

並列曲線 I 桁橋の疲労実験

FATIGUE TESTS ON MULTIPLE CURVED I-GIRDER BRIDGES

中井 博^{*}、北田俊行^{**}、明橋克良^{***}、矢野直樹^{****}

By Hiroshi NAKAI, Toshiyuki KITADA, Katsuyoshi AKEHASHI and Naoki YANO

The present study describes the fatigue strength of the horizontally curved I-girder bridges. The points focused on this fatigue study are the following structural details: the lower rib plates in the junction between main girder and floor beam, and lateral gusset plates. The fatigue test was carried out by using a curved twin I-girder bridge model. Then, the model girders are tested up to the fatigue failure after having checked the local stresses in static loading test. Using test results, the causes and the evaluations concerning the initiation of fatigue cracks are discussed in detail.

1. まえがき

都市内の高速道路橋では、立地条件の制約から道路線形が複雑化し、そのため曲線橋の建設される機会が多くなってきている。

曲線橋に関する静力学的挙動、動力学的挙動、あるいは座屈安定性などの研究は、これまで数多く発表されている¹⁾。しかしながら、疲労強度に着目した研究は、数少なく、米国においてJ.W.Fisherらによって行われた曲線箱桁、および曲線 I 桁に関する一連の疲労実験²⁾があるだけである。ところが、わが国では地震や風の作用に対してより安全な構造とするため、並列曲線 I 桁橋の横構・対傾構の組み方や各部材の溶接方法が米国のそれとは異っており、上記の研究は、あまり参考とならず、わが国独自の研究が必要となる。

現在のところ、曲線桁橋特有の疲労損傷事例は、国内であまり報告されていない。しかし、並列直線 I 桁橋の疲労損傷事例を調べて見ると、主桁と横桁、あるいは対傾構との取合い部、および桁端切欠き部やソールプレートなど、これまで構造詳細部の設計においてあまり重視されなかった構造部材に多くの疲労損傷が発生している^{3), 4)}。したがって、より複雑な構造詳細をもつ曲線桁橋では、疲労に対する一層の配慮が必要である。

曲線桁橋に特有の力学的特性で、疲労強度に影響を及ぼすと考えられるものとしては、下記のものが挙げられる。

[*]	工博	大阪市立大学	教授	工学部土木工学科	(〒558 大阪市住吉区杉本3-3-138)
^{**}	工博	大阪市立大学	助教授	工学部土木工学科	(〒558 大阪市住吉区杉本3-3-138)
^{***}	工修	㈱横河橋梁製作所	研究所研究課	(〒260 千葉市新港88)	
^{****}		大阪市立大学大学院	院 生	工学部土木工学科	(〒558 大阪市住吉区杉本3-3-138)

- i) 腹板が曲率を有しているため、腹板に作用する面内の曲げ応力に加えて、面外の曲げ応力が常時発生する。また、その応力は、フランジと腹板との隅肉溶接部で最大となる。
- ii) 曲率の影響によって大きなそり応力がフランジに発生し、その合力は、横桁、対傾構、および横構に伝達される。そのため、それらの取付部の腹板部において、大きな面外曲げ応力が発生する。
- iii) 横構、横桁、および対傾構は、地震や風などの水平荷重に抵抗する以外に、主桁間の荷重分配作用や、死・活荷重などの主荷重によって生じるねじりモーメントに対して抵抗する役割を持っている。とくに、横構は、一次部材として設計され、その作用力の大きさ、および頻度とも、直線 I 桁橋に比べて相当に差異がある。

上記 i) に関して、著者らは、すでに数値解析、および 1 本の曲線 I 桁を対象とした疲労実験を行っている⁵⁾。その結果、現行の設計基準⁶⁾を守っていれば、腹板とフランジとの隅肉溶接部は、疲労に関して安全であるという結論を得ている。

