

鋼鉄道橋のマクラギ受取付溶接部の疲労強度

伊藤裕一¹・鍛冶秀樹²・関 雅樹³・三木千寿⁴・市川篤司⁵

¹正会員 工修 東海旅客鉄道㈱ (〒485-0801 愛知県小牧市大山1545番33)

²正会員 東海旅客鉄道㈱ (〒485-0801 愛知県小牧市大山1545番33)

³フェロー 工博 東海旅客鉄道㈱ (〒485-0801 愛知県小牧市大山1545番33)

⁴フェロー 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科 (〒152-8852 東京都目黒区大岡山2-12-1)

⁵正会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科 (〒152-8852 東京都目黒区大岡山2-12-1)

初期の開床式溶接鋼鉄道橋には、マクラギを固定するマクラギ受が溶接により取付けられており、過去に亀裂の発生が報告されている。本研究では、上フランジに不等脚のすみ肉溶接で取付けられ、桁の曲げ応力の影響を受けると共に、マクラギを通じて上部から直接荷重が載荷されるマクラギ受の疲労強度について、実橋での亀裂発生状況の調査及び、疲労試験により検討を行った。その結果、マクラギ受取付溶接部の疲労亀裂は常に桁軸直角方向の溶接ルート部から発生し、桁の曲げ応力が主因と考えられること、疲労試験の結果より上載荷重を受けない場合の疲労強度はF等級程度となるが、上載荷重を受ける場合や脚長不足の場合はF等級を下回ること、実橋における疲労強度は更にこれを下回る可能性があることなどが明らかとなった。

Key Words: steel bridge, welded railway bridge, cross tie, fatigue crack

1. はじめに

マクラギを介し橋桁が直接レールを支持するタイプの鋼鉄道橋では、マクラギを桁に定着するため、フックボルト(マクラギを縦方向に貫通し、桁の上フランジ端に引っ掛けるJ型のボルト)を用いることが一般的である。しかし一部の路線では、マクラギをより強固に定着する構造として、図-1に示すようにマクラギ受と呼ぶ部材を溶接等により上フランジ上面に取付け、マクラギ受とマクラギを横縫いボルトにより定着する構造が採用¹⁾されている。

マクラギ受を用いたマクラギの定着方法は、緩みが少ない上、列車荷重をウェブ付近に集中的に伝えるため、ウェブ・フランジ首溶接部に曲げを作用させないこと、上フランジの腐食防止等種々のメリットがある。しかし近年、既設橋のマクラギ受取付け溶接部に、疲労によると思われる亀裂が発見された。

マクラギ受取付溶接部から発生する亀裂は、進展が遅いため検査時に確実に発見が可能で、対策方法も確立しているため、現状の維持管理で十分に対処可能である。しかし、マクラギ受の数が多いため、発生数が増えた場合経済的な負担が大きくなる可能性がある。

本論文では、実橋における亀裂の発生状況及び疲労試験結果より、亀裂発生の要因及びマクラギ受の疲労強度を検討する。

2. マクラギ受の構造と疲労強度に関する既往の研究

溶接構造のマクラギ受の標準設計を図-2に示す。マクラギ受の応力方向の長さは267mmで桁上フランジにすみ肉溶接で取付けられている。

応力方向に直交する前面のすみ肉溶接は4mm×8mmの不等脚で、フランジ側の止端は仕上げられている。側面のすみ肉溶接は6mmの等脚である。実橋から採取したマクラギ受の前面すみ肉溶接のマクロ試験結果を写真-1に示す。ただし、実橋において、マクラギ受取付け溶接の脚長は設計に比べ小さい場合があること。また、マクラギ受の縦桁上フランジとの密着に問題のある可能性があることに注意が必要である。

亀裂発生の主因を桁の直応力と考えるならば、当該箇所の疲労等級は、JSSCの鋼構造物の疲労設計指針(以下JSSC疲労設計指針)²⁾の「(f)その他の溶接継手, 1. カバ

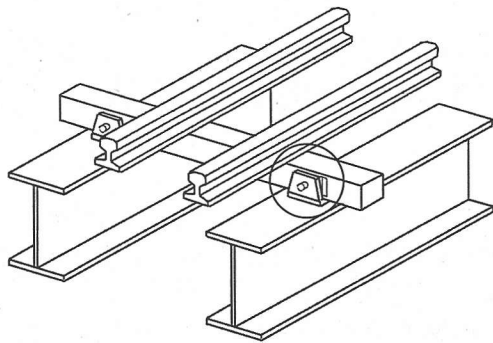


図-1 枕木受け

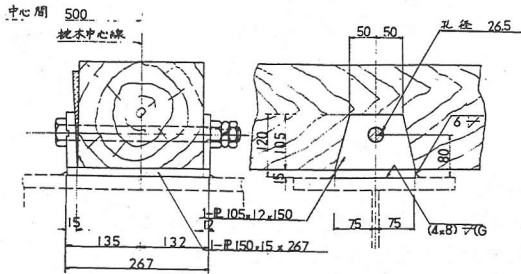


図-2 マクラギ受標準設計の例

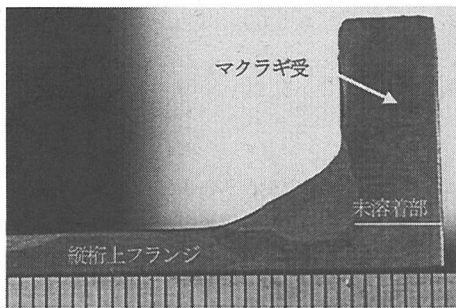


写真-1 縦桁マクラギ受前面溶接部マクロ

ープレートをすみ肉溶接で取付けた継手(取付け長さ \leq 300mm)(1)止端仕上げ:強度等級E)が該当する。ただしJSSC疲労設計指針では、当該溶接継手に等脚のすみ肉溶接を想定しており、亀裂発生点を止端と考えている。

また、鉄道構造物等設計標準³⁾では、荷重点となる場合とならない場合の両者を含む、脚長5mmの等脚のすみ肉溶接でフランジに取付けたマクラギ受を対象とした阪本^{4),5)}を根拠に「(f)その他の溶接継手①マクラギ受等当て板を溶接で取付けた継手をもつ母材(前面すみ肉)($L \leq 300$ mm)(1)止端仕上げ:強度等級E)に分類している。

杉本⁶⁾は、脚長5mmの等脚のすみ肉溶接を対象にした疲労試験の結果より、非荷重のマクラギ受は前面すみ肉の止端部に、荷重個所のマクラギ受は前面すみ肉溶接のルート部に亀裂が発生し、前者の疲労強度はF等級に比べ多少高め、後者はF等級をかうろうじて満足するとしてい

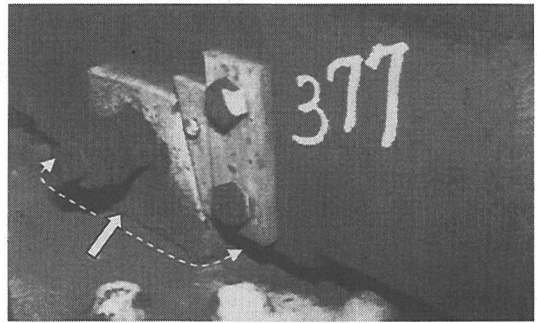


写真-2 実橋における亀裂発生状況(図-1 円内に相当)

