

新幹線の軌道管理技術



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

新幹線が開業してから50年近く経過しました。この間、新幹線の安全・快適な走行を支える軌道技術も、変化し続けています。ここでは軌道変位の整備基準を中心に、この40余年間における新幹線の軌道管理技術の流れをご紹介します。

開業当時の軌道整備基準

軌道変位管理は、走行安全性などを考慮してあらかじめ定められた軌道整備基準値に基づき、これを超える確率が極力少なくなるよう行われます。しかし東海道新幹線開業当時は、高速走行によって軌道変位がどのように変化していくかがわかっておらず、新幹線の軌道整備基準値は定め

られていませんでした。その代わりに、鴨宮試験線での実績などをもとに、以下の4種類の軌道整備目標値が定められていました。

- ①仕上がり目標値(作業や工事施工時の仕上りの目標値)
- ②保守計画目標値(保守計画を立てるにあたって、整備の対象とすべき軌道変位箇所を決めるための目標値)
- ③乗り心地目標値(列車の良好な乗り心地を確保するための目標値)
- ④要注意目標値(徐行運転を行わなければならない前に、予防的に管理すべき要注意の目標値)

その後、開業後数年間の実績などをもとに、昭和44年に、軌道整備基準値(表1)が定められました。この中では、上記③の「乗り心地目標値」を軌道整備基準値として採用し

ています。ここでは、この③の乗り心地目標値と④要注意目標値の制定経緯を紹介します¹⁾。

(1) 乗り心地目標値

東海道新幹線開業前の鴨宮試験線における試運転結果及び開業後の保守の実情などにもとづき、乗り心地を基準とした軌道変位の整備基準が定められ、乗り心地目標値として設定されました。乗り心地の指標には、アメリカの自動車技術者協会(Society of Automotive Engineers)のR.N.Janeweyが提案した乗り心地の許容基準を参考に国鉄が定めた乗り心地係数を用いており、これを1~2の間に収めることとしています。

① 高低変位

試運転結果では、新幹線の車両動揺のうち軌道変位が原因となる動揺は1~2Hzに集中し、これが乗り心地係数1~2の間に収まる上下振動加速度は全振幅で0.25g程度となりました。一方、モデル線における高低変位とそれに対応する上下振動加速度を照らし合わ

表1 新幹線の軌道整備基準値

(昭和44年制定、新幹線軌道整備基準規程第9条)

項目	単位	列車速度 160km/h 以上の本線	列車速度 160km/h 未満の本線	副本線、 回送線及び 着発収容線	側線
軌間	mm	+6, -4	+6, -4	+6, -4	+6, -4
水準	mm	5	6	7	9
高低	mm/10m	7	8	9	10
通り	mm/10m	4	5	6	7
平面性	mm/2.5m	3	6	7	8

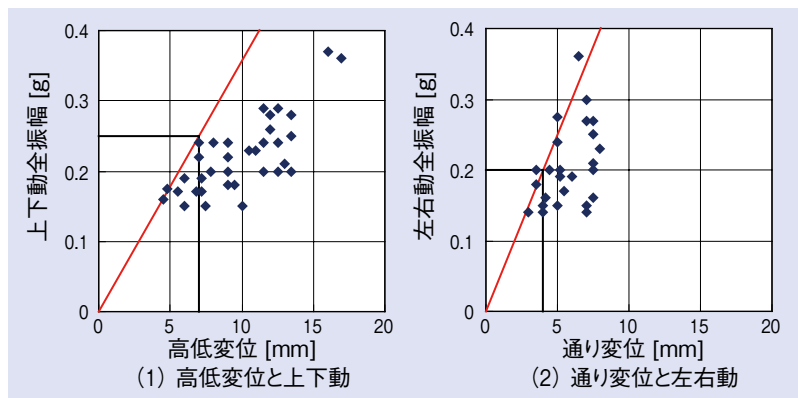


図1 軌道変位と車両動揺の関係¹⁾

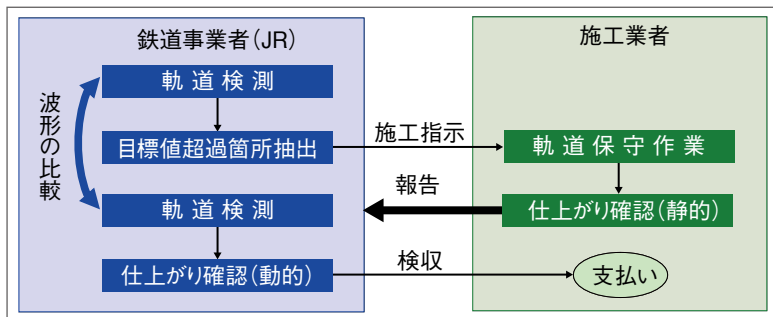


図2 指示・検収の流れ

表2 新幹線の仕上がり目標値

項目	単位	目標値
軌間	mm	2
水準	mm	3
高低	mm/10m	4
通り	mm/10m	3
平面性	mm/2.5m	3

せたところ図1(1)となったので、同図で0.25gに対応する高低変位7mmを乗り心地目標値としました。

②通り変位

同様に、車両動揺の1~2Hzが乗り心地係数1~2の間に収まる左右振動加速度は全振幅で0.20g程度となりました。一方、鴨宮試験線における通り変位とそれに対応する左右振動加速度を照らし合わせたところ図1(2)となったので、これの0.20gに対応する通り変位4mmを乗り心地目標値としました。

