

鋼板補強済RC床版のコンクリート物性値や内部損傷と外観変状との関連性に関する分析

慈道充¹・植田拓磨²・齊藤暖²

¹ (一財)阪神高速道路技術センター調査研究部調査研究第一課

² 保全交通部保全調整・点検課

要約

筆者らは阪神高速ブリッジマネジメントシステムの高度化を目指し、外観変状から構造物の性能と劣化を適切に評価する検討を進めてきた。鋼板補強済RC床版は鋼板に隠され床版の状況を直接目視できない。鋼板補強済RC床版については、フレッシュアップ工事等のタイミングで実施されている詳細調査によって、コンクリート物性値や内部損傷の状況が把握できているパネルがある。一方、定期点検による近接目視によって鋼板補強面の外観変状を把握している。本検討では、詳細調査結果と外観変状との関連性について分析を行い、床版の性能に関連するとみられる外観変状を把握するとともに、今後の近接目視において着目すべき変状について整理した。

キーワード: 大規模修繕, 鋼板補強済RC床版, 詳細調査, 外観変状, 内部損傷

1. はじめに

阪神高速ブリッジマネジメントシステム(H-BMS)は、本体構造物を更新しない条件でモデルが構築されていたが、「阪神高速道路の長期時管理及び更新に関する技術検討委員会(提言案)」(H25.4)により「永続的な利用を想定したアセット健全性管理」を想定し、大規模更新・修繕を踏まえた管理の必要性が唱えられたため、H-BMSを再構築し、大規模な更新や修繕を考慮できるモデルに高度化する必要がある。

平成28年度にはRC床版、軽量コンクリート床版を対象に、安全性・使用性などの性能評価手法、劣化予測モデル、ライフサイクルコストに基づく最適対策抽出方法について検討を行った¹⁾。この一連の検討では、定期点検による外観変状によって評価しており、しかも外観変状と性能との関連は、図-6に示すように定性的なものであった。そのため、RC床版の性能が必ずしも実際の安全性を表していない可能性が考えられる。

また、鋼板補強済RC床版は、古い基準で構築されたRC床版が交通荷重による疲労損傷によりひび割れが生じた状態で床版下面から鋼板で補強されているものが多く、鋼板補強後も交通荷重は作用し続けており、RC床版内部では、継続して疲労損傷が進行している可能性が考えられる。しかし、定期点検においては、鋼板表面に生じている外観変状を評価するため、内部損傷の進行状況やコンクリートの

品質を直接評価することができず、床版の性能を把握するためには、何等かの方法で床版内部の状況を評価する必要がある。

このような問題意識のもと、本検討では、鋼板補強済RC床版のコンクリート物性値、内部損傷と外観変状との関係について検討した。

本稿の2. では詳細調査結果の概要を、3. では定期点検における外観変状の概要を述べる。さらに4. , 5. , 6. では詳細調査で得られたコンクリート物性値・内部損傷と外観変状との関連を分析し、これらの結果を踏まえ7. では損傷要因について考察する。

2. 詳細調査の概要

阪神高速では、臨時点検等を実施し、床版内部の情報が収集されている。本検討では、そのうち床版の物性値と内部損傷が調査されている点検結果を対象とした。調査によって取得されている物性値はコンクリートの圧縮強度、静弾性係数、中性化深さ、塩化物イオン濃度調査である。また、Single-iやレーダー探査で床版内部の水平ひび割れなどの内部損傷が調査されている。調査は主に平成27年度に実施されており、取得されたコンクリート物性値は主に堺線を対象に鋼板補強済床版21径間の25パネル、未補強床版2径間の4パネル分である。また、内部損傷については、23径間の90パネルで調査されている。

