

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

# 地震時における橋りょう上の列車走行安全性を評価する

近年頻発している大地震時において鉄道車両の脱線が発生しており、鉄道システム全体で多角的な対策が進められているところです。車両の脱線挙動は、地震動の大きさや特性はもちろん、構造物、軌道、車両の振動特性などのすべての要因に影響を受けますので、精度よくこれを評価するためには分野横断的な視野が必要となります。ここでは、これらを考慮した車両の脱線挙動をシミュレーションする技術について概説し、新たに提案した構造物の非線形挙動を考慮した橋りょう上における地震時走行安全性の簡易評価手法について紹介します。



徳永 宗正  
Munemasa Tokunaga  
鉄道力学研究部  
構造力学研究室  
主任研究員



成田 顕次  
Kenji Narita  
鉄道力学研究部  
構造力学研究室  
研究員

## はじめに

2004年新潟県中越地震、2011年東北地方太平洋沖地震、2015年熊本地震において鉄道車両の脱線が発生しました(図1)。近年の大規模地震の頻発に対し、鉄道分野においては地震時の脱線や逸脱(☞参照)を防ぐために、緊急地震速報を含む鉄道システム全体で多角的な対策を実施し、土木構造物に対しても地震時列車走行安全性向上のための検討、対策が進められています1)2)。

地震時の車両の脱線挙動は多くの影響因子により支配され、複雑なメカニズムを呈します。しかし、とくに新潟県中越地震以降の精力的な研究開発により、シミュレーション技術が高度化され、これらの要因が個々に解明され影響度も定量化されてきました。

これまでの地震時の車両の脱線被害

### ☞ 地震時の脱線と逸脱

地震時の脱線は、車輪フランジが飛び上がってレールに乗り上げ、レールから落下した状態を表します。逸脱は、さらに車輪が線路直角方向に移動し、車両が軌道から大きく離れてしまう状態を表します。

は、橋りょうや高架橋上で発生しているものがほとんどです。これには、橋りょう上で地震の揺れが地表面よりも大きくなる(増幅される)ことにより生じる変位(振動変位)や、地震の揺れにより隣接する橋りょうとの間に生じるずれ(不同変位)が大きく影響していることがわかっています(図2)3)。

土木構造物(ここではおもに橋りょうを指します)の現在の設計では、車両が脱線する可能性ができるだけ小さくなるように、L1地震動(☞参照)に対して一定の変位(動的応答)以下となるように設計されます。それ以上の規模の地震動に対しては、構造物だけの対策で対応することは難しく、緊急地震速報などのシステムを含む車両、軌道を含む対策で対応する必要があります3)。構造物自体の破壊に対してはL2地震動(☞参照)まで保証できるように設計されるのに対して4)、列車の地震時走行安全性に対しては、設計で考慮する地震動が異なる点に特徴があります。

なお、盛土区間やトンネル区間は橋りょう区間と比較して、振動増幅の程度が小さく、列車を脱線させる可能性



図1 2004年新潟県中越地震で脱線した新幹線列車  
 (出典:「鉄道事故調査報告書」(運輸安全委員会)(<http://www.mlit.go.jp/jtsb/railway/rep-acc/RA2007-8-1.pdf>) (2021年10月13日に利用))

