

レール頭部きず補修工法の適用拡大と脱技能化

伊藤 太初* 山本 隆一*
寺下 善弘* 辰巳 光正**

Extension of Application and Deskillling for Rail Head Repair Method

Hajime ITO Ryu-ichi YAMAMOTO
Yoshihiro TERASHITA Mitsumasa TATSUMI

Rail head repair method developed by RTRI is useful for efficiently repairing rail head defects. However, application of this method has been restricted because it cannot be applied to the maintenance of the head hardened rail at present. Moreover, hot correcting, which is a method to prevent dipping of the repair part due to thermal contraction, has poor workability because of manual operation, thus leading to the occurrence of fluctuations of the uplifting amount. Therefore, we investigated the extension of application and deskillling of this method. Based on the results of these investigations, we suggested an appropriate condition for welding the head hardened rail and developed an automatically controlled hot correcting machine.

キーワード：レール頭部補修，テルミット溶接，レール頭部損傷，熱処理レール

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，さらにレール緊張機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方法（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 ElektroThermit 社が開発した Thermit Head Repair（以下，THR 法と称す）を用いた補修溶接方法²⁾であり，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⁾。一方，当該補修工法は直線区間に生じるシェリングきずを主な補修対象として開発されたため，主に曲線区間に使用される HH340 レールへの適用性が検証されておらず，施工箇所が普通レールのみ制限されている。また，補修後の落込み防止として溶接作業直後に熱間矯正作業を実施しているが，手動でレール変形量の調整を実施してい

るため作業性が悪く，高い技能が必要となるなどの問題が生じている。そこで，本研究では本工法の熱処理レールへの適用および熱間矯正作業の脱技能化について，検討を実施した。

2. 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取り，切断面をグラインダー研削した後，浸透探傷検査で残存きずの有無を確認する。当工法では図 1(d) に示す使い捨てるつぽを使用し，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器を使った熱間矯正作業（図 1(f)）を実施する。矯正修了後，空冷装置による強制空冷を実施し，最後にグラインダーで研削仕上げを実施する。

3. 熱処理レールへの適用検討

レール溶接で用いられる通常のテルミット溶接では，HH340 レール等の熱処理レールに対して，高硬度の溶接金属が得られる専用の溶剤（Z120M）を用いて施工される。本工法においても，事前に熱処理レール専用溶剤の適用を検討したが，現時点ではメーカーにおいて開発段階であることから，適用を断念した。そこで，普通レール用溶剤 H260 を用い，強制空冷により硬度を確保することとした。本検討では，強制空冷条件毎に試験体を作

* 軌道技術研究部 レールメンテナンス研究室
** 前 軌道技術研究部 レール溶接研究室
(現 株式会社全溶)

特集：軌道技術

製し、強制空冷時の風圧が頭頂面硬度分布および溶接金属組織に及ぼす影響について調査した。また、作製した試験体に対する性能評価試験を実施した。



図1 レール頭部きず補修工法の施工手順

3.1 溶接試験体作製条件

図2に強制空冷による試験体作製状況、表1に試験体作製条件を示す。切り取り形状、予熱条件および押抜き開始時間は普通レールと同一である。押抜き完了後の強制空冷では、図2(b)に示す熱処理レールガス圧接部の後熱処理作業で使用する冷却装置（九州鉄道機器製造(株)製RH-2-DHH）を使用し、風圧を50mmAq、100mmAq、150mmAq、200mmAqおよび400mmAqの4条件とした。なお、施工時間短縮のため空冷時間は5分とした。

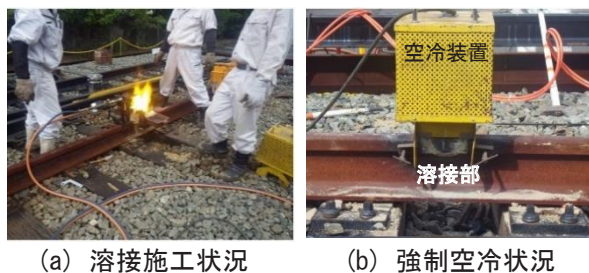


図2 強制空冷による試験体作製状況

表1 頭部強制空冷試験体の作製条件

切り取り形状 (mm)		予熱条件			使用溶剤	空冷条件	
長さ	深さ	酸素 (MPa)	プロパン (MPa)	時間		風圧範囲 (mmAq)	時間
90	25	0.42	0.12	3'00"	H260	50 ~ 400	5'00"

