

ハンガーブラケット実橋モデルによる疲労試験

Fatigue test of full scale model specimen of hanger bracket used for Honshu-Shikoku Bridges.

田島二郎* 飯島武明** 谷藤精一*** 梶本勝也****

by Jiro Tajima, Takeaki Iijima, Seiichi Tanifuji and Katsuya Kajimoto

In 3 suspension bridges of Kojima-Sakaide route of Honshu-Shikoku Bridges, new structural type of hanger brackets are used. In order to clarify their fatigue strength, a full scale model specimen of the hanger bracket was made and fatigue test was conducted. The following results were obtained.

1. The new type hanger bracket has sufficient fatigue strength for design life.
2. Fatigue strength analysis and fracture mechanics analysis well describe test results.
3. Reference fatigue strength data for maintainance of these bridges (crack initiation life and its location, etc.) are obtained.

1. ま え が き

本州四国連絡橋児島・坂出ルートの3吊橋（南備讃瀬戸大橋、北備讃瀬戸大橋および下津井瀬戸大橋）において、主構部から張り出たハンガーブラケットによる新しい吊り構造形式が採用された。このハンガーブラケットは橋全体を支える重要部材であり、さらに、列車荷重による繰返し荷重が作用するので、疲労強度に対して十分安全であるよう配慮して設計がなされている。

しかし、構造上複雑であり、溶接作業性が良くないことを勘案し、

- 設計上評価できない弱点部位があるかどうかを調査すると共に、疲労強度に対する安全性を確認する。
- 竣工後の維持管理の資料を得る。

の2項目を目的として実橋モデルによる疲労試験を行った。その結果、溶接ルート部からの断面方向へと進展する疲労亀裂、圧縮応力下の疲労亀裂の発生、進展および疲労強度に及ぼすビード形状の影響など実体試験ならではの得られぬ種々貴重な知見が得られたので報告する。

-
- * 工博 埼玉大学教授 工学部建設工学科（〒338 埼玉県浦和市下大久保255）
 ** 本州四国連絡橋公団 設計部長 （〒105 東京都港区虎ノ門5丁目1-5）
 *** 建設機械化研究所（〒417 静岡県富士市大淵3154）
 **** 工博 三菱重工業㈱広島研究所（〒733 広島市西区観音新町4丁目6-22）

2. 試験方法

2.1 供試体および荷重要領

供試体としてハンガーブラケットから主構中心までを試験対象範囲とし、図1に示すように左右対称構造のものを実橋と同一施工条件で1体製作した。荷重要領は図2に示すように、ハンガー定着部8ヶ所を実橋と同一条件になるように支持し、主構上弦材中央部に荷重用円柱を介して線荷重を与える方式をとった。これにより、各着目点（※1：主構との付け根部、※2：くびれ部、※3：ハンガー定着部）の断面力は図中の表に示すように、ほぼ実橋設計条件を再現できる。

断面力表 ($\Delta P=36\text{ton}$)

単位：t, tm

	設計	モデル
※1(主構との付け根部)	ΔM	45.4
	ΔS	19.8
※2(くびれ部)	ΔM	16.7
	ΔS	19.6
※3(ハンガー定着部)	ΔR	25.8

