

4 種類の垂直補剛材取付部をもつ プレートガーダー試験体の疲労実験と寿命予測

FATIGUE TEST AND LIFE ESTIMATION OF PLATE GIRDER SPECIMENS WITH 4 TYPES OF VERTICAL STIFFENER CONNECTIONS

坂野昌弘* ・三上市藏** ・米本栄一*** ・安池寿夫****

By Masahiro SAKANO, Ichizou MIKAMI, Eiichi YONEMOTO and Hisao YASUIKE

Long life fatigue tests are performed using plate girder specimens with 4 types of vertical stiffener connections in order to investigate the initiation and propagation behavior of fatigue cracks and fatigue strength of each connection. Fatigue cracks are initiated at the weld toe of stiffener-to-flange fillet welds and at blow holes contained in web-to-flange fillet welds. The connection with 30mm-gap between the stiffener end and tension flange plate is superior in fatigue strength than the other three types of connections. Fatigue life of each connection can be estimated with adequate accuracy by the crack propagation analysis taking account of the configuration of fillet weld toe.

1. はじめに

道路橋示方書の改訂により、プレートガーダー垂直補剛材の引張フランジ側の取付け方法に関する規定が追加された¹⁾。主な追加点は、支点部以外の垂直補剛材と引張フランジについて、

- ・荷重集中点では原則的には溶接せずメタルタッチとする
- ・桁の面外方向に生じる水平力を考慮する場合あるいは床版と接する場合には溶接する
- ・荷重集中点以外では防錆に配慮して適当な間隔をあける

などである。道路橋では鋼床版を除いて疲労に対する応力照査は行われていないが、疲労亀裂の成長が桁全体の崩壊につながるおそれのある引張フランジ側のディテールについては、特に、その疲労強度特性を十分に把握しておくことが必要である。

従来より、鉄道橋では垂直補剛材取付溶接部の疲労強度はリブ十字継手小型試験体の疲労試験結果を参考に評価されている²⁾。しかし、実際のディテールではスカーラップや回し溶接、溶接線の交差部などを有し、その疲労強度特性がリブ十字小型試験体のものとは異なる可能性がある。また、ディテールによっては溶接

* 工博 関西大学専任講師 工学部土木工学科 (〒564 大阪府吹田市山手町3-3-35)

** 工博 関西大学教授 工学部土木工学科 (同 上)

*** 関西大学大学院生 博士課程前期課程 (同 上)

**** 日本電子計算機 大阪支店技術営業部 (研究当時：関西大学工学部学生)

施工性に差があり、そのために溶接部の形状や寸法に違いが生じることも予想される。

以上のような背景から、本研究では、4種類の方法で垂直補剛材を取付けたプレートガーダー試験体を用いて実用上重要な長寿命域を中心とした疲労実験を行い、各ディテールの疲労亀裂発生・進展挙動および疲労強度特性について検討した。また、破壊力学の手法を用いた疲労亀裂進展解析により、各ディテールの疲労強度の違いについて定量的な評価を試みた。

2. 疲労実験

(1) 試験体

試験体の形状と寸法を図-1に示す。試験体は、全長3250mm、高さ380mmのI型断面のプレートガーダーで、以下の①～④の方法で4ヶ所に垂直補剛材が取付けられている。

- ① スカーラップを設け引張フランジと溶接する
- ② スカーラップを設け引張フランジと密着させる
- ③ 引張フランジと適当な間隔をあけて取付ける
- ④ スカーラップなしで引張フランジと溶接する

各取付部の詳細を同図中に示す。各ディテールについて疲労亀裂の発生が予想される位置（ディテール②、③のウェブ側の垂直補剛材下端部の回し溶接止端、およびディテール①、④のフランジ側の溶接止端）の応力が等しくなるように垂直補剛材の取付け位置を決定した。

ウェブとフランジの鋼材は板厚がそれぞれ9mmと12mmのSM490A、補剛材は板厚が9mmのSS400である。ウェブとフランジの組立てはソリッドワイヤYS-S6およびフラックスFS-FP1を用いたサブマージアーク溶接、補剛材の取付けはフラックス入りワイヤYFW24を用いたCO₂ガスアーク溶接により行った。各鋼材の機械的性質と化学成分（ミルシート値）を表-1に、溶接条件を表-2に示す。なお、溶接は試験体1体につき1人の溶接工が行った。

