

レール頭部きず補修工法用新型熱間矯正機の開発

伊藤 太初* 井筒 宏樹** 相澤 宏行*
山本 隆一*

Hot Correcting Machine for the Rail Head Repair Method by Alumino-thermic Welding

Hajime ITO Hiroki IZUTSU Hiroyuki AIZAWA
Ryu-ichi YAMAMOTO

When rail head repair method is used to fix damaged rails, hot correcting work is required to prevent the repaired parts from dipping due to thermal contraction. Since a conventional hot correcting machine has a mechanism to lift bottom of the rail, it can only be used for ballast tracks. In this study, we newly developed a hot correcting machine to be used for solid-bed tracks. Furthermore, we confirmed the practicality of our proposed method by welding test on actual track.

キーワード：補修溶接，テルミット溶接，熱間矯正，レール頭部損傷

1. はじめに

シェリングきずなどのレール頭部損傷はレール折損の主な要因の一つであり，その管理に多大な労力がかかけられている。一般的に，鉄道事業者ではこのようなレール頭部損傷に対して超音波探傷検査を実施し，閾値を超えたきずに対して，継目板取り付け後に計画的あるいは緊急的にレール交換が実施される。しかしながら，レール交換には，新しく挿入するレールの手配や作業工程調整，さらにレール緊張器の配備など多くの手間とコストが必要となる。

このような中，鉄道総研においてテルミット溶接を用いたレール頭部補修工法（以下，レール頭部きず補修工法と称す）のJISレールへの適用に向けた検討が2014年に実施された¹⁾。本工法は，ドイツElektro-Thermit社が開発したテルミット頭部補修溶接法であり²⁾，局所的に発生したレールきずを簡易に除去できる手法として，現在JR各社において試験敷設や本格導入が実施されている³⁾。当工法では，補修部の熱収縮による落込みを防止するため，熱間矯正作業が必要となるが，現行の作業手順では，レール底面を支点として曲げ上げる方式のため，準備作業としてバラスト掘削やまくらぎ移動が必要となる。また，同様の理由によりまくらぎ直結軌道などの直結系軌道では適用自体が困難となる。そこで，本研究では，まくらぎ移動等の付帯作業を必要とせず，

直結系軌道でも施工可能な矯正機の開発を目的として各種試験を実施した。

2. レール頭部きず補修工法

2.1 レール頭部きず補修工法の概要

図1にレール頭部きず補修工法の施工手順を示す。まず，シェリングきず等のレール頭部損傷箇所をガス切断で切り取り，切断面をグラインダ研削した後，浸透探傷検査で残きずの有無を確認する。当工法では図1(c)に示す使い捨てのつぼを使用し，モールド内に注入されたテルミット溶鋼が凝固した後に余盛を押抜く。また，押抜き直後の高温状態において，落込み防止のために専用の矯正機を使った熱間矯正作業（図1(e))を実施する。矯正終了後，空冷装置による強制空冷を実施し，最後にグラインダで研削仕上げを実施する。

2.2 レール頭部きず補修工法の熱間矯正

レールに限らず，一般的な溶接施工では，溶接時の熱収縮による部材の変形が少なからず生じるため，治具などで部材を拘束したり，逆ひずみを設けたりすることで，溶接施工後の寸法や形状の変化を最小限に抑えている。図2に現行の熱間矯正機による矯正作業の模式図を示す。レール頭部きず補修工法の場合，頭部のきずが存在する箇所のみを補修するため，補修部の冷却に伴う熱収縮によりレールが「く」の字に変形する。なお，そのままの状態で敷設するとレール頭頂面に大きな落込み（凹み）が生じ，列車通過に伴い著大な輪重変動が生じるため，軌道状態の悪化を招く要因となる。そこで，上述し

* 軌道技術研究部 レールメンテナンス研究室
** 軌道技術研究部 レールメンテナンス研究室
(現 双葉鉄道工業株式会社)



図1 レール頭部きず補修工法の施工手順

たように、本工法では熱間矯正作業を実施し、落込みを防止している。熱間矯正作業では、補修直後に専用の矯正器を使い、補修部を中心にレールが落ち込む量を見込んだ所定量を曲げ上げる。これにより、補修後の頭頂面形状を仕上り範囲内に収めることが可能となる。