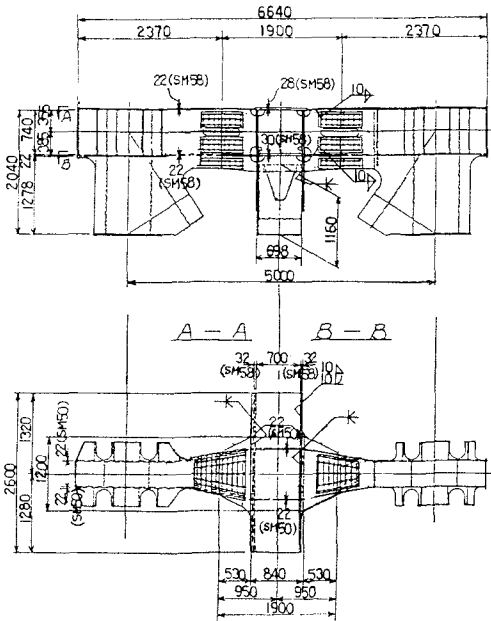


図1 ハンガーブラケット疲労試験供試体図

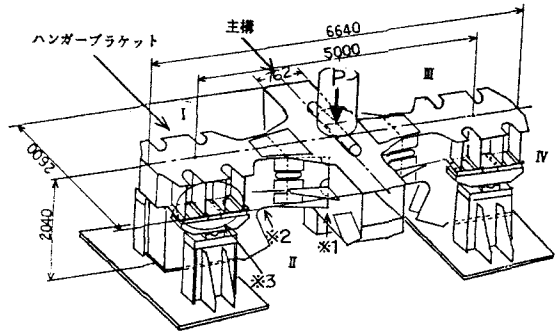


図2 荷重要領及び各部の断面力

2.2 疲労試験および内容

疲労試験の手順を図3にまとめて示す。

まず、供試体について検査要領書に基づく諸検査(手順①)を行うとともに、図4に示すように立体モデルのFEM解析(手順②)を実施し、各部の施工品質および応力状態を把握した。そして、これらを基に各構造部分の疲労強度を照査(手順③)し、繰返し数が200万回程度で疲労亀裂が生じうる試験荷重範囲として $\Delta P=130\text{ton}$ (設計疲労荷重条件 $\Delta P=36\text{ton}$ の約3.6倍)を設定した。

次に、試験前の準備(手順④)として、上述手順②のFEM解析結果等をよく吟味して、各部にひずみゲージを貼付するとともに変位計を取り付けた。

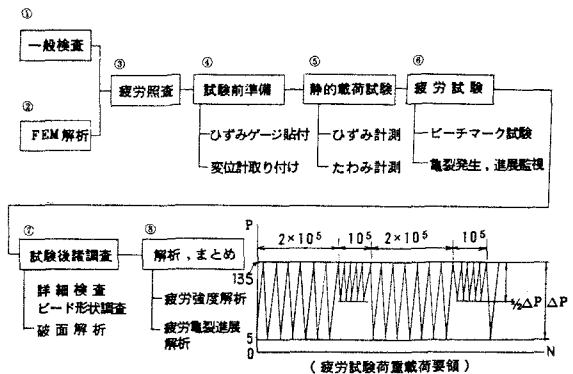


図3 疲労試験の手順

試験においては、上述のFEMの解析の妥当性確認および後述の疲労強度解析の基礎資料とするため、静的载荷によるひずみ、たわみ計測（手順⑤）を実施した後に疲労試験に入った。

疲労試験（手順⑥）は、板内部における疲労亀裂の発生、進展状況を知るためにビーチマーク試験法（図3中に示すように所定の繰返し数毎に応力範囲を変動させる方法）を適用して行った。また、定期的に検査を行い、疲労亀裂の発生、進展状況を監視した。

試験終了後は、着目点、その他溶接継手部について詳細な非破壊検査を行うとともに、型取り法を適用してビード形状を調べた。そして、亀裂発生部についてはその近傍からブロックを切出した後に、亀裂破面を露呈した。その後、実体顕微鏡および走査型電子顕微鏡などを用いて詳細な破面解析を行った。（手順⑦）

以上の諸結果を基に解析、まとめ（手順⑧）として、まず亀裂発生構造箇所について疲労強度解析を行い、その疲労安全性について考察を加えた。また、破壊力学を適用した疲労亀裂の進展解析を行った。

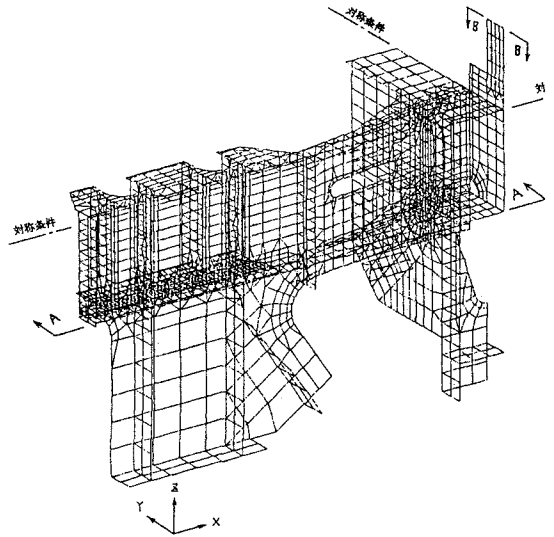


図4 FEM解析モデル

3. 試験結果

3.1 FEM応力解析結果

FEM応力解析結果として供試体の各構造箇所が生じる最大応力値を抽出して図5にまとめて示す。図から、最大応力値を示す構造部位は主構との付け根部の補強リブ端部溶接部で、次いで下部および上部スカラップ部がこれに準じた応力値を示した。したがって、疲労試験においては当該構造箇所が疲労亀裂の発生点となりうるが予想された。

