

長寿命域における変動振幅荷重下の面外ガセット溶接継手の疲労強度

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法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、変動応力が可能な実験システムの開発、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荷重速度 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。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。そこで、著者らは、板曲げ疲労試験機を用いて、低応力範囲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を開発し、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た¹⁰⁾。

本概要は、長寿命域における変動振幅荷重下の溶接継手部の疲労試験データの蓄積を目的とし、面外ガセット溶接継手を対象に、開発した自動変速システムを用いた長寿命域の変動振幅荷重疲労試験を実施した。

2. 試験概要

2.1 試験体概要

図-1 に試験体概要を示す。鋼材の機械的性質および化学成分を表-1 に示す。試験体鋼材は SM490A であり、主板には板厚 12mm の鋼板を用いている。付加板には、幅 100mm、板厚 12mm 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 50mm 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-2 に試験体一覧および疲労試験に使用した等価応力範囲を示す。疲労試験はすべて応力比 R=-1 とした。等価応力範囲は図-1 (b) に示す溶接止端から長手方向に 12mm の位置で試験体中心から左右 50mm

離れた位置に貼付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。等価応力範囲は、既往研究で実施された一定振幅荷重疲労試験結果⁹⁾を基に、応力比 R=-1 で破断に至った最も低い応力範囲である 52MPa とした。

2.2 試験システムと変動振幅荷重

図-2 に試験システムを示す。試験システムは著者らの既往研究¹⁰⁾で開発した自動変速載荷システムを用いた。

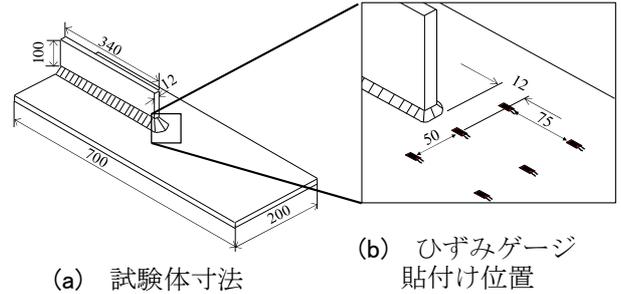


図-1 疲労試験概要(単位: mm)

表-1 機械的性質と化学成分

鋼種	降伏強度 [MPa]	引張強度 [MPa]	伸び [%]	化学成分 [%]				
				C	Si	Mn	P	S
SM490A	395	559	23	0.16	0.34	1.43	0.013	0.005

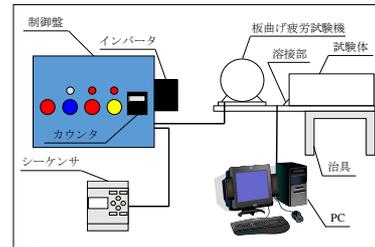


図-2 自動変速システム

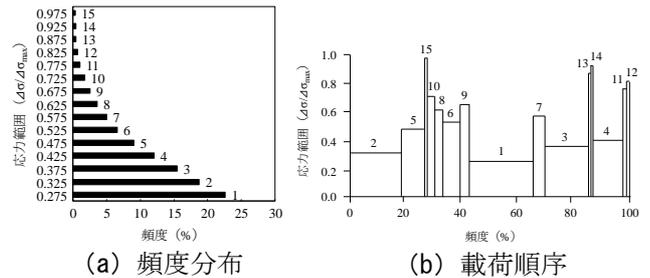


図-3 変動振幅荷重の頻度分布と荷重順序⁵⁾

表-2 試験体一覧

試験体名	応力比	等価応力範囲(MPa)	最大応力範囲(MPa)	最小応力範囲(MPa)	繰返し数(cycles)				き裂進展回数(cycles)			破壊起点
					N _{toe, N_{5%}}	N _b	N ₁₀	N ₂₀	N _{toe} →N _b	N _b →N ₁₀	N ₁₀ →N ₂₀	
AW1	-1	52	113	32	1,121,400	2,843,400	4,092,400	4,871,500	1,722,000	1,249,000	779,100	止端
AW2		48	102	29	1,603,900	4,079,200	5,918,400	6,881,700	2,475,300	1,839,200	963,300	止端
AW3		43	91	26	2,878,500	4,961,800	7,430,200	9,369,200	2,083,300	2,468,400	1,939,000	止端
AW4		37	79	22	5,717,200	8,632,300	11,891,100	13,960,600	2,915,100	3,258,800	2,069,500	止端
AW5		32	68	19	3,456,400	9,850,400	13,092,800	16,054,300	6,394,000	3,242,400	2,961,500	止端
AW6		27	58	16	23,346,300	40,312,200	48,112,000	53,750,700	16,965,900	7,799,800	5,638,700	止端
AW7		22	39	11	>71,963,800				-			-

キーワード：変動振幅荷重、長寿命域、面外ガセット溶接継手

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

試験体にはき裂検知用銅線を貼付し、銅線が切断された時点でのき裂長さにおける繰返し数を計測した。疲労き裂が回し溶接部端部で検知されたものを N_{toe} 、回し溶接部側面で検知されたものを N_b 、回し溶接部から母材部へ 10mm, 20mm 進展したものをそれぞれ N_{10} , N_{20} と定義した。

図-3 に変動振幅荷重の頻度分布と载荷順序を示す。Albrecht et al.⁵⁾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。15段階の载荷ブロック変動試験は疲労試験が終了するまで繰返し図-3(b)に示す载荷順序とした。なお、各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⁾。

3. 疲労試験結果

表-2 に疲労試験結果を示す。図-4 にき裂長さ N_{toe} , N_{20} における S-N 曲線をそれぞれ示す。図中には JSSC 疲労強度等級線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⁹⁾⁻¹²⁾を併記した。

