

高速鉄道車両の地震時走行安全性に関する研究

○ [機] 西村 和彦 (東海旅客鉄道), [機] 曄道 佳明 (上智大学),

[機] 森村 勉 (東海旅客鉄道), [機] 深田 淳司 (東海旅客鉄道),

[機] 曾我部 潔 (上智大学)

Study on the Safety of High Speed Railway Vehicle on Excited Tracks

○Kazuhiko Nishimura(JR-Central), Yoshiaki Terumichi (Sophia University),

Tsutomu Morimura (JR-Central), Junji Fukada (JR-Central),

Kiyoshi Sogabe (Sophia University)

Recent reports imply that railway vehicles could be derailed solely by the ground motions of earthquakes. Thus, we should further study the derailment mechanism of these cases, to pursue to minimize the risk of railway system. In this paper, we study the derailment mechanism through the theoretical analyses based on our original vehicle dynamics simulation and the results from 1/10 scale vehicle/roller rig experiment. Through the analyses and experimental observations, we obtained the following outcomes. (1) Derailing processes are two types; one is rocking derailment and the other is sliding derailment. Interestingly, similar derailment motions are observed regardless of vehicle speed. (2) The excitation amplitudes for derailment decrease according to the increase of vehicle speed particularly by low frequency excitations. (3) The excitation amplitudes for wheel lift of flange height are relatively independent of vehicle speed.

キーワード：鉄道，地震，地震動，脱線，車両運動シミュレーション，実験

Key Words：Railway, Earthquake, Seismic Motion, Derailment, Vehicle Dynamics Simulation, Experiment

1. はじめに

近年発生した兵庫県南部地震では走行中の列車の脱線，停車中の列車の脱線あるいは転倒などの被害が発生した．被災した列車のなかには強い地震の揺れが直接の原因となり脱線・転倒したものとされている⁽¹⁾．新潟県中越地震では速度約 200km/h で走行中の新幹線が初めて脱線するという事象が発生した．この脱線は軌道の損壊によるものではなく地震動による横揺れが原因と結論づけられている⁽²⁾．地震動を受けた鉄道車両の脱線事象に対して，大きな損壊のない軌道上を走行中の列車が地震の横揺れにより脱線した事実を踏まえ，技術的検討を深める必要がある．

2. 走行安全性のシミュレーションによる分析

2.1 シミュレーションモデル

(1) 車両モデル

車両に軌道と直交する正弦波状の水平方向変位を地盤から入力した場合の車両の運動をシミュレーション⁽³⁾により求める．計算に用いる車両モデルは，図 1 に示すとおり 9 自由度半車両モデルとし，輪軸，台車および車体の運動は左右・上下・ローリング運動の各 3 自由度とする．二輪軸の運動はそれぞれ独立ではないものとする．車両の運動方程式は式(1)，(2)および(3)

で表されるものとする．

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{e}} = \mathbf{F} \quad (1)$$

$$\mathbf{e} = (y_b, y_t, y_{w1}, y_{w2}, z_b, z_t, z_{w1}, z_{w2}, \theta_b, \theta_t, \theta_{w1}, \theta_{w2}) \quad (2)$$

$$\text{ただし, } (y_{w1}, z_{w1}, \theta_{w1}) = (y_{w2}, z_{w2}, \theta_{w2}) \quad (3)$$

ここで， $\mathbf{M}$ ， $\mathbf{F}$ および $\mathbf{e}$ は，それぞれ車両の質量マトリックス，車両に働く外力とモーメントマトリクス，および車両の変位，回転ベクトルを指す．

y_b	車体左右変位(m)
y_t	台車左右変位(m)
y_{wi}	輪軸左右変位(m) $i=1,2$
z_b	車体上下変位(m)
z_t	台車上下変位(m)
z_{wi}	輪軸上下変位(m) $i=1,2$
θ_b	車体ロール角変位(rad)
θ_t	台車ロール角変位(rad)
θ_{wi}	輪軸ロール角変位(rad) $i=1,2$

(2) 軌道モデル

軌道は図 2 に示すとおりレールをモデル化する．左右 2 本のレールが地盤との間で上下・左右方向にばねおよびダンパ要素で支持され，上下・左右方向の運動として合計 4 自由度を与える．車輪・レールの接触は 1 点接触と仮定する．車輪がレールから浮き上がる場合も考慮し，車輪の浮上は幾何学的な位置関係から判別する．車輪とレールとが接触する場合，車輪・レール

