

(34) 振動軌道上の鉄道車両のロッキング挙動の解析

埼玉大学工学部

正会員○ 川上英二

八千代エンジニアリング 正会員 藤田義人

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。^{たじえば¹⁾}

川上・田島・秋山²⁾は昭和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と1/10の縮尺をもつ二軸車両(写真-1参照)およびボギー車両の2つの模型とを用いてロッキング・脱線・転覆等の極限状態での実験を行っており、軌道を水平方向に加振させた実験において生じるロッキング現象の挙動およびその発生条件に関して次の結論を得ている。

(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。

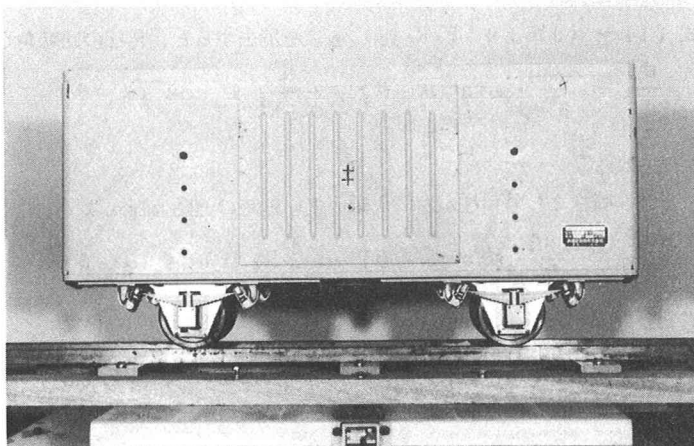


写真-1 二軸車両模型

本研究は、車両模型を第一近似として角柱で近似し、上述のロッキング現象または飛び移り現象が、角柱モデルの数値解析により、どこまで近似説明できるかを検討したものである。

2. 剛体角柱の運動方程式

剛体角柱の運動についての研究は従来数多く行われている。^{たじえば³⁾} 本研究では車両模型の挙動を角柱モデルでどの程度説明可能であることを明らかにすることが目的であるため、角柱のすべり、飛び上がり現象等を考慮に入れず最も基本的な角柱モデルに対して検討を加えた。さらに、地面の運動としては実験の場合と同様に水平振動のみとし、底面の一辺を中心として回転する場合のみを考えた。

図-1に示すように地面の水平(y方向)変位をD、重心の絶対座標を (y_g, z_g) 、反力のy, z成分をそれぞれF, Rとし、角柱の質量をMとした場合、高さH、幅Bの角柱が左側に θ 傾いている場合の運動方程式は³⁾

$$M\ddot{y}_G = F \quad \dots\dots (1)$$

$$M\ddot{z}_G = R - Mg \quad \dots\dots (2)$$

$$Mk^2\ddot{\theta} = -Ra \sin(\alpha - \theta) + Fa \cos(\alpha - \theta) \quad \dots\dots (3)$$

ただし、 g は重力加速度、 k は重心回りの回転半径であり

$$\alpha = \tan^{-1}(B/H) \quad \dots\dots (4)$$

$$a = \sqrt{H^2 + B^2} / 2 \quad \dots\dots (5)$$

である。ところが y_G, z_G は D, α, θ, a と次式の関係が成り立ち

$$y_G = a \sin(\alpha - \theta) + D \quad \dots\dots (6)$$

$$z_G = a \cos(\alpha - \theta) \quad \dots\dots (7)$$

両辺を t で 2 回微分して

$$\ddot{y}_G = -a \cos(\alpha - \theta) \ddot{\theta} - a \sin(\alpha - \theta) \dot{\theta}^2 + \ddot{D} \quad \dots\dots (8)$$

$$\ddot{z}_G = a \sin(\alpha - \theta) \ddot{\theta} - a \cos(\alpha - \theta) \dot{\theta}^2 \quad \dots\dots (9)$$

式 (1) ~ (9) より $F, R, \ddot{y}_G, \ddot{z}_G$ を消去すると、角柱の回転角 θ に関して次式

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = -\frac{ag}{a^2 + k^2} \sin(\alpha - \theta) + \frac{a}{a^2 + k^2} \ddot{D} \cos(\alpha - \theta) \quad \dots\dots (10)$$

