

曲げ疲労強度の向上が可能な テルミット溶接工法の開発

寺下 善弘* 山本 隆一*
岩崎 幹大* 相澤 宏行*

**Development of the Aluminothermic Welding Method
that can Improve Bending Fatigue Strength**

Yoshihiro TERASHITA Ryu-ich YAMAMOTO
Mikihiro IWASAKI Hiroyuki AIZAWA

An aluminothermic welding method was introduced in Japan from Germany in 1979 is the most popular welding process on conventional lines. However, the bending fatigue strength of the aluminothermic welding method is lower than that of other welding methods such as the enclosed arc welding method. For this reason, the application of the aluminothermic welding method on the Shinkansen lines has ever been restricted. On the other hand, the enclosed arc welding method, which is an on-track welding method for the Shinkansen lines, faces issues such as a shortage of engineers. So as to introduce the aluminothermic welding method to the Shinkansen lines, we develop the aluminothermic welding method that can improve bending fatigue strength.

キーワード：テルミット溶接，新幹線，曲げ疲労強度，残留応力，応力集中，余盛

1. はじめに

1979年にドイツのElektro-Thermit社から導入されたテルミット溶接法（通称，ゴールドサミット溶接）は、在来線で約40年の使用実績を有している。今日においてはその信頼性も導入当初から比べて格段に高くなり、JRグループにおける年間レール溶接施工数の約45%に適用されるまでに至っている。一方、新幹線では東海道新幹線建設に国産のテルミット溶接法が適用されたが、開業当初から溶接部の損傷が頻発して問題となり、それ以降、テルミット溶接法は新幹線での適用が制限されている¹⁾。上記の状況から、現在新幹線の現場溶接法（三次溶接）として確立された緊張ガス圧接法²⁾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、高度な技術を必要とする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おり、簡便かつ施工においてレール移動の必要ないテルミット溶接法の新幹線への適用が検討されている。

本研究では、テルミット溶接法の新幹線の高速区間への導入を目標として、エンクローズアーク溶接部と同程度まで曲げ疲労強度を向上させて疲労破壊に対する余裕度を持たせるための施工方法について検討した。

2. 曲げ疲労強度向上方法の検討

テルミット溶接法は他の溶接法のように加圧装置や電源を必要とせず、使用器具も簡便・軽量であるため機動性に富み、溶接時間も短いことから、三次溶接（本線に敷設されたレールを溶接する作業）に最も適している。しかしながら、図1に示すようにテルミット溶接部はあご部から底部まで余盛が存在しており、列車通過時にはその止端部に応力が集中する段差が存在している。また、レール溶接部には溶接に伴う熱サイクルによって溶接残留応力が生じる。テルミット溶接部では、上首部と下首部付近に大きな引張応力が残留しており、曲げ疲労試験



図1 テルミット溶接部の外観および曲げ疲労試験における破壊起点

* 軌道技術研究部 レールメンテナンス研究室

においては図1に示すようにレール底部上面の余盛止端部を破壊起点として疲労破壊することがわかっている。

以上のように、テルミット溶接部の曲げ疲労強度には、溶接残留応力と余盛止端部形状が影響すると考えられることから、これらの因子に着目し、改善を図ることを目標にして以下の2種類の工法について検討した。

2.1 溶接残留応力状態の改善

図2に新品テルミット溶接部の頭部および底部領域の溶接中心、かつ断面中心で改良型深穴穿孔法（MIRS法：Modified Internal Residual Stress）³⁾で測定したレール長手方向の残留応力状態を示す。底面近傍は約200MPaの圧縮残留応力が作用しているが、腹部領域に向かうにつれて引張応力側に移行し、下首部付近で最大200MPa程度の引張残留応力状態となっている。また、頭部領域では頭頂面近傍に約200MPaの圧縮残留応力が作用しているが、上首部に向かうにつれて圧縮残留応力の大きさが低下している。このように、断面積が大きくなる上首部および下首部付近は溶鋼の冷却速度が遅くなりやすく、それに起因して引張残留応力状態となり、曲げ疲労試験における破壊起点になっていると考えられる。