そこで、本研究では、残された上記 ii) と iii) との曲線桁特有の力学的挙動が、その構造詳細部の疲労強度に対して与える影響を調べるため、曲線 2 主桁の供試体を製作し、疲労実験を行った。ここでは、曲線 2 主桁供試体のうち、横桁取付け部の下側リブプレート、および横構ガセットプレートの取付け部に着目し、それらの疲労強度について考察を行い、並列曲線 I 桁橋の疲労に関する一資料を提供しようとするものである。

2. 実験供試体および載荷方法

本研究では、図-1 (a) に示すように、2 本の I 桁を並列させた曲線桁の実験供試体（使用鋼材 S S 4 1）を製作した。着目部位である横桁取付け部の下側リブプレート、および横構のガセットプレートの取付け部の詳細図をそれぞれ、同図 (b)、および (c) に示す。なお、横桁取付け部以外の一般部の垂直補剛材は、メタルタッチとした。

供試体の設計は、阪神高速道路公団・曲線桁設計の手引き（案）⁷⁾ に準じて行った。ここで、腹板の曲がりの程度を表す曲率パラメーター Z を以下のように設定し、供試体の寸法諸量を決定した。

$$Z = \frac{a^2}{8 \cdot R \cdot t_w} = \begin{cases} \text{外主桁: } 0.743 \\ \text{内主桁: } 0.693 \end{cases} \dots\dots\dots (1)$$

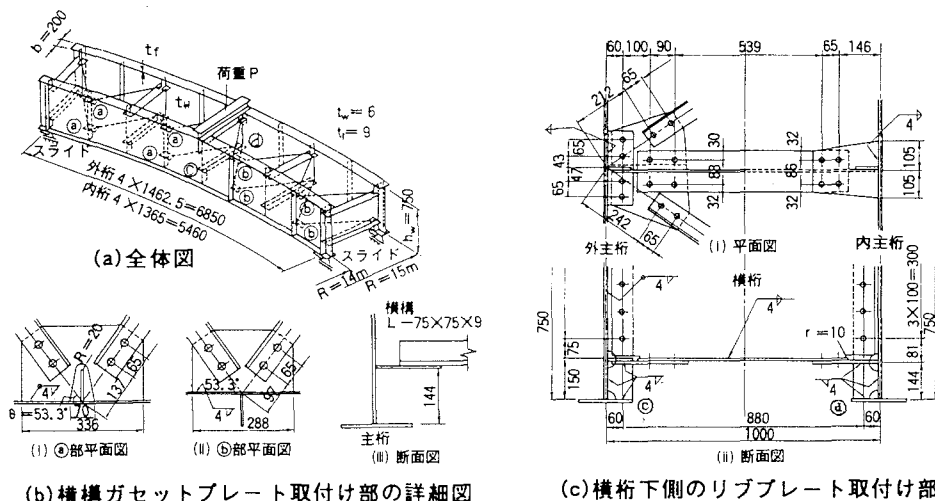


図-1 実験供試体の全体図および詳細図（寸法単位：mm）

ここに、 a は垂直補剛材間隔、 R は曲率半径、また t_w は腹板厚さである。曲線桁に関する実績調査結果⁸⁾によると、このパラメーターは、 $0 < Z \leq 0.7$ の範囲にある。そして、本実験で用いた供試体は、実際の曲線桁橋の中で、最も厳しい曲率に対応している。また、腹板の幅厚比 (h/t_w : h は桁高)は、この設計基準 ($h/t_w < 115$: SS41材)⁷⁾によらず、ここでは、少し薄くしている ($h/t_w \approx 125$)。

溶接は、主部材に対しては鉄粉系を、また、二次部材に対しては低水素系の被服アーク溶接棒を用い、すべて手溶接で行った。

載荷方法は、実験供試体のスパン中央に梁を渡し、その梁を介して鉛直荷重を与えた。また、疲労実験は、外桁下フランジの垂直応力が許容応力 $\sigma_a = 137\text{MPa}$ (内桁 84MPa) となるような 1.5Hz の正弦波の繰り返し荷重を与えた (最大荷重 328kN で最小荷重 15kN)。なお、亀裂破面にピーチマークを入れるため、50万回ごとに荷重振幅を $1/2$ にし、20万回の載荷を行った。

