

地震時車両走行安全性に関するフラジリティ曲線の算出

鉄道力学研究部 構造力学
主任研究員 曾我部正道

1. 目的

地震対策の効果を検討するためには、精度の高い投資判断を可能とする鉄道全体のリスク評価システムの構築が必要不可欠となる。地震リスクに関する研究は、近年、様々な分野で広く行われている。しかしながら、鉄道高架橋上における地震時車両走行性に関するフラジリティ曲線（地震動指標に対する被害発生確率）については、これまで十分な検討がなされておらず、その実態もよく分かっていない。また、大規模地震動による鉄道車両の脱線を想定した場合、被害の最小化を図るためには、脱線した車両を反対線や線路外部に逸脱させないための対策が重要となる。図-1に逸脱対策の例の一つとして逸脱防止ガード付きラダー型マクラギの概念図及び敷設状況を示す。逸脱防止ガード付きラダー型マクラギは、線路方向に連続する付帯構造を配置しやすいラダーマクラギのメリットを生かした構造となっている。しかしながらこのような対策工の効果を定量的に把握するための効率的な解析法も未構築となっている。

以上のような背景から、本研究では以下を研究の目的とした。

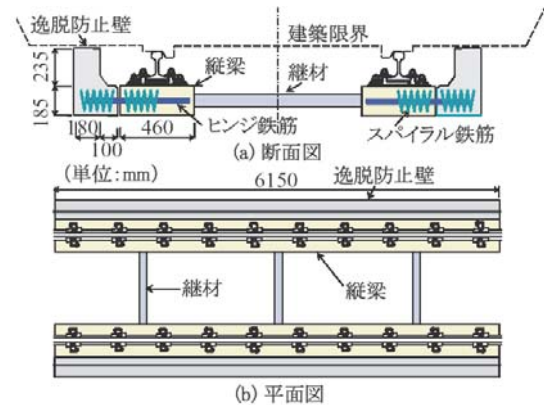
- ① 連続する構造物群全体を評価するための解析システムを構築する。
- ② 脱線後の車両挙動を解析するため実用的な構成則を提案する。
- ③ 連続する構造物群の地震時車両走行性に関するフラジリティ曲線を算出するとともに、逸脱防止効果を確認する。

2. 解析方法

検討には、車両と構造物との動的相互作用解析プログラム DIASTARS III を用いた。車両の解析モデルは、車体、台車、輪軸を剛体と仮定し、これらを、ばねとダンパで結合して構成した。実車には、各構成要素間に相対変位抑制のためのストッパが設けられている。このため、ばねはバイリニア型の非線形ばねとした。列車は8両編成とし列車速度は270km/hとした。

図-2に逸脱防止ガードと車輪のモデル化の概念図を示す。脱線後の車両挙動を評価するために、MBD (Multi Body Dynamics) により逸脱防止ガードを含む軌道構造と車輪をモデル化する手法を新たに提案した。ここで軌道構造は、外側又は内側に逸脱防止ガードを有する剛体断面モデルとした。車輪は、解析の高速化を図るため区分的な直線（円錐台形）により近似するモデルとした。車輪と軌道構造部材との衝突は非線形の衝突ばねで表現するモデルを構築した。脱線までは車輪とレールの精密な幾何形状を考慮した接触モデルを、脱線後は上記の脱線後モデルを車輪ごとに使い分けることとした。本研究ではこのうち外側ガードのみを用いて検討を行った。

図-3に連続する構造物群全体の解析システムを示す。本システムでは、図-3(a)に示すように構造物データベースと解析条件に基づき、自動的に解析区間を抽出して解析モデルを作成し、解析実施後は、



