

ガセット継手の疲労強度と疲労亀裂 進展挙動の破壊力学的評価

FATIGUE STRENGTH AND FRACTURE MECHANICAL
EVALUATION FOR GUSSET JOINTS

菊池洋一*・宮川健策**・青木尚夫***・長井憲一****

By Yōichi KIKUCHI, Kensaku MIYAGAWA, Hisao AOKI
and Kenichi NAGAI

1. まえがき

近年の橋梁の調査などによれば、プレートガーダーの中間対傾構のガセット部に疲労亀裂が生じている事例があり、鉄道橋などにも報告例がある¹⁾。これは、年々の交通量の増加^{2)~4)}や設計荷重を超える重量トラック交通などによる過応力の影響も一因と考えられるが⁵⁾、主として、ガセット連結部の偏心構造に大きく起因されたものと考えられる。このガセットの疲労亀裂が進展し分離破断してもただちに橋の崩壊につながるものではないが、たとえ、橋梁の二次的部材であっても疲労破壊の危険性を有することは橋梁全体の安全性の観点より軽視し得ない問題である。

さて、通常、道路橋の設計においては繰返し荷重による疲労の影響は考慮されていない。したがって、二次部材、もしくは分配対傾構として中間対傾構が設計される場合においても、現行の設計法ではガセット連結部の偏心などに、疲労設計上の厳密な配慮がなされていないのが現状である^{6)~8)}。これは、応力度が小さいときはほとんど問題とならないが、床版や主桁などと一体となって抵抗し、中間対傾構に予想以上の分配効果を生じる場合^{9), 10)}や過載荷重が想定⁵⁾される場合などではガセット連結部の偏心は疲労に対して無視し得ないものと考えられる。

しかしながら、ガセット連結部の構造的研究や偏心載荷による部材の耐荷力もしくは疲労についての研究報告として、トラス格点構造に関するもの^{10)~12)}、型鋼の偏心載荷に関するもの^{13), 14)}、船体構造部材に関するもの¹⁵⁾、溶接時に生じる角変形などの偏心に関するものな

どがあるが^{16), 17)}、中間対傾構ガセットの偏心に着目した疲労特性の研究はほとんどみられない。一方、橋梁においては、最近、疲労亀裂の進展挙動を考慮した疲労設計法の考え方が提示されている^{12), 30)}。そこで、このような背景より、本研究は偏心構造を有するガセット連結部の疲労亀裂進展挙動に着目し、その進展則の破壊力学的評価を試みようとするものである。このため、まず、実物大ガセット継手供試体を用いて、疲労強度に及ぼす偏心の影響を把握するとともに、亀裂進展則を究明する際の亀裂モデルを検討すべく予備実験を行った。この結果、現状の中間対傾構の標準的ガセット連結部の構造は、面内、面外の偏心を有するため、三次元的応力場ならびに三次元的広がりをもつ表面亀裂の進展問題となる。この表面亀裂の進展挙動に関する研究^{18), 19)}も最近、数例報告されているようであるが、亀裂前線に沿った応力拡大係数の変化ならびに亀裂前線上各点での進展速度の相異など、破壊力学的解析として困難な問題の一つとされている²⁰⁾。

そこで、ガセット継手の疲労亀裂進展則を究明するにあたり、第1段階として二次元的な面内偏心問題としてとらえ、板厚方向貫通亀裂の進展挙動を線形破壊力学パラメーターの応力拡大係数 K で評価することとした。

この応力拡大係数の解析方法として、種々の方法が提示されているが^{20), 21)}、本研究における面内偏心問題の K_1 , K_{II} の解析には山田らが新しく提案した方法で²²⁾、手法の容易さにもかかわらず、応力拡大係数に対しきわめて精度の高いとされている特異有限要素法を用いた。

すなわち、本研究は偏心を有するガセット連結部の疲労亀裂進展挙動を面内偏心問題としてとらえ、特異有限要素法により解析した K_1 、もしくは K_{II} と亀裂進展速度との関係、さらには、近年、注目されだしているフラクトグラフィによる事故解析において^{23), 30)}、有効なストライエーション間隔と巨視的亀裂進展速度との対応づけなどにより疲労亀裂進展則を究明したものである。

* 正会員 工博 名古屋大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 トピー工業(株) 設計部主査

*** トピー工業(株) 技術研究所副主査

**** トピー工業(株) 技術研究所

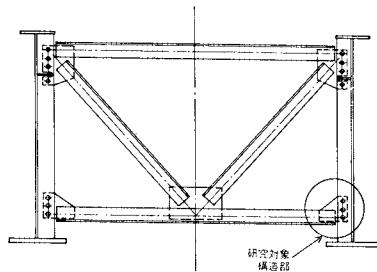


図-1 中間対傾構

なお、中間対傾構のガセット連結部には、実際の全体構造を考えると、ガセット部には曲げ応力が作用することも想定されるが、本研究においては、ガセットの剛度も小さく、ピン結合と仮定し、曲げ応力の影響がないものとして、荷重形式は一応、片振引張荷重とした。

2. ガセット継手の疲労強度に関する予備実験

本研究の対象構造は図-1に示すような中間対傾構の主桁への取付部であり、このガセット連結部は通常、一面摩擦継手が採用されることが多く面外もしくは面内の偏心継手構造となる。したがって、実際の橋梁のガセット部に発見された亀裂の多くはこのようなガセット連結部の偏心構造に大きく起因する疲労亀裂と考えられる。そこで、ガセット継手の静的ひずみ分布挙動ならびに疲労強度に及ぼす偏心の影響を解明するために静的載荷試験ならびに片振引張疲労試験を行うこととした。さらに、疲労亀裂の進展挙動の破面観察などより、ガセット連結部の疲労亀裂進展則の破壊力学的評価を試みる際の解析モデルを考えることとした。

