

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

走行車両と軌道・構造物の連成シミュレーション

鉄道車両が構造物上を走行すると、両者の間で力のやりとりが発生し、動的な相互作用が生じます。この動的な相互作用は、構造物の安全性や使用性、車両の走行安全性や乗り心地などに密接に関連することから、現象の適切な予測・評価を行う必要があります。一方で、この種の連成応答は実験などでの再現・評価が困難であることから、数値解析を活用することが多くなっています。ここでは、こうした車両と構造物の連成応答を表現可能な数値解析法を紹介するとともに、地震時の車両走行性に焦点を当て、その適用事例について紹介します。



後藤 恵一
Keiichi Goto
鉄道力学研究部
構造力学研究室
副主任研究員
[専門分野] 車両・軌道・
構造物の動的相互作用
解析、衝突解析、実験



曾我部 正道
Masamichi Sogabe
前 鉄道力学研究部
主任研究員
[専門分野] 車両・軌道・
構造物の動的相互作用
解析、振動、疲労



渡辺 勉
Tsutomu Watanabe
鉄道力学研究部
構造力学研究室
副主任研究員
[専門分野] 車両・軌道・
構造物の動的相互作用
解析、構造物振動、騒音



徳永 宗正
Munemasa Tokunaga
鉄道力学研究部
構造力学研究室
研究員
[専門分野] 車両・軌道・
構造物の動的相互作用
解析、耐震設計、橋梁
振動

はじめに

コンピュータの性能向上に伴い、数値シミュレーションを用いた現象説明・評価が行われる機会が増えています。この数値シミュレーションの特徴としては、多くのパラメータスタディーを行えること、実験では不可能な現象を再現できること、定量的精度が高いこと、などが挙げられます。鉄道分野においても数値シミュレーションによる現象説明・評価が進められており、その一つに走行車両と構造物の連成シミュレーションがあります。

鉄道車両が構造物上を走行する場合、互いに振動系である車両と構造物は、レールなどの軌道構造を介して常に動的な力をやりとりし、影響を及ぼしあっています。このような動的な力のやりとりのことを「動的相互作用」と呼びます。構造物上を走行する車両と構造物の連成応答を適切に予測・評価するためには、動的相互作用を考慮して数値計算を行うことが必要です。

ここでは、こうした車両と構造物との連成応答をコンピューター上に再現することが可能な数値解析法と、地震時の車両走行性に焦点を当てた最近の

適用事例について紹介します。

数値解析法

図1に鉄道総研が開発した、新幹線車両と線路構造物との動的相互作用解析プログラム DIASTARS III (Dynamic Interaction Analysis for Shinkansen Train And Railway Structures) の概念図を示します。

車両は、車体、台車枠、輪軸を剛体と仮定し、これをばねとダンパーで結合した、マルチボディーによりモデル化しています。

軌道および構造物は、有限要素法 (FEM) により任意の構造形式をモデル化することができます。

両者の連成応答を表現するための動的相互作用のモデル化ですが、車輪の脱線前・後によって使い分けます。近年の地震動の大規模化に伴い、脱線後の車両走行性の評価に関するニーズも増えていることから、脱線後についてもモデル化を行っています。