(c)敷設状況

図-1 逸脱防止ガード付きラダー型マクラギの概念図

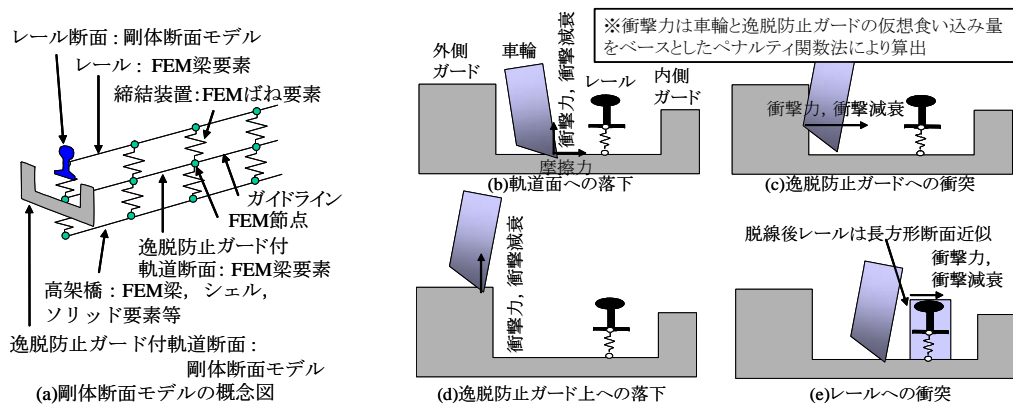


図-2 車輪と逸脱防止ガードの力学モデル

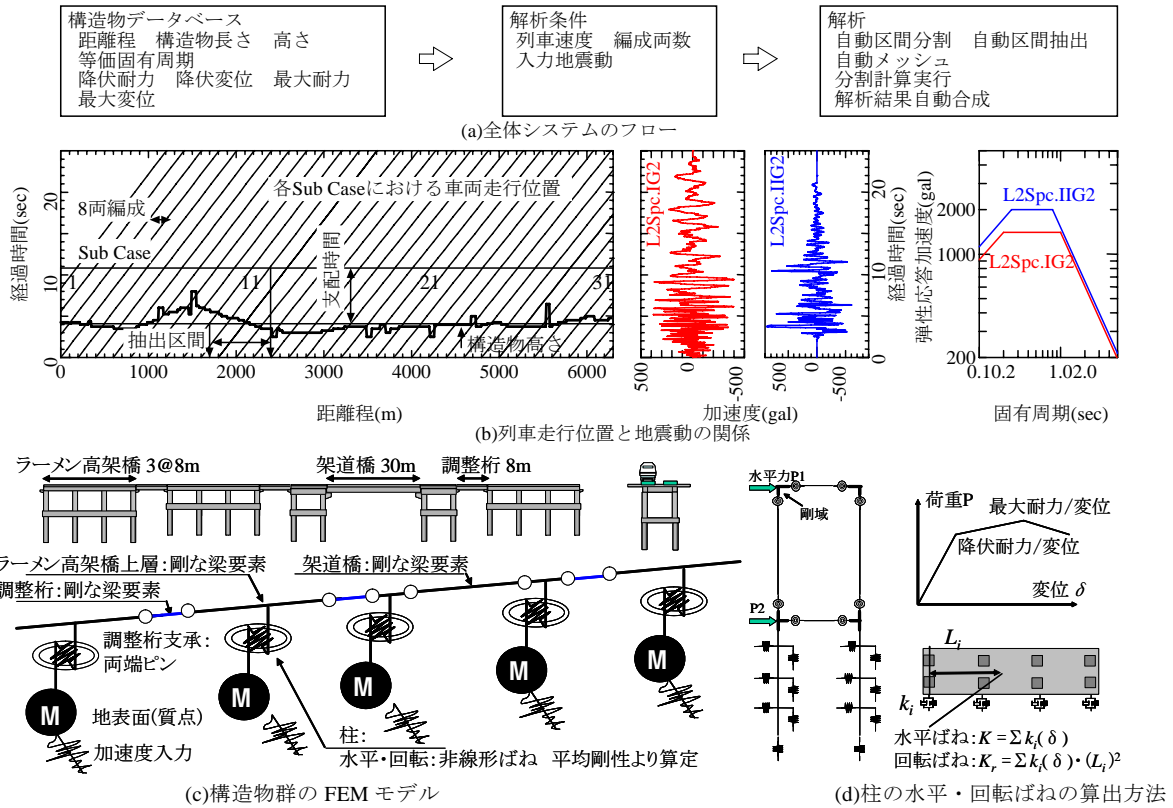


図-3 連続する構造物群の解析システム

解析結果を合成して全体線区の評価を行う。線区全体の評価を行う場合には、線区全線に車両を載荷して、洩れなく解析するのが理想的であるが、この場合、構造物や車両の自由度が膨大となる。そこで図-3(b)に示すように8両編成を1Sub Caseとして分割解析を行う手法を提案した。具体的には、地震動ごとに予め検討しておいた支配時間(脱線が発生するパワーを最も有する時間帯)から、各Sub Caseの抽出区間を計算する。例えばSub Case 11の場合、必要な抽出区間は1700~2400mとなる。この抽出した区間を自動メッシュによりFEMでモデル化する。