

# 凍結防止剤がコンクリート部材の耐久性に及ぼす影響に関する研究

研究予算：運営交付金（一般勘定）

研究期間：平 17～平 19

担当チーム：橋梁チーム

研究担当者：村越潤，田中良樹，長屋優子

## 【要旨】

国内では、これまでの RC 床版損傷のほとんどが大型車の繰返し载荷に起因した疲労によるものであった。しかし、1990 年代のスパイクタイヤの禁止以降、凍結防止剤の散布量が増加しており、既設 RC 床版の維持管理においては、疲労のみならず塩害劣化対策にも注意を払う必要がある。凍結防止剤に起因した RC 床版の塩害劣化の事例はまだ多くはないものの国内でも既に報告されている。本研究では、撤去された橋梁部材の調査、既設 RC 床版の実態調査を実施するとともに、模擬損傷を有する RC 床版の輪荷重走行試験をはじめとする各種の室内試験を実施し、RC 床版の疲労損傷機構について新たな知見を見出すとともに、路面からの水の侵入経路とその影響、及び疲労と塩害の複合的な劣化のパターンを整理した。また、これらの結果を踏まえて、RC 床版の維持管理における留意事項をとりまとめた。

キーワード：RC 床版，疲労，塩害，複合劣化，アスファルト舗装，透水係数

## 1. はじめに

米国では州間道路建設が始まった 1960 年代に凍結防止剤の散布量が急増したことが原因で、新設間もない主要幹線道路の橋梁群で著しい鉄筋腐食による床版路面コンクリートの剥離が頻発した<sup>1)3)</sup>。この損傷は、走行性・走行安全性への悪影響、工事に伴う渋滞、補修費の増大などの点で社会問題となり、今なお多くの損傷橋梁を抱えて維持管理の大きな負担になっている<sup>4)8)</sup>。

日本では、これまでの RC 床版損傷のほとんどが大型車の繰返し载荷に起因した疲労によるものであった。しかし、1990 年代のスパイクタイヤの禁止以降、凍結防止剤の散布量が急増しており<sup>9)</sup>、疲労耐久性が高い新設 RC 床版では、今後塩害劣化対策に注意を払う必要がある(現行道路橋示方書では防水層の設置が望ましいとしている)。凍結防止剤に起因した RC 床版の塩害劣化の事例はまだ多くはないものの国内でも既に報告されている<sup>10)12)</sup>(図-1)。また、近年の道路橋と比較して、RC 床版の疲労耐久性が低い傾向にある昭和 30～40 年代(1955～1974 年)の橋梁は既設道路橋の多くを占め、今日も供用されており、塩害と疲労の複合的な劣化も想定される。

上記のとおり、日米における RC 床版の劣化現象の相違している要因には、凍結防止剤散布量の程度、過積載を含む実走行自動車荷重の程度の違いと、アスファルト舗装の有無(米国ではほとんどの場合、新

設橋の RC 床版にアスファルト舗装を敷設しない)が挙げられる<sup>10)</sup>。しかし、アスファルト舗装は透水性があり、路面からの塩分浸透に対して期待できないとする見方がある一方で、路面への塩分浸透をある程度抑制していたとする報告もある<sup>9)13)</sup>。また、路面から塩分が浸透する場合に水が関与することは明らかであり、水の浸透そのものは RC 床版の疲労耐久性を著しく低下させることが知られている<sup>14)15)</sup>。このことから、RC 床版の塩害、疲労を検討する上で、アスファルト舗装の路面からの塩分浸透について、実橋における実態を把握しておく必要がある。

本研究では、撤去された道路橋あるいは RC 床版を用いた路面からの塩分浸透状況の調査、アスファルト舗装の透水係数に関する室内試験、既設 RC 床版の含水分布の調査、含水状態の変化に着目したコンクリートの圧縮疲労試験、塩害により上面かぶり



図-1 RC 床版上面の腐食事例

が剥離した RC 床版の疲労耐久性に関する輪荷重走行試験を実施した<sup>16)17)</sup>。本文では、それらの結果を踏まえて、RC 床版における疲労と塩害の複合的な劣化のパターンと、既設 RC 床版の維持管理における留意事項をとりまとめた。

## 2. 調査の概要

### 2.1 路面からの塩分浸透状況の調査

#### (1) 対象構造物の概要

表-1 に対象構造物の概要を示す。

#### (2) 調査方法

##### 1) コア採取

アスファルト舗装の透水性とその下のコンクリート中への塩分浸透状況を確認するため、アスファルト舗装を剥ぐ前に、アスファルト舗装とともに床版コンクリートのコア抜きを行った(図-2、以下、舗装付きコアという)。また、AT 橋及び TO 橋では、橋梁撤去工事に伴い削孔された床版コンクリートのコアを塩分調査用に回収した(図-3、以下、撤去時コアという)。撤去時コアは、廃棄物処理の関係上、これらのコア抜き前にアスファルト舗装が剥がされたため、舗装付きコアは入手できなかった。

#### 2) コンクリートの塩分分析

舗装付きコアのコンクリート中の塩分分析は、舗装との境界から 10mm 幅で切断して、各試料ごとに JCI-SC4(全塩分)により、塩化物イオン量を測定した。また、撤去時コアについては、路面側表面(舗装除去時にコンクリート表面が欠けているものもあった)から一定の深さ(AT 橋 30mm, TO 橋 20mm)ま



図-2 舗装付きコアの例



図-3 撤去時コア(AT 橋の例)

表-1 対象構造物の主な諸元, 供用期間, 環境条件等

	AS 橋	AT 橋	KO 橋	TO 橋
橋梁形式	鋼ローゼ, 下路形式	ポストテンション単純 PC, T げた橋 3 径間, 5 主げた	ポストテンション単純 PC, T げた橋 9 径間, 5~6 主げた	鋼合成プレートガーダー橋, 3 径間, 4 主げた
支間	71.4 m	3 @ 22.6 m	20 + 2@25.12 + 3@29.96 + 3@25.12 m	3 @ 23.3 m
有効幅員	10.0 m	9.0 m	8.0 m	9.5 m
橋格	一等橋 (TL-20)	一等橋 (TL-20)	一等橋 (TL-20)	一等橋 (TL-20)
床版コンクリート圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	42.0	58.4 (地覆 未調査)	63.1 (地覆 40.1)	24.9
竣工年月	1966 年 3 月	1971 年 9 月	1965 年 12 月	1963 年
交通量	18,732/12h(1999 年)	9310 台/24h(1990 年), 大型車混入率 26.0%	9310 台/24h(1990 年), 大型車混入率 26.0%	19,464 台/12h 大型車混入率 21.2%
海岸線からの距離	(内陸)	0.0 km	0.0 km	2.0 km
飛来塩分量 (Cl <sup>-</sup> ・mdd)	—	2.7 (1992 年調査)	13 (1992 年調査)	0.31 (推定値)
凍結防止剤の散布	あり	なし	なし	あり
床版, 舗装の補修履歴	1995 年 SFRC 上面増厚による床版補強(一部) 2002 年 SFRC 上面増厚による床版補強(一部)+アラミド繊維補強	1984 年 スパン 1, 主げた, 床版下面の部分断面修復, 表面塗装 1986 年 スパン 2,3, 同様の補修	1980 年 スパン 2, 主げた, 床版下面の断面修復, 表面塗装 1983~86 年 スパン 1,3~9, 同様の補修 1993 年 スパン 2 再補修	1996 年 床版補強, 舗装打ち替え(防水層設置) 1999 年 舗装部分オーバーレイ
橋梁撤去年または床版撤去年	2004 年 7 月	2005 年	2005 年	2006 年
コア採取	2004 年 8~9 月	1 回目 2005 年 4 月 2 回目 同 6~8 月	2005 年 4 月	1 回目 2006 年 2 月 2 回目 2006 年 3 月
舗装付きコア本数	18 本 うち 6 本は SFRC 舗装	11 本	11 本	15 本
撤去コア本数	—	○322 本(3 径間, 全面)	—	○322 本(3 径間, 全面)

注) コンクリートの圧縮強度は、別途採取したコンクリートコア(φ68mm)の圧縮強度試験によった。

でドリル(φ14.5mm)で削孔してコンクリートの粉末を採取し、塩分量測定用の試験紙を用いた簡易塩分分析<sup>18)</sup>により塩化物イオン量を測定した。

### 3) アスファルトの空隙率測定及び加圧透水試験

アスファルトの空隙率は舗装試験法便覧<sup>19)</sup>によった。最大比重は撤去されたアスファルトを用いて測定した。アスファルトの透水係数は、加圧透水試験<sup>20)</sup>(150kPa加圧)によって測定し、24時間以内に通水がない場合は不透水とした。

## 2.2 アスファルト混合物の透水係数に関する室内試験

現場から採取したアスファルトコアの加圧透水試験では、コアの厚さが大きく異なり、これらは透水係数算定式において考慮できるようなにはなっているが、試験方法の特性が必ずしも明確でなかったことから、新たにアスファルトコア供試体を作成して、表-2に示す密粒度アスファルト混合物(13)の供試体を作成して、空隙率測定及び加圧透水試験を実施した。表-3に主な試験パラメータを示す。コア供試体は、300mm×300mmのアスファルト板を作成した後、所定の径でコア抜き機により採取した。各測定、試験の方法は2.1と同じである。

### 2.3 既設RC床版の含水分布測定

1956年に竣工した、単純鋼合成プレートガーダーの既設道路橋(支間5@31.5m,有効幅員9.5m,以下,SI橋)において、RC床版下面の含水率分布の測定を行った。測定は、市販のコンクリート水分計を用いて、300mm間隔で測定した(図-4)。1回目の測定は床版抜け落ちが発生した後、舗装と床版の間に鋼板を敷いて暫定供用している期間に行った。2回目は床版の部分打ち替え、塗膜系防水層設置、全面舗装打ち替えの後に行った。

### 2.4 含水状態に着目したコンクリートコアの圧縮疲労試験

含水状態に着目したコンクリートコアの圧縮疲労試験に用いるコア供試体(コアI)の配合を表-4に示す。コアは直径100mm×高さ200mmである。疲労試験に用いる供試体は、打設後3日で脱型した後、約1年間、気中養生とした。含水状態として、気中及び水中で疲労試験を実施する他、水中で所定の回数まで疲労試験を実施した後、20℃,RH55%の恒温恒湿槽に14日入れて乾燥させ、気中での疲労試験を実施した。また、逆に気中で所定の回数まで疲

表-2 骨材及びアスファルトの配合割合

種別	割合%
6号砕石	41
7号砕石	18
粗砂	30
スクリーニングス	6
石粉	5
ストレートアスファルト60/80	4.9

理論最大密度: 2.465 g/cm<sup>3</sup>

表-3 主な試験パラメータ

項目	設定値
締固め回数(回)	10, 20, 30, 40, 50
コア径(mm)	50, 75, 100
コア厚(mm)	20, 40, 80



図-4 RC床版下面の含水率測定状況

表-4 コンクリートの配合及び打設記録

	W/C %	Air %	s/a %	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					SL cm	C.T. ℃
				W	C	S	G	AE		
コアI	70	5.4	50	185	264	892	916	13.2ml	17.2	21.4
床版供試体及びコアII	73.5	3.4	49.1	188	256	609	942	2.56	20.5	33.0

セメント: 普通ポルトランドセメント, AE: AE減水剤(遅延形),  
最大粗骨材寸法 G<sub>max</sub> = 20mm, 目標圧縮強度: 25 N/mm<sup>2</sup>  
注) 埋め込みゲージの設置に配慮して単位水量を大きくした。

