

SBHS700 鋼母材の疲労強度とき裂進展特性に関する検討

岐阜大学大学院 学生会員 ○小野友暉

岐阜大学 正会員 木下幸治

1. はじめに

橋梁用高降伏点鋼板 SBHS は、降伏点が高いほか、溶接性、加工性に優れた高性能鋼材であり、SBHS の適用により鋼桁の鋼重低減が見込まれる。さらに、通常、溶接継手部の疲労強度は鋼材強度依存性が無いとされているが、圧縮残留応力導入や止端形状改善などの疲労強度向上に関しては鋼材強度依存性が見られ、特に高強度の SBHS700 では高い疲労強度向上効果が期待される。文献²⁾では、面外ガセット溶接継手の疲労限の推定に鋼材強度や疲労限がパラメータとされていることから、今後 SBHS700 における基礎的な研究データの蓄積が必要である。そこで本研究では SBHS700 鋼母材の疲労強度とき裂進展特性を明らかにすることを目的とし、鋼母材の疲労試験を実施し従来鋼との比較を行った。また、疲労試験後には、いくつかの試験体を対象に、走査型顕微鏡 (SEM) による破壊起点の観察、破断面のストライエーションの観察に基づきき裂進展速度の検討も行った。

2. 試験体と疲労試験条件

図-1 に試験体の寸法を示す。試験体は鋼板からワイヤ放電加工機を用いて切出すことにより製作した。試験体の鋼材は板厚 12mm の SM490A (降伏強度 439MPa, 引張強度 577MPa), SBHS700 (降伏強度 823MPa, 引張強度 846MPa) である。試験体の表面は、粒度 240A 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研磨した。表面の粗さは比較用表面アラサ標準片 (JIS B 0559-1) を用いて、試験体の表面を視覚、触覚にて比較を行い、表面粗さ 50μm 以下であることを確認した。JSSC³⁾では、鋼母材 (帯板) の 200 万回疲労強度は、鋼材の表面粗さで強度等級が分類されており、本検討では A 等級に分類される表面粗さ 50μm 以下に従った。疲労試験には 200kN の材料疲労試験機を用いた。荷重載荷は一軸引張下で行い、載荷繰返し速度は 10Hz、荷重波形は正弦波とした。表-1 に試験体の一覧とその公称応力範囲を示す。応力測定には試験体中央の表裏にひずみゲージを貼付し、表裏のひずみの平均より公称応力を算出

した。一部の試験体ではビーチマーク試験を行い、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とした。応力比は約 0 とした。

3. 疲労試験結果

図-2 に疲労試験結果を示す。疲労試験結果より、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。ただし、SM-1 では、試験体角部の研磨未処理のため、角部よりき裂が早期に生じたため B~C 等級程度となっている。これより鋼材によらず表面粗さの管理により、JSSC³⁾に規定される A 等級を満足することが確認できた。一方、SBHS700 と SM490A の疲労限に関しては、SM490A は応力範囲 220MPa~310MPa の試験においてき裂発生に至らなかった試験体があるが、応力範囲 240MPa, 310MPa ではき裂が生じた。一方、SBHS700