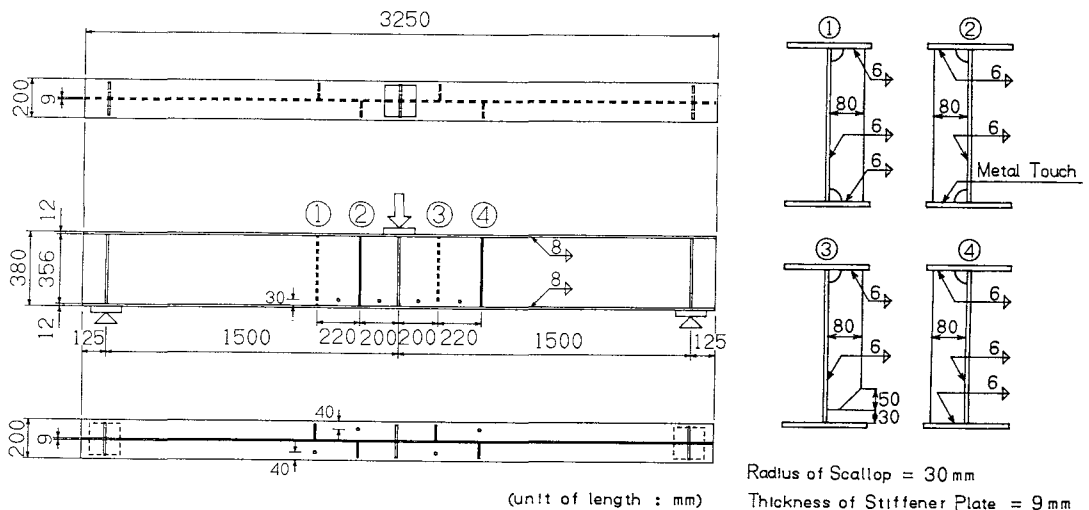


図-1 試験体の形状と寸法（・印はひずみゲージ貼付位置を示す）

表－１ 鋼材の機械的性質と化学成分

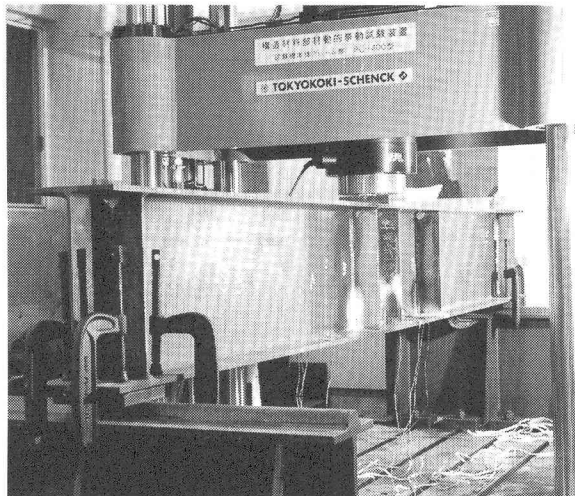
Material	Mechanical Properties			Chemical Composition (%)				
	Y.P. (MPa)	T.S. (MPa)	EL. (%)	C ×100	Si ×100	Mn ×100	P ×1000	S ×1000
SM490A	359	516	28	15	35	140	17	9
SS400	294	437	30	15	14	68	17	4

表－２ 溶接条件

Welding Method	Current (A)	Voltage (V)	Welding Speed (cm/min)	Heat Input (J/cm)
Submerged Arc Welding	650	35	60	22750
CO ₂ Arc Welding	250	28	20～26	16150～21000

(2) 荷重条件

疲労試験は動的能力±400kN の電気油圧式疲労試験機を用いて行った。載荷方法は図－１に示すような３点曲げ載荷とし、死荷重応力を想定してスパン中央（曲げモーメント最大位置）の引張フランジの最大応力がほぼ許容応力度（186MPa）となるように、最小荷重を－294kN に固定した部分片振り圧縮荷重とした。このとき、試験部の最大応力は140MPa、応力比は0.3～0.6程度となる。荷重波形は正弦波、荷重繰返し速度は3～6 Hzで行った。疲労試験状況を図－２に示す。各試験部に生じる応力はひずみゲージ（貼付位置を図－１に示す）により測定し、４ヶ所の試験部の応力がほぼ等しくなるように載荷位置などの調整を行った。なお、疲労試験開始後、亀裂が発生するまでひずみゲージ出力値に変化はほとんどみられなかった。



図－２ 疲労試験状況

(3) 疲労亀裂の観察および損傷部の補強

疲労試験開始後、疲労亀裂発生の有無および進展挙動を調べるために一定の荷重繰返し回数（40万回 or 50万回）ごとに疲労試験機を一旦停止し、各ディテールの亀裂発生が予想される溶接部について、目視および浸透探傷法により観察を行った。本実験では、浸透探傷法により、図－３に示すように溶接止端から発生した表面長さ1mm程度の疲労亀裂から検出することができた。亀裂発見後は、破面にビーチマークを印す目

的で、一定の荷重繰返し回数ごとに荷重範囲を半減させた2段多重荷重を作用させた。半減荷重の繰返し回数は疲労寿命には含めていない。

亀裂が成長しフランジを貫通した場合には、添接板と高力ボルトを用いてその部分を補強した。ウェブに進展した亀裂に対しては、ストップホールと高力ボルトによる締め付けを併用して補強し、疲労試験を続行した（図-4 参照）。