表-5 コンクリートの静的圧縮強度試験結果

供試体	圧縮強度 N/mm <sup>2</sup>	弾性係数 kN/mm <sup>2</sup>	ポアソン比	圧縮試験本数(本)	材齢(日)
コアI	24.6	27.9	—	3	28
コアII	22.5	23.5	—	7	37, 86*
供試体N	26.8	26.5	0.215	3	64
供試体D	25.0	25.5	0.213	3	83

注1) コアIは28日標準養生の結果を示す。コアIIは床版供試体と同様の養生を行った。

注2) いずれも平均値, \*) コアの疲労試験前4本, 試験後3本

疲労試験を実施した後、1月水中に浸漬して吸水させ、水中での疲労試験を実施した。疲労試験は気中、水中ともに円筒の軸方向に圧縮が作用するように繰返し载荷を行った(応力比0.1, サイン波, 7~8 Hz)。コア側面にひずみゲージ(ゲージ長60mm)を載荷方

向に2枚貼り付け、疲労試験の前に疲労試験の上限荷重まで静的荷重を行い、荷重ごとのひずみを測定した。そのうち1体は、疲労試験の途中、所定の回数で静的荷重試験を行った。

## 2.5 RC床版の輪荷重走行試験

### (1) 床版供試体

図-5、表-6に床版供試体N、Dの形状寸法と主な諸元を示す。供試体Nは従来の輪荷重走行試験<sup>21)</sup>と同様の供試体であり、供試体Dは供試体Nとほとんど同一形状であるが、床版の中央の上面かぶりを1m×1mの範囲で欠損させた(実測欠損深さ29mm)。断面欠損は発砲スチロールの型を設置した上で、コンクリートを打設することによって、コンクリートの練り混ぜはプラントでの実機練りとした。前掲の表-4に、床版供試体のコンクリートの配合と打設記録を示した。養生シートで10日間養生した後、気中に放置した。表-5にコンクリートの圧縮強度試験結果を示す。表-7に使用した鉄筋の引張試験結果を示す。

### (2) 荷重試験と計測項目

床版供試体の支持は2辺(長辺)を単純支持、他の2辺を弾性支持とした。図-5に示した網掛け部分に輪荷重157kNを走行荷重させた。供試体Dの断面欠損部の走行範囲は、その形に合わせた木製の板をはめ込み(図-6)、その上に走行荷重させた。試験中、これによる荷重治具のずれや異常音は発生しなかった。

主な計測項目は、変位、鉄筋ひずみとした。また、供試体Nでは、コンクリート中に小型の埋め込みゲージ(ゲージ長50mm)を埋め込んで、走行荷重位置直下のかぶり付近や、床版中央支間方向の上下主鉄筋間などにおけるコンクリートのひずみも測定した。測定箇所の一部では3軸ゲージとなるように3本の埋め込みゲージをあらかじめ組み合わせて、埋め込んだ。

試験終了後、床版の破壊箇所を中心に走行方向及び走行直角方向に切断して、内部のひび割れ状況の観察及び版厚、鉄筋位置の計測を行った。

### (3) コンクリートコアの圧縮疲労試験

床版供試体と同じバッチのコンクリートを用いて、コア供試体(コアII)による気中圧縮疲労試験を実施した。コアは直径100mm×高さ200mmである。打設後3日で脱型した後、床版供試体の側で、シートで覆って養生した。試験方法は、2.4の気中の場合と同様に行った。

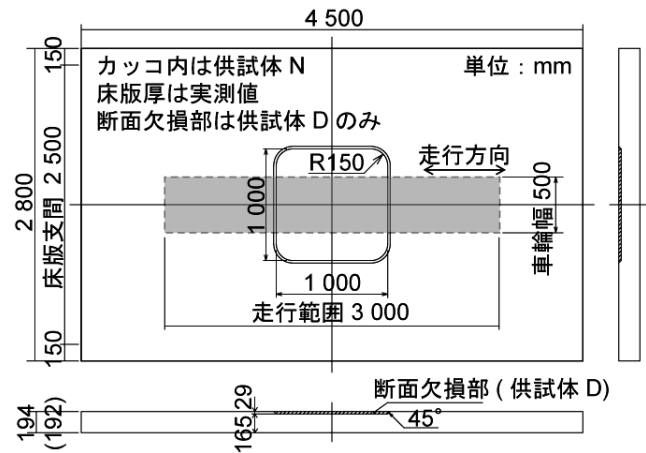


図-5 床版供試体の形状寸法

表-6 床版供試体の主な諸元

供試体	主鉄筋			配力筋		
	呼び径 mm	間隔 mm	上縁からの距離 <sup>1)</sup> mm	呼び径 mm	間隔 mm	
N 断面欠損なし	上段	D16	300	35	D10	300
	下段	D16	150	164	D13	300
D <sup>2)</sup> 断面欠損あり	上段	D16	300	11.5 <sup>3)</sup> (36)	D10	300
	下段	D16	150	137 <sup>3)</sup> (166)	D13	300

注 1) 床版上縁から鉄筋中心までの距離、解体後実測

2) 断面欠損深さ(実測値): 29mm

3) 断面欠損部、カッコ内は一般部

表-7 鉄筋の引張試験結果

鉄筋	降伏点 N/mm <sup>2</sup>	引張強さ N/mm <sup>2</sup>	弾性係数 kN/mm <sup>2</sup>
D10	338	477	189
D13	350	504	192
D16	390	593	196

いずれも SD295A, 3本の平均値



図-6 断面欠損部の荷重状況(供試体D)

### 3. 路面からの塩分浸透状況

AS 橋の RC 床版は、伸縮装置から約 7m の範囲で SFRC による上面増厚が施工され、その範囲のみ、アスファルト舗装はなく、SFRC が舗装も兼ねる構造となっていた(図-7)。図-8 にこの SFRC の路面からの塩分浸透状況を示す。SFRC 部は床版ごと撤去されるまで約 3 年間供用され、その間に路面から塩化物イオンの浸透があったことが確認できる。このうち、特に SFRC に大きなひび割れが発生していた箇所で採取されたコア C3-1 では、内部まで多くの塩化物イオンが浸透していた。また、SFRC 部とアスファルト部の境界で SFRC の上にごく薄いアスファルト層が敷かれていた箇所で採取されたコア C3-2 は、他のコアよりも塩化物イオンの浸透量が多い傾向が見られた。薄層アスファルト部では、SFRC とアスファルトの間に塩水が侵入するとともに、湿気が抜け難いため、塩化物イオンの浸透を促進した可能性がある(8.1 に述べるとおり、湿潤状態では塩分の拡散が速い傾向にあるため)。図-9 に SFRC 部に比較的近いアスファルト舗装部における 12 本の床版コンクリートコア中の塩化物イオン量の測定結果を示す。アスファルト舗装のひび割れ近傍で舗装と床版の剥離が見られた箇所や舗装の打継目(車線境界部)付近では、多量の塩化物イオンが浸透する事例が見られた。その他のアスファルト舗装下のほとんどのコアは、路面からの塩化物イオンの浸透が見られなかった。これらの結果から、既往の調査でも見られたように<sup>9)13)</sup>、アスファルト舗装によって塩分浸透が抑制される場合があることがわかる。

図-10~11 に、AT 橋及び KO 橋について、舗装付きコアの採取位置と、それぞれのコア中の塩化物イオン量の浸透状況を示す。AT 橋と KO 橋は近接しており、いずれも海岸部の橋であった。これらの地覆部のコンクリート上面には、多量の塩化物イオンが浸透していたが、それに比べると、アスファルト舗装下のコンクリート(多くは PCT 桁の上フランジ)中への浸透はごく軽微であった。塩化物イオンの浸透は KO 橋の方が AT 橋よりも多い傾向が見られた。KO 橋の場合、アスファルト舗装はオーバーレイを重ねて厚くなっていたが、路面に近い部分は骨材間の空隙が目立ち、粗粒度のアスファルトが使用されていたことから、路肩部や打継目から塩水が侵入し易い傾向にあったと考えられる。AT 橋の舗装及び KO 橋の表層のアスファルトコアの透水係数はほとんど



図-7 部分的な SFRC 上面増厚

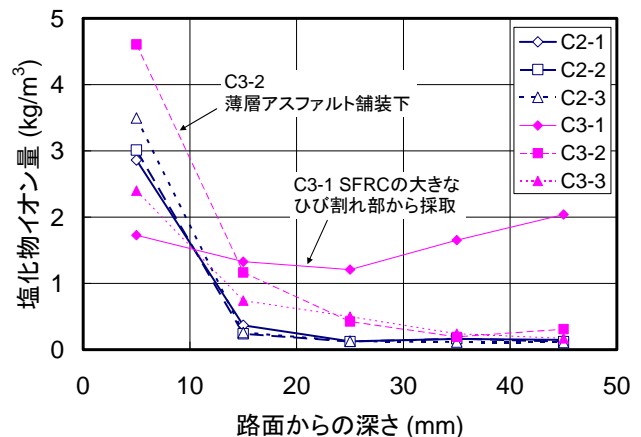


図-8 SFRC 中の塩化物イオン量 (AS 橋)

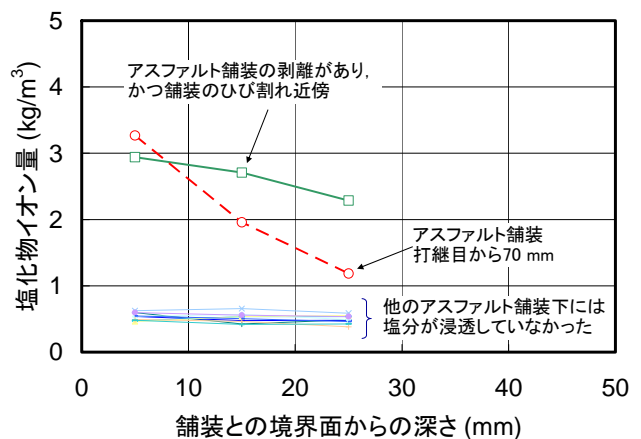


図-9 アスファルト舗装下の床版コンクリート中の塩化物イオン量 (AS 橋)

の場合に不透水であった。

同様に TO 橋の調査結果を図-12 に示す。図中、アスファルトコアの透水係数も示した。TO 橋は海からやや離れているが、凍結防止剤の散布が行われるため、目地部で塩化物イオンの浸透が見られた。しかし、目地部以外では、路面からの塩化物の侵入はほとんど見られなかった。TO 橋では、アスファ