る。

このように、既存の指針類や既往の研究は全て等脚のすみ肉溶接で取付けられた板を対象としているが、実際のマクラギ受は全て不等脚すみ肉溶接で取付けられており、疲労亀裂の発生状況や疲労強度が異なる可能性がある。また、不等脚すみ肉溶接で取付けられたマクラギ受の荷重・非荷重の差異に関する研究はない。そのため、これまで筆者らは、不等脚のマクラギ受を取付けた桁試験体を用いた疲労試験より、当該部分の疲労強度がJSSCのF等級を満たさない可能性を報告している⁷⁾。

3. 実橋における亀裂発生状況

実橋でこれまでに発見されたマクラギ受取付け溶接部の亀裂を表-1に示す。これらは、8年周期の詳細な目視検査の結果、平成5年から平成12年の間に発見されたものである。この間の検査対象数量と亀裂発生率を表-2に示す。亀裂は全ての形式の桁に発生しており、平均発生率は0.04%である。亀裂(写真-2)はいずれもある程度以上の長さ(120mm程度)で発見されたが、比較的短い亀裂は、前面すみ肉溶接のウェブ直上付近ビード上で発見されており、亀裂はウェブ直上付近の溶接ルート部から発生していると考えられる。中にはマクラギ受のコーナーを回り側面のすみ肉溶接を進展し、溶接全周を破断しているものもある。なお、溶接止端部から発生した亀裂や、フランジに進入した亀裂は報告されていない。

表-1の亀裂位置からもわかる通り、亀裂は必ずしも曲げ応力の高い桁中央付近で発生しているわけではない。図-3に示すように亀裂が発生した桁の公称応力(桁中央部上フランジで測定した活荷重応力)も必ずしも高くなく、A橋のように比較的応力の低い桁でも発生している。

しかし、実橋で測定した桁とマクラギ受溶接ビード上の応力状態は、桁の公称応力と同波形であり(図-4)、マクラギ受を通じた上荷重の影響(ピークの数が多い)は見られない。このことからマクラギ受の疲労亀裂

表-1 マクラギ受溶接部の疲労亀裂発見状況

No	橋梁名	連	上下別	形式	図面番号	部材	公称応力範囲 (MPa)	亀裂位置	
1	A橋	3	上	GdB	WDG.N37-2	主桁	17.1	81%	
2			29%						
3			21.6				99%		
4			4				上	18.9	91%
5			5				上	17.7	10%
6			6				上	10%	
7								3%	
8								0%	
9	B橋	16		上	GdI	WDG.N20-1		主桁	48.7
10	C橋	4	上	Tt	WTT.N145(3)-1	縦桁	45.5	43%	
11			60%						
12	5	下	Gt	WTG.N17-2B	縦桁	47.2	60%		
13						50%			
14						70%			
15	D橋	1	上	Gt	WTG.N25-102	縦桁	39.8	70%	
16							100%		
17							0%		
18	E橋	2	上下	GdI	WDG.N20-1	主桁	39.4	70%	
19							40%		
20							60%		
21	F橋	4	下	Tt	WTT.N60-1C1	縦桁	40.6	30%	
22							26.7	0%	
23							30.9	89%	
24	H橋	5	下	GdI	WDG.N27-1	主桁	30.2	100%	
25							31.1	100%	
26							92%		
27	I橋	6	上	GdI	WDG.N35-1	主桁	46.1	50%	
28							50%		

GdB：上路プレートガーダー(BOX断面) GdI：上路プレートガーダー(I断面)

Tt：下路トラス Gt：下路プレートガーダー(開床式)

公称応力範囲：桁中央断面の下フランジ下面ウェブ直下に橋軸方向に貼付した歪ゲージで測定した活荷重応力振幅の5列車平均値
 亀裂位置の表記：桁端からの距離/バ×2(桁中央=100%)

表-2 H5~8年の検査数量(開床式の桁)

形式	連数	マクラギ受	発生数
上路プレートガーダー(I断面)	5バ×20m未満	45	2,372
	5バ×20m以上	228	21,852
上路プレートガーダー(BOX断面)	131	17,206	8
下路プレートガーダー(開床式)	34	5,606	5
下路トラス	78	29,624	6
計	516	76,660	28

の発生には、列車荷重による桁の挙動が大きく影響していると言える。

さらに同じ桁、隣接する桁で疲労亀裂が集中して発生する傾向が見られることから、脚長・のど厚・溶け込み深さ、溶接残留応力、フランジとの隙の存在など桁・製

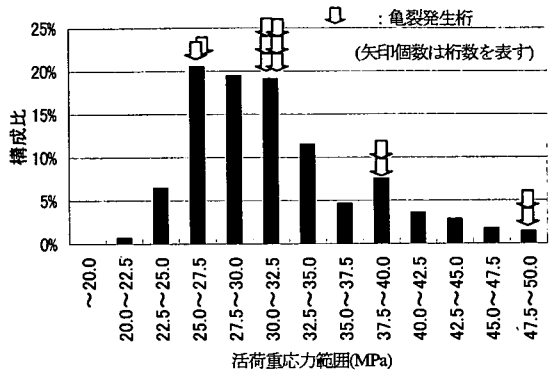


図-3 検査対象とした全ての上路プレートガーダー(I断面バ×20m以上)の公称応力範囲の分布と亀裂発生桁

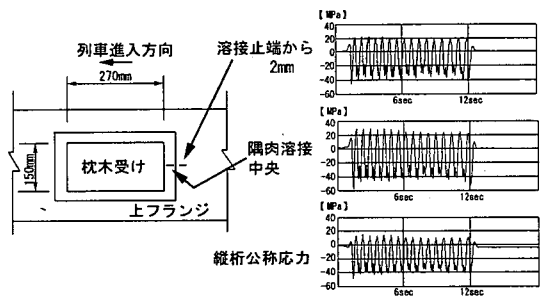


図-4 マクラギ受溶接ビード周囲の実測応力波形

表-3 マクラギ受前面すみ肉溶接の脚長・のど厚測定結果

	脚長		のど厚
	フランジ側	まくらぎ受側	
基準(最小値)	8.0	4.0	3.6
平均値	A橋	11.0	5.3
	X橋	11.2	5.4
	Y橋	9.8	5.5
最小値	A橋	9.0	3.1
	X橋	8.7	4.1
	Y橋	8.4	4.1
標準偏差	A橋	0.9	0.8
	X橋	1.2	0.8
	Y橋	0.9	0.8

単位：mm
 サンプル数：A橋、X橋：22箇所、Y橋：48箇所

作メーカーに固有の要因が亀裂の発生に強く影響を及ぼしていることが想定される。

このため、マクラギ受に疲労亀裂が集中して発生したA橋と、疲労亀裂が全く発生していないX・Y橋で、マクラギ受前面すみ肉溶接の脚長・のど厚を計測した。測定位置はウェブ直上である。表-3に結果を示すように、A橋とX・Y橋には、脚長・のど厚の平均値・標準偏差に差異は認められない。ただし、A橋にはマクラギ受側の脚長とのど厚が極端に小さい測定値が1例含まれていた。

