

強風・地震に対する車両の走行安全性向上

公益財団法人鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部長
曾我部 正道



1. はじめに

車両の走行安全性に影響を及ぼす自然外力としては、強風や地震が挙げられる。

強風による車両転覆はこれまでに、日本全国で50件以上発生しているが、台風が主たる原因であった20世紀前半に比較して、近年は、急激に発達する温帯低気圧や寒冷前線の前面に生じる積乱雲による突風で被害が発生しており、被害が発生する気象条件が多様化している^{1,2)}。また転覆の危険が生じる地点の構造物、地形条件も多様である。風速計の増設や運転規制の強化により風による車両転覆事故は減少傾向であるが、多様化する現象の理解と対策が必要となっている。

地震による車両脱線はこれまでに、60件以上が報告されている。関東地震～兵庫県南部地震前までの36件のうち脱線の主因が土木構造物の損傷であるとされたものは17件であり、軌道の平滑性を確保するために、軌道・土木構造物の損傷防止の対策が行われてきた。兵庫県南部地震³⁾以降の26件については、構造物・軌道に損傷のない地震動が主因と考えられる脱

線が23件発生しており、またこのうち3件は、新幹線の脱線であった。このため、従来の軌道・土木構造物の補強に加え、地震動による車両の横揺れに対応した対策が必要となっている。

鉄道車両は、不規則な強風や地震といった自然現象の影響を受けながら、数kmを走行することとなる。一方、鉄道車両は、車体、台車、輪軸の構成要素に分けて応答メカニズムを表すが、構成要素間のばね・ダンパーによる接合、そして車輪/レール間接触挙動は複雑な非線形挙動となる。このように、大規模な自然現象問題の中で、車両の精密な挙動を理解し走行安全性を向上させていかねばならないところに、問題の難しさがある。また実車両の走行で上記の現象を試験するには、技術的な困難が伴う。

このような背景から、鉄道総研では、高度な数値解析や試験等により被害状況を評価する手法を構築するとともに、さらにこれを活用した被害低減手法の開発を進めてきた。本稿では、これらの取り組みを紹介するとともに、走行安全性の向上策について展望する。

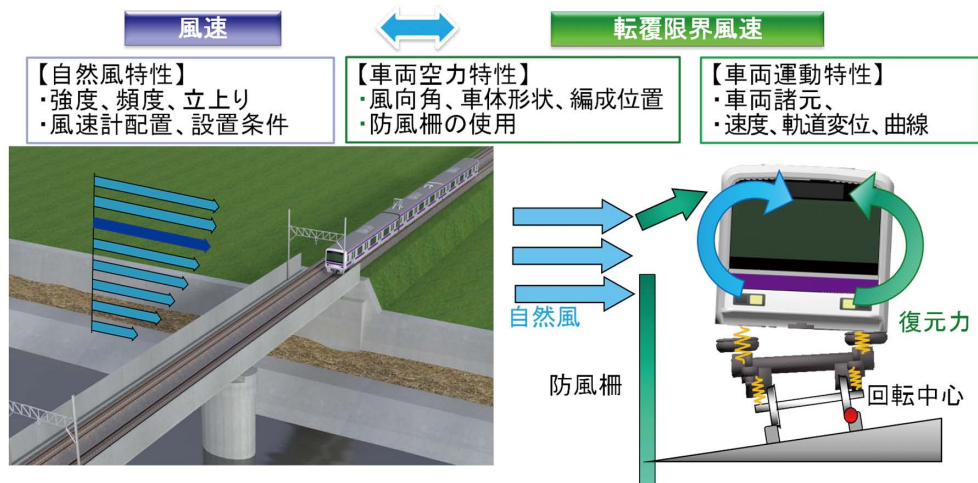


図1 強風に対する車両の走行安全性

2. 強風や地震に対する車両走行安全性の現状と課題

(1) 強風に対する車両挙動評価の現状と課題

強風に対して車両の走行安全性を確保するためには、転覆限界風速を超える危険な強風に列車を遭遇させないよう、強風監視や運転規制を行うことが基本となる(図1)。このためには、①自然風の特徴を正しく捉え、風速計により沿線の強風を監視すること、②車両の空力特性を理解すること、③車両の運動特性を理解し転覆限界風速を算定することが重要となる。鉄道総研では、これまでに現地観測、風洞試験、模型試験、実物大模型試験で各特性の把握を実施してきたが、多様化する強風被害の防止のためには、より高度な現象理解が必要となる。

