

スペクトル強度とピーク速度による 地震時列車走行性の照査法の比較検討

羅 休¹・宮本 岳史²

¹(財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 主任研究員 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)
E-mail: luo@rtri.or.jp

²(財)鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部 主任研究員 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)
E-mail: takefumi@rtri.or.jp

地震時横振動変位は列車の走行安全性に大きな影響を与えるため、鉄道構造物の耐震設計に用いられるこの影響に対する照査法の確立が必要である。本研究では、鉄道構造物の変位制限標準を作成するために、地震時列車走行安全性の照査指標について、 SI (スペクトル強度)と PV (ピーク速度)を対象に検討を行った。検討にあたって、列車走行シミュレーション解析により、異なる周期特性の地震波に対する SI と PV の照査精度および安定度を把握した。その結果、 SI による照査法が妥当であることを検証した。また、この照査法を設計実務に適用するために、多数の代表的な地震波を用いて、地震波の不規則性を反映した限界 SI 線を求め簡易照査用のノモグラムを作成した。

Key Words: *Vibrating displacement, Running safety of railway vehicle, Seismic design
 SI (Spectral Intensity), PV (Peak Velocity), Vehicle running simulation*

1. はじめに

地震による構造物の振動変位は列車の走行安全性に大きな影響を与え、鉄道構造物の耐震設計においては、この影響を考慮する必要がある。2004年新潟県中越地震では震源から約10km離れた地点で新幹線が脱線したことから、地震に対し列車走行安全性の高い鉄道構造物を設計することがより一層求められている。

通常、地震時の軌道面の変位には、角折れ・目違いと横振動変位の2種類がある。前者について、構造物の最大変位から算定した軌道面の角折れ・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(静的照査法)が既に確立されている。後者の横振動変位に対する照査は、エネルギー的な照査指標 SI (スペクトル強度)を用いる照査法(動的照査法)が現行の鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震設計)¹⁾に規定されている。しかしながら、この照査法に用いられる限界 SI (限界スペクトル強度)は正弦波に基づいたものであり、地震波の不規則性を反映していないなどの課題が残されている。また、 SI の概念に対しては、設計者の馴染みが薄いことなどから、例えば応答速度など設計者に馴染み易い指標が望ましいと言った指摘があり、本研究ではこれまで、

照査指標としての構造物の応答 PV (ピーク速度)による走行安全性の照査法を検討してきた。そこで、どちらの照査指標が設計実務上適切であるのかを見定めるために、各種の地震波に対する指標の照査精度および安定度などについて、 SI と PV の両方で比較検討を行った。その結果、 SI による照査法が妥当であることを検証した。また、この照査法を設計実務に適用するために、多数の代表的な地震波を用いて、地震波の不規則性を反映した新しい限界 SI 線を求め簡易照査用のノモグラムを作成した。

2. 指標 SI と PV による照査法の違い

地震時の列車が脱線するかどうか直接的な判定指標は、車輪とレール間の相対水平変位である。この相対水平変位は、地震の際に鉄道構造物レール面で生じる絶対変位に大きく依存する。しかしながら、耐震設計で求められる構造物レール面の変位は、不動点と仮定する基盤面からの相対変位であるため、列車の走行安全性照査に使えない。この問題を解決するために、近年、筆者らは地震時横振動変位に対する車両運動の特徴を調べたうえ、車両運動によるポテンシャル・エネルギーと応答速度の関

係から SI を指標とする照査法を提案してきた^{2),3),4)}。

ここでは、この提案法の概要について説明する。正弦加速度入力波に対する車体の基本的な運動モデルを図-1 に示すような 1 質量 2 自由度 (水平, 回転) 系で表わすことができる。この場合、軌道-車輪間のフランジによる水平方向の抵抗力が大きくなり、車体はレール面の O 点を中心とする回転運動の方程式は次の通りである。

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

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^* : 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

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, $\alpha^* \cong b / h_g^*$

加速度は振幅が A の正弦半波状, $\ddot{u} = -A \sin(\omega t + \psi)$ と仮定する。なお、 α^* および b が小さいものとする。式(1)は次のようになる。

$$I_0 \ddot{\phi} = -MgR^* (\alpha^* - \phi) + MA \sin(\omega t + \psi) R^* \quad \dots\dots (2)$$

軌道面の水平抵抗が十分に大きく、車体の回転運動が始まる直前の力の釣り合い関係は $A \sin(\omega t + \psi) = g \alpha^*$ となる。また、 $t = 0$ のとき、振幅 $A = g \alpha^* / \sin \psi$ と定められる。これを式(2)に代入すると以下の式になる。

$$\ddot{\phi} - p^2 \phi = \alpha^* p^2 \left[\frac{\sin(\omega t + \psi)}{\sin \psi} - 1 \right] \quad \dots\dots (3)$$

ここに、 $p^2 = MgR^* / I_0$ 、初期条件 $\phi_{(t=0)} = 0$ と $\dot{\phi}_{(t=0)} = 0$ を代入して、次のような式(3)の解が求められる。

$$\frac{\phi - \alpha^*}{\alpha^*} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega}{p}\right)^2} \quad (4)$$

$$\left[\frac{\omega \sinh pt}{p \tan \psi} - \left(\frac{\omega}{p}\right)^2 \cosh pt - \frac{\sin(\omega t + \psi)}{\sin \psi} \right]$$