脱線前では、車輪とレールの両者の正確な幾何形状を考慮して接触点と接触角を求め、動的相互作用力を計算します。具体的には、鉛直方向では、車

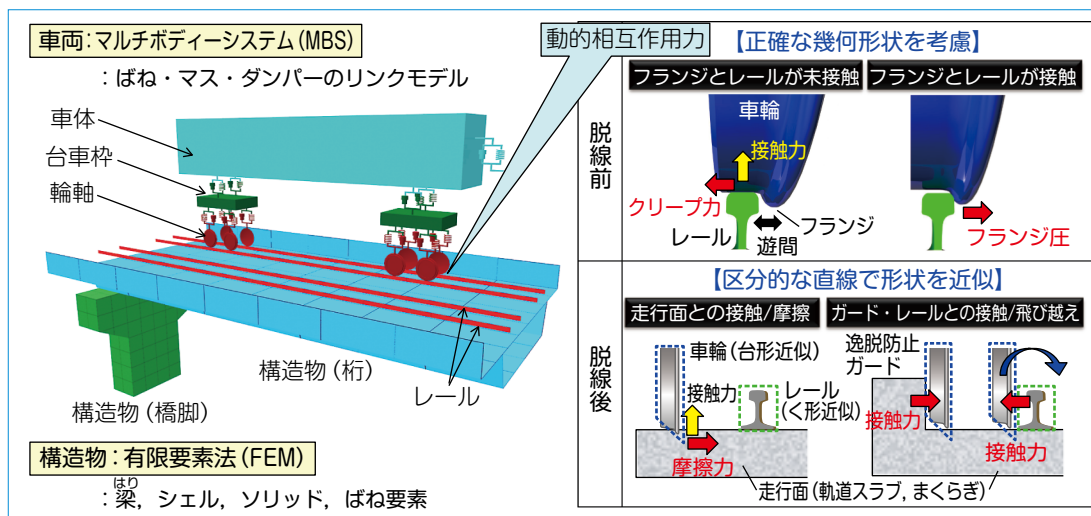


図1 動的相互作用解析プログラムDIASTARS IIIの概念図

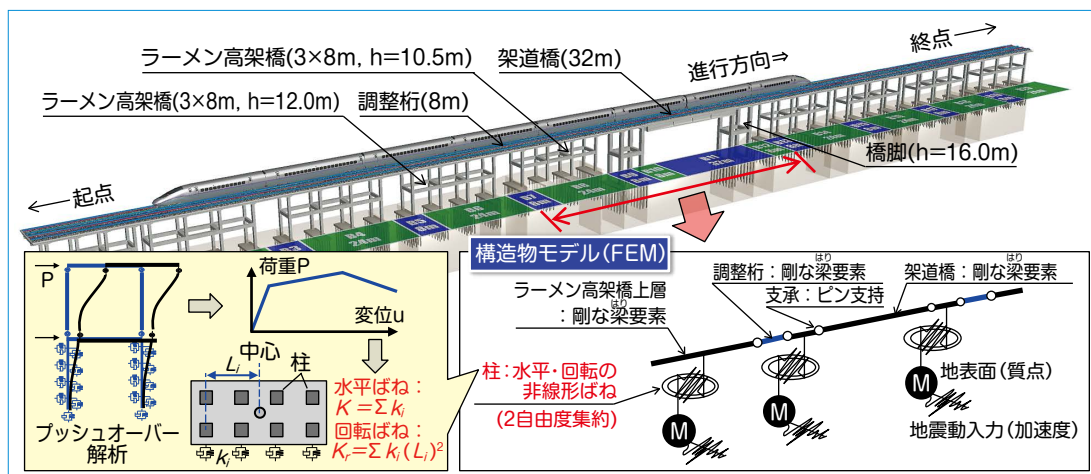


図2 構造物上の地震時車両走行性解析

輪のレールからの浮き上がりを考慮するとともに、車輪とレール間の接触力をHertzの接触理論(☞参照)に基づく接触ばねを用いて評価しています。水平方向では、車輪フランジとレールとの間に遊間が確保されている場合には、両者の接触面の接線方向にクリープ力(☞参照)が働きます。車輪フランジとレールとが接触する場合には、レール小返りばねに基づく接触力(フランジ圧)が接触面法線方向に働きます。脱線後では、車輪と軌道スラブやまくらぎ、逸脱防止ガード(☞参照)、レールなどのさまざまな軌道部材との接触を考慮します。しかし、脱線前と同様に正確な形状をモデル化すると計算負荷が多くなるため、各形状を区分的な直線で近似して計算の高速化を図っ

ています。脱線後の車輪と軌道部材の動的相互作用としては、鉛直方向では、走行面への落下時接触力を、水平方向では、車輪と逸脱防止ガードやレールとの接触力、走行面との摩擦力を考慮します。車輪と軌道部材の接触力はペナルティー関数法(☞参照)を用いて求めます。