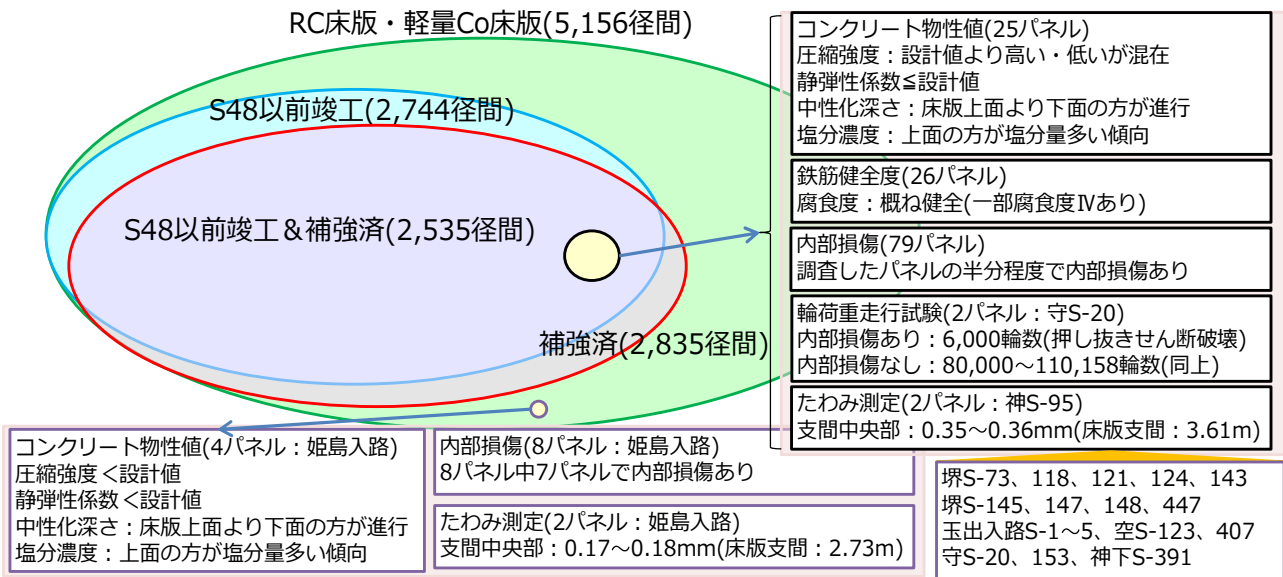


図-1 詳細調査結果

表-1 定期点検における外観変状の結果

	補修済 不良音	補修済 さび発生	補修済 シールはく離	補修済 その他	補修済 ホルトゆるみ	補修済 ホルト欠損	補修済 鋼板そり	補修済 漏水・遊離石灰
C	21	33	2	28	0	0	0	0
B	3	5	0	0	0	0	0	3
A	11	2	0	2	0	1	1	1
なし	55	50	88	60	90	89	89	86
計	90	90	90	90	90	90	90	90

表-2 道路構造物の点検要領(H27.7)における不良音とさびの判定

	判定項目			
	S	A	B	C
不良音		たたき点検において、鋼板1枚の1/2程度以上の範囲に不良音がある	たたき点検において、鋼板1枚の1/2程度以下の範囲に不良音がある	たたき点検において不良音がわずかにある
鋼板のさびおよび腐食	路下が第三者の用に供されており、かつ落下防護ネットが未設置箇所において以下の状況が確認される。 鋼板の腐食が著しく、腐食編が欠落する恐れがある	①鋼板に腐食(合計0.2㎡以上)があり、床版機能が喪失する恐れがある ②広範囲(パネルの1/2以上)にさびがあり美観を著しく阻害している	①鋼板に腐食がある ②広範囲にさびがある	鋼板にさびが点在している

詳細調査の実施に合わせて、補強鋼板の不良音も調査されており、損傷図で報告されている。この23径間のなかにはコンクリート物性値が調査されている径間もある。図-1に示すとおり、阪神高速が管理するRC床版・軽量コンクリート床版は総数5,156径間存在し、そのうちS48年以前竣工かつ鋼板補強済の床版が2,535径間ある。本検討で対象とする21径間は、2,535径間のうちの0.8%しかない。そのため、この検討で得られる傾向はかなり局所的であり、全体的な傾向を示していない可能性もあるが、全体を知る上では重要な手がかりになると考えられるため、今後の情報が蓄積されることを期待して検討を進める。

