

震動変位に対する列車走行性の簡便な照査手法

羅 休¹・西村昭彦²

¹正会員 工博 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-0034 東京都国分寺市光町 2-8-38)

²正会員 工博 (株)テス 土木事業部 (〒186-0002 東京都国立市東 1-4-15)

地震による震動変位は列車の走行に大きい影響を与え、その影響を受けた車両が脱線・転覆に至るような大変位を生じる危険性がある。このような車両運動の特性を反映できる厳密な力学モデルに基づいた計算機シミュレーションの手法が既に開発されているが、多数のパラメータと高度な数値解析技術が要求されるため、設計の実務に適用し難い問題がある。そこで、本研究は簡単な力学モデルによる車両の脱線・転覆の特徴を分析したうえで、エネルギー的な照査指標 SI (スペクトル強度) を耐震設計上用いることが適切であることを確かめた。また、厳密なシミュレーション結果をベースに新幹線と在来線の走行安全限界スペクトル強度 SI_L を作成し、簡易な照査法を開発した。

Key Words : Seismic design, Seismic displacement, Vehicle running safety, Spectral intensity

1 はじめに

鉄道構造物の耐震設計を行う際に、構造物の震動変位に対する列車の走行性を照査する必要がある。通常、構造物に作用する水平方向の慣性力による軌道面の変位は、折れ角・目違いと震動変位の2種類がある。前者について、構造物の最大変位から換算した軌道面の折れ角・目違いの量は設計標準に定めた制限値を超えないように照査する方法が既に確立されているが、後者の震動変位に対して詳細な計算機による列車の走行シミュレーションが可能であるが¹⁾²⁾、多数のパラメータと高度な数値解析技術が要求されるため、設計実務に適用し難い問題がある。

本研究では、この問題を解決するために、地震の際に車両が脱線・転覆に至るような大変位を生じたときの特徴を分析することによって、エネルギー的な照査指標 SI (スペクトル強度) を設計上用いることが妥当であることを検証した。また、計算機による厳密な列車走行シミュレーションの結果に基づいて新幹線と在来線の走行安全限界指標 SI_L を作成し、実設計向きの簡便な照査法を開発した。

2 厳密法による列車走行安全の限界

列車走行安全における軌道面の振動変位量の限界値を計算機のシミュレーションによって求めることができ、その結果を図-1に示す³⁾。

この走行安全限界線図は、横軸に加振周波数を縦軸に水平振動の加振振幅をとり、各加振周波数毎に加振振幅を5mm単位で大きくしながらシミュレーションを繰り返し

返し実行し、走行安全限界判定において危険判定を受ける直下の振幅をプロットしたものである。また、車輪がレールから完全に脱線する場合を危険と判定するため、車輪とレール間の相対水平変位を指標とし、その目安値

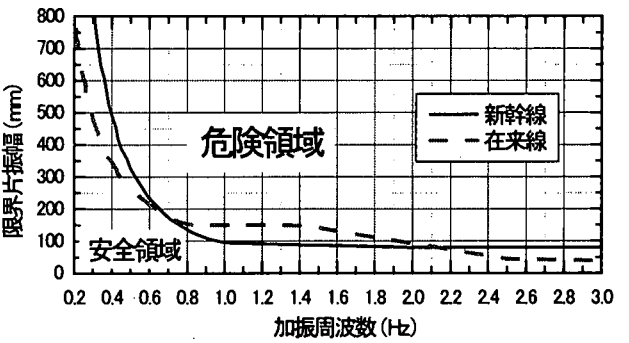
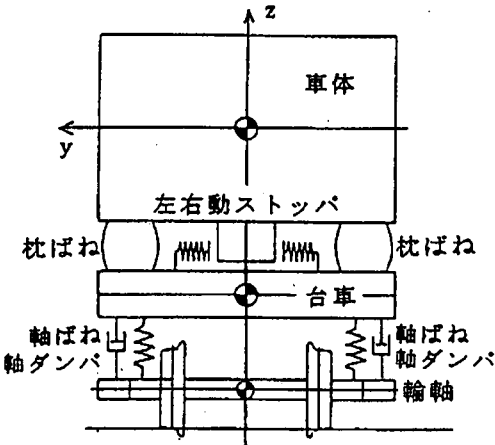


