

横振動を受ける鉄道車両のロッキング 挙動に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY OF ROCKING MOTIONS OF
RAILWAY FREIGHT CARS ON VIBRATING TRACKS

川上英二*・田島二郎**・秋山成興***

By Hideji KAWAKAMI, Jiro TAJIMA and Narioki AKIYAMA

1. 序 論

鉄道車両の走行安全性に関しては、通常の静止した軌道上を鉄道車両が走行する際の走行安定問題に関する多くの研究がある。さらに、近年、わが国では本州四国連絡橋の建設に伴い、長大径間をもつ橋梁上を列車が通過する際の地震時または強風下の車両の走行安全性の問題が提起され、この問題に関する研究が昭和 37 年度以来、日本鉄道建設公団、本州四国連絡橋公団を中心とした「本州四国連絡橋の列車走行に関する研究委員会」の「走行分科会」で行われ、多くの検討が重ねられてきている。これらの研究成果については、一連の「本州四国連絡橋の列車走行に関する研究報告書」¹⁾に詳細に取りまとめられている。

これらの研究の一環として八十島・松本・西岡ら^{2)~10)}は、列車通過・風荷重・地震荷重等に伴い生ずる橋梁の振動による、または軌道狂いによる鉄道車両の安全性を検討するための、また逆に、このような安全性を損なうことがないように橋梁形式を選択するための基礎的な研究を行っており、軌道から振動外力が作用する場合に車両が安全に走行し得る限界を明らかにすることを目的として、横振動を受ける鉄道車両の挙動および安全性に関する多くの理論的、実験的研究成果を報告している^{2)~10)}。

これらの中の文献 3), 5), 7) にみられる理論的研究により、軌道に水平方向の振動外力が作用する場合、車両に発生する下心ローリング、上心ローリングによっておもに走行安全性が損なわれること、また、それらの発現が軌道の振動数や振幅、あるいは車両の走行速度によって影響されることを指摘している。また伊藤・長嶋¹⁾は、車両のロッキング挙動を考慮した簡略化された半車

体のモデルの解析方法を提案し、シミュレーションを行っている。

一方、実験的研究により、八十島・松本・西岡⁴⁾は、走行車両の不安定な現象が乗り上がり脱線、浮き上がり脱線、ロッキング、転覆に分類されることを指摘している。また文献 10) では、軌道振動台上を走行状態にある縮尺 1/5 の模型車両の挙動を実験により検討している。

本研究は、以上の八十島・松本・西岡らによる研究を引き継いで、昭和 49 年に東京大学より埼玉大学工学部に移設された上記の軌道振動台を用いて行われたもの¹¹⁾である。ただし、本研究では、模型とはいえ 100 kg 以上の質量を有するため 1/5 の模型車両では容易ではなかったロッキング、脱線、転覆等の極限状態での実験を安全に行えるように、さらに小型化された 1/10 の縮尺をもつ二軸車両およびボギー車両の 2 つの模型を新たに製作し、実験を行っている。本論文は、模型車両が停止または走行状態にあり、軌道を水平方向に加振させた実験において、多く観察された不安定な現象の 1 つであるロッキング現象に特に注目し、この現象の挙動およびその発生条件を詳細に検討し、さらに、車両の安全限界に関する実験の成果を述べたものである。2. では実験装置について、3. では停止状態にある二軸車両の挙動の加振振動数、振幅の違いによる変化を、4. では停止状態にある、二軸およびボギー車両の特にローリング、ロッキング挙動についてさらに詳細に検討し、5. では走行状態にあるこれら 2 種類の車両のロッキング挙動の発生条件について模型実験により検討した結果について述べたものである。

2. 実験装置

(1) 軌道振動台・小型振動台

軌道振動台は、振動する軌道を実験で再現させるため

* 正会員 工博 埼玉大学助手 工学部建設工学科

** 正会員 工博 埼玉大学教授 工学部建設工学科

*** 正会員 工博 埼玉大学教授 工学部建設基礎工学科

の装置である。本振動台は、全長 36 m, 幅 1.5 m, 高さ 0.65 m, 質量 18.5 t の鋼製箱桁を長手方向に対して直角水平に最大振幅 ± 100 mm, 最大振動数 10 Hz, 最大加速度 0.5 g (4.9 m/s^2) で正弦加振することができるものである。また、本振動台は 3 ユニットに等分され、箱桁は油圧浮上装置によって支持され、電気油圧サーボ方式によって水平方向に加振するものである。各ユニットには 5 個を 1 組とするコイルばねが配置され、このコイルばねの種類と配置の組合せにより加振振動数を設定している。前述のように本振動台は昭和 44 年に東京大学工学部に設置された後、昭和 49 年に東京大学より埼玉大学に移設されたものであり、その詳細は文献 9), 10) に述べられているので、ここでは省略する。ただし、本実験では縮尺 1/10 の長さ 15 m の軌道を縮尺 1/5 の軌道^{9), 10)}の上に新たに設置してあり、振動台上には、実験模型車両および牽引枠のための 2 組の軌道が取り付けられている。模型車両用軌間は、模型車両の縮尺 (1/10) と同様に、日本標準軌間 1 067 mm の 1/10 である約 107 mm としてある。牽引枠用の軌間は、脱線防止の目的で約 450 mm と広くしてある。

この軌道振動台のほかに 3. の停止状態での実験においては、振動数を変えるのが容易であるという理由で、1 m \times 1 m の大きさのテーブルを有する油圧式小型振動台を用いて実験を行っている。

(2) 牽引用枠

牽引用枠は、模型車両を牽引して所定速度で走行させるための車両枠である。1/10 模型に対しては牽引枠は無動力とし、この枠の中に車両模型を入れ、細いひもで牽引枠と連結し、牽引枠に取り付けられたワイヤーをモーターで巻き取ることで車両模型を走行させている。この牽引枠は、車両が転覆した場合に車両に破壊が生ずるのを防ぐ役割をも果たすものである。