自然風の特徴と車両の空力特性については、風洞内に自然風を模擬した気流(乱流境界層)を生成して行う1/40模型を用いた風洞試験により、定量化が行われてきた(図2)⁴⁾。風向角、車両の編成内での位置(先頭車or中間車)、5種類の車両形状、7種類の構造物形状に応じた空気力係数(風により車両が受ける力を評価する指標)が提案されており、これらは実物大模型の試験により検証が行われてきた⁵⁾。

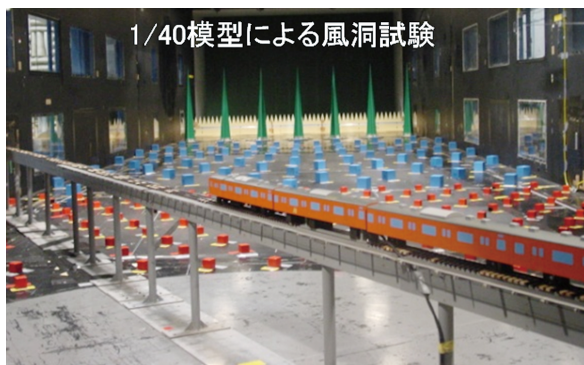
空気力を受ける場合の車両の運動特性については、実車と車両試験台を用いた動的な模擬空気力負荷試験で検討されてきた(図3)⁶⁾。自然風を模擬した空気力を車両に接続したワイヤで負荷し、振幅や周波数の影響、横風によるヨーイングモーメントの影響を評価するとともに、横風を受ける車両の動的挙動を数値解析で検討する方法を確立した。

突風に類する風の急激な立ち上がりの例として、車両がトンネルを出た直後に強風にさらされる場合を想定し、1/10車両模型と送風機を用いた横風下の走行試験が実施された(図4)⁷⁾。その結果、列車速度が高いほど、急激な横風の立ち上がりとなり、影響を受けやすいことが明らかとなった。

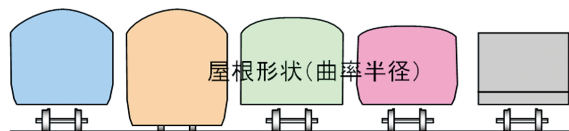
一方で、転覆の危険が生じる場合の気象、地形、構造物、車両条件は多様化しており、車両の走行安全性を向上させるためには、個々のパラメーターの評価精度を高めていくことが課題となっている。