式(4)を解くために、車体の転覆が始まる条件を決定

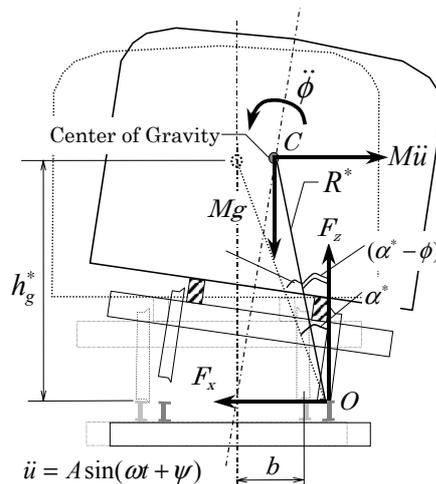


図-1 車体の基本的な運動モデル

する。つまり、図-1に示す車体の重心 C は回転中心 O の鉛直上方になった時点で車体の転倒が始まる。この条件に基づいて次の簡易解を求める。

$$\frac{A}{g \alpha^*} = \sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{p}\right)^2} \quad \dots\dots (5)$$

ここに、 $A / g \alpha^*$ 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。

通常、式(5)中において $(\omega / p)^2 \gg 1$ ので、この式を次のように近似的に表現することができる。

$$\frac{A}{\omega} = \frac{g \alpha^*}{p} \quad \dots\dots (6)$$

式(6)は車体の転倒が始まるのに必要な最小速度(臨界速度)を表わす。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-1に車体重心 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 $S_v \cong \bar{\omega} S_d$ であることにより、単位質量あたりの最大エネルギーは

$$\frac{1}{2} (\bar{K} / \bar{M}) S_d^2 = \frac{1}{2} S_v^2 \quad \dots\dots (7)$$

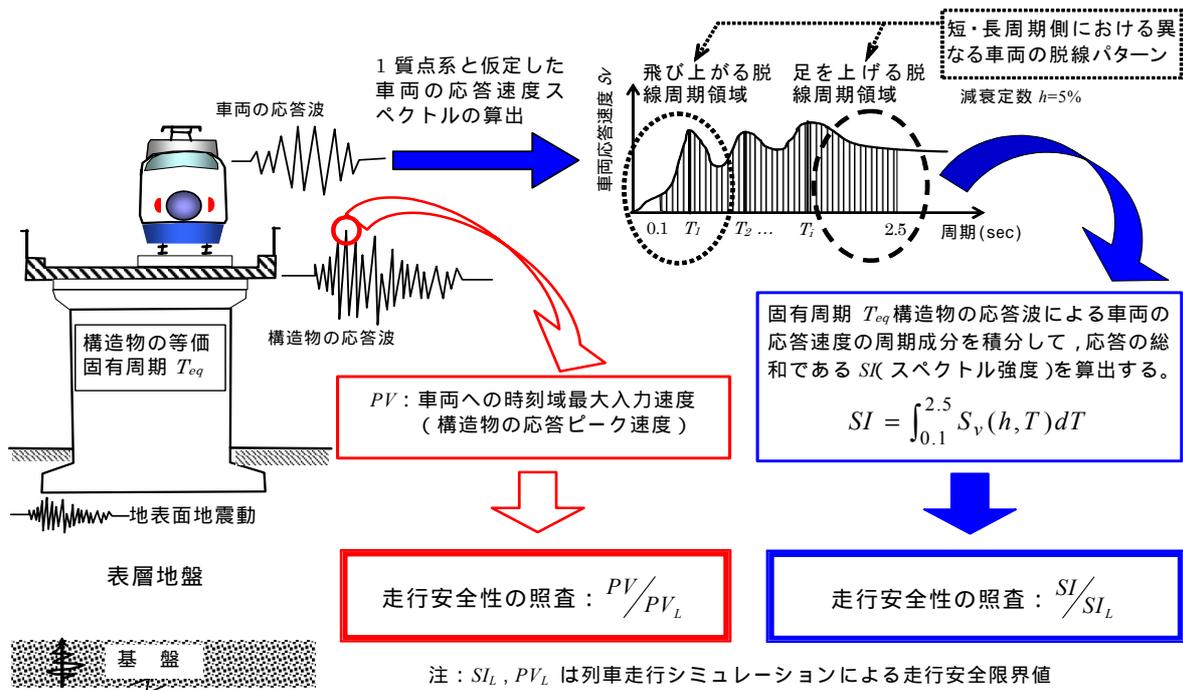


図-2 地震時横振動変位に対する列車走行安全性の照査概念および指標 SI と PV の相違点

となる。式(7)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る。

SI はエネルギー・スペクトルを代表して、図-2に示すように車両の速度応答の周期成分を0.1秒から2.5秒までに積分して求められる。この図に、指標 SI と PV の相違点も示されている。 PV は応答速度波のピーク値で時刻域の指標であり、 SI との根本的な違いは、 PV は時刻域における車両への入力の強さ(構造物応答の大小)を表す指標であり、 SI は周波数域における車両応答の強さを表す指標である。つまり、 PV は周期特性に依存しない車両へのインプット値、 SI は周期特性を考慮した車両のアウトプット値である。また、積分による SI を選んだもう一