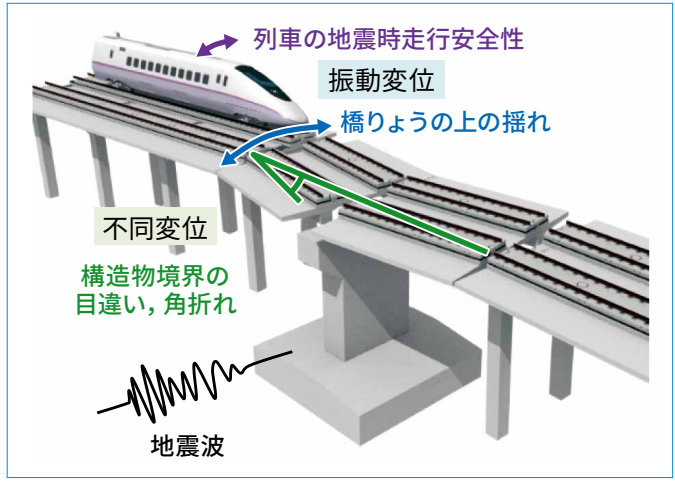


図2 振動変位と不同変位

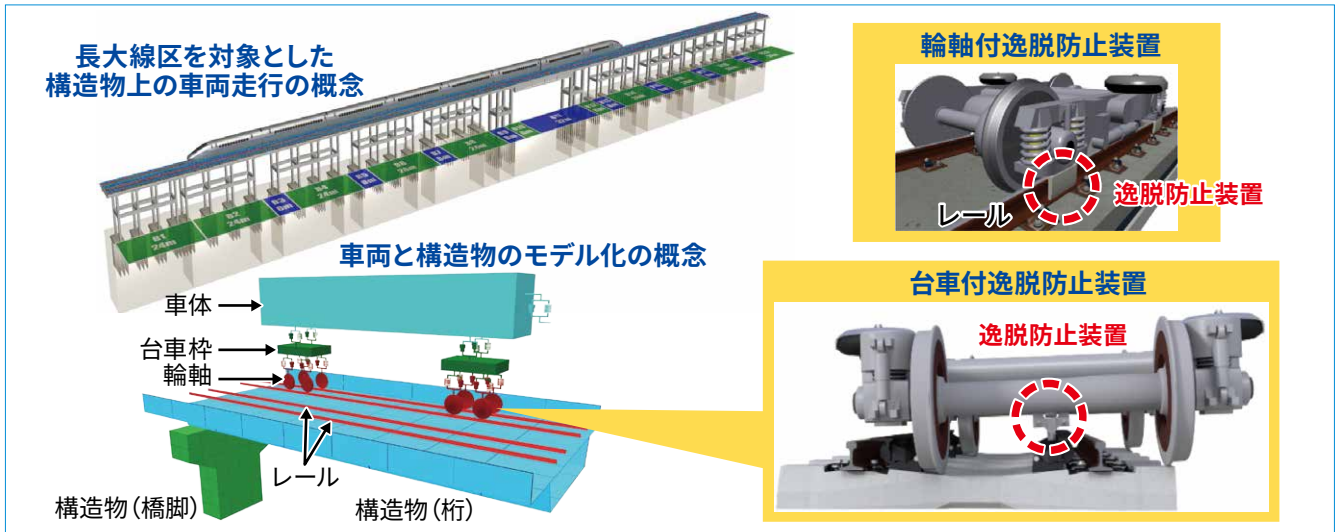


図3 車両と構造物の相互作用を考慮した動的相互作用プログラム

は低いことがわかっています。これは、盛土やトンネルは橋りょうと比較すると地震の揺れの増幅が小さいことが影響しています。さらに、線路直角方向の変形の不連続性が小さいことも、橋りょう区間よりも有利な点です。

**設計地震動**

L1地震動は建設地点において設計耐用期間内に数回程度発生する確率を有する地震動、L2地震動は建設地点で考えられる最大級の強さをもつ地震動として定義されています。海溝型や内陸活断層型の種類や、建設地点の地盤種別などに大きく依存しますが、標準的なL1地震動の地表面加速度は100～200gal程度、標準的なL2地震動は500～1000gal程度です。

**車両/橋りょうの動的シミュレーションによる地震時走行安全性の評価**

橋りょう上を走行する鉄道車両の地震時脱線挙動を解明するためには、コンピューターを用いた詳細な数値シミュレーションが必要です。これには、車両だけでなく車両が走行する軌道面および橋りょうの動的な挙動をすべて考慮する必要があります。

このような鉄道車両の走行シミュレーション技術は、2000年頃までは鉄道総研を含め世界でも限られた研究グループのみが保有する特別な解析技術でした。近年では商用ソフトウェアの普及により、一般の技術者でも比較的容易にシミュレーションが可能と

