

鋼鉄道橋溶接継手部の長寿命域疲労強度

阪本謙二¹・杉本一朗²・市川篤司³・阿部允⁴・三木千壽⁵

¹正会員 ジェイアール東日本コンサルタンツ(株) 技術本部 技術第二部 (〒151 東京都渋谷区代々木2-2-6)

²正会員 工博(財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業部 橋梁 (〒185 東京都国分寺市光町2-8-38)

³正会員 工博(財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業部 橋梁 (〒185 東京都国分寺市光町2-8-38)

⁴正会員 (株) BMC (〒261-71 千葉県千葉市美浜区中瀬2-6)

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

最近、鉄道橋では、荷重体系の変更、列車本数の増加等により、特に長寿命域での疲労評価手法の精度向上の重要性が増している。疲労設計に用いる溶接継手の疲労許容応力度は、残留応力の影響等のない小型試験体より、より実橋に近い大型試験体でのデータをもとに検討されるべきと考えられており、本州四国連絡橋の設計にあたっては多くの疲労試験が実施された。しかし、この試験は 780MPa クラスの調質高張力鋼が主体で、通常鉄道橋で疲労が問題になる SM520 クラス以下の非調質鋼でのデータは極めて少ない。このようなことから、本研究では、非調質鋼を用いた大型の桁試験体の高繰り返し回数下の疲労試験を実施し、各種継手における長寿命域での疲労強度特性について検討した。

Key Words : steel railway bridge, fatigue, fatigue strength of long life, full scale test specimen

1. はじめに

近年、鉄道橋の設計は、限界状態設計法の導入、荷重体系（列車荷重）の見直し、設計基準の種々の列車荷重体系への適用（全鉄道事業者への適用）等、それを取りまく環境が大きく変化してきている¹⁾。

疲労についても、設計列車荷重の実荷重に対する余裕が少なくなっていること、列車本数が増加し応力の累積繰り返し回数が増大していること、設計速度の向上に伴い動的な応力変動が大きくなっていることなど従来とは条件が変わってきている。また既設鋼橋においても電車専用線を中心に疲労変状の発生が見られる^{2), 3), 4), 5), 6)}こと、さらには架設後60年以上経過した鋼橋が半数以上を占め疲労による残存耐用年数（余寿命）を求めることが要求されるようになったこと等、疲労照査の精度の向上が益々重要なことになっている⁷⁾。新橋の設計においても既設橋の疲労照査においても従来ほとんど蓄積のない、長寿命域での疲労強度の確認と精度の向上が大きな課題である。

昭和45年までの鋼鉄道橋の設計基準における疲労設計では、 2×10^6 回の繰り返しに対する疲労強度（基本疲労許容応力範囲）を基準に疲労許容応力度を定め、それを基に在来線で60年、新幹線で70年の耐用年数に発生する繰り返し回数に対応する許容応力度

を求めていた。

昭和58年の設計基準⁸⁾ではいくつかの継手について大型疲労試験の成果を取り入れた本四連絡橋の疲労設計⁹⁾の考え方と整合を図っているものの、大部分は比較的小型の試験体を用い、一定振幅の応力で 2×10^6 回程度の疲労試験により得られた試験データを基に定められたもので、高繰り返し回数の試験データを基にしたものではない。また、最近の研究成果として継手形式によっては疲労限がかなり長寿命域となることや低応力・長寿命域での疲労特性は、変動応力波形の形状によって変化すること等¹⁰⁾が明らかになっている。

最近の疲労設計に対して大きな影響を及ぼしているのが本州四国連絡橋公団で行われた大型疲労試験である。しかし、本州四国連絡橋公団で多数行っている大型試験体の疲労試験は調質高張力鋼を中心としたもので、鉄道橋で疲労が問題になる部材に用いられるSM520 クラス以下の非調質鋼については、実橋を模擬した大型試験体を用いた高繰り返し回数の疲労試験はこれまであまり行われていない。

構造ディテールもその力学挙動が明らかになったことや疲労における研究成果¹¹⁾、製作上の都合などにより時代とともに見直されている。垂直補剛材の下端部の回し溶接および水平補剛材と水直補剛材との連結等鉄道橋固有の構造ディテールについても、

製作の省力化を目指す最近の傾向を考慮すると改良も考えられるが、それには実験的な検討が必要である。

このようなことから、本研究では、鉄道橋で疲労が問題になる部材に一般に用いる非調質鋼の大型桁試験体を用いた疲労試験を実施し、現在鉄道橋で最も問題になっている継手を中心に、従来の大型試験体の疲労試験より多い1000万回オーダーの高繰返し回数下での疲労強度について検討した。

なお、本研究の成果の一部は既に現行の鋼鉄道橋の設計基準^{1,2)}に反映されている。

2. 試験方法

(1) 試験体

試験には、鉄道橋で一般に用いられるさまざまな継手を設けた10体のI型桁試験体^{1,3), 14), 15)}を用いた。試験体の全長は4.4mあるいは5.4mである。

これらの試験体は、垂直補剛材に着目したA桁およびC桁、フランジガセットおよび腹板ガセットに着目したB桁およびF桁、桁端を切り欠き構造とジベルおよびまくら木受けを取り付けたD桁、E桁、G桁およびH桁、垂直補剛材下端部の溶接法を変えたI桁およびJ桁である。図-1に各試験体の形状および寸法を示す。また、試験体の特徴を表-1に示す。

試験体のうち、D桁とG桁、E桁とH桁はそれぞれ同一の形状・寸法を有する桁端を切り欠いた構造の試験体である。ただし、G桁およびH桁のフランジと腹板の縦方向溶接部の溶接欠陥の等級は、D桁およびE桁に比べるとやや低級である。

桁端の切り欠きの構造は、既設橋に見られる曲線切り欠き(E、H桁左側)、その簡易な補強を想定した構造(D・G桁左:リブ補強、E・H桁右:フランジ追加補強)、および腐食の進んだ桁支承部の改良を想定した直角切り欠き構造(D、G桁右)とした。また、I桁とJ桁も同一形状・寸法であるが、特に縦すみ肉溶接に着目し、前者は鉄道橋の製作基準に従って通常の溶接方法で製作し、後者はこれより大きなプローホールができるように接合面に工夫をして製作した。

試験体の溶接部は全数目視および一部X線にて溶接内部の欠陥の調査を行った。特に、垂直補剛材や腹板ガセットの取り付けすみ肉溶接部の溶接止端部のアンダーカットおよびオーバーラップについては注意深く検査し、欠陥が発見された部分については、グラインダーにより止端処理を行った。ただし、F桁の垂直補剛材下端部の一部については、アンダーカットが疲労強度に及ぼす影響を把握するために、

意図的に大きめのアンダーカットを発生させており、止端処理を行っていない。

試験体の材質はSM400AあるいはSM490Aを用いた。各試験体ごとの材質、機械的性質ならびに化学成分を表-2に示す。

(2) 荷重および載荷方法

載荷には、30tf、50tfおよび100tfの電気油圧式サーボ型疲労試験機を用い、図-2に示すように試験機アクチュエータと試験体との間に設置した荷重配分分析を介して2点に載荷した。

荷重は、A～E桁については、電車専用線の代表的な線区である東海道新幹線の下路プレートガーダーおよび下路トラスの測定により得られた応力頻度分布に基づくシミュレーションを行っている¹⁶⁾。シミュレーションは鉄道橋の平均的な支間である20mの単純桁を対象とした。このシミュレーション波形を図-3に示す。しかし、電車荷重の場合、各車両の軸重毎の変動が小さく、また波形も同形状になることから、F～J桁については桁上を列車が走行する場合の応力変動をもとに単純化したシミュレーション荷重を載荷した。この荷重波形を図-4に示す。疲労強度の検討においては、これらの荷重波形にレイインフロー法を適用して等価荷重に換算し、それを用いて算出した等価応力範囲を用いている。

