FWD 法を用いた複合劣化したコンクリート床版の

劣化評価に関する基礎的検討

久保 善司*, Ho Hong Sao**, 菊池 創太***, 杉山 瑞樹****, 桝谷 浩*****

*博(工),金沢大学准教授,理工学域環境デザイン学類(〒920-1192 石川県金沢市角間町) **修士,金沢大学大学院自然科学研究科環境デザイン専攻(〒920-1192 石川県金沢市角間町) ***学士,金沢大学大学院自然科学研究科環境デザイン専攻(〒920-1192 石川県金沢市角間町) ****金沢大学理工学域環境デザイン学類(〒920-1192 石川県金沢市角間町) *****工博,金沢大学教授,理工学域環境デザイン学類(〒920-1192 石川県金沢市角間町)

> 床版における劣化損傷については,疲労劣化によるものが主な課題とされ,輪荷重走行試験を含む研究蓄積による劣化メカニズムの解明に伴い, 維持管理対策などの多くの問題が解決されつつある.近年では,塩害,凍 害,アルカリシリカ反応など材料劣化による床版損傷も報告され,疲労損 傷以外のひび割れが発生し,床版の健全性に大きな影響を与える可能性が 指摘されている.本研究では,アルカリシリカ反応,塩害,およびそれら の材料劣化が複合した床版劣化において,小型 FWD 装置を用いて,異なる 劣化損傷における性能評価の可能性について実験的検討を行うこととした. キーワード:アルカリシリカ反応,塩害,複合劣化,FWD 法,劣化評価

1. はじめに

コンクリート構造物の早期劣化および長寿命化に伴い, 補修.補強を含め種々の維持管理を必要とする構造物は 膨大な数となりつつある.我が国においては,高度経済 成長期を通じて集中的かつ大量に社会資本の整備が進め られたこともその一因とされる.一般のコンクリート構 造物においては,塩害,中性化,凍害,アルカリシリカ 反応などの材料劣化に起因する構造物の劣化・損傷に対 する研究,および実務における維持管理対策が検討され てきた.他方,床版構造物においては大型交通車両の増 大など交通荷重に起因した疲労劣化による床版損傷が大 きな課題とされてきた.疲労による床版劣化については, 輪荷重走行試験による多くの研究蓄積によって,劣化メ カニズムの解明に伴い,実務における維持管理対策など の数多くの問題を解決しつつある.

しかし、スパイクタイヤの禁止以降、凍結防止剤の散 布量の増加に伴い、凍結防止剤に含まれる塩化物イオン に起因した塩害劣化を生じた事例が報告され、中には、 短期間で補修等を要する顕著な劣化に至った事例も報告 されている^{1),2)}.また、使用された骨材が反応性を有す る場合には、アルカリシリカ反応により損傷した事例も 報告されている³⁾.さらに、これらの材料劣化が複合し、 床版の疲労寿命を大きく損ない、早期に抜け落ちなどを 生じる可能性も指摘されている.その原因としては,材 料劣化が生じた場合には,疲労損傷以外のひび割れが発 生,進展することで,外部からの水分供給が増え,これ によって疲労劣化がさらに加速されること,また,材料 劣化によってコンクリートそのものの健全性が損なわれ ることが推察される.

アルカリシリカ反応による劣化においては、梁および 柱部材などにおいては、鉄筋等の拘束によって膨張が適 切に抑制されている範囲においては、耐荷性能に顕著な 影響はないとされている⁴⁾.床版にアルカリシリカ反応 が生じた場合には、梁および柱と異なり、上下方向の膨 張を拘束する鉄筋が存在しないため、アルカリシリカ反 応による膨張によって水平のひび割れが生じることが報 告されている⁵⁾.また、アルカリシリカ反応による劣化 した床版の力学的性能については、載荷試験結果から床 版の剛性が小さくなり、その場合の低下は、コンクリー トの圧縮強度試験から得られる弾性係数から推定される より顕著であることが報告されている⁶⁾.

