

鉄道分岐器のガードに発生する背面横圧の実態とその軽減策

ACTUAL STATE AND SUPPRESSION OF A LATERAL FORCE INDUCED AT GUARD RAIL IN RAILWAY TURNOUT

佐藤泰生*・佐藤吉彦**・三浦 重***

By Yasuo SATO, Yoshihiko SATO and Shigeru MIURA

The guard rail existing in railway turnout receives a large lateral guiding force from running wheels. This force is one of the important factors limiting the running speed of trains at turnouts. The paper describes : (1) The results of a series of running tests on Kosei line, which clarify the actual condition inducing the force; (2) A theoretical study performed by a simulation method using a dynamic rolling stock model; and (3) The countermeasures to suppress the force at the guard rail.

Keywords : railway track, turnout, guard rail, lateral force

1. ま え が き

鉄道の高速化を実現するためには、最高速度の向上とともに、曲線、分岐器等の速度制限要因の除去が必要である。このうち、分岐器の速度制限は、その設置数が多いため、優等列車の表定速度に影響をもつもので、これに対応するため、昭和43年に直線側の最高速度を130 km/hとする高速分岐器が設計されたが、高価であるとともに、全国的にみて敷設数は少なく、当面する高速化の要請を経済的に実施するには、すでに敷設してある分岐器（設計速度100 km/h）を速度向上する必要があると考えられた。

この要請に答えるために、その後補強策を実施して、120 km/hとされたが、今後の一層の速度向上を考えると、速度制限要因の抜本的な解明を実施する必要があると考えられた。

この速度制限要因の1つに、図-1の分岐器のガードに発生する著大な背面横圧があって暫定的な走行試験の

基準として120 kNが限度とされてきたが、従来の理論的検討¹⁾においては明確な条件の下における直接の実測が行われていなかったことから、これは背面横圧の抜本的な軽減策を図るための理論的手段としては十分ではなかった。

一方欧州では、分岐ガードに弾性を与える構造が実用化されており²⁾、これは背面横圧に対する軽減効果があるとされていたが、明確になっていなかった。

このような背景の下で、その抜本的軽減策を検討するために、湖西線において160 km/h領域に到る速度向上試験が行われた際に、試験ガードを敷設して試験列車による背面横圧の実測を行い、その結果を解析しこれを敷衍するために、従来からある車両モデルの縮小モデルを作ってシミュレーションを行い、この適合性を検討し、これにより背面横圧の特性を明らかにし、軽減策を検討した。

この論文は、以上の経緯に基づいて測定試験結果を述

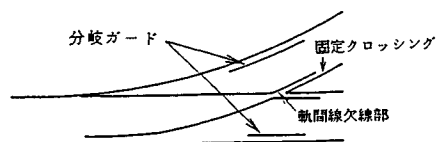


図-1 分岐器と分岐ガード

* 正会員 鉄道総合技術研究所企画部次長
(〒107 港区南青山6-3-3)

** 正会員 工博 日本機械保線 KK 取締役技術開発部長
(〒281 千葉市黒砂台1-11-8)

*** 正会員 鉄道総合技術研究所線路構造研究室主任研究員
(〒160 新宿区西早稲田1-2-15)

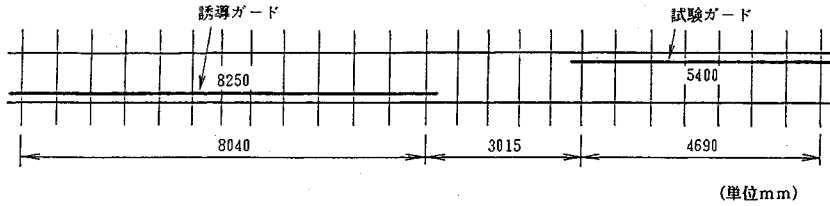


図-2 試験ガードと誘導ガードの配置

べ、背面横圧の理論的解析法と高速化の際の背面横圧軽減策を提案するものである。

2. 走行試験による背面横圧の実測

(1) 背面横圧の測定試験

湖西線における背面横圧の測定試験については、その経過がすでに報告されているが³⁾⁻⁵⁾その概要は次のとおりである。

- a) 実施期日：昭和 59 年 6 月 23 日～7 月 10 日
- b) 試験箇所：湖西線マキノ～永原間 62K 850 下り線
- c) 試験箇所の線形：直線，10‰上り勾配
- d) 試験箇所の軌道構造：50N レール，3号 PC まくらぎ²¹⁾，5型レール締結装置
- e) 試験速度：120～160 km/h