3.2 溶接試験体作製結果

3.2.1 頭頂部ビッカース硬さ分布

図3に頭頂面下5mm位置で測定した各風圧条件に対する補修部のビッカース硬さ（荷重10kN：10点平均）を示す。補修部の硬さは風圧の増加と共に上昇する傾向が認められ、150mmAq以上の風圧においてHH340レールの硬度規格範囲に達する。しかしながら、風圧400mmAqの条件では硬度に大きなばらつきが生じており、HH340レールの硬度範囲の上限を外れるケースがあった。

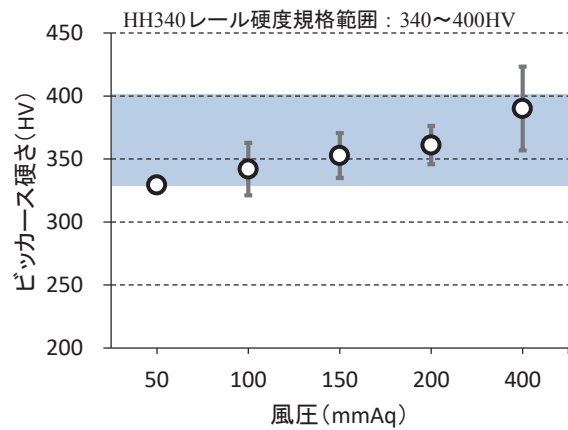


図3 風圧とビッカース硬さの関係

3.2.2 ミクロ組織観察

図4に各風圧における溶接金属のミクロ組織を示す。風圧50mmAqのミクロ組織はレール母材と同様のフェライト-パーライト組織であり、硬化組織等は認められない。風圧100mmAq、150mmAqおよび200mmAqではフェライト-パーライト組織を呈しているものの、微細な硬化組織が観察された。一方、風圧400mmAqでは広範囲に硬化組織（ビッカース硬さ550HV程度）が認められ、これに起因してビッカース硬度にバラツキが生じたものと推定される。これより、風圧400mmAqの条件は適切ではないと考えられる。

3.3 熱処理レールに対する施工条件

H260溶剤を用いて頭部強制空冷を施した場合、風圧100～200mmAqにおいて補修部の硬度がHH340レールの硬度範囲に収まるが、溶接金属のミクロ組織に微細な硬化組織が認められた。溶接直後の水冷により広範囲

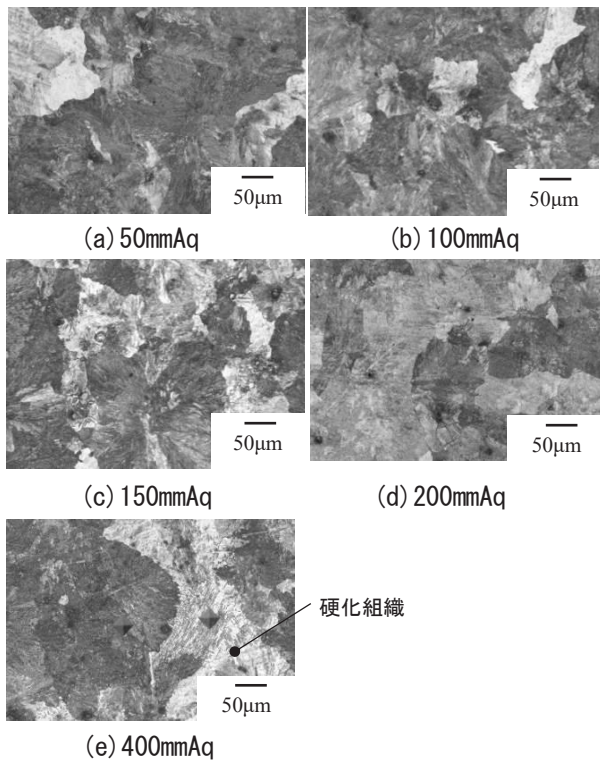


図4 各風圧における溶接金属のミクロ組織

に異常硬化組織（マルテンサイト組織）が発生した場合には水素脆化割れ等によりレール折損を引き起こす可能性があるが、風圧 100～200mmAq の条件では発生した硬化組織の面積が極めて微細であること、中間的な硬度であることから、実用上有害とはならないと考えられる。