ルの左右相対変位を指標に、車輪・レールの接触角、接触半径、接触点間距離を数表から与える。

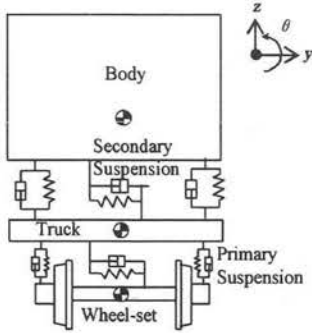


図 1 車両モデル

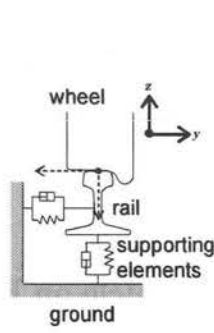


図 2 軌道モデル

2.2 入力条件と脱線の判定基準

シミュレーションに使用する計算諸元は代表的な高速鉄道車両の諸元等を基本とする⁽³⁾。入力波は地震を模擬した軌道と直行する水平方向の変位として、レール下部の地盤部分に与える。波形は図 3 に示す正弦波状とし、始点に緩和曲線を挿入し、3 波の定常部分を有し、終点にかけては漸減する形状とする。入力波の加振周波数は 0.5Hz から 2.0Hz までとする。

脱線の判定は、車輪がレールに対してフランジ高さに相当する 30mm 以上上昇し、かつレールに対して左右方向に 70mm 以上移動する状態と定義する。

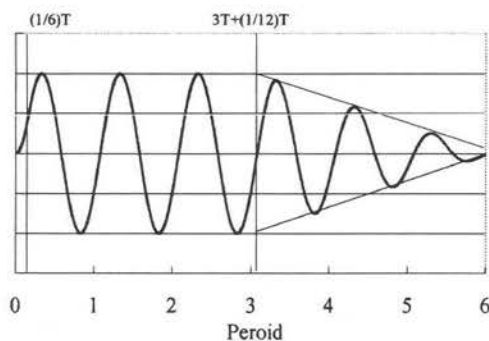


図 3 入力波の形状

2.3 シミュレーション計算結果と分析

(1) 脱線の限界と挙動

脱線するときの加振変位振幅（以下、脱線限界と呼ぶ）について、車両の走行速度が 300km/h の場合を例として図 4 に示す。計算は入力波の変位振幅が ±0.4m あるいは加速度振幅が ±1500gal を超えない範囲で行う。実線より下の振幅領域(a)では車両は脱線せず、実線より上の振幅領域で脱線する。脱線の形態は二種類みられ、斜線部分の領域(b)では脱線側の車輪がレールに衝突し滑り上がる形態（これを滑り上がり脱線と呼ぶ）をとり、実線より上でかつ(b)を除く領域(c)では車両のロッキング運動の過程で、車輪がレール頭頂面を超えて外軌側へ移動し脱線する形態（これらをロッキング脱線と呼ぶ）をとる。図 4 に示された領域の面積の大きさから判断すると、ロッキング脱線が主

体である。脱線形態に対しては、車両の走行速度の影響はあまりみられない。

脱線限界に対する走行速度の影響について図 5 に示す。走行速度の影響に関して、脱線限界は一般に速度の増加とともに低下し、高い速度域では下げ止まる傾向がみられる。脱線の限界振幅の低下は、0.6, 0.8Hz などの比較的低い加振周波数で顕著で、1.5Hz といった高い加振周波数ではみられない。

