

既設鉄道施設の耐震性評価と対策

佐藤 勉
 構造物技術研究部
 (主管研究員)

室野 剛隆
 構造物技術研究部
 (耐震構造 研究室長)



さとう つとむ



むろの よしたか

はじめに

鉄道システムは、土木構造物、建築物、電力設備、軌道、車両などから構成され、それらは地震時に相互に影響して挙動すると考えられます。しかし、各種の施設は個別に耐震設計されており、想定する地震のレベルや保証する耐震性能も異なっているのが現状です。鉄道の地震時の安全性をより向上させて行くためには、土木構造物だけでなく、建築物、電力設備、軌道、車両などの耐震性を同じ土俵で評価し、必要な施策を実施することが合理的といえます。そのためには、評価用の地震動、各施設間の相互作用などを考慮した複合体としての鉄道施設の地震時挙動を評価することが必要となります。また、線区の実状に応じた地震対策とその実施の判断を求められるときの意思決定方法について、それを支援するための定量的かつ適正な優先順位の評価指標などの検討がこれまで行われていませんでした。

そこで、鉄道総研では、平成17年度から鉄道の将来に向けた研究開発課題として、「既設鉄道施設の耐震性評価と対策」を設定し、5年間にわたり研究開発に取り組んできました。鉄道システム全体に対してバランスのとれた耐震化を目指し、共

通の考え方で評価するための地震動の設定、各種施設間の相互作用を考慮した地震時挙動の評価法、耐震対策とその効果の評価法、および施すべき耐震対策を判断するための合理的な手法などの研究を行ってきました(図1)。その成果の一部を以下に紹介します。

断層～地盤～構造物群～車両系の地震応答解析法の構築

我が国には地震を発生させる多くの活断層が存在しているため、断層近傍に鉄道構造物が敷設されている場合など、地震が発生したときの鉄道構造物への影響を適切に予測する必要があります。

本研究では、まず地震動については、震源となる断層を含む広範な領域における地震動の伝播を考慮するとともに、軟弱な表層部における局所的な地震動の変化の影響も考慮し、2つの解析手法をカップリングさせることによって、両者の影響を評価できる地震動の予測法を構築しました(図2)。図3には、解析によって得られた地表面の速度

