

## 曲げ疲労強度向上が可能なテルミット溶接工法

高木 雄太\* 寺下 善弘 山本 隆一 (鉄道総合技術研究所)

Aluminothermic Welding Method that can Improve Bending Fatigue Strength  
Yuta Takagi\*, Yoshihiro Terashita, Ryuichi Yamamoto, (Railway Technical Research Institute)

We have developed a welding method that improves the bending fatigue strength of aluminothermic welds and provides a margin against fatigue failure. However, small unmelted parts may remain at the mold collar edge of the top surface of the rail foot in this welding method. Therefore, it was necessary to remove the unmelted part by grinding. In order to solve this issue, we improved the shape of mold and performed a lot of tests on welded specimens which were produced under the various conditions of preheating time and welding gap.

キーワード：テルミット溶接，曲げ疲労強度，未溶融部，応力集中

(Keywords, aluminothermic welding, bending fatigue strength, unmelted part, stress concentration)

### 1. はじめに

テルミット溶接法は、東海道新幹線建設当時に曲げ疲労強度の低い国産のテルミット溶接部で多数損傷が発生した<sup>①</sup>ことから、未だに新幹線高速区間への適用が制限されている。そのため、新幹線の現場溶接法(三次溶接法)として確立された緊張ガス圧接法<sup>②</sup>の施工数は増加しているが、レール移動を許容できない分岐器付近の施工には適さない。また、エンクローズアーク溶接法(半自動含む)においては、高度な技量を要するため、技術者の高齢化などに伴う技術者不足の課題に直面している。

鉄道総研では、テルミット溶接部の曲げ疲労強度(200N/mm<sup>2</sup>程度)をエンクローズアーク溶接部(超音波探傷検査で欠陥等級が無級の場合、270N/mm<sup>2</sup>)と同等程度まで向上させて疲労破壊に余裕度を持たせる工法のひとつとして、余盛形状を改良したモールドの使用と余盛止端部表面の研削を組合せる工法(以下、「改良工法」という)を開発<sup>③</sup>した。しかしながら、改良工法では、底部上面余盛止端部にわずかな未溶融部が残存する可能性があるため、当該箇所を研削加工する必要があった(図1, 図2参照)。

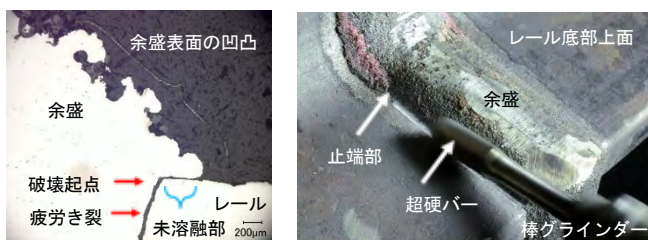


図1 余盛止端部の未溶融部

図2 余盛止端部の研削

本報告では、底部上面余盛止端部の未溶融部を解消するために実施したモールド形状の一部改良、予熱時間や開先間隔を変更した溶接試験および作製した溶接試験体に対する各種試験の結果について述べる。

### 2. 試作モールドの形状

曲げ疲労強度向上を目的に、レール底部上面およびレール底面の余盛止端部形状がなだらかになるようモールドの内部形状を変更することで、余盛止端部では溶鋼が充填される領域が小さくなり、結果としてレール端部が熔融しにくく、未溶融部の発生に繋がった。一方、レール端部の溶融量を大きくするためには、溶鋼が充填される領域を拡大することが有効であるが、その場合、応力が集中しやすい止端部形状となるため、曲げ疲労強度が向上しない。

上記を考慮して試作したモールド形状を図3に示す。溶接残留応力が圧縮となるため、曲げ疲労強度に影響を及ぼさないレール底面は溶鋼の充填領域が大きい現行モールドと同様の直角形状、曲げ疲労強度に影響を及ぼすレール底部上面は2種類のなだらかな形状とした。また、レール底部上面および底面の鑄バリの発生を抑制する観点から3分割

