

アルカリシリカ反応と輪荷重疲労で複合劣化した床版の疲労耐久性

五島孝行・大田孝二・岸良 竜・大野 晃・前島 拓・久保善司

1. はじめに

昭和30年代から40年代に建設された日本の鋼橋床版には数多くの損傷や抜け落ち事故が生じ、大きな問題となった。その原因として、設計床版厚が薄いこと、配筋量の不足とともに、過積載のトラック荷重や当時導入されたポンプ打設などのいくつか要因が指摘されている。その対策として昭和50年代以降、床版厚さを増し、配筋量の追加を行うなどの設計対応を繰り返した結果、最近の新設床版における損傷事例は極めて少なくなった。

一方、地方の橋梁では、さほど大きな荷重が頻繁に通過する条件ではない橋梁で、床版の損傷程度が軽微、あるいは簡易な補修を施した状態での供用を継続し、建設後40年を超えて供用されている床版も存在する。このような床版の場合、その供用期間の長さから、輪荷重の疲労に加え、塩害や凍害等によるコンクリートの材料劣化を受けた床版も多く^{1),2)}、また、アルカリシリカ反応（以下ASRと記す）を呈する床版の損傷事例も報告³⁾されるようになってきている。ここではRC床版の複合劣化の一例として、ASRと輪荷重による疲労を取り上げ、反応性骨材を用いた床版試験体に対する輪荷重移動載荷実験について紹介する。

2. ASRを呈する床版の損傷例

2.1 ASRコンクリートの特徴

ASRはセメント内のアルカリ（NaやK）分と骨材中の反応性分が水の存在で化学反応を起こし、コンクリートに有害な膨張現象を生じる現象である。最近では、使用する骨材が反応性か否かを確かめることでASRの発生を未然に防ぐことができるが、40年も前にはその手法はまだ確立しておらず、それどころか、日本にはそのような反応性骨材は無いとさえ言われていた。この膨張現象は非常にゆっくりと生じることもあって、ASRはコンクリート劣化におけるもっとも扱いにくい現象の1つとなっている。ASRは水分や凍結防止剤（NaCl等の塩類）

により加速することが確認されており、凍結防止剤散布がASR被害を促進させているとされている。内部からの膨張はコンクリート表面にひび割れを生じさせ、特に部材厚さの大きな構造物のひび割れが多い。写真-1に橋脚の損傷例を示す。



写真-1 橋脚のASR損傷の例（オリエンタル白石、角本氏撮影）

2.2 道路橋床版のASR損傷²⁾

比較的厚さが薄い道路橋のRC床版にASRが生じ、さらに輪荷重が作用した場合、どのような損傷形態となるのかを紹介する。

調査した床版は、別途行われた調査でASRでの損傷であることが確かめられている、建設後47年を経過した道路橋床版である。損傷床版のアスファルト舗装をはぎ取ると、写真-2のように床版上面のかぶりコンクリートが土砂化し、上側鉄筋が露出しているのが広い部分で観察できた。床版の下面は鋼板接着工法で補強されていることもあり、水が抜け難い構造となっており、床版内部への雨水の滞水や凍結防止剤によるアルカリがASRを促進した可能性が考えられる。



写真-2 床版上側主筋の露出状況

この床版からコアを採取してひび割れの様子を調査したのが写真-3である。下端の青い線は鋼板接着用のエポキシ樹脂である。ひび割れは水平方向に卓越しており、とくに下側の鉄筋位置付近に比較的大きなひび割れが観察できる。

コアを採取して行った床版コンクリートの調査によれば、ほとんどのコアは水平方向のひび割れのためにコア採取ができず、採取した6体のコアの

うち唯一、高さ/直径の比が2.0以上を満たしたコアの圧縮強度は16.5MPa(ヤング係数は2.3GPa)であり、設計基準強度(合成桁であるため28MPaと考えられる)を大きく下回り、極めて劣化していることが判明した。

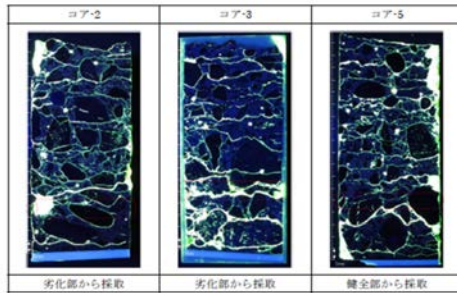


写真-3 コアのひび割れ状況

3. ASR床版の輪荷重移動載荷試験

3.1 試験の目的

輪荷重移動載荷試験は、ASRの促進期間を変え、異なる劣化状態を再現した床版試験体に輪荷重を走行させ、ASRがRC床版の耐疲労性に与える影響を確認することを目的とする。