(2) 強風に対する車両走行安全性の向上の現状と課題

強風に対する車両走行安全性の向上の検討項目は、強風監視方法、運転規制、転覆限界風速それぞれの改善により実現される。



5種類の車両形状



7種類の構造物形状

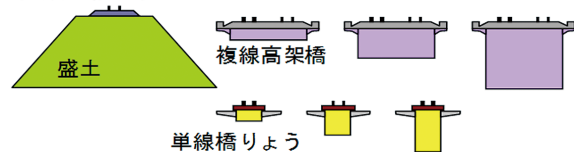


図2 自然風を模擬した風洞試験

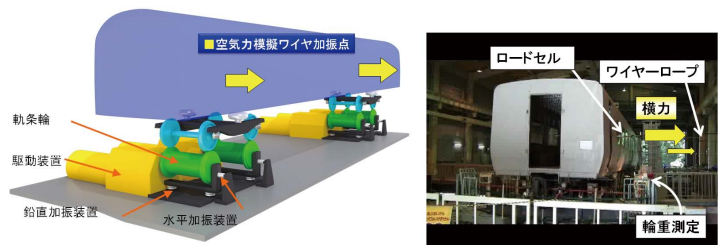


図3 実車と車両試験台を用いた動的な模擬空気力負荷試験

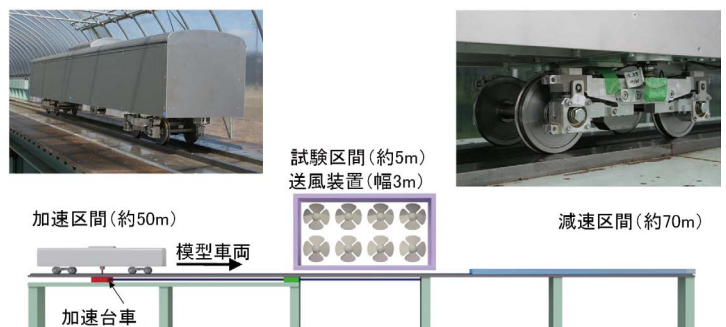


図4 車両模型と送風機を用いた横風下の走行試験

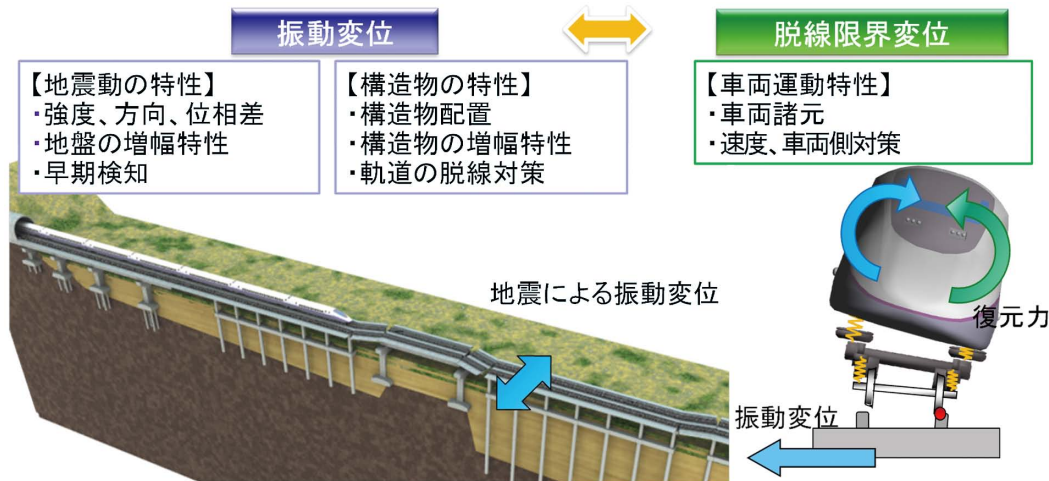


図5 地震に対する車両の走行安全性

強風監視方法については、規制区間において区間の状況を正しく把握し強風箇所へ風速計を配置すること、線路構造物の影響を受けにくい高さに風速計を設置することが重要である。

運転規制については、線区の実状に即した運転規制基準を策定するとともに、徐行による転覆限界風速の向上についても検討する必要がある。

転覆限界風速の向上については、車体形状、車両質量、重心高さ等の車両設計（特に先頭車両）や防風柵の設置等の地上側の対策が挙げられる。

防風柵は、2006年に鉄道強風対策協議会から出された「防風設備の手引き」に基づいて設置される場合が多いが、防風設備として設計されていないものの防音壁、高欄、下路桁のように防風効果が期待される構造物もある⁸⁾。

以上のように、現状において、風洞試験、実車や模型走行試験に基づき様々な対策が提案されてきたが、一方で風洞試験や測定では網羅されていない多数のパラメーターの組み合わせが存在し、また複数の対策を組み合わせた場合の総合的な評価が課題となっている。

(3) 地震に対する車両挙動評価の現状と課題

地震に対して車両の走行安全性を確保するためには、脱線限界変位を超える構造物変位に列車を遭遇させない対策が必要である(図5)。このためには、①強度、方向、位相差、地盤の増幅等の地震動の特性を理解すること、②構造物の配置、増幅特性、軌道条件等の構造物の特性を正しく捉えること、③車両の諸元、走行速度等の車両の運動特性を理解し脱線限界変位を算定することが重要である。

鉄道の地震時走行安全性に関する研究は、古くから行われてきたが⁹⁾、特に1995年の兵庫県南部地震以降、数値解析や試験が本格的に行われるようになった。

車両の走行安全性評価の基本となる正弦波を用いた脱線限界変位及び脱線形態については、実物大車両（半車体）の加振や数値解析により概ね解明されており、車両側での対策の定量評価にも活用されている(図6)¹⁰⁾。

またこれらの試験、数値解析技術は2004年の新潟県中越地震を始めとした新幹線の脱線の調査にも活用されており、観測波から当該地点の地盤の増幅を考慮した地震波を作成し、構造物の非線形性を考慮したレール位置での揺れを算定して、車両の脱線挙動の評価とメカニズム解明に用いられた¹¹⁾。これらは実際の車輪の脱線痕や構造物の損傷等の観測情報との一致も確認された。

以上のように、現状で車両の基本的な脱線挙動の表現や実地震による車両の脱線挙動の再現は可能となっているが、一方で脱線後の車両の挙動は十分に解明されておらず、被害軽減策を検討するためには、より詳細な検討方法が必要である。

(4) 地震に対する車両走行安全性の向上の現状と課題

兵庫県南部地震や過去の震災例をみると、大規模地震に対しては、車両の脱線が地表面においても生じている。このため、地震早期検知システムの利用による速やかな減速・停止や、脱線防止ガード、逸脱防止ガードによる脱線後の被災軽減対策等、鉄道システム全体から見た適切で効果的なりリスク低減が重要となる。