図-1 厳密法による限界変位振幅と加振周波数との関係



車両進行方向背面から見た図

図-2 シミュレーション用車体のモデル図(宮本らより)⁴⁾

を 70mm とした。

図- 1の走行安全限界振幅は、図- 2に示すように一車両を 1 車体、2 台車、4 輪軸の 7 つの質量要素で合計 58 自由度の数値解析モデルに基いて、5 波の正弦波加振の条件で、車体-台車-輪軸間の相互作用を厳密に評価して求めた結果である¹⁾²⁾。しかし、構造物の耐震設計に用いる入力波はランダムな地震波であり、定常な正弦波の限界値はそのまま構造物の照査に使えない。したがって、両者の間に何らかの共通しかも便宜な照査指標を見付ける必要がある。

3 簡便法による列車振動特徴の分析

耐震設計に適する列車走行安全性の照査指標を決めるために、車両の動的特性を簡単なモデルで調べた。まず、車両の主要な部分と思われる車体を対象にモデル化する。図- 3に示す剛な軌道面に載せた 1 質量、2 自由度（水平、回転）の車体に正弦加速度波を入力して、その挙動と入力加速度振幅 A および周波数との関係を調べる。この場合、車両の可能な運動は回転、水平および回転+水平の 3 種類があり、それぞれの特徴を分析する。

3.1 回転運動

軌道-車輪間のフランジによる水平方向の抵抗力が十分に大きい場合、車体は O 点を中心として回転するときの運動方程式は、

$$I_0 \ddot{\phi} + M \ddot{u} R^* \cos(\alpha^* - \phi) + Mg R^* \sin(\alpha^* - \phi) = 0 \quad (1)$$

ただし、

I_0 : 回転中心 O に対する慣性モーメント

ϕ : 回転角

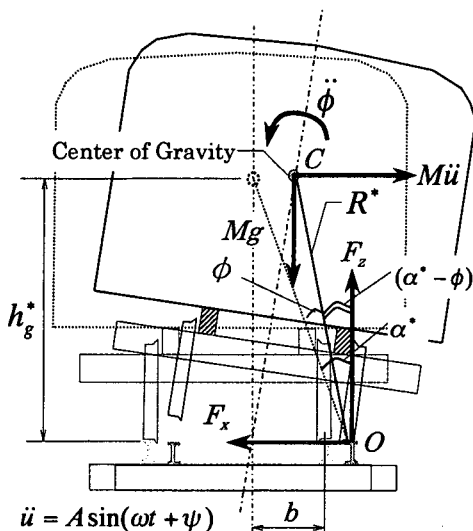


図- 3 車体の水平・回転運動における簡便化モデル図

$\ddot{\phi}$: 回転角加速度

M : 車体の質量

g : 重力加速度

$\ddot{u}$: 水平加速度

R^* : 車体の有効回転半径, $R^* = \sqrt{h_g^{*2} + b^2}$

h_g^* : ばね系を考慮した車両重心の有効高さ、一般の車両の場合は、車両重心の 20~25% 増し⁴⁾

b : 左右車輪/軌道接触点の間隔の半分

α^* : 車体が静止ときの有効回転半径 R^* と鉛直線間の角度, $\alpha^* \approx b / h_g^*$

次の仮定、

① 加速度は振幅が A の正弦半波状、

$$\ddot{u} = -A \sin(\omega t + \psi)$$

② α^* , ϕ の値が小さい

③ 車体の重心 C の位置は回転中心 O の鉛直上方になったときに転覆が開始

に基き、式(1)における簡易解を次のように求めた。

$$\frac{A}{g \alpha^*} = \sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{p}\right)^2} \quad (2)$$