(3) 模型車両

本実験で用いた模型車両は、国鉄仕様のワラ 1 形二軸車両およびホキ 300 形ボギー車両 (台車 TR-41 型) を原型として製作されたもので、縮尺は 1/10 である。縮尺 1/5 の模型¹⁰⁾では各車両の総質量が 100 kg を超すために危険でロッキング、脱線、転覆という極限状態を容易に発生できなかったのに比べ、これら縮尺 1/10 の模型では 1/5 模型と比較し、総重量は 1/8 と小さくなっているためこれら極限状態での実験が容易である。2 つの模型車両とも車体は測定の都合上無蓋車となっており、内側に荷重枠を取り付け、1 個 2 kg または 3 kg の荷重を用いて載荷状態の設定を変化できるような構造となっている。本実験では、載荷状態を中心軸に対し対称とし

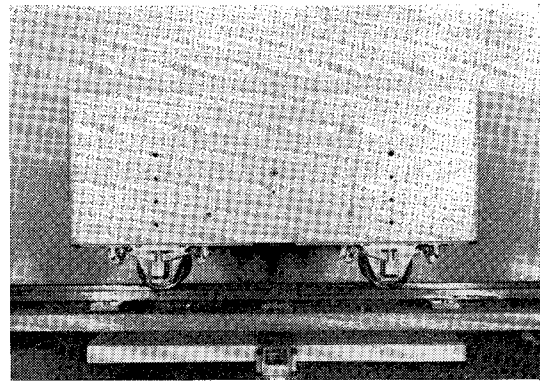


Fig. 1 WARA-Type Model Car.

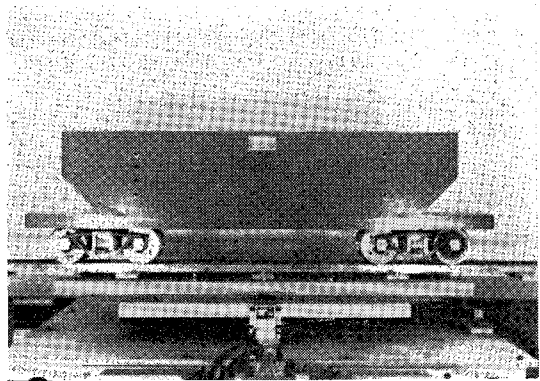


Fig. 2 HOKI-Type Model Car.

Table 1 Comparison between Model and Prototype.

Vehicle	WARA-Type 2 Axles Freight Car		HOKI-Type 2 Axles Bogie Freight Car	
	Prototype	Model	Prototype	Model
Weight	9.2 t	15.5 kg	18.5 t	23.8 kg
Maximally Loaded Weight	26.2 t	27.5 kg*	48.5 t	35.8 kg*
Maximum Height	3 770 mm	360 mm	2 900 mm	305 mm
Maximum Width	2 840	265	2 562	258
Maximum Length	8 040	725	11 200	1 040
Distance between Wheelsets	4 130	413	7 100**	710**
Suspension Device	2-Linkage	2-Linkage	TR-41	TR-41

* Condition under This Experiment

** Distance between Swivels, or Centers of Bogie Trucks

て、車体の重心位置がレール面上約 22 cm (ワラ) または約 20 cm (ホキ) の高さの対称軸上にある場合について実験を行っている。

ワラ 1 形車両模型 (Fig. 1)・ホキ形車両模型 (Fig. 2) の諸元を実車と比較して Table 1 に示す。模型車両の長さの縮尺は実車の約 1/10 であり、模型車両のつり装置、車輪等は実物と同じ材料を用いて、1/5 模型の場合と同様に¹⁰⁾可能な限り実物を相似させて作製されている。また、本実験では重力の影響を無視できないの

Table 2 Scale Factor of Model Vehicles.

	Scale Factor
Length	1/10
Acceleration	1/1
Mass	1/1 000
Force	1/1 000
Moment of Inertia	1/100 000
Time	1/ $\sqrt{10}$
Velocity	1/ $\sqrt{10}$
Frequency	$\sqrt{10}/1$
Stiffness	1/100
Damping Coefficient	1/100 $\sqrt{10}$

で、加速度の縮尺を 1/1 に設定することとなり、よって、実験に關係する諸量の相似率は 1/5 模型の場合^{9), 10)}と同様 **Table 2** のようである。

(4) 測定装置

測定装置および測定方法はともに文献 9), 10) に示されたものを参考にした。本論文で使用した測定項目は加速度と変位(停止状態)であり、このほかにビデオカメラを用いて、車体、車輪の挙動を観察した。

3. 入力振動数による停止状態での車両の挙動の変化

(1) 実験方法

1m×1m のテーブルを有する小型振動台上に、1/10の縮尺の長さ約 1.5m の軌道を敷設し、その上にワラ 1 形 1/10 模型車両を停止状態とし (**Fig. 3** 参照)、振動台を車両長手方向に垂直な水平方向に正弦波振動させ、車体の変位応答を観察した。その際、入力振幅は零から徐々に増加させ、振動台の最大振幅に達した後、今度は逆に入力振幅が零になるまで徐々に減少させた。ただし、入力振動数 f は、1.5~5 Hz の間の 10 個の振動数とし、**Fig. 3** に示すように、入力変位に対する車体重心位置での水平方向の相対変位波形 y^*_{B} 、および軌道上で測定した入力加速度波形 \ddot{y}_R を記録した。今後、 y, z は変位の

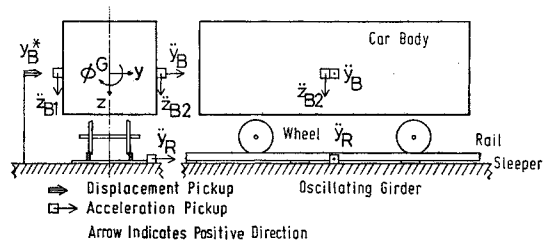


Fig. 3 Schematic Diagram of Model Vehicle and Instruments.

