

1203 鉄道車両の耐震脱線防止システムのシミュレーション解析

学○伊藤 有希 (早大)

正[機] 山川 宏 (早大)

正[信] 稲宮 健一 (シニア鉄道安全研究会)

A simulation analysis on a quakeproof derailment prevention system of a railroad carriage

Yuki ITO (Waseda Univ.) 3-4-1, Ohkubo, Shinjuku-ku, Tokyo, 169-8555

Hiroshi YAMAKAWA (Waseda Univ.) Kenichi INAMIYA (Senior Railroad Safety Study Group)

It is a big issue to prevent a disaster caused by an earthquake while a train is running. At present, the seismometer network distributed over all Japan can generate the warning signal based on P(Primary)wave detection, after that, immediately a stop command to the running trains will be activated to prevent a derailment by S(Secondary)wave. However, when the time period between P wave and S wave arrivals is short, such as a case of the quake origin located under a vicinity of the high populated area, this method is not sufficient. In order to prevent the derailment of running trains just after the detection of P wave, we are proposing a new concept to install an auxiliary mechanism on a wheel frame which has an actuator holding an auxiliary wheel or a bar. The actuator of the mechanism will work to prevent the derailment after P wave warning generation while the train is running. A study of the auxiliary wheel type had been conducted and reported, and the bar type actuator has been studied in this time. A simulation model of a train carriage in a computer is developed initially and the dynamic characteristic of the model is verified through comparison with the existing carriage model data. Then, the developed model include the proposed bar type actuator is examined by vibration signals and we obtain that the bar type case provides a significant result to improve the safety criterion.

Keywords: Derailment, Derailment prevention, Derailment prevention of railroad carriage, Earthquake, Earthquake disaster

1. はじめに

鉄道車両が走行中に地震に襲われたとき、脱線することがあり得る。現在これに対抗する措置として、地震発生時に検出されたP波を基にした警報に従って、列車を停止させる方法が講じられている。車両をまず停車させることが減災上極めて重要であることによる。しかし、例えば直下型や、震源が浅い場合、P波とS波の到着時間間隔が短く、停車以前にS波に襲われると脱線を引き起こすことがある。走行状態で車両が脱線すると、車両は進行方向に大きな運動エネルギーを持っているので、脱線は車両を線路域から逸脱させ、場合によっては他の列車に衝突するなどの重大な二次災害へと拡大することもある。このような災害を予防するため、車両が停車するまで、脱線させない措置を講ずることが安全確保のために必須の条件である。

この研究では、P波の警報が発生した直後に台車に取り付けた耐震脱線防止システムに係る構造物からアクチュエータを作動させ、走行中の脱線を防止して、減災に寄与することを目的としている。

アクチュエータとして、補助輪を使用した研究はすでに報告しているが、今回ラッチ型の検討を進めたので報告する。⁽¹⁾

2. 動作原理

鉄道車両の車輪は自動車と異なり、曲線走行のための専用の機

構を持たない。その代わりに、車輪のフランジに60度程の角度を持たせて、巧みに曲線を走行させている。しかし、このフランジ角は横方向の振動を受けたとき、乗り上がり現象を生じやすくする。中村等⁽³⁾は車輪のフランジ角、フランジ長と脱線の関係を実車の1/8モデルを使用して研究して、フランジ角を大きくしたり、フランジ長を長くしたりすることにより脱線に対する走行安全限界値を改善できると報告している。

しかし、実用面から見て、車輪は規格に従って鍛造で造られているので、この研究で提案しているように地震時に車輪のフランジの形状を容易に変えることはできない。したがって、筆者等は車輪の形状を変更することなく、台車に耐震脱線防止システム⁽²⁾の構想に基づいた構造物を取り付け、等価的にこの原理を実現する方法を提案している。

フランジ角が垂直で、かつ長い状態を等価的に創りだすため、構造物の主要機能である補助輪や、棒状のラッチ型のアクチュエータを地震時にレールの頭部に展伸させ脱線を防止する。

この構造物を台車に付加すること、およびアクチュエータを作動させることにより、現在の台車、およびレールの近傍の今まで何もなかった領域に、この構造物が新たに占有する領域が生ずるが、そのために車両の走行に障害が生ずることは許されない。

そこで、システムの主要要素であるアクチュエータが活用できる自由空間として、フランジが通過する領域と、その領域より少

し下部のレールの頭部の付近の領域を活用することにした。レールにはポイント、継ぎ目板や、踏切板などの付加物があるが、アクチュエータを作動させ、この領域に展伸させても、これらの付加物として作動しているアクチュエータのクリアランスで問題になることはない。

