

800Mpa級鋼材を用いた実大トラス弦材各種構造の疲労強度

The fatigue strength of truss chord using 800 Mpa steel

大江慎一 三木千寿 奥川淳志 安井成豊

By shinichi OOE, chitoshi MIKI, atushi OKUKAWA and shigetomi YASUI

One box section member whose dimensions were almost equal to the truss chord of the Akashi-kaikyo Bridge was tested under repeated bending by using a 4 MN fatigue testing machine. The four corner joints consist of partially penetrated. These corner joints contain blowholes with various sizes at the roots. The fatigue strength of corner joints decrease remarkably with the increasing of blowhole size at the root of corner joints. In many cases various attachments - gusset, diaphragm and cover plate - attach on truss chord. The fatigue strength of truss chord is affected by attachments. These attachments attach on this truss chord. In this paper the effect of various attachments on the fatigue strength was studied.

1. はじめに

本州四国連絡橋の道路・鉄道併用橋の設計にあたっては、大型疲労試験機を用いたトラス桁の実物大に近い試験体での疲労試験を含む疲労の検討が実施され、その結果に基づいて、疲労の条件の厳しい部材の製作にあたっては、溶接前の清掃と乾燥・シーリング溶接の施工・本溶接時での仮付け溶接の再溶融・ルートギャップ・直接バーナーの禁止等を要求するとともに、かど継手のブローホール寸法やすみ肉溶接の止端形状等に厳しい制限を設けた。明石海峡大橋の補剛トラス弦材には、800Mpaクラスの調質高張力鋼を用いることで計画されているが、これらの高張力鋼を用いたトラス弦材の製作方法は瀬戸大橋に準ずるものとし、かど溶接部でのブローホールの補修限界寸法は、道路橋であることから瀬戸大橋の製作基準でのB部材を念頭に、幅 $W=3\text{mm}$ 、高さ $H=6\text{mm}$ とし、比較的大きなブローホールが残ることを認めている¹⁾。また、トラス構造物の弦材には、ガセットをはじめダイヤフラム、あて板、リブ等のアタッチメントが取り付けられることが多い。これらのアタッチメントはその形状寸法によっては疲労強度が低くなり、トラス弦材の疲労強度を支配する場合もある。そこで、明石海峡大橋の補剛桁をモデルとした800Mpaクラスの鋼材を用いた実大トラス弦材を製作し、かど溶接部におけるブローホールやトラス弦材に取り付けられるアタッチメントがトラス弦材の疲労強度に及ぼす影響を検討するために疲労試験を実施した。

-
- * 本州四国連絡橋公団 (〒651 神戸市中央区浜辺通5-1-14 神戸センタービル)
 - ** 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科 (〒152 目黒区大岡山2-12-1)
 - *** 工博 本州四国連絡橋公団 (〒722 広島県御調郡向島町 5890-1)
 - **** 建設機械化研究所 (〒417 富士市大淵 3154)

2. 試験の方法

(1) 試験体

試験体の形状寸法を図-1に示す。明石海峡大橋補剛トラス弦材とはほぼ同じ寸法の箱断面部材である。また、この供試体にはガセット、ダイヤフラム等の橋梁につくことが

予想されるアタッチメントを取り付けており、それぞ

れ形状や溶接方法を変えている。使用した鋼材は、フランジおよびウェブが800Mpa級高張力鋼であり、表-1にその機械的性質を、表-2に化学成分を示す。ダイヤフラム・ガセットなどのアタッチメントは、SS400である。

表-1 鋼材の機械的性質

材 質	板厚 (mm)	降伏点 (kg/mm^2)	引張強度 (kg/mm^2)	伸び (%)	衝撃度 (kg/m) (-4℃)
HT790	32	81	86	23	23.1

表-2 鋼材の化学成分

材 質	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Nb	V	Al	Ceq
	$\times 100$			$\times 1000$		$\times 100$			$\times 100$			$\times 1000$	$\times 100$
HT790	12	27	93	11	2	18	93	44	33	—	4	—	48

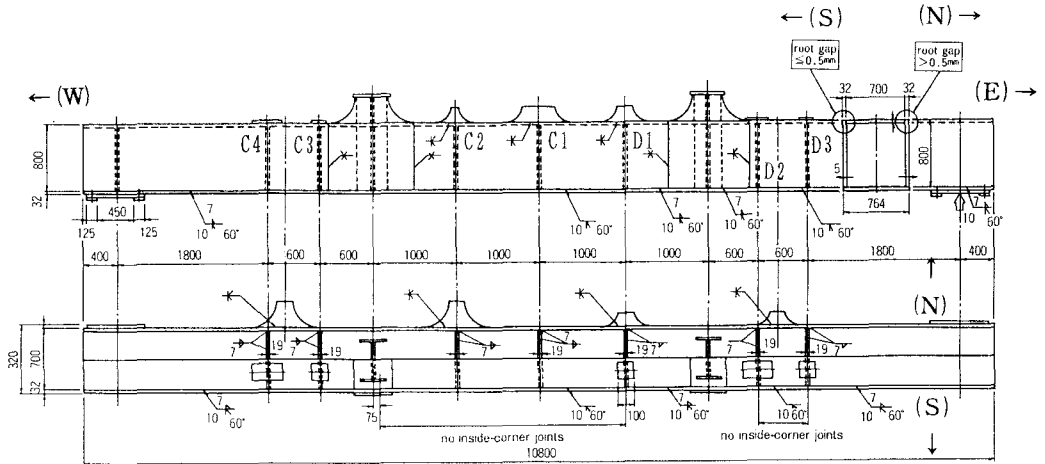


図-1 試験体の形状・寸法

①かど溶接

外面レ型溶接はサブマージアーク溶接で行なった。使用溶接材料は、US49 (4.8φ)・MF63 (20×200) である。溶接条件は仮付け溶接およびシーリング溶接が再溶融される条件を基本とした。ただし、特定の区間については開先面内にジンクリッチペイントを塗布し、目標寸法 (幅W=3mm、高さH=6mm) のブローホールを発生させることとした。溶接後、かど溶接4線の中央部7mについて超音波探傷試験を実施し、検出された高さ8mm以上のブローホールはエアークラウジングにより除去し、再溶接した。内面すみ肉溶接は、脚長7mmの2層溶接とした。溶接棒としては、北側の溶接線は1層目に細径の低水素系溶接棒 (LB60・4φ) を2層目に太径の止端改良棒 (LBF62・6φ) を使い、南側の溶接線には1層目にCO₂溶接 (YM60C・1.2φ) で行い、を2層目には太径の止端改良棒 (LBF62・6φ) を用いた。溶接はすべて電気ヒーターを用いた100℃以上の予熱の条件で実施している。

②ガセット

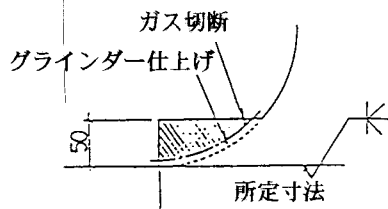
ガセット形状は表-3に示す組み合わせのものとし、箱断面の溶接終了後、フランジ、ウェブに突合わせ溶接した。突合わせ溶接の端部の施工方法は、図-2に示すA工法 (南側) とB工法 (北側) の2種類である。開先形状はK開先とし、ガウジングを使用した完全溶込み溶接としている。

