

名城大学 学生会員 柘植章宏

名城大学 正会員 近藤明雅

1. 背景と目的

鋼橋において、各種アタッチメントやソールプレートなどが I 形桁やボックス桁の上下フランジ、デッキプレート上面などにすみ肉溶接で取付けられる場合が多い。このような溶接継手の止端部では断面の急変部となるため、応力集中を生じ、疲労損傷の原因となることが知られている。ところが、これらのディテールは構造設計が終了した後に、施工やメンテナンスあるいは、損傷断面の補強のために取付けが決まるため、たとえ橋梁全体が疲労照査された場合でも、この継手部位では疲労損傷が発生する可能性がある。本研究では、アタッチメントを有する I 形桁について、アタッチメント端部形状を変更することによって、すみ肉溶接止端部の応力集中を緩和させることを目的としている。

2. FEM 解析（一次解析）

(a) 解析方法 解析プログラムには汎用プログラム MSC/NASTRAN を使用した。I 形桁試験体は 2 軸対称であるので 1/4 を解析対象とした。要素はソリッド要素を使用した。要素の最小寸法は $1 \times 4.5 \times 1 \text{ mm}$ とした。材料定数はヤング係数 $E = 200 \text{ GPa}$ 、ポアソン比 $\nu = 0.3$ とした。溶接部は止端角 $\theta = 45^\circ$ 、 26.6° 、止端半径 $\rho = 0$ とした。アタッチメントとフランジの間には実構造を考慮するため隙間 0.1 mm を与えた。

(b) 解析モデル 試験体の基本モデル寸法を図 2-1 に示す。

検討したアタッチメント端部形状を図 2-2 に示す。溶接脚長は $1:1(6 \times 6 \text{ mm})$ と $1:2(6 \times 12 \text{ mm})$ の 2 種類を行う。

①端部が矩形のモデルを N-type. [基本形状] N_A (溶接脚長 $6 \times 6 \text{ mm}$)、 N_B (溶接脚長 $6 \times 12 \text{ mm}$)

②端部に窪みをつけたモデルを H-type. [窪み形状] H_A 、 H_B

③端部に窪みと段差をつけたモデルを SH-type. [段差+窪み形状] SH_A 、 SH_B

(c) 解析結果 図 2-3 に N, H, SH-Type の応力分布図を示す。縦軸に応力集中係数 K_t 、横軸はフランジ板幅方向に端を 0 とした中央までの距離である。 N_A の応力分布は中央に向かって応力集中が高い傾向にある。各モデルの応力集中係数の最大値は $N_A 5.27$ 、 $H_A 4.00$ 、 $SH_A 3.82$ 、 $N_B 3.65$ 、 $H_B 3.89$ 、 $SH_B 3.27$ となった。端部に窪みを付けることによって、 N_A で顕著であった中央の応力集中が緩和された。

3. FEM 解析（二次解析）

(a) 解析方法 亀裂進展解析を行うにあたって、止端形状を考慮した板厚方向の応力分布が必要である。そこで一次解析の最も応力集中の高かった部分を取り出し、その結果から得た節点変位を強制変位として二次解析モデルに与え解析を行う。二次解析は一次解析の解析結果から応力集中の最も

