

## (14) 振動軌道上の鉄道車両のロッキング挙動について

○ 埼玉大学 川上 英二      大成建設 長谷川 勝哉  
埼玉大学 田島 二郎      埼玉大学 秋山 成興

### 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、多くの検討が重ねられてきている。<sup>1)</sup>

これらの研究の一環として八十島・松本・西岡ら<sup>たとえ2), 3)</sup>は、列車通過・風荷重・地震荷重等に伴い発生す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。

本研究は、以上の八十島・松本・西岡らによる研究を引継いで、昭和49年に東京大学より埼玉大学工学部に移設された軌道振動台を用いて行われたものである。ただし、本研究では、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、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全な現象の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。

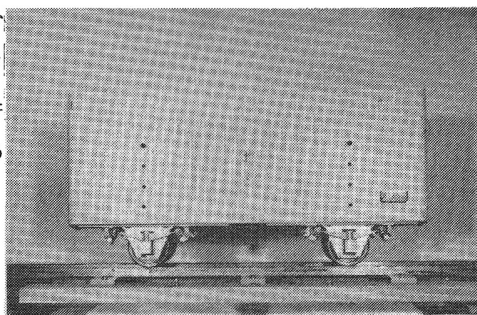


Fig.1 WARA-Type Model Car

### 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の装置である。本振動台は、全長3.6m、幅1.5m、高さ0.65m、質量18.5tの鋼製橋桁を長手方向に対して直角水平に最大振幅±100mm、最大振動数10Hz、最大加速度0.5g ( $4.9 \text{ m/s}^2$ )で正弦加振することができるものである。本振動台は昭和44年に東京大学工学部に設置された後<sup>2)</sup>、昭和49年に埼玉大学に移設されたものである。ただし、本実験では模型車両の縮尺(1/10)と同様に、日本標準軌間1067mmの1/10である約

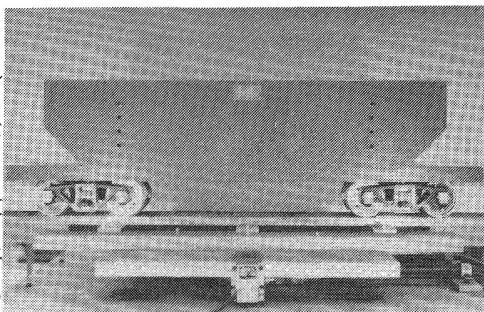


Fig.2 HOKI-Type Model Car

107 mm の軌間を有する 1.5 m の長さの軌道を新たに設置してある。

以上の軌道振動台の他に、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、約 1 m × 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) 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。本実験では、載荷状態を中心軸に対し対称として、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、実験に関係する諸量の相似率は Table 2 のようである。

Table 1 Comparison between Model and Prototype

| Vehicle                    | WARA-Type 2 Axes Freight Car |           | HOKI-Type 2 Axes 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             | 3770 mm                      | 360 mm    | 2900 mm                            | 305 mm   |
| Maximum Width              | 2840                         | 265       | 2562                               | 258      |
| Maximum Length             | 8040                         | 725       | 11200                              | 1040     |
| Distance between Wheelsets | 4130                         | 413       | 7100 **                            | 710 **   |
| Suspension Device          | 2-Linkage                    | 2-Linkage | TR-41                              | TR-41    |

\* Condition under This Experiment,

\*\* Distance between Swivels, or Centers of Bogie Trucks

Table 2 Scale Factor of Model Vehicles

|                     | Scale Factor |
|---------------------|--------------|
| Length              | 1/10         |
| Acceleration        | 1/1          |
| Mass                | 1/1000       |
| Force               | 1/1000       |
| Moment of Inertia   | 1/100000     |
| Time                | 1/√10        |
| Velocity            | 1/√10        |
| Frequency           | √10/1        |
| Stiffness           | 1/100        |
| Damping Coefficient | 1/100√10     |