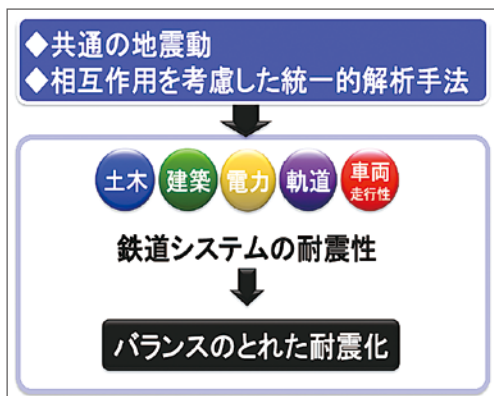


図1 研究の目的

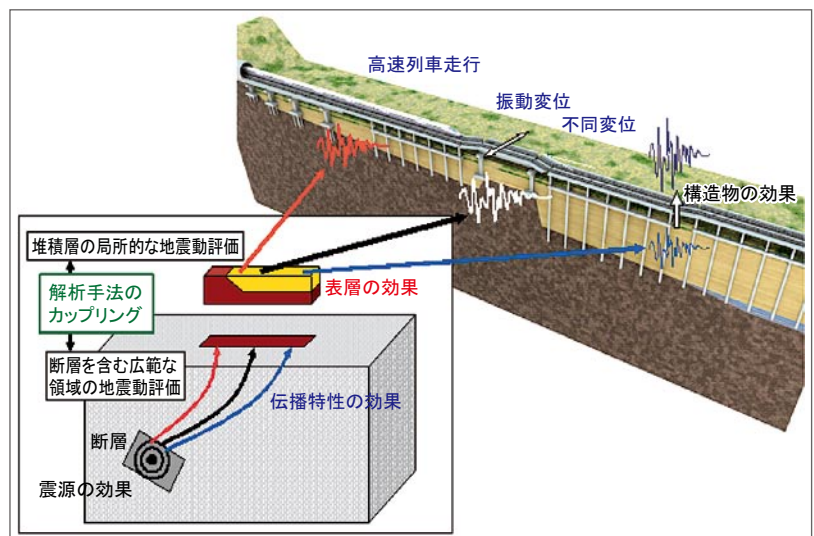


図2 断層～地盤～構造物～車両の挙動の評価手法

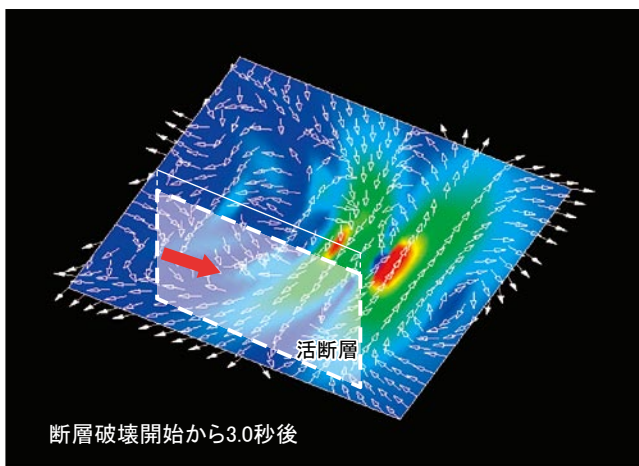


図3 地震動シミュレーションの例(速度分布)

分布の一例を示しています。断層の近くでは、地震波が複雑に伝わっていることが分かります。また、これらの影響を考慮すると、高架橋などが連続する場合には各高架橋で異なる地震動が入力されるため、隣接構造物間の相互作用を適切に評価する必要があります。本研究では、高架橋間に配置される調整桁の拘束の影響を実験的に評価し、その結果に基づいて高架橋を「群」として考えた場合の隣接構造物間の相互作用をモデル化することで、精度の高い構造物群の挙動解析を可能にしました。

今回開発した解析手法を用いることで、活断層からの距離や地盤の状態によって、位相差を伴って地表面が振動し、それにより構造物群がどのように挙動するかを表現することができます。この結果、断層モデルから求めた加速度波形を構造物群のそれぞれに作用させた場合と単一の加速度波形を構造物群に作用させた場合では、列車走行性に及ぼす影響にも違いがあることなどが分かりました。

従来、断層～地盤～構造物～車両の挙動を連続的に解析することは困難でしたが、今回開発した解析手法により、断層近傍に鉄道構造物が建設されている場合に、構造物群の地震時挙動および列車走行性を高い精度で評価することが可能になります。

鉄道高架橋の角折れ防止装置の開発

隣り合う構造物の動的な特性や耐力が大きく異なるような箇所では、目違いや角折れといった変位が構造物間に生じ、地震時の列車走行性の注意箇所となることが指摘されています。

そこで、このような箇所における地震時の列車走行性を向上させる対策として、ラーメン高架橋と調整桁間にアンカーボルトにより設置する簡易な角折れ防止装置を開発しました(図4)。この装置の開発に際しては、実物大の部分