2005年の国土交通省の新幹線脱線協議会の提言¹²⁾

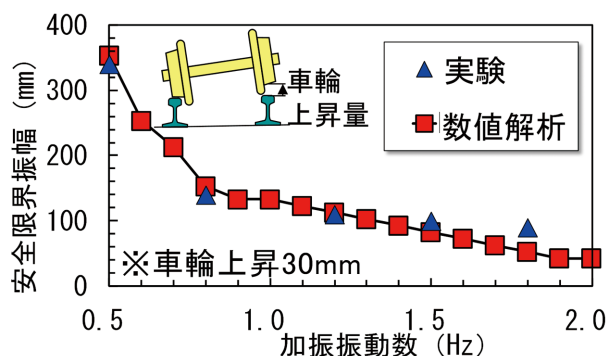
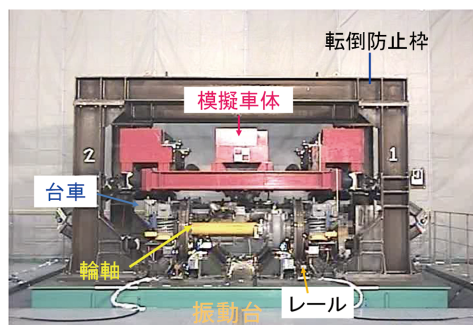


図6 脱線限界変位の算定例

以降、具体的な新幹線脱線対策の実施を進めており、また進捗状況が公表されている¹³⁾。

早期検知¹⁴⁾については、運転規制の判断指標の変更、地震規模等の推定式の変更、地震規模に合わせた範囲の送電停止機能の追加、沿線地震計の増設が行われている¹³⁾。

構造物の耐震対策としては、高架橋の耐震補強やダンパー・ブレース補強¹⁵⁾、盛土の耐震補強、高架橋間の相対変位を抑制する目違い防止工等の対策が行われている¹⁶⁾。

脱線・逸脱防止としては、軌道に設置する脱線防止ガード、逸脱防止ガード、車両の軸箱下に設置するL型ガイド等による対策が実施されている¹³⁾。L型ガイドについては、2011年の東北地方太平洋沖地震において、脱線した車両の軌道からの逸脱を防いだことが報告されている¹⁷⁾。

新しい対策の例として、地震時脱線対策用左右動ダンパーとクラッシュブルストッパーの例を示す(図7)¹⁸⁾。地震時脱線対策用左右動ダンパーは、地震時には大きな台車-車体間の相対変位が発生することに着目し、ピストン速度が通常の使用範囲を超えた場合に減衰力が増加するようになっている。通常の使用範囲の走行との両立については、走行試験により確認を行っている。クラッシュブルストッパーは、車体と台車間に過大な力が作用するとストッパー座が潰れて遊間が拡大し、地震対策左右動ダンパーの可動範囲を広げる手法で、これらを併用することにより走行安全性を向上させることができる。

以上のように、現状において、新幹線を中心に様々な対策が提案されて進展してきたが、一方で対策効果の定量化、新技術の評価、複数対策の総合的評価が課題となっている。

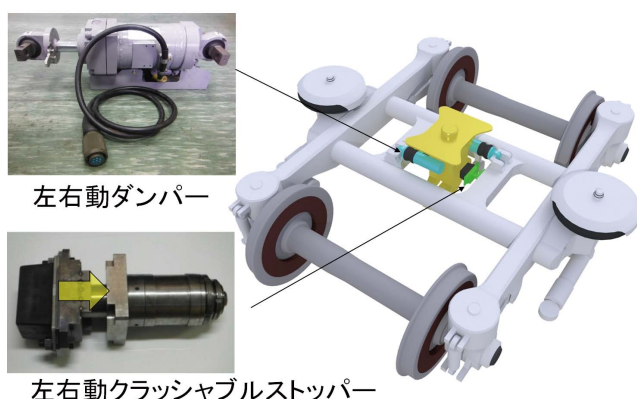


図7 地震時脱線対策用部品

3. 高度な解析技術で強風や地震に備える

前章までに述べたように強風や地震に対して備えるためには、車両の走行安全性に対する現象やメカニズムの高度な理解と、効率的な技術開発が必要となる。

しかしながら大規模な自然災害の中を高速で走行する車両の挙動は試験による評価が技術的に困難であり、危険、費用、時間が伴う。また自然外力から車両の応答を求めるまでに分野ごとに考慮すべきパラメーターが多く、膨大な組み合わせを考慮しなければならない。

上記の評価困難性、多様性に対応するためには、高度な解析技術により被害形態・対策効果を推定するのが有効な手法である。

(1) 大規模数値シミュレーション

大規模数値シミュレーションは、近年のスーパーコンピュータの計算能力の向上を生かし複雑かつ大規模なモデルを忠実に再現する手法である。空間的・時間的に解像度を高めて現象解明を行うものである。