つの理由は 図-2に示すように 車両の脱線パターンは、入力波の卓越周期成分によって異なることである。つまり、短周期側の成分に対して車輪が飛び上がり、長周期側に対して足を上げるように脱線する。地震の際に、車両は同時に様々な周期成分により異なるパターンの応答が混在するために、その応答の総和である SI を照査指標とすることが合理的であると考えられる。

3. SI と PV 照査法の比較検討

(1) 地震波の選定および構造物応答の算出

本研究では、指標 SI と PV の照査精度および安定度に

表-1 検討に用いた地表面地震波の特徴

地震名称	波形名称	選定理由
釧路沖地震	釧路気象台 NS 釧路気象台 EW	深い地震、大振幅で継続時間が長く、短周期成分が卓越する。
北海道東方沖地震	浦河 EW 浦河 NS	大地震+遠方
兵庫県南部地震	神戸海洋気象台 NS 神戸海洋気象台 EW	断層近傍地震、大振幅で継続時間が短く、1秒付近の波が卓越し、速度が大きいいため、構造物や車両に大きな影響を及ぼす。
台湾集集地震	台中県 TCU068	断層近傍地震、大速度パルス波で3~5秒が卓越し速度が大きい。
L1 耐震設計波	L1, G3 地盤	L1 地震動, 普通地盤
L1 耐震設計波	L1, G5 地盤	L1 地震動, 軟弱地盤
L2 耐震設計波	L2, スペクトル, G3 地盤	L2 海溝型地震動, 普通地盤
L2 耐震設計波	L2, スペクトル, G3 地盤	L2 直下型地震動, 普通地盤

焦点において照査法の妥当性を検討した。検討にあたって、まず、代表的な地表面地震波を選定し構造物天端の応答波を算出した。その後、算出された応答波を用いて列車走行シミュレーション解析を行い、指標 SI と PV の限界値を算定し両者の相違を比較した。

検討に用いた 11 種類の地表面地震波の特徴を表-1に示す。これらの波は過去の観測データの中から、震源特性、震源距離、伝播特性および地盤種別などの要素を考慮して選定した代表的なものである。構造物応答波の算出については、耐震設計に用いられる非線形スペクトル法と同じ考えに基づき、構造物を 1 質点系とみなし、構造物の等価固有周期をパラメータとして、表-1の絶対加速度地震波に対する構造物の絶対応答波を求めた。このとき構造物の減衰定数 $\eta=0.05$ を用いた。また、表-1の地震波の最大振幅は同一でないため、それらの最大値が $100\text{gal}(=cm/s^2)$ となるように振幅倍率を掛けて基準化した波を構造物の入力加速度波とした。これらの基準化加速度波による構造物の絶対応答加速度波を 0.1Hz のハイパスフィルターを通し、数値積分することで、構造物上で線路直角方向の絶対変位波を求めて、列車走行シミュレーション解析の入力波とした。

(2) 走行安全限界の算定

前節で求められた構造物の応答波は、地表面における最大振幅 100gal 相当の地震波によるものである。列車走行シミュレーション解析では、この構造物の応答波をレール支持面で左右方向に入力し、振幅を 10% ずつ大きく

しながら、走行安全限界を超過する直前の入力波の振幅倍率を、この地震波に対する安全限界倍率と定義した。

シミュレーション解析に用いた車両モデルは、図-3に示すように 1 車両を 1 車体、2 台車、4 輪軸の 7 つの質量要素について各 6 自由度、各車輪を支える 8 つのレールを上下、左右の各 2 自由度の合計 58 自由度でモデル化した。レールは上下、左右ともばね・ダンパで弾性的に支えられ、その上を剛体車輪軸が転がり、7 つの質量要素の間は各ばね・ダンパ系で結合されている。ばね・ダンパについては、力の作用点と作用方向を厳密に計算し、重心移動に伴う重力の影響を正確に計算できるように配慮した。ばね・ダンパについては、1 つの支持要素で 3 軸方向の力と、3 軸回りのモーメントを出すことができる。また、地震時のシミュレーションの特徴として、各剛体間の相対変位が大きく、ストッパなどが特に重要な要素であるため、輪軸 - 台車間や台車 - 車体間のストッパ当たりなどを考慮したほか、ヨーダンパについては、直列にばね(ゴムに相当)を挿入したモデルとしている。

なお、シミュレーション解析の条件として、軌道不整のないスラブ軌道の直線区間において、新幹線車両が速度 300km/h で走行する際に地震動を受けるものと設定した^{5),6)}。

