

論文の内容の要旨

論文題目 鋼コンクリート合成床版の損傷機構と交通疲労限界状態の照査
Damage Mechanism and Fatigue Limit State of Steel-Concrete
Composite Deck Subjected to Traffic Load

氏 名 藤山 知加子

本研究の目的は、主として橋梁を対象とする合成床版疲労耐久性評価システムの構築である。合成床版の破壊形態と疲労寿命に影響をおよぼすずれ止めによるコンクリートの拘束効果と、鋼材とコンクリート境界面の初期付着および摩擦特性に着目し、実験と数値解析の両面から疲労損傷機構の解明を試みた。その結果、合成床版の破壊過程を明らかにするとともに、数値解析による合成床版の疲労寿命解析の有効性を示した。さらに、合成床版の疲労限界と終局限界を数値解析によって数量化し、鉄筋コンクリート床版とは異なる合成床版の合理的な疲労限界評価指標としてS-N図を示した。

高サイクル荷重が直接作用する橋梁スラブは、疲労破壊の危険性が最も高い部材のひとつである。道路橋においては1960年代に鉄筋コンクリート床版の深刻な疲労損傷問題が顕在化した。1980年代以降現在までの実物大床版を用いた数々の実験的研究の成果により、疲労問題はひと段落したかに見えた。しかし、近年鋼橋合理化・省力化の観点から研究事例の蓄積された鉄筋コンクリート床版に代わって、鋼コンクリート合成床版（合成床版）が登場するに至った。合成床版の開発研究では、合成構造の破壊形態がスタッドやリブといったずれ止めの諸元に大きく依存することはよく知られていながらも、要求性能として所定の大きさと回数 of 疲労荷重を上回る強度を付与することのみに力点が置かれてきた。そのため、限界状態を超えたときの復旧性はほとんど検討されていないのである。

これに対し、本研究では、実橋で想定される様々な合成構造のずれ止め形状、界面状態に対して、実験・数値解析の両面からその破壊過程を明らかにし、あらゆるタイプの鋼コンクリート合成床版に対して、損傷度を定量的に評価することを目指している。ゆえに、実験と数値解析との比較においては、部材耐荷力や破壊までのサイクル数の大小のみならず、ひび割れの発生・進展のプロセスおよび破壊モードの再現性にも力点を置いた。数値解析の技術を用いることで、計測や目視調査等では発見できないコンクリート内部の損傷リスクも含めた構造物の性能評価を目指す点が、本研究の特長である。

はじめに、ずれ止め形状と配置、鋼・コンクリート境界面状態を系統的に分析するため、全17体（予備的実験を含む）の合成床版の静的載荷、疲労載荷実験を実施した。また、これまでRC構造物の疲労解析で実績をあげてきたコンクリートの高サイクル疲労を再現する非線形有限要素解析COM3Dに適切な接合要素モデルを導入することで、前述の合成床版各実験の結果を概ね精度良く再現することに成功した。

具体的には、実験結果と数値解析結果の分析から、本研究の条件のもとでリブピッチを版

有効高の0.625倍，1.875倍，3.125倍で変化させた場合，合成床版の破壊モードはそれぞれ異なること，曲げ剛性が等価であればI型鋼リブと平鋼リブとの間で有意な性能の差はみられないこと，鋼コンクリート境界面に初期付着力の有無を考慮した数値解析による検討結果から，本実験で使用した供試体では鋼コンクリート境界面に初期付着力が存在したことが明らかとなった．以上より，合成構造内に配置するずれ止めは単に鋼とコンクリートの合成作用をもたらすだけでなく，クラックの基点となり合成床版の破壊形態を変化させる要因として認識する必要があることが示された．

