

水平角折れのある軌道上の車両運動に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY FOR DYNAMIC BEHAVIOR OF RAILWAY VEHICLES ON LATERALLY ANGLED TRACK

松本 嘉司*・藤沢 伸光**

By Yoshiji Matsumoto and Nobumitsu Fujisawa

1. ま え が き

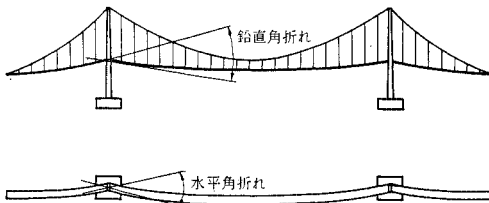
長大径間の吊橋のような剛性の小さい橋梁を、鉄道橋として安全に使用できるかどうかについては、多くの検討すべき問題があるが、軌道に生じる角折れもその一つである。一般に、このような橋梁では補剛桁の剛性が小さいため、たわみが大きく、図一1 に示すように、主径間の補剛桁と側径間の補剛桁の継目などに大きな角折れを生じる。角折れは鉛直方向だけでなく、風荷重、地震荷重などの荷重によって水平方向にも生じる。いずれの場合も角折れの大きさが過度に大きくなると、列車の走行に支障をきたすことが考えられるので、たとえば現在計画中の本州四国連絡橋の設計案では補剛桁の継目に補助桁を用いて、軌道に生じる角折れをいくつかに分散する方法が考案されている。

このような橋梁における車両の走行安定性を検討するためには、角折れのある軌道を通過する時の車両運動についての研究が必要である。軌道の角折れ自身は、通常の軌道においても分岐器のトング・レールの先端などに生じており、新しい現象ではないが、これを通過する車両についての動的解析の例は少なく、十分には解明されていない。その理由の一つは、理論的に厳密な解析が容易でないためと思われる。理論解析を困難にしている原

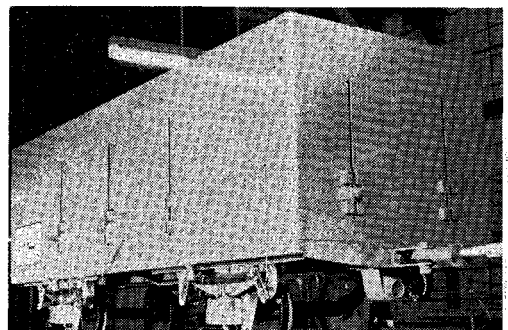
因はいくつか考えられるが、ここでは、厳密に考えた場合の車体つり装置の特性が簡単な線型方程式で表わせないこと、および車輪とレールの間に働く力について完全には解明されていないことを指摘しておく。これらの影響は鉛直方向より水平方向の運動に対して大きく、また運動の振幅が大きいほど著しい。特に、車輪の横変位が大きく、車輪フランジがレールに接触するような場合には、車輪とレールの間に働く力について不明な点が多い。それゆえ、水平方向に角折れのついている軌道を走行する車両の運動を、理論的に解析するためには、かなり多くの仮定が必要となり、信頼度の高い結果を得ることは困難である。これらの事情を考慮して、今回は模型の車両および軌道を用いて、水平角折れのある軌道を走行する車両の運動性状を実験的に考察し、理論解析を進めるための基礎的資料を得ることとした。本文は、この実験の結果を整理し、車体および車軸の運動に着目してまとめたものである。

2. 実験車両と軌道

実験に使用した車両は、ワラ1型を原型に取った2軸貨車の模型であるが、測定の都合上、無蓋車とした。実験車両の外形を写真一1に示す。この車両のつり装置は、



図一1 吊橋軌道に生じる角折れ



写真一1

* 正会員 工博 東京大学助教授 工学部土木工学科

** 学生会員 工修 東京大学大学院博士課程学生

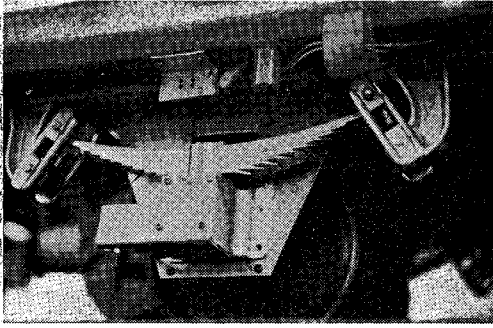


写真-2

表-1 模型車両の諸元

車体の寸法	1450×508×428 mm
自重	73.6 kg
車軸中心から車体重心までの高さ	
空車時	237 mm
満載時	327 mm
軸距	845 mm
車輪直径	172 mm

交換できる構造となっており、1段リンクおよび2段リンクの両方の試験が可能であるが、今回は1段リンク式つり装置を用いて実験を行なった。写真-2にこのつり装置を示す。車輪の踏面は、国鉄の標準踏面にしたがって製作した。模型の縮尺は1/5で、寸法その他の諸元は、表-1に示してある。本実験においては重力の影響が大きいので、模型と実物の間の加速度の比は1/1となる。したがって質量の比は1/125、時間および速度の比は $1/\sqrt{5}$ である。

実験車両は、約1馬力の直流分巻電動機2基を搭載した機関車でけん引されて走行する。実験中に、機関車が脱線や転覆などの事故を起こさないように、機関車のレールは実験車両のレールとは別に設け、特別に軌間を広く取ってある。写真-3に、機関車と軌道の様子を示す。中央に見えるのが機関車で、その奥に実験車両が連結されている。手前に見えるレールの中で、外側の2本が機関車用、内側の2本が実験車両用で、中央の線は機関車に電気を送るためのフィーダーである。

この機関車は、最高速度40 km/h (実



写真-3

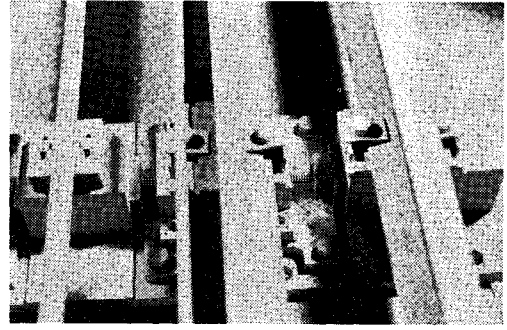


写真-4

車換算90 km/h) を目標として製作したが、加速時に車輪とレールの間にすべりが生じるため、実際に得られた速度は最高で16.4 km/h (実車換算37.0 km/h) であった。このため、今回は11および16 km/h (実車換算25および36 km/h) の2つの速度で実験を行なったが、さらに高速での実験も行なえるように、装置の改良を検討中である。

実験に用いたレールは、50 kg レールを縮尺して製作したもので、特殊な可動式の締結装置によってまくらぎに締結してある。写真-4に締結装置を示す。可動式締結装置は実験車両用レールにのみ使用してあり、機関車用レールの方は固定である。実験車両用のレールの可動範囲は、機関車用レールに当たらない範囲に制限されて、 ± 17 mm となっている。これは可動式締結装置が、元来、軌道に各種の軌道狂いを設けるために作られたもので、軌道角折れの試験のために製作されたものではないためである。今回はこれをそのまま使用し、実験車両用の軌道にのみ水平方向の角折れを設けて、実験を行なうこととした。