3. 疲労試験

(1) 静的載荷試験

疲労試験に先立って静的載荷試験を行い、発生応力の実測値と計算応力度との比較を行った。図-5にゲージ取り付け位置の例を、表-3にその結果を示す。上下フランジと垂直補剛材下端では計算応力度と実測応力度はほぼ一致する結果となった。上フランジで最大で1.2倍程度の差が生じたが、これは偏心または面外曲げの影響と考えられる。これより上下フランジおよび垂直補剛材下端部の疲労強度の検討では計算応力度を用いた。腹板ガセットの応力比較では実測値と計算値にかなり差が表れた。これは面外曲げ応力の影響と局部応力の影響を受けていたためと考えられる。腹板ガセットの検討では実測応力を整理することとした。

(2) き裂の発生状況

疲労試験によるき裂の発生状況を図-6に示す。図中の最初の番号はその桁においてき裂の発生した順序を示し、後の数字は繰返し回数を示す。これらのき裂の発生状況には、以下のようないくつかの特徴がある。

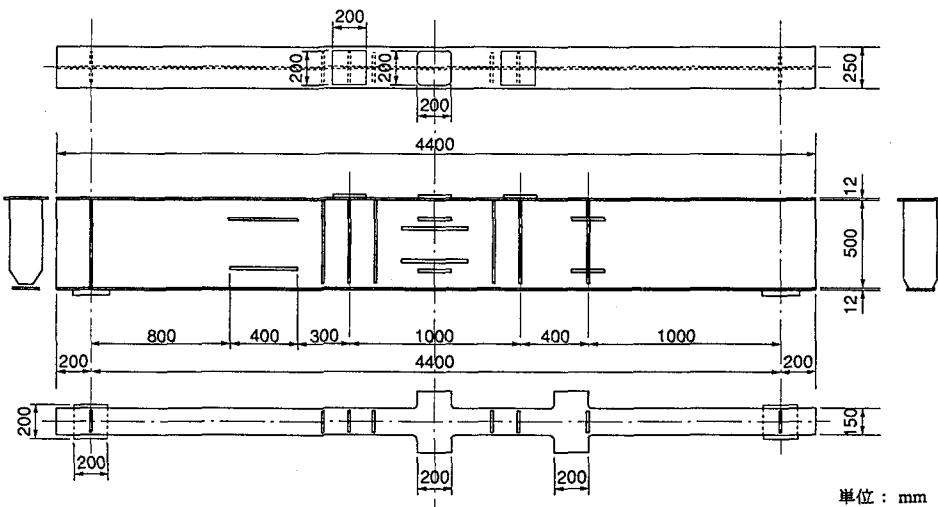


図-1 試験体形状および寸法

表-1 各試験体の主な特徴

	A 柄	B 柄	C 柄	D 柄	E 柄	F 柄	G 柄	H 柄	I 柄	J 柄
試験体材質	SM490A	SM490A	SM490A	SM490	SM490	SM490	SM490	SM490	SM400	SM490
繰返し回数	2.6×10^4 回	6.0×10^4 回	1.8×10^5 回	1.38×10^7 回	2.5×10^7 回	2.5×10^7 回	3.0×10^7 回	3.0×10^7 回	3.8×10^4 回	1.2×10^7 回
桁端構造	切欠きなし	切欠きなし	切欠きなし	一端:円弧切欠き 他端:直角切欠き	一端:円弧切欠き 他端:直角切欠き	切欠きなし	一端:円弧切欠き 他端:直角切欠き (アングル溶接) 他端:直角切欠き	一端:円弧切欠き 他端:直角切欠き (アングル溶接) 他端:直角切欠き	切欠きなし	切欠きなし
フランジ・ウェブ 間の溶接条件	すみ肉溶接	すみ肉溶接	すみ肉溶接	開先溶接	すみ肉溶接	すみ肉溶接	開先溶接	すみ肉溶接	すみ肉溶接	すみ肉溶接
その他	垂直補剛材 腹板ガセット フランジガセット	垂直補剛材	垂直補剛材	ジ'ペル 枕木受け (E6TIG溶接)	ジ'ペル 枕木受け (E6TIG溶接)	柱脚カセット とフランジガセット を割ける	ジ'ペル	ジ'ペル 柱脚UTIG溶接	垂直補剛材 既設の柱脚 アンダーカット	垂直補剛材 既設の柱脚 アンダーカット

表-2 使用鋼材の機械的性質および化学成分

桁試験 体番号	鋼種	板厚 mm	機械的性質			化学成分(%)					
			降伏点 MPa	引張強度 MPa	伸び %	C	S i	Mn	P	S	N i
						×100			×1000		
A B C	SM490A	12	460	580	22	17	31	128	16	4	—
		9	410	540	28	18	28	132	20	4	—
D E F G H J	SM490A	12	363	520	27	17	24	133	17	3	2 3
		9	363	520	27	17	24	133	17	3	2 3
I	SM400A	12	322	430	31	12	19	65	3	4	—
		9	343	430	29	12	15	68	3	4	—

電気油圧式サーボ型
疲労試験機

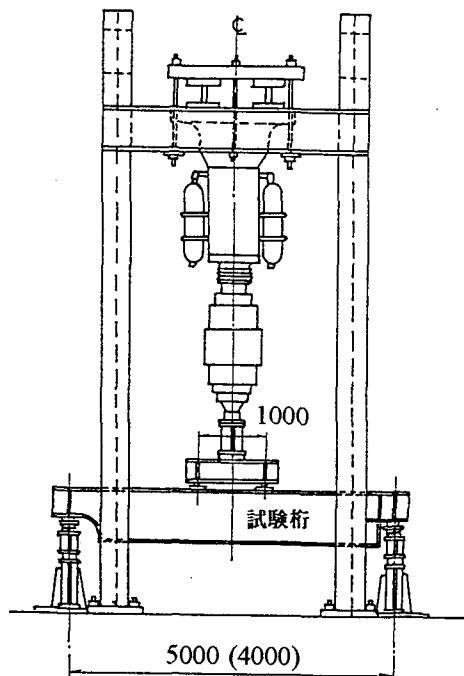


図-2 試験装置

表-3 静的載荷試験結果

部位	E 桁		G 桁		I 桁		H 桁		単位 : MPa
	実測	計算	実測	計算	実測	計算	実測	計算	
上 フ ラン ジ	68	77	36	43	69	73	35	43	
	81	77	39	43	84	99	40	43	
	-	-	-	-	86	90	-	-	
	-	-	-	-	63	66	-	-	
下 フ ラン ジ	70	65	37	36	87	94	34	36	
	118	113	63	63	117	128	62	63	
	106	113	60	63	118	128	62	63	
	74	65	39	36	113	110	37	36	
	-	-	-	-	111	110	-	-	
	--	-	-	-	107	110	-	-	
	-	-	-	-	80	80	--	--	
垂 直 補 剛 材 下 端	101	97	58	54	81	72	51	54	
	97	91	49	50	95	93	54	50	
	74	97	52	54	98	86	52	54	
	93	91	57	50	90	86	45	50	
腹 板 ガ セ ト	70	39	37	22	-	-	38	22	
	69	39	32	22	-	-	31	22	
	57	39	33	22	-	-	34	22	
	-	-	37	22	-	-	-	-	