## 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

上述の小型振動台上に 1/10 の縮尺の長さ約 1.5 m 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、振動台の最大許容振幅に達した後、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 Hz ～ 5 Hz の間の 10 個とし、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 (a)～(f) はそれぞれ各入力振動数  $f$  における、入力加速度振幅  $|\ddot{y}_R|$ （横軸）と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。以降、簡略化のため、これら 2

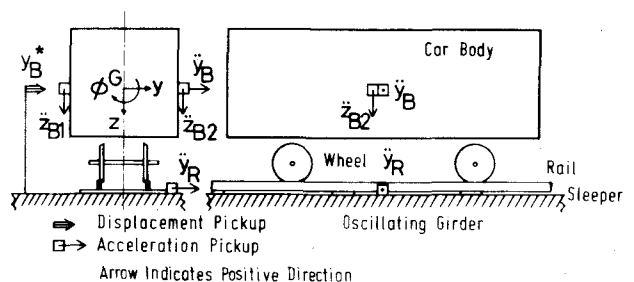


Fig.3 Schematic Diagram of Model Vehicle and Instruments

つの値をそれぞれ入力、応答と呼ぶことにする。

振動数  $f = 1.5 \text{ Hz}$  (Fig.4 (a) 参照)においては入力  $|\ddot{y}_R|$  が約  $0.2 \text{ g}$  (約  $1.96 \text{ cm/s}^2$ ) まで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。その際車輪の浮上は認められない。入力  $|\ddot{y}_R| \approx 0.2 \text{ g}$  では片輪が浮上し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  $2.0 \text{ Hz}$  の場合 (Fig. 4 (b)) は、入力  $|\ddot{y}_R|$  が約  $0.16 \text{ g}$  までは下心ローリング状態であり、車輪の浮上は認められない。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事が認められる。そして入力  $|\ddot{y}_R| \approx 0.16 \text{ g}$  で急に車輪が浮上し、これ以降車輪が左右交互に浮上す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  $22 \text{ mm}$ ) は、ロッキング開始直前の応答 (約  $5 \text{ mm}$ ) 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  $|\ddot{y}_R|$  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  $0.06 \text{ g}$  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  $8 \text{ mm}$  から約  $1 \text{ mm}$  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  $2.25 \text{ Hz}$ 、 $2.75 \text{ Hz}$  の場合 (Fig.4 (c) (d)) についてみるとそれぞれ  $2.0 \text{ Hz}$  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  $2.0 \text{ Hz}$  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