以上より、本検討で提案する HH340 レールに対する施工条件を表 2 に示す。使用溶剤は H260 とし強制空冷を風圧 150mmAq となる条件で押抜き後から 5 分間実施する。なお、ガス圧接部の後熱処理作業で使用されている冷却装置（九州鉄道機器製造(株)製 RH-2-DHH）を用いる場合、風圧 150mmAq はダイヤル③相当の風圧である。また、予熱条件は普通レール施工時と同様、酸素手元圧 0.32MPa、プロパン手元圧 0.07MPa、予熱時間 3 分とする。

表 2 提案する HH340 レールの施工条件

レール種別	予熱条件			溶剤	空冷条件	
	酸素 (MPa)	プロパン (MPa)	時間		風圧 (mmAq)	時間
60kg	0.32	0.07	3'00"	H260	150	5'00"
50kgN						

3.4 性能評価試験

表 2 の施工条件により作製した試験体に対して、以下の性能評価試験を実施した。

- ・静的曲げ試験（頭部下向き）、
- ・頭頂面硬さ測定、
- ・転動疲労試験、
- ・マクロ・ミクロ組織観察、
- ・残留応力

測定

なお、静的曲げ試験、転動疲労試験および残留応力測定で使用した試験体は、実施工を想定し、押抜き後に熱間矯正を実施した。

3.4.1 静的曲げ試験（頭部下向き）

静的曲げ試験は 1m スパン中央集中荷重による 3 点曲げで実施した。試験体数は 60kg レール 3 体、50kgN レール 3 体である。破断姿勢は頭頂面に引張応力が作用する頭部下向き（HD）とした。図 5 に試験体の静的曲げ試験結果を示す。いずれの試験体も破断荷重、たわみ共にテルミット溶接部の基準値（HD：50kgN レール 950 kN-10mm、60kg レール 1,250kN-10mm）を上回っており、破断面に欠陥等は認められなかった。

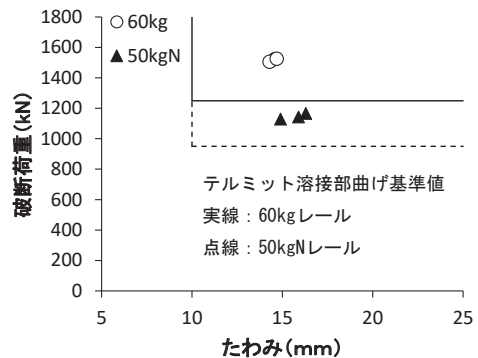


図 5 静的曲げ試験結果

3.4.2 頭頂面硬さ測定

図 6 に頭頂面中央部で測定したブリネル硬さ分布を示す。測定間隔は 5mm である。溶接金属の硬度分布は 317～340HB であり、当該試験体の母材硬度がやや高いため、溶接金属の硬度が相対的に低い。また、溶接金属および熱影響部には HH340 レールの硬度範囲（321～375HB：JIS E1120）をわずかに下回っている領域が存在する。しかしながら、後述する転動疲労試験後に落込み等が認められないことから、実用上問題ないと判断する。

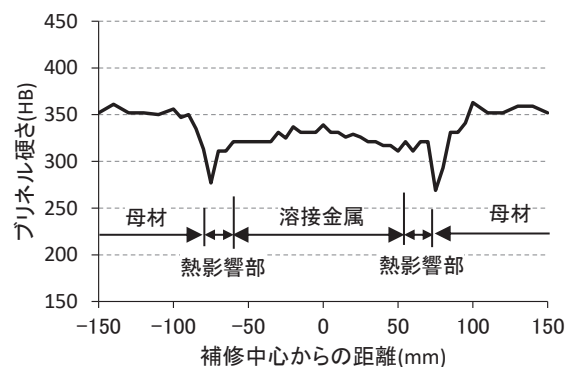


図 6 頭頂面のブリネル硬さ分布

特集：軌道技術

3.4.3 転動疲労試験

表3に転動疲労試験条件および結果、図7に転動疲労試験状況を示す。本試験では、曲げ支点から50mmの位置が溶接金属中心となるように試験体を設置し、溶接金属中心から左右100mm（総移動範囲200mm）範囲で車輪を転動させた。垂直荷重は150kNとし、車輪が自由端側にあるときの頭頂面における最大引張応力は70N/mm²となる。また、過去の解析結果によると頭頂面下10mm位置における最大せん断応力は139N/mm²であり、エンクローズアーク溶接部に対して実施された試験例では、頭頂部に水平裂が発生する厳しい条件である。試験の結果、補修部は100万回の往復転動回数において未破断であり、試験終了後の超音波探傷試験においてもきずエコーは検出されなかった。なお、試験後の頭頂面外観は良好であり、レール母材と補修部において摩耗量の差は認められなかった。

