

論文の内容の要旨

氏名：岸良 竜

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：アルカリシリカ反応により劣化した道路橋 RC 床版の構造性能評価とその補強方法に関する研究

わが国のインフラの多くは高度経済成長期以降に集中的に建設されており、建設後 50 年を超えるインフラの割合が今後飛躍的に増加することが見込まれている。このうち、道路橋は、現在全国に約 72 万橋あるとされ、建設後 50 年を経過する橋梁の割合が、2019 年の 27%に対し、10 年後の 2029 年には 52%まで急増すると予想されている。インフラは国民生活および経済活動の基盤であり、今後は計画的に維持管理・更新を進めていく必要がある。すでに NEXCO、首都高速道路および阪神高速道路では、それぞれ保有する道路インフラの大規模更新・大規模修繕プロジェクトを立ち上げ、老朽化対策に着手している。このうち NEXCO では、総工費約 30,200 億円のうち、約半分にあたる約 16,500 億円を道路橋の床版の更新・修繕に充てるとしており、道路橋を構成する部材の中でも、特に床版の劣化への対応が急務であることが認識されつつある。

近年、道路橋の鉄筋コンクリート(以下、RC)床版では、交通荷重の繰返しによる疲労損傷に加えて、塩害や凍害、アルカリシリカ反応(以下、ASR)といったコンクリートの材料劣化との複合劣化が顕在化しつつある。材料劣化のうち ASR に着目すると、RC 床版では ASR の発生は比較的少ないという認識も過去にはあったが、凍結防止剤の散布が本格化して以降、RC 床版における ASR の発生事例や損傷事例の報告が多くみられるようになってきた。RC 床版の維持管理を今後効率的に行うには、ASR による RC 床版の劣化性状を把握し、その構造性能にどのような影響を及ぼすかを明らかにすることが必要である。また、国や地方公共団体を通じて財政状況が厳しい現状を考慮すると、床版自体の架け替え(更新)が困難なケースも多くなると予想され、ASR により劣化した RC 床版に対する効果的な補修・補強方法を明らかにすることも重要である。

RC 床版の構造性能への ASR の影響に関する研究事例は少なく、十分な検討がなされているとは言い難い。通常、この種の検討を実験的に行う場合は、比較的高温の促進養生により ASR を急速に生じさせることが多いが、著者を含む研究グループはこれまでの検討で、ASR の反応速度が RC 床版の耐疲労性に大きな影響を及ぼし、特に実環境のように促進試験と比べ緩やかに ASR が進行した場合に耐疲労性が大きく低下することを明らかにしている。すなわち、ASR による RC 床版の劣化機構の解明に向けては、より実環境に即した条件下での検討が重要であるとともに、低下した構造性能を回復、向上させる補修・補強方法の確立が必要であるといえる。

以上の背景から、本研究では、ASR による RC 床版の構造性能への影響を明らかにし、効果的な補強方法を提案することを目的に実験的に検討を行った。実橋の RC 床版の ASR によるひび割れは、内部鉄筋に加えて鋼主桁の拘束の影響を受けると想定されることから、これらの拘束作用についても検討においては再現することとした。具体的には、屋外環境下の鋼主桁上に実物大の RC 床版を作製し、約 4 年間、ASR による劣化性状を評価した。また、実物大 RC 床版から供験体を切り出して静的載荷試験を行い、ASR が RC 床版の押抜きせん断耐力に及ぼす影響について実験的に検討を行った。さらに、ASR 劣化した RC 床版に対してラテックス改質コンクリート(以下、LMC)を用いた床版上面の部分打替えを行い、静的耐力の向上効果を検証した。

本論文は「アルカリシリカ反応により劣化した道路橋 RC 床版の構造性能評価とその補強方法に関する研究」と題し、6 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 RC 床版の現状を示した後に、ASR が RC 床版の構造性

能に及ぼす影響の解明および補強方法の検討の必要性を示し、本研究の目的を示した。

第2章の「既往の研究」では、RC床版におけるASR損傷事例、ASRがRC部材の構造性能に及ぼす影響に関する既往の研究の要点、およびASRが生じたコンクリート構造物の補修・補強方法に関する検討事例を収集、整理し、本研究で取り組むべき課題を抽出した。まず、ASRより劣化したRC床版でみられる変状の特徴を整理し、RC床版におけるASRによる劣化機構の解明の必要性を示した。つぎに、ASRがRC床版の構造性能に及ぼす影響が十分に解明されていないことを示し、ASRに関する研究においてより実環境を再現した条件下で検討を行うことの重要性を示した。さらに、ASRにより劣化したRC床版に対する効果的な補強方法の検討の必要性を示した。

第3章の「部分打替え補強したASRと疲労の複合劣化RC床版の耐疲労性評価」では、凍結防止剤散布下におけるASRと疲労により複合劣化したRC床版を想定し、その補強方法の検討を行った。まず、ASRと疲労を実験的に生じさせたRC床版供試体を作製した後、床版供試体の上側の損傷部を除去し、LMCを用いた部分打替えを行った。その後、輪荷重走行試験を実施することで、部分打替えによる耐疲労性向上効果を評価した。