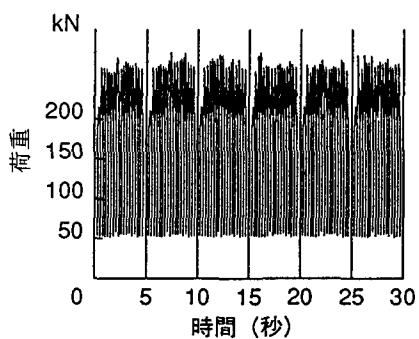


図-3 シミュレーション波形

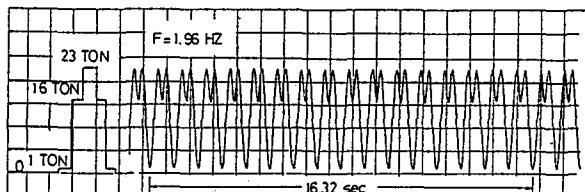
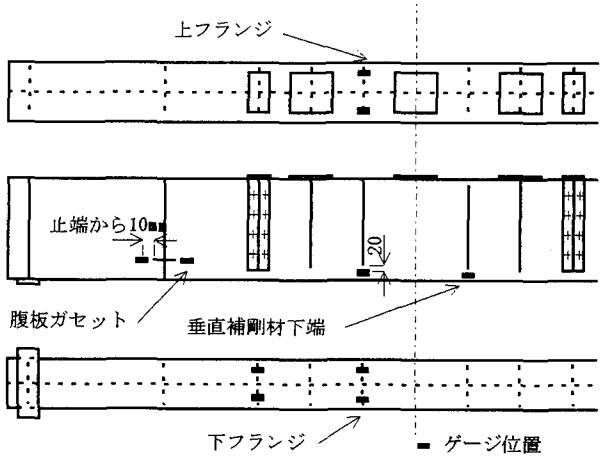


図-4 試験荷重波形



単位 : mm

図-5 ゲージ位置 (E 桁)

- ①き裂は、フランジ付加板、水平補剛材および垂直補剛材の取り付け溶接部に多く発生した。
- ②載荷位置のフランジ付加板のき裂は、非載荷のものより早期に発生した。
- ③J桁は他の試験体と比較してき裂の発生量が多い。フランジと腹板の縦すみ肉溶接については、意図的に欠陥を発生させたにも関わらず、き裂の発生は見られなかった。
- ④圧縮側にき裂の発生が見られたのは、フランジ付加板のみで、それ以外のき裂は引張側に集中している。
- ⑤水平補剛材に関しては、非連結タイプの方が早期にき裂が発生した。
- ⑥ジベル部には、き裂の発生は見られなかった。
- ⑦桁端切り欠き構造については、曲線切り欠き部の簡易補強構造案の一部にき裂が発生した。

(3) 縦すみ肉溶接

縦方向溶接のうちすみ肉溶接および部分溶け込み開先溶接の疲労強度は、溶接欠陥、特にルート部のプローホールの影響を大きく受けることがこれまでの大型試験体の疲労試験^[7]により明らかになっていいる。

本試験では試験体の腹板とフランジを連結する縦方向継手を一般的な品質のすみ肉溶接とすることを基本としたが、D桁およびG桁に関しては、すみ肉溶接よりもプローホール等の欠陥が出にくいと考えられる開先溶接とした。溶接はいずれも自動溶接である。H桁、I桁および開先溶接を採用したG桁には、若干のプローホールが検出されたが（図-7参照），特に手直しは行っていない。また、2.1に述べたようにJ桁については、縦すみ肉溶接部に事前にジンクリッヂプライマーを塗布したうえで溶接することによって故意にプローホールを発生させており、他の試験体に比べてかなり大きなプローホールが見られた。X線により確認されたプローホールの高さを図-7に示す。また、プローホールの断面を写真-1に示す。J桁以外の桁に発生しているプローホールは、通常の鉄道橋に内在するプローホールの寸法と同程度と考えられる。

図-8に縦ビード溶接部からの破断データの疲労試験結果を、写真-2には破面写真を示す。き裂の発生はA桁およびC桁の各1カ所のみであった。図-9には未破断データの試験結果を示す。J桁のように、水平補剛材から先に亀裂が発生し、発生したき裂を補修しながらさらに繰り返し回数を増加させていったが、1200万回を超えてプローホールからのき裂

は認められなかつた。これは他の桁においても同様であり、プローホールからのき裂の発生は認められなかつた。このことは実橋に用いられていた縦桁を使用した疲労試験の結果^[8]と同様の傾向を示している。

図-8,9にはこれまでに実施してきた大型試験体による疲労試験結果^{[9], [20], [21], [22]}と「鋼構造疲労設計指針、日本鋼構造協会編」^[23]（JSSC指針）の疲労設計曲線をあわせて示す。以下、疲労試験の結果は疲労き裂が実際に目視で確認できる可能な長さ（10mm～30mm）に達したときを疲労寿命と考えて繰り返し回数をプロットした。なお、JSSC指針では縦方向溶接継手の疲労強度等級を鋼種に関わらずD等級としている。本試験では、プローホールを含むすみ肉溶接継手および開先溶接継手の疲労強度は、図-7に示すように高さが1.5mmを超えるような大きなプローホールがあつてもJSSC指針のB等級をほぼ満足している^{[9], [20]}。ただし、AASHTOでは縦すみ肉溶接の疲労強度をすみ肉溶接の場合には125MPaとしているが、部分溶け込み溶接の場合には100MPaに下げており^[24]、今後、この点に関してさらに検討が必要と考えられる。

以上のことから、非調質鋼の場合、調質高張力鋼に比べて疲労強度は大きくなると考えられる。これは、切欠き感度が低い非調質鋼では調質高張力鋼と比べて縦すみ肉溶接のプローホールからき裂へ進展するものの発生率が少なく、疲労強度に与える影響が小さいためと考えられる。したがって、非調質鋼の場合、疲労強度等級をJSSC指針に定めるD等級より高くできると考えられる。このようなことから鉄道橋の設計基準では、溶接工の技量検定や施工試験によって内在する欠陥が小さくなることが確認されている場合には、JSSC指針より1ランク高いC等級を適用することにしている。

(4) フランジの付加板

本試験では、全ての試験体の上フランジの載荷位置およびその近傍に付加板を取付けた。これは、開床式橋まくらぎ形式の桁に用いられるまくらぎ受け、カバープレートあるいは既設桁の補強鋼板を想定したもので、載荷位置に取り付けた付加板がまくらぎ受けに相当すると考えられる。付加板の長さは100mmおよび200mm^[25]である。溶接は脚長を5mmとした全周すみ肉溶接である。なお、試験体Eでは、溶接部止端部にTIG処理を施した。