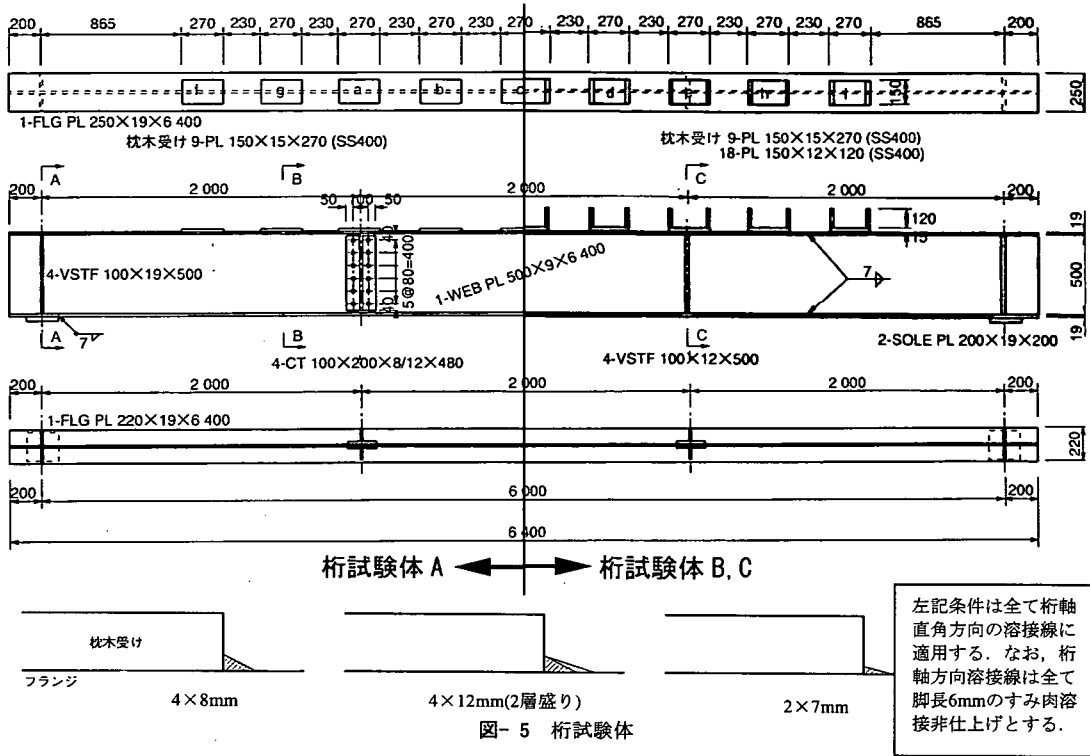


図-5 桁試験体

左記条件は全て桁軸直角方向の溶接線に適用する。なお、桁軸方向溶接線は全て脚長6mmのすみ肉溶接非仕上げとする。

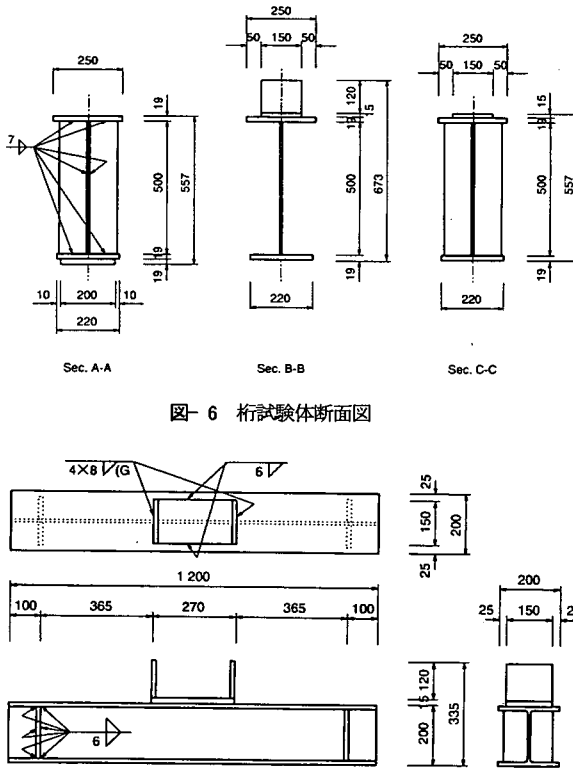


図-6 桁試験体断面図

表-4 桁試験体マクラギ受詳細

試験体	マクラギ受	区間	脚長	仕上	はた隙
桁試験体 A	a	等曲げ区間	4×8mm	-	0mm
	b		4×8mm	Gr	2mm
	c		4×12mm	Gr	0mm
	d		2×7mm	Gr	0mm
	e		4×8mm	Gr	0mm
	f	せん断区間	4×8mm	-	0mm
	g		4×8mm	Gr	2mm
	h		2×7mm	Gr	0mm
	i		4×8mm	Gr	0mm
桁試験体 B	a	等曲げ区間	4×8mm	Gr	0mm
	b		4×8mm	Gr	0mm
	c		4×8mm	Gr	1mm
	d		2×7mm	Gr	0mm
	e		4×8mm	Gr	0mm
	f	せん断区間	4×8mm	Gr	0mm
	g		4×8mm	Gr	0mm
	h		2×7mm	Gr	0mm
	i		4×8mm	Gr	0mm

Gr: グラインダ仕上げ

4. 疲労試験

マクラギ受取付け溶接部には列車通過に伴い、桁の曲げによる桁軸方向の応力に加え、レール・マクラギを通

表-5 小型試験体の荷荷条件

試験体	支持条件	P_{max} (kN)	P_{min} (kN)	$\Delta\sigma$ (MPa)	繰返し数	はた隙
A-1	単純支持	160	20	60	3×10^6	0mm
A-2	〃	150	20	60	3×10^6	0mm
A-3	〃	280	20	120	3×10^6	0mm
A-4	〃	160	20	60	5×10^6	0mm
B-1	全面支持	90	10	-	4×10^6	0mm
B-2	〃	90	10	-	5×10^6	0mm
C-1	〃	90	10	-	3×10^6	1mm
C-2	〃	90	10	-	3×10^6	1mm

表-6 桁試験体の荷荷条件

試験体	荷荷点	P_{max} (kN)	P_{min} (kN)	$\Delta\sigma$ (MPa)	繰返し数
A	a,b,c,e	360	20	140	1.4×10^6
B	a,e	400	20	140	3×10^6
C	a,c,e	180	30	60	5×10^6

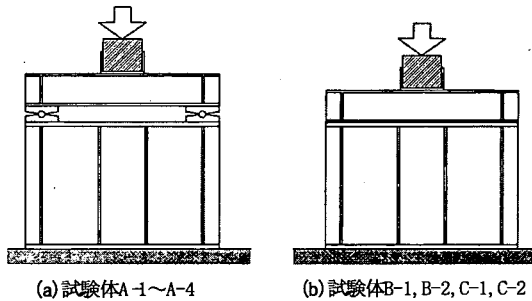


図-8 小型試験体の荷荷方法

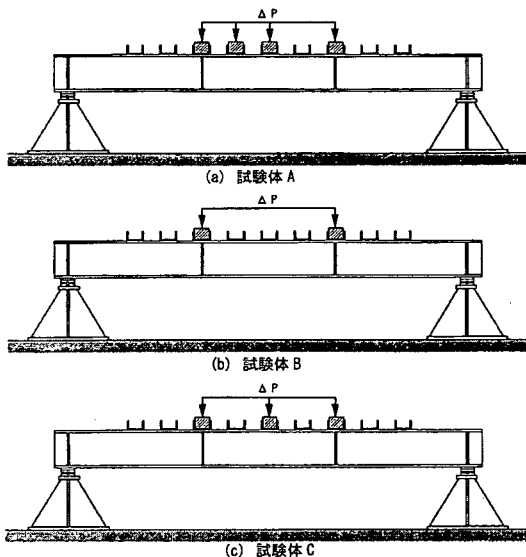


図-9 桁試験体荷荷方法

じた鉛直方向からの圧縮力が作用しており、その影響は

前述の通り既存の基準類では考慮されていない。

そのため、マクラギ受を溶接で取付けた試験体を作成し疲労試験を行った。試験体は図-7に示す小型試験体8体 (A-1~A-4, B-1, B-2, C-1, C-2) 及び、図-5, 図-6に示す桁試験体3体 (試験体A, B, C) である。小型試験体は全てSS400材、桁試験体はマクラギ受のみSS400材で、その他の部分はSM400材を用いて製作した。