なお抽出区間の前後には、抽出区間前後の構造物の平均的な振動特性に基づいて半無限走行領域としてプリラン区間、ポストララン区間を設けた。よって走行性の評価単位の精度は車両の観点から見れば1車両長の25m間隔、輪軸の観点から見れば輪軸間隔単位となる。本研究では、6.3kmの複線の新幹線高架橋を解析対象とした。3径間、ブロック長24mの調整桁式ラーメン高架橋を構造物群の基本単位とした。図-3(c)は抽出区間の具体的なFEMモデルであるが、高架橋の上層及び桁は剛な梁要素でモデル化した。柱の非線形性は、図-3(d)に示すように予めプッシュオーバー解析により骨格線を求めておき(データベースの入力項目)、これに基づき重心位置に標準型バイリニア型の非線形水平及び回転ばねを設けて考慮した。構造物の減衰定数 ξ は5%とした。

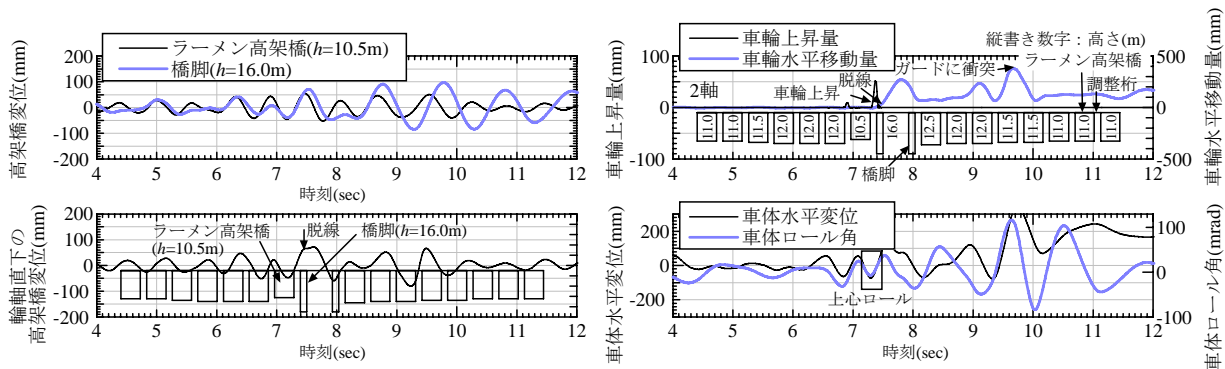


図-4 時刻歴波形の例(海溝型L2スペクトルI, $PGA = 240gal$)