試験の結果、まくらぎ受けを想定した載荷位置の付加板には、繰り返し回数 2×10^6 回付近で、前面す

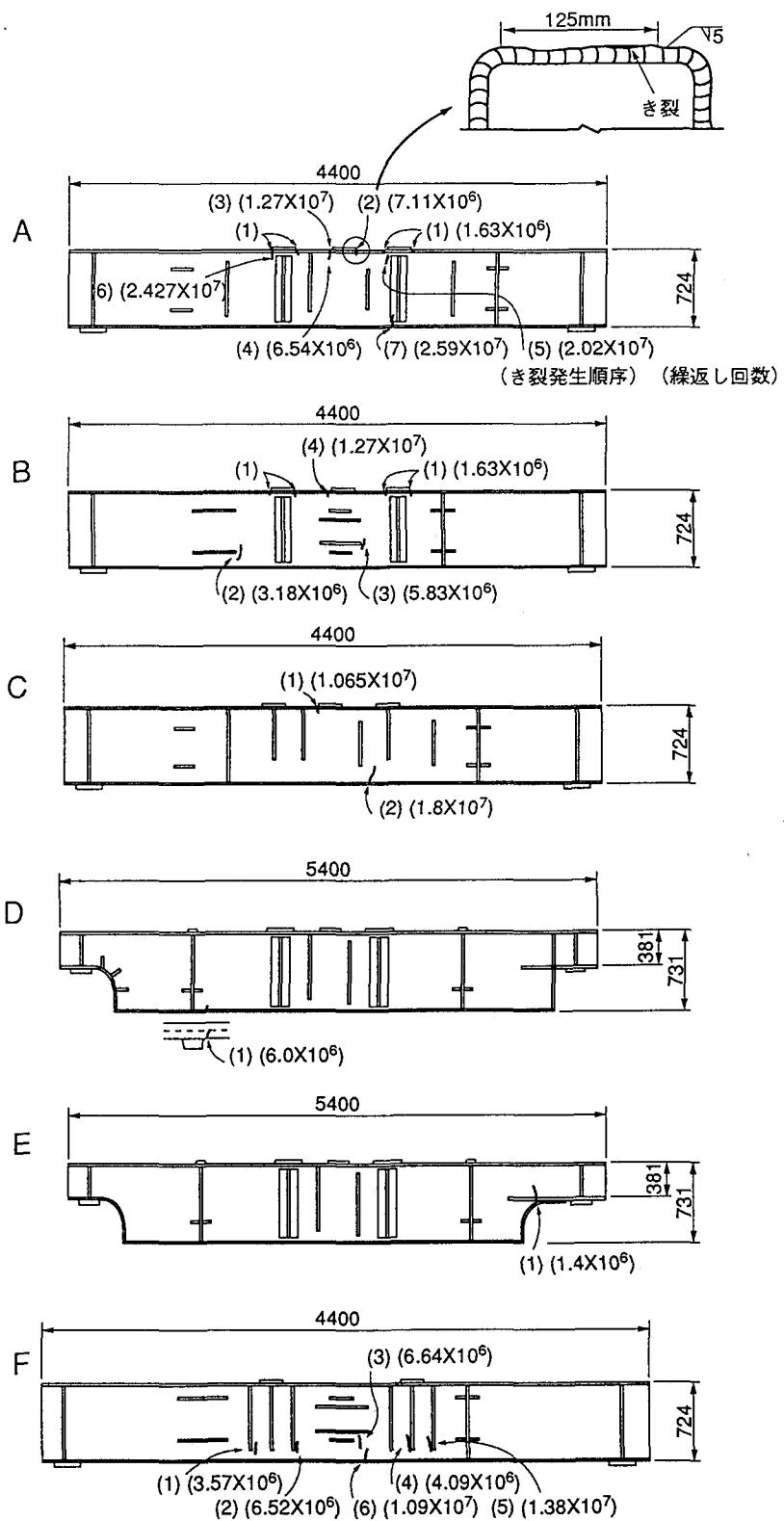
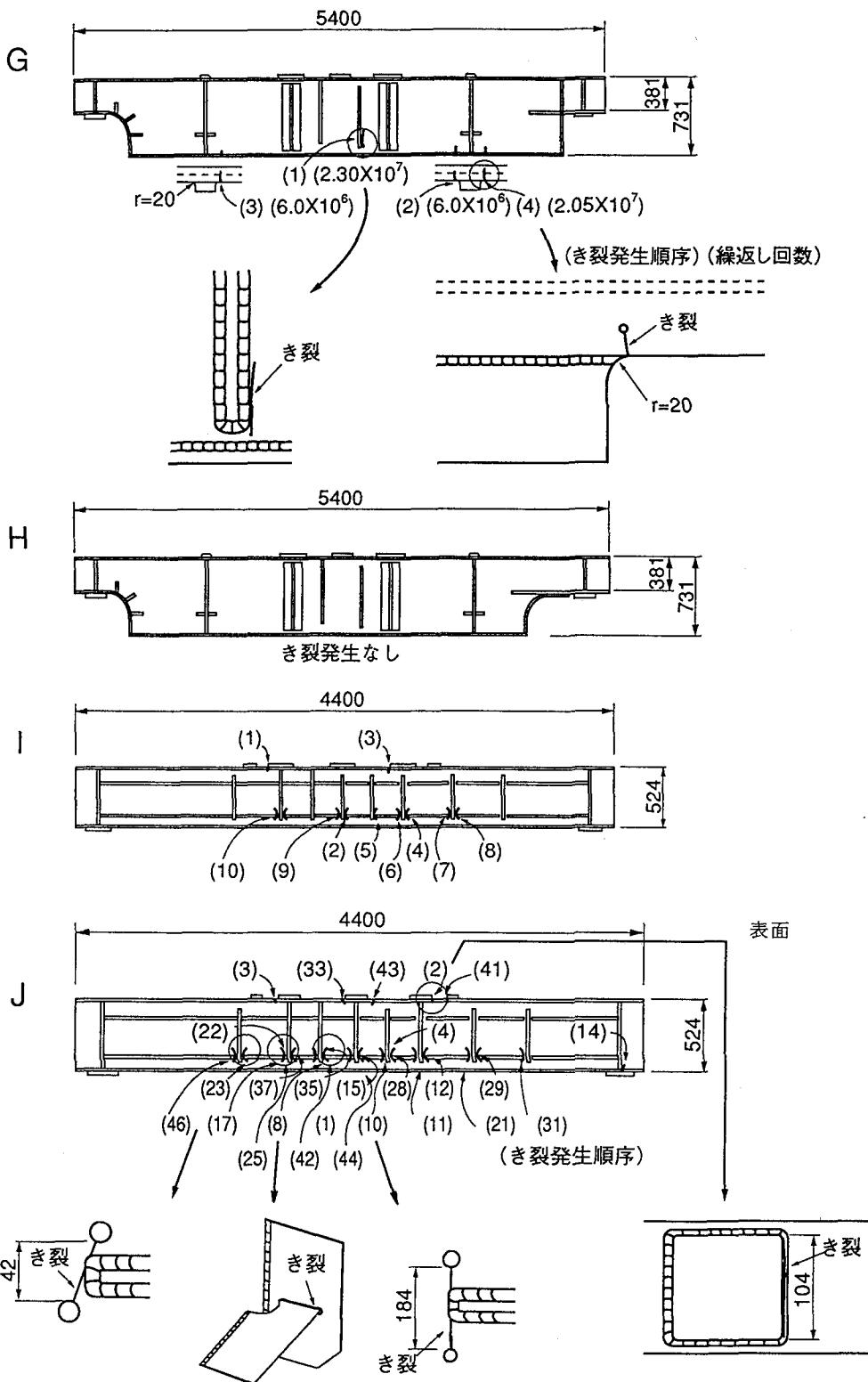


図-6 き裂の発生状況 (その1)



単位: mm

図-6 き裂の発生状況 (その 2)