が得られる。³⁾

また、同様にして角柱が右に θ 傾いている時の運動方程式は

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = -\frac{ag}{a^2 + k^2} \sin(\alpha - \theta) - \frac{a}{a^2 + k^2} \ddot{D} \cos(\alpha - \theta) \quad \dots\dots (11)$$

となる。

また、角柱が平面に衝突する前後の角柱の回転角速度 (それぞれ ω_0, ω'_0) の関係としては幾つかの関係式が提案されているが、ここでは最も基本的な木村・飯田³⁾による関係

$$\omega'_0 = \frac{a^2 \cos(2\alpha) k^2}{a^2 + k^2} \omega_0 \quad \dots\dots (12)$$

を用いた。この関係式は衝突前後における角柱の衝突点回りの角運動量が変化しないものと仮定して導いたものである。また、一般に

$$\omega'_0 = c \omega_0 \quad \dots\dots (13)$$

とおき、 c を変化させて解析を行った。

今回の解析に用いた角柱を図-1に示す。ただし、ワラ1形二軸車両の1/10 模型による実験結果と比較するため角柱の幅は日本標準軌間1067mmの1/10である106.7mmとし、重心高さ、質量は車両模型の場合と同じ値(それぞれ220mm, 27.5kg)とした。

入力波は、鉛直成分を零とし水平成分のみを有する正弦波 $D = \epsilon \sin(pt)$ と考え、振幅 ϵ を時間の関数として徐々に増大または減少させていくものとした。運動方程式の積分にはRunge-Kutta-Gill法を用いた。

3. 角柱の挙動の計算結果

図-2 (a) ~ (d) はそれぞれ入力振動数 $f = 1.5, 2.0, 3.0, 4.0$ Hzにおける、入力加速度振

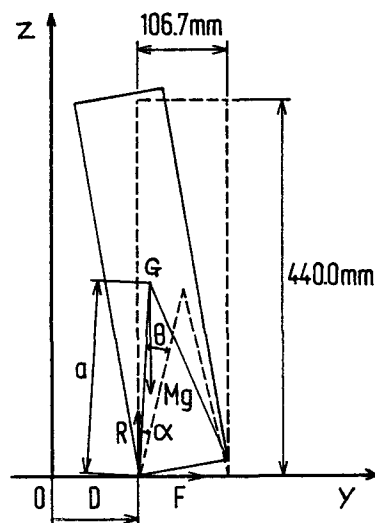


図-1 角柱モデル

幅 $|\ddot{D}|$ (横軸) と角柱重心での水平方向の地面に対する相対応答振幅 $|y_G^*|$ (縦軸) との関係を示したものである。ただし、角柱が左側に θ 傾いている場合には式 (6) と同様にして

$$y_G^* = a \sin(\alpha - \theta) - B/2$$

..... (14)

である。また、 $| |$ は振幅の大きさを表すものとする。

1.5 Hz の場合 (図-2 (a)) 入力加速度振幅 $|\ddot{D}|$ を徐々に増大させていくと $|\ddot{D}| = 0.26g$ 付近までは、静止状態であり、その後角柱底面の一辺が浮上しロッキング状態に移行しそうになるが、地面との衝突を1~2回くり返した後、定常になる前に角柱の応答が大きくなり転倒している。

一方、図-2 (b) ~ (d) に示す入力振動数 $f = 2 \sim 4 \text{ Hz}$ の場合には、同様に $0.26g$ 付近まで静止状態を続けた後、ロッキングを開始する。ロッキング開始後は 1.5 Hz の場合の様にすぐ転倒するというのではなく、非定常なロッキング状態がしばらく続き、やがて定常なロッキング状態が生じている。このロッキング状態では角柱重心の水平相対変位と入力変位との方向が反対である。また、ロッキング開始後角柱の応答は急激に大きくなっていることがわかる。次に入力加速度振幅 $|\ddot{D}|$ を漸次減少させるとロッキング状態を開始した入力加速度振幅 (約 $0.26g$) になってもロッキング状態は終了せず、かなり小さな入力加速度振幅 (2 Hz では $0.02g$ 以下) でロッキング状態が終了している。角柱の応答はロッキング状態が終了するまでほぼ線形的に減少していき、ロッキング状態が終了し静止状態に移る際には、角柱の振幅は急激に減少する。