軌道の全長は36 m であるが加速および減速に必要な距離を差し引くと、実際の測定区間は中央の約12 m 程度となる。前述のようにレールの左右方向の可動範囲が最大で34 mm であるから、この測定区間に角折れを1つだけ設けることは不可能であり、少なくとも2ヵ所に互いに方向が逆な角折れが必要となる。この場合、最初の角折れ(以後第1角折れと呼ぶ)によって車両に生じた運動が、2番目の角折れ(第2角折れ)進入時までには減衰しないで残っている可能性が高い。連続した角折れが、車両の運動にどのような影響を与えるかということも、興味深い問題ではあるが、今回は角折れ通過時の車両運動に関する基礎的資料を得るという目的から、第1角折れ通過時の車両の運動に重点をおいて測定した。また、第1角折れにおいては、純粋に角折れによって生じる運動だけを測定できるように、出発点から第1角折れの間は直線として、その間に車両に発生する動揺ができるだけ小さくなるように考慮した。

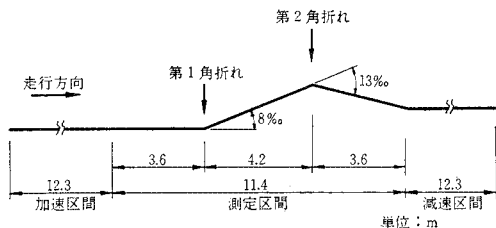


図-2 角折れの設定

角折れの大きさは、本州四国連絡橋の場合、5/1000程度と考えられているが、今回の研究の趣旨からは、角折れの影響を強調した若干大きめの値の方が良いと思われたので、10/1000程度を目標とした。しかし、レールの左右方向の可動範囲の制限があるので、最終的に決定した軌道の線形は、図-2に示したようなもので、第1角折れの大きさは約8/1000である。

3. 実験の方法およびデータの処理について

(1) 実験の種類

実験速度は、前節に述べたとおり11および16km/hの2種類とした。

実験車両の積載重量は0kg(すなわち空車状態)、70kg(半載状態)、150kg(満載状態)の3種類とし、70および150kgの場合は、さらに車体中心に関して対称に積載した場合(偏心なし)、進行方向に向かって右側だけに積載した場合(右偏心)、同じく左側だけに積載した場合(左偏心)の3通りについての実験を行なった。速度の組み合わせまで入れると、実験条件は合計14通りである。

以上の条件のもとで走行実験を行ない、下記の測定項目a)~k)について測定した。走行回数は、同一条件の下でおおの3回ずつとしたが、測定項目が多く、全項目を同時に記録することができなかつたため、項目別に実験を4回に分割した。このため、全走行回数は168回となった。

(2) 測定項目

- a) 前軸左車輪輪重
- b) 前軸左車輪横圧
- c) 前軸右車輪輪重
- d) 前軸右車輪横圧

以上の4項目は、写真-5に示すスポーク車輪によって測定した。この車輪のスポークは特別に細めに製作し、輪重や横圧によるスポークのひずみが大きくなるように考慮した。輪重はスポークの軸方向ひずみから、横圧は曲げひずみから検出し、スリップ・リングを介して

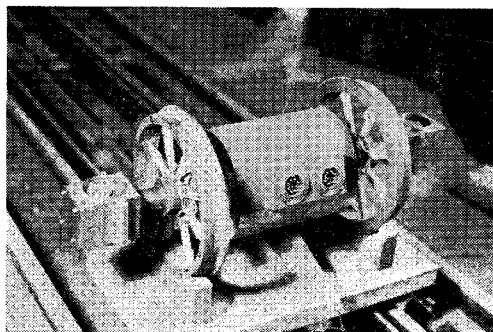


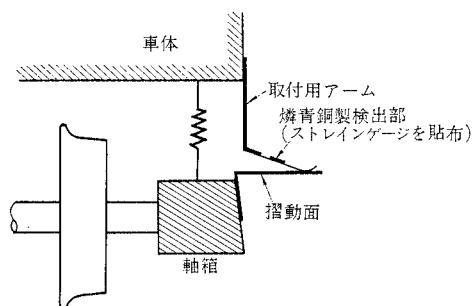
写真-5

外部に導く。写真-5の両車輪の間に見えるのがスリップ・リングである。

- e) 前軸右側つり装置の鉛直方向たわみ
- f) 前軸左側つり装置の鉛直方向たわみ
- g) 前軸右側つり装置の横方向たわみ
- h) 後軸右側つり装置の横方向たわみ

以上の4項目は車体の変位を求めるために測定した。車軸自体の鉛直方向の変位は微小であるから、つり装置の鉛直たわみは、つり装置の真上における車体の絶対鉛直変位に等しいと考えられる。横たわみも車軸に対する車体の相対変位を表わしているが、データ処理の際に車軸の変位を加算することによって、車体の絶対変位を求めることも可能である。厳密には車軸と軸箱の間には横方向に遊間があり、したがって両者の横変位は同一ではない。しかし、この遊間はさほど大きなものではないし、また、車軸と車体間の相対変位を直接測定することはきわめて困難でもあるので、今回は、軸箱と車体間の相対変位を測定し、軸箱と車軸間の相対変位は無視することとした。

この変位を検出するピックアップは、小型軽量で、かつ感度、周波数特性、直線性が良好でなければならない。このような条件を満足するピックアップは、市販品には見当らなかつたので、図-3に示すような原理のピックアップを製作して使用した。図-3において、検出部は燐青銅製の矩形の板で一端は車体に固定され、他端



横たわみ測定用ピックアップも同様の原理である
図-3 つり装置鉛直たわみ測定の原理

は軸箱に固定された摺動面に接している。軸箱が摺動面に平行に運動する場合には、接点がすべるだけであるが、この面に垂直な運動に対しては、検出部に曲げが生じる。したがって、検出部に貼付したストレーンゲージによって、この曲げを検出すれば、車軸と車体間の相対変位の摺動面に垂直な方向の成分のみを測定することができる。

実験に先立って、このピックアップの試験を行なった結果、十分満足すべき性能が得られたので、4個製作して、e)~h)の項目の測定に使用した。

- i) 前軸のレールに対する相対変位
- j) 後軸のレールに対する相対変位

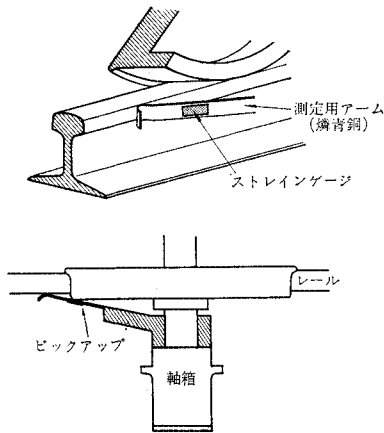


図-4 車軸横変位測定用ピックアップ

これらの項目についても、前項と同様な原理のピックアップを製作して測定を行なった。これを図-4に示す。この場合、接点におけるすべり速度がかなり速く、またレール側面の仕上げが良好でないため、短い周期の振動が若干発生した。この振動は、ピックアップの剛性を高くすることによって減少させることもできるが、接点における接触圧が増加し、車軸に余分な力が加わることになるので好ましくない。この振動によって生じる雑音は、振動数が高く、また振幅もさほど大きくはなかったため、データ処理の際に取り除くことが可能であると考へ、そのまま使用した。このピックアップについてもあらかじめ試験を行なったが、感度、直線性とも十分に良好なものであった。

