

【研究論文】

【平成29～令和元年度 受託研究】

鉄道レールの余盛(よもり)除去装置の開発 — 第一報 レールの削正用工具と削正条件の実験的検討 —

家口 心, 今野 啓輝^{*1}, 小松 良知^{*1}, 吉川 穰, 渡邊 洋一, 久田 哲弥
自動車産業支援部
^{*1}大研工業株式会社

新幹線や都市部の在来線では、騒音・振動の低減および列車の乗り心地向上の観点から、レールの継ぎ目を溶接により排除したロングレール軌道が採用されている。レールの溶接工程には、溶接部の余盛を除去し段差を平滑化する削正作業が付随する。この削正作業は一般砥石を搭載したハンドグラインダを用いて人力で行われており、本作業の効率化が課題となっている。そこで本作業の効率化を実現するため、一般砥石に代わる候補工具としてカップ型CBN電着砥石、縦型フライスカッターを設定し、レール削正中の加工力や、削正面における焼けの発生状況、粗さ、残留応力等を指標として各工具の比較検討を行った。検討の結果、フライスカッターがレール削正用工具として高い適正を有することが明らかとなった。

キーワード: 鉄道レール, 削正, 研削, 切削, 加工力, 表面粗さ, 残留応力

1 緒言

新幹線や都市部の在来線では、騒音・振動の低減および列車の乗り心地向上の観点から、レールの継ぎ目を溶接により排除したロングレール軌道が一般的となっている¹⁾²⁾。レールの溶接工程には、溶接部の余盛を除去し段差を平滑化する削正作業が付随する。この削正作業は一般砥石を搭載したハンドグラインダを用いて人力で行われており、本作業の効率化が課題となっている³⁾。そこで本作業の効率化を図るべく、一般砥石に代わる削正用工具の検討を行った。レール削正作業は高温に加熱されたレールの溶接余盛を、クーラントを用いることなく除去加工する必要があり、使用される工具にとって極めて過酷な環境となる。そこで、候補工具としてカップ型のCBN電着砥石、縦型フライスカッターを設定し、レールから切り出した試験片の削正実験を行った。削正中の加工力や、加工面における焼けの発生状況、粗さ、残留応力等を指標として各工具の比較検討を行った。

2 実験方法

2.1 削正工具

表1に実験に使用した工具を示す。実験には#60カップ型一般砥石(以下、WA60と表記)、#30カップ型CBN

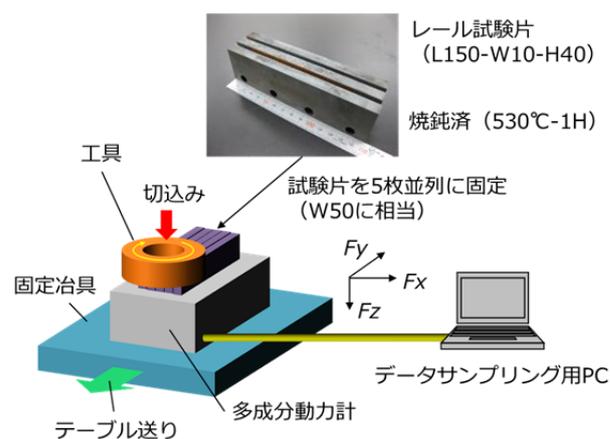


図1 実験装置の模式図

電着砥石(以下、CBN30Pと表記)、縦型フライスカッター(以下、Milling cutterと表記)を使用した。

2.2 実験装置

図1に実験装置の模式図を示す。マシニングセンタ(MB-56VB, オークマ)のテーブル上に多成分動力計(9257B, 日本キスラー)を配置し、その動力計上に60kg普通レール⁴⁾からワイヤ放電加工により切り出した試験片を配置した。試験片の寸法は長さ150mm, 幅10mm, 高さ40mmとし、5枚を並列に並べて固定した。なお、本試験片は応力除去を目的として実験前に焼鈍(530°C, 1時間)を行った⁵⁾。

表1 削正工具

工具種類	略称	仕様, メーカー
#60カップ型一般砥石	WA60	外径100 mm, 内径80 mm, ノリタケカンパニーリミテド
#30カップ型CBN電着砥石	CBN30P	外径108 mm, 内径80 mm, ノリタケカンパニーリミテド
縦型フライスカッター	Milling cutter	外径75 mm, φ12 mm円形チップ, 5枚刃, アレーサー

表2 主な削正条件

項目	条件
試験片材料	60 kg普通レールからの切出し材
試験片寸法	150 mm, 幅10 mm, 高さ40 mm (5枚を並列に配列して使用)
工具回転数	4000 rpm (WA60, CBN30P) 1000 rpm (Milling cutter)
クーラント	なし(乾式)

