.1)	×	80.8 (-14.7)	97.4 (24.1)	×	80.8 (-14.7)	97.4 (24.1)	×
WG2下-S	93.0 (21.8)	20 18	84.9 (21.8)	19 22	84.9 (21.8)	27 23	112.0 (-15.9)	124.7 (21.8)	57 -25	89.6 (-15.9)	99.8 (21.8)	44 -23	89.6 (-15.9)	99.8 (21.8)	60 -24
WG2下-N	84.7 (0)	4 5	77.3 (0)	2 -3	77.3 (0)	1 3	121.0 (-17.7)	124.5 (19.3)	×	96.8 (-17.7)	99.6 (19.3)	-48 40	96.8 (-17.7)	99.6 (19.3)	-43 55
WG3下-S	84.7 (0)	1 0	77.3 (0)	-2 0	77.3 (0)	-2 4	124.5 (19.3)	121.0 (-17.7)	28 46(-45)*	99.6 (19.3)	96.8 (-17.7)	28 -41	99.6 (19.3)	96.8 (-17.7)	45 -52
WG3下-N	93.0 (-21.8)	-18 -15	84.9 (-21.8)	-30 -22	84.9 (-21.8)	-23 -20	124.7 (21.8)	112.0 (-15.9)	?	99.8 (21.8)	89.6 (-15.9)	-45 32	99.8 (21.8)	89.6 (-15.9)	-46 28
WG4下-S	82.0 (-24.1)	×	74.9 (-24.1)	-24 -24	74.9 (-24.1)	-25 -22	121.8 (24.1)	101.0 (-14.7)	×	97.4 (24.1)	80.8 (-14.7)	44 -43	97.4 (24.1)	80.8 (-14.7)	28 -50
WG4下-N	68.9 (-27.4)	×	62.9 (-27.4)	-29 -26	62.9 (-27.4)	-33 -28	114.9 (27.4)	82.3 (-13.4)	×	91.9 (27.4)	65.9 (-13.4)	×	91.9 (27.4)	65.9 (-13.4)	×
WG1上-S	<p>き裂進展方向の定義 右回りを正とする E面</p>				-62.9 (-27.4)	×	ア: 主応力の大きさ イ: 主応力直角方向 (鉛直軸に対して) ウ: き裂進展方向 (鉛直軸に対して) ガセット上側 エ: き裂進展方向 (鉛直軸に対して) ガセット下側 ×: き裂ウェブ面まで進展しておらず、き裂進展方向が確認できなかった部位 * 分岐き裂が生じている 46度の方が主たるき裂			-65.9 (13.4)			-65.9 (13.4)	-91.9 (-27.4)	×
WG1上-N					-74.9 (-24.1)	-21 -30							-80.8 (14.7)	-97.4 (-24.1)	×
WG2上-S					-84.9 (-21.8)	-22 -26							-89.6 (15.9)	-99.8 (-21.8)	×
WG2上-N					-77.3 (0)	1 0							-96.8 (17.7)	-99.6 (-19.3)	×
WG3上-S					-77.3 (0)	-2 -6							-99.6 (-19.3)	-96.8 (17.7)	×
WG3上-N					-84.9 21.8	×							-99.8 (-21.8)	-89.6 (15.9)	×
WG4上-S					-74.9 (24.1)	20 25							-97.4 (-24.1)	-80.8 (14.7)	×
WG4上-N					-62.9 (27.4)	×							-91.9 (-27.4)	-65.9 (13.4)	×
ア: 主応力の大きさ(N/mm ²) イ: 鉛直方向に対する主応力直角方向(度) ウ: 鉛直方向に対するき裂進展方向(度) ガセット上側 (エ: 下側)															
×: き裂進展方向が確認できなかった部位															

1500mmになると応力集中域が上へと移動し、1560mmでは回し溶接中央に応力集中域が移動している。そして、荷重位置 1600mmで応力集中域が回し溶接の上へ移動し、1700mmになると応力集中位置は回し溶接の上部で生じている。なお、回し溶接の下側で最も大きな最大主応力は荷重位置 1500mmで生じており、その大きさは 368 N/mm²であった。回し溶接中央で最も大きい最大主応力が生じた荷重位置は 1560mmであり、その大きさは 369 N/mm²であった。そして回し溶接の上部で最も大きな最大主応力が生じていた荷重位置は 1700mmであり、その値は 385 N/mm²であった。これらの主応力の方向は、すべて溶接止端に対してほぼ垂直な方向である。これらの最大主応力の大きさは、定点荷重等モーメント区間と同程度である。

以上のように、最大主応力は溶接止端を舐めるように移動している。これが、移動荷重疲労試験での疲労き裂が溶接止端に沿って進展する領域が、定点荷重疲労試験より長い原因と考えられる。

(6) き裂進展方向

前章で述べたように、定点荷重疲労試験では疲労き裂が溶接止端を離れた後の進展方向は、ほぼ主応力直角方向となっている。それに対し、移動荷重疲労試験では、溶接止端を巻き込むように進展している。表-5に各ガセ

