

繰り返し重錘落下試験によるレール頭頂面端部の塑性変形進みの評価

鉄道総合技術研究所 正会員 ○中野 哲弥

鉄道総合技術研究所 正会員 西宮 裕騎

鉄道総合技術研究所 正会員 塩田 勝利

鉄道総合技術研究所 正会員 安田 新太郎

1. はじめに

近年、無線式の列車制御システムの開発・導入が進んでいるが、将来的に軌道回路が撤去されることでレールの破断検知ができなくなる。そのため、軌道回路によらないレールの破断検知方法が研究されているが、常時監視可能な軌道回路と異なり、一定期間レール破断箇所の車両の繰り返し通過が生じると考えられる。レール破断箇所の車両の繰り返し通過を想定した実験では、浦川らにより繰り返し重錘落下試験によってレールの塑性変形進みについて検証²⁾がされているが、載荷回数は 603 回であった。そこで、本研究では更なるレール頭頂面端部の塑性変形進みを評価するため、レール開口部の 10 万回繰り返し重錘落下試験を実施した。

2. 繰り返し重錘落下試験

2.1 試験概要

図 1 に重錘落下試験の概要を、表 1 に供試体の軌道部材を示す。本試験は、重錘を設定した高さまで上昇させ、開口部を設けたレールに落下させる試験である。レールへの接触部は車輪径を模擬した接触子を用い、載荷荷重はロードセルにより確認した。載荷荷重は重錘重量と落下高さにより調整し、重錘重量 890kg、落下高さ 75mm とすることで目標とする載荷荷重 (340kN、2.2 節参照) になることを確認した。ここで、繰り返し載荷によりレールに塑性変形が生じレールの角が潰れると、応力集中が緩和され載荷荷重が減少すると考えられる。しかし、減少した載荷荷重をその都度調整することは困難であるため、重錘重量と落下高さは変更せず試験を実施した。測定項目は、レールの塑性変形形状とし、その形状はレール形状測定用ミニプロフを用い、レール頭頂面端部をレール長手方向に測定した。レール頭頂面端部の落ち込み量 (以下、「塑性落ち込み量」) は、試験前の初期形状との差分より求めた。

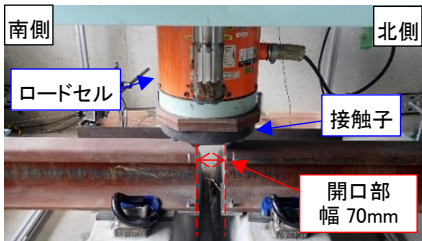


図 1 重錘落下試験

表 1 供試体

軌道部材	種別
レール	JIS 50kgN レール
PC まくらぎ	P3TS5 (半まくらぎ)
レール締結装置	e2009 形
軌道パッド	PND 用 (ばね定数:110MN/m)

2.2 試験条件

本試験は、図 2 に示すようにレールの破断が受け側レール付近で発生した場合を想定した。これは、受け側レールの方が去り側レールと比べ剛性が高く、レール頭頂面端部の塑性変形に厳しい条件と考えられるためである。開口部はレール破断時開口量の限度値である 70mm とし、開口部の中心を重錘の落下位置とした。しかし、図 2 に示す配置状態で実施すると、受け側レールと去り側レールで剛性が異なるため、レールに衝撃した重錘が偏心し、試験機の破損につながる恐れが考えられた。そのため、本試験では、開口部中心を対称面とし、受け側レールを左右対称となるよう供試体を設置した。ここで、スラブ軌道上の幅 70mm のレール開口部を、車両が 100km/h の速度で通過した際に受け側レールに発生する衝撃輪重は 170kN だとされている³⁾。本試験では接触子が 2 本のレールに衝撃することから、南北のレールに均等に荷重が加わると想定し、受け側レールに発生する衝撃輪重 170kN を 2 倍し、340kN を載荷荷重とした。載荷回数は、10 万回 (10 両編成・2500 本相当) とした。

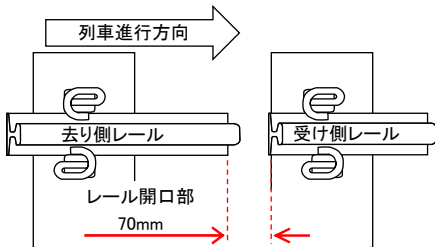


図 2 レール破断箇所の想定

キーワード 重錘落下試験, 塑性変形, レール損傷

連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38 (公財) 鉄道総合技術研究所 軌道構造 TEL 042-573-7275

2.3 試験結果

図 3 に 10 万回载荷後のレール頭頂面端部の状態を、図 4 にレール頭頂面端部の塑性変形形状、表 2 に塑性落ち込み量の推移を示す。塑性落ち込み量の最大値は北側 1.2mm、南側 1.8mm であり、北側と南側で 0.6mm の差が生じていた。塑性落ち込み量の推移（括弧内は最大値に対する割合）は、载荷回数 25 回の時点で北側 0.7mm（58%）、南側 0.6mm（33%）と载荷初期での進みが大きく、5 万回から 10 万回では北側、南側ともに推移していなかった。载荷荷重は塑性変形が進むにつれ減少し、1 万回以降では約 310kN 程度となっていた。なお、10 万回载荷後の PC まくらぎ、レール締結装置に外観上の損傷は発生していなかった。