溶接はCO₂溶接で行い、最終層は手溶接で仕上げた。

表-3 ガセット形状の組み合わせ

		平坦部長さ		
R	R/D	100mm	200mm	400mm
150mm	1/5.1	—	4カ所	—
180mm	1/4.6	2カ所	2カ所	2カ所
300mm	1/2.5	—	4カ所	—

S側 (A工法)



N側 (B工法)

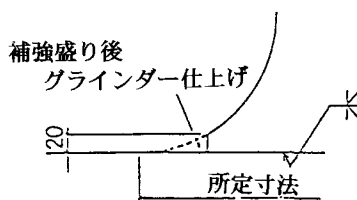


図-2 ガセットの端部処理

③ダイヤフラム

図-1に示すC1、C2、C3、C4のダイヤフラムは、トラス弦材の中間ダイヤフラムを想定し、スカラップを付けている。C1・C2は初層をCO₂溶接(YM60C・1.2φ)で行なった後、太径の止端改良棒(LBF62・6φ)で手溶接で溶接した(タイプ1)。C3・C4は初層を細径の溶接棒(L60・4φ)で2層目を太径の溶接棒(L60・6φ)で手溶接で溶接した(タイプ2)。溶接順序を図-3に示す。C1については、θゲージを用いて止端フランク角が120°以上となるように止端形状の管理を行い、不具合部についてはグラインダー仕上げを行なった。

D1、D2、D3は端ダイヤフラムを想定しスカラップを付けていない。溶接方法はD1はC1・C2とD2・D3はC3・C4と同じ方法としている。図-4に溶接順序を示す。溶接姿勢はスカラップ有り無しともに水平で行なっている。

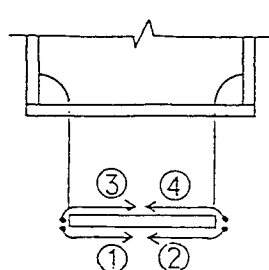


図-3 中間ダイヤフラムの溶接順序

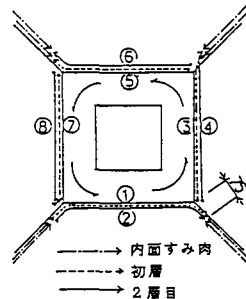


図-4 端ダイヤフラムの溶接順序

④あて板・カバープレート

試験体の圧縮フランジに板を全周溶接にて取り付けた。板は軸方向長さを変化させており、長さ180mmのものがあて板に、360mmのものがカバープレートに該当する。また、板厚は南側が12mm、北側が24mmであり、溶接は脚長をそれぞれ6mm、7mmとしたすみ肉溶接で、改良溶接棒(LBF62A)による手溶接で行なっている。

(2) 疲労試験

疲労試験には本州四国連絡橋公団所有の動的载荷能力400tonの大型疲労試験機を用いた。载荷は、図-5に示すように試験桁と载荷桁を組み合わせた4点曲げ方式で行なった。試験桁の支持スパンは10m、载荷スパンは4mとし、载荷桁の中央を疲労試験機により载荷した。試験荷重は、試験桁の4点曲げ等曲げモーメント区間の最大引張縁応力範囲が100MPaとなるよう荷重振幅を164tf(最大荷重174tf、最小荷重101tf)に決定した。疲労試験中のき裂の検出は目視調査で行い、必要に応じて磁粉探傷試験を併用した。

また、繰返し数200万回終了した時点でかど継手部に超音波自動探傷試験を実施している。

疲労試験中および疲労試験後に各アタッチメント部の応力状況と条件の相違による応力分布の違いを把握することを目的として静的载荷試験を疲労試験と同様の载荷方法にて実施した。

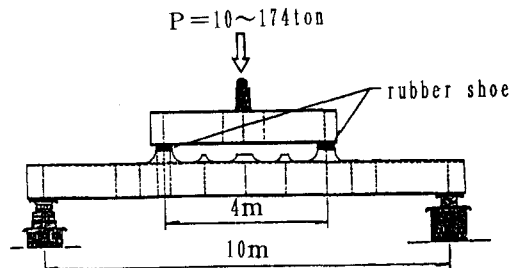


図-5 載荷方法

(3) かど溶接のルートおよびき裂破面の露呈調査

疲労試験終了後、かど溶接部をルートに沿って露呈し、ルート部に存在するブローホール等の欠陥および疲労き裂の発生状態を観察した。発見された疲労き裂はさらに直角方向に破壊することにより破面を露呈し、疲労き裂の発生・進展の状況、ビーチマーク等を観察した。アタッチメントに発生したき裂については、き裂発生起点の確認を目的としてき裂破面を露呈した。ガセットに発生したき裂については、疲労試験中にき裂をグラインダーで除去しているため、1箇所を除いて破面の露呈は行っていない。

3. 試験結果と考察

(1) 試験の経過

疲労試験の経過とアタッチメントからの疲労き裂発生経過を図-6に示す。外面レ型溶接部で発見された疲労き裂は6個であり、全て溶接ルート部から発生しそれが進展して表面に現われている。6カ所の疲労き裂発生点のうち4カ所は圧縮フランジ（上フランジ）である。内面すみ肉溶接部で発見された疲労き裂は2カ所である。その内1カ所のき裂は208万回の時点で実施した超音波自動探傷試験により、内部に疲労き裂があると判定されており、その後262万回の時点で試験体表面で発見された。外面レ形溶接部のき裂のうち5カ所および内面すみ肉溶接のうち1カ所は、ブローホールを起点として疲労き裂が発生していることが確認されている。

ビード部の調査延長39.2m（外面レ型溶接：7m×4線=28.0m内面すみ肉溶接：2.8m×4線=11.2m）のルート露呈調査によって検出されたブローホールの総数は2027であり、そのうち疲労き裂が発生していたのは20カ所であった。

アタッチメントから疲労き裂の発生状況を図-7に示す。疲労試験中に検出されたき裂は、ガセットから13ヶ所、ダイヤフラムから2ヶ所およびあて板・カバープレートから10ヶ所であった。

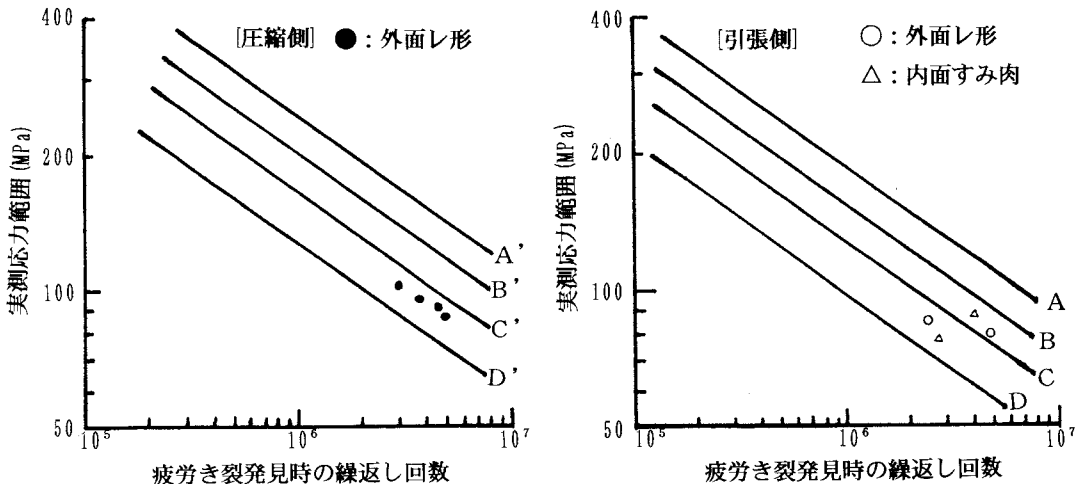
ガセットより検出された疲労き裂は、近傍の応力測定を実施後、グラインダーにより除去した。