(2) 背面横圧測定計画

背面横圧測定の実施にあたって、背面横圧の発生要因に関する下記の試験条件を明確にした測定を計画した。

- a) 試験列車の速度は段階的に向上する
- b) 誘導角は一定（直線状の誘導部）とする
- c) 分岐ガードの横ばね係数の実測を行う
- d) 車輪誘導量を実測する

(3) 試験ガード

図-2 に示すように、高速区間で用いられている H 形構造²²⁾の試験ガードと誘導ガードを敷設し、試験ガード本体および取付け金具にひずみゲージを貼り付け、ガードレールに作用する背面横圧の地上における測定を初めて行った（写真-1）。

誘導ガードは、試験ガードの前方に設置し、走入する車両の車輪が試験ガードを衝撃するように案内し、走行条件をできるだけ一定にするためのものである。

試験ガードは、その誘導部を直線とし、誘導角を一定として、試験を行った。

試験ガードの構造および測定位置を図-3 に示す。また、試験ガードの最小フ



写真-1 湖西線の試験現場に敷設された試験ガード

ランジウェー幅（走行用レールとガードレールの隙間）は、車輪誘導量を変えるため、38, 40 および 48 mm に変化させた。

(4) 走行試験結果

試験ガードに作用した試験列車ごとの背面横圧の最大値と速度の関係は、図-4 のとおりであった。また、試験ガード各部における背面横圧の作用状況を、最大級の背面横圧を示した列車について示したのが図-5 である。

この図-5 から明らかとなっており、背面横圧は車輪がガードレールに接触後急激に増加し、ガードレールの誘導部終点付近で最大となり以後は減少している。

(5) 試験ガードの横ばね係数測定試験

湖西線の試験で用いられた供試ガードの横ばね係数を明らかにするため、走行試験後供試ガードを国鉄日野土木実験所に現地試験と同じ条件で敷設し、横圧試験車による横押し試験を行い、横ばね係数の実測を行った。

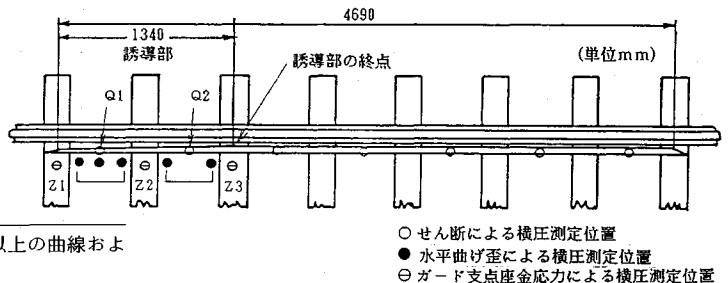
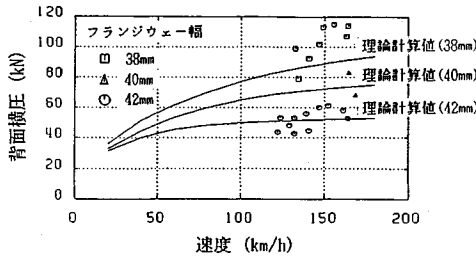


図-3 試験ガードの構造および測定位置

注 1) 狭軌線用 PC まくらぎで、半径 800 m 以上の曲線および直線に多数使用されている。
 2) 高速用分岐器に使用されているガードの構造で、ガードレールを床板の支材に取り付ける構造

○ せん断による横圧測定位置
 ● 水平曲げ歪による横圧測定位置
 ⊙ ガード支点座金応力による横圧測定位置



図—4 背面横圧の実測最大値と速度の関係

図—6は、横押し試験結果による誘導部終点付近における載荷荷重とガードレールの横方向変位との関係である。また図—7は試験ガード各部の横ばね係数であり、その値は大略15~20 MN/mの範囲であった。