図2に示すように、現行の熱間矯正機ではレール底面を支点として曲げ上げる機構を採用している。レール底面は、溶接による熱影響(温度上昇による軟化)が少なく、かつ補修部を効率的に曲げ上げることが可能な位置として選定された。一方、実施工においてはレール底面を支点とするため、レール下部のバラスト掘削やまくらぎが支障する場合にはまくらぎ移動などの付帯作業が必要となる。また、直結系軌道ではレールをこう上させるなどしてレール下部にスペースを設ける必要があるため、作業量が大幅に増加するといった課題が生じる。

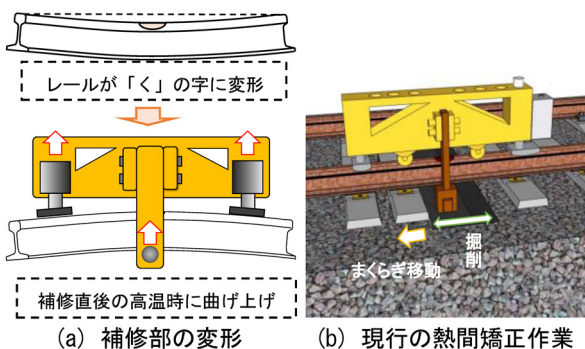


図2 熱間矯正作業の詳細

3. 新しい矯正手法の検討

3.1 あご下を支点とした矯正手法の検討

上述のように、現行の熱間矯正機では施工が困難となる箇所が存在することから、レール下部を支障しない新しい矯正手法を検討した。現行のレールガス圧接部の熱間矯正ではあご下を支点とした熱間矯正を実施していることから、本研究においてもあご下を支点とする手法に着目した。一方、最も効率的に矯正能力を発揮する補修部直下を支点とする機構とした場合、あご下部は補修溶接時の熱影響による軟化のため、レール曲上げに対する反力を支えられないと考えられる。また、補修部直下を避けるように支点位置を設置した場合、補修部直下から離れるほど矯正機の最大出力の増加が必要となり、併せて矯正機の剛性確保のための大型化が必須となる。そこで、本研究では補修部の断面マクロ組織より熱影響範囲を求めることで支点位置を決定した。図3に補修部の断面マクロ組織の一例および支点位置を示す。レールを含む一般的な鋼材は、 A_1 変態点(723℃)近傍である700~800℃を超えると降伏応力が0に近くなる⁴⁾ことが知られており、 A_1 変態点を上回る領域に支点を設けることは避けなければならない。そこで、断面マクロ組織上における熱影響部が A_1 変態点以上の温度に達したことを示すことから、図3に示すようにレールあご下部における熱影響境界のわずかに外側となる位置を支点位置とした。図4に上記を基に設計した矯正治具(あご下設置治具)を示す。あご下部の熱影響境界の外側となる左右50mm位置が支点となるよう切り欠き部を設けた。さらに、従来の熱間矯正機において矯正量が過大となった際に仕上げ作業に多大な時間を要することから⁵⁾、所定の矯正量(レールのたわみ角)となった際に荷重の伝搬を低下させる「超過防止機能」を設けた。これは、あご下設置治具の長手方向にレールたわみ角相当のテーパを設けると共に、治具長さを300mm(あご下接触長さ:片側100mm)とすることで、レールが所定のたわみ角に達すると接触面積が増加しレールの曲げ応力が低下することで、矯正量が一定となることを狙ったものである。なお、本検討では従来の矯正機において矯正量の目安としていた14mm/mの矯正量となるレールたわみ角をテー

