

鉄道車両用台車枠グラインダ仕上げ溶接部の確率疲労特性

牧野 泰三* 加藤 孝憲 (日本製鉄)

亀甲 智 下川 嘉之 富永 知徳 (日本製鉄)

Probabilistic fatigue property of grinder-finished welds in railway bogie frames

Taizo Makino*, Takanori Kato, (Nippon Steel Corporation)

Satoshi Kikko, Yoshiyuki Shimokawa, Tomonori Tominaga, (Nippon Steel Corporation)

Grinder-finished welds are typically used in railway bogie frames to meet the fatigue strength requirements of welded parts. However, the probabilistic fatigue property of grinder-finished welds has not been clarified. In this paper, several grinder-finished load-carrying cruciform welded joint specimens were fatigue-tested and their probabilistic fatigue properties evaluated. The evaluation results showed that the fatigue strength at 2×10^6 cycles for a failure probability of 0.1% was higher than the JIS E 4207⁽¹⁾-defined allowable stress of grinder-finished welds and even that of non-welded parts.

キーワード：鉄道車両，台車枠，グラインダ仕上げ溶接部，確率疲労特性，破壊確率， $P-S-N$ 曲線，応力除去焼鈍，母材強度

(Railway vehicle, Bogie frame, Grinder-finished weld, Probabilistic fatigue property, Failure probability, $P-S-N$ curve, Stress relief annealing, Strength of base metal)

1. 緒言

鉄道車両用台車枠は、車両の走行、駆動・制動、曲線通過にともない、複雑な動荷重を受ける溶接構造部材である。このため、長期の使用に対する強度耐久性を確保しておく必要がある。現状では、JIS 規格 (JIS E 4207⁽¹⁾, JIS E 4208⁽²⁾) に準じた設計と長年の実績に基づく経験によってそれに対応している。JIS E 4207⁽¹⁾では溶接後非仕上げ (As-weld) 部に対し、溶接後グラインダ (G) 仕上げ部では高い許容応力が規定されていることから、高応力が作用する部位では、G 仕上げが多用されてきた。台車枠で用いられる G 仕上げは、鋼構造物や船舶などで見られる止端部のみを滑らかに仕上げるもの^{(3),(4)}とは異なり、余盛を大きく追加した上で、余盛全体を板厚以上の曲率半径の R 形状にグラインダで成形するものである。このような特殊な G 仕上げについてはその疲労試験データが少なく⁽⁵⁾、疲労信頼性評価に必要な確率疲労特性についてはほとんどない。

このため、溶接構造用圧延鋼材 SM400B および SM490YB による、上記した台車枠特有の G 仕上げを施工した荷重伝達型十字溶接継手について、多数の疲労試験を行った。そして、その確率疲労特性を評価し、JIS E 4207⁽¹⁾に規定された許容応力と比較した。さらに、疲労強度に及ぼす応力除去焼鈍と母材強度の影響について考察した。

2. 供試材、試験片、および疲労試験方法

〈2・1〉 供試材および試験片 供試材は JIS SM400B および SM490YB の板厚 8 または 9 mm の圧延鋼材である。表 1 にその機械的性質を示す。これらを母材として溶接金属 JIS YGW-15 および YGW-19 を用いて開先付荷重伝達型十字溶接継手を製作した。製作にあたっては通常の As-weld に対し、余盛を大きく追加した上で余盛全体を R 形状にグラインダで成形した。図 1 に試験片形状の一例を示す。図では試験部の幅が 16.5 mm であるが、一部 27 mm、50 mm のものがある。溶接部の R 端ではグラインダ仕上げによるすり込みが生じるが、その深さを 0.5 mm 以下となるようにした。目違いは最大 1.31 mm、角折れは最大 0.006 rad であった。また、SM490YB による一部の試験片について応力除去焼鈍を行った。

表 1 母材部の機械的性質

Table 1. Mechanical properties of the base metals.

Steel type	YP [MPa]	UTS [MPa]	El. [%]	R.A. [%]
SM400B	364	473	32	70
SM490YB	365 - 411	511 - 578	27 - 41	71 - 76

YP: 0.2% proof stress, UTS: ultimate tensile strength, El.: elongation, R.A.: reduction of area.

