

地盤・構造物・車両の挙動解析で 地震時脱線現象を再現する



坂井 公俊
Kimitoshi Sakai

鉄道地震工学研究センター
地震応答制御研究室長



飯田 浩平
Kohei Iida

鉄道力学研究部
車両力学研究室長



小野寺 周
Meguru Onodera

鉄道地震工学研究センター
地震応答制御研究室
主任研究員



和田 一範
Kazunori Wada

鉄道地震工学研究センター
地震応答制御研究室
主任研究員

はじめに

地震が発生したとき、鉄道車両がどのように揺れ、どのような条件で脱線に至るのかを理解することは、構造物や軌道、車両の脱線・逸脱対策などによる鉄道のさらなる安全性向上を考えるうえで重要です。しかし、地震による車両の脱線は、地震の大きさだけでなく、地盤と構造物の揺れ、さらには車両の挙動が同時かつ複雑に関係して発生する現象です。

一般に、**地震動**^①・地盤・構造物・車両の振動は、それぞれの知見を持つ技術者が個別に評価することが多いですが、それぞれ単独で評価した結果を組み合わせるだけでは、実際の脱線現象を高い精度で再現することが困難です。各段階でのそれぞれのパラメーターが持つ意味と最終的な結果に与える影響を総合的に理解し、適切に判断、統合することではじめて実現象の再現が可能となります。

本稿では、地震動・地盤・構造物・車両の挙動をつなげて扱う再現解析技術について紹介します。

脱線現象を再現する解析技術

ある地震で脱線が生じた際、その現象を再現するためには、「その地点でどのような地面の揺れ（地震動）が発生したか」、「地震動に対して構造物がどのように揺れたか」、「その上を走る車両がどう動いたか」を一連の流れとして評価する必要があります。本技術では、①当該地点の地震動の再現、②構造物の動的応答解析による挙動の再現、③車両挙動解析による脱線現象の再現、を連続的に実施するとともに、各解析の結果を次の解析へと引き継ぎます。

この解析の流れを図1に示します。一般的に個別に扱われることが多いこれらの現象を統合して連続的に扱うことで、実際の現象に近い挙動の再現が可能となります。

地震動の再現技術

脱線現象の再現を行うためにはまず、対象地点における地震動を高い精度で再現する必要があります。地震動は、地点ごとの地盤による増幅の影響を強く受けるため、周辺で観測された

