

構造物の耐震技術に関する最近の研究開発

佐藤 勉*

Recent Research and Development of Structural Seismic Technology

Tsutomu SATO

Structures Technology Division has carried out researches and development of practicable technology with respect to seismic design and seismic retrofitting of railway structures. This paper describes briefly several examples of subjects of the research and development for seismic technology. Furthermore, the author introduces the prospects of revision of the Design Standards for Railway Structures (Seismic Design) in the paper.

キーワード：構造物，耐震設計，耐震補強，技術基準

1. はじめに

構造物技術研究部では、鉄道構造物の耐震設計や耐震補強に関する研究開発を継続して実施している。本稿では、鉄道構造物の耐震技術に関し、現在精力的に取り組んでいる課題のうち、将来に向けた研究開発課題として行っている「既設鉄道施設の耐震性評価と対策」、および鉄道技術基準整備の一環である「鉄道構造物等設計標準（耐震設計）」¹⁾（以下、耐震標準という）の改訂について、その概要と今後の展望について紹介する。なお、これら課題以外にも、構造物技術研究部では、耐震技術に関する研究開発に取り組んでいるが、紙面の都合上、今回は紹介を省かせて頂く。

2. 「既設構造物の耐震性評価と対策」に関する研究開発

2.1 研究の目的

鉄道総研では、将来に向けた研究開発課題として13課題に取り組んでいるが、その一つとして、「既設構造物の耐震性評価と対策」に関する研究開発を構造物技術研究部が中心となって実施している。鉄道システムは、土木・建築構造物、軌道、電力設備、信号設備、列車などから構成されているが、耐震診断や耐震補強は、それぞれ別個に評価・対策が行われてきた。そこで、別個に行われてきた評価を共通の考え方で行うことで鉄道施設の地震時挙動を共通の指標、尺度で評価し、どのような順序でどのような対策を施すべきかを、総合的に判断する方法を示すことが本研究の目的である。平成17年度から研究をスタートし、これまで地震動の設定、鉄道施設間の相

互作用を考慮した挙動評価法や耐震補強法等の研究を進めてきた。平成19年度からは、列車の走行性や鉄道付帯設備に対する耐震対策についても検討を始めている（図1参照）。これまで実施してきた研究開発の概要について、以下に述べる。

2.2 鉄道施設の耐震性評価に用いる地震動の設定に関する研究

鉄道システムの地震時安全性をバランス良く向上させるためには、各施設の耐震性を共通の指標で評価する必要がある。この研究テーマでは、各施設の固有周期帯域を調査し、それを考慮した評価用地震動の設定方法とサンプル波の提案が目標である。土木（橋脚、高架橋、盛土）、建築（旅客上家）、電車線柱について、代表的な地震波（釧路沖地震、兵庫県南部地震、新潟県中越地震など）を入力した動的解析を実施し、各施設の保有している性能比較を行い、明らかになった地震応答特性を勘案した上で、各施設の耐震検討を行う際に用いる地震動を検討している。

2.3 鉄道施設間の相互作用を考慮した挙動評価に関する研究

鉄道システム全体の地震時安全性を向上させるためには、土木構造物だけでなく、それとの相互作用が生じる各施設の耐震性についても評価する必要がある。この研究テーマでは、今まで個々に地震時の評価を行ってきた電車線柱、建築付帯設備、軌道構造等を対象に、大規模地震時に、これらの構造と土木構造物との相互作用を考慮できるモデル化の方法を提案するとともに、連成応答による影響について検討することを目的としている。