例として直交格子LES (Large Eddy Simulation) に

よる解析を挙げる(図8)¹⁹⁾。縮尺模型による風洞試験をスーパーコンピュータで再現したもので、LESにより影響度の大きな渦を効率的に解析し、2400コアの並列計算で最小格子間隔1mm、格子数10億点の解像度の高い数値計算を実現している。

風洞試験に比べて多様な車両、構造物条件の組み合わせが検討可能であり、模型作成、試験実施費用、時間を削減した検討が可能となる。また車両床下や構造物の形状等、模型による風洞試験では困難なディテールまでモデル化が可能であるという特徴もある。

現状では風洞試験の完全な置き換えまでには至らないが、試験条件の絞り込みやパラメータの補間には有効であり、今後、創造的なアイデアを簡単に試行できるイノベーションツールとしての発展が期待される。

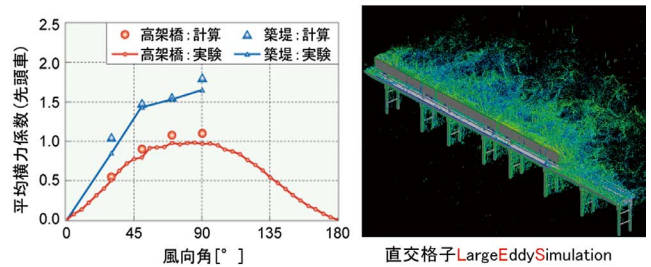


図8 直交格子法による乱流風洞試験の評価の例(大規模シミュレーション)

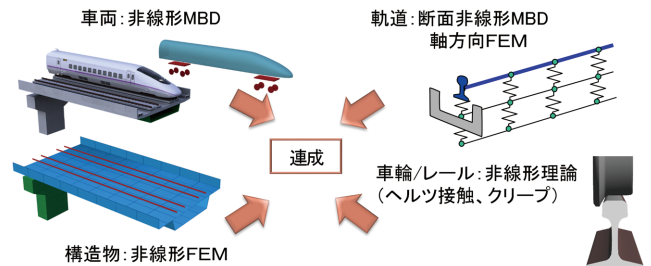


図9 地震時の車両走行安全性の検討例(連成シミュレーション)

(2) 連成シミュレーション

事象全体をモデル化するために自然外力、車両、軌道、構造物、防災の分野の成熟した理論や解析を連成させて、自然現象の中の車両挙動を検討する方法で、現象や物体から特徴的な要素と構成則を組み合わせて効率的な解析手法を構築するものである。

地震時の車両走行性の検討例では、車両をマルチボディダイナミクス(MBD)で、軌道をMDBと有限要素法(FEM)の合成で、構造物をFEMでモデル化し、車輪とレール間の接触を考慮して解く。車両、軌道、構造物については相互作用の影響が考えられるため、特徴を捉えた力学モデルをそれぞれ構築して、微小な時間単位で物理量の釣り合いを考慮して解く(図9)。

また、より巨大な地震に対する脱線後の被害形態と対策効果を検討する場合には、脱線後の車両挙動や車

両と地上設備との接触までを考慮する必要がある。ここでは車両側の接触点と構造物側の接触面を用いた接触解析方法について示す(図10)²⁰⁾。MBDでモデル化した車両に任意配置の接触検知点を設け、FEMでモデル化した地上設備(軌道・構造物)に任意形状の接触面を定義し、検知点/接触面間に発生する接触力をペナルティー関数法(仮定の食い込み量に対して接触力を定義する方法)で評価する手法を開発している。図は下路桁と車体の接触や、輪軸のギアボックスとレールの接触の事例を示している。このような手法は、車両と接触構造物の全てを有限要素でモデル化した場

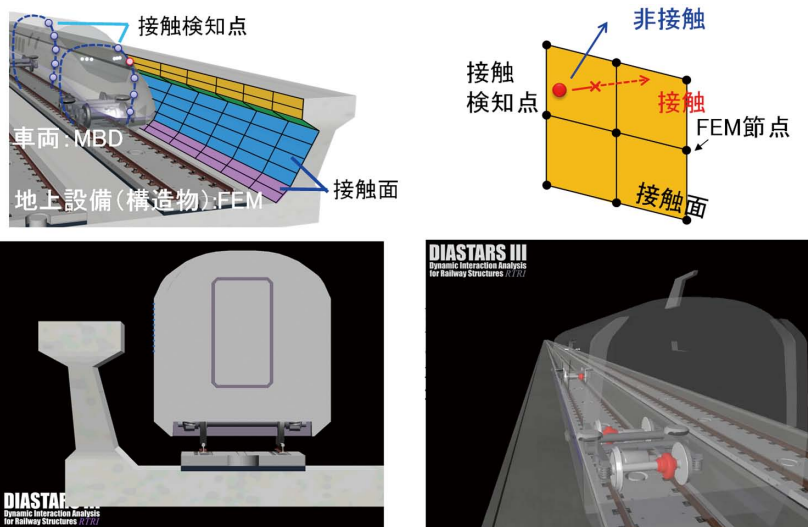


図10 脱線後の車両と構造物の接触の検討例(連成シミュレーション)

