

トラス箱断面実部材の曲げ疲労試験

BENDING FATIGUE TEST ON FULL SCALE TRUSS CHORD MODEL

竹名 興英* 下川浩資** 深沢 誠*** 三木千寿****

By Koei TAKENA, Hirotsuke SHIMOKAWA, Makoto FUKAZAWA and Chitoshi MIKI

One box-section member whose dimensions are almost equal to the truss chord of Iwagurojima Bridge has been fabricated. The fabrication process of the bridge has been evaluated throughout the construction and the member is used in the following fatigue test. The dimension of the member is 1000mm wide and 1000mm high, and 600MPa class steel of 40mm thickness is used. The corner joints of this member contain groove welds with partial penetration from outside and fillet welds from inside. The fatigue test is carried out under four point bending method by a fatigue testing machine with the dynamic capacity of 4 MN. Fatigue cracks originate from the location of distinct surface ripples in the stop-and-start position of the inside fillet welds in the corner joints and in several positions in the member.

1. はじめに

本州四国連絡橋の吊橋および斜張橋には、SM58Q、HT70などの調質鋼が使用されるが、道路鉄道併用橋の設計・製作にあたっては、列車荷重による疲労を考慮する必要がある。そのため、調質鋼を用いる補剛トラス主構弦材のかど継手を対象とした大型の疲労試験が数多く行なわれてきている^{1)~5)}。その結果、レ形溶接ルート部の溶接欠陥を起点として亀裂が発生し、その疲労強度は小型試験によつて設定された当初の設計疲労強度よりかなり下回ることが判明した。

ところで、今まで行なわれてきた大型疲労試験の供試体は最大でも外径寸法180×300mm、板厚15mmである。しかし、本州四国連絡橋の岩島橋を例にとると、補剛トラス主構弦材の最大断面は1080×1080mm、板厚55mmであり、試験体の大きさによる差異一寸法効果、欠陥の発生状況、残留応力の性状等一が疲労強度に及ぼす影響が大きいことを考えるならば、実部材に近い供試体でその強度を確認することも必要であろう。一方、このように弦材の断面が大きい場合のかど継手として、部分溶込みレ形溶接の考え方をそのまま延長してよいのか。設計のバランスを図る上からも溶接施工方法を検討する必要がある。道路橋においては、大島大橋、港大橋⁶⁾のような大断面のトラス弦材に、外面溶接とともに内面からすみ肉溶接を

* 本州四国連絡橋公団 設計二課 (東京都港区虎ノ門4-3-20)

** 本州四国連絡橋公団 常任参与 (東京都港区虎ノ門4-3-20)

*** 横河橋梁製作所 研究所 (千葉市新港88)

**** 工博 東京工業大学助教授 土木工学科 (東京都目黒区大岡山2-12-1)

施工した例があるが、疲労を考慮すべき鉄道併用橋の場合、内面溶接の効果はどのように発揮されるか興味のある問題である。

岩黒島橋の工事に際し、内面溶接の施工性、品質基準の達成度などを明らかにする目的で、弦材のパイロットメンバーテストが行なわれたので、その供試体を用いて、上記問題点を究明するための疲労試験を実施した。本稿では、この疲労試験結果について述べるとともに、併せて、かど継手の疲労強度に影響を及ぼす溶接欠陥の発生状況の調査、及び残留応力の測定結果を報告する。

2. 供試体形状および試験方法

トラス弦材は軸力部材であるが、今回の試験は疲労試験機の容量の関係から曲げ試験—支間13m、載荷点間隔3mの2点載荷—で行なった。写真-1に試験状況を、図-1に供試体形状および載荷方法を示す。一般部の断面寸法は1080×1040mm（板厚40mm）であるが、載荷点近傍はダイアフラムのすみ肉溶接継手の疲労を考慮して、フランジ、ウェブとも60mmに増厚した。また、曲げによる外面レ形溶接と内面すみ肉溶接のルート部の応力を同一にするため、フランジをウェブに載せる形とした。使用鋼材はSM58Qであり、その機械的性質と化学成分を表-1に示す。

内面すみ肉溶接のサイズは7mmとし、外面レ形溶接を行なった後に施工した。表-2に溶接条件を示す。すみ肉溶接については、表示のようにタイプ1、タイプ2の2種類の方法を採用した。タイプ1は初層を手溶接（細往低水素系棒）で行なう方法、タイプ2は初層を炭酸ガスアーク（CO₂）溶接で行なう方法である。2層目はいずれも止端形状がきれいになるすみ肉専用棒を用いた。

疲労試験は400t・f大型試験機を用い、等曲げモーメント区間のかど溶接ルート部の曲げ応力範囲が150N/mm²になるように、表-3の試験条件を選んだ。試験途中、疲労亀裂の発生および進展を確認する目的で、