以上の結果より、静止状態とロッキング状態と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、これら2つの状態が生じる入力、つまり、ロッキング開始時と終了時との入力加速度振幅が大きく異なることがわかり、このため図-2 (b) ~ (d) ではループを描くことがわかる。また、このループの大きさは振動数が高い程小さく、また、応答振幅そのものも小さ

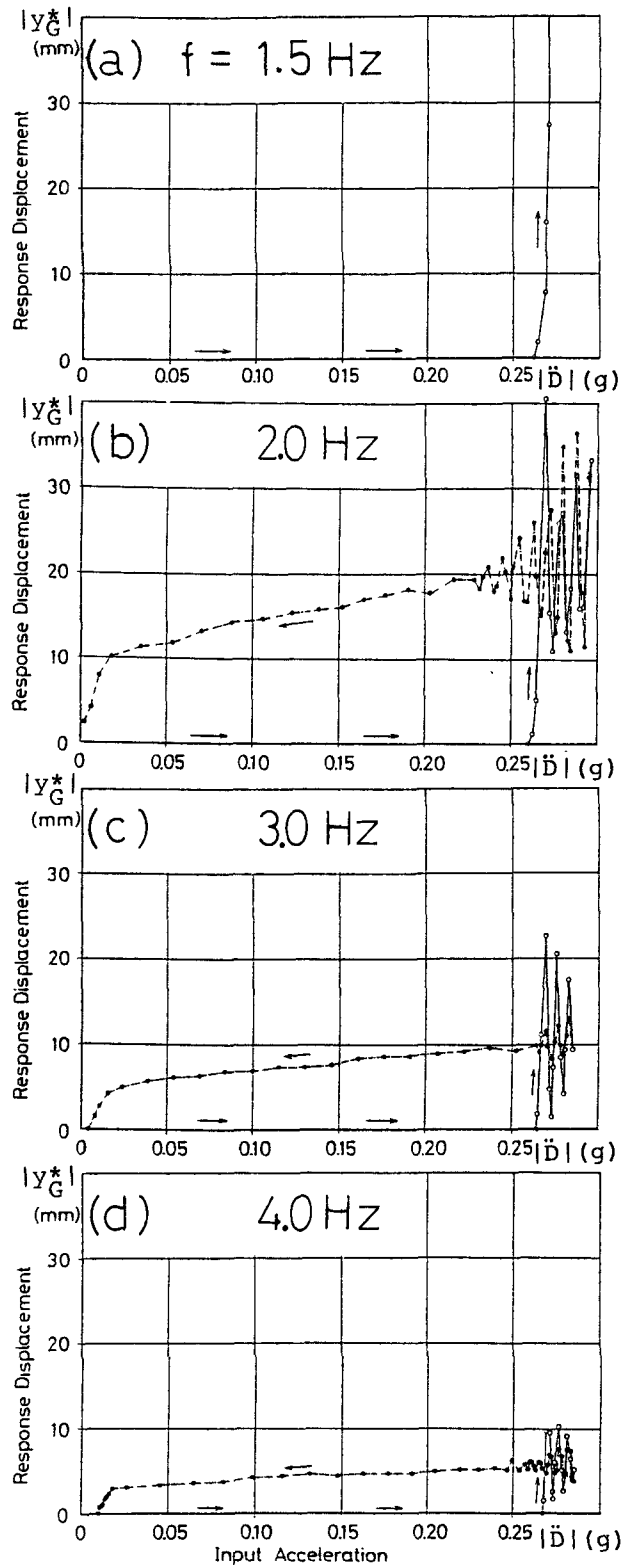


図-2 入力加速度振幅と角柱の応答振幅との関係

くなっている。

次に、角柱の回転軸が移動する場合に回転角速度が著しく減衰する場合について計算を行った。これは、車両模型実験における、車体—車軸間または車軸—レール間の減衰を想定してのものである。すなわち、式 (13) において回転軸が変わる際の角速度の変化を $c = 0.7$, 0.5 の2通りに対して計算を行った。