(1) 供試体の形状寸法

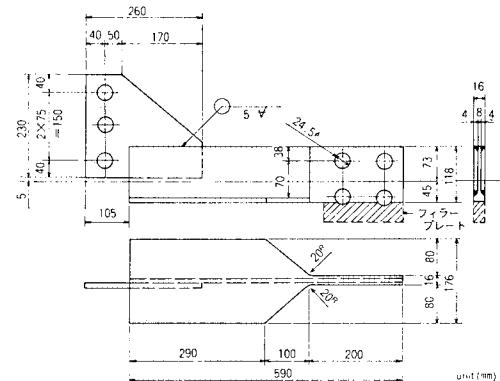
予備実験に用いた供試体の形状寸法は図-2に示す2通りである。TYPE-1は二次部材として、中間対傾構を設計する場合、建設省標準図集「活荷重合成プレートガーダー橋」などにみられる一般的な構造でもあり、広く普及していることから標準型と称することにする。TYPE-2は面内外無偏心を配慮して試作した無偏心型である。

なお、これらの2つの供試体のガセット部の最小断面積を等しくし、材質としては、表-1に示すような機械的性質ならびに化学成分を有するSS41を用いた。

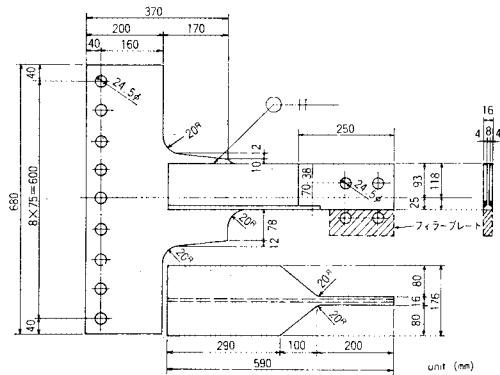
表-1 供試体の機械的性質と化学成分

材質	板厚 mm	化 学 成 分 (%)					機 械 的 性 質		
		C	Si	Mn	P	S	降伏点 kg/mm ² (MPa)	引張強さ kg/mm ² (MPa)	伸び %
SS41	9	0.14	0.20	0.71	0.018	0.007	32.0 (313.7)	46.0 (451.0)	30

(ミルシートによる)



(a) 標準タイプ供試体 (TYPE-1)



(b) 無偏心タイプ供試体 (TYPE-2)

図-2 実物供試体の形状寸法

(2) 実験方法

a) 静的載荷試験

上述の供試体を高力ボルトを用いて、図-3に示すように疲労試験機にセットし、静的引張載荷を行った。なお、静的ひずみ分布ならびに挙動を供試体の最小断面部の表裏に連続的に貼布したひずみゲージにより測定した。

b) 疲労試験

静的載荷試験においてTYPE-1の標準型供試体の最大出力ゲージのひずみがほぼ1500μストレインに達したときの荷重を最大繰返し荷重とする片振引張疲労試験を行った。ここで、1500μストレインのひずみはSS41の降伏応力よりやや小さい応力が生じていることになる。疲労試験機は油圧サーボタイプの島津サーボバルサ EHF 20(動的±20t)を用い、繰返し速度は10Hzとした。

(3) 実験結果

a) 静的ひずみ挙動

TYPE-1ならびにTYPE-2の静的ひずみ挙動を

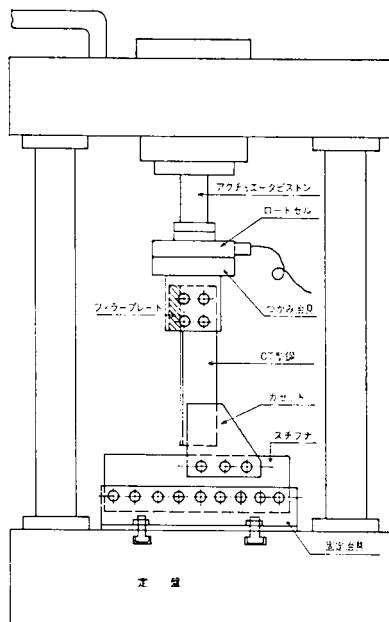
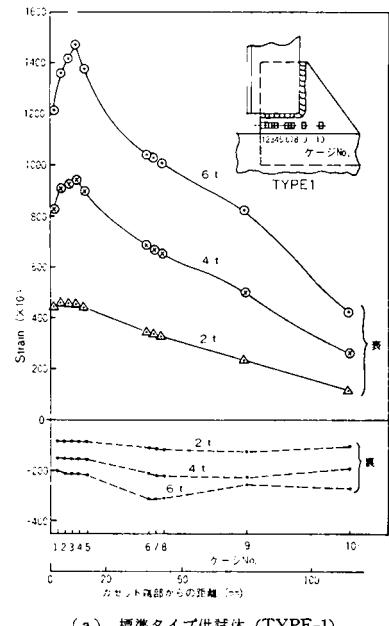
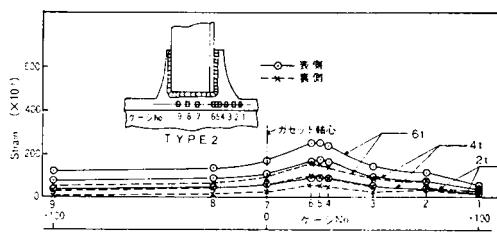


図-3 供試体の載荷方法



(a) 標準タイプ供試体 (TYPE-1)



(b) 無偏心タイプ供試体 (TYPE-2)

図-4 静的載荷試験におけるひずみ挙動

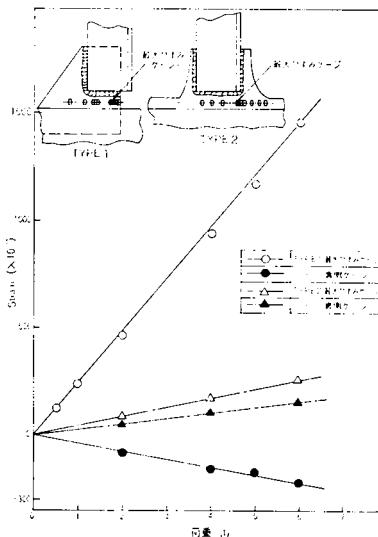


図-5 最大ひずみ部の TYPE-1, TYPE-2 の比較

表-2 予備実験の疲労試験結果

供試体	最大荷重	最小荷重	平均荷重	繰返し速度	継返し数	結果
	P _{max}	P _{min}	P _{mean}	Hz		
TYPE-1 (標準型)	6t	0.2t	2.9t	10	4.35×10 ⁵	ビード止端部より疲労亀裂発生後破断
TYPE-2 (無偏心型)	6t	0.2t	2.9t	10	3.30×10 ⁶	疲労亀裂は発生せず