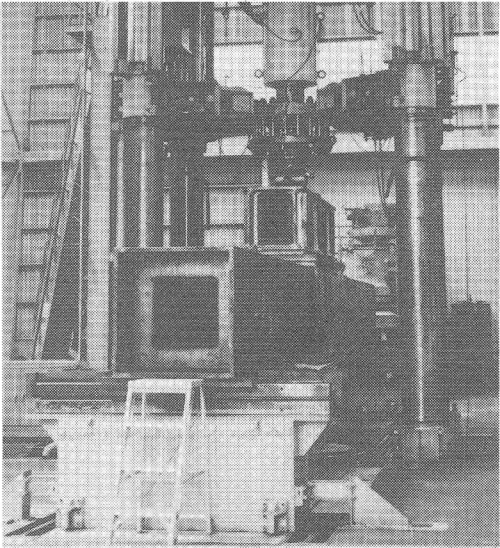


写真-1 疲労試験状況

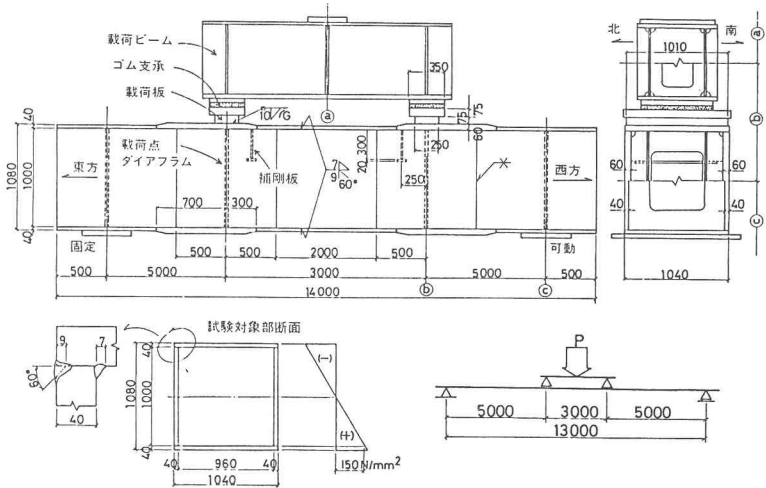


図-1 供試体形状及び載荷方法

表-1 供試鋼材の機械的性質と化学成分

	機 械 的 性 質			化 学 成 分 (%)											備 考
	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸 び (%)	C x100	Si x100	Mn x100	P x1000	S x1000	Mo x100	Cu x100	Cr x100	Ni x100	V x1000	B x1000	
SM58Q,t=40	588	667	26	14	32	135	18	4	10	10	-	14	42	1	フランジ
SM58Q,t=40	539	637	29	14	32	135	18	4	10	10	-	14	42	1	ウェブ
SM58Q,t=60	618	696	24	13	28	131	13	3	15	-	13	-	39	1	フランジ ウェブ

繰り返し数50万回毎に荷重範囲を変化させ（下限荷重を上げ1／2の荷重範囲とする），亀裂破面にビーチマークを残す操作を行なっている。

3. 試験結果概要

疲労試験に際し，随時，目視検査により亀裂の発生をチェックしたが，50万回の時点で，載荷板のすみ肉溶接および載荷点近傍の内面すみ肉溶接に亀裂の発生が確認できた。いずれの溶接継手も本来の試験目的部ではないことから，試験を中断して亀裂の補修を行なうとともに，一部，供試体を改造した。詳細については，試験結果のそれぞれの項目で述べる。その後，試験を続行したが，試験体中央部近傍のかど継手に発生した亀裂が下フランジ，ウェブを貫通した169.5万回で終了した。写真－2にこの亀裂の様相を示す。亀裂は内面すみ肉溶接の棒継ぎ部から発生している。

疲労試験終了後，供試体の全溶接線について，目視および磁粉探傷により表面亀裂の有無を検査した。さらに，外面レ形溶接，内面すみ肉溶接それぞれについて，溶接線に沿ってルート部を開き（以下，縦方向破面試験と称す），溶接欠陥の存在状況と潜在疲労亀裂の有無を調査した。その結果，かど継手部にはタイプの異なる多くの疲労亀裂が見つかった。以下ではそれぞれの亀裂の状況説明と発生原因の検討を行ない，最後に，内面すみ肉溶接を併用したかど継手の疲労強度を評価する。また，かど継手以外の溶接線においても種々の亀裂が検出されており，これらについてもその概要を述べる。

4. かど継手部に発生した疲労亀裂

かど継手部に発生した亀裂の全貌を図－2にまとめて示す。今回の試験では，亀裂はレ形溶接側には全く発生しておらず，いずれも内面すみ肉溶接側となつている。亀裂の種類は，

- ① ルートブローホールからの亀裂
- ② 棒継ぎ部からの亀裂
- ③ 溶着鋼ルート部の群集亀裂
- ④ ビード方向の亀裂

の4種類に大別される。ここで，③，④の亀裂の発生はフランジ突合せ溶接部近傍に限られている。

表－2 かど継手の溶接条件

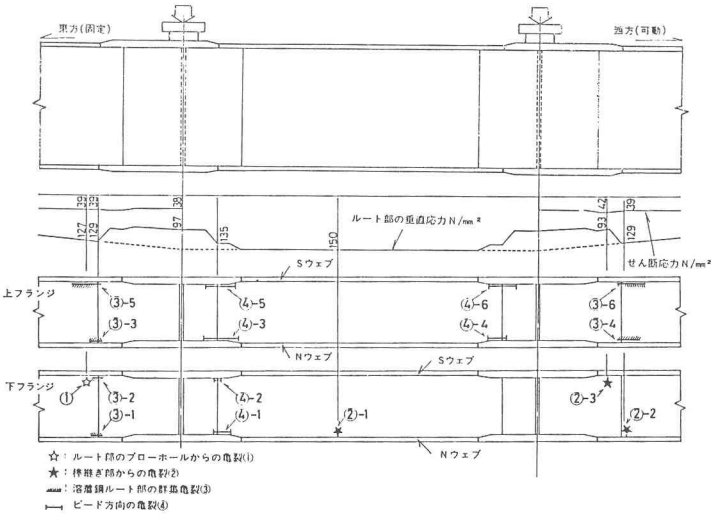
継 手	積層方法	層数	溶接方法	溶接材料	予熱温度
外面レ形溶接		1 ・ 2	二電極 サブマージ溶接	Y-DM (4φ) YF15 (20x200)	50°C (t=40) 100°C (t=60)
タイプ1 内面Sウェブ側 すみ肉		1 ・ 2	手 溶 接 手 溶 接	L-60 (4φ) LBF62A (6φ)	100°C
溶 接 タイプ2 Nウェブ側		1 ・ 2	炭酸ガス アーク溶接 手 溶 接	YM-60 (1.2φ) LBF62A (6φ)	50°C (t=40) 100°C (t=60)

表－3 疲労試験条件

試験荷重 (tf)		かど溶接ルート部の応力 (N/mm ²)			繰り返し 速 度 (cpm)	最 終 繰り返し数 (x10 ⁴)	備 考
上限	下限	上限	下限	範囲			
362	5	152	2	150	30	169.5	試験対象部内の内面すみ肉溶接棒継ぎ部から亀裂発生