床版構造物において、材料劣化が生じた場合には.疲 労耐久性に与える影響は大きいため、早期にそれらの兆 候を検知すること、さらには、それらの疲労耐荷性につ いての定量評価を適切に行う手法が必要とされている. 床版における健全度評価手法の一つとして重錘落下たわ み法(Falling Weight Deflection method, FWD 法)が挙げ

| 配合 | W/C | 単位量(kg/m³) | | | | | | | |
|------------------|-----|------------|-----|-----|-----|-----|------|-------|-------|
| | % | w | С | G | Sn | Sr | 減水剤 | AE剤 | NaCl |
| 反応性 コンクリート | 63 | 170 | 270 | 945 | 881 | 0 | 1.76 | 0.041 | 0 |
| 普通コンク リート(塩害) | 63 | 170 | 270 | 945 | 881 | 0 | 1.62 | 0.035 | 8.24 |
| 普通 コンクリート | 63 | 170 | 270 | 945 | 613 | 268 | 1.62 | 0.035 | 12.39 |

表-1 コンクリート配合

Sn:非反応性細骨材 Sr:反応性細骨材



られる.これらの手法を用いた既往の研究においては, 既設 RC 床版の対策要否等の評価を前提とした健全度評 価に用いられている^{7),8}.本手法の特徴としては,対象 とする床版のたわみを測定することで,床版の損傷程度, あるいは,局部的な損傷の有無等の情報が得られるとさ れる。他方,床版における劣化形態は,疲労劣化単独の ものから,塩害,凍害,アルカリシリカ反応など材料劣 化を伴うものまで,劣化形態が多様化しているとの報告 もされている^{9,10}.

本研究では、アルカリシリカ反応、塩害、およびそれ らの材料劣化が複合した床版劣化において、小型 FWD 試験器を用いて、異なる劣化損傷における性能評価の可 能性について実験的検討を行うこととした.

2. 実験概要

2.1 供試体

コンクリートは、反応性細骨材を用いたアルカリシリ

表-2 供試体一覧

| 供試体名 | 劣化要因 | コンクリート | エポキシ塗膜 |
|----------|--------|--------|--------|
| ASR単独1 | ASR | 反応性 | 上下筋 |
| ASR単独2 | ASR | 反応性 | 上下筋 |
| 複合劣化(下) | ASR+塩害 | 反応性 | 上筋 |
| 複合劣化(上) | ASR+塩害 | 反応性 | 下筋 |
| 複合劣化(上下) | ASR+塩害 | 反応性 | なし |
| 塩害単独(下) | 塩害 | 普通(塩害) | 上筋 |
| 塩害単独(上) | 塩害 | 普通(塩害) | 下筋 |
| 健全 | なし | 普通 | 上下筋 |

カ反応性を有するのものと、非反応性骨材を用いた普通 コンクリートの2種類とした.反応性細骨材の混和量は、 全細骨材量の 30%(体積)とした.添加アルカリには、 塩化ナトリウムを使用し、塩害を想定するものについて は、塩化ナトリウムの添加量を CI量が 5.0kg/m³となるよ うにし、アルカリシリカ反応(以下 ASR と略す)および ASR と塩害の複合劣化のものでは、等価アルカリ量が 8.0kg/m³となるよう添加した.配合を表-1に示す.

供試体の寸法は縦1150mm×横1150mm,厚さ100mm とした.鋼材としてD10の異形鋼棒を用い,鋼材比は主 筋方向,配力筋方向ともに1.07%(圧縮側:0.36%,引張 側:0.71%)とした.主鉄筋は床版の上面および下面か ら20mm(上面から20mmおよび80mm)の位置に配置 し,配力鉄筋は上面および下面から30mm(上面から 30mmおよび70mm)の位置に配置した.供試体配筋図 を図-1に示す.

