

審査の結果の要旨

氏名 上半文昭

本論文は、「応用要素法と微動測定を利用した鉄道高架橋の総合的な地震被害評価」と題し、鉄道の主要構造物でありながら、近年の地震による被害発生頻度の高い鉄道高架橋を対象として、その地震被害を未然に防ぎ、また地震被害発生時には早期復旧を支援するための地震被害の評価技術の開発に取り組んでいる。平時（地震前）、地震直後、および復旧対策時（地震後）に実施される様々な対策、検討作業全体を「総合的な地震被害評価」と位置づけ、新しい非線形構造解析手法である「応用要素法」と平時の極微小な地盤の振動である「常時微動」、ならびに走行車両が誘発する振動を利用して地震被害評価作業の改善に供する様々な新技術を開発し、それらを効果的に用いた鉄道の地震被害のトータルマネジメント戦略を提案している。

第1章では、研究の背景と目的および論文の構成についてまとめている。兵庫県南部地震による鉄道の被害を踏まえ、鉄道構造物の耐震性能把握と耐震補強対策、大地震直後の早期被害把握、および構造物の損傷度検査や復旧後確認検査の効率化が、今後の地震対策の重要な課題であると指摘し、これらの課題解決に必要な各種作業全体を「総合的な地震被害評価」と定義している。

第2章では、破壊シミュレーション技術による鉄道高架橋の地震被害評価に関する研究の導入として、鉄道RC高架橋の歴史、鉄道RC高架橋の地震被害、鉄道高架橋の耐震対策の現状を調査し、兵庫県南部地震で多くの鉄道高架橋が被災するに至った背景と今後取り組むべき対策についてまとめている。また、鉄道高架橋の地震被害の分析に適用する数値シミュレーション手法が有すべき機能についてまとめている。

第3章では、鉄道RC高架橋の破壊シミュレーション手法として応用要素法を適用し、その選択理由と基礎理論について説明するとともに、鉄道RCラーメン高架橋の数値解析モデル化方法を検討している。応用要素法の適用性と解析精度を確認し、実地震で被災した高架橋の破壊メカニズムを明らかにしている。

第4章では、兵庫県南部地震以降、鋼板などの補強材料を巻き立てて補強されたRCラーメン高架橋が主要な鉄道構造物となったことを鑑み、耐震補強されたRC柱の破壊挙動を高精度かつ短い演算時間で解析できる2次元数値解析モデルを開発し、同モデルで鋼板巻き立て補強によるRC柱の破壊形態や変形性能の変化をシミュレーションできることを確認している。また、同解析モデルを山陽新幹線高架橋の耐震補強に適用された外部スパイラル鋼線巻き立て工法で耐震補強されたRC柱の破壊挙動の解析にも応用可能であることを示している。その結果は、現在鉄道高架橋の耐震補強に適用されている鋼板巻き立て工法以外の各種工法で補強された高架橋の数値解析に提案モデルを応用できることを示唆しており、耐震補強された鉄道高架橋の耐震性能の評価に有効なツールが開発された。

第5章では、第3章および第4章で検討した高架橋の破壊シミュレーション技術を用いた、高架橋の耐震性能照査および最適補強方法決定支援ツールが開発された。まず、軸方向鉄筋の段落とし部を有するRC柱および段落とし部を鋼板補強したRC柱の破壊実験結果の数値シミュレーションにより、開発ツールで部材の破壊形態や変形性能を十分な精度で評価できることを明らかにしている。次にブッシュオーバー解析と地震応答解析により、2層ラーメン高架橋の最適な補強方法を検討し、中層梁のみの耐震補強が非常に危険であることなどを明らかにしている。その成果は、山陽新幹線高架橋の耐震補強方針決定に役立てられた。

第6章では、常時微動測定技術を用いた地震被害の評価に関する研究の導入として、鉄道分野で実施されてきた振動測定による構造物検査手法、常時微動の地震防災への利用に関する研究、地震後の復旧対応、地震時運転規制方法、および地震被害の推定方法などの現状を調査している。その結果を踏まえ、振動測定による構造物検査手法の精度向上、振動測定作業の効率性および安全性の向上、地震直後の早期被害把握が重要な課題であることを指摘している。

第7章では、応用要素法による数値シミュレーションを利用して地震後に実施する構造物の損傷度検査の精度を高める手法を検討している。振動測定結果から構造物の損傷度を精度良く求めるために、数値解析で高架橋の損傷度の判定基準を作成する手法を提案し、RC柱供試体および実高架橋の損傷に伴う固有振動数の変化の数値シミュレーションを実施して、損傷度判定基準の作成に応用要素法を適用できることを明らかにしている。また、高架橋の損傷部位毎の損傷度を検査する手法も提案し、数値シミュレーションと模型実験により、その妥当性を検証している。提案手法は、構造物の損傷度を客観的な数値情報として与えることができ、また、目視検査の難しい鋼板などの補強材巻き立てで補強された高架橋の損傷度も検査できるなど、非常に有用である。

第8章では、構造物検査を目的とした振動測定をより安全かつ効率的に実施するための常時微動の非接触測定技術および装置を開発している。レーザドップラ速度計(LDV)を用いて屋外で構造物の常時微動を測定する際に問題となる、風や各種地盤振動の影響で生じるLDVセンサの振動に起因するノイズを、LDVセンサに取り付けた微動センサの記録を用いて除去する技術を提案し、構造物の常時微動を数mから数10m離れた場所から非接触で高精度に測定可能にしている。提案手法は、鉄道構造物の振動測定による検査技術から、構造物の加振、および、センサ類の構造物への取り付けと撤去を不要にするので、検査作業の効率性や安全性に大きく寄与すると考えられる。

第9章では、地震直後の鉄道の早期復旧支援への応用を目的とした鉄道構造物の即時地震被害把握システムの開発に向けた基礎的な検討を実施している。即時地震被害把握システムのプロトタイプとして、構造物の振動状態を無人監視して地震発生時などに記録データを遠隔地のPCに無線送信する機能を持った構造物振動の無人観測システムを開発し、自然エネルギーによる連続稼働試験を実施してその機能を確認し、即時地震被害把握システムへの応用方法を示している。運用が容易でまた、高架橋の振動特性に基づいて平時の維持管理、地震直後の即時被害把握、および復旧対策時の損傷度や復旧効果の確認検査を行う新しい構造物管理体系を提案し、常時微動測定技術を利用した地震被害評価についてまとめている。

第10章は、本論文各章で開発した新技術を活用した、平時、地震直後、および復旧対策時にわたる総合的な地震被害評価の流れをまとめ、結論としている。

以上のように、本論文は、鉄道の主要構造物であるRCラーメン高架橋に着目し、その地震被害を未然に防ぎ、また地震被害発生時には早期復旧を支援するために非常に有用な、地震被害評価のための新技術、および、それら技術を利用した新しい鉄道の地震対策体系を提案している。提案技術の一部については既に実用に供せられ、実務の面からも高い評価を得ており、その他についても鉄道事業者等から早期の実用化を望まれているものである。鉄道高架橋の耐震性の向上、および、地震後の被害状況の早期把握や各種検査の効率化を実現可能にする多くの新技術を開発、検証し、それらを体系化した本成果は、わが国の鉄道の地震対策における重要課題の解決に向けた重要な研究成果と評価できる。

よって本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。