

曲線通過速度向上のための軌道管理



ふるかわ あつし

古川 敦

軌道技術研究部(軌道管理 研究室長)

はじめに

我々の大先輩である広井生馬氏(元国鉄施設局)は、「鉄道線路」誌の1981年10月号で、以下のように述べられています。『(速度向上について)保線がいつまでも受け身の立場をとらざるを得ないもう一つの原因は、速度と保線との相互関係について、明確に科学的に、自らも納得し、部外も納得させ得るだけの理論体系がないことであろう。速

度の向上がどれだけ軌道狂いの進行を促進し、作業量を増大させるか、線路状態の程度によって、速度の差がどのように列車動揺・輪重・横圧に影響するか、たったこれだけのことが、未だに、完全に明確になったとは言えないのではなかろうか。』この問いかけに対する現時点の回答を以下に述べようと思います。28年後の我々の技術レベルは、先輩に満足していただけるでしょうか？

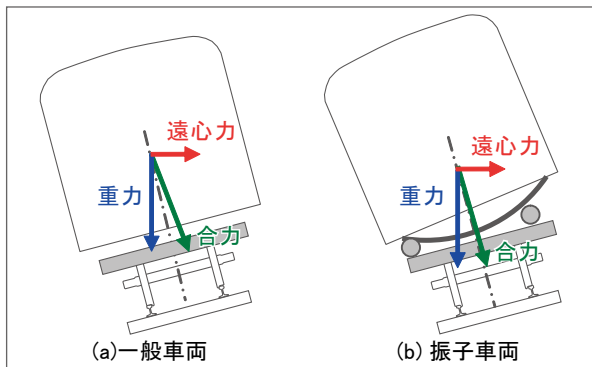


図1 振り車両の仕組み

曲線通過速度向上と軌道

現在日本の鉄道の最高速度は新幹線が300km/h、在来線が160km/hです。といっても、駅で停車している時間以外、全ての区間をこの速度で走行しているわけではありません。日本の、特に戦前に建設された在来線は曲線が多く、たとえ直線区間での速度を向上しても、急曲線での速度制限により目的地到達時はそれほど短縮されません。このため、曲線通過速度の向上が必要となります。

曲線通過速度向上のために、旧国鉄が切り札として投入したのが、1973年に登場した381系振り車両です。振り車両は図1に示すように、円弧状のはりで支持された低重心の車体がコロの上に載る構造となっています。このため、曲線中で大きな遠心力を受けると車体が自然に内側へ傾斜し、客室で感じる遠心力を打ち消すことができます。ただし、振り電車は軌道に作用する力を打ち消せるわけではありません。軌道にとって曲線通過速度向上とは、遠心力にいかにか抵抗するか、ということに尽きます。

曲線中で軌道に作用する力

ところで、曲線通過速度向上に伴って軌道に作用する力は、遠心力ではありません。車両から軌道に作用する横方向の力を「横圧」といいます。曲線中で測定された横圧の波形例を図2に示します。おおざっぱに言えば、内軌(曲線内側のレール)の横圧は曲線中でほぼ一定であり、外軌(曲線外側のレール)はある一定の値の回りを複雑に

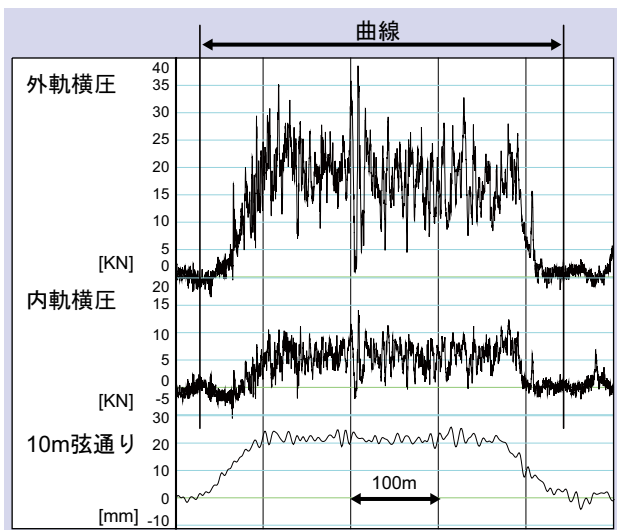


図2 横圧波形の例(半径600m, 105km/h)