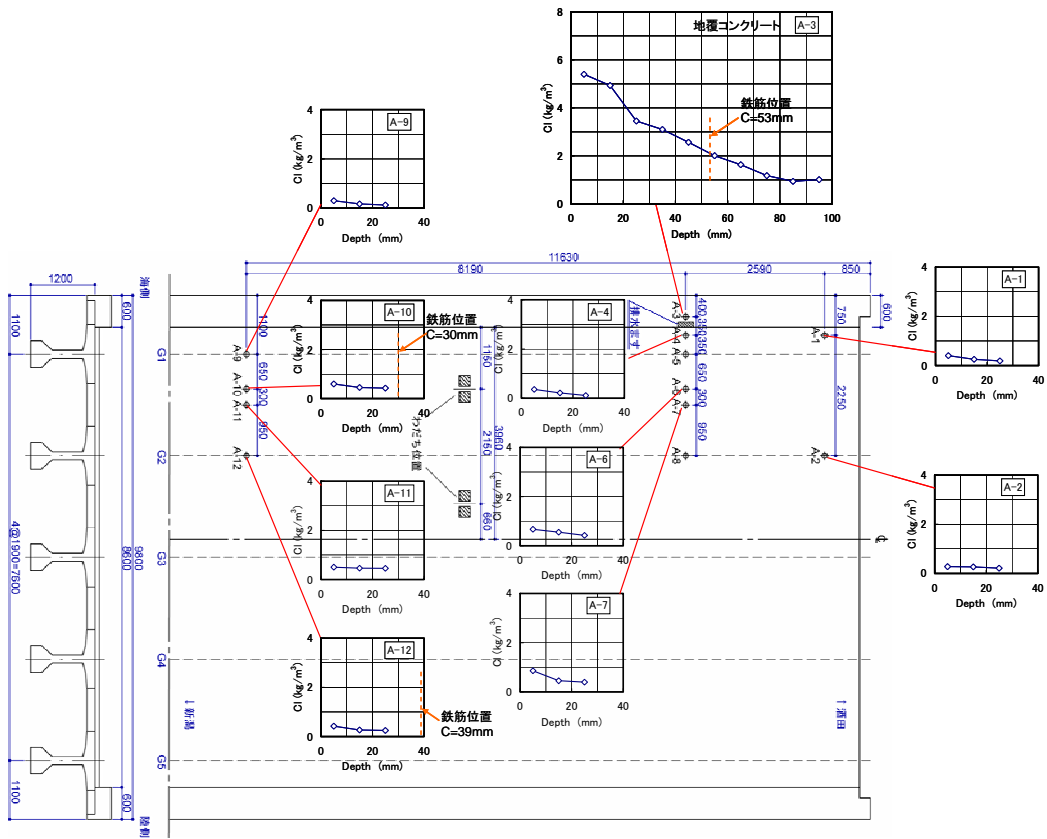


図-10 アスファルト舗装下の床版コンクリート中の塩化物イオン分布 (AT 橋)

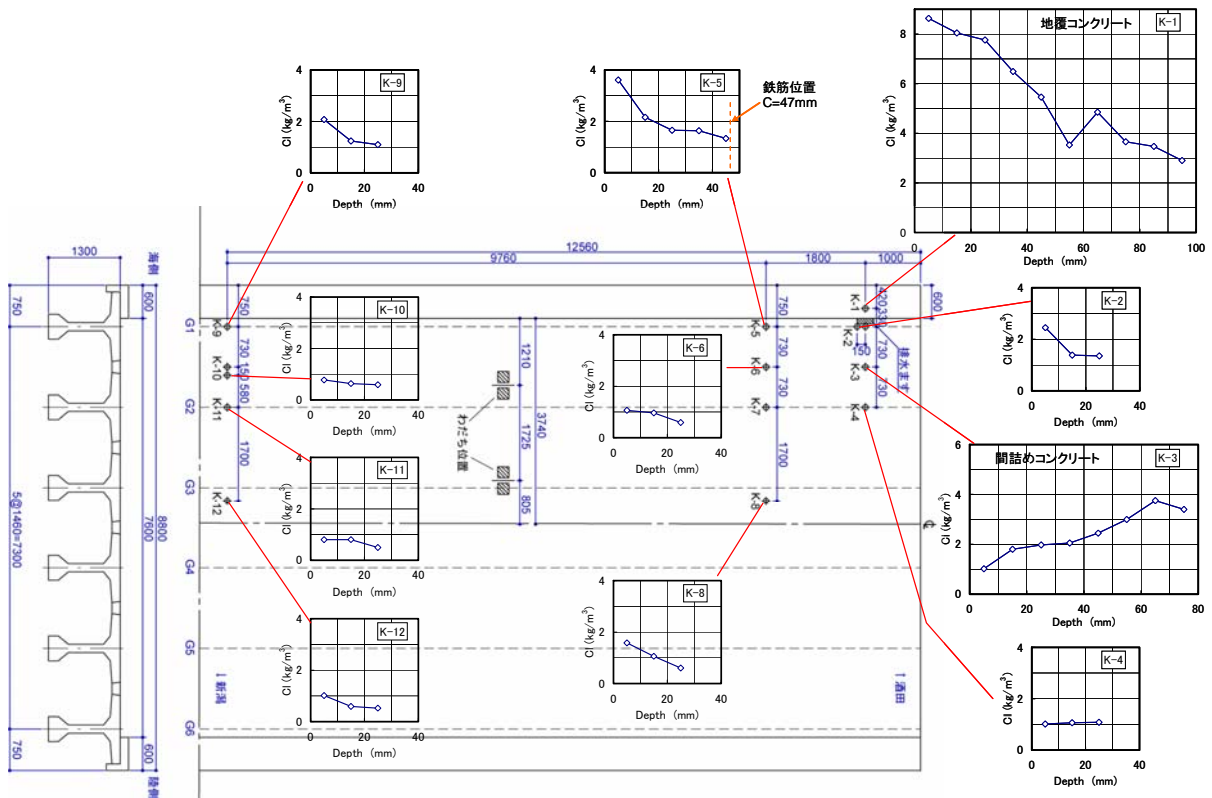


図-11 アスファルト舗装下の床版コンクリート中の塩化物イオン分布 (KO 橋)

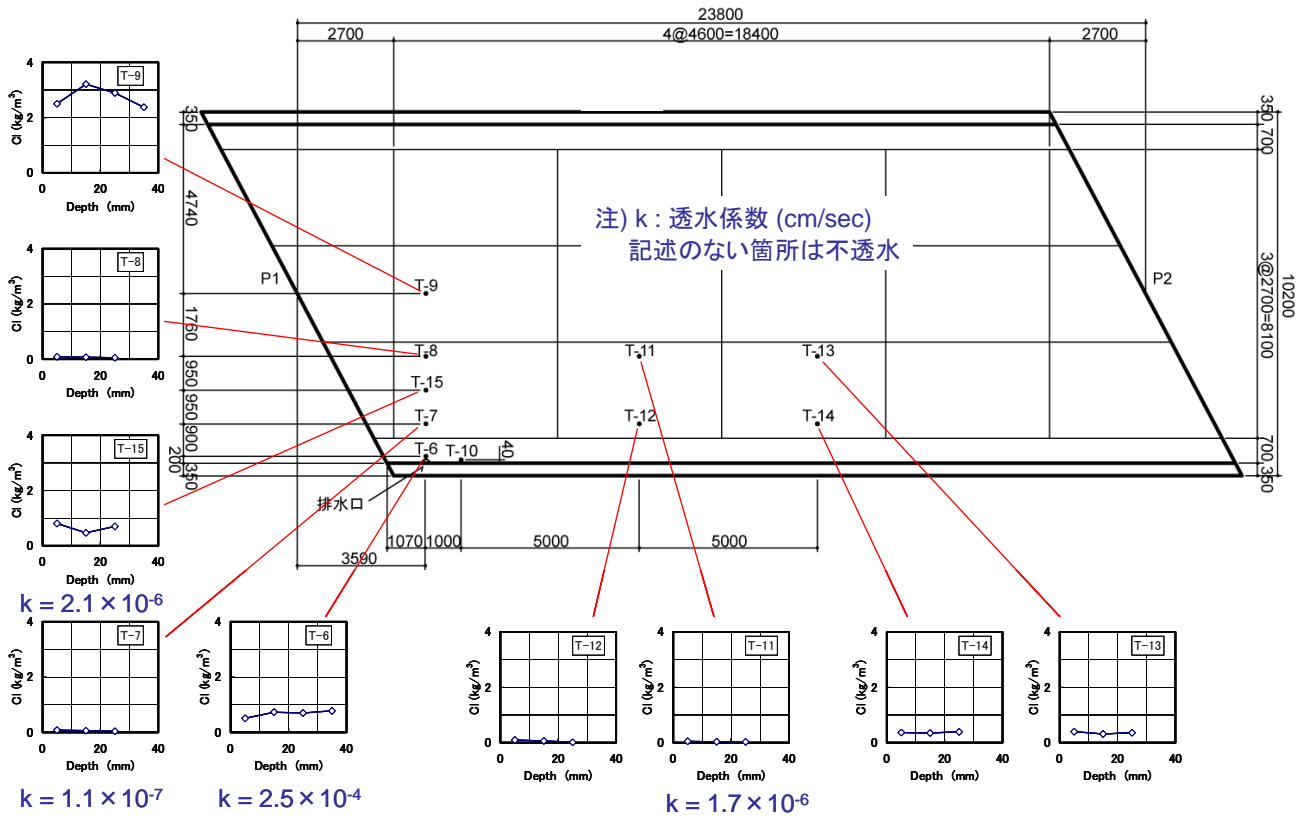


図-12 アスファルト舗装下の床版コンクリート中の塩化物イオン分布及びアスファルトの透水係数 (TO 橋)

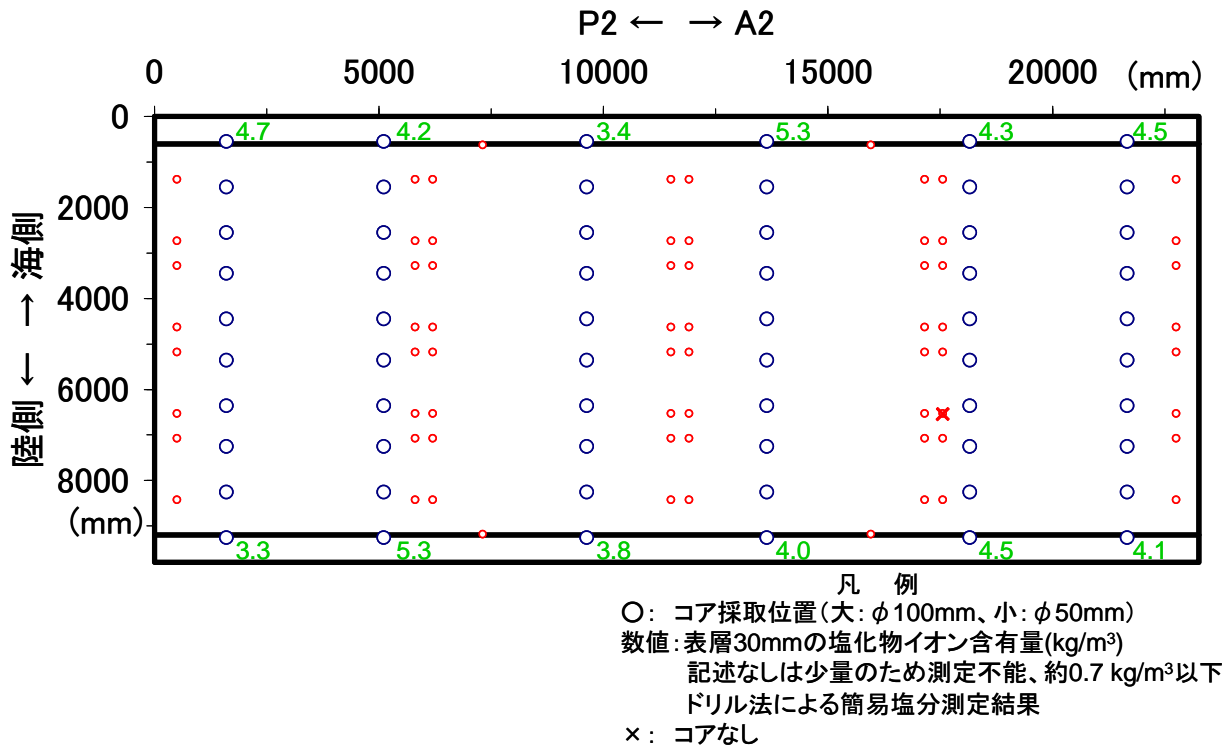


図-13 撤去時コア上面の塩化物イオン量 (AT 橋, P2-A2)