ASR のみのもの (ASR 単独) では,添加した塩化ナト リウムによる鉄筋腐食が生じないよう異形鉄筋にエポ キシ樹脂塗装を施した (2 体). ASR と塩害の複合劣化を 想定したもの (複合劣化) では,上側鉄筋あるいは下側 鉄筋にエポキシ塗装鉄筋を用いるものと,上下側の両方 を未塗装とした3体を用意した。また,塩害のみのもの (塩害単独) では,上側あるいは下側鉄筋にエポキシ樹 脂塗装鉄筋を用いた.なお,比較用の普通コンクリート のもの (健全) については上下側の両方を未塗装とした。 供試体一覧を表-2に示す.

コンクリート打設後, 蒸気養生(50℃)を行い, 型枠 脱型後, 約 2~3 週間供試体をビニール製シートで覆い 乾燥を抑制し, 屋外において養生を行った. 養生終了後, ビニール製シートで覆った状態で,一日にあたり 10~12 時間程度, 50℃の蒸気を与え, ASR 膨張を促進した(促 進約1年後に屋外環境に移動した).

2.2 測定および試験方法

(1) 外観観察

供試体表面におけるひび割れ観察を目視で行い,ひび 割れのスケッチ図を作成した.なお,ひび割れ幅はクラ ックゲージにより計測した.



(2) 膨張ひずみ

供試体内部の膨張挙動を把握するため、供試体中央に 埋込み式モールドゲージ(東京測器社製, PMFL-50, 基 長:50mm)を供試体中心位置に埋設し.厚さ方向のコ ンクリートひずみを測定した.

コンクリート表面にコンタクトゲージチップを側面 で4箇所に貼付け,膨張ひずみを測定した(基長:250mm).

モールドゲージおよび供試体側面の測定位置を図-2 に示す.

(3) 鉄筋腐食測定

複合劣化および塩害単独のものについて、エポキシ塗 装をしていない鉄筋に測定用コードを取付け、携帯型腐 食診断器を用いて、自然電位および分極抵抗を測定した. 測定は、供試体中心部付近の3箇所とし、鉄筋交差部と 鉄筋交差部の間に電極を設置し、測定を行った。腐食判 定基準は、ASTMC 876 および CEB の基準を用いた.

(4) 超音波伝播速度

ASR, 複合劣化および塩害単独等の劣化による内部に 生じたひび割れがコンクリート性状に与える影響を把 握するため,供試体厚さ方向に,鋼材配置位置を避けて, 中心軸(床版上面から見た対称軸)とそれと直交するも う一つの中心軸上に, 5~6箇所において,超音波伝播速 度を測定した.同一箇所 3~5 回程度測定し,平均値を 算出した.

(5) FWD 法によるたわみ計測

小型 FWD 装置(図-3 参照)を用いて, 重錘高さ 50cm, 重錘質量 5kg の条件において,中央変位(最大値)およ

| 表—3 | 各供試 | 体のひ | 7 湾川わ | の特徴 |
|------|-------|-------------------|-------|-----|
| IX J | LIVEN | $r \rightarrow 0$ | | |

| | 上面 | 下面 | | |
|----------|-------------------------------|-------------------------------|--|--|
| ASR単独 | 鉄筋に沿ったひび割れ (方向性小),幅0.2mm以下 | 鉄筋に沿ったひび割れ (方向性小),幅0.2mm以下 | | |
| 複合劣化(下) | ほぼなし | 鉄筋に沿ったひび割れ (格子状),幅0.2mm以下 | | |
| 複合劣化(上) | 鉄筋に沿ったひび割れ (格子状),幅0.2mm以上 | ほぼなし | | |
| 複合劣化(上下) | 鉄筋に沿ったひび割れ (格子状),幅0.2mm以下 | 鉄筋に沿ったひび割れ (格子状),幅0.2mm以下 | | |
| 塩害単独(下) | ほぼなし | ほぼなし | | |
| 塩害単独(上) | ほぼなし | ほぼなし | | |





赤線:幅0.2mm以上



図-4 ひび割れスケッチ例

び荷重を計測した(加速度計データを積分処理). 床版 供試体の支持条件は,支間1000mm、4辺固定支持とし, 版中央に重錘を載荷した. 各供試体 3~5 回の測定を行 った.

