

鋼道路橋の疲労設計法における信頼性向上に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 25～平 28

担当チーム：橋梁構造研究グループ

研究担当者：玉越隆史、村越潤、木ノ本剛、
平野秀一、佐藤歩、原田英明

【要旨】

□本研究では、疲労設計法の信頼性向上を達成するための手法の一つと考えられる疲労強度等級細分化の実現可能性を検証するため、疲労設計上クリティカルになりやすい面外ガセット継手を対象に、継手寸法を変化させた実物大疲労試験や、面外ガセットを有する桁試験体の移動荷重（輪荷重走行）疲労試験を行い、寸法効果や載荷方法が疲労強度に及ぼす影響を実験的に確認した。

□その結果、ガセットの長さが大きくなるほど疲労強度は低下する傾向にあることがわかった。また、主応力が変化する応力場での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、疲労強度等級にして1ランク程度低いことを確認した。

キーワード：疲労強度、面外ガセット、寸法効果、輪荷重走行試験

1. はじめに

我が国における橋長 15m 以上の道路橋の数は約 16 万であり、その約 4 割が鋼橋である。近年、鋼道路橋の溶接部において、疲労による損傷が顕在化しており、平成 14 年の「鋼道路橋の疲労設計指針」¹⁾（以下、「疲労指針」）発刊以降、平成 24 年に発刊された「道路橋示方書・同解説」²⁾においても、鋼道路橋の設計に疲労設計が導入されてきている。疲労指針¹⁾では、過去に実施された疲労試験結果を統計処理し、疲労試験結果の下限に相当する非超過 97.7%の疲労強度と疲労設計曲線を比較することにより設定された継手形式や構造細目ごとの「疲労強度等級」を用いることとされている。

一方で、疲労強度等級の根拠となっている疲労試験結果のばらつきは小さくないことに加え、使用される継手の部位や位置によっては、き裂発生部の応力性状が、従来の疲労試験と実橋とでは乖離があることが指摘されている³⁾。

疲労設計法の信頼性向上を達成するための手法の一つとして、疲労照査結果に支配的に影響する疲労強度等級について、継手の実橋での使われ方（継手の形状・寸法、溶接部の応力状態等）を考慮して細分化する方法が考えられる。本研究では、面外ガセット継手を対象として、疲労強度等級細分化の実現可能性について検証した。

主桁ウェブに取付く水平補剛材や下横構ガセット

等の面外ガセット継手は、100 mm以上のガセットを隅肉溶接した面外ガセット継手としてG等級の疲労強度等級に分類され、実橋で用いられる溶接継手としては最も強度等級が低いため、疲労照査を満たさない可能性が高い継手である。「疲労指針」や「鋼構造物の疲労設計指針」（以下、「JSSC 指針」）⁴⁾における面外ガセット継手の疲労強度等級は、隅肉溶接で非仕上げの場合、ガセット長さ 100 mmを下回る場合にF等級、100 mm以上の長さの場合にG等級と分類されている。これは、疲労亀裂の起点となるガセット端の応力集中がガセット取付け長さの影響を受けるため⁵⁾とされているが、疲労試験機の制約の問題などからガセット長さは小型試験体で50 mm～150 mm、桁試験体で300 mm程度の大きさの疲労試験結果がほとんどであり、道路橋に取付く実大サイズの面外ガセット継手を考えると必ずしも十分な試験データが得られているとは言い難い。例えば、下横構が取り付くガセットであれば、各種機関の構造標準図等⁶⁾から付加板寸法は少なくとも幅250 mm以上、長さ500 mm以上である。さらに、近年の構造物の大型化や少数主桁の採用に伴う主桁寸法の大型化に伴い、水平補剛材寸法等も大型化されており、これらの大型化が面外ガセット継手の疲労強度に与える影響を把握する必要がある。

