

第2回 既設構造物の変状（その1）

講師：立神 久雄*

1. はじめに

定期点検などにより既設構造物に変状が確認された場合には、原因を適切に推定して速やかに対策を講じなければなりません。本講座（第2回と第3回）では、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（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、⑧ 更新用プレキャスト PC 床版特有の変状例について説明します。

今回は床版における、① 輪荷重による疲労および② 塩害に関して説明します。

2. 輪荷重による疲労

2.1 発生機構

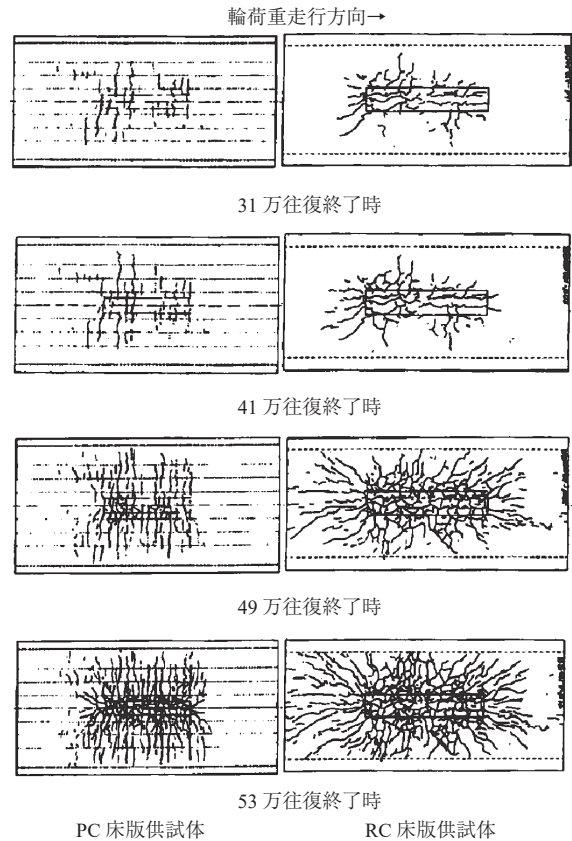
RC 床版は、コンクリートの乾燥収縮や輪荷重の繰り返し走行により、橋軸直角方向にひび割れが発生します。次に移動する輪荷重により橋軸直角方向のひび割れが増えて、さらに橋軸方向のひび割れが発生します。これにより亀甲状のひび割れが形成されると、ひび割れには輪荷重の移動により、曲げ・せん断・ねじりが作用して角落ちが始まり、疲労強度に達すると抜け落ちて破壊に至ります。これに水が作用すると、この現象は加速度的に進み、床版の寿命は乾燥状態の比べ 1/10 以下に低下するといわれています。

2.2 発生原因（劣化要因）

疲労劣化・損傷の要因は、過積載車両の通行、大型車の通行量の増加などの荷重要因、古い設計基準により設計・施工されたことによる床版厚と鉄筋量の不足、過大な床版支間などの構造要因、雨水の床版内への浸入などの複合要因があります。また、地方道などでは建設時 TL - 14 で設計された橋梁を大型車が通行する例もあり、対策の検討にあたっては、建設時の設計条件と現状の交通状況にも配慮する必要があります。

2.3 特徴と留意点

PC 床版の押抜きせん断破壊による広がりやプレストレスの効果により、RC 床版のそれと比較して大きくなります。PC 床版のひび割れは、プレストレスされていない方向に直交するひび割れが卓越する傾向にあります。また、図 - 1 に示すように、ひび割れの進行状況は、RC 床版では早い段階から亀甲状のひび割れが進展するのに対して、

図 - 1 RC 床版と PC 床版のひび割れ比較¹⁾

PC 床版ではプレストレスされた橋軸方向ひび割れが極端に少なく、橋軸直角方向のひび割れが先行し、亀甲状になるのが RC 床版に比べてかなり遅くなります。載荷試験における破壊形態と設計の条件から考察すると PC 床版供試体は、RC 床版供試体と比較して高い疲労耐久性を示すと考えられます。

2.4 劣化進行過程

輪荷重による床版の劣化進行過程は、通常、潜伏期、進展期、加速期、劣化期に分けられます。表 - 1 に RC 床版を参考として、各劣化進行過程における床版下面のひび割れ進行状況を示します。