写真－2 かど継手に発生した疲労亀裂



図－2 内面すみ肉溶接に発生した疲労亀裂と溶接部の応力範囲

1) ブローホールから発生した疲労亀裂・①

縦方向破面試験により、かど継手のルートブローホールおよび落在疲労亀裂の発生の有無を調査した。ブローホールについては幅・ w と高さ・ h とで形状を代表させ、そのいずれかが 0.5 mm 以上のものを欠陥として数えた。表-4に、ブローホールの形状寸法に注目し、溶接方法とブローホール発生数について整理して示す。溶接線 1 m 当

たりの発生個数についてみると、内面すみ肉溶接はタイプ1で $7.8\text{ 個}/\text{m}$ 、タイプ2では $4.7\text{ 個}/\text{m}$ といずれもレ形溶接の $1.0\text{ 個}/\text{m}$ に比べて多くなっている。

しかしながら、内面すみ肉溶接のブローホールは微小であり、ほとんどが短径寸法 1 mm 以下のものである。許容ブローホール⁷⁾の目安となる短径寸法が 1.5 mm を越えるブローホール数は、3種類の溶接法とも全検査区間でそれぞれ1個と大差はなかった。

ブローホールからの疲労亀裂は、下フランジ側内面すみ肉溶接に1カ所見つけた。表-5に、ルート部の応力範囲が $100\text{ N}/\text{mm}^2$ 以上の位置における比較的大きなブローホールの調査データを示す。亀裂が発生したものは、そのうちの1つである。図-3に、この亀裂のスケッチを示す。亀裂は幅 2 mm 、高さ 1.5 mm のブローホール側部から発生しており、破面の大きさは、おおよそ半径 1 mm の $1/4$ 円に過ぎない。詳細な計算仮定は省略するが、破壊力学手法を用いて、この亀裂がウェブ板厚 40 mm の8割まで進展するのに必要な総繰返し数(疲労寿命・ N_f)を求めると 309.1 万回となる。

なお、ウェブ増厚部のかど継手には、最大で 0.5 mm (本四製作基準における許容限界)などのルートギャップが存在し、レ形溶接ルート部には写真-3に示すような垂れ込みが、また、内面すみ肉溶接部には溶け込み線の凹凸が生じていたが、疲労亀裂の発生は認められなかった。

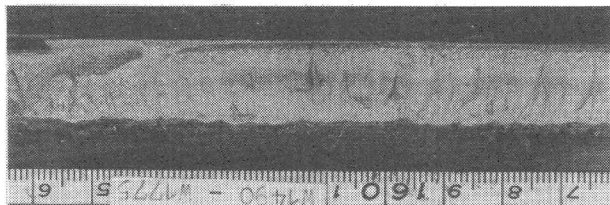


写真-3 外面レ形溶接ルート部の垂れ込み

表-4 形状寸法に注目したブローホールの発生個数

ブローホール形状	幅, $w(\text{mm})$	≤ 0.5				≤ 1.0				≤ 1.5				> 1.5				ブローホール総数 (個)	検査区間 (m)	1 mあたりの発生個数 (個/m)
		≤ 0.5	≤ 1.0	≤ 1.5	> 1.5	≤ 0.5	≤ 1.0	≤ 1.5	> 1.5	≤ 0.5	≤ 1.0	≤ 1.5	> 1.5	≤ 0.5	≤ 1.0	≤ 1.5	> 1.5			
レ形溶接	高さ, $h(\text{mm})$	5	1	0	0	3	4	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	17	17.3	1.0
ブローホール発生個数	すみ肉溶接(初層手溶接)	14	6	2	2	16	9	2	4	7	2	1	0	0	3	1 [*] (20x15)	1	70	9.0	7.8
	すみ肉溶接(初層CO ₂ 溶接)	15	0	1	0	6	14	1	0	0	1	2	1	0	0	0	1	42	8.9	4.7

注) ☆印は疲労亀裂が発生していたブローホール。
()はその形状寸法、 $w \times h$



表-5 比較的大きなブローホールからの亀裂発生の有無

位置	溶接方法	応力範囲 (N/mm^2)	ブローホール形状 $w \times h$ (mm)	亀裂の有無
上フランジ	レ形溶接	-122	2.0x2.0	無
下フランジ	レ形溶接	150	1.5x1.5	無
	すみ肉溶接(タイプ1)	127	2.0x1.5	亀裂発生
		145	2.0x2.0	無

注) 応力範囲が $100\text{ N}/\text{mm}^2$ 以上の位置における短径寸法が 1.0 mm を越えるブローホール。

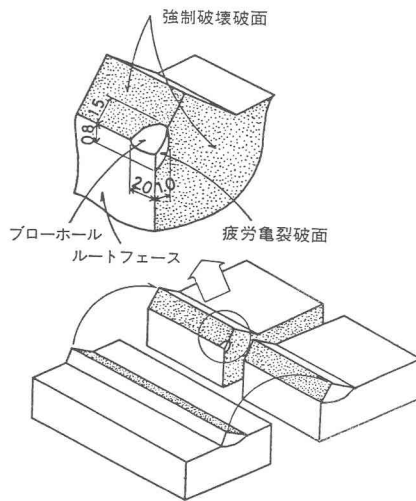


図-3 ブローホールから発生した疲労亀裂

2) 棒継ぎ部から発生した疲労亀裂・②

内面すみ肉溶接の第2層手溶接の棒継ぎ部表面から疲労亀裂が発生した。発生位置は載荷点内1カ所(②-1), 載荷点外2カ所(②-2, 3)の計3カ所で, いずれも下フランジ側となっている。亀裂②-1は試験途中の132.5万回時に発生が確認され, 167.3万回に下フランジを貫通したもので, 169.5万回まで進展の観察を行ない, 試験を終了した。