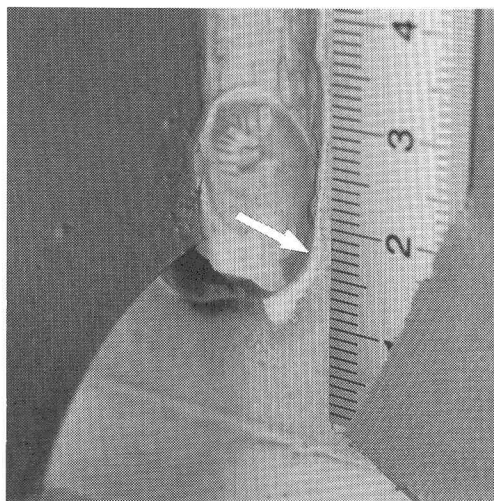


図-3 疲労亀裂の検出（試験体No. 1, ディテール②, N=80万回）

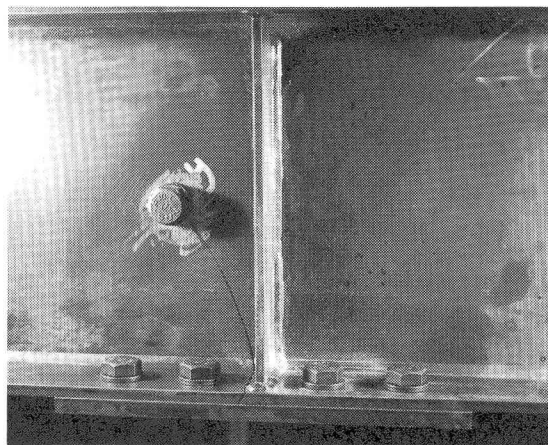


図-4 フランジ破断部の補強（試験体No. 3, ディテール④, N=495万回）

3. 疲労亀裂の発生進展挙動

(1) 疲労亀裂の発生

疲労試験はNo. 1～3の3体の試験体を用いて行った。表-3に各試験体の荷重範囲 ΔP 、ひずみゲージにより求めた試験部の公称曲げ引張応力範囲 S_r 、亀裂発見時の荷重繰返し回数 N_c 、およびフランジ破断時（あるいは試験打ち切り時）の荷重繰返し回数 N_f を示す。亀裂発見時の表面長さは、すみ肉溶接接端から発生した亀裂については1～10mm程度、ブローホールから発生した亀裂については5～20mm程度である。試験体No. 3は応力範囲 $S_r=65\text{MPa}$ で1047万回の繰返し载荷を受けても亀裂が発生しなかったため、応力範囲を約95MPaに上げて再試験を行った。

各試験体の荷重条件と疲労亀裂の発生状況を図-5～7に、疲労破面を図-8～10に示す。図-5～7に破線で示した亀裂は、フランジの補強後に進展したものである。荷重範囲が最も大きい試験体No. 1では①、②、④の3つのディテールで疲労亀裂が生じている。亀裂発生位置は①、②でウェブ側の垂直補剛材下端部の回し溶接接端、④ではウェブとフランジを接合するすみ肉溶接と補剛材取付けのためのすみ肉溶接が交差する位置の溶接接端部である。ディテール①では垂直補剛材下端はすみ肉溶接で引張フランジに接合されているが、その位置からは疲労亀裂は発生していない。それぞれの疲労破面ではビーチマークが認められる。最も内側のビーチマーク（応力繰返し数 160万回時）の大きさを考慮すれば、ほぼ試験開始直後から疲労亀裂が発生し進展していることが推定できる。

試験体No. 2では、ディテール④で試験体No. 1と同様な位置で補剛材の両側2ヶ所（㉔、㉕）に疲労亀裂が生じている。また、ウェブとフランジを接合するすみ肉溶接部でも2ヶ所（BH 1, BH 2）で疲労亀裂が生じ

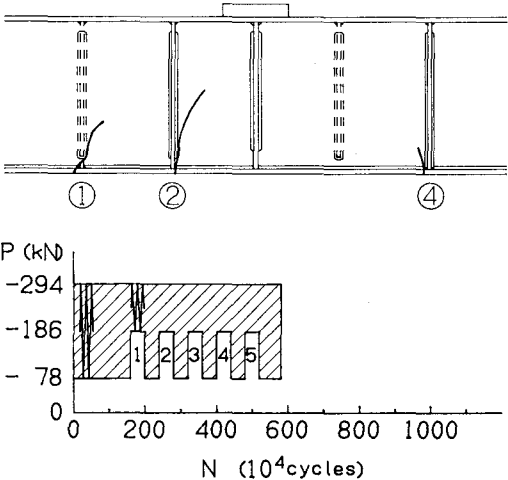
ている。ディテール④の②と⑥では、ビーチマークがほぼ同じように残っており、両方の亀裂が同じような時期に発生し進展していることがわかる。両方の亀裂とも、試験終了時点ではフランジを貫通していない。BH 1 の破面上には最大幅1.6mm、長さ2.1mm、BH 2 の破面上には、最大幅1.7mm、長さ4.1mmのブローホールが認められる。破面上に残されたビーチマーク等からブローホールを起点として疲労亀裂が発生していることがわかる。

試験体No. 3では、再試験の結果、疲労亀裂が②と④の2つのディテールで生じている。亀裂発生位置は試験体No. 1と同様である。ディテール④の疲労破面には5本（ビーチマークNo. 1～5）のビーチマークが、ディテール②の疲労破面には4本（ビーチマークNo. 6～9）のビーチマークが認められる。