方向を (**Fig. 3** 参照), B, R はそれぞれ Car Body, Rail の頭文字を、 \cdot は時間に関する微分を、 $*$ は入力に対する相対記録を、 $||$ は波形の振幅の大きさを示すものとする。

(2) 実験結果および考察

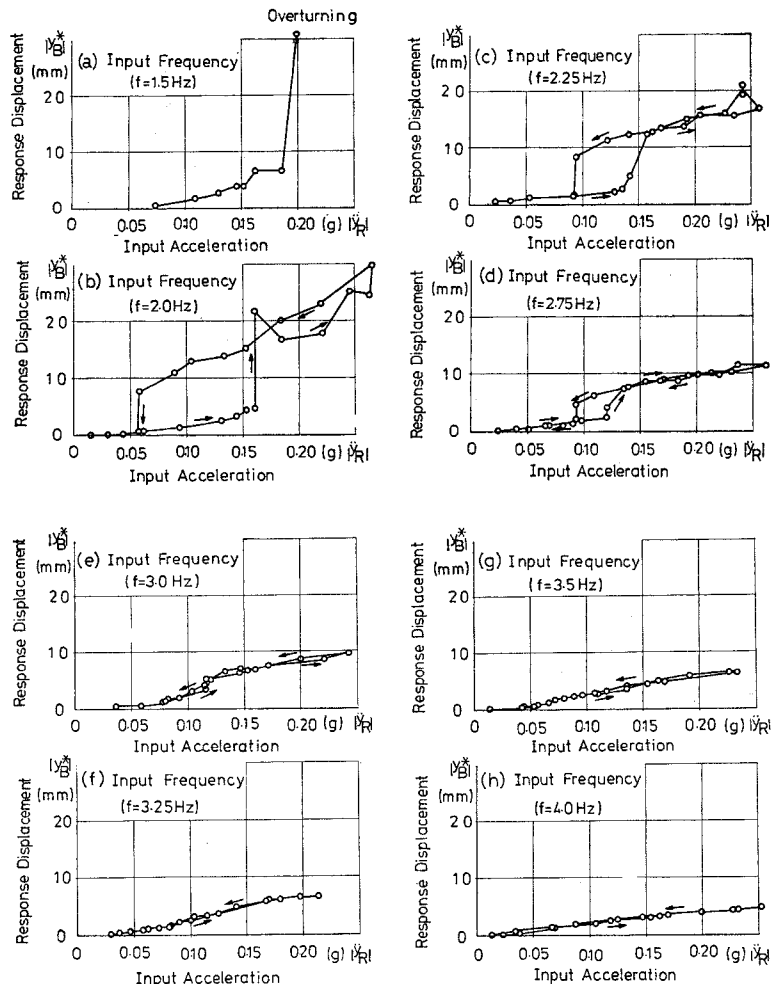


Fig. 4 Relationship between Input Acceleration Amplitude and Response Displacement Amplitude of Car Body (WARA-Type Model).

Fig. 4 (a)~(h) はそれぞれ各入力振動数 f における、入力加速度振幅 $|y_R|$ (横軸) と入力変位に対する車体重心での水平方向の相対変位応答振幅 $|y^*B|$ (縦軸) との関係を示したものである。以後、簡略化のため、これら2つの値をそれぞれ入力、応答とよぶことにする。

振動数 $f=1.5$ Hz (**Fig. 4** (a) 参照) においては入力 $|y_R|$ が約 0.2 g (約 196 cm/s²) までは車体の応答は入力の増大に伴いほぼ連続的に増加する。その際車輪の浮き上がりは認められない。入力 $|y_R| \approx 0.2$ g では片輪が浮き上がった直後にロッキング状態に移行しそうになるが、ロッキング状態が2~3回繰り返され定常になる前に車体の応答が大きくなり転覆が発生している。

入力振動数 f が 2.0 Hz の場合 (**Fig. 4** (b)) は、入力 $|y_R|$ が約 0.16 g までは下心ローリング状態であり、車輪の浮き上がりは認められない。車体の応答は入力の増加に伴いほぼ線形的に増加していくことが認められる。そして入力 $|y_R| \approx 0.16$ g で急に車輪が浮き上がり、これ以降車輪が左右交互に浮き上がるロッキング状態に入る。ロッキング開始直後、一時期車体が非常に大きく振動することが認められ、ロッキング開始直後の応答(約 22 mm) は、ロッキング開始直前の応答(約 5 mm) の約 4.5 倍になっている。しかし、これ以降比較的定常なロッキング振動を継続する。さらに入力を増大すると、ロッキング振動の応答は漸次増加していく。次に、入力 $|y_R|$ を漸減させると、車体の応答はロッキング終了まではほぼ連続的に減少するが、入力が約 0.06 g でロッキングが急に終了し、ローリング状態に移る。その際、車体の応答は急激に減少する(約 8 mm から約 1 mm へと約 1/8 倍になる)。以上の結果より、ローリング状態とロッキング状態の間では飛び移り現象(入力のわずかな違いに伴う応答の不連続的な変化)が認められること、また、それらの現象が生じる入力、つまり、ロッキング開始時と終了時の入力、が著しく異なり、前者は後者の2~3倍程度であることがわかる。

入力振動数が 2.25 Hz, 2.75 Hz の場合 (**Fig. 4** (c), (d)) についてみるとそれぞれ 2.0 Hz の場合と同様にローリング, ロッキングの2状態間で飛び移り現象が、異なる2つの入力で認められ、**Fig. 4** (b) のようにループを描いていることがわかる。しかし、そのループの大きさは 2.0 Hz の場合より小さくなっており、入力振動数が高いほど、その描くループの大きさがより小さくなっている。すなわち、高い振動数ほど、ロッキング開始時とロッキング終了時の入力の差および車体の応答の差がともに小さい。

一方、入力振動数が 3.0 Hz 以上になると、ローリング状態とロッキング状態との判別が困難である。ローリング状態からロッキング状態への移行、また、ロッキン

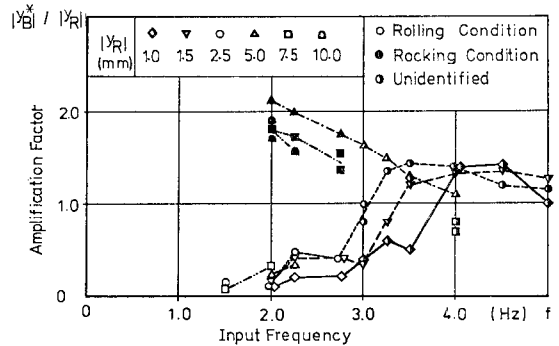


Fig. 5 Relationship between Input Frequency and Displacement Amplification Factor (WARA-Type Model).