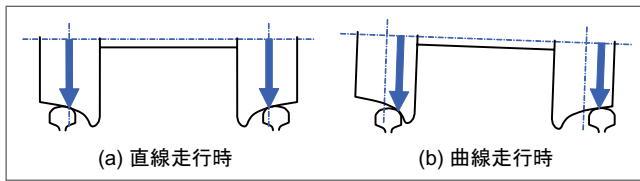


図3 車輪とレールの位置関係

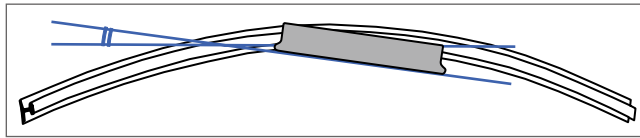


図4 アタック角

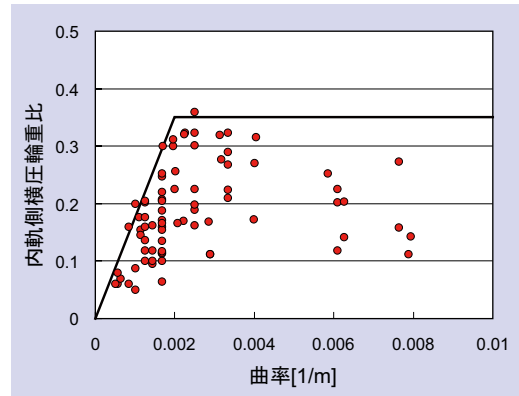


図5 内軌側横圧輪重比の例

変動する波形となります。この横圧は、以下の6種類の成分から構成されます。

- ① 曲線通過に伴って発生する転向横圧
- ② 遠心力による、曲線外方への力。
- ③ カント（軌道面の傾き）による曲線内方への力。
- ④ 空気ばねのねじれによる力。
- ⑤ 軌道変位（主として通り変位）による慣性力。
- ⑥ レールの継目部や溶接部で発生する衝撃的な力。

以下で、これらの力の正体を詳しくご紹介します。

(1) 転向横圧

鉄道車両にはハンドルがありません。したがって曲線では、車輪はレールに沿って走行します。ただし、単純に車輪のフランジ（つば）がレールと接触して走行するわけではありません。車両の走行方向を変えていくのは、曲線内側の車輪とレールとの間に作用する横方向の摩擦力です。

図3は、直線と曲線での輪軸とレールの位置関係を示したものです。直線走行時には(a)のように、輪軸は軌道のほぼ中央を走行します。これに対し曲線走行時には、(b)のように輪軸が曲線の外側に寄ります。車輪の断面形状は円弧状ですので、このときの車輪の回転半径は、曲線外側と内側で異なります。狭軌線の場合、内軌と外軌は曲線半径が1.067m異なりますから、両者の長さもわずかに異なります。内外の車輪の回転半径差は、長さの異なる2本のレールを滑らかに走行するために必要なものです。

ところで、車両が曲線に進入すると輪軸は自然に図3(b)のような姿勢をとります。自然になるというのは、力が0というわけではなく、輪軸に作用する様々な力が釣り合って図3(b)の状態となるということです。このうち、輪軸をこのような傾いた状態で保持する力は、おおまかにいえば右側のレール車輪間の摩擦力で近似できます。

摩擦力は、接触面に垂直な力と摩擦係数の積です。鉄道の場合、前者は車輪がレールを上下方向に押す力（「輪重」といいます）です。また後者はレール・車輪間の摩擦係数ですが、厳密には物理的な摩擦係数ではなく、「車輪がレール