ット端で観察された疲労き裂の進展方向と各位置のガセット板厚中心位置に対して梁理論から求めた最大主応力(引張側)と大きさとその直角方向、あるいは最小主応力(圧縮側)の大きさと直角方向 1616を示す。なお、ガセット板上面・下面で計算される桁軸方法応力は、ガセット板厚中央と 5%程度異なる。角度の定義は表中に示す通りである。また、ここに示す角度は E(東)面から見たものである。なお、移動荷重の場合には着目部直上を荷重が通過する際に、主応力の大きさと方向が変化するため、通過前後の値を示している。このときの荷重は S(南)側から N(北)側へ移動するものとしている。

定点荷重疲労試験では、ガセットの回し溶接から平坦なウェブ板表面まで進展したき裂については、いずれのガセット端においても疲労き裂はほぼ主応力直角方向に進展している。一方、移動荷重疲労試験では、先に述べたように回し溶接部を巻き込むように進展しているものがほとんどである。表-5で S 側のガセット端では上側の進展方向が負、下側が正の符号となっているものがそれに対応する。N 側のガセット端では逆となる。これらのき裂進展方向は主応力直角方向よりもさらに大きな角度となっている。これは、前項で示したように移動荷重疲労試験では、溶接止端に沿って主応力発生位置が移動するために、止端に沿って進展する亀裂が長くなり、その時点での亀裂の方向が大きく傾くためと考えられる。ま

図-17 橋軸方向応力で整理した移動荷重疲労試験結果

図-18 最大主応力で整理した移動荷重疲労試験結果

た、既報¹⁰⁾で示したように、傾いたき裂はさらに傾いた方向に進展する傾向にあるということも原因しているものと考えられる。ただし、詳細については、さらに検討する必要があると考えている。

(7) 疲労強度

各面外ガセット溶接止端部の等価公称応力（橋軸方向）範囲で整理した疲労試験結果を図-17に示す。等価応力範囲で整理した理由は、各部位で図-10に示したような応力変動となることによる。すなわち、この応力変動にレインフロー法を適用すると2つの応力範囲が求められることによる。図の横軸の疲労寿命は、き裂の鉛直方向投影長さが40mmとなった時の荷重繰返し数である。図中には、JSSC 指針で示されている各強度等級に対応する疲労設計曲線も示している。図中で()を付した数値はデータ数である。面外ガセット溶接継手の疲労強度等級はGとされているが、ここでのデータはG等級の疲労強度曲線の下に位置している。

等価主応力範囲で整理した疲労試験結果を図-18に示す。その際の主応力範囲は、文献9)で提案しているように、最も大きな主応力とその方向での最も小さい応力の差として求めている。等価軸方向公称応力範囲で整理した場合に比べて、疲労試験データのばらつきが小さくなっている。図中のマークは、引張側ガセットと圧縮側ガセットで変えているが、両者で明確な違いは認められない。ただし、圧縮側ガセットでは未破断データが多い。既報¹⁰⁾で示したように、圧縮側では荷重点に近いために圧縮の鉛直方向応力が大きく、最小主応力が引張側のガセット端の最大主応力よりも大きくなる。したがって、圧縮側の疲労強度は引張側ガセットよりも低くなるものと予想されるが、先述のように両者の疲労強度に明確な

図-19 移動荷重疲労試験結果と他の試験結果の比較

差はなかった。これは、主応力の変動幅だけではなく、疲労強度に対して応力比の影響が生じているためと考えられる。圧縮繰返し応力を受ける場合の疲労強度については、今後さらに検討する必要があると考えている。

図-19は、移動荷重疲労試験より得られた等価主応力範囲（梁理論から計算したもの）と疲労寿命の関係を定点荷重疲労試験結果と比較したものである。図中には文献10)に示されている2点交互載荷の疲労試験結果、そして既往の定点荷重疲労試験の結果も示している。ここでは、比較を容易とするため、未破断データは除いている。本実験で得られた定点荷重疲労試験の結果は、文献10)の2点交互載荷および既往の定点荷重疲労試験の結果とほぼ一致している。これらに対し、移動荷重疲労試験結果は、20～30%程度疲労強度が低くなっており、データの下限は疲労強度等級Gの疲労強度曲線よりも下に位置している。このように移動荷重下で疲労強度が低下する原因は、図-16に示したように最大主応力位置が溶接止端の広い範囲を移動するために定点荷重疲労試験に比

べて疲労き裂が発生しうる領域が広くなることにありと考えられる。すなわち、主応力が溶接止端形状が鋭い場所を探すように移動し、き裂の起点が多くなる、それにより小さい段階での疲労き裂の形状が扁平となって応力拡大係数が大きくなるのが疲労強度低下の原因と考えられる。

溶接止端に沿うき裂長さは、せん断応力と軸方向応力の比、また回し溶接部の形状にも依存するものと考えられる。主応力方向が変化する溶接部の疲労強度については、さらに検討が必要と考えている。

5. まとめ

荷重の移動に伴い主応力方向が変化する応力場にある面外ガセット溶接継手の疲労強度と疲労き裂の発生・進展挙動を明らかにする目的で定点荷重（4点曲げ）疲労試験と移動荷重（輪荷重走行）疲労試験を行った。ここで得られた主な結果は以下のとおりである。