(注) TYPE-1 の破断位置は図-6 参照。

図-4 (a), (b) に示すが、TYPE-1 の供試体は面内外の偏心によるひずみ集中挙動が顕著に認められる。この 2 体の供試体に貼布したひずみゲージにおいて最も大きなひずみを呈したものとの比較したのが図-5 であるが、TYPE-1 は TYPE-2 に比べ 5~6 倍の偏心によるひずみ集中が生じていることになる。

b) 疲労試験結果

静的載荷試験の結果より、P_{max} を 6t とした片振疲労試験を行い、その試験結果を表-2 に示す。なお、P_{max} を 6t としたときの最小断面積部の公称応力は 2.9 kg/mm² (28.4 MPa) である。標準的ガセット構造である TYPE-1 は 43.5 万回で破断したのに対し、無偏心型の TYPE-2 は 330 万回以上の繰返し回数においても疲労亀裂はみられなかった。このことからも、ガセット総手に荷重分配が生じる場合など、疲労に対する偏心の影響は無視し得ないものと考えられる。

c) 疲労破面様相

図-6 に TYPE-1 の疲労破面の様相を示すが、図中の矢印は走査型電顕 (5000 倍) による破面観察により推定した疲労亀裂の進展方向を示すものである。この図より、疲労亀裂は隅肉溶接部の止端に沿って分布亀裂として発生し、繰返しの初期に板厚方向に進展し、合体後

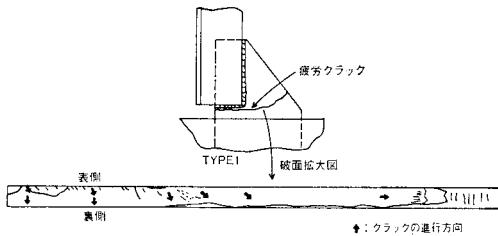


図-6 TYPE-1 の疲労破面様相

に荷重直角方向に進展していることが明瞭に認められる。

また、疲労亀裂が隅肉ビード部を通過すると面内偏心などによると考えられる亀裂の屈折現象がみられた。これらの疲労亀裂の様相より、TYPE-1 のような偏心構造を有するガセット継手の疲労亀裂進展則を究明する場合、面内外偏心による三次元的応力場ならびに三次元的広がりをもつ亀裂の進展問題を論じなければならず、近年、この種の問題に対する研究もなされているが、十分に実用的段階に達しているとはいえない^{20), 24)}。

そこで、このような面内外の偏心構造を有するガセット継手の疲労亀裂進展問題を究明するにあたり、第1段階として、亀裂のモデル化と亀裂進展の破壊力学的評価が比較的容易と考えられる面内偏心問題としてとらえることとし、次章以降で面内偏心構造ガセット継手の疲労亀裂進展に関する破壊力学的評価を行った。

3. 面内偏心構造ガセット継手の疲労亀裂進展速度の測定

面内、面外の偏心構造を有するガセット継手の疲労亀裂進展則を究明するにあたり、まず、第1段階として、 K_I , K_{II} の混合モード下における面内偏心問題としてとらえ、疲労亀裂進展挙動の破壊力学的評価を試みることとした。

(1) 供試体ならびに人工切欠

ガセット連結部の面内偏心問題としての疲労亀裂進展挙動を究明するため、実際の標準的ガセット連結部の面内偏心量にはほぼ等しく、かつ、面外偏心の生じない図-7に示すような供試体を2体製作した。供試体の材質は実際の標準的ガセットと同じSS 41である。人工切欠は面内偏心によるひずみ集中が最も大きいと考えられるガセット端部に、切欠先端半径0.3 mmの板厚方向に貫通した機械切欠を設けた。

(2) 疲労予亀裂の導入と自動検出

面内偏心構造ガセット供試体の疲労亀裂進展速度を追跡するに際し、(1)の前節で述べた人工的機械切欠か

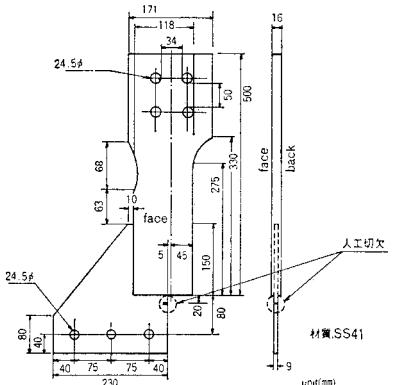


図-7 面内偏心供試体形状

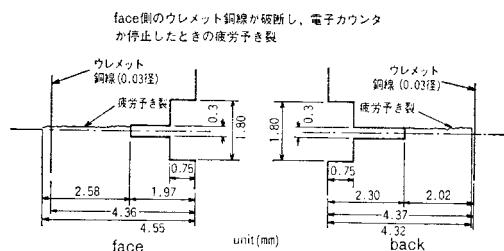


図-8 人工切欠部のウレメット銅線方式による疲労予亀裂の検出

ら、さらに所定の位置まで疲労亀裂を進展させ、疲労予亀裂を導入することは人工切欠の影響をなくし、信頼性のある亀裂進展挙動を把握するためにも必要であり、また、この位置は自動検出されることが望ましい。本研究では、図-8に示すように人工切欠からさらにはぼ2 mmの位置に0.03 mm径のウレメット銅線を供試体表面に貼布し、疲労予亀裂位置の自動検出を試みた。この方法は、二瓶・今野・佐々木ら²⁵⁾が N_c (亀裂発生寿命)の自動検出用に開発したものであり、亀裂進展に伴う銅線の破断を電気回路的に検出し電子カウンタを自動停止させるものである。図-8をみるとウレメット銅線の貼布された位置ではぼ疲労予亀裂が停止しており、この方式は疲労予亀裂の導入に際し、信頼性の高い自動検出法といえる。なお、この疲労予亀裂導入時の荷重振幅は亀裂進展測定時のそれを超えないよう十分に配慮した。