この結果より、理論解析におけるガードの横ばね係数の値は一律17.5 MN/mとすることとした。

(6) 車輪誘導量の実測

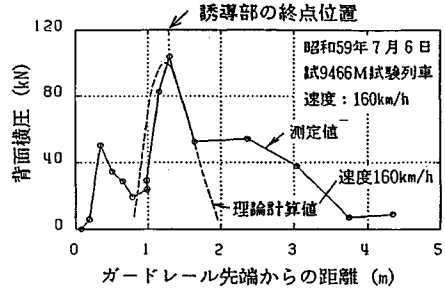
車輪誘導量の測定は、高速度撮影により行った。

その方法は、列車通過前にガードレールの車輪接触面に白色塗料を塗布し、車輪が接触して塗料を剥ぎとる状況を高速度撮影し、その画面から車輪の最初に当たった位置を求め、誘導量を算出するものである。

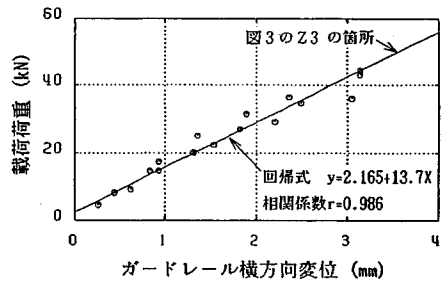
写真—2は車輪接触前の、写真—3は車輪接触後のガードレールの状況であり、写真—3において車輪の痕跡をみることができる。

この測定により、発生順の最大誘導量の値が求められる。これと測定された背面横圧とを車輪ごとに図示すると、図—8の例に示すようになり、発生順の最大誘導量が発生する車軸と、発生順の最大背面横圧が発生する車軸とが一致することが認められた。

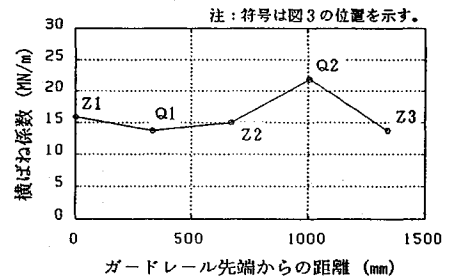
そして、この図から求めた誘導量と背面横圧の関係をまとめて図示すると、図—9が得られ、最大車輪誘導量と最大背面横圧の間に明らかな相関が認められた。



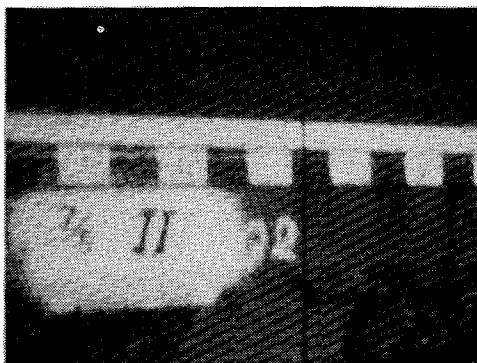
図—5 試験ガード各部における背面横圧の作用状況



図—6 載荷荷重とガードレール横方向変位の関係



図—7 試験ガード各部の横ばね係数



写真—2 車輪接触前のガードレール



写真—3 車輪接触後のガードレール

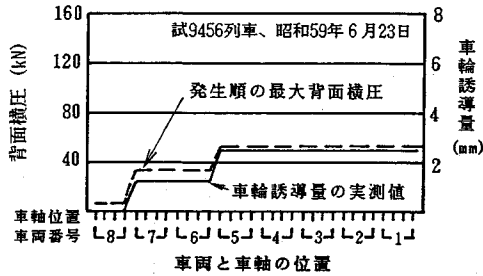


図-8 発生順の最大車輪誘導量と発生順の最大背面横圧の関係

なお、測定期間中に観測された最大の誘導量は7.8 mmであった。

3. 背面横圧の解析法

(1) 要 旨

車両に発生する横圧を解析する方法として、車両運動のシミュレーションが、有力な手段となっている。しかしながら、従来の方法は走行レールと車輪間の正横圧の解析を主としており、分岐ガード等で発生する背面横圧の解析は行われていなかった。

ここでは、すでに提案されている新幹線の角折れ部の走行特性解析に用いた一車体モデルに、ガードレールと車輪の接触による背面横圧を導入したシミュレーション手法を基本として、半車体モデル、一台車モデル、半台車モデル、輪軸モデルによる解析の比較および背面横圧の影響要因を検討するための理論計算を行った。