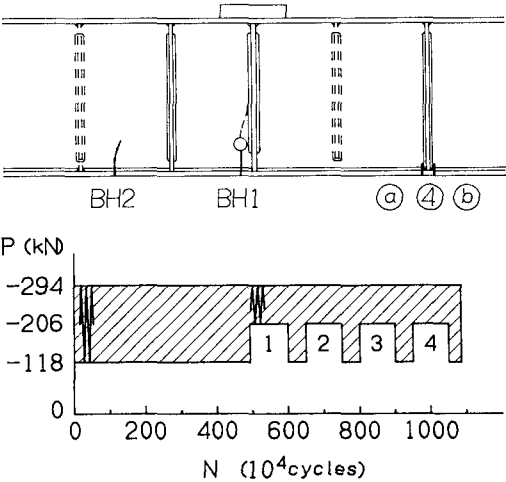
表－3 疲労試験結果

Specimen	ΔP (kN)	Detail	Sr (MPa)	Nc $\times 10^4$ (cycles)	Nf $\times 10^4$ (cycles)
No. 1	216	①	84*	240	335
		②	103	80	294
		③	102	> 381	> 381
		④	98	120	256
No. 2	176	①	82	> 678	> 678
		②	85	> 678	> 678
		③	85	> 678	> 678
		④	85	493	678
		BH 1	118	493	493
		BH 2	94	593	678
No. 3	137	①	65	>1047	>1047
		②	65	>1047	>1047
		③	65	>1047	>1047
		④	65	>1047	>1047
No. 3 (retest)	196	①	93	> 661	> 661
		②	95	495	660
		③	96	> 661	> 661
		④	95	81	329

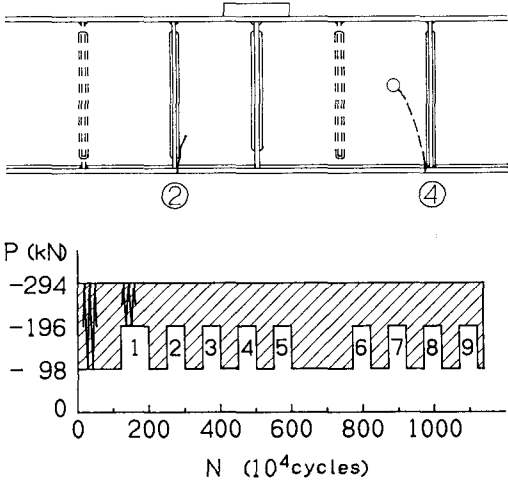
*: Stress range at stiffener end on web plate.



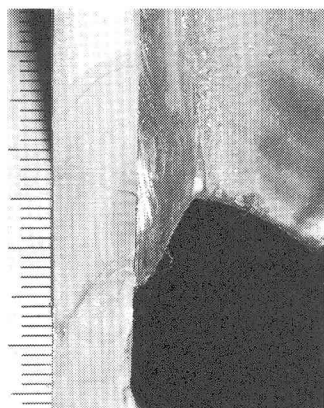
図－5 疲労亀裂発生位置（試験体No. 1）



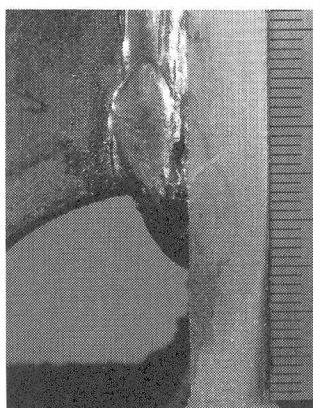
図－6 疲労亀裂発生位置（試験体No. 2）



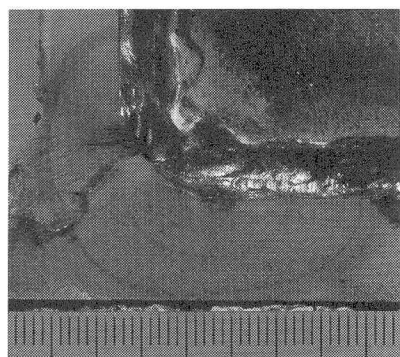
図－7 疲労亀裂発生位置（試験体No. 3）



ディテール①

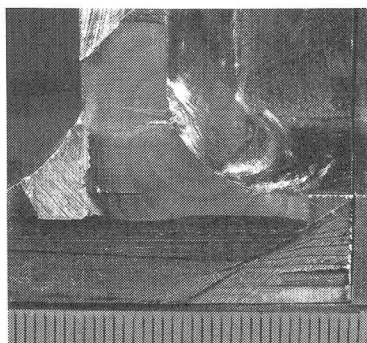


ディテール②

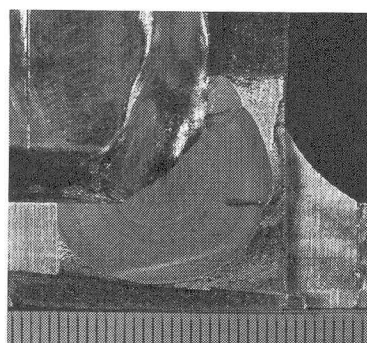


ディテール④

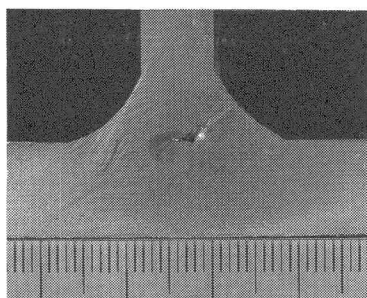
図-8 疲労破面 (試験体No. 1)



