鋼材強度加味による溶接接手の疲労強度向上法の評価手法の高度化

岐阜大学 学生会員 〇小野友暉 岐阜大学 正会員 木下幸治

1. はじめに

鋼橋への高強度鋼の適用は、軽量化による製作、輸送、架設コス ト低減において最も有効な方法の一つである.しかし,通常の溶接 部の疲労強度は鋼材強度依存性が無いとされており、高強度鋼を最 大限に活用するには溶接部の疲労強度を改善する必要がある. その ため, 溶接部の止端形状改善や圧縮残留応力導入といった疲労強度 向上に関する研究が進められ、特に高強度である 780MPa 級の橋梁 用高降伏点鋼板(SBHS700)では、高い疲労強度向上効果があると いった鋼材強度依存性が示された 1.2).

これまでに、島貫ら3は鋼材強度を加味した溶接部の疲労限度推 定法として,修正グッドマン線図を溶接止端部に応用した推定式を 提示している. 推定式では、鋼母材の疲労強度がパラメータとされ ており、溶接部の疲労強度向上評価の高度化に関して、SBHS700鋼 母材の疲労限度の提案が必要であるが、十分な疲労強度データが存 在しない.一方, 鋼母材の疲労限度に関しては, 村上ら∜は, √area パラメータモデルによって疲労限度に与える表面性状の影響を定 量的に評価できることが示されてきている. そのため, √areaパラ メータモデルを用いて SBHS700 鋼母材の疲労限度を評価可能か明 らかにした上で、従来の疲労限度の管理値となっている最大表面粗 さで整理可能かを合わせて検討する必要がある. そこで本研究では、 SBHS700 鋼母材の疲労強度を明らかにするために、鋼母材の疲労 試験を実施し、従来鋼との疲労強度との比較を行ったう. さらに、 本概要では、疲労試験後に走査型顕微鏡 (SEM) による破壊起点の 観察に基づく疲労限度の評価を行った上で,著者らのおよび森ら2) が実施した超音波衝撃処理(UIT)を施した溶接継手の疲労試験結 果を評価した.

2. 試験体と疲労試験条件

微小欠陥を有する鋼母材の疲労限度推定法として、

村上ら 4は以 下の√areaパラメータモデル(式1)を提唱している.

> $\sigma_w = A(HV+120)/(\sqrt{area})^{1/6} \times (1-R/2)^{\alpha}$ 式(1)

ここで、Aは欠陥位置による係数(表面欠陥:1.43,表面に接する ような欠陥: 1.41, 内部欠陥: 1.56), HV はビッカース硬さ, area は 欠陥を最大主応力方向に投影した投影面積, R は応力比, α は 0.226+HV×104である. また, 疲労限度の上限値は, 引張強度の 1/2 としている. そこで、本研究では、純粋な鋼母材の疲労限度である 上限値付近の疲労限度(Typel)と欠陥寸法を大きくした場合の疲労 限度(Type2)の把握を目的に試験体を製作した. 図-1 に試験体の 形状と寸法,図-2に試験体の表面性状を示す. Type2は,腐食によ り表面欠陥を生成させた試験体(図-2(b))であり, Type1(図-2(a)) は、それら欠陥を削除した試験体である.まず、試験体表面を道路 橋示方書に定められる最大表面粗さ50µm以下とすることを目標に, 粒度 240 のディスクグラインダーで処理した後, 180 番, 240 番, 400番,600番のサンドペーパーで仕上げを行った.最大表面粗さ は、比較用表面アラサ標準片(JISB0559-1)を用いて、試験体の表 面を視覚,触覚にて比較を行い,50µm以下であることと簡易的に 確認した. Typel に関しては、 粒度 240 以下のディスクグラインダ ーで表面の欠陥を削除した後、同様の処理を行った.表-1に試験体 一覧と機械的性質を示す.供試鋼材は、板厚12mmの橋梁用高降伏 点鋼板 SBHS700 と従来鋼として溶接構造用圧延鋼材 SM490A とし た. ビッカース硬さは、経験式 4 (式 2) によりミルシート値の引 張強度(σB)を代入することで推定した.



図-1 試験体の形状と寸法



(b) Type2

図-2 試験体の表面性状

表-1 試験体一覧と機械的性質

		ミルシート値			推定値(式2)	
試験体種類	鋼種	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	伸び (%)	ビッカース硬さ (kgf/mm ²)	個数
Type1	SBHS700	823	846	24	255	2
Type2						9
Type2	SM490A	439	577	25	174	8



 $H_V = \sigma_B / (0.36 \times 9.4 \times 0.94)$ 式(2) 疲労試験は、200kNの材料疲労試験機を用いて、繰返し一軸引張 載荷で行った.載荷繰返し速度は10Hz,荷重波形は正弦波とした. 一部の試験体でビーチマーク試験を実施し、200万回の繰返しによ りき裂が発生しない場合は試験を終了,または公称応力範囲を増加 させて試験を継続した.また、応力比はほぼ0とした.