面外ガセット継手の寸法効果に関しては、これまでも各種の検討が実施されている。ガセット長さ

の影響に関して Smith ら⁷⁾は、破壊力学の手法を用いた疲労き裂進展解析によりガセット長さや高さの増加により疲労寿命が低下するが、長さや幅の影響は比較的 150 mm 以下の範囲で大きいことを示している。また、穴見ら⁸⁾は桁試験体での溶接止端部での応力集中係数が小型試験体と比較して大きな値を示すことを解析的に確認し、更に溶接止端部の応力集中が、主板厚、主板幅、付加板長さだけでなく、フランジ板などの他の面外付加物の存在やせん断力の存在の影響を受けることを確認している。さらに、最近の検討⁹⁾においては、実橋における面外ガセット継手の寸法効果を確認するために、最大寸法を主板幅で 1,000 mm、ガセット長さで 1,000 mm、付加板高さで 500 mm までとしたパラメトリック解析により溶接止端部の応力集中を検討し、ガセット長さおよび主板幅の増大により止端部応力集中は増大し、その増大傾向はガセット長さとは主基板幅のバランスに大きく依存することを示している。これらの検討では解析的な検討が中心となっており、解析結果を裏付ける疲労試験データは必ずしも十分とは言えない。特に実物大の面外ガセットを有する疲労試験はクープン試験では下川ら¹⁰⁾、桁試験体では Fisher ら¹¹⁾の結果のみであり、実物大の面外ガセット継手で長さの影響を確認した疲労試験は実施されていない。

また、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⁴⁾。しかし、この位置の主応力方向は、荷重の移動に伴い大きく変化する。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。森らは、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¹²⁾。また、桁試験体の 2 か所に設置したアクチュエータ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ほぼ一致するという結果を示している¹³⁾。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

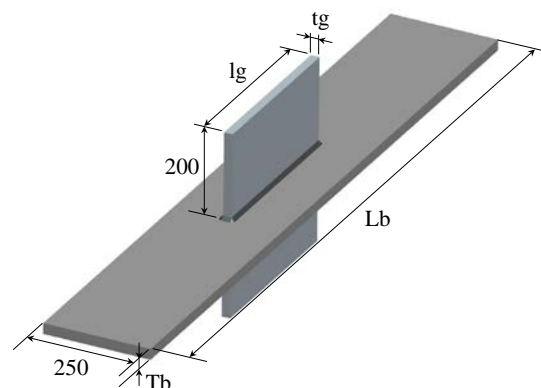


図-1 面外ガセット継形状

表-1 継手寸法の組み合わせ

		寸法値【mm】			
		tg	Tb	lg	LB
試験体	A	9	9	200	1200
	B	9	9	400	1600
	C	9	9	800	2000
	D	25	25	400	1600
	E	25	40	400	1600

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。

以上のことから、本研究では、疲労設計上クリティカルになりやすい面外ガセット継手を対象に、継手寸法を変化させた実物大疲労試験や、面外ガセットを有する桁試験体の移動荷重（輪荷重走行）疲労試験を行い、寸法効果や載荷方法が疲労強度に及ぼす影響を実験的に確認することで、疲労強度等級細分化の実現可能性を検証した。

2. 寸法効果が疲労強度に与える影響

2.1 疲労試験体

疲労試験に用いた面外ガセット継手の形状と寸法を図-1に、継手寸法の組合せを表-1に示す。試験体は鋼桁橋の主桁ウェブと下横構ガセットや水平補剛材の面外ガセット継手を想定して主板厚、ガセット板厚を 9 mm とし、長さを 200 mm, 400 mm, 800 mm とした試験体と、ガセット長を 400 mm と固定して主板厚 25 mm, 40 mm, ガセット板厚を 25 mm とした試験体をそれぞれ 9 体、合計 45 体の試験体を製作した。なお、主板幅はガセットによる応力集中の影響を極力大きくするために試験機に取付られる最大の寸法として 250 mm とした。試験体に用いた鋼材の機械的性質及