溶接方法は、桁本体のフランジ・ウェブ間すみ肉溶接をCO₂半自動溶接、その他の溶接部を手溶接とし、前者には軟鋼および高張力鋼MAGソリッドワイヤ (JIS Z3312 YGW12相当) を、後者には軟鋼用被覆アーク溶接棒 (JIS Z3211 D4301相当) を用いた。

マクラギ受の取付け詳細は、小型試験体では図-7に示す1種類とし、C-1, C-2試験体には人為的にマクラギ受と上フランジとの間にはた隙 (1mm) を作った。桁試験体では、溶接脚長・マクラギ受と上フランジとの間はた隙 (1mm, 2mm) の有無・止端仕上げの有無をパラメータとし、表-4に示す要領で施工した。

(1) 試験方法

a) 小型試験体

試験体A-1~A-4は、橋梁支間中央付近に位置するマクラギ受近傍の応力状態を模擬するため、図-8 (a) に示すように、支間中央のマクラギに荷荷する3点曲げ荷荷とした。B-1, B-2, C-1, C-2は、橋梁支点付近に位置するマクラギ受近傍の応力状態を模擬するため、図-8 (b) に示すように、下フランジ下面を全面支持した状態で支間中央のマクラギに検討対象とする路線を走行する列車の輪重80kNを荷荷した。表-5に各小型試験体の荷荷条件を示す。荷重波形は正弦波である。

b) 桁試験体

荷重波形は試験体A, B, Cとも正弦波とし、荷荷方法と下フランジの応力範囲を変えた。表-6に桁試験体の荷荷条件を示す。

すなわち試験体Aは、図-9 (a) に示すように、試験体の4箇所 (マクラギa, b, c, e) にマクラギを設置し、その上に1本の鋼製の荷荷梁を載せ、荷荷梁中央をアクチュエーターにより荷荷した。なお、下フランジ公称応力の分布は桁の各荷荷点に荷重を均等に分布させた場合の計算値と異なることから、荷重は各荷荷点に均等に荷荷されていないことがわかっている。

試験体Bは図-9 (b) に示すように、試験体2箇所 (マクラギa, e) にマクラギを設置しその上に1本の鋼製の荷荷梁を載せ、荷荷梁中央をアクチュエーターにより荷荷することにより荷重を等分に加えた。

試験体Cは、図-9 (c) に示すように、アクチュエーター3機を用いてマクラギa, c, eの3箇所と同時に荷荷した。

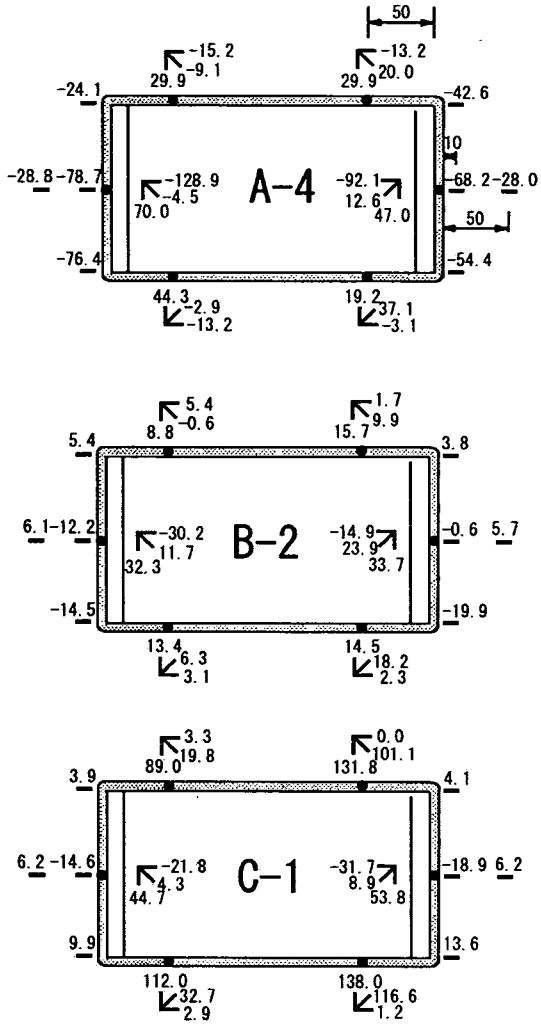


図-10 小型試験体静的荷重試験結果(90kN荷重時)

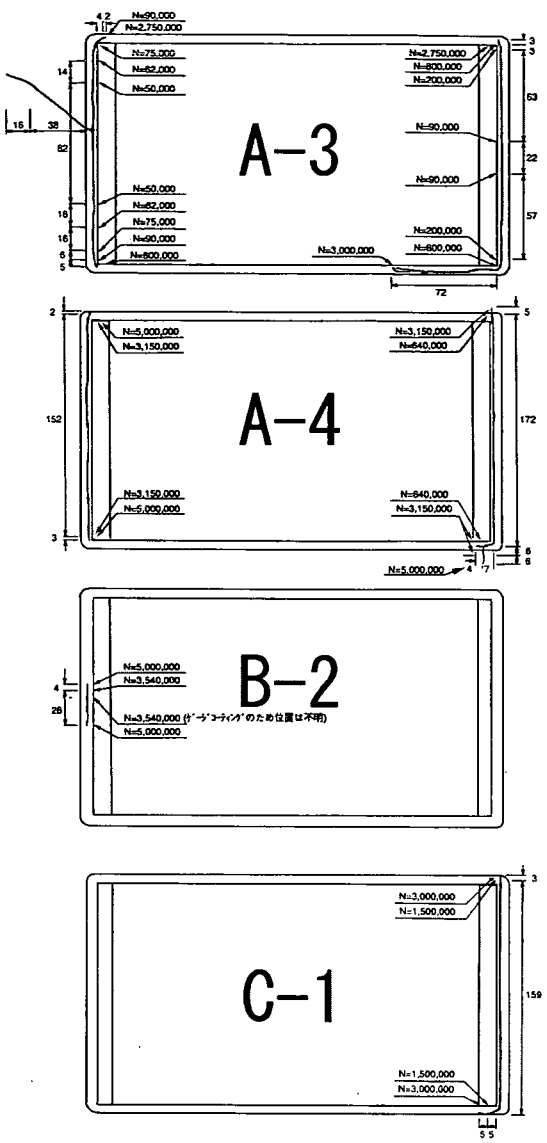


図-11 小型試験体の亀裂進展状況

表-7 小型試験体試験結果

試験体 番号	亀裂発 生位置	繰返し数($\times 10^3$)		発見時 亀裂長さ (mm)	応力 範囲 (MPa)
		発見時	フランジ 進入時		
A-1	北側	2,468	-	126	38.3
A-1	南側	572	-	36	44.1
A-2	北側	1,140	-	6	63.2
A-2	南側	2,450	-	36	27.0
A-3	北側	90	-	22	70.0
A-3	南側	50	-	82	75.2
A-4	北側	640	3,150	162	38.3
A-4	南側	3,150	-	152	38.3
B-2	南側	3,540	-	10	74.5
C-1	北側	1,500	-	160	74.5
C-2	北側	2,510	-	150	74.5