① 地震動

地震によって地面が揺れる現象のことです。観測された記録や地盤の特性をもとに、特定の地点でどのような揺れが生じたかを推定することができます。

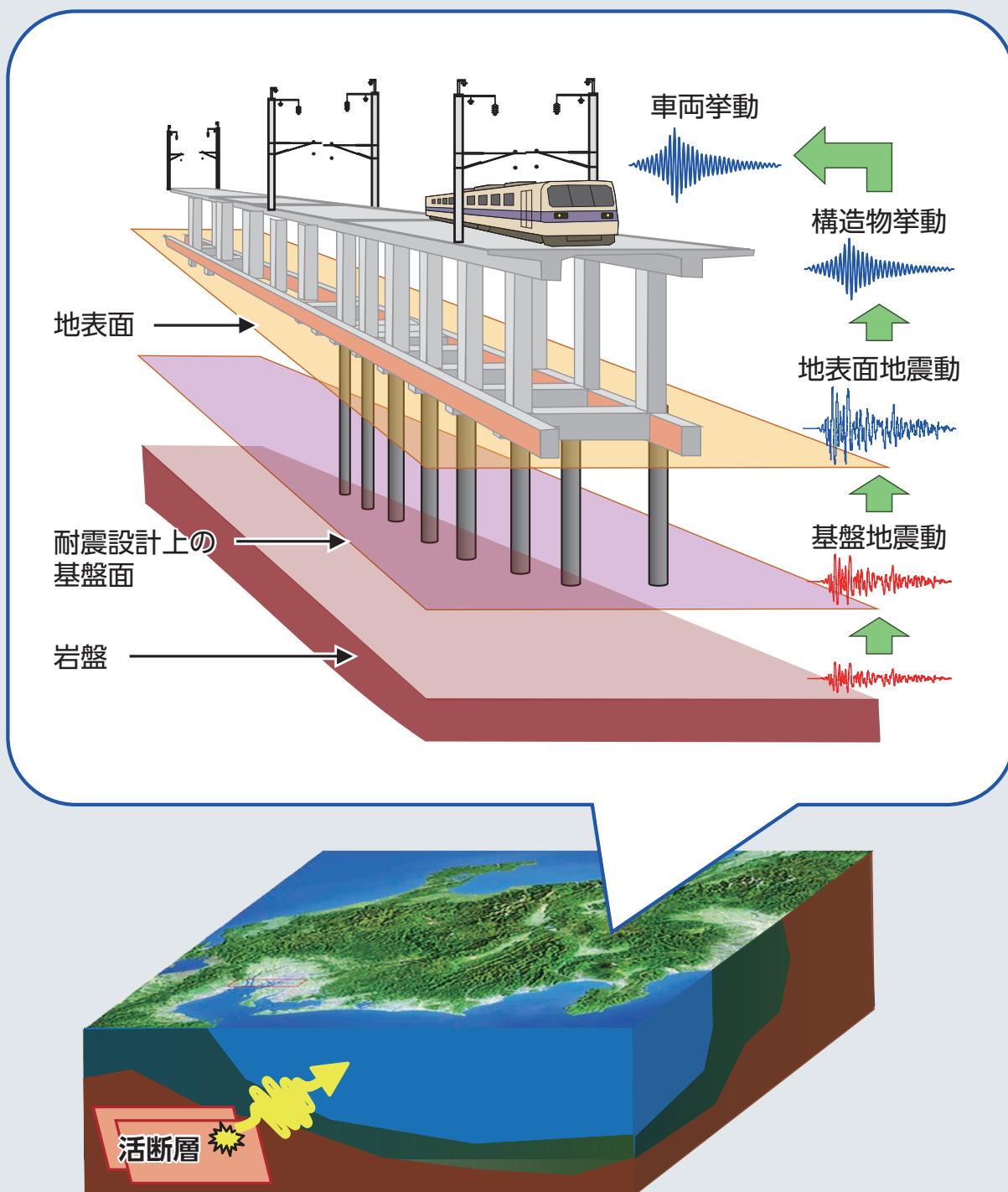


図1 地盤・構造物・車両の挙動解析のイメージ

地震記録と当該地点の地震動は大きく異なることもあります。

そのため、事象発生後の早い時期に当該地点で臨時の地震観測を実施(図2)することで、地

震観測点と当該地点の地盤による地震増幅特性の違いを把握するとともに、この違いを補正することで、当該地点の揺れを高い精度で推定します。また地表付近の地盤は、大規模地震時に