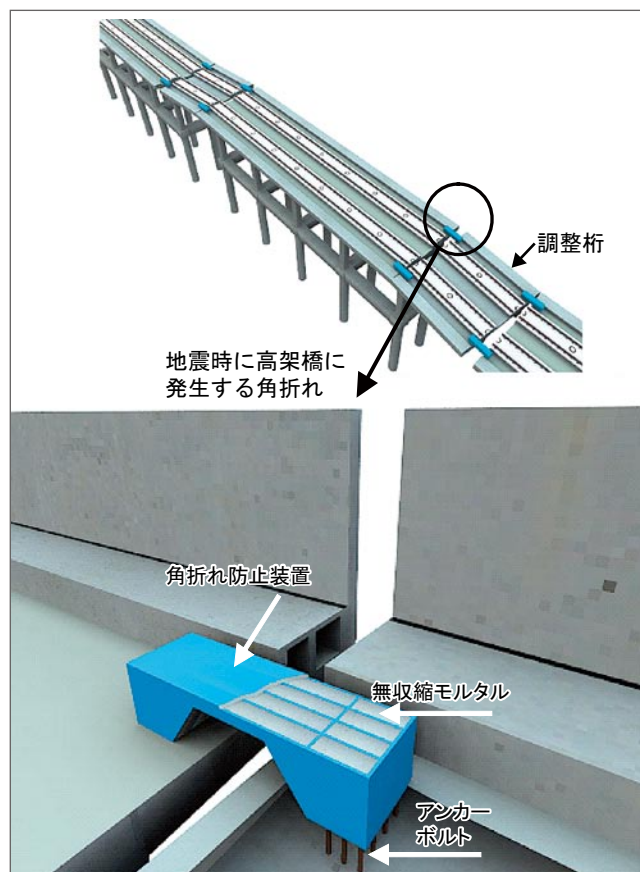


図4 角折れ防止装置の概念図

模型実験を実施し、その耐荷性能などを確認しました。また、得られた諸特性に基づき、本装置をラーメン高架橋群に適用した場合の効果を動的非線形解析により検討しました。例えば、隣り合う高架橋の柱の長さが2m程度異なる調整桁式ラーメン高架橋の場合、地震動により発生する角折れ量が、本装置を設けることにより無対策に比べて1/2程度に低減できることが分かりました。本装置を、脱線防止ガードや逸脱防止ガードなどの他の対策と組み合わせることにより、地震時の列車の走行性を総合的に高めることができると考えています。

鉄道施設間の相互作用を考慮した挙動評価

鉄道システム全体の地震時安全性をより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種施設の耐震性についても評価することが必要です。本研究では、今まで個々に地震時の評価を行ってきた電車線柱、旅客上家や吊り天井などの建築設備、軌道構造などを対象に、これらの構造と土木構造物との地震時における相互作用について検討しました。

高架橋と電車線柱との相互作用に関しては、高架橋と電車線柱を一体としてモデル化した場合と単独にモデル化し

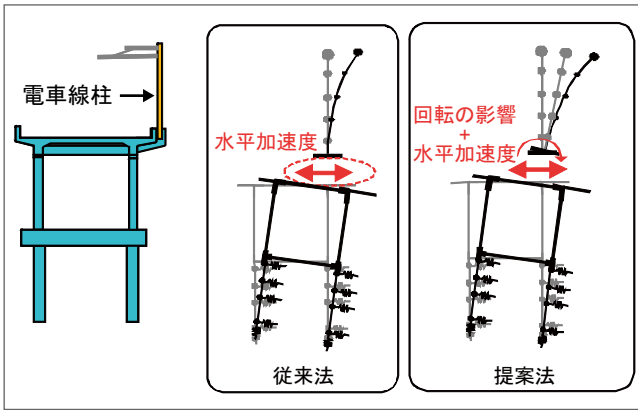


図5 高架橋と電車線柱の相互作用の評価

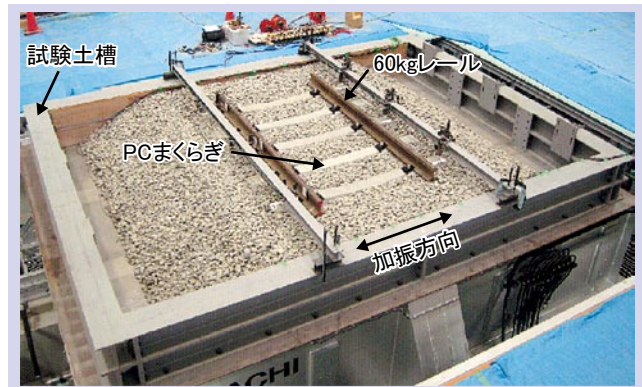
た場合に対して地震応答解析を行い、相互作用の現象を明らかにしました。具体的には、電車線柱では、構造物の水平動により生じる振動以外に、構造物の回転によって生じる振動の影響も大きいことを確認し、この影響を簡便に取り入れた耐震評価法を提案しました(図5)。高架橋と建築設備との相互作用に関しては、高架橋と旅客上家との地震時の応答特性を確認し、高架橋の挙動を考慮した新たな旅客上家の設計法を提案しました。さらに、橋梁と軌道との相互作用に関する検討では、スラブ軌道を対象に、線路方向および線路直角方向の地震応答解析を行い、軌道をモデル化することによる種々の構造物の応答への影響を確認しました。