(2) 背面横圧解析における横圧力の関係

分岐ガードにおける背面横圧解析方法として、新幹線の角折れ部の走行特性解析に用いた車両モデル⁶⁾において、横圧は式(1)に示す3種類の横圧の和であると仮定し、

$$Q = Q_c + Q_r - Q_g \dots\dots\dots (1)$$

とする³⁾。

ここで、 Q ：車輪横圧

Q_c ：レール/車輪接触面のクリープによる横圧

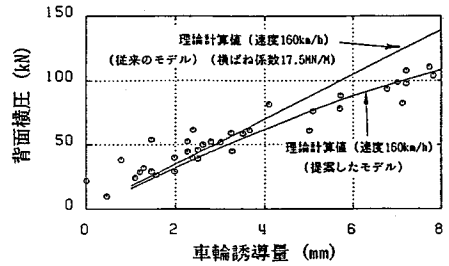


図-9 最大車輪誘導量と最大背面横圧の関係

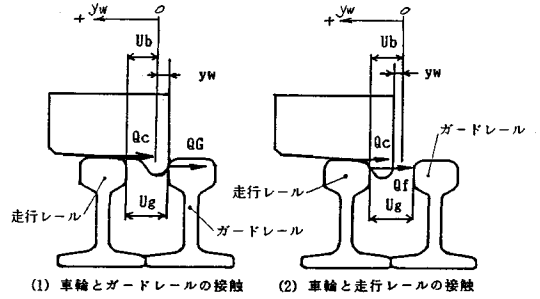


図-10 車輪とレールの接触により発生する横圧

Q_r ：レールと車輪フランジの接触により発生する横圧

Q_g ：ガードレールと車輪背面の接触により発生する横圧

である。このうち、 Q_c 、 Q_r については、既成のモデルと同じであり、 Q_g については、

$$Q_g = K_g \cdot y_b \dots\dots\dots (2)$$

である。ここで、 $|-y_w| \leq U_g - U_b$ のとき、

$$y_b = 0$$

$|-y_w| > U_g - U_b$ のとき、

$$y_b = -y_w - U_b + U_g$$

である。また、

K_g ：ガードの横ばね係数

y_b ：背面横圧によるガードの横方向変位

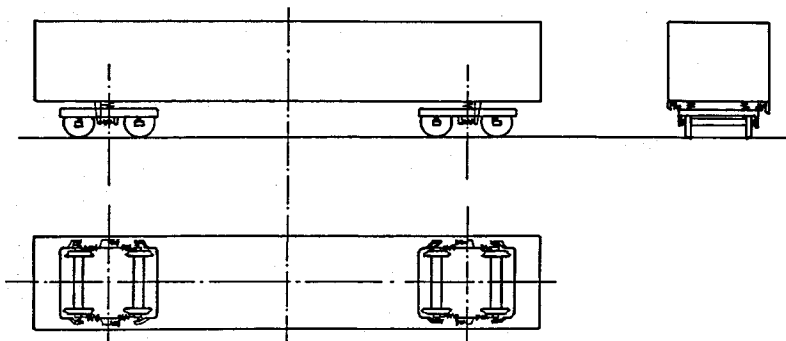


図-11 一車体モデル

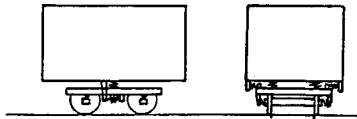


図-12 半車体モデル

y_w : 車輪の変位

U_b : レール/車輪間標準距離^{注3)}

U_g : 分岐ガードのフランジウェー幅

である(図-10)。

(3) 車両モデルの影響の検討

分岐ガードの背面横圧の発生は、ガード誘導部前後の短区間に限られることから、背面横圧のシミュレーション解析に適切な車両モデルを求めるため、

一車体モデル(図-11)

半車体モデル(図-12)

一台車モデル(図-13)

半台車モデル(図-14)

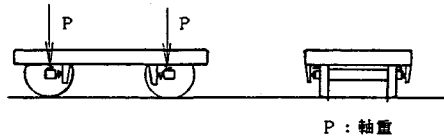
輪軸モデル(図-15)