この構造体は台車に取り付けられ、P波受信直後に、このフランジの下部にアクチュエータが展伸して、脱線防止の機能を果たす。アクチュエータとして、補助輪を使った研究は発表済みである。⁽¹⁾今回はラッチ型の研究を実施したので、以下ラッチ型に関して述べる。

Fig.1 は耐震脱線防止システムの主要機能であるアクチュエータとレールとの位置関係を示した概念図である。

Fig.1 は視点を進行方向正面からアクチュエータとレールの部分に焦点を当てた図である。右側のレール(斜線部分)とレールの頭部の左側付近のアクチュエータの位置関係を示した。Fig.1 (a)は通常の走行状態において、ラッチ型アクチュエータがレールの頭部より高い位置の格納状態にあることを示す。この状態は通常の走行に何ら影響を与えることはない。

Fig.1 (b)はP波検出後、地震警報を受けて、ラッチが台車に取り付けられたアクチュエータ・ホルダから下降して、レールの頭部に位置することを示す。車両は地震の揺れに応じて位置が変動するが、台車に取り付けられた加速度計などのセンサ入力に基づいた位置情報に応じて、ラッチが台車の変動分 Δ に応じて上下に運動して、常にレールの頭部に位置するように自動的に制御されている状態を示す。

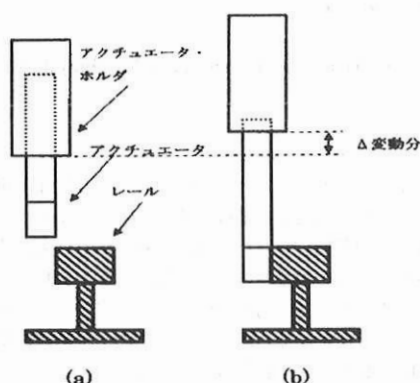


Fig.1 システム概念図

ラッチが下降して常にレールの頭部に位置することにより、文献⁽³⁾で示されている垂直なフランジ角と長いフランジ長の状態を実現できる。このシステムの全体は文献(2)に詳しく記載されている。

この研究では地震が発生したとき、ラッチ型アクチュエータがFig.1 (b)の状態になることを想定して、その時の車両の振る舞いをシミュレーションで解析した。

3. 研究の経緯

この研究の初期では1/8台車ハードウェア・モデルと、それに適合した補助輪型アクチュエータを試作して、振動台を用いて地震波を想定した振動試験を実施し、同時にこの構成のシミュレーション・モデルを使って耐震脱線防止の解析作業を行い、検討を

行った。⁽¹⁾

Fig.2 は補助輪型アクチュエータを使用した研究で用いたハードウェア・モデルの構成図を示す。通常の走行時、補助輪は上部にあって、地震発生時は圧搾空気によって、補助輪をレールに押しつける構成である。補助輪を作動させた場合と、させない場合の両者を想定して、振動台を使って模擬実験を行った。

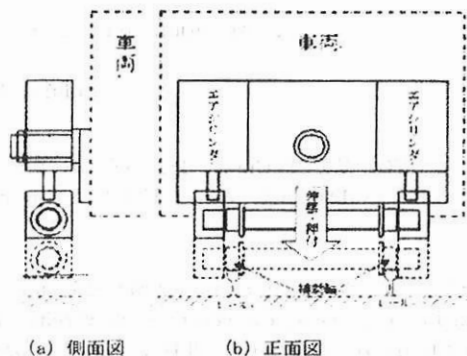


Fig.2 補助輪型アクチュエータ実験モデル

今回は脱線防止装置として棒状のラッチ型を対象に検討した。

4. 研究方法

4.1 研究の流れ

車両の複雑な挙動を解析するため、汎用機構解析ソフトADAMS2011を用い、旧国鉄103系の車両をバネ・マス系で表現した解析用の車両モデルを開発した。最初にこのモデルの力学的な妥当性を検証するため、シミュレーションによりこのモデルの震動特性を取得し、他の文献で示されている車両の振動特性と比較してその妥当性を確認した。その後、このモデルに耐震脱線防止システムのアクチュエータを車体に取り付けた状態で、同様なシミュレーションにて振動試験を行い提案している耐震脱線防止システムの有用性を検討した。