グからローリングへの移行が、目視により認められない。また、**Fig. 4** (e)~(h) より車体の応答は、入力にほぼ比例して連続的に変化している。ビデオレコーダーの記録を調べた結果、車両の回転中心はレール面よりかなり上方にあり、上心ローリングであることが認められた。

Fig. 5 には **Fig. 4** の実験結果を整理し直し、車体重心での水平方向の相対変位応答振幅 $|y^*B|$ を、入力変位振幅 $|y_R|$ (**Fig. 4** で用いた入力加速度振幅 $|y_R|$ より波形が正弦波であることに基づき算定した) で割った応答倍率 $|y^*B|/|y_R|$ を縦軸に、振動数 f を横軸にとり、入力変位振幅 $|y_R|$ をパラメータとして示してある。また、目視によりロッキング状態である場合には●印で、ローリング状態では○印で、ロッキング状態かローリング状態か判別が困難な場合には⊙印で示してある。この図より、ローリング状態とロッキング状態との応答倍率は、明らかに大きく異なり、2種類の応答倍率曲線が認められる。つまり、3 Hz 以下 2 Hz までの入力振動数では、同一振動数に対し2つの応答倍率が存在し、その大きさは、ローリング状態では 0.2~0.4 であるのに対して、ロッキング状態では 1.5~2.1 であり、4~10 倍の応答倍率の違いが認められる。なお、前述したように入力振動数が 1.5 Hz ではロッキング挙動が定常とならず転覆現象が生じている。ロッキング状態では、入力変位振幅 $|y_R|=5.0, 7.5, 10.0$ mm の場合について認められるように、応答倍率は入力振動数 $f=2.0$ Hz で最大値を示し入力振動数の増加に対して応答倍率はほぼ連続的に減少している。また、入力変位振幅 $|y_R|$ が大きいほど、応答倍率は小さくなっていることが認められる。一方、入力振動数が 3 Hz 以下のローリング状態では、入力振動数の増加に対して応答倍率は概略増加の傾向にあり、振動数 3~4 Hz で上心ローリングとなりロッキング状態での応答倍率曲線と合流している。データの数が十分でないため明らかではないが、この応答

倍率には 2~2.5 Hz と 3.5~4.5 Hz 付近になだらかなピークがあり、これらがそれぞれ下心ローリング、上心ローリングの共振点であると考えられる。二段リンク、車輪-レール間等遊びの多い構造であることが原因となり、減衰が大きく、応答曲線がなだらかになっているものと考えられる。

次に、Fig. 4 の各入力振動数に対し、ローリング状態とロッキング状態との間で飛び移りが発生した入力加速度振幅を読み取った。各入力振動数（横軸）に対して、ロッキング開始時（ローリングからロッキングへ飛び移り）と終了時（ロッキングからローリングへ飛び移り）との入力加速度振幅（縦軸）をそれぞれプロットしたものを Fig. 6 に示す。ロッキング開始時の入力加速度は、振動数が高くなるほど減少するのに対して、終了時の入力加速度は増加することがわかる。そして入力振動数が 3.0 Hz でこれら両者が一致しており、これより、入力振動数が高くなるとロッキング状態とローリング状態との区別が困難な状態になっている。

また、本実験結果を用いて、入力振動数 f 、入力加速度振幅 $|\dot{y}_R|$ 、車体水平方向相対変位応答 $|y^*B|$ を 3 つの軸にとり、三次元的に表わしたその概略図を Fig. 7 に示す。これまで述べてきたように、 $f=1.5\sim 2.75$ Hz では、ローリング状態とロッキング状態とのそれぞれの応答量を表わす 2 つの面が存在し、ロッキング開始時と終了時の、入力加速度の差および車体変位応答の差は、入力振動数が高くなるに従い両者とも減少し、 $f=3.0$ Hz あたりでこの差は零になっていることが認められる。 $f=3.0$ Hz 以上では、車体の応答量を表わす面は不連続面を有しない 1 つの連続面となっている。入力振動数が 2~2.75 Hz の場合に認められた、ロッキング開始また

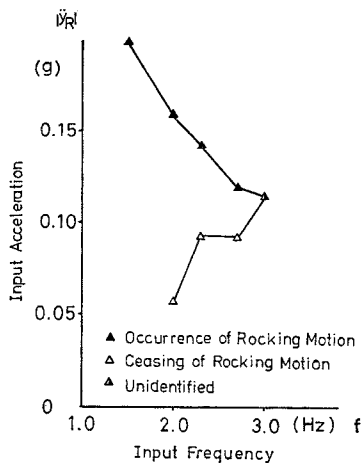


Fig. 6 Relationship between Input Frequency and Input Acceleration Amplitudes where Rocking Motion Occurs or Ceases (WARA-Type Model).

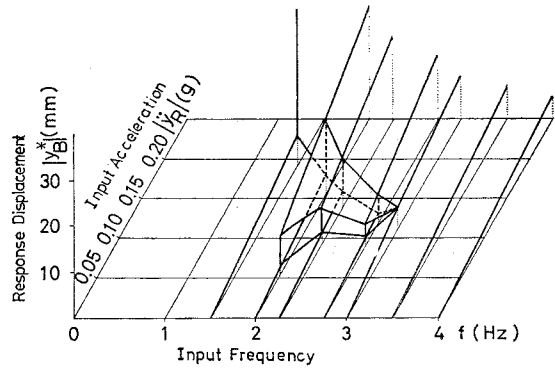


Fig. 7 Relationship among Input Frequency, Input Acceleration Amplitude and Response Displacement Amplitude of Car Body (WARA-Type Model).