3. 構造詳細部の局部応力特性

本研究の着目点である横桁取付け部の下側リブプレート (スパン中央)、および上横構のガセットプレート取付け部 (支点側)における最大荷重時の主応力図を、それぞれ図-2 (a)、および (b) に示す。

同図 (a) から、リブプレート内の主応力は、二次部材であるにもかかわらず、かなり大きい主応力が発生していることがわかる。また、スカーラップ部における腹板の主応力は、桁の鉛直方向において、正負逆の値を示し、大きな面外曲げが作用していることがわかる。

また、同図 (b) のガセットプレートのスカーラップにおいては、垂直補剛材の両側における主応力の符号が異なっている。さらに、ガセットプレートの端部の腹板では、主桁の応力とはかなりかけ離れた応力を示している。これらは、主桁腹板の面外方向に働く横構の軸方向力の影響であると判断される。

このような局所的な面外曲げが、曲線桁橋局所の疲労亀裂発生原因の大きな要因になると考えられる。

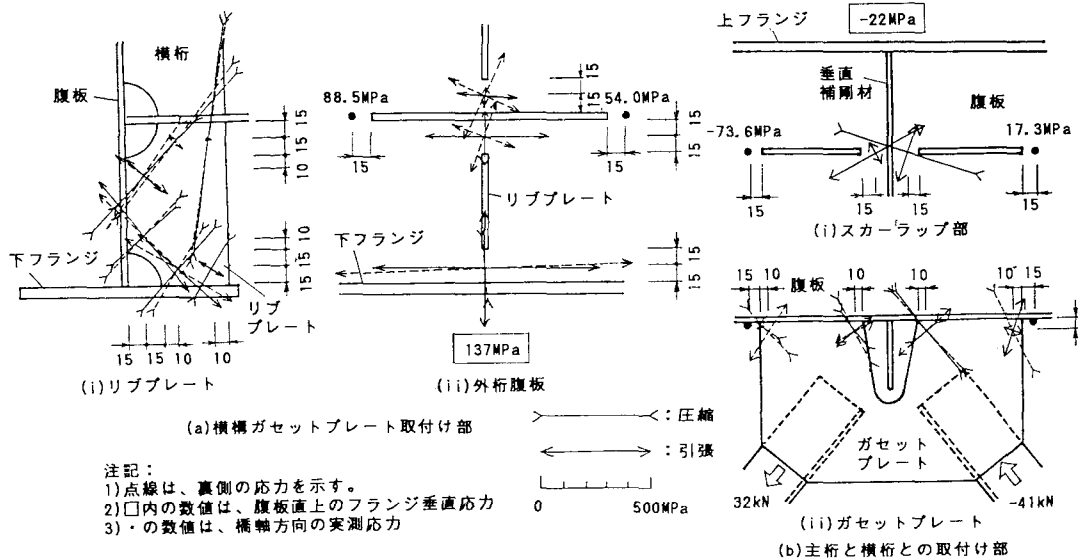


図-2 構造詳細部における実測応力 (寸法単位: mm)

4. 疲労実験結果とその考察

(1) 疲労亀裂発生箇所

供試体の局部、および全体の静的挙動を調べた後、疲労実験を行った。290万回の載荷実験終了時の亀裂を、図-3に示す。同図には、ひずみゲージ（部材端から15mmで板の片側に添付）により実験前に測定した橋軸方向の応力範囲 $\Delta\sigma$ 、および亀裂長さ25mmのときの繰返し回数N（ピーチマークにより推測）も記入してある。また、それらの亀裂の始点、梁理論および実測値から求められた応力範囲、目視により確認された発見回数、その亀裂が部材を貫通した回数、表面の亀裂長さ20mmならびに25mmのときの回数、およびJSSCの疲労設計指針（案）⁹⁾による継手分類を、表-1に示す。