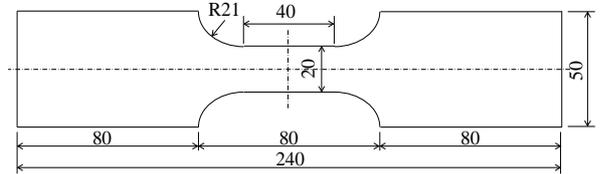


図-1 試験体の寸法

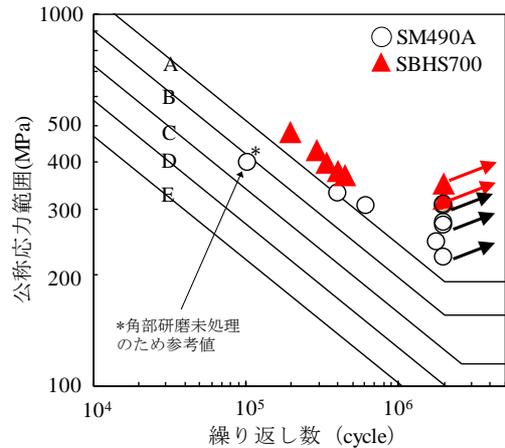


図-2 疲労試験結果

表-1 試験体の一覧と公称応力範囲

試験体	公称応力範囲 (MPa)	繰返し数 (cycles)	備考	試験体	公称応力範囲 (MPa)	繰返し数 (cycles)
SM-1	400	104590	角部の研磨未処理	SBHS-1	480	196100
SM-2	330	407350		SBHS-2	430	295690
SM-3	310	626190		SBHS-3	400	339400
SM-4	240	1824800		SBHS-4	380	406250
SM-5	220	未破断	応力範囲増加	SBHS-5	370	450000
	270	未破断		SBHS-6	350	未破断
SM-6	270	未破断	応力範囲増加	SBHS-7	320	未破断
	290	未破断				
SM-7	310	未破断				
SM-8	300	未破断				

未破断：繰返し200万によりき裂未発生

キーワード：SBHS, 橋梁用高降伏点鋼板, SEM, 鋼母材

連絡先：〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1 岐阜大学工学部 社会基盤工学科 TEL：058-293-2424

は応力範囲 320MPa, 350MPa であってもき裂発生に至らず, 応力範囲 370MPa 以降でき裂が発生している. 以上より, 本試験の限りでは, SBHS700 は SM490A と比較して高い疲労限を有していると言える.

4. 疲労限の推定

図-3 に示すように破断した試験体を対象に SEM による破面観察を行った. 平滑材の疲労限は, 文献 4)より鋼材強度の約 1/2 程度であるとされるが, 表面処理や腐食による微小欠陥が存在する場合, 疲労限の低下が考えられる. 本研究では図-3 に示すように微小欠陥(腐食ピット)が破壊起点であることが確認された. 文献 5)では, 微小欠陥を有する平滑材の疲労限の推定のために以下の式(1)が提案されている.

$$\sigma_w = 1.43(HV+120)/(\sqrt{\text{area}})^{1/6} \cdot (1-R/2)^\alpha \quad \text{式(1)}$$

ここで, HV はビッカース硬さ, area は欠陥面積, R は応力比, α は $0.226+HV \times 10^{-4}$ である. そこで, 本検討でも式(1)に基づき疲労限を評価することとした. なお, 欠陥の形状と寸法の影響は欠陥面積によって表され, 観察した欠陥を楕円形状に置き換えて面積を算出した. また, HV は SBHS700 では 270kgf/mm^2 , SM490A では 130kgf/mm^2 とした. 図-4 に推定疲労限と欠陥面積の関係を示す. 図中には破断した試験体の公称応力範囲と測定した欠陥面積の関係をプロットしている. 図-4 より, 破断した試験体は, 推定疲労限よりも高い位置に分布していることから疲労き裂発生に至ったと考えられる.

5. ストライエーションの観察

判治ら 6)は, CT 試験片を用いたき裂進展量の計測結果から, SBHS700 に対して従来のき裂進展速度式が適用可能であること示した. ここでは, SEM による破断面のストライエーション観察からき裂進展速度 da/dN を求める手法を用いて, SBHS700 の疲労き裂進展特性を検討する. 図-5 に観察されたストライエーションの一例を示す. ストライエーションの判定基準は文献 7)より, しま模様ほぼ平行に 5 本以上連続している, しま模様が交差や枝分かれしていない, しまの長さが間隔の 5 倍以上あるなどで判断し, ストライエーションの間隔を測定した. 応力拡大係数範囲 ΔK の算出にはストライエーション間隔 S を基にした小林ら 8)の式(2), き裂形状, 試験体寸法, 応力範囲による Newman&Raju 3)の式(3)を用いた.

$$S = 9.4 (1-\nu^2) (\Delta K/E)^2 \quad \text{式(2)}$$

$$\Delta K = (\Delta \sigma_t + H \cdot \Delta \sigma_b) \cdot F \cdot \sqrt{\pi a/Q} \quad \text{式(3)}$$