なお、S-N線に整理する時の繰返し回数をき裂検出時としており、き裂長も異なったものとなっているが、基準としたき裂の長さは小さい。

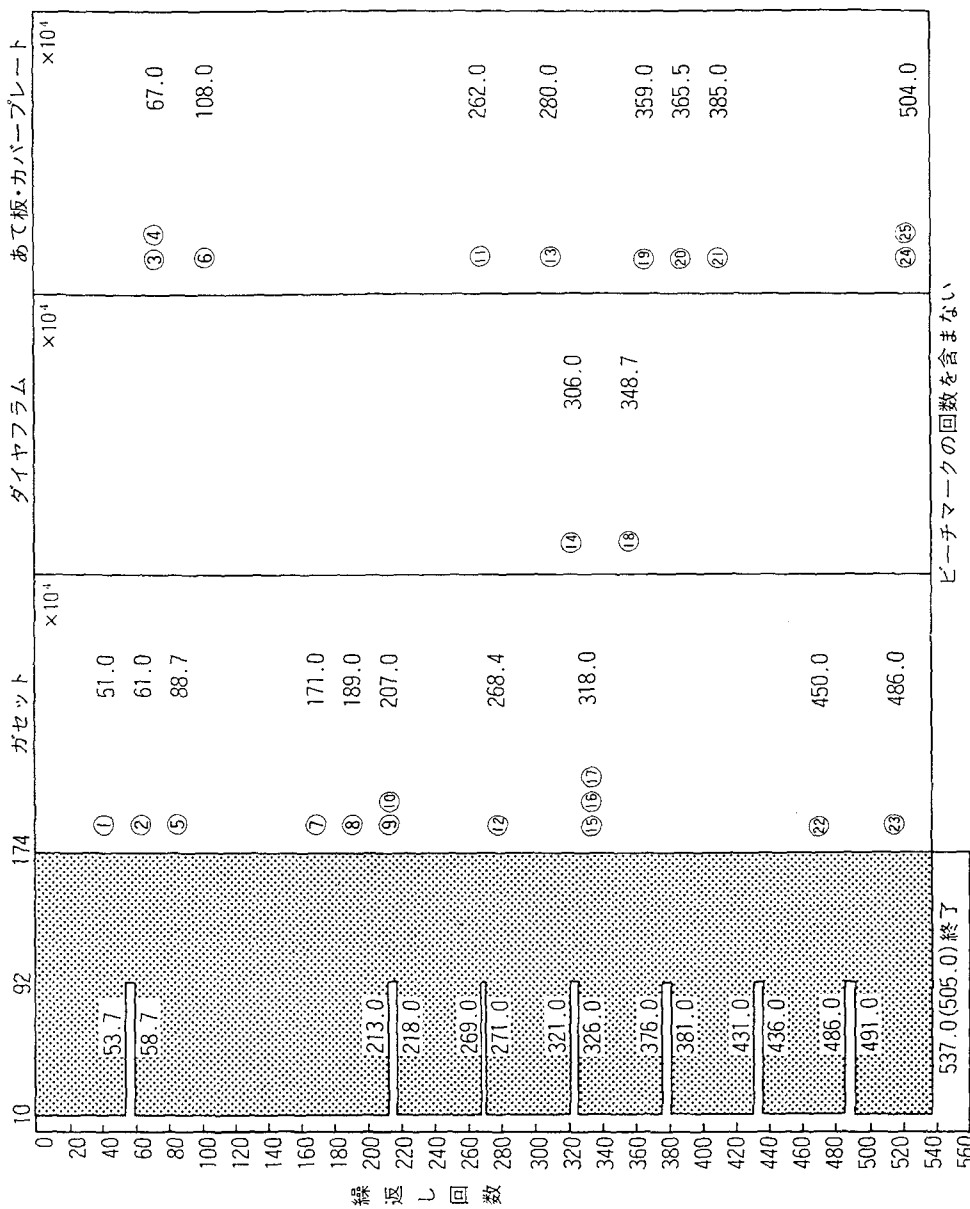
(2) 疲労強度

①かど溶接

図-8に表面で検出した疲労き裂について、その発生位置付近で測定した応力と、それらの発見時の繰返し回数の関係を、圧縮側（上フランジ側）と引張側（下フランジ側）にわけて示す。検出時の疲労き裂の寸法は、異なったものとなっている。



試験荷重 (ton)