表-1 実験供試体の疲労亀裂発生状況の一覧

亀裂の始点	発生位置 (図-3)	応力範囲 $\Delta\sigma$ (MPa)		発見回数 ($\times 10^4$)	貫通回数 ($\times 10^4$)	亀裂長20mm時 の回数($\times 10^4$)	亀裂長25mm時 の回数($\times 10^4$)	JSSC継 手分類
		梁理論	実測値					
横桁下側リブプレート隅 肉回し溶接腹板側止端部	a-1	137	132	225	—	115	148	E
	a-2	83	70	216	—	255	267	E
横橋ガセットプレート スカーラップ部隅肉 回し溶接腹板側止端部	b-1	-38	-99	100	125	—	50	G
	b-2	38	56	100	125	—	96	G
	b-3	13	36	100	—	142	174	G
	b-4	-13	-63	290	—	—	—	G
	b-5	38	6	290	—	227	—	G
	b-6	—	—	—	—	—	—	—
横橋ガセットプレート 回し溶接腹板側止端部	c-1	42	115	200	200	110	138	G
	c-2	16	74	290	—	—	—	G
	c-3	41	93	200	237	193	228	G
	c-4	28	76	290	—	290	—	G
	c-5	83	89	200	200	221	238	G
	c-6	16	64	290	—	—	—	G
横橋ガセットプレート回 し溶接ガセット側止端部	d-1	-83	-44	225	—	—	—	E
	d-2	-83	-40	185	—	—	—	E
垂直補強材スカーラップ 回し溶接補強材側止端部	e-1	63	—	290	—	131	149	E

(2) 疲労強度の評価

供試体各部に発生したすべての疲労亀裂を、その発生位置により分類する。そして、供試体に発生した疲労亀裂について考察を行うと、以下のとおりである。

a. 横桁下端のリブプレート近傍における疲労損傷

この部位で発生した亀裂の応力範囲 $\Delta\sigma$ （梁理論）と繰返し回数Nとの関係を、JSSC疲労設計指針（案）⁹⁾の疲労強度曲線（継手分類E）とともに、図-4に示す。ここで、それらの亀裂発生回数Nは、板表面の亀裂長さが回し溶接部

のはほぼ全域に及ぶとき（亀裂長さ25mm）とする。そして、その状態を、その部位の破壊と定義している。

この部位の橋軸方向、および橋軸直角方向の応力は、いずれも面外曲げ応力が包含している。とくに、その傾向は、後者の応力分布において顕著に現れる。これらは、先にも述べたように、並列曲線I桁橋特有の応力分布である。しかし、梁理論を用いて求められる応力範囲で整理した実験結果は、JSSCの疲労強度曲線を満足している。このことから、この部位の疲労照査の際には、設計計算の際に求められる主桁の垂直応力を当該の溶接部に発生する応力として疲労強度を評価すればよいことがわかる。