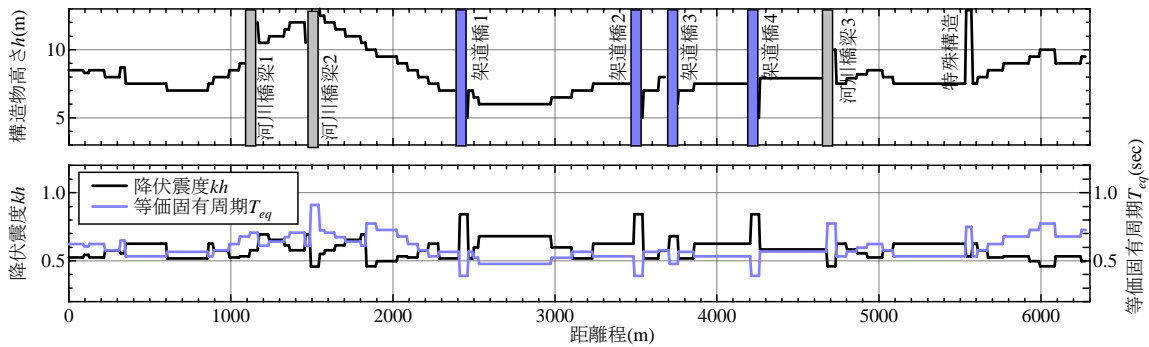


図-5 モデル線区の構造物諸元

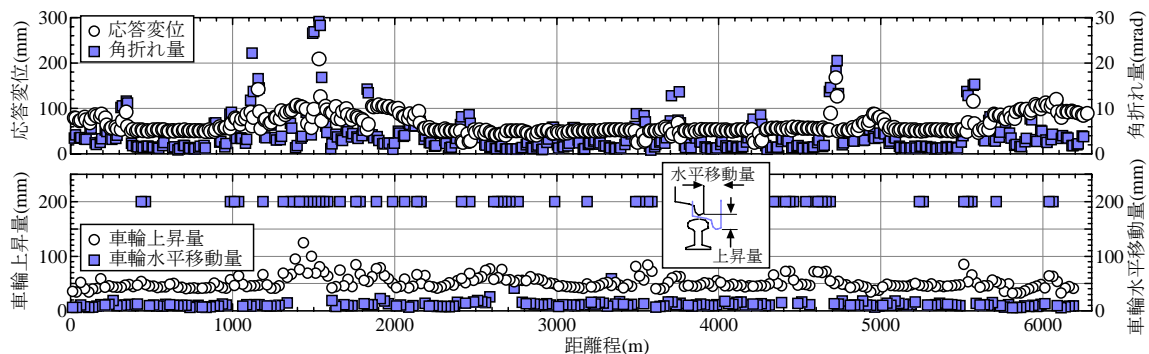


図-6 モデル線区の解析結果(海溝型L2スペクトルI, $PGA = 240gal$)

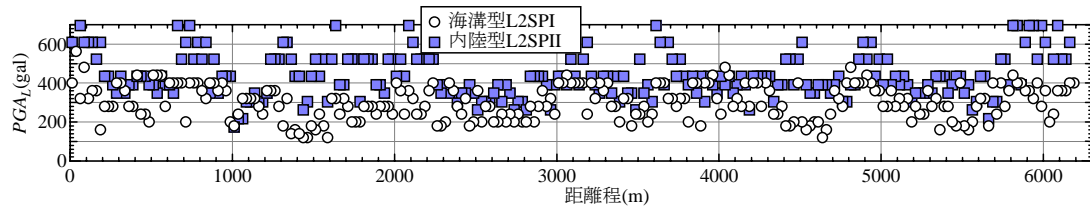


図-7 モデル線区の限界地表面加速度 PGA_L

入力地震動には鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震標準)¹⁾に定める海溝型のL2スペクトルI地震動及び内陸活断層型のL2スペクトルIIを用いた。地盤はG2地盤(洪積層)を想定した。車両の応答は非線形性が強いため、地震動の地表面入力加速度最大値 PGA を線形に漸増させながら検討を行った。車両走行性は、車輪とレール間の相対水平移動量で評価した。脱線限界の目安値には、車輪のフランジがレールから外れて水平に移動した量の限界として70mmを適用した。

3. 解析結果

図-4に脱線が生じたケースの時刻歴波形の例を示す。ラーメン高架橋と橋脚の変位を見ると、7秒で相対変位50mmを生じていることが分かる。輪軸直下の構造物の変位を見ると7秒前後で2Hz、全振幅80mmの加振を受けていることが分かる。車輪上昇はラーメン高架橋と橋脚の間の調整桁上ではじまり、車輪水平移動量が70mmを超えて脱線している。脱線した車輪は9.7秒に逸脱防止ガードに

解析結果の換算条件

1日当たりの列車本数 16両編成 144本 :6分に1本 360秒に1本
 列車間隔 27000m 構造物区間6300m
 列車速度 270km/h(75m/s) 車両長25mを評価単位とする 占有時間0.333秒
 1日で25mの評価単位に列車が存在する確率 0.0148
 当該線区を走行している列車の期待値3.674