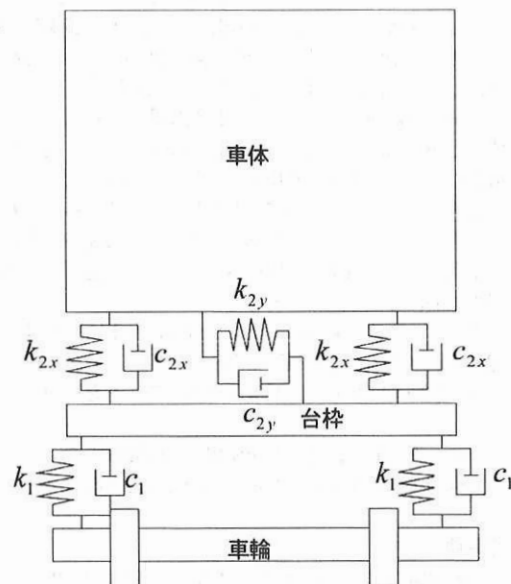


Fig.3 車両の解析モデル

Fig.3 に開発した車両の解析モデルを示す。この解析モデルで
使用した車両の主要な諸元は Table 1 に示す。

Table 1 車両諸元値 1

記号	値	単位
k1	1090	kN/m
k2 _x	1720	kN/m
k2 _y	539	kN/m
c1	19.6	kN s/m
c2 _x	82.1	kN s/m
c2 _y	117.6	kN s/m

Table 1 車両諸元値 2

名称	値	単位
車両総重量	37300	kg
車両	24300	
台車 (×2)	6500	
車両長	19500	mm
車両幅	2800	mm
台車幅	2300	mm
軸距	2300	mm
車輪径	910	mm
軌間 (レール間距離)	1067	mm

4. 2 ラッチ構造物

このシステムではラッチ型アクチュエータは地震時に Fig.1 (b)
で示す位置に展伸し、台車の揺れに対抗してラッチの先端が常に
レールの頭部に位置するように展伸の長さが制御される。しかし、
このシミュレーション作業では、解析の初期的な段階として、位
置制御を持たないラッチ構造物を車体に付加した。

ラッチ型アクチュエータの形状並び寸法は Fig.4 に示す。こ
の図は車体の正面から見た形状である。πの字型の両先端がアク
チュエータのラッチで、車輪のフランジが通過する部分に挿入さ
れる。背に相当する平らな部分で車体に取り付けられる。

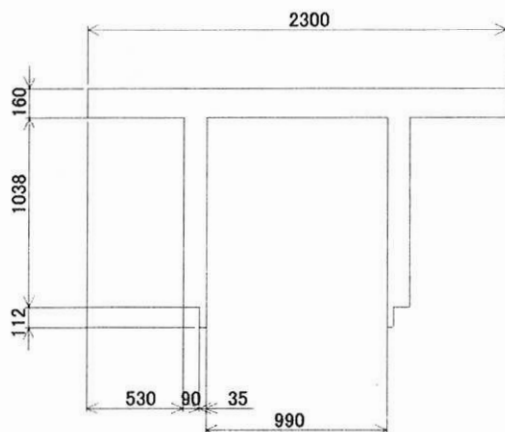


Fig.4 ラッチ構造物の構成

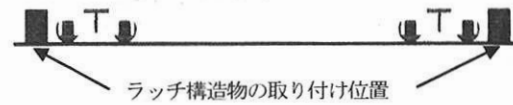


Fig.5 ラッチ構造物の取り付け

Fig.5 にラッチ構造物を車体に取り付けた様子を示す。図は車体
を横から見た構図で、車体の前後に Fig.4 で示すラッチ構造物が
取り付けられている。

4. 3 加振条件

進行方向に垂直な水平面に正弦波を加えて加振する。正弦波は
0.5Hz から 3.0Hz までの 0.5Hz 刻みで加振する。加振データの取
得方法は、ある周波数で振幅を徐々に増加させ、脱線に達する限
界値を取得した。この時、車両の応答を検出するため、車輪とレ
ールの接点をモニター点として観察した。

また、脱線はレールを除く地表面に力が及んだとき発生したと
定義した。

5 解析結果

5. 1 開発モデルの妥当性

開発した車両モデルを加振して得られた安全限界値と、既に文
献⁽⁴⁾で示されている値をプロットした。その結果、両者を比較
すると、各周波数において両者の安全限界値が近い値を示してい
る。この曲線の近似度から見て、開発した車両モデルの振動特性
は妥当であることが示された。