輪荷重移動載荷試験の床版試験体製作に先がけ、使用する反応性粗骨材が実際に膨張するか否かの確認と、粗骨材を用いてコンクリートとして使用する場合の膨張性を確認した。さらにASRを促進させるために必要となる養生方法などの条件を確認するための予備試験を実施した。以下に概要を記述する。

3.2 反応性骨材の膨張性確認試験

本試験では、入手した反応性粗骨材について、反応性とコンクリートに使用する場合の膨張性を確認した。

反応性の確認は一般的には、JISA1145化学法とJISA1146モルタルバー法が使われるが、今回は化学法に準じた試験を採用した。溶解シリカ量とアルカリ濃度の比較により、「無害でない」判定となった。

コンクリートに使用する場合の膨張性の確認は、 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の円柱供試体を3本製作し、約1日間蒸気養生した後、デンマーク法によるASR促進膨張試験を3ヶ月間実施した。

コンクリートの配合は水セメント比60%とし、ASR膨張を早期に生じさせるため、アルカリ(NaCl)を Na_2O 換算で 10kg/m^3 添加した。

また、デンマーク法は、温度 50°C 、飽和NaCl溶液への浸漬で行った。

デンマーク法による3ヶ月の膨張量試験結果は0.6% ($6,000\mu$) に達し、通常、デンマーク法で行

う残存膨張量試験において残存膨張性の判断基準とされる0.4% ($4,000\mu$) に比べても大きな膨張量を示した。

3.3 床版試験体の製作のための予備試験

予備試験は、輪荷重移動載荷試験で採用する床版試験体の条件や方法を設定するために行うもので、ASR反応を促進させるために添加するNaClが鉄筋の腐食に影響を及ぼすか否か、膨張量の測定はどのような方法が適しているか、さらに、移動載荷試験で使用する実物大のRC床版の養生方法を確立するため、NaClの添加の有無、養生方法を変えて試験を行った。

供試体は、無筋の円柱供試体($\phi 100 \times 200\text{mm}$)を6体(NaCl添加3体、無添加3体)、鉄筋を配置した角柱供試体($100 \times 100 \times 400\text{mm}$)を12体(NaCl添加+浸漬:3体、無添加+浸漬:3体、NaCl添加+湛水:3体、無添加+湛水:3体)製作し、コンクリートの配合は、水セメント比65%とし、ASRを促進させるためのNaClの添加は3.1と同様に Na_2O 換算で 10kg/m^3 とした。ここで、浸漬とは供試体をNaCl水溶液中に沈めるもので、湛水とは供試体上面にNaCl水溶液を湛えるものである。

NaCl添加の有無や浸漬と湛水の場合に関わらず、全てのケースで鉄筋の表面に錆は認められたが、鋼材腐食減量率はいずれの条件においても1%未満であり、RC部材の疲労耐荷力に影響を及ぼすレベルには達していないことを確認した。

促進養生方法については、環境試験装置内で移動載荷試験で使用する実物大のRC床版を全面浸漬することは作業上の制約を受け困難であることから、床版上面に湛水する方法でもASR促進が可能であるか否かを判断するために、角柱供試体において浸漬と湛水の2種類について試験を行った。浸漬供試体と湛水供試体のひずみ量を比べた結果、浸漬供試体の1供試体で湛水供試体の最大ひずみ量の1.3倍となった他は、全体的には同じようなひずみ量を示すことを確認した。

この予備試験の結果から、実際の輪荷重移動載荷試験では、次の条件を採用することに決定した。

- ① ASR促進にはNaClを添加する。
- ② 促進養生には湛水養生を採用する。

3.4 床版試験体の製作と載荷

輪荷重移動載荷試験の試験体 ($2.0 \times 3.0 \times 0.16\text{m}$ 厚さ) は、同じ反応性粗骨材を使用し、水セメント比

土研センター

65%のコンクリートにNa₂O換算で10kg/m³のNaClを加えて図-1に示す3体を製作した。

主鉄筋(D16)は下側150mm、上側300mmピッチで配置し、配力鉄筋(D13)は下側125mm、上側250mmピッチで配置した。ひずみゲージ(図-1参照)は、主鉄筋計測用(○)を床版支間中央部と端部の3か所、配力鉄筋計測用(×)を床版支間中