上を横滑りすることによって発生する力を輪重で割った値」となります。前述したように鉄道車両にはハンドルが無いので、曲線中では車輪はレールに対し常に一定の角度を持って走行します（図4）。この角度のことを「アタック角」といいます。アタック角が大きくなるほど、すなわち急曲線ほど車輪がレールに対し横滑りする量が大きくなるので、この（見かけ上の）摩擦係数が大きくなります。内軌側の横圧と輪重の比と、曲線半径との関係の例を図5に示します。高速走行時は、内軌側横圧輪重比は最大0.4程度となります。

なお、曲線中で速度が高くなると遠心力で車両が曲線外向きの力を受けるので、曲線内側の輪重は小さくなります。したがって、転向横圧は曲線通過速度が高くなるとともに、小さくなります。

(2) カントと遠心力

曲線中では、遠心力を打ち消すために図1のように外軌を外軌よりも高くします。この高さの差を「カント」といいます。曲線中では遠心力によって車両に曲線外方への力が作用します。これが大きくなりすぎると乗り心地が悪くなり、場合によっては走行安全性にも影響します。これに対し、カントによって遠心力による力を打ち消します。

原則として、カントの大きさは遠心力と重力の合力が車体の床面とちょうど直角となるように定めます。このときのカントを均衡カントといいます。ただし、曲線通過速度は列車の種類によって様々です。最も高い速度の特急列車に合わせてカントを設ければ、普通列車や貨物列車にとってカントが大き過ぎ、かえって曲線内方への力が発生します。したがって、多くの場合、曲線中における各列車の平均速度に対し均衡するよう、カントを設定します。

カントと遠心力による横圧の和は、均衡カントでは0、平均速度より高い速度で走行する場合は外向きに作用します。遠心力は速度の2乗に比例するため、この和も速度の2乗の関数となります。したがって遠心力による横圧は、速度が高くなるとともにまさに加速度的に増加します。

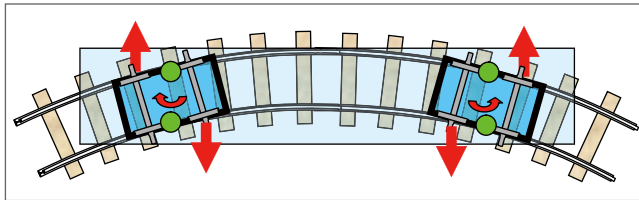


図6 空気ばねのねじれによる横圧

(3) 空気ばねのねじれによる横圧

最近の車両は、ボルスタレス台車と呼ばれる、台車と車体との間が空気ばねを介して接続された構造となっています。曲線中では車体と台車の間に相対的な回転角が発生するため、この空気ばねがねじれ、図6に示すように車両の1, 4軸では曲線外向きに、2, 3軸では内向きの力が作用します。この力は台車の回転角に比例し、速度に関わらずほぼ一定となります。

(4) 軌道変位・継目部による慣性力

円曲線中におけるレールは、完全な円を構成してはならず、数ミリの振幅で上下左右に変位しています。これを軌道変位と言います。ここを車両が高速で走行すると、車両自身が上下左右に揺れ、それに伴う慣性力がレールに作用します。慣性力は質量と加速度の積ですので、軌道変位によって発生する加速度に比例します。加速度は変位の2階微分であるため、軌道変位が単一の正弦波であれば、加速度は速度の2乗に比例します。ただし、車両は軌道変位による加速度を抑制するようにばねやダンパが設計されているので、実際の慣性力は速度にほぼ比例します。

継目部における慣性力は、レール継目部を通る際に発生する衝撃的な力ですが、軌道変位による慣性力が車両全体の質量にほぼ比例するのに対し、継目部における慣性力は、輪軸周囲のみの質量に比例し、また作用時間は短いけれどもピーク値が大きいのが特徴です。図2の横圧波形のうち激しく変動している成分が、この慣性力です。