(3) 亀裂進展速度の測定

疲労試験に先立ち、静的引張載荷を行いガセット端面よりほぼ4 mmの位置にある疲労予亀裂の先端近傍に貼布したひずみゲージの挙動より荷重振幅を設定した。すなわち、2体の供試体について、上限荷重 P_{max} をそれぞれ10 t, 6 tとし、下限荷重 P_{min} をほぼ0 tとする片振引張荷重制御とした。

なお、今回の面内偏心構造の設定条件に極力合致させるため載荷治具ならびに載荷方法などを十分配慮し、供試体の数か所の表裏に貼布したひずみゲージにより面外偏心のないことを静的載荷試験時に確認した。

疲労亀裂進展挙動の測定は疲労予亀裂から荷重直角方向の進展距離を所定の繰返し回数ごとに、供試体の表裏について引張荷重の直角方向の軸に射影した亀裂長さを測定した。亀裂長さの測定には 0.01 mm の精度を有する読み取り顕微鏡を用いた。

疲労試験は進展速度がほぼ 10^{-3} mm/cycle になったとき停止した。

疲労試験機は油圧サーボタイプの島津サーボバルサ EHF 20 (動的 ± 20 t) を用い、繰返し速度は 600 cpm (10 Hz) とした。

4. 亀裂進展則の破壊力学的解析

(1) 亀裂進展挙動ならびに巨視的亀裂進展速度の決定

$P_{\max} 10$ t, 6 t の供試体の疲労亀裂進展挙動を図-9, 10 に示し、疲労亀裂の進展状況を $P_{\max} 10$ t の供試体について写真-1 に示す。

本試験の面内偏心構造ガセット供試体の疲労亀裂進展の測定により得られたデータは繰返し回数の増分 ΔN

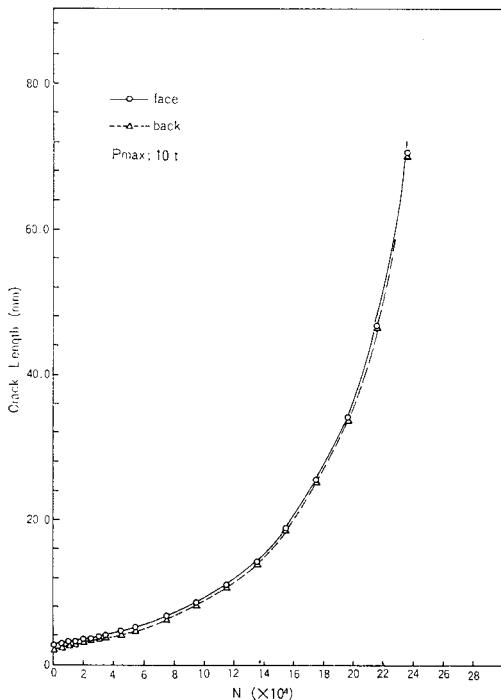


図-9 a - N 曲線 ($P_{\max}=10$ t)

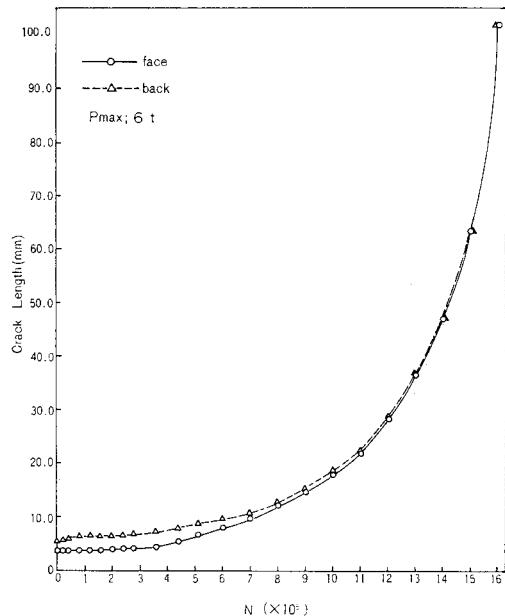


図-10 a - N 曲線 ($P_{\max}=6$ t)

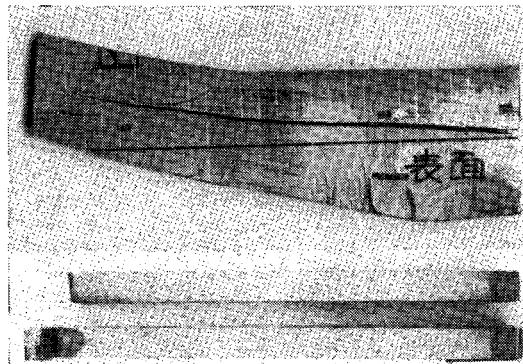


写真-1 $P_{\max} 10$ t の疲労亀裂進展状況

と、そのときの亀裂長さの増分 Δa である。これらのデータより、ASTM E 647に準じて巨視的亀裂進展速度、 da/dN を次の 2 方法により算出した²⁶⁾。

(a) Secant 法 :

$$(da/dN)_a = \frac{a_{i+1} - a_i}{N_{i+1} - N_i} \quad \dots \dots \dots (1)$$

(b) Incremental Polynominal 法 :