構造物設計用の走行安全限界の判定基準については、これまで脱線係数、輪重減少率、輪重、横圧などの車輪・レール間作用力をもとにした指標を用いてきた。しかしながら、地震時の脱線に至るような大変位状態では、車輪がレールから離れて、再びレール上に戻る場合もあることから、本研究では耐震設計に用いられる地震時の車両の走行安全限界は、車輪・レールの左右相対変位により判定することとし、静止時の車輪の中正位置から $\pm 70\text{mm}$ 以上の変位を生じたときを安全の限界とした。このときの車輪とレールの位置関係は図-4に示すように、車輪がレールから外れて落ちる直前の状態を表わしている。

検討対象とする構造物の固有周期区間は、実設計に使用される $0.5\text{秒} \sim 2.0\text{秒}$ とした。その中、周期 $0.5\text{秒} \sim 1.0\text{秒}$ の間において、変化の激しい短周期側に対応するためには、固有周波数の刻みを 0.1Hz で密に設定し、 $1.0\text{秒} \sim 2.0\text{秒}$ の間においては固有周期の刻みを 0.1秒 で合計 20 分割と設定した。11 種類の代表的な地震波(表-1)に対する走行安全限界の算定結果を図-5に示す。図-5(a)に示す安全限界倍率の大きなばらつきは、各地震波の異なる周期特性によるものと考えられる。図-5(b)は、走行安全限界線図として、構造物の等価固有周期に対する走行安全限界における最大変位を示したものである。この走行安全限界における最大変位とは、車輪・レールの左右相対変位が 70mm に達した時間プラス 1.0秒 までの間の入力波の最大振幅変位である。

