

板曲げを受ける十字溶接継手ルート破壊の疲労評価式の提案

法政大学大学院	学生会員	○明見正雄
法政大学	正会員	森 猛
三井造船	正会員	内田大介
三井造船		福岡哲二

1. はじめに：荷重伝達型十字溶接継手がルート破壊する場合の疲労

き裂の発生・進展性状や疲労強度については、既に数多くの検討がなされている。これらの検討の多くは、引張り荷重を受ける場合を対象としているが、実際の構造物では、継手部が板曲げを受ける場合も少なくない。本研究では、板曲げを受ける十字溶接継手がルート破壊する場合の疲労強度の推定法を確立することを目的とし、溶接サイズが異なる2種類の試験体を対象として、軸引張荷重下と板曲げ荷重下で疲労試験を行うとともに、曲げ応力比 σ_{Bs}/σ_{Bb} 、板厚 T 、溶け込み深さ Pw 、溶接サイズ Hs をパラメータ(図1参照)とした疲労き裂進展解析を行う。

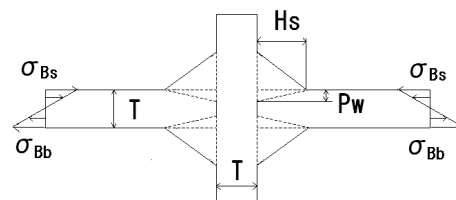


図1 解析パラメータ

2. 疲労試験：供試鋼材は板厚 15mm の日本海事協会規格 KA32 (降伏応力 : 362 N/mm²、引張強度 : 512N/mm²、伸び : 25%)である。この鋼板を用いて、溶接脚長を 5mm とした試験体(S5 試験体)と脚長を 3mm とした試験体(S3 試験体)の2種類の荷重伝達型十字すみ肉溶接継手試験体を作成した。これらの試験体は、幅 1000mm で製作した十字継手を幅 50mm に切断したものである。なお、溶接残留応力を軽減する目的で、焼鈍(620℃で2時間半保持)を行っている。図2に試験体の形状と寸法、写真1に断面マクロ写真を示す。溶接の溶け込み深さは、いずれの試験体も 1.5~1.9mm 程度で、溶接はほぼ等脚である。

疲労試験は軸引張荷重下と板曲げ荷重下で行った。軸引張疲労試験は、上限荷重を S5 試験体に対しては 110kN(応力比 $R=0.6\sim0.8$)、S3 試験体に対しては 80kN(応力比 $R=0.5\sim0.7$)で一定とし、それぞれの試験体に対し6体ずつ行った。板曲げ疲労試験は4点曲げで行い、上限荷重を 10kN(応力比 $R=0.3\sim0.8$)で一定とし、S5、S3 試験体に対し6体ずつ行った。疲労試験より求めた主板での応力範囲と疲労寿命の関係を図3に示す。いずれの試験体、応力範囲においても、軸引張荷重下と比べて、板曲げ荷重下では疲労強度が4倍以上高くなっている。

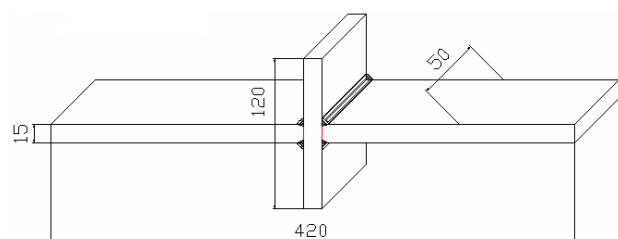


図2 試験体の形状と寸法 (mm)



写真1 断面マクロ

3. 疲労き裂進展解析：疲労試験に用いた試験体を対象として、破壊力学の手法を用いた疲労き裂進展解析を行い、疲労寿命を算出した。き裂の進展方向は最大主応力説、疲労き裂進展速度表示式は国際溶接学会の疲労設計指針に従った。なお、解析ソフトには汎用き裂進展解析コード FRANC2D/L を用いた。解析より求めた疲労寿命と試験より求めた疲労寿命を比較した結果を図4に示す。解析結果は試験結果とよく一致しており、軸力・板曲げによらず、疲労き裂進展解析から高い精度で疲労強度・寿命を予測できるといえる。

キーワード 十字溶接継手, ルート破壊, 板曲げ, 疲労強度

連絡先 〒184-8584 東京都小金井市梶野町 3-7-2 法政大学 工学部 TEL 042-387-6287

4. 疲労強度評価式の提案：曲げ応力比 σ_{Bs}/σ_{Bb} 、板厚 T 、溶接サイズ H_s 、溶け込み深さ P_w をパラメータとして(図1参照)、上述の条件で疲労き裂進展解析を行った。曲げ応力比とは、板上面と下面の応力の比であり、軸引張荷重では1、板曲げ荷重では-1となる。図5は、解析より求めた無次元化疲労強度(曲げ応力比-1~1の各200万回疲労強度を曲げ応力比1の200万回疲労強度で除した値)と曲げ応力比の関係を、溶接サイズ H_s と板厚 T の比 H_s/T によりマークを変えて示したものである。いずれの場合も、曲げ応力比が低くなるに従い、疲労強度は高くなり、板曲げ応力下では軸応力下の4.5~8倍となっている。また、曲げ応力比-0.5までは溶接サイズ H_s/T によらず、ほぼ同じ疲労強度-曲げ応力比関係となっている。溶接サイズをパラメータとした曲げ応力比の影響を定式化する際、式が煩雑になるため、 $H_s/T=0.25$ としたときの疲労強度に及ぼす曲げ応力比の影響を定式化した。これにより H_s/T が大きいものについては安全側の評価となる。これらのパラメトリックな疲労き裂進展解析の結果に基づき、任意の板厚、溶接サイズおよび溶け込み深さの十字継手が、軸引張荷重および板曲げ荷重を受けてルート破壊する場合の疲労強度評価式を導いた。