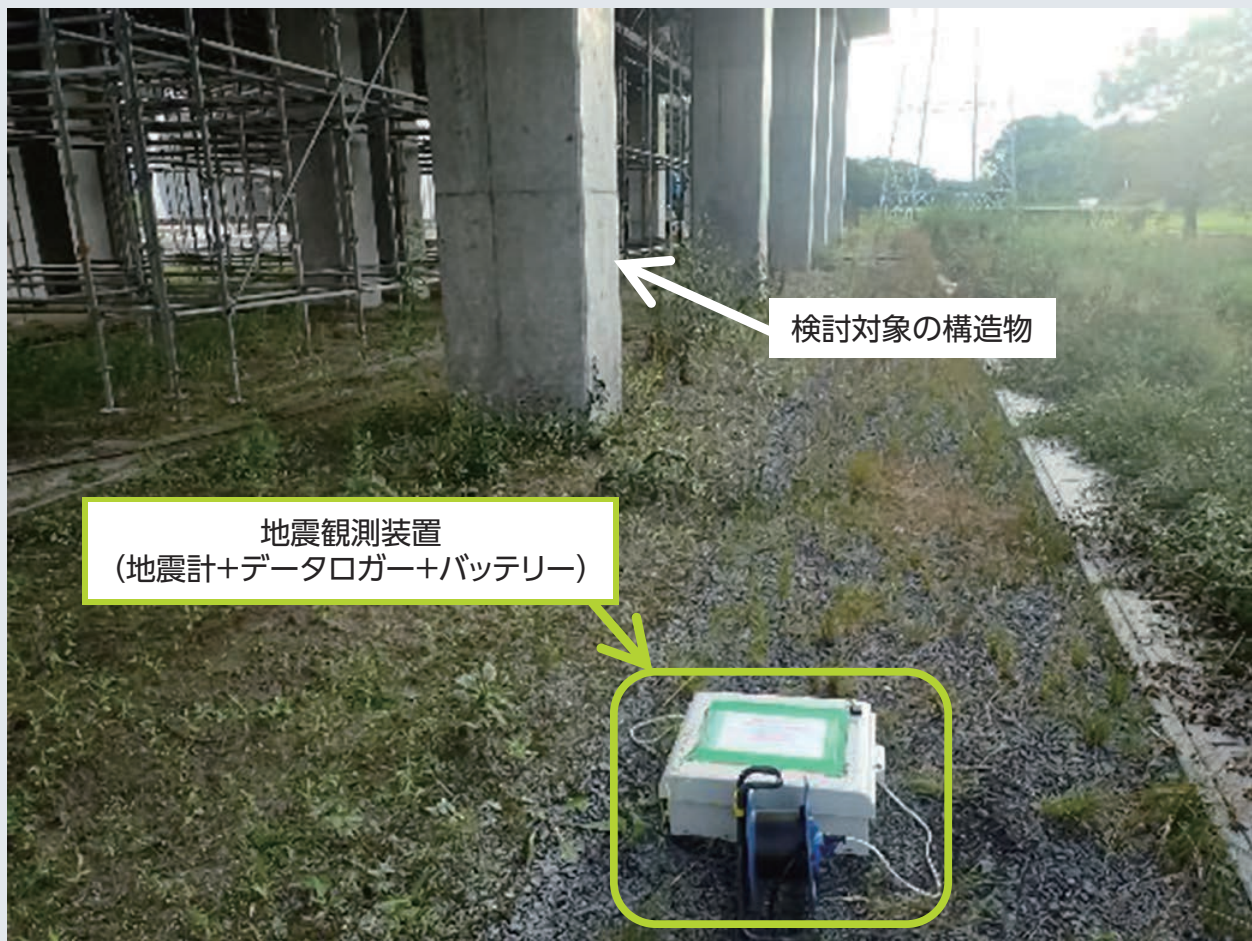