3. 外観変状の概要

詳細調査が実施された時期の直近の定期点検で得られた外観変状をコンクリート物性値・内部損傷との比較対象とした。点検結果は保全情報管理システ

ムから抽出した。対象床版は原則として鋼板補強済の床版であり、「補修済床版」として外観変状が評価されているが、姫島入路は「未補修床版」として評価されている。補修済床版を対象を絞り、外観変状の状況を示したのが表-1である。AランクからCランクの総数では、「補修済_さび発生」が最も多く40パネルで発生し、次いで、「補修済_不良音」の35パネルである。Aランク損傷だけに着目すると、「補修済_不良音」が11パネルであり、2番目に多いのが「補修済_さび発生」「補修済_その他」であり、不良音が卓越する。表-2に示すように、阪神高速の点検要領では、不良音はパネル当りに発生している発生率で判定ランクが変わり、パネル当り半分以上不良音が生じている場合にはAランク、半分以上以下であればBランク、点さび程度であればCランクと判定する。

4. コンクリート物性値と外観変状

表-3 圧縮強度と外観変状との関係

床版補強	圧縮強度 (実測値/設計 値)	臨時点検 時うき発 生率	外観変状									
			補修済_さ び発生	補修済_シ ールはく離	補修済_そ の他	補修済_ホ ル欠損	補修済_ホ ル欠損	補修済_鋼 板そり	補修済_不 良音	補修済_漏 水・遊離 石灰	ひび 線状	
修済床版	1.550	0.5125	なし	なし	C	なし	なし	なし	なし	C	なし	なし
	1.493	0.6500	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	C	なし	なし
	1.389	1.0000	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	A	なし	なし
	1.164	1.0000	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	A	なし	なし
	1.268	0.8000	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	A	なし	なし
	1.307	0.7750	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	A	なし	なし
	2.164	0.5195	A	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし
	1.300	0.5889	A	なし	なし	なし	なし	A	A	A	A	なし
	1.068	0.4167	B	なし	なし	なし	なし	なし	なし	B	なし	なし
	1.396	0.2656	C	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし
	1.471	0.1786	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし
	1.000	0.0625	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし
	1.189	0.1250	C	なし	A	なし	なし	なし	なし	なし	B	なし
	1.343	0.4375	なし	なし	C	なし	なし	なし	なし	C	なし	なし
	1.450	0.4722	B	なし	C	なし	なし	なし	なし	B	B	なし
	1.436	0.1042	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	C	なし	なし
	1.571	0.5152	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし
	1.271	0.5000	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	C	なし	なし
	1.321	0.4833	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし
	1.079	0.3750	なし	なし	A	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし
1.125	0.2500	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	
未補修床 版	0.763		なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	C
	0.678		なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし
	0.663		なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	C
	0.947		なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし