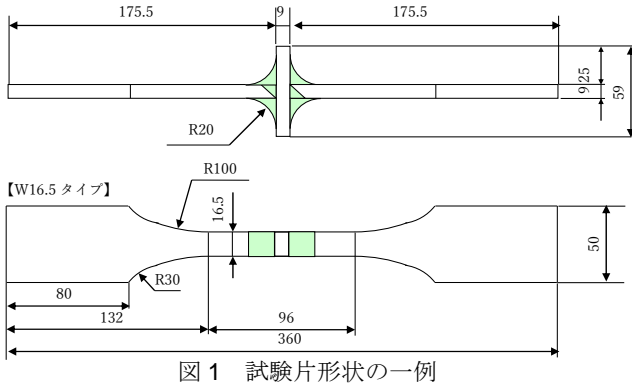


図 1 試験片形状の一例

Fig. 1. An example of the specimen configuration.

〈2・2〉 疲労試験方法 試験片には予め図 2 に示す位置にゲージ長 5mm のひずみゲージを貼付し、静荷重試験を行い、荷重とひずみとの関係の評価した。疲労試験の荷重方式は、軸荷重と曲げである。図 3 に曲げ疲労試験時の荷重方式の模式図を示す。4 点曲げのため、溶接部のある中央の支持点間では曲げモーメントが均一となっている。応力比 R は、軸荷重において 0.05, 0.4, 曲げにおいて -1 である。疲労試験機には、容量 50 ~ 200 kN の電気油圧サーボ型疲労試験機を用いた。

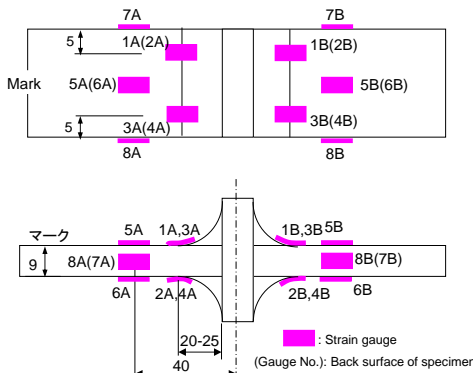


図 2 試験片におけるひずみゲージ貼付位置

Fig. 2. Strain gauge attachment location on the specimen.

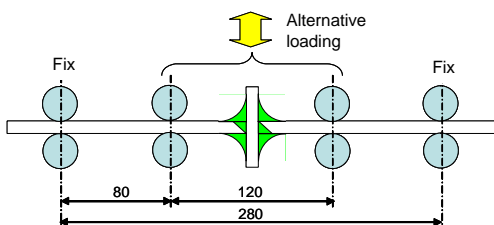


図 3 曲げ疲労試験時の荷重方式の模式図

Fig. 3. Schematic of the loading method in the bending fatigue test.

3. G 仕上げ溶接部の確率疲労特性

〈3・1〉 S-N 線図 図 4 に疲労試験を行って得られた

S-N 線図を示す。図では、破断した試験片については起点近くに貼付されたひずみゲージによる応力 (ゲージ応力) の範囲を、未破断試験片については試験片中で最も高いゲージ応力範囲を、縦軸として評価に用いた。これより、SM490YB の $R = -1$ が最も高疲労強度、続いて SM490YB の $R = 0.05$ となることがわかる。これ以下は SM490YB の $R = 0.4$ と SM400B の $R = 0.05, 0.4$ であったが、その中では疲労強度の差異が明確ではなかった。このため、図中の実験データを統計処理することで、ばらつきを含めて評価した。

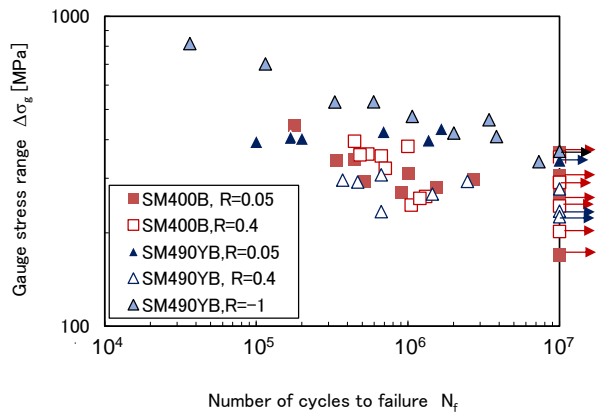


図 4 S-N 線図

Fig. 4. S-N diagram.

