

論文の内容の要旨

氏名：前 島 拓

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：凍結防止剤散布下において劣化した道路橋 RC 床版の耐疲労性評価に関する研究

道路橋 RC 床版(以下、RC 床版)は、今なお、疲労による著しい損傷例が多く報告されている。このうち、輪荷重単独による疲労損傷は、既往の研究により床版下面のひび割れの進行過程による整理がなされ、床版下面からの点検により疲労損傷度を評価することが可能となり、現行の維持管理方法に適用されている。

一方で、東北地方をはじめとする積雪寒冷地では、凍結防止剤(主に NaCl)の大量散布に伴い、コンクリート構造物の塩害、凍害、アルカリシリカ反応(ASR)が促進され、近年、RC 床版の早期劣化が社会問題になりつつある。こういった地域の RC 床版では、前述した床版下面による点検で変状がほとんど見られない場合であっても、床版上面で損傷が著しく進行しているケースが多数報告されている。

このように、凍結防止剤散布環境下にある RC 床版については、従来の床版下面による点検では、その損傷度を適切に評価することが難しい。今後、対策を必要とする道路橋の増加が予想される中、インフラの更新が難しい社会情勢を踏まえると、疲労とともに材料劣化を受けるような複合劣化が生じる RC 床版の劣化の進行を把握し、損傷に応じた適切な対策を講じる必要がある。そのためには、凍結防止剤散布環境下において促進される各種材料劣化が RC 床版の耐疲労性に及ぼす影響を解明することが重要である。

以上の背景より、本研究では、凍結防止剤散布環境下において促進される材料劣化のうち塩害と ASR を取り上げ、これらが道路橋 RC 床版の耐疲労性に及ぼす影響について実験的・解析的に検討することを目的とした。

このうち、塩害を受ける RC 床版については、実物大に近い RC 床版供試体を作製し、これに対して、塩水を用いた乾湿繰返しによって塩害促進を実施した。そして、塩害による鉄筋腐食を模擬した RC 床版供試体による輪荷重走行試験を行い、その耐疲労性を実験的に評価した。次に、鉄筋腐食量をパラメータとした 3 次元非線形有限要素解析を実施し、鉄筋の腐食状況と、床版断面のひずみ分布より、耐疲労性に及ぼす要因を解析的に検討した。

ASR を受ける RC 床版については、反応性粗骨材を使用して作製した RC 床版に対して、環境条件の異なる ASR 促進を実施することで、ASR によるコンクリートの膨張速度および損傷状況を変化させた。そして、輪荷重走行試験により、ASR を受ける RC 床版の耐疲労性を評価した。また、輪荷重走行試験の各段階において、小型加振器を励振器とした強制振動試験を実施し、RC 床版内部の損傷レベルを定量的に評価することで、ASR が RC 床版の耐疲労性に及ぼす影響について実験的に検討した。

本論文は「凍結防止剤散布下において劣化した道路橋 RC 床版の耐疲労性評価に関する研究」と題し、7 章から構成されている。

本論文を要約すると、以下の通りである。

第 1 章は「序論」であり、本研究の背景となる、凍結防止剤散布下における道路橋 RC 床版の現状、および各種材料劣化を受ける RC 床版の耐疲労性評価の重要性を示した後に、本研究の目的を明らかとした。

第 2 章の「凍結防止剤散布下におけるコンクリート構造物の劣化および道路橋 RC 床版の耐疲労性評価に関する既往の研究」では、まず、凍結防止剤散布下におけるコンクリート構造物のうち RC 床版の損傷事例を中心に列挙し、現状の課題を整理した。さらに、本研究に係る既往の研究の要点を整理し、本研究で取り組むべき課題を明らかとした。その結果、材料劣化した RC 床版の耐疲労性に関する既往の研究は、実構造物に近い状態で再現された例が極めて少なく、疲労損傷機構の解明は十分にされていないことを明らかとした。

第3章の「塩害による鉄筋腐食が道路橋 RC 床版の耐疲労性に及ぼす影響」では、材料劣化のうち塩害を取り上げ、これが RC 床版の耐疲労性に与える影響を検討した。まず RC 床版の腐食ひび割れや鉄筋腐食性状などを、できる限り実構造物に近い状態で再現するため、長期にわたって屋外曝露環境下に供試体を設置し、さらに電気化学的な方法ではなく、塩水を用いた乾湿繰返しによって塩害促進を実施した。その際、促進時の塩分供給方法を変えることで異なる 3 条件の鉄筋腐食状況を生じさせた。そして、塩害による鉄筋腐食を模擬した RC 床版供試体による輪荷重走行試験より、その耐疲労性を実験的に評価した。

得られた主な結果は以下の通りである。

- 1) 塩害を受けた供試体は、健全供試体に比べ耐疲労性が低下し、静的載荷試験により評価されるはりの曲げ耐力に影響がないとされる鉄筋腐食減量率 5%程度であっても、輪荷重走行試験により評価される耐疲労性が 1/10 程度にまで低下することが確認された。
- 2) 凍結防止剤散布を模擬した方法により塩害促進を施した散布供試体におけるひび割れや活荷重たわみの測定結果は、床版下面に変状が表れたときには既に床版上面において劣化が顕在化しているといった、凍結防止剤散布下における実 RC 床版の現象とよく一致した傾向を示した。
- 3) 鉄筋腐食が RC 床版の耐疲労性に及ぼす影響は下側鉄筋に比べ上側鉄筋の方が大きいことが示唆される結果を示した。これは、上側鉄筋の腐食が大きいと、疲労荷重による鉄筋とコンクリートの間の付着が急激に低下し、これに起因して水平ひび割れが早期に発生することで著しく耐疲労性が低下するためと考えられる。