なっており、さまざまな用途で用いられています。鉄道総研でも目的は異なるものの複数のグループが車両の走行解析を行っていますが、現在でもとくに構造物の挙動を考慮して地震時の脱線現象を解析できるプログラムは、世界を見渡しても日本、中国、台湾、イタリア、ポルトガルのいくつかの限られた研究チームで開発されている程度となっています。

鉄道総研では、車両と構造物の動的相互作用プログラムDIASTARSを開発してきました(図3)<sup>5)</sup>。このプログラムでは、車輪とレール間の力のやり取りを考慮して、車両と構造物の挙動をシミュレーションすることができます。図3に示しますように長大線区を

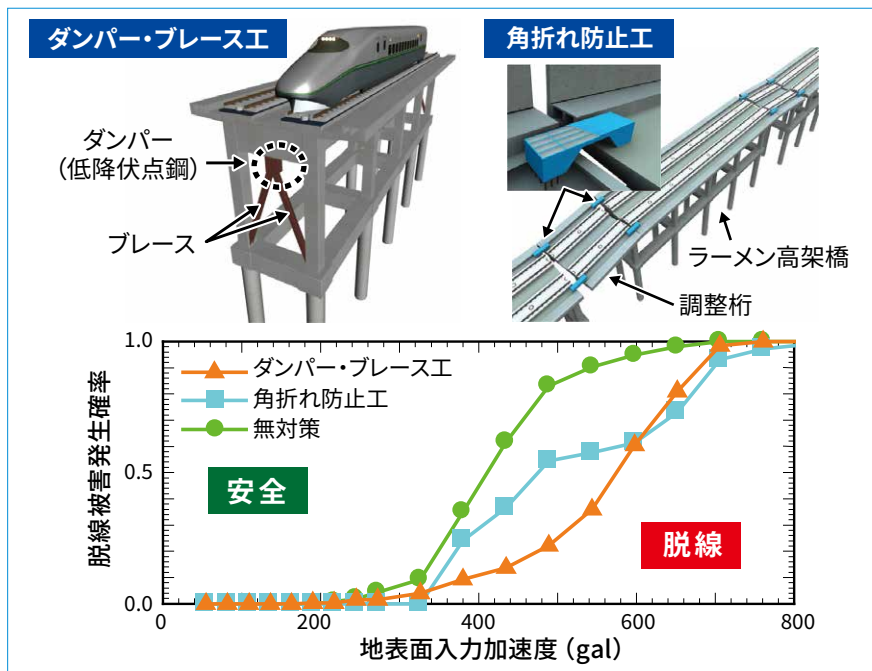


図4 脱線被害の発生確率

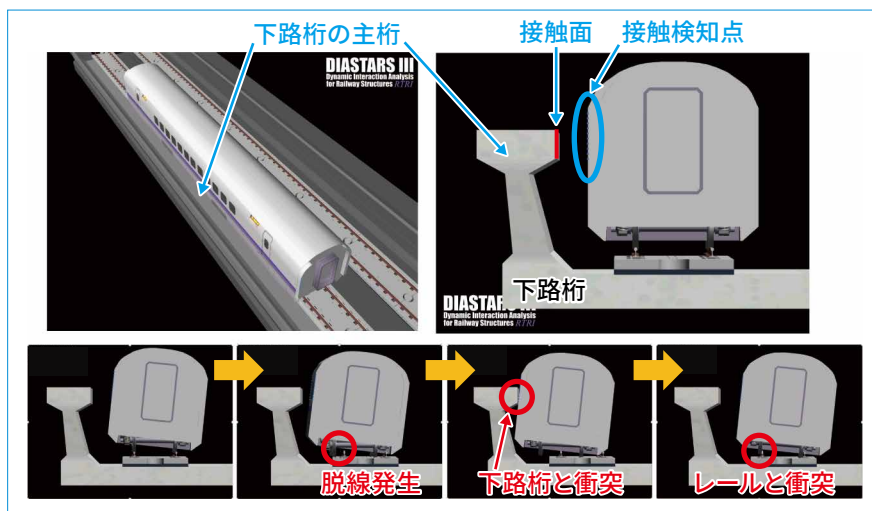


図5 車体と線路構造物の接触解析

対象とした地震時の車両走行解析や、脱線後の逸脱防止装置の性能評価などに用いられています。

図4は地震時の脱線の確率を低減させる対策工であるダンパーブレース工や角折れ防止工の性能評価を実施した例です。ダンパーブレース工は、鋼材を筋交い(ブレース)のように斜めに配置し剛性を高めつつ、地震動のエネルギーを吸収する部材(ダンパー)を組み合わせることで、地震時の応答を低減する工法です。角折れ防止工は、