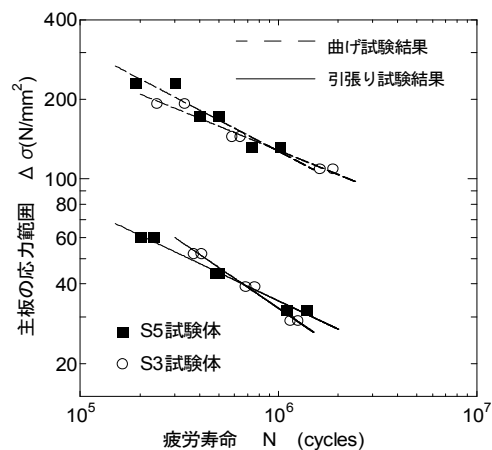


図3 試験結果

$$\Delta \sigma_{t200} = \varepsilon_T \times \varepsilon_{H_s} \times \varepsilon_{P_w} \times \varepsilon_B \times \Delta \sigma_{t200b} \quad 0.25 \leq H_s/T \leq 1.0 \quad 0 \leq P_w/T \leq 0.3 \quad -1 \leq \sigma_{Bs}/\sigma_{Bb} \leq 1$$

$$\varepsilon_T = (T/25)^{-\frac{1}{6}} \quad \varepsilon_{H_s} = 56.236(H_s/T)/42.177 \quad \Delta \sigma_{t200} : \text{主板の応力範囲での200万回疲労強度}$$

$$\varepsilon_{P_w} = 1.694(H_s/T)^{-0.942}(P_w/T) + 1 \quad \Delta \sigma_{t200b} : \text{基準モデルの200万回疲労強度}$$

$$\varepsilon_B = 0.847\{(\sigma_{Bs}/\sigma_{Bb}) - 1\}^2 + 1 \quad \text{基準モデル: } (T=25\text{mm}, H_s/T=0.75, P_w/T=0, \sigma_{Bs}/\sigma_{Bb}=1)$$

ε_T : 板厚の影響 ε_{P_w} : 溶け込み深さの影響
 ε_{H_s} : 溶接サイズの影響 ε_B : 曲げ応力比の影響

上記の評価式から求めた疲労強度と進展解析から求めた疲労強度を比較した結果を図6に示す。図中には、疲労強度評価式構築のために用いたモデルに加え、任意にパラメータを組み合わせて作成したモデルの結果も示している。いずれのモデルについても、200万回疲労強度が200N/mm²以上の領域では安全側の評価となっている。これは、図5に示したように溶接サイズ H_s/T が大きくなるにつれて、疲労強度に対する曲げ応力比の影響が大きくなり疲労強度が高くなるという現象を評価式では考慮していないためである。日本鋼構造協会の疲労設計指針には、十字溶接継手の200万回疲労強度(非超過確率50%)が止端仕上げをした場合175N/mm²、非仕上げの場合126N/mm²という試験結果が示されている。すなわち200万回疲労強度が200N/mm²以上では十字溶接継手は止端破壊が生じると考えられる。したがって、上記の式で、軸力・板曲げを受ける十字溶接継手がルート破壊する場合の疲労強度を適切に評価できる。

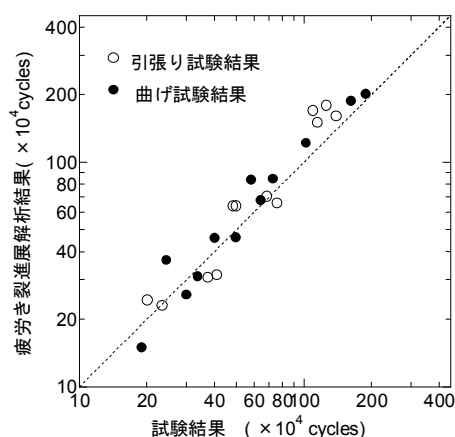


図4 試験結果と解析結果の比較

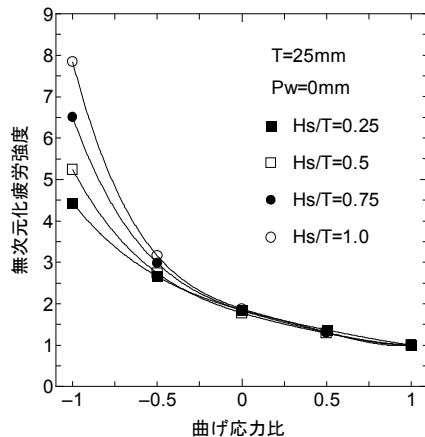


図5 無次元化疲労強度と曲げ応力比の関係

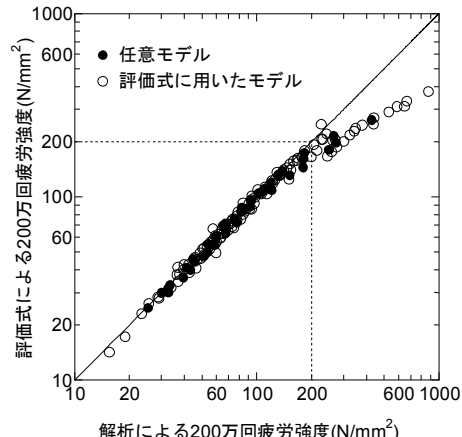


図6 推定値と解析結果との比較