大規模地震時における土木構造物と各種施設の相互作用として、橋梁と電車線柱との相互作用、高架橋と付帯

* 構造物技術研究部 研究室長（耐震構造）

特集：構造物の耐震技術

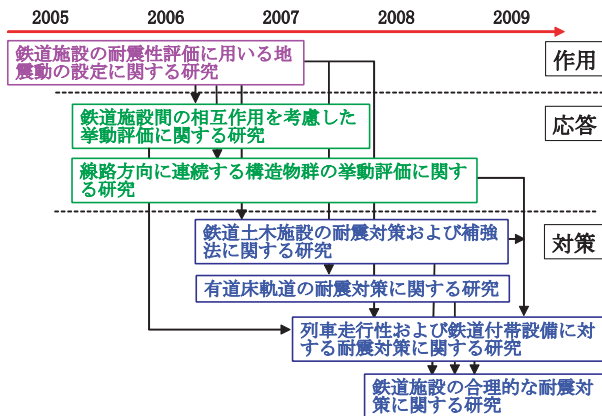


図1 研究開発の全体フロー

建築設備（上家、天井部材）との相互作用、橋梁と軌道との相互作用などについて時刻歴応答解析により検討を行っている。その一例として、土木構造物—電車線柱連成系の振動特性について図2に示す。その結果、従来のように土木構造物と電車線柱を分離したモデルで、土木構造物天端の水平加速度を電柱の入力加速度として評価した場合は、①詳細モデルにより得られる実際に近い応答を過小評価すること、②分離モデルでも橋梁天端の回転による影響を考慮することにより実際に近い挙動を再現できること、等が分かった。さらに上記の検討の深度化を図り、土木構造物と各種施設との相互作用を考慮した耐震性能評価法について提案する予定である。

2.4 線路方向に連続する構造物群の挙動評価に関する研究

地震時の高速車両の走行安全性を検討するためには、地震動の継続時間と走行速度の関係から、500m～1km程度の表層地盤と構造物群の挙動評価、さらには断層や深層地盤を含めた広域地盤の評価も必要となる（図3）。この研究テーマでは、広域地盤および構造物群の挙動を評価する手法を開発し、地盤や構造物が急変する場合の車両の走行安全性について評価を行うことを目的としている。主な実施項目は、①10～100km程度の広範囲の領域の地震動を面的にシミュレーションする理論的手法の開発、②構造物を群としてモデル化する場合の境界条件について数値解析による検討、③地盤急変部を走行する車両の挙動の検討など、である。

①では、剛性マトリクス法を用いて、断層永久変位を含む地震動波形を理論的に合成する手法を開発し、10km～100km程度の非常に広域の地震動のシミュレーションを可能にした。図4はそのシミュレーション例として、地震動の時間的・空間的変動を示したものであるが、時計回りと反時計回りの渦が現れ、その渦が断層の破壊方向に伝播しており、地震動の特性は局所的に複雑に変化することなどが分かっている。

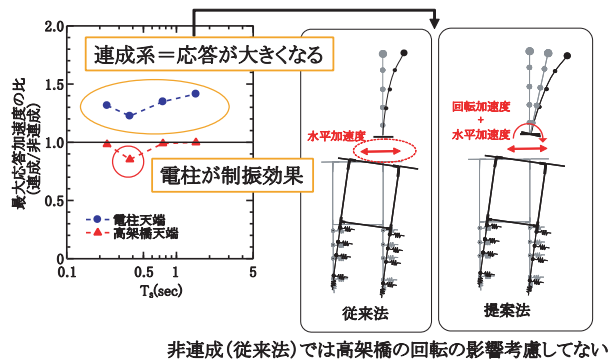


図2 高架橋と電柱の相互作用による応答加速度比

鉄道のような長い線状構造物には、このような地震動の空間変動の影響は大きいと予想され、今後は、開発した手法を用いて、断層条件、地盤条件、構造条件を変化させた解析を実施し、構造物の動的挙動や列車の走行安全性について検討していく。