表-2 試験体に使った鋼材の機械的性質及び化学成分

材質	板厚 (mm)	機械的性質			化学成分											
		降伏点 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	伸び (%)	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cu (%)	Ni (%)	Cr (%)	Mo (%)	V (%)	Ceq	Pcm
SM490YA	9	417	550	25	0.16	0.38	1.39	0.015	0.004	0.01	0.01	0.01	0	0.001	0.41	0.25
SM490YB	25	390	540	27	0.17	0.41	1.42	0.018	0.006	0.01	0.01	0.01	0	0.002	0.43	0.26
SM490YB	40	388	552	27	0.16	0.34	1.36	0.015	0.004	0.01	0.01	0.03	0	0.033	0.41	0.25

表-3 使用した溶接材料の機械的性質及び化学成分

ワイヤの種類	機械的性質				化学成分						
	降伏点 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	伸び (%)	シャルピー吸収エネルギー (J)	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cu (%)	Ti+Zr (%)
	YGW11	450	533	30	142	0.07	0.75	1.58	0.01	0.012	0.26

び化学成分を表-2 に示す。

ガセットの主板への取付は鋼橋の製作で最も一般的なCO2半自動溶接とし、溶接材料には応力集中が高い止端形状となるようにソリッドワイヤを用いた。使用した溶接材料の機械的性質及び化学成分を表-3 に示す。

2.2 試験方法

2.2.1 静的荷重試験

実験に用いた試験体の面外ガセット継手は実大サイズの寸法であり、溶接による引張残留応力が確実に導入されると考えられるが、一方で溶接歪による初期不整の影響が懸念された。そこで、疲労荷重前に引張残留応力の導入と初期不整の影響確認を目的として静的荷重試験を実施した。

試験体に貼付した歪ゲージ配置を図-2 に示す。ガセットから200mm離れたA位置の歪ゲージでは、試験体に軸引張応力が均等に導入されていることを確認し、ガセット先端位置でガセット板厚中心から75mmの位置に貼付したB位置の歪ゲージでは、ガセット先端位置における試験体の板曲げ応力の有無を確認した。また、溶接止端部の残留応力の確認、および疲労荷重中の亀裂進展による歪変動の初期段階での検知を目的として溶接止端から3mm位置(C位置)にゲージ長1mmの歪ゲージを貼付した。なお、3mmはゲージ貼付け時の鋼材研磨作業において、溶接止端部に接触しない必要な離隔として設定した。

静的荷重試験は0kNから200kNまで引張荷重を50kNずつ増加、減少させる荷重を2回、0kNから400kNまで50kNずつ増加し、100kNずつ減少させる荷重を2回行う荷重方法とした。図-3にC位置の歪変動の一例を示すが、初荷重の荷重初期段階、2回目の荷重で初荷重の上限荷重200kNを超えた段階で降伏を示す挙動を示しており、溶接止端部付近に降伏応力に近い引張残留応力が導入されている事が