有道床軌道の座屈安定性評価および座屈対策

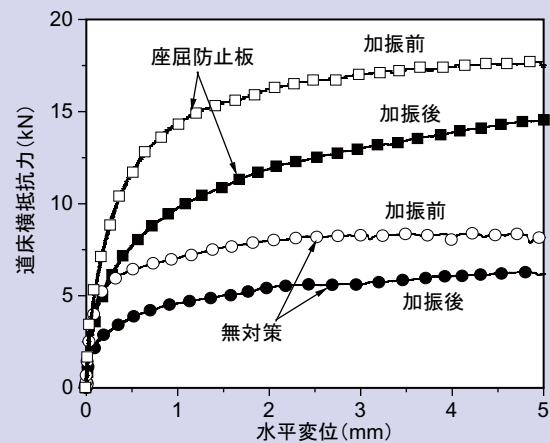
有道床軌道の地震時における道床横抵抗力、座屈安定性の評価方法や座屈安定性を向上するための対策工の研究を実施しました。

有道床軌道の道床横抵抗力を評価する解析モデルを検討し、道床バラストの大型三軸試験結果から得られた変形特性を用いることで、実物大の道床横抵抗力を推定できることが分かりました。また、構造物上の有道床軌道を対象として、加振時から構造物応答加速度最大時までの道床横抵抗力の変化を考慮できる有道床軌道の座屈解析ツールを開発しました。この解析ツールを用いて、ロングレール区間に連続的に配置された調整桁式ラーメン高架橋上の有道床軌道を対象として、一定の条件下での地震時座屈挙動解析を行った結果、地震時における道床横抵抗力が常時の25%程度まで低下すると座屈することなどが分かりました。

さらに、実物大軌道(5本まくらぎ)による実地震波形による振動台試験を行い、座屈防止板による座屈対策を施すことにより、無加振時で無対策の2倍程度の道床横抵抗力



(a) 実物大軌道による実地震波形による振動台試験



(b) 加振前後の道床横抵抗力

図6 有道床軌道の道床横抵抗力試験

が得られるとともに、加振による低下も比較的少なく、地震による座屈対策工法として効果が大きいことなどが分かりました(図6)。

既設土木構造物の耐震性評価法

鉄道の土木構造物は、鋼構造物、トンネル、コンクリート構造物、土構造物などから構成されていますが、各構造物は、材料や構造も異なるため、構造物間で耐震性の評価方法にも差異があります。構造物間でバランスの良い耐震補強を行うためには、極力同じ評価指標で耐震性能や補強効果を評価することが重要といえます。その共通の評価指標として、「損傷レベル」で評価する方法を提案しました。この損傷レベルとは、新設構造物などの性能照査型設計標準で用いられている指標で、損傷の程度および修復の難しさの程度を表すものです。

例えば、地震時におけるトンネルの損傷としては、図7に示すような覆工コンクリートの剥落を伴うような損傷、これを圧ざと言いますが、この圧ざを表現できる実用的な解析手法を提案するとともに、損傷レベルとの関連を示し