ここに、 $p^2 = Mg R^* / I_0$, $A / g \alpha^*$ は正規化入力加速度の振幅、 ω / p は正規化加振周波数である。

3.2 水平運動

車体の水平運動は車輪と軌道の接触面で起きると仮定し、回転運動との連成影響を無視する場合、支持点 O の水平反力 F_x と車体の水平慣性力 $M \ddot{u}$ との釣り合い関係を次に示す。

$$\mu Mg = M A \sin(\omega t + \psi) \quad (3)$$

ここに、 μ は車輪のフランジによる水平運動に対する抵抗係数、ここでは便宜のため、 $\mu = F_x / F_z$ で表す。

式(3)に、 $t = (\pi - 2\psi) / 2\omega$ のとき水平慣性力が最大となる。このとき、車体の水平脱線運動が始まる加速度振幅 A は μg となる。これを式(2)のように正規化すると次のようになる。

$$\frac{A}{g \alpha^*} = \frac{\mu}{\alpha^*} \quad (4)$$

3.3 回転+水平運動

式(2)と式(4)から車体の転倒および水平脱線運動の臨界加速度振幅と加振周波数の関係を求めて図- 4に示す。そこで、転倒領域と水平運動領域が重なる部分は転倒と水平の複合運動領域となっている。ここでは、簡単のために、式(4)中の μ / α^* を 1.5 と仮定し、エネルギー

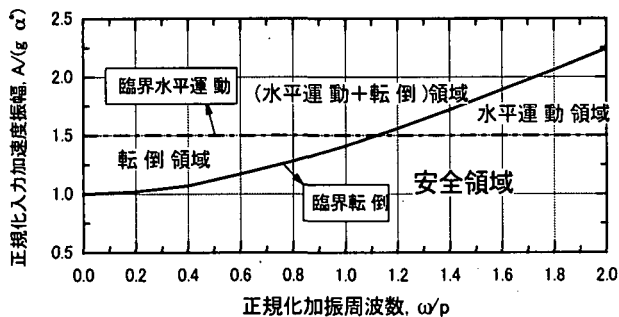


図-4 車体の運動モードと加速度振幅と周波数の関係の一例

一損失の影響を考慮しない。

図-4に示す簡易なモデルによる車両の運動特徴は、厳密なモデルで計算機による列車走行シミュレーションの結論とほぼ一致している。つまり、車両運動の臨界線図付近に車両の挙動は加振周波数別におもな次の3種類に分類することができる。

- ① 低周波数領域では、車輪フランジの接触による大きな水平運動が発生せずに下心回転振動を起こし、車体が大きく揺さられることによって車輪が持ち上げられ転覆するような脱線（足上がり脱線）が起こる。
- ② 高周波数領域では、フランジの衝突が激しくなり、それによって大きな水平運動が発生して車両下部の左右水平運動による上心回転振動を起こし、輪軸が飛び上がり臨界水平脱線値を超えるような脱線（飛び上がり脱線）が起きる。
- ③ 低、高周波数の中間領域では両挙動の過渡領域となっている。図-4には、水平抵抗係数 μ は周波数に依存していないため、この過渡領域が明確に現れていない。

このような周波数によって振動のパターンが大きく変わる車両の運動を照査する場合には、エネルギー的な照査指標を用いることが妥当であると考えられる。つまり、式(2)中に $(\omega/p)^2 \gg 1$ の場合、この式を次のように近似的に表現することができる。

$$\frac{A}{\omega} = \frac{g\alpha}{p} \quad (5)$$

式(5)は車体の転倒が始まるのに必要な最小速度(臨界速度)を表れる。この臨界速度による運動エネルギーは、車体の転倒に必要なポテンシャル・エネルギー（図-3の車体重心C点が最高点に達したとき）と等しい。この関係を速度応答スペクトルで表現することができる。速度応答スペクトルは、応答速度の最大値を表すものであるが、加振波が系に与える最大のエネルギーと密接な関係がある。すなわち、系の質量を $\bar{M}$ 、ばね定数を