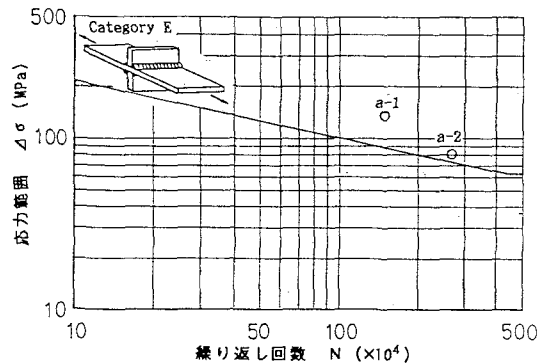
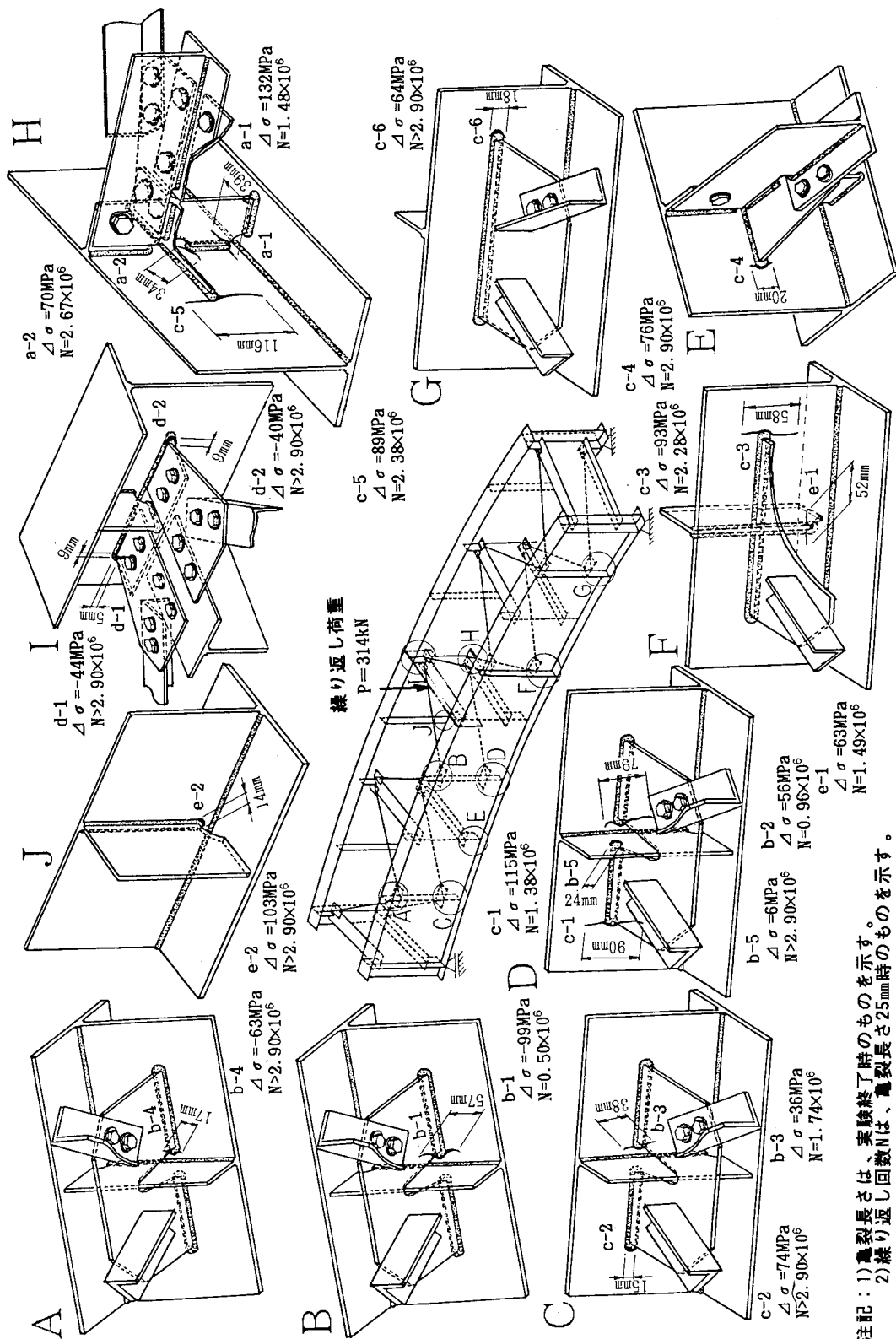


図-4 横桁下端のリブプレート
取付部の疲労強度



注記: 1) 亀裂長さは、実験終了時のものを示す。
 2) 繰り返し回数Nは、亀裂長さ25mm時のものを示す。

図-3 実験供試体の疲労損傷状況

b. 横構ガセットプレートのスカーラップまわし溶接腹板側止端部における疲労損傷

この部位に発生した疲労亀裂の発生回数 N (亀裂長 25 mm) と応力範囲 $\Delta\sigma$ との関係を、JSSC 疲労設計指針 (案)⁹⁾ の疲労強度曲線 (継手分類 G) とともに、図-5 (a) に示す。これらの実験値の応力範囲は、梁理論を用いて求められる当該の溶接部の直応力 (□)、および静的実験から得られた実測値 (○) の両者を示す。また、これらの亀裂破面 (亀裂 b-2、および b-3) のスケッチを、図-6 に示す。