3. 結果および考察

3.1 外観観察

外観観察結果によるひび割れ性状の特徴を表-3 に 示す.また,外観観察によるスケッチ例を図-4に示す.

ASR 単独の場合には、上下面のいずれにも、鉄筋位 置に沿ったひび割れが発生した.これに対して、塩害あ るいは複合劣化のものに比べて方向性は小さいひび割 れが発生していた.供試体側面付近を除けば、ひび割れ 幅は0.2mm 以下のものがほとんどであった.

これに対して、複合劣化のものでは、腐食を生じてい る鉄筋が位置する面のみに、鉄筋に沿った方向性の強い ひび割れが発生し、腐食を生じていない鉄筋が位置する 面については、顕著なひび割れは生じていなかった.ま た、複合劣化のものの中では、上面側の鉄筋が腐食して





いる複合劣化(上)のもののひび割れ幅は他のものより も大きく,鉄筋に沿ったひび割れ幅は0.2~0.4mmであ った.複合劣化(上下)および複合劣化(下)のものの 鉄筋に沿ったひび割れ幅は,ASR単独と同様,0.2mm 以下のものがほとんどであった.この原因として,上側 の鉄筋量は,下側に比べて拘束が小さく,そこにASR 膨張が作用することで複合劣化(上)の上面の膨張が大 きくなったことと,鉄筋腐食によって鉄筋に沿ったひび 割れが生じやすくなったことがその傾向を助長した結 果と考えられる.複合劣化(上下)の場合,ASR 膨張 力が上部と下部に分散されたたため,複合劣化(上)の 上面ほどひび割れが顕著とならなかったものと考えら れる.

塩害単独の場合には、鉄筋に沿ったものを含めて、 ひび割れはほとんど認められなかった.現段階において は、鉄筋の腐食量がひび割れを発生させるまでには至っ ていないためと考えられる.

外観観察結果から、劣化要因による影響は顕著に認



図-7 側面水平方向ひび割れ

められ, ASR と塩害が複合した場合には, ASR 単独の 場合よりもひび割れ発生が顕著となることが確認され た. 今回は ASR 促進環境であったが, 塩害単独のもの でも腐食発生に十分な塩化物イオン量が混和されてい たことから, ASR によるひび割れの発生は, 塩害単独 によるひび割れ発生よりも早期に生じる可能性が示唆 された.

3.2 膨張ひずみ

床版供試体側面の水平方向の膨張ひずみを図-5 に 示す.主筋および配力筋方向の鋼材比は同一としたため, 4箇所の膨張ひずみから各供試体の平均値を算出し,供 試体の膨張ひずみとした.

水平方向の膨張量は,800 µから 1500 µ程度であっ た.鋼材比が約 1%程度であったため,水平方向の膨張 が拘束されたためと考えられる.なお,鉄筋拘束とASR 膨張の関係についての既往の研究においては,鉄筋拘束 が 0.8%以上となると,無拘束のものと比べて大幅に抑 制されることが報告されている⁴.なお,複合劣化のも ので,上下鉄筋が腐食しているものが他のものより膨張 が大きくなった原因については,鉄筋腐食と軸筋に沿っ たひび割れが発生し,コンクリートとの付着等に影響を 与えた可能性が推察される.

実環境下においても、かぶりが小さい場合、凍結防 止剤から塩分浸透が生じる場合には、鉄筋腐食と ASR が同時に進行し、膨張およびひび割れの進展が助長され る可能性が高いものと考えられる. 2.1 外観観察におい て述べたとおり、現段階においては、ASR 単独の場合 には、軸筋に沿ったひび割れも認められたが、複合劣化 (上側腐食)のものほど顕著でなかった.これらは、鉄 筋腐食と ASR 膨張の両者の影響によって生じた可能性 が高く、上記の膨張挙動に関する証左と考えられる.