〈3・2〉 P-S-N 曲線および疲労強度

図 5 に、図 4 の実験データのそれぞれの系列について評価した P-S-N 曲線の例を示す。評価にあたっては、日本材料学会標準⁽⁶⁾に従い、応力範囲の対数の残差二乗和を最小化するように S-N 曲線を近似し、標準偏差を求めた。そして、最小破断応力範囲と、これより高い未破断応力がなければ、最大未破断応力との平均を疲労限度とした。最小破断応力範囲より高い未破断応力がある場合は、最小破断応力を疲労限度とした。図中には標準偏差の ±3 倍を中央近似線 (50%破壊確率) から増減した 0.1%および 99.9%破壊確率に対応した P-S-N 曲線を示している。全てのプロット点が P-S-N 曲線で囲まれた範囲内にあることがわかる。なお、SM490YB の $R = 0.05$ については実験データが少ないために、S-N 曲線の近似ができなかった。

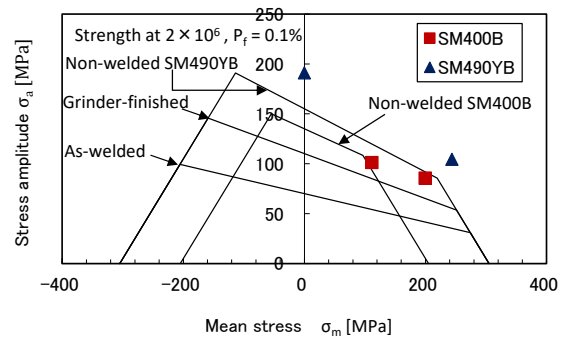
表 2 に、P-S-N 曲線の導出にともなって得られた破壊確率 50% と 0.1% に対応した 2×10^6 回時間強度、ならびに破壊確率 50%, 2.3%, および 0.1% に対応した 1×10^7 回時間強度 (いずれもゲージ応力範囲) を示す。なお、SM490YB の $R = 0.4$ では、S-N 曲線の折れ曲がり点が 1×10^7 回より大きくなったので、折れ曲がり点 (6.84×10^7 回) における時間強度についても付記している。

〈3・3〉 JIS E 4207⁽¹⁾による許容応力との比較

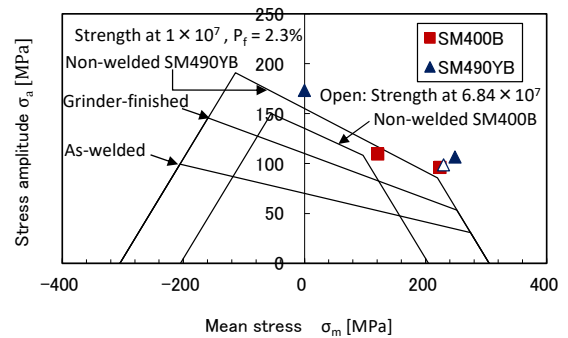
ここでは、前節で得られた各時間強度と JIS E 4207 に規定された許容応力⁽¹⁾とを比較する。JIS E 4207 において母材の許容応力は試験片疲労強度の 80%とされ、その根拠は、変動係

数を 0.06 と仮定して 0.1%破壊確率を考慮することにある⁽¹⁾。また、As-weld 部の許容応力は、0.1%破壊確率の 2×10^6 回時間強度に近い⁽¹⁾、との記述があるが、G 仕上げ部については明確な記述がない。そこで、図 6 の耐久限度線図において、各時間強度と JIS E 4207 の許容応力⁽¹⁾を比較して示す。図(a)では、0.1%破壊確率の 2×10^6 回時間強度をプロットしているが、SM400B, SM490YB とも G 仕上げ部の許容応力より高く、さらにそれぞれの母材部の許容応力、もしくは降伏点よりも高いことがわかる。図(b)には、2.3%破壊確率の 1×10^7 回時間強度をプロットしているが、上記した図(a)の傾向と同様であった。以上の結果は、G 仕上げ部について JIS E 4207 の許容応力⁽¹⁾を用いて設計した場合、As-

weld 部と比較して疲労安全性において余裕があること、G 仕上げ部は母材部と同等の疲労強度を有する可能性があることを示唆している。

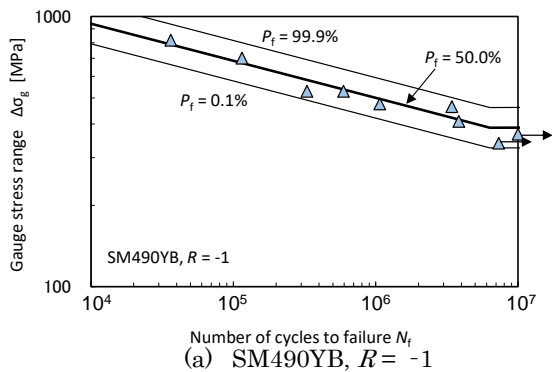


(a) Strength at 2×10^6 cycles and failure probability of 0.1%

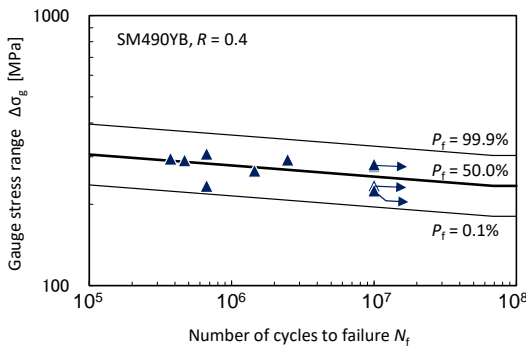


(b) Strength at 1×10^7 cycles and failure probability of 2.3%

図 6 時間強度と JIS E 4207⁽¹⁾の許容応力との比較
Fig. 6. Comparison of the fatigue strength and allowable stress defined in JIS E 4207⁽¹⁾.