③軌間変位

通り変位を乗り心地目標値内に収めれば、軌間変位と車両動揺にはあまり関係がなく、+6mm~-4mmの範囲で乗り心地は良好なので、この値を乗り心地目標値としました。

④水準変位

高低変位を乗り心地目標値内に収めれば、水準変位と車両動揺の相関は小さく、現場では6mm以内の変位で乗り心地良好なので、この値を水準変位の乗り心地目標値としました。その後、路盤の落ち着きならびに軌道保守体制の整備を勘案し、目標値は5mmに改定されました。

⑤平面性変位

高低変位を乗り心地目標値内に収めた範囲内では、乗り心地はほとんど問題となりませんでした。高低変位を乗り心地目標値の範囲内とした場合の平面性変位は4~5mmで管理することが保守上から妥当と考えられたので、平面性変位5mm(2.5m間)を乗り心地目標値としました。

(2) 要注意目標値

安全上の軌道変位限度についても鴨宮試験線におけるデータなどが参考とされましたが、伸縮継目部に5mm以上の通り変位があると横圧が40kN(4tf)を超えることが多いこと以外に、軌道変位との顕著な関係は得られませんでした。したがって東海道新幹線の開業時には、安全に対し十分な余裕を持ち、かつ当時の保線支所単位で、1回の軌道検測あたり1~2箇所の頻度で発生する値として、上

下動0.35gに対応する高低変位10mm、左右動0.25gに対応する通り変位6mmを要注意目標値としました。

なお、現在のJR各社の軌道整備基準値は、新幹線を運行する4社で少しずつ異なりますが、基本的には表1の値に基づき、さらに、より高い速度段での値を加えた形となっています。

指示・検収制度

新幹線の軌道管理の特徴の一つとして、「指示・検収制度」があります。

現在、新幹線では軌道検測を10日に1回行っています。この目的は、走行安全性を確保するためであるのもちろんのことですが、軌道保守作業区間の指示および作業後の状態を確認するためという面もあります。

現在では、在来線の軌道保守作業も多くは専門業者に外注されていますが、新幹線では早くから保守作業が外注化されていました。指示・検収制度とは、10日に1回の軌道検測データによって鉄道事業者が施工箇所を指示し、施工業者が所定の精度で作業を行ったかどうかを確認し、仕上がり目標値を満足していれば費用を支払う制度を言います。図2に指示・検収の流れを、表2に国鉄時代に定められた、新幹線の「仕上がり目標値」を示します。

表1に示す軌道変位の整備基準値は、一般的には列車の走行によって軌道が徐々に変形していくことに対して適用します。しかし新幹線のように高いレベルでの管理が求められる場合は、そもそも保守作業後の仕上がり状態が表1を満足しているかどうか分かりません。施工業者は作業直後に軌道変位を測定していますが、この測定はあくまでも列車が走行していない状態で行われるものであり、元々の要求精度が厳しい場合は、列車が走行していない状態と走行している状態との軌道変位の差を無視できません。このため、10日に1回走行する軌道検測車のデータを用いて、保守作業後の仕上がり状態を確認します。

また、施工場所の指示も10日ごとの軌道検測データに

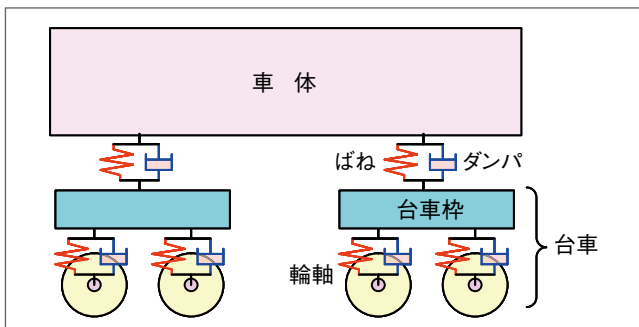


図3 鉄道車両の振動モデル

基づき、優先順位をつけて行われます。施工の指示から検収までの流れは、すべてコンピュータで処理されます。

この「指示・検収制度」は、日本の新幹線独自のものです²⁾、施工業者の「技術を向上したい」というやる気をかき立て、結果として高精度な軌道状態の実現に大きく寄与しています。新幹線の安全・安定走行には、単なる工学的な技術だけではなく、このような制度面での工夫も貢献しています。