表3 転動疲労試験条件および結果

垂直荷重 (kN)	試験条件		試験結果	
	発生応力 (N/mm ²)		往復転動数	状態
	最大引張応力	最大せん断応力		
150	70	139	100万回	未破断

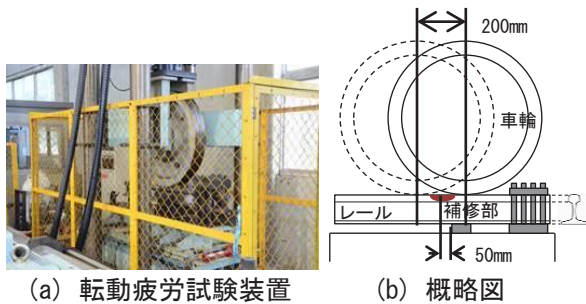


図7 転動疲労試験状況

3.4.4 断面マクロ・ミクロ組織観察

補修部中央縦断面においてマクロ組織観察を実施した。その結果、いずれの領域も切り形形状から3mm以上の十分な溶込み量が得られていることを確認した。また、当該断面上で実施したミクロ組織観察の結果、溶接金属中央部には、フェライト-パーライト組織（ピッカース硬さ：270HV程度）の他、前述したように一部に微細な硬化組織（中間段階組織：ピッカース硬さ590HV程度）が認められた。一方、溶接金属融合部は母材に比べやや結晶粒の大きなフェライト-パーライト組織であり、硬化組織は認められなかった。また、熱影響境界部は一般的なレール溶接部と同様の微細パーライト組織であった。

3.4.5 残留応力測定

熱間矯正を実施した試験体において残留応力分布を測定した。測定にはひずみゲージを用い、試験体を切断した際に開放されたひずみを残留応力として測定する切出

し法を採用した。

図8に溶接中心で測定したレール長手方向および高さ方向の残留応力分布を示す。HH340レールの補修部は、レール長手方向では、頭部あご下部で最大275MPa程度の大きな引張残留応力となり、頭頂面で540MPa程度の著大な圧縮残留応力となっている。また、レール高さ方向では、頭頂面から頭部あご下までは50MPa程度の圧縮残留応力となっているが、腹部中立軸近傍では100MPa程度の引張残留応力が発生している。頭頂面で最大の圧縮応力、あご下部で最大の引張応力となる残留応力分布は普通レール補修部の残留応力分布と同様の傾向であり、転動疲労試験および軸力付加曲げ疲労試験において疲労き裂等が発生していないことから、実用上問題ないと考えられる。

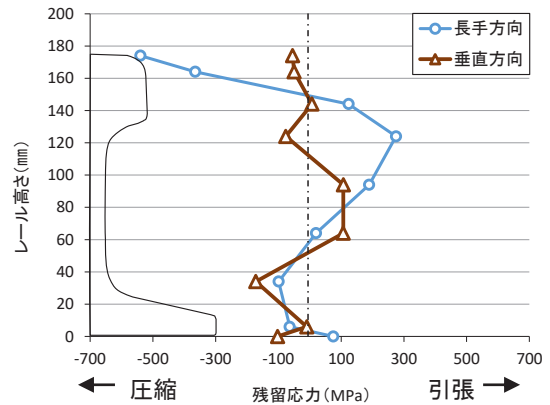


図8 補修部の残留応力分布

4. 熱間矯正作業の施工性改善

レール頭部きず補修工法は、頭部に膨大な熱量が加わることから、冷却に伴う熱収縮によりレールに大きな落込みが発生する（-1.5mm以上/1mスパン）。現在、落込み防止のために補修直後に専用の矯正機を使った熱間矯正作業（図1(f)）を実施し、補修部を中心にレールを所定量曲げ上げているが、作業性が悪く、高い技能を必要としている。そこで、現在手動で実施している矯正作業を自動制御とし、作業性を改善すると共に、脱技能化を図った。

