1516 急曲線外軌波状摩耗発生区間の軌道振動特性

正[土]〇田中 博文 (鉄道総研) 正[土] 輪田 朝亮 (JR 東日本)

Properties of Track Vibration Generated with Corrugated High Rails in Sharply Curved Tunnels

Hirofumi TANAKA, Railway Technical Research Institute. 2-8-38, Hikari-cho, Kokubunji-city Tomoaki WADA, East Japan Railway Company

Corrugations with comparatively long wavelengths of about 30 cm were recently found on some high rails in sharply curved tunnels. In this particular line, these corrugations were only found in tunnels, not found in any open sections with sharp curves. For the above reason, these corrugations seem to be generated by the effects of tunnels as well as the lateral forces observed in sharply curved tracks. Hence, we measured the track vibrations before and after the rail replacement in two sharply curved tracks with a same radius; one is in a tunnel and the other is in an open section. As a result, these track vibrations showed different properties, which suggested the generation mechanism of the corrugations.

Keywords: high rail, corrugation, track vibration, gauge corner, tunnel, sharp curve, acceleration, power spectrum

1. はじめに

急曲線内軌の頭頂面に,波長10cm程度の波状摩耗が発 生することは広く知られている.一方,曲線外軌のゲー ジョーナーに波長数十cm程度の比較的波長の長い波状 摩耗が発生することが稀な事例として報告されている^{1),} ²⁾ この度JR東日本管内において,急曲線とトンネルが 重なる急勾配区間のみで,外軌のゲージョーナー部に波 長30cm程度の波状摩耗が発生しているのが確認された³⁾. この種の波状摩耗は,深く進行した場合はレール削正に よる除去が困難であり,また著大な輪重・横圧変動の原 因となることから,その抑制策を講じる上で,発生メカ ニズムの解明が必要となる.

これに対し、著者らは、地上輪重横圧測定を実施し、 レール/車輪間の接触力の把握を試みた³⁾. その結果、 まず、外軌波状摩耗の谷部で輪重が増加し、横圧が減少 することを確認した.また、波状摩耗レールの塑性流動 分析を行い、トンネル内のみ外軌のゲージョーナーにレ ール長手方向の塑性流動が確認され、縦すべりが発生し ており、これが外軌波状摩耗の発生に影響している可能 性が高いことを指摘した³⁾.さらに、トンネル内でのみ 外軌波状摩耗が発生するという特性に着目し、同一曲線 のトンネル内と明かり区間でインパルスハンマーによる 衝撃加振試験を実施し、トンネル内と明かり区間で軌道 振動特性が異なることを確認した⁴⁾.本研究では、上記 の衝撃加振試験に加えて、列車走行時の軌道各部の振動 測定を実施し、外軌波状摩耗発生区間の軌道振動特性に ついての検討を行った.

2. 外軌波状摩耗の発生状況と線区の概要

外軌波状摩耗は、半径300mの曲線とトンネル、さらに は平均22‰という急勾配という限られた区間のみにおい て発生していた.波状摩耗発生区間の軌道構造は有道床 軌道,道床厚は250mmであり、まくらぎ間隔は平均0.58m (43本/25m)であった.なお、当該線区は単線区間であ る.また、トンネル構造は馬蹄形の山岳トンネルであり、 覆工厚は300~450mmで、坑口付近にはインバートが施 工されていた.上記のような区間は、当該線区に9ヶ所存 在するが、そのいずれにおいても、波長30cm程度の波状 摩耗が外軌のゲージューナー部に発生していた.なお、 レールは50Nレールであり、敷設後の累積通過トン数は 4000万トン程度である.

当該線区を走行する列車は,通過トン数換算で9割以上 を特急列車が占めており,残りは普通列車である.貨物 列車は走行していない.また,線区の最高速度は130km/h であるが,外軌波状摩耗が発生していた区間では,いず れの曲線でも列車の通過速度は60km/h程度である.

3. 列車走行時の軌道振動測定の概要

3.1 試験測定の位置

列車走行時の軌道振動測定は,図1に示すように外軌 波状摩耗が発生しているトンネル内と,同じ曲線内で発 生していない明かり区間の2測線で実施した.当該曲線 の半径は300m,カントは90mmで,勾配は起点方から 終点方に上り22‰であった.なお,試験測線は,継目に よる衝撃的な振動の影響をできる限り受けないようにす るため,それぞれ継目間の中央に設定した.



3.2 加速度ピックアップの設置位置

図2に、各測線の加速度ピックアップの取り付け位置 を示す.トンネル内では、内外軌それぞれのレール(締 結装置直上の頭側部フィールドコーナー側), PC まくら ぎ(端部上面)およびトンネル側壁(レールレベル)に 取り付けた.明かり区間では側壁が存在しないため、側 壁用の加速度ピックアップを設置していない.加速度ピ

[No.09-65] 日本機械学会第16回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集〔2009-12.2~4. 東京〕

ックアップは、ベークライトの台座を介して、図2に示 した各取り付け位置において、それぞれ上下振動加速度 用と左右振動加速度用を30mm程度はなして2個取付け た.なお、加速度ピックアップは、レール用としてRION 社製 PV-94、まくらぎおよび側壁用として同じく PV-86 を用い、チャージアンプは全てRION 社製のUV-06を用 いた.