は終了時の車体変位の急激な変化は、上述の 2 つの連続面間の飛び移り現象であると解釈することができる。また、ロッキング状態での車体変位について検討すると、入力振動数が小さく、入力加速度が大きいほど車体変位は大きい。そして、入力振動数が大きくなるほど車体変位は小さくなっていく傾向にある。

4. 停止状態における車両のローリング、ロッキング挙動の検討

(1) 実験方法

本章では、特に、3. でロッキング状態が最も顕著に表われた振動数である、 $f=2.0$ Hz (Fig. 4 (b) 参照) に加振振動数を設定して、ローリング、ロッキング状態での挙動をさらに詳細に検討した。まず、軌道振動台上で 1/10 模型車両を停止状態にし、振動台を 3. と同様に水平 y 軸方向 (Fig. 3 参照) に振動させた場合に、車体に生ずる水平・鉛直方向の加速度応答を Fig. 3 内に示す車体重心高さでの 3 点で測定した。測定された波形をそれぞれ \dot{y}_B , \ddot{z}_{B1} , \ddot{z}_{B2} で示す。前章と同様、入力振幅を零からしだいに漸増させ、ローリング状態からロッキング状態に移し、振動台の許容最大振幅に達した後、逆に入力振幅を漸減させ、ロッキング状態からローリング状態へ移行するまでの応答波形の測定を行い、同時に、入力加速度 \dot{y}_R をも記録した。

(2) ワラ 1 形模型車両の加速度応答振幅

まず、ワラ 1 形 1/10 模型車両の入力加速度振幅 $|\dot{y}_R|$ の変化に対する、車体加速度振幅 $|\dot{y}_B|$, $|\ddot{z}_{B1}|$, $|\ddot{z}_{B2}|$ の変化をそれぞれ Fig. 8 (a)~(c) に示す。ただし、車体加速度振幅としては、入力加速度の基本振動数のみが

卓越し、正弦波とみなされる場合には \odot で示し、車輪に浮き上がりが生じ、レールとの衝突に伴い発生すると考えられる、高振動数の波を伴う波形の場合(Fig. 9 参照)には、その高振動数波の最大振幅の値を \bullet で、高振動数の波形を除いた入力振動数成分の振幅を \circ で示した。これらの図は、車体の水平、鉛直方向の応答ともに、先に示した Fig. 4 (b) と似た形を描いている。すなわち、車体の応答倍率の比較的小さいローリング状態と、応答倍率が高いロッキング状態との、2つの状態が明らかに別々に存在し、その間で飛び移り現象が認められるこ

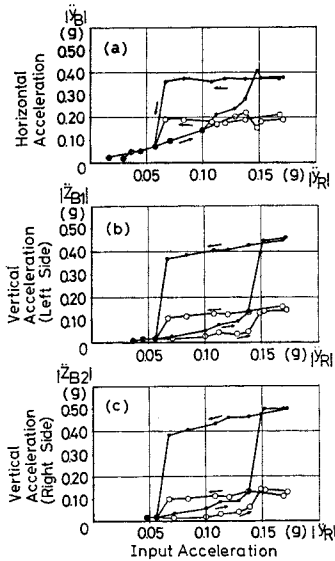


Fig. 8 Relationship between Input and Response Acceleration Amplitudes in (a) Horizontal Direction, (b) Vertical Direction Measured on Left Side, or (c) Vertical Direction on Right Side of Car Body (WARA-Type Model, Frequency $f=2\text{ Hz}$). (\circ Amplitude of Fundamental Frequency Component; \bullet Maximum Amplitude)

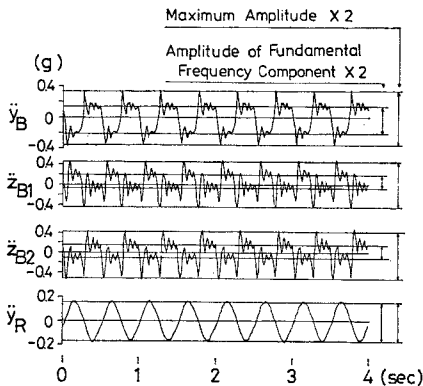


Fig. 9 Acceleration Records of Model Car in Rocking Motion (WARA-Type Model).

と、ロッキング開始時とロッキング終了時の入力加速度が大きく異なり、前者(約 0.14 g)は後者(約 0.06 g)の 2~3 倍程度も大きいことがわかる。

もとより、本実験の場合、ローリングからロッキングへの飛び移り入力加速度は約 0.14 g であり、Fig. 4 (b) の場合の約 0.16 g と比べ 1 割程度小さな値が得られている。Fig. 4 (b) は小型振動台を使った場合の結果であり、Fig. 8 (a) は軌道振動台を使用した場合の結果であり、この違いが 1 割程度の誤差となって現われているものと考えられる。研究の簡潔さから考えると、両者の実験は同一の振動台で行うことがよいと考えられるが、小型振動台には振動数を自由に設定できる利点があり、軌道振動台は車両を走行状態で実験できる利点がある。本章での実験結果は 3. の結果をさらに詳細に検討する目的のほかに、5. で走行状態の場合との比較を行うために重要であるという意味もあって行われたものである。