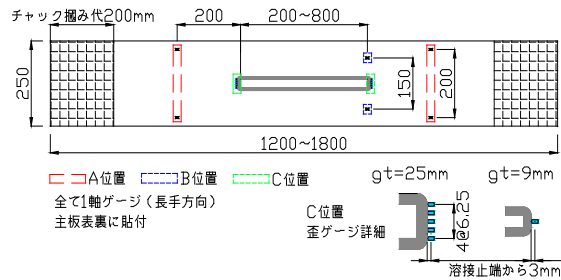


図-2 歪ゲージ配置

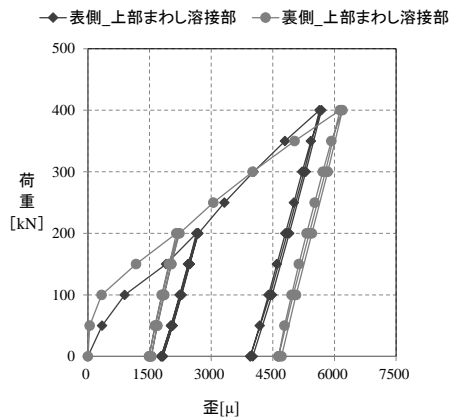


図-3 C位置の歪変動の一例

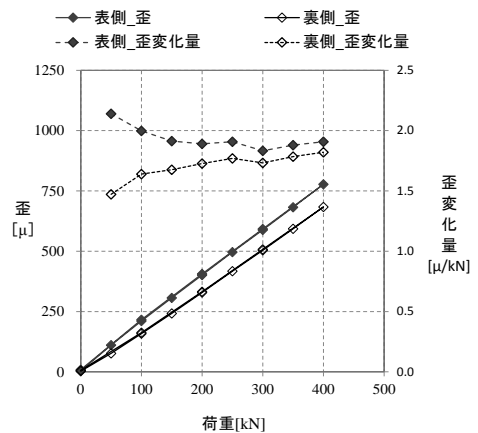


図-4 B位置の荷重-歪関係及び単位荷重あたりの歪変化量

表-4 試験条件

		応力範囲 【Mpa】	上限荷重 【kN】	下限荷重 【kN】	荷重範囲 【kN】	最大応力 【Mpa】	最小応力 【Mpa】	応力比
試験体	A	80	500.0	320.0	180.0	222	142	0.64
	B	65	500.0	353.3	146.8	222	157	0.71
	C	50	500.0	387.0	113.0	222	172	0.77
	D	80	1000.0	500.0	500.0	160	80	0.50
		65	1000.0	593.8	406.3	160	95	0.59
		50	1000.0	687.5	312.5	160	110	0.69
	E	80	1000.0	200.0	800.0	100	20	0.20
		65	1000.0	350.0	650.0	100	35	0.35
		50	1000.0	500.0	500.0	100	50	0.50



写真-1 疲労試験状況

確認できる。なお、この挙動は全ての試験体で確認している。図-4 に B 位置での 0kN から 400kN までの 2 回目载荷時の荷重-歪関係、および単位荷重あたりの歪変化量の一例を示すが、载荷初期段階では表裏の単位荷重あたりの歪変化量の差が大きく、溶接による初期不正の影響が確認できる。この表裏差は载荷荷重の増加に伴い小さくなるため、文献 14) を参考に表裏面の歪差が 10% 以下となるように疲労载荷における上限荷重を決定した。

2.2.2 疲労試験

疲労試験は動的能力 1000kN の油圧サーボ制御式の疲労試験機を用いて実施した。応力波形は正弦波形で、繰返し速度は 5~10Hz である。疲労試験における公称応力範囲は 80MPa、65MPa、50MPa の 3 段階とし、各応力範囲で 3 体の試験を実施した。各試験体の試験条件を表-4 に示す。本試験での応力比は初期不整の影響を極力排除するために 0.2~0.77 の範囲となっており、応力比がほぼ 0 で行われる通常の溶接継手の疲労試験と異なるが、溶接部近傍で降伏

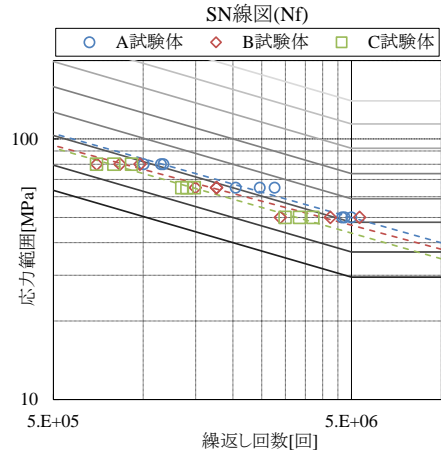


図-5 S-Nf 線図 (ガセット長さ着目)