$\bar{K}$ 、固有周波数を $\bar{\omega}$ 、最大変位を $x_{\max}$ 、変位応答スペクトルを S_d 、速度応答スペクトルを S_v とすれば

$$\text{最大ポテンシャル・エネルギー} = \frac{1}{2} \bar{K} x_{\max}^2$$

であるが、 $x_{\max} = S_d$ と $S_v \equiv \bar{\omega} S_d$ であることにより、単位質量あたりの最大エネルギー

$$\frac{1}{2} (\bar{K}/\bar{M}) S_d^2 = \frac{1}{2} S_v^2 \quad (6)$$

となる。式(6)から、速度応答スペクトル S_v は加振波のエネルギー・スペクトルとの密接な関係があることが分かった。

4 列車走行安全の照査指標の作成

図-1の列車走行安全限界値の計算に用いられる正弦波と構造物の設計に用いられる地震波は性質上異なるものである。また、地盤種別に対応した設計地震動の主要な周期範囲もまちまちである。そこで、構造物の固有周期と設計地震波の周期成分を考慮して、0.1secから2.5secの間のエネルギー総和に相当する積分値、スペクトル強度(SI)

$$SI(h, T) = \int_{0.1}^{2.5} S_v(h, T) dT \quad (7)$$

をもって、加振波の強さを表す指標とした。図-1に示す走行安全限界振幅図から、限界絶対加速度振幅と加振

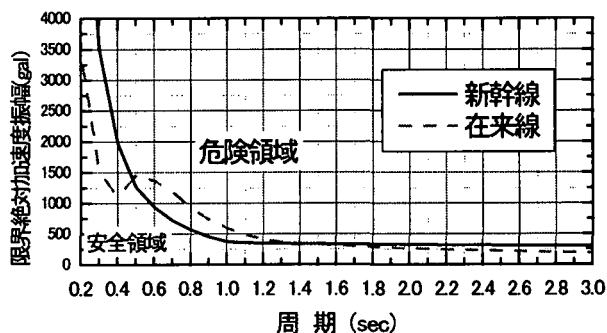
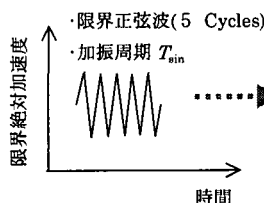


図-5 厳密法による限界絶対加速度振幅と周期の関係

列車走行シミュレーション
入力波の諸元



限界スペクトル強度 SI_L の算定

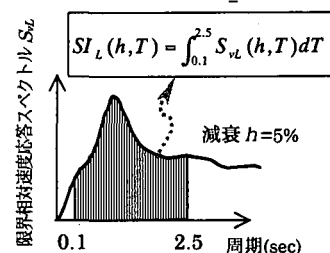


図-6 限界絶対加速度から限界スペクトル強度の算定

周期との関係求めた (図- 5). この加速度振幅を用いて5波の限界正弦波を作成し, 図- 6に示す方法によって限界スペクトル強度 SI_L の算定ができ, その結果を図- 7に示した. この限界線図の値は安全係数を考慮して求めたものである.

5 列車走行安全の照査

地震時に列車が載せられた構造物の軌道面の絶対応答波は車両の入力波になるので, この応答波のスペクトル強度 SI は限界スペクトル強度 SI_L を超えないように照査するものとする. その照査方法を図- 8に示す. まず, 地表面の設計地震動による構造物の絶対加速度応答波のスペクトル強度 SI を算出する. 次に, このスペクトル強度を用いて各卓越周期に対する限界スペクトル強度 $SI_L(T_i)$ と比較する. もし SI がすべての $SI_L(T_i)$ より小さければ, この設計地震動に対する列車の走行が安全であると判断する. 通常, ランダムな設計地震波に対する構造物の応答波の卓越周期は一つしかない. また, この卓越周期の値は構造物の固有周期 T_{eq} とほぼ等しい. この場合, 限界スペクトル強度 $SI_L(T_i)$ は一つしかなく, その値は近似的に $SI_L(T_{eq})$ と等しい. したがって, このときの走行安全照査は SI と $SI_L(T_{eq})$ との比較だけでよい.

また, 設計地震波に対して本簡便法と列車走行シミュレーションによる結果との比較を行い, 両者がほぼ一致していることから, 本法の妥当性を確かめた (図- 9).