(3) 位相特性

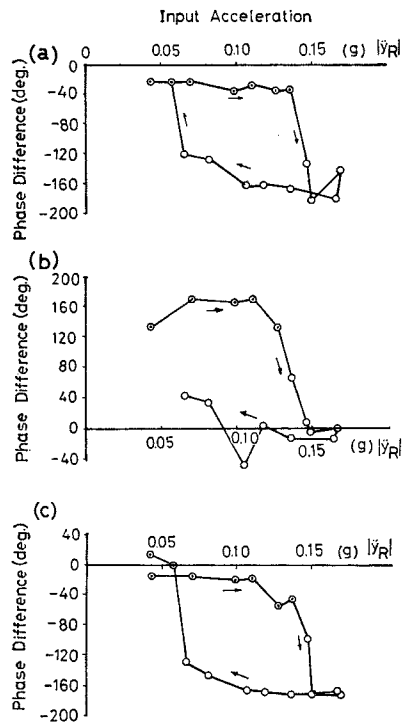


Fig. 10 Phase Difference between Input Wave and Response (a) Horizontal Wave, (b) Vertical Wave Measured on Left Side, or (c) Vertical Wave on Right Side of Car Body (WARA-Type Model, Frequency $f=2\text{ Hz}$). (In Case Response Wave Looks Like : \odot Sinusoidal Wave; \bullet Rectangular Wave with High Frequency Components)

入力加速度波形 \ddot{y}_R に対する、車体加速度波形 \ddot{y}_B , \ddot{z}_{B1} , \ddot{z}_{B2} の入力振動数成分の位相差を読み取り、これらをそれぞれ入力加速度振幅 $|\ddot{y}_R|$ の関数とし、**Fig. 10** (a)~(c) に示す。ただし、正の値の位相差は応答波形の方が入力波形より進んでいること、負の値は遅れていることを示している。**Fig. 10** (a) (車体水平方向加速度 \ddot{y}_B) では、この位相差はローリング状態では約 35° の遅れであるが、ロッキングへの移行に伴い急増し、ロッキング状態では約 160° の遅れになっている。そして、ロッキング状態では約 160° の遅れで一定値を保ち、ローリング状態に戻ると、再び約 35° の遅れとなっている。**Fig. 10** (b), (c) の車体上下方向加速度 \ddot{z}_{B1} , \ddot{z}_{B2} について検討すると、まずローリング状態では、 \ddot{z}_{B1} は約 170° の進み、 \ddot{z}_{B2} は約 10° の遅れになっているのに対して、ロッキング状態では位相特性はともに大きく変化し \ddot{z}_{B1} は入力波とほぼ同位相、 \ddot{z}_{B2} は約 170° の遅れとなっていることがわかる。しかし、 \ddot{z}_{B1} と \ddot{z}_{B2} とはいずれの状態においてもちょうど互いに逆位相となっている。

以上のように、車体加速度波形と入力波形との位相差について調べても、この値は、ローリング状態とロッキング状態とで大きく変化し、その変化はわずかな入力加速度振幅の変化に伴い発生する、つまりローリング状態とロッキング状態との、異なる二状態間を飛び移る現象が認められる。また、この2つの状態間を飛び移る際の入力加速度は、飛び移る方向により大きく異なっている。これらの結果は、これまで述べてきた結果と一致している。また、上述の位相差は、いずれも同位相 (0°) か逆位相 (180°) に近く、各状態でのモード形を描くことが可能であることを示唆している。

(4) ローリング、ロッキング状態でのモード形

ビデオレコーダーに集録された記録より、ローリング状態とロッキング状態とにおける、車体下部からレールまでの挙動を、写し取った図を **Fig. 11** (a), (b) に示す。正負それぞれの最大変位での状態を、一点鎖線と破線で示す。ただし、入力加速度としては、約 $0.1g$ (98 cm/s^2) の一定値を選び、(a) では入力加速度を増加させた際に発生したローリング状態での挙動を、(b) では入力加速度を減少させた際に発生したロッキング状態での挙動を示す。(a) のローリング状態では、レールは車輪に接したままである。また、上下方向の変位はごくわずかであり、水平方向の振動が卓越している。(b) のロッキング状態では、車輪に浮き上がりが起こり、車体に上下方向の変位が顕著に認められる。

ビデオレコーダーの記録より車体の水平、鉛直、回転変位を読み取り、車体全体についてその挙動を表わした

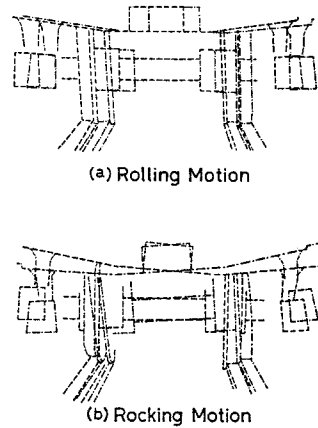


Fig. 11 Two Different Responses of Car Body under Same Excitation (WARA-Type Model, Frequency $f=2\text{Hz}$, Amplitude $|\ddot{y}_R|=0.1g$).

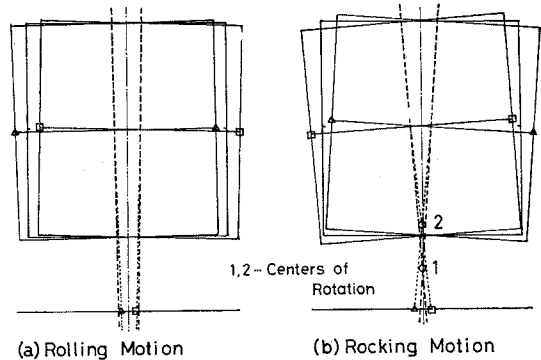


Fig. 12 Mode Shapes under Same Excitation (WARA-Type Model, Frequency $f=2\text{Hz}$, Amplitude $|\ddot{y}_R|=0.1g$).