(1) 潜伏期

乾燥収縮もしくは載荷による橋軸直角方向の一方向ひび

* Hisao TATEGAMI：ドーピー建設工業(株) 技術開発部

表 - 1 RC 床版疲労による劣化進行とひび割れ形態の分類²⁾

劣化過程	ひび割れ形態	模式図	ひび割れ状況写真
潜伏期	橋軸 直角方向 ひび割れ		
進展期	直交2方向 ひび割れ		
加速期	前期 亀甲状 ひび割れ		
	後期 角落ち、 ひび割れのスリット化		
劣化期	抜け落ち		

割れが数本程度確認できる段階です。

(2) 進展期

主桁作用による橋軸直角方向の曲げひび割れが進展するとともに橋軸方向の方向のひび割れも進展し始め、格子状のひび割れ網が形成されます。また、外観上ひび割れ密度の増加は著しいが床版の連続性（二方向性）は失われていない段階です。

(3) 加速期

ひび割れの細網化が進み、ひび割れの開閉やひび割れ面のこすり合せが始まる段階です。ひび割れのスリット化や角落ちが生じるとコンクリート断面の抵抗は期待できないので、床版の押抜きせん断耐力は急速に低下し始めます。

(4) 劣化期

床版断面内にひび割れが貫通して床版の連続性が失われ、貫通ひび割れで区切られたはり状部材として輪荷重に抵抗することになる段階で、コンクリートの抜け落ちが発生します。貫通ひび割れの間隔やコンクリート強度、配筋量などが部材としての終局耐力に影響します。雨水の浸透や鉄筋腐食などに配慮する必要があります。

2.5 性能の評価

疲労により性能低下した床版は、どの劣化過程にあるかによって影響を受ける性能とその低下の度合いが異なって

表 - 2 床版の疲労に対する性能低下の定量評価のために考慮すべき事項³⁾

性能	考慮すべき事項
安全性	ひび割れのスリット化・角落ち ひび割れの貫通、雨水の浸透 腐食による鋼材の断面減少および付着力の低下 水平ひび割れ、砂利化
使用性	路面のひび割れ、陥没
第三者影響度	コンクリート剥離・剥落の発生
美観	ひび割れ、エフロレッセンス、ポットホール

きます。各劣化過程において評価の対象となる性能は、表 - 1 に示すように、床版下面のひび割れの発生状況を基に判断することがある程度可能です。たとえば、潜伏期あるいは進展期では、安全性や使用性にはとくに問題は生じませんが構造物の立地条件によっては、ひび割れからの鋼材腐食因子の侵入などが生じ、耐久性が評価の対象となる可能性があります。また、進展期では、美観なども影響を受け始めます。加速期では美観のほか、ひび割れのスリット化や角落ちなどが現れ、剥離・剥落などの第三者影響度が問題となる可能性があり、また、コンクリート断面の力学的特性が低下するため、安全性や使用性についても評価する必要があります。劣化期では亀甲状のひび割れが貫通し、状況によっては床版の抜け落ちが生じるなど、安全性、使用性が大きく損なわれ、第三者影響が生じることになるため、これらの評価はきわめて重要です。

一方、床版の疲労に関して、凍結防止剤散布下においては、塩害、凍害、アルカリシリカ反応と、疲労との複合劣化として性能が低下するため、前述の床版下面からのひび割れを中心とした項目に対する評価および判定を行う必要があります。具体的には床版上面も鋼材腐食、スケーリング、水平ひび割れ、砂利化の有無とこれらの程度について評価および判定を行う必要があります。

床版の性能が、維持管理を開始した時点から点検時までの間にどの程度低下し、いつの時点で許容される限界の状態に至るかを定量的に評価することは、現状では困難です。

たとえば、安全性に関しては、点検時には載荷試験とその逆解析などによって耐力を確認しその概要を評価することは可能ですが、将来の予測は難しく、性能によっては点検時の評価も定量的に行うことが難しい場合もあります。凍結防止剤散布下においては、床版上面から劣化が進行するため舗装面からのひび割れやポットホールといった外観上の状態（グレード）を評価し、これにより性能評価を行うことが可能となります。