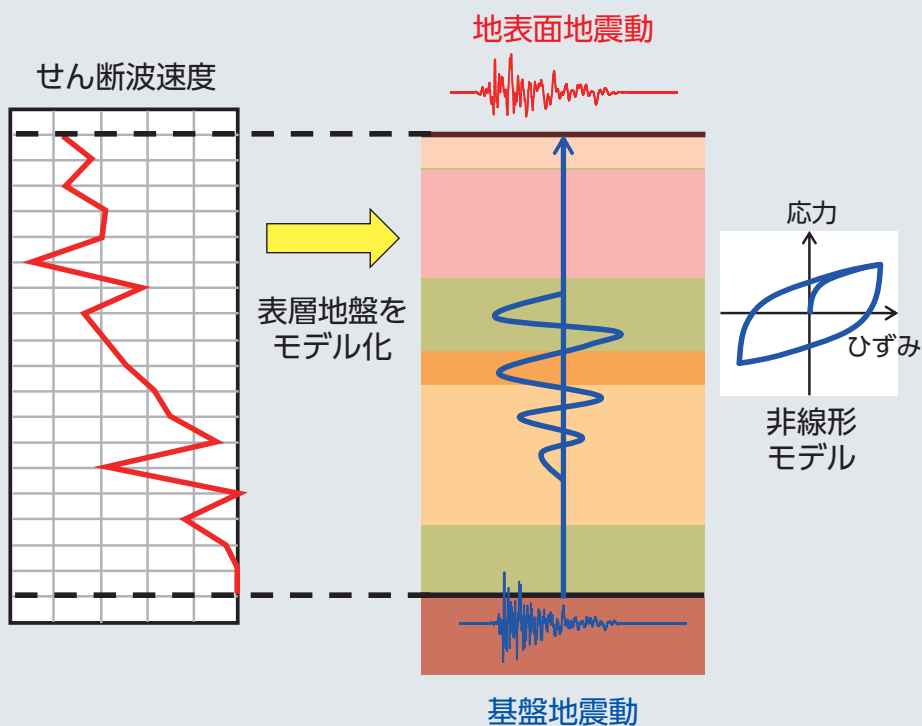