表3 切込深さと送り速度

条件名称	切込深さ	送り速度	除去速度
単位	(μ m)	(mm/min)	(cm^3/min)
$\Delta 10-F 4000$	10	4000	2
$\Delta 20-F 2000$	20	2000	2
$\Delta 50-F 800$	50	800	2
$\Delta 100-F 400$	100	400	2
$\Delta 200-F 200$	200	200	2
$\Delta 500-F 80$	500	80	2
$\Delta 1000-F 40$	1000	40	2

2.3 実験条件

表2に主な削正条件を示す。各工具の回転数はメーカー推奨値を元に選定した。実際の削正工程と同様にクーラントは使用しなかった。表3に実験した切込深さと送り速度の関係を示す。レール全周における余盛の体積は約60 cm^3 あり、削正工具にはその余盛を30分以内で除去する能力が要求される⁶⁾。このため、2 cm^3/min の除去速度となる複数の切込深さと送り速度の組合せで1方向送りの削正実験を行った。

2.4 削正中のデータ収録

削正中は多成分動力計を用いて三方向の加工力(図1中の F_x , F_y , F_z)を測定した。

削正後の加工面の3箇所において、表面粗さ・形状測定機(フォームタリサーフPGI 1250A, アメテックテラレーホブソン)を用いて平均粗さ(R_a)と最大高さ粗さ(R_z)を測定した。また、ポータブル型X線残留応力測定装置(μ -X360, パルステック工業)を用い、テーブル送り方



図3 各工具を用いて試験片を削正中の様子

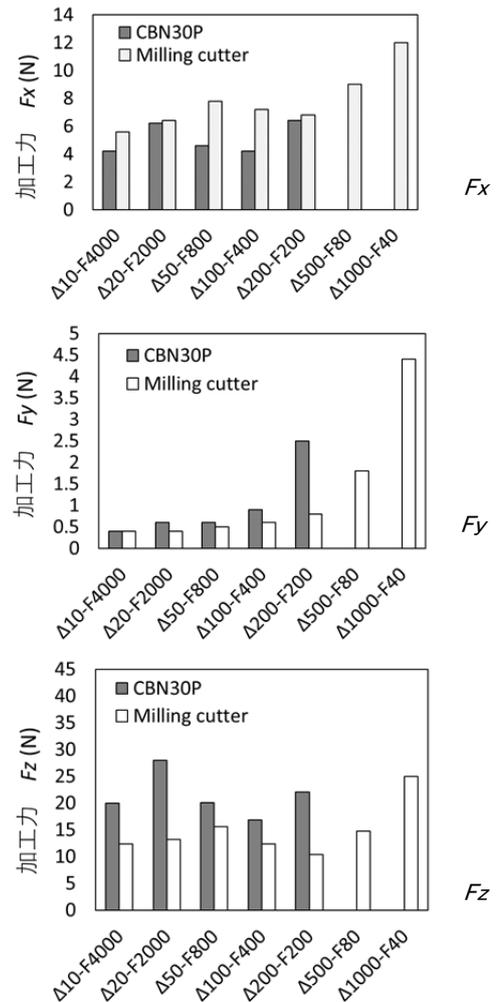


図4 削正中の各方向における加工力

向に対して平行方向と直交方向における残留応力を測定した。

3 実験結果及び考察

3.1 各工具の限界切込深さ

WA60を使用した場合、加工位置設定のための当込みを行った瞬間に、接触界面から白煙が発生した。この時、試験片表面において研削焼けは確認されなかったが、これ以上の切込の付与は危険と判断したため、

