

変動振幅荷重を受ける面外ガセット溶接継手の疲労破面観察

岐阜大学大学院 学生会員 ○阪野裕樹 岐阜大学 正会員 木下幸治

1. はじめに

道路橋では、作用する応力は低応力範囲側、すなわち長寿命域に偏った変動応力となることが実橋の応力計測結果から知られている¹⁾。従って、鋼道路橋溶接継手部は、低応力範囲でかつ変動応力における疲労強度評価が重要であると言える。低応力範囲の変動応力における評価方法として、鋼道路橋の疲労設計指針では、修正 Miner 則による方法²⁾等が示されているが、長寿命域となる低応力範囲で、かつ変動応力下の実験には、変動応力が可能な試験システムの開発、並びに膨大な実験時間を要するため³⁾⁶⁾、検証に用いられたデータは限られており、十分な検証が行われているとは言い難い。一方、2007年に山田らにより開発された载荷速度 20Hz 程度で溶接継手試験体の疲労試験が可能な簡易な板曲げ疲労試験機⁷⁾を用いた鋼道路橋の溶接部の 10⁷ 回オーダーの長寿命域の疲労試験が実施されてきており⁸⁾⁹⁾、長寿命域における疲労強度の解明が期待されている。このような現状より、今後は、板曲げ疲労試験機を用いた低応力範囲でかつ変動応力の疲労試験システムが必要であると言える。

著者らは、板曲げ疲労試験機の低応力範囲側でかつ変動応力下の長寿命域疲労試験を可能とする自動変速システムの開発を目的とし、変動振幅荷重を受ける面外ガセット溶接継手の疲労試験を実施してきている¹⁰⁾。本概要では、その疲労試験によって得られた試験体の疲労破面を走査型電子顕微鏡(SEM)を用いて観察した結果について報告する。

2. 既往の試験結果¹⁰⁾

2.1 試験体と試験方法

図-1 に試験体概要を示す。試験体鋼材は SM490A であり、主板には板厚 12 mm の鋼板を用いている。付加板には、幅 200 mm、板厚 12 mm の鋼板を用い、CO₂ 半自動溶接により、開先加工し溶接止端部の付加板から 50 mm 程度の範囲を完全溶け込み溶接とし、残りの区間はすみ肉溶接とした。表-1 に試験体一覧と等価応力範囲を示す。等価応力範囲は図-1 (b) に示すように溶接止端から長手方向に 12 mm の位置で試験体中央から左右 50 mm 離れた位置に貼付けしたひずみゲージより算出した公称応力を用いて計算した。

図-2 に自動変速システムを示す。本研究では山田ら⁷⁾により開発された板曲げ疲労試験機のインバータに新たにシーケンサを接続し自動変速システムを構築した。応力比は R=-1 の両振り载荷試験とした。また、試験体にはき裂検知用の被覆銅線を貼付し、銅線が切断された時点でのき裂長さの繰返し数を計測した。疲労

き裂は回し溶接部止端で検知されたものを N_{toe}、回し溶接部端部の止端で検知されたものを N_b、回し溶接部止端部から母材部に 10 mm 進展したものを N₁₀、20 mm 進展したものを N₂₀ とそれぞれ定義した。

2.2 変動振幅荷重

図-3 に本概要で用いた変動振幅荷重の頻度分布と载荷順序を示す。Albrecht et al⁵⁾が図-3 (a) に示すような米国の実際の道路橋から得た低応力範囲側に偏った応力頻度分布を用いた 15 段階の载荷ブロック変動荷重疲労試験を実施しており、この研究を参考に 15 段階の载荷ブロック変動試験とした。なお、図-3 (b) に示す 15 の载荷ブロックの载荷順序は、乱数を発生させ、その乱数に基づいて順番を付けたものと説明されている⁵⁾。表-2 に 15 段階载荷ブロック変動試験の荷重内訳を示す。試験体 AW1, AW2 では、最小応力範囲 48 MPa、最大応力範囲 171 MPa とし、AW3, AW4 では最小応力範囲 73 MPa、最大応力範囲 252 MPa とし、マイナー則が成り立つ応力範囲で変動試験を実施した。

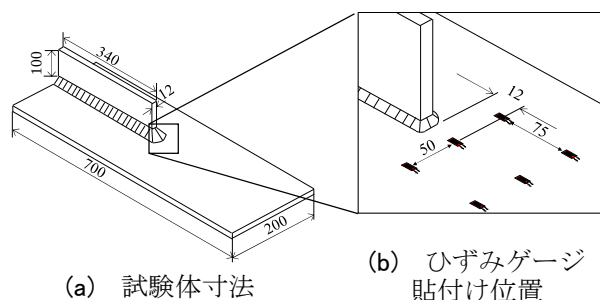


図-1 疲労試験概要(単位: mm)