による比較を行った。

解析モデルの比較は、図-16に示すガードレールのモデルと、表-1の381系電車の主要諸元を用い、背面横圧の時間的変化を比較することにより行った。

その結果各モデルの比較は図-17に示す例のとなり、最大値は一車体モデル、半車体モデル、一台車モデルのいずれを用いても実用上差がなく、輪軸モデルではピーク値でこれよりわずかに下がる(92%)ことが認められた。このことは、背面横圧の発生は、主としてばね下質量が大きく関与していることによると考えられた。また最大値以後の推移を考えると、半車体モデルないし台車モデルを用いれば十分な精度が得られることが明らかにされた。

なお、この半車体モデルの計算プログラムは、新幹線車両の長大吊橋における走行安定性検討のため誘導された運動方程式を計算するプログラム⁵⁾を、車体の半分と一台車を考慮する運動方程式を計算するよう改めたものである。この計算には鉄道技術研究所のFACOM-M-360を用いているが、その計算時間は表-2のとおりであった。



P: 軸重

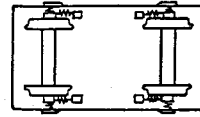


図-13 一台車モデル

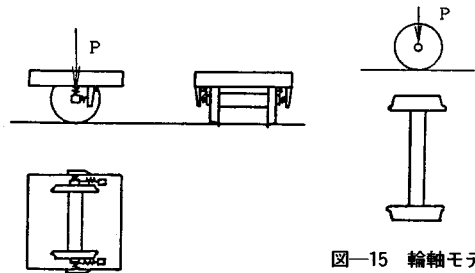


図-15 輪軸モデル

図-14 半台車モデル

表-1 381系電車の主要諸元

名 称	諸元
前後台車の心ざら間距離	14.400 m
軸距	2.300 m
ボルスタ・アンカ位置の左右間隔	2.300 m
軸ばねの左右間隔	1.640 m
まくらばねの左右間隔	1.640 m
レール面上車体重心の高さ	1.257 m
車輪中心より車体重心までの高さ	0.827 m
まくらばね中央より車体重心までの高さ	0.307 m
台車中心よりまくらばね中央までの高さ	0.448 m
軸ばね定数	1274kN/m
上下まくらばね定数	374kN/m
左右まくらばね定数	3626kN/m
ボルスタ・アンカばね定数	4900kN/m

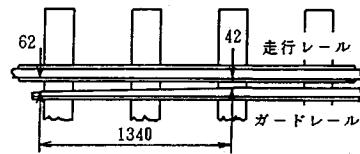


図-16 各モデルの比較に用いたガードのモデル

(4) 実測値の検討

以上の検討により、半車体モデルと台車モデルでは計算時間に大きな差がなく、半車体モデルでは車体の応答も計算できることから、半車体モデルにより2.(4)で述べた試験ガードの横ばね係数実測値を用いて理論計算を行い、2.(5)で述べた誘導量の実測値と計算値とを比較した。

注3) タイヤ内面間距離の限界値の平均(991 mm)をもつ車輪が、正規の軌間線間距離(1 067 mm)の中心に位置したときの、軌間線とタイヤ内面間の距離

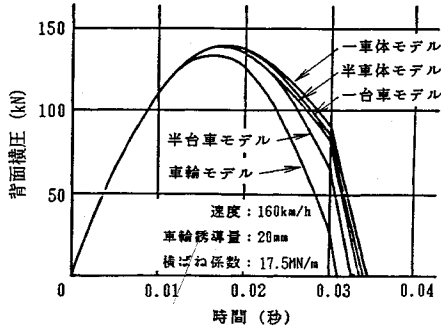


図-17 各モデルの比較

表-2 大型計算機による各モデルの計算時間

モデル	計算時間 (秒)	記 事
一車体	12.41	ガードレール1.8m について1回当りの 計算時間
半車体	6.27	
一台車	5.61	
半台車	4.35	
車輪	4.07	

これを示したのが図-5の理論計算値の線であり、最大値到達後の挙動については差がみられるが、最大背面横圧の発生に至る過程ならびに、背面横圧の最大値自体についてはよく合致することが認められる。ガード前端および誘導部終点以後における理論値と実測値の相違は、寸法上接触する車輪は一軸であることから、走行角やガードの状態により起こる再接触によると思われる。