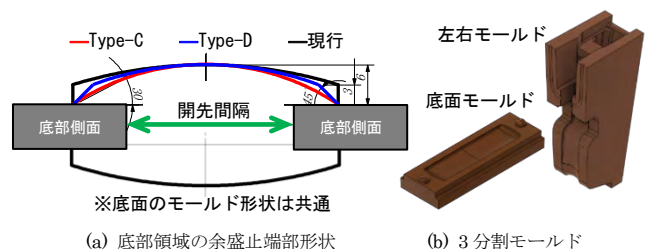


図3 試作したモールド

のモールドとした。ここで、レール底部上面の余盛止端部の角度を 30° としたものを Type-C (赤線), 45° としたものを Type-D (青線) とし、いずれも余盛高さが現行の 6mm となるよう余盛形状の半径を決定した。なお、底面モールドの内部形状は Type-C, D ともに同じである。

### 3. 溶接試験体の作製

表 1 に試験体作製時の溶接条件の一例を示す。溶接試験体の作製では、開先間隔を標準条件 (腹部で 25mm を目安)、あるいはモールド内部 (余盛形成領域) に突き出すレールの長さを短くして、溶鋼充填領域を拡大する広い開先 (腹部で 29mm または 27mm を目安) に設定するとともに、予熱時間を標準 (150 秒) より 30 秒程度延長した。また、予熱時間のさらなる延長に伴うモールドの溶損を考慮し、予熱時の酸素ボンベ圧力を標準 (0.5MPa) より 0.1MPa 下げた 0.4MPa として検討することとした。

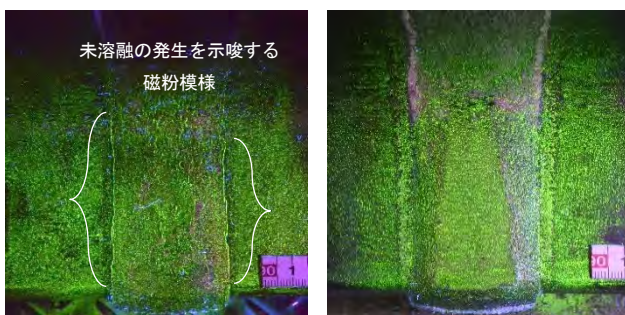
表 1 試験体作製時の溶接条件の一例

条件	モールド	開先間隔 (mm)	予熱時間 (秒)	酸素ボンベ圧力 (MPa)
C-0	Type-C	25	150	0.5
C-1		25	180	
C-2		27	180	
C-3		29	180	
C-4		25	195	
D-1	Type-D	25	180	0.4
D-2		29	180	
C-5	Type-C	25	270	
C-6		29	270	

### 4. 試験体に関する各試験結果

#### 〈4-1〉 底部上面余盛止端部に対する磁粉探傷試験

底部上面余盛止端部における未溶融部の発生状況を簡易に確認するため、磁粉探傷試験を実施した。図 4 に磁粉探傷試験結果の一例を示す。予熱時間を延長あるいは開先間隔を拡大した溶接条件で作製した試験体で未溶融部の抑制効果が認められたが、同じ条件 (複数の試験体を作製した C-1 および D-1) でもばらつきが認められた。なお、開先間隔を 29mm



(a) 開先 25mm 予熱 150 秒 (C-0) (b) 開先 29mm 予熱 180 秒 (C-3)

図 4 底部上面余盛止端部に対する磁粉探傷試験の一例

に拡大し、予熱時間を 180 秒とした溶接条件 (C-3, D-2)、開先間隔を 25mm とし、予熱時間を 195 秒とした溶接条件 (C-4) および酸素ボンベ圧を 0.4MPa とし、予熱時間を 270 秒とした溶接条件 (C-5, C-6) で作製した試験体には、未溶融部の発生を示唆するきず磁粉模様は認められなかった。