2.5 鉄道土木施設の耐震対策および補強法に関する研究

この研究テーマでは、トンネル、鋼製橋脚を中心として、コンクリート構造、盛土も含めた土木構造物の耐震補強法を取りまとめることにより、総合的な耐震対策の方法論を構築することを目的としている。実施項目としては、例えば、山岳トンネルを対象に行った地震被害分析事例から、断層破砕帯等の軟弱な地山での被害形態、断層のずれによる被害形態の特徴を分析している。また、3次元載荷模型土槽（図5）を用いて、地盤変位に伴うトンネルの破壊状況の再現実験なども実施している。今後、トンネルの模型載荷試験と数値シミュレーションにより地震時評価法を検討する予定である。

また、既設鋼橋については、数多く適用されている鋼製線支承のモデル化と支承部の損傷を許容した橋梁全体系の耐震性評価法などを検討している。これに関する詳細は、本号の「鑄鉄製支承の地震時耐荷力特性と復元力モデル」を参照されたい。

2.6 有道床軌道の耐震対策に関する研究

この研究テーマでは、列車走行安全性のため有道床軌道の地震時における道床抵抗力を明らかにし、座屈安定性に対する評価法、および道床抵抗力の増加による座屈安定性向上のための対策工の提案を目的としている。対策の有無による道床横抵抗力を評価するために、実物大模型軌道を用いた水平載荷試験や有道床軌道の地震時座屈安定性解析を可能とする解析ツールの整備を行うとともに、座屈解析において重要となる要因についての基礎的検討を実施している。