床版供試体の厚さ方向の膨張ひずみを図-6に示す. 厚さ方向の膨張ひずみは、3000 µ から 4000 µ 程度であった. 促進期間中に、埋設したモールドゲージの計測が 困難となったが、それ以前には他のものと同様の膨張挙 動を示しており、厚さ方向の膨張挙動は概ね、ASR 単 独の場合と複合劣化の場合と大きな相違はなかったも のと考えられる. いずれの場合にも、厚さ方向の膨張を 拘束する鋼材は存在せず、厚さ方向の ASR 膨張に、顕 著な相違を生じなかったものと考えられる.

なお、供試体側面には、図-7に示すような水平ひび 割れが、ASR 単独および複合劣化のいずれのものにも 生じていた. 拘束のない厚さ方向に大きな膨張が生じた 場合には、床版には水平ひび割れ、あるいは、膨張に相 当するひび割れ損傷が生じるものと考えられる.



3.3 鉄筋腐食測定

ASR 単独および複合劣化のものの自然電位および分極抵抗の測定結果を図-8および図-9に示す.

自然電位においは、いずれのものも腐食を示す電位を 示した. 混和した塩化物イオン量は、ASR 単独のもの では7.6kg/m³であり、複合劣化のものはそれよりも若干 小さい5.0kg/m³であったが、いずれも腐食を生じるに十 分な塩化物イオン量が含まれている.また、促進環境に おいては、1 日に約 10 時間程度、50℃の蒸気環境に静 置されていたことから、鉄筋腐食が発生・進行する環境 にあった.なお、鉄筋腐食測定前には、蒸気を与えず、 常温(屋外温度)になるまで静置し、測定を行った.

分極抵抗値については,促進日数の増加に伴い,分極 抵抗が大きくなる(腐食速度が小さくなる)傾向を示し たものの,概ね腐食を示す分極抵抗値を示した.

分極抵抗値の算出においては、分極範囲を10cmと推



図-10 超音波伝播速度

定した. 腐食が生じると分極範囲が小さくなることが知られており, 推定よりも小さな分極範囲へと推移した可能性も高く, 分極抵抗が大きくなった一因として考えられる. これらについては, はつり出し等を行い, 実際の腐食状況について検討を行う必要がある.

外観観察結果で述べたとおり、ひび割れ性状について は、複合劣化したものと塩害単独のものでは相違が認め られ、鉄筋に沿ったひび割れ発生は、複合劣化のものの 方が顕著であった。しかし、分極抵抗にはその影響が認 められなかった.この原因としては、促進環境において は、鉄筋付近の含水状態がひび割れ性状の有無にかかわ らず、概ね同程度であったためと推察される.

腐食に関しては、塩害単独と複合劣化の相違は、促進 環境においては明確には現れなかったため、今後、環境 条件等を検討し、これらの影響を明らかにする必要があ る.

3.4 超音波伝播速度

各供試体の厚さ方向の超音波伝播速度を図-10 に示 す。各供試体における測定箇所の測定値を全て平均して 算出した.平均値では,健全なものの超音波伝播速度は 4500m/s 以上の速度となり, ASR 単独および複合劣化 のものの超音波伝播速度は4200m/s程度と低下していた. なお,塩害単独のものは,健全なものと同程度の超音波 伝播速度を示した. ASR および複合劣化のものの超音 波伝播速度の低下は,厚さ方向の膨張に伴い内部に発生 した水平ひび割れ,もしくはひび割れ損傷によるものと 考えられる.

3.5 FWD 法によるたわみ計測

FWD 法により計測した各供試体の最大荷重を図-11 に示す. ASR および複合劣化したものの最大荷重はわ ずかに小さかったが、いずれのものも 5000N 程度の最 大荷重であった.劣化の有無および複合劣化のいずれに おいても最大荷重の相違はないものと考えられる.