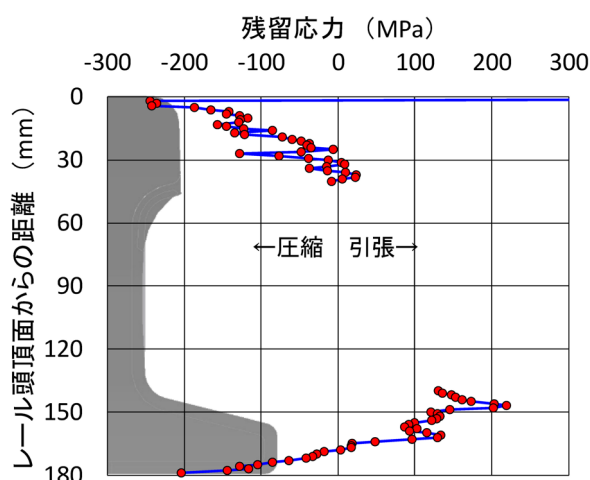


図2 溶接中心のレール長手方向残留応力



図3 余盛止端部へのピーニング処理

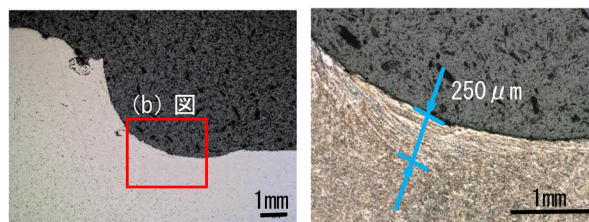
現行のテルミット溶接部の疲労性能を向上させるためにピーニング処理の適用について検討することにした。ピーニング処理は材料をたたくことによって表層に加工硬化層生成に伴う圧縮残留応力を付与し、材料の疲労性能を向上させる工法であり、対象とする箇所が限定される場合は比較的簡易な工具で処理が可能である。

ピーニング処理は図3に示すように、銅テルミット溶接レールボンドの施工にも使用されている市販の電気工具（振動ドリル）に鋼製たがねを装着し、余盛止端部に鋼製たがね先端を押し付けることによって施すこととした。処理範囲を上首部から底部上面とした場合、作業時間は1溶接部当たり3分程度であり、余盛止端部に鋼製たがね先端を十分押し付けることができれば、特別な技量を必要としない。なお、鋼製たがねについては、先端の曲率半径が1.5～3.0mmの範囲で3種類の先端工具を試作し、施工性などを含めて検討した。

図4にピーニング処理後のレール底部上面の余盛止端部の縦断面を示す。ピーニング処理を施すことによって、ほぼ直角な余盛止端部形状が鋼製たがねの先端形状に対応するように変形し、応力集中を低減できる滑らかな形状を呈していることがわかる。また、表層部を拡大して観察すると、ピーニングによる塑性流動が表面から深さ約250μmまで存在しており、十分な圧縮応力が付与できていると考えられる。なお、余盛止端部を完全に變形させる目的で鋼製たがねの先端形状を変化させたが、先端の曲率半径が1.5～3.0mmではいずれも隅角部を残すことなく変形可能であったことから、応力集中の低減効果を考慮して最も径の大きな鋼製たがねを選択することとした。

図5に余盛止端部にピーニング処理を行った試験体の表層部のひずみゲージ切断法により測定した残留応力状態を、現行の標準的な溶接部の残留応力状態と比較して示す。

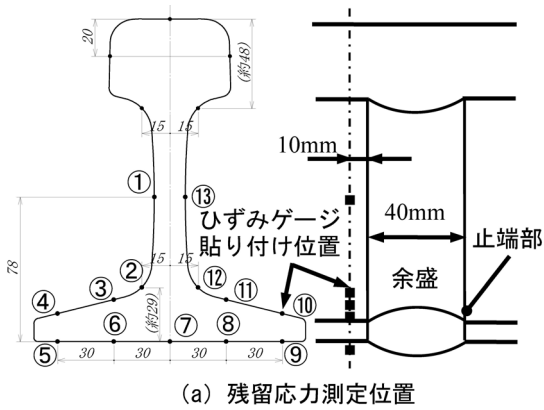
余盛止端部にピーニング処理を施すことにより、引張残留応力が作用している下首部から底部上面部にかけての領域に圧縮応力を付与できていることを確認した（図5中の②、③、⑪、⑫）。なお、底面の余盛止端部にもピーニング処理を施しているが、測定結果にピーニングの有無による大きな差は認められなかった。