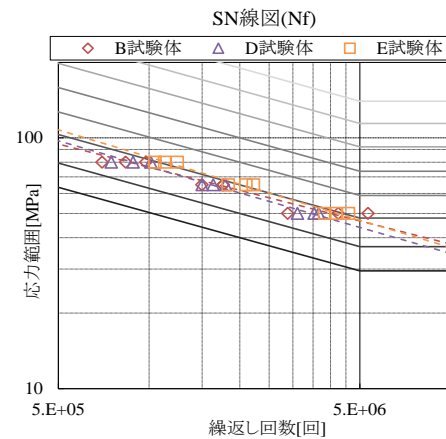


図-6 S-Nf 線図 (ガセット板厚着目)

強度付近の引張残留応力が導入されていることを確認しており、応力比の影響は受けないものと考えられる。

疲労载荷中、試験体に貼付した歪ゲージを動歪計に接続し、1000 回の繰返し载荷毎に 5 载荷分の歪波形を取得し、溶接止端から 3 mm 位置の歪範囲の変動を確認した。疲労試験は疲労亀裂の進展により残存断面積が減少し、载荷荷重に対して残存断面での塑性変形が顕著になった段階で試験終了とした。具体的には、試験体変位が 10 mm を超えた時点で試験機を停止し、その後、静的に変位を単調増加させて試験体を破断した。疲労载荷後の試験停止時における試験体状況を写真-5 に示す。

2.3 疲労試験結果

合計 45 体の疲労試験結果を試験停止までの繰返し回数 (Nf) で整理した S-Nf 線図として主板厚が一定でガセット長さを変化させたシリーズを図-5 に、ガセット長さが一定で主板厚、ガセット板厚を変化させたシリーズを図-6 に示す。なお、S-N 直線回帰