(a, N) の 7 つのデータを次の 2 式であてはめるものである。

$$\hat{a}_i = b_0 + b_1 \{(N_i - C_1)/C_2\} + b_2 \{(N_i - C_1)/C_2\}^2 \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $-1 \leq \{(N_i - C_1)/C_2\} < +1$

$$C_1 = (N_{i-3} + N_{i+3})/2, C_2 = (N_{i+3} - N_i)/2$$

$$(da/dN)_{\hat{a}} = b_1/C_2 + 2b_2(N_i - C_1)/C_2^2 \dots \dots \dots (3)$$

測定した疲労亀裂の表裏の平均値を亀裂長さ a (mm) とし上記 2 方法にて解析した巨視的亀裂進展速度を表一

表-3 ASTM-E 647 による da/dN (a) $P_{max}=10\text{ t}$ (表裏の平均亀裂長さ = a)

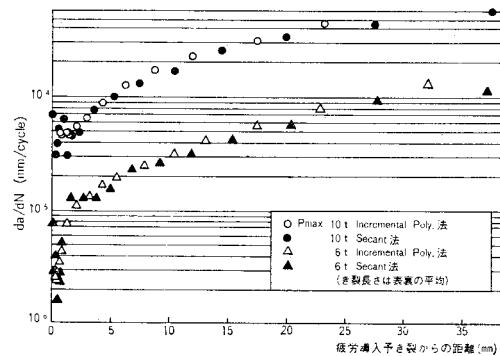
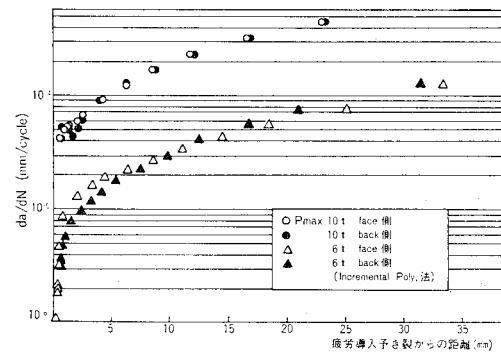
繰返し数 $N(\text{cycles})$	ガセット端から の亀裂長さ $a(\text{mm})$	Secant 法 da/dN (mm/cycle)	Incremental Polyno. 法 da/dN (mm/cycle)
1	0	4.43×10^{-4}	—
2	5 000	4.77×10^{-4}	—
3	10 000	4.92×10^{-4}	—
4	15 000	5.11×10^{-4}	0.474×10^{-4}
5	20 000	5.36×10^{-4}	0.461×10^{-4}
6	25 000	5.62×10^{-4}	0.476×10^{-4}
7	30 000	5.93×10^{-4}	0.481×10^{-4}
8	35 000	6.06×10^{-4}	0.454×10^{-4}
9	45 000	6.52×10^{-4}	0.523×10^{-4}
10	55 000	7.01×10^{-4}	0.627×10^{-4}
11	75 000	8.64×10^{-4}	0.893×10^{-4}
12	95 000	10.62×10^{-4}	0.122×10^{-3}
13	115 000	13.17×10^{-4}	0.166×10^{-3}
14	135 000	16.43×10^{-4}	0.223×10^{-3}
15	155 000	21.23×10^{-4}	0.309×10^{-3}
16	175 000	27.66×10^{-4}	0.463×10^{-3}
17	195 000	36.21×10^{-4}	—
18	215 000	49.14×10^{-4}	—
19	235 000	72.80×10^{-4}	—

(b) $P_{max}=6\text{ t}$ (表裏の平均亀裂長さ = a)

繰返し数 $N(\text{cycles})$	ガセット端から の亀裂長さ $a(\text{mm})$	Secant 法 da/dN (mm/cycle)	Incremental Polyno. 法 da/dN (mm/cycle)
1	0	4.54×10^{-5}	—
2	20 000	-0.20×10^{-5}	—
3	40 000	4.65×10^{-5}	—
4	80 000	4.76×10^{-5}	0.257×10^{-5}
5	120 000	4.86×10^{-5}	0.242×10^{-5}
6	160 000	5.02×10^{-5}	0.262×10^{-5}
7	200 000	5.08×10^{-5}	0.292×10^{-5}
8	240 000	5.17×10^{-5}	0.363×10^{-5}
9	280 000	5.28×10^{-5}	0.458×10^{-5}
10	360 000	5.68×10^{-5}	0.799×10^{-5}
11	440 000	6.68×10^{-5}	0.106×10^{-4}
12	520 000	7.73×10^{-5}	0.132×10^{-4}
13	600 000	8.73×10^{-5}	0.153×10^{-4}
14	700 000	10.27×10^{-5}	0.192×10^{-4}
15	800 000	12.45×10^{-5}	0.239×10^{-4}
16	900 000	14.99×10^{-5}	0.307×10^{-4}
17	1 000 000	18.04×10^{-5}	0.417×10^{-4}
18	1 100 000	22.10×10^{-5}	0.562×10^{-4}
19	1 200 000	27.60×10^{-5}	0.782×10^{-4}
20	1 300 000	36.72×10^{-5}	0.111×10^{-3}
21	1 400 000	47.24×10^{-5}	—
22	1 500 000	63.62×10^{-5}	—
23	1 600 000	102.06×10^{-5}	—

3 ならびに 図-11 に示すが、亀裂進展初期において Secant 法は Incremental Polynominal 法に比べばらつきが大きい。一般に、巨視的進展速度を求める場合、得られた $a-N$ 曲線をスムーズィングした方がばらつきが小さいとされており²⁰⁾、以後の解析には Incremental Polynominal 法の算出値を用いるものとした。

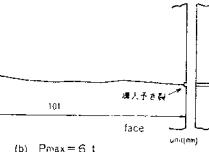
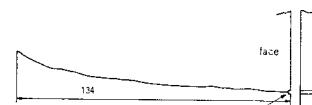
また、図-12 は表裏疲労亀裂の da/dN を示したものであるが、表裏の差違はほとんどなく、面外偏心の小さいことを示唆している。

図-11 ASTM E 647 による da/dN 図-12 供試体表裏面の da/dN の差

(2) 特異有限要素法による応力拡大係数の解析

a) 疲労亀裂のモデル化

面内偏心構造の亀裂先端の応力拡大係数は K_I , K_{II} の混合モードとなり、いわゆる亀裂の屈折現象がみられるといわれているが^{20), 27), 28)}、本研究に用いた供試体についても写真—



1 ならびに 図-13 に示すように上記屈折現象が認められる。

しかしながら、本研究においては荷重直角方向に射影した亀裂進展速度が 10^{-3} mm/cycle のオーダーになったとき、亀裂進展長さの測定を停止し、この間の疲労亀裂進展則を応力拡大係数で評価することを試みたため、ガセット端から約 60 mm まで（表-3 参照）の疲労亀裂のモデル化を検討することとした。そこで、このガセット端から 60 mm の位置までに進展した疲労亀裂の形状がほぼ斜め直線状であるため、傾斜角 3.5° (0.06 rad .)

