

第3回 既設構造物の変状（その2）

講師：立神 久雄*

1. はじめに

第2回では、① 輪荷重による疲労、② 塩害について説明しました。第3回では、③ 凍害、④ アルカリシリカ反応（ASR）、⑤ 想定外の収縮・クリープ挙動に起因する劣化、⑥ 複合劣化、⑦ 付属物の変状に起因する劣化について説明します。また、更新用プレキャスト PC 床版特有の変状例に関しても説明をします。

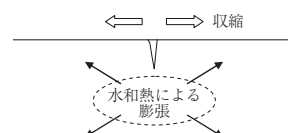
2. 凍 害

氷点下に至る温度の繰返しが起こる地域では、凍害によるコンクリートの劣化が懸念されます。既設橋梁の RC 床版や地覆・壁高欄においても、橋面上に滞水した雨水および融雪水の影響により、床版上面や地覆・壁高欄の表面が劣化した事例があるばかりでなく、地覆から伝わる雨水などの影響により、床版下面の水切り部にも凍害が多く発生しています。凍害を受けた床版は、コンクリート表面の微細なひび割れ、ポップアウト、スケーリングなどの形で劣化が顕在化するのが一般的です。

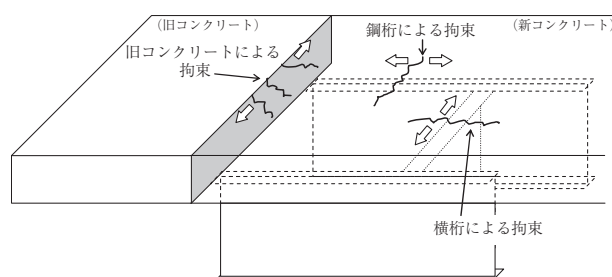
3. アルカリシリカ反応

床版の配筋は、版の断面に対して上下に層状に配置される構造であり、一般的に上下方向に補強材が存在しないことから、アルカリシリカ反応（以下、ASR という。）が床版に発生すると、主に上下方向に膨張が生じます。結果として水平方向のひび割れが卓越することとなり、版は層状化し剛性が大幅に低下することとなります。よって、適切な補修・補強を施す必要があります。厳密には ASR 単独で劣化が進行することは少なく、凍結防止剤散布による ASR 促進やその浸透による塩害の併発など複合劣化の様相を示すことが多いと考えられます。

近年、橋梁に関してはアセットマネジメントによる維持管理手法の浸透により定期的な点検が実施されるようになってきています。点検の注意点としては、床版に関しては「疲労」問題が突出しているため、網目状ひび割れと白色析出物で疲労劣化が進行していると判定される場合があります。これは、ASR が発生した床版でも同様の劣化現象となるためですが、下部構造など他の構造物でも ASR が発生している地域か否か、交通量が疲労を考慮する程度の



① 内部拘束によるひび割れ



② 外部拘束によるひび割れ

図 - 1 収縮差によるひび割れ

ものかを調べれば判定の精度は向上し、さらに建設年次や凍結防止剤の散布の有無で混同することは無くなると考えられます。なお、ASR を簡易に判定する手法として ASR ゲルステイン法が開発されています。この手法ではコンクリートの表面に試薬を噴霧することでアルカリシリカゲルが変色する反応を利用しています。

一般に ASR が発生したコンクリートでは弾性係数が低下することが知られています。床版構造での弾性係数の低下はたわみの増大という形で表面化しますが、前述の水平ひび割れでも剛性が低下することとなります。

4. 想定外の収縮・クリープ挙動に起因する劣化

コンクリートの収縮には、水和反応による収縮、乾燥収縮、自己収縮などがあります。なかでも、維持管理の実務上、とくに重要な乾燥収縮は、コンクリートが時間の経過に伴って収縮する現象であり、これはコンクリート中のセメントペーストが乾燥することによって収縮するというメカニズムです。この収縮作用が何らかの拘束を受けるとコンクリートにひび割れが発生します。この拘束は、内部拘束と外部拘束（図 - 1）に分けられます。また、乾燥収縮に影響を及ぼす要因としては、仮想部材厚（部材断面積