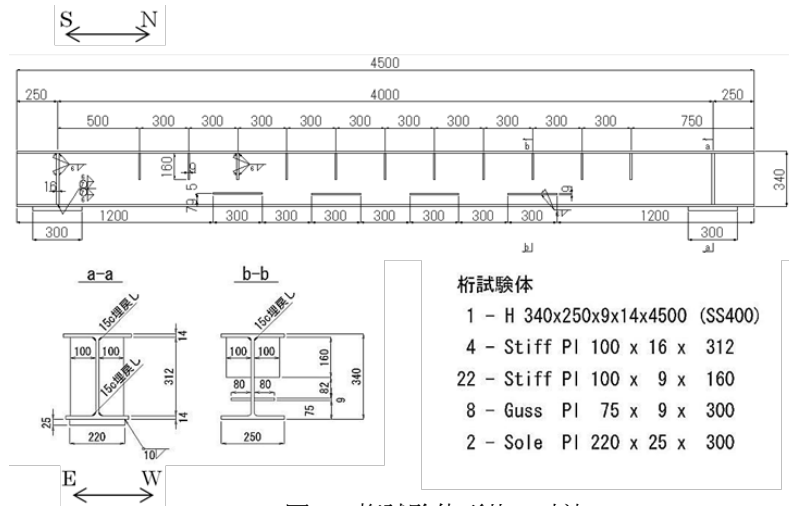


図-7 桁試験体形状・寸法



写真-2 定点荷重疲労試験状況

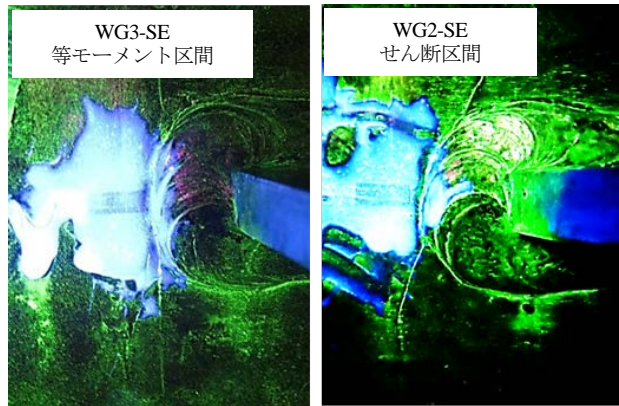


写真-3 疲労き裂の一例（定点荷重）

は文献4)にしたがって、次式の $\log \Delta \sigma$ を独立変数、 $\log N_f$ を従属変数として回帰した。

$$\log N_f = -m \cdot \log \Delta \sigma + C$$

図-5, 6より、ガセット長さを変化させた試験体シリーズではガセット長さの増加により疲労強度が低下することがわかる。一方、主板厚とガセット板厚を変化させた試験シリーズでは、主板厚40mmの試験体で疲労強度が若干上昇するが、主板厚9mmと25mmの試験体での差は明確ではない。

3. 载荷方法の違いが疲労強度に与える影響

3.1 試験体

試験体は、図-7に示すように、H形鋼 (SS400) の4か所にフラックスコールドワイヤを用いたC02法でガセットを接合したものである。各ガセットを南(S)側から順番にWG1~WG4と呼ぶ。面外ガセットはウェブの両面に設けている。2つのウェブ面を東(E)、西(W)で区別する。また、各ガセットの両端を南(S)、北(N)で区別する。例えば、WG2の南側端の

ウェブ東面のガセット端をWG2-SEと呼ぶ。このような試験体を3体製作し、1体を主応力方向が変化しない定点荷重疲労試験に、2体を主応力方向が変化する移動荷重試験に用いた。

3.2 定点荷重疲労試験

定点荷重疲労試験は、繰り返し荷重を10~240kN、繰り返し速度を0.65Hzとして4点曲げで行った。その際の支間は4000mm、荷重点間距離は600mmとしている。ガセット端から疲労き裂が進展して、その長さが50mm以上となった場合には、き裂先端に円孔をあけ、それをボルト締めすることにより補修した。このような補修を行うことにより、多くの位置での疲労き裂を観察できるようにした。定点荷重試験の状況を写真-2に示す。

写真-3にこの試験で観察された疲労き裂の例を示す。従来から知られているように、等モーメント区間では鉛直方向に疲労き裂が進展しており、せん断区間では主応力方向と直角に進展している。