6 まとめ

地震による軌道面の震動変位に対する列車の走行安全照査は鉄道構造物の耐震設計上重要なことである. 本研究は設計に適する照査法を開発するために, 車体運動の特徴を分析し, 地震に起因する脱線・転覆に至るような車体が大変位する際の挙動をエネルギー的な指標 SI (スペクトル強度) によって照査する手法を開発した.

謝 辞

列車走行安全の限界スペクトル強度を作成する際に, 鉄道総研の車両運動研究室の石田弘明氏の協力を頂き, 紙面借りて御礼申し上げます.

参考資料

1) 宮本岳史, 石田弘明, 松尾雅樹: 地震時の鉄道車両の挙動解析 (上下, 左右に振動する軌道上の車両運動シミュレーション), 日本機械学会論文集 (C 編), 64 巻 626 号, pp236-243,

1998, 10
2) Takefumi MIYAMOTO, Hiroaki ISHIDA, Masaki MATSUO : Running Safety of Railway Vehicle as Earthquake Occurs, Quarterly Report of RTRI, Vol. 38, No. 3, Sep. 1997
3) 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計 (案), (財) 鉄道総合技術研究所, 平成 10 年 11 月
4) 国枝正春: 「車両転覆に関する力学的理論解析」, 鉄研報告, No.793, 1972, 2

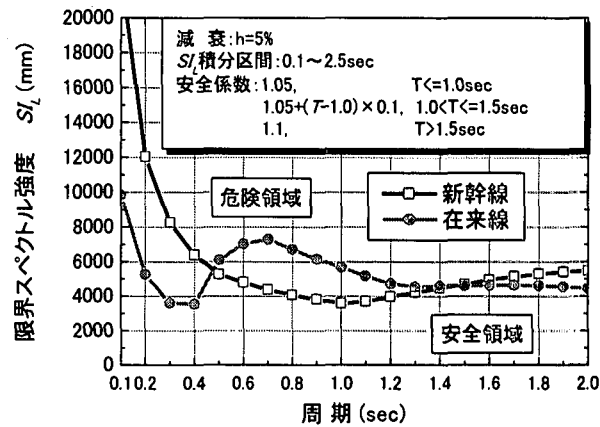


図-7 列車走行安全の限界スペクトル強度

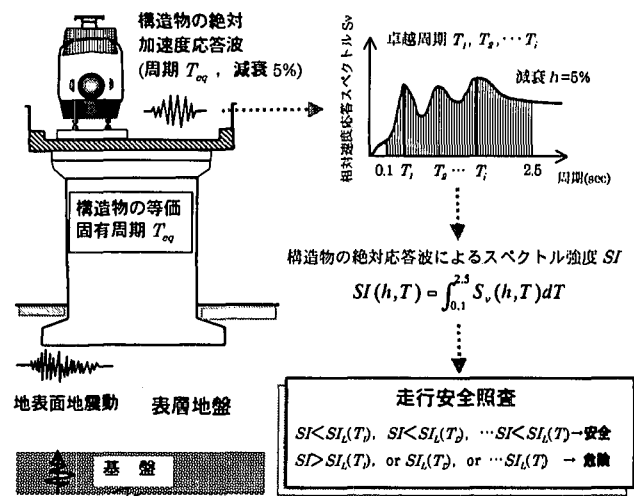


図-8 列車走行安全の照査方法

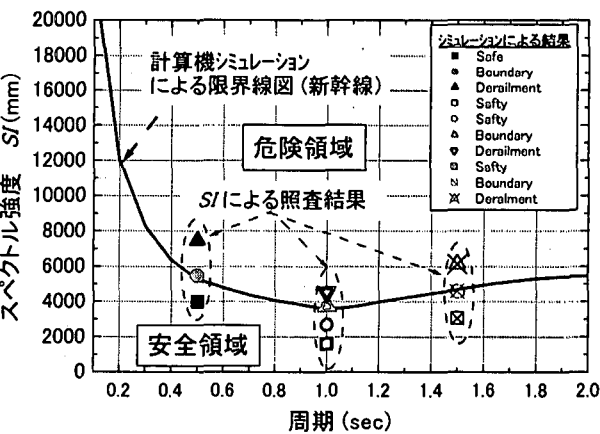


図-9 厳密法と簡便法による照査結果の比較