(2) 試験結果

a) 小型試験体

疲労試験に先立ち実施した静的荷重試験(図-10)によれば、すみ肉溶接ビード上に貼付した歪ゲージにより計測された応力は、曲げ荷重の場合、前面すみ肉溶接のウェブ直上における軸方向応力が他に比べ著しく高い。一方、下フランジ全面を支持したBシリーズ、Cシリーズでは、この位置における応力は小さく、特にBシリーズにおいては全測定点において発生応力が低い。マクラギ受と上フランジとの間に1mmの隙があるCシリーズでは、桁軸に平行な溶接線に直交する方向の応力が高い。

試験を実施した試験体8体のうち、B-1を除く7体に疲労亀裂が発生した。表-7に各試験体における疲労亀裂の発生状況を示す。試験体A-1~A-4は、亀裂の発生・進展はフランジの曲げ応力に支配されると考え、疲労亀裂の発生位置に最も近いマクラギ受取付け溶接のフランジ側止端から50mmの位置に貼付した歪ゲージの応力範囲で整理した。一方、下フランジを全面支持したB-1、B-2およびC-1、C-2は、亀裂の発生・進展はすみ肉溶接のど断面に生じるせん断応力に支配されると考え、載荷荷重範囲を桁軸に直交するすみ肉溶接の有効のど断面積で除して、応力範囲とした。図-11に代表的な亀裂の進展状況を示し、図-12に亀裂発見時繰返し数、及び亀裂が前面すみ肉溶接全長(150mm)に及んだ時の繰返し数で整理したS-N線図を示す。

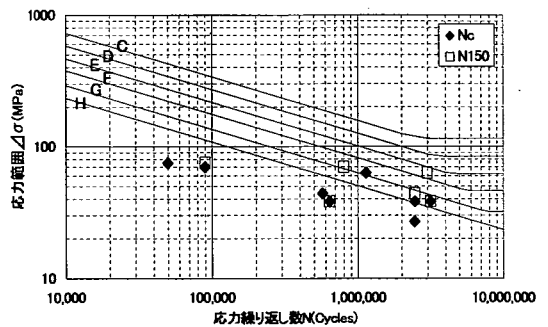
疲労亀裂は、いずれも桁軸に直交する溶接線のウェブ直上近傍のすみ肉溶接ルート部から発生し、溶接線に沿って進展した。その後の進展状況は全ての亀裂で同じではなく、そのまま桁軸直角方向に進展するものとマクラギ受角部で方向を変え軸方向へ進展するものがあった。前者のうち試験体A-4では亀裂がフランジに侵入し、後者のうち試験体A-3では亀裂が軸方向に70mm程度進展した。

試験体ABC各シリーズの亀裂の進展状況を比較すると、マクラギ受と上フランジの間には隙がないBシリーズでは疲労亀裂は発生しにくく、発生しても他の試験体シリーズに比べ、進展が非常に遅い。Cシリーズは、静的載荷試験の結果、桁軸方向すみ肉溶接部に桁軸直角方向の大きな応力が発生していることから、亀裂が更に進展した場合、桁軸直角方向から桁軸方向に方向を変えた後、そのまま溶接線に沿って進展する可能性が高いと考えられる。

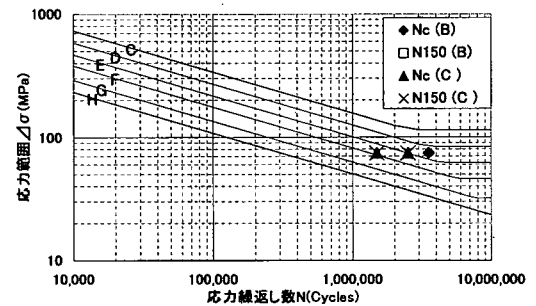
亀裂の発見時における繰返し数でS-N線図を作成した場合、曲げ載荷した試験体Aシリーズを、実測された曲げ応力で整理するとほとんどのデータがJSSC疲労設計指針(以下指針と記す)におけるE等級を下回る。一方、下フランジを全面支持したBCシリーズは、すみ肉溶接のど断面における平均せん断応力で整理した場合、F等級を満たす。

亀裂発生点であるすみ肉溶接ルート部近傍の応力状態を考えると、Bシリーズはマクラギ受とフランジが密着しており、載荷荷重の一部が直接フランジに伝達されるが、Cシリーズでは、マクラギ受とフランジが接していないため、全荷重がすみ肉溶接を介してフランジに伝達される。従ってBシリーズと比較してCシリーズの方がルート部近傍の応力状態が厳しく、疲労強度が低い結果となったと考える。

Aシリーズは、Bシリーズの応力状態に曲げによる直応



Aシリーズ



B, Cシリーズ

図-12 小型試験体S-N線図

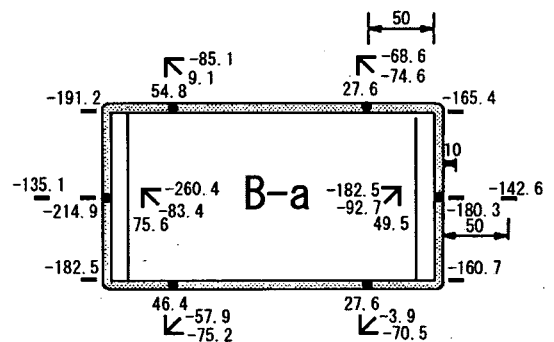


図-13 試験体Bマクラギ受a静的載荷試験結果(400kN載荷時)

力が重畳した状態になっていると考えられ、曲げ応力のみで疲労試験結果を整理することは本来適切でないと思われるが、こうした応力を評価することは困難であるため、曲げ応力のみでS-N線図を作成したことから、ばらつきの大い結果となったと考えられる。

b) 桁試験体

疲労試験に先立ち実施した静的載荷試験(図-13に一例を示す)によれば、すみ肉溶接ビード上に貼付した歪ゲージにより計測された応力は、小型試験体Aシリーズと同様、桁軸直角方向溶接線のウェブ直上における桁軸方向

表-8 桁試験体A実験結果

亀裂番号	亀裂発生位置	マクラギ受取付け方法	載荷点	繰返数(×10 ⁴ 回)		発見時亀裂長(mm)	応力範囲(MPa)
				発見	フランジ進入		
1	マクラギ受d(c側)	2×7mmGr		30	900	50	88
2	マクラギ受e(b側)	4×8mmGr	○	58	900	5	85
3	マクラギ受b(c側)	4×8mmGr隙	○	160	550	140	93
4	マクラギ受d(c側)	2×7mmGr		250	900	150	88
5	マクラギ受b(a側)	4×8mmGr隙	○	250	900	130	93
6	マクラギ受c(b側)	4×12mmGr	○	250	-	105	94
7	マクラギ受c(d側)	4×12mmGr	○	250	-	137	94
8	マクラギ受a(b側)	4×8mm	○	250	1,400	144	80
9	マクラギ受a(g側)	4×8mm	○	250	1,400	145	80
10	マクラギ受e(d側)	4×8mmGr	○	900	1,400	>150	85
11	マクラギ受g(f側)	4×8mmGr隙		900	-	115	60
12	マクラギ受g(a側)	4×8mmGr隙		900	1,400	140	60
13	マクラギ受h(e側)	2×7mmGr		1,200	1,400		64