- k) マーカー

実験車両の前軸が角折れを通過する時刻を知るために、光電式のマーカーを取り付けた。原理は入射光線の照度によって電気抵抗が変化する硫化カドミウム (CdS) の光電セルを用いたも

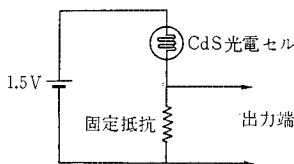


図-5 光電式マーカー結線図

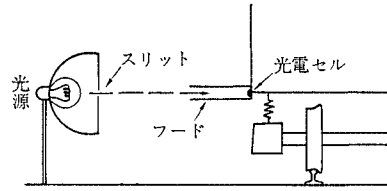


図-6 光電式マーカーの取付け

ので、図-5のように結線して車両に取りつけた。一方、軌道に沿って角折れの位置には光源を設けた。光源の前には、図-6のようにスリットを置いて光線を細く絞ると同時に、光電セルの前にもフードを置いて、ほかの光で誤動作を起こさないように考慮した。

車両が角折れに進入して、光源からの光が光電セルに入ると、CdSの抵抗が急激に小さくなって回路に電流が流れる。その時の出力端の電圧は0.5~1V程度である。

(3) 測定データの処理

以上のように本実験では、ピックアップ類はすべて車両に載っているが、一方、記録器は重量、寸法および電源の制約から車両に搭載することができなかったため、車両側から地上側へのデータ通信設備として、搬送波40.8MHzのFM方式テレメーターを使用した。全体の測定システムは図-7に示すとおりで、機関車には直流アンプ・テレメーター送信機および電源の鉛蓄電池を搭載し、地上側にテレメーター受信機と記録器を設置した。データの処理および解析が容易にできるように、記録器としては磁気テープ式データ・レコーダーを用いたが、モニター用として、電磁オシログラフをも併用した。

- a)~j)の各項目測定用ピックアップおよびスポーク

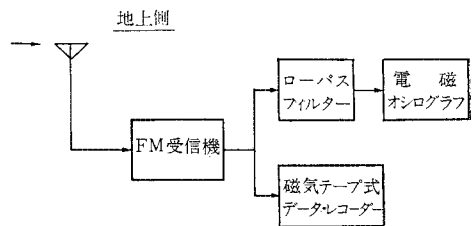
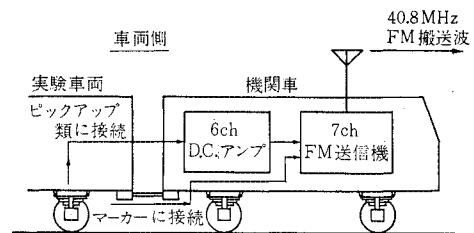


図-7 測定系統図

車輪に貼ったストレインゲージは、ホイートストン・ブリッジを構成するように結線されているので、これに直流 1.5 V の電圧を加え、ゲージのひずみに比例して生じる電位差を、直流アンプで ± 1 V 前後まで増幅する。これらの出力および測定項目 k) のマーカーの出力を送信機に入力して、車両側から送出した。

この状態で、実際に車両を走行させ、地上側の受信機の出力端に生じる信号をシンクロスコープで観測したところ、機関車の電動機からの誘導雑音とみられる周波数の高い成分が、かなり混入していた。データ・レコーダー上の記録については、後の解析の際に処理することが可能なので、そのまま記録することにしたが、電磁オシログラフの方には、ローパス・フィルターを入れてこの雑音を消去した。フィルターのカット・オフ周波数は、雑音の成分および必要な信号の帯域を考慮して約 20 Hz とした。

以上の測定システムによって得られたデータは、日立製の CLOAP-2000 E 型デジタル計算機および ALS-505 型アナログ計算機から成るハイブリッド・システムによって処理した。このシステムの概略を図-8 に示す。データ・レコーダーに記録されたアナログ信号は初め ALS-505 に入力し、ここでフィルタリングや、マーカー信号の波形の整形などの前処理を行なうとともに、デジタル化の際のビット落ちを防ぐため、 ± 100 V 程度にまで増幅する。この信号を A-D 変換器でサンプリングしてデジタル量に直し、オン・ラインで CLOAP-2000 E に送り込んで、必要な処理を行なうものである。

軌道角折れによる車両の運動は非定常過程であって、場所すなわち角折れからの距離の関数と考えられる。したがって、各実験の結果を比較するためには、サンプルする点は時間によって定めずに、車両が特定の位置に来た時にサンプルするようにしなければならない。このため、サンプル間隔を非常に小さく $2\sim 3$ m \cdot sec に取って、得られたサンプル値をすべて CLOAP-2000 E 中のコア・メモリーに記憶させると同時に、マーカーの位置も記憶させ、サンプリング終了後にマーカーの位置を基準

にして、あらかじめ定めたサンプル点に最も近い位置でのサンプル値を選び出すことにした。この方法では、実際には使用しないデータまで記憶しなければならない。CLOAP-2000 E のコア・メモリーの制限から、データを解析するプログラムまで同時に組み込むことはできなかった。得られたデータは一度紙テープの形で出力することとした。ただし、周波数解析などのように、上記のようなサンプル方法が必要でない場合は、アナログ・データの入力から、最終的な出力まで完全にオン・ラインで処理を行なった。

輪重の測定データに対しては、以上のような処理を行なうことができなかった。これは、スポーク車輪を用いた測定では、原理的に車輪が半回転するたびに出力の符号が反転するためであって、得られる信号は、車輪の回転数に等しい周波数の搬送波を輪重の波形で AM 変調したような形となる。原理的には、これを整流して平滑化すれば真の輪重が得られるわけであるが、実際には輪重の変化がかなり急激で、周期が車輪の回転周期とほとんど同程度になることもあるため、この方法では良い結果が得られない。それゆえ、輪重については、オシロ・ペーパー上の記録を読み取って、その値を紙テープに穿孔することにした。

いずれの場合も、紙テープ上のデータは CLOAP-2000 E によって解析した。その結果の一部はフレキシライターで印字させたが、図化の必要なものについては、D-A 変換器によって再びアナログ信号に直し、X-Y レコーダーによって表示した。また、X-Y レコーダーでは図化に長時間を要するものについては、シンクロスコープに表示させ、これを写真に撮影する方法も併用した。