ピーチマークの回数を含まない

図-6 疲労試験の経過とアタッチメントからのき裂発生経過

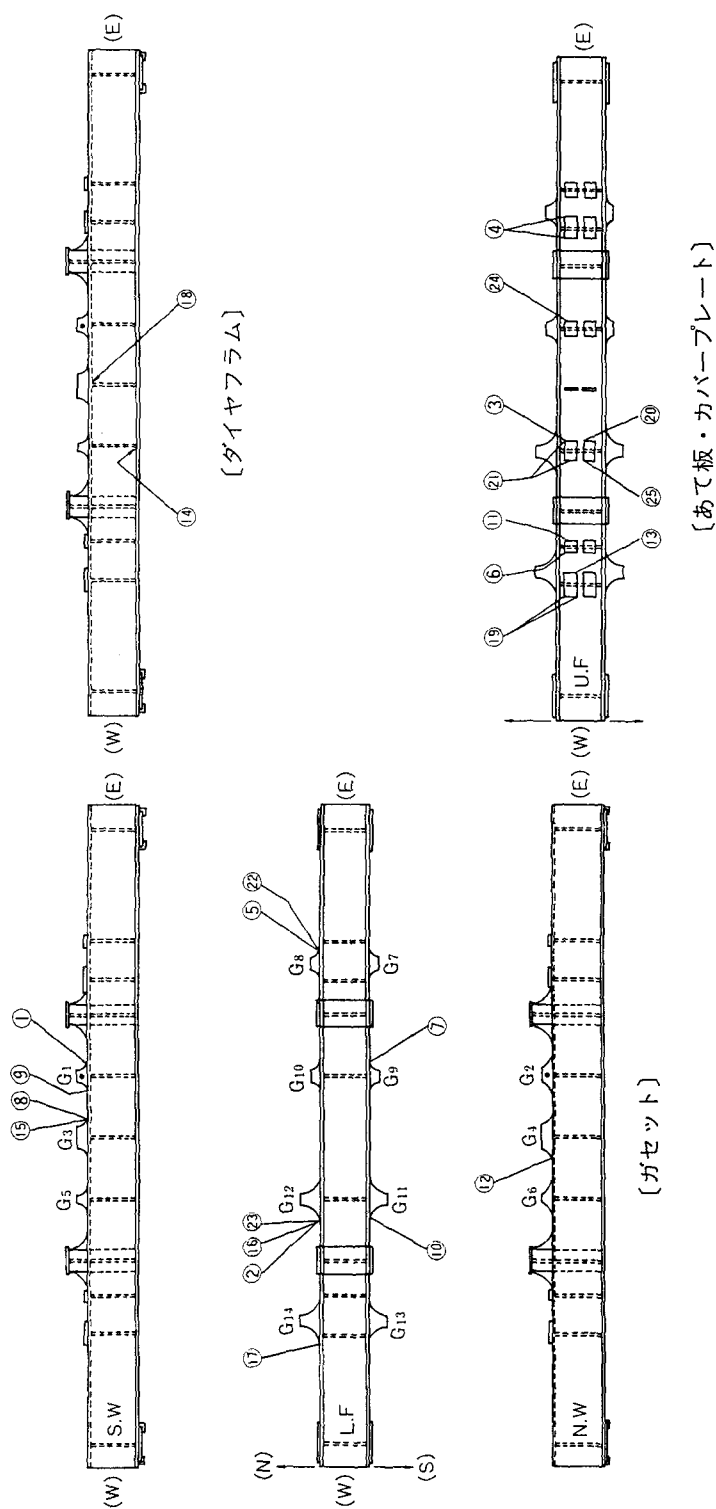


図-7 アタッチメントからの疲労き裂発生状況

図中のABCDおよびA' B' C' D'の直線は、本州四国連絡橋の上部構造設計基準における設計寿命曲線である。圧縮側の設計寿命曲線は引張側の設計寿命曲線を1.3倍したものである。試験結果は引張側はC等級の設計線の近傍、圧縮側はC'等級の設計線のやや下側に位置している。これは従来本州四国連絡橋公団が実施したブローホールの高さが4mm以下のかど溶接部の大型疲労試験結果に比べてかなり低い強度であり、かど溶接部のブローホールの寸法が大きくなった影響が現われているものと考えられる。

図-9は、ピーチマークによる疲労き裂の進展状況の観察結果に基づいて、試験後のルート部の露呈により発見した疲労き裂も含め、すべての疲労き裂についてき裂寸法が10mmとなったときの寿命を求め、その位置での公称応力でプロットしたものである。き裂寸法10mmは、ほぼき裂が表面に出現する寸法に対応している。本州四国連絡橋のかど継手部に対する疲労設計においては、ルート部から発生した疲労き裂が表面に進展した時点を疲労寿命としており、ここで定義したき裂寸法10mmがほぼその寿命の定義に対応している。各疲労き裂の公称応力とき裂寸法10mmの寿命の関係は、広い寿命範囲にばらついているが、D等級を下回るものもある。したがって本試験体に存在している程度のブローホールが含まれているかど継手の疲労照査を行なう場合には、D等級あるいはそれを下回る新たな設計曲線を設定して適用する必要があるといえる。

瀬戸大橋の製作基準では、かど継手に対して、品質等級を特A、AおよびBに分類しており、特Aで製作された部材のかど継手は含まれるブローホール寸法を幅 $W=1.5\text{mm}$ 、高さ $H=4\text{mm}$ 以下としており、本四基準の疲労強度等級のB等級に該当する。本試験体で目標とした品質等級のBのかど溶接は、作用応力範囲/許容応力範囲が0.5以下の部材に適用される。疲労強度等級B等級の 2×10^6 の 12.75kg/mm^2 であり、その0.5は 6.4kg/mm^2 とD等級の 8kg/mm^2 より低く、D等級でほぼ安全なものと言える。

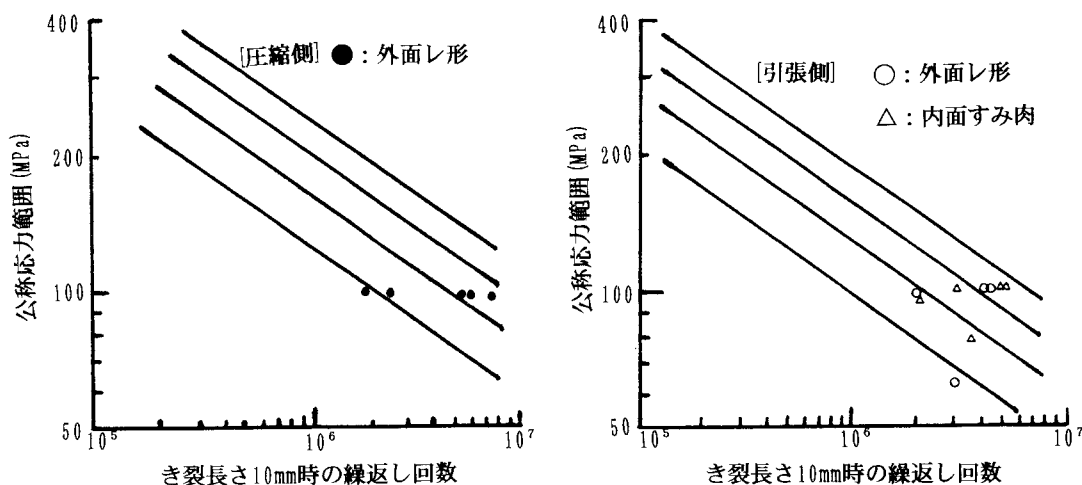


図-9 疲労き裂寸法10mm時の繰返し回数と公称応力範囲の関係

②ガセット

図-10に表面で検出したき裂について、その位置での公称応力範囲とそれらの発見時の繰返し回数の関係を圧縮側(上フランジ側)と引張側(下フランジ側)にわけて示す。引張側のガセットではB工法で施工したガセットの方がA工法で施工したガセットよりも疲労強度が低く、D等級を下回るき裂が引張側で8ヶ所中3ヶ所で発生した。A工法のガセットでは、D等級を下回るものは発生しなかったが、本四基準のガセットの疲労許容応力のC等級を下回るものは8ヶ所中2ヶ所あった。図-13で点線で繋いだプロットは、同じガセットR部より発生したき裂である。

圧縮側のカセットでは、引張側の疲労許容応力を 1.3 倍して設定した圧縮側の疲労許容応力の D 等級を下回るものが A 工法で 6 ケ所中 3 ケ所に発生したが、B 工法では D 等級を下回るものは発生せず、C 等級を下回るものが 1 ケ所発生しただけであり、B 工法によるカセットの方が疲労強度が高いという結果になった。これらを 1.3 倍しない設計疲労曲線と比べると引張側の試験結果とほぼ同様の位置にプロットされる。

疲労き裂が発生したカセットについて、形状測定を実施したが、疲労強度の低かったカセットの多くは、所定の形状からはずれているあるいは小波のような形状変化があるなどフィレット端の形状が悪かった。カセットの疲労強度は製作方法に起因するフィレット端での局所的な形状の乱れの影響を大きく受けるものと思われる。

なお、圧縮側で発生した A 工法に図-7 に示す①のき裂は、5.1 万回で発生しており非常に低い疲労強度を示したが、これはフィレット端付近のグラインダーによる傷から発生しており、製作時のグラインダー傷は疲労強度を低下させる。

また、疲労試験中での疲労き裂の除去はグラインダーを用いて、表面形状や溶接金属の状態を確認しながら実施したが、そのほとんどの疲労き裂発生位置から微小なブローホールが発見された。