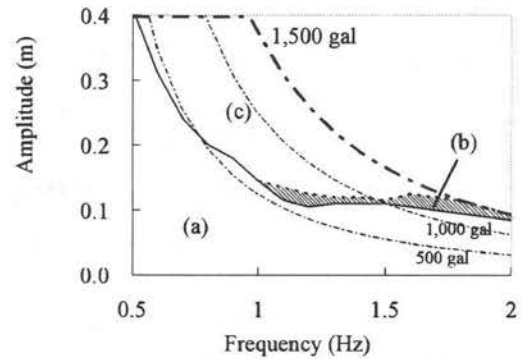


図 4 脱線限界（走行速度 300km/h）

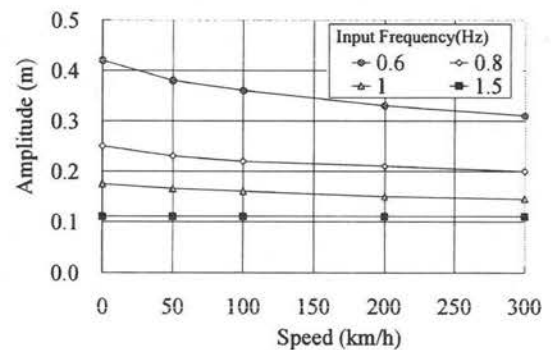


図 5 走行速度に対する脱線限界

次に脱線挙動に関して、速度 100km/h で走行した場合を例に、加振変位、車輪の上下および左右変位の時刻歴波形を図 6, 7 に示す。ロッキング脱線の場合、図 6 に示すように、車両は加振を受けると左右の車輪が交互に大きく上昇し、2.4sec 手前で車輪 2 がフランジでレール頭頂面に落下し、外軌方向へ移動して脱線に至る。滑り上がり脱線の場合、図 7 に示すように、車輪 1 が 1.3sec を超えたところでレールに横衝突し、レール上を滑り上がりながら移動し 1.4sec を越えたところで脱線する。

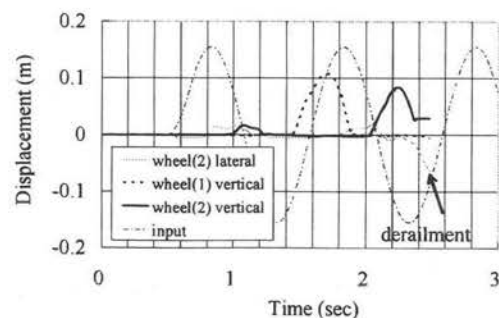


図 6 ロッキング脱線挙動（入力 1.0Hz±160mm）

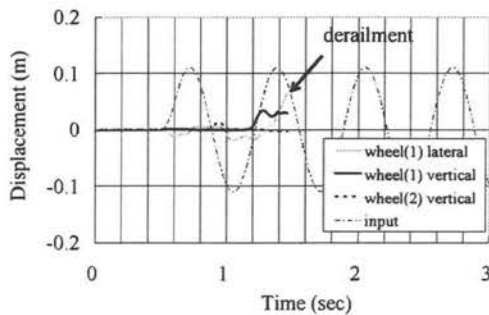


図 7 滑り上がり脱線挙動 (入力 1.5Hz±110mm)

(2) 車輪フランジ高さ上昇の限界

車輪が交互に高く上昇するのは地震時の車両のロッキング運動に特有の現象である。加振周波数に対する車輪がフランジ高さ上昇するときの加振変位振幅（以下、車輪フランジ高さ上昇限界と呼ぶ）を図 8 に示す。車両が走行している場合（速度 300km/h）も停止している場合も、車輪フランジ高さ上昇限界は減少傾向のなかで 1.0Hz 付近に極小値、1.3Hz 付近に極大値をもつ。これは車体のロール運動と連成して車輪の上昇運動が起こっているため、走行速度の影響はあまりみられない。

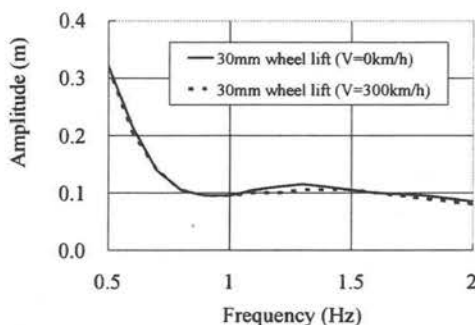


図 8 車輪フランジ高さ上昇限界

3. 走行安全性の 1/10 模型実験による検証

3.1 1/10 模型実験装置の概要

模型実験装置は 1/10 スケールの模型車両、軌条輪装置、加振装置および測定センサで構成される。

1/10 模型車両は、新幹線車両の半車体相当の荷重枠、荷重枠支持ばね、1 台車、軸箱支持部、2 輪軸および荷重枠のピッチングおよびヨーイングを防止する治具で構成する。基本的な寸法について実物の新幹線電車の 1/10 スケールとなるように設定し、物理的諸特性について、できるだけ実物の新幹線車両と 1/10 スケールで物理的に相似な関係となるように設定する。