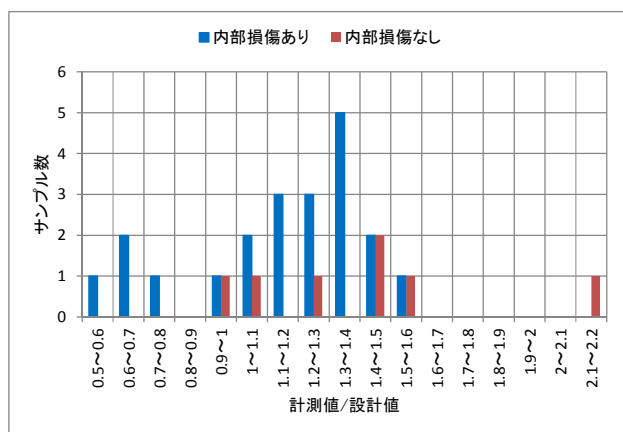


図-2 圧縮強度と内部損傷との関係

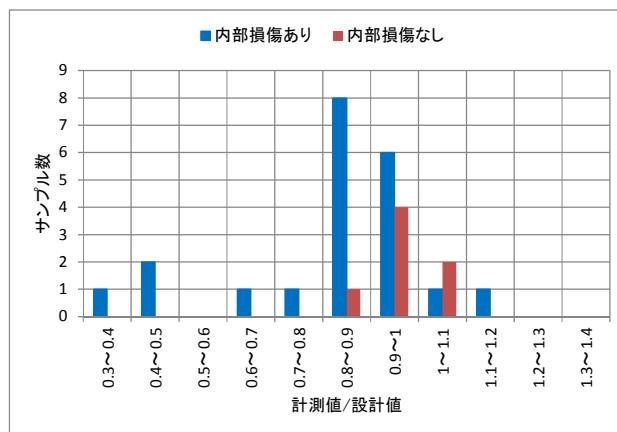


図-3 静弾性係数と内部損傷との関係

表-3は、圧縮強度の設計値に対する実測値の比と外観目視点検結果との対応関係を示したものである。表には詳細調査時に把握された不良音の損傷図に基づき算出した「臨時点検うき発生率」も併せて表記している。表-3をみると、圧縮強度が設計値より高い補強済床版において、実測値/計測値が最大(2.164)となるパネルではAランクの「補修済_さび発生」が発生しているが、最小(1.000)となるパネルでは外観変状が観測されていない。このことからコンクリート圧縮強度と外観変状の間には明確な相関がみられない。

静弾性係数と外観変状についても同様の結果であった。

5. コンクリート物性値と内部損傷

次に、圧縮強度、静弾性係数と内部損傷との相関について確認した。データ数が少ないため相関係数

による分析を実施していない。

図-2をみると、圧縮強度については、ほぼ全ての範囲で内部損傷が確認されており、圧縮強度と内部損傷との間に関連がないと考えられる。

一方、静弾性係数については、内部損傷がないのは計測値/設計値の値が比較的高い範囲に偏っており、内部損傷とわずかに関連がみられる(図-3)。

6. 内部損傷と外観変状

(1) 検討の概要

内部損傷が調査されているパネル数が全体的に少ないため、相関分析をして有意な結論が得られない可能性が考えられる。

そこで、本検討では、内部変状の有無と、外観変状との重複程度に着目し、内部損傷と外観変状との関係を検討する。対象とする損傷は、「補修済_不良音」「補修済_さび発生」「補修済_遊離石灰」

表-4 不良音と内部損傷との関係

発生数		補修済_不良音				計	外観変状発生率
		A	B	C	なし		
内部損傷	あり	8	1	10	16	35	0.5429
	なし	3	2	11	31	47	0.3404
計		11	3	21	47	82	0.4268
内部損傷あり判定率		0.73	0.33	0.48	0.34		

表-5 さびと内部損傷との関係

発生数		補修済_さび発生				計	外観変状発生率
		A	B	C	なし		
内部損傷	あり	0	1	6	28	35	0.2000
	なし	2	4	27	14	47	0.7021
計		2	5	33	42	82	0.4878
内部損傷あり判定率		0.00	0.20	0.18	0.67		

「補修済_その他」とする。

(2) 不良音と内部損傷

表-4は不良音と内部損傷との関係を示す。不良音でAランクと判定された11パネルのうち、内部損傷が発生していたのは8パネルで約7割である。不良音の判定ランクはパネルにおける面積比で決まっており、面積比が50%以上であれば、Aランクと判定される。

また、内部損傷ありと判定された35パネルのうち、内部損傷が発生していたのは19パネルであり、約5割となっている。

以上を踏まえると、不良音の面積と内部損傷との間に相関がみられる。

ただし、本検討で取得データ数が少ないため、今後データ数の蓄積によりデータの信頼性を高める必要がある。

(3) さび発生と内部損傷

表-5はさびと内部損傷との関係を示す。内部損傷があると判定された35パネルのうち、さびと判定されたパネルは7パネルで2割、逆にさび発生と判定された40パネルのうち、内部損傷が発生しているのは7パネルで、約1割8分となっている。不良音ほどではないが、内部損傷とさびとの間にわずかに関係がみられる。ただし、損傷判定がAランクで内部損傷がみられないため、損傷程度との関係はないと考えられる。

(4) 鋼板補強前の損傷状況

本検討で対象のパネルのうち、図-4は堺線の補強前の損傷状況を示す。全てのパネルで何等かの損傷が発生し、AランクとBランクの損傷が9割以上を占めている。この結果をみると、鋼板補強前に全てのパネルで何等かの損傷が発生しており6割がAランク損傷であったことがわかる。

過年度の検討²⁾では、不良音の発生率と補強前の判定ランクとの間に関連がみられないという結論であった。本検討対象パネルに対して鋼板補強前の損傷と、定期点検における不良音との関係を整理した。その結果を表-6に示す。補強前にAランクであった場合、補強後には必ずCランク以上の損傷が発生し