写真-4は, 亀裂が発生した棒継ぎ部と他の棒継ぎ部とを比較して示したものである。亀裂の発生をみた棒継ぎ部は3カ所とも, 先行ビードのクレータの一部が表面に残っているのが特徴であり, この部分が起点となつて亀裂が発生したものである。図-4にそれぞれの亀裂の破面のスケッチを, 写真-5には代表として②-2の亀裂破面を示す。亀裂はほぼ円形を保つて進展しており, その中心点はすみ肉溶接ビード表面上に位置していることが判る。また, 亀裂②-1, ②-2には150万回時のピーチマークが確認できた。

棒継ぎ部から発生した3個の亀裂の疲労寿命を評価するため, 亀裂が板厚の8割まで進展した時点を破断寿命・ N_f と仮定して, それぞれの N_f を破壊力学手法を用いて推定した。計算にあたって, 載荷点外の亀裂についてはせん断応力を無視して軸方向応力・ σ のみが作用するとし, また, 亀裂進展速度・ da/dN (mm/cycle)と応力拡大係数範囲・ ΔK ($\text{kg}/\text{mm}^{3/2}$)の間にはParis則⁸⁾が成り立つとした。

$$da/dN = C (\Delta K)^m \text{ ----- (1)}$$

$$m = 3.0$$

$$C = 1.63 \times 10^{-10} \quad 9)$$

一方, 亀裂形状は図-5に示すように, フランジ側を半楕円形亀裂, ウェブ側を1/4円形亀裂と仮定し, それぞれ独立に進展するものとした。この場合, 応力拡大係数は次のように与えられる。

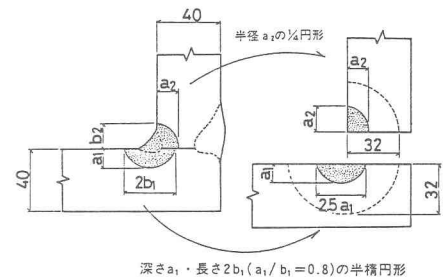


図-5 亀裂のモデル化

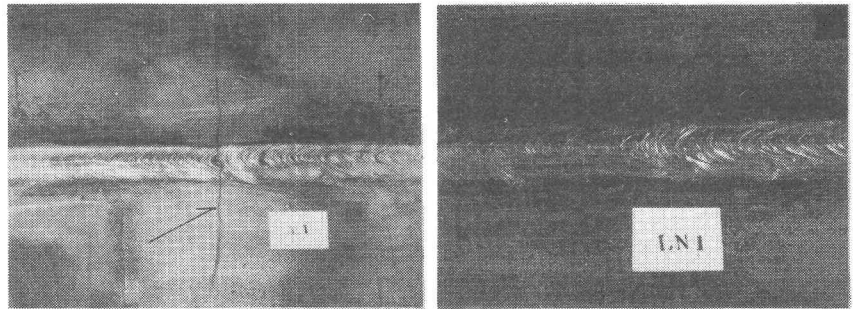


写真-4 内面すみ肉溶接の棒継ぎ部(左:亀裂発生, 右:亀裂発生せず)

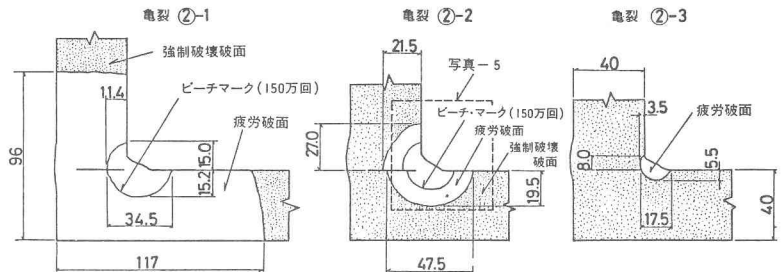


図-4 棒継ぎ部から発生した亀裂破面のスケッチ

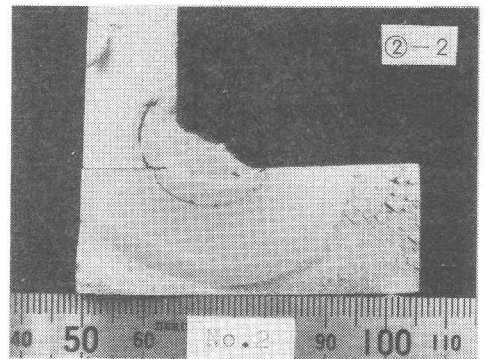


写真-5 棒継ぎ部から発生した亀裂破面

- ・フランジ側（深さ a_1 ，長さ $2b_1$ の半楕円形亀裂）
- ・ウェブ側（半径 a_2 の $1/4$ 円形状）

$$K_f = \frac{M_s \cdot M_t}{\phi_0} \cdot \sigma \sqrt{\pi a_1} \quad (2)$$

$$K_w = F_f \cdot F_t \cdot \frac{2}{\pi} \sqrt{\pi a_2} \quad (3)$$

M_s ：亀裂形状の補正係数

F_f ：表面亀裂であるための補正係数

M_t ：亀裂先端位置の補正係数

F_t ：有限板厚に対する補正係数

ϕ_0 ：楕円形状に対する補正係数

ここで、初期亀裂寸法 a_1 ， a_2 として、亀裂②-1については150万回時のビーチマーク形状寸法を、また②-2，②-3については169.5万回時の最終亀裂形状寸法を用いた。また、ウェブ側，フランジ側についてそれぞれ計算を行ない、少ない方の繰返し数を推定寿命とした。このようにして求めた推定疲労寿命は以下ようになる。

亀 裂	応 力 範 囲	
②-1	$\Delta \sigma = 150 \text{ N/mm}^2$	$N_f = 158.1 \times 10^4$
②-2	129 N/mm^2	172.2×10^4
②-3	93 N/mm^2	288.6×10^4