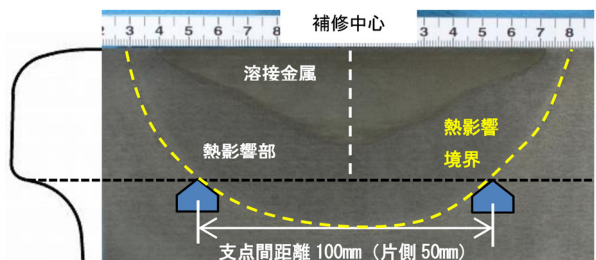


図3 補修部の断面マクロ組織の一例および支点位置

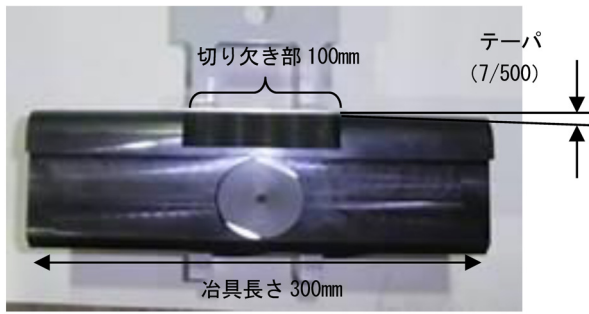


図4 試作した矯正治具（あご下設置治具）

パ角度として設定した。

当該治具を用いて補修部の熱間矯正試験を実施し、あご下を支点とした場合の作業性および矯正能力を確認することとした。

3.2 あご下設置治具による熱間矯正試験

試作したあご下設置治具による試験に併せて、従来の治具（底面設置治具）による熱間矯正試験も実施し、作業性および矯正能力を比較した。表1に各種治具による矯正試験条件および結果、図5に各種治具による矯正試験状況、図6に原田式踏面測定器で測定した各試験体の仕上り形状（1m 弦頭頂面凹凸形状）を示す。なお、熱間矯正試験では、自動制御式熱間矯正機⁵⁾を用いて、

表1 各種治具による熱間矯正試験結果

TP No.	矯正方法	設定出力 (kN)	最大出力 (kN)	シリンダ変位 (mm)	レール変位(mm)		仕上り形状 (mm)
					矯正時	矯正後	
1-1	底面	464	450	21.4	16.9	6.5	+0.40
1-2	あご下	464	449	21.6	12.5	5.6	+0.10



(a) 底面治具 (b) あご下治具

図5 各種治具による矯正機の外観

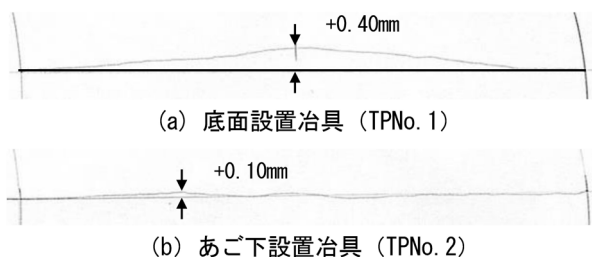


図6 試験体の仕上り形状

ポンプの設定出力（最大 464kN）になるまでレールに加圧し、その際の最大出力およびシリンダ変位を測定した。また、併せてレール上部からレーザ変位計を用いレール高さ方向の変位（レール変位）を測定した。試験材は長さ 11m のレールとし、その中心でテルミット頭部補修溶接を実施した後、熱間矯正試験を実施した。なお、事前検討において、あご下設置治具がくさび形状に沿ってレール外方に開くことが予想されたため、市販の万力2台により外方への開きを防止している。

矯正試験の結果、あご下設置治具を用いた場合でも作業性に大きな問題はなく、また、シリンダ変位およびポンプの油圧力は底面設置治具の場合とほぼ同様の値であった。一方、あご下設置治具のレール変位は、底面設置治具に比べ矯正時に約 4.5mm、矯正後で 1.0mm 低い結果となった。また、いずれの治具においてもレール溶接部の仕上り範囲内（± 0.5mm）に収まる形状となっているが、あご下設置治具では底面設置治具に比べほぼ平滑に仕上げられている。一般的に、溶接部の仕上り形状は落込みを考慮し、山なりに仕上げるのが望ましいとされており、その点を考慮すると矯正量がさらに必要であると考えられる。