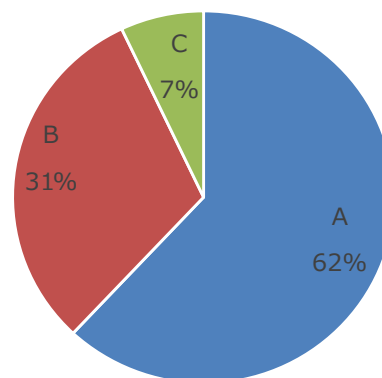


図-4 鋼板補強前の損傷状況

表-6 不良音と補強前損傷との関係

		補修済_不良音				総計
		A	B	C	なし	
補強前損傷	A	9	1	12	22	44
	B		1	7	14	22
	C				5	5
	総計	9	2	19	41	71

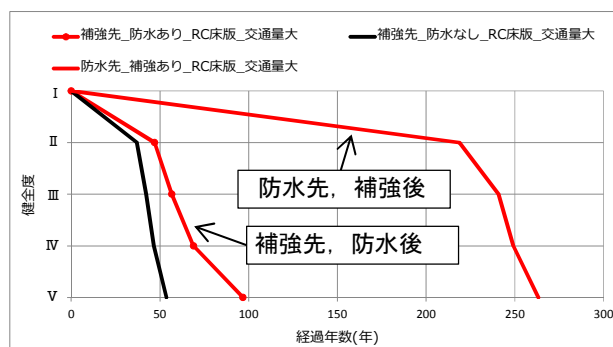


図-5 床版防水、鋼板補強実施時期の違いによる劣化の比較 (I～IVの定義は付録参照)

ている。補強前にBランクであっても、補強後にはB、あるいはCランクの損傷が発生している。このことから補強前の損傷が「補修済_不良音」に何らかの影響を与えている可能性が考えられる。

7. 損傷要因の検討

(1) 鋼板補強の有無と不良音との関係

本検討では、床版防水や鋼板補強の有無による損傷進展への影響について劣化予測モデル³⁾の視点で検討している。本稿では、図-5に結果のみを示すが、鋼板補強よりも床版防水が先の場合の劣化速度は、鋼板補強が床版防水よりも先の場合の劣化速度よりもはるかに遅く、鋼板補強のみで床版防水がない場合の劣化速度が最も速かった。防水を先に施工することで床版内部への水の浸透を防止し、劣化が遅くなっていることが考えられ、床版防水に一定の効果がみられた。これを確認するために、劣化予測に用いた定期点検結果の損傷の内訳と発生数を整理した(表-7)。鋼板補強が床版防水よりも先に施工された

表-7 補強済床版の径間毎点検毎の損傷数

II～IVの定義は付録参照

		補修済_さ び発生	補修済_不 良音	補修済_漏 水・遊離 石灰	補修済_シ ールはく離	補修済_そ の他	補修済_ホ ルトゆるみ	補修済_ホ ルト欠損	補修済_鋼 板そり
補強あり 防水あり	補強先行	II	0.082	0.504	0.161		0.364	0.015	0.088
		III	0.250	0.706	0.333		0.400	0.028	0.067
		IV	0.345	2.088	0.442		0.841	0.044	0.080
		V	0.737	6.474	0.789		0.895		0.158
	防水先行	II	0.000		0.000		0.500	0.200	0.300
		III	0.333		1.333		0.000	0.000	0.000
		IV	0.000		1.333		0.667	0.000	0.000
		V							
補強先行防水なし	II	0.078	0.526	0.259	0.009	0.181	0.009	0.034	0.017
	III	0.345	0.673	0.436	0.036	0.309			0.055
	IV	0.500	1.262	0.476	0.071	0.762			
	V	4.600	0.333	0.933	3.333	4.000			

床版では、不良音が発生しさびの発生数も多いのに対し、鋼板補強よりも床版防水が先行した場合には、不良音が発生しておらず、さびも少なかった。このことから、鋼板補強を先に実施することによって、床版内部に水が浸透したことが疑われる。