注：亀裂発生位置の記述において、例えばマクラギ受d(c側)とはマクラギ受dに2箇所ある前面すみ肉溶接の内、マクラギ受eに近い側を意味する。表-9、表-10も同様

応力が非常に高くなっており、この位置からの疲労亀裂の発生を示唆する結果となった。また、桁軸方向溶接線上では桁軸直角方向に比較的高い応力が計測された。

疲労試験の結果、試験体Aはマクラギ受a, b, c, d, e, f, g, hの取付け溶接部、試験体Bは全てのマクラギ受取付け溶接部、試験体Cはマクラギ受a, c, dの取付け溶接部、それぞれに疲労亀裂が発生した。いずれの亀裂もすみ肉溶接ルート部から発生したものであった。

表-8、表-9、表-10に全ての亀裂についてその発生位置、発見時・フランジ進入時繰返し回数、亀裂長さ、および発生位置における応力範囲を示す。また図-14に代表的な亀裂の進展状況を示す。さらに、図-15に亀裂発見時繰返し数で整理したS-N線図を示す。

疲労亀裂は、載荷の有無や脚長にかかわらず、いずれも桁軸と直交する溶接線のウェブ直上付近のすみ肉溶接ルート部から発生し当該溶接線に沿って進展した。その後、マクラギ受角部で方向を変え桁軸方向へある程度進展した後、さらに進展方向を桁軸直角方向へ変えフランジに進入した。桁軸方向への進展長さは亀裂毎にまちまちで短いもので3~5mm、長いもので100mm程度である。

図-16にマクラギ受コーナー部を亀裂が通過した時を

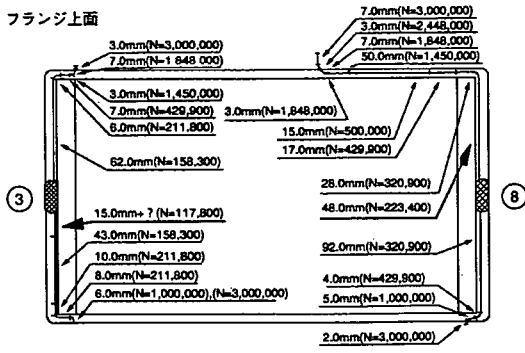
表-9 桁試験体B実験結果

亀裂番号	亀裂発生位置	マクラギ受取付け方法	載荷点	繰返数(×10 ⁴ 回)		発見時亀裂長(mm)	応力範囲(MPa)
				発見	フランジ進入		
1	マクラギ受e(b側)	4×8mmGr	○	100	1,848	115	126.3
2	マクラギ受d(c側)	2×7mmGr		100	1,848	150	134.7
3	マクラギ受a(e側)	4×8mmGr	○	118	1,848	25	127.7
4	マクラギ受d(e側)	2×7mmGr		118	1,450	36	133.7
5	マクラギ受c(d側)	4×8mmGr隙		158	1,450	31	135.5
6	マクラギ受h(e側)	2×7mmGr		212	1,848	125	116.0
7	マクラギ受b(c側)	4×8mmGr		221	1,848	50	137.8
8	マクラギ受a(b側)	4×8mmGr	○	223	2,448	57	134.7
9	マクラギ受c(b側)	4×8mmGr隙		254	1,848	66	133.5
10	マクラギ受b(a側)	4×8mmGr		321	1,450	150	136.2
11	マクラギ受e(d側)	4×8mmGr	○	325	1,848	20	128.8
12	マクラギ受h(f側)	2×7mmGr		430	1,848	32	96.2
13	マクラギ受g(a側)	4×8mmGr		799	1,848	158	118.0
14	マクラギ受g(f側)	4×8mmGr		799	1,848	140	95.8
15	マクラギ受f(g側)	4×8mmGr		1,848	-	61	84.7
16	マクラギ受f(gの反対側)	4×8mmGr		2,448	-	125	58.3
17	マクラギ受h(hの反対側)	4×8mmGr		2,563	-	41	58.1
18	マクラギ受I(h側)	4×8mmGr		2,763	-	43	84.0

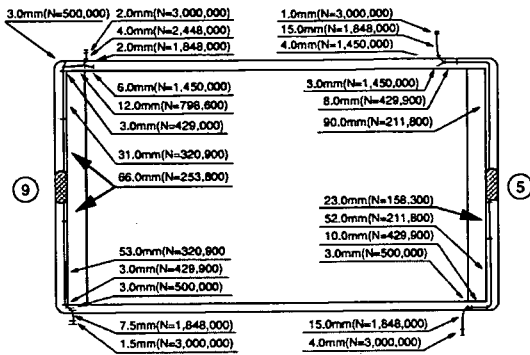
表-10 桁試験体C実験結果

亀裂番号	亀裂発生位置	マクラギ受取付け方法	載荷点	繰返数(×10 ⁴ 回)		発見時亀裂長(mm)	応力範囲(MPa)
				発見	フランジ進入		
1	マクラギ受c(d側)	4×8mmGr隙	○	1,237	-	139	59.1
2	マクラギ受c(b側)	4×8mmGr隙	○	1,621	-	93	59.7
3	マクラギ受d(c側)	2×7mmGr		3,672	-	60	57.5
4	マクラギ受a(g側)	4×8mmGr	○	4,051	-	46&55	55.9

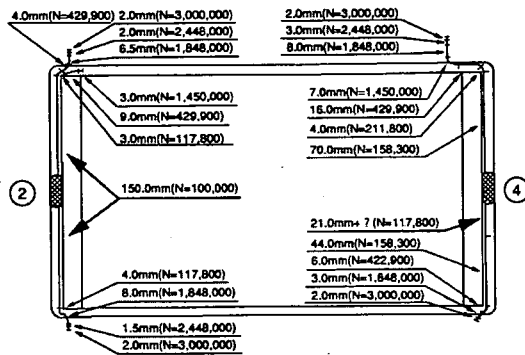
応力繰返し回数N=0回とし、マクラギ受前面溶接(長さ150mm)の中央からコーナー部に向かって伸びる亀裂を片側毎に長さを測定して整理した桁試験体亀裂進展速度を示す。亀裂がマクラギ受コーナー部(亀裂長75mm)で桁軸方向に進展方向を変えてから亀裂の進展速度は鈍り、フランジに進展するまで、多くの場合コーナー部を通過してから100万回以上の荷重繰返しを要し、フランジに



(a) 桁試験体B マクラギ受a (4×8mmGr 荷重点)



(b) 桁試験体B マクラギ受c (4×8mmGr隙)