合に比べて1/100以下の計算時間となり、効率的な技術開発に寄与することができる。

4. リスク評価で強風や地震に備える

鉄道路線の弱点箇所を抽出し、効率的な対策を実施するためには、鉄道システム全体のリスクを適切に評価し、限られた投資リソースを有効に活用できる、精度の高いリスク評価システムの構築が必要であると考えられる。リスク評価については既に多くの研究がなされており、基本的な評価手順は確立されていると考えられるが、重要となるのは具体的な評価に用いるデータの精度である。

シミュレーションに用いる自然外力の期間再現確率、変動要因の評価、いわゆるハザード曲線（指標に対する年超過発生確率等）については、鉄道に限らず当該研究分野において相当程度進んでおり、他分野の知見活用が有効である。

一方、鉄道独自のイベントツリー（被害形態の分類）、被害形態毎のフラジリティ曲線（指標に対する被害発生確率）、被害形態ごとの被害時コスト等については、今後の重要な検討課題になると考えられる。

しかしながら現状では、リスク評価手法を用いた被害軽減効果の絶対評価は上記のような未検討の課題もあり困難である。このため、一定精度のリスクの相对比较手法を開発して、鉄道事業者の施策判断に貢献することが当面の研究課題であると言える。

モデル線区の強風時のリスク評価の検討例について、気象数値シミュレーションと地形データを用いる手法を示す(図11)²¹⁾。この手法では、気象モデル(3km格子)を用いて過去の強風事例から平均風速の再現期待値を

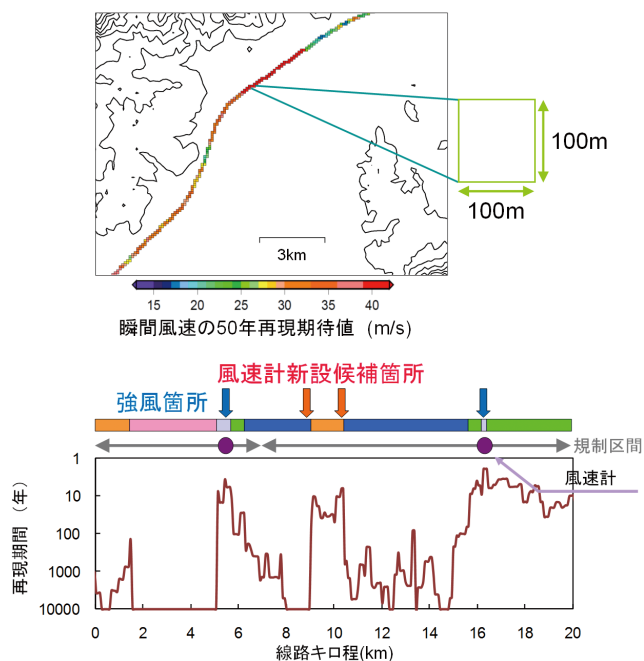


図 11 モデル線区の強風時のリスク評価の検討例

算出し、気流モデル(200m格子)を用いて細かな起伏に沿って流れる風向と平均風速の再現期待値を算出する。更に地形因子解析により、統計的な手法を用いて最大瞬間風速に変換して100m間隔の瞬間風速の再現期間を算出し、線区における最大瞬間風速の再現期待値を求める。これをモデル線区において算出した線路構造物の形状別の転覆限界風速と比較することにより、転覆限界風速以上の強風発生確率を算出し、規制区間の設定や風速計の設置位置の検討を行うことができる。