表-4 特異有限要素法による K 値解析の 7 ケース

Case	疲労亀裂の設定条件
Case 1	ガセット端より 4 mm までの直角方向の疲労亀裂
Case 2	ガセット端より 6 mm までの傾斜亀裂で、4 mm より 3.5° の傾斜亀裂
Case 3	ガセット端より 8 mm までの傾斜亀裂で、4 mm より 3.5° の傾斜亀裂
Case 4	ガセット端より 10 mm までの傾斜亀裂で、4 mm より 3.5° の傾斜亀裂
Case 5	ガセット端より 20 mm までの傾斜亀裂で、4 mm より 3.5° の傾斜亀裂
Case 6	ガセット端より 40 mm までの傾斜亀裂で、4 mm より 3.5° の傾斜亀裂
Case 7	ガセット端より 60 mm までの傾斜亀裂で、4 mm より 3.5° の傾斜亀裂

(注) $3.5^\circ = 0.06 \text{ rad}$

の直線斜め亀裂にモデル化し、亀裂進展過程中、表-4 に示す 7 ケースについて応力拡大係数を解析することとした。

b) 3 節点特異要素法による応力拡大係数の解析

有限要素法により、破壊力学の解析を行う場合亀裂先端における応力の特異性をどのように取り扱うかが問題となる。本研究で山田ら²²⁾が新しく提案した特異要素法において 3 節点特異要素を用いて解析することとした。

すなわち、図-14 に示す 4 節点アイソパラメトリック要素において、節点 1 と 4 が同一の座標値を有するように退化させ、正規化座標系 (ξ, η) における変位場の表現には通常のものを用い、全体座

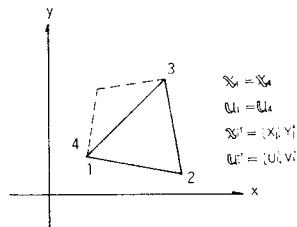


図-14 四辺形要素の三角形要素への退化

標系 (x, y) での変位場が特異項 ρ^λ (ρ : 全体座標系における無次元化半径座標) を有するような写像を提案している。この写像式をベクトル的に次式で示す。

$$\begin{aligned} x - x_1 &= \left[\frac{1-\eta}{2} (x_2 - x_1) + \frac{1+\eta}{2} (x_3 - x_1) \right] \\ &\cdot \left(\frac{1+\xi}{2} \right)^{1/\lambda} \end{aligned} \quad (4)$$

上式などから導かれた変位勾配は、 $u_1 = u_4$ の場合、 $\rho^{1-\lambda}$ の特異性のみが現われることになり、有限要素法のプログラムでは $\lambda = 0.5$ として入力した。

以上の 3 節点特異要素を用いた有限要素法により、亀裂先端の節点 i, j の変位を求め、応力拡大係数 K_I, K_{II} を次式により算出した（図-15 参照）。

$$\begin{Bmatrix} K_I \\ K_{II} \end{Bmatrix} = \frac{2G}{k+1} \sqrt{\frac{2\pi}{r_0}} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} V_i \\ V_j \\ U_i \\ U_j \end{Bmatrix} \quad (5)$$

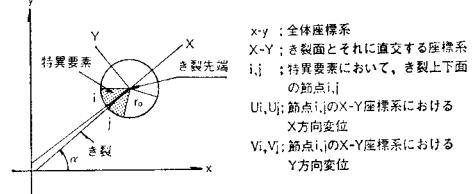
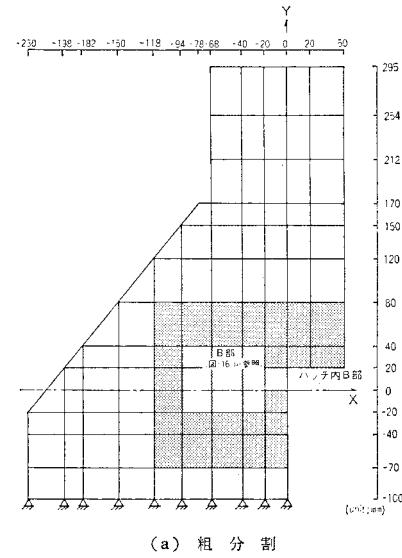
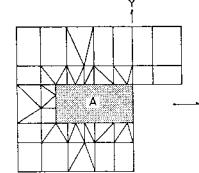


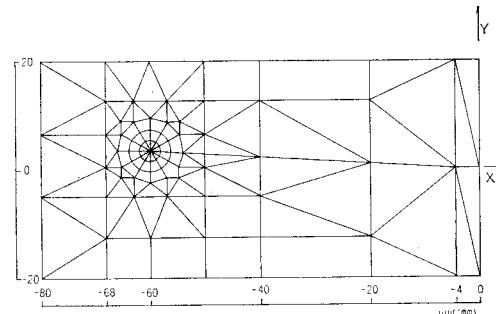
図-15 亀裂先端の特異要素と座標系



(a) 粗分割



(b) 中分割 (B部詳細)



(c) 細分割 (A部詳細)