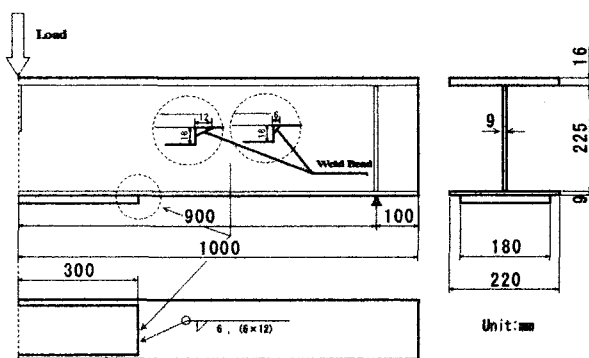


図 2-1 基本モデル寸法

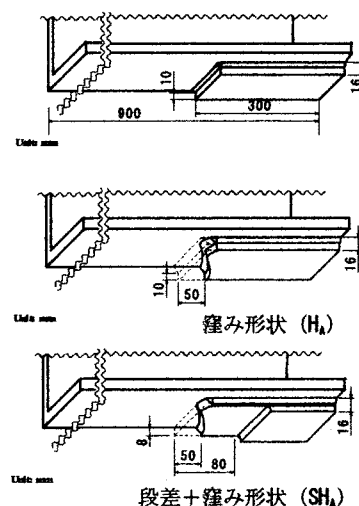


図 2-2 アタッチメント端部形状

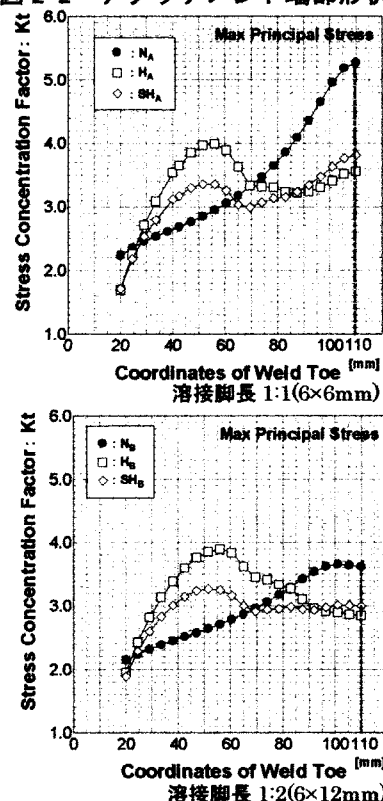


図2-3 溶接止端の応力分布

高い溶接部を取り出し、要素分割をさらに細かくして解析を行った。要素の最小寸法は $0.02 \times 0.02 \times 4.5\text{mm}$ とし、二次解析では止端形状を考慮し止端半径 $\rho = 0.2\text{mm}$ 、止端角 $\theta = 45^\circ$ とした。

(b)解析結果 解析結果を図3に示す。縦軸に応力集中係数 K_t 、横軸は板厚方向に溶接止端部からの深さである。一次解析と同様に、 N_A を基準として最大値を比較すると H_A で 19%、 SH_A で 23%の低下となった。

4. 亀裂進展解析

初期亀裂深さ a_0 から最終亀裂深さ a_f まで半楕円亀裂を仮定し進展解析を行った。 $a_0 = 0.05\text{mm}$ 、 $a_f = \text{板厚の } 100\%$ 、亀裂形状比 $b/a = 3$ とした。

JSSC の疲労設計指針で定める最安全設計 ($C = 2.7 \times 10^{-11}$ 、 $m = 2.75$ 、 $\Delta K_{th} = 2.0$) と平均設計曲線 ($C = 2.7 \times 10^{-11}$ 、 $m = 2.75$ 、 $\Delta K_{th} = 2.9$) を用いた場合の各モデルの 200 万回疲労強度を図4-1、疲労限を図4-2に示す。

N_A の 200 万回疲労強度は平均設計曲線で 26.0MPa 最安全設計曲線で 20.7MPa、 H_A では平均 35.3MPa 最安全 28.1MPa、 SH_A では平均 34.2MPa 最安全 27.2MPa、 N_A の疲労限は平均 20.2MPa 最安全 13.9MPa、 H_A では平均 25.9MPa 最安全 17.8MPa、 SH_A では平均 26.2MPa 最安全 18.1MPa となった。

5. 疲労試験

(a)疲労試験 N_A (3 体)、 H_A (3 体)、 SH_A (3 体) の計 9 体中 7 体の疲労試験を行った。応力範囲は 150, 110, 80MPa とした。疲労試験は MTS 試験機を用いて一定振幅荷重を載荷し、荷重繰り返し速度を 1.0~1.5Hz とした。

(b)疲労試験結果 疲労試験結果と亀裂進展解析結果の S-N 線図 (平均設計曲線) を図5に示す。疲労試験結果は解析結果よりも大きく上回る結果となった。応力範囲 150MPa のとき破断するまでの応力繰り返し数は N_A で 70,427 回、 H_A で 93,700 回、 SH_A で 111,400 回。80MPa のとき N_A で 445,200 回、 H_A で 719,500 回、 SH_A で 1,274,900 回。110MPa のとき N_A で 159,000 回となった。