3.2 静的载荷試験結果

静的载荷試験結果の一例として、主構との付け根部における応力測定値を先に実施したFEM解析結果と比較して図6に示す。とくにスカラップ部において複雑な応力分布を示しているが、全般的には実測値とFEM解析値は良く一致していた。しかし、同図A部に示すように上スカラップのフランジ側溶接止端部については実測値がFEM

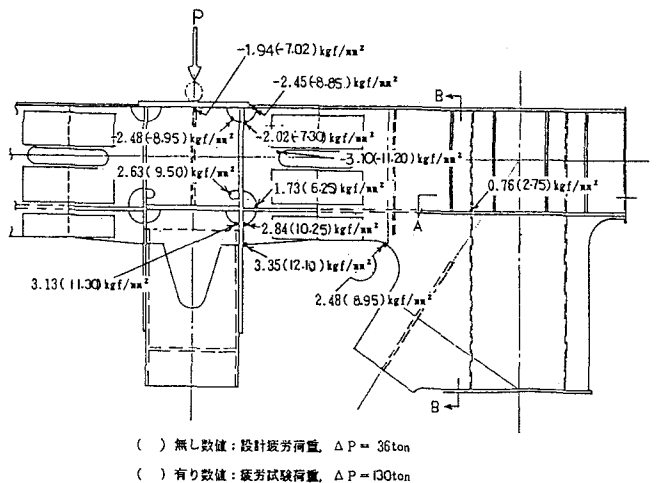


図5 供試体各部に発生する最大応力値

M解析値より相当大きくなっていった。この原因として、当該部は製作上の都合から板厚差のある主構とハンガーブラケット部の上フランジをスカラップ内で突合せ溶接しているが、立体モデルのFEM解析では解析の簡便さからスカラップ内の上フランジはハンガーブラケット部の板厚(22mm)としており、この両者の差異

(板厚差, 偏心等) が影響したことが考えられる。そこで、実構造の板厚差および溶接ビード形状を忠実にモデル化した 2 次元ズームアップ解析を追加して行ってみた。その結果を図 7 に示す。解析結果は同図中に示すひずみゲージによる実測値とほぼ良い対応を示していることがわかる。

3.3 疲労試験結果

疲労試験中、適宜検査を行いつつ試験を続けた結果、当初想定繰返し数 2×10^6 回頃より各所に疲労亀裂の発生が認められるようになり、最終的な試験繰返し数 4.08×10^6 回の時点で、リブ端部に 1 個、下スカラップ部に 5 個、上スカラップ部に 3 個、角継手部に 3 個の計 12 個の疲労亀裂が検出された。その状況を図 8 に示す。また、各亀裂発生部位について行った諸調査結果を一括して表 1 にまとめて示す。これから主たる結果として次のことがあげられる。

- (1) リブ端部 1 箇所に発生した疲労亀裂 (No.①) は、リブ側溶接止端部を起点としていた。当該部には微小カットがみられ、他箇所に比べて止端部の応力集中係数 K_t は大きかった。
- (2) 下スカラップの回し溶接部に発生した疲労亀裂は、一部 (止端部を起点とした No.③-1) を除いて、いずれも溶接ルート部を起点としていた。なお、亀裂 No.③-1 の溶接止端部には微小カットがみられ、他箇所に比べて K_t は大きかった。また、全てのルート部に若干の溶込み不足がみられた。
- (3) 上スカラップの回し溶接部に発生した疲労亀裂は、いずれも溶接ルート部を起点として回し溶接金属部の表面に現れた後に、上フランジ側へと進展していた。当該構造箇所は疲労応力的には圧縮応力になるのに、このような疲労亀裂が発生、進展したのは、溶接残留応力が大きく影響したものと考えられる。また、下スカラップ同様、ルート部溶込み不足がみられた。
- (4) 角継手部の疲労亀裂は、溶接ルート部を起点として表面亀裂の形態で 3 個発生していた。