J

裏面

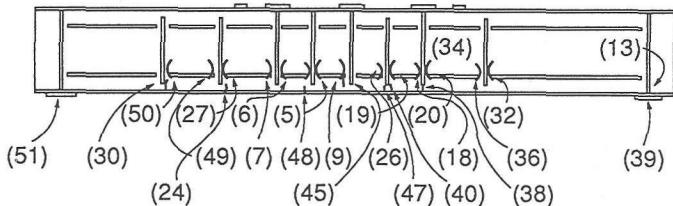


図-6 き裂の発生状況（その3）

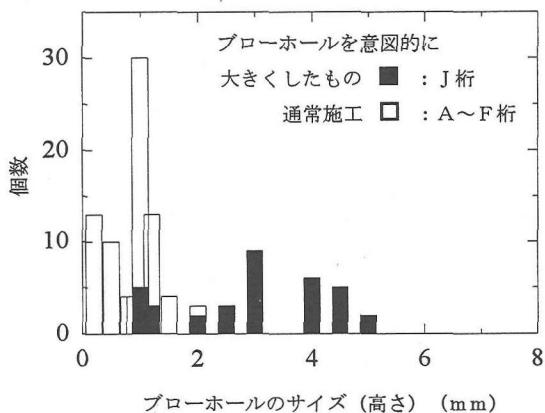


図-7 プローホールサイズの頻度分布

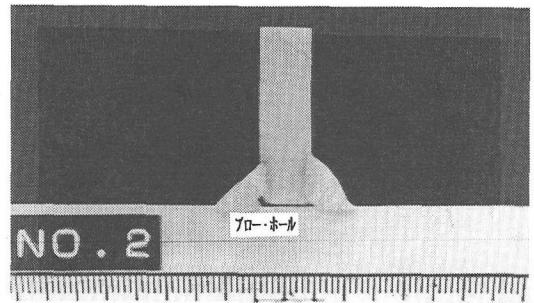


写真-1 プローホールのある断面

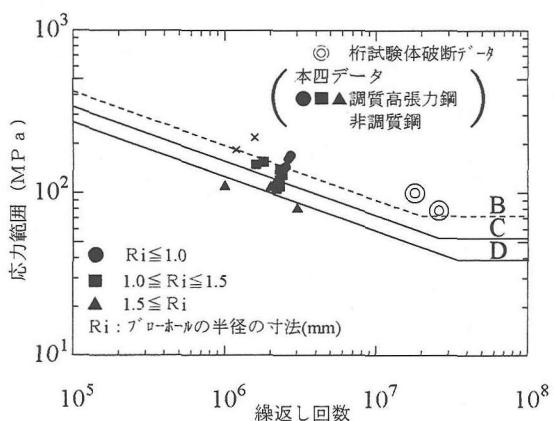


図-8 疲労試験結果

(縦すみ肉溶接部、破断)

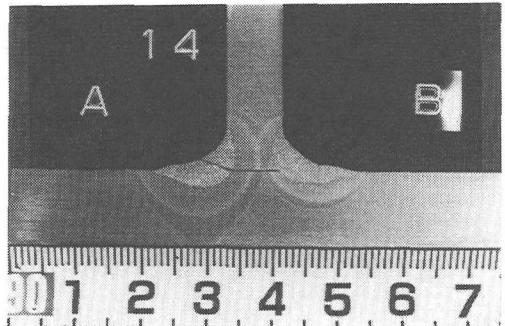


写真-2 破面写真 (マクロ)

み肉溶接のルート部にき裂が発生した。き裂の発生した様子を写真-3に示す。このき裂は、進行してビードを破断した後上フランジにまで進展した。なお、J桁において、ルート部のき裂発生後にその近傍の溶接止端部に1カ所のみき裂が発生した。また、非載荷の付加板には、繰り返し回数 1×10^7 回付近で前面すみ肉溶接ビードの止端部にき裂が発生した。

フランジ付加板の疲労強度について、JSSC指針では付加板の長さと溶接止端処理に応じて疲労強度等級を定めており、本試験に用いたような長さが300mm以下の付加板では載荷、非載荷の区別無しに同じF等級と評価している。図-10に、本研究における試験結果をS-N線図（JSSC指針のF等級）およびその根拠となるデータとともに示す。これから、非載荷の付加板の疲労強度はJSSC指針に示すデータに比べて多少高めになること、および載荷位置の付加板の疲労強度はF等級をかろうじて満足するものの他のデータに比べて明らかに小さいことがわかる。このように、両者にはき裂の発生状況および疲労強度に明確な差が認められた。これは、付加板とフランジに多少隙があり、載荷によって付加板に曲げが生じ、前面すみ肉溶接のルート部にそれに伴う応力が発生することが主な理由と考えられる。なお、TIG処理を施した非載荷の付加板からはき裂の発生は見られなかった。

これらの試験結果から、まくらぎ受けの溶接部は疲労強度が小さいことが予想され、今後十分に注意を要すると考えられる。

なお、ジベル取り付け部の溶接からはき裂の発生は見られなかった。

（5）フランジガセット

本実験では、B桁、D桁、E桁およびF桁に、切り出し一体型ガセットあるいはフランジと同厚の鋼板を開先溶接で取り付けフィレット部をグラインダーで仕上げたガセットを取り付けた。フィレット半径は20mmあるいは40mmである。

き裂は、D桁およびG桁の下フランジに取り付けたフィレット半径20mmの溶接ガセットに発生した。切り出し一体型ガセットおよびフィレット半径40mmの溶接ガセットにはき裂は発生していない。 $r=20\text{mm}$ のコーナー部から発生したき裂の様子を写真-4に示す。これらの結果を図-11のS-N線図に示す。図にはJSSC指針のF等級の設計線も示すが、フィレット半径20mmの溶接ガセットには疲労強度がF等級を下回るものもあった。F等級を下回った試験体

のき裂は写真-5に示すようにフランジとガセットの溶接の余盛をそのまま残していたことが原因と考えられる。実施の鋼鉄道橋ではこの余盛をグラインダーで平らに仕上げることとなっており、余盛を仕上げた箇所から発生したき裂はF等級を下回ることがなかった。この他、フランジガセットの疲労強度は、フィレット部の仕上げの良否にも影響される²⁶⁾ことが明らかにされている。なお、従来の小型試験体でのデータ^{23), 27), 28), 29), 30)}では 2×10^6 回近傍において多数の疲労き裂が発生しており、さらに今回の試験より 10^7 回オーダーにおける疲労き裂の発生が確認され、このレベルによる疲労強度の設定が重要性を持つことを確認した。

フランジガセットは、鉄道ではプレートガーダーの主桁あるいはトラス桁の縦桁に適用されることが多い、現在設計するものについてはフィレット半径を40mm以上にするのを標準にしている。しかし、既設橋には、疲労強度が小さいフィレット半径20mm程度のものが多く架設されており、維持管理上、十分に注意を要すると考えられる。

（6）垂直補剛材

鉄道橋では、現在、垂直補剛材の下端部の溶接に回し溶接を義務付けている。これは、下端部は面内応力が大きくかつ溶接欠陥が発生しやすいことからこの位置に溶接始終端を避けたため³¹⁾である。しかし、製作の省力化を考慮すると、回し溶接の省略についての検討も必要となる。このようなことから、本実験では、補剛材下端の溶接形状を回し溶接にした場合、補剛材の下端位置で止めた場合および補剛材下端より上で溶接を止めた場合について試験を行った。これらの補剛材下端部の溶接形状の違いを図-12に示す。なお、溶接止端部は各溶接とも非仕上げとした。

試験の結果、図-13に示すように疲労き裂のほとんどは補剛材下端を回し溶接したタイプAに見られた。また補剛材下端位置で溶接を止めたタイプBに疲労き裂の発生が1カ所認められた。図-14にはき裂が発生しなかったケースを示す。タイプCはこの中に含まれた。タイプAでは写真-6に示すように、き裂は垂直補剛材下端の回し溶接部の横側から発生し上下方向に進展した。き裂の発生位置および方向から考えてこれらのき裂は面内応力に起因するものと考えられる。また、アンダーカットがある場合には、き裂はアンダーカットの底部から発生した。

