

報告 膨張コンクリートによる鋼道路橋RC床版ひび割れ対策工の33年間追跡調査

豊福 俊泰*1・内野 雅彦*2・松井 秀誠*3・篠原 知則*4

要旨：鋼道路橋の鉄筋コンクリート（RC）床版は、1965（昭和40）年代初めから、大型車通行の増大に伴い、ひび割れ劣化が生じ、部分的に抜け落ちる事例が各所で頻発し、道路管理上の重要課題となった。そこで、長崎自動車道黒石浜橋（鋼単純合成桁橋）および多良見橋（鋼4径間連続非合成桁橋）において、鋼道路橋RC床版のひび割れ劣化対策として膨張コンクリートを、我が国で初めて実橋に適用し、その効果を追跡調査した。本報告は、黒石浜橋33年経過後、多良見橋31年経過後の追跡調査結果から、鋼道路橋RC床版のひび割れ発生・劣化のメカニズムとともに膨張コンクリートの有効性を検証したものである。

キーワード：鋼道路橋、RC床版、膨張コンクリート、ひび割れ密度

1. はじめに

道路橋の鉄筋コンクリート（RC）床版は、1965（昭和40）年代初めから、経済発展による大型車（過大重量車）通行の増大に伴い、ひび割れ劣化が生じ、部分的に抜け落ちる事例が各所で頻発し、道路管理上の重要課題となったため、諸機関において種々の研究が進められたりなど。高速自動車国道においても、名神や東名高速道路などの鋼橋RC床版の劣化問題が注目され、課題²⁾などとなっていた。そこで、昭和51（1976）年度から日本道路公団試験所コンクリート試験室（当時）では、大型疲労試験機による疲労試験と実橋の荷重応答調査の両面から、鋼道路橋RC床版のひび割れ発生・劣化のメカニズムを解明するとともにその対策工を開発する研究を推進し報告³⁾などした。この成果から、長崎自動車道黒石浜橋（鋼単純合成桁橋、膨張コンクリートRC床版）、雀倉橋（鋼単純合成桁橋、普通コンクリートRC床版）および多良見橋（鋼4径間連続非合成桁橋、膨張・普通コンクリートRC床版）において、鋼道路橋RC床版のひび割れ劣化対策として有効と考えられた膨張コンクリートを、我が国で

初めて実橋に適用し、その効果を16年経過後まで追跡調査によって検証した^{3)~6)}。さらに、コンクリートの打込み直後からの水分逸散、温度変化などに起因する初期ひび割れを解明する研究を継続した⁷⁾など。

以上のことから、本論文は、これらのまとめとして、黒石浜橋33年経過後、多良見橋31年経過後の追跡調査結果から、鋼道路橋RC床版のひび割れ発生・劣化のメカニズムとともに膨張コンクリートの有効性を検証したものである。

2. 調査橋梁の概要

合成桁である黒石浜橋（諫早IC下りランプ、膨張コンクリート床版）およびこれと対比した雀倉橋（同IC上りランプ、普通コンクリート床版）の概要は、図-1および表-1に示すとおりであり、打設したコンクリートの品質を表-2に示す^{3)~5)}。ひび割れの測定箇所は、支点部の中桁間〔1〕と〔5〕：走行車線部、支間中央部の中桁間〔3〕と〔7〕：走行車線部、耳桁間〔4〕と〔8〕：追越車線部とした。また、非合成桁である多良見橋（膨張・普通コンクリート