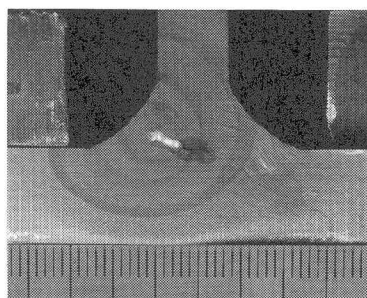
ディテール④-③



ディテール④-⑤

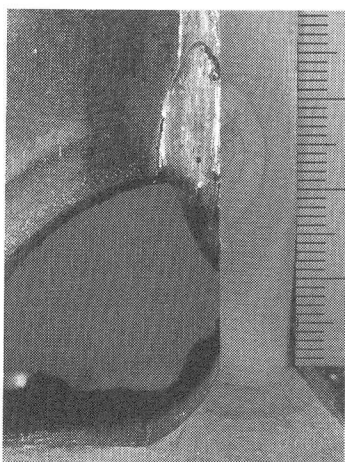


BH 1

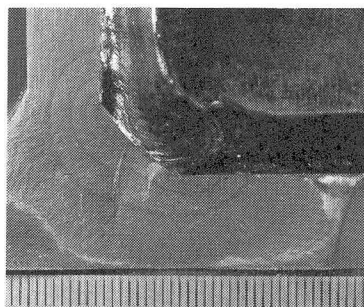


BH 2

図-9 疲労破面 (試験体No. 2)



ディテール②



ディテール④

図-10 疲労破面（試験体No. 3）

(2) 疲労亀裂の進展

溶接止端から発生した疲労亀裂について、図-11に亀裂深さ a (mm)とフランジの破断寿命に対する荷重繰返し回数比 N/N_f の関係を、図-12に亀裂表面長さ $2b$ (mm)と N/N_f の関係を、それぞれ示す。疲労亀裂が深さ 8mm、表面亀裂長さ 20mm 程度に成長するまでにフランジ破断寿命の80%以上が費やされており、板厚（9mm or 12mm）貫通後は急速にフランジ破断に至っている。したがって、プレートガーダーの破断寿命は實際上、疲労亀裂がウェブあるいはフランジの板厚を貫通するまでの寿命とみなすことができる。

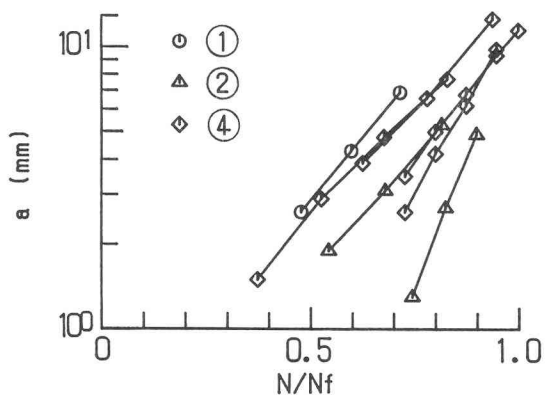


図-11 各試験体の $a \sim N/N_f$ 関係

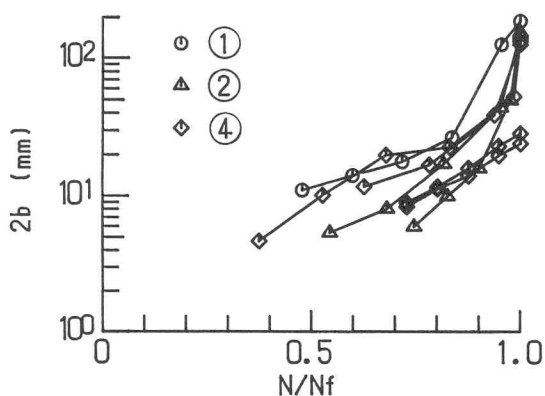


図-12 各試験体の $2b \sim N/N_f$ 関係

4. 疲労強度

各ディテールの亀裂発生位置における公称曲げ引張応力範囲 S_r と亀裂発見時の寿命 N_c およびフランジ破断寿命 N_f との関係を図-13, 14に示す。

疲労亀裂が発生しない応力範囲のうちで最大のものを疲労限と定義し、各ディテールについて疲労限を比較するとディテール③が最も高く100MPa以上、次に①と②が85MPa程度、④が最も低く65MPaである。ディテール①の疲労限はウェブ側の垂直補剛材下端の溶接部に対するものであり、引張フランジ側の溶接部については95MPa以上の疲労限を有している。

図-13, 14には、日本鋼構造協会(JSSC)疲労設計指針(案)³⁾のDおよびE等級の設計曲線も示してある。 N_f を基準とすれば、垂直補剛材取付部のディテールは全て、仕上げなしの前面すみ肉溶接継手に適用されるE等級を十分満たしている。ディテール③に関しては、仕上げた前面すみ肉溶接継手に適用されるD等級以上の強度を示している。また、ブローホールから亀裂が発生したウェブとフランジの間の溶接部についても、縦方向すみ肉溶接継手に適用されるD等級を満たしている。