地震時の列車走行性をリスク評価する手法については、長さ6.3kmのモデル線区における検討例を示す(図12)²²⁾。この手法では全線を有限要素法により

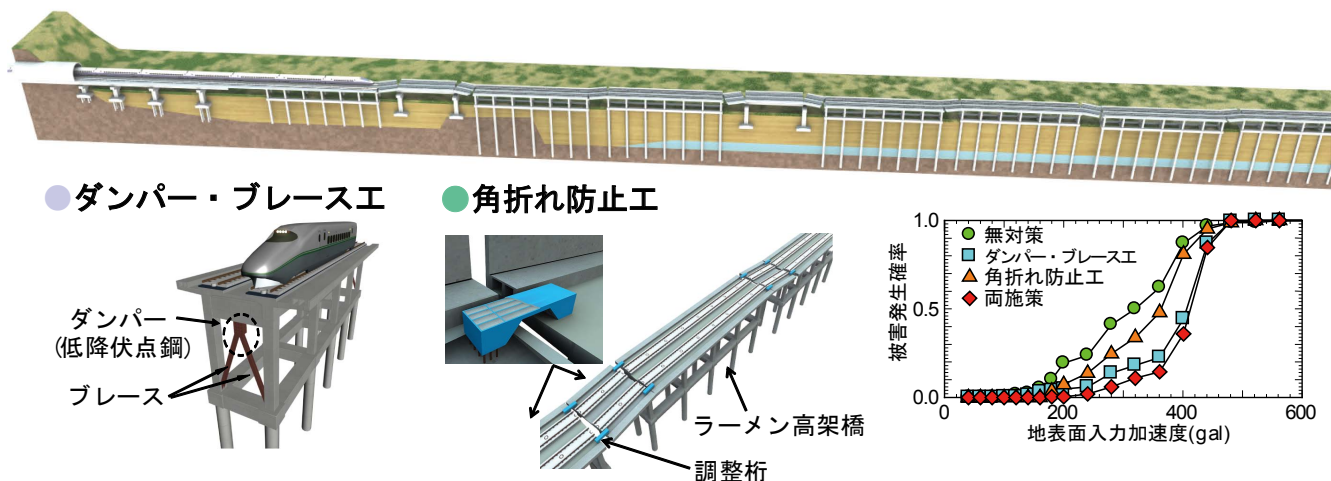


図 12 モデル線区の地震時のリスク評価の検討例

モデル化し、地震開始時の構造物上における列車走行開始位置を少しずつ変化させながら被害発生確率を評価する。実際の解析では、スーパーコンピュータの計算リソースとして200コアを使用し、列車走行開始位置ごとの計算ケースを割り当てて、並行計算により効率的に解いている。図は海溝型地震動L2スペクトル1の波形を用いて、ダンパー・ブレース工や角折れ防止工による走行安全性の向上効果を、地表面地震動を指標として評価した例である。このような検討では、不確定要素の積み重ねが多くなり、絶対値としての結果の解釈には注意が必要であるが、対策工の相対比較や相乗効果の評価には有用であると考えられる。

5.さらなる走行安全性の向上を目指して

強風や地震に対する車両の走行安全性は、技術的に試験が困難な問題であり、高度な解析技術やリスク評価を活用した現象解明が重要であることを示した。最後に、鉄道総研のさらなる取り組みについて整理する。

(1)大規模数値シミュレーション

演算技術の進歩に対応して計算機の更新、並列化を進め空間的、時間的に計算規模の拡大を進めると同時に、演算能力の向上を活かした鉄道固有の解析ツールを整備し推進する必要がある。また竜巻やダウンバースト等による新たな被害形態の評価にも取り組む必要がある。

このような取り組みにより縮尺モデルではモデル化できない床下機器周りの細かい風の流れや、スケールの計測機器が設置できない物理現象を捉えることができる。

大規模シミュレーションは、現状では風洞試験を完全に置き換えるまでには至っていないが、パラメータ検討における依存度は更に上昇していくと考えられる。

(2)連成シミュレーション

鉄道固有の特徴的な解析手法の組み合わせを推進していく。例えば横風に対する流体解析と車両運動解析を連成させることにより、横風を受けながら車両が走行する効果や、横風による車両の傾斜が空気流に及ぼす影響といった課題にも取り組むことができる。地震時については、例えば軌道座屈解析と車両運動解析を連成させることにより、地震を受けて大きく変形したバラスト軌道上を車両が走行する場合の影響を評価することができる。

(3)リスク評価

線区全体の総合評価に適用するに当たり意思決定の精度向上を図るとともに、実用的な計算負荷を確保しなければならない。

軌道、車両、構造物の新しい様々な脱線・逸脱対策に対するモデル化や、脱線後の車両の挙動や地上設備との接触、被害形態についてもモデル化の精度を向上させていく必要がある。

こうした取り組みにより理想的な車両、軌道、構造物諸元の探索が可能となり、総合的な鉄道の安全性の向上が実現できると考えられる。例えば車両諸元に対する具体的な検討としては、車体の低重心化、ばね・ダンパーの取り付け位置、ダンパーの高減衰化、ストッパ間隔調整等が挙げられる。