(a) SM490YB, $R = -1$



(b) SM490YB, $R = 0.4$

図 5 P-S-N 曲線の例

Fig. 5. Examples of the P-S-N curve.

表 2 各破壊確率に対応した疲労強度

Table 2. Fatigue strength at each failure probability.

Steel type	R	Strength at 2×10^6 cycles*		Strength at 1×10^7 cycles*		
		50%	0.1%	50%	2.3%	0.1%
SM400B	0.05	274	202	268	219	198
	0.4	245	171	245	192	171
SM490YB	-1	454	382	388	346	327
	0.05	-	-	368	-	-
	0.4	270	209	253	213	195
				234*	197*	181**

*: gauge stress range [MPa]

** : strength at 6.84×10^7 cycles (knee point on the S-N curve)

4. 考察

〈4.1〉 応力除去焼鈍の影響 2 節で述べた通り、SM490YB による一部の試験片について応力除去焼鈍 (SR) を行った。SR 条件は、 $625^\circ\text{C} \times 1.5\text{hr}$ 保持後炉冷である。SR していない試験片では、溶接部 R 端付近の表面および 0.1 mm 深さにおける試験片長手方向残留応力が、 $-282 \sim +217\text{MPa}$ と大きくばらついていた。SR 処理を行うことで残留応力は消失すると考えられる。図 7 に、SM490YB の $R = 0.05$ と 0.4 について S-N 線図上で SR の有無を比較して示す。ここで、SR 未処理品と処理品では引張強さが異なるので、図の縦軸を引張強さで正規化したゲージ応力範囲とした。これより、 $R = 0.05, 0.4$ のいずれも、SR 有無によらず、それぞれほぼ同じ寿命曲線上にあることがわかる。以上より、本研究で評価した SM490YB による G 仕上げ溶接部の $R = 0.05, 0.4$ の条件では SR の影響は認められなかった。

SR の影響については、長瀬⁽⁷⁾が台車枠溶接部を想定して SM400B による余盛削除した肉盛溶接部を設けた試験片を

用いて評価している。その結果、SR 前の残留応力が 400 MPa を超えていたにもかかわらず、SR しても疲労強度には変化がなかったことを確認している⁽⁷⁾。一方、台車枠用途以外のブラケット溶接部⁽⁸⁾や U リブ鋼床版⁽⁹⁾では、SR によって疲労強度が向上することが報告されている。残留応力が疲労強度に影響することは自明であるので、SR によって引張残留応力が低減されれば、疲労強度は向上するはずである。しかしながら、本研究で用いた試験片のように SR 前に圧縮から引張まで残留応力がばらばらについている場合や、片振り条件下で最大応力が降伏点付近に達し、疲労試験中に残留応力が減衰する場合では、SR の影響が疲労強度に明確には現れないものと考えられる。

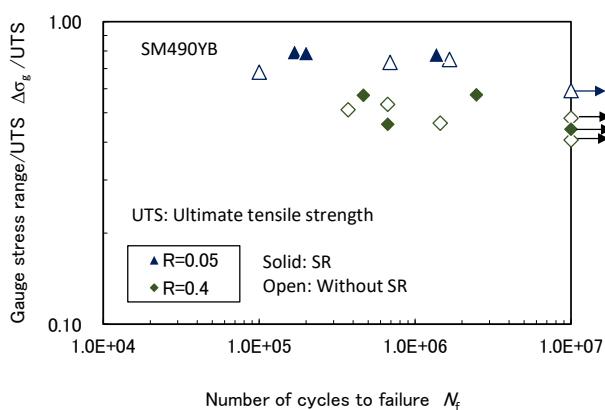


図 7 正規化した $S-N$ 線図における SR 有無の比較
Fig. 7. Comparison of the normalized $S-N$ diagram with and without stress relief annealing.