得られた主な結果は、以下のとおりである。

- (1) 疲労限界時の等価繰返し走行回数を比較すると、部分打替え後は部分打替え前の178倍となり、ASRと疲労により複合劣化したRC床版に対する部分打替えによる補強効果が明確に認められた。これは、供試体上面を力学特性や水の浸透抵抗性に優れるLMCで置き換えたことで、圧縮側コンクリートのせん断抵抗が向上したことや、RC床版の耐疲労性を大きく低下させる水の浸透が抑制されたことなどが寄与したものと考えられた。
- (2) 共振周波数比は、ASRの発生やその後の輪荷重走行試験による疲労によって大きく低下したが、部分打替え後は共振周波数比も健全時までとはいかないが増加した。すなわち、この種の非破壊検査からも耐疲労性に対する補強効果の評価が可能であると考えられた。
- (3) 輪荷重走行試験終了後の断面観察より、疲労限界が上側鉄筋付近における水平ひび割れの発生に加え、部分打替え箇所界面の剥離によって有効な床版厚さが減少し、せん断耐力が低下したことに起因したものと考えられた。このことは、RC床版の損傷部分を新たな材料で打ち替えるような部分打替えにおける既設部との一体性の確保の重要性を示唆するものと考えられた。

第4章の「鋼主桁上RC床版のASRによる劣化性状評価」では、RC床版におけるASR劣化性状についてより実環境に即した評価を行うことを目的として、鋼主桁上に実物大のRC床版を架設し、約4年間、屋外暴露環境下で各種計測を実施した。具体的には、RC床版内部に設置した埋込み型ひずみ計により、RC床版の膨張挙動をモニタリングするとともに、強制振動試験、透気試験により、劣化の進行度を評価した。また、偏光顕微鏡観察とSEM-EDS分析により、ASRの発生状況を確認した。

得られた主な結果は、以下のとおりである。

- (1) RC床版におけるASRによる膨張は、床版内部の鉄筋による拘束の影響を受け、水平方向より鉛直方向で卓越した。このことにより床版内部には水平方向のひび割れが生じ、耐疲労性に影響を及ぼすと考えられる上側鉄筋位置で特に幅の大きなひび割れが生じた。また、水平方向の膨張には鋼主桁の拘束も影響していた。
- (2) ASRの温度依存性により、実環境下のASR膨張は季節変動を示した。外気温の上昇にともない膨張挙動が生じるが、膨張開始温度は劣化の進行にともない低下することを明らかにした。
- (3) 実体顕微鏡、偏光顕微鏡観察の結果、粗骨材の反応性リムの生成、ASRゲルの滲出、ひび割れの生成、セメントペースト中の高密度なひび割れが確認され、ASRの劣化進行度としては中程度～顕著と判定された。また、ASRゲルおよびCSHゲルの分析結果から、ASRの進行過程としては中期ステージであり、ASRによる反応余力をなお十分に有していると考えられた。
- (4) ASRによる床版供試体の膨張にともない共振周波数比は低下し、強制振動試験はASR劣化を検知するうえで有効な手法と考えられた。共振周波数比は、約0.8まで低下した後はほぼ一定で推移し、その後増加する傾向を示したものの、材齢4年では約0.7まで低下した。

- (5) 透気試験の結果、実環境下における RC 床版の表層品質は、床版の上下面で大きく異なることが明らかとなった。また、ASR の進行にともない透気係数は大きくなった。ASR によるひび割れを避ける計測を行えば RC 床版の表層付近の状態を透気係数にて評価できる可能性が示唆された。

第 5 章の「鋼主桁上で ASR を受けた RC 床版の構造性能および部分打替えによる補強効果」では、第 4 章の実物大 RC 床版から供試体を切り出して静的載荷試験を行い、ASR が RC 床版の押抜きせん断耐力に及ぼす影響について検討を行った。さらに、鋼主桁上の実物大 RC 床版上で LMC を用いた部分打替えを行った後に、同様に供試体を切り出して静的載荷試験を行い、部分打替えによる押抜きせん断耐力の向上効果を評価した。

得られた主な結果は、以下のとおりである。

- (1) ASR が生じた供試体では、ASR により床版内部に発生した水平方向のひび割れの影響により、静的載荷による斜めひび割れが水平方向に誘導される傾向を示し、特に、供試体配力鉄筋方向では斜めひび割れが圧縮側鉄筋付近より水平方向に進展した。
- (2) 鋼主桁や主鉄筋、配力鉄筋による拘束を受けて、ASR が中程度～顕著に進行した RC 床版では静的耐力が明らかに低下することが判明し、その破壊形態や耐荷機構は、ASR により発生した水平方向のひび割れに依存することが確認された。
- (3) 部分打替え後の供試体の押抜きせん断耐力は、補強前の約 1.5 倍であり、LMC を用いた部分打替えが、ASR 劣化 RC 床版の静的耐力の向上に有効であることを示した。

第 6 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、今後の課題と展望について述べた。