図-14 撤去時コア上面の塩化物イオン量 (TO 橋, P1-P2)

ルトの透水係数が不透水でない部分が見られ, 地覆直近の排水口近傍を除くと  $1 \sim 20 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$  であった。

図-13~14に, AT 橋と TO 橋で行った撤去時コアの上面の塩化物イオン量測定結果を示す。図中の○印がコア採取位置を示すが, 塩化物イオン量の記載がない箇所は値が小さく簡易な測定方法では検出されない程度であったことを表す。AT 橋の場合, 図-10と同様に地覆コンクリートには多量の塩化物イオン量の浸透が認められたが, アスファルト舗装下のコンクリート中には塩化物イオンの侵入が見られなかった。TO 橋の場合, 車道部の数箇所では  $0.4 \sim 0.6 \text{kg/m}^3$  程度の若干の塩化物イオン量が見られたものの, 橋面全体にわたって塩化物イオンの侵入がほとんどなかったことがわかる。

#### 4. アスファルトの透水性

加圧透水試験の結果は, 次式により透水係数が計算される<sup>20)</sup>。

$$k = LQ / AHT \quad (1)$$

ここに,  $k$ : 透水係数(cm/sec),  $Q$ : 透水量(cm<sup>3</sup>),  $H$ : 水頭(cm, 150kPa  $\approx$  1500cm),  $T$ : 透水時間(sec),  $A$ : 供試体断面積(cm<sup>2</sup>),  $L$ : 供試体高さ(cm)

図-15に室内試験の結果から得られたアスファルトの空隙率と透水係数の関係を示す。既に知られているとおり<sup>22)~24)</sup>, 同図上で空隙率と透水係数の間に

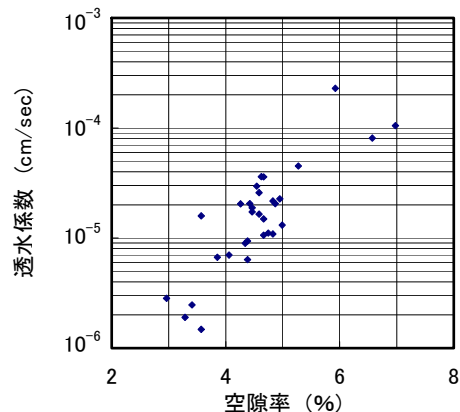


図-15 アスファルトの空隙率と透水係数の関係

概ね直線的な関係がある。一般的な密粒度アスファルトでは設計において空隙率が 4~5%程度に設定されるとすると, 図-15より透水係数は概ね  $5 \sim 50 \times 10^{-6} \text{cm/sec}$  の範囲にあると考えられる。しかし, 既設橋から採取したアスファルトコアは, 空隙率が 2%以下のものが多く見られ, 透水係数も前述のとおり不透水の場合が多かった。アスファルトの空隙率は供用期間に応じて低下することが知られているが<sup>25)</sup>, AS 橋のように舗装打ち換え後の供用年数が 3 年程度であっても 2%以下のコアが多かったことから, 比較的早期に空隙率が低下している可能性がある。この室内試験において, 図-15の結果を得るため, 締固め回数を変えることによって空隙率を管理することとしたことから明らかなように(図-16),



既設橋のアスファルトの空隙率が小さくなる要因の一つは供用荷重による締め固めが挙げられる。しかし、わだちのできる車輪走行位置のみで不透水ということではなかったため、荷重以外の要因、例えば夏季の高温履歴や空隙の目詰まりなどの影響もあると考えられる。また、調査の範囲では、防水層が既に設置されていた床版もあるが、防水層が設置される以前にも塩水に曝されていたことを考えると、必ずしも防水層のみによって塩化物イオンの侵入が防がれていたのではないことがわかる。

図-17 に、コア厚と空隙率の関係を示す。この図に示した結果は同じ配合と同じ締め回数(20回)で得られたものであるが、空隙率は目標値 4.8%と大きく異なり、アスファルト層が厚いほど空隙率が小さくなる傾向が明確に見られた。このことを踏まえて、橋面舗装について考えてみると、横断勾配のために舗装厚が小さい箇所が十分に締め固めが難しいだけでなく、締め固めの効率が悪くなることから、アスファルトの透水性に不利な条件となっていることがわかる。なお、室内試験では、コア径が異なっても空隙率はほとんど変わらなかった。図-16 において、締め回数 20 回のところでばらつきが大きい傾向にあるが、これはコア厚の異なる試験結果をいっしょにプロットしたことの影響によるものである。

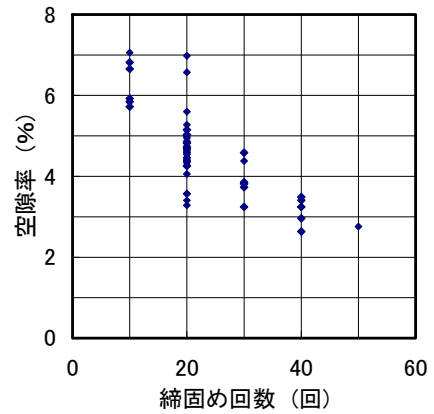


図-16 締め回数と空隙率の関係

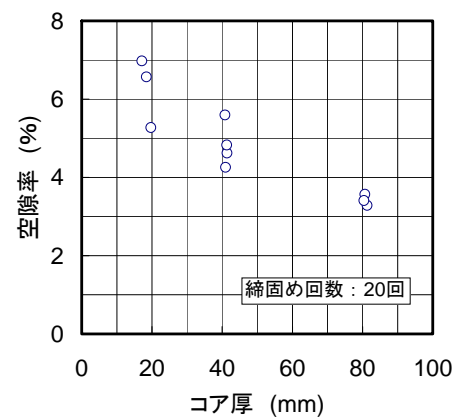


図-17 コアの厚さと空隙率の関係

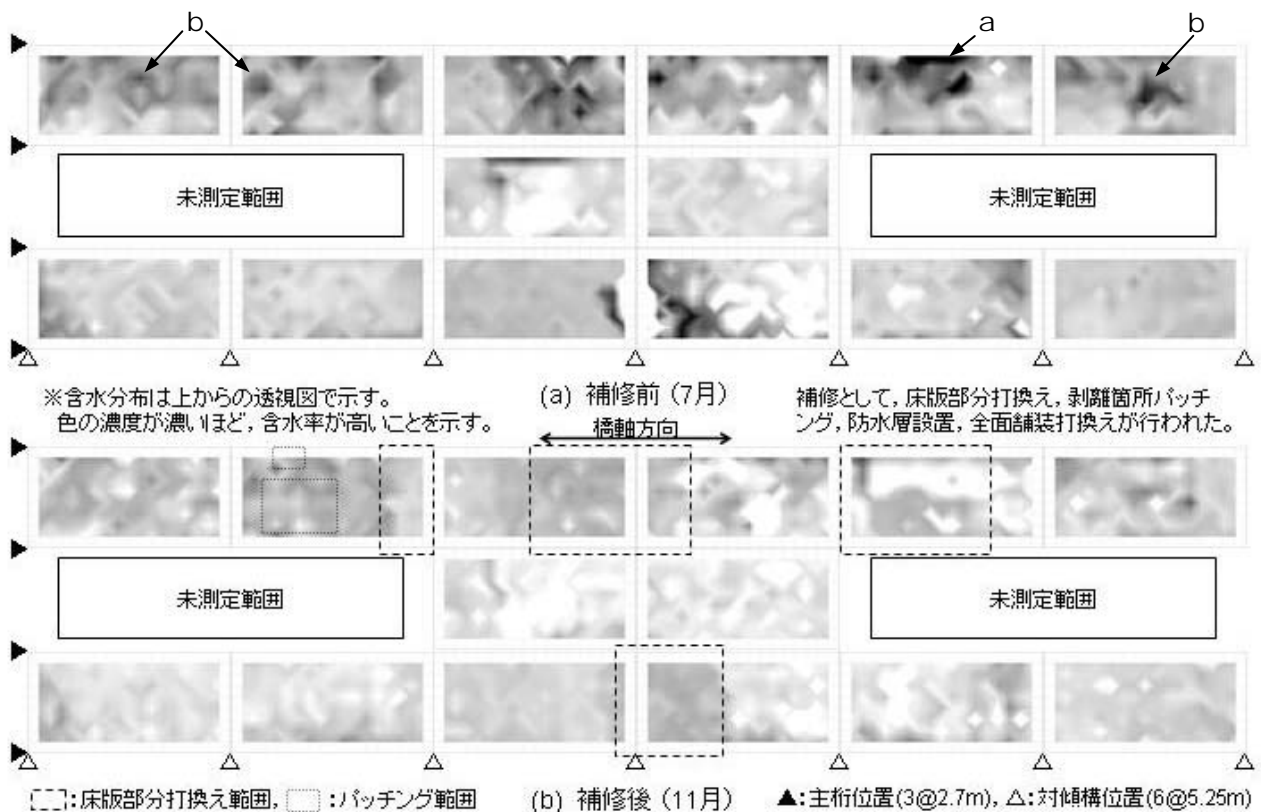


図-18 既設 RC 床版の含水分布 (SI 橋)

## 5. 既設床版の含水状態とアスファルト舗装の状態

図-18 に、既設 RC 床版の含水分布測定結果の例を示す。同図では、床版コンクリート下面で測定した含水率(測定機器がもつ、含水率と相関があるとされる指標 D 値を測定した)を相対的に表すコンタ図で示した。図中の色が濃い方(青い部分)が含水率が高い傾向にあることを示す。補修前の測定時点では、全面舗装打ち換えの直前で、部分的な舗装修繕がところどころ繰り返されていたため(図-19)、舗装の締固めが十分でない箇所があったと考えられる。また目地部に隙間が生じている箇所が見られた(図-20)。このことから、補修前の床版は、部分補修箇所や目地部付近で含水率の高い箇所が見られた。この測定後まもなく、床版下面で漏水が見られた箇所はコンクリートの部分打ち換えが行われ、塗膜系防水層を塗布した後、全面舗装打ち換えが行われた。すべての補修が終わってから約2ヶ月後、同様の含水分布測定を行った結果、補修前に含水率が特に高かった箇所は、コンクリート自体が取り替えられたことと、防水層の効果とその後の床版下面からの乾燥によって、ほとんどない状況となっていた(2回目測定初日、雨天であった)。



図-19 SI 橋補修前の部分的な舗装修繕の状況



図-20 SI 橋の舗装目地部の隙間

(図-18 の補修前 a 点の状況、床版抜け落ち防止のため、応急処置として鋼板を舗装下に敷いて、仮舗装した状態)

## 6. コンクリートの含水状態が疲労耐久性に及ぼす影響

水中におけるコンクリートの圧縮強度や疲労強度は、気中の場合に比べて小さい<sup>26)27)</sup>。破壊過程においてコンクリートの微細ひび割れを伴うが、その際に水分の存在がそれらのひび割れ間の引張力を低下させると考えられており、また、水中でのこれらの強度低下の程度は、コンクリート中の溶液の表面張力が高いほど大きいとされている<sup>27)28)</sup>。図-21 に、本研究で実施した圧縮疲労試験結果のうち気中及び水中での試験結果を、既往の試験結果<sup>27)29)-31)</sup>とともに示す。気中の結果は既往の結果と同程度であったが、水中の結果は既往の結果よりも低かった。