(4.2) 母材強度の影響 図 8 に、3 節で得られた 1×10^7 回時間強度と母材強度 (引張強さ) との関係を示す。これより、母材強度の上昇とともに 1×10^7 回時間強度が上昇していることがわかる。図中には 2.3%破壊確率に対応した白抜きのプロット点と原点を結んだ線も示しており、この線を 2.3%破壊確率の 1×10^7 回時間強度の引張強さ依存性を表す線と定義する。ただし、同じ応力比で複数のプロット

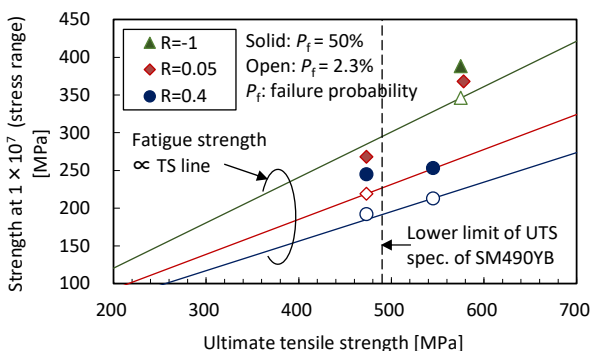


図 8 1×10^7 回時間強度と母材強度 (引張強さ) との関係
Fig. 8. Relationship between the strength at 1×10^7 cycles and tensile strength of the base metal.

点がある場合は低い側を採用した。また、図中に SM490YB の規格下限の引張強さを破線で示す。この下限の引張強さと 2.3%破壊確率の 1×10^7 回時間強度の引張強さ依存性の線との交点について、JIS E 4207 の許容応力と比較した。その結果、下限の引張強さであっても、2.3%破壊確率の 1×10^7 回時間強度は、G 仕上げ部の許容応力よりも高く、SM490YB 母材の許容応力に近いレベルであった。なお、母材の引張強さが規格下限近くになる確率はかなり低いことから、上記した時間強度のレベルとなる確率は 2.3%より大幅に低いことが予想される。

5. 結言

台車枠特有の G 仕上げを施工した荷重伝達型十字溶接継手について、疲労試験を行い、確率疲労特性を評価した。その結果、以下のことがわかった。

(1) 0.1%破壊確率に対応した 2×10^6 回時間強度および 2.3%破壊確率に対応した 1×10^7 回時間強度は、JIS E 4207⁽¹⁾に規定された G 仕上げ部の許容応力はおろか、母材部の許容応力より高いレベルであった。この結果は、G 仕上げ部について JIS E 4207⁽¹⁾の許容応力を用いて設計した場合、As-weld 部と比較して疲労安全性において余裕があること、G 仕上げ部は母材部と同等の疲労強度を有する可能性があることを示唆した。

(2) 疲労強度に及ぼす応力除去焼鈍の影響は、本研究で評価した G 仕上げ溶接部の $R = 0.05, 0.4$ の条件では認められなかった。

(3) 母材強度の上昇とともに疲労強度 (1×10^7 回時間強度) は上昇していた。SM490YB の規格下限の引張強さにおける 2.3%破壊確率に対応した 1×10^7 回時間強度を見積もったところ、JIS E 4207⁽¹⁾の G 仕上げ部の許容応力より高いレベルであった。

文 献

- (1) 日本産業規格:「JIS E 4207, 鉄道車両一台車一台車枠設計通則」, 日本規格協会 (2019)
- (2) 日本産業規格:「JIS E 4208-1, 鉄道車両一台車強度試験-第一部: 静荷重試験方法」, 日本規格協会 (2021)
- (3) 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, pp.214-215. (1998)
- (4) KA Macdonald:「Fracture and fatigue of welded joints and structures」, Woodhead publishing, pp.310-313, (2011)
- (5) 森猛, 藤平正一郎, 射越潤一, 藤木修:「十字継手の疲労強度に対する溶接部仕上げの効果」, 鋼構造論文集, Vol.13, No.51 pp.39-48
- (6) 日本材料学会標準:「JSMS-SD-6-04, 金属材料疲労信頼性評価標準-S-N 曲線回帰法」, (2004)
- (7) 長瀬隆夫:「鋼製溶接構造台車枠の疲労強度」, 研友社, pp.127-129. (2010)
- (8) 佐藤正信, 山本豊, 柳下公男:「ブラケット溶接部の疲労強度向上に及ぼす応力除去焼鈍及びワイヤピーニングの効果」, 溶接学会全国大会講演概要 pp.280-281, (1982)
- (9) 廣畑 幹人, 伊藤 義人:「熱処理による溶接残留応力の低減が U リブ鋼床版の耐疲労性に及ぼす影響」, 溶接学会平成 28 年春季全国大会講演概要, pp.102-103, (2016)