図-15はアンダーカットの深さに着目した試験結果のS-N線図である。図-15より深さ0.5mm未満の

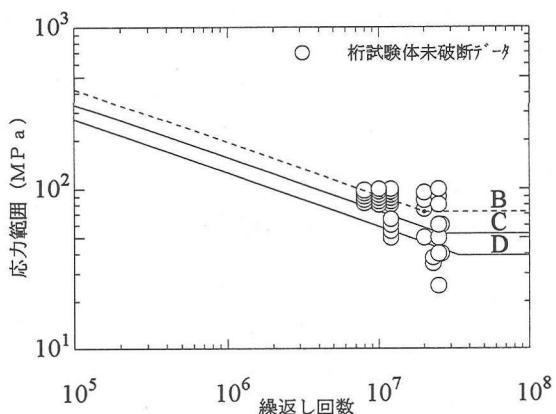


図-9 疲労試験結果
(縦すみ肉溶接部, 未破断)

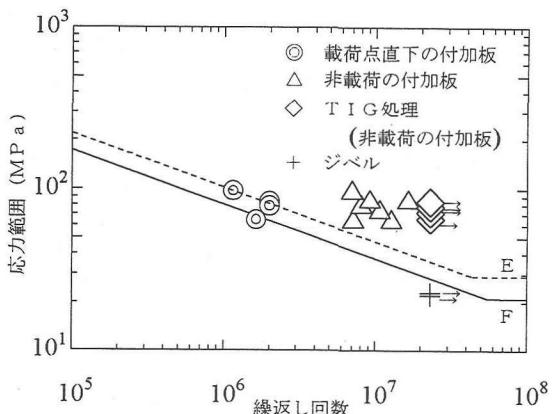


図-10 疲労試験結果 (フランジ付加板)

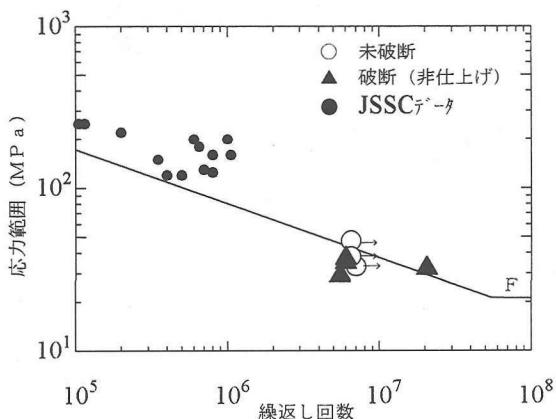


図-11 疲労試験結果 (フランジガセット)