図2 臨時地震観測の状況

図3 表層地盤の非線形挙動の表現



は強い**非線形挙動**^④を示すこともあるため、この影響も適切に考慮する必要があります(図3)。このようにして構造物・車両に入力される地震動を適切に再現することが、その後の解析の精度を左右する重要なポイントとなります。

④ 非線形挙動

地盤や構造物、車両が大きな力を受けたときに、力と変形の関係が単純な比例関係にならない挙動のことです。地震時のような大きな揺れではこの影響が重要となり、現象を正しく再現するためには適切に考慮する必要があります。

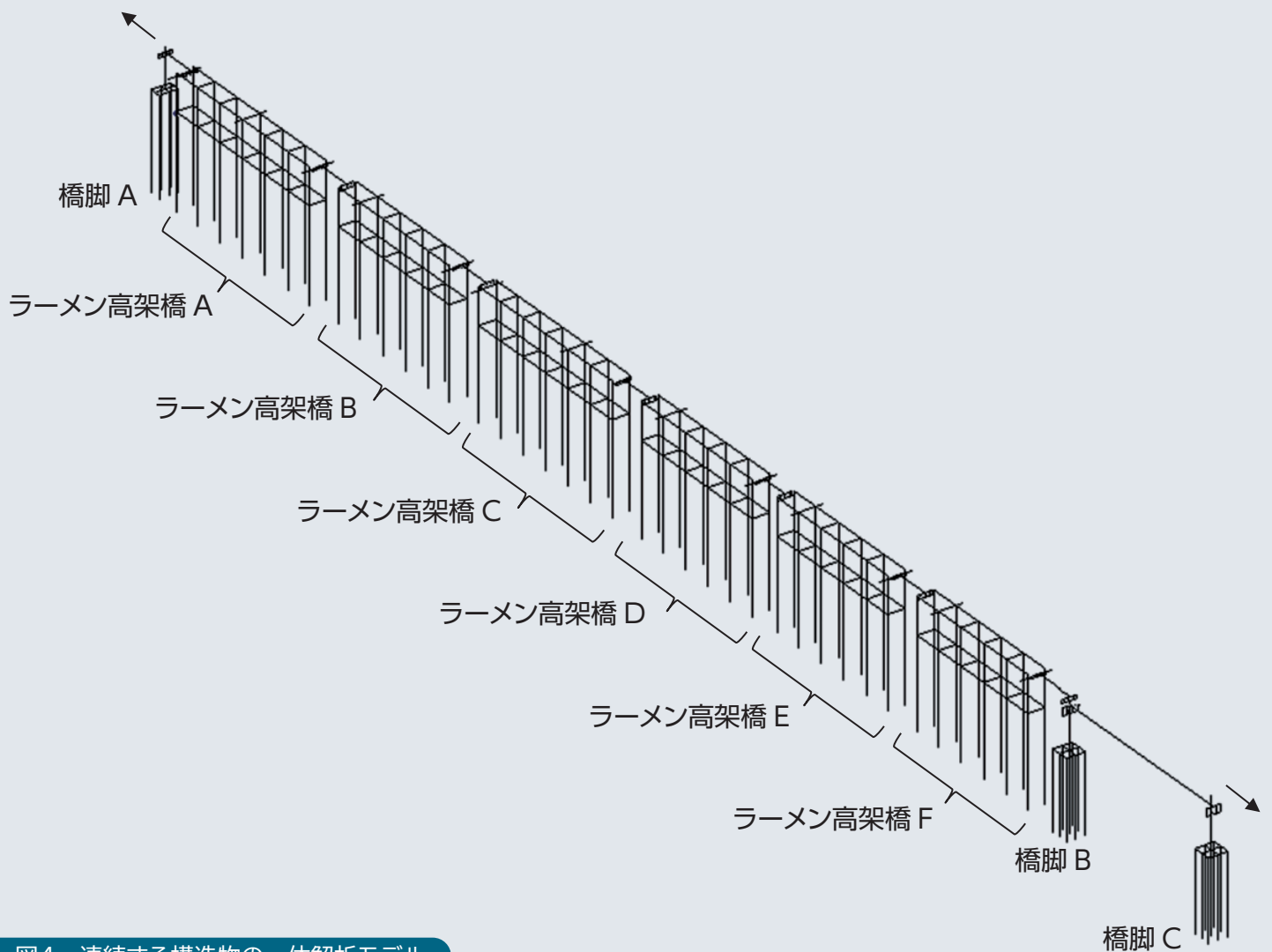


図4 連続する構造物の一体解析モデル

構造物挙動の再現技術

次に、地震動を入力として構造物の揺れを解析します。構造物は一つ一つが個別に揺れるのではなく、隣接する構造物と相互に影響を与えながら揺れます。そのため、対象区間の構造物をまとめて三次元のモデルとして表現するとともに、一体で挙動を評価することによって、隣接構造物の影響を含んだ高精度の評価が可能となります。

この時には、鉄道総研開発の鉄道地震災害シミュレーター¹⁾を用いることで、効率的かつ高い精度での解析モデル構築を可能としています。解析モデルの例として、橋脚3基、ラーメン高架橋6ブロックをまとめてモデル化した結果を図4に示します。このように、対象とする構造物を一体でモデル化するとともに、複雑な

挙動を適切に再現することで、車両に入力される軌道面の揺れを現実に近い形で求めることができます。これは、脱線現象を再現するうえで重要な技術の一つです。

車両挙動の再現技術

構造物の揺れを入力として、車両の動きを解析します。鉄道総研では、独自に開発した車両運動シミュレーションプログラムVDS²⁾を用いることで、車体、台車、輪軸などを詳細に表現するとともに、地震時の大きな揺れを高い精度で評価可能としています。

車両運動シミュレーションモデルを図5に示します。車両の走行に伴い、各輪軸の軌道上の位置が時々刻々変化するため、その位置に応じた軌道面の揺れをシミュレーションに反映して