ものを **Fig. 12** (a), (b) に示す。入力振動であるレールの中央位置での左右最大変位をそれぞれ Δ と \square で示し、同時刻での車体の位置を Δ と \square で示してある。また、車体の回転の中心を求めるために、左右に最大変位した車体の中心軸を破線で、レールの中央位置と車体の図心位置とを結んだ線を点線で示してある。これらそれぞれの線の交点が回転中心であると考えられる。(a) のローリング状態では、振動台が右へ変位すると車体も右へ変位し、さらに時計方向に回転する車体モードを示している。回転の中心がレール面よりかなり下方に位置している下心ローリングである。一方、(b) のロッキング状態では、振動台と車体の水平方向の変位は逆位相となっている。つまり、振動台が右へ変位しているとき、車体は左に変位している。これは、先に述べた入力加速度と車体加速度との位相差 (**Fig. 10** (a)) の結果からも明らかである。また、上述のように求められる2種類の回転中心は、それぞれ図中 1, 2 で示されているが、ロー

リング状態の場合と明らかに異なり、レール面より上方に存在している。

(5) ボギー車両 (ホキ 300 形 1/10 模型) の停止状態におけるローリング、ロッキング挙動

以上二軸車両であるワラ 1 形模型を用いた実験結果について検討した。次に以上得られた結果が、二軸車両であるワラ形車両のみに特有な現象であるかどうかを明らかにするため、ボギー車両であるホキ 300 形の模型車両を用いて同様の実験を行った。Fig. 13 (a)~(c) には入力加速度振幅 (横軸) の変化に伴う車体加速度振幅の変化を示してある。図中の ⊙, •, ○ の記号は、ワラ形車両のロッキング実験の結果 (Fig. 8) に用いられた記号と同じ意味を表わしている。Fig. 13 の (a)~(c) は、それぞれワラ形車両の実験結果である Fig. 8 (a)~(c) と同様なループを描いていることがわかる。また、位相特性、モード形とも二軸車両の場合と同様な結果が認められた。したがってローリングとロッキングとの定性的な特性については、二軸車両とボギー車両の両者の間には共通した特性があるものと考えられる。

5. 走行状態における車両のローリング、ロッキング挙動

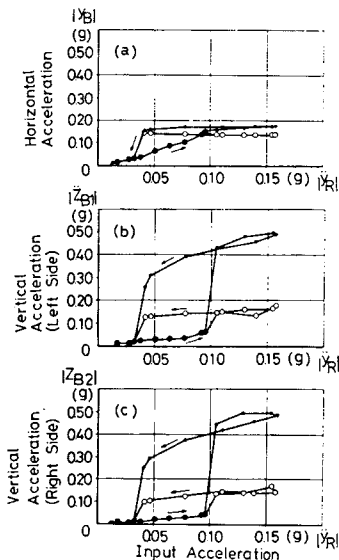


Fig. 13 Relationship between Input and Response Acceleration Amplitudes in (a) Horizontal Direction, (b) Vertical Direction Measured on Left Side, or (c) Vertical Direction on Right Side of Car Body (HOKI-Type Model, Frequency $f=2\text{Hz}$). (○ Amplitude of Fundamental Frequency Component; • Maximum Amplitude)

(1) 実験方法

横振動する直線軌道上をワラ 1 形車両またはホキ 300 形車両を走行させ、走行状態がロッキング挙動に及ぼす影響を検討した。ただし、入力振動数としては、4. の場合と同様に 3. でロッキング挙動が顕著に認められた 2.0 Hz を選んだ。走行による影響を明らかにするため、まず、停止状態でロッキング開始限界の付近まで入力加速度振幅を上げておく。そして、そのローリング状態から車両を走行させほぼ一定速度になるとともに入力加速度振幅を漸増させ、車両にロッキングを開始させる。そして、そのときの入力加速度振幅の値を測定した。また逆に、停止状態でロッキング状態にさせておき、ロッキング終了限界の付近まで入力振幅を減少させておく。車両を走行させ、ほぼ一定速度になるとともに入力振幅を漸減させ、ロッキングが終了するときの入力加速度振幅の値を測定した。ただし、車両の走行速度は、0, 0.2, 0.7, 1.1 m/s (それぞれ実車で 0, 2.3, 8.0, 12.5 km/h に相当 (Table 2 参照)) の 4 段階とした。また、各走行速度についてそれぞれ 10 回ずつ走行させ、ロッキングの開始または終了限界それぞれの平均値および標準偏差を算定した。

(2) 実験結果および考察

Fig. 14 にワラ形またはホキ形車両模型の、ロッキング開始時と終了時の入力加速度振幅を、走行速度の関数として示す。入力加速度振幅の平均値を \triangle \blacktriangle で、平均値 \pm 標準偏差を \circ で表わしてある。(a) のワラ形車両のロッキング開始時の入力加速度振幅は、停止状態または走行状態によらず約 0.15 g であり、この値はまた走行速度にもあまり影響されない。同様に、ロッキング終了時の入力加速度は、いずれの場合も約 0.06 g である。

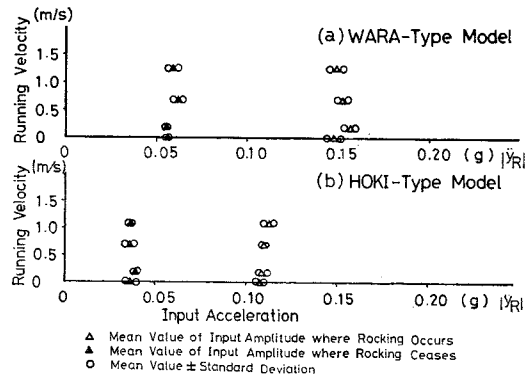


Fig. 14 Input Acceleration Amplitude where Rocking Motion Occurs or Ceases as Function of Running Velocity of (a) WARA-Type or (b) HOKI-Type Model Car (Frequency $f=2\text{Hz}$).