これらの力の和が、広井先輩が「いまだ明確となっていない」と嘆いた横圧となります。速度と横圧との関係は概ね図7のようになります。速度向上に伴って、遠心力の割合が大きくなるのがわかります。

横圧に対し軌道はどう対処するか？

さて、曲線通過速度の向上に伴って、軌道にどのような力が発生するかがわかりました。次に、この横圧に対し何らかの形で抵抗しなければなりません。横圧の増加による問題点とその対策には以下のようなものがあります。

(1) 横圧によるレール締結装置の破損

横圧が大きくなってもレールが折れることはありませんが、レール締結装置の疲労破壊に対する設計荷重を超える

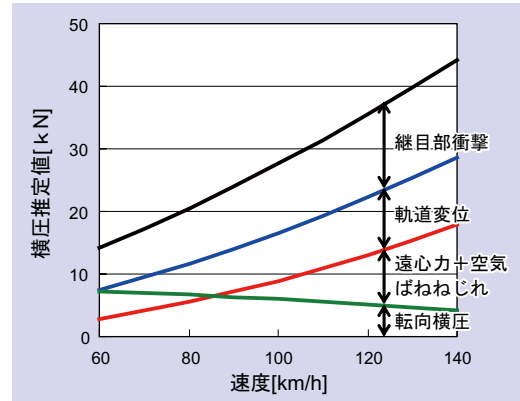


図7 速度と横圧との関係の例
(半径600m, カント105mm)

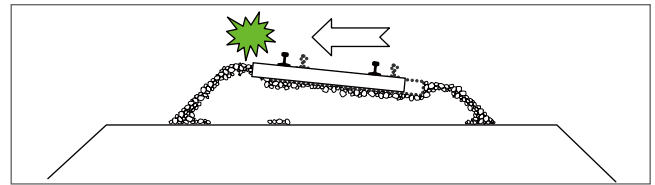


図8 横圧による軌きょうの横変形

横圧が繰り返し作用するとこれが破損することがあります。この対策には以下の3つがあります。

- ①レール締結装置そのものの強度を増す。
- ②レールを太くする。
- ③まくらぎの本数を増やす。

①はレール締結装置を強くするもので、②、③は一つ一つのレール締結装置に作用する力を小さくすることを目的としたものです。

(2) 軌きょうの横変形

日本の在来線の多くは、道床バラスト（砂利）の上に横まくらぎを並べ、その上にレールを締結した構造となっています。この構造は、保守が容易であるという特徴がある一方、軌きょう（レール+まくらぎ）を支えるバラストの量が不十分な場合、軌きょうを横方向に大きな力で押すとまくらぎが道床バラスト上を横滑りし、大きな変形が発生します（図8）。この対策には、以下の3つがあります。

- ①まくらぎの本数を増やす。
- ②バラストの盛りを多くする。
- ③座屈防止板等で、まくらぎと道床バラスト間の噛み合いを強くする。

(3) 横圧そのものの低減

(1)、(2)とは別に、横圧そのものを小さくする工夫も必要です。これには大きく2つの方法があります。

- ①カントの増加
 - ②軌道変位管理の強化
- カントが大きくなるとより大きな遠心力を打ち消すこと

ができるので、①のカント量の増加は曲線通過速度向上に有効です。ただしカントを大きくしすぎると、道床バラストが崩れる、あるいは車両が曲線内側へ転覆する危険性が増す、といった副作用があるため、日本の狭軌線におけるカントは最大105mmとされています。またカントが急激に変化すると、乗り心地が悪くなる、あるいはカント変化区間での輪重減少が大きくなるといった問題が生じますので、カントを大きくする際は、緩和曲線(カント変化区間)を延長する必要があります。

軌道変位については、波長が等しい場合、発生する慣性力はその振幅にほぼ比例します。したがって、軌道変位の管理値を強化するのも対策の一つです。これは、速度向上に伴う乗り心地悪化を防ぐためにも有効です。