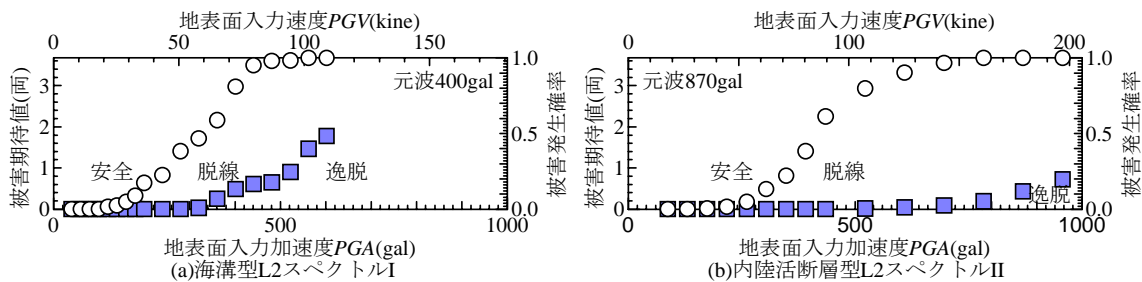
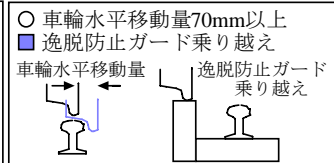


図-8 モデル線区の地震時車両走行性に関するフラジリティ曲線

衝突している。脱線時刻において車体水平変位と車体ロール角は完全に同位相となっており、上心ロールによる脱線であると判断される。

図-5 にモデル線区全体の諸元を、図-6 に全体の解析結果を示す。海溝型 L2 スペクトル I、地表面入力加速度 $PGA=240gal$ の場合の応答について示した。車両の応答は 1 両単位の最大値で整理し、海溝型は 8 秒後、内陸活断層型は 6 秒後の走行位置で図中に整理して示した。車輪の水平移動量が 200mm を超えたものは 200mm として示した。高橋脚の河川橋梁は隣接ラーメン高架橋よりも等価固有周期が長く、変位が大きくなる傾向にある。架道橋は逆に隣接ラーメン高架橋よりも等価固有周期が短く、変位が小さくなる傾向にある。これらの構造物境界で角折れが生じやすいため、車輪上昇量や水平移動量も大きくなる傾向にあった。高架橋高さ 10m を 1 層と 2 層のラーメン高架橋の適用境界としたが、この部分(1800m 付近)でも固有周期の違いに起因した角折れ及び車両の応答が生じている。

図-7 に車輪の水平移動量が 70mm を超える限界地表面入力加速度 PGA_L を示す。 PGA_L は、海溝型の L2 スペクトル I 地震動で 100~400gal、内陸活断層型の L2 スペクトル II で 200~600gal 程度とばらついた。同規模の波の繰り返し数が多い海溝型の方が、厳しい PGA_L となっている。振動特性が異なる地点で PGA_L が低くなる傾向にあるが、車両位置は、前述のように海溝型は 8 秒後、内陸型は 6 秒後で整理しているだけであり、実際には弱点地点の前後の走行ケースもその影響を受ける。一つの弱点箇所は前後 200~400m の走行ケースに影響を及ぼしていることが読み取れる。

図-8 にモデル線区の地震時車両走行性に関するフラジリティ曲線を示す。図中に示す仮定に基づき図-7 に示した数値解析結果を整理した。このフラジリティ曲線は、車両の諸元、構造物の種類及び配置、地盤特性、地震動の種類に大きく依存するが、今後のリスク解析に対する一つの指標と成り得るであろう。提案した逸脱防止ガード付きラダー型マクラギは、それぞれの地震動の元波に対して逸脱被害発生確率 10%程度であり、かなりの大規模地震動に対しても効果を発揮することが分かった。

4. 結論

本研究で得られた成果は以下の通りである。

- ① 地震動の支配時間を考慮した自由度縮小方法に基づき、長大な構造物群上の車両走行性を効率的に検討するためのアルゴリズムを提案した。
- ② 脱線後の車両挙動を解析するために、円錐台形車輪と矩形逸脱防止ガードを用いた剛体断面モデルを提案した。
- ③ 連続する構造物群の地震時車両走行性に関するフラジリティ曲線を算出した。これに基づき、逸脱防止ガードを用いればかなりの大規模地震動に対しても逸脱を防止できることを定量的に示した。

参考文献 1) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震設計)，丸善，1995。