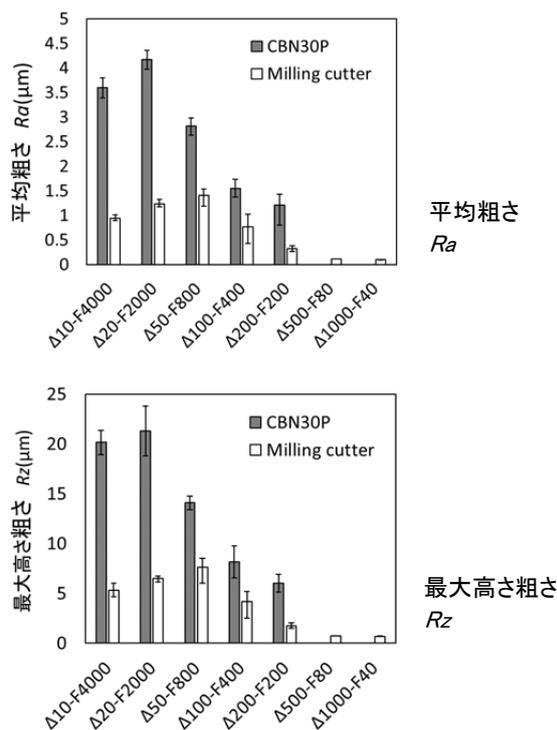


図5 各条件で削正した面の粗さ

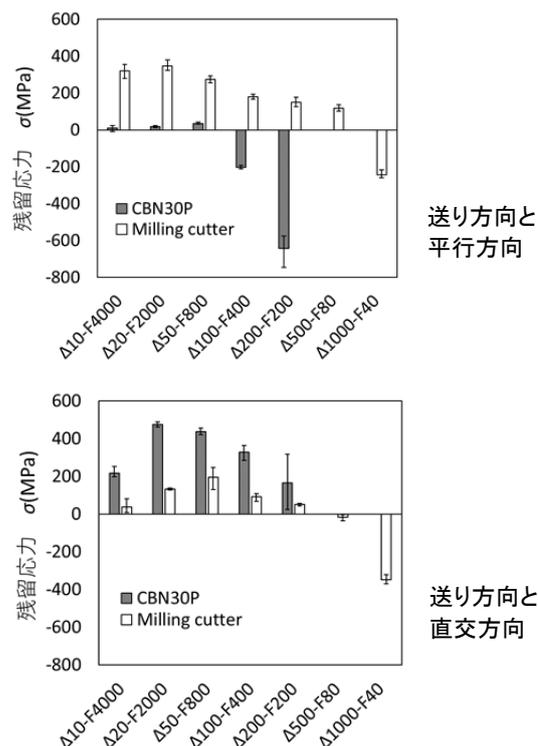


図6 各条件で削正した面の残留応力

WA60を用いた削正実験は中止することとした。

図3にCBN30PとMilling cutterを用いて試験片を削正中の様子を示す。クーラントを使用しなかったため、いずれの工具を使用した場合でも火花が発生した。CBN30Pを用いた場合の方が発生する火花がより顕著であった。

CBN30Pを用いて切込深さ500 μmで試験片を削正した場合、加工面に研削焼けが発生した。本工具については、約200 μmが限界の切込深さであると判断し、500 μm以上の切込深さでの実験は差し控えた。一方、Milling cutterを用いて削正した場合には、1 mmの切込深さまで焼けの発生は確認されなかった。

3.2 加工力の測定結果

図4に削正中の各方向における加工力 (F_x , F_y , F_z の最大値)を示す。Milling cutterの加工力はCBN30Pと比較して、 F_x に関しては同等かやや大きい傾向があるが、 F_y と F_z に関しては小さい傾向があることが分かる。総合的に判断すると、CBN30Pと比較してMilling cutterの方が小さい加工力でレール削正が可能である。

3.3 削正面粗さの測定結果

図5に各条件で削正した面の粗さを示す。平均粗さ、

最大高さ粗さ共に同様の傾向を示しており、送り速度が小さい程、粗さが小さくなることが分かる。また、CBN30Pと比較して、Milling cutterの方が小さい値を示している。これらの原因は、送り速度が遅い程、また、使用する工具先端半径が大きい程、カスプ(削り残し山部)の高さが小さくなることから説明できる。

3.4 削正面の残留応力

金属材料表面に残留する過度な引張応力は、表層の亀裂を誘発する危険性があるため、列車の通過に伴う繰返し荷重が付与される鉄道レールにとっても極力抑制するべきである⁷⁾⁸⁾。

図6に、テーブル送り方向に対して平行方向と直交方向における削正面の残留応力を示す。両図において、プラスの残留応力は引張、マイナスの残留応力は圧縮となる。両図から、工具痕に対して平行方向と直交方向共に、切込深さが大きい(送り速度が小さい)程、残留応力が小さくなる傾向があることが分かる。また、残留応力の値は、送り方向に対して平行方向ではCBN30Pによる加工面の方が大きく、直交方向ではMilling cutterによる加工面の方が大きい。特に、CBN30Pを用いて高い送り速度で削正した場合には、平行方向で400 MPaを超過する過大な引張残留応力が検出されるため、この条件での削正は避けた方が良い。