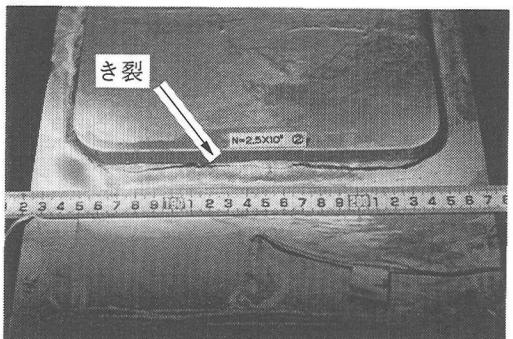


写真-3 まくら木受けに発生したき裂

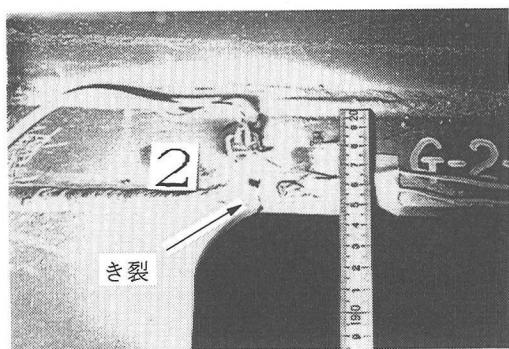


写真-4 フランジガセットとき裂の発生状況

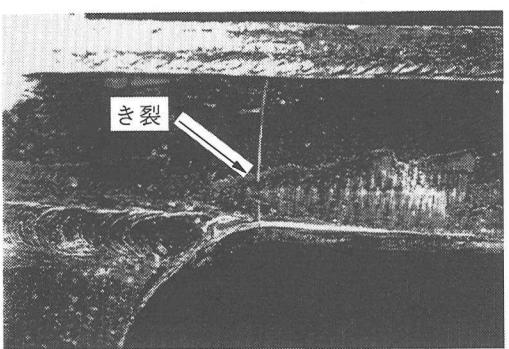


写真-5 止端非仕上げ部から発生したき裂

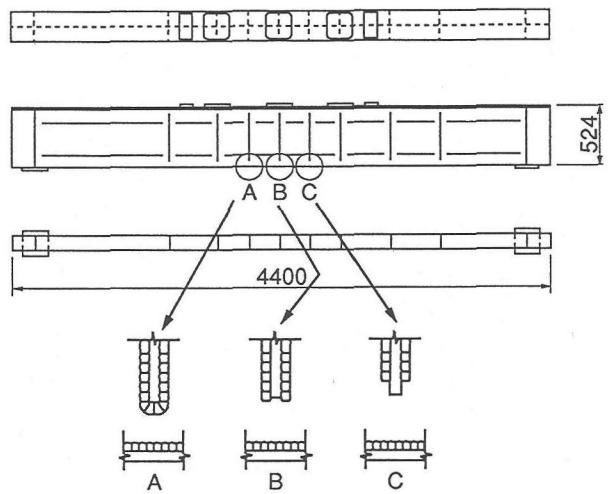


図-12 垂直補剛材下端部の溶接形状の違い

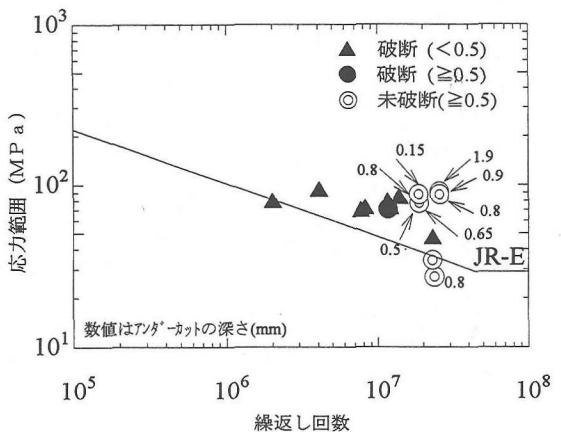


図-15 アンダーカットからのき裂の発生

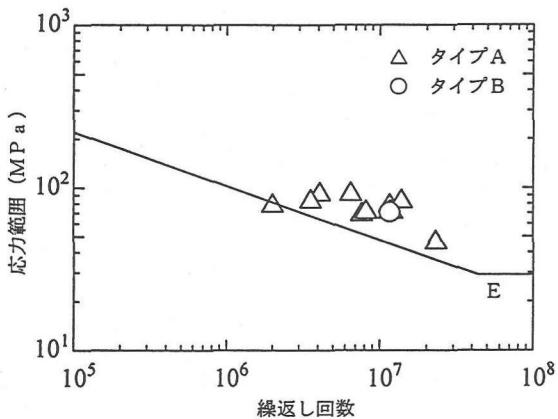


図-13 垂直補剛材下端部の溶接形状の違い（破断）

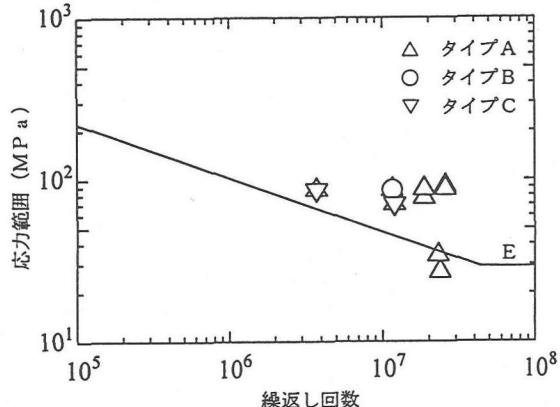


図-14 垂直補剛材下端部の溶接形状の違い（未破断）

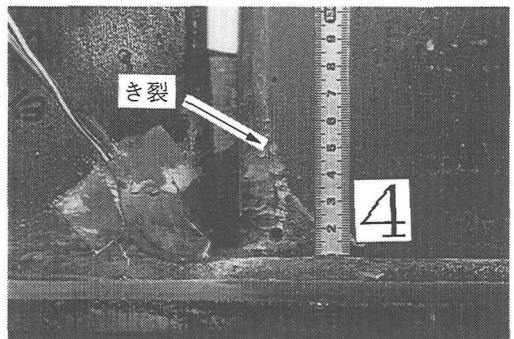


写真-6 垂直補剛材下端部に発生したき裂

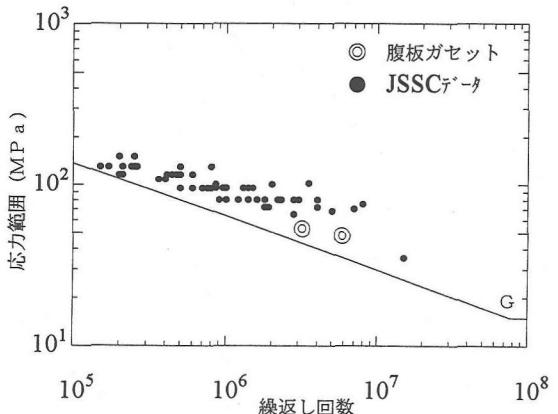


図-16 疲労試験の結果（腹板ガセット）

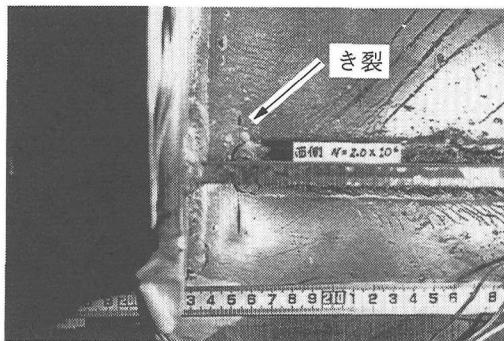


写真-7 水平補剛材に発生したき裂
(水平補剛材接合タイプ)

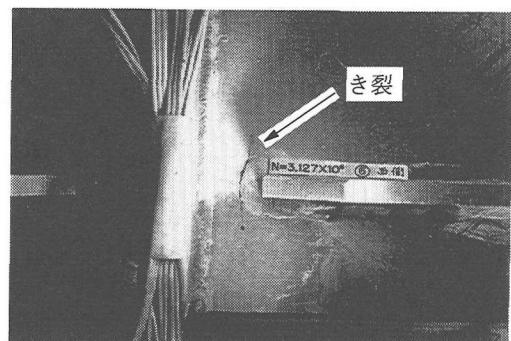


写真-8 水平補剛材に発生したき裂
(水平補剛材非連結タイプ)

アンダーカットから疲労亀裂が発生することが確認される。ただし、通常の品質管理がなされていればJSSC指針のE等級を下回るものではなく、現在の基準を満足しているものと考えられる。また、道路橋示方書³²⁾ではアンダーカットの大きさが疲労に影響を及ぼす恐れがあることから、主要部材、二次部材別にアンダーカットの深さを規定している。今回の試験では、図-15に示すように0.5mm以上のアンダーカットが存在しても疲労き裂が発生しない場合があることも明らかになり、アンダーカットの深さに依存しない結果となった。ただし、安全をみて現行の鉄道橋設計標準では0.5mm以上のアンダーカットは溶接したのちグラインダーで仕上げることとしている。

(7) 水平補剛材および腹板ガセット

a) 水平補剛材

鉄道橋では、水平補剛材を設ける場合、垂直補剛材と連結する構造が一般的である。しかし、この部分の溶接は手溶接に頼らざるを得ないため、溶接しない方が省力化につながる。このようなことから、この本実験ではI桁およびJ桁において、桁中央を境として、一方を写真-7に示すように水平補剛材と垂直補剛材を接合したタイプに、他方を写真-8に示すように水平補剛材と垂直補剛材を非連結にしたタイプとして両者の比較を行った。

疲労き裂の発生位置は図-6のI桁、J桁に示す通りである。き裂は両者に発生しているが、これは、1ヶ所でき裂が発生した後、継続して疲労試験を行ったためである。水平補剛材を非連結にした方がき裂の発生が早い。試験体の左右で連結タイプ、

非連結タイプの同数の試験条件を設定していることから、き裂の発生数で比較すると非連結の方がき裂の発生が多い。

鉄道橋では、最近高速化に伴い腹板等の面外方向への振動が増加する傾向にあり^{33)、34)}、それに伴ってこの部分でもき裂が発生しやすくなると考えられるが、連結構造はこのような腹板の面外振動による応力の増加を抑制する効果も期待できる。このようなことから、水平補剛材は従来通り垂直補剛材と連結する構造を用いることとした。

b) 腹板ガセット

腹板ガセットの試験結果を図-16に示す。腹板ガセットの応力範囲は実測データを用いた。この継手も水平補剛材と同じ継手に分類されるが、鋼材長の長い水平補剛材端部の疲労強度とほぼ同程度であった。

(8) 桁端の切り欠き構造

桁端の切り欠き構造のうち、図-6のE桁に示すように曲線切り欠き構造に対する簡易な補強を想定した構造の一つにき裂が発生した。この構造では、水平フランジと曲線フランジの交差部に応力が集中しやすく、また溶接に欠陥が生じやすいために疲労強度は小さいと考えられる。それ以外には、き裂の発生は見られなかった。特に、直線切り欠きの構造(D桁・G桁右)は、腐食が進んだ桁の支承部の改造に使用されており今後も増加すると考えられるが、き裂の発生は認められなかった。実際には現場溶接になるので、特に交差部の溶接には十分注意が必要であろう。

4. 結論

研究の一環で行ったものである。

本研究では、大型桁試験体を用いて、鉄道橋で一般的に用いる非調質鋼継手の長寿命域での疲労強度の検討を行った。この結果、明らかとなった主な継手の疲労特性についてまとめると以下のようになる。

(1) 従来、あまり検討されていなかった 10^7 回オーダーにおける疲労試験を実施したところ、縦すみ肉溶接、付加板、垂直補剛材等において疲労き裂が発生した。このことより 10^6 回を基準とした考え方のみでなく、 10^7 回オーダーを基準とした疲労強度の定め方の重要性を確認した。

(2) 非調質鋼を用いた縦すみ肉溶接の疲労強度は、調質高張力鋼の場合の上限値程度となっており、ブローホールの高さが1.5mmを超えるような大きなものがあってもJSSC指針のB等級を満足している。このように非調質鋼の場合、調質高張力鋼に比べて疲労強度は大きくなるが、これは切欠き感度が低い非調質鋼ではブローホールからき裂へ進展するものの発生率が少なく、疲労強度に与える影響が小さいためと考えられる。なお、設計基準では余裕をみてC等級とした。

(3) フランジの付加板のうち、非載荷の付加板には前面すみ肉溶接の止端部に、載荷箇所の付加板には桁端に近い前面すみ肉溶接のルート部にき裂が発生した。これらの疲労強度は、前者ではJSSC指針に示すF等級のデータに比べて多少高めであり、後者ではF等級をかろうじて満足するものの他のデータに比べて明らかに小さい。