実施した性能評価の結果、点検時あるいは設計供用期間終了時に床版の性能が維持管理限界を満足していない場合には対策を検討する必要があります。疲労による損傷が顕在化したあとに劣化の進行を止めるには、対策に要する費用が大きくなることが知られています。このため、疲労を受ける床版の維持管理限界は、疲労による劣化の進行過程と性能低下の定量評価のために表 - 2 に示す事項を考慮し、かつ、対象とする床版の状態に応じた対策の方法と、

表 - 3 各劣化過程の定義 (塩害)⁴⁾

劣化過程	定 義	期間を決定する要因
潜伏期	塩化物イオンが侵入し、鋼材かぶり位置における塩化物イオン濃度が腐食発生限界に到達するまで蓄積する期間。 (鋼材の腐食が開始するまでの期間)	塩化物イオンの拡散 初期含有塩化物イオン濃度
進展期	鋼材の腐食が開始・進行してひび割れが発生するまでの期間。	鋼材の腐食速度
加速期	ひび割れの発生により急速に腐食速度が増大する期間で、コンクリートのはく離などが生じる。	ひび割れを有する場合の鋼材の腐食速度
劣化期	腐食量の増加により鋼材断面が減少し、部材の耐荷力低下が顕著な状態。	

利用面などを踏まえた対策実施の容易性などを勘案して適切に設定する必要があります。

3. 塩 害

3.1 発生機構

塩害とは、塩化物イオンがコンクリート内部へ侵入して鋼材の不動態被膜を破壊して、水と酸素の存在によって鋼材腐食が促進され、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たり、あるいは鋼材断面の減少を引き起こしたりすることによって、床版の性能を低下させる現象です。コンクリートにひび割れや剥離が生じることでコンクリート内部の鋼材が外気に触れると、鋼材腐食はより一層促進されます。とくに、PC床版に使われているPC鋼材は、常時引張応力が生じている状態であり、PC床版の耐荷力保持においては重要な部材です。それが腐食すると構造体としての健全性に深刻な影響を与えるおそれがあります。

3.2 発生原因 (劣化要因)

塩化物イオンの侵入経路は、点検における詳細調査の結果および環境条件より推定することができます。塩化物イオンがコンクリート内部へ侵入する要因は、下記に示すようなコンクリート製造時に混入してしまう場合と外部環境から供給される場合がありますが、わが国では海水 (外部環境) からの塩化物イオンの侵入がきわめて多いことが一般に知られています。

・コンクリート製造時に混入する場合 (コンクリート硬化前)

- 1) 海砂の使用
- 2) 塩化物イオンを含む混和剤の使用
- 3) コンクリート打設時における海水の影響

・外部環境から供給される場合 (コンクリート硬化後)

- 4) コンクリート硬化後の海水の影響
 - 5) 凍結防止剤の使用
- 3) は海水または潮の干満の影響を受けながら施工するような状況下において、コンクリート打設中に塩化物イオンが混入する場合や打設前の鋼材に塩化物イオンが付着する場合があります。また、4) は海水が風の力により空気中に巻き上げられ、塩化物イオンを含んだ水滴や水分蒸発した塩の粒子が風に乗って運ばれて、沿岸部にあるコンクリート構造物の表面に付着する場合があります。

塩化物イオンがコンクリート硬化あとに侵入している場合は、継続的に塩化物イオンが侵入している場合が多いの

で注意する必要があります。また、1)～5)の塩化物イオンの侵入経路が、複合している場合もありますので侵入経路の推定は慎重に行わなければなりません。

3.3 特徴と留意点

PC床版には設計基準強度50 N/mm²以上のコンクリートを使用する 경우가多く比較的緻密なコンクリートが用いられ、設計荷重においてひび割れが入らないように設計されているので、一般にはRC床版より塩害が生じにくいと言えます。塩化物イオンのコンクリート中への拡散は、コンクリートの品質に大きく影響を受けます。塩害はコンクリート内部で劣化が進行するため、PC床版の場合、劣化が顕在化した段階では鋼材腐食が相当進行していることが予想されます。

PC鋼材はつねに高い引張応力を受けているので、何らかの原因で腐食が発生すると、鋼材断面積の減少に伴う局部的な応力集中による応力腐食を引き起こし、最終的には破断に至るおそれがあります。