(2) 考えられる損傷要因

a) 結果と想定される要因

以上の検討結果を改めて整理すると

- ① 不良音の判定ランクが高いほど、内部損傷の発生割合が高い
- ② わずかに内部損傷と鋼板のさびに関連がみられる
- ③ 不良音が発生しているパネルの約 6 割のパネルは補強前に A ランク、3 割が B ランク、残りが C ランク⇒全てのパネルで損傷あり

このことから、対象としたパネルは補強前から損傷が発生した状態であり、補強後に路面から水が浸透したことによって鋼板の損傷が発生した可能性が考えられる。このような状況を踏まえ、損傷の原因を以下のように想定することができる。

- ① 交通荷重の繰り返し载荷による疲労損傷の進展
- ② 床版内部に浸透した水などの影響で鋼板が床版からはがれた

b) 交通荷重の繰り返し载荷による疲労損傷の進展

過年度の検討²⁾では、補強済床版の輪荷重走行試験の研究を取りまとめている。補強済床版の疲労の進展は、まず輪荷重の繰り返し载荷により床版内部にひび割れが発生し、たわみが増加する。そのたわみに追従できなくなった鋼板がはがれ不良音が増加する、というものである。内部に水が浸透している場合には疲労が促進されるため、疲労の進展速度が速くなる。

表-3に示すとおり、不良音とさびや、漏水・遊離石灰との関連は少ないと考えられる。しかし、守S-20で切出された床版の鋼板撤去時の損傷確認の結果⁴⁾、床版内部で滞水していた可能性を示していた。鋼板下面ではさびや漏水など床版内部の水の浸透を

疑う損傷がみられなかったことを考慮すると、さびや漏水がみられなくても床版内部に滞水している可能性は否定できない。

以上のことから、交通荷重による疲労損傷が床版内部の滞水によって促進され、内部損傷が進行するとともに不良音が広がった可能性が考えられる。

c) 床版内部に浸透した水などの影響で鋼板が床版からはがれた

斉藤⁵⁾によると、鋼板接着にエポキシ樹脂を利用する際の留意点として「施工上の注意点はコンクリートと鋼板とが完全に接着するよう、コンクリート面のケレンを入念に行うことと、鋼板面の下地処理(サンドブラスト)を確実にしておくことである。さらに交通解放下での注入作業であるためコンクリートのひびわれから雨水の浸透により鋼板面が錆びたり、ひびわれ部よりコンクリートのすり減り粉が落ちて鋼板上に堆積したりすることがあるため、鋼板取り付け後は可及的速やかにエポキシ樹脂を注入する必要がある。」となっている。つまり、コンクリート面とエポキシ樹脂の接着面の処理が十分でないで完全に接着ができず雨水が浸透し鋼板のさびの原因となったり、場合によっては不良音につながる可能性があると考えられる。

また、土木研究所の研究⁶⁾によると、高分子系建設資材は加水による劣化も発生することから水によって接着作用が低下した可能性も考えられる。

これらのことから、施工の際、接着剤を注入する段階で床版や鋼板の状況が十分でなかったことや、床版内部に浸透した水によってエポキシ樹脂が劣化したことなどにより、不良音が拡大した可能性が考えられる。

8. まとめ

本検討では、鋼板補強済RC床版を対象に外観変状からコンクリートの物性値や内部損傷の状況を把握することを目的に検討を進めてきた。サンプル数は少ないものの今後の鋼板補強済床版の大規模修繕や、日常的な維持管理に向けて手がかりになる結果が得られた。

表-8 性能の定義

性能	解説	備考
安全性	死荷重、活荷重、地震の影響等の荷重に対し、橋が適切な安全性を有していること	道路橋示方書(H14)
耐久性	橋に経年的な劣化が生じたとしても使用目的との適合性や構造物の安全性が大きく低下することなく、所要の性能が確保できること	道路橋示方書(H14)
使用性	構造物の利用者が許容限度以上の不快感、不安感を覚えず、快適に構造物を利用するために必要な性能	鋼・合成構造標準示方書【維持管理編】(2013)

表-9 性能評価の既権的な考え方

性能	基本的な考え方
安全性	構造的安全性に影響を与える損傷を評価
耐久性	長期的な安全性・使用性の低下促進の恐れがある損傷を評価 水に関連した損傷を耐久性に分類
使用性	路面に影響のある損傷、第三者に影響を与える損傷を評価