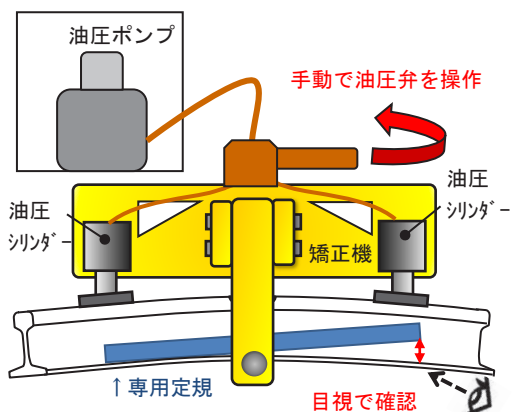
4.1 現行の熱間矯正作業の課題

図9に既存の熱間矯正機を用いた矯正状況を示す。熱間矯正機本体は左右の油圧シリンダーと中央の治具を使って、3点曲げの要領で補修箇所を矯正する機構である。現行の矯正作業では、同図に示すような専用の定規をレール底部上面に設置し、矯正時のレール変形量を目視により測定して、手動で油圧の調整を実施している。そのため、実際のレール変形量にばらつきが生じやすく、矯正量が適切でなかった場合、仕上り範囲内（高低：+0.5mm～-0.1mm/1mスパン）に収めるための仕上げ

作業（グラインダー研削作業）に膨大な時間と労力が必要となる。熱間矯正時に所定のレール変形量となるよう安定して施工できれば、仕上げ時間の減少によって施工時間短縮に期待できる。



(a) 熱間矯正状況



(b) 熱間矯正機概略

図9 既存の熱間矯正機を用いた矯正作業状況

4.2 自動制御機構の検討

手動で実施している矯正作業を自動化するためには、専用定規と作業者の目視で測定しているレール変形量を変位センサーに置き換えると共に、センサーからの信号により油圧ポンプに設置した油圧弁を制御する必要がある。この際、レール底部上面に設置する定規に変位センサーを取り付けると、定規の設置状況により測定されるレール変形量にばらつきが生じることが懸念される。そこで、本検討では、矯正に3点曲げを採用していることを利用し、レール変形量に対応するシリンダー伸び量を

変位センサーで測定することでレール変形量を制御することとした。

4.3 既存の矯正機構を用いた事前検討

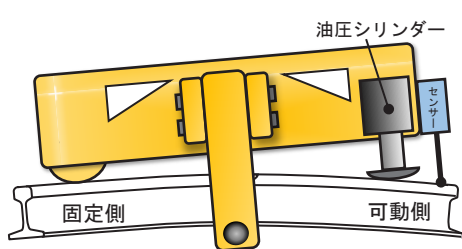
既存の熱間矯正機は油圧シリンダーが2台あり、それぞれに変位センサーを取り付ける場合、制御機構が複雑となる。そこで、事前検討として、左右のシリンダー伸び量が同値となるような固定治具を設置し、矯正試験を実施した。しかしながら、固定治具を設置したにもかかわらず、矯正機のがたつきや遊びの影響によりシリンダー伸び量とレール変形量が作業毎に大きく異なることが判明した。そこで、シリンダー台数1台で矯正可能な新しい矯正機構を検討することとした。

4.4 新しい矯正機構による自動制御手法の検討

レールガス圧接時に使用する縦矯正機を参考とし、シリンダー1台で矯正可能な機構を考案した。図10に自動制御式熱間矯正機の詳細を示す。既存の矯正機に設置されている2台のシリンダーの内、片側のシリンダーを固定（不動点）し、センサー側のシリンダーのみに油圧ホースを接続した。また、矯正機には固定側を支点とした回転が伴うことから、レールとの接触部となるシリンダー先端には両側とも半円状の治具を設置した。なお、変位制御で変形量が所定値に達しないままポンプの油圧上限に達した場合、矯正作業が終了しない（油圧が抜けない）ことが想定されたため、ポンプの油圧力に上限を設けて矯正を中断する制御を追加した。

当該矯正機を使用し、補修部の矯正試験を実施した。本矯正試験では、従来の専用定規による読み値が14mmとなる手動の矯正作業を実施し、その際にセンサーで測定したシリンダー変位量を設定値とした。表4に矯正試験結果と施工後の仕上り形状(高低)を併せて示す。なお、今回の試験では矯正タイミングを出鋼後11分30秒とした。TPNo.1の手動による矯正作業で専用定規による読み値が14mmとなった際のシリンダー変位量は23.6mmであったことから、TPNo.2およびNo.3において自動制御の設定値を24.0mmとした。また、油圧力の設定値

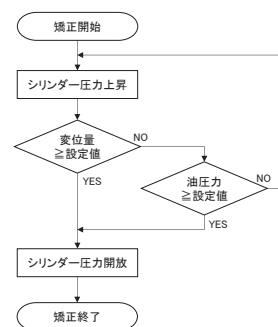
片側を固定とし、一方のシリンダーのみ使用 ⇒ 矯正機本体が回転し、3点曲げを実現