以上の試験の結果、溶接ルート部からの断面方向へと進展する疲労亀裂、圧縮応力下の疲労亀裂の発生、進展および疲労強度に及ぼすビード形状の影響など実体試験ならではの得られぬ種々貴重な知見が得られた。

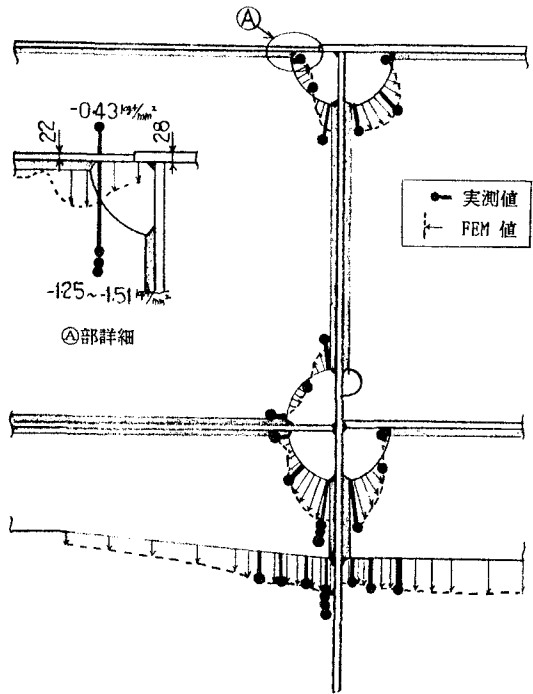


図6 主構との付け根部における応力分布 ($P=10^7 \text{ MPa}$)