4. 角折れ通過時の車両の運動

角折れに進入した車両は、その慣性によって進入前の進行方向を保とうとする傾向があるため、車軸には軌道に対する相対的な変位が生じて、角折れの外側へ偏倚するような運動を行なう。しかし、この相対変位は車輪のフランジによって拘束されて、ある程度以上の大きさにはならず、また、これに伴って車輪に横圧が発生する。したがって、角折れを通過する車両の運動について検討する場合、第 1 に、この車軸の偏倚と、それに伴う横圧発生機構を解明し、異常に大きな横圧が発生したり、車輪が乗り上ったりする危険がないかどうかを究明することが重要である。

一方、鉄道車両が蛇行動と呼ばれる固有の周期の振動を起こす場合があることは、すでによく知られているが、これまで行われてきた研究の多くは、軌道が完全

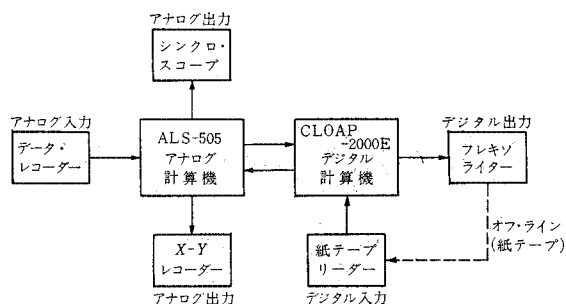
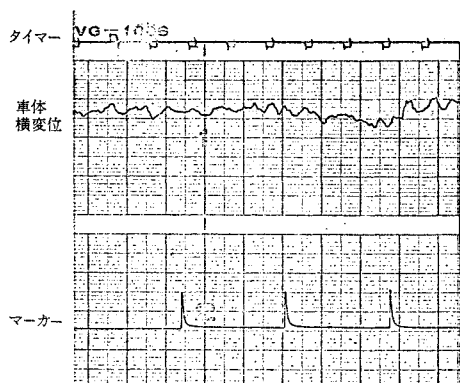


図-8 データ処理系統図



注：タイマーは1目盛り 0.5秒
 マーカーは第1マーカーがデータ処理開始点
 第2, 3マーカーが第1, 2角折れ

図-9 車体横変位測定波形 (速度 11 km/h)

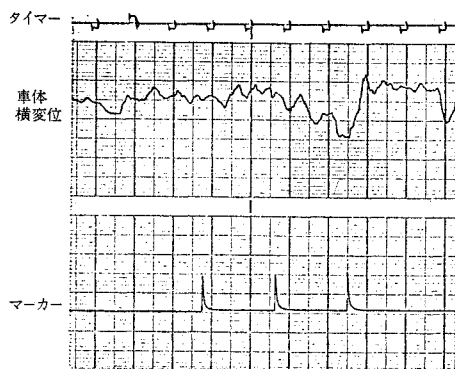


図-10 車体横変位測定波形 (速度 16 km/h)

に直線の場合についてであって、軌道に角折れがある場合の問題については、ほとんど解明されていない。したがって第2の問題として、軌道の角折れが蛇行動に与える影響を解析し、さらに通常の蛇行動と異なる特殊な振動を生じることがないかどうかを検査することが必要である。

角折れ通過時の車両の運動については、このほかにも前に述べた連続した角折れの影響や、角折れ進入時にすでに車両に動揺が生じている場合の問題など、検討すべき多くの問題があるが、上記の2点が最も本質的であると考え、この観点から実験データを整理した。

初めに車体の振動について解析した結果から述べる。

図-9, 10 は、おのおの速度が 11 および 16 km/h の時の車体と車軸間の相対横変位の測定結果である。縦軸は横変位、横軸は時間を表わす。横変位の符号は、車体が進行方向に向かって右に変位した時が負(図上で下向き)である。荷重の条件は両者とも半載で、偏心はない。図からわかるように、どちらにもかなり大きな振動が生じているが、角折れ進入以前にも現われていることから、車体は軌道の不整などのごくわずかな外乱によ

て容易に振動することがわかる。また振動成分のみに関していえば、角折れ前後でさほど大きな変化は認められない。したがって車体の振動に関する限り、この程度の角折れは、軌道のわずかな不整などと同程度の影響しか与えないものと考えられる。車両の蛇行動に関する理論的研究によれば(参考文献 1)~4) 車両の速度が安定領域にあれば蛇行動は減衰する。しかし、その場合でも、走行する車両が持つ多くの振動モードの中で、蛇行動と呼ばれるモードが最も大きな振動を生じるモードであることには変わりがない。したがって、軌道の不整のように、ランダムに外乱が加わる場合、たとえ走行速度が安定領域にあっても、車両が蛇行動の周期で振動することは十分に考えられる。そこで、これらの波形の周波数解析を行ない、蛇行動の周期と比較検討してみた。前にも述べたように、今回の実験においては車両の運動は非定常過程であって、エルゴード的ではない。そこで、通常のランダム・プロセスの解析において行なわれているように、相関関数のフーリエ変換からパワー・スペクトルを求める方法をとらず、データ・レコーダーに記録した波形を直接フーリエ級数に展開し、各周波数における sin および cos の係数の 2 乗の和を求めた。また、今回の実験では走行時間が比較的短いため、測定波形に含まれるランダムな要素が解析結果に影響を与える可能性が高い。個々の実験について求めた周波数分布から、このランダムに変動する成分を除いて、周波数分布の期待値を求めるため、42 回の全実験について分布を計算した後、これの平均値を求めた。この結果をシンクロスコープ上に表示したものを写真-6 に示す。写真において横軸は周波数を表わしており、左端の目盛りが 0 Hz、右端の目盛りが 5 Hz を示している。この間は等間隔で 1 目盛りが 0.5 Hz を表わす。

一般に時刻 $t=0$ から $t=T$ sec までしかないデータを用いて、これをフーリエ級数に展開するということは、 $t < 0$ または $T < t$ では $0 \leq t \leq T$ と同じく形が周期的に繰り返されると仮定したことになるので、 $1/T$ Hz に大きな成分が現われることになる。今回の場合 $T=4$

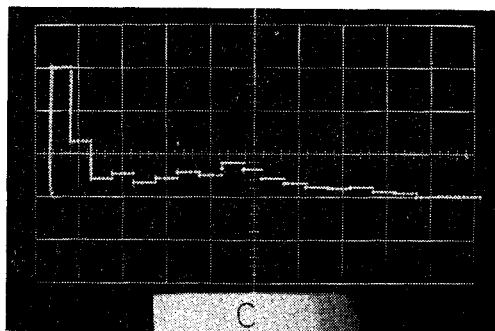


写真-6

sec としたから、このピークは 0.25 Hz に生じる。写真の左端に見える大きなピークがそれで、これは計算に伴う誤差の一種と考えられる。そこで、これを無視することになれば、約 2 Hz 強の成分が大きいことがわかる。これは実車に換算すれば、約 0.9 Hz であって、通常の軌道における 2 軸車の蛇行動理論に基づいて計算した一次蛇行動の振動数にほぼ一致する。