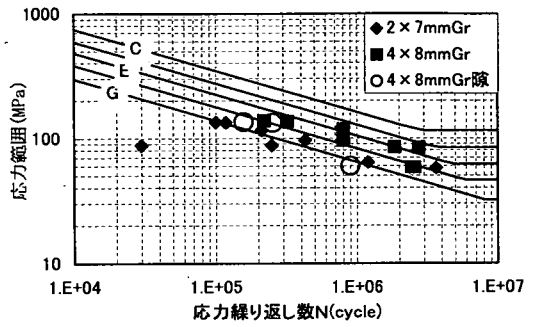
(c) 桁試験体B マクラギ受d (2×7mmGr)

図-14 桁試験体の亀裂進展状況

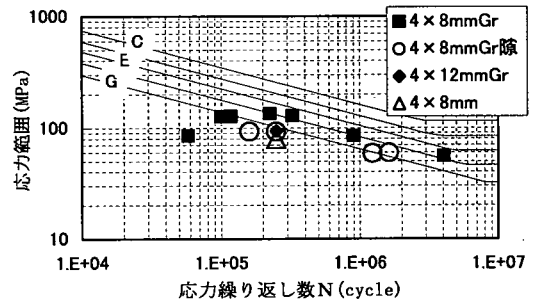
進入してからの進展速度も、10mmあたり早くて40~50万回かかる。荷重点直下の試験体Bのマクラギ受a(b側)に発生した一例に限り、マクラギ受角部を過ぎてからも亀裂進展速度が比較的早く、上載荷重の影響の可能性が考えられる。

なお、亀裂は全てルート部から発生しているため、疲労強度は止端部の仕上げの有無・施工状態に依存しない。

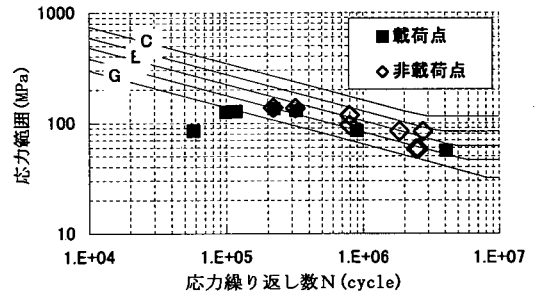
荷重点以外のマクラギ受溶接部に発生した亀裂を整理したS-N線図によれば、設計条件である4×8mm(Gr仕上げ)の疲労強度はJSSC指針のF等級をほぼ満足する。



(a) 非荷重点



(b) 荷重点



(c) 荷重点と非荷重点の比較 (4×8mmを抽出)
図-15 桁試験体S-N線図(前面溶接破断時)

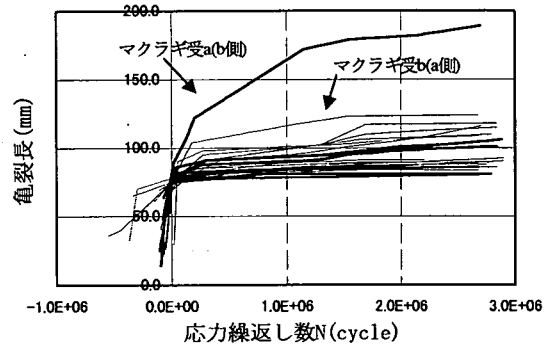


図-16 桁試験体亀裂進展速度(太線: 荷重点) マクラギ受コーナ一部通過時をN=0とした)

隙がある場合や脚長不足の場合の疲労強度はF等級を下回り、特に脚長不足の場合に影響が著しい。荷重点のマクラギ受溶接部に発生した亀裂を整理したS-N線図では、4×8mm (Gr仕上げ) の中に一部疲労強度がきわめて低いものが含まれている。隙の存在による疲労強度の低下は荷重点のマクラギ受溶接部の場合、荷重点以外に比べ明瞭である。

桁試験体の結果を小型試験体Aシリーズの試験結果と比較すると桁試験の方が疲労強度が高い。この原因として、小型試験体のデータは全て直接荷重を受けるマクラギのデータであること、小型試験体のS-N線図を作成する際に用いた応力範囲がすみ肉溶接止端から50mmの位置での実測応力であり、支間長および荷重条件の違いから桁軸方向の応力の変化率が小型試験体でより大きく、亀裂発生位置の応力は小型試験体の方が高いことなどが考えられる。

実橋においてマクラギ受1個あたりに作用する荷重はレールによる荷重分散効果により80kNをかなり下回ると考えられ、曲げ応力の桁軸方向の変化率等を考え合わせると、実橋に対して用いるS-Nデータは、桁試験体の方が妥当と考える。

5. 疲労亀裂発生率の検討

スパン20m以上のI断面上路プレートガーダー228連を対象に、疲労試験より推定したマクラギ受取付け溶接部の疲労強度と、実橋で測定した活荷重応力より、実橋での疲労亀裂発生率の推定を試みた。推定フローを図-17に示す。検討にあたっては、代表桁 (WDG. N25-1, 支間25m) と代表列車を設定した。

供用開始後の列車本数は全線ではほぼ均一で、開業以来の全列車本数が判明している。

桁上フランジ全長の応力振幅の確率分布 $f(F)$ は、桁中央上フランジで実測した代表列車通過時の応力範囲 (5列車分平均したもの) の分布を、代表列車の軸配置と、代表桁の断面変化を考慮して計算により変形して求めた。

マクラギ受取付け溶接部の疲労強度の確率分布 $f(R)$ は、まず代表桁の開業以来の等価繰返し数 N を、代表列車一編成が通過する際の等価繰返し数 n_{eq} に、開業以来の全列車本数を乗じて求め (表-11)、桁試験体の疲労試験結果 (①脚長不足、隙があるものを含む全データ、②脚長4×8mmの全データ、③脚長4×8mm非載荷点のみのデータ) に対してS-N直線回帰を行い、得られたパラメータ (表-12) より、開業以来の等価応力繰返し数 N に対応する $\log \Delta \sigma$ と、 $\log \Delta \sigma$ の標準偏差 S_d からなる対数正規分布 (ただし底

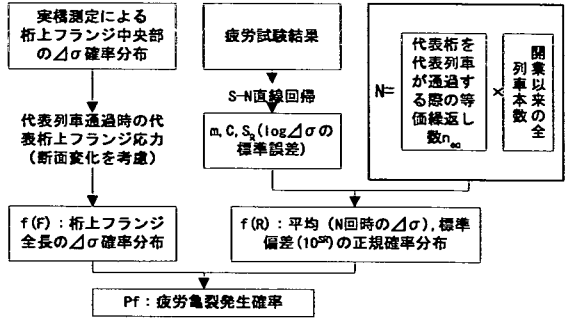


図-17 検討フロー

表-11 開業以来の等価応力繰返し数

	1列車当り	列車本数	N
DG(I) (L=25m)	3.68回	86万本	318万回

表-12 疲労試験のS-N直線回帰結果

データ群	データ数	指数 m	指数 C	$\log \Delta \sigma$ の標準偏差 (S_d)	2×10^6 回疲労強度 (MPa)
全データ	18	4.66	15.16	0.0690	70.2
4×8mm全データ	10	4.34	14.61	0.0660	79.7
4×8mm非載荷点	6	3.09	12.15	0.0553	73.9

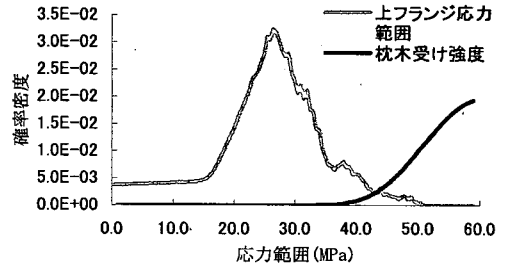


図-18 上フランジ応力分布と、疲労強度分布 (マクラギ受疲労強度: 全データより)