* Hisao TATEGAMI：ドーピー建設工業(株) 技術開発部

/外気に接する周長), 相対湿度, コンクリートの単位水量および鉄筋比などがあります。

コンクリートにひび割れを引き起こす内部拘束とは, コンクリートの表面と内部の体積変化量の差 (図 - 1 ①) による拘束のことです。この内部拘束による乾燥収縮ひび割れは, 竣工後, 初期の段階で発生しやすい現象です。

一方, 外部拘束は, たとえば, 旧コンクリートと新コンクリートの収縮量に差が生じることによって拘束力が発生し, ひび割れを引き起こします (図 - 1 ②)。

クリープは, 一定の応力が作用し続けると時間の経過とともにひずみが増大していく現象です。PC 床版では, クリープひずみによってプレストレスの減少が生じます。この影響で, 耐荷力の低下やひび割れの発生によるほかの劣化機構の発生, 変形の進行による使用性の低下などが劣化として現れます。

5. 複合劣化

5.1 複合劣化の概要

床版の劣化については, 単独の劣化要因による劣化のみならず, 複数の要因による複合劣化が考えられます。しかし, その損傷に対する各要因の特定, また複合劣化によりどの程度劣化速度に影響が出るのかは, 現在各分野で研究が進められているところであり, いまだ説明されていない部分が多いのが現状です。

床版は輪荷重を直接支持する部材であるため, すべての複合劣化には輪荷重による影響が付加的に関係すると考えられます。たとえば塩害, 中性化, ASR, 凍害などにより劣化進行した床版に輪荷重が加わると, コンクリートのひび割れおよび土砂化が増進されます。また, 疲労劣化により床版下面, 内部および上面に発生した損傷は, ほかの劣化要因による鉄筋腐食などと複合することにより大幅に加速されます。なお, 複合劣化における性能低下への影響については, その劣化要因により潜伏期, 進展期, 加速期, 劣化期のどこから始まるのかはさまざまです。床版においては, ここで紹介する事例以外にもさまざまな組合せの複合劣化が存在するため, 点検, 診断においては, 個々の劣化状態および環境条件を考慮し実施することが重要です。

床版の複合劣化に対して補修・補強工法を選定する場合には, 主たる劣化要因および複合している劣化要因を的確に判断することが重要です。このため, 想定される劣化要因に応じ, 詳細調査を行い, その後の複合した劣化進行速度や構造物の性能低下速度の予測などを行うのがよいでしょう。また, 補修・補強工法の選定においては, 各種適用工法から主たる劣化要因に対応する補修・補強工法を選定するとともに, ほかの複合する劣化要因についての対策効果も考慮し選定することを基本とします。たとえば輪荷重の疲労に対して効果的な工法であっても, 塩害との複合劣化の場合には, 残留する塩化物イオンの影響により補強後短期間で鉄筋腐食などの再劣化が発生することがあります。このため, 対策工法の選定においては塩害にも対応できる疲労対策工法を選定するか, もしくは疲労対策工法と塩害対策工法の双方を実施する必要があります。

5.2 疲労と塩害の複合劣化

床版は床版支間長 (主桁間隔) に対して厚さの薄い構造であり, 変動の激しい輪荷重を直接支える部材であるため, 荷重の繰返しをもたらし疲労の影響が大きいです。疲労劣化のメカニズムとしては, 床版下面からのひび割れと剥離から, 最終的に床版の押抜きせん断破壊に至ることが知られています。

疲労劣化を受ける床版において, 建設時におけるコンクリート骨材に海砂を使用した場合, 塩化物イオンを含む混和剤を使用した場合, 海岸に近く飛来塩分の影響がある場合, 凍結防止剤の散布が日常的に行われる場合には, 疲労による劣化に加えて塩害による複合劣化が発生し, 床版の性能低下を加速させることが知られています。とくに近年では寒冷地における凍結防止剤による道路橋床版の塩害が顕著です。

コンクリート構造物の塩害は, コンクリート中の鋼材の腐食が塩化物イオンの存在により促進され, 腐食生成物の体積膨張がコンクリートにひび割れや剥離を引き起こし, 鋼材の断面減少などを伴う現象です。床版の疲労劣化過程においては, 床版上面・下面および内部にひび割れが発生するため, 塩害環境下にある床版では, そのひび割れから床版内部に水, 空気が侵入するとともに塩化物イオンによる鉄筋腐食が発生し, ひび割れの助長および鉄筋腐食による耐荷力低下により著しく疲労劣化を加速させます。