図-4(a)より、き裂長さ N_{toe} における疲労試験結果は傾き 3 である疲労強度等級線よりも緩やかな傾きとなり、疲労き裂が発生した最も低い等価応力範囲は 27MPa であった。これは面外ガセット溶接継手の一定振幅荷重の打ち切り限界(32MPa)以下であった。また、等価応力範囲 22MPa で実施した試験体について、繰返し回数約 7000 万回到達後に磁粉探傷試験にて溶接止端部を探傷したがき裂の発生が認められなかったため現在疲労試験を継続中である。図-4(b)より、き裂長さ N_{20} における疲労試験結果は一定振幅荷重疲労試験結果と同様に F 等級の疲労強度等級線に沿って分布することがわかった。表-3 に疲労寿命に対するき裂発生寿命およびき裂進展寿命の割合を示す。それぞれの割合は各き裂長さに到達するまでに寄与した繰返し回数をき裂長さ N_{20} での繰返し回数で割ることによって求めた。表より、概ねすべての試験体で疲労寿命に対するき裂発生寿命の割合が 2~3 割程度となり、き裂進展寿命が疲労寿命に対して支配的であることがわかった。

4. 疲労破面観察

図-5 に疲労試験により得られた試験体 AW3 の疲労破面を示す。図中にはそれぞれのき裂長さに対応する位置を併記した。図-5(a)より、载荷ブロックの変動に起因した特有の痕が疲労破面に形成されていることが確認できる。図-5(b)にき裂長さ N_{toe} 近傍の疲労破面を示す。図中の赤矢印はき裂長さ N_{toe} を検知した時点でのき裂長さを示している。図より、き裂長さ N_{toe} 近傍の疲労破面からは载荷ブロックの変動に起因した特有の痕が目視で確認できなかった。なお、AW3 ではき裂長さ N_{toe} に到達するまでに繰返し回数約 287 万回载荷されている。一方、図-5(c)に示すき裂長さ N_b , N_{10} 付近の疲労破面では変動振幅荷重中の低応力範囲がき裂進展に寄与したと考えられる特有の痕が目視で確認できた。以上のことより、一定振幅荷重の打ち切り限界以下の低応力範囲はき裂発生後、疲労き裂進展に寄与すると考えられる。

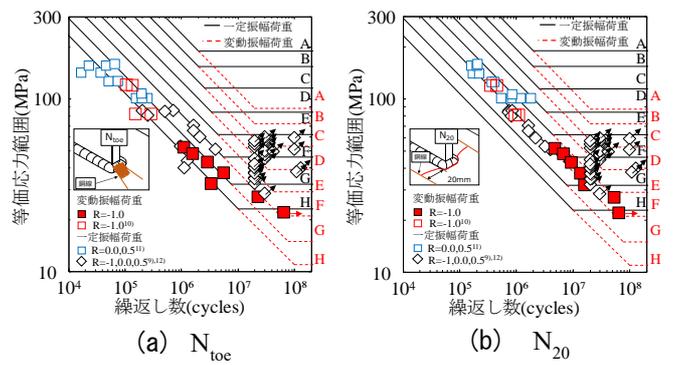


図-4 疲労試験結果(S-N 曲線)

表-3 疲労寿命に対するき裂発生寿命およびき裂進展寿命の割合 (単位: %)

試験体名	き裂発生寿命		き裂進展寿命	
	N_{toe} , $N_{5\%}$	N_{toe} から N_b	N_b から N_{10}	N_{10} から N_{20}
AW1	23.0	35.3	25.6	16.0
AW2	23.3	36.0	26.7	14.0
AW3	30.7	22.2	26.3	20.7
AW4	41.0	20.9	23.3	14.8
AW5	21.5	39.8	20.2	18.4
AW6	43.4	31.6	14.5	10.5

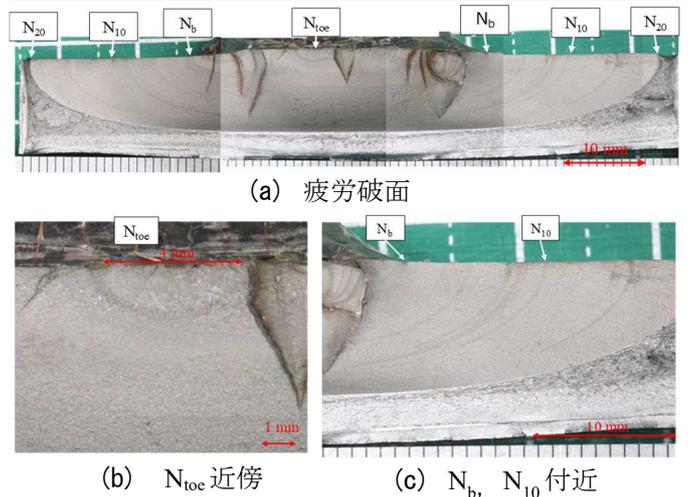


図-5 AW3 の疲労破面

5. 結論

疲労試験結果および疲労破面観察結果より、疲労き裂発生後に変動振幅荷重中の低応力範囲がき裂進展に寄与することより、疲労寿命に対する疲労き裂進展寿命が支配的になると言える。以上より、低応力範囲かつ変動振幅荷重下の疲労強度は修正 Miner 則により十分評価可能であると考えられる。

<参考文献>1)山田ら：長寿命域での低荷重振動疲労試験結果，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. 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. 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.814-814，2013.11. 10)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)木下ら：面外ガセット溶接継手の疲労強度に及ぼすショットブラストの効果，鋼構造年次論文報告集，第21巻，pp.809-813，2013.11.