き裂の発生に対して、応力集中部に存在するブローホールが大きく寄与しているものと考えられる。

③ダイヤフラム

表面で検出したき裂について、公称応力範囲とき裂発生時の繰返し回数の関係を図-11 に示す。本四基準では、ダイヤフラムの疲労許容応力は、スカラップ有り、無しについては同じ許容応力としており D 等級を基本に、特に止端形状等を管理した場合については C 等級にして良いものとしている。今回の結果から、端ダイヤフラム（スカラップ無し）についてはき裂が発生せず、疲労強度が高いことが分かった。また、中間ダイヤフラム（スカラップ有り）については発生き裂を整理すると、D 等級を

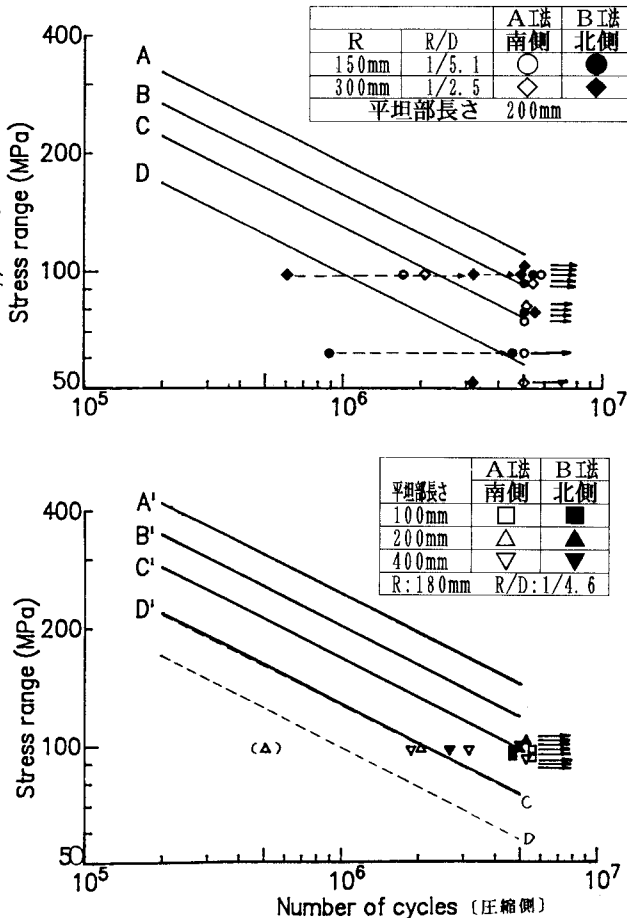


図-10 カセットから発生したき裂の疲労強度（公称応力範囲で整理）

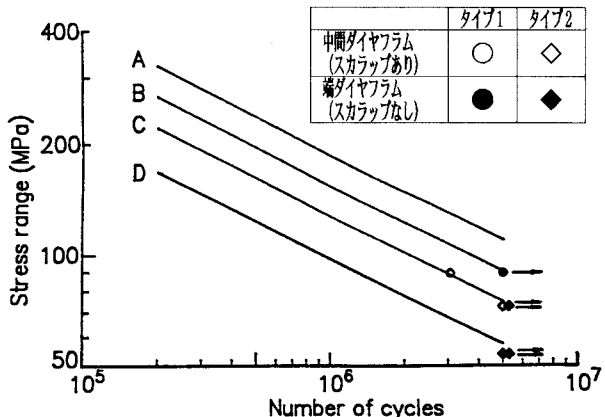


図-11 ダイヤフラムから発生したき裂の疲労強度（公称応力範囲で整理）

満足している。止端形状を管理したC1からも、き裂が発生したがダイヤフラムのスカーラップ回し溶接部に部材軸方向に入っており、弦材の軸方向応力によるき裂ではなく、曲げ載荷により発生した軸直角方向応力によるものと思われ、S-N線では評価できていない。

④あて板、カバープレート

図-12、13に公称応力範囲とき裂発見時の繰返し回数の関係を示す。本四基準では本継手について、疲労許容応力度を規定していないので、JSSC疲労設計指針(案)⁶⁾の疲労設計曲線と比較した。

JSSC疲労設計指針(案)では、軸方向長さが、180mmの場合の疲労等級は、あて板に該当しF等級と規定しているが、疲労試験結果はき裂が発生した2ヶ所のうち1ヶ所はF等級を下回っている。き裂発生はいずれも板厚24mmのあて板について発生し、板厚12mmではき裂は発生しなかった。

軸方向長さが360mmについてはカバープレートに該当しH等級と規定しているが、疲労試験結果はこれを満足するものであった。なお、板厚12mmの場合ではE等級をも満足するものであった。

すみ肉溶接の脚長にほとんど差がない場合には、疲労強度に及ぼす板厚の影響は顕著であった。疲労き裂の破面露呈の結果、トウき裂とルートき裂がみられた。

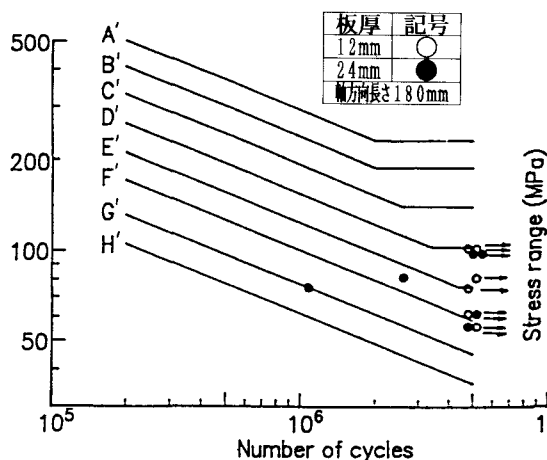


図-12 あて板の疲労強度 (公称応力範囲で整理)

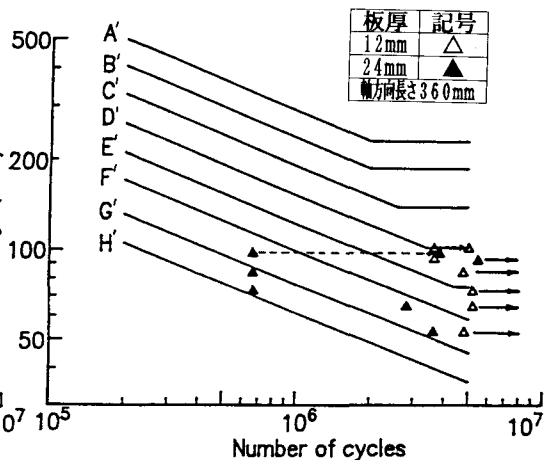


図-13 カバープレートの疲労強度 (公称応力範囲で整理)

(3) ブローホールからの疲労き裂発生と進展特性

図-14にかど溶接部を露呈して発見したブローホールのW寸法、H寸法を用いて計算した換算直径の分布、疲労き裂の発生したブローホールの寸法の換算直径の分布、疲労き裂発生率を示す。き裂発生率は縦ビード溶接部全線で生じたブローホールの総数に対する、き裂が発生したブローホール数の比率である。換算直径はブローホールを等価な円板上の疲労き裂とみなした時の直径で下式により与えられる。²⁾

$$\text{換算直径 } D = 0.94 \times W^{0.29} \times H^{0.48} \quad \text{ただし、} W, H \text{ はブローホールの幅および高さ}$$