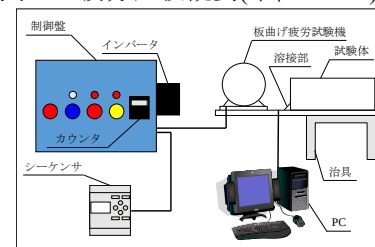


図-2 自動変速システム

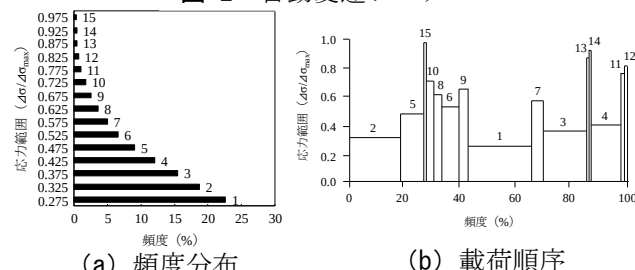


図-3 変動振幅荷重の頻度分布と载荷順序⁵⁾

表-1 試験体一覧と等価応力範囲

止端処理	鋼種	試験体名称	応力比 R	等価応力範囲 (MPa)	繰返し数 (cycles)				き裂進展回数(cycles)			破壊起点
					N _{toe}	N _b	N ₁₀	N ₂₀	N _{toe} →N _b	N _b →N ₁₀	N ₁₀ →N ₂₀	
As-welded	SM490A	AW1	-1	81	157,000	470,700	760,400	961,700	313,700	289,700	201,300	止端
		AW2		81	295,700	596,800	963,000	1,134,900	301,100	366,200	171,900	止端
		AW3		120	107,000	165,200	300,200	354,100	58,200	135,000	53,900	止端
		AW4		119	138,000	240,300	399,600	465,000	102,300	159,300	65,400	止端

表-2 15 段階载荷ブロック
変動試験の荷重内訳

载荷 ブロック	応力範囲 ($\Delta\sigma/\Delta\sigma_{max}$)	载荷回数 (cycle)	応力範囲 (MPa)	応力範囲 (MPa)
1	0.275	2260	48	73
2	0.325	1870	57	86
3	0.375	1550	66	93
4	0.425	1200	75	112
5	0.475	900	84	124
6	0.525	660	93	137
7	0.575	500	101	150
8	0.625	360	109	162
9	0.675	250	118	175
10	0.725	170	127	188
11	0.775	100	136	202
12	0.825	70	144	214
13	0.875	40	153	227
14	0.925	40	162	241
15	0.975	30	171	252

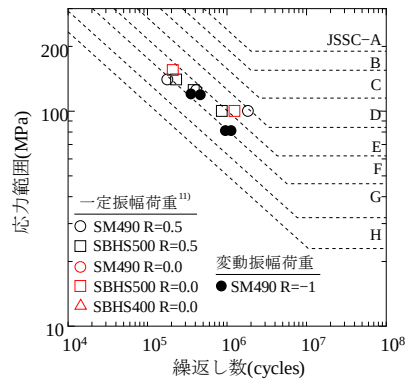
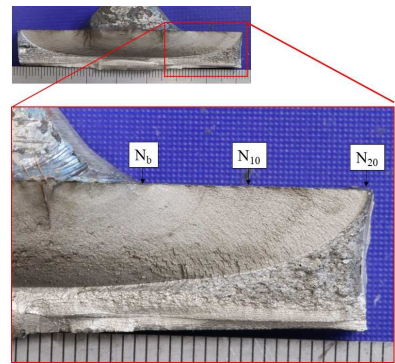
図-4 き裂長さ N_{20} における
疲労試験結果

図-5 試験体 AW1 の疲労破面

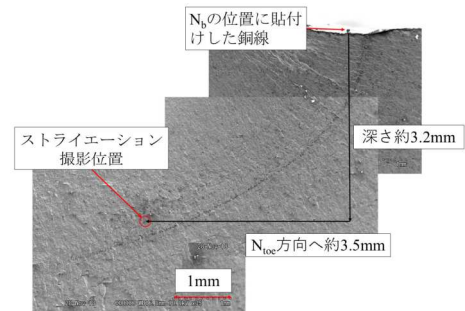
2.3 試験結果

図-4 にき裂長さ N_{20} における疲労試験結果を示す。図中には JSSC 疲労強度曲線²⁾及び、既往研究で実施された一定振幅荷重による疲労試験結果¹¹⁾を併記した。また、表-1 に疲労試験結果を示す。

図-4 並びに表-1 より、等価応力範囲 81 MPa で試験を行った AW1, AW2 及び、等価応力範囲 120 MPa で疲労試験を行った AW3, AW4 の疲労強度はすべて F 等級を示した。一方、一定振幅荷重による疲労試験より得られた疲労強度は E から F 等級を示している。このことから、マイナー則が成り立つ応力範囲で行った 15 段階载荷ブロック変動試験は既往の研究¹¹⁾で得られた疲労試験結果とよく一致することが確認できた。