#### 〈4-2〉 曲げ疲労試験

試作モールドおよび各溶接条件で作製した溶接部の曲げ疲労強度を評価するため、レール底部領域に引張応力の作用する HU (頭部上向き) 姿勢にて、支点間距離 1,300mm, 中央載荷点距離 150mm, 繰返し速度 3Hz の 4 点曲げ疲労試験を実施した。試験は、最小応力を 30N/mm<sup>2</sup> とする片振り条件を採用し、繰返し数 200 万回を限度とし、破断の有無で曲げ疲労強度を評価した。なお、試験条件における応力全振幅は、磁粉探傷試験結果や開先間隔および予熱時間、さらには実施した曲げ疲労試験結果を考慮して設定し、未破断の場合は、さらに 30N/mm<sup>2</sup> 増して再度曲げ疲労試験に供した。表 2 に試験結果を整理して示す。

表 2 曲げ疲労試験結果

試験体 No.	試験体作製条件の詳細	応力全振幅 (N/mm <sup>2</sup> )	繰返し数 (回)	破断の有無
D-1	Type-D MT 結果: 良 開先 25mm 予熱 180 秒	210	829,877	破断 (上面余盛止端部)
D-2	Type-D MT 結果: 良 開先 29mm 予熱 180 秒	240	377,847	破断 (上面余盛止端部)
C-1-①	Type-C MT 結果: 良 開先 25mm 予熱 180 秒	270	471,478	破断 (上面余盛止端部)
C-1-②	Type-C MT 結果: 否 開先 25mm 予熱 180 秒	210	576,022	破断 (上面余盛止端部)
C-2	Type-C MT 結果: 否 開先 27mm 予熱 180 秒	210	2,000,000	未破断 (試験後の UT で底部二探触子法 22%)
C-3	Type-C MT 結果: 良 開先 29mm 予熱 180 秒	240	1,869,797	破断 (レール母材底面)
C-4	Type-C MT 結果: 良 開先 25mm 予熱 195 秒	240	2,000,000	未破断
	- // -	270	602,321	破断 (上面余盛止端部)
C-5	Type-C MT 結果: 良 開先 25mm 予熱 270 秒 酸素ボンベ圧 0.4MPa	270	895,459	破断 (上面余盛止端部)
C-6	Type-C MT 結果: 良 開先 29mm 予熱 270 秒 酸素ボンベ圧 0.4MPa	240	1,352,010	破断 (上面余盛止端部)

※MT: 磁粉探傷検査, UT: 超音波探傷検査

図 5 に曲げ疲労試験で破断した試験体の外観 (D-2) を示す。底部上面余盛止端部の角度を 45° とした Type-D モールドで作製した試験体 (D-1, D-2) は、磁粉探傷試験において未溶融部を示唆する明確なきず磁粉模様は認められなかったが、210N/mm<sup>2</sup> および 240N/mm<sup>2</sup> の応力全振幅の疲労試験条件で、底部上面余盛止端部から疲労き裂が発生、進展し、それぞれ 82 万回, 37 万回の繰返し数で破断した。一方、磁粉探傷試験で底部上面余盛止端部にきず磁粉模様が認められ



図 5 曲げ疲労試験で破断した試験体の外観 (D-2)

た試験体 (C-1-②, C-2) は、応力全振幅を  $210\text{N/mm}^2$  まで下げた条件でも、57 万回の繰り返し数で破断、または 200 万回載荷後の超音波探傷試験で疲労き裂の発生を検知した。

図 6 に曲げ疲労試験で破断した試験体 (C-3) の外観を示す。開先間隔を  $29\text{mm}$  に拡大し、予熱時間を 180 秒とした条件で作製した、きず磁粉模様が認められなかった当溶接部は、応力全振幅  $240\text{N/mm}^2$  で溶接中心から約  $100\text{mm}$  離れたレール母材底面が破壊起点となり破断した。なお、レール母材から破断した要因は、新品レール底面に存在した錆びと考慮しており、実軌道においては、 $240\text{N/mm}^2$  達するような応力は作用していない。また、開先間隔を標準の  $25\text{mm}$  とし、予熱時間を 195 秒に延長した条件で作製した、きず磁粉模様が認められなかった試験体 (C-4) は、応力全振幅  $240\text{N/mm}^2$  の 200 万回曲げ疲労強度を有していた。その後、最大応力を  $30\text{N/mm}^2$  大きくした  $270\text{N/mm}^2$  の条件に供した結果、60 万回の繰り返し数で、底部上面余盛止端部から破断した。