なお、亀裂②-1は167.3万回で板厚を貫通しており、 N_f との差9万回ほどが板厚の2割分を進展する繰返し数となる。

3) 溶着鉋ルート部の群集疲労亀裂・③

内面すみ肉溶接の溶着鉋ルート部に、写真-6に示すような群集疲労亀裂が検出された。この亀裂群は引張，圧縮側に関係なく、載荷点より外側のフランジ突合せ溶接近傍に位置している。ルート部の溶け込みは良好であり、ブローホールの発生が特に多いわけではなく、ビード断面方向へほぼ一定の角度をもった亀裂が溶着鉋内でなたらかな包絡線を描いて、重なり合うに発生していることが判る。このような亀裂は載荷点内のフランジ突合せ溶接部近傍のすみ肉溶接には発生しておらず、また、レ形溶接ルート部にも異常は見られなかった。写真-7は代表的な1個の亀裂について破面を露呈したものである。

このような、ビード方向に対してある角度を有し、しかも密集して発生する亀裂は、岡田らの行なつた不溶着部を有する斜め突合せ継手の疲労試験¹¹⁾において報告されているものと同様であり、垂直応力とせん断応力の組合せ応

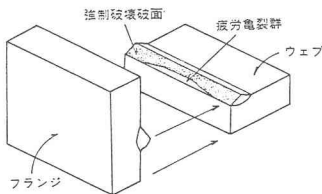
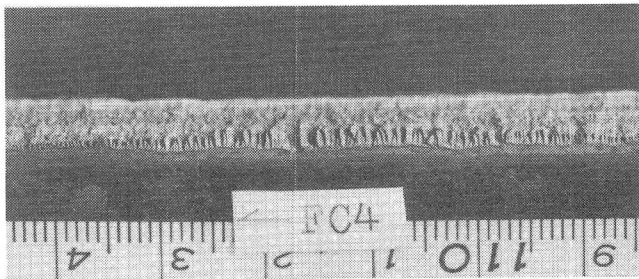


写真-6 内面すみ肉溶接ルート部に発生した群集亀裂

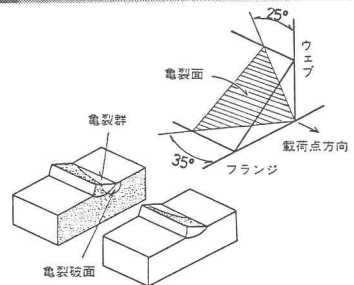
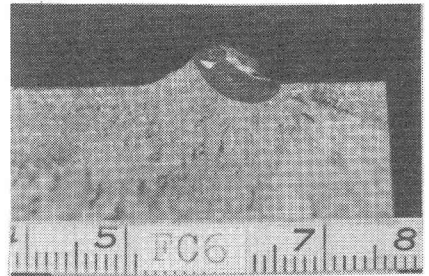


写真-7 群集亀裂の破面

力下で発生したものと考えられる。フランジ突合せ溶接部位置でのすみ肉溶接ルート部の計算応力範囲は、垂直応力で 129N/mm^2 、また、外面レ形溶接を含めたかど継手の全のど厚を 16mm とすると、せん断応力は 39N/mm^2 である。ところで、今回の供試体は載荷点近傍の応力を低く抑えるために断面変化を大きくし、フランジ、ウェブとも $1/5$ のテーパをとって板厚 40mm と 60mm の板継ぎを行なっている。そのため、フランジ、ウェブの部材力が板継ぎ部で大きく変化し、この位置でのかど継手部には断面変化による二次的なせん断応力（次項で述べるが、せん断応力が0であるべき載荷点内のフランジ突合せ溶接部近傍のすみ肉溶接ビード表面で、 $40\sim 50\text{N/mm}^2$ のせん断応力が測定された）が作用すると考えられる。さらに、ボックス、コーナー部でのせん断流を考えると、外面レ形溶接に比べて内面すみ肉溶接側の方に力線が密になり、また、ルート部には当然、切欠きによる集中がある。したがって、以上のような、一次応力、二次応力、さらには溶接残留応力の重量により、群集亀裂が発生したものと考えられるが、この問題の究明は今後の研究に期待したい。

4) ビード方向の疲労亀裂・④

繰り返し数50万回経過後、載荷点間のフランジ突合せ溶接部近傍一上フランジ側4カ所、下フランジ側2カ所一の内面すみ肉溶接表面にビード方向の疲労亀裂が発見された。写真-8に代表的な亀裂発生部（④-3）を示す。すみ肉溶接をグラインダーで削り込んであるが、ルート部からのど断面に沿ってビード表面に達している亀裂と、止端部から母材板厚方向へ進展している亀裂の2種類が確認できる。

亀裂発見後、静的載荷による歪測定を行なった結果、載荷点近傍ではボックスの面外変形が生じており、かど継手部には大きな二次応力が作用していることが確認できた。図-6に応力測定結果を示すが、内面すみ肉溶接ビード表面上では、ビード直角方向に $-30\sim -70\text{N/mm}^2$ の圧縮応力が、また、 $40\sim 50\text{N/mm}^2$ のせん断応力が作用していた。この原因は載荷板の幅がウェブ間隔より狭く、フランジ板に荷重が集中したためと考えられたので、直ちに亀裂の補修を行なうとともに、ボックスの面外変形を抑える目的で試験体の改造を行なった。すなわち、当初 $850\text{W}\times 350\text{L}\times 50\text{t}$ であった載荷板を $1010\text{W}\times 250\text{L}\times 75\text{t}$ と変更し、さらに、図-1に示したようにT字形の補剛板を添加した。

改造後の静的載荷によると、上フランジの面外変形はかなり改善されたが、すみ肉溶接のせん断応力は改造前と変わりがなかった。したがって、このせん断応力は、前項で述べたようなフランジの断面変化により生じたものと考えられる。なお、補修溶接のすみ肉溶接はのど厚を

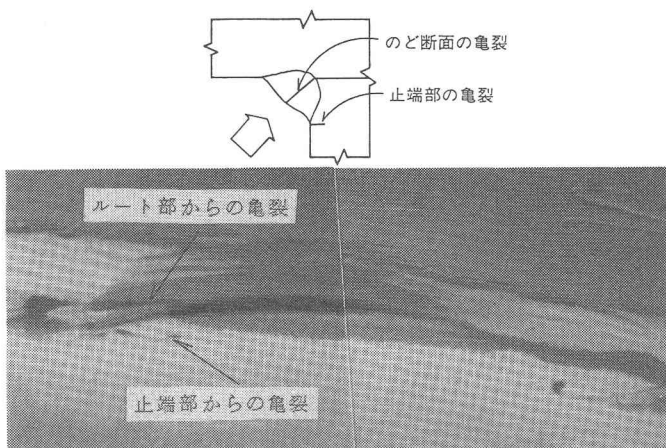


写真-8 内面すみ肉溶接ビード方向の亀裂
(グラインダーによりビードを削り込んである)

