

名古屋大学工学部 正会員 菊池洋一
トピー工業(株) 正会員 O宮川健策
トピー工業(株) 清水尚夫
トピー工業(株) 篠原義則

1. まえがき

近年の橋梁の調査などによれば、プレートガダの中間対傾構のガゼット部に疲労き裂が生じている事例があり、鉄道橋などにも報告例がみられる。これは、年々の交通量の増加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、主として、ガゼ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。そこで、本研究は偏心を有するガゼット連結部を疲労強度の観点より着眼し、静的ひずみ挙動および疲労強度に及ぼす偏心の影響を明らかにし、さらに、二次元的面内偏心問題としてのガゼット継手の疲労き裂進展挙動を特異有限要素法で解析した応力拡大係数を用いて破壊力学的評価を試みた。

2. ガゼット継手の静的ひずみ挙動と疲労強度

中間対傾構の主桁への取付部に用いられるガゼット連結部は通常、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。そこで、ガゼ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明らかにするための静的引張荷重試験ならびに片振引張疲労試験を行った。供試体はTYPE-1(標準型)とTYPE-2(無偏心型)の2体とし、2つの供試体のガゼット部の最小断面積を等しくなるように製作した。なお、材質はSS41を用いた。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、また、疲労強度に対しても両者の差違は顕著である。

表-1 ガゼット継手の疲労試験結果

供試体	最大荷重	最小荷重	平均荷重	繰返し速度	繰返し数	結果
	Pmax	Pmin	Pmean	Hz	N	
TYPE-1 (標準型)	6 t	0.2 t	2.9 t	10	4.35×10 ⁶	ビード止端部より疲労き裂発生後破断
TYPE-2 (無偏心型)	6 t	0.2 t	2.9 t	10	3.30×10 ⁶	疲労き裂は発生せず

(図-1, 表-1)

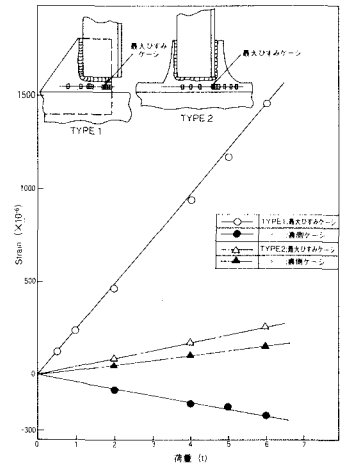


図-1 静的ひずみ挙動に及ぼす偏心の影響

3. 面内偏心構造ガゼット継手の疲労き裂進展速度の測定

TYPE-1の疲労破面を走査型電子顕微鏡で観察した結果、疲労き裂はすみ肉溶接部の止端に沿って分布き裂として発生し、繰返しの初期に板厚方向に進展し、合体後に荷重直角方向に屈折しながら進展していくことが認められた。そこで、このような面内外の偏心構造を有するガゼット継手の疲労き裂進展則を究明するにあたり、まず、1段階として、図-2に示すような、板厚方向貫通切欠を有する面内偏心構造供試体を製作し、面内偏心構造ガゼット継手の疲労き裂進展に関する破壊力学的評価を行うこととした。

上限荷重 P_{max} をそれぞれ 10 t, 6 t, 下限荷重 P_{min} をほぼ 0 t とする片振引張荷重制御下における疲労き裂進展挙動を測定した。人工切欠の先端からさらに 2 mm 程度進展させた疲労予き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測定した。き裂長さの

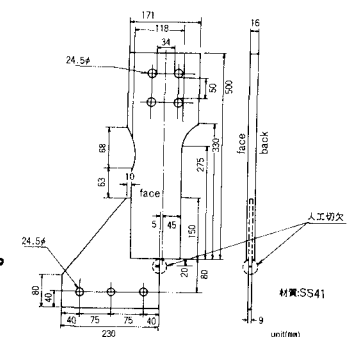


図-2 面内偏心供試体形状

測定には、0.01 mmの精度を有する読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。なお、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600 cpm（10 Hz）とした。得られたデータより、ASTM E647に準じて巨視的き裂進展速度、 da/dN を算出した。