たとえば, 塩害劣化において進展期にある床版では, 塩化物イオンの含有量は腐食発錆限界以上ですが, ひび割れの発生は認められていない場合があります。この床版に輪荷重により潜伏期程度の疲労が複合した場合, 疲労によるひび割れが発生するため, 酸素や水および塩化物イオンが鉄筋周りに直接的に供給され, 本来であれば塩害による劣化進行過程が進展期にある床版が容易に加速期に移行します。とくに凍結防止剤による塩害の場合には, 床版上側鉄筋の腐食による床版上面コンクリートの劣化が顕著化し, 水と走行輪荷重によりかぶりコンクリートが土砂化し路面の走行性に大きく影響するとともに, 疲労耐久性が大きく低下する場合があります。また, 飛来塩分による塩害の場合には, 床版下面に発生したひび割れから侵入した塩化物イオンにより, 床版下側鉄筋の腐食が顕著化する傾向にあります。

なお, 疲労と塩害の複合劣化においては, 輪荷重の影響および塩化物イオン量の影響を受けますが, 両劣化ともひび割れ発生および水の影響も大きく受けるため, PC 床版を使用している場合や床版防水層の機能が健全であれば劣化の進行は遅いと考えられます。

5.3 中性化と塩害の複合劣化

中性化による劣化メカニズムは, コンクリートの炭酸化反応により pH が低下することでコンクリート内部鋼材が腐食し, ひび割れの発生, かぶりの剥離・剥落や鋼材の断面欠損などによる耐荷力の低下を招く現象ですが, その進行速度は比較的遅く, 中性化のみで極端な耐荷性能の低下を招いた事例は少ないです。

しかし, 中性化が進行している床版に塩化物イオンが存

在すると、中性化と塩害による複合劣化が発生し、鉄筋腐食による床版の性能低下を加速させることが知られています。塩化物イオンは鉄筋の不動態被膜を破壊し腐食を発生させる要因となりますが、この不動態被膜の破壊はコンクリート内の塩化物イオン濃度が高いほど発生しやすく、また中性化などによりコンクリートの pH が低くなるほど発生しやすくなります。また、中性化によりコンクリート表層部に固相しているフリーデル氏塩が塩化物イオンとなって内部に移動・濃縮されること（中性化による塩化物イオンのフロント化現象）が知られており、この濃縮が鉄筋位置で発生した場合には、中性化による pH 低下との相乗効果により鉄筋腐食を加速させます。

なお、疲労により床版下面にひび割れが発生した場合には、ひび割れからの二酸化炭素の供給により、中性化および塩害による鉄筋腐食がさらに加速され、塩害と同様に疲労劣化そのものも加速させます。

また、中性化と塩害の複合劣化においては、コンクリートの品質・強度と塩化物イオンの量に影響を受けますが、鉄筋腐食はひび割れ発生による空気と水および凍結防止剤などの侵入により加速されるため、比較的緻密なコンクリートを用いて設計荷重においてはひび割れが発生しないように設計されている PC 床版を用いている場合や床版防水層の機能が健全である場合は劣化の進行は遅いと考えられます。

5.4 凍害と塩害の複合劣化

積雪寒冷地における床版では、床版上面に雨水および融雪水が滞水しやすく、凍害による床版上面劣化が発生する場合があります。また、床版下面における凍害は雨水などの影響により、張出床版水切り部に発生する場合があります。凍害のメカニズムとしては、コンクリート中の水分が 0℃ 以下になったときの凍結膨張によって発生するものであり、長年にわたる凍結と融解の繰返しによってコンクリートが徐々に劣化する現象です。

これに対し、コンクリート構造物の塩害は、コンクリート中の鋼材の腐食が塩化物イオンの存在により促進され、腐食生成物の体積膨張がコンクリートにひび割れや剥離を引き起こし、鋼材の断面減少などを伴う現象ですが、積雪寒冷地における主要道路橋では凍結防止剤の散布量も多く、凍害と塩害が複合的に作用し、床版の性能低下を加速させる場合があります。

