

スペクトル強度による列車走行性の検討

(財)鉄道総合技術研究所

正会員

羅 休

(財)鉄道総合技術研究所

正会員

西村 昭彦

1 まえがき

地震の振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把握するための計算機シミュレーション手法を開発しておる。しかし、この手法は58自由度を持つ複雑な力学モデルに基づいたもので、高度な数値解析技術が必要のため、一般の鉄道構造物の設計に用いることが困難である。従って、設計に適する簡単かつ合理的な列車走行性の照査法が必要である。

本研究は、簡単な力学モデルに基づいて地震の際に車両の脱線・転覆の特徴を分析し、計算機による厳密なシミュレーション結果を参照し、適切な列車走行性の照査指標を検討した。結果、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が分かった。また、計算機シミュレーションの結果に基づいた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、この限界値を設計実務に用いることが適切であることを確認した。

2 列車振動の特徴と走行安全限界

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。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、その目安値を70mmとした。

図-1の走行安全限界振幅は、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づいて、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⁾。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。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ために、車両の動的特性を簡単なモデルで調べる。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。

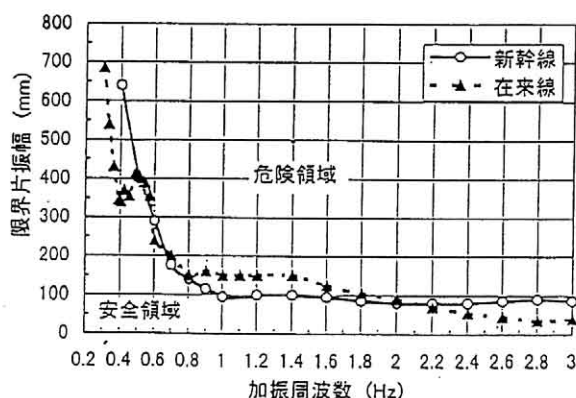


図-1 限界振幅と加振周波数との関係

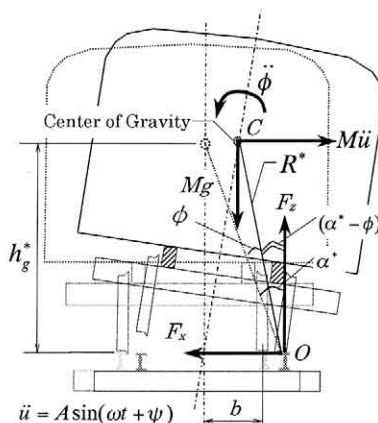


図-2 車体運動の簡便なモデル

図-2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。

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

キーワード：地震，耐震設計，列車走行安全，スペクトル強度

連絡先：〒185-0034 東京都国分寺市光町 2-8-38

Tel:042-573-7262

Fax:042-573-7248

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、 $\ddot{\phi}$ = 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、 $R^* = \sqrt{h_g^{*2} + b^2}$ 、 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、 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。

$(\omega / p)^2 \gg 1$ 場合、式 (2) を $A / \omega = (g \alpha^*) / p$ で近似的に表現することができる。この式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-2 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。

3 列車走行安全の照査

構造物の固有周期を入力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 $SI(h, T) = \int_{0.1}^{2.5} S_v(h, T) dT$ をもって、加振波の強さを表す指標とした。図-1の限界振幅を

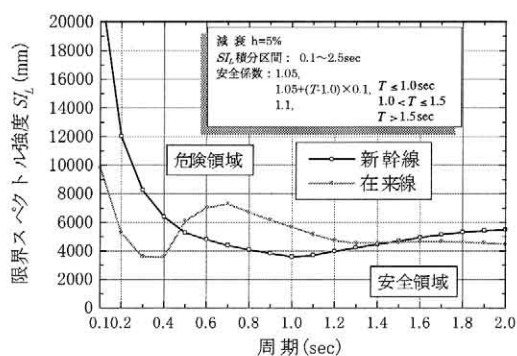


図-3 列車走行安全の限界スペクトル強度

限界スペクトル強度に変換し (図-3)、それを列車走行安全の照査に用いる (図-4)。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。

4 まとめ

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提案した。

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

- 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

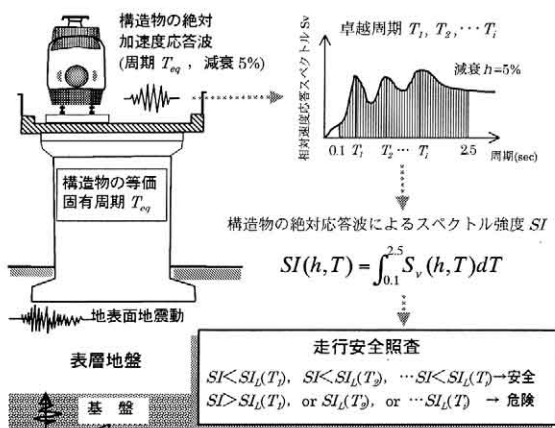


図-4 列車走行安全の照査方法