(6) 例かり区間 図2加速度ピックアップの取り付け位置

3.3 測定列車の概要

当該線区は、2章でも述べたように、通過列車の大部 分を特急列車が占めており、波状摩耗の発生にもこの特 急列車が大きく寄与していると考えられる.軌道振動測 定時には、普通列車の測定も実施したが、以下の分析で は、特急列車の振動測定結果のみを用いている.また、 当該線区は単線区間のため、試験測線上を上下列車が通 過しており、双方の列車を測定した.なお、試験区間の 列車の平均通過速度は 57km/h 程度であったが、50~ 60km/h の範囲内で多少のばらつきがあった.ただし、以 下の章で分析対象とした列車は、走行速度が 55km/h 以 上のものに限定しており、走行速度の差が軌道の振動特 性に与える影響を極力排除した.

4. 列車走行時の軌道振動の分析結果

4.1 レール交換前後の軌道振動特性の違い

外軌波状摩耗の有無が軌道振動に与える影響を検討す るため、トンネル内測線において、レール交換前後の軌 道振動の分析を行った.レール交換は、緩和曲線を含む 曲線全部の内外軌の両方に対して行い、レール交換後も 50Nの定尺レールとした.なお、軌道振動測定は、レー ル交換の直前直後で実施した.

(1) 振動加速度レベル

図3に、トンネル内における上下列車走行時における レール交換前後の外軌側の軌道各部の振動加速度レベル を示す、レール交換前後で比較すると、レールでは上下 振動で2dB,左右振動で7dB,PCまくらぎでは上下振動, 左右振動ともに11~12dB 程度,側壁では上下振動,左 右振動で15~20dBの振動加速度レベルの低下が見られ る.これより、レール、PCまくらぎ、側壁の経路で車両 からの振動が伝播するに従って、レール交換前後での振 動加速度レベルの低下割合が大きくなっていることがわ かる.また、レール交換前後ともに、振動加速度レベル に列車の走行方向の違いによる大きな差異は見られない.



(2) 振動加速度のパワースペクトル密度

図4に、レール交換前後のトンネル内の下り列車走行 時の外軌側の上下振動加速度および左右振動加速度のパ ワースペクトル密度の一例を示す. 同図より, レール交 換前には、レール、まくらぎおよび側壁において、上下 振動加速度, 左右振動加速度ともに, 55Hz 程度を中心と する明瞭なピークが見られる.また,110Hz および 220Hz にも、この高調波と考えられるピークが見られる.一方、 レール交換後にはこれらの周波数に明瞭なピークは見ら れない、なお、この周波数は、当該線区に発生している 波長 30cm の外軌波状摩耗上を列車が 60km/h で走行した 場合に励起される振動の周波数とほぼ一致しており、外 軌波状摩耗によってこのピークが生じていたことがわか る.また,55Hz付近のピーク以外でも、レール交換前の 軌道各部の振動加速度パワーは全体的に大きくなってお り,外軌波状摩耗によって,軌道が全体的に大きく振動 していたことがわかる.この結果は、図3の振動加速度 レベルの分析結果と一致している.

4.2 トンネル内と明かり区間の軌道振動特性の違い

外軌波状摩耗はトンネル内のみ発生しており、トンネ ル内と明かり区間の列車走行時の軌道振動特性の違いを 検討するに当たり、この波状摩耗によって励起される振 動の影響が非常に大きいと想定された.そこで、レール 交換後の軌道振動を分析し、レール凹凸の影響を受けて いない状態での、トンネル内と明かり区間の軌道振動特 性の差異を検討した.

(1) 振動加速度レベル

図5に、レール交換後のトンネル内と明かり区間の軌 道各部の振動加速度レベルを示す.振動加速度の方向に よらず、トンネル内と明かり区間の軌道各部で振動加速 度レベルに大きな差異は見られず,最大でも3dB程度で あった.これは、レール交換に伴って、トンネル内の外 軌波状摩耗がなくなり、トンネル内と明かり区間のレー ル凹凸が同等となったためであると考えられる.この結 果より、振動加速度レベルでは、トンネル内と明かり区 間の軌道振動特性の差を見出すことはできなかった.ま た,レール交換前後の振動加速度レベルの比較と同様に, 列車の走行方向の違いによる明瞭な差異も見られない.



(下り列車の一例)



図5 トンネル内と明かり区間の軌道各部の 振動加速度レベル

(2) 振動加速度のパワースペクトル密度

図6に、レール交換後のトンネル内と明かり区間の下 り列車走行時の外軌側の上下振動加速度および左右振動 加速度のパワースペクトル密度を示す.同図より、トン ネル内でのみレール、まくらぎともに上下振動加速度で 70Hz付近に明瞭なピークが見られる.一方、左右振動加 速度では、トンネル内ではレールおよびまくらぎの80Hz 付近にピークが見られるが、明かり区間のレールでは40, 60,80Hzにもピークがみられた.なお、150Hzよりも高 周波側では、トンネル内と明かり区間の振動加速度に明 確な差異は見られない.