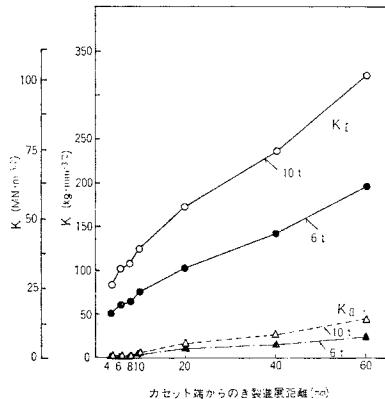
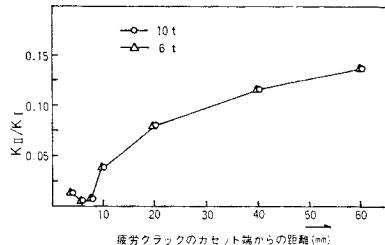
図-16 メッシュ分割の一例 (ケース 7)

表-4 の 7 つのモデル亀裂のうち、一例としてケース 7 のメッシュ分割を図-16 (a)～(c) に示すが薄墨部は 3 節点特異要素である。このようにして解析した応力拡大係数を表-5 ならびに図-17 に示すが、疲労クラッ

表-5 K 値解析結果

	P_{\max} (t)	K_I (kg·mm ^{-3/2})	K_{II} (kg·mm ^{-3/2})
Case 1	10.0	83.73	1.39
	6.0	51.40	0.83
Case 2	10.0	103.82	0.41
	6.0	62.28	0.24
Case 3	10.0	107.91	0.67
	6.0	64.70	0.42
Case 4	10.0	128.01	5.04
	6.0	76.84	3.02
Case 5	10.0	168.27	13.59
	6.0	100.98	8.35
Case 6	10.0	232.99	26.03
	6.0	139.78	15.67
Case 7	10.0	320.02	43.83
	6.0	192.12	26.29

1 kgf/mm^{3/2}=0.310 1 MN/m^{3/2}

図-17 特異有限要素により解析した K_I , K_{II} の変化図-18 疲労亀裂進展に伴う K_{II}/K_I の変化

クの進展に伴い K_I , K_{II} が増加しており, K -increasing タイプとなっている。

一方, K_I の単一モード下では疲労亀裂は前方へ直線的に進展するが, 混合モード下では亀裂の屈折現象がみられ, K_{II}/K_I と屈折角との関係²⁸⁾, また, ジグザグ状疲労亀裂の進展経路²⁴⁾についても議論されている。今回の面内偏心タイプのガセットについても疲労亀裂は最終的には大きく屈折してくるのが認められる(写真-1 参照)。

しかしながら, 疲労亀裂の小さい繰返しの初期の段階では屈折角はほとんど小さいといえる。これは, ガセット端より 60 mm までの 3.5° (0.06 rad) のモデル化した直線斜め亀裂に対して解析した 7 ケースの K_{II}/K_I の増加(図-18)度合がガセット端より 60 mm の位置までは漸増してはいるがほとんど小さいためと考える。

(3) 疲労亀裂進展則

本研究における着眼点の 1 つは, 面内偏心構造ガセット締手のような K_I , K_{II} の混合モード下の疲労亀裂進展挙動をいわゆる, Paris 則などで簡便に評価し得ないかという点である。この混合モード下における亀裂進展則の一般法則は現在, 確立されていないが, 荷重軸に垂直な方向への射影速度が ΔK_I の関数とし整理し得るという報告もあり^{20), 27)}, 今回, K_{II} を配慮せず K_I のみの関数とし次式で整理してみることとした。

$$da/dN = C(K_{I \max})^m \quad \dots \dots \dots (6)$$

式(6)において, da/dN は 4. (1) で述べた Incremental Polynominal 法で解析した荷重直角方向の軸に射影した亀裂長さに対する巨視的亀裂進展速度であり, $K_{I \max}$ は 3 節点特異要素を用いて解析したものである。この関係を両対数表示で, P_{\max} 10 t, 6 t の 2 体の供試体についてプロットしたのが図-19 であるが, いずれも第 II 領域において 1 つの直線で表わされるようである。また, 式(6)における係数 C , m 値を第 II 領域において, 最小 2 乗法で求めると式(6)は次式となる。

$$da/dN = 0.223 \times 10^{-10} (K_{I \max})^{3.156} \quad \dots \dots \dots (7)$$

この C , m 値は K_I のみの単一モード下における同鋼種値に比べ²⁹⁾, C がやや大きく, m が小さいものとなった。なお, 式(7)における $K_{I \max}$ は本研究の片振引張荷重制御の条件では ΔK_I と同じものである。

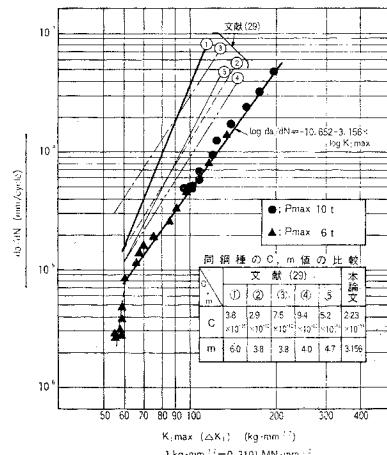
図-19 da/dN と $K_{I \max}$ の関係



写真-2 $P_{\max} 10 \text{ t}$, 亀裂進展距離 54.0 mm におけるミクロ破面 ($\times 3500$)

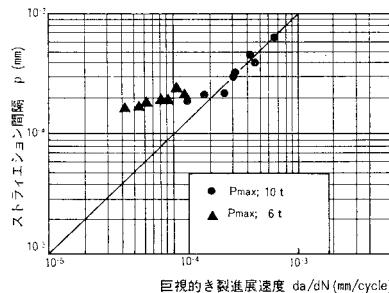


図-20 da/dN と p との対応

(4) da/dN とストライエーション間隔 (p) との対応

疲労亀裂の進展を測定した2体の供試体の破面について、走査型電顕によりストライエーション間隔 (p) を測定し、巨視的亀裂進展速度 da/dN との対応を行った(写真-2 参照)。

この両者の対応を図-20に示すが、亀裂進展速度が 10^{-4} mm/cycle 以上ではかなりよく一致しているようである。

5. 結 言

プレートガーダーの中間対傾構のガセット連結部の偏心構造について、疲労強度の観点より着眼し、予備実験により偏心の影響を明らかにした。さらに、疲労亀裂進展則を充明するにあたり、第1段階として面内偏心問題としてとらえ、その進展則に破壊力学的評価を加えた結果、以下の点が明らかになった。