(a) 矯正機構の模式図



(b) 試作機による矯正状況



(c) フローチャート

図10 自動制御式熱間矯正機の詳細

特集：軌道技術

は従来の矯正作業で使用する油圧ポンプの上限値である70MPaとした。その結果、TPNo.2では、油圧力制御により油圧力70MPa、変位量22.6mmで終了し、TPNo.3では変位制御により油圧力69.7MPa、変位量24.0mmで矯正終了となった。仕上り状態を確認した結果、TPNo.2では+0.35mmと仕上り範囲内に収まったが、TPNo.3では矯正量がやや多かったため、+0.55mmと仕上り範囲をわずかに上回る結果となった。なお、現場作業ではTPNo.3の矯正量でも仕上り範囲内に収めることは十分可能であるが、施工時間短縮を考えた場合、シリンダー変位量の設定値は23.0mmがより適正であると考えられる。

以上の結果より、開発した自動制御機構を用いて、従来の手動による矯正作業と同様のレール変形量を確保することが可能であることが確認された。

表4 試験条件および試験結果

制御方法	TP No.	設定値			試験結果			仕上り形状 (mm)
		自動制御		定規	自動制御		定規	
		変位量 (mm)	油圧力 (MPa)	測定値 (mm)	変位量 (mm)	油圧力 (MPa)	測定値 (mm)	
手動	1	-	-	14	23.6	67.0	14	+0.45
自動	2	24.0	70.0	-	22.6	70.0	14	+0.35
	3	24.0	70.0	-	24.0	69.7	15	+0.55

4.5 現場施工試験

営業線における現場施工試験において、開発した自動制御機構を用いた矯正作業を実施した。図11に現場施工試験状況、表5に熱間矯正条件および結果を示す。自動制御機構の設定値は変位量23.0mm、油圧力70.0MPaである。矯正作業の結果、矯正量23.0mm、油圧力68.4MPaで矯正作業が終了した。定規によるレールの変形量は15mmであり、目安となる14mmより1mm上回る結果であった。図12に最終仕上げ後の1mスパン頭頂面形状を示す。頭頂面形状は、最終仕上げ段階で+0.45mmであり、仕上り基準値内に収まっていた。また、従来の作業における計画施工時間に比べ60分以上短い150分で施工が完了した。以上より、自動制御式熱間矯正機を用いて意図した矯正作業が達成できると共に、脱技能化により作業の効率化が向上し、施工時間の短縮に繋がるものとする。

5. 「施工の手引き」の作成

熱間矯正作業の自動化により、レール頭部補修工法の脱技能化が達成されたことから、全国の鉄道事業者で施工者を問わず施工することが可能となった。一方、新規にレール頭部補修工法を導入する場合、レール頭部補修工法の施工のポイントをまとめた手引き等が必要となる。そこで、これまでの研究開発成果を反映し、施工のポイントをまとめた「レール頭部きず補修工法施工の手引き」を作成した。



図11 現場施工試験状況

表5 自動制御による熱間矯正作業

設定値		矯正結果			矯正時間	
自動制御		自動制御	定規	測定値	開始	終了
変位量 (mm)	油圧力 (MPa)	変位量 (mm)	油圧力 (MPa)	(mm)		
23.0	70.0	23.0	68.4	15	11' 30"	11' 43"

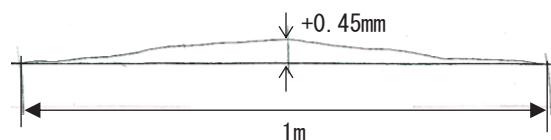


図12 現場施工試験における1mスパン頭頂面形状

6. まとめ

本研究では熱処理レールへの適用および熱間矯正作業の脱技能化について、検討を実施した。結果は以下の通りである。

- (1) 熱処理レールへの適用に向けた各種検討を実施し、HH340レールへの適用条件を提案した。また、提案した条件により作製した試験体に対して、一連の性能評価試験を実施し、実用上十分な強度を有することを確認した。
- (2) 熱間矯正作業の脱技能化のため、新たに自動制御手法を開発した。また、現地試験において当該自動制御手法を用い、従来と同様の矯正結果が得られると共に施工時間を短縮できることを確認した。
- (3) これまでの研究開発成果を反映し、レール頭部補修工法の施工のポイントをまとめた「レール頭部きず補修工法施工の手引き」を作成した。

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) 敷中嘉彦, 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, 2016