一方、ホキ形車両では、ロッキング開始時の入力加速度は約 0.11 g、ロッキング終了時の入力加速度は約 0.04 g である。ワラ、ホキ形車両とも走行のこれらの限界値への影響は±約 5% 以内であり、ロッキングの開始および終了時の入力加速度振幅の違い(約 2~3 倍)と比べ、停止、走行の状態の違いによる影響、走行速度による影響は、ともに顕著ではないといえる。もとより、本実験結果は比較的走行速度の小さい場合の結果であり、高速の場合に関してはさらに検討が必要である。

6. 結 論

停止または走行状態にある鉄道車両に、軌道から水平振動外力が作用した場合に生ずる、不安全な現象の 1 つである、車両ロッキング挙動およびその発生限界を、模型実験により検討した。得られたおもな結論は次のとおりである。

(1) 入力振動数により、車体の挙動に大きな違いがみられる。比較的低い振動数が低い場合(本実験では 1.5 Hz)は、安定なロッキング現象は発生せず、転覆現象が認められる。中間の入力振動数(2.0~2.75 Hz)では、ローリング状態とロッキング状態との異なる二形態を明瞭に示す。ある入力振幅域内の同一の加振に対し、ローリング状態とロッキング状態との 2 つの異なる応答を示す。比較的高い入力振動数(3.0~5.0 Hz)では、二形態の差がなくなり、上心ローリングが発生する。

(2) 従来ロッキング挙動の安全限界の入力加速度として考えられていたロッキングの開始限界加速度よりも小さい入力加速度で、ロッキング終了限界加速度があることが認められた。これらロッキング開始限界加速度と終了限界加速度とは、加振振動数によっては 2~3 倍程度も異なり、前者は後者より大きい値を示す。以上の結果は、片輪浮き上がり限界、ロッキング開始限界、または横圧/輪重を、安全性の指標と考えている車両の従来の安全限界基準に、1 つの新しい限界—ロッキング終了限界—を加えるものである。この値は、たとえ一度ロッキングが発生したとしても、それが継続せず、ローリングに復帰するために必要な入力振幅の大きさを表わす、より安全側の限界値であり、地震動の振幅の非正常性、または継続時間との関係のうえから、車両の安全基準をより合理的にするための、有益な資料となるものと考えられる。

(3) ローリング状態とロッキング状態間の移行時には、わずかな入力振幅の変化に伴い、車体の応答に大幅な変化がみられる。ローリング状態とロッキング状態それぞれのうちの応答倍率は、入力振幅、振動数に対し連続的であるが、それらの状態間では飛び移りが生じ、この移行時の状態間の飛び移りが、車体の応答の大幅な

変化となって現われるものと考えられる。

(4) ロッキング現象は、二軸車両、ボギー車両とも共通して観察された。車両の種類の違いによらず、定性的には共通したローリング・ロッキングの特性が認められた。

(5) ロッキングの開始、終了限界値は、停止状態、走行状態で大差なく、また走行速度によってもあまり変わらない。走行による、ロッキング現象の発生条件への影響は、本実験の範囲内では顕著ではない。この結果は、走行状態の三次元車両モデルを用いず、解析が容易である停止状態の二次元半車体モデル¹⁾でロッキング挙動の解析をしても、近似的には十分であることを示すものと考えられる。

現在、以上の現象を説明するための力学モデルについては検討中であり、また、ロッキング走行実験中において幾度か発生した脱線についても検討を進めている。

7. あとがき

本研究は、本州四国連絡橋公団から委託された番ノ州高架橋の列車走行性に関する研究・横振動をとする軌道上の列車走行性に関する研究の一環として行われたものである。本研究の遂行にあたって本州四国連絡橋の列車走行に関する研究委員会(委員長:八十島 義之助 教授, 埼玉大学)およびその走行分科会(主査:伊藤文人教授, 東京都立大学)の委員の方々にご意見, ご助言をいただいた。また、実験に参画された埼玉大学工学部の堀野浩美文部技官, 当時の埼玉大学建設基礎工学科の大学院または学部学生であった中原 建(現・長大橋設計センター), 長谷川勝哉(現・大成建設), 大野俊夫(現・鹿島建設), 大橋士美(現・開発土木 コンサル) 諸氏の大いなる助けを得た。深く感謝する次第である。

参 考 文 献

- 1) 日本鉄道施設協会: 本州四国連絡橋の列車走行に関する研究, 走行分科会中間報告書, 昭和 48 年 3 月~昭和 56 年 3 月。
- 2) 八十島義之助: 吊橋軌道とその車両走行安定性に関する研究, 第 5 中間報告, 東京大学工学部土木工学科。
- 3) Yasoshima, Y., M. Ito and T. Nishioka: Some problems of suspension bridges under running of railway vehicles, Proc. of JSCE, No. 167, pp. 47~53, 1969-7.
- 4) Yasoshima, Y., Y. Matsumoto and T. Nishioka: Experimental study for derailment on vibrating tracks, Proc. of JSCE, No. 164, pp. 71~76, 1969-4.
- 5) 西岡 隆: 軌道の振動を考慮した車両運動に関する理論的研究, 土木学会論文報告集, No. 172, pp. 43~57, 1969-12.
- 6) 松本嘉司・藤沢伸光: 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, 土木学会論文報告集, No. 200, 1972-4.
- 7) 西岡 隆・橋本渉一: 水平地震動に対する橋梁上の二軸

- 貨車の走行安定性，土木学会論文報告集，No. 296，1980-4.
- 8) 西岡 隆・塩尻弘雄・橋本渉一：横風作用下における長大橋梁上の鉄道車両に関する実験的研究，土木学会論文報告集，No. 309，pp. 113~128，1981-5.
- 9) Yasoshima, Y., Y. Matsumoto and T. Nishioka : Studies on the running stability of railway vehicles on suspension bridges, Journal of the Faculty of Engineering, the University of Tokyo (B), Vol. XXXVI, No. 1, 1981.
- 10) 八十島・松本・西岡・大嶋：振動軌道上の鉄道貨車の走行安定性に関する実験的研究，土木学会論文報告集，No. 313，pp. 111~124，1981-9.
- 11) Okumura, T., N. Akiyama and Y. Ishii : The study for stability of freight cars on vibrating tracks, 埼玉大学建設系研究報告，第8巻，1979.
- 12) 松平 精：二軸鉄道車両の蛇行動とその防止法，第1報，第2報，機械学会論文集，第19巻，87号，1953.
- 13) 松井 哲：二軸貨車競合脱線に関する研究，鉄道技術研究報告，No. 827，1973-1.
- 14) 佐藤 裕：軌道力学，鉄道現業社，1964.

(1982.7.12・受付)