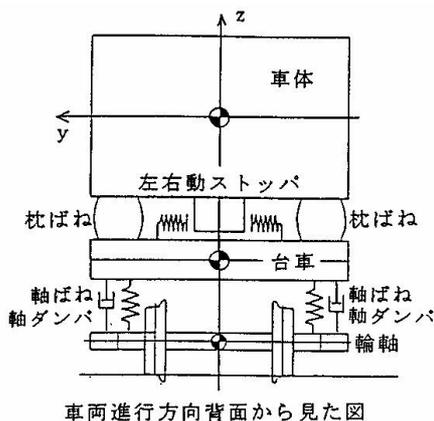


図-3 シミュレーション解析用の車両モデル図

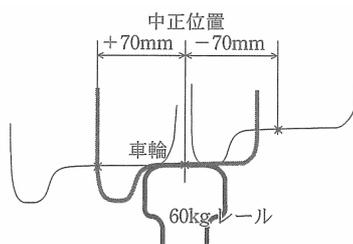


図-4 走行限界の判定基準

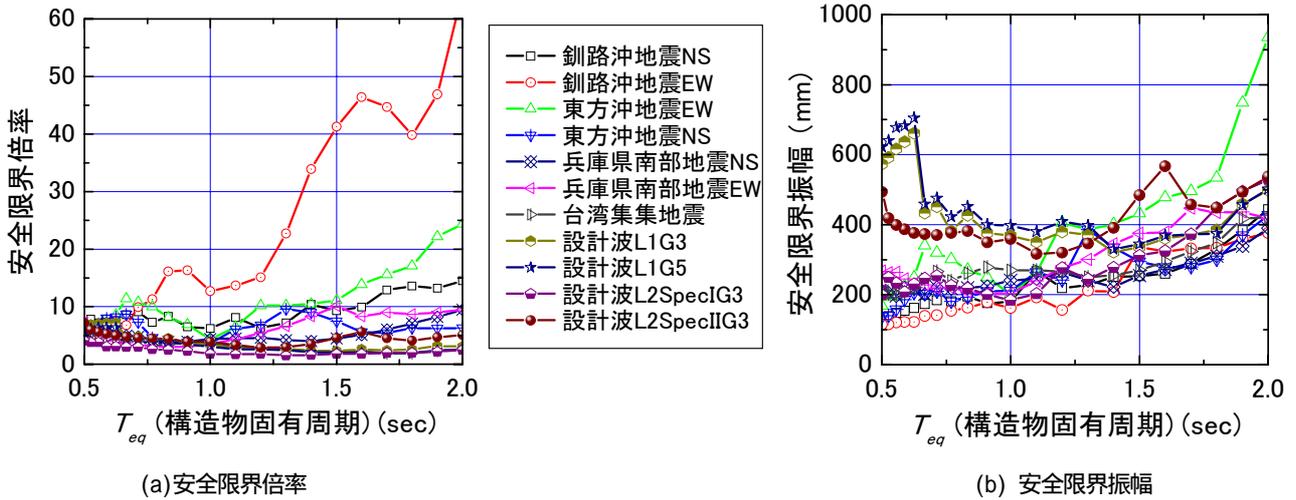


図-5 列車走行シミュレーション解析による安全限界

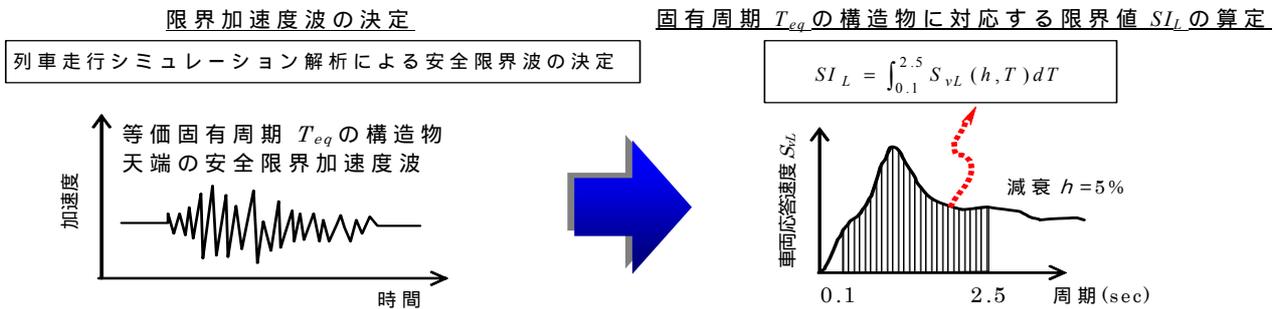


図-6 限界値 SI_L の算定方法

(3) 限界線の安定度の検討

前節で記述した列車走行シミュレーション解析による安全限界を定め、各等価固有周期 T_{eq} の構造物に対応する SI と PV の限界値 SI_L と PV_L を算定してそれぞれの特徴を比較した。なお、今までの一連の検討との整合性を取るために、本比較検討に用いた走行限界の判定基準については、レール面からの車輪上昇量が 25mm 以上となったときを安全限界とした。

図-6に示すように、限界値 SI_L を算定する際に、まず、

安全限界倍率を用いて限界加速度波を決め、その後、安全限界波から限界値 SI_L を算定した。限界値 PV_L の算定は、安全限界倍率を用いて、等価固有周期 T_{eq} の構造物に対応する応答速度波の振幅を調整した。

図-7に、各地震動に対する SI と PV の限界線、ならびにその安定度を評価するための変動係数 $\sigma / E(x)$ (σ : 標準偏差, $E(x)$: 平均値) を示す。図-7(a)の限界値 SI_L の形状は全体的に平坦であり、その変動係数は全周期にわたって約 0.1 程度である。

一方、図-7(b)に示す限界値 PV_L の形状は SI_L と比べ大

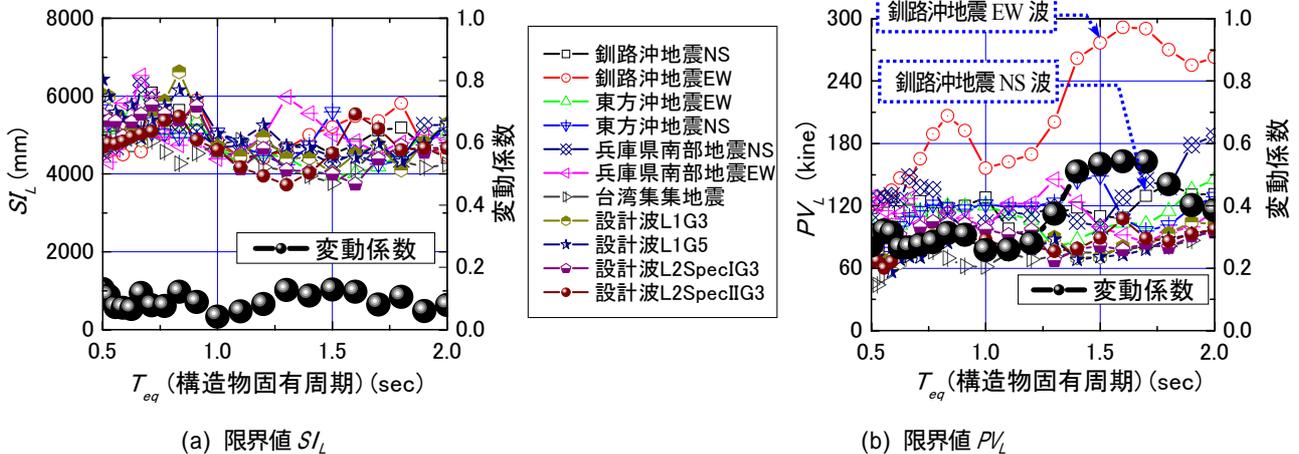


図-7 列車走行シミュレーション解析の安全限界倍率から求められた限界値 ($SI_L \cdot PV_L$) および変動係数

大きく変化し、その変動係数は SI_L の 3 倍以上であり、特に、固有周期 1.2 秒以上の区間における変動係数は 0.5 を超え、極めて不安定な状況が示された。

(4) 地震波特性による影響の検討

図-7(b)に示した限界値 PV_L において、釧路沖地震 EW 波に対する限界値が特段に高い。その原因を究明するために、同じ釧路沖地震の NS 波の時刻歴および周期特性との比較を行った。図-8に基準化されたこの 2 波の時刻歴(最大加速度 100gal)とフーリエスペクトルを示す。この図から EW 波の短周期成分は NS 波より卓越していることが分かる。特に中段にある EW 波の拡大図を見ると、時刻 20.7 秒、21.8 秒付近で長周期振幅にうねり状の短周期成分が乗っかっていることは短周期卓越の特徴を表わしている。さらに、下段のフーリエスペクトルにも EW 波の短周期成分が卓越し、長周期成分は NS 波より弱いことを示唆している。