線路方向に高架橋を接続させることで境界部のずれを低減する工法です。この例では、図の横軸の地表面入力加速度(地震での地表での加速度の最大値)が400gal(重力加速度の約0.4倍)の場合に着目すると、脱線被害発生確率(線区内を走行する列車編成のうち脱線が発生する輪軸の割合)が無対策の場合には45%程度であるのに対して、角折れ防止工の導入により30%程度、ダンパーブレース工の導入により10%程度まで低下することがわかります。

また、脱線前から脱線後の動的挙動を連続して解析することができますので、近年は車両の脱線後の挙動解明や逸脱を防止するための対策工の性能評価を目的とした研究開発にも活用されています。例えば、車両の台車や輪軸に設置した逸脱防止装置と軌道部材との接触(図3)、車体と線路構造物との接触を考慮した数値解析が可能となっています。図5は、車両が地震動により揺すられることで脱線して、車体が軌道の側方に位置する下路桁の主桁と衝突する様子を解析した例です。

計算処理の工夫として、図6に示すように、解析区間を複数に分割して、それぞれの区間の走行解析をスーパーコンピュータ内の複数の処理装置(プロセッサ)上で同時に処理させることで、大幅な高速化を図っています。これにより、列車速度や走行位置、地震動の規模などのさまざまなパラメータの影響を網羅的に把握でき、長大線区全体を対象とした検討や、緻密な現象解明が可能となっています。

### 大規模地震に対応した地震時走行安全性の新しい評価方法

先述した詳細な数値シミュレーションは、検討コストや時間を要することから、長大線区を対象とした網羅的な検討には不向きです。そこで、鉄道構造物等設計標準・同解説(変位制限)<sup>3)</sup>では、簡易な地震時走行安全性評価方法としてSI値とよばれる指標を用いた方法が導入されていました。SI値を用いた方法では、構造物の振動周期など、通常の耐震設計で得られる情報に基づいてグラフを読み取るだけで地震時走行安全性を評価できます。ただし、SI値を用いた方法の適用は、構造物の挙動が線形である(変形に比例して抵抗力が大きくなる)範囲とされており、例えば、一般的な高架橋では