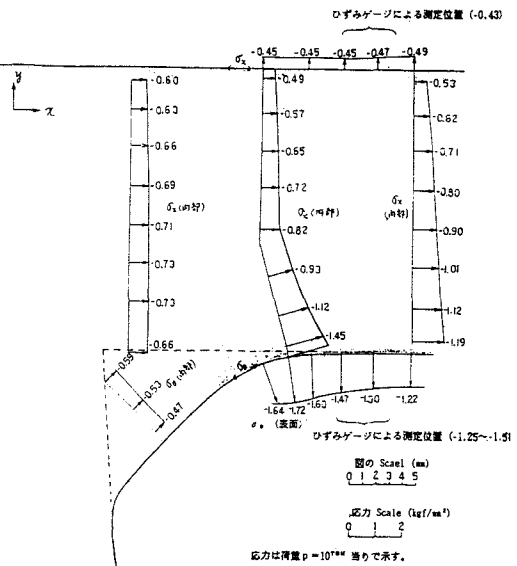


図7 上スカラップ部近傍の 2 次元ズームアップ解析結果

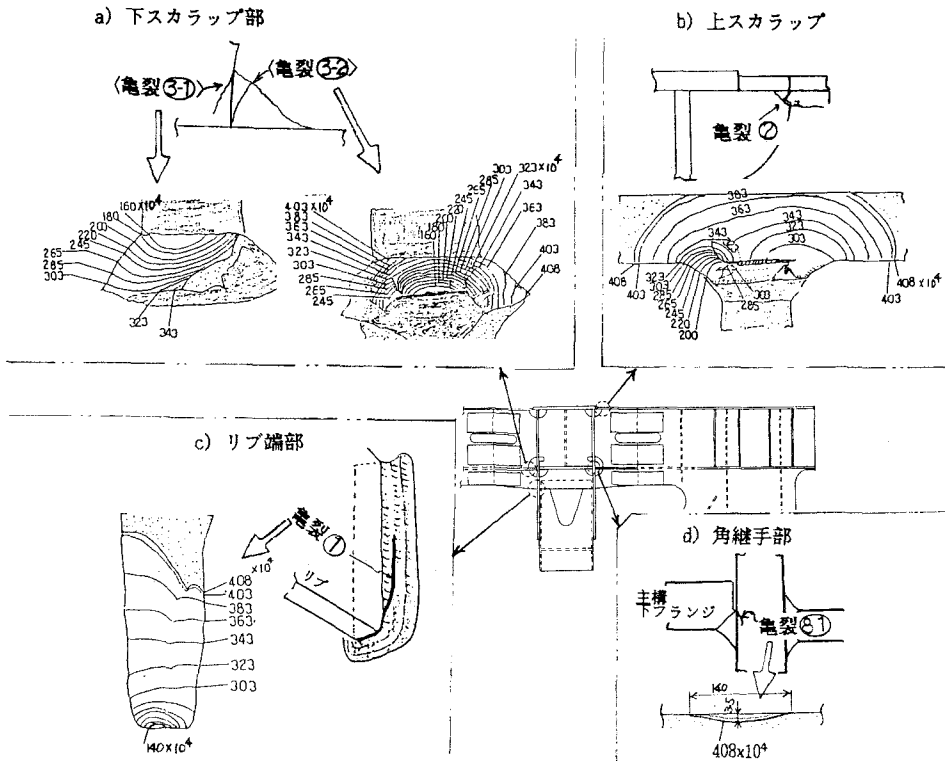


図8 亀裂発生状況

4. 考察

4.1 ハンガーブラケット各構造部の疲労照査

ハンガーブラケット実構造モデルによる疲労試験の結果、主構との付け根部のリブ端部、下スカラップ部、上スカラップ部および角継手部に疲労亀裂の発生をみた。そこで、これら疲労強度上の弱点部位となりうる各構造箇所の疲労強度を照査するとともに、その疲労安全性に検討を加えてみた。

疲労強度の照査はまず本四設計基準¹⁾に基づいて行った。すなわち、実橋設計時と全く同様の手法で疲労試験時における供試体各部の疲労応力範囲 (σ_r) を算出し、本四基準の疲労許容応力範囲 (σ_{fa}) と対比したものを表2に示す。なお、各構造箇所の疲労寿命(溶接のど厚の80%まで亀裂が進展する寿命と考えた)は、角継手部を除いておおむね200万回付近と考えられるため、 σ_{fa} として

表1 疲労亀裂発生部位の諸調査結果まとめ

構 造 所	作 用 力 ^{*1} 応 力 (kgf/mm ²)	破面観察結果			ビード形状型取り結果		
		NO.	起 点	疲労寿命 ^{*2} (Cycles)	応 力 集 中 係数 ^{*3} Kt	溶接のど厚 (mm)	
リブ 端部	I	13.8	なし	—	1.27~1.33	10.8~11.6	
	II	13.3	①	止端部	2.45 × 10 ⁶	1.34~4.54	9.5~10.5
	III	15.6	なし	—	1.31~1.67	10.0~11.5	
	IV	14.8	なし	—	1.19~1.24	8.8~10.4	
下スカ ラップ	I	下フランジ側 ウェブ側 5.1	①	ルート部	3.65 × 10 ⁶	1.98~2.60	7.5~7.7
	II		⑤	ルート部	2.20 × 10 ⁶	1.90~2.95	7.5~8.4
	III		③-1	止端部	2.20 × 10 ⁶	1.86~6.73	9.0~9.4
	IV		③-2	ルート部	3.03 × 10 ⁶	—	—
上スカ ラップ	I	-19.5	なし	—	1.86~3.99	8.4~9.2	
	II	-18.1	②	ルート部	1.86 × 10 ⁶	1.49~2.98	7.6~8.2
	III	-16.1	④	ルート部	2.20 × 10 ⁶	1.61~3.12	7.6~8.2
	IV	-19.2	⑥	ルート部	3.43 × 10 ⁶	1.72~2.13	7.8~8.4
角継 手	I-II	5.3	③-1	ルート部	>4.08 × 10 ⁶	—	26.8
			③-2	ルート部	"	—	"
			③-3	ルート部	"	—	"
	III-IV	—	なし	—	—	—	—

*1 : 溶接止端部近傍に貼付したひずみゲージによる実測値

*2 : 溶接のど厚の約80%まで亀裂が進展したときの繰返し数(ビーチマーク等より推定)

*3 : 溶接ビード形状(ρ , θ)の計測結果を基に、熊谷らの式(機論, Vol.34)を用いて

は 200万回基本疲労許容応力範囲を採用している。

リップ端部については十分安全側の評価を与えている。また、角継手部についてもルート部から約 3 mm深さの疲労亀裂の進展をみたが、 4.08×10^6 回の時点で疲労寿命に達しておらず、疲労試験結果とほぼ対応した評価を与えている。