図-14で換算き裂の応力拡大係数が大きくなるに従い疲労き裂の発生率が高くなる傾向が認められ、4～5MPa√mから発生率は急激に高くなる。また、その応力拡大係数範囲が2MPa√m以下では疲労き裂が発生していない。この2MPa√mは本州四国連絡橋の疲労設計基準およびブローホールの補修限界寸法の算出に用いた疲労き裂進展下限限界値 ΔK_{th} に一致している。²⁾

(4) アタッチメント近傍の応力分布

①ガセット

図-15にガセットR部の測定応力の公称応力に対する比を示す。R部半径による応力発生状況に顕著な差は見られなかった。図-16にガセットR部で応力測定の最大値と公称応力の比(応力集中度)とその理論値をプロットしたものを示す。測定値は理論値よりも、低い位置にプロットされた。測定値が必ずしも

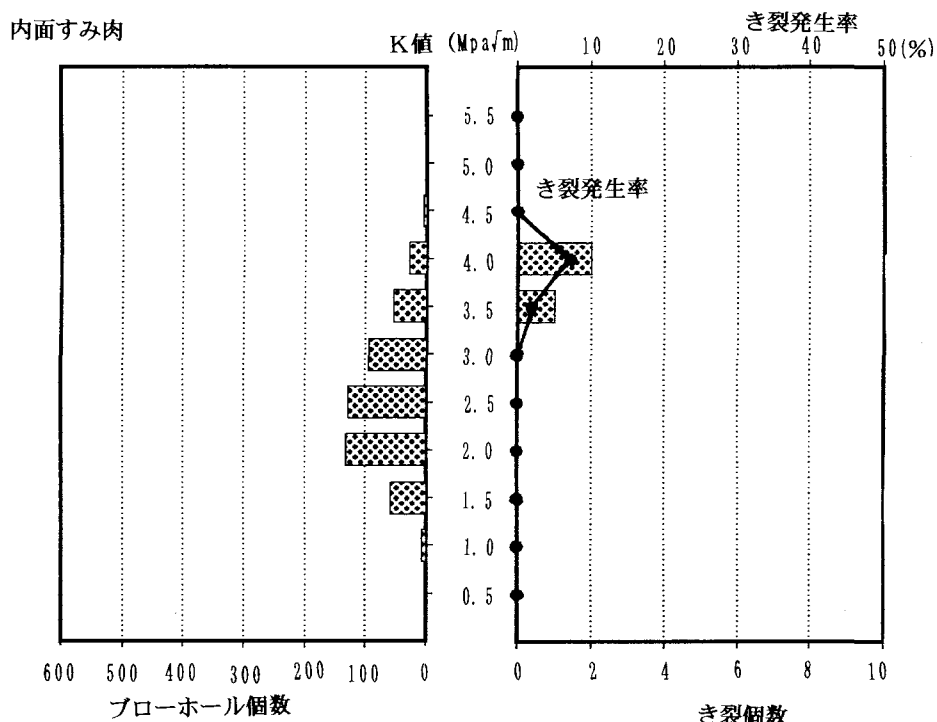
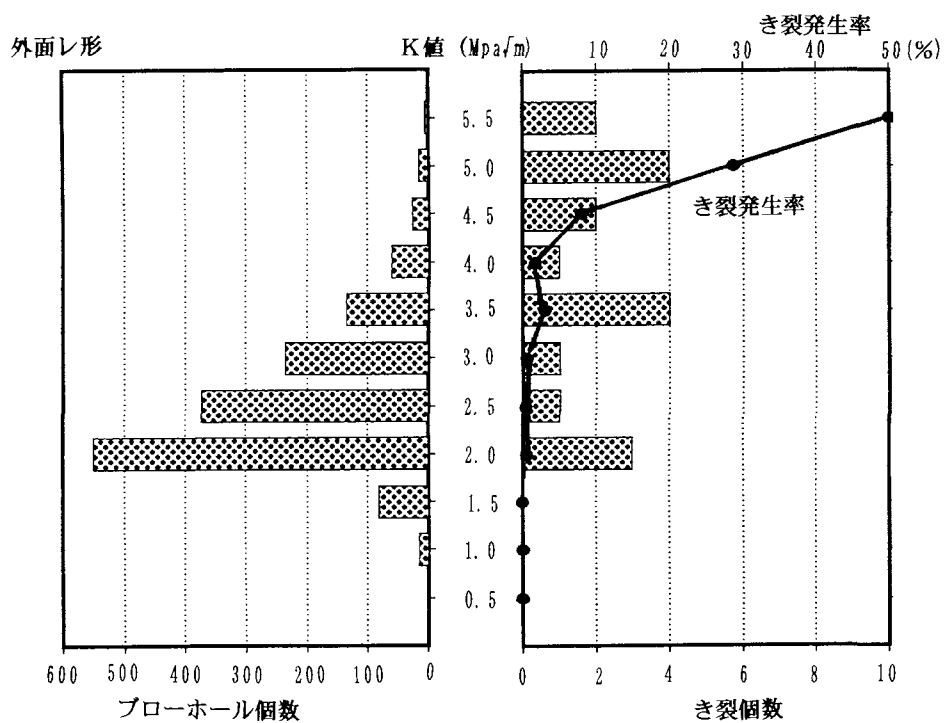