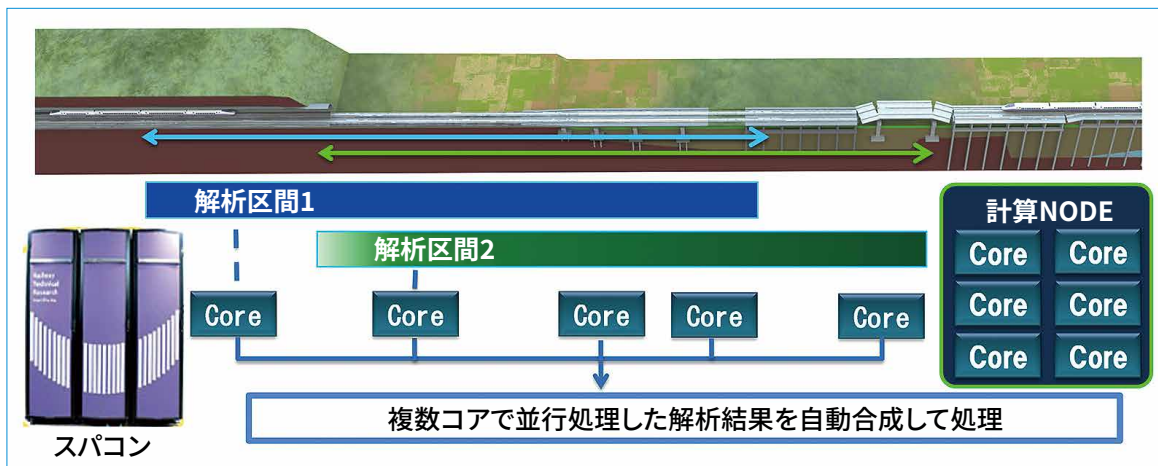


図6 スーパーコンピューターの並列計算による長大線区の動的相互作用解析

数センチから十センチ程度の小さい揺れに限られています。また、大きい揺れの場合や列車の高速走行時に影響が大きくなる不同変位の影響を考慮できないことも課題でした。

鉄道総研では、大規模地震時の橋りょうの非線形挙動を考慮した地震時走行安全性の新しい評価方法を提案しました(図7)<sup>6)</sup>。この方法では、振動変位と不同変位の影響を考慮した指標であるRSI (Running Safety Index)を算定し、車両の脱線の発生の可能性を判定します。具体的にはRSI>1となる場合に脱線の可能性が高く、RSI<1の場合には安全と判定します。先述したSI値を用いた方法では、縦軸の振動変位の影響に着目して地震時走行安全性を評価するもので、横軸で示す不同変位の影響とは独立して評価していました。提案したRSIは構造物天端の加速度に着目した振動変位の影響と、橋りょう境界部の角折れによる不同変位の影響を同時に考慮した指標となっています。これらの指標RSIの有効性や脱線限界曲線は、先述したようにスーパーコンピューター上でDIASTARSを用いて、あらゆる条件を想定した数十万ケースの地震時車両走行シミュレーションを実施して見いだしたものです。RSI(図7の赤

線の範囲)は、大規模地震時の非線形応答にも対しても有効ですので、線形応答の仮定を必要とする変位制限標準(図7の紫線の範囲)よりも適用範囲が広がっています。またRSIの妥当性は、複数の長大線区を対象として、脱線位置や脱線限界がDIASTARSによるシミュレーション結果とRSIでの評価結果が一致することを確認して検証しています。

### おわりに

近年では、とくに大規模地震への対応が必要とされていますので、脱線後を含めた現象解明を着実に進めるとともに、シミュレーションなどの評価技術の高度化、信頼性の向上を一層進める必要があると考えています。また評価法だけでなく、L1地震動より規模の大きい地震動まで、車両が脱線する確率を低減できるような、橋りょうの構造形式や設計を模索していく必要があります。究極には車両を脱線させない橋りょうが開発できれば、鉄道橋りょうのあるべき姿なのではないかと考えていますが、実現できるかどうかは今後の技術開発に期待したいところです。**RRR**

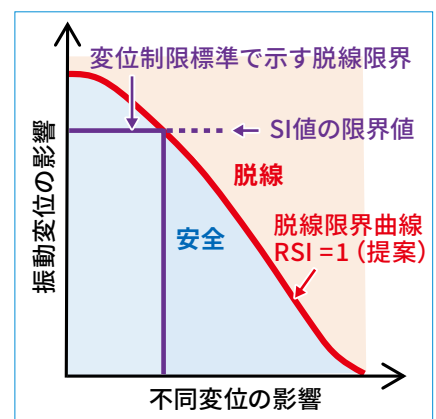


図7 橋りょうの非線形挙動を考慮した地震時走行安全性の評価方法

### 文献

- 1) 鉄道の地震時走行安全研究会：鉄道の地震時走行安全，鉄道力学論文集，No.10，pp.85-93，2006
- 2) 航空：鉄道事故調査委員会：鉄道事故調査報告書，RA2007-8，2007
- 3) 国土交通省監修，鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説(変位制限)，丸善出版，2006
- 4) 国土交通省監修，鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震設計)，丸善出版，2012
- 5) 涌井一，松本信之，松浦章夫，田辺誠：鉄道車両と線路構造物との連成応答解析法に関する研究，土木学会論文集，No.513/I-31，pp.129-138，1995
- 6) 徳永宗正，成田顕次，後藤恵一：鉄道構造物の大規模地震を想定した地震時走行安全性の簡易評価手法，土木学会論文集A1(構造・地震工学)，Vol.76，No.2，pp.376-394，2020