3.4 劣化予測

コンクリート構造物における塩害についての既往の研究において劣化予測の定量的な判断手法を明確化したものは、そのほとんどがRC構造を対象としたものであり、PC構造物を対象としたものは現状ほとんどありません。PC床版の塩害予測は、外観目視点検結果を定性的に判断する手法に頼らざるを得ないのが現状です。塩害自体のメカニズムは、PC床版であってもRC床版であっても同じであるため、PC床版においては、腐食がPC鋼材に至るか否かが重要な判断材料となります。また、塩害における劣化過程は、表-3に示すように定義されます。これによると、コンクリートの腐食ひび割れの発生を契機として劣化速度は増大しており、この腐食ひび割れの発生が塩害においてきわめて重要な臨界点であることがわかります。

海から飛来してくる塩水および積雪地や寒冷地において冬期における路面の凍結防止用に散布される凍結防止剤に含まれる塩水による塩害は、表-4に示すように塩水を含む漏水が床版上面のひび割れから下面方向に侵入し、床版上側鉄筋の腐食や鉄筋かぶりコンクリートの劣化に起因する床版上面の損傷が先行して発生するものと考えられます。

この上面損傷は床版厚にかかわらず発生しますが、凍結防止剤を多量に散布する積雪寒冷地において多発する傾向があります。また、とくに版厚の厚い床版に上面損傷が生じた場合には、床版下面に損傷が進行するまで比較的長い

表 - 4 床版の塩害による劣化進行過程²⁾

劣化過程	床版断面の損傷イメージ図 (ひび割れ、漏水、鉄筋附着に着目)	床版の劣化・損傷内容
潜伏期		乾燥収縮によるひび割れ
進展期		塩分を含んだ水のひび割れ内への浸透
加速期		・ 床版上側鉄筋の腐食膨張 前期：腐食ひび割れ発生 後期：腐食ひび割れが多数発生
劣化期		・ 床版下側鉄筋の腐食膨張 ・ 床版下側コンクリートのはく落 ・ 腐食量の増大による耐荷力が低下

時間がかかるため、下面からの観察ではひび割れ、エフロレッセンスなどが確認されにくいことも特徴です。

このような劣化・損傷現象から道路橋床版の上面損傷のメカニズムを推定した場合、以下のような劣化過程が考えられます。

まず、建設当初にコンクリート床版の上面に発生した乾燥収縮ひび割れに車両の通行に伴って雨水が高圧で注入・吸引されるポンピング作用により、徐々にひび割れが拡大していきます。次に、ひび割れが上側鉄筋に達すると鉄筋は発錆しやすくなり、発錆時の膨張圧によってかぶりコンクリートが浮いた状態となります。さらに、浮いた状態のコンクリートが床版上面に有れば、交通荷重の影響により床版にたたき作用や摺磨き作用などが生じコンクリートが土砂化し、損傷は舗装の浮き（ポットホール）として出現します。

これらの凍結防止剤による道路橋床版の塩害劣化については、劣化予測に関する研究、塩分浸透予測に関する研究、上面増厚後の再損傷に関する研究、鉄筋腐食を伴う劣化機構の解明に関する研究などが現地における個々の詳細調査を主体として進められています。

以上のように、床版上面側の劣化・損傷現象は従来の交通荷重の作用による疲労損傷形態とは異なり、劣化の発生が床版上面に限られることもあります。このため、床版下面にひび割れやエフロレッセンスが析出しない場合であっても上面からの劣化は進行している可能性があり、従来の対応では維持管理上の問題が生じる可能性が大きいとも言えるでしょう。

4. おわりに

既設構造物の適切な維持管理を実施するためには、各部位・部材に発生している劣化現象に対して、劣化機構を推定し、劣化機構に基づいた劣化予測および性能評価を適切に行わなければなりません。そのためには、発生機構、発生要因を十分に理解していることが重要となります。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。

講座第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、⑧更新用プレキャストPC床版特有の変状例に関して説明します。

参考文献

- 1) 長谷, 上東, 安松: 長支間PC床版の移動輪荷重走行疲労試験による耐久性評価, コンクリート工学年次論文報告集, pp259-264, Vol.21, No.3, 1999
- 2) 土木学会: 道路橋床版の維持管理マニュアル, 2012
- 3) 土木学会: 2013年制定コンクリート標準示方書 [維持管理編: 劣化現象・機能別], 2013
- 4) 土木学会: 2007年制定コンクリート標準示方書 [維持管理編], 2007

【2020年3月3日受付】