(4) フィレット半径の小さいフランジガセットの疲労強度は小型試験体でのデータに比べてかなり小さく、JSSC指針のF等級を満足できないと考えられる。このような継手は既設橋に多く使用されており、今後、十分に注意を要する継手である。

(5) 補剛材下端部の面内応力による疲労強度について、いずれもJSSC指針のE等級を満足することが明らかになった。補剛材の回し溶接部については、回し溶接を行うことによってかえって低下する場合がある。回し溶接部にアンダーカットがある場合には疲労き裂はアンダーカットから発生した。ただし、必ずしもアンダーカットの深さが大きいものから疲労き裂が発生するとは限らない。

謝辞：本研究の実施にあたりご協力いただいたトピ一工業（株）、川崎製鉄（株）の関係各位に感謝の意を表します。なお、本研究は、運輸省からの受託

参考文献

- 1) 阪本謙二、市川篤司：鉄道建造物設計標準[鋼・合成構造物]の要旨、鉄道総研報告、Vol. 5, No. 10, pp. 1-9, 1991. 10.
- 2) 三木千壽、坂野昌弘、館石和雄、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) 土木学会鋼構造委員会疲労変状調査小委員会：鋼橋の疲労変状、土木学会論文集、No. 368, pp. 1-12, 1986. 4.
- 4) 阿部 他：下路プレートガーダーの床組の疲労、構造物設計資料、No. 60, pp. 2-5, 1979. 12.
- 5) 岩崎雅紀、名取暢、深沢誠、寺田博昌：鋼橋の疲労損傷事例と補修・補強対策、横河橋梁技報、No. 18, pp. 36-52, 1989. 1.
- 6) 明石重雄：溶接部疲労の現状と研究、土木学会論文集、Vol. 350, pp. 1-7, 1984. 10.
- 7) 市川篤司：鋼鉄道橋の補修・補強の概要、橋梁と基礎、pp. 17-21, 1994. 8.
- 8) 国鉄建造物設計標準・同解説：土木学会、1983.
- 9) 本州四国連絡橋公団：上部構造設計基準・同解説、1980. 6.
- 10) Fisher, J. W., Mertz, D. R. and Zhong, A. : STEEL BRIDGE MEMBERS UNDER VARIABLE AMPLITUDE, LONG LIFE FATIGUE LOADING, Fritz Engineering Laboratory, No. 463-1(83), 1983. 9.
- 11) 阿部英彦：溶接橋の注意点、構造物設計資料、1964. 12.
- 12) 鉄道構造物等設計標準・同解説（鋼・合成構造物：丸善、1992. 10.
- 13) 阪本謙二、阿部允、杉館政雄：実働荷重による鋼橋部材の疲労強度（その1）、鉄道総研報告、Vol. 3, No. 10, pp. 22-29, 1989. 10.
- 14) 阪本謙二、阿部允、杉館政雄：実働荷重による鋼橋部材の疲労強度（その2）、鉄道総研報告、Vol. 5, No. 5, pp. 1-9, 1991. 5.
- 15) 阪本謙二：機械・構造物の強度評価と安全性、3. 機械・構造物の強度と安全性評価の実例、材料、41巻、第466号、pp. 1198-1203, 1992. 7.
- 16) 三木千壽、森猛、阪本謙二、杉本一朗：鋼鉄道橋桁のシミュレーション荷重疲労試験、土木学会第45回年次学術講演会、pp. 838-839, 1990. 9.
- 17) 三木千壽、館石和雄、慶甲秀：縦方向継手強度に与えるブローホールの影響に関する確率的検討、Journal Society of Material Science Japan, Vol. 43, pp. 421-426, No. 487, 1994.
- 18) 谷口紀久、阿部允：長期使用した鉄道橋縦桁の長期疲

- 労試験、構造物設計資料、No. 75, pp. 28-32, 1983. 9.
- 19) Tajima, J., Takeno, K., Miki, C. and Ito, F.: FATIGUE STRENGTH OF TRUSS MADE OF HIGH STRENGTH STEELS, Proc. of JSCE, No. 341, 1984. 1.
- 20) 竹名興英, 伊藤文夫, 平野茂, 三木千壽: ボックス断面内の溶接欠陥が疲労強度に及ぼす影響, 構造工学論文集, Vol. 35A, pp. 939-949, 1989.
- 21) Sakamoto, K., Yasuda, M., Fukazawa, M. and Miki, C. : AN INVESTIGATION ON FATIGUE STRENGTH FOR TRANSVERSE CHORD OF STIFFENING TRUSS, Proc. of JSCE. Vol. 1, No. 2, pp. 157-167, 1984. 10.
- 22) 伊藤文夫, 山岸一彦, 三木千壽: ボックス断面供試体の大型疲労試験, 土木学会第40回年次学術講演会, pp. 251-252, 1984. 10.
- 23) 日本鋼構造協会: 鋼構造物の疲労設計指針・同解説, 技報堂, 1993. 4.
- 24) AASHTO : Standard Specification for Highway Bridges, SI Units First Edition , 1994.
- 25) 諸戸健一, 山田健太郎: カバーブレートの疲れ強さと疲れ許容力度, 構造工学論文集, Vol. 33A, pp. 403-410, 1987. 3.
- 26) 酒井吉永, 松井銳一, 山田健太郎, 近藤明雅: き裂の突き合せ溶接補修とその疲れ挙動, 構造工学論文集, Vol. 33A, pp. 411-420, 1987. 3.
- 27) 山田健太郎, 三ツ木幸子, 近藤明雅: 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.
- 28) 坂巻和男, 山田健太郎: 疲れ試験データベースの作成とその利用, 土木学会論文集, No. 356, pp. 547-553, 1985. 4.
- 29) 科学技術庁金属材料技術研究所: 金属材料技術研究所 疲れデータシート, 1980.
- 30) 川崎製鉄研究開発センター構造研究室: 疲労試験データベース
- 31) 名取暢, 深沢誠, 寺田博昌, 寺尾圭史: 面外曲げを受けるすみ肉回し溶接部の疲労強度, 横河橋梁技報, No. 19, pp. 37-45, 1990. 1.
- 32) 道路橋示方書, 日本道路協会, 1996. 12.
- 33) 市川篤司, 松本信之: 速度向上と橋梁, 日本鉄道施設協会誌, Vol. 7, No. 9, pp. 52-55, 1993.
- 34) Isoura, K. : Maintenance Program of Shinkansen Structures: IABSE SYMPOSIUM LISBON, pp. 639-649, 1989.
- 35) Miki, C., Murakoshi, J., Toyoda, Y. and Sakano, M. : LONG LIFE FATIGUE BEHAVIOR OF FILLET WELDED JOINTS UNDER COMPUTER SIMULATED HIGHWAY AND RAILROAD LOADING, Proc. of JSCE. Vol. 6, No. 1, pp. 63-70 , 1989. 4.

(1996. 8. 1 受付)

LONG LIFE FATIGUE STRENGTH OF WELDED JOINTS IN STEEL RAILWAY BRIDGES

Kenji SAKAMOTO, Ichiro SUGIMOTO, Atsushi ICHIKAWA,
Makoto ABE and Chitoshi MIKI

In steel railway bridges, it is important to evaluate fatigue strength in long life region both for design and maintenance of bridges. There are few fatigue test data of 400~520MPa class steel with long life fatigue test and full scale specimens. Various types of welded joints in ten full scale specimens which included some details of steel railway bridges were tested. Fatigue performances of cover plate, joint of horizontal stiffener, flange gusset and longitudinal bead are discussed, and compare with those of small test specimens data and JSSC S-N curve.