以上の結果より、あご下設置治具を用いた場合、やや矯正量が不足するものの、仕上り範囲内に収まる矯正作業が可能であることが確認された。

4. 新型熱間矯正機の開発

上述のあご下治具による矯正試験では仕上り範囲内に収まったものの、従来矯正機に比べ矯正量が不足する結果となった。そこで、矯正量を増加させるため、

- (1) あご下設置治具の形状改良
 - (2) シリンダ出力の増加
- についてそれぞれ検討した。

4.1 あご下治具の改良

矯正量不足の要因の一つとして、あご下治具に設けた変形量の超過防止機能が作用した可能性が考えられる。そこで、当該機能を除くことで、矯正機からの出力を効率的に補修部に伝達することとした。図7にあご下治具の超過防止機能を除去した改良治具を示す。改良治



(a) 矯正機外観 (b) 治具取付状況

図7 改良治具の詳細

具は、従来のあご下治具を基に、治具幅を 300mm から 120mm に、接触部長さを 100mm から 10mm に狭め、テーパ部を除去した。なお、切り欠き部は、従来と同様、中心から両側 50mm（計 100mm）に設けた。

4.2 シリンダ出力の増加

矯正量不足の二つ目の要因として、あご下設置治具が補修部中心から離れた位置を支点とすることから、底面治具のように補修部中心を直接曲げ上げる機構に比べ、変形に要する荷重が増加したものと考えられる。一方、新型矯正機を設計する上では、事前に必要となる出力を見積もる必要がある。そこで、ここでは有限要素法による熱伝導 - 構造解析（静解析）を実施し、矯正時のレールの動きを再現すると共に、出力増加による変形量の増加傾向および治具形状によるレール変形状況の違いについて検討した。

4.2.1 解析モデルの詳細

図 8 に解析に使用したモデルの詳細、表 2 に解析条件を示す。当モデルでは、矯正作業時に補修部から片側 3 締結を緩解することから、補修部を中心とした片側 2m を解析対象とし、1/4 軸対称モデルとした。なお、ソル

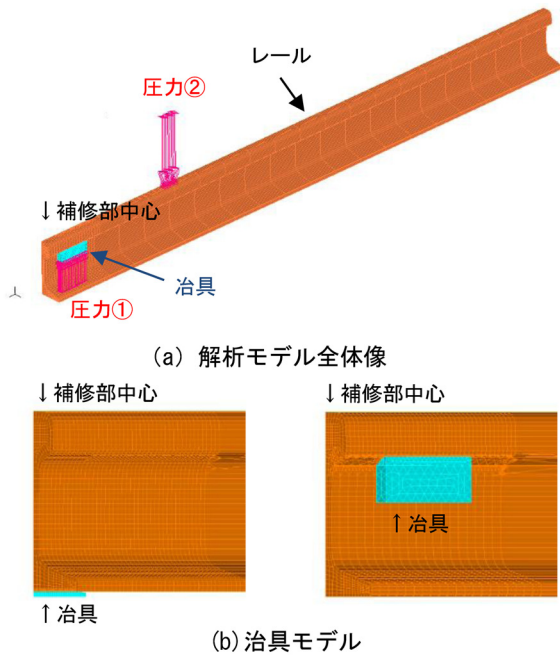


図 8 使用した解析モデルの詳細

表 2 解析条件

No.	条件	治具種別	矯正機出力 (kN)	圧力① (MPa)	圧力② (MPa)	温度 (°C)
1	底面_464kN	底面	464.0	164.5	193.0	800
2	あご下_464kN	あご下	464.0	77.3	193.0	
3	あご下_600kN		600.0	100.0	250.0	

バーは汎用ソフトである ADINA を使用した。補修部の温度分布を完全に再現するにはテルミット溶接プロセスをモデル化する必要があるが、膨大な時間と専用のソフトが必要となる。ここでは簡易的にレール端部の補修部範囲相当（深さ 40mm、長さ 50mm）に 800°C の温度を 900 秒間与えることで、矯正時の補修部温度分布を模擬した。また、加熱後の補修部に対して、矯正治具の底面に矯正機からの出力相当となる圧力を付与し、その後除去する条件（図 8(a) の圧力①）を与えた。なお、実際の矯正作業では、レールは矯正機の反力も同時に受けることから、補修部中心から 500mm 離れたレール頭頂部（矯正機のシリンダ接触部）に反力相当の圧力（図 8(a) の圧力②）を設定した。使用した材料物性値は温度依存性を考慮したが、モデル簡略化のため熱膨張は無視した。