このような短周期卓越型地表面波が、限界値 PV_L にどのような影響を与えるかを調べるために、構造物天端の応答加速度、速度および変位波を計算して比較した。その一例として、等価固有周期 $T_{eq}=1.6$ 秒の構造物に対応する応答波を図-9に示す。この図から、釧路沖地震 EW 波による加速度、速度、変位の全ての応答値は、NS 波の応答より小さいことが分かる。特に、下段に示す列車走行シミュレーション解析用の入力変位波の最大振幅について、NS 波の 26.2mm に対して EW 波は 7mm の応答し

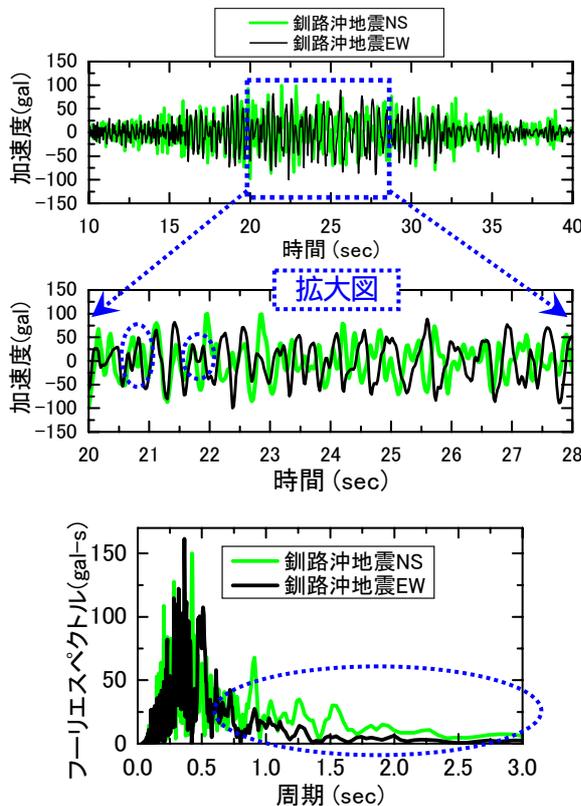


図-8 釧路沖地震 NS・EW 波の時刻歴波形と周期成分の比較

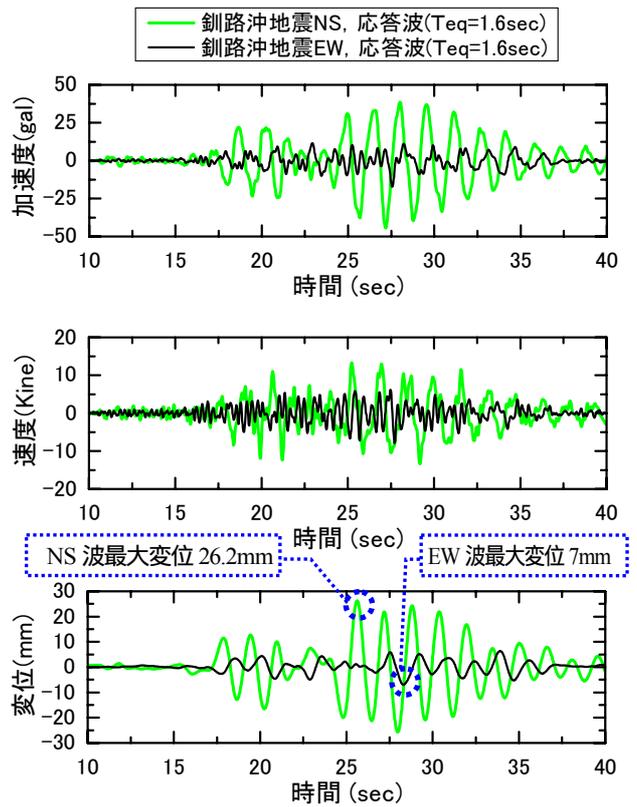


図-9 釧路沖地震 NS・EW 基準化波による構造物の応答波

が生じていないことから、短周期卓越型地震波は固有周期の長い構造物を共振させ難い特徴が顕著に現れているとも言える。

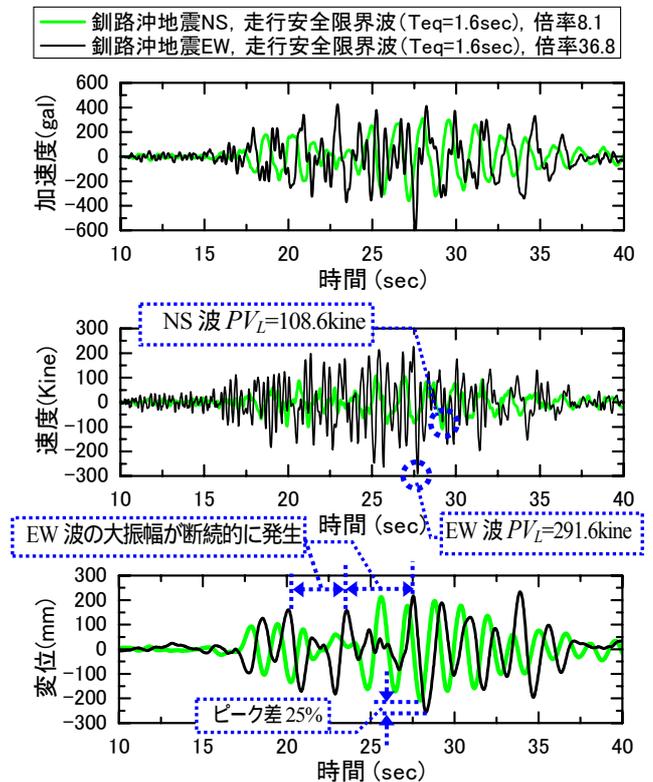


図-10 釧路沖地震 NS・EW 波による走行安全限界波

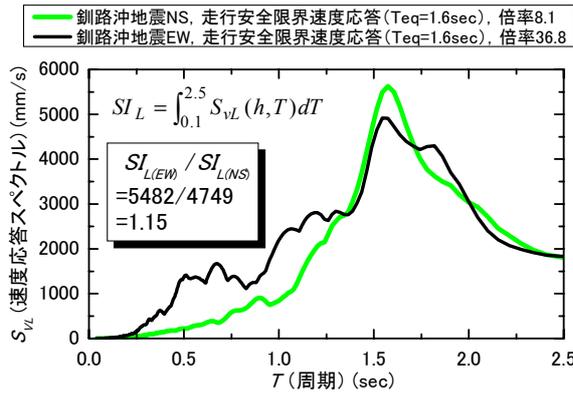


図-11 釧路沖地震 NS・EW 波による限界値 S_L

図-9下段に示す基準化波による応答変位波を用いて、列車走行シミュレーション解析を行い安全限界倍率を算定した。その結果、釧路沖地震 NS 波は 8.1 倍、EW 波は 36.8 倍となった。これらの倍率を元の応答波（図-9）の振幅に掛けて、図-10に示す加速度、速度、変位の安全限界波を作成した。