また、図-4の速度と最大背面横圧の関係については、測定結果の最大時の誘導量7.8 mmが、フランジウェー38 mmのとき発生したことより、条件を同じと仮定したシミュレーションの結果、図の理論計算値を得た。

理論計算値と実測値の差は、試験ガード敷設時における敷設状態と計算上の仮定との差によるものと考えられるが、比較的良好に対応していると考えられる。

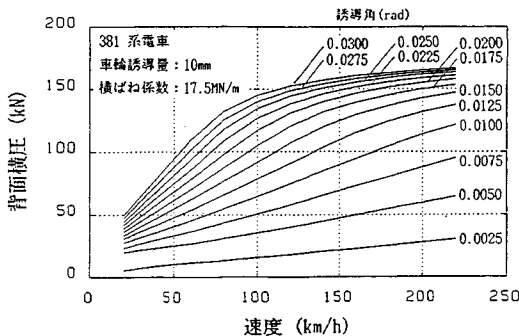


図-18 速度と背面横圧の関係

また、2.(4)で述べた試験ガードの横ばね係数試験結果を用いた速度160 km/hのシミュレーション結果を、従来の理論¹⁾による計算とともに図-9に示すと図の理論計算値となる。誘導量が少ない領域で実測値が高いのは、摩擦力の影響と考えられる。この結果によれば、提案した理論による計算は、従来の理論に比べて、誘導量の大きい領域でよりよく合致した。

4. 半車体モデルによる背面横圧の理論解析

(1) 理論解析の目的

背面横圧については、従来質点モデルおよび台車の回転を考慮したモデルによる解法があり¹⁾、これらの方法により計算した結果、背面横圧に影響する因子として、a) 速度、b) 誘導角、c) 分岐ガードの横ばね係数、d) 車輪の誘導量があるとされている。

そこで、ここではこれらの関係をさらに明らかにするため、半車体モデルによる理論計算を行った。

(2) 速度および誘導角と背面横圧の関係

車輪誘導量とガードの横ばね係数を一定とし誘導角をパラメーターとして、速度と背面横圧の関係を図示すると図-18となる。また速度をパラメーターとした誘導角と背面横圧の関係は図-19となる。

なお分岐器の基準線側ガードで使用されている円弧形状の誘導部と同じ長さの直線形状の誘導部の比較は図-20のとおりであり、直線形状の方が現状の整備度における誘導量13.5 mmを考慮した場合、最大背面横圧が小さい。

(3) ガードの横ばね係数と背面横圧の関係

車輪誘導量と誘導角を一定とし速度をパラメーターとして、ガードの横ばね係数と背面横圧の関係を図示すると図-21となる。この図から明らかなように分岐ガード横ばね係数を低下させることは、高速になるほど背面横圧の抑制に有効である。