曲線中の乗り心地改善

振り車両の性能向上により、乗り心地の上では遠心力を問題とせず速度向上が可能となりました。一方、振り車両では乗り物酔いが多いということが、運行当初から指摘されていました。これに対し最近の研究では、乗り物酔いには0.3Hz付近の低い周波数の持続的な左右振動が影響していることがわかりました。このような低周波の振動の原因となる軌道側の要因をどのように見つけ出せば良いのでしょうか？

よくよく軌道検測データを見ると、低周波の左右振動が大きい箇所は、カントと平面線形にずれが生じていることがわかりました。例を図9に示します。平面曲線(通り10m弦)とカントは曲線中でほぼ台形状となるのですが、図9では形が崩れているのがわかります。これを定量的に見いだすのは容易ではありませんが、図9の通り10m弦、カントから求められる遠心力(上段赤線の波形)を見ると、その変動が予測できます。低周波の左右振動は結局のところ遠心力の変動が原因ですので、赤線の波形の変動が大きい箇所を保守すれば良いことになります。

おわりに

以上、曲線速度向上のための軌道管理手法を、特に曲線通過時に発生する力に着目して解説しました。広井先輩のエッセイから30年弱が過ぎましたが、この間の曲線通過速度を可能とした、技術的なエポックとして以下のものが挙げられます。

○測定技術の大幅な向上

車上で輪重・横圧を連続的に測定する技術の開発により、

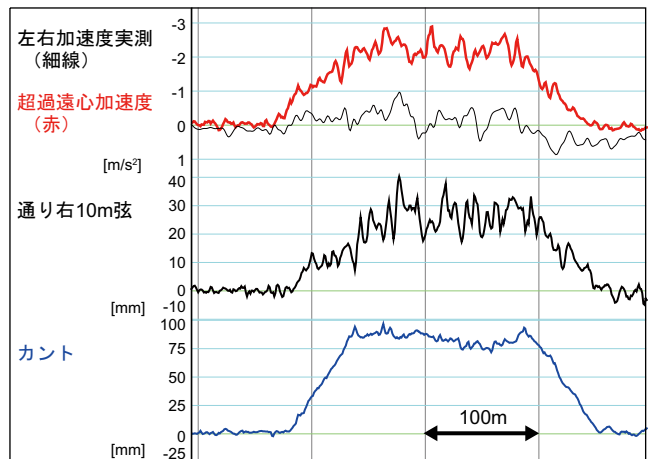


図9 曲線線形と超過遠心加速度の関係

レール/車輪間に作用する力のかかなりの部分が解明されてきました。これによって、速度向上時に必要となる軌道強化策等を検討できるようになりました。

○データ処理技術の向上

昔は紙チャートの波形のピークに定規をあてて値を読みとり、グラフ用紙に手書きでプロットしていました。現在では、各種車上測定データや軌道検測データを波形のままパソコン上で処理できるようになり、両者の関係をより詳細に理解できるようになりました。

○軌道状態の改善

もちろん、軌道状態そのものの大幅な改善も忘れてはなりません。軌道強化およびマルチによる長波長軌道整備により、曲線通過速度向上に耐え得る軌道が実現しました。

○振り車両の開発

最後はやはり振り車両です。JR四国の2000系気動車を嚆矢とする制御付き振り車両は、在来線の曲線通過速度向上に大きく貢献しました。

これらのエポックは、国鉄末期から分割民営化直後に花開き、民営化後の最初の10年間にJR旅客6社全てで振り車両を用いた曲線通過速度向上が実施しました。その後の10年間は、速度向上は一段落した感がありますが、今後エネルギー問題等で地方の都市間輸送が自動車から鉄道にシフトしてくれば、いずれまた到達時分短縮への社会的なニーズが高まってくるものと考えられます。その際は、一段と進化した軌道技術を諸先輩に報告したいと思います。

RRR

文献

1) 広井生馬:「速度と保線」雑考, 鉄道線路, 1981.10