速度向上と長波長軌道管理

さて、新幹線は1964年の開業から長い間最高速度210km/hで営業されていましたが、1986年には東海道・山陽新幹線が220km/hに、1989年には山陽新幹線で230km/hまで速度が上げられました。また東北新幹線は1985年から240km/hに速度が上げられました。それに伴って、車両の揺れが大きくなってきました。鉄道の車両は複雑な構造をしていますが、車両の揺れに関わる部分だけを取り出すと、図3のようにばね、ダンパー、質量を組み合わせた構造にモデル化できます。このような振動体は、ばねの強さや質量に応じて、揺れやすい振動数が存在します。これを「固有振動数」と呼びます。なお、振動数とは1秒間に揺れる回数のことです。車体や台車枠にもそれぞれの固有振動数があります。このうち最も乗り心地に影響する車体の固有振動数は、車両の形式にかかわらず1Hz付近にあります。車両の大きさはどの形式もほぼ同じことやホームの高さなどの制約から、車体の構造には形式ごとの差が小さいためです。

車両の揺れ方がわかっているのであれば、車両を揺らす原因である軌道変位を小さくすれば、乗り心地は良くなるはずですが、固有振動数の1Hzとは1秒間に1回の揺れですから、車両が1秒間に進む距離に対応する長さの軌道変位を小さくすれば良いわけです。時速210km/hは秒速約58m/sとなります。したがって、58m毎に繰り返される軌道変位を小さくすれば、乗り心地は良くなるはずですが、

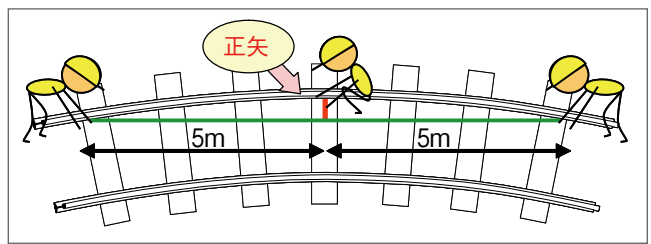


図4 10m弦正矢法

230km/hは64m/sで、その差はわずか6m/sです。

ところが、ここで一つ問題があります。新幹線に限らず、日本では高低・通り変位の軌道検測は10m弦正矢法で行われます。10m弦正矢法とは、図4に示すように10mの糸をレールに当て、中心での糸とレールとの離れを測定するものです。もちろん、実際には全線にわたってこのような作業を手で行うわけにはいきませんので、軌道検測車による機械的な方法でこれを実現しています。10m弦正矢法で測定された波形は、実際の軌道形状とは一致しません。なぜ一致しないかはやや専門的になるので割愛しますが、例えば糸の長さを11mにしたら、得られる波形は10mの場合とは異なるはずですから、一致しない事実だけは直感的に理解できると思います。この、一致しない程度を軌道変位の波長との関連で示したものが図5の黒線です。縦軸は、実際の軌道形状との振幅比を表しています。この図からわかるように、波長が長くなるほど10m弦で測定される振幅は急激に小さくなっていきます。波長が50mを超えると、10m弦正矢の倍率はもともと0.2倍以下と小さいですが、波長58mと64mでは、縦軸の値がさらに20%も異なります。すなわちもとの振幅が同じであっても、測定される振幅は20%異なるのですから、秒速6m/sの差が無視できないわけです。

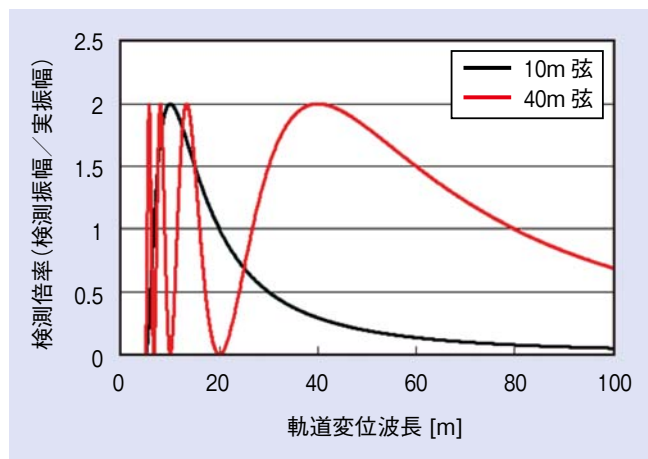


図5 正矢法の検測倍率

表3 新幹線の長波長軌道整備目標値の例

項目	単位	20m弦	40m弦
高低	mm	8	7
通り	mm	7	5

このため、のぞみ号が270km/hで運転される頃から、40m弦正矢法が各社で用いられるようになりました³⁾。40m弦正矢法とは40mの糸をレールにあてて、その中点でのレールと糸との離れを測定するものです。もちろん、実際に40mもの長さの糸をレールにあてるわけにはいかないので、10m弦正矢法のデータから、計算で求めます。40m弦正矢は図5の赤線に示すように、波長が30m～80mの軌道変位に対し高い感度を持っています。なお、同じ目的から、20m弦正矢も併用されます。20m弦、40m弦正矢の軌道整備目標値の例を表3に示します。