4.2.2 解析結果

図 9 に各条件における最大荷重載荷時および荷重除荷時の補修部中心から 2m（2,000mm）までの頭頂面の上下変位を示す。解析結果を前述の矯正試験結果と比べると、解析結果の変位量は試験結果の約 2/3 程度となっている。これは、補修溶接による温度分布の違いの他、実際のまくらぎ間隔と解析上の支点間距離との違いが影響したと考えられる。しかしながら、矯正機構や治具形

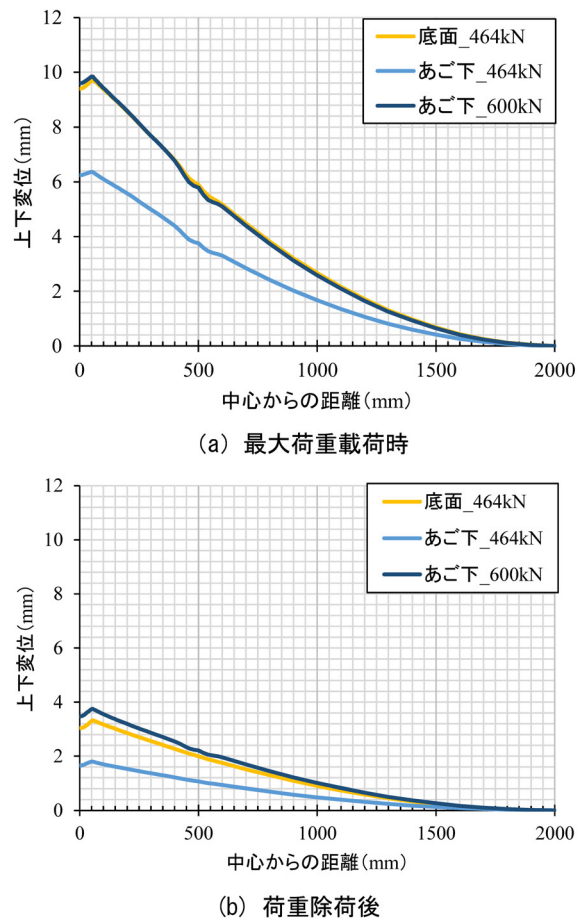


図 9 各解析条件によるレール頭部の上下変位

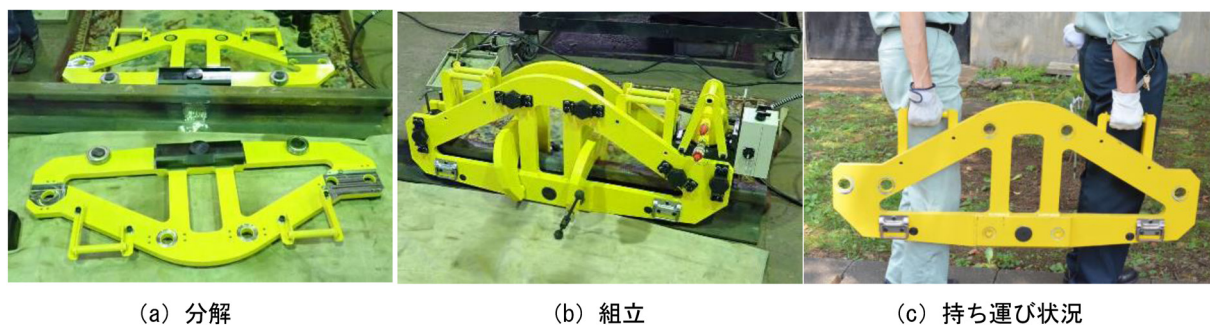


図 10 試作した新型熱間矯正機

状による影響を相対的に比較することは可能と判断した。矯正機出力 464kN の No.1 (底面_464kN) と No.2 (あご下_464kN) を比較すると、載荷点がレール中心から離れるあご下治具において上下変位が低下しており、図 9(b) に示す荷重除荷時において約半分の矯正量(残留ひずみに相当)しか得られていない。一方、あご下治具で矯正機出力 600kN とした No.3 (あご下_600kN) では、No.1 とほぼ同様の変形量が得られており、図 9(b) に示す荷重除荷時には No.1 をわずかに上回る矯正量が得られている。なお、図 9 において、補修中心から 50mm 程度までの範囲で上下変位が中心に向かって低下する傾向が認められた。これは、当該領域が 800℃ 近傍の高温状態であるため、大きく塑性変形し、局部的に大きな絞りが生じていることによる。実際の矯正作業においても同様の現象が生じていると考えられるが、補修部には補修溶接時の余盛形成により断面積が増加していることから、仕上げ作業や仕上り精度に影響を及ぼしていないものと考えられる。