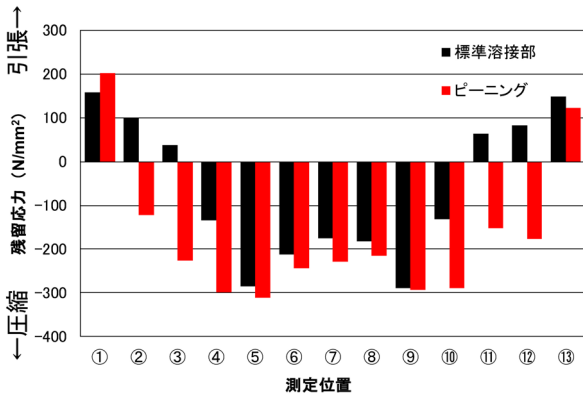
(a) 止端部形状

(b) 表層部拡大

図4 ピーニングによって変形した余盛止端部



(a) 残留応力測定位置



(b) 残留応力測定結果

図5 腹部から底部領域の表層部残留応力状態

2.2 余盛止端部形状の改善

前述したように、テルミット溶接部はあご部から底部まで余盛が存在しているため、形状変化部となる止端部には列車通過時に大きな引張応力が局所的に作用することになる。なお、現状の余盛止端部への応力集中の程度を実際に計測することは困難であるため、有限要素法を用いたテルミット溶接部の応力解析モデルを構築して解析を実施した。なお、解析では支点間距離 1300mm、中央荷点距離 150mm の 4 点曲げ疲労試験の荷重状態を再現させた。その結果、溶接部の頭頂面に 100kN を荷重すると、図 6 に示すように底部上面の余盛止端部には周囲に比べて発生する引張応力が 3 倍程度大きくなる傾向が明らかとなった。

そこで、容易に余盛止端部の形状を改善できる方法として、モールドの内部形状の改良を試みた。図 7 に応力集中の低減を主目的として設計した余盛（モールド内部）形状を示す。現行のモールドを適用した場合、高さ 6mm、幅 40mm の余盛が形成され、止端部は鑄バリ（レールとモールドの隙間にはみ出して凝固した溶接金属）の発生状況にも影響されるが、ほぼ直角な形状を呈する。一方、改良モールドは余盛止端部の応力集中を低減させる観点から、余盛高さは同じで、余盛止端部の角度を 30° とする緩やかな傾斜形状とした。なお、上述した応力解析モデルにて計算した結果、余盛止端部を緩やかな

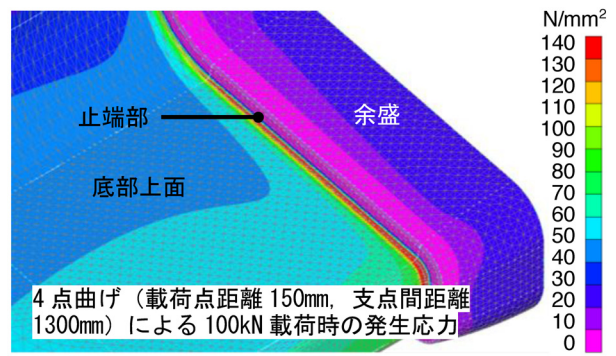


図6 テルミット溶接部の応力解析

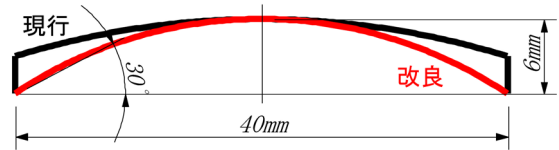


図7 設計した余盛（モールド内部）形状

30° の傾斜形状とした場合には、現行と比較して 2 割程度の応力集中低減効果が得られることを確認した。

図 8 に製作したモールドの外観を現行モールドと併せて示す。止端部形状を変更したため、余盛形成領域が現行より小さくなっており、溶鋼の湯流れやレールの溶融などに影響を及ぼす可能性が懸念された。そこで、現行のモールド（SkV-F 型）ではなく、シングルユースルツボ（専用テルミット溶剤含む）との組み合わせにより溶融性能などを向上させた SkV-Elite⁴⁾ のモールド型をベースとして、余盛形状変更に併せて以下の改良を加えた。

- ・予熱条件の変更に耐えることを目的として、モールド内壁の材料に高い耐熱性を有するジルコンサンドを使用する。
- ・湯漏れおよびブローホールに起因する表面きずの発生を防止する観点から、モールドとレールとの隙間を極