写真-7, 8 は同様にして、速度が 11 km/h および 16 km/h の場合について、おのおの周波数分布の平均を求めたものである。11 km/h 時には、0.25 Hz 以外に大きなピークがほとんど見られないが、16 km/h では 2 Hz 前後の成分がきわめて大きい。蛇行動理論によれば、16 km/h の方が不安定領域に近く、蛇行動の減衰性が低い。したがって車体はその固有周期で振動を生じやすくなる。写真-7, 8 の結果は、この理論による推定と良く一致する。写真-9, 10, 11 は積載重量の影響を示したものである。どの場合も周波数分布はほとんど同様な形状を示しているが、重量の増加に伴って 2 Hz 前後のピークの振動数が低下しており、積載重量の増加によって蛇行動の振動数が低下することを示している。写真-12, 13, 14 は積載荷重の偏心の影響を検討したものである。無偏心、左偏心の場合は、一般の場合と同じように 2 Hz 付近に山があるが、右偏心の場合には 2 Hz 付近の成分が小さくなっている。このように右偏心の場合に

は、0.25 Hz の他には特に大きなピークが認められず、蛇行動の周期が顕著に現われない理由は、角折れ部の方向に関係するものと思われるが、詳細は明らかでない。以上から車体に生じる振動は、通常の軌道における蛇行動による振動とほぼ同質のもので、角折れによって特殊な振動を生じることはないと考えてよい。

図-11, 12 は 図-9, 10 と同じ条件で走行させた場合の前軸とレールの相対変位についての測定結果である。図-11, 12 においては、第 1 角折れ通過後に変位が徐々に増加しており、図-9, 10 の場合とかなり異なるが、ここでは振動成分にのみ着目して、周波数解析の結果を検討してみる。写真-15 は、前と同様にして求めた周波数分布の全実験についての平均値で、これを写



写真-9

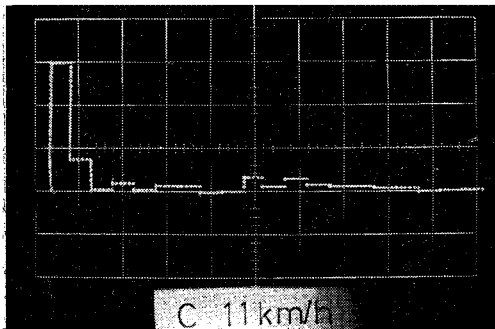


写真-7

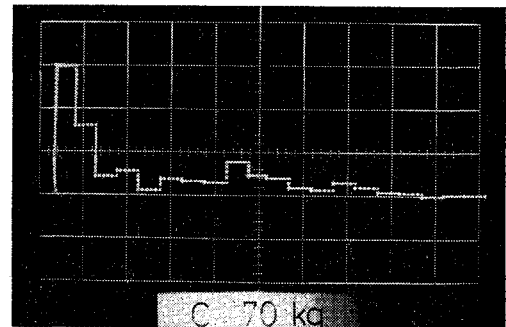


写真-10

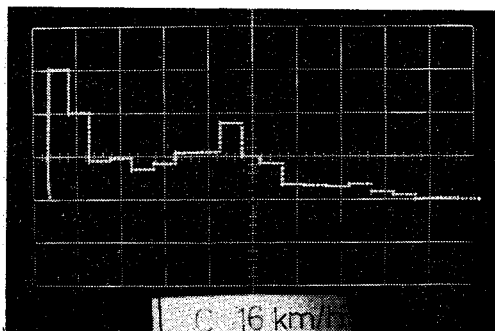


写真-8

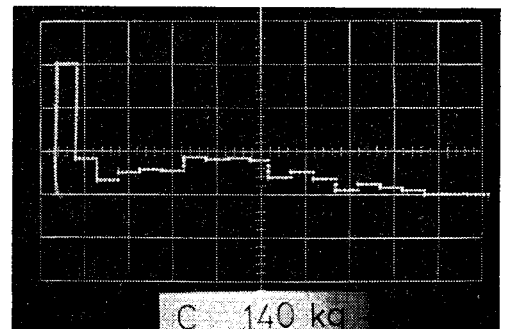


写真-11

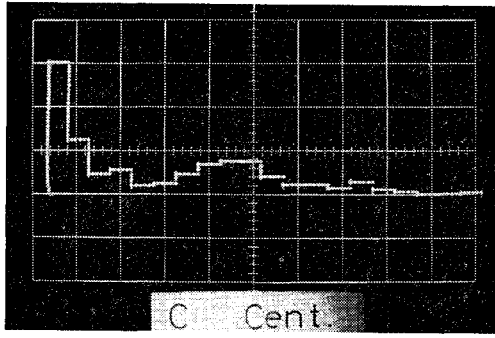


写真-12

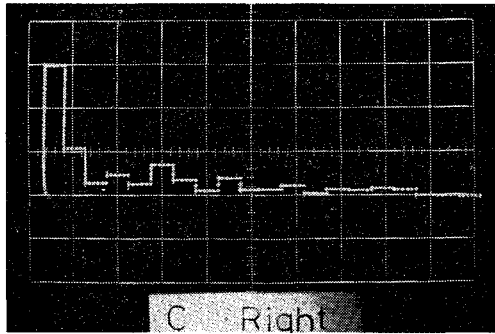


写真-13

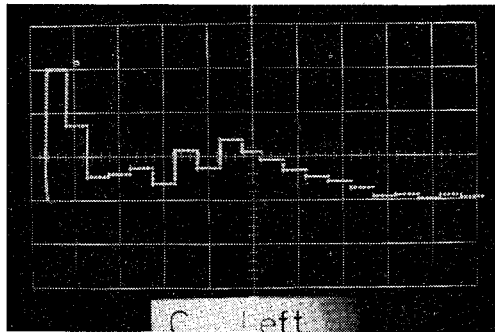


写真-14

真-6 と比較すると、2 Hz 付近では約 1.75 Hz にピークがあり、車体の蛇行の周期に比べて若干低くなっている。また 0.25 Hz から 1.25 Hz 付近までの低振動数の成分が大きいため、写真-6 とはかなり異なった周波数分布となっている。後者の原因は、次のように考えられる。図-11,12 からわかるように、車軸は第1角折れ通過後に徐々に右に変位し、第2角折れ通過後に左へ戻るような運動をしている。第1角折れで車軸が右に変位を始める点から、第2角折れ通過後再び左側へ戻るまでの距離は、約 8~10 m 程度であるから、車両はこの区間を約 2 秒強で通過する。したがって、角折れによる車軸の変位を振動波形と考えれば、その振動数は約 0.5 Hz となり、これが 写真-15 の 0.25~1.25 Hz に現われて

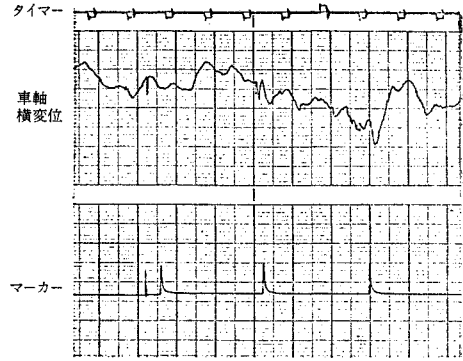


図-11 車軸横変位測定波形 (速度 11 km/h)