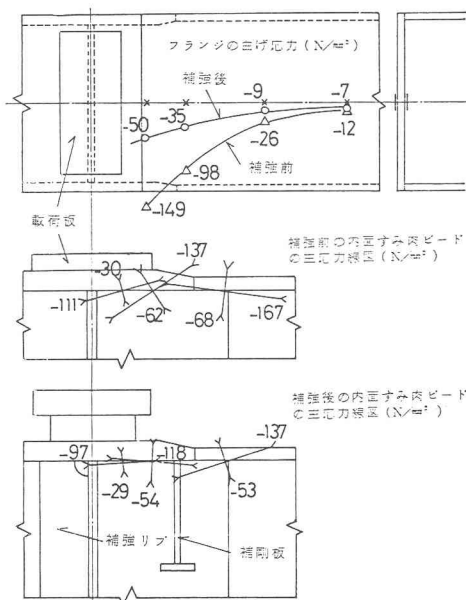


図-6 補強前後の載荷点回りの応力性状

大きくし、止端仕上げを行なったこともあり、試験後の調査において同様な亀裂は検出されていない。

5) かど継手・内面すみ肉溶接の疲労強度

内面すみ肉溶接部には、以上述べた4種類・16カ所の疲労亀裂が発生していた。このうち、ルート部の群集亀裂・③、載荷点近傍のビード方向亀裂・④は、試験体形状および載荷方法に起因するものであり、今回の曲げ試験特有の亀裂と考えられる。したがって、ここでは、溶接品質、すなわちブローホールおよび棒継ぎ部の表面不整に起因する亀裂について、本四設計基準に定める疲労許容応力との関係を検討する。同基準では、各種の継手をA～Dの4等級に分類し、それぞれの設計寿命曲線を与えている。そして、SM58Qを用いたかど継手に対しては、B等級と分類し、応力範囲・ σ_r (kg/mm²) と繰り返し数・Nの関係を

$$(\sigma_r)^3 \cdot N = 4.10 \times 10^9 \quad \text{----- (4)}$$

としている。ここで、200万回の基本許容応力範囲は125 N/mm² (12.7 kg/mm²) である。

図-7は、この設計寿命曲線であり、今回発生した4個の疲労亀裂の推定寿命をプロットした。図中には既往の箱断面の引張疲労試験(180×300 mm,

板厚15 mm, 内面すみ肉溶接なし)の結果を併記する。ブローホールから発生した亀裂の推定寿命は設計寿命曲線を上回っており、箱断面試験体の実験値と同様な傾向にある。ブローホールからの疲労亀裂は1個であるが、表-5に示したように、応力範囲、形状寸法ともより大きいブローホールからの亀裂発生がないことを考え合わせるならば、内面すみ肉溶接に対する品質基準は従来のV形溶接に対するものと同様、直径1.5 mm以下として差しつかえないものと考えられる。そして、今回採用した2つの溶接方法はブローホール、ルート不整の発生が少なく、良好な施工方法であると言える。

これに対し、棒継ぎ部表面から発生した亀裂には設計寿命曲線を下回ったケースがあり、今後、表面に棒継ぎ部が生じない連続溶接の採用、もしくは表面不整を防止する施工方法について検討する必要がある。

5. かど継手以外に発生した疲労亀裂

今回の疲労試験ではかど継手を対象とし、それ以外の溶接継手からの亀裂発生を極力避けるように配慮した。しかしながら、実際には、載荷板取り付けのためのすみ肉溶接、および、補剛板のスカラップ回し溶接部にも亀裂が発生した。これらの亀裂は、試験体の形状、載荷方法に起因すると思われるが、発生位置がいずれも圧縮側であることは興味あることであった。試験目的とははずれるが、今後の参考になるとと思われるので、その概要を述

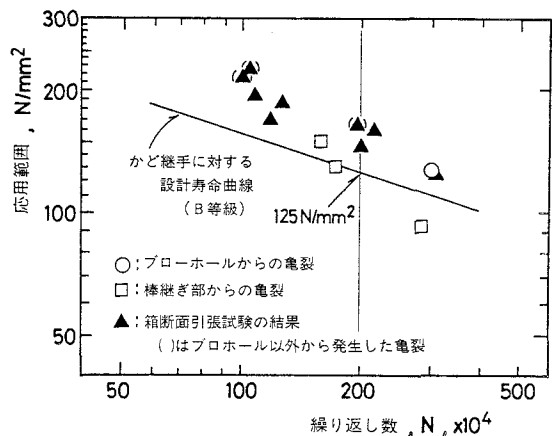


図-7 設計寿命曲線と実験値の比較

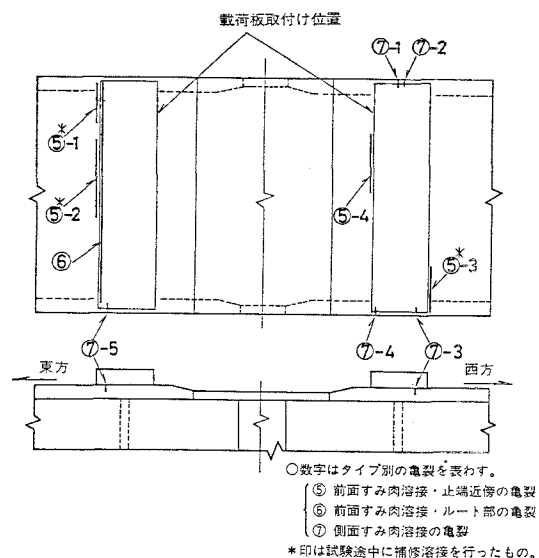


図-8 載荷板回りに発生した疲労亀裂

べる。

図-8に、載荷板取り付けのすみ肉溶接（脚長 10mm 、止端部グラインダー仕上げ）に発生した亀裂の位置を、写真-9、10には代表的な様相を示す。亀裂はいずれも、試験体軸方向に直角であるが、以下の3つのタイプに分類できる。