表4 各条件での削正試験結果

工具種類	切込 深さ	順 位	送り 速度	順 位	X方向 加工力	順 位	Y方向 加工力	順 位	Z方向 加工力	順 位	平行方向 残留応力	順 位	直行方向 残留応力	順 位	平均 粗さ	順 位	最大高 さ粗さ	順 位	順位 合計	総合 順位
		0		2		2		0.5		2		1		1		1		1		
	Δ		F		F_x		F_y		F_z		σ_p		σ_v		R_a		R_z			
	単位	μm	番	mm/min	番	N	番	N	番	N	番	MPa	番	MPa	番	μm	番	μm	番	番
CBN30P	10	1	4000	11	4.2	1	0.4	1	20.0	8	197	9	-8	4	3.6	11	20.2	11	76	9
CBN30P	20	3	2000	9	6.2	5	0.6	5	28.0	12	461	12	13	5	4.2	12	21.3	12	96	12
CBN30P	50	5	800	7	4.6	3	0.6	5	20.1	9	421	11	32	6	2.8	10	14.1	10	78	10
CBN30P	100	7	400	5	4.2	1	0.9	9	16.8	7	284	10	-212	3	1.5	9	8.2	9	62	7
CBN30P	200	9	200	3	6.4	6	2.5	11	22.0	10	23	4	-746	1	1.2	6	6.0	6	61	6
Milling cutter	10	1	4000	11	5.6	4	0.4	1	12.4	2	7	3	280	11	0.9	5	5.3	5	59	4
Milling cutter	20	3	2000	9	6.4	6	0.4	3	13.2	4	127	7	323	12	1.2	7	6.5	7	73	8
Milling cutter	50	5	800	7	7.8	10	0.5	4	15.6	6	130	8	254	10	1.4	8	7.6	8	82	11
Milling cutter	100	7	400	5	7.2	9	0.6	5	12.4	2	66	6	166	9	0.8	4	4.2	4	58	3
Milling cutter	200	9	200	3	6.8	8	0.8	8	10.4	1	43	5	125	8	0.3	3	1.7	3	47	1
Milling cutter	500	11	80	2	9.0	11	1.8	10	14.8	5	-36	2	100	7	0.1	2	0.7	2	54	2
Milling cutter	1000	12	40	1	12.0	12	4.4	12	25.0	11	-371	1	-260	2	0.1	1	0.7	1	59	5

4 実験結果の総合評価

各条件における実験の集計結果を表4に示す。評価項目毎に順位付けを行い、その順位に対して評価項目の重要度を考慮した重み付け係数を乗算した。各評価項目の重み付け係数は、送り速度については工具送り方向反転時における反力の増大に大きく影響するため「2」、X方向とZ方向の加工力についても、絶対値が大きく装置剛性に影響するため「2」、Y方向の加工力は絶対値が相対的に小さいため「0.5」とした。残留応力と粗さについては全て「1」とした。実験条件毎に各評価項目の順位に重み付け係数を乗算した値を合計し、合計値の小さい条件から順に順位付けを行った。その結果、順位の上位5位までを工具としてMilling cutterを使用した条件が占有した。このことからCBN30Pと比較してMilling cutterの方が比較的小さい加工力での加工が可能であると共に、加工面の粗さや残留応力も小さく抑えられることから、レール削正工具として優位性があることが分かった。

5 結言

レール削正時に使用する工具と加工条件の最適化を目的とし、カップ型の#60一般砥石(WA60)、#30CBN電着砥石(CBN30P)、及び縦型フライスカッター(Milling cutter)を用いてレールから切り出した試験片の削正試験を試みた。その結果、以下に示す知見が得られた。

- (1) CBN30Pでは200 μm の切込深さまでのレール削正が可能である。500 μm の切込深さでは研削焼けが発生する。
- (2) Milling cutterでは1 mmの切込深さでのレール削

正が可能である。

- (3) CBN30Pと比較してMilling cutterの方が、小さい加工力によって、加工面粗さが小さく、残留応力も小さいレール削正が可能である。

謝辞

本研究は平成30年度中小企業経営支援等対策費補助金(戦略的基盤技術高度化支援事業)「鉄道レールの溶接余盛除去装置の開発」の一環で実施されたものである。

参考文献

- 1) 山本隆一:レールの溶接, 日本溶接学会誌, **81**, **8**, (2012), p.641-649.
- 2) 才田健二ほか:レールの溶接技術の動向と今後の展開, 新日鉄住金技報, **395**, (2013), p.85-94.
- 3) 齋藤優輝ほか:レール溶接仕上用機械の開発, JR EAST Technical Review, **39**, (2012), p.67-70.
- 4) JIS E1101, (2001).
- 5) 浦島親行ほか:残留応力制御熱処理レールの開発, までりあ, **33**, **4**, (1994), p.432-434.
- 6) 佐竹宣章ほか:CBN砥石による鉄道レールの乾式研削特性—第1報:乾式研削の可能性試験—, 2015年度砥粒加工学会学術講演会講演論文集, (2015), p.93-98.
- 7) 名村 明ほか:レールの亀裂進展を予測する, Railway Research Review **72**, (2015), p.20-23.
- 8) S. TAKAHASHI, et al.: RESIDUAL STRESS EVALUATION OF RAILWAY RAILS, JCPDS-ICDD, (2009), p.240-247.