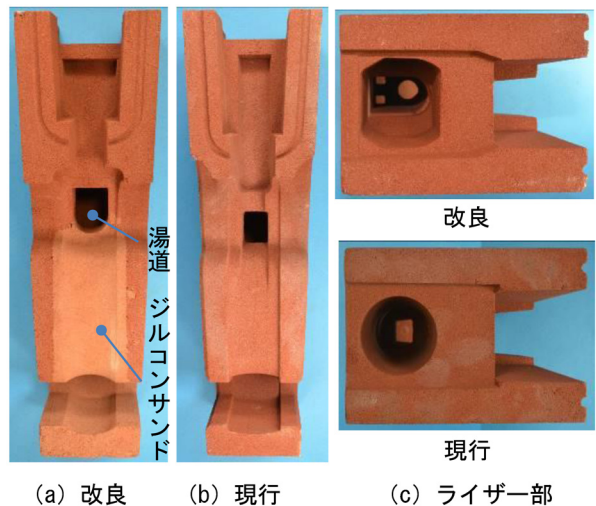


図8 モールド形状

力小さくするため、現行の JIS レール形状に合ったサイズとする。

なお、SkV-Elite モールドは現行に比べてライザー（押し湯）径が大きく、底部上面付近で3本に分かれているとともに、頭部側面の湯道径も大きくなっていることから、より効率的な湯流れが得られると期待される。

2.3 曲げ疲労試験による各工法の評価

2.1 節、2.2 節で検討した各工法の曲げ疲労強度向上性能を評価するため、レール底部領域に引張応力が作用する頭部上向き姿勢にて、支点間距離 1,300mm、中央載荷点距離 150mm、繰返し周波数 3Hz の 4 点曲げ疲労試験を実施した。試験は、最小応力を 30N/mm² とする片振り条件を採用し、繰返し数 200 万回を限度として、破断の有無で曲げ疲労強度を評価した。なお、未破断の場合は応力全振幅をさらに 30N/mm² 増して再度曲げ疲労試験に供した。表 1 に最終的な試験結果を、現行テルミット溶接部の試験結果と併せて示す。

現行テルミット溶接部の 4 点曲げ疲労強度は、これまでの知見と、数は少ないものの本試験の結果（S-1、S-2）から、200N/mm² 程度と判断される。以下、曲げ疲労試験の結果を基に次に示す諸検討を実施し、最終的な工法を提案することとする。

(1) ピーニング

余盛止端部にピーニング処理を施した試験体（P-1～P-3）は、処理範囲の拡大に伴い曲げ疲労強度が向上することが明らかとなった。ピーニング処理を底部上面のみに適用した場合は、応力全振幅 240N/mm² の試験条件で処理範囲をわずかに外れた下首部の余盛止端部から疲労破壊した。また、腹部中央から底部上面にピーニング処理を施した場合には、図 9 に曲げ疲労試験で破断し

表 1 曲げ疲労試験の結果

No.	各工法の詳細	応力全振幅 (N/mm ²)	繰返し数 (回)	破断の有無
S-1	現行法	210	1,445,560	破断（底部上面）
S-2	—	200	2,000,000	未破断
		210	432,411	破断（底部上面）
P-1	ピーニング（底部上面）	210	2,000,000	未破断
		240	220,829	破断（下首部）
P-2	ピーニング（腹部～底部上面）	240	2,000,000	未破断
		270	354,977	破断（あご部）
P-3	ピーニング（あご～底部上面）	270	2,000,000	未破断
M-1	改良モールド	240	2,000,000	未破断
		270	1,452,533	破断（底部上面）
M-2	改良モールド（止端部表面研磨）	270	2,000,000	未破断



図 9 曲げ疲労試験で破断した試験体の一例（P-2）

た試験体の外観を示すように、応力全振幅 270N/mm² で底部上面と同程度の引張応力が残留しているあご部の余盛止端部から疲労破壊して破断に至った。なお、底面の余盛止端部へのピーニング処理は、実施工において適用することが困難であり、溶接によって大きな圧縮残留応力が生じているとともに、応力全振幅 270N/mm² の試験条件では破断起点とならなかったことから、適用は不要と判断した。

以上のことから、現行のテルミット溶接法を採用する場合、施工後にあご部から底部上面までの余盛止端部にピーニング処理を施すことで、標準溶接部に対して 35%（270 ÷ 200 = 1.35）増の曲げ疲労強度向上効果が得られることを確認した。