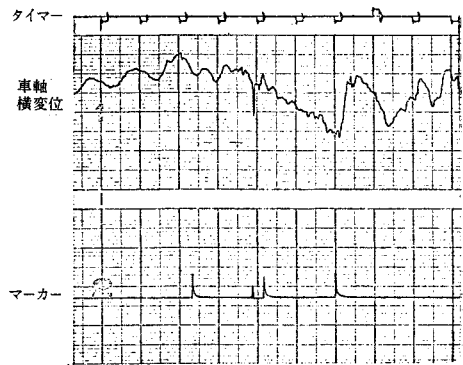


図-12 車軸横変位測定波形 (速度 16 km/h)

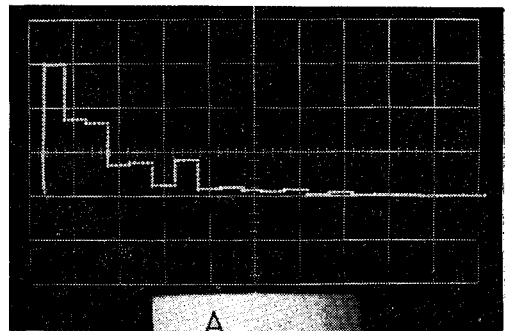


写真-15

いるものと考えられる。写真-16, 17 は前と同様にして、速度別に周波数分布を求めたものであるが、低周波数の成分は 16 km/h 時の方が大きくなっている。周波数解析にあたっては、サンプル区間を速度には無関係に一定時間 (4 秒) にとったため、前述の角折れによって車軸が変位する区間が全サンプル区間に対して占める割合は、高速時ほど大きくなる。したがってこれを振動波形と考えれば、高速時の方が周期性が顕著であると見なされる。写真-17 の方が低周波数の成分が大きいのは、主として上述のような理由によるもので、後に述べるよ

うに、角折れによる車軸の変位量自身については、速度による差がほとんど認められない。

写真-15に見られた 1.75 Hz のピークは 16 km/h だ

けに現われて、11 km/h 時には全く見られない。写真-18~23 は積載重量の影響を検討したものであるが、写真-15 とほとんど同じ形の周波数分布となっており、

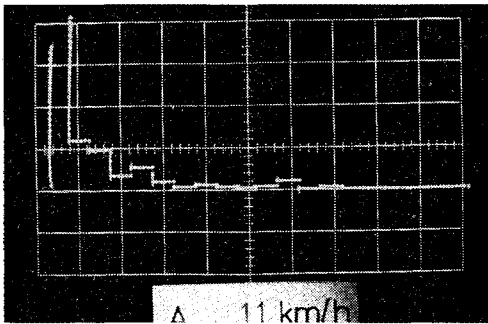


写真-16

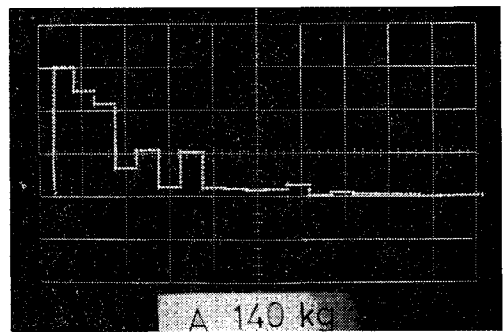


写真-20

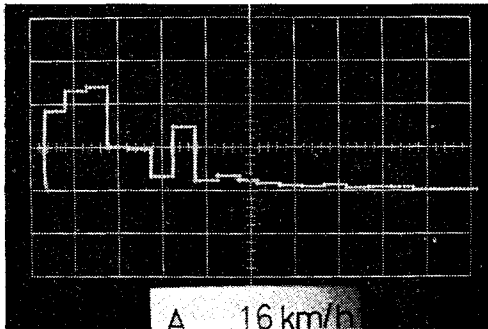


写真-17

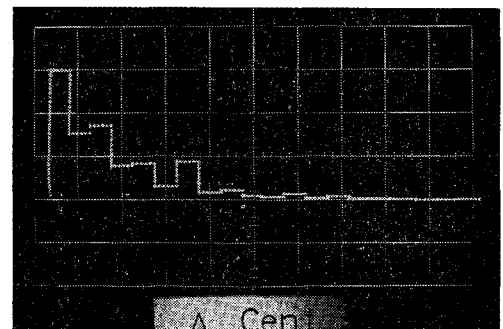


写真-21

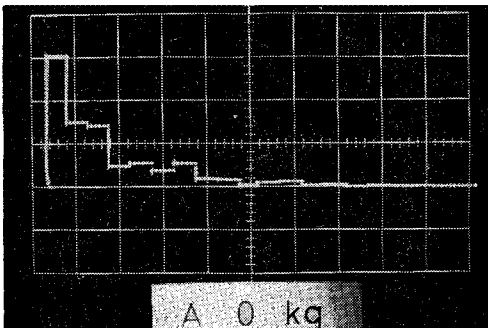


写真-18

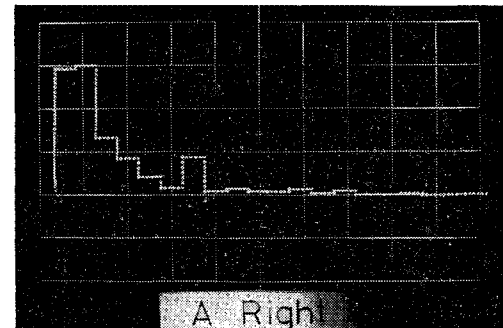


写真-22

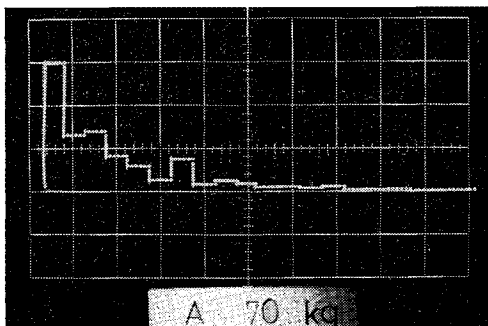


写真-19

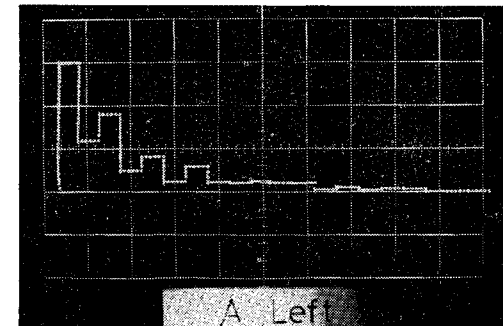
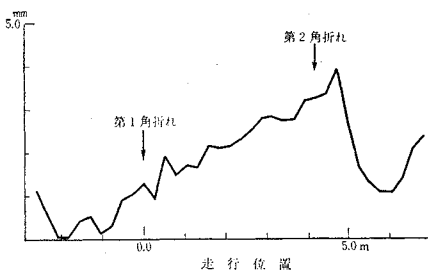