本数値解析法の妥当性に関しては、走行試験により全体の検証を行うことは困難です。そのため、実物大車両模型での振動台実験¹⁾や、車輪とコンクリートの接触実験・解析²⁾など部分的な検証を積み重ねることで、その妥当性を確認しています。

☞ Hertzの接触理論

接触する二つの物体の接触面での接触面の大きさ、接触面の变形、接触面の圧力分布など、接触面の弾性的挙動を表現する理論。

☞ クリープ力

車輪がレール上を転がりながら進むとき、接触面でのすべりによって発生する接線力。すべり率が大きくなると摩擦力に飽和する特性を有します。

☞ 逸脱防止ガード

軌間の内外に設置する逸脱防止対策工の一つ。脱線時に車輪が引っ掛かることで、車両が線路から大きく逸脱することを防ぎます。

☞ ペナルティー関数法

動的接触問題を取り扱う際の代表的な計算方法。接触する境界面間に人工的なばねを付加し、接触点間での相対変位(食い込み量)に応じた接触力を計算します。

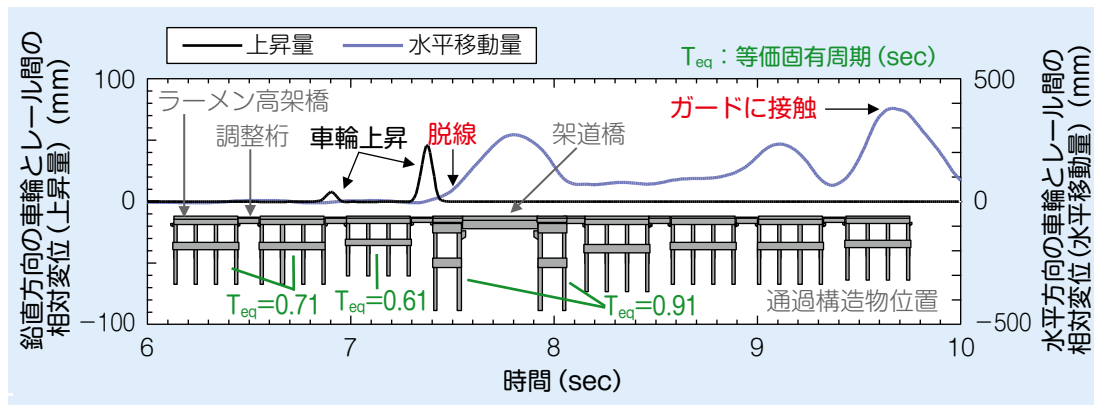


図3 車輪挙動の時刻歴波形

構造物上の地震時車両走行性

近年、地震動の大規模化に伴い、地震時に構造物上を走行する際の車両走行性について注目が集まっています。鉄道構造物はさまざまな種類の構造形式が線状に存在し、地震時には各々が異なる挙動を示します。また、その上を車両が高速に走行するため、現象は非常に複雑なものになります。このような連続する構造物上の地震時車両走行性を評価するために、車両と構造物の連成を考慮した数値解析が行われる事例が増えています。

図2に構造物上の地震時車両走行性の検討事例を示します。調整桁式ラメン高架橋と架道橋からなる構造物群について検討した例です。ラメン高架橋の上層および桁は剛な梁要素でモデル化し、柱の非線形性はプッシュオーバー解析(☞参照)の結果に基づいた水平および回転の2自由度の非線形ばねに集約してモデル化しています。各構造物の橋脚下端に地表面地震動を入力しています。