強風や地震に対しては鉄道システム全体からみて適切で効果的なリスク低減手段が重要となる一方で、車両、軌道、構造物の各分野における対策については、相乗効果あるいは相殺効果が想定される。このため必要な対策を、効率的に選択していく必要がある。

6.おわりに

鉄道システムは、様々な技術の集合体であり、強風や地震に対する車両の走行安全性の現象解明には、防災、車両、軌道、構造物に対する十分な理解が必要であり、その評価には困難が伴う。一方で複雑系であることの特徴を活かし、個々の分野において安全性を追求するとともに、シミュレーション技術を駆使して効率的に全体システムの安全性を向上させることが可能である。このような対策を着実に積み重ねることにより、車両の走行安全性の向上を図っていきたい。

本稿の一部は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した。

参考文献

- 1) 藤井俊茂：自然災害に対する列車の運転規制、鉄道総研報告、Vol.21、No.1、pp.1-6、2007
- 2) 竜巻等の突風データベース、気象庁ホームページ、<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado/index.html>
- 3) 鉄道総合技術研究所：兵庫県南部地震鉄道被害調査報告書、鉄道総研報告、特別第4号、1996
- 4) 鈴木実、種本勝二、斎藤寛之、今井俊昭：自然風を模擬した車両に働く空気力に関する風洞試験法、鉄道総研報告、Vol.17、No.11、pp.47-52、2003

- 5) 鈴木実、種本勝二：横風に対する車両の空力特性に関する実物大試験と風洞試験、第14回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2007) 講演論文集、pp.231-234、2007
- 6) 日比野有、金本啓幸、下村隆行：1車両モデルを用いた車両の横風に対する安全性評価、鉄道総研報告、Vol.26、No.10、pp.5-10、2012
- 7) 日比野有、金本啓幸、佐久間豊：急激な風の立ち上がりに対する車両の応答に関する基礎研究、鉄道総研報告、Vol.27、No.12、pp.23-28、2013
- 8) 鉄道強風対策協議会：防風設備の手引き、2006
- 9) 八十島義之助、松本嘉司、西岡隆、大嶋孝二：振動軌道上の鉄道貨車の走行安全性に関する実験的研究、土木学会論文報告集、No.313、pp.113-124、1981
- 10) 宮本岳史、松本信之、曾我部正道、下村隆之、西山幸夫、松尾雅樹：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、2005
- 11) 地震による新幹線脱線シミュレーション解析グループ：新潟県中越地震新幹線脱線シミュレーション解析、鉄道総研報告特別第52号、2008
- 12) 国土交通省 鉄道局 新幹線脱線対策協議会：新幹線脱線対策に係る中間とりまとめについて、2005
- 13) 国土交通省 鉄道局技術企画課：平成27年度末における新幹線脱線対策の進捗状況について、2016
- 14) 中村豊：総合地震防災システムの研究、土木学会論文集、No.531/I-34、pp.1-33、1996
- 15) 松本信之、曾我部正道、岡野素之、涌井一、大内一：鋼製ダンパーブレースを用いた鉄道高架橋の振動性状改善に関する研究、構造工学論文集、Vol.46A、pp.547-554、2000
- 16) 東海旅客鉄道株式会社：東海道新幹線の脱線・逸脱防止対策について、2012
- 17) 国土交通省 航空・鉄道事故調査委員会：鉄道事故調査報告書RA2013-1 I東日本旅客鉄道株式会社 東北新幹線仙台駅構内 列車脱線事故、2013
- 18) 中嶋大智、鈴木貢、西山幸夫、宮本岳史、梶谷泰史：地震時脱線対策クラッシュブルダンプの開発、鉄道総研報告、Vol.27、No.10、pp.17-22、2013
- 19) 野口雄平、中出孝次：横風空力特性に関する風洞試験を模擬した数値シミュレーション、鉄道総研報告、Vol.31、No.9、pp.11-16、2017
- 20) K. Goto, M. Sogabe, M. Tanabe and T. Watanabe : An efficient contact analysis method between the carbody and the railway structures using a multi body dynamics, Procedia Engineering, Vol.199, Supplement C, pp.3272-3277, 2017
- 21) 荒木啓司、福原隆彰、島村泰介、今井俊昭：数値解析手法を用いた鉄道線区における強風箇所の抽出方法、鉄道総研報告、Vol.24、No.5、pp.29-34、2010
- 22) 曾我部正道、徳永宗正、後藤恵一、渡辺勉、松岡弘大：各種対策工が地震時車両走行性に関するフラジリティ曲線に及ぼす影響、鉄道工学シンポジウム論文集、Vol.18、pp.39-46、2014