図-15は各試験体で測定された①～④の各ディテールの亀裂発生位置付近の溶接止端角度 θ と曲率半径 ρ の分布を表したものである。全体的にみて、スカーラップ部の回し溶接が必要なディテール①と②に比べ、スカーラップをもたないディテール③と④の溶接止端形状が緩やか(θ が小さく、 ρ が大きい)となっている。これらのうちで、ディテール①, ②, および③に関しては、溶接止端形状の傾向と疲労強度の大小関係がよく一致している。すなわち、溶接止端形状の緩やかなディテール③の疲労強度が溶接止端形状のきびしいディテール①, ②に比べて高くなっている。しかし、ディテール④の疲労強度に関しては溶接止端形状の傾向と逆の傾向(止端形状が緩やかなのに疲労強度が低い)を示している。ディテール④では、図-16に示すように亀裂発生部がウェブとフランジの間の溶接線の交差部であり、溶接の形状が他のディテールに比べて多少複雑になっている。このような3次元的な溶接部の形状が疲労強度に影響している可能性も考えられる。

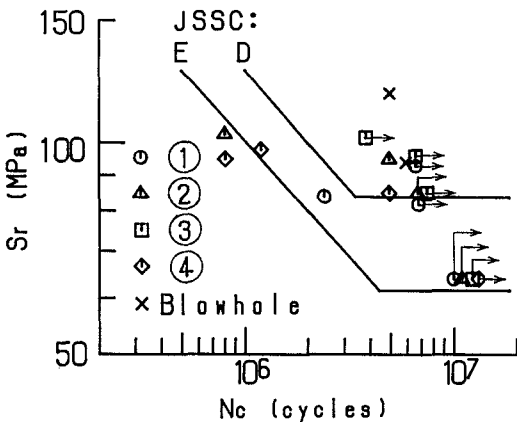


図-13 疲労亀裂発見時の寿命 N_c

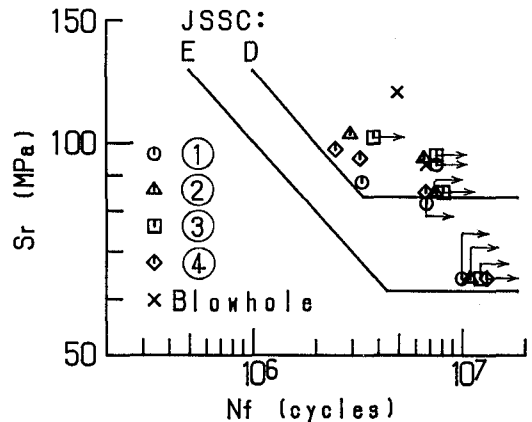


図-14 フランジ破断寿命 N_f

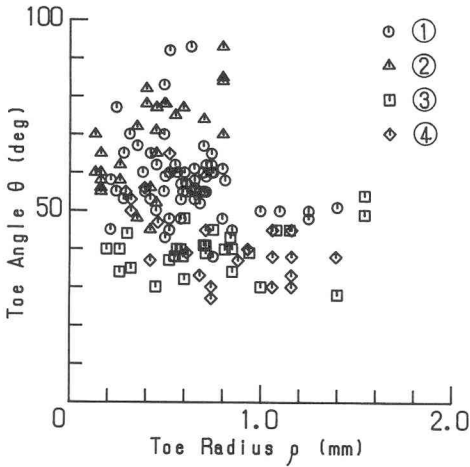


図-15 溶接止端角度 θ と
曲率半径 ρ の分布

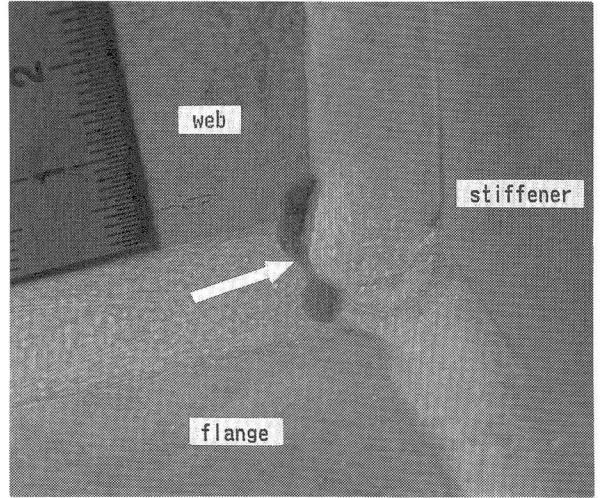


図-16 ディテール④の亀裂発生位置詳細
(試験体No. 3, N=329万回カラーチェック中,
矢印は亀裂発生位置を示す)

5. 疲労寿命予測

前章で述べた、各補剛材取付ディテールの溶接止端形状の違いと疲労強度の関係、および溶接線交差部の形状が疲労強度におよぼす影響を定量的に検討するために、破壊力学の手法を用いた疲労亀裂進展解析を行った。

すみ肉溶接止端部に生じる半楕円形表面亀裂に対する応力拡大係数範囲 ΔK は式(1)で表すことができる^{4, 5)}。

$$\Delta K = F_e \cdot F_s \cdot F_t \cdot F_g \cdot S_r \sqrt{\pi a} \quad (1)$$