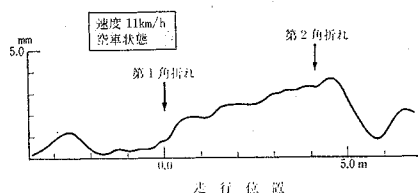
写真-23

1.75 Hz のピークがばね上質量の影響を受けないことを示している。磁気テープに記録した原波形を検討した結果、減速区間に入った付近で大きな振動が生じており、その振動数は速度が 16 km/h の場合約 1.75 Hz であった。この振動はほとんどの実験において同一の波形を示すので、この地点の軌道に通り狂いがあったものと推定されるが、本実験終了後に他の実験に備えて軌道を修正したため、確認はできなかった。いずれにしても、1.75 Hz にピークを生じる原因がこの振動にあることは明らかで、速度が 11 km/h の場合には、車軸がこの地点に進入する前にサンプルが終了してしまうため、周波数解析の結果には現われない。16 km/h の場合も、同様にしてこの振動が生じる前にサンプルを打ち切れば、ピークを消去することも可能であるが、サンプル区間の短縮は周波数分解能の低下を招いて、詳細な分析を困難にするので好ましくない。以上の結果から車軸の運動は軌道の線形によって大きく左右され、車体の場合のような蛇行動による振動は、顕著に現われないものといえる。

次に車軸のレールに対する相対変位と、それに伴う横圧の発生について検討してみる。図—11, 12 において振動成分を無視してみれば、車軸は第 1 角折れ通過の後、徐々に右側、すなわち角折れの外側へ変位し、第 2 角折れで最大に達した後、急激に左側へ戻るような運動をしていることがわかる。この運動が軌道の角折れに起因することは明らかであって、走行速度や積載荷重などの条件によらず、常に同じ位置で似たような傾向の運動を示している。このことを一層明白にするため、3. で述べたように 42 回の全実験について、常に同じ場所でサンプルした値を用いて、その平均値を求めたものを図—13 に示す。この図は 図—11, 12 と同様に縦軸は



図—13 前軸横変位 (全実験についての平均)

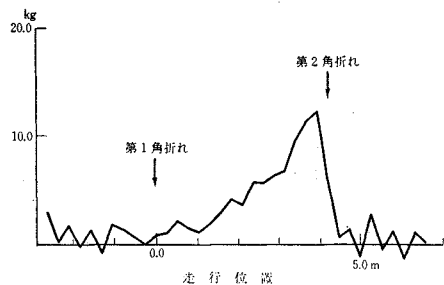


図—14 平滑化した前軸横変位

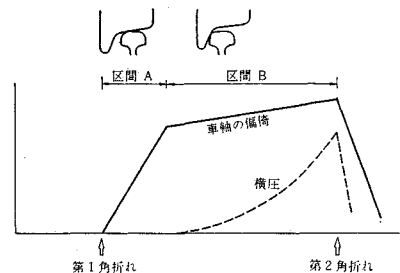
変位を表わすが、符号は逆で車軸が進行方向に向かって右に変位した時を正にとっている。また、横軸は走行位置で目盛っており、原点は第 1 角折れの位置である。図—13 においては、ランダムな振動は打ち消されているので、軌道の角折れによって車軸に生じる横変位の期待値を、ほぼ正確に表わしていると考えられる。

蛇行動によると考えられる振動を除去する別の方法として、車軸横変位の測定データの波形を、十分長い時定数を持つローパス・フィルターにかけて、振動成分を平滑化したものを 図—14 に示す。図は速度 11 km/h、空車時のものである。この図では、鋭いピークが除かれているため、角折れ通過時の車軸の横方向の運動の特徴がさらに顕著に現われている。車軸は、第 1 角折れを通過すると、かなり大きな速度で右側へ変位し始める。角折れ通過の後、約 0.6 m で変位が約 2 mm に達すると、この変位の速度は急に小さくなる。しかし、その後も徐々に変位は増加を続け、第 2 角折れ点で約 4 mm となる。第 2 角折れは方向が第 1 角折れと逆であるため、車軸の右側への変位は、この点で最大となった後急激に減少する。変位が約 2 mm を超えると、変位速度が急に小さくなることは、それ以上の車軸変位に対しては、何らかの拘束が働くことを意味しており、これが横圧と無関係でないことは容易に想像される。

図—15 は、図—13 と同様にして、右側前輪横圧の全実験の平均値を求めたものである。図—14 において変位の速度が減少している点から、横圧は徐々に増加しており、車軸に加わる拘束が、横圧すなわちレールからの



図—15 右前輪横圧 (全実験についての平均)



図—16 車軸偏倚と横圧の発生

反力であることを物語っている。これを図式的に示したのが図-16で区間Aにおいては車輪とレールの接点における勾配が小さいため、車軸は容易に変位し、横圧はほとんど発生しないが、区間Bでは接点がフランジに近付いて勾配が大きくなるため、車軸の変位が拘束されて、それとともに横圧が発生する。

また、図-14において、車軸の変位が2mmを超えた点から後の変位の増加は、ほぼ直線的であるのに対して、図-15の横圧の増加曲線は下に凸である。このことは、フランジがレールに接近した時に、車輪とレールの接点は1/20の勾配を持つ通常の踏面から60°の傾斜を持つフランジ部へと急激に移るわけではなく、その中間で接触点の勾配が徐々に増していくことを意味している。この性質は車輪とレールの断面形状に大きく左右され、両者が摩耗した場合にはその傾向も変わってくるものと考えられるが、その理論的検討にはいくつかの複雑な問題を含んでいるので、詳細は今後に譲りたい。

また今回の実験では、使用した軌道の都合で、2つの角折れを設けたが、以上に述べた通り車軸変位および横圧は、この第2の角折れまで増加を続けた。したがって、これらの最大値および最大値をとる場所を求めることはできなかった。

次に後軸の運動について若干触れておく。図-17は、前と同様にして、前軸および後軸のレールに対する相対変位を、全実験について平均したものである。一見してわかるように後軸の変位はきわめて小さく、言い換えれば後軸はほとんど軌道中心線に沿って走行している。そ

れゆえ後軸については、これ以上の解析を行なわなかったが、前軸に比べて問題は少ないものと思われる。

最後に速度および積載荷重の影響について述べる。図-18は、42回の全実験を走行速度によって分類し、おのおのについて車軸横変位の平均値を求めたものである。図からわかるように速度による差はほとんど認められない。図-19は同様にして積載重量別に平均値を求めたものであるが、荷重半載の時に最大となり、続いて空車、満載の順となる傾向を示している。この差が有意であるかどうかの判定を行なうために、分散を求めたところ、きわめて大きな値となって有意差はないと判定された。しかし、測定波形は蛇行動による振動成分を多量に含んでいるから、その分散が大きな値を示すのは当然であって、本来は振動成分を除去して、図-19に示したような成分について分析を行なうべきであると考えられる。現実には、厳密に両者を分離することはできないので、図-19における差が真に有意であるかどうかは解明できなかった。図-20は積載荷重の偏心の有無による影響を検討したものであるが、図から明らかなように、その差はほとんど認められない。