- ⑤ 前面すみ肉溶接・止端部近傍の亀裂
- ⑥ 前面すみ肉溶接・ルート部からの亀裂（写真-9）
- ⑦ 側面すみ肉溶接・ビード直角方向の亀裂（写真-10）

止端部近傍からの亀裂は全部で4カ所に発生したが、このうち3カ所は試験途中に発見され、直ちに補修溶接を行なっている。試験終了後に発見した亀裂（⑤-4）について破面を露呈したところ、亀裂は止端近傍からルート部直下方向へ斜めに進展しており、長さ 260mm 、最大深さ 13mm の舟底形であつた。ルート部から発生した亀裂（⑥）は、ほぼフランジ全幅に渡っており、すみ肉溶接ルートからフランジプレートの板厚方向に最大 42mm の深さ（フランジ板厚の 70% ）まで進展していた。また、側面すみ肉溶接に発生した亀裂（⑦）は、すみ肉溶接ルートを起点とし、フランジ側へ半円を描いて進展している。

載荷板取り付け部の上フランジ上縁の曲げ応力は、計算上、 -105N/mm^2 である。載荷板とフランジ面との密着が十分でなかつたために発生した局部曲げ応力も亀裂発生の一因であるが、圧縮作用応力下であつても溶接引張残留応力の存在により、実際には引張りの繰り返し応力が作用して亀裂が発生したものと考えられる。

写真-10は補剛板スカラップの回し溶接部に発生した亀裂である。この補剛板は、載荷点近傍の上フランジの面外変形を拘束するため、試験途中で取り付けたものであり、亀裂の発生は所期の効果が発揮された証左と見られる。このような亀裂は、実橋においても数多く発生しており¹²⁾、圧縮側であつても、変形の拘束を期待する部材の溶接は、疲労に対して十分注意する必要がある。

6. かど継手の残留応力分布

疲労試験終了後の供試体を用いて、かど継手の溶接残留応力の測定を行なつた。測定位置は、繰り返し応力の影響を考慮して桁端より 1.25m の断面とし、橋軸方向に単軸の全ゲージを貼布し、切断による解放ひずみを測定する切り出し法に依つた。

図-9に、 $1/4$ 断面の残留応力分布を示す。測定は全断面について行なつたが、かど継手に関してすべて同一傾向にあり、内面すみ肉溶接方法のちがひによる有意差は認めら

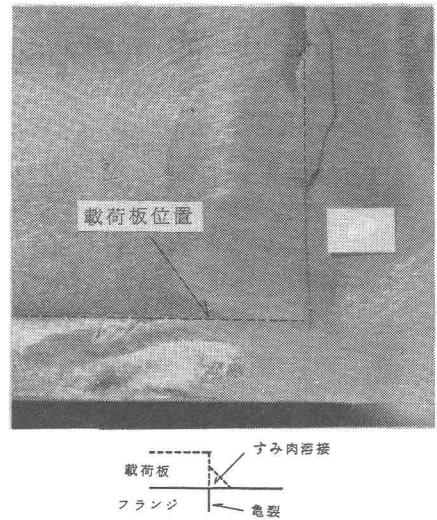


写真-9 前面すみ肉溶接・ルート部の亀裂(⑥)

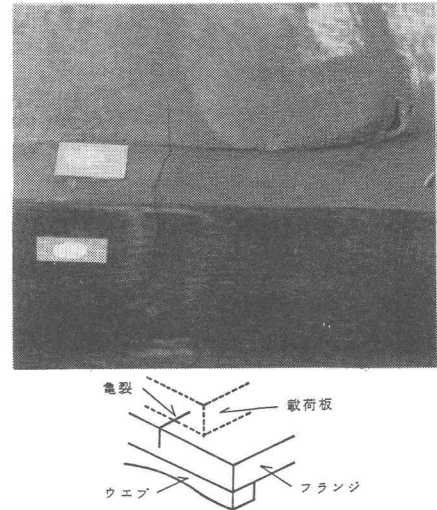


写真-10 側面すみ肉溶接の亀裂(⑦-3)

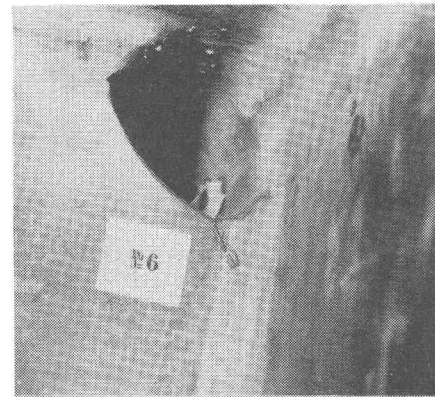


写真-11 補剛板スカラップ回し溶接部の亀裂

れなかつた。かど継手部近傍のみが大きな引張残留応力域であり、最大応力はビード上にあつて、その値は、外面レ形溶接側で 430 N/mm^2 、内面すみ肉溶接側では 470 N/mm^2 である。この値は、かど継手の疲労強度に重大な影響を与えたものと考えられるが、従来の $200 \times 300 \text{ mm}$ 程度の箱断面供試体での計測値とはほぼ一致している。