ここに、 S_r は公称応力範囲、 a は亀裂深さ、 F_e 、 F_s 、 F_t および F_g はそれぞれ亀裂形状、表面亀裂、有限板幅、および応力分布に対する補正係数である。 F_e 、 F_s は式(2)、(3)の式で与えられる。

$$F_e = 1 / \sqrt{1 + 1.464(a/b)^{1.65}} \quad (2)$$

$$F_s = 1 + 0.12(1 - a/b) \quad (3)$$

ここに、 b は表面亀裂長さの半分である。 F_t は、解析対象の板幅が亀裂に対して十分大きいいため、1と仮定した。亀裂形状比 a/b はリブ十字継手の疲労試験結果⁵⁾を参考に1/2、初期亀裂深さ a_i はすみ肉溶接部の第1段階亀裂深さ^{7, 8)}を参考に0.05mm、限界亀裂深さ a_f は板厚(9mm)に仮定し、疲労亀裂進展速度 da/dN と ΔK の関係はSM490鋼溶接部について求められた式(4)⁹⁾を用いた。

$$da/dN = \begin{cases} 1.0 \times 10^{-11} \cdot \Delta K^3 & (\Delta K > \Delta K_{th}) \\ 0 & (\Delta K \leq \Delta K_{th}) \end{cases} \quad (4)$$

ここに、下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} は $2.5\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 、 da/dN の単位は m/cycle である。

F_g は、継手部の幾何形状や荷重条件が応力分布に及ぼす影響を補正するための係数である。ここでは、各ディテールに対して仮定した溶接部の形状について亀裂のない場合の応力分布をFEMにより計算し、亀裂面に分布荷重が作用する場合との重ね合わせにより F_g を求めた。

まず、図-15に示した溶接止端形状の違いを検討するために、以下の2ケースの止端角度 θ と曲率半径 ρ の組み合わせを仮定した。

ケースⅠ： $\theta = 70^\circ$ ， $\rho = 0.5\text{mm}$

ケースⅡ： $\theta = 35^\circ$ ， $\rho = 0.75\text{mm}$

ケースⅠはスカーラップを有するディテール①と②，ケースⅡはスカーラップをもたないディテール③と④の止端形状を代表している。図-17に、溶接止端形状をケースⅠおよびケースⅡに仮定した2次元FEMによって求めた寿命予測曲線とディテール①，②，③のフランジ破断寿命 N_f を示す。疲労限についてみれば，ケースⅠの予測曲線はディテール①および②と，ケースⅡの曲線はディテール③の実験値とよく一致している。したがって，溶接止端形状を考慮した2次元応力解析により，垂直補剛材取付ディテール①，②，③の疲労強度を十分な精度で予測できることが示された。

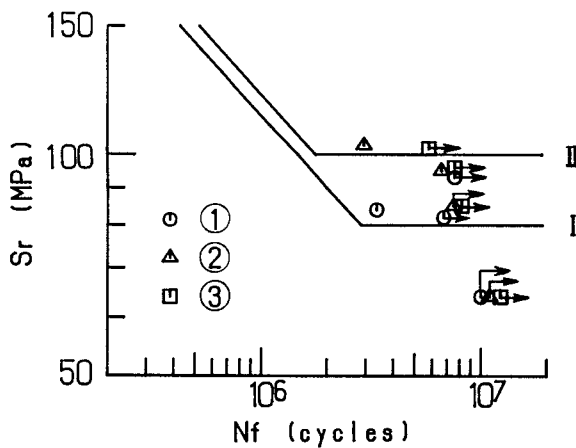


図-17 ディテール①，②，③の寿命予測

ディテール④の疲労強度が低いことに関しては，4章で述べたように溶接止端形状だけでは説明がつかない。図-16に示すとおり，亀裂が生じた溶接線交差位置では溶接部が若干複雑な形状を示しており，応力作用方向（橋軸方向）に止端部が突出した形になっている。ここでは，そのような突出部をもつ溶接部形状の影響を，図-18に示すようなモデルを用いた3次元FEM解析により検討した。突出部の形状は実際の寸法を参考に，半径6mmの半円形を仮定した。図-19に解析モデルの要素分割を示す。図-20に，ディテール④のフランジ破断寿命 N_f とケースⅡの2次元（Ⅱ-2D）および3次元（Ⅱ-3D）の寿命予測曲線を示す。ケースⅡ-3Dの寿命曲線はⅡ-2Dに比べて大きく低下しており，実験値をよく表している。したがって，ディテール④については，溶接線交差部の応力方向に突出した形状の影響を考慮することにより，疲労強度の低下を定量的に説明することができる。