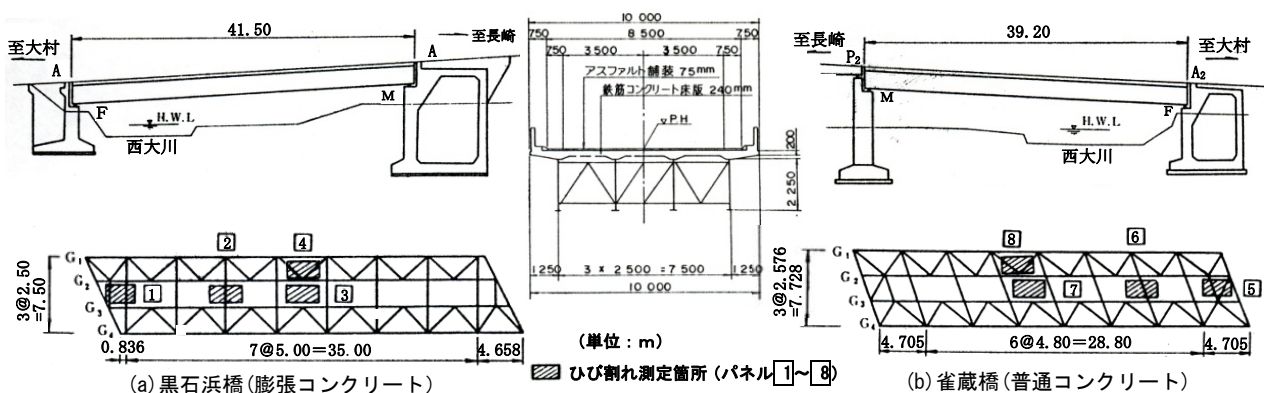


図-1 鋼単純合成桁橋（黒石浜橋、雀倉橋）の調査概要⁵⁾

*1 九州産業大学 名誉教授（元日本道路公団福岡建設局長崎工事事務所諫早工事長） 工博（名誉会員）

*2 西日本高速道路株式会社本社保全改築課 課長（前同社九州支社熊本高速道路事務所 所長）

*3 西日本高速道路（株）関西支社姫路高速道路事務所 副所長（前同社九州支社長崎高速道路事務所統括課 課長）

*4 西日本高速道路エンジニアリング九州（株）大宰府点検事務所（前西日本高速道路（株）九州支社長崎高速道路事務所統括課）

表-1 調査橋梁の諸元⁵⁾

橋梁形式	橋名	上下線の区分	床版コンクリートの種類 (コンクリート)	橋長 (m)	斜角 (°)	幅員 (m)	主桁			床版					
							本数 (本)	間隔 (m)	高さ (m)	厚さ (cm)	主鉄筋 (mm)	配力鉄筋 (mm)	コンクリートの種別の 契約記号	コンクリートの設計基準強度 (N/mm ²)	コンクリートの打設日 (年月日)
鋼単純合成桁	黒石浜橋	下りランプ	膨張	41.5	63	8.5	4	2.50	2.25	24.0	D19, 125ctc (かぶり40)	D16, 125ctc (かぶり40)	A ₁₋₃	29.4	昭55.10.31
	雀倉橋	上りランプ	普通	38.95	70	8.5	4	2.576	2.20	23.0	D19, 125ctc (かぶり40)	D16, 125ctc (かぶり40)	A ₁₋₁	29.4	昭55.10.17
鋼4径間連続非合成桁	多良見橋	下り(ブロック)◀▶	膨張	149.15	0	9.25	5	2.00	2.00	21.0	D19, 125ctc (かぶり40)	D16, 125ctc (かぶり40)	B ₀₋₃	23.5	昭57.6.25
		下り(ブロック)◀▶	普通	149.15	0	9.25	5	2.00	2.00	21.0	D19, 125ctc (かぶり40)	D16, 125ctc (かぶり40)	B ₀₋₁	23.5	昭57.6.25
		上り(ブロック)◀▶	普通	149.15	0	9.25	5	2.00	2.00	21.0	D19, 125ctc (かぶり40)	D16, 125ctc (かぶり40)	B ₀₋₁	23.5	昭57.4.28