第4章は「鉄筋腐食が道路橋 RC 床版の耐疲労性に及ぼす影響に関する解析的検討」である。本章では、鉄筋腐食がたわみの進展に及ぼす影響に関する考察をさらに深めるため、第3章の実験と同一の材料特性のもと、腐食状況を極端に設定した 3 次元非線形有限要素解析による検討を行った。本解析検討では、腐食の有無、腐食部位、腐食量等をパラメータとした計 5 ケースとし、実験と同様の段階載荷方式による解析に加え、実験的には時間的制約で試験が困難な一定荷重載荷方式によるパターンも実施した。

得られた主な結果は以下の通りである。

- 1) 腐食状況を変化させた 3 次元非線形有限要素解析により、簡略的なモデル化を行っているものの、影響因子に応じたたわみの進展を解析的に捉えることが可能であり、第3章で述べた実験結果と同様に、下側鉄筋が腐食したケースよりも上側鉄筋の腐食が進行したケースで疲労寿命が低下するといった現象を解析的に推定することができた。
- 2) 上側鉄筋が腐食したケースでは、腐食に伴い発生するひび割れの影響により、鉄筋とコンクリート間の付着が低下することで、上側鉄筋位置における鉛直ひずみが輪荷重の繰返し作用により早期に増大し、重ね梁のような状態となることで耐疲労性が低下することが示された。

第5章は「アルカリシリカ反応が道路橋 RC 床版の耐疲労性に及ぼす影響」である。ここでは、材料劣化のうち ASR を取り上げ、まず、反応性粗骨材を使用して作製した RC 床版に対して、環境条件の異なる ASR 促進を実施することで、ASR によるコンクリートの膨張速度および損傷状況の異なる劣化を生じさせた。そして、ASR による劣化を受けた RC 床版による輪荷重走行試験より、ASR によるコンクリートの劣化を受けた RC 床版の耐疲労性を評価した。

得られた主な結果は以下の通りである。

- 1) ASR により劣化した RC 床版は、ASR の促進方法により床版の損傷状況及び耐疲労性が大きく異なり、急速に ASR を促した床版では、ケミカルプレストレスの影響により健全な床版に比べて耐疲労性がむしろ向上し、反対に、緩やかに ASR を促した床版では、耐疲労性が大きく低下する結果となった。
- 2) ASR 促進を実施した床版では、いずれも ASR によるひび割れが支配的となり、その後の疲労による新たなひび割れの発生が抑制される傾向を示した。特に、ASR を緩やかに促進させた床版では、ASR により発生した幅の大きなひび割れが支配的となったことで疲労によるひび割れの分散性を低下させ、その後の輪荷重走行試験では、輪荷重走行範囲直下で局所的にひび割れが進展し、急激な疲労破壊に至る傾向が示された。
- 3) ASR により劣化した RC 床版は、ASR の促進速度を変えることで、ASR 膨張量とこれに伴うケミカルプレストレスの導入量、さらにこれらの経時的な相互作用によるひび割れ性状が大きく変化し、これが、

その後の輪荷重走行試験による耐疲労性に大きな影響を及ぼすものと考えられた。

第6章は「強制振動試験による道路橋 RC 床版の疲労損傷度評価」である。ここでは、小型加振器を励振器した強制振動試験により、道路橋 RC 床版の耐疲労性を評価した。

まず、50 年間供用され撤去・架替えに至った実道路橋 RC 床版を切り出し、床版の劣化性状と共振周波数によりその劣化度を評価した。さらに、切り出した床版に対して輪荷重走行試験を実施し、疲労損傷の進展による共振周波数の変化を捉え、輪荷重走行試験結果と共振周波数との関係を整理した。

次に、実道路橋 RC 床版の疲労損傷評価で得られた知見を基に、第5章で実験を実施した ASR を受けた RC 床版の輪荷重走行試験の各段階において、RC 床版内部の損傷レベルを定量的に評価することで、ASR が RC 床版の耐疲労性に及ぼす影響について実験的に検討した。

得られた主な結果は以下の通りである。

- 1) 疲労損傷の各段階において複数点の共振周波数比を計測することで、目視の点検では困難である部材内部の損傷レベルの評価及び損傷範囲の推定が可能であり、床版内部の疲労損傷を検知する上で有効な手法となり得ることが明らかになった。
- 2) ASR 劣化した RC 床版は、床版上下面のひび割れ同様に、促進方法の違いにより床版内部の損傷度が異なり、急速に ASR を促した床版では、促進後における局所的な損傷程度は小さく、その後の輪荷重走行試験では輪荷重走行範囲全域で損傷が進行した。これに対し、緩やかに ASR を促した床版では促進後における局所的な損傷が著しく、その後の輪荷重走行試験では促進後における損傷が支配的となり、局所的に内部損傷が進展することが明らかとなった。

第7章の「結論」では、本研究で得られた主な結果を各章ごとにまとめるとともに、今後の課題について述べた。