- (1) 定点荷重では、従来から知られているように、引張繰返し応力場では最大主応力の方向に対して直角方向、圧縮繰返し応力場では最小主応力方向に対して直角方向に疲労き裂が進展する。
- (2) 移動荷重を受ける場合、定点荷重に比べて、溶接止端において疲労き裂の発生数が多く、き裂が止端に沿って進展する領域が長い。
- (3) 移動荷重下では、回し溶接を巻き込むように疲労き裂が進展する。また、主応力直角方向よりもさらに傾いた方向に進展する。これは、溶接止端に沿う疲労き裂が長いために止端を離れる前からき裂が傾いているためと考えられる。
- (4) 移動荷重下では、回し溶接の端部から発生した疲労き裂が止端中央に対して潜り込むように進展し、溶接部にオーバーラップが生じているような疲労破面となることがある。
- (5) 従来から知られているように、軸方向応力とせん断応力の組み合わせ応力場での疲労試験結果は、軸方向応力範囲よりも主応力範囲で整理するのがよい。
- (6) 最大主応力範囲で整理した場合、主応力方向が変化する応力場にある面外ガセット継手の疲労強度は、主応力方向が変化しない応力場よりも、20～30%程度低い。その下限は JSSC 指針の疲労強度等級 G の疲労強度曲線よりも下に位置している。
- (7) 主応力方向が変化する応力場で疲労強度が低くなる原因は、最大主応力位置が溶接止端の広い範囲を移

動するため定点荷重疲労試験に比べて疲労き裂が発生しうる領域が広くなることにありと考えられる。

主応力方向が変化する応力場では、特異な疲労き裂の発生・進展挙動を示し、それが原因で疲労強度が低くなるという結果を示した。しかし、橋梁には床版が設置されているため、桁に作用する荷重はある程度分配される（上フランジでの載荷面積が広がる）ため、またせん断応力と曲げ応力の比を考慮すれば、ここで行った移動荷重疲労試験とは異なる応力性状となり、実橋ではここで得られたような大きな疲労強度の相違は生じないとも考えられる。移動荷重下の橋梁・横部材取り付け部の応力性状と疲労強度については、さらに検討する必要があると考えている。ただし、クレーンガーダーは、ここで行った移動荷重疲労試験に近い状況にあると考えられる。

謝辞：本研究は、科学研究費基盤研究(B)（課題番号：26289147）の補助を受けて実施したものである。また、本研究の一部は村山健人氏（現在、北海道庁）の卒業研究として行われたものである。ここに記して感謝します。

参考文献

- 1) 西川和廣：道路橋における疲労問題と補修・補強，橋梁と基礎，第17巻，第8号，pp. 19-23, 1983.
- 2) 三木千壽，坂野昌弘，舘石和雄，福岡良典：鋼橋の疲労損傷事例のデータベースの構築とその分析，土木学会論文集，No. 392/I-9，pp. 403-410, 1988.
- 3) 日本道路協会：鋼橋の疲労，丸善，1997.
- 4) 多田宏行：橋梁技術の変遷，鹿島出版会，2000.
- 5) 日本鋼構造協会：既設鋼橋部材の耐力・耐久性診断と補修・補強に関する資料集（鋼橋の維持管理とそれを支える要素技術），テクニカルレポート，No. 51, 2002.
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅱ 鋼橋編，丸善，2002.
- 7) 日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針，丸善，2002.
- 8) 日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説一付・設計例—2012年改定版，技報堂出版，2012.
- 9) 平山繁幸，森 猛，望月建志：主応力方向が変化するウェブガセット溶接継手部の疲労強度評価，構造工学論文集，Vol. 51A，pp. 1027-1036, 2005.
- 10) 森 猛，平山繁幸：主応力方向が変化する応力場にある面外ガセット溶接継手の疲労試験，土木学会論文集A1（構造・地震工学），Vol. 69, No. 2，pp. 245-256, 2013.
- 11) 森 猛，松井喜昭，平野秀一，原田英明，村越潤：移動荷重を受ける鋼I桁ウェブガセット溶接部の応力性状，土木学会論文集A1（構造・地震工学），Vol. 72, No. 2，pp. 350-363, 2016.

(2016. 11. 24 受付)

FATIGUE STRENGTH OF WEB-GUSSET WELDED JOINTS IN I-SECTION GIRDER UNDER MOVING LOADS

Takeshi MORI, Yoshiaki MATSUI, Ayumu SATO, Hideaki HARADA
and Jun MURAKOSHI

Fixed point load fatigue tests (four points bending tests) and the moving load fatigue tests (wheel load driving tests) on I-section girder specimens with web-gusset welded joints have been performed in order to make clear fatigue crack initiation and propagation behavior from the weld toe of the joint and the fatigue strength under variation in principal stress direction. The test results suggested that the fatigue strength under moving loads is lower around 20 to 30% than the strength under the fixed point loads, and fatigue crack extending along the weld toe is long compared with that in fixed point loads, and the fatigue crack after leaving from the weld toe propagates in more inclined direction compared with the direction perpendicular to the principal stress direction.