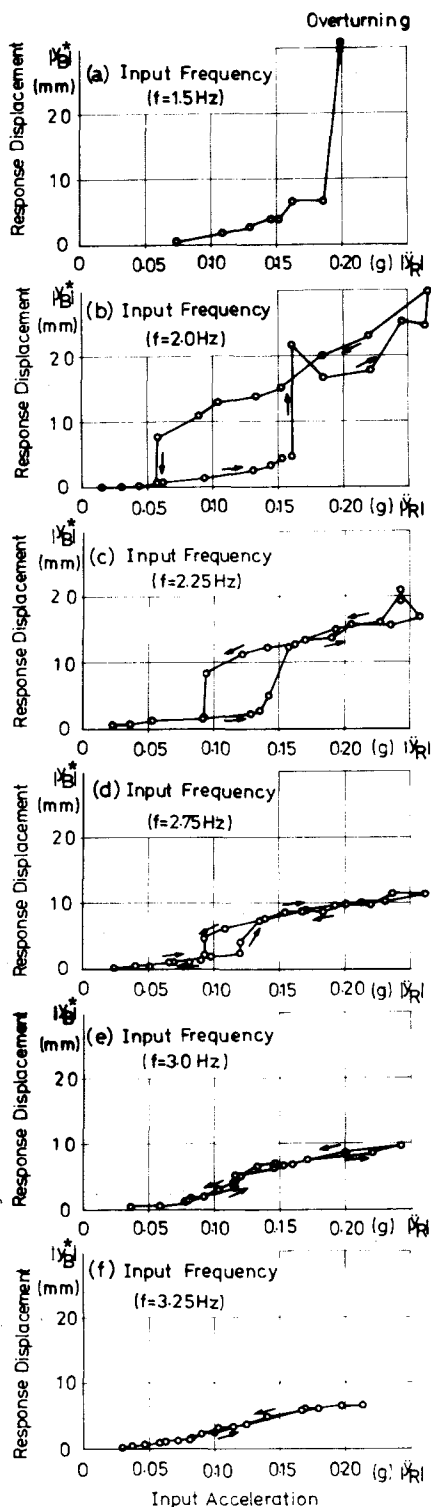


Fig.4 Relationship between Input Acceleration Amplitude and Response Displacement Amplitude of Car Body (WARA-Type Model)

の応答の差が共に小さい。

一方、入力振動数が3.0Hz以上になると、ローリング状態とロックング状態との判別が困難であり、これら2つの状態間での移行が、目視により認められない。また、Fig. 4 (e) ~ (f) 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 $\ddot{y}_R$ より波形が正弦波である事に基き算定した) 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、目視によりロックング状態である場合には●印で、ローリング状態では○印で、ロック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クング状態とでの応答倍率は、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、3Hz以下の入力振動数では、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 $y_B^* / y_R$ のに対して、ロックング状態では1.5~2.1であり、4~10倍の応答倍率の違いが認められる。

ロックング状態では、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 $f$  = 2.0Hz 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。尚、前述したように入力振動数が1.5 Hzではロックング挙動が定常とならず転覆現象が生じている。また、入力変位振幅 $y_R$ が大きい程、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ク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2~2.5Hzと3.5~4.5Hz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

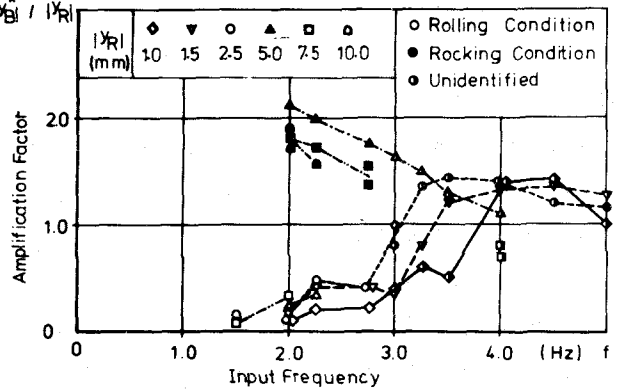


Fig.5 Relationship between Input Frequency and Displacement Amplification Factor (WARA-Type Model)

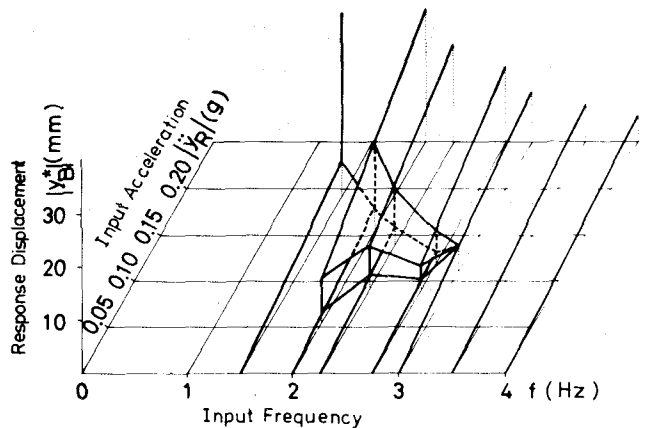


Fig.6 Relationship among Input Frequency, Input Acceleration Amplitude and Response Displacement Amplitude of Car Body (WARA-Type Model)

