

論文審査の結果の要旨

氏名：木内 彬 喬

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：走行振動荷重が作用する道路橋 RC 床版の耐疲労性の評価および伸縮装置の耐荷力性能

審査委員：（主査） 教授 澤野 利章

（副査） 教授 師橋 憲貴

教授 水口 和彦

日本大学名誉教授 阿部 忠

我が国の橋梁は 2021 年現在で 72 万橋が供用され、その多くは高度経済成長期に整備された。これらの橋梁は 50 年以上が経過し、老朽化した割合は約 30%と、年々増加している。また、設計基準においても 2019 年改訂の道路橋示方書・同解説に至るまでに数回の改訂が行われ、1994 年改訂以降からは設計荷重も 198kN から 245kN へと引き上げられた。さらに、重要路線では荷重の増加に伴う補強対策が課題となっている。これらの老朽化対策として、国土交通省では 2009 年より従来の事後保全維持管理から計画的に実施する予防保全型維持管理計画へと政策が移行された。これに伴って地方自治体では、道路橋長寿命化修繕計画を立案し、損傷が軽微な段階において平準化した予算内での計画的な修繕を行い、緊急対応の必要な橋梁は補修・補強対策を施すことで、安全性が確保されている。

橋梁を構成する部材において最も損傷が著しい部材は RC 床版であり、建設地域の環境条件によっても損傷状況は大きく異なっている。とくに、交通量の多い都市部では 2 方向ひび割れの発生による疲労損傷が多い。また、海岸線に建設された RC 床版では飛来塩分による塩害と疲労損傷、積雪寒冷地域では融雪剤散布による塩害、凍結・融解による凍害と疲労損傷が複合している。また、いずれの建設地域においても伸縮装置の近傍において大きな損傷が生じている。これは伸縮装置の段差に起因したものであり、段差量が 20mm となる場合には、伸縮装置の設置位置から 8m 付近まで軸重量の±2.8 倍程度の変動荷重が作用することが報告されている。しかしながら、大型車両の荷重変動を再現できる試験装置が少ないことから、伸縮装置の段差によって発生する荷重変動が RC 床版に及ぼす影響や寿命推定に関する研究は行われていないのが現状である。

一方、伸縮装置自体も大型車両の荷重変動によって大きな衝撃を受けることで損傷も多く、現在、道路橋長寿命化修繕計画の中で計画的に取替工事が進められている。伸縮装置は荷重支持型伸縮装置、突き合わせ型伸縮装置、埋設型伸縮装置に分類され、各企業において特徴のある伸縮装置が開発されている。荷重支持型や突き合わせ型は交通量の多い道路橋に使用され、埋設型は交通量の少ない道路橋や騒音規制の厳しい地域に採用されている。一般的に用いられる荷重支持型伸縮装置は、鉄筋と伸縮部の鋼板や既設部に直接打ち込んだアンカー筋を溶接して設置し、超速硬コンクリートを用いて一体化が図られている。しかしながら、この構造は、縦筋が立体ラーメン構造であることから支持した荷重を輪荷重設置面から 45 度範囲内の限定された範囲に荷重が作用することとなる。このような問題を解決できる新構造として、荷重分布型伸縮装置が開発された。荷重分布型伸縮装置は、縦筋の下面に荷重分布鋼板を設けた構造であり、荷重分布鋼板を介して支持した輪荷重を既設 RC 床版に分布させる構造である。しかし、この装置については、耐荷力性能が評価されていないのが現状である。

そこで本研究では、道路橋 RC 床版の損傷要因となる大型車両が伸縮装置の段差部を通過した際に発生する荷重変動が、RC 床版の耐疲労性に与える影響について、モデル化した RC 床版を用いて走行一定荷重および走行振動荷重による疲労試験を行い、耐疲労性を評価する。また、走行振動荷重による疲労試験の結果から、RC 床版の寿命予測のための S-N 曲線式を確立し、荷重変動を受ける RC 床版の寿命推定を可能にすることで維持管理の一助とする。さらには、従来型の伸縮装置と従来型伸縮装置に荷重分布鋼板を設けた伸縮装置について静荷重実験を行い、両供試体の最大耐荷力および荷重分布鋼板設置の効果を評価するとともに実用性を評価した。

本論文は 7 章で構成されており、各章の主要点を以下に示す。

第1章「序論」では、道路橋 RC 床版の損傷事例を取りまとめており、とくに、伸縮装置の段差や路面の凹凸を大型車両が通過した際に発生する荷重変動が RC 床版に及ぼす影響について述べている。また、荷重変動が発生する要因となる伸縮装置に関する構造的な特徴や問題点を述べることで、本研究の目的である荷重変動を考慮した輪荷重走行振動疲労試験による検証の必要性ならびに、対応策として新たな伸縮装置の開発の重要性を示し、本研究の位置づけを論じている。

第2章「道路橋 RC 床版および伸縮装置の現状」では、我が国における道路橋の現状を述べたうえで、現在取り組まれている橋梁長寿命化修繕計画の概要について論じている。また、道路橋示方書の変遷を示すことで新旧基準の違いによる問題点を道路橋の損傷事例を紹介しながら論じている。とくに、RC 床版および伸縮装置の損傷事例を取りまとめ、伸縮装置の損傷に起因して発生する荷重変動に関する既往の研究を論じることで、本研究の重要性を示している。