図 3 10 万回载荷後のレール頭頂面端部

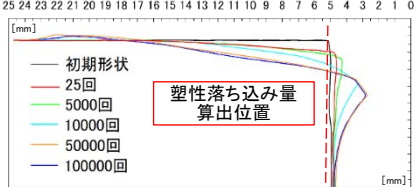


図 4-a 南側レールの塑性変形形状

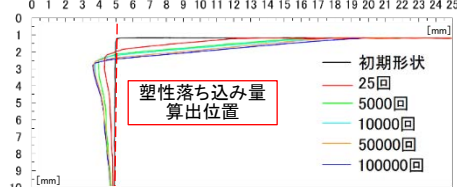


図 4-b 北側レールの塑性変形形状

3. 試験結果の考察

浦川らによる 603 回の繰り返し重錘落下試験²⁾では、荷重条件やレールと車輪の接触条件が変わらない場合、以下の知見が得られている。

- ・ 塑性落ち込み量はある一定値に漸近収束する。
- ・ レールの最大塑性落ち込み量は、载荷荷重の振れ幅とレールの降伏応力、およびレールと車輪の幾何形状よりおおむね予測可能である（理論式（1））。

3.1 塑性変形落ち込み量の推移

塑性落ち込み量の推移（表 2）に着目すると、北側、南側とも载荷回数 5 万程度で一定値に収束し、その後载荷回数 10 万回まで塑性落ち込み量が増加していないことが確認された。これは、塑性落ち込み量はある一定値に漸近収束するという浦川らの知見²⁾と同じ傾向であることを確認した。

3.2 最大塑性変形落ち込み量

レールの最大の塑性落ち込み量 z_{pmax} の理論式（1）を本試験に適用した。ここに、 P_a ：载荷荷重の振幅（170kN(载荷荷重 340kN を北側と南側に等分配)）、 σ_y ：レール鋼の加工硬化前の降伏応力（450MPa）、50kgN レールの頭頂面と接触子の接触関係より α ：121.4、 β ：231.39 である。算定されたレールの最大の塑性落ち込み量 z_{pmax} は 1.05mm となり、北側の最大塑性落ち込み量 1.2mm と比較すると、その差は 0.15mm（+14%）と概ね一致している結果となった。一方、南側の最大塑性落ち込み量 1.8mm と比較すると、その差は 0.75mm（+71%）と大きな差になった。図 5 に 5000 回以降に確認された衝撃状態を示す。接触子は開口部の中央に衝撃した後、わずかに跳ね上がり、南側にずれた状態で着地していた。この挙動により、理論式（1）で仮定しているレールの頭頂面と接触子の接触関係と、本試験での接触関係が乖離したため、南側の最大塑性落ち込み量に理論値との大きな差が生じたと推察する。このことから、レール開口部の車両の繰り返し通過を想定した本試験では、北側の試験結果の方が再現度の高いものだと考える。

4. まとめ

本稿では、レール開口部の繰り返し载荷試験によるレール頭頂面端部の塑性変形形状を測定し、塑性変形進みを評価した。その結果、塑性落ち込み量は、载荷回数 5 万回程度で一致値に収束し、その後 10 万回まで進みがみられないことを確認した。また、レールの最大の塑性落ち込み量の理論式²⁾を適用した結果、北側の最大塑性落ち込み量の差は 0.15mm（14%）と概ね一致していた。今後は、曲線を想定した同試験を実施する予定である。

参考文献

1) 渡辺郁夫：無線式列車制御の動向，鉄道総研報告，25 巻 5 号，pp.1-4，2011
2) 浦川ほか：繰り返し重錘落下試験による開口部のレール塑性変形進み特性の把握，第 25 回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集（J-RAIL2018）

表 2 塑性落ち込み量の推移

载荷回数 (回)	南側		北側	
	増加量	最大値	増加量	最大値
25	0.6mm(33%)	0.6mm(33%)	0.7mm(58%)	0.7mm(58%)
5000	0.2mm(11%)	0.8mm(44%)	0.2mm(17%)	0.9mm(75%)
10000	0.6mm(33%)	1.4mm(77%)	0.1mm(8%)	1.0mm(83%)
50000	0.4mm(22%)	1.8mm(100%)	0.2mm(17%)	1.2mm(100%)
100000	0.0mm(0%)	1.8mm(100%)	0.0mm(0%)	1.2mm(100%)

※ 括弧内は最大塑性落ち込み量に対する割合

$$z_{pmax} = \frac{-\beta + \sqrt{\beta^2 + 4\alpha \frac{P_a}{\sigma_y}}}{2\alpha} \quad (1)$$

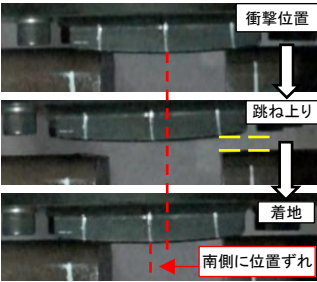


図 5 衝撃状態