3. 疲労破面観察結果

図-5 に疲労試験より得られた試験体 AW1 の疲労破面を示す。また、図中にはき裂長さ N_b , N_{10} , N_{20} に対応する位置を併記した。図より、载荷ブロックの変動に起因したビーチマーク状の痕が破断面に形成されていることが確認できる。また、ここでは、SEM による疲労破面観察から、疲労破面に残されたストライエーションの本数と、载荷ブロックの载荷回数との比較より、疲労き裂進展に寄与した载荷ブロックの同定を試みた。SEM には S3000-N(日立製)を使用し、倍率は 2700 から 5000 倍程度で撮影した。図-6 に SEM による疲労破面の撮影画像を例示する。図-6(a) に示すようにストライエーション撮影はき裂長さ N_b の位置に貼付けした銅線から深さ約 3.2 mm, N_{toe} 方向へ約 3.5 mm 離れた位置を起点に行った。ストライエーション判定基準は文献¹²⁾より、しま模様がほぼ平行に 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定した。図-6(b) より、疲労き裂進展方向に沿ってストライエーション間隔の変化が観察できた。ここで、ストライエーション間隔が変化した区間のストライエーション本数は 35 本程度であり、これは表-2 に示した载荷ブロック 15 の载荷回数と概ね一致していることが確認できた。図-6(c) より、ストライエーション間隔が中央を境に変化していることが観察できた。ここで、ストライエーション間隔が変化した区間の本数はそれぞれ 35 本と 46 本程度であり、载荷ブロック 13, 14 の载荷回数と概ね一致していることが確認できた。このことより、ストライエーションの本数と载荷ブロックの出力回数が概ね一致したことから、疲労破面観察結果からも自動変速システムが開発できたと言える。



(a) ストライエーション撮影位置

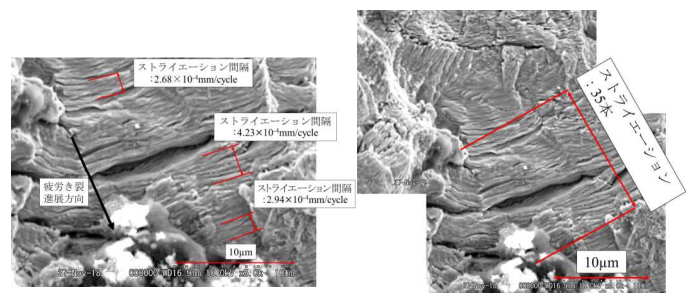
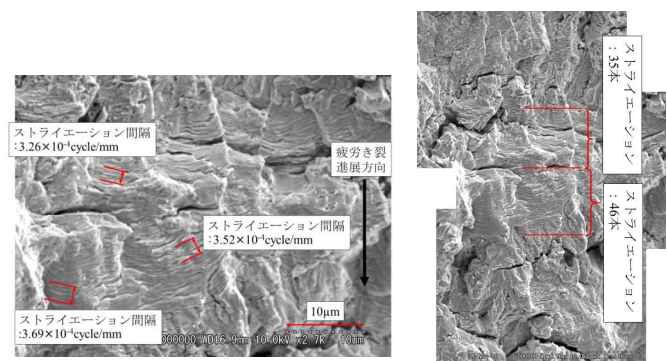
(b) 銅線から深さ方向に 3.2 mm,
 N_{toe} 方向に 3.55 mm (左図:5000 倍, 右図:2700 倍)(c) 銅線から深さ方向に 3.38 mm
 N_{toe} 方向に 3.44 mm (左図, 右図ともに 2700 倍)

図-6 SEM によるストライエーション撮影画像

<参考文献>1)山田ら：長寿命域での低荷重振幅疲れ試験結果，構造工学論文集，Vol.35A，pp.961-968，1989.3.2)日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説，技報堂出版，1993.3)近藤ら：変動荷重によるリブ十字溶接継手の長寿命疲労試験，構造工学論文集，Vol.43A，pp.1171-1181，1997.3.4)近藤ら：面内ガセット溶接継手の長寿命変動荷重疲労試験，構造工学論文集，Vol.48A，pp.1039-1046，2002.3.5)Albrecht, P et al：Simulation of Service Fatigue Loads for Shot-Span Highway Bridges, American Society for Testing and Materials, pp.255-277，1979.6)Fatigue-Limit Effect on Variable-Amplitude Fatigue of Stiffeners, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.105, No. ST12, pp.2657-2675，1979.7) Yamada, K et al: Development of a new fatigue testing machine and some fatigue tests for plate bending, International Institute of Welding, IIW Document, XIII-2161-07, 2007.8) 山田ら，面外ガセット溶接継手の曲げ強度に及ぼすショットブラストの影響，構造工学論文集，Vol.54A，pp.522-529，2008.3.9) 木下ら：面外ガセット溶接継手の長寿命疲労強度に関する実験的検討，鋼構造年次論文報告集，第 21 巻，pp.814-814，2013.1110) 木下ら：板曲げ疲労試験機を用いた変動振幅荷重制御システムの開発，鋼構造年次論文報告集，第 26 巻，2018.11.11)JSSC テクニカルレポート No.115 鋼橋の疲労対策のための技術資料，2018.12)橋内ら：アルミ合金および軟鉄のストライエーション間隔の統計的検討，日本機械学会論文報告集第 1 部，42 巻，364 号，1976.12.