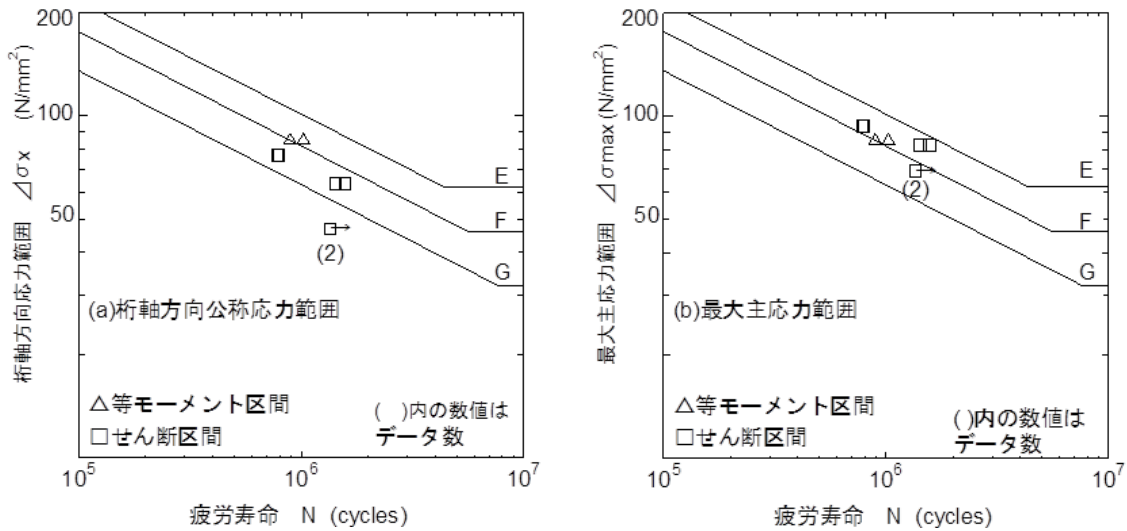


図-8 定点荷重疲労試験結果



写真-4 移動荷重疲労試験状況

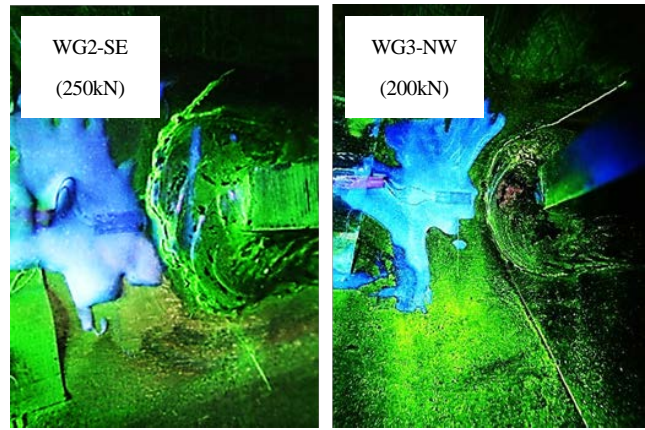


写真-5 疲労き裂の一例（移動荷重）

疲労寿命を亀裂長さが40mmに達した荷重繰返し数と定義し、公称応力範囲で疲労寿命を整理した。その結果を図-8(a)に示す。図中には、JSSC 指針⁴⁾に示されている設計疲労強度曲線も示している。等モーメント区間の疲労寿命は、応力範囲が大きいかにかかわらず、せん断区間に比べて長くなっている。図-8(b)は最大主応力範囲で疲労試験結果を整理したものである。このような整理を行うと、等モーメント区間、せん断区間にかかわらず、疲労試験データが設計曲線とほぼ平行となっている。ここで得られた結果は、JSSC 指針⁴⁾でこの継手に対して規定されているG等級の設計曲線を満たしている。

3.3 移動荷重疲労試験

移動荷重疲労試験は輪荷重走行試験機を用いて行った。輪荷重は、支間4,000mmの内、中央の3,000mmの範囲を移動させている。この試験機は通常床版の疲労試験に用いられている。輪荷重は1体

目で250kN、2体目で200kNとした。移動荷重疲労試験の状況を写真-4に示す。

写真-5にこの試験で観察された疲労き裂の例を示す。き裂は主応力方向と直角ではなく、さらに傾いた角度で進展している。また、ガセットの上下で進展の方向が異なっている。

最大主応力範囲で整理した疲労試験結果を図-9に示す。なお、荷重が南から北、北から南に移動する際の直目点の応力波形は異なるため、2方向の移動それぞれについてレインフロー法を適用し、抽出される2つの最大主応力範囲の等価応力範囲としている。図中には、定点荷重疲労試験結果も示している。移動荷重試験で得られたデータは、G等級の設計曲線よりも下に位置しており、定点荷重試験で得られたデータとの差は強度等級1ランク程度である。