さらなる速度向上に向けて

さて、冒頭に述べたように、2012年度末には新幹線の最高速度が320km/hに上がります。これに対する軌道変位管理はどのようにすれば良いでしょうか。270km/hで40m弦だから、次は50m弦正矢といきたいところですが、最近では車両側の設計技術も向上し、固有振動数での揺れはあまり目立たないようになってきました。したがって、単に弦を長くすれば良いというわけでもありません。

しかし一方で、軌道状態が同じであれば、速度の向上に伴って車両の揺れは大きくなるのも事実です⁴⁾。それならば、表3の整備目標値を小さくすれば良い、とも言えますが、施工精度などを考慮すると、目標値をさらに小さくするのも考えものです。

ここで、先ほどの固有振動数には、「その振動数での外乱が連続すると、揺れが増幅される」という性質があります。たとえ振幅が小さくても固有振動数に対応する波長の軌道変位が連続していると、車両の揺れが徐々に大きくなるわけです。このような現象を「共振」と呼びます。簡単なモデルで、共振による左右振動加速度の増加を模擬した例を図6に示します。同じ波長の通り変位が1波の場合と3波連続する場合とでは、後者の左右動の振幅の方が大きいことがわかります。すなわち、後者のような現象を防ぐためには、単に軌道変位の振幅を小さくするのではなく、「特定の波長の軌道変位が、ある区間内に連続して存在しないようにする」ということとなります。このような考え方にに基づき、過去に開業前の上越新幹線で、図6のような線形を意図的に設定し、車両の挙動を測定する試験も行わ

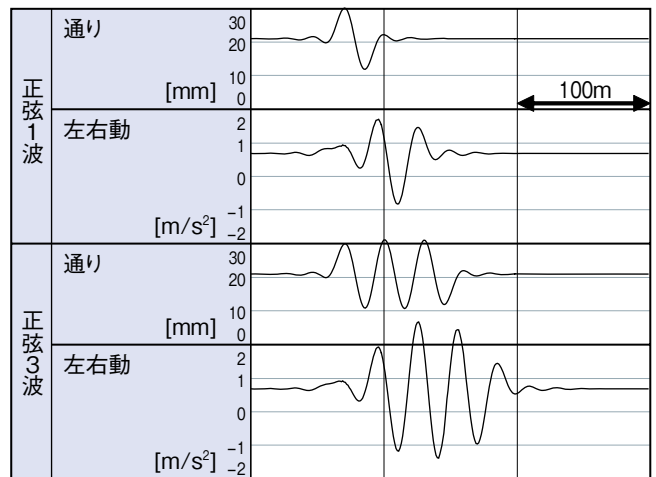


図6 通り変位の波数と左右動の関係(在来線の例)

れています⁵⁾。

共振に対する軌道変位の管理は、在来線の貨物列車走行区間ではすでに行われていますので、目新しいものではありませんが、新幹線での高速化には有効な考え方です。

おわりに

昔の文献を読んでいると、新幹線開業のころは何もかもが手探りの状態で、何か異状が見つければ、翌朝の始発列車に間に合うように、夜のうちに人海戦術で対応していたようです。その後四十数年を経過し、新幹線は世界に冠たる技術体系を築きました。よく新幹線は「システム技術」と言われます。これは、何か新たに高度な技術開発が行われたというよりも、既存の技術の高度な組み合わせによって成り立っている、という意味です。軌道管理技術についても、基本的には在来線技術の延長ではありますが、その中で高速での安全走行を支える様々な工夫が行われていることをご理解いただければ幸いです。RRR

文献

- 1) 松原健太郎：新幹線の保線，日本鉄道施設協会
- 2) 山口義信：我国の線路保守における技術発達史とその移入，定着，変容および創出に関する研究，東京大学学位論文，2010
- 3) 高井秀之：新幹線の長波長軌道狂い管理，鉄道総研報告，vol.3, No.4, 1989
- 4) 輪田朝亮，小関昌信：高速走行時の列車動揺特性評価，JR EAST Technical Review, No.32, 2010
- 5) 佐藤吉彦，高井秀之：軌道狂い設定試験結果による軌道検測特性の提案，鉄道技術研究報告，No.1283, 1985