図-14 かど継手中のブローホールの分布、それから疲労き裂発生個数および発生率（応力拡大係数表示）

最大応力発生位置を捉えていないことも考えられる。

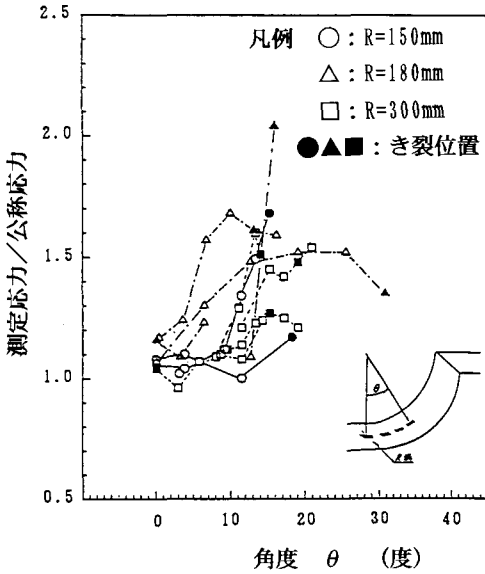


図-15 ガセットR部の応力分布

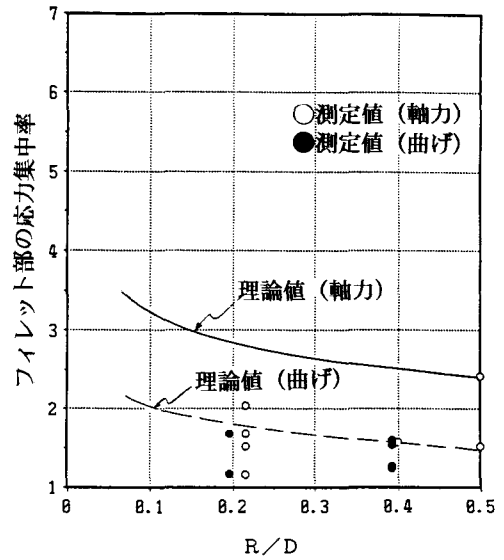


図-16 ガセットの応力集中率の理論値と測定値の比較

②ダイヤフラム

ダイヤフラム近傍の測定応力結果と公称応力の比を図-17に示す。測定応力と公称応力の比が最大になるものは1.2であった。

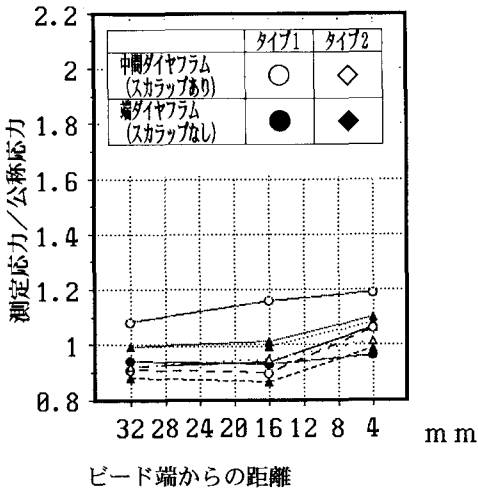
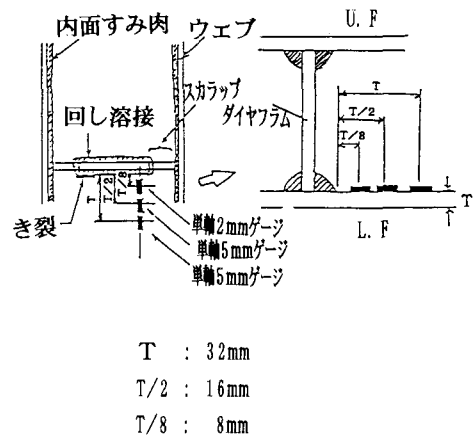
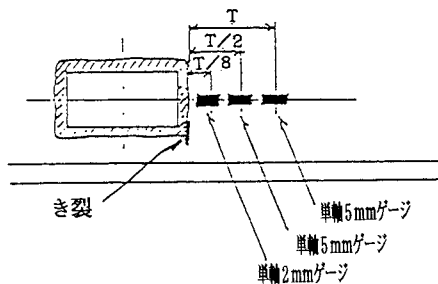
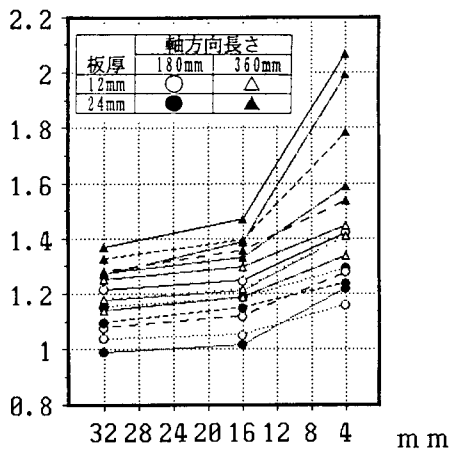


図-17 ダイヤフラム近傍の応力分布

③あて板、カバープレート

あて板、カバープレート近傍での応力分布を図-18に示す。あて板ビード端から4mmの位置での測定応力の公称応力に対する比は、大きいもので2倍前後の数値となっている。長さが長く、板厚が厚いものほどその比が大きくなっている。この結果は疲労試験の結果とも一致している。





T : 32mm
T/2 : 16mm
T/8 : 8mm

ビード端からの距離

図-18 あて板・カパープレート近傍の応力分布

(5) 局部応力と疲労強度

JSSC疲労設計指針(案)によれば、疲労照査をホットスポット応力により実施する場合、溶接部が非仕上げの継手はE等級に、溶接部を仕上げた継手はD等級として、照査をすることとしている。ここでは、各種アタッチメントの疲労強度をホットスポット応力を含む局部応力で評価することを試みる。

①ガセット

き裂検出位置での応力範囲とき裂検出時の繰返し回数の関係を図-19に示す。ここで()は、き裂発生位置での測定値がなく、対称位置または同条件の位置での測定値でプロットしたものである。プロットは、ばらついたものとなっている。ここでは本州四国連絡橋の疲労設計曲線と比較しているが、JSSCの疲労設計曲線と対応させた場合、本州四国連絡橋のC、DがそれぞれJSSCのD、Eにほぼ該当する。

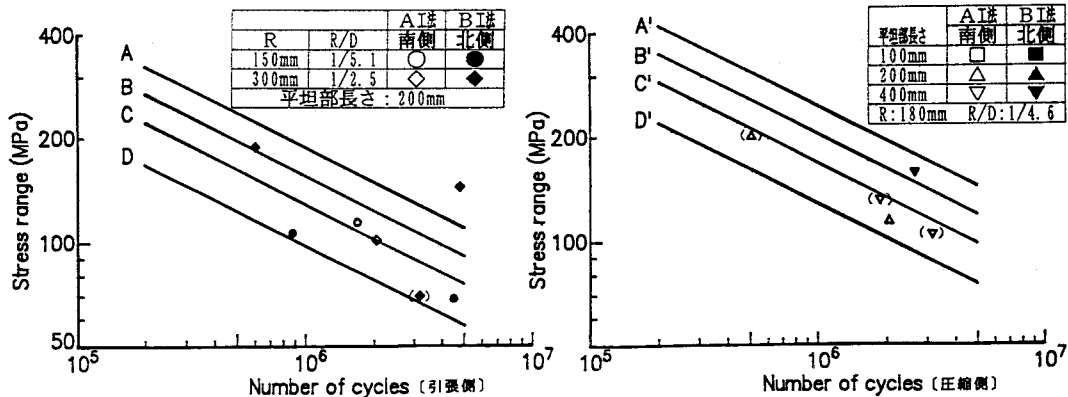


図-19 き裂検出位置測定応力範囲とき裂検出時の繰返し回数の関係(ガセット)

②ダイヤフラム

C2ダイヤフラムに発生したき裂について、ビード端からフランジの板厚tに対しての1/8 tの位置(4mm) 1/2 t (8mm) およびt (16mm) 離れた位置での応力範囲と2tとtの位置での測定応力から直線で外挿したビード端での応力範囲(ホットスポット応力と定義する。)でJSSCの疲労設計曲線に整理したものを図-20に示す。疲労強度はいずれもD等級を満足したものとなっている。

③あて板、カバープレート

あて板、カバープレートから発生したき裂について、局部応力を測定したものについてその応力で疲労設計曲線に整理したものを図-21から図-24に示す。ここでの疲労設計曲線は、JSSCの疲労設計指針(案)における引張側の曲線を圧縮側であるので、1.3倍したものとしている。フランジの板厚 $1/8t$ (4mm)離れた位置での応力でS-N線図に整理した場合および $1/2t$ と t の位置での測定応力から直線で外挿したピード端での応力(ホットスポット応力と定義)でS-N線図に整理した場合ともに、圧縮側の疲労設計曲線のほぼF等級に該当する。