応力範囲を梁理論により求められる直応力とみなした場合、すべての実験値は、疲労強度曲線を下回り、危険側となる。また、応力範囲を実測値とした場合、繰り返し応力が圧縮のときは、疲労強度曲線を上回るものの、引張の場合は、危険側となる。

これらの原因としては、ガセットプレートの回し溶接部、とくにスカーラップの近傍では、腹板面内の垂直応力以外にも横構の軸方向力の影響を大きく受け、さらに 応力集中があつて、実測値 (部材端から 15mm) から予測することが困難な応力が止端部で働いていることが推定される。そのため、一軸応力状態を対象として定められている JSSC の疲労強度曲線⁹⁾ よりも、継手の疲労強度が低下し、亀裂が早期に発生したものと考えられる。

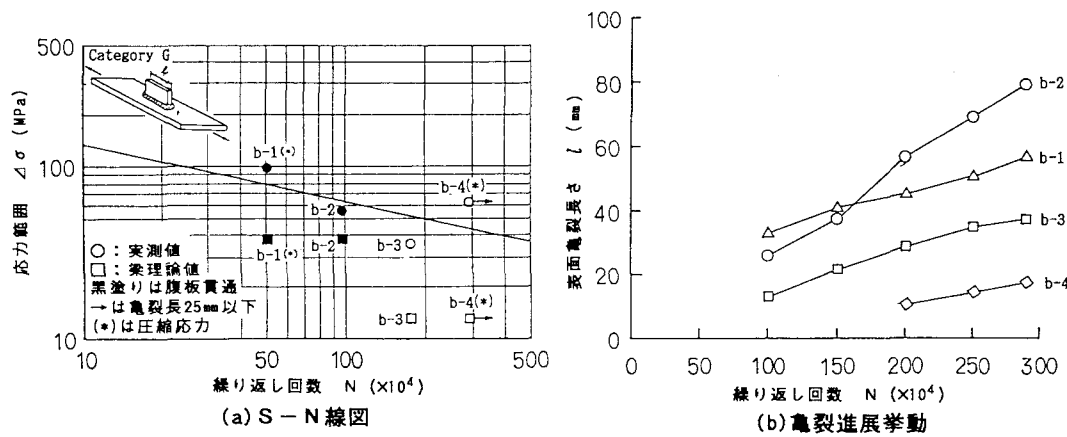


図-5 横構ガセットプレートのスカーラップ部における亀裂

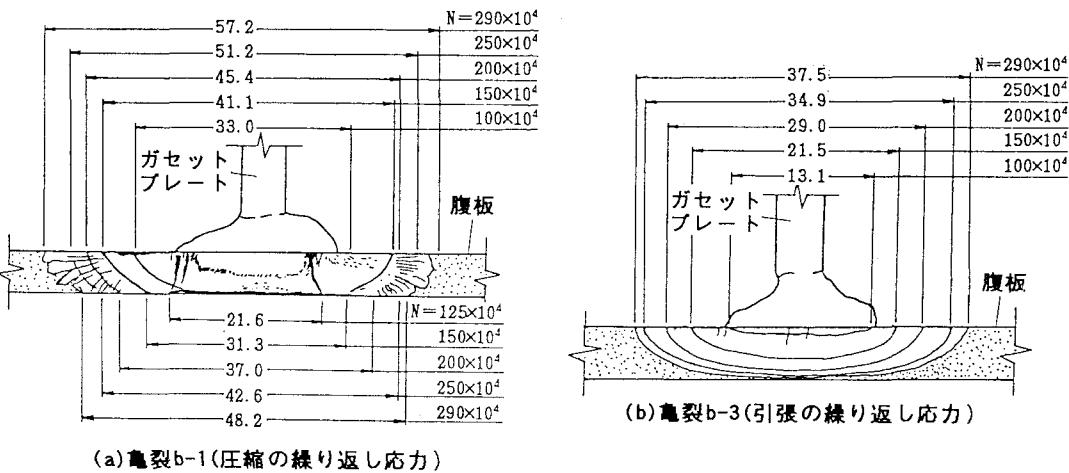


図-6 横構ガセットプレートのスカーラップ部の亀裂破面

亀裂の進展挙動は、図-5 (b)に示すように、圧縮・引張にかかわらず、表面の亀裂長さ l と繰返し回数 N との関係は、ほぼ直線的であり、急速に延びていくタイプの亀裂でないことがわかる。その原因として、この部位では、亀裂が発生したことによって応力集中が緩和されたものと思われる。さらに、図-2の主応力図からもわかるように、この部位では、主桁面内の垂直応力の影響は少なく、横構ガセットプレートからの伝達力が支配的である。それゆえ、亀裂進展に伴う先端の応力範囲の増加がほとんどなかったことが予想でき、進展速度は一定にとどまったと思われる。