FWD 法により計測した最大の中央変位を図-12 に示



図-12 FWD 最大変位

す.健全および塩害単独のものの変位は 0.12mm 程度で あったのに対して、ASR 単独のものでは 0.15mm 程度, 複合劣化のものでは 0.15~0.17mm 程度となった.ASR 膨張によって床版の剛性が低下したため、ASR 単独お よび複合劣化したものの変位が健全なものと比べて大 きくなったものと考えられる.他方、塩害単独のもので は、健全のものと同程度であったため、現段階の腐食進 行においては、床版の変位に影響を与えるものでなかっ たものと考えられる.なお、複合劣化および塩害単独の いずれの場合にも、はく離や浮き等は確認されていない 段階であり、腐食初期の状態を検知するにはさらなる検 討が必要である.

4. まとめ

本研究の範囲内で得られた主な結果を以下に示す.

- (1) 外観観察の結果から, ASR 単独の場合よりも複合劣 化したものの方が軸方向に沿ったひび割れが顕著 であった.
- (2) ASR と塩害が複合した場合, 膨張およびひび割れの 進展が助長される可能性が高い.また,塩害単独の 腐食によるひび割れ発生よりも, ASR によるひび割 れが早期に発生する可能性が高い.
- (3) 腐食測定の結果から,塩害単独および複合劣化のもののいずれも鉄筋の腐食進行が確認された.しかし,両者の相違は現段階では確認できなかった.
- (4) 超音波伝播速度の結果から、内部の厚さ方向にASR

膨張に伴う水平ひび割れ,あるいはひび割れ損傷の 発生が確認された.

- (5) FWD 法により, ASR および複合劣化したものの中 央変位は健全のものより大きくなり,劣化発生の有 無が検知できること,塩害の初期段階では,健全の ものとの相違が変位からは認められなかったことが 確認された.
- (6) ASR と複合劣化の相違,劣化形態による腐食進展, など,促進環境などについて更なる検討を行い,明 らかにする必要がある.

謝辞

本研究は、SIP「インフラ維持管理・更新マネジメント 技術」の支援の基に実施した。

参考文献

- 横山和昭,本荘清司,葛目和宏,藤原規雄:道路橋 RC床版の鉄筋腐食を伴う劣化機構の解明に関する研 究,コンクリート工学年次論文集,Vol.30,No.3, pp.1687-1692,2008.7
- 2)本荘清司、中野将宏、藤原規雄、葛目和弘、牧博則: 凍結防止剤によって塩害劣化した鋼橋 RC 床版の詳 細調査、コンクリート構造物の補修、補強、アップグ レード論文報告集, Vol.10, pp.51-56, 2010.10
- 3) 石川裕夏,久保善司,横山広,出口一也:凍結防止剤 がコンクリート構造物に及ぼす影響に関する実態調 査,コンクリート工学年次論文集,Vol.34,No.1, pp.766-771,2012.7
- 4) 土木学会:アルカリ骨材反応対策小委員会報告書,コンクリートライブラリー124,2005.8
- 5) 久保善司,佐古崇,川崎文義,横山広:床版部材の ASR 膨張挙動と FRP シート貼付けによる膨張抑制, コンクリート工学年次論文集,Vol.31, No.1, 2009.7
- 6) 久保善司,市原鴻,横山広,桝谷浩:ASR 劣化床版の弾性挙動に関する基礎的研究:第8回道路橋床版シンポジウム論文報告集,pp.45-48,2014.10
- 7) 関口幹夫,國府勝郎: FWD による床版の健全度評価 手法の検討,構造工学論文集,Vol.50A, pp.697-706, 2004.3
- 山口恭平,早坂洋平,曽田信雄,大西弘志:FWDを 用いた既設 RC 床版の健全度評価手法に関する一考 察,構造工学論文集,Vol61A,pp.1062-1072,2015.3
- 9) 田中良樹,村越潤一:道路橋鉄筋コンクリート床版の 劣化形態の多様化と防水対策,第8回道路橋床版シン ポジウム論文報告集,pp.281-284,2014.10
- 小林孝一, 鹿野裕, 六郷恵哲:山間寒冷地における RC 床版の ASR と凍害による複合劣化の事例と検証 実験, 土木学会論文集 E2, Vol.70, No.3, pp.320-335, 2014

(2016年7月18日受付)