図3に解析結果として、地震により脱線が生じたときの車輪挙動の時刻歴

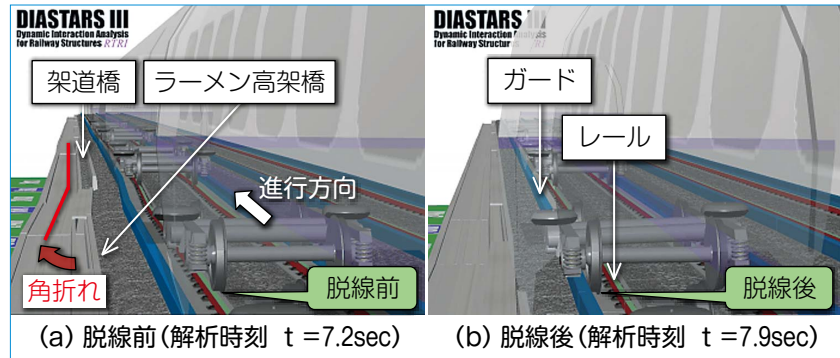


図4 車両と構造物の挙動

波形を示します。図より、異なる高さのラメン高架橋を接続する調整桁上を通過する時刻(約6.9sec)およびラメン高架橋と架道橋を接続する調整桁上を通過する時刻(約7.3sec)で車輪上昇が発生しているのが分かります。このように振動特性が異なる構造物の境界部を通過する際に脱線が生じやすいことが分かります。特に、本検討では、ラメン高架橋と架道橋の境界部で大きな車輪上昇が発生しており、脱線に至っています。また、脱線後は、車輪が逸脱防止ガードに接触することで、それ以上の水平移動が制限され、安全に誘導されていることも分かります。図4に車両と構造物の挙動の可視化図を示します。架道橋とラメン高架橋間に発生した角折れ部に、左右に加振された状態の高速な車両が進入することで脱線が引き起こされていることが確認できます。この様に、本数値解析法により走行車両と構造物の複雑な連成挙動を表現することが可能です。

長大区間の地震時車両脱線被害発生確率

大規模地震動に対して、連続する構造物群全体の評価や地震対策の効果を検討するためには、線区全体を対象とした精度の高い脱線などの被害発生確率算定手法の確立が重要となります。しかしながら、数km~数百km単位の連続する構造物全体をFEMによりモデル化すると、計算自由度が膨大になります。また、車両が走行していない、あるいは当該車両の走行に影響しない領域にまで多くの計算リソースを割かなければいけません。

図5に長大区間の地震時車両走行性を評価可能な解析システムの概要を示します。本解析システムでは、長大な構造物を疑似的な境界を用いて複数の解析区間に分割し、スーパーコンピュータの複数コアを用いて多重並行処理を実施します。また、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