表-10 健全度の定義

健全度	安全性 性能評価値
I	0
II	1以上, 5以下
III	6以上, 10以下
IV	11以上, 30以下
V	31以上

外観変状からコンクリート物性値を把握することはできなかったが、これは鋼板補強済RC床版では、定期点検において鋼板面に生じている変状を確認し、コンクリートそのものの変状を確認していないことが原因と考えられる。

一方、外観変状とRC床版の内部損傷との関係を検討した結果、鋼板に生じている不良音の面積が内部損傷を疑う手がかりとなり得ることがわかった。この不良音の発生原因については、①鋼板補強前に生じていたRC床版のひび割れなどに水が浸透することによって疲労損傷が促進された可能性や、②浸透した水などが原因で鋼板接着材が劣化した可能性が考えられた。床版内部に水が浸透していることは、床版防水よりも先に鋼板補強をした床版に不良音が発生し、さびも多いことから推察できる。

これらのことを踏まえると、定期点検時に鋼板の不良音をできるだけ正確に把握することは、床版内部の損傷の有無や、床版内部の詳細調査の判断材料を得るために重要な指標であると判断できる。また、鋼板補強が先に実施されている床版では、床版内部に滞水が生じ、床版の劣化を促進させている恐れがあるため、詳細調査あるいは対策の優先順位を評価するうえで重要な手がかりと考えられる。

一連の検討では、詳細調査結果や、これまで蓄積されてきた定期点検結果を用いたが、詳細調査データ数が少ないために、偏った結果になっている恐れがある。検討結果の信頼性を高めるためには、詳細調査を継続して実施することによるデータの蓄積が必要である。

点検項目	性能への影響			
不良音	安全性	耐久性	使用性	
遊離石灰他	安全性	耐久性	使用性	
鋼板さび腐食	安全性	耐久性	使用性	
鋼板の変形	安全性	耐久性	使用性	
シール材剥離など	安全性	耐久性	使用性	
アンカーボルト他	安全性	耐久性	使用性	
その他	合成桁	安全性	耐久性	使用性
	非合成桁	安全性	耐久性	使用性

重み 小 : 中 : 大

図-6 損傷と性能との関連付け

付録 RC床版の健全度の考え方

慈道ら¹⁾に基づき、健全度評価手法について整理する。

RC床版の性能を表-8のように定義し、表-9に示すルールに従い、点検結果を安全性、耐久性、使用性に割り当て、以下に示す床版の性能評価値の計算式と、図-6に示す点検項目ごとの重みの考え方に基づき安全性、耐久性、使用性の性能評価値を計算する。性能評価値は0であれば健全(Aランク損傷無)であり、点数が大きくなるほど性能が低下する連続量である。

性能評価値 = \sum (点検項目の重み × 点検項目のAランク以上損傷数)

重み：大=10, 中=5, 小=1, 無し=0

この連続量を劣化予測モデルを構築するために離散化する。閾値の設定には、物理的な意味づけが必要であるが、現時点で明確な意味づけが困難であるため、便宜的に閾値を設定し、5段階の健全度を定義した(表-10)。

参考文献

- 1) 慈道充, 植田拓磨: 阪神高速橋梁マネジメントシステム高度化のための基礎的検討(RC床版), 第49回技術研究発表会
- 2) 鋼板接着RC床版の維持管理に関する検討会報告書, 阪神高速道路(株), (財)阪神高速道路管理技術センター, 平成23年3月
- 3) 津田尚胤, 貝戸清之, 青木一也, 小林潔司: 橋梁劣化予測のためのマルコフ推移確率の推定, 土木学会論文集, No.801/I-73, pp69-82, 2005
- 4) 平成25年度構造物点検及び管理業務【守上S20床版詳細調査】報告書, 平成26年3月
- 5) 斉藤弘志: エポキシ樹脂接着剤の土木分野への利用について, 熱硬化性樹脂, Vol.10 No.4(1989)
- 6) 高分子系建設資材の寿命評価手法に関する研究 <https://www.pwri.go.jp/jpn/results/report/report-seika/2007/pdf/2007-04.pdf>