しかし、スカラップ継手部については、本四基準のフランジ側溶接止端部に着目した照査では許容値以下となり、結果は危険側の評価を与えている。疲労試験の結果は止端部からの母材亀裂でなく、ルート部を起点としての断面方面へと進展する亀裂が発生しており、この部分に対するビードのせん断応力に対する設計上の評価方法について今後検討する必要があると考えられる。

次に、溶接継手の疲労強度は、冶金的なものより形状の因子により支配されることが多いことから、溶接継手に発生する応力を①溶接ビードによる応力集中効果 (K_f) と②継手構造による二次応力効果 (K_s) に分離して考えて溶接止端部からの疲労強度を評価する方法が提案され、その有用性が確認されている²⁾。すなわち、次式のように溶接止端部におけるピーク応力 (σ_{max}) が平滑母材の疲れ限度に達したときに疲労亀裂が発生すると考えるものである。

$$\sigma_{max} = K_f \cdot K_s \cdot \sigma_{wk} = \sigma_{wo} \quad (1)$$

ここに、 σ_{wk} は溶接継手の疲れ限度（公称応力表示）、 σ_{wo} は平滑母材の疲れ限度、 K_f は溶接ビードの疲れ切欠係数、 K_s は継手構造の二次応力係数（継手の全体形状により発生するいわば構造的な応力集中で、実物での応力計測や精度の良い FEM 解析を行うことにより求めることができる）である。

そこで、(1)式を適用して溶接止端部からの疲労亀裂の発生をみたリップ端部における疲労強度を評価した結果を表 3 に示す。疲労試験でも構造箇所Ⅱのみに止端部からの疲労亀裂が発生しており、実験結果と非常に良い対応を示している。すなわち、継手構造による二次応力や継手形状の影響をさらに高精度に評価したい場合は、(1)式のような考え方は有用な方法となりうるということがわかる。

なお、疲労試験は実設計荷重の約 3.6 倍で行っているの、疲労寿命は直線累積被害法則に従うものと仮定して、次式によって設計疲労荷重条件時における疲労寿命を推定してみた。

$$\log(\sigma_T / \sigma_D) = -K \log(N_T / N_D) \quad (2)$$

ここに、 σ_T は疲労試験時の作用応力範囲、 σ_D は設計疲労荷重条件時の作用応力範囲、 N_T は疲労試験時の疲労寿命、 N_D は設計疲労荷重条件時の

表 2 各構造部の疲労強度照査結果（本四設計基準）

構造箇所	疲労試験結果		疲労照査結果			備考
	起点	疲労寿命 (Nf)	応力範囲 σ_r (kgf/mm ²)	許容応力範囲 σ_{fa} (kgf/mm ²)	判定 σ_r / σ_{fa}	
リップ端部	I	—	17.2	10.5 (等級 C)	1.64	
	II 止端部	2.45×10^6				
	III	—				
	IV	—				
下スカラップ	I	ルート部 3.65×10^6	6.2	8.0 (等級 D)	0.78	
	II	ルート部 2.20×10^6				
	III 止端部	2.20×10^6				
	IV	ルート部 3.30×10^6				
上スカラップ	I	—	8.1	10.4 (等級 D)	0.79	
	II	ルート部 1.86×10^6				
	III	ルート部 2.20×10^6				
	IV	ルート部 3.43×10^6				
角継手	I-II	ルート部 4.08×10^6	6.2	8.0 (等級 D)	0.78	
	III-IV	—				

*1：設計検討時の立体 FEM 解析により応力集中率 1.6 を考慮

*2：作用応力が片振り圧縮であることを考慮 ($1.3 \times 8.0 = 10.4$)

表 3 継手応力分割評価法による疲労強度照査結果

構造箇所	疲労試験結果 亀裂発生の有無 (起点)	疲労寿命 Nf (cycle)	疲労照査結果					判定 *2
			二次応力変動幅 σ_s (kgf/mm ²)	疲れ切欠係数 K_f	ピーク応力変動幅 σ_{max} (kgf/mm ²)	母材疲れ限度 σ_{wo} (kgf/mm ²)	$\sigma_{max} / \sigma_{wo}$	
リップ端部	I	無	B 13.8	1.23~1.31	18.1	26.0 (SM50)	0.70	○
	II	有	B 13.3	1.29~2.30	30.6		1.18	×
	III	無	B 15.6	1.29~1.44	22.5		0.87	○
	IV	無	B 14.8	1.17~1.23	18.2		0.70	○