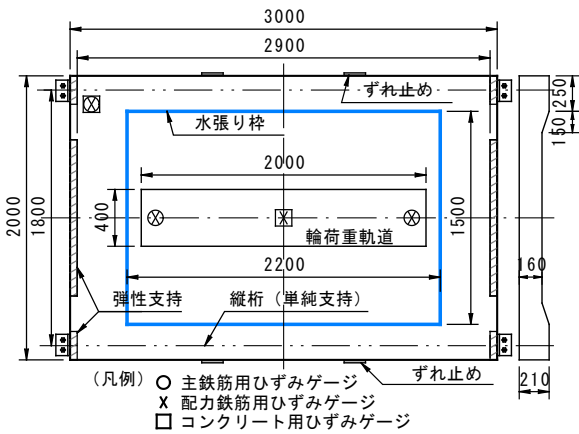


図-1 床版試験体形状及び支持条件

央部と端部の4か所に配置した。コンクリート計測用埋め込み型ひずみゲージ(□)は床版支間中央部と端部の2か所に配置した。

3体の実験条件を表-1に示す。

表-1 床版試験体の実験条件

| 供試体 | 劣化状態 | 床版上面の水張り有無 |
|-----|-------|------------|
| 床版Ⅰ | 健全相当 | 無 |
| 床版Ⅱ | 進展期相当 | 無 |
| 床版Ⅲ | 加速期相当 | 有 |

本実験では、ASRが耐疲労性に与える影響を確認するため、各試験体の劣化状態を変化させた。ここでは、各劣化状態を示す進展期相当、加速期相当の定義については、土木学会コンクリート標準示方書維持管理編のASRの章を参考に、進展期相当は、RC床版上面にひび割れが発生した時点、加速期相当は、進展期よりもRC床版上面のひび割れが進展し、ひび割れの幅が大きくなる時点と定め、各試験体はその状態になるまで次に示す養生を行った。

床版Ⅰは、4週間の湿布養生のみで健全相当の状態とした。床版Ⅱは4週間の湿布養生後、41日間のASR促進養生(室温50℃、80%の湿度、上面に飽和NaCl水溶液を湛水)を行い、進展期相当の状態となった。床版Ⅲは9日間の湿布養生の後、アルカリイオンの濃度拡散および鉄筋腐食を防ぎつつASRを緩やかに進行させるために5%NaCl水溶液

に87日浸漬養生した後、床版Ⅱと同様のASR促進養生を59日間行い、加速期相当となった。床版Ⅱと床版Ⅲは、養生期間中、各試験体の目標とする劣化状態になるまでひび割れ観察を行うとともに、配力鉄筋配置(x)方向、主鉄筋配置(y)方向、版に対し垂直方向(z)のひずみを測定した。

載荷試験機は写真-4に示すように、載荷の輪荷重が固定されており、試験体を載せた台車走行のタイプで、輪の移動距離は2mである。前述の促進養生を行った3試験体を用いて輪荷重移動載荷試験を実施した。図-1に示すように各床版試験体は床版支間1,800mmを受桁2辺で支持されており、短辺は形鋼を用いて弾性支持としている。



写真-4 輪荷重移動試験機(台車走行型)

図の水張り枠とは、床版Ⅲで湛水した部分である。

床版荷重はT荷重の1輪を想定して98kNを基準とし、走行回数が10万回、20万回、25万回に達した際に載荷荷重を29.4kNずつ増加させ、等価繰返し走行回数で床版の疲労耐久性を評価した。ひずみやたわみ、ひび割れの計測では、目標回数を載荷した後、基本荷重(98kN)を載荷して計測した。

4. 試験結果

4.1 ASR促進結果

図-2

より、ASR促進期間中の床版中心部のコンクリートのひずみ量は、床版を問

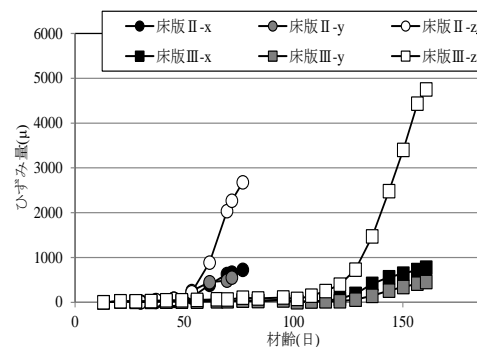


図-2 コンクリートひずみ

わず配力鉄筋配置(x)方向と主鉄筋配置(y)方向では同じような増加傾向を示す一方で、版に対し垂直(z)方向のひずみは、明らかに増加する傾向を示し、促進期間の長い床版Ⅲでは4750μまで達し、床版