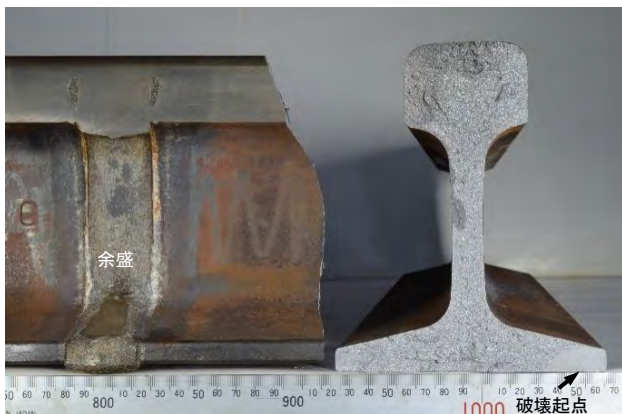


図 6 曲げ疲労試験で破断した試験体の外観 (C-3)

なお、予熱時の酸素ボンベ圧力を標準 ( $0.5\text{MPa}$ ) より  $0.1\text{MPa}$  下げた  $0.4\text{MPa}$  で、予熱時間を 270 秒とし、開先間隔を  $29\text{mm}$  に拡大した条件で作製した、きず磁粉模様が認められなかった試験体 (C-6) は、応力全振幅  $240\text{N/mm}^2$  のもと、135 万回の繰り返し数で、底部上面余盛止端部から破断した。