上述の結果を入力振動数、入力加速度振幅、応答水平変位振幅を三軸にとり、三次元的に表した概略図が図-3である。図-4に示す模型実験結果と比較すると、1.5 Hzにおける転倒または転覆、2 Hzにおける静止状態またはローリング状態とロッキング状態との間の飛び移り現象など類似点が認められる。しかし、4 Hzの計算結果では応答振幅の差は小さいものの静止状態とロッキング状態との二つの状態が認められ、ローリング状態とロッキング状態との違いが明らかでなかった実験結果と異なっている。

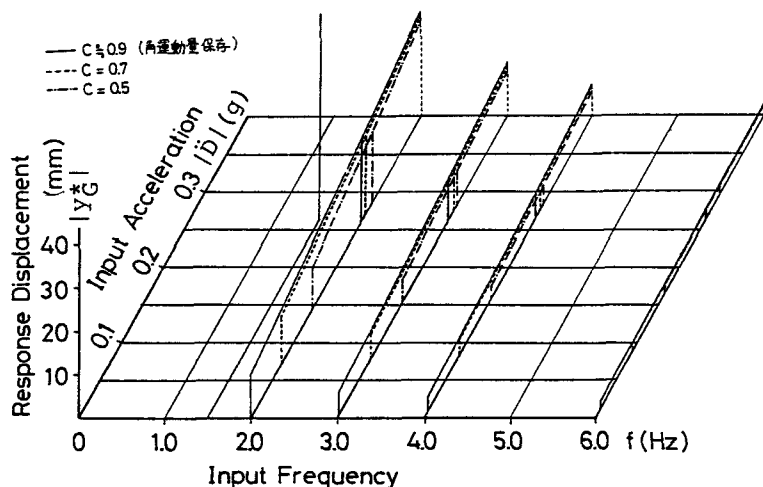


図-3 入力振動数、入力振幅、応答振幅の関係 (計算結果)

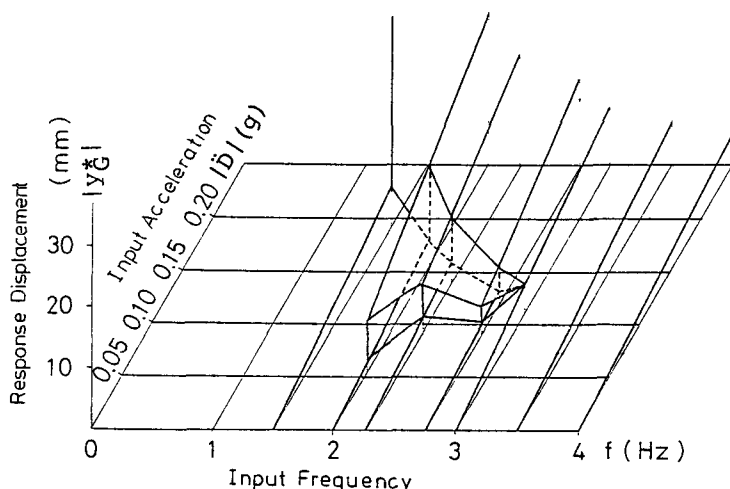


図-4 入力振動数、入力振幅、応答振幅の関係 (実験結果)

4. 結語

振動軌道上の鉄道車両のロッキング挙動についての実験結果を、車両模型の第一近似である角柱モデルの数値解析により、どこまで近似説明できるかを検討した。その結果、飛び移り現象、および二種類の限界振幅の存在については説明可能であった。しかし、相違点も認められ、さらに、現在、車両模型を車体と車軸との二剛体モデルで近似し、解析を続けている。

あとがき 本研究をまとめるにあたり、埼玉大学工学部の久保慶三郎先生、渡辺啓行先生に御助言を頂いた。また、研究の機会を与えて頂いた八十島義之助先生、田島二郎先生、秋山成興先生に深く感謝致します。

参考文献

- (1) 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.
- (2) 川上英二・田島二郎・秋山成興：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、土木学会論文報告集, No. 337, 1983 (掲載予定)。
- (3) 木村準・飯田汲事：角柱の踊りに就いて (I) (II)、地震、第6巻、1943。