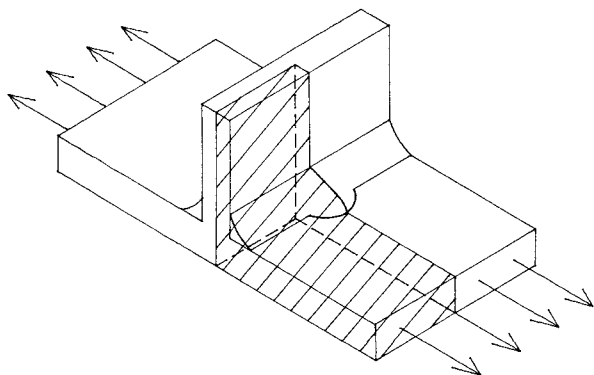


図-18 ディテール④の解析モデル

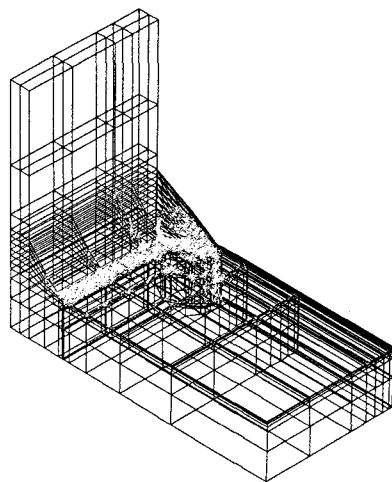


図-19 3次元FEM要素分割

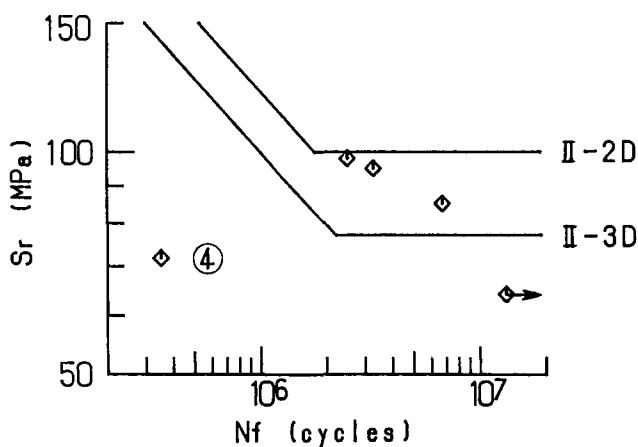


図-20 ディテール④の寿命予測

6. おわりに

4種類の方法で垂直補剛材を取付けたプレートガーダー試験体を用いて疲労実験を行い、各ディテールについて疲労亀裂進展解析による疲労強度評価を試みた。得られた主な結果を以下に示す。

- (1) 疲労亀裂はディテール①、②のウェブ側の垂直補剛材下端部の回し溶接止端、およびディテール④のウェブとフランジを接合するすみ肉溶接と垂直補剛材取付けのためのすみ肉溶接の交差部の溶接止端から発生した。ディテール③では、疲労亀裂は発生しなかった。なお、ディテール①では、引張フランジと垂直補剛材の溶接部からは疲労亀裂は発生していない。また、ウェブとフランジを接合するすみ肉溶接部の2ヶ所でブローホールを起点として疲労亀裂が発生した。
- (2) すみ肉溶接止端部から発生する疲労亀裂に関しては、表面長さ20mm、深さ8mm程度に成長するまでにフランジ破断寿命の80%以上が費やされる。
- (3) 疲労限はディテール③が最も高く100MPa以上、次に①と②が85MPa程度、④が最も低く65MPaである。なお、ディテール①の疲労限はウェブ側の溶接部のものであり、垂直補剛材と引張フランジを溶接するこ

とによる疲労強度の低下はみられない。

- (4) フランジの破断寿命を基準とすれば、垂直補剛材取付部の疲労強度は全てJSSC疲労設計指針案のE等級を十分満たし、ディテール③についてはD等級以上となる。ブローホールを含むウェブとフランジの間の縦方向溶接部についてもD等級を満たしている。
- (5) ディテール①、②、③の疲労強度に関しては2次元的な溶接止端形状の違いにより、また、ディテール④の疲労強度に関しては溶接線交差部の3次元的な形状の影響を考慮した疲労亀裂進展解析により、定量的に評価することができる。

謝辞：本研究を行うにあたり、東京工業大学三木千壽教授には貴重な御助言を頂き、関西大学工学部技術職員兵庫正寿、脇村義弘両氏、および関西大学大学院生宮川欣也君には疲労実験等に御助力を頂いた。また、三井造船㈱には試験体の製作等で御協力頂いた。本研究の一部は平成3年度文部省科学研究費補助金（奨励研究(A) 研究代表者：坂野昌弘 課題番号：03750399）によるものである。各位に対し、深甚なる感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説（Ⅰ共通編・Ⅱ鋼橋編），1990.
- 2) 土木学会：国鉄建造物設計標準解説（鋼鉄道橋編），1983.
- 3) 日本鋼構造協会：疲労設計指針(案)，JSSCレポート，No. 14，1989.
- 4) 山田健太郎・Hirt, M. A.：破壊力学を応用したパラメトリックな疲労寿命解析，土木学会論文報告集，第319号，pp. 55-64，1982.
- 5) 三木千壽・坂野昌弘：疲労亀裂進展解析による疲労設計曲線の検討，構造工学論文集，Vol. 36A，pp. 409-416，1990.
- 6) 田垣徳幸・近藤明雅・山田健太郎・菊池洋一：溶接継手の疲労寿命に与える隅肉溶接止端形状の影響，土木学会論文報告集，第324号，pp. 151-159，1982.
- 7) 坂野昌弘・新井弘・西村俊夫：すみ肉溶接継手の腐食疲労亀裂発生・進展挙動，構造工学論文集，Vol. 36A，pp. 379-388，1990.
- 8) 三木千壽・坂野昌弘・豊田幸宏：隅肉溶接止端からの疲労亀裂の発生と初期進展挙動，構造工学論文集，Vol. 35A，pp. 321-328，1989.
- 9) 金属材料研究所：疲れデータシート，No. 21，1980.

（1991年9月30日受付）