軌条輪装置は軌条輪、模型車両の前後方向の運動を拘束する固定装置およびモータで構成される。実物換算で走行速度 327km/h まで実験可能とする。軌条輪の軌間は新幹線の 1/10 スケールの 143.5mm とする。

模型車両、軌条輪装置、油圧アクチュエータおよび

測定センサ（一部）の構成写真を図 9 に示す。油圧アクチュエータは軌条輪装置の側板中央部に取り付き、模型車両・軌条輪装置の全体を水平方向に加振する。加振能力は周波数 1.6Hz で変位振幅±50mm（加速度振幅±515gal）、8.0Hz で変位振幅±10mm（加速度振幅±2,576gal）とする。

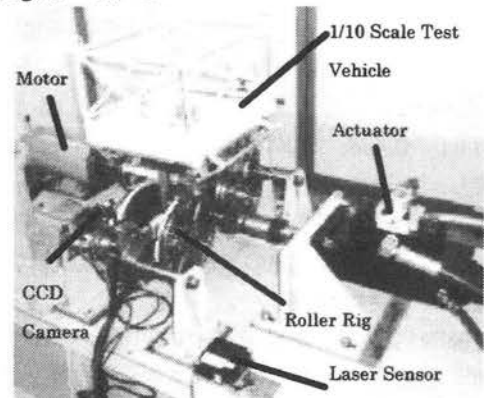


図 9 1/10 模型実験装置

3.2 入力条件と脱線の基準

加振入力は水平方向の正弦波状で、変位振幅として軌条輪部分に与える。入力波の周波数は 1.6Hz（実物換算で 0.5Hz）から 5.7Hz（実物換算で 1.8Hz）まで約 0.3Hz（実物換算で 0.1Hz）刻みで変化させる。形状は、図 10 に示す正弦波状で、最初の 0.5 周期に緩和部分を設け、3 周期の定常部分を有し、最後の 1.5 周期にも緩和部分を設ける。加速度振幅で 1,000gal あるいは変位振幅で 20mm を超える大きな加振を行う。

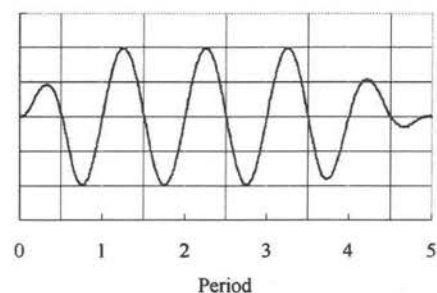


図 10 入力波の形状

車両各部の挙動について、レーザ変位計により測定する。測定対象としては、軌条輪に対する荷重枠の上下変位 2 点・左右変位 1 点、台車の上下変位 2 点・左右変位 1 点、輪軸の上下変位 2 点・左右変位 1 点および軌条輪の左右変位 1 点とする。脱線の判定は、車輪がレールに対してフランジ高さ相当の 3mm 以上上昇し、かつレールに対して左右方向に 2mm 以上移動する状態と定義する。この状態では、車輪フランジは肩部を超えたフラットな頭頂面でレールと接触するか浮上している。

3.3 模型実験結果と分析

(1) 脱線の挙動

車両の脱線挙動はロッキング脱線と滑り上がり脱線の二種類がみられた。脱線挙動について、速度 32km/h (実物換算で 100km/h) で走行した場合を例に、加振変位、車輪の上下および左右変位の時刻歴波形を図 11, 12 に示す。ロッキング脱線の場合、図 11 に示すとおり、0.6sec を超えたところで車輪 1 がフランジでレール頭頂面に落下し、軌道外側へそのまま移動して脱線に至る。滑り上がり脱線の場合、図 12 に示すとおり、0.4sec で車輪 2 が落下しながらレールに横衝突し、レール上を滑り上がりながら移動し 0.45sec 付近で脱線する。これらはそれぞれ、2.3 節のシミュレーション結果と脱線のタイミング、脱線時の挙動が定性的に一致している。

脱線限界に対する走行速度の影響については図 13 に示すとおり、速度の増加とともに低下し、高速度域では下げ止まる。2.3 節のシミュレーション結果と同様に、脱線限界の低下は、2.2Hz (実物換算で 0.7Hz)、2.8Hz (実物換算で 0.9Hz) といった比較的低い加振周波数で顕著で、4.7Hz (実物換算で 1.5Hz) といった比較的高い加振周波数ではあまりみられない。