(2) 改良モールド

余盛止端部形状を変更した改良モールドを適用して作製した試験体の余盛止端部形状は設計通りであったが、図 10 に示すように余盛止端部の溶接金属がわずかにレールに被る形態の未溶融部が底部領域に観察され、曲げ疲労試験においても上記の未溶融部が破壊起点となることが判明した。そこで、予熱完了時点のレール底部端部温度が約 100℃高くなるよう、予熱時間を標準より 30 秒延長することにした。

この予熱条件の見直しにより、改良モールドの適用（M-1）だけでも曲げ疲労強度が向上したが、底部余盛止端部のレールの溶融程度にばらつきがあり、応力全振幅 270N/mm² の試験条件では、底部上面の余盛止端部の未溶融部から疲労破壊する事象が認められた。そのため、図 11 に示すように、超硬バーを取り付けた棒グラインダで余盛止端部の未溶融部を研磨除去する工法を組み合わせて、余盛止端部を局部的に滑らかな形状に処理した結果（M-2）、270N/mm² までの 200 万回曲げ疲労強度向上を達成した。一方、レール底面の余盛止端部の被りは 270N/mm² までの試験条件において曲げ疲労強度に影響を及ぼさないため、研磨処理を必要としない。



図10 余盛止端部に認められた未熔融部



図11 余盛止端部の研磨処理

改良モールドを適用して溶接施工した後、棒グラインダにより余盛止端部を局部的に表面研磨するのに必要な作業時間は1つの溶接部あたり2分程度であり、特別な技量を必要としない。また、研磨処理範囲は応力全振幅 $270\text{N}/\text{mm}^2$ の試験条件で錆の生じていないあご部が破壊起点とならなかったことから、腹部中央から底部上面までとしている。なお、現行のテルミット溶接法を採用して余盛止端部を緩やかな同様の傾斜形状にするためには、同じ研磨装置を使用して30分以上の時間を要することから、改良モールドの適用により作業時間を大幅に短縮できていることがわかる。

3. 施工不良発生低減策の検討

テルミット溶接部の信頼性は、以前に比べて非常に高くなったとともに仕上り検査技術の向上により、折損に至る事象がほぼ皆無になった。一方で、表面きずの発生や湯漏れなどの施工不良に関する事象が稀に報告されている。また、新幹線の高速区間にテルミット溶接法を導入するにあたり、曲げ疲労強度の他にも、溶接欠陥や湯漏れなどの施工不良が生じることが懸念されている。本章では、施工不良などの発生を現状よりさらに低減でき

る方法について検討した。

表面きずの発生を防止するためには、レールとモールドとの隙間を極力小さくすることが効果的であることが判明⁵⁾していることから、余盛形状を変更したモールド改良に加えて、モールド取り付け時のレールとの隙間を現行より小さくした。図12(a)に現行のモールドと改良モールドをJIS60kgレールに取り付けた状況を示す。同図のように、表面きずの発生起点となっているあご部およびレール底面におけるレールとモールドとの隙間が小さくなっており、ブローホールに起因する表面きずを低減できると判断される。また、湯漏れの原因は完全には明らかにされていないが、砂詰め不良を想定した場合、レールとの隙間は極力小さい方が好ましいことから、頭頂部においてもモールド内部への砂詰め作業が不要な形状としている。なお、モールド補修用のペーストを隙間部に塗り付けた後に目地砂を詰めることにより、予熱によってペーストが硬化して隙間を埋めるとともに溶鋼と目地砂との接触を防止できるため、湯漏れや表面きずの発生を抑制できると考える。さらに、図12(b)に示すレール頭部きず補修工法で使用されているシングルユースルツボを採用することにより、ロングライフスルツボの乾燥不良などの要因により、現在は稀に発生する異常反応に伴う引け巣の溶接欠陥が生じなくなるとともに、オートタップの取り付けや溶材充填などが不要になることから、ヒューマンエラーに起因する施工不良を防止することが可能となる。