6. まとめ

応力集中の低減効果は、 N_A が基準のとき $H_A \cdot SH_A$ に、 N_B が基準とき SH_B に見られた。 N_A を基準として最大値を比較すると H_A では 24%、 SH_A では 28%の低下となった。端部に窪みを付けることによって、 N_A で顕著であった中央の応力集中が緩和された。溶接脚長 1:2 を見てみると溶接脚長を等脚から不等脚に変更することで 31%の低下となった。 N_B を基準として最大値を比較すると H_A では 6%の上昇、 SH_B とでは 13%の低下となった。

亀裂進展解析結果の 200 万回疲労強度は N_A を基準とすると H_A で 26%、 SH_A で 24%の向上し、疲労限は N_A を基準とすると H_A で 22%、 SH_A で 23%の向上となった。

疲労試験結果では、疲労寿命に着目すると、応力範囲が 150MPa のとき N_A を基準に H_A で 1.3 倍、 SH_A で 1.6 倍。80MPa のときでは、 H_A で 1.6 倍、 SH_A で 2.9 倍、110MPa のときでは、 H_A で 2.1 倍となった。

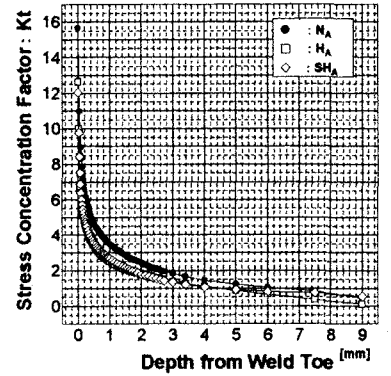


図3 板厚方向の応力分布

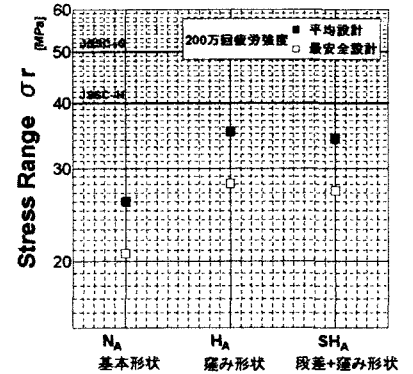


図4-1 各モデル 200 万回疲労強度の比較

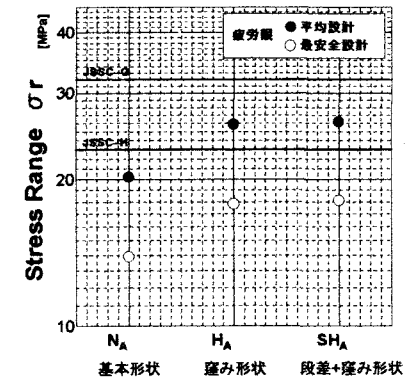


図4-2 各モデルの疲労限の比較

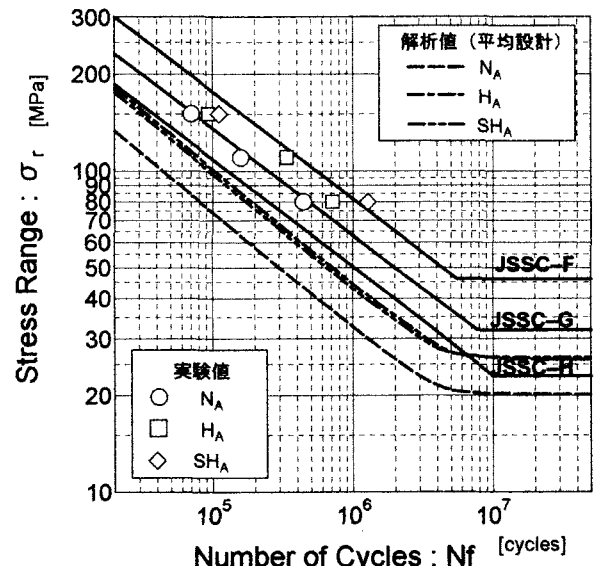


図5 疲労試験結果