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。

また、本実験結果を用いて、入力振動数  $f$ 、入力加速度振幅  $|\ddot{y}_R|$ 、車体水平方向相対変位応答  $|\dot{y}_B^*|$  を3つの軸にとり、三次元的に表わしたその概略図を Fig.6 に示す。これまで述べてきたように、 $f = 1.5 \sim 2.75 \text{ Hz}$  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したがい両者とも減少し、 $f = 3.0 \text{ Hz}$  あたりでこの差は零になっていることが認められる。 $f = 3.0 \text{ Hz}$  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  $2 \sim 2.75 \text{ Hz}$  の場合に認められた、ロッキング開始また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

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、 $f = 2.0 \text{ Hz}$  (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。

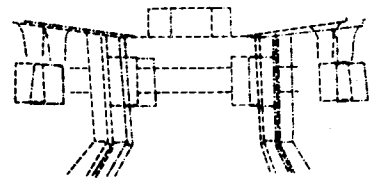
##### (1) 位相特性

まず、車体応答波形と入力波形との位相差について調べた。

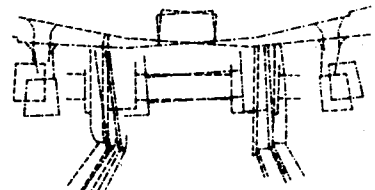
その結果、この値は、ローリング状態とロッキング状態とで大きく変化し、その変化はわずかな入力加速度振幅の変化に伴い発生する、つまりローリング状態とロッキング状態との、異なる二状態間を飛び移る現象が認められた。また、上述の入力振動数では位相差が、何れも同位相 ( $0^\circ$ ) か逆位相 ( $180^\circ$ ) に近く、各状態でのモード形を描く事が可能であることを示唆している。

##### (2) 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

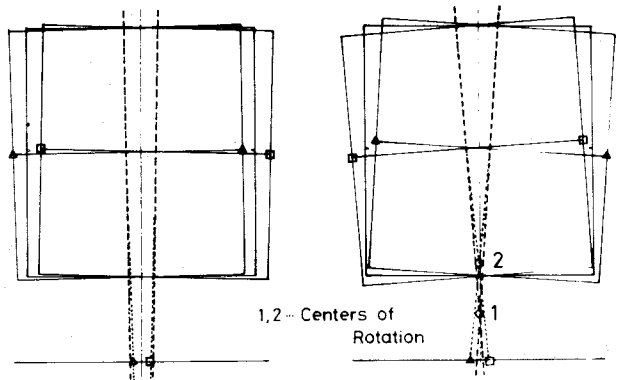


(a) Rolling Motion



(b) Rocking Motion

Fig.7 Two Different Responses of Car Body under Same Excitation (WARA-Type Model, Frequency  $f = 2 \text{ Hz}$ , Amplitude  $|\ddot{y}_R| = 0.1g$ )



(a) Rolling Motion

(b) Rocking Motion

Fig.8 Mode Shapes under Same Excitation (WARA-Type Model, Frequency  $f = 2 \text{ Hz}$ , Amplitude  $|\ddot{y}_R| = 0.1g$ )

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.7 (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  $0.1 \text{ g}$  ( $98 \text{ cm/s}^2$ ) 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、車輪に浮上が起こり、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、回転変位を読みとり、車体全体についてその挙動を表わしたものを Fig. 8 (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  $\Delta$  と  $\square$  で示し、同時刻での車体の位置を  $\Delta$  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時、車体は左へ変位している。また、上述の様に求められる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。

### (3) 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。その結果車体の応答振幅、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。従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間には大きな相違点はないものと考えられる。