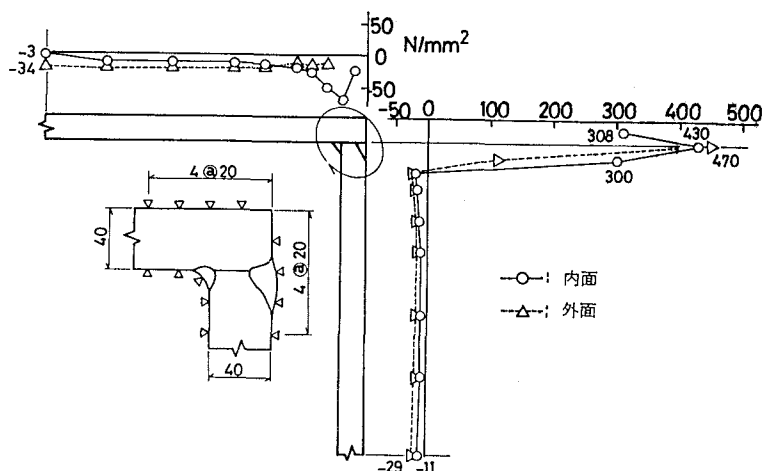


図-9 残留応力分布

7. まとめ

調質鋼を用いた実寸大のトラス

弦材の供試体による曲げ疲労試験を行ない、外面レ形溶接と内面すみ肉溶接を併用したかど継手の疲労強度を検討した。試験溶接部の曲げ応力範囲 150 N/mm^2 ，繰返し数 169.5 万回の試験を行なった結果をまとめると以下の通りである。

- 1) 外面レ形溶接と内面すみ肉溶接の品質は、ルートブローホールのクライテリオンを短径 1.5 mm とすると、ほぼ同等であつたが、疲労亀裂はレ形溶接からは全く発生せず、内面すみ肉溶接部のブローホールから 1 カ所、棒継ぎ部表面から 3 カ所発生した。
- 2) 亀裂が発生したブローホールは、 $1.5 \text{ mm} \times 2.0 \text{ mm}$ の大きさである。この亀裂から破壊力学手法を用いて推定した疲労寿命は、設計寿命曲線を上回っている。このことより、すみ肉溶接のルート欠陥に対する品質基準は、従来のレ形溶接に対する考え方をそのまま延長しても差しつかえないと言える。
- 3) 亀裂が発生した棒継ぎ部は、いずれも先行ビードのクレータが表面に残っており、その疲労寿命は設計曲線を下回ることもある。したがって、連続ビードの得られない内面溶接については、棒継ぎ部に対する品質基準を設ける必要がある。
- 4) 載荷点近傍の内面すみ肉溶接に斜め方向の群集亀裂が発生した。亀裂の方向と、板厚変化点に集中発生していることから、せん断応力の集中が主因と考えられるが、今後の研究を要する問題である。
- 5) 載荷点近傍に発生した別の縦亀裂は、純粋に加力構造に係る問題であるが、局部応力と疲労亀裂の発生に重要な示唆を与える。
- 6) 載荷板取り付け部は圧縮側であるが、このすみ肉溶接のルートおよび止端近傍から多くの亀裂が発生した。直接載荷による複雑な応力状態が考えられ、亀裂の発生・進展に対し、すみ肉溶接の引張残留応力が大きな影響を及ぼしているものと考えられる。
- 7) 上フランジの面外変形を防止するために取り付けた補剛板のスカラップ回し溶接部から亀裂が発生した。圧縮側であつても、繰返し面外変形が予想される部材の溶接部には十分な注意をする必要がある。
- 8) かど継手の残留応力は、外面レ形溶接ビード表面で最大 430 N/mm^2 ，内面すみ肉溶接ビード表面で同じく 470 N/mm^2 が計測された。この値は、従来の研究から見て、縦ビードの疲労強度に重大な影響を与えたものと考えられる。

なお、今回の疲労試験結果により、弦材かど継手として内面すみ肉溶接を併用するにあつては、棒継ぎ部の品質の検討を行なう必要がでてきた。また、非破壊検査における溶接欠陥の検出能力を確立する必要がある、さらに、箱内部での溶接作業であるために作業環境の問題も重要である。このような点を考慮し、岩

黒島橋の製作にあたっては、補剛トラス主構弦材のかど継手は外面レ形溶接のど厚に少し余裕をもたせ、内面すみ肉溶接は行なわないことにした。

最後に、本疲労試験は建設機械化研究所において実施されたことを付記し、江口保平、谷藤精一、伊藤文夫の諸氏に深謝いたします。また、榎横河橋梁製作所の明石重雄、寺田博昌、名取暢の諸氏には終始有益な御意見、御支援をいただいた。記して深謝いたします。

参考文献

- 1) 土木学会：本州四国連絡橋上部構造に関する調査研究報告書，別冊 2，疲れに関する検討，1980
- 2) 土木学会：本州四国連絡橋上部構造に関する調査研究報告書，別冊 1，疲れに関する検討，1981
- 3) 西村俊夫・田島二郎・奥川淳志・三木千寿：レ形溶接縦方向継手を有する鋼部材の疲れ強さ，土木学会論文集，No.291，1979，11
- 4) 田島二郎・奥川淳志：80キロ鋼を使用したトラス格点構造の疲労試験，橋梁と基礎，1978，11
- 5) 旭一穂・岸本良孝・帆足博明：箱型断面供試体を用いた大型疲労試験，橋梁と基礎，1980，6
- 6) 笹戸松二・河井章好・吉川紀・水元義久：長大トラス橋におけるかど継手の設計・施工，橋梁と基礎，1975，3
- 7) 旭一穂・竹名興英・平野茂：疲労許容応力の見直し，本四技報，No.18，1981，10
- 8) Paris, C., F. Erdogan: Journal of Basic Engineering, Trans. ASCE, Vol.85-1, 1963, 11
- 9) T. Okumura, T. Nishimura, C. Miki, K. Hasegawa: Fatigue Crack Growth Rates in Structural Steels, Proceeding of JSCE, No.322, 1982
- 10) 小林英男：破壊力学入門 (N)，応力拡大係数，非破壊検査，Vol.24，No.10
- 11) 岡田実・森脇良一：切欠きを有する溶接継手の疲れ挙動に関する研究，溶接学会誌，Vol.31，No.6，1962
- 12) J.W.Fisher・三木千寿：米国の溶接橋梁に生じた疲労亀裂，橋梁と基礎，1982，10

(1985年10月18日受付)