図-22 に、圧縮疲労試験(配合 I)の途中で気中から水中、または水中から気中に含水状態を変化させた場合の結果を示す。気中から水中の変化は容易に予測できるとおり、水中に移行したことによって水中での疲労強度に相当するところまで低下することが確認できた。一方、水中での疲労履歴を受けたコンクリートは、乾燥状態に戻して気中疲労試験を行ったところ、気中での疲労強度に近いところまで疲労強度が回復することがわかった。

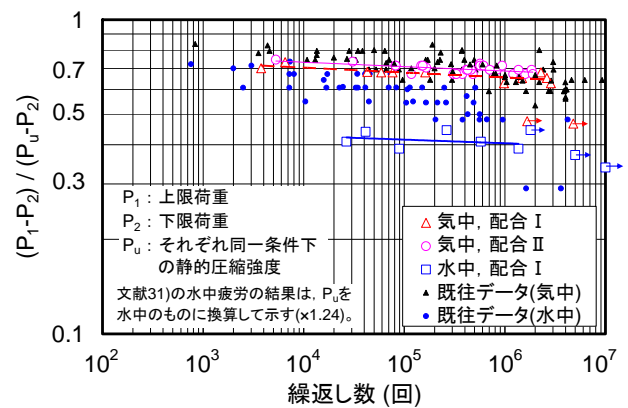


図-21 気中、水中における圧縮疲労試験結果

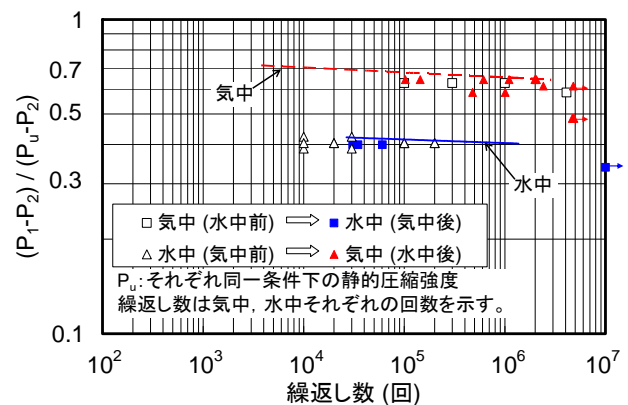


図-22 含水状態を変化させた場合の結果

## 7. 塩害を受けた RC 床版の疲労耐久性に関する検討

### 7.1 RC 床版の疲労損傷過程におけるせん断ひび割れの形成<sup>16)</sup>

道路橋 RC 床版の路面側に塩害が生じた場合、かぶりの剥離が生じることがあり、RC 床版の疲労耐久性にも影響が及ぶことが懸念される。繰返し移動荷重を受ける鉄筋コンクリート床版の疲労損傷機構については既に研究されているが<sup>32)</sup>(図-23)、ひび割れが進行し床版がはり状化した後の、床版内部のひび割れ挙動が必ずしも明確でない。このことから、かぶりの剥離の影響について検討するだけでなく、RC 床版の疲労損傷機構についても改めて詳細な検討が必要であると考えた。

供試体 N の輪荷重走行試験における鉄筋ひずみの計測結果に基づき、RC 床版の内力の変化を検討した結果、繰返し移動荷重により比較的早期に床版内部にせん断ひび割れが発生して、走行範囲にわたってアーチ機構が形成されることを確認した。図-24 に試験後の走行直角方向断面のひび割れ状況と、図-25 にアーチ機構のイメージを示す。図-24 は輪荷重走行試験後に確認したものであるが、アーチ機構形成時期は、比較的早期に発生しており、中立軸が下降し始める時点(後に図-30 で示す)の繰返し数  $N_s$  と概ね一致することがわかった。

既往の RC 床版供試体(39 床版 10 体, 47 床版 1 体, 39(47)床版は昭和 39(47)年道路橋示方書により設計された床版の意)の試験結果<sup>33)34)</sup>についても  $N_s$  を求め、抜け落ち破壊が生じた回数  $N_f$  との関係を見ると、図-26 に示すとおり、 $N_s$  は従来言われているひび割れ密度が破壊時の 9 割以上に達する回数  $0.05 \sim 0.3N_f$ <sup>32)</sup> の範囲に概ね入っていた。

図-27 に、 $N_s$  を用いた S-N 図を示す。縦軸の  $P/P_{sx}$  は、松井によるはり状化した後の静的押し抜きせん

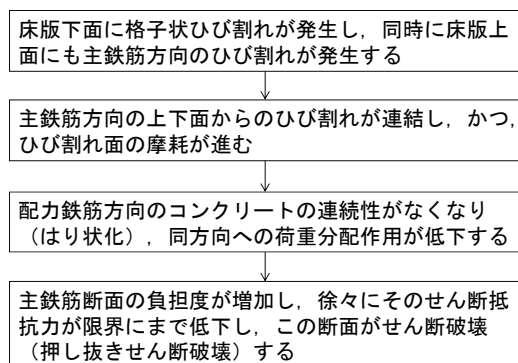


図-23 輪荷重走行試験における床版供試体の疲労損傷機構(既往の知見)<sup>3)</sup>

断耐力計算値であり、 $P$  は走行荷重である<sup>15)</sup>。これよりアーチ機構形成までの繰返し数  $N_s$  は、破壊までの回数と同様、 $P/P_{sx}$  とよい相関が見られた。

### 7.2 アーチ機構形成後の疲労性状<sup>17)</sup>

床版供試体と同じバッチのコンクリートコアの気中圧縮疲労試験において、コンクリートのひずみにより S-N 線を整理した結果(図-28)、試験開始時におけるひずみ範囲が  $800 \sim 1000 \mu$  程度の場合に、数 10 万回の繰返し載荷で圧縮疲労破壊が生じることがわ

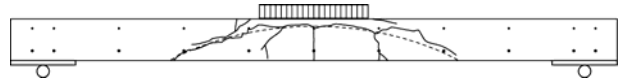


図-24 ひび割れ状況図(供試体 N 試験後)

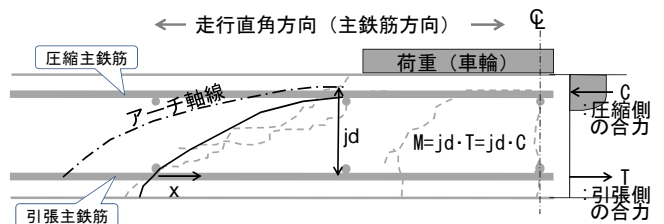


図-25 アーチ機構のイメージ

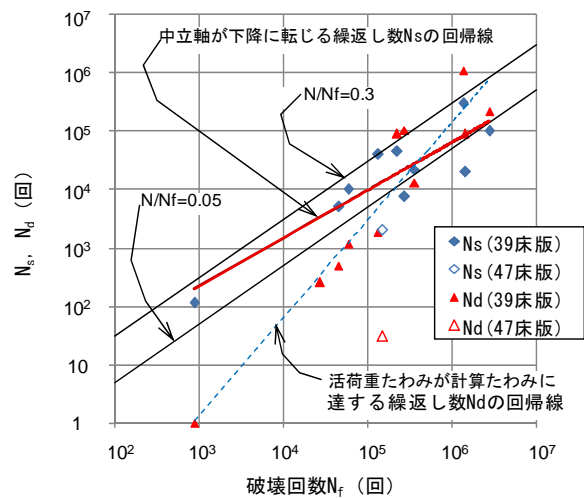


図-26 破壊回数に対する  $N_s$  と  $N_f$  の関係

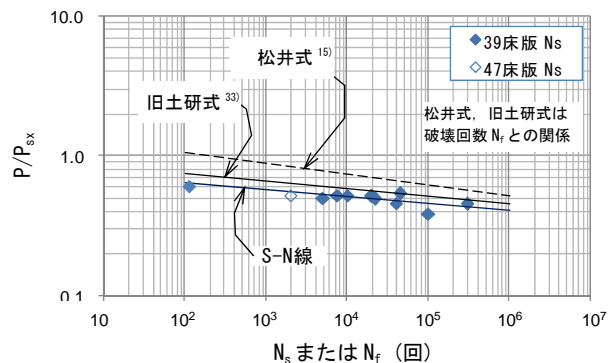


図-27  $N_s$  を用いた RC 床版の S-N 図

かった(床版供試体では 14 万回から 36 万回で破壊に至った)。

図-29 に、動的ひずみのうち圧縮ひずみが大きかった箇所の測定結果例を示す。輪荷重走行試験の下で、床版内のせん断ひび割れの発生、進展とともに、RC 床版にアーチ機構が形成されると、コンクリートのひずみ範囲(埋め込みゲージによる実測値)が  $800\mu$  (圧縮側)を超える箇所が徐々に見られ、コンクリートの圧縮疲労の影響が顕著となる状況に移行することが確認できた。

図-30 に供試体 N 及び D の中立軸の変化を示す。輪荷重走行試験において、床版内にアーチ機構が形成されてから中立軸が低下する傾向は、主としてアーチ機構を構成する圧縮側コンクリートの弾性係数が疲労によって低下することに起因すると考えられる。図-31 にコンクリートコア(コア I)の気中圧縮疲労試験における荷重とひずみの関係を示す。また、図-32 にコンクリートの弾性係数の変化を示す。これらの例に見られるように、繰返し荷重を受けるコンクリートの弾性係数は、繰返し数とともに低下することが知られている<sup>35)36)</sup>。床版においても、コンクリート内部のひずみの最大値は、繰返し数とともに徐々に増加する傾向が見られた(図-29)。

床版内部のコンクリートの弾性係数を別の視点から検討するため、図-33 のようにアーチ機構形成後の圧縮合力におけるコンクリートと圧縮鉄筋の負担割合を上下鉄筋ひずみから算定した。この負担割合がヤング係数比を考慮したコンクリートと鉄筋の断面積比と一致すると仮定して推定した、アーチ機構の圧縮負担範囲におけるコンクリートの弾性係数は、繰返し数とともに急激に低下していたことが確認できた(図-34)。

### 7.3 上面かぶりがないことの影響<sup>17)</sup>

供試体 N, D の場合、上面かぶりが部分的に断面

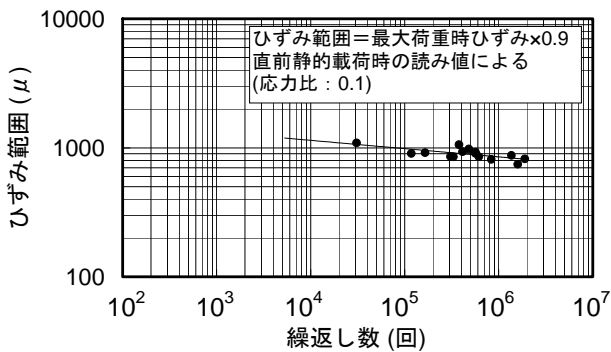


図-28 気中圧縮疲労試験におけるひずみと繰返し数の関係

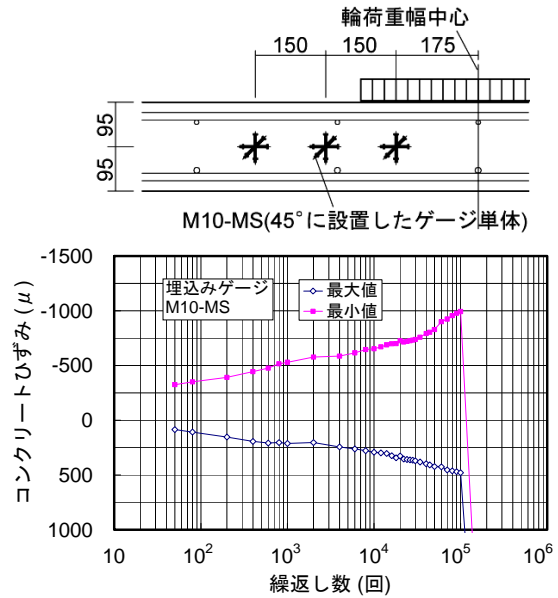


図-29 動的ひずみのうち圧縮ひずみが大きかった箇所の測定結果例(せん断ひび割れ発生箇所付近の斜め方向ひずみ, E-E 断面, 走行幅中心から 300 mm, M10-MS)