図 7 に曲げ疲労試験で破断した破断面を突き合わせて、疲労き裂の起点付近でレール長手方向に切断して観察した底部

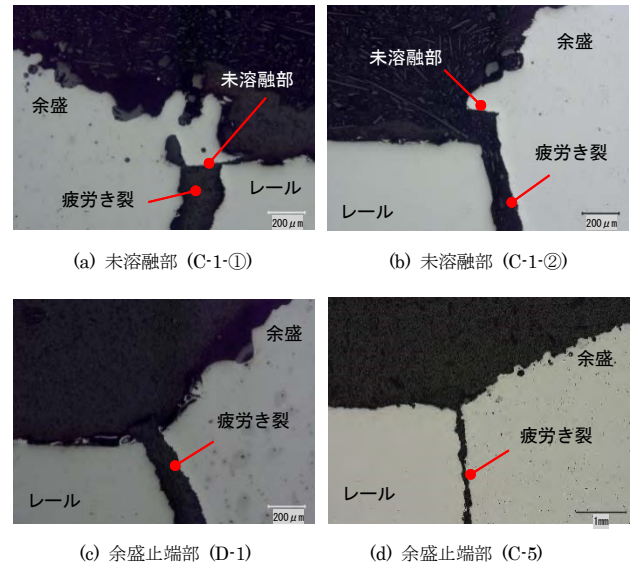


図 7 曲げ疲労試験で破壊起点となった余盛止端部の拡大

上面余盛止端部のマイクロ形態を示す。磁粉探傷試験できず磁粉模様が認められなかった試験体 (C-1-①) にも、きず磁粉模様が認められた試験体 (C-1-②) と同様に、わずか  $200\mu\text{m}$  程度の未溶融部が存在しており、この部位への応力集中によって疲労き裂が発生したと推定される (a 図, b 図)。この結果から、わずかな未溶融部の発生は、磁粉探傷試験で検知することは困難であると言える。一方で、底部上面余盛止端部の角度を  $45^\circ$  とした Type-D モールドで作製した試験体 (D-1) の破壊起点部に未溶融部は観察されていないが、応力全振幅  $210\text{N/mm}^2$  で底部上面余盛止端部 (余盛と被溶接レールとの境界) から破断している (c 図)。したがって、未溶融部の発生を解消しても Type-C モールドに比べて余盛止端部の角度が大きい Type-D モールドを使用した溶接試験体では、余盛止端部形状に伴う応力集中が大きくなり、曲げ疲労強度が低下すると考えられる。また、試験体 C-5 については、未溶融部の発生は認められなかったが、試験体 D-1 と同様に底部上面余盛止端部で破断している (d 図)

図 8 には、予熱時間の延長および開先間隔の拡大によるレールの溶融に対する効果を検証するため、試験体 C-0 と試験体 C-3 の底部側面から約  $40\text{mm}$  内側の位置で採取した底部上面余盛止端部の断面をピクリン酸腐食液によるエッチング処理によって、介在物を現出させて溶融境界を明瞭にした状況を示す。試験体 C-0 は、余盛内に溶融境界が位置しており、

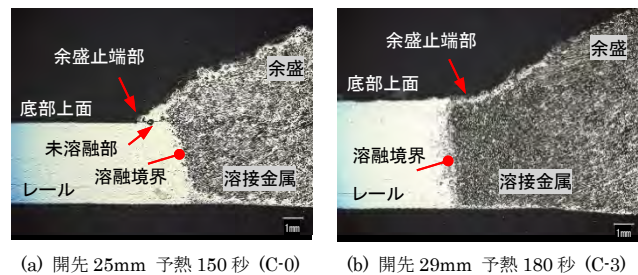


図 8 底部余盛止端部におけるレールの溶融状況

未溶融部も発生している。一方で、試験体 C-3 では、曲げ疲労試験で余盛止端部ではなく、レール母材から破断したように、底部上面余盛止端部を超える位置までレールが溶融されている。

曲げ疲労試験の結果、応力全振幅  $240\text{N/mm}^2$  の曲げ疲労試験において、試験体 C-3 は、余盛止端部ではなくレール母材からの破断であったこと、および試験体 C-4 は、未破断であったことから、未溶融部の発生を抑制することで曲げ疲労強度が向上する傾向が認められた。その一方で、試験体 C-4 および試験体 C-5 において、未溶融部を解消したにもかかわらず、全応力振幅  $270\text{N/mm}^2$  で 200 万回に達する前に破断した要因としては、底部上面余盛止端部表面の僅かな凹凸への応力集中および予熱時間の延長に伴う溶接残留応力の変化の可能性はある。しかしながら、実軌道においては、 $240\text{N/mm}^2$  および  $270\text{N/mm}^2$  に達するような応力は作用していない。

#### (4-3) マクロ組織観察

ここでは、予熱時間の延長と開先間隔の拡大による未溶融部の抑制効果を個別に評価するため、予熱時間と開先間隔を系統的に変化させた条件で作製した試験体における各部の溶接金属幅を確認した。図 9 にマクロ組織観察のための試験片採取位置を、図 10 に試験体 C-3 から採取して観察した底部足部水平断面（底面上 12mm）および底部足部縦断面（底部側面から 40mm）のマクロ組織を示す。10%硝酸アルコール溶液によるエッチング処理によって、溶接金属が明瞭に識別できる。

また、表 3 には、図 10 に示す各部位で測定した溶接金属幅を、溶接条件の異なる試験体で観察して測定した値と比較して示す。試験体 C-3 は、試験体 C-0 と比較して、底部足部水平断面のレールの溶融を含む溶接金属の幅は、底部側面から 65mm 内側 (①) で 9mm、最小溶融部 (②) で 8mm 増加していた。また、底部足部縦断面の溶接金属幅は、底部上面 (④) で 6mm、最小溶融部 (⑤) で 8mm 増加していた。なお、試験体 C-1 は、溶接金属幅が試験体 C-0 と比較して大きい傾向が認められるものの、曲げ疲労強度に特に影響が大きいと考えられる①②④については 4mm 以下の増加であった。したがって、予熱時間の延長に加えて、開先間隔を拡大することで未溶融部の抑制効果が高まることが確認できた。