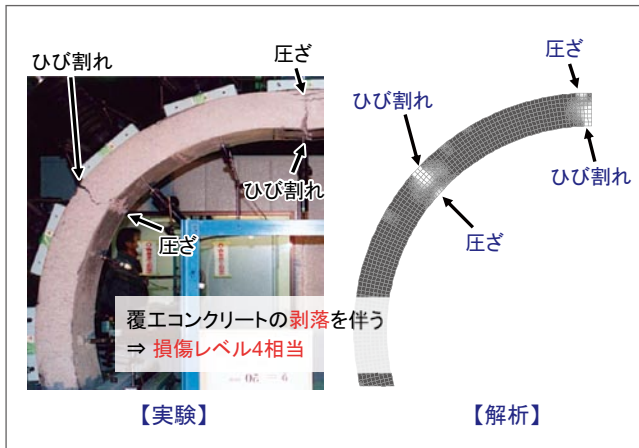


図7 トンネル覆工コンクリートの耐震性評価

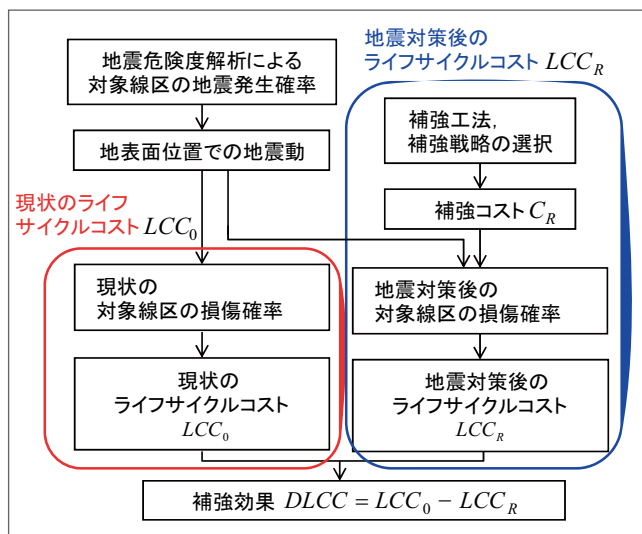


図8 地震トータルコスト算定フロー

ました。覆工コンクリートの載荷実験と解析結果を比較すると、荷重～変位関係や、ひび割れ、圧ざなどの変状の発生状況が比較的良く再現できます。

鉄道施設の地震対策の優先度判定の考え方

限られた予算の中で線状に延びる鉄道施設の効果的な耐震補強を行うためには、補強の優先順位や補強工法の選択について合理的な戦略を立てる必要があります。この場合、線区の実状に応じた地震対策の選定やその実施の意思決定方法において、それを支援するための定量的かつ適正な優先順位の判断指標などが確立されていません。そこで、地震による復旧性の観点から、地震対策前後のライフサイクルコストの差分(DLCC)が最大となるように、補強優先順位を決定する手法を提案しました。

図8はDLCCの算定手順を示しています。対象路線に対して、発生確率を考慮した地震動の大きさを予測し、それ

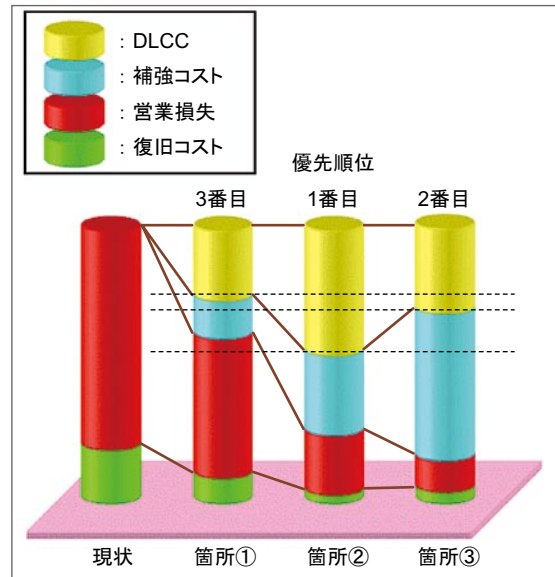


図9 補強の優先順位の考え方のイメージ

に基づき構造物の損傷確率および地震に対する現状のライフサイクルコスト(LCC₀)を算定します。次に、補強を実施した場合の損傷確率および対策後のライフサイクルコスト(LCC_R)を算定します。これらの結果に基づきDLCCを算定します。DLCCを用いた補強優先順位の考え方のイメージを図9に示します。この例では、補強の必要な箇所が3箇所あります。箇所②の補強によるDLCCが最大となっています。箇所③は補強に多大なコストを要するものの、その補強効果は大きく、DLCCは②に次いでいます。箇所①のDLCCは低く、補強の緊急性は低いと判断されます。よって、この例では②→③→①の順で補強するのが妥当と考えられます。提案手法を用いることで、対象とする路線の運行条件、地震条件、地盤条件、構造物条件に応じた最適な耐震補強戦略の選択が可能となります。

提案手法を実際の鉄道路線に適用することにより、各路線のバランスのとれた耐震対策の検討に役立つものと考えています。

おわりに

鉄道網は、総延長で2万数千キロに及ぶとともに、わが国には数百の活断層が確認されています。このような状況において、ご紹介した研究成果は、地震時の注意箇所の抽出、耐震対策の優先順位、各種耐震対策効果の評価等への活用が期待できるものと考えております。

なお、本研究の一部は、国土交通省からの補助金を受けて実施しました。[RRR]