IIに比べ 2000 μ ほど大きい結果となった。これは ASR によるコンクリートの膨張が鉄筋による拘束を受けにくい z 方向に進展したためと考えられる。なお、輪荷重移動載荷試験後に輪荷重の影響が少ないと考えられる範囲の床版から採取したコアの観察では、コンクリートの膨張により水平ひび割れが発生していることを確認した。

4.2 輪荷重移動載荷試験結果

活荷重たわみと等価繰返し走行回数の関係を図-3に示す。各床版の疲労限界状態に至った等価繰返し走行回数は、98kN換算で床版 I が700万回、床版 II が9,000万回、床版 III が2,300万回であった。健全相当の床版 I よりも、ASR促進養生を行った床版 (II, III) の方が疲労破壊に至る走行回数は大幅に増加していることから、床版 II と床版 III は健全相当の床版

I よりも耐疲労性が向上していることが分かる。

走行回数の増加に伴う各床版の活荷重たわ

みは、床版 I では徐々に増加していくのに対し、促進養生を行った床版 (II, III) では、いずれも増加量は小さい傾向を示した。これは、ASR によるコンクリートの膨張を鉄筋が拘束し、ケミカルプレストレス⁴⁾が導入されたため、活荷重たわみの増加を抑制したものと考えられ、床版 II と床版 III の活荷重たわみの推移が同程度である理由もこれによると解釈される。

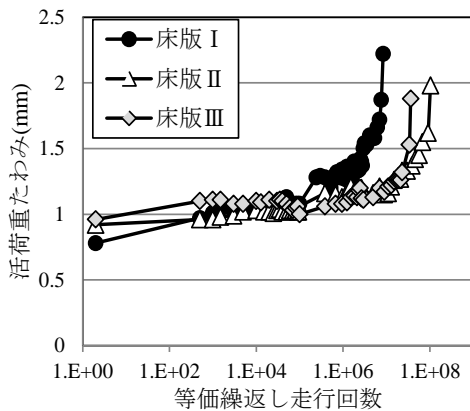


図-3 活荷重たわみ・等価繰返し走行回数

また、ASR 促進を実施した床版で比較すると、床版 III では、等価繰返し走行回数が床版 II の 25% 程度で疲労破壊に至っている。これはこれまでの研究成果で報告されている水の影響を受ける場合は水のない場合に比べ等価繰返し走行回数が 1%以下になる⁵⁾のに比較して大きいものとなっており、ASR の膨張により導入されたケミカルプレストレスが耐疲労性を向上させた結果であると推察される。

5. まとめ

本研究ではつぎの成果を得ることができた。

- (1) ASR による膨張は、平面方向に比べ床版厚さ方向に卓越していることが分かった。ASR が生じた RC 床版では、床版厚さ方向の膨張が水平方向のひび割れに寄与していることを確認した。
- (2) 本実験では、ASR 促進時においてコンクリートが急激に膨張し、床版の x、y 方向にはその作用が鉄筋により拘束されたことによりケミカルプレストレスが導入され、RC 床版の耐疲労性が向上した。

今後は、実床版に生じている ASR 損傷を参考に、輪荷重による疲労と ASR の進行過程の関係についても調査を行いながら、切り出し床版を利用するなどして、実床版の損傷度の評価が行えるように研究を重ねて行きたい。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：融雪剤によるコンクリート構造物の劣化研究委員会報告書、1999
- 2) 橋吉宏：鉄筋コンクリート床版の損傷と調査、橋梁と基礎、2014.5
- 3) 五島孝行、大田孝二、柴田辰正、伊戸康清、島田守：アルカリシリカ反応で損傷した道路橋床版の調査、土木学会第68回年次学術講演会講演集、2013
- 4) 小林和夫：アルカリ骨材反応を生じた部材や構造物の耐荷重性能—はり部材—、コンクリート工学、Vol.24、No.11、pp.70~78、1986
- 5) 大田孝二：道路橋RC床版の設計と損傷、橋梁と基礎、2013.11

五島孝行



(一財)土木研究センター企画・審査部次長
Takayuki GOTO

大田孝二



(一財)土木研究センター企画・審査部長、工博
Dr Kouji OHTA

岸良 竜



太平洋セメント(株)中央研究所 第2研究部
Ryo KISHIRA

大野 晃



住友大阪セメント(株)セメント・コンクリート研究所
Akira OHNO

前島 拓



日本大学大学院工学研究科 博士後期課程
Takuya MAESHIMA

久保善司



金沢大学理工学域環境デザイン学類准教授、工博
Dr Zenji KUBO