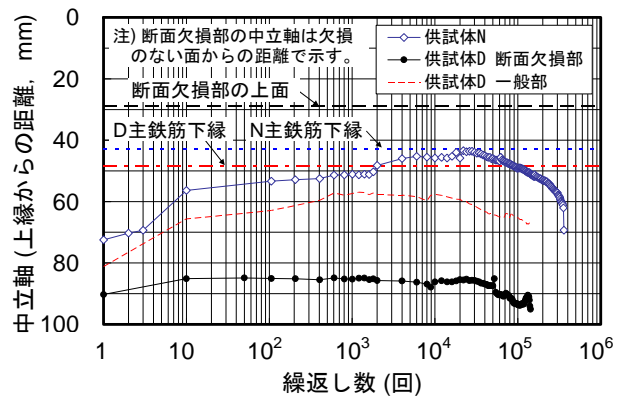


図-30 床版中央における中立軸の変化

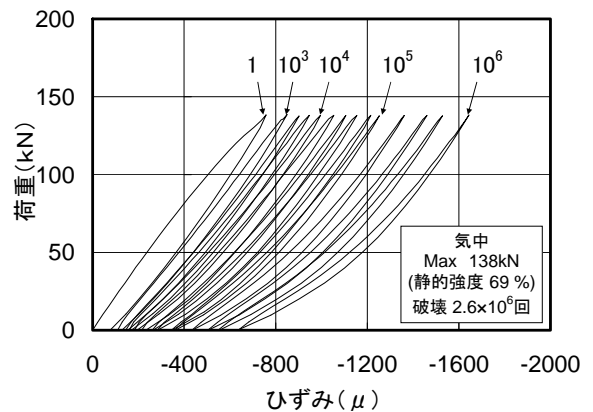


図-31 コンクリートコアの気中圧縮疲労試験における荷重とひずみの関係

欠損することによって、床版の疲労寿命は約 40 % まで低下した。しかし、かぶりコンクリートが剥離した場合でも、供試体 N の試験結果に基づきマイナー則にしたがって算定した値よりは、やや疲労寿命が長かった。その際、アーチ機構の圧縮軸力における圧縮主鉄筋の負担が、かぶりがあるときに比べて著しく大きくなっていった(図-35)。上面かぶりに剥離が生じた場合、中立軸の低下により圧縮鉄筋下のコンクリートが圧縮に抵抗するだけでなく、圧縮鉄筋も貢献することによって、疲労寿命の低下が抑制されることがわかった。

### 7.4 RC 床版の疲労に及ぼすコンクリート強度及び水の影響

本検討からわかった RC 床版の疲労損傷機構を踏まえた上で、RC 床版の疲労に及ぼすコンクリート強度  $f_c$  の影響及び水の影響について整理しておく。

#### (1) コンクリート強度の影響

松井式のうち、 $P_{sx}$  には  $f_c$  が考慮されており、従来はこの  $P_{sx}$  への影響を通じて  $f_c$  が床版の疲労に及ぼす影響について検討される事例が見られる<sup>33)</sup>。

せん断ひび割れ発生までは、 $f_c$  は床版の曲げ剛性に若干影響するが、曲げひび割れの発生に及ぼす影響は小さい。 $f_c$  はせん断ひび割れの発生への影響は大きいと考えられる。図-27 で示した  $P/P_{sx}$  と  $N_s$  が間に良好な相関が見られたのは  $P_{sx}$  の算定式の中で考慮されるコンクリートの最大せん断応力度  $\tau_{smax}$  の影響が大きいと考えられ、この  $\tau_{smax}$  は  $f_c$  の関数として与えられている。

せん断ひび割れ発生後、アーチ機構の圧縮部材を形成するかぶり付近のコンクリートが、圧縮疲労を受ける形で損傷が進行することから、図-21 に示した S-N 図から考えて、 $f_c$  はせん断ひび割れ発生後の疲労寿命への影響が大きいと考えられる。

#### (2) 水の影響

水の影響によって、RC 床版の疲労耐久性は著しく低下する<sup>14)15)</sup>。床版に漏水が見られる場合、図-23 に示した疲労損傷が促進されるとされている<sup>15)37)</sup>。

水の影響によって  $f_c$  が低下することから、前項(1)のとおり、RC 床版の疲労損傷過程のさまざまところに影響する。特に、コンクリートの疲労強度は静的強度である  $f_c$  の低下の影響以上に著しく低下することから、水の浸入によって、アーチ機構形成後の圧縮部材を構成する床版上縁付近のコンクリートの疲労寿命の著しい低下をもたらすと考えられる。

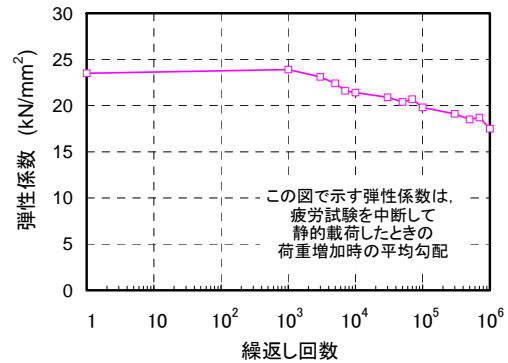


図-32 気中圧縮疲労試験におけるコンクリートの弾性係数の変化 (1 供試体の例)

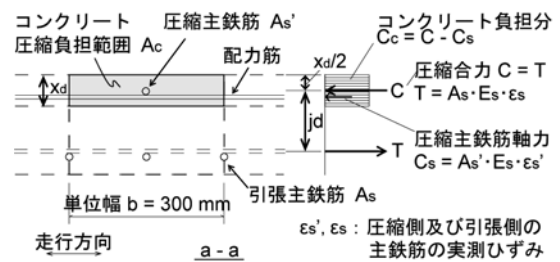


図-33 アーチ機構形成後の圧縮合力におけるコンクリートと圧縮鉄筋の分担 (イメージ)

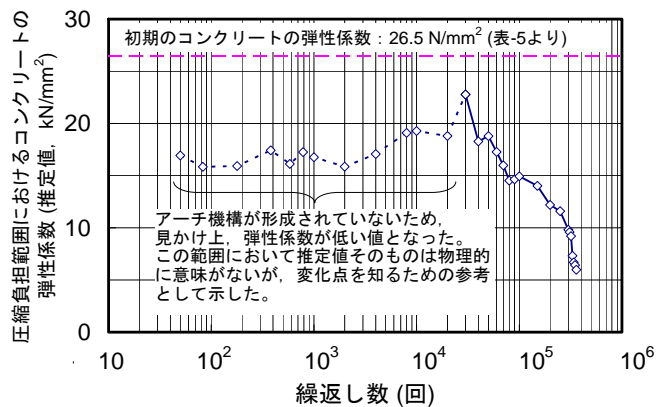


図-34 アーチ機構の圧縮負担範囲におけるコンクリートの弾性係数(推定値)の変化

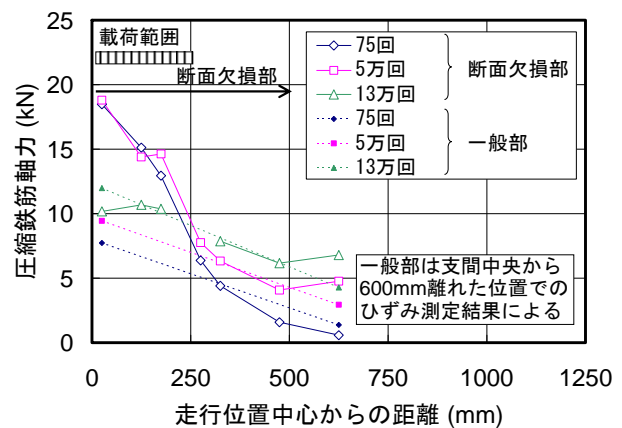


図-35 断面欠損部と一般部の圧縮主鉄筋軸力

## 8. RC床版の塩害と疲労の複合劣化に関する考察

### 8.1 RC床版上面の塩害

#### (1) RC床版上面への塩化物イオンの侵入経路

アスファルト舗装が敷設されているRC床版上面への塩化物イオンの侵入経路は、配合や締固めの程度によってはアスファルト混合物に直接浸透して床版に供給される場合と、透水係数が比較的低いアスファルト混合物であっても、舗装端部やポットホール、ひび割れなどのアスファルト舗装の損傷部から床版上面に侵入する場合がありますと考えられている<sup>10)</sup>。今回の調査の結果も、これらの想定範囲内にあった。

アスファルト混合物自体は、室内試験では明らかに透水性が高かったことから、舗設当初は比較的高い透水性が考えられるが、既設のアスファルト舗装から採取したコアは多くの場合に不透水であり、供用後の空隙率の低下<sup>25)</sup>とともに透水性も低下することがわかった。舗装の締固め回数が同じであっても、舗装厚が小さい場合に空隙率が大きく、透水係数が比較的大きいことから、舗装の締固めが容易でない橋面端部や舗装打継目付近ではアスファルト舗装の透水性が高い傾向にあると考えられる。

#### (2) 床版コンクリート中への塩化物イオン浸透

床版上面に塩水が侵入・滞水すると、コンクリート中に塩化物イオンが浸透・拡散すると考えられ、撤去床版の調査における塩化物イオンの深さ方向の分布からも、上面からの塩化物イオンが浸透していたことが確認できる。国内の床版の場合、新設時よりアスファルト舗装で覆われており、舗装の損傷によって塩水が侵入した場合については、その侵入開始時期が明確でなく、コアデータから塩化物イオンの拡散係数 $D_c$ の特定ができていない。

塩水浸漬試験における $D_c$ は屋外暴露試験の場合に比べて1オーダー大きいことが報告されている(図-36)<sup>38)</sup>。舗装と床版の界面に塩水が侵入した場合、乾燥し難い状態に置かれることから、RC床版上面のコンクリートは塩水浸漬試験に近い状況に置かれ、塩化物イオンの拡散係数は比較的高速の傾向にあると考えられる。

#### (3) 鉄筋腐食とかぶりの剥離

床版上面は塩水浸漬試験に近い環境であると想定し、コンクリートの水セメント比55%、コンクリート表面における塩化物イオン量 $3\text{kg/m}^3$ (撤去床版の調査結果を参考とした)、かぶり30mmと仮定して試算した結果を図-37に示す。この場合、鉄筋位置