(1) 現状の中間対傾構の標準的構造である標準型供試体ならびに面内外無偏心を配慮した無偏心型供試体による静的ひずみ挙動において、標準型は無偏心型に比べ5~6倍の大きなひずみ集中を生じ、疲労強度の差も顕著である。

(2) 予備実験における標準的ガセット供試体の疲労破面様相より、面内外偏心による三次元的応力場における疲労亀裂は三次元的広がりをもつ表面亀裂となる。

(3) $P_{\max} 10 \text{ t}, 6 \text{ t}$ の面内偏心供試体の片振引張荷重制御試験において、荷重直角方向に射影した巨視的亀裂進展速度と3節点特異有限要素法で解析したモードIの応力拡大係数 (K_I) との間には次式が成り立つ。

$$da/dN = 0.223 \times 10^{-10} (K_{I\max})^{3.156}$$

上式における係数は K_I のみの単一モード下における同鋼種の値に比べ、 C がやや大きく、 m が小さいものとなっている。

(4) 3節点特異要素を用いた有限要素法により解析した K_I 、 K_{II} は亀裂進展に伴い増加する K -increasingタイプであり、面内偏心型でみられた亀裂の屈折状況は K_{II}/K_I である程度推定し得る。

(5) 巨視的亀裂進展速度とストライエーション間隔 (p) は亀裂進展速度が 10^{-4} mm/cycle 以上でかなりよく一致し、面内偏心下におけるフラグラフィ的事故解析の可能性を示すものである。

参考文献

- 1) 田島二郎：溶接構造物の疲労損傷例とフラクチャコントロールデザイン、溶接学会東海支部、pp. 76~77、昭和55年6月。
- 2) 高速道路調査会：高速道路と自動車、1978.1~9.
- 3) 日本道路公団：東名高速道路建設誌、1970.3.
- 4) 日本道路協会：道路、1979.4.
- 5) Abtahi, A., P. Albrecht and G.R. Irwin : Fatigue of periodically overloaded stiffner detail, Proc. of ASME, No. ST 11, pp. 2103~2119, Nov., 1976.
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書・解説、1980.2.
- 7) 中村正平：鋼合成げた橋の設計計算例、山海堂、1973.10.
- 8) 全日本建設技術協会：土木構造物標準設計.
- 9) 高島春生：道路橋の横分配実用計算法、現代社、1965.3.
- 10) 多田安夫・中村正平・篠原洋司：活荷重合成ゲタ橋の大模型実験、土木研究所報告、116号、4、1962.1.
- 11) 本州四国連絡橋公団：トラス格点部の疲労試験、FS委員会資料、FS-426-77.
- 12) 土木学会・本州四国連絡橋鋼上部構造研究小委員会：本州四国連絡橋鋼上部構造に関する調査研究報告書一別冊2—疲れに関する研究、1980.3.
- 13) 宇佐美 勉・福本勝士：プレーシング材としての山形およびT形鋼部材の圧縮強度と設計、土木学会論文報告集、第201号、pp. 43~50、1972.5.
- 14) 草間孝志：偏心圧縮柱の荷重-変形性状に与えるひずみ硬化の影響、土木学会論文報告集、第184号、pp. 1~10、1970.12.
- 15) 真谷捷郎：船体構造部材の疲労き裂強度評価、日本造船学会論文集、第134号、pp. 351~363、1973.12.
- 16) 飯田國廣・飯野 暢：角変形をもつ溶接継手の疲労強度、日本造船学会論文集、第140号、pp. 259~265、1976.12.
- 17) 矢田敏夫：初期変形をもつ溶接継手に生じる応力集中の考察、石川島播磨技術報、第16卷、第2号、1976.3.
- 18) 川原正言・栗原正好：表面欠陥からの疲労き裂伝播(第一報)、日本造船学会論文集、第139号、pp. 234~239、1976.6.
- 19) 川原正言・栗原正好：表面欠陥からの疲労き裂伝播(第二報)、日本造船学会論文集、第141号、pp. 250~256、1977.6.

- 20) 北川英夫・渡辺勝彦・結城良治：破壊力学の基本・応用とその進歩・適用の現状、東大生研セミナー テキスト、コース 51, 1979.
- 21) 石田 誠：き裂の弾性解析と応力拡大係数、培風館, 1978.
- 22) 山田嘉昭・江澤良孝・西口磯春・岡部政之：特異有限要素とその構造解析への応用、生産研究, 31巻, 3号, pp. 176～185, 1979.3.
- 23) 日本金属学会、日本鉄鋼協会：金属材料技術者のための破壊力学入門とその応用, 1978.10.
- 24) Sih, G.C. : Mixed Mode Fatigue Crack Growth Predictions, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 13, pp. 439～451, 1980.
- 25) 二瓶正俊・今野武志・佐々木悦男：亀裂発生寿命に及ぼす切欠形状の影響、日本造船学会論文集, 第 144 号, pp. 337～347, 1978.12.
- 26) ASTM E 647-78 T : Tentative Test Method for Constant-Load-Amplitude Fatigue Crack Growth Rates Above 10^{-8} m/cycle.
- 27) Kitagawa, H., R. Yuuki and T. Ohira : Crack-morphological aspects in fracture mechanics, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 7, pp. 515～529, 1975.
- 28) Erdogan, F. and G.C. Sih : On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear, Transaction of the ASME, pp. 519～525, Dec., 1963.
- 29) 成木朝雄・田中康浩・船越督己：各種構造用鋼の疲労き裂伝播、川崎製鉄技報, Vol. 6, No. 1, pp. 38～51, 1974.
- 30) Fisher, J.W., F. ASCE, Alan W. Pense, H. Hausmann and G.R. Irwin : Quinnipiac river bridge cracking, Proceeding of ASCE, Vol. 106, No. ST 4, pp. 773～789, April, 1980.

(1980.12.26・受付)