## 5. 走行状態における車両のローリング、ロッキング挙動

### (1) 実験方法

横振動する直線軌道上にワラ 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

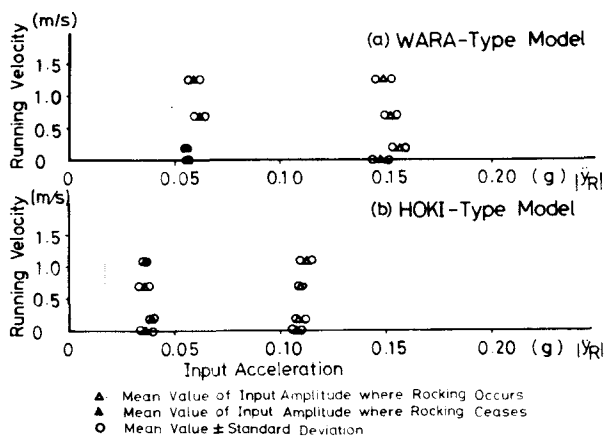


Fig.9 Input Acceleration Amplitude where Rocking Motion Occurs or Ceases as Function of Running Velocity of (a) WARA-Type or (b) HOKI-Type Model Car (Frequency  $f = 2 \text{ Hz}$ )

に認められた2.0Hz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れば一定速度になると共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、その時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、同様にしてロッキングが終了する時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0～1.1 m/sまでの4段階とし、各走行速度について10回ずつ走行させ、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.9 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。平均値を△▲で、平均値±標準偏差を○で表わしてある。(a)のワラ形車両のロッキング開始時(終了時)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(約0.06 g)であり、これらの値は走行速度にもあまり影響されない。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)と比べ顕著ではないことが認められる。

## 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、車両の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。得られた主な結論は次のとおりである。

- (1) 二軸・ボギー車両、または停止・走行状態何れにおいても、同一の外力に対しローリングとロッキング挙動との二種類の応答を示す場合があり、これらの挙動間では飛び移り現象が生じる。
- (2) 軌道の入力加速度振幅を漸次増加させた場合に車両のロッキング挙動が開始する限界振幅は、逆に振幅を減少させた場合に終了する限界振幅より大きく、入力振動数によっては2～3倍も異なる。
- (3) ロッキング脱線に及ぼす走行の影響は顕著であるのに対し、ロッキングの発生条件に及ぼす車両の走行速度の影響は少なく、この発生条件は、2次元モデルで解析しても近似的には十分である。

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の一環として行われたものであり、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)およびその走行分科会(主査:伊藤文人教授)の委員の方々にご意見、ご助言を頂いた。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)Yasoshima, Y., Y. Matsumoto and T. Nishioka: Experimental study for derailment on vibrating tracks, Proc. of JSCE, No.164, pp.71～76, 1964.
- 3)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.

# Rocking Motions of Railway Freight Cars on Vibrating Tracks

by Hideji KAWAKAMI\*  
Katsuya HASEGAWA\*\*  
Jiro TAJIMA\*  
Narioki AKIYAMA\*

Since last decade the railway bridges connecting between Honshu and Shikoku islands in Japan have been under construction, and the safety of trains running on the long-span suspension bridges during earthquakes or strong wind is considered to be an important problem.

In this study the rocking motions of railway freight cars on horizontally vibrating tracks are examined in each of standing or running conditions, and the conditions for their occurrence are determined by the experimental investigation.

The main results are summarized as follows:

- (1) Under the certain same excitation two kinds of response, rolling and rocking motions, are observed in either cases of 2 axles freight cars or 2 axles bogie freight cars, or in either cases of standing or running conditions. And the jumps between these two responses are recognized.
- (2) The amplitude of tracks where the rocking response begins and the rolling ends is larger than the amplitude where rocking response ends and the rolling begins. Each of these two cases occurs when the amplitude of tracks is increased or decreased gradually. In certain range of excitation frequencies the former amplitude is 2 to 3 times as large as the latter one.
- (3) Even though the effect of either standing or running condition on the occurrence of derailment during the rocking motion is remarkable, these effect on the occurrence of the rocking motion is not noticeable in this experiment. This result indicates that the 2-dimensional analytical model can be used to calculate the occurrence condition of the rocking motion as the first approximation.

---

\* Faculty of Engineering, Saitama University.

\*\* Taisei Corporation. (Then Senior of Saitama University.)