表-13 疲労亀裂発生率の比較 (DG (I) L≥20m)

使用した疲労試験結果	疲労亀裂発生率 P_f	
	計算結果	実橋 (表-2より)
全データ	0.12%	0.04%
4×8mm全データ	0.01%	
4×8mm非載荷点	0.04%	

は10)と仮定することにより求めた。得られた S_d は何れのケースも既往の研究⁹⁾の範囲内であり、実験結果のバラツキは標準的と考えられる。

なお、S-N直線回帰は式(1)において $\log N$ を独立変数、 $\log \Delta \sigma$ を従属変数として回帰した。従って標準偏差は $\log \Delta \sigma$ に対するものである。

$$\log \Delta \sigma = -\frac{1}{m} \log N + \frac{C}{m} \quad (1)$$

疲労亀裂の発生確率 P_f は、上フランジ応力 F および疲労強度 R が共に確率変数であり、それぞれの確率密度関数が $f(F)$ 、 $f(R)$ であることから、式(2)により求められる。

$$P_f = \int_0^F f(F) \left\{ \int_0^F f(R) dR \right\} dF \quad (2)$$

$f(F)$ 、 $f(R)$ の例を図-18に示すと共に、表-13に計算結果と実橋の疲労亀裂発生率 P_f を対比して示す。なお、変動振幅応力に対する応力範囲の打ち切り限界を式(3)により検討したが、今回の例では、最終的な計算結果には影響を与えていない。

$$\Delta \sigma_{we} = 6.295 \times 10^{-2} \Delta \sigma_f^{1.396} \quad (3)$$

ここに

$$\Delta \sigma_f, 2 \times 10^6 \text{回強度}$$

計算結果と実際の変状発生率はオーダー的には一致しているが、 $f(F)$ 、 $f(R)$ 分布の裾部分の重なりであり、誤差が大きいこと想定される。

実際、実橋で亀裂が発生した最小の公称応力はH橋3連目の26.7MPaであり、しかも支承部で発生しているため、図-18に示すマクラギ受強度分布よりさらに低い部分で発生している。実橋では溶け込みが少ないか、溶接脚長がさらに小さいなど、今回の疲労試験の想定を超える溶接部の条件により疲労強度の分布がさらに広がっていることが想定される。

6. まとめ

本研究では、上フランジに不等脚のすみ肉溶接で取付けられ、上載荷重をうけるマクラギ受の疲労強度について、実橋での亀裂発生状況の調査及び、疲労試験により検討を行った。その結果以下の知見が得られた。

1) 実橋で測定した応力波形から、マクラギ受取付け溶接部に発生する疲労亀裂は桁の曲げ応力の影響を大きくうけていると考えられるが、実橋における亀裂発生状況よりマクラギ受とフランジ間の肌隙の存在、マクラギ受取付け溶接の脚長・溶接方法など桁・製作メーカーに固有の要因が亀裂の発生に強く影響を及ぼしていることが想定される。

2) 疲労試験でマクラギ受取付け溶接に発生した疲労亀裂は、試験体の種類や載荷条件によらず、全て桁軸直角

方向溶接のルート部から発生し、溶接止端部に発生したものはない。実橋で用いられているサイズの不等脚すみ肉溶接では止端割れは生じず、常にルート割れになるものと考えられる。その後亀裂はフランジに進入し進展速度は遅いものの徐々に進展を続ける。

3) 小型試験体の実験結果から、亀裂発生位置に桁の曲げ応力が存在しない場合、すなわち桁支点付近のマクラギ受の場合には疲労亀裂は発生しにくく、発生したとしても進展速度は遅い。また亀裂の発生・進展にはマクラギ受とフランジとの隙が大きく影響する。隙がある場合、桁軸方向溶接線においてそれと直交する方向に比較的高い応力が発生し、発生した亀裂がマクラギ受角部で進展方向を桁軸方向に変えた後、そのまま進展する可能性が高いと考えられる。

4) 桁試験体の実験結果から、マクラギ受（非載荷点）の疲労強度は、設計条件である $4 \times 8 \text{mm}$ （Gr仕上げ）の疲労強度はJSSC指針のF等級をほぼ満足する。隙がある場合や脚長不足の場合の疲労強度はF等級を下回り、特に脚長不足の影響が著しい。載荷点の疲労強度は非載荷点を下回り、一部疲労強度がきわめて低いものが含まれる。隙の存在による疲労強度の低下は載荷点の場合、非載荷点より明瞭に現れる。

5) 疲労試験結果より実橋の疲労亀裂発生率を予測した所、比較的よい一致をみた。このことは今後のマクラギ受疲労亀裂の発生傾向が全体的には予測できることを示唆する。しかし実橋で亀裂が発生している桁に作用している応力のばらつきから、実橋ではマクラギのバツキの存在や、溶接脚長がさらに小さいなどの原因により、疲労強度の分布がさらに広いことが想定され、桁の応力だけでは疲労亀裂の発生箇所を特定できず、実際の維持管理においては、依然として定期的な目視検査が重要であることも判明した。

参考文献

- 1) 小林正：新幹線の橋マクラギ締結装置、構造物設計資料、No. 10, pp. 365-372, 1967.
- 2) (社)日本鋼構造協会編：鋼構造物の疲労設計指針・同解説、pp. 39, 1993.
- 3) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 鋼・合成構造物、丸善、1992.
- 4) 阪本謙二、阿部允、杉節雅雄：実働荷重による鋼材部材の疲労強度(その1)、鉄道総研報告、Vol. 3, No. 10, 1989.
- 5) 阪本謙二、阿部允、杉節雅雄：実働荷重による鋼材部材の疲労強度(その2)、鉄道総研報告、Vol. 5, No. 5, 1991.
- 6) 杉本一郎：溶接鋼鉄道橋の疲労強度と延命化に関する研究、東京工業大学学位論文、1996.

- 7) 鍛冶秀樹, 根岸裕, 伊藤裕一, 内藤繁: 圧縮応力域における不等脚すみ肉溶接継手の疲労特性その2, 土木学会年次学術講演会概要集, Vol. 52, pp. 504-505, 1997.
- 8) ヨーロッパ鋼構造連合第3技術委員会: 鋼構造の疲労設計指針, 山田健太郎訳, 日本鋼構造協会, 1985. (2001. 10. 15受付)

FATIGUE STRENGTH OF THE WELDING SLEEPER SUPPORT OF STEEL RAILWAY BRIDGES

Yuichi ITO, Hideki KAJI, Masaki SEKI, Chitoshi MIKI and Atushi ICHIKAWA

In this study, we studied the fatigue strength of sleeper supports, which are attached to upper flange of open floor type steel railway bridges with uneven leg length type fillet welding and receives direct vertical load. We used the method of crack investigation on actual bridges and fatigue test. Results tell us that fatigue cracks always propagate from weld root area at transverse fillet weld and the main cause will be bending stress on the girder. Also, the result of fatigue tests clarified that fatigue strength without direct vertical load will be level F, but with direct vertical load, or without sufficient leg length, it doesn't reach the level F, and the fatigue strength of actual bridges can be even below this level.