供試体に発生した亀裂のうち最も早く発生していることから、曲線桁全体としての疲労強度を考えた場合、この部位の疲労については、十分な注意が必要であると思われる。

c. 横構ガセットプレートのまわし溶接腹板側止端部における疲労損傷

図-5と同様に、この部位の応力範囲 $\Delta\sigma$ と亀裂発生回数 N との関係を図-7 (a)に、また 表面の亀裂長さ l と繰返し回数 N との関係を同図(b)に示す。

応力範囲を梁理論により求められる直応力とみなした場合、亀裂c-5 (横構の軸方向力が小さなガセットプレートの亀裂であり、梁理論で求めた応力と実測値がほとんど等しい)を除くすべての実験値は、J S S Cの疲労強度曲線⁹⁾を下回り、危険側となる。しかし、応力範囲を実測値とした場合、実験結果は、J S S Cの疲労強度曲線⁹⁾をうわまわり、安全側となる。

この隅肉止端部における応力集中の度合は、ひずみゲージによりほぼ推定でき、スカーラップ部より小さいものと考えられる。しかし、スカーラップ部の亀裂とは相違して、進展速度は、急速に大きくなる傾向がある。この部位の亀裂は、桁深さ方向に進展しており、それに伴って、亀裂先端の応力は大きくなり、当然、応力拡大係数範囲も大きくなって進展速度が増したものと思われる。