図-10中段の限界速度波形を考察すると、やや長周期卓越型の NS 波は 1.6 秒の構造物固有周期のフィルター効果を受けながら長い周期で振動していることに対して、短周期卓越型の EW 波の振動周期が短く NS 波の振動周期の約半分しかないことが分かった。振幅のピーク値については、NS 波の限界値 $PV_{L(NS)} = 108.6\text{kine}$ に対して、

EW 波の限界値 $PV_{L(EW)} = 291.6\text{kine}$ で約 2.7 倍も高くなっている。これは、列車走行シミュレーション解析で得られた EW 波の大きな安全限界倍率（36.8）によるものと考えられる。つまり、列車を脱線させる変位は入力速度波の振幅と周期の積からなるため、短周期卓越型の EW 波に対して、列車を脱線させるような大変位をもたらすために振幅を大きく調整したわけである。それ以外に、振幅を大きく調整したもう一つの原因が 図-10下段に示すように、時刻 28 秒付近で列車を脱線させる EW 波の最大変位振幅は NS 波より約 25% 大きい。これは、EW 波の断続的な大振幅振動が列車を脱線させるような連続的な車両応答をもたらせないため、より大きな入力振幅が必要となったと考えられる。

以上の検討から、図-7(b)に示す釧路沖地震 EW 波の PV_L が平均値から大きく乖離した原因として PV_L そのものは車両の応答を評価できないため、見かけ上の値が大きくなり指標の安定度を低下させたことが明らかになった。一方、車両の応答に基づく S_L が、上記と同様、2 波に対してどのように変化するかを調べるために、図-11に示す速度応答スペクトルを計算した。釧路沖地震 EW 波による速度応答スペクトルは短周期側が卓越するが、積分面積の S_L に対する寄与度が低く、NS 波による S_L との比率は 1.15 程度で、図-10中段に示す PV_L における EW 波と NS 波の比率 2.7 (291.6/108.6) よりもはるかに小さい。