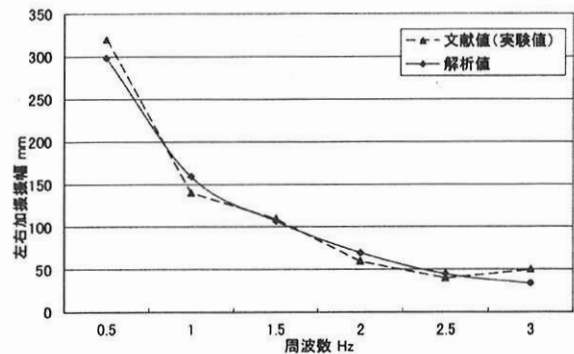


Fig.6 安全限界値の比較

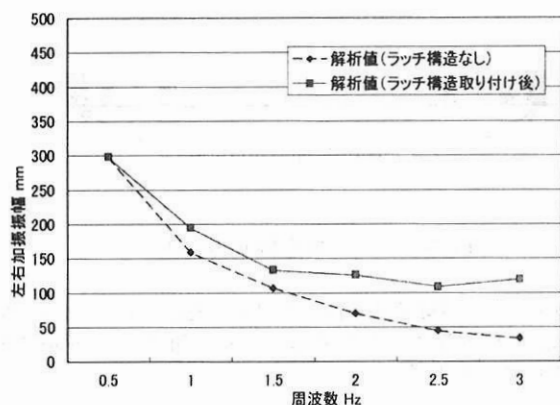


Fig.7 安全限界値 2

5. 2 ラッチ構造物を付加した時の安全限界値

車両にラッチ構造物を付加して、Fig. 6 と同様な加振を行い安全限界値のデータを取得した。

Fig.7 にラッチ構造物を付加したとき、通常の状態の時の安全限界値をプロットした。両者を比較すると、明らかに改善されていることが示されている。

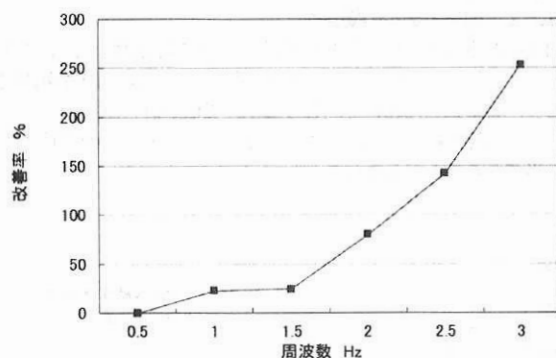


Fig.8 安全限界値の改善率

Fig.7の安全限界値の両者の値を改善率(%)で表したのがFig.8である。

6. 考察

Fig. 8 よりラッチ構造物を付加したとき、安全限界値を大きく改善できることが確認された。しかしながら、低周波領域では改善率が低く、特に 0.5Hz ではラッチ構造物を取りつけた効果が得られなかった。

これは下心ロールの現象で車両が振動したときは車両の回転中心が下方にあり、左右の車輪が交互に浮き上がる現象である。下心ロールは 0.8Hz 以下の振動のとき発生する。したがって、下心ロールが起きた時、このシミュレーションの構造のラッチは有効に作用しない。

これに対して、周波数を徐々に上げていくと、車両の振動に上

心ロールの振動が現れ、レールと車輪が激しく衝突する振動が発生する。このような現象では車輪が飛びあがる脱線が発生するので、ラッチがそれを防ぐ役割を果たし、安全限界値を大きく改善できる。

7. まとめ

今回の研究と、今後の検討課題を以下にまとめる。

- (1) 今回の研究は、提案している耐震脱線防止システムのうち、補助輪型アクチュエータを使った方法はすでに研究を実施したので、他の方法である棒状のアクチュエータであるラッチ型の検討を行った。
- (2) ラッチ型アクチュエータはFig.5に示されるように車体に取り付けた状態で振動試験を行った。
- (3) 振動の周波数は 0.5Hz から 3.0Hz まで 0.5Hz の刻みで正弦波を使用した。
- (4) 上記の条件の下、ラッチ型アクチュエータによる安全限界値の改善が確認できた。

今後の課題は以下の通り。

- (5) ラッチ型アクチュエータの本来の動作環境を実現したモデルの開発と、その動作の確認が必要である。即ち、ラッチの取り付け位置を台車とし、台車の動揺に抗して、ラッチが常にレールの頭部の留まるように制御する機能を持つモデルの開発を行う。
- (6) 実用に供するための特性を確認するため、走行状態の車両、車両が連結した列車の状態のシミュレーションの実行。
- (7) 振動源として、実際の地震の波形、強度で振動試験を実施する。
- (8) 補助輪型アクチュエータを使用したとき、低い周波数領域でも安全限界値の改善が見られた、ラッチ型、補助輪型の特徴をさらに吟味する必要がある。
- (9) ラッチ構造物で必ず脱線を防げると言えないため、脱線時の安全性の確保が必要である。

参考文献

- (1) 河合紘幸, 他 5 名, 鉄道車両の耐震脱線防止システムの研究, J-RAIL2008, 100-S7, pp.387-390.
- (2) 特許 4986108 号, 展伸機を用いた耐震脱線防止システム.
- (3) 中村行秀, 他 2 名, 鉄道車両の地震に対する走行安全性の研究, J-RAIL04, S7-3-4, pp.535-538.
- (4) 仁杉 巖他, 巨大地震と高速鉄道, p.260, 山海堂, ISBN4-381-01824-9.