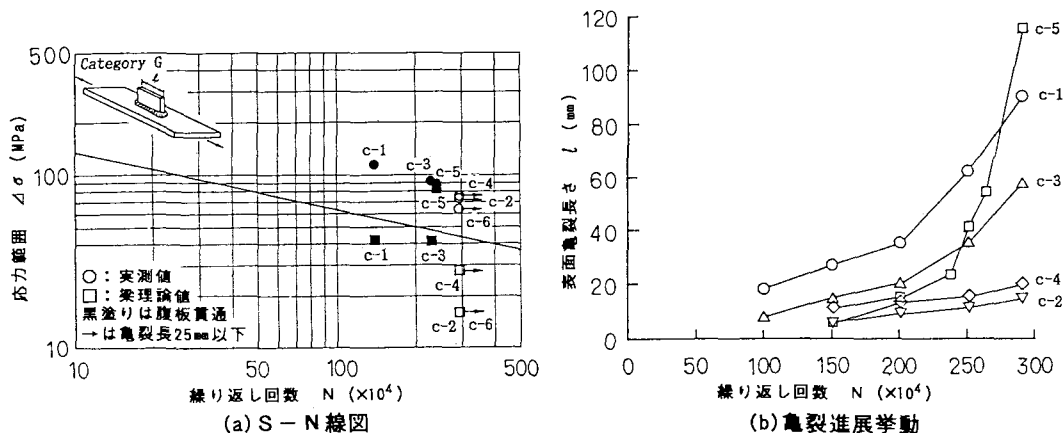


図-7 横構ガセットプレートの止端部における亀裂

(d) その他

横構のガセットプレート回し溶接部のガセットプレート側の止端部から発生した亀裂については、以下のように考察される。腹板側の止端部で測定した応力は、d-1部において-44MPa、またd-2部で-40MPaとなり、梁理論によって求められる応力度-83MPaの半分程度であった。横桁の荷重分配、および横構軸力などが影響して、表面の応力が低下するような面外曲げが腹板に発生していたと考えられる。この横構ガセットプレートは、横桁のフランジも兼ねており、内と外主桁との変位差の影響を大きく受ける箇所でもある。これらのことから、亀裂が腹板側の止端部に発生せず、ガセットプレート側から発生したと思われる。しかし、亀裂は、小さく、腹板を破断する方向に進展していないため、構造系全体に影響を及ぼすものではない。

最後に、垂直補剛材のスカーラップから発生した損傷は、鉄道橋などで多く報告¹⁰⁾ されているように、

局部的な腹板の面外変形が起因して発生したものと思われる。並列曲線Ⅰ桁では、腹板全体が面外たわみを起こすため、直線桁に比べ、より発生しやすい亀裂であると思われる。しかし、この部位の亀裂特性については、本研究の着目部位ではなく、鉄道橋で、一様の成果を挙げているので、ここでの考察は控える。

5. まとめ

本研究は、並列曲線Ⅰ桁橋の模型を製作し、横桁取付け部の下側リブプレート、および横構ガセットプレートの取付け部に着目した疲労実験を行い、発生した亀裂とその発生原因とについて述べた。

これらのうち、横構のガセットプレート取付け部のスカーラップ部に対しては、急速な疲労亀裂の進展挙動は、見られなかった。しかし、本実験では最も早く疲労亀裂が発見された部位であることから、F.E.M.解析¹¹⁾などによって亀裂発生地点の局部応力を詳しく調べるなどして、合理的な構造詳細部についての検討が、将来、必要であると考えられる。

実橋と実験桁との間に差異があると思われるが、既設橋梁においては、本研究で示した部位において、疲労損傷の可能性は十分にあると考えらる。したがって、今後、維持・管理をする際は、本論文で示した部位に着目して点検を行うべきである。

最後に、本研究は、文部省の科学研究費・一般研究Bの補助を受けたものであることを付記する。

参考文献

- 1) Nakai, H. and Yoo, C. H. : Analysis and Design of Curved Steel Bridges, McGraw-Hill, 1988
- 2) Zettlemoyer, N., Fisher, John W. and Daniels, J. Hartley: Fatigue of Curved Steel Bridge Elements - Stress Concentration, Stress Range Gradient and Principal Stress Effects on Fatigue Life, FHWA Report No. DOT-FH-11-8198.2, August 1979.
- 3) 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、Vol.18、pp.36～52、1989年
- 4) 中井博：都市高速道路橋の疲労損傷事例、橋梁と基礎、Vol.24、No.2、pp.23～31、1990年2月
- 5) Nakai, H., Kitada, T. Ishizaki, H. and Akehasi, K. : An Experimental Study on Fatigue Strength of Web Plates for Horizontally Curved Plate Girders, Proc. of JSCE, No.416/I-13, 113s～121s, April 1990
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説、丸善、平成2年2月
- 7) 阪神高速道路公団：曲線桁設計の手引き（案）、1988年10月
- 8) 中井博・松村駿一郎・吉川紀・北田俊行・大南亮一：曲線桁橋の実績調査、橋梁と基礎、Vol. 15、No. 4、pp.38～43、1981年5月
- 9) 日本鋼構造協会：疲労設計指針（案）、J S S Cレポート、No.14、1989年11月
- 10) 阿部英彦・谷口紀久・阿部允：鋼鉄道橋における疲労問題と補修・補強、橋梁と基礎、Vol.17、No.8、pp.24～29、1983年8月
- 11) 北田俊行・大塚久哲・古田秀博・明橋克良：鋼橋2次部材に発生する局部応力の一解析手法、日本鋼構造協会、構造工学における数値解析法シンポジウム、第13巻、pp.105～110、平成元年7月

(1990年10月12日受付)