凍害と塩害の複合劣化メカニズムとしては、凍結融解によるコンクリートの直接的な強度低下と凍害劣化によるコンクリートの物質移動抵抗性の低下による塩化物イオンの移動により、鉄筋腐食が促進されるためと考えられています。また、床版上面においてはこの複合劣化に輪荷重による繰返し載荷が加わると、5.2 の疲労と塩害の複合劣化の場合以上にコンクリートに土砂化（骨材分離）が進行し、路面の走行性に影響を与えるとともに床版圧縮側の断面抵抗が減少したことによる疲労耐久性の低下を招く場合もあります。なお、凍害と塩害の複合劣化においては、気温、コンクリート品質および強度と塩化物イオンの量に影響を受けますが、両劣化とも水の影響を大きく受けるため、床

表 - 1 付属物の変状が更新構造物に与える影響

付属物	機 能	更新構造物に与える影響例
橋梁用防護柵	・落下防止 ・美観、景観 ・第三者影響度	・損傷による劣化 ・美観、景観イメージのダウン ・第三者被害防止
地覆	・第三者影響度 ・走行安全性 ・水切り ・美観、景観	・鋼材の腐食 ・高欄衝突の防止 ・走行安全性不良 ・コンクリート不良の劣化促進 ・主桁の汚れ
排水装置 橋面防水	・排水機能 ・走行性	・水の影響によるコンクリート劣化促進 ・雨天時の走行安全性不良
橋面舗装	・走行性	・走行時の異常振動
伸縮装置	・走行性	・水の影響による桁端部の劣化促進

版防水層の機能が健全であれば劣化の進行は遅いと考えられます。凍害と塩害を受ける床版は、輪荷重の走行によりコンクリート表面にスケールが生じるため、凍結防止剤や融雪剤の散布により塩化物イオン量が蓄積して鉄筋腐食を促進させます。積雪寒冷地域の RC 床版は、融雪剤散布により融雪水が微細なひび割れに侵入し、凍結・融解作用と輪荷重の走行による疲労損傷とが複合し、コンクリート表面にスケールや土砂化が発生します。この凍害による影響は伸縮継手付近から 5 m 付近にまで及んでおり、塩害のみを受けた RC 床版に比して劣化の進行が著しいです。

5.5 ASR と塩害の複合劣化

ASR は、反応性骨材の膨張によりコンクリートにひび割れなどを発生させる現象であり、水分およびアルカリが供給される条件下で、長期にわたって進行するのが一般的です。なお、ASR が顕著な場合には橋脚など比較的厚いコンクリート部材で内部鉄筋が破断した事例もありますが、近年では、道路橋床版における劣化事例も報告されています。

コンクリート構造物の塩害は、コンクリート中の鋼材の腐食が塩化物イオンの存在により促進され、腐食生成物の体積膨張がコンクリートにひび割れや剥離を引き起こし、鋼材の断面減少などを伴う現象であり、寒冷地においては凍結防止剤により塩化物イオンが供給されることが多いです。ASR による劣化を受けた床版に凍結防止剤を散布すると、それに使用されている塩類（NaCl など）のアルカリイオンと水分が ASR の進行を促進することとなり、コンクリートのひび割れを進行させるとともに、ひび割れの進行により凍結防止剤に含まれる塩化物イオンによる鉄筋腐食も進行することになります。このため、ASR を受けた床版に凍結防止剤を散布した場合には、ASR と塩害が複合的に作用し、床版の性能低下を加速させる場合があります。

また、床版上面においてはこの複合劣化に輪荷重による

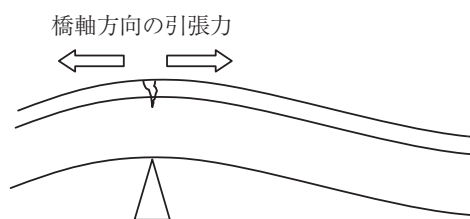
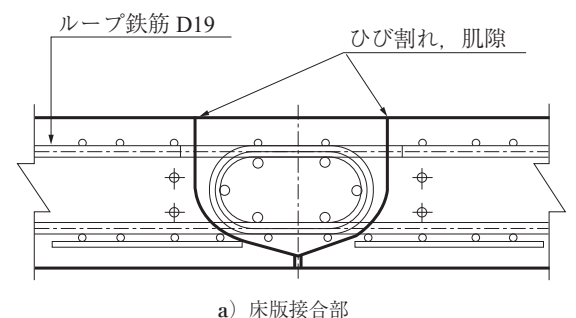
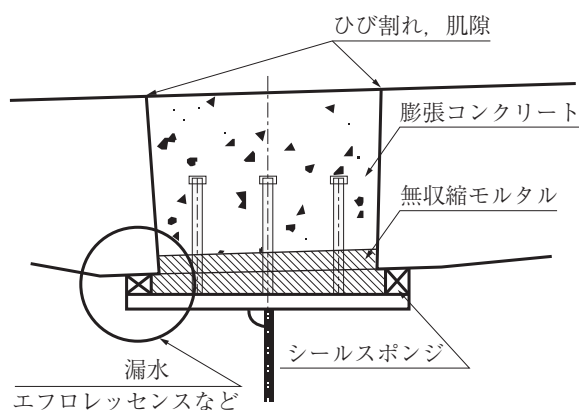