疲労寿命, KはS-N線図の勾配 (SM50の場合 1/4, SM58の場合 1/3とした¹⁾) がある。

設計疲労荷重条件時における疲労寿命推定結果を表4に示す。いずれの構造箇所とも

100年を考えた設計寿命 (9.6×10^6 回) を大きく上回っており, 採用されたハンガーブラケット構造部は疲労に対して十分安全であると考えられる。

4.2 疲労亀裂の進展挙動

疲労試験において, 亀裂発生のみられた構造箇所について, 破壊力学を適用した疲労亀裂進展解析を行い, 実験結果と比較検討することによりその妥当性を調べた。なお, 疲労亀裂の進展速度式としては次式を用い, 上スカラップ部のように作用応力が片振り圧縮状態であっても, 溶接残留応力の影響により ΔK は亀裂進展に 100%有効に働くと考えて解析を行った。

$$da/dN = C (\Delta K)^m \quad \text{----- (3)}$$

ここに, da/dN は亀裂進展速度, ΔK は応力拡大係数の変動範囲, C, m は材質によって定まる常数 (SM50 ----- $C = 1.52 \times 10^{-10}, m = 2.99$; SM58 ----- $C = 3.01 \times 10^{-10}, m = 2.85$ を用いた) である。

表5に解析対象とした各構造箇所における疲労亀裂の進展状況と解析上のモデル化例を示す。

リブ端部については, リブ板厚を貫通するまでは半楕円表面亀裂とみなして Newman の K 値解析解³⁾ を適用して解析を行った。リブ板厚貫通後は有限板片側亀裂にモデル化して解析したが, その際の端部の条件としては, 供試体の荷重, 変位条件が単純でないことを考慮して①荷重型②変位型③端面非回転・平均応力一定の3ケース⁴⁾ に変化させた。解析結果として, 図9にリブ板厚貫通前後を含めた亀裂進展状況を疲労試験結果のそれと比較して示す。実構造物においては, 亀裂が大きく成長すると荷重の再配分などが起こるため, 荷重・変位条件等に対する配慮が必要になることがわかる。

上スカラップ部については, まず溶接金属内の進展は溶接ルートの未溶着部に適当な大きさの初期亀裂の存在を仮定して, 半楕円表面亀裂の進展問題として解析を試みた。なお, その際の作用応力としては図7に示したFEM2次元ズームアップ解析による溶接のど断面部における値を用いた。次に上フランジ内の進展については, 疲労試験の亀裂進展状況に合わせて, 半楕円複数亀裂の進展問題として Kobayashi の K 値算定式⁵⁾ に飯田らの形状変化則⁶⁾ を組み合わせた亀裂進展解析プログラムを用いて解析した。作用

表4 各構造箇所の設計疲労荷重条件時の疲労寿命推定結果

構造箇所	リブ端部	下スカラップ部	上スカラップ部	角継手部
疲労寿命	4.17×10^8 > 6.94×10^8	3.74×10^8 > 6.17×10^8	3.06×10^8 > 6.94×10^8	> 1.92×10^8

表5 疲労亀裂進展解析のモデル化

亀裂進展状況	モデル化
リブ端部 板厚貫通前 亀裂No.①の破面	半楕円表面亀裂 (J. C. Newman の解) ① 荷重型 σ 一定 ② 変位型 V_0 一定 ③ 端面非回転 平均応力一定 Z_0 一定 V_0 一定
リブ端部 板厚貫通後 亀裂No.②の破面	有限板片側亀裂 ① 荷重型 σ 一定 ② 変位型 V_0 一定 ③ 端面非回転 平均応力一定 Z_0 一定 V_0 一定
上スカラップ部 溶接金属内進展 I. 上フランジ 亀裂No.③の破面	半楕円表面亀裂 (J. C. Newman の解) 半楕円複数表面亀裂 (A. S. Kobayashi の解+飯田らの形状変化則 亀裂の干渉・合体考慮)