の塩化物イオン量が鋼材の発錆限界塩化物イオン量 $C_{th} = 1.2\text{kg/m}^3$ に達するまでの時間はわずか2年程度となる。ただし、 $1.2\text{kg/m}^3$ は設計で用いられる値であり、既設のコンクリート構造物の調査事例では $C_{th}$ が $2.5\text{kg/m}^3$ の場合にたいして腐食が見られる<sup>39)</sup>( $C_{th} = 2.5\text{kg/m}^3$ に達する時間は約30年)。

図-38、39に床版上面の鉄筋腐食事例を示す。舗装打ち換え中にコンクリートの剥離が確認され、鉄筋腐食が確認された。図-38に示したわだち付近の鉄筋腐食は、舗装のひび割れから塩水が浸透した可能性があるが既に舗装が部分打ち換えされていたため明確でない。腐食範囲は橋面全体からみるとごく限られた範囲であったが、明らかに腐食による考えられる鉄筋の断面欠損が見られた。図-39は、橋面端部で路面の排水が溜まり易い箇所であるとともに、横断勾配の関係でかぶりが比較的小さい箇所であり、かつ前述のとおり舗装の透水性の点からも塩水が侵入する可能性が高いと考えられる箇所である。

### 8.2 舗装損傷先行型の疲労損傷

従来、RC床版の疲労損傷は、一般に、疲労の進行とともに床版下面に格子状のひび割れが見られるようになり、ある程度進行した後は床版パネル(主げたと横構で囲まれた範囲)の全面に格子状ひび割れ

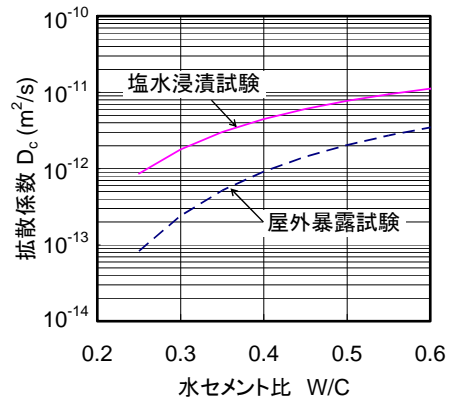


図-36 コンクリート中の塩化物イオン拡散係数<sup>38)</sup>

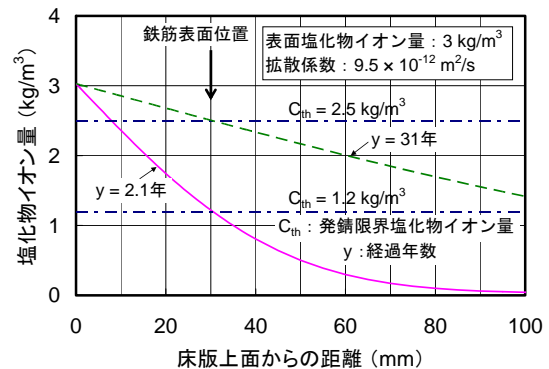


図-37 床版上面からの塩分浸透(試算例)



図-38 床版上面の鉄筋腐食と上面かぶりの剥離  
(補修のため、鉄筋下まではつったところ)



図-41 抜け落ちた箇所周辺のひび割れ状況  
(左上の部分はひび割れが出ていなかった)



図-39 伸縮装置と地覆の角部における鉄筋腐食



図-42 抜け落ちた箇所周囲の路面状況<sup>9)</sup>

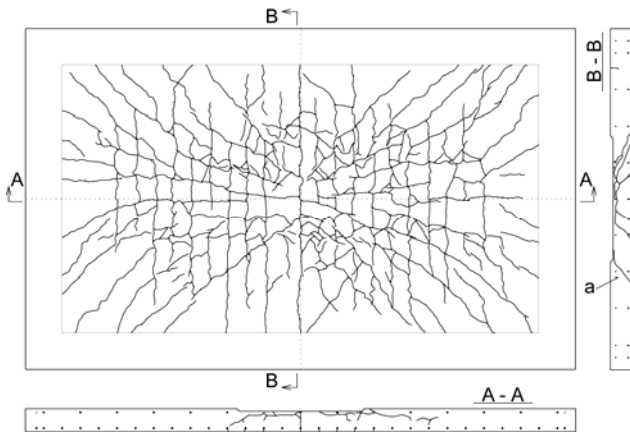


図-40 輪荷重試験における床版のひび割れ例

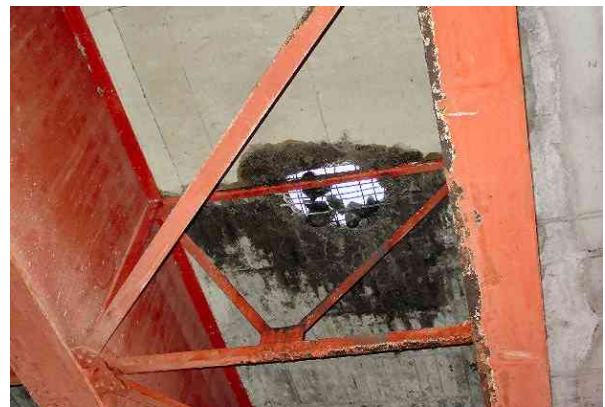


図-43 床版部分打ち換え時の打継部の損傷

が進展するものと考えられている(図-40は供試体Dの例)。しかし、地方の道路橋などでは、必ずしも床版パネル全面に格子状のひび割れが発生していないうちに抜け落ちが生じる事例が見られる。図-41の事例では、抜け落ちた周辺のみ格子状ひび割れが見られたが、約2m離れた箇所では同じ輪荷重走行位置の下でもまったくひび割れが見られなかった。

比較的健全であったRC床版において、アスファルト舗装の一部にひび割れなどの損傷が生じて水が浸入した場合、その周辺のコンクリートの疲労強度が著しく低下して、局所的に疲労損傷が進行することがあると考えられる。図-18に示した床版の含水分布のうち、b点などは局所的に含水率が高くなっていた箇所であり、この周囲には部分的なひび割れ

が見られた(アスファルト舗装のひび割れか部分補修の影響によると考えられる)。図-42 や前掲の図-19 の例に見られるように、舗装の部分打ち換えが頻繁に行われると、水の浸入を防ぐことが難しく、床版の局所的な抜け落ちが生じる可能性が高くなると考えられる。特に、39 床版のように床版厚が小さく疲労耐久性が相対的に低い場合には、水が浸入してから疲労損傷の進行が速いものと推察される。

なお、図-43 に、部分的に床版を打ち換えたときに生じる新旧コンクリートの打継目付近で疲労による抜け落ちが生じた事例を示す。コンクリートの打継目は漏水の可能性もあるが、近傍のコンクリートが打ち換えられた履歴があることから考えると、その周囲の残されたコンクリートも疲労損傷の進行がある程度進んでいた可能性があり、この箇所での抜け落ちをもたらす一因であると考えられる。

### 8.3 塩害と疲労の複合的な劣化のパターン

以上の点を踏まえて、図-44 に RC 床版の塩害と疲労の複合的な劣化のパターンを示す。RC 床版の上面の塩害と疲労はそれぞれ単独でも発生する可能性がある。疲労損傷の進行程度とアスファルト舗装の不具合による水あるいは塩水の侵入のタイミングによって、複数の劣化パターンが想定される。なお、コンクリートの圧縮疲労による損傷過程の後期において、コンクリート中に微細ひび割れや視認できるひび割れが見られるようになるので、この時点では塩化物イオンの浸透が加速することが予想される。

## 9. 既設 RC 床版の維持管理における留意事項

凍結防止剤が RC 床版の耐久性に及ぼす影響に関連して、防水層の設置、路面水の確実な排水などの現行の維持管理に加えて、以下の点について留意する必要がある。

### (1) 橋面舗装の維持管理

旧建設省技術研究会の調査<sup>9)</sup>や今回の調査の結果から、防水層がなくとも、アスファルト舗装が防水の役割を果たす場合があることがわかった。アスファルト舗装の防水性能は防水層以上に不確実な部分があるが、舗装自体が水の浸入によって剥離などの損傷が生じることを考えると、ある程度の防水性能を有していなければならない。防水層を設置することによって、舗装と防水層、両者を合わせた二層構造によって防水性能を高めているというのが実態であると考えられる。橋面舗装は、RC 床版の維持管理、防水性能という視点から、橋梁の一部として維

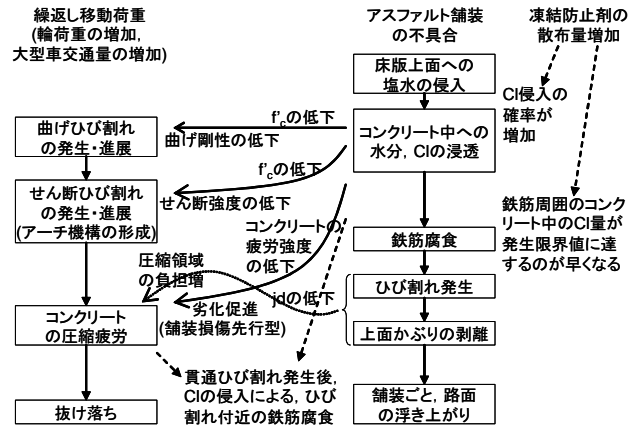


図-44 RC床版の塩害と疲労の複合的な劣化

持管理する必要がある。

RC 床版の塩害と疲労の複合的な劣化は実際に起こり得ると考えられるが、上記のとおり複雑であり、かつ 39 床版のように水の侵入が早期劣化をもたらす可能性があることを考えると、「舗装の劣化=床版の劣化」と位置付けて、橋面舗装の維持管理を行う必要がある。舗装のひび割れなどの損傷が見られる場合には長期に放置せず、また部分打ち換えの繰り返しにより橋面舗装がパッチワーク状態になる前に、全面打ち換えを実施するなどの配慮が必要である。

### (2) RC 床版下面の点検

RC 床版の定期点検では格子状のひび割れの有無やひび割れ幅、角落ち(ひび割れ周囲のコンクリートの欠け落ち)の有無などを目安に損傷度が判定されている<sup>40)</sup>。前述のとおり、床版下面のひび割れから漏水がある場合は水の影響の点から注意すべき状況にあるが、雨天時や雨天直後なら確認できても、乾燥してしまうとわかりにくい場合がある。遊離石灰は水の存在を表す一つの目安であるが、いつの時点で現れたものであるか判別し難い場合がある。例えば、舗装が全面打ち換えされて防水層が設置された後も遊離石灰は残っているので、必ずしも現時点で漏水が生じているとは限らない。橋面舗装の状況と照らし合わせて、漏水の可能性について検討するとともに、特に漏水の懸念がある場合は、雨天の日に合わせて再調査を実施するなどして確認することが望ましい。

### (3) RC 床版の部分打ち換え

床版下面に部分的にひび割れが発生している場合であっても漏水を伴う場合には、遠からず抜け落ちが発生する危険性が高まっているので、防水層の導入と舗装の打ち換えが必要となる。また、舗装を除



去した際に床版の劣化が見られた場合、応急的な処置として、コンクリートの部分打ち換えが必要となる。床版の状態については事前調査により確認しておくことが望ましい。その場合に打ち換えの範囲は、部分的にひび割れが見られる範囲よりも広い範囲を対象として実施するのがよい。その際、アスファルト舗装の損傷位置との関係や床版の含水状態を確認しておくことが望ましい。