4.3 新型矯正機矯正機の試作

上記の検討を踏まえて、新型矯正機を試作した。矯正機の構造を検討する上で、以下の点について、考慮した。

- ・ 締結装置(ばね、ボルト、インシュレータ等)を外すのみで矯正作業が可能
- ・ 作業員 2 名で運搬可能

図 10 に試作した新型熱間矯正機を示す。当該矯正機では、三角トラス構造を採用することで、極力レール幅方向に支障せず十分な強度を持たせた。また、ボルト締めで分解・組立て可能な構造とし、現地での組立て作業が必要となるが、最大部材重量を 65kg に納めて、運搬を容易にした。なお、矯正量は油圧シリンダに取り付けた非接触式レーザ変位計にて測定した値により自動制御することが可能である。

4.4 新型熱間矯正機による熱間矯正試験

上述のコンセプトを基に試作した新型熱間矯正機を使用し、バラスト軌道のマクラギ直上およびスラブ軌道(直

結 8 型レール締結装置) 上で矯正試験を実施した。矯正試験では、従来矯正機と同様の設定出力 464kN と新型矯正機の最大出力 611kN でそれぞれ矯正試験を実施し、矯正時の最大出力、シリンダ変位およびレール変位を測定した。矯正試験結果を表 3、試験状況を図 11 に示す。

矯正試験の結果、設定出力 464kN、最大出力 455kN の条件で実施した TPN0.1 において、矯正時のレール変位で 11.7mm、矯正後のレール変位 5.0mm と、従来矯正機と同程度の矯正量に達したが、最終的な仕上り形状は -0.35mm と仕上り範囲(+0.5mm ~ -0.1mm) を超過した。一方、設定出力 618kN、最大出力 611kN の条件で実施した TPN0.2 では、矯正時のレール変位で 21.0mm、矯正後のレール変位 10.0mm と、従来矯正機 2 倍以上の矯正量に達した。図 12 に TPN0.2 の粗仕上げおよび最終仕上げにおける頭頂面凹凸形状を示す。当該試験体では、十分な矯正量が得られた結果、粗仕上げ後の頭頂面形状で +1.0mm、最終仕上げ時の頭頂面形状で +0.5mm と必要最小限のグラインダ研削で仕上り範囲内に収めることが可能になった。なお、新型矯正機の作業性に関して、バラスト軌道のマクラギ直上およびスラブ軌道上で実施したいずれの試験においても問題なく作業可能であ

表 3 新型熱間矯正機による熱間矯正試験結果

TP No.	軌道構造	設定出力(kN)	最大出力(kN)	シリンダ変位(mm)	レール変位(mm)		仕上り形状(mm)
					矯正時	矯正後	
2-1	スラブ	464	455	14.5	11.7	5.0	-0.35
2-2	バラスト	618	611	21.3	21.0	10.0	+0.50

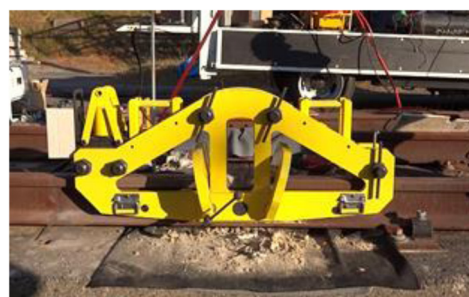


図 11 新型熱間矯正機による矯正試験状況

ることを確認した。また、当該矯正機による矯正量の自動制御を実施する場合には、普通レールの場合、シリンダ変位量 22.0mm に設定することで必要な矯正量が得られるものとする。