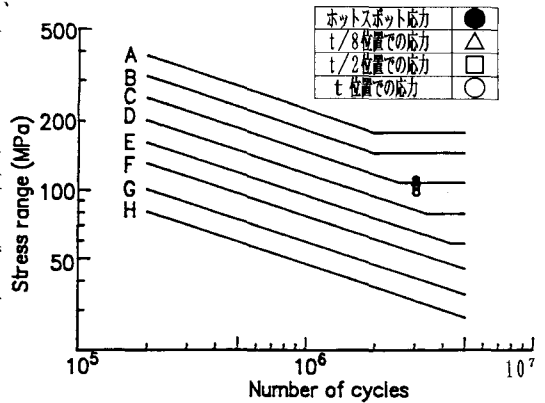


図-20 局部応力とき裂検出時繰り返し回数 (ダイヤフラム)

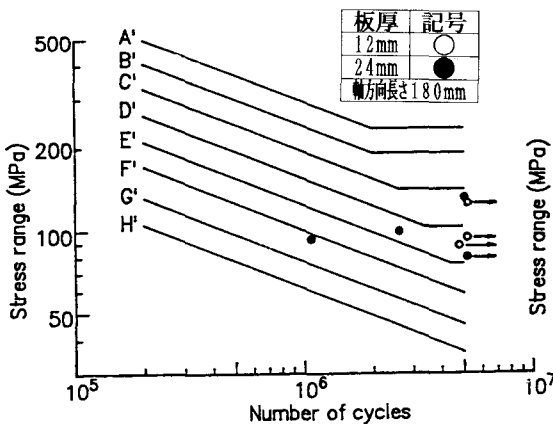


図-21 局部応力とき裂検出時繰り返し回数 (あて板)

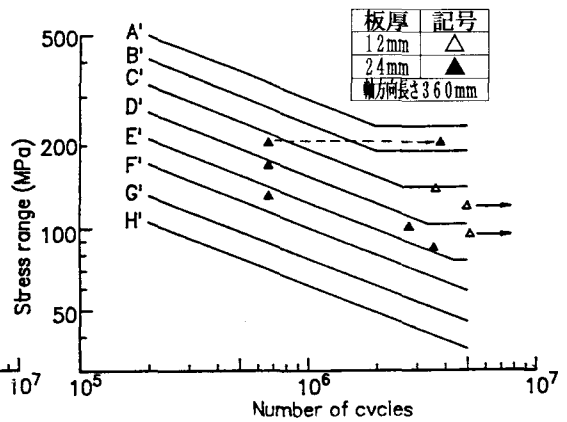


図-22 局部応力とき裂検出時繰り返し回数 (カバープレート)

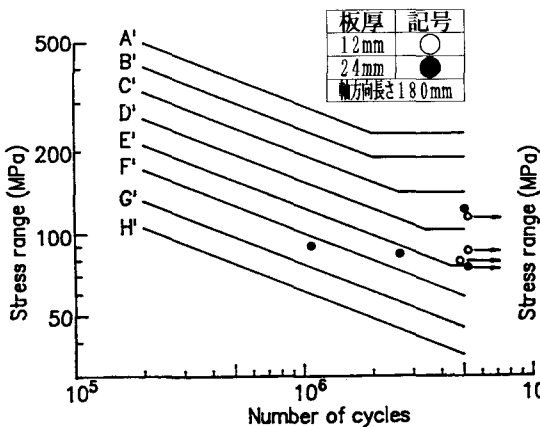


図-23 ホットスポット応力とき裂検出時繰り返し回数 (あて板)

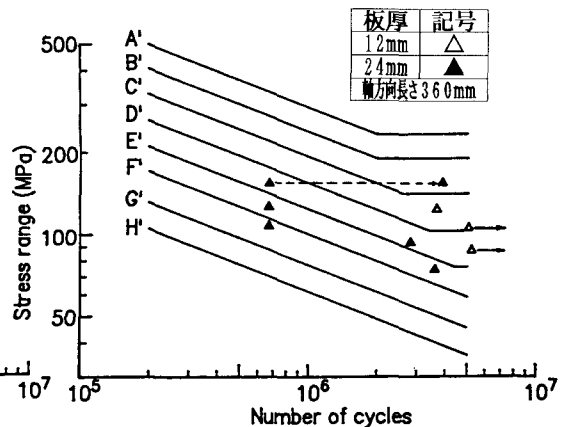


図-24 ホットスポット応力とき裂検出時繰り返し回数 (カバープレート)

4. 結論

かど溶接に比較的大きなブローホールを含み、種々のアタッチメントを取り付けた調質高張力鋼を用いて製作したトラス弦材の疲労試験を行い、得られた主な結果は以下のとおりである。

- (1) 本四製作基準B等級に対応するブローホールを含むかど溶接部の疲労強度はかなり低く、疲労許容応力度D等級程度である。
- (2) ブローホールからの疲労き裂の発生および進展性状は、引張フランジ（下フランジ）と圧縮フランジ（上フランジ）で差は認められない。疲労き裂の発生数は圧縮フランジの方が多い傾向にある。
- (3) ブローホールの換算き裂に対する応力拡大係数が大きくなるに従ってブローホールからの疲労き裂の発生率は高くなる。その応力拡大係数が $2\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 以下では疲労き裂は発生しない。
- (4) 突き合わせ溶接で取り付けたガセットは、そのR端の出来上がり形状により、疲労強度C等級を下回る場合もある。また、グラインダーによる疲労き裂の除去時にほとんどのき裂よりブローホールが発見されており、き裂発生にブローホールが寄与しているものと思われる。
- (5) ダイアフラムの疲労強度は、スカラップ有り、無しともに、C等級を満足している。
- (6) ダイアフラムの疲労強度を局部応力で評価すると、JSSCの疲労設計曲線のD等級を満足するものとなった。
- (7) あて板の疲労強度はJSSCの疲労設計指針（案）のF等級を、カバープレーットの疲労強度は同指針（案）のH等級をほぼ満足し、同指針（案）の規定と一致した。
- (8) あて板・カバープレーットのすみ肉溶接の溶接脚長にほとんど差がない場合、疲労強度に及ぼす板厚の影響は大きい。

謝辞

本実験を実するにあたり、(財) 海洋架橋調査会に設置された鋼上部構造委員会疲労分科会の委員各位に有益な助言を頂きました。ここに深く謝意を表します。

- 1) 鋼橋等製作基準 本州四国連絡橋公団
- 2) Miki, C., Mori, T., Sakamoto, K. and Sasaki, T. : An Analysis of Fatigue Crack Growth from Blowholes in Longitudinal Welded Joints, Structural Eng./Earthquake Eng., Vol. 4, No. 2, Oct. 1987, 289s-297s
- 3) Miki, C., Mori, T., and Tajima, T. J. : Effect of Stress Ratio and Tensile Residual Stress on near Threshold Fatigue Crack Growth, Structural Eng./Earthquake Eng., Vol. 3 No. 1, April 1986, 155s-182s
- 4) Takena, K., Hirano, S., Itoh, E. and Miki, C. : Fatigue Strengths of Box Section Truss Chord with Corner Joints, Structural Eng./Earthquake Eng., Vol. 4, No. 1, April 1987 41s-49s
- 5) 竹名興英、伊藤文夫、平野茂、三木千寿：ボックス断面角継手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 1989. 3
- 6) 疲労設計指針（案）平成元年11月 日本鋼構造協会

(1991年9月30日受付)