図6 トンネル内と明かり区間の外軌側の パワースペクトル密度(下り列車の一例)

(3) 振動加速度のパワースペクトル密度のレベル差 トンネル内と明かり区間の軌道各部の振動加速度のパ ワー差を定量的に評価するために,振動加速度のパワー スペクトル密度のレベル差を求めた.トンネル内と明か り区間の振動加速度のパワースペクトル密度のレベル差 は式(1)で定義し,このレベル差が正のときはトンネル内 の振動加速度パワーの方が大きく,負のときは明かり区 間の振動加速度パワーの方が大きいことを示す.この評 価手法は、同一曲線においてインパルスハンマーによる 衝撃加振試験を行った際に、トンネル内と明かり区間の 振動特性の差を検討したときと同じ手法である⁴⁾.

$$\Delta L_{PSD(T/O)}(f) = 20 \log \left(\frac{PSD_{Tunnel}(f)}{PSD_{Open}(f)} \right)$$
(1)

ここで、 $\Delta L_{PSD(T/O)}(f)$:トンネル内と明かり区 間の振動加速度のパワースペクトル密度のレ ベル 差[dB], $PSD_{Tunnel}(f)$:トンネル内の振 動加速度のパワースペクトル密度[(m/s²)²/Hz], $PSD_{Open}(f)$:明かり区間の振動加速度のパワ ースペクトル密度[(m/s²)²/Hz]

図7に、図6に示したレール交換後のトンネル内と明 かり区間の外軌側の上下振動加速度および左右振動加速 度のパワースペクトル密度のレベル差を示す.同図より, 上下振動加速度は、レール、PCまくらぎともに70Hz付 近で、トンネル内の方が30dB程度振動加速度のパワー が大きい.一方、左右振動加速度は、PCまくらぎでは 80Hz付近でやはり30dB程度パワーが大きくなっている が、レールでは80Hz付近でレベル差が0dBとなって



(b) 左右振動加速度
図 7 外軌側のパワースペクトル密度のレベル差
(トンネル/明かり区間)(下り列車の一例)

いるものの,その前後の周波数帯でレベル差が負となっ ていることがわかる.すなわち,明かり区間の方がパワ ーは大きい.しかしながら,左右振動加速度の 80Hz 付 近のパワーは,上下振動加速度に対して非常に小さいの で,振動エネルギーそのものは、'トンネル内の方が大き いといえる.このように,特定の周波数でトンネル内の 軌道が明かり区間に比べて振動しやすいという現象は, インパルスハンマーによる衝撃加振試験の結果⁴⁾とも概 ね一致しており,トンネル内軌道の振動特性の特異性が 外軌波状摩耗の発生に寄与している可能性を示唆してい る.

5. まとめ

レール交換前後で,外軌波状摩耗の発生していたトン ネル内と,比較対照として同じ曲線内の明かり区間にお いて,列車走行時の軌道振動測定を実施した.以下に, 分析によって得られた結果を列挙する.

- (1) レール交換前のトンネル内では、軌道各部の振動に 55Hz 付近に明瞭なピークが見られたが、レール交換後にはみられなかったので、この振動のピークは、外軌波状摩耗上を列車が走行することによって生じたものであることがわかった.また、このピーク以外にも、外軌波状摩耗の影響によって、トンネル内軌道の振動加速度レベルが明かり区間よりも大きくなっていたことがわかった。
- (2) レール交換後に、トンネル内において 70~80Hz 付近で明かり区間よりも振動が卓越していることを 確認した.この結果は、インパルスハンマーによる 衝撃加振試験の結果とも一致していた.さらに、こ の卓越周波数は、車両のばね下質量と軌道の相互作 用による固有振動数(60~70Hz程度)と近く、また (1)で述べたレール交換前にトンネル内でのみ見ら れた外軌波状摩耗に起因する 55Hz とも近かった.

以上の結果より、トンネル内でのみ卓越している特定 の周波数の振動が、外軌波状摩耗の発生・成長に寄与し ていると考えられる.また、このトンネル内と明かり区 間の軌道振動特性の差は、路盤条件や構造物条件の差が 影響していると考えられる.今後は、この軌道振動特性 の差に着目して、外軌波状摩耗の抑制方法に関する検討 を行う予定である.

参考文献

- 西本正人: JR 四国におけるレール波状摩耗の発生 と軸箱振動加速度の測定,新線路, Vol.49, No.5, pp.22-24, 1995.
- 岩田直泰,横山秀史,芦谷公稔,斎藤聡:波状摩耗 レールの更換による地盤振動特性の変化,鉄道力学 論文集,No.10, pp.37-42, 2006.
- 田中博文,松田博之,輪田朝亮:急曲線外軌波状摩 耗発生区間のレール/車輪間の接触力学に関する考 察,鉄道力学論文集,No.13,pp.43-50,2009.
- 4) 田中博文,南木聡明,輪田朝亮:外軌波状摩耗が発 生しているトンネル内急曲線軌道の衝撃加振試験, 土木学会年次学術講演会概要集,Ⅳ-330, pp.657-658, 2009.