表-2 コンクリートの示方配合と打設したコンクリートの性質⁵⁾

橋名	上下線の区分	床版コンクリートの種類 (コンクリート)	コンクリートの種別の契約記号	示 方 配 合											打設したコンクリート			
				粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	水結合材比 W C+E (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)						スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (℃)	圧縮強度(材齢28日) (N/mm ²)
									水 W	セメント C	膨張材 E	細骨材 S	粗骨材 G	AE減水剤				
黒石浜橋	下りランプ	膨張	A ₁₋₃	25	8±2.5	4.0±1.0	41.2	40.0	160	345	35	699	1069	0.95	8.5	4.4	21	43.7
雀倉橋	上りランプ	普通	A ₁₋₁	25	8±2.5	4.0±1.0	41.2	40.0	160	380	0	699	1069	0.95	8.0	4.1	28	37.7
多良見橋	下り(ブロック)⬇	膨張	B ₀₋₃	25	8±2.5	4.0±1.0	50.3	42.5	161	285	35	760	1051	0.80	8.5	4.5	30	32.5
	下り(ブロック)⬇	普通	B ₀₋₁	25	8±2.5	4.0±1.0	50.3	42.5	161	320	0	760	1051	0.80	9.0	4.0	32	32.9
	上り(ブロック)⬆	普通	B ₀₋₁	25	8±2.5	4.0±1.0	50.3	42.5	161	320	0	760	1051	0.80	8.5	3.9	25	33.0

ト床版)の概要は、図-2に示すとおりであり(表-1、表-2参照)、橋梁形式が左右対称のため、膨張コンクリート床版を下り車線の側径間部に採用して普通コンクリート床版部と対比するものとし、さらに、これらの床版コンクリートの性能を地上部で観測するための供試体として、ダミーのコンクリート版をA₁部横に設置した。

コンクリートの品質としては、ひび割れ、床版内部湿度・温度の測定を実施した。ひび割れの測定箇所は、支間中央部で対傾構による拘束がある箇所のA-A断面、A'-A'断面およびA''-A''断面(10と20:下り追越車線部、11と21:下り走行車線部、9:上り走行車線部)ならびに中間支点部C-C断面(15:下り走行車線部)とした。床版内部の温度湿度の測定は、膨張コンクリート部(A-A近傍断面)、普通コンクリート部(A'-A'近傍断面)およびダミーのコンクリート版の3箇所で行った。測定箇所には、所定の位置(図-2(c)参照)ごとにφ9mmの穴をあけゴム栓で封じており、測定時にこれらの穴に棒状タイプ温湿度計を挿入して約20分間ゴム粘土で密封後、測定値を読み取った^{4),5)}。

ひび割れの測定データは、ハンチ部とこれを除く桁間の中央部とに区分し、ひび割れ長さおよび格子密度法によりひび割れ密度を算定した²⁾。ひび割れ幅(mm)は、0.05未満、0.05~0.15、0.15~0.25、0.25以上で区分した。

3. 測定結果および考察

3.1 鋼桁の拘束条件とひび割れとの関係

合成桁(黒石浜橋、雀倉橋)・非合成桁(多良見橋)の

部位ごとのひび割れ発生状況は、図-3・図-4に示すように、以下の傾向が認められる。

普通コンクリート床版の場合、合成桁(雀倉橋)は、非合成桁(多良見橋P₁~A₂)に比較して約1.5~2倍程度ひび割れ密度が大きくなっており、ずれ止めとして前者はスタッド、後者はスラブアンカーを採用しており、床版に対する主桁の拘束度の差のためと考えられる⁵⁾。主桁の拘束・死活荷重による応力等の影響は中央部に現れており、非合成桁(多良見橋P₁~A₂)の場合、中間支点部15では、支間中央部21に比べ8.86/5.95≒1.5倍程度ひび割れ密度が大きくなっており、P₂橋脚上で橋軸直角方向の拘束が大きいためと、4径間の中間支点上の床版に主桁作用による引張応力が橋軸方向に大きく作用するためと考えられる。合成桁(雀倉橋)の場合は、A₁~A₂の支間中央部7では、支点部5に比べ12.16/8.28≒1.5倍程度ひび割れ密度が大きくなっており、支点部に比べ曲げモーメントやたわみが大きいためと考えられる。また、走行車線部21のひび割れ密度は、追越車線部20に比べ5.95/4.89≒1.2倍程度が大きくなっており、繰返し荷重による影響が現れているものと考えられる。