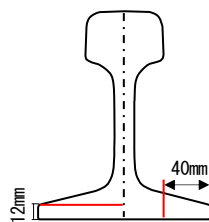
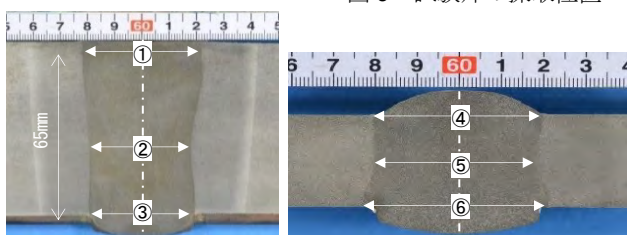


図 9 試験片の採取位置



(a) 底部水平断面（底面上 12mm） (b) 底部足部縦断面（底部側面から 40mm）

図 10 観察したマクロ組織の一例 (C-3)

表 3 各部位で測定した溶接金属幅 (mm)

No 条件		C-0	C-1	C-3
		開先 25mm 予熱 150 秒	開先 25mm 予熱 180 秒	開先 29mm 予熱 180 秒
①	底部上 65	35	39	44
②	底部上最小	30	33	38
③	底部上端部	36	38	39
④	足部 40 上面	35	38	41
⑤	足部 40 最小	31	36	39
⑥	足部 40 底面	41	46	43

## 5. まとめ

鉄道総研が開発した、曲げ疲労強度向上を可能とした改良工法は、底部上面余盛止端部にわずかな未溶融部が残存する可能性があるため、当該箇所を研削加工する必要があった。そこで、モールド形状を一部改良するとともに、未溶融部の発生を抑制するため、予熱時間や開先間隔を変更して作製した溶接試験体に対する各種試験を実施した。その結果をまとめると以下の通りである。

(1) 未溶融部の解消および曲げ疲労強度の向上を目的に、底部の余盛止端部形状を変更した 3 分割モールドを 2 種類試作した。曲げ疲労試験の結果、底部上面余盛止端部の角度を  $45^\circ$  として溶鋼の充填領域を少し拡大した Type-D は、余盛止端部の角度を  $30^\circ$  とした Type-C に比べて余盛止端部への応力集中が大きくなり、曲げ疲労強度が小さくなる傾向となった。

(2) 底部上面余盛止端部に対する磁粉探傷試験の結果、予熱時間の延長あるいは開先間隔を拡大した試験体で未溶融部の抑制効果が認められた。また、マクロ組織観察の結果、予熱時間の延長に加えて、開先間隔を拡大することで、溶接金属幅が顕著に増加することが確認できた。

(3) 予熱時間の延長や開先間隔の拡大を実施し、未溶融部を解消した試験体を曲げ疲労試験に供した結果、応力全振幅  $240\text{N/mm}^2$  の 200 万回曲げ疲労強度を有することを確認した。

(4) 未溶融部を解消したにもかかわらず、応力全振幅  $270\text{N/mm}^2$  で 200 万回に達する前に破断した要因としては、底部上面余盛止端部表面の僅かな凹凸への応力集中および予熱時間の延長に伴う溶接残留応力の変化の可能性はある。

## 文 献

- (1) 栗原利喜雄：「レール損傷に関する研究」，鉄道技術研究報告，No.1188，pp.284-299 (1981)
- (2) 大島崇史：「わかりやすい保線技術 緊張ガス圧接」，新線路，Vol.72，No.10，pp.93-94(2018)
- (3) 寺下善弘，山本隆一，岩崎幹大，相澤宏行：「曲げ疲労強度の向上が可能なアルミット溶接工法の開発」，鉄道総研報告，Vol.35，No.4 pp.11-16(2021)