続いて，ずれ止めリブとコンクリートとの境界面条件を変えて道路橋設計荷重相当の低荷重域で30万回以上の高サイクル荷重履歴を含む実験，さらに最大耐力の70～90%の高荷重域での低サイクル疲労実験を実施し，それらを鋼・コンクリート境界面初期付着力を考慮したモデルを用いて再現する数値解析を実施した．数値解析は，実験結果を概ね良好に再現し，付着切れが生じる前の初期剛性はリブ形状にかかわらず，鋼コンクリートのずれ抵抗性による合成度とリブの曲げ剛性とによって決定されること，鋼・コンクリート間付着切れに関して部材の耐荷力が一時的に低下すること，界面のほぼ全体が初期付着を消失した後の耐荷力機構は摩擦則を主体としたものへと移行すること，摩擦ずれの増加とともに変形が増大し，鋼材の様々な部位に降伏をもたらして終局に至ること，などが明らかにされた．高荷重域での定点疲労載荷の予測寿命は，本研究で対象とした諸条件のもとでは，実験で得られた疲労寿命の傾向と矛盾しなかった．

以上，冒頭に述べた2つの着目点，ずれ止め形状と配置によって，また鋼材表面の初期付着と摩擦特性の違いによって，合成床版がまったく異なる複数の破壊形態を示すことを実験と解析の両面から明らかにしたことは，本研究の重要な成果である．

次に，合成床版の性能評価に関して，現状，最も信頼性が高いとされる輪荷重走行試験の数値解析による再現にも取り組み，その高い再現性を示すとともに，実際の試験では試験機の性能の限界から依然として不明であった終局状態の評価と，それ以後の損傷プロセスについて予測を試みた．

既往の輪荷重走行試験のうち，本研究で検討してきた1方向リブタイプの例を取り上げ，前述の数値解析手法を用いて，再現シミュレーションを実施した．リブ先端からの水平方向ひび割れの発生から進展，連続化までの損傷過程が再現可能であることを示した．また，水平ひび割れが発生した後でもひび割れ面のせん断伝達機能が失われるまでは床版の急激な耐荷力の低下には至らないこと，やがて水平ひび割れがコンクリートスラブを2層化すること，その後は上層のコンクリートが移動荷重直下で圧縮疲労破壊して版が終局に至るシナリオを示した．つまり，鋼殻で囲まれた合成床版では，コンクリートの疲労損傷にともなう床版としての機能低下が，たわみの急増だけでは計り得ないことが示された．よって，本研究では合成床版の破壊シナリオに沿って，コンクリート内部の水平ひび割れ連続化を疲労限界，また2層化後の上層コンクリート圧縮疲労破壊によるたわみ増大を終局限界と定めた．その関係を静的耐力を基準としたS-N図で提示することで，損傷がたわみの増加に大きく関与する鉄筋コンクリート床版とは異なる合成床版の長期管理・評価の基準として，合理的な指標を示すことができた．これが本研究の第二の成果である．

さらに，鋼コンクリート境界の摩擦が低下した場合を想定したシミュレーションを実施し，コンクリートの疲労損傷がたわみの増加に大きく関与するRC床版とは異なる，合成床版の長期管理・評価の基準として合理的な疲労限界を定める必要性について言及した．その一例として，コンクリートの損傷エネルギーに基づく評価手法を提示した．

本研究の数値解析は界面固着特性など幾つかのモデル簡略化に基づくため，定量的な観点からさらに検証が必要である．本論文で対象とした諸元に限らず，合成床版の終局破壊に至

るまでの疲労過程を実験的に明らかにした例は，RC床版に比べて少ない．今後の検証研究を待ちたい．また，数値解析を適切に取り入れることにより，実験的研究のみでは得るのは難しかったいくつかの貴重な成果を提示することができたが，本研究で対象とした合成床版は，様々な合成床版形式の中の1つに過ぎない．今後，本研究の目的である「合成床版疲労耐久性の定量評価システムの構築」の完成のため，他の合成床版に対しても長期管理・評価の基準として合理的な疲労限界の指標を定める研究を継続していきたい．