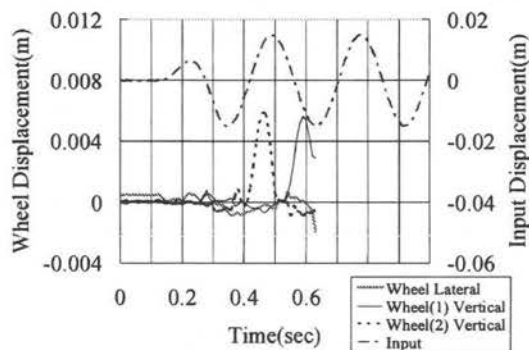


図 11 時刻歴波形(入力 3.5Hz±15mm 速度 32km/h)

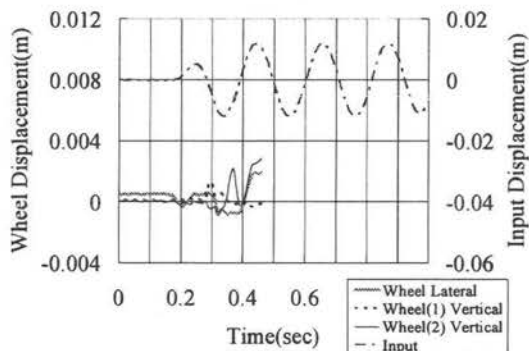


図 12 時刻歴波形(入力 4.7Hz±12mm 速度 32km/h)

(2) 車輪フランジ高さ上昇の限界

車輪が上昇する運動に対する走行速度の影響に関して図 14 を示す。走行速度に関係なく、加振周波数に対して車輪フランジ高さ上昇限界はほぼ同じであり、減少傾向のなかで 3.0Hz (実物換算 0.9Hz) 付近に極小値、4.0Hz (実物換算 1.3Hz) 付近に極大値をもつ。脱線の挙動同様にロッキング挙動に関しても、2.3 節

のシミュレーション結果と傾向が一致している。

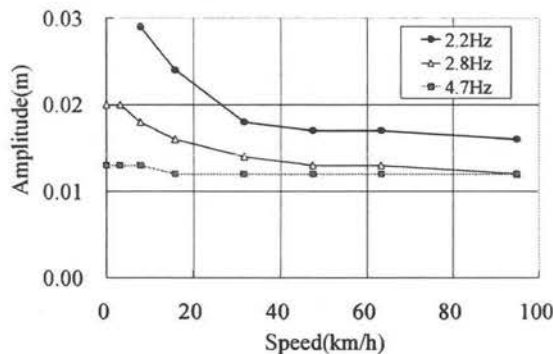


図 13 走行速度に対する脱線限界

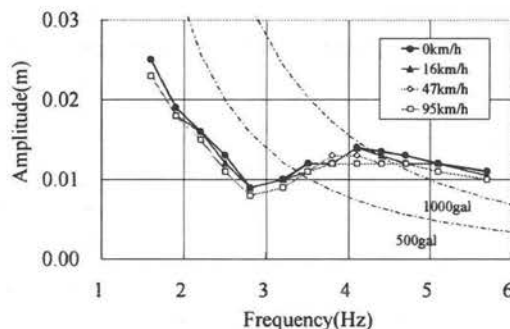


図 14 車輪フランジ高さ上昇限界

5. 結論

地震時の車両挙動に関して、シミュレーション解析および模型実験を行い、これらから定性的に合致する以下の結論を得た。

(1) 大きな加振を受けた車両の脱線挙動としてはロッキング脱線が主体である。脱線挙動に対して、走行速度の影響はあまりみられない。

(2) 脱線の限界振幅は、特に低周波数の加振で、速度の増加とともに低下し、高速域で下げ止まる傾向がみられる。

(3) 車両のロッキング運動の特徴である車輪上昇に関して走行速度の影響は小さい。

参考文献

- (1) Nagase, K., Kondo, K. and Nomura, T., 1997, "Train Damaged by the Quake in kobe", Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol. C-63-606, pp 300-307
- (2) Aircraft and Railway Accidents Investigation Commission, 2007, "The Report of the Investigation on the Derailment Accident at Jyoutetsu Shinkansen of JR East", pp1-56
- (3) Nishimura, K., Terumichi, Y., Morimura, T. and Sogabe, K., 2008, "Analytical Study on the Safety of High Speed Railway Vehicle by Track Excitations on Earthquakes", Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol. C-74-744, pp 93-100