図-2 桁作用によるひび割れ



a) 床版接合部



b) ずれ止め用孔および鋼桁接合部

図-3 接合部の変状

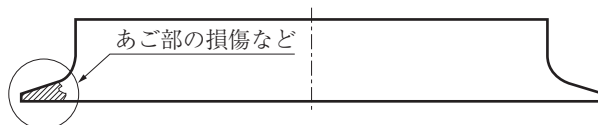


図-4 あご部のひび割れまたは欠け

繰返し載荷が加わると、5.2の疲労と塩害の複合劣化の場合以上にコンクリートに土砂化（骨材分離）が進行し、路面の走行性に影響を与えるとともに床版内部の断面抵抗が減少したことによる疲労耐久性の低下を招く場合もあります。

なお、ASRと塩害の複合劣化においては、コンクリートの残存膨張率と塩化物イオン量の影響を受けますが、両劣化とも水の影響を大きく受けるため、床版防水層の機能が健全であれば劣化の進行は遅いと考えられます。

6. 付属物に起因する劣化

床版の付属物とは、たとえば、橋梁用防護柵、地覆、排

水装置、橋面舗装および伸縮装置などのことです。付属物の変状に起因する劣化とは、付属物の変状が発生することにより、床版にひび割れなどを発生させ、それが劣化因子の侵入経路となり、内部への劣化因子の侵入を促進させて劣化を発生させたり、あるいは、すでに生じている劣化を促進させたりすることです。

床版の防水機能の低下は、床版コンクリートに水分を供給することとなり、塩害、アルカリシリカ反応、床版疲労などの劣化を促進する要因となります。

付属物の変状は、床版の劣化を引き起こしたり、促進したりする場合があります。付属物の変状が床版に与える影響を十分考慮して、劣化予測および性能の評価を行うことが重要です。表-1に付属物の変状が更新構造物に与える影響について示します。

7. その他の劣化

前述した劣化機構以外には、化学的侵食、風化・老化などがあります。また、既設鋼桁に変状がある場合は、更新構造物の施工時に足場などを設置するため、更新工事に合わせて既設鋼桁の補修または補強工事を行うことが望ましいでしょう。疲労などに起因する鋼桁のき裂の補修または補強は、床版撤去時に行った方が簡便に実施できます。鋼部材の劣化に関しては、第5回で詳しく説明します。

8. 更新用プレキャスト PC 床版特有の変状例

以下に、更新用プレキャスト PC 床版の変状例を示します。

① 長支間連続桁の中間支点付近の負曲げ区間

設計上の前提である桁作用の影響による橋軸直角方向の貫通ひび割れおよびその箇所の漏水、エフロレッセンスの発生（図-2）。

② 床版および鋼桁の接合部界面

膨張材無添加、養生不足などかつ防水工の劣化や施工不良などの複合要因により、肌隙、ひび割れの発生およびその箇所の漏水、エフロレッセンスの発生（図-3）。

③ ループ継手あご部

プレキャスト床版の移動時や架設時に発生するあご部のひび割れまたは欠け（図-4）。

9. おわりに

前回と今回の講座では、既設構造物の変状として、① 輪荷重による疲労、② 塩害、③ 凍害、④ アルカリシリカ反応、⑤ 想定外の収縮・クリープ挙動に起因する劣化、⑥ 複合劣化、⑦ 付属物の変状に起因する劣化、および更新用プレキャスト PC 床版特有の変状についての説明を行いました。本稿が、劣化現象を理解するための一助となれば幸いです。

【2020年3月3日受付】