3. 疲労試験結果

図-3 に疲労試験結果を示す. 図中には, JSSC 疲労設計曲線の うち A, B 等級を併記している. 疲労試験結果より,疲労強度は, 試験体母材の鋼材によらず A 等級を概ね示す結果となった. これよ り鋼材によらず最大表面粗さ 50µm 以下の管理により, JSSC に規 定される A 等級を満足することを確認した. 次に, SBHS700 と SM490A の疲労限度に関して, Type2 では, SBHS700 は 300 から 360MPa 程度, SM490A は 220 から 300MPa 程度となった. 一方, 表面の欠陥を取り除いた Type1 では, SBHS700 は 430 から 450MPa 程度となった. よって, SBHS700 鋼母材の疲労強度は, SM490A と 比較して高く,また鋼母材強度との明確な相関関係を得た. さらに, 表面の欠陥を取り除いた場合,疲労限度は 100MPa 程度上昇した.

4. 欠陥寸法に基づく疲労限度の評価

図-4 に疲労試験後の各 Type の SEM による破壊起点周辺の撮影 画像を例示する. 欠陥の投影面積 \sqrt{area} は, 撮影画像上で欠陥深さ, 長さを測定し, 半楕円近似%により算出した. 図-5 に疲労限度と欠 陥面積の関係を示す. 図中には,疲労試験より得られた疲労限度と \sqrt{area} の関係をプロットしている. 欠陥の投影面積 \sqrt{area} は,疲労 限度が得られた試験体に十分な応力を負荷して破断させ,前述した 手法で算出している. また,試験体のR部近傍からき裂が発生した ため, FEM 解析により求めた応力集中係数を考慮した局所応力で 応力範囲を整理している. 図-5 より, SBHS700の疲労限度は, \sqrt{area} パラメータモデルの推定疲労限度の推定線上または下部に 分布し,欠陥面積の減少に伴って増加する傾向に良く一致する. よ って,SBHS700 鋼母材の疲労限度は, \sqrt{area} パラメータモデルを用 いて評価することが可能であることが分かった.

5. UIT 処理された溶接接手の疲労試験結果の評価

島貫ら³の修正グッドマン線図を溶接止端部に適用した以下の式 (3)を用いて, UIT 処理された溶接継手部の疲労限度を推定した.

ここで、 σ_Bは鋼材の引張強度、 σ_{RS}は残留応力、K_tは止端応力集中 係数、αは鋼材の疲労限に対する引張強度の割合である。図-6 に疲 労試験結果と推定 S-N 線を示す。図中には、HFMI による推定線、 著者ら[®]および森ら²⁰の UIT 処理された SBHS700 面外ガセット溶 接接手の疲労試験結果をプロットしている.推定線のσ_Bは780MPa、 σ_{RS}は-280MPa, Kt は 2.81⁷とし、本研究の疲労試験結果よりαは2.2

(Type1), 3.7 (Type2) とした. ただし, 島貫らは $\alpha \ge 3.0$ と設定し ている. 図-6 より, α の設定により大きく疲労限度が異なるが, 概 ね α =3.0 から 2.2 の推定線内に疲労試験結果が分布していることが 分かる. また, 森らの疲労試験結果の下限に位置するのは α =3.0 の 推定線であり, α =3.7 の場合は α =3.0 と比較して約 15%程度安全側 に見積もられた. ただし,疲労限度と定義する 300 万回疲労強度に 関しては, α =3.7 と HFMI が同程度であった. 今後, UIT 処理部の 凹凸形状や破壊起点などを詳細に検討した上で, 鋼素材の疲労限度 を設定していく予定である.

<参考文献> 1)判治ら:止端処理による溶接継手の疲労強度改善効果とその鋼材強度依存性,構造工学論文集,2017.3.2)森ら:面外ガセット溶接継手のUIT 疲労強度改善効果に対する鋼材静的強度の影響,土木学会論文集,2014.3)島貫:超音波衝撃処理による溶接継手の疲労寿命向上効果に及ぼす影響因子,溶接学会誌,2016.4)村上ら:金属疲労 微小欠陥と介在物の影響,養賢堂,1993.5)小野ら:SBHS700 鋼母材の疲労強度とき裂進展特性,鋼構造 年次論文集,2018.5)Ono et al: Continuous fatigue test of welded joint taken from



図-6 UIT 処理された溶接部の疲労試験結果と推定 S-N 線

SBHS700 girder specimen, Ce/papers, EUROSTEEL 2017. 7)Mori, et al.: Effect of UIT on fatigue strength of web-gusset welded joints considering service condition of steel structures, Welding in the world, 2012.