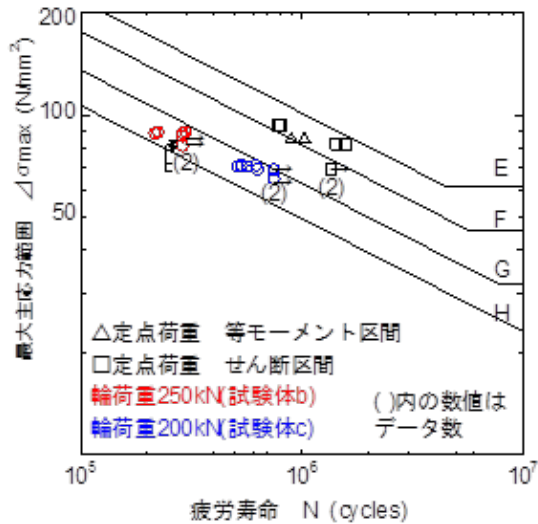


図-9 移動荷重疲労試験結果

6. 結論

疲労設計法の信頼性向上を達成するための手法の一つと考えられる疲労強度等級細分化の実現可能性を検証するため、面外ガセット継手を対象に、継手寸法を変化させた実物大疲労試験や、面外ガセットを有する桁試験体の移動荷重（輪荷重走行）疲労試験を行い、寸法効果や載荷方法が疲労強度に及ぼす影響を実験的に確認した。

継手寸法をパラメータとした実物大試験体を対象に行った1軸疲労試験から得た結論は以下である。

- (1) ガセット長さの増加により疲労強度が低下する。
- (2) 主板やガセットの板厚の差による影響は明確ではない。

面外ガセットを有する桁試験体を対象に行った定荷重疲労試験及び移動荷重疲労試験から得た結論は以下である。

- (3) 主応力方向が変化する応力場での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、疲労強度等級にして1ランク（25%）程度低い。

以上のことから、面外ガセット継手において、実橋での使われ方（継手の形状・寸法、溶接部の応力状態等）に着目した疲労強度等級の細分化は実現可能であり、他の継手についても同様の着眼で疲労強度等級を細分化することで、疲労設計法の信頼性が向上する可能性がある。

参考文献

- 1) 日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針，丸善，2002.2)
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，II 鋼橋編，丸善，2002.
- 3) 森猛，松井喜昭，佐藤歩，原田英明，村越潤：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，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），2017.
- 4) 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.
- 5) 山田健太郎，三ツ木幸子，近藤明雄：ガセット溶接部材の疲れ強さと設計基準，構造工学論文集，Vol.32A，pp.25-33，1986.3.
- 6) 首都高速道路株式会社：橋梁構造物標準図集（鋼構造物編），2007.7.
- 7) Smith, I. F. and Gurney, T. R.: Changes in the Fatigue Life of Plates with Attachments due to Geometrical Effects, Welding Research Supplement, 1986. 2000.
- 8) 穴見健吾，三木千壽：溶接継手部の疲労強度の寸法効果に関する研究，鋼構造論文集 4(14)，pp.9-17，1997.6.
- 9) 穴見健吾，合田雄亮，内田大介，平山繁幸，判治剛：面外ガセット溶接継手の疲労強度の寸法効果に関する一考察，構造工学論文集 Vol.60A，2014. 3.
- 10) 下川浩資，竹名興英，伊藤文夫，三木千壽：800Mpa級鋼材の大型ガセット継手の疲労強度，構造工学論文集，Vol.33A，1987.3.
- 11) Fisher, J. W., Barthelemy, B. M., Mertz, D. R. and Edinger, J. A. : Fatigue behavior of full-scale welded bridge attachments, NCHRP Report 227, Transportation Research Board, National Research Council, USA, November, 1980.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) JIS Z 3103-1987 アーク溶接継手の片振り引張疲れ試験方法

Study on improvement of reliability in fatigue design method of steel road bridge

Budgeted : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2013-2016

Research Team : Bridge and Structural Engineering

Research Group

Author : TAMAKOSHI Takashi

MURAKOSHI Jun

KINOMOTO Takeshi

HIRANO Syuichi

SATOU Ayumu

HARADA Hideaki

Abstract : In this research, in order to verify the feasibility of segmentation of fatigue strength classification, which is considered as one of the methods to achieve the improvement of the reliability of the fatigue design method, the actual large fatigue test, Wheel load running test was carried out.

Key words : fatigue strength ,web-gusset joint, moving load , Size effect