第3章「走行振動荷重が作用する RC 床版の耐疲労性および衝撃係数の評価」では、道路橋 RC 床版の疲労損傷の原因の1つとして、路面の凹凸や伸縮装置の段差を大型車両が通過した際に発生する走行振動荷重が RC 床版の耐疲労性に与える影響および走行回数の増加に伴う衝撃係数について、輪荷重走行疲労試験により検証を行った。疲労試験では、コンクリートの圧縮強度が異なる RC 床版に走行一定荷重および走行振動荷重 $\pm 20\%$ 、 30% の正弦波形で実験を行った。その結果、荷重変動が RC 床版の耐疲労性に大きく影響を及ぼすことを明らかにした。また、走行振動荷重 $\pm 20\%$ 、 30% が作用することで、衝撃係数が現行示方書に規定する衝撃係数を大幅に上回ることを示し、伸縮装置の段差量に関する点検が課題となることを示唆した。

第4章「走行振動荷重が作用する RC 床版の寿命推定に用いる S-N 曲線式の提案」では、第3章で用いた RC 床版に走行振動荷重 $\pm 20\%$ 、 30% の正弦波形で疲労試験を行い、得られた等価走行回数を基に、松井式および阿部式から得られた押抜きせん断耐荷力との関係から、既往の研究による松井らや阿部らが提案する RC 床版の S-N 曲線式との整合性を検証した。その結果、阿部らが提案する押抜きせん断耐荷力と本実験から得られた等価走行回数の関係は S-N 曲線式上にプロットされ、整合性が得られた。さらに、S-N 曲線式の傾きをスライドさせて、走行振動荷重 $\pm 20\%$ 、 30% 作用した場合の S-N 曲線式を提案した。これによって、伸縮装置設置位置から 8m 付近の寿命推定が可能となる。

第5章「走行振動荷重を考慮した道路橋示方書の変遷による RC 床版の寿命推定」では、道路橋示方書が改定された 1973 年、1980 年、1994 年基準で設計された RC 床版の寿命推定を行った。1973 年道示で設計された RC 床版は、床版厚が薄いため寿命は 60 年程度であり、さらに走行振動荷重 $\pm 20\%$ 、 30% を考慮した場合の S-N 曲線式で寿命推定した場合は、それぞれ 20 年、7 年と推定された。一方、1980 年、1994 年改定道示は、床版厚は計画交通量により割り増しされ厚くなることから、寿命が 100 年以上、振動荷重 20%、30%においてもそれぞれ 40 年、10 年以上となった。いずれにおいても、段差量 20mm 以下に維持管理することが床版の長寿命化に繋がることを明らかにした。

第6章「荷重分布型伸縮装置を設置した RC はりの静荷重実験による耐荷力性能」では、伸縮装置の取り替えは 10 年程度であることから、伸縮装置独自の耐荷力、設置後の RC 床版の耐荷力の向上が図られる伸縮装置が望まれている。そこで、従来の伸縮装置の下面に荷重分布鋼板を設けた荷重分型伸縮装置が開発され、実用性を評価するために静荷重実験を行い、耐荷力性能を検証した。実験では既往の伸縮装置と荷重分型伸縮装置、2 種類の接着剤を用いて設置した試験体を用いた。既往の伸縮装置に対して荷重分布型伸縮装置は 1.4 倍、2 種類の接着材を塗布した供試体は 1.6 倍の耐荷力が得られた。よって、荷重分布型伸縮装置は大型車両の荷重変動が及ぼした場合においても既設 RC 床版には大きな損傷に至らない装置であり、実用的である結果が得られた。また、設置においては 2 種類の接着剤を用いることを提案した。

第7章「総括」では、各章における結論を総括して、本論文の主な研究成果をまとめるとともに、将来

への展望について論じている。

以上より、本研究で得られた知見は、伸縮装置の段差量 20mm を許容する場合は、衝撃係数が現行示方書の衝撃係数を大きく上回る結果が得られたことから、伸縮装置近傍の床版の設計においては本実験で得られた衝撃係数も活荷重モーメントに適用することで、曲げ抵抗が向上し、長寿命化が図られると考えられる。また、走行振動荷重が及ぼすことによる寿命推定には本提案した S-N 曲線も適用することで可能となる。本研究から得られた結果より、橋梁の維持管理においては橋梁定期点検要領に示す段差量 20mm を段差量 15mm までとすることで、伸縮装置本体および近傍の RC 床版の損傷が大幅に軽減されるものと考えられる。

次に、伸縮装置の損傷の多くは伸縮装置の破損、コンクリートの割れ、老朽化が挙げられるが、既設 RC 床版は取り替え工事を繰り返すことで新たな損傷が懸念されることから、既設 RC 床版に優しい伸縮装置が必要となる。従来の伸縮装置は、輪荷重は走行位置から 45 度下方分布されている。荷重分布型伸縮装置は、輪荷重は載荷位置から 45 度で分布されるが、荷重分布鋼板を設けることで荷重分布鋼板を介して既設 RC 床版に幅広く分布されることから耐荷力性能が向上する。なお、この荷重分布型伸縮装置は、昨年、熊本県で採用されている。

本論文で明らかにした伸縮装置の段差の影響、荷重振幅が及ぼす RC 床版の S-N 曲線式、新たな伸縮装置の活用など、道路橋 RC 床版の維持管理技術の発展に大きく寄与するものである。

この成果は、生産工学、特に土木工学（維持管理工学）に寄与するものと評価できる。

よって本論文は、博士（工学）の学位を授与されるに値するものと認められる。

以 上

令 和 4 年 3 月 3 日