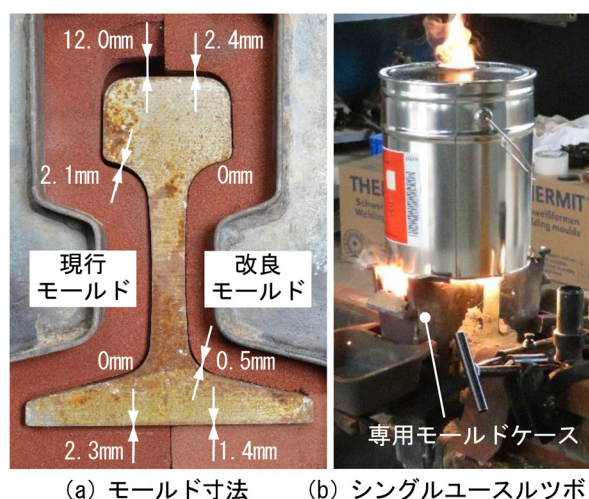


図12 施工不良防止のための改良点

4. まとめ

テルミット溶接法の新幹線高速区間への導入を目標として、余盛形状を改良したモールドの使用に併せて余盛止端部表面の研磨を組み合わせる施工法を開発し、 $270\text{N}/\text{mm}^2$ までの200万回曲げ疲労強度向上を達成した。

また、現行のテルミット溶接法においても、あご部から底部上面までの余盛止端部にピーニング処理を施すことで、同レベルの曲げ疲労特性を有することを曲げ疲労試験により確認した。

なお、開発したテルミット溶接工法の施工条件等を表2に示す。基本的に現行のテルミット溶接法に準拠するが、溶接機材および溶接条件の変更が必要となる。

改良モールドの使用に併せて余盛止端部表面の研磨を組み合わせる工法は、シングルユースルツボをモールド上に設置するための専用モールドケースと頭部領域への押し湯を拡大させたモールドの内部形状が変更となっているため、押抜きせん断機はワイドギャップ用などを準備する必要がある。また、曲げ疲労強度向上の観点からモールド取り付け時には、現行とは異なりレール底部上面に隙間が生じないように設置することを基本とする。さらに、予熱時間および静置時間の溶接条件は、改良モールドおよびシングルユースルツボ用のテルミット溶材の使用に合わせて変更している。なお、溶接施工後の余盛止端部の表面研磨処理には、直径8mmの先丸円筒形状の超硬バーの使用を推奨するとともに、余盛止端部の未溶融部の完全除去を確認するために、磁粉探傷検査を適用することが望ましい。また、本テーマではJIS60kg普通レールを対象として検討したため、熱処理レールへの適用時にはテルミット溶剤の適切な静置時間を確認する必要があるが、その他は普通レールの溶接条件および機材が適用できる。

一方、余盛止端部にピーニング処理を施す工法は、現行のテルミット溶接法に適用することを前提にしているため、溶接機材および溶接条件に変更はない。

5. おわりに

本研究では、270N/mm²の200万回曲げ疲労強度を有する欠陥等級が無級のエンクローズアーク溶接部と同等の曲げ疲労強度を達成可能な2種類の工法を考案した。

今後は、改良モールドを用いたテルミット溶接法の実用化を目指し、試験敷設を含む研究開発を継続するとともに、在来線でも稀に生じる凝固割れの発生防止策についても検討を進める予定である。

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) 永井卓也，河合真二，岡野成威，望月正人：改良型深穴穿孔法による内部残留応力測定，検査技術，pp.64-67，2016.6
- 4) Jorg Keichel, Robert Gehrman : New SkV-Elite Thermitwelding process, Railway Technical Review, Vol.49, No.4, pp.31-33, 2009.
- 5) 寺下善弘，山本隆一，辰巳光正，伊藤太初，梅内一行：テルミット溶接部の表面きず発生原因とその防止策，鉄道総研報告，Vol.29，No.8，pp.53-57，2015

表2 標準施工条件および使用機材（JIS60kg 普通レール）

溶接条件・溶接機材	溶接工法 改良モールドの使用と余盛止端部 表面の研磨を組み合わせる工法	ピーニング工法
予熱時間 (sec)	150	120
静置時間 (sec)	300~330	240~270
モールド	改良モールド (SkV-Elite L25 ベース)	現行モールド (SkV-F)
モールドケース	シングルユース用	現行品
モールドの取り付け	底部上面基準	底面基準
テルミット溶剤	60/Z90 SkV-Elite L25	60/Z90 SkV
ルツボ	シングルユース	ロングライフ
ルツボの乾燥	不要	100℃以上
オートタップ	不要 (装填済み)	必要
押抜きせん断機	ワイドギャップ用など	現行品
余盛止端部の処理	表面研磨 (腹部中央~底部上面)	ピーニング (あご部~底部上面)

注 網掛けした溶接条件・溶接機材は現行のテルミット溶接法と同じ