4. 特異有限要素法による応力拡大係数の解析

図-2で示した試体のガセット端から約60 mmの位置までに進展した疲労き裂について、傾斜角 3.5° （0.06 rad.）の直線斜めき裂にモデル化し、進展距離を7ケースの段階に分け、各ケースの応力拡大係数を解析することとした。面内偏心構造におけるき裂先端の応力拡大係数は K_I 、 K_{II} の混合モードとなるが、これらの応力拡大係数を山田らが提案した特異有限要素法を用いて解析し、き裂先端の節点 i 、 j の変位から次式により、 K_I 、 K_{II} を算出した。

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

図-3にメッシュ分割の一例を示す。また、図-4に解析した K_I 、 K_{II} の変化を示すが、疲労き裂の進展に伴い、 K_I 、 K_{II} が増加してくるが、 K_{II} は小さく、 K_{II}/K_I も増加率が小さい。したがって、最終的には大きなき裂の屈折がみられた面内偏心タイプのガセットも、ガセット端から60 mmほどの位置までは K_{II}/K_I も小さく、ほぼ、荷重直角方向に直線的に進展したものと考えられる。

5. 疲労き裂進展則

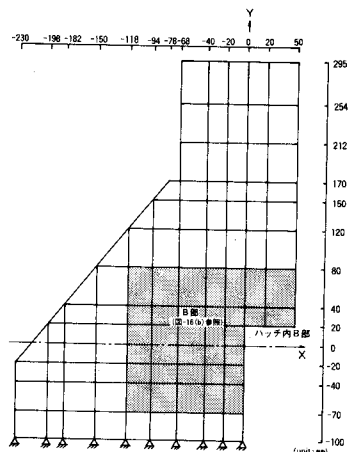
面内偏心構造における混合モード下の疲労き裂進展則は現状、十分に確立されているとは言えないが、荷重軸に垂直方向への射影速度が ΔK_I の関数として整理し得るという報告もあり、今回、 K_{II} を既感せず K_I のみでパリス則の評価を行った。これを図-5に示すが、C、m値を K_{II} 領域において、最小2乗法で求めると次式が得られた。

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

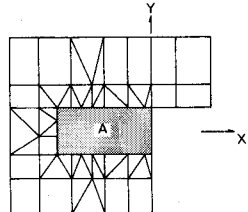
この際、ストライエーション間隔（ ρ ）と巨視的き裂進展速度 da/dN との対応など、ガセット継手の疲労き裂進展挙動についての知見が得られた。

【参考文献】

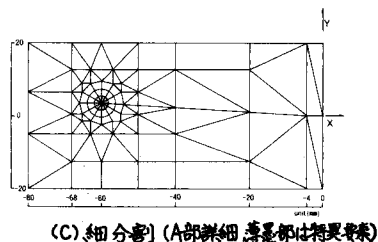
- (1) 田島, “溶接構造の疲労損傷例とフラクチャコントロール技術”, 溶接学会誌, PP.76-77, 昭和54年。
- (2) 山田, 江澤, 西口, 岡部, “特異有限要素法とその構造解析への応用”, 生産研究, 31巻, 3号, PP.176-185, 1979.3。



(a) 粗分割



(b) 中分割 (B部詳細)



(c) 細分割 (A部詳細, 薄層部は特異要素)
図-3 特異有限要素法によるメッシュ分割の一例 (ケース7)

図-4 特異有限要素法により解析した K_I 、 K_{II} の変化

図-4は、図-3(c)のメッシュ分割を用いて解析した K_I 、 K_{II} の変化を示すグラフである。横軸は「ガセット端からのき裂進展距離 (mm)」で、0から60まで表示されている。縦軸は「K (kg・mm^{-3/2})」で、0から350まで表示されている。グラフには、 K_I （開き丸）と K_{II} （開き三角）のデータがプロットされている。また、 K_I のデータには10:1と6:1の傾斜角が示されている。グラフから、 K_I はき裂進展とともに増加し、 K_{II} は非常に小さい値を維持していることが確認できる。

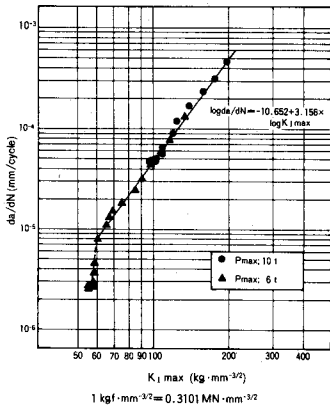


図-5 da/dN と $K_{I \max}$ の関係