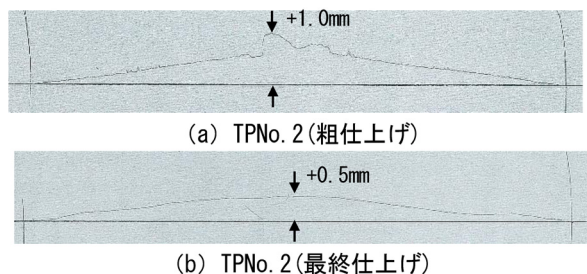


図 12 頭頂面凹凸状況

4.5 新型熱間矯正機による施工時間短縮効果

表 4 に現行矯正機と新型矯正機の比較結果を一覧で示す。上述したように、開発した新型矯正機ではバラスト軌道上においてバラスト掘削・埋戻しやまくらぎ移動、バラスト突き固めなどの溶接作業以外の付帯作業が不要となるため、溶接作業員のみで施工可能となる。また、工程全体の作業時間短縮にも大きな効果が見込める。図 13 に現行の矯正機を使用した場合と新型矯正機を使用した場合の比較結果を示す。新型矯正機の使用により準備作業、後作業併せて 15 分程度の短縮が可能となり、総施工時間は約 146 分(2 時間 16 分程度)となる。さらに、作業員 2 名で運搬可能となったため、施工箇所への搬入が容易となり、搬入・搬出時間の削減も可能となる。

表 4 現行機と新型矯正機の比較

	現行矯正機	新型矯正機
適用箇所	バラスト区間のみ	制限無し
付帯作業	必要	不要
施行時間	161分	146分
最小運搬要員	4名	2名

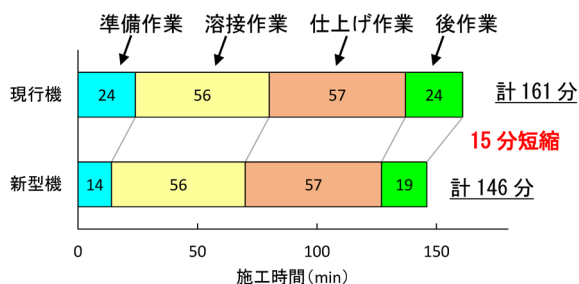


図 13 作業省力化手法による施工時間短縮効果 (まくらぎ直上での施工を想定)

5. まとめ

本研究では、まくらぎ移動等の付帯作業を必要とせず、無道床軌道でも施工可能な矯正機を開発することを目的として、各種試験を実施した。結果は以下の通りである。

- (1) あご下を支点とする新たな矯正機構について、既存の矯正機を用いて検討を実施した。その結果、補修部の断面マクロ組織より A_1 変態点以下となる補修中心から左右 50mm 位置に載荷点を 2 点設けることで、あご下を支点としても従来と同様に矯正することが可能であることを確認した。
- (2) 上記の試験結果に加え、数値解析により矯正機の必要出力を見積もることで、あご下を支点とする矯正機構を有し、締結装置等を支障しない新たな熱間矯正機を開発した。新型矯正機を用いた矯正試験の結果、仕上り精度を十分満足する矯正能力を持つこと、作業性(まくらぎ移動不要・直結系軌道で施工可能)が大きく改善されることを確認した。

文献

- 1) 伊藤太初, 他: テルミット頭部補修溶接法を用いたレール頭部補修方法, 鉄道総研報告, Vol.28, No.6, pp.41-46, 2014
- 2) Gehrmann, R, and Keichel, J., "A simple approach to rail head repairs," *Railway Gazette International*, Vol.167, pp.42-43, 2011.
- 3) 藪中嘉彦, 原岡周平: レール頭部補修溶接法によるシェリング傷除去試験とその後の追跡調査, 日本鉄道施設協会誌, Vol.54, No.12, pp.3-16, 2016
- 4) 村川栄一: 溶接力学Ⅱ (溶接変形と残留応力), 溶接工学夏期大学教材, 2013 年 7 月, 溶接学会
- 5) 伊藤太初, 他: レール頭部きず補修工法の適用拡大と脱技能化, 鉄道総研報告, Vol.33, No.2, pp.6-23, 2019