今後は、対策工を施した有道床軌道の耐震性能を評価するため、模型軌道による振動台試験や開発した解析プ

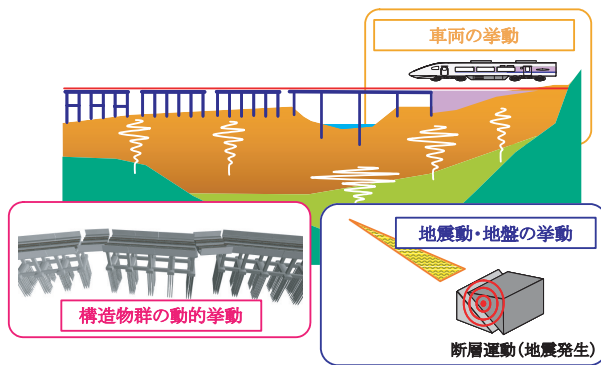


図3 地盤—構造物—車両の全体イメージ

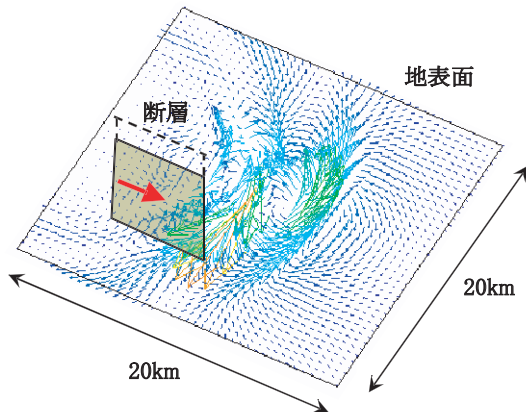


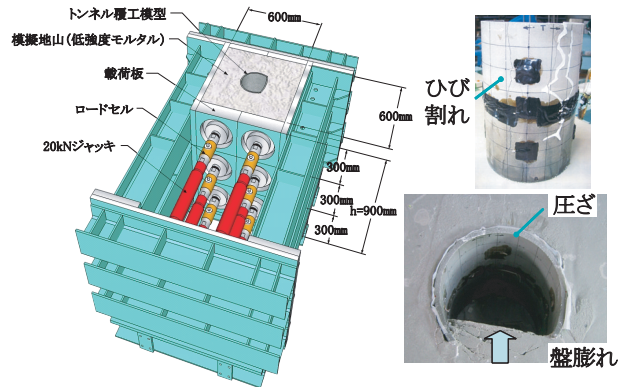
図4 広域地盤の地震動のシミュレーション例

プログラムによる検討を実施し、道床横抵抗力向上等による耐震対策効果の評価を行う予定である。

3. 耐震標準の改訂の動向

3.1 改訂の目的

現行の耐震標準¹⁾は、平成7年の兵庫県南部地震で土木構造物が甚大な被害に遭ったのを契機に以前の耐震設計法を全面的に改訂したものであり、新設構造物の設計に適用されている。耐震標準は、レベルの異なる2種類(L1, L2)の地震動を考慮する2段階設計法の採用、地盤や構造物の非線形性を考慮した動的解析を積極的に活用するなど先駆的な内容となっている。しかし、平成13年の「鉄道に関する技術上の基準を定める省令(国交省令151号)」により、本格的な性能規定化の移行が進められ、耐震標準も本格的な性能規定型に移行するための検討が必要となっている。また、その後の地震工学分野の研究の進展や新潟県中越地震など比較的大きな地震が近年多数発生していることから、国土交通省の指導のもとに、平成17年3月から耐震標準に関する検討委員会を設置し、平成20年度末までに改訂原案を作成する計画で検討作業を実施している。現時点における耐震標準の改訂の動向を紹介する。



3次元載荷模型土槽 トンネルの破壊状況
図5 地盤変位に伴うトンネルの破壊状況の再現実験

3.2 改訂の方針

耐震標準の改訂方針は、以下のとおりである。

- 新技術の導入に対して柔軟な対応を可能とする(免震・制震技術の採用等の新技術の導入を阻害しないこと、制限値の物理的な意味を極力明確化する)。
- 地域性や線区の個別事情への柔軟な対応を可能とする(サイトに応じた地震動の設定への対応、要求性能と地震動レベルの関係の見直し)。
- 検証方法の自由度を高める(対応可能な複数の検証方法を提示)。

- 鉄道という特殊性および設計実務に対応した適合見なし規定の整備(鉄道事業者が個別の事情に応じて選択可能とする)。

また、改訂の主な検討項目としては、以下を予定している。

- 地震動の定義と要求性能(安全性、復旧性)
- 地震動の選定フローおよび設計地震動(応答スペクトル、地震動波形)
- 地盤種別(動的解析結果との整合、周期区分の精査)
- 非線形スペクトル法(適用範囲、履歴モデル、降伏点の定義)
- 照査方法(部材の損傷レベルの制限値)等

3.3 設計地震動について

設計地震動に関しては、構造物の安全性および復旧性を照査する地震動について検討を行っている。一方、走行安全性の検討に用いる地震動は、平成18年制定の変位制限標準²⁾に従い、現行のL1地震動を踏襲する予定である。

現行のL2地震動のスペクトルII(断層近傍型)は、既往の観測記録を距離減衰式を用いて、M7程度の、断層直上の地震動に変換して、その非超過確率が90%になるように設定したものであり、概ね、現在検討中の安全性照査用の地震動の定義(その地点で想定される最大級の地震動)に即したものと考えている。しかし、近年、強震観測網の整備により、比較的断層近傍で観測記録が得

特集：構造物の耐震技術

られており、最大加速度で見た場合に、現行のL2地震動を超えるものも観測されていることから、安全性照査用の地震動に関しては、応答スペクトルのレベルを再検討している。なお、設計地震動としては、単純にスペクトルの大小だけではなく、例えば地震動の継続時間が地盤や構造物にとって影響が大きい場合もあり、そのような観点から2タイプの地震（断層近傍型と海溝型）に対して検討を行っている。

復旧性照査用の地震動は、原則的には対象構造物に影響を与える地震動群として与えられるべきものと考えている。復旧性とは、適用可能な技術でかつ妥当な経費および期間で機能を回復できる性能と考え、復旧性の照査指標としては、トータルコスト・ミニマムとすることが考えられる。一方、設計実務の便を考慮し、適合見なし仕様として、標準的な地震動レベルを設定し、それに対してある制限値を設けて照査するという簡易な手法を採用することも検討している。具体的には、日本の主要地域に対して、どの程度の地震動レベルと制限値の組合せにすると、復旧性に優れた構造物になるかを試算し、設定したいと考えている。