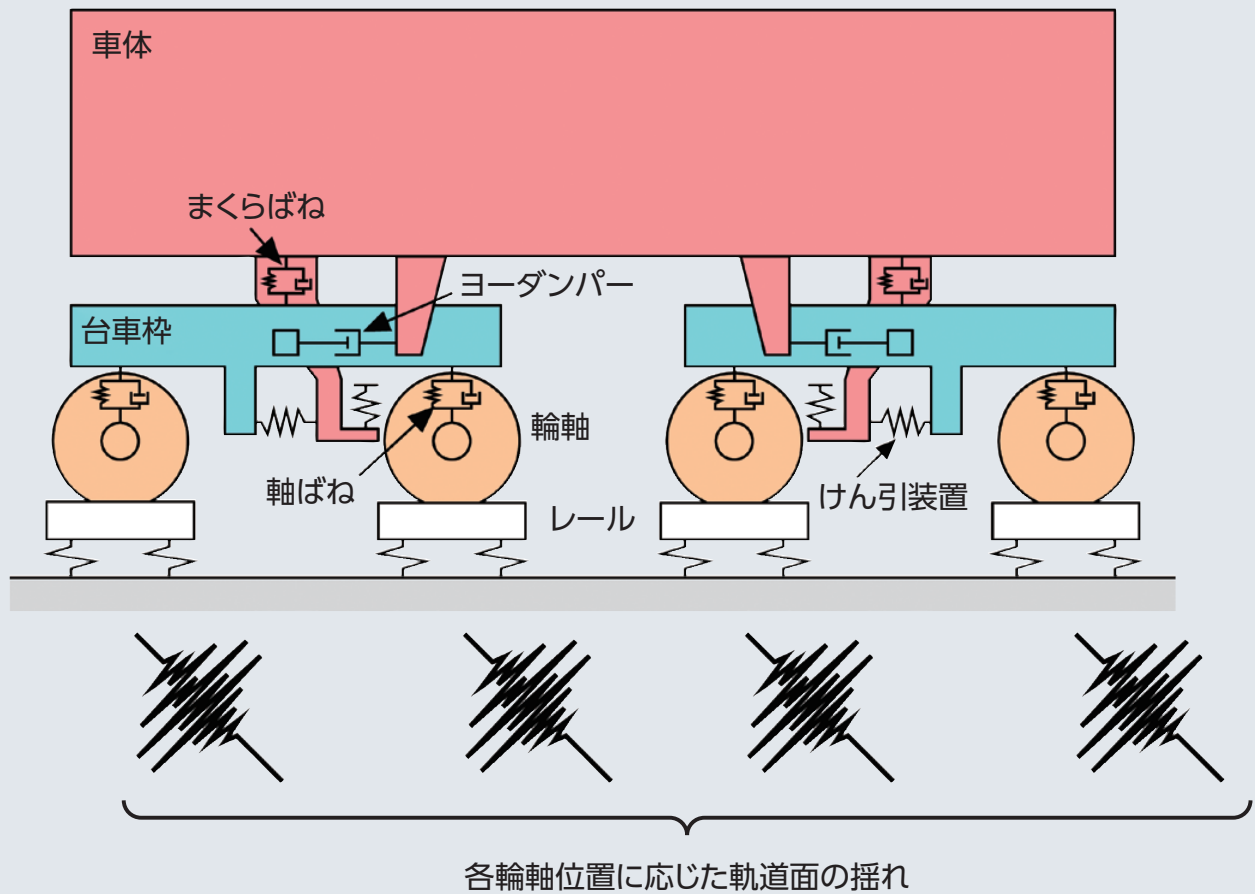


図5 車両運動シミュレーションモデル

いきます。大規模地震時には、車輪がレールから一瞬浮き上がるとともに、横方向の力が作用することがあります。

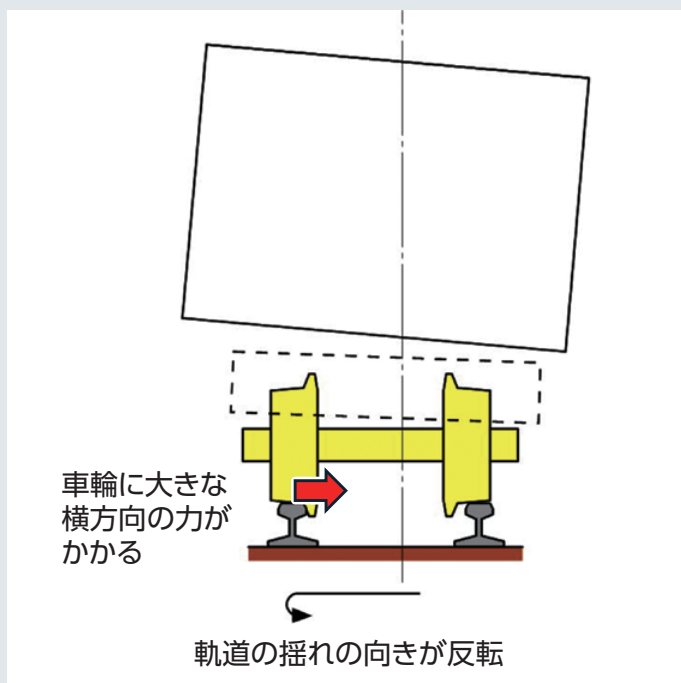
このような挙動は通常の走行では見られないものであり、これを再現するためには車両の動きを詳細に評価する必要があります。本技術により、従来は把握が難しかった脱線に至る過程を再現することが可能となります。