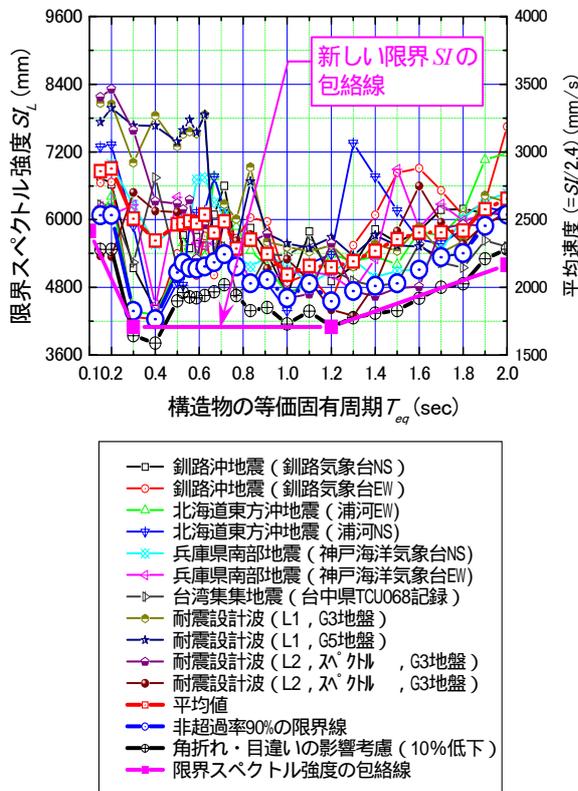


図-12 地震波による走行限界 S_L の包絡線

4. 構造物の設計への適用

安定度の高い照査指標 S_L を用いて、図-4の走行限界判定基準にしたがい、図-12に示すように表-1中の 11 の代

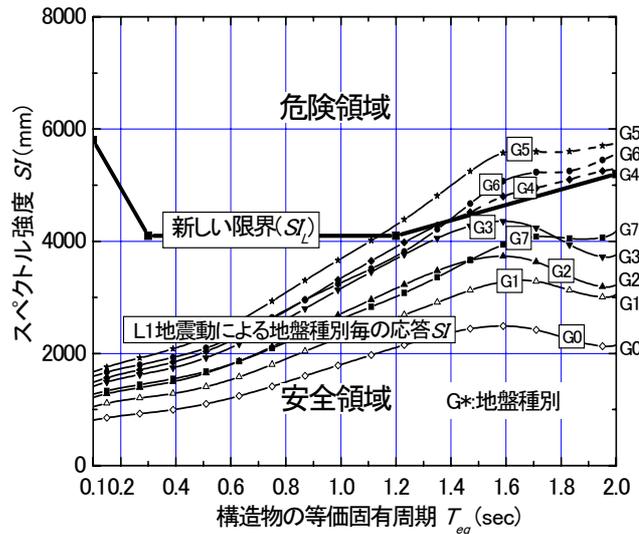


図-13 走行安全性照査用ノモグラム

表的な地震波に対応する限界 SI 結果に対し非超過確率 90%の限界 SI 線を求めたうえ、レールの角折れ・目違いの影響を考慮して、さらに 10%低減した結果を包絡したものを地震の不規則性を反映した新しい限界線とした。

また、設計実務の利便性を図るために、各地盤種別の L1 設計地震動による車両の応答 SI 値を計算し限界 SI 線図と一緒にプロットして 図-13に示す照査用のノモグラムを作成した。このノモグラムの適用方法は、まず、ブッシュオーバー解析で構造物の等価固有周期を求める。次に、対象箇所の地盤条件から地盤種別 (G0~G7) を定め、該当する応答 SI と限界値 (SI_L) を比較することによって、列車の走行安全性を簡便に判定することが可能となった。

5. おわりに

地震時列車走行安全性の照査法を確立するために、指標 SI (スペクトル強度) と構造物の応答 PV (ピーク速度) を対象に比較検討を行った。その結果、 SI による照査法は、照査精度と安定度の点において優れていることが判明した。また、この照査法を利用できる実務設計用のノモグラムを作成した。

本研究で確立した SI に基づく列車走行安全性照査法は、平成 18 年 2 月に刊行された鉄道構造物等設計標準・同解説 (変位制限)⁷⁾ に採用された。

参考文献

- 1) 鉄道構造物等設計標準・同解説 (耐震設計), (財)鉄道総合技術研究所, 平成 11 年 10 月
- 2) LUO Xiu: Study on Methodology for Running Safety Assessment of Trains in Seismic Design of Railway Structures, *Journal Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.25, No.2, Elsevier Science Ltd., pp.79-91, Mar. 2005
- 3) 羅休: スペクトル強度による地震時列車走行性の簡便照査法, 鉄道総研報告, Vol.16, No.3, pp.31-36, 2002.3
- 4) 宮本岳史, 石田弘明, 羅休, 松尾雅樹, 長谷川浩二: 振動する軌道上を走行する車両の挙動, 機構論, No.04-53 (2004, 12), pp.243-246, 2004.12
- 5) 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, pp.236-243, 1998.10
- 6) 宮本岳史, 曾我部正道, 下村隆行, 西山幸夫, 松本信之, 松尾雅樹: 実台車加振実験によるシミュレーションの検証, 鉄道総研報告, Vol.17, No.9, pp.39-44, 2003.9
- 7) 鉄道構造物等設計標準・同解説 (変位制限), (財)鉄道総合技術研究所, 平成 18 年 2 月

(2007.03.30 受付)

COMPARISON OF RUNNING SAFETY ASSESSMENT METHODS BASED ON SPECTRAL INTENSITY AND PEAK VELOCITY FOR RAILWAY VEHICLES DURING EARTHQUAKES

Xiu LUO and Takefumi MIYAMOTO

Due to structural vibrating displacements caused by earthquakes adversely affecting the safety of running railway vehicles, it is essential to establish a sound method to assess the effects while designing railway structures seismically. This paper examines the precision and stability of assessment indices of SI (Spectral Intensity) and PV (Peak Velocity) for running safety through vehicle running simulation. Various earthquake motions with different frequency characteristics are used in the examination. As a result, the adequacy of the SI is verified for running safety assessment. Moreover, to enable simple assessment of the running safety for a common seismic design, a nomogram based on the assessment index of SI omitting any calculation in seismic design of railway structures has been prepared for the purpose.