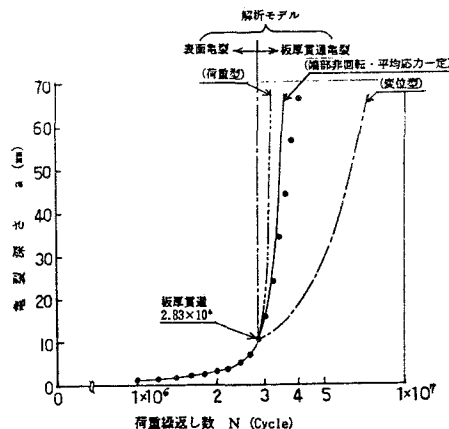


図9 疲労亀裂進展解析結果 (リブ端部)

応力としては、同じくFEM2次元ズームアップ解析による亀裂進展位置近傍の値を用いた。

解析結果として、図10に初期亀裂の深さ(a_0)を1～3mmに変化させて溶接金属内における疲労亀裂の進展深さと繰返し数の関係を解析した結果を示す。なお、同図には疲労試験時に亀裂が外表面から検出された時期も併せて示してある。図から、初期亀裂の深さとして約2mm程度のものを仮定すれば、疲労試験時の亀裂検出状況と良い対応を示していることがわかる。

このように、溶接ルート部における応力集中効果を適当な大きさの初期亀裂(例えば2mm深さ)に置き換えて評価することの妥当性が普遍的にいえば、本試験で発生したような溶接ルート部を起点としてのど断面方向へと進展する疲労亀裂の有用な評価法となりうることが期待される。

次に上フランジ内の解析結果として、図11に解析による亀裂進展形状と疲労試験時のビーチマーク形状を対比して示す。両者は良い一致を示していることがわかる。

5. あとがき

ハンガースラケット実橋モデルを製作し、FEM応解析、静的荷重試験および疲労試験を実施した。そして、亀裂発生部については、詳細な破面解析、ビード形状の型取り調査などを行い、これらを基にその疲労強度を照査するとともに、破壊力学を適用した疲労亀裂進展解析を行った。その結果、採用されたハンガースラケット構造部は疲労強度に対して十分安全であることを確認することができた。また、竣工後の維持管理に関する諸資料を取得できた。今後の吊橋の維持管理および設計・施工法に、これらの成果を有効に活用して行きたい。

参 考 文 献

- 1) 本四橋「上部構造設計基準・同解説」
- 2) 砂本、他；溶接継手の疲れ強さに関する新しい評価法の検討、三菱重工技報 VOL.16 No.3(1979)
- 3) Newman, J.C.Jr, Raju, I.S.; Analysis of Surface Cracks in Finite Plates under Tension or Bending Loads, NASA Technical Paper 1578 (1979)
- 4) D.P.Rooke, D.J.Cartwright ; Compendium of Stress Intensity Factors, London Her Majesty's Stationary Office
- 5) Kobayashi, A.S. ; Crack Opening Displacement in a Surface Flawed Plate Subjected to Tension or Plate Bending, Proceedings of the 2nd International Conference on Mech.Behavior of Matls., Federation of Materials Societies, 1976 Boston
- 6) 飯田、他；複数表面欠陥からの疲労き裂伝播寿命評価(第一報)、日本造船学会論文集、第148号(1980)

(1987年10月16日)

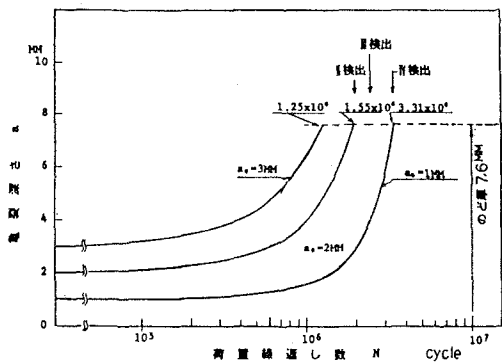
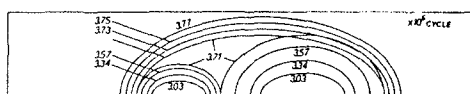
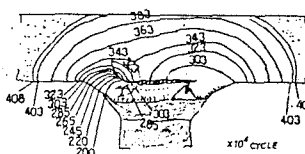


図10 疲労亀裂進展解析結果(上スカラップ部、溶接金属中)



(a) 解析結果



(b) 破面ビーチマーク形状

図11 上スカラップ部の疲労亀裂進展形状(上フランジ)