

地震時の鉄道システムの動的応答解析に関する研究の現状

鉄道力学研究部

部長 鈴木康文

1. はじめに

地震時の鉄道の安全を確保しそれを高めるためには、鉄道システムを構成する各要素がどのような様に地震時に応答するのかを知り、それに基づいて安全性向上策を検討する必要がある。地震波は震源から鉄道構造物のある地点までにどのように伝播し、地表面に達するのか、構造物や軌道はそれに対しどのように応答し、そこを走行する列車はどのように揺れるのか。このような現象解明の研究成果に基づき、構造物、軌道、車両において、列車の走行安全性向上対策を検討するとともに、脱線後の車両挙動解析が試みられている。ここでは、これらの研究の現状を紹介する。

2. 地震波の伝播メカニズムと予測法

地震時の構造物の応答、その構造物上を走行する車両の挙動を予測するためには、対象とする地点の地震波がどのような様になるのかを正確に予測する必要がある。地震動を予測するためには、断層においてどのような破壊が発生したのか(震源特性)、生じた地震波がどのように地殻内を伝わるのか(伝播経路特性)、対象地点の地盤構造によって地震波動がどのような影響を受けるか(サイト特性)、といった内容をなるべく精度良く評価する必要がある。これらを実地評価する手法としては、大別すると、①既往の観測記録から経験的に上記の平均的特性をモデル化する手法と、②上記の特性を理論的に評価する手法があり、それぞれ予測精度向上のための研究がなされている。

また、地震による地盤や構造物の揺れに大きな影響を及ぼす現象として、液状化が挙げられる。液状化が発生すると、構造物の沈下や傾斜により大被害に結びつくので、液状化の予測法や液状化の防止・軽減対策に関する研究が行われている。

3. 地震時の構造物の挙動解析と安全性向上策

地震動による構造物の応答および列車の走行安全性を検討するためには、車両と構造物との動的相互作用を考慮しなければならない場合がある。そのための解析ツールとして従来開発してきた車両・構造物動的相互作用解析プログラム(DIASTARS)を、構造物や車両各部が大変形したときの非線形性を考慮できるよう改良し、地震時の列車走行安全性を検討できるようにした。

また、高架橋における桁の支承部のモデル化手法の研究、構造物の境界部が列車走行性に与える影響について研究が行われている。

高架橋上の列車走行性を改善させる対策としては、構造物変位を可能な限り抑制する手法が基本となると考えられる。具体的には、高架橋については制震ブレース等の変位抑制工法のほか、杭張出し高架橋、シートパイル基礎などが提案されている。橋りょう上の列車走行性を改善させる対策としては、免震支承等を用いて長周期化をすることが、構造物の変位は増加するものの車両の固有周期からは離れるため、走行性の向上に有効であると考えられる。

4. 地震時の軌道の挙動解析と安全性向上策

地震時の軌道変形は①構造物の変状による軌道変状、②構造物境界での角折れ、目違い③構造物境界での高低変位、④一般部での軌道座屈に大別できる。このうち、④については、軌道を支える構造物や路盤等に特段の変状が見られない有道床軌道でも、強地震動に起因する道床バラストの流動化や道床抵抗力の低下により軌框の座屈現象や著大軌道変位が発生するものである。これに関して、応答値の算定に動的解析法を採用した耐震性能評価法は確立されていない。

そこで、地震時の動的応答解析に適用可能な数値解析モデルを構築することを目的として、累積損傷度理論に基づく FEM 変形解析を用いた有道床軌道の地震時の簡易な変形予測手法が研究されている。また、道床構造を精密に模擬した不連続変形法解析によるバラストの挙動解析、温度変化に伴う軌道の変形、レール軸力増加や振動下における道床抵抗力特性を考慮した有道床軌道の動的座屈解析による耐震性の評価が試みられている。

耐震対策については、座屈防止板、道床安定剤、バラスト止め等による道床抵抗力向上策の検討が行われている。

5. 地震時の車両の挙動解析と安全性向上策

地震時の車両挙動解析については、1995年の兵庫県南部地震以降、精力的に解析ツールの開発が行われてきた。従来の車両運動シミュレーションと異なり、地震時には車両各部が大きく変位することや、ばね、ダンパ等の大変位時の特性を考慮するなど大幅な改良を行った。このシミュレーション (VDS) は、実台車を用いた加振実験の結果と比較して、その精度が検証されている。

1 車両の解析モデルを結合し、編成車両としての挙動解析が可能となっており、車体間の結合ばねが走行安全性に与える影響についての検討がなされている。

また、バラスト軌道上の車両挙動解析をより現実に近いように、まくらぎが列車荷重により横変位する影響を考慮できるようシミュレーションを改良している。

地震時の走行安全性を高めるための車両側の対策として、現状のばね、ダンパの特性等を変更した場合、地震時に大きな荷重が加わると潰れて遊間が拡大するような左右動ストッパを装着した場合、ダンパが大変位し高速作動するとき大きな減衰力を発生させる特性のダンパを装着した場合などの、走行安全性について検討を有効策を提案している。

6. 地震時、脱線後の車両挙動解析

脱線した後に被害を拡大させないためには、列車が軌道からそれずに走行することが重要となる。現在、各種の逸脱防止のため軌道側、車両側それぞれから対策が検討されているが、対策を検討するにあたって、列車が脱線後にどのような挙動をするのか推定する手法が望まれており、機構解析ソフト (ADAMS) を活用して、列車の脱線後の挙動解析に取り組んでいる。逸脱防止のためのコンクリート壁に車輪が高速で衝突する場合の変形と荷重の関係を詳細な解析で求め、等価な接触ばね特性を解析ソフトに組み込んで解析をするなど多くの工夫をしている。

7. おわりに

地震時の鉄道システムの動的応、の中でも主として列車走行性に関する取組の現状を紹介した。走行安全性の向上のためには、構造物、軌道、車両の挙動解析に基づいた、全体としてバランスのとれた対策が必要であり、トータルとしての鉄道システムの安全性向上策の検討が必要である。