図-21, 22, 23は同様にして、右側前輪の横圧に対するパラメーターの影響を検討したものである。横圧の場合は、車軸横変位に比べて、速度による差が大きく、16km/hの場合の最大値は11km/h時の約1.4倍となっている。積載重量による影響は車軸横変位の場合と同様に半載の場合に最大となっているが、これに続いて満載、空車となっており、荷重を積載すると、横変位は小

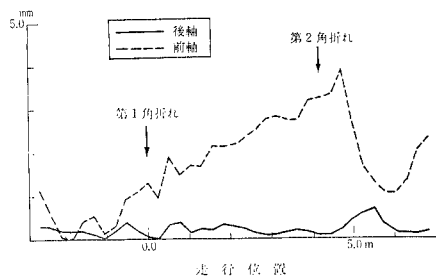


図-17 前軸横変位と後軸横変位の比較

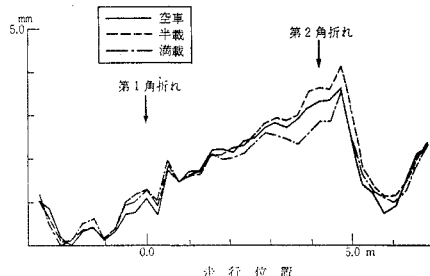


図-19 前軸前変位に対する積載重量の影響

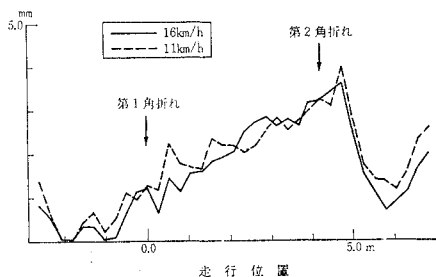


図-18 前軸横変位に対する速度の影響

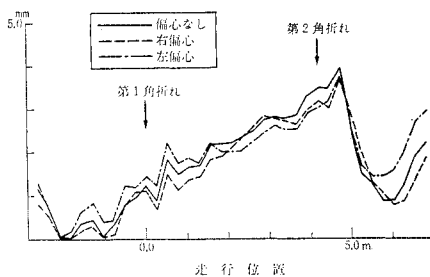
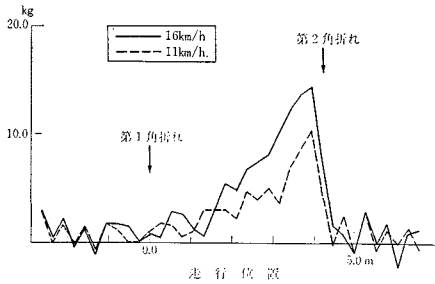
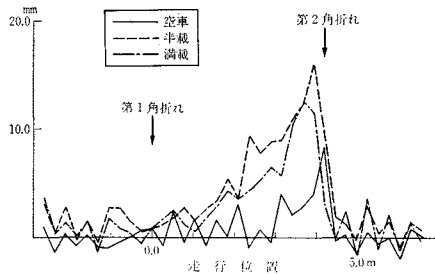


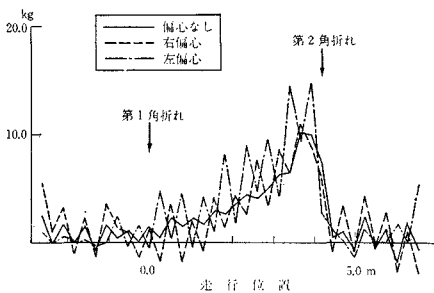
図-20 前軸横変位に対する積載荷重偏心の影響



図—21 右前輪横圧に対する速度の影響



図—22 右前輪横圧に対する積載重量の影響



図—23 右前輪横圧に対する積載荷重偏心の影響

さくとも、大きな横圧が生じることを示している。荷重偏心の影響については、ほとんどその差が認められない。横圧の場合も、振動成分によって分散が大きくなるため、この結果が有意なものであるかどうかの判定はできなかった。

5. 結 論

今回の 8/1 000 の水平角折れのある軌道を走行する模型車両の実験から得られた結果をまとめると、次の通りである。

(1) 車両は、その慣性によって角折れ進入後も進入前の進行方向を保とうとする傾向があるため、車軸には軌道に対する相対的な変位が生じる。この変位は角折れ通過直後には、かなり大きな速度で生ずるが、ある限界

に達すると変位の速度は急に小さくなる。この運動は前車軸に顕著に現われるもので、後車軸にはほとんど発生しない。

(2) 車軸の変位がある限界に達するまでは、横圧はほとんど 0 であるが、ある限界を超すと急激に横圧が発生する。その後の車軸の横変位は徐々に直線的に増加するのに対して、横圧は下に凸な曲線を描いて急増する。この横圧は速度が高い場合のほうが大きい。

(3) 今回実験を行なった範囲では、フランジの接触によって特殊な振動を生じたり、あるいは過大な横圧によって車輪がレールに乗り上がり、脱線を生じるような危険性は全く認められない。

(4) 角折れのある軌道を走行することによって、車体にはかなり大きな振動が生じるが、通常の軌道における蛇行動とくらべて特に異なるところはない。

(5) 角折れ通過時の車軸の振動は、軌道の線形によって左右されるところが大きく、車体の場合のような蛇行動による振動はほとんど見られない。

(6) 積載重量に関しては、車軸横変位、横圧ともに、荷重半載時に最大である。また、荷重を偏心させて積載したことによる差は、ほとんど認められない。

謝 辞

本研究は日本鉄道建設公団より東京大学が受諾した委託研究の一部として行なわれたもので、研究にあたっては東京大学土木工学教室の八十島義之助教授から、貴重なご助言を賜った。また、実験およびデータの処理にあたって、大嶋孝二助手をはじめ、同交通研究室の方々にも多大のご助力を頂いた。ここに深く感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) Carter, F.W. : On the Stability of Running of Locomotives, Proc. Roy. Soc. Series, A 1928. 121,585.
- 2) 松平 精 : 2 軸鉄道車両の蛇行動とその防止法, 機械学会論文集, 19 卷 87 号.
- 3) Wickens, A.H. : The dynamics of railway vehicle on straight track, Fundamental Considerations of Lateral Stability, Interaction Between Vehicle & Track, Paper 1, Proc. 1965. 66, Vol. 180, Part 3 F, Instn. Mech. Engrs., London.
- 4) 横瀬景司 : 2 段リンク改造の 2 軸車に対する 蛇行動の検討—鉄研速報, No. 67-258, 昭和 42 年 12 月.
- 5) 本州四国連絡鉄道吊橋技術調査委員会 : 軌道専門部会報告, 日本鉄道建設公団, 昭和 45 年 2 月.

(1970. 7. 11・受付)
(1971. 9. 8・再受付)