3.4 非線形応答スペクトルの設定方法

現行の耐震標準では、非線形応答スペクトル法が標準的な手法として用いられており、新しい耐震標準でも、適用範囲を明確にした上で、実務的に有効な手法として位置づけられる予定である。ただし、非線形応答スペクトル法を適用する際、いくつかのパラメータを決定する必要があるが、その方法が、現行の耐震標準では安全側になるように配慮されており、場合によっては過剰になっている場合も想定される。例えば、非線形応答スペクトル法を用いるには、降伏震度と等価固有周期が必要であるが、これらのパラメータは、プッシュオーバー解析により得られる荷重～変位曲線により設定される。現行の耐震標準では、いずれかの部材初降伏点、または安定上の初降伏点を、構造物の全体系の降伏点として定義している。しかし、実際の構造物の設計では、初降伏点と、荷重～変位曲線が明瞭な折れ曲がりを示す点は一致しない場合が多い。特にラーメン高架橋では、塑性ヒンジが様々な箇所に形成されて、実際の荷重～変位曲線の折れ曲り点は、初降伏点をかなり上回る場合が多く、より合理的な降伏点の設定方法を提案したいと考えている。

また、降伏点のほか、地盤の塑性化が顕著になる場合の履歴モデルの見直し等を含めて検討する予定である。

3.5 鉄筋コンクリート部材の非線形モデルと損傷レベルの限界値

地震動の継続時間が鉄筋コンクリート構造物の変形に与える影響を検討するため、繰り返しの影響を考慮でき

る部材の非線形モデルを検討している。例えば、鉄筋コンクリート部材の場合では、正負交番載荷試験の履歴曲線に見られるように、最大荷重を維持する最大変位までは繰り返しの影響が小さく、それ以降では繰り返しの影響が大きくなる特性があり、これを直接的に表現できる新たな非線形モデルを検討している。この非線形モデルを用いて、地震動の継続時間が構造物の応答変位や損傷に及ぼす影響を評価し、損傷レベルの制限値を検討したいと考えている。これらに関連する研究論文として、本号の「地震動の繰り返しを受けるラーメン高架橋柱の崩壊限界の評価法」および「繰り返しによる耐力低下を考慮したRC部材の履歴モデルの開発」を参照されたい。

4. その他の耐震技術に関する話題

構造物技術研究部では、耐震技術に関する研究開発について、このほか数多くのテーマに取り組んでいる。それらの中から本号では、震害を受けて補修したラーメン高架橋柱の部材特性、レンガ・石積等組積構造の橋脚を対象とした耐震補強法、斜杭基礎による地震時走行安定性向上、盛土の耐震性に与える浸透水の影響、物理探査手法を用いた不整形基盤位置の推定と地震動評価、の5件について紹介する。

5. おわりに

今回の特集「構造物の耐震技術」では、構造物技術研究部で取り組んでいる耐震技術にかかわる研究開発の状況の一部を紹介した。構造物の耐震に係わる技術開発はこれまで多くの実績を上げてきたが、まだ取り組むべき課題も多い。今後も鉄道事業者や鉄道に関連した活動をされている皆様のお役に立つ技術の開発を進めていきたいと考えている。また、鉄道総研では、研究施設の充実を図るため、現在、大型振動台（平成20年秋完成の予定）を建設している。振動台の活用成果についても、今後ご期待願うとともに、鉄道事業者の皆様のご活用もいただきたいと願っている。

なお、ここで紹介した研究テーマの一部は、国土交通省からの補助金で実施している。また、耐震標準の改訂は、国土交通省委託「鉄道技術基準整備のための調査研究」の一環として実施しているものである。

文献

- 1) 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，1999.10
- 2) 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，2006.2