(4) 車輪誘導量と背面横圧の関係

ガードの横ばね係数と誘導角を一定とし速度をパラ

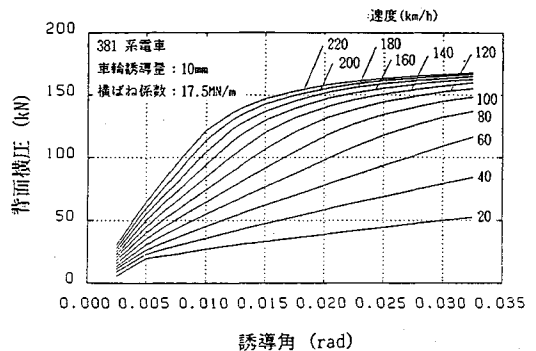


図-19 誘導角と背面横圧の関係

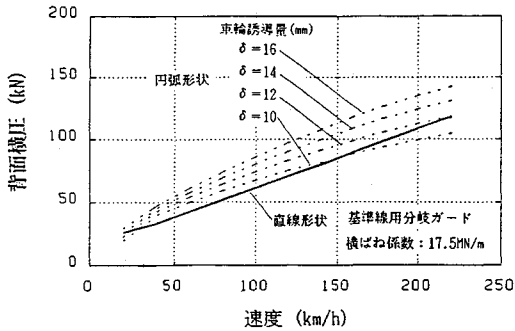


図-20 直線形状および円弧形状の誘導部における背面横圧の比較

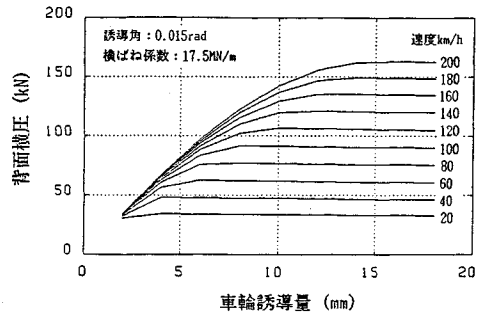


図-22 車輪誘導量と背面横圧の関係

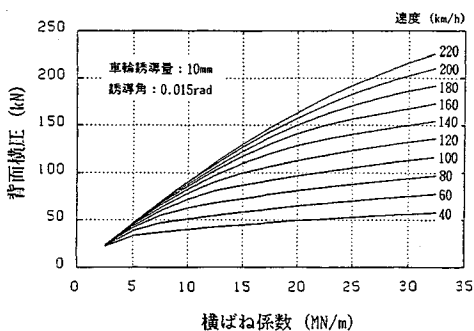


図-21 分岐ガードの横ばね係数と背面横圧の関係

メーターとして、車輪誘導量と背面横圧の関係を図示すると図-22となる。これによると、誘導量が大きくなるに従って背面横圧は増加するが、ある大きさ以上になると、背面横圧は増加しなくなる。これは、図-23に示すように、分岐ガードによる誘導が大きくなると、車輪がガードレールから離れる方向に動き、最大弾性変形量が増加しないためであり、誘導部の終点を通過後背面横圧が残存するのは、弾性変形が残存することによるものである。

以上の理論計算から、実用に供せられている分岐ガードの係数の範囲においては、従来の理論的検討から明らかにされているとおり、速度、誘導角、分岐ガードの横ばね係数、車輪の誘導量が関係しており、その影響の程度としては、車輪の誘導量およびガードの横ばね係数の影響が大きいことが示された。

(5) 提案した理論による計算結果と従来の理論による結果との比較

a) 従来の理論では、輪軸の横移動に注目したモデルと台車の回転に注目したモデルの2種類の異なる計算結果が示されており、台車の回転に注目したモデルの計算値は輪軸の横移動に注目したモデルの計算値より大きい結果が得られている。

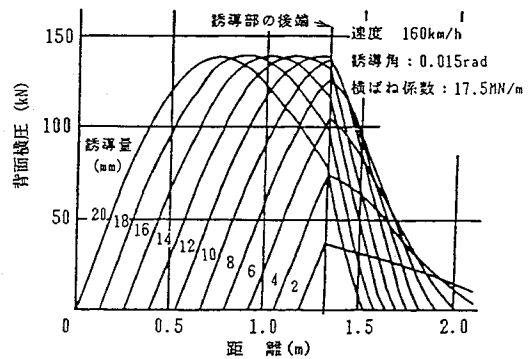


図-23 車輪誘導量の変化による背面横圧の変化

そして、図-9において比較したとおり、提案する計算法は誘導量の大きい範囲で、従来の理論計算法より、実測値との適合性がよいと思われる。

b) 従来の理論計算の結果から、分岐ガードの導線を円弧形状とした方が、誘導量の小さい領域で背面横圧が小さいとされたことから、円弧形状の導線をもつガードが採用されているが、現状の整備度における最大誘導量である13.5 mmを考慮した同じ有効長をもつガードを比較した場合、速度160 km/hの領域においては、直線形状の導線をもつガードの方が最大背面横圧軽減の目的にはよいと考えられる。

c) 従来のモデルによる計算結果では、同じ背面横圧の値に対して、速度 v と誘導角 θ とは反比例することから、 v と θ の積 ($v\theta$) が1つの因子とされていたが、提案した理論計算による計算結果では、図-24に示すように、同じ $v\theta$ に対して背面横圧の最大値は速度 (v) により異なり、1つの因子として扱うのは、必ずしも妥当ではないと考えられた。