☞ プッシュオーバー解析

部材の非線形性を考慮した解析モデルに対して、静的荷重を漸増載荷する解析。構造物全体系での荷重と変位の関係や損傷過程を把握することができます。

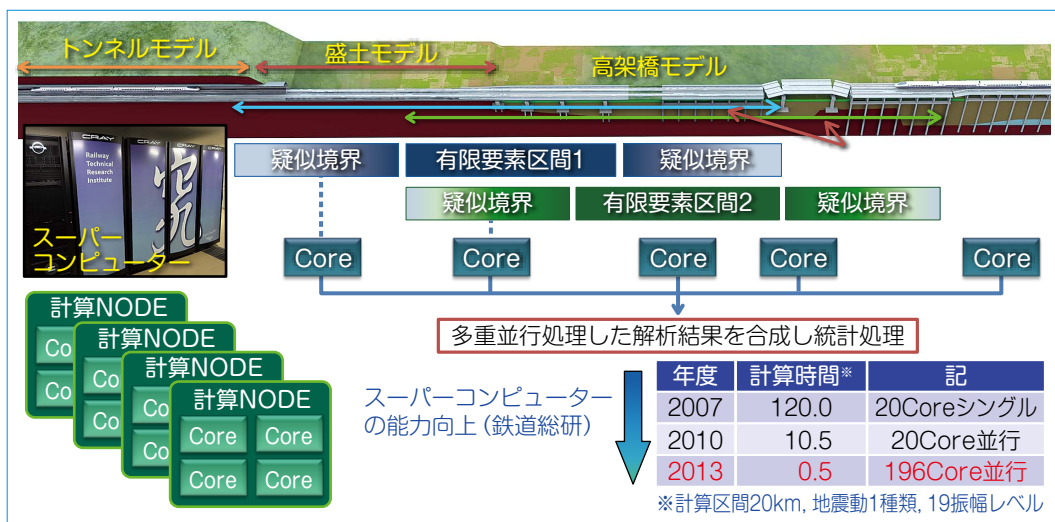


図5 長大区間の地震時車両走行性の解析システムの概念図

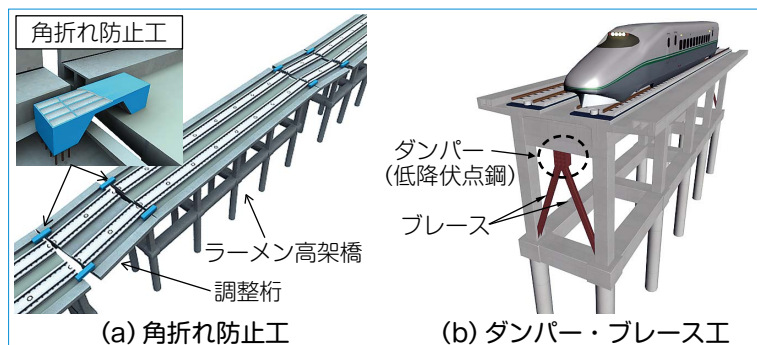


図6 対策工の概念図

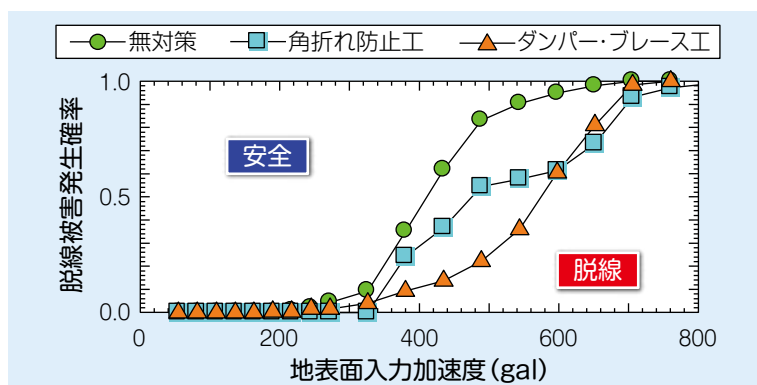


図7 脱線被害発生確率(対策工の効果)

図7に検討結果である脱線被害発生確率を示します。この図は、地震動の大きさを徐々に増加させながら脱線が発生する車両総数をカウントすることで算出しました。無対策と比較して、対策工の確率曲線が地震動の大きくなる方にシフトしている、すなわち、両対策工の効果により脱線被害発生確率が低減されていることが確認できます。また、本線区においては、角折れ防止工よりもダンパー・ブレース工の方が効果が高いことも分かります。

おわりに

走行車両と構造物の連成を考慮した数値解析手法と、それによる地震時車両走行性の解析事例を紹介しました。

近年、こうした実験などでは再現困難な現象解明および現象評価のニーズが高まっています。今後も数値解析法の改良を行うとともに、その実証を模型実験などにより進めていきたいと考えています。[RRR]

文献

- 1) 宮本岳史ほか：大変位軌道振動による実物大鉄道車両の加振実験，日本機械学会論文集（C編），Vol.72，No.706，pp.1849-1855，2005
- 2) 後藤恵一ほか：鉄道車輪とPCまくらぎの接触力に関する基礎的研究，コンクリート工学論文集，Vol.32，No.2，pp.769-774，2010

を作成し、並行計算を実施します。さらに、個々の解析を実施した後、解析結果を合成して全体線区の評価を行います。本手法により、車両の諸元、車両の速度、構造物の諸元、地震動の種類、震源の方向、各種対策工の効果などのさまざまなパラメーターの影響を解析することができます。

上記の解析システムを用いて、構造物における地震対策工の効果について検討した事例を紹介します。図6に示

す2種類の対策工について検討しました。角折れ防止工は隣接する構造物どうしを接続し境界部に発生する角折れを低減することで、ダンパー・ブレース工はブレースによる高剛性化とダンパーによる振動減衰性を構造物に付加することで、車両走行性の向上を図ります。検討線区は、延長6.3kmの複線の新幹線高架橋区間とし、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ました。