適用例：熊本地震における 脱線現象の再現

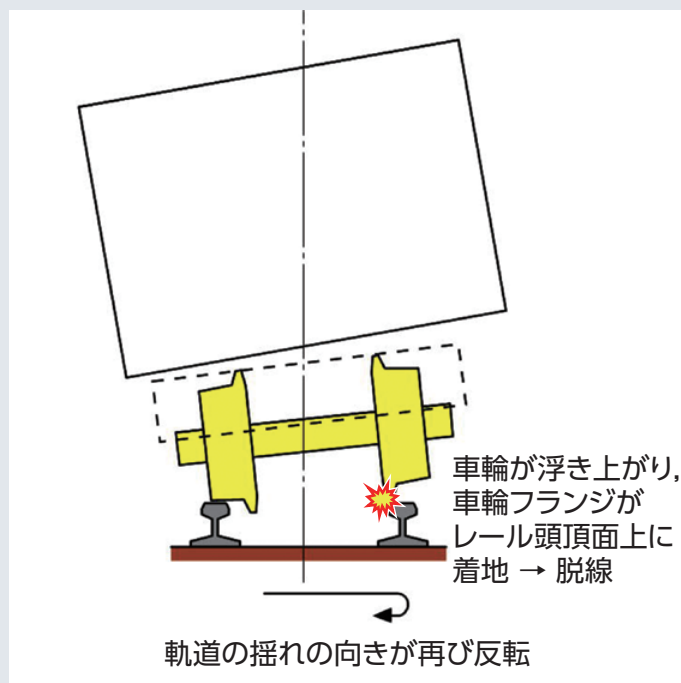
これらの技術を平成28年熊本地震に適用し、新幹線車両の脱線現象の再現を行いました³⁾。解析の結果、軌道の揺れの方法が反転するときに大きな横方向の力（横圧）が車輪にかかり（図6(a)）、反対側の車輪がレールから浮き上がったところ、再度軌道の揺れの方法が反転し、車輪フランジ¹²⁾がレール頭頂面上に着地し脱線する（図6(b)）様子が確認されました。

¹²⁾ 車輪フランジ

車輪の帽子のつばのような形状の部分指します。高さ30mm程度で、急曲線を走行するときなどにレールと接触し、脱線しないようにガイドする機能をもっていますが、その機能にも限界はあります。



(a) 時刻 21:26:42:8 付近



(b) 時刻 21:26:43:2 付近

出典：「鉄道事故調査報告書」(運輸安全委員会)
(<https://jtsb.mlit.go.jp/railway/rep-acc/RA2017-8-2.pdf>)
(2026 年 4 月 20 日に利用)に加筆

図6 熊本地震における脱線挙動の再現

このように、本技術を用いることで、実際に発生した脱線現象を再現することができました。これは、地震動、構造物、車両というそれぞれの要素を高い精度で再現する技術を連続的に組み合わせることで可能となったものです。

おわりに

本稿では、地震時の車両脱線現象を再現する技術を紹介しました。ここでは地盤、構造物、車両の挙動をそれぞれ高い精度で再現し、これらを連続的に評価することで、地震時の脱線現象を高い精度で再現しています。こうした解析技術は、過去に発生した事象の再現や原因の究明に活用されている^{例え4)5)}とともに、これ

を踏まえた対策工法の開発など、地震時の安全性向上に向けた研究開発にも活用されています。

RRR

文 献

- 1) 井澤淳, 坂井公俊, 本山紘希, 室野剛隆: 鉄道地震災害シミュレーターで構造物被害を予測する, RRR, Vol.73, No.3, pp.8-11, 2016
- 2) 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.3928-3935, 1998
- 3) 鉄道総合技術研究所編: 熊本地震における新幹線の脱線シミュレーション解析, 鉄道総研報告特別号, 2018
- 4) 運輸安全委員会: 鉄道事故調査報告書 九州旅客鉄道株式会社 九州新幹線 熊本駅~熊本総合車両所間 列車脱線事故, 2017
- 5) 運輸安全委員会: 鉄道事故調査報告書 東日本旅客鉄道株式会社 東北新幹線 福島駅~白石蔵王駅間 列車脱線事故, 2024