5. 高速時における背面横圧軽減策

以上の検討結果より、高速走行時に分岐器に発生する背面横圧の軽減策として、次の事項が挙げられた。

- (1) 横ばね係数の低下により高速走行時の背面横圧

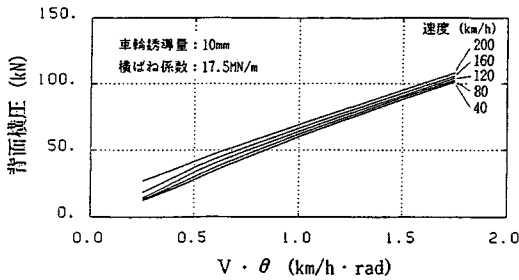


図-24 速度による $v \cdot \theta$ と背面横圧の関係

を軽減するため、欧州でみられる弾性化により、ガードの横ばね係数を低減すること、また、誘導角の低下も合わせて実施することが有効である。

(2) 現状の整備度において、高速走行時の最大背面横圧を低減させる目的のためには、ガードの誘導部の導線を直線形状とする方がよい。

6. 結 論

(1) 背面横圧の実測結果について

a) 湖西線における走行試験において試験ガードを敷設し、ガードレールと取付け金具にひずみゲージを貼付して背面横圧の実測を行い、背面横圧の実態を明らかにした。

b) 湖西線で試験に供した試験ガードを日野土木実験所に移設して、横押し試験により横ばね係数を実測した。その結果横ばね係数のおよその値は15~20 MN/mの範囲にあり、計算値として17.5 MN/mを用いることとした。

c) 試験ガードによる車輪の誘導量を、高速度撮影により車輪の接触位置を求める方法で測定した。

この結果最大背面横圧を発生する車軸と最大誘導量が発生する車軸は一致し、背面横圧の大きさは車輪誘導量に明らかな相関があることが示された。湖西線の試験において観測された誘導量の最大は7.8 mmであった。

d) 測定結果から、背面横圧は車輪がガードレールに接触した後急激に増加し、ガードレールの誘導部終点付近で最大値に達し、以後減少することが示された。

(2) 理論解析について

a) 背面横圧の解析法として、新たに半車体モデルによるシミュレーション手法を提案した。

b) 提案した解析法により、実測による分岐ガードの横ばね係数と車輪の最大誘導量の値を用いて計算した結果、実測された分岐ガードの背面横圧の発生状況を比較的良好に説明できることが明らかにされた。

c) 提案した解析法による計算の結果、実測した車輪の最大誘導量と背面横圧の関係を、よく説明できることが示された。

(3) 高速走行時における背面横圧の軽減策

以上の結果から5. に述べた背面横圧の軽減策を示した。

7. あとがき

以上の提案および解析により、背面横圧の抑制策として分岐ガードの横ばね係数低下の有用性が示唆され、今後の重要な検討課題であることがわかった。

最後に、この論文をまとめるにあたり、東海大学教授黒河内浩博士にご指導を頂き、また都立大学教授 故・伊藤文人博士に暖かい励ましを頂きましたこと、また資料の整理および図面の清書について鉄道総合技術研究所線路構造研究室の関係者の協力を得たことについて謝意を表します。なお、この研究における著者らの貢献は、当時の国鉄・構造物設計事務所(佐藤(泰))、同鉄道技術研究所(佐藤(吉)、三浦)におけるものである。

参 考 文 献

- 1) 黒河内浩：分岐器、レール伸縮継目の設計に関する基礎研究，鉄道技術研究報告，No.799，1972.3.
- 2) Morgenschweis, O. : S54-Weichen der Deutschen Bundesbahn, ETR Vol.28, pp.651~658, 1979.
- 3) 佐藤吉彦・三浦 重・橋本渉一：在来線高速運転時の分岐ガード背面横圧の実測と解析，土木学会第40回年次学術講演会概要集，1985.10.
- 4) 佐藤泰生・鈴木喜也：分岐器ガードレールの背面横圧と車輪誘導量，土木学会第40回年次学術講演会概要集，1985.10.
- 5) 佐藤吉彦・佐藤泰生・三浦 重・橋本渉一・鈴木喜也：分岐ガード背面横圧に関する試験・解析，鉄道技術研究報告，No.1348，1987.3.
- 6) 涌井 一：新幹線車両の走行性からみた長大吊橋の折れ角限度，鉄道技術研究報告，No.1087，1978.7.

(1987.8.31・受付)