## 10. まとめ

本検討の主な結果を以下に示す。

- 1) 撤去床版から採取したアスファルト舗装の多くは不透水の状態となっていた。ここで調査した範囲では、路面からの塩分浸透がアスファルト舗装によって抑制される事例が多かった。アスファルト舗装の透水係数は、空隙率と相関があること、空隙率が供用後に低下することが知られており、このことによって供用下のアスファルト舗装が不透水に近づくものと考えられる。
- 2) アスファルト舗装の空隙率は締固め回数や舗装厚の影響を受け、特に舗装厚が薄い場合に空隙率、透水係数が大きくなる傾向にある。橋面の端部(伸縮装置や地覆の近傍)やアスファルト舗装の打継目(上り、下りの境界あるいは部分打ち換えの境界)付近では、締固めが不十分になり易いことから、目地だけでなく、舗装自体も水あるいは塩水が浸透しやすい傾向にあると考えられる。
- 3) 既設 RC 床版の下面から含水率の分布を調査した結果、アスファルト舗装の地覆との目地部やひび割れ部あるいは部分打ち換えされた箇所で含水率が高くなる傾向が見られた。また、RC 床版の部分打ち換え、橋面舗装の全面打ち換え、防水層敷設の後には、含水率の高い箇所がほとんどなくなった。
- 4) コンクリートの圧縮疲労試験において、水中における疲労強度は気中の場合に比べて著しく低下することが知られている。しかし、水中における疲労履歴を有していても、再び乾燥させると気中における疲労耐久性に近い状態に改善されることがわかった。
- 5) RC 床版の疲労損傷機構について、輪荷重走行試験を実施し、計測結果に基づく RC 床版の内力の変化を検討した結果、繰返し移動載荷により比較的早期に床版内部にせん断ひび割れが発生して、走行範囲にわたってアーチ機構が形成されること

を確認した。

- 6) RC 床版の疲労損傷過程における上面かぶりの役割とかぶりが剥離したときの影響について、模擬的に上面かぶりを欠損した床版供試体の輪荷重走行試験を実施して、RC 床版内にアーチ機構が形成された後、圧縮部材を構成するかぶりコンクリートに、圧縮疲労による弾性係数の低下が生じることがわかった。また、塩害等によって上面かぶりが剥離した場合でも、圧縮主鉄筋がアーチ機構の保持に貢献することが確認できた。
- 7) 以上の結果を踏まえて、RC 床版における塩害と疲労の複合的な劣化のパターンについて整理するとともに、既設 RC 床版の維持管理における留意事項を取りまとめた。

## 11. あとがき

RC 床版の塩害や疲労を対象として、それらの非破壊検査による調査方法及び損傷を受けた後の補修・補強について、「コンクリート床版の補強設計法に関する研究(一般, H19~21)」において別途検討しているところである。

本研究では、上記の RC 床版に関する調査のほか、プレテンション PC げた橋における排水口付近の PC げたへの塩分浸透状況、海岸部の橋の防護柵アルミめっき柱の地覆内での腐食状況、SFRC 舗装のひび割れ部における鋼繊維の腐食状況、橋台・橋脚上面に堆積した土中の塩分がコンクリート中への塩分浸透に及ぼす影響、橋面における凍結防止剤散布量の観測方法<sup>4)</sup>についても調査を行った。

## 謝辞

本研究に関する調査にご協力をいただいた地方整備局の関係各位に深く感謝致します。

## 参考文献

- 1) Clear, K., Permanent Bridge Deck Repair, Public Roads, Vol.39 No.2, Sep. 1975.
- 2) Kilaeski, W.P., Corrosion Induced Deterioration of Reinforced Concrete -An Overview, Material Performance, pp.48-50, March 1980.
- 3) Banks, R.K., Bridge Decks: Their Problems and Solutions, Public Works, Dec.1986.
- 4) Galambos, C.F., Bridge Design, Maintenance, and Management, Public Roads, 50-4, March 1987.
- 5) Evaluation of Bridge Deck Protective Strategies, NCHRP Report 297, Transportation Research Board,

- National Research Council, 1987.
- 6) Highway Deicing -Comparing Salt and Calcium Magnesium Acetate, Special Report 235, Transportation Research Board, National Research Council, 1991.
  - 7) Smith, J.L. and Virmani, Y.P., Performance of Epoxy-Coated Rebars in Bridge Decks, Public Roads, pp.6-12, Autumn 1996.
  - 8) Lee, S-K. and Krauss, P.D., Service life extension of Northern bridge decks containing epoxy-coated reinforcing bars, Concrete Reinforcing Steel Institute, WJE, Oct. 2003.
  - 9) 国土交通省国道課, 土木研究所, 地方整備局等:「コンクリート橋のライフサイクルコストに関する調査研究—コンクリート橋の損傷状況と維持管理費の実態調査—」, 土木研究所資料第 3811 号, 2001.3
  - 10) 融雪剤によるコンクリート構造物の劣化に関する研究委員会報告, 日本コンクリート工学協会, 1999.11.
  - 11) 関口武一, 笹井幸男, 石塚喬康: 塩害を受けた RC 床版の劣化度調査と保全工事, コンクリート工学, 32-5, pp.41-49, 1994.5.
  - 12) 笹井幸男, 松本吉正, 佐藤雅則, 奥谷裕介: 中央自動車道古川渡橋における床版取換え—塩害を受けた RC 床版からプレキャスト PC 床版へ—, 橋梁と基礎, pp.27-33, 1994.10.
  - 13) 田中良樹, 河野広隆, 大和恒哉, 大山英郎: 路面の塩化物の RC 床版への浸透状況, 土木学会第 56 回年講, V, pp.566-567, 2001.10.
  - 14) 武田昭彦, 遠藤武平: RC 床版の繰返し劣化と水の影響, セメント・コンクリート, No.433, pp.24-29, 1983.3.
  - 15) 松井繁之: 移動荷重を受ける道路橋 RC 床版の疲労強度と水の影響について, コンクリート工学年次論文報告集, 9-2, pp.627-632, 1987.
  - 16) 長屋優子, 村越潤, 田中良樹: 繰返し移動荷重を受ける鉄筋コンクリート床版のひび割れ挙動に関する検討, コンクリート工学年次論文集, 2008.(投稿中)
  - 17) 田中良樹, 村越潤, 長屋優子: 道路橋 RC 床版の疲労損傷過程における上面かぶりの剥離の影響, コンクリート工学年次論文集, 2008.(投稿中)
  - 18) コンクリート中の塩化物イオン量測定の実誤差に関する検討, 土木研究所資料第 3987 号, 2005.11.
  - 19) 舗装試験法便覧, (社)日本道路協会, 1988.11.
  - 20) 松野三朗, 南雲貞夫, 三浦裕二, 山之口浩: アスファルト舗装に関する試験, 建設図書, pp.261-262, 1971.
  - 21) 内田賢一, 西川和廣, 神田昌幸: 既設 RC 床版の健全度評価手法に関する実験的検討, 土木学会第 55 回年次学術講演会, pp.516-517, 2000.9.
  - 22) 今田元氏, 佐鳥悦久: アスファルト法面舗装の締めめと透水係数について, 第 7 回日本道路会議論文集, pp.445-448, 1963.
  - 23) 中村弘, 佐鳥悦久: ノリ面舗装用シートアスファルトの骨材粒度が透水係数におよぼす影響, 第 8 回日本道路会議論文集, pp.517-520, 1965.
  - 24) 中原大磯, 坂口陸男, 橋本修治: 薄層弾性舗装のブリスタリングと透気・透水評価に関する一検討, 第 21 回日本道路会議論文集, pp.532-533, 1995.
  - 25) 舗装技術の質疑応答, 建設図書, pp.77-82, 1972 及び同第 4 巻(上), pp.179-183, 1983.
  - 26) 田政範, 島田静雄: 水で飽和されたモルタルの圧縮破壊および疲労特性に関する基礎的検討, 土木学会論文集, 245 号, pp.85-76, 1976.1.
  - 27) 松下博通: 水中におけるコンクリートの圧縮疲労強度に関する研究, 土木学会論文集, 296 号, pp.87-95, 1980.4.
  - 28) 松下博通, 尾上幸造: コンクリート内部空隙中の液体の表面張力が圧縮疲労強度に及ぼす影響, コンクリート工学論文集, 17-1, pp.19-30, 2006.1.
  - 29) Assimacopoulos, B.M., Warner, R.F. and Ekberg, Jr., C.E., High speed fatigue tests on small specimens of plain concrete, PCI Journal, pp.53-70, Sep. 1959.
  - 30) 松下博通, 徳光善治: 生存確率を考慮したコンクリートの圧縮疲労強度に関する研究, 土木学会論文集, 284 号, pp.127-138, 1979.4.
  - 31) 河野広隆, 高橋弘人, 森濱和正: 水中不分離性コンクリートの疲労特性, 土木技術資料, 36-2, pp.54-58, 1994.2.
  - 32) 松井繁之: 道路橋コンクリート系床版の疲労と設計法に関する研究, 大阪大学博士論文, 1984.11.
  - 33) 国土技術政策総合研究所: 道路橋床版の疲労耐久性に関する試験, 国総研資料 No.28, 2002.3.
  - 34) (財)災害科学研究所: 各種の輪荷重走行試験装置下での床版疲労耐久性と S-N 疲労曲線の統一化についての総合評価 (28 社共同研究で委託), 2006.3.
  - 35) Do, M., Chaallal, O. and Aitcin, P., Fatigue behavior of high-performance concrete, J. of Materials in Civil Engineering, 5-1, pp.96-111, Feb. 1993.
  - 36) 藤本将行, 佐藤靖彦, 角田典史雄: 水中におけるコンクリートの圧縮疲労性状に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, 22-3, pp.205-210, 2000.
  - 37) 松井繁之, 西川和廣, 大田孝二: RC 床版とその損傷 (その 2), 橋梁と基礎, pp.47-50, 1998.6.
  - 38) 田中良樹, 藤田学, 河野広隆, 渡辺博志: 高強度コンクリートの塩分浸透抵抗性, コンクリート工学年次論文集, 23-2, pp.517-522, 2001.7.
  - 39) 土木研究所, PC 建設業協会: ミニマムメンテナンス PC 橋の開発に関する共同研究報告書(II)—コンクリート道路橋の必要かぶりに関する検討—, 共同研究報告書 258 号, 2000.12.
  - 40) 道路橋マネジメントの手引き, (財)海洋架橋・橋梁調査会, 2004.8.
  - 41) 田中良樹, 村越潤: 簡易排水装置を用いた桁端部の腐食環境改善, 第 27 回日本道路会議, 2007.11.

# RESEARCH ON INFLUENCE OF DEICING SALT ON DURABILITY OF CONCRETE STRUCTURES

## **Abstract :**

In Japan, most of deterioration of reinforced concrete decks on highway bridges has been caused by fatigue due to cyclic loading of heavy vehicles. However, since spike tires were prohibited in 1990s, salt use for deicing road surface has been increasing. Attention should be paid to not only fatigue, but also chloride-induced deterioration on the concrete decks. Some cases of the deterioration due to deicing salt were already reported so far. In this research, investigations using old removed bridges or bridge decks, and various laboratory tests including a truck wheel loading test using a real-size reinforced concrete deck containing an artificial deficiency, were conducted. From the results, several findings regarding fatigue mechanism of concrete decks were obtained. In addition, influence of water ingress and spalling of upper cover concrete on the mechanism, water paths from road surface to concrete decks covered by ordinary asphalt pavement, interactive deterioration due to fatigue and chloride-induced corrosion, and issues from the viewpoints for maintenance of concrete decks of highway bridges were discussed.

**Key words** : reinforced concrete decks, fatigue, chloride-induced deterioration, interactive deterioration, asphalt pavement, coefficient of water permeability