ここで, 式(2)の ν はポアソン比, E はヤング係数, 式(3)の H , F , Q は補正係数, a はき裂深さ, $\Delta \sigma_t$ は軸方向応力範囲, $\Delta \sigma_b$ は曲げ応力範囲である. き裂進展速度 da/dN は, 1 サイクルあたりのき裂進展量を表すストライエーション間隔 S とした. 図-6 に SBHS700 のき裂進展速度と応力拡大係数範囲の関係を示す. 図中には, ビーチマークの幅と回数から求めた da/dN と式(3)から求めた ΔK の関係, JSSC のき裂進展速度式 3)も併記している. 式(2), 式(3)を用いて求めた $da/dN - \Delta K$ では, 若干ばらつきが認められるものの概ね設計曲線付近に分布していることが分かる. よって, 本検討で実施した SEM による破面のストライエーション観察からも, 判治ら 6)と同様に SBHS700 のき裂進展特性は従来のき裂進展速度式を適用可能であることを明らかとした.

<参考文献> 1) 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. 2)島貫ら: UIT による溶接継

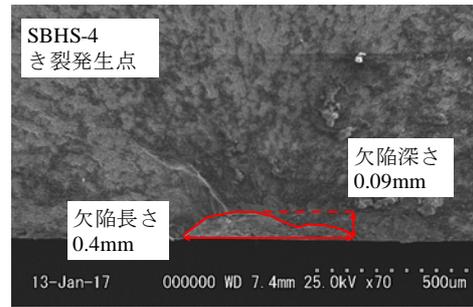


図-3 SEMによる破壊起点周辺の撮影画像

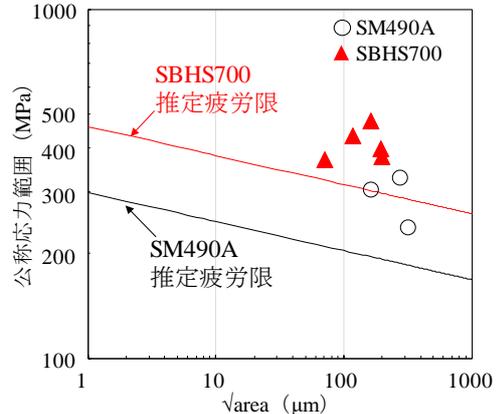


図-4 推定疲労限と欠陥面積の関係

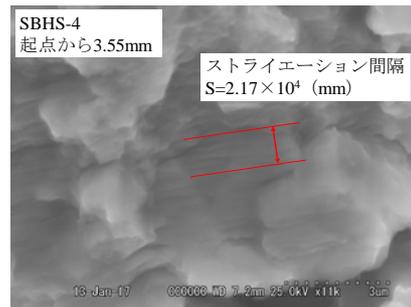


図-5 ストライエーション (SEM)

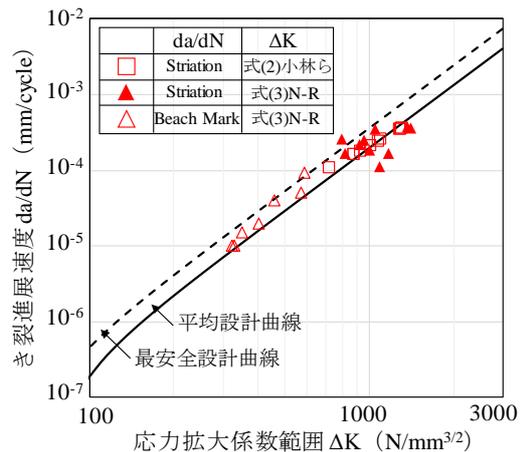


図-6 da/dN-ΔK の関係 (SBHS700)

手の疲労強度改善効果の推定方法の検討その4, 第71回学術講演会, 2016. 3) 日本鋼構造協会:JSS 鋼構造物の疲労設計指針・同解説(改定案), 2010. 4) 三木千壽: 鋼構造, 共立出版株式会社, 2000. 5) 村上ら: 微小欠陥と介在物の影響, 養賢堂, 1993. 6)判治ら: 橋梁用高降伏点鋼板(SBHS)を用いた溶接継手の疲労特性, 構造工学論文集, 2014. 7) 橋内ら: アルミ合金および軟鋼のストライエーション間隔の統計的検討, 日本機械学会論文集, 1983. 8) 日本材料学会: フラクトグラフィ破面と破壊情報解析, 丸善株式会社, 平成12年3月