一方、膨張コンクリート床版の場合(黒石浜橋、多良見橋A₁~P₁)、ひび割れが普通コンクリート床版に比べ極めて少なく^{3)~5)}、主に橋軸直角方向に発生しており、床版に対する主桁の拘束度のためと考えられ、繰返し荷重による影響が認められない。

3.2 材齢とひび割れ密度との関係

合成桁(黒石浜橋、雀倉橋)、非合成桁(多良見橋)

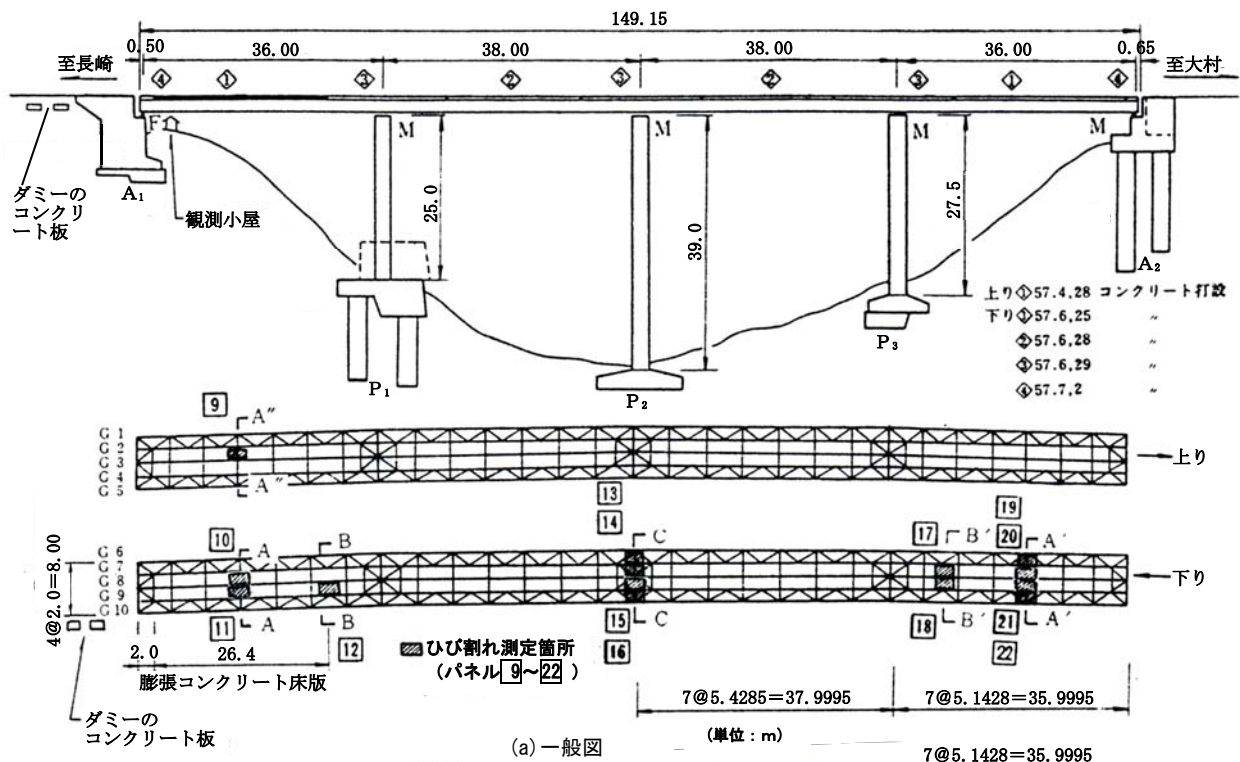


図-2 鋼 4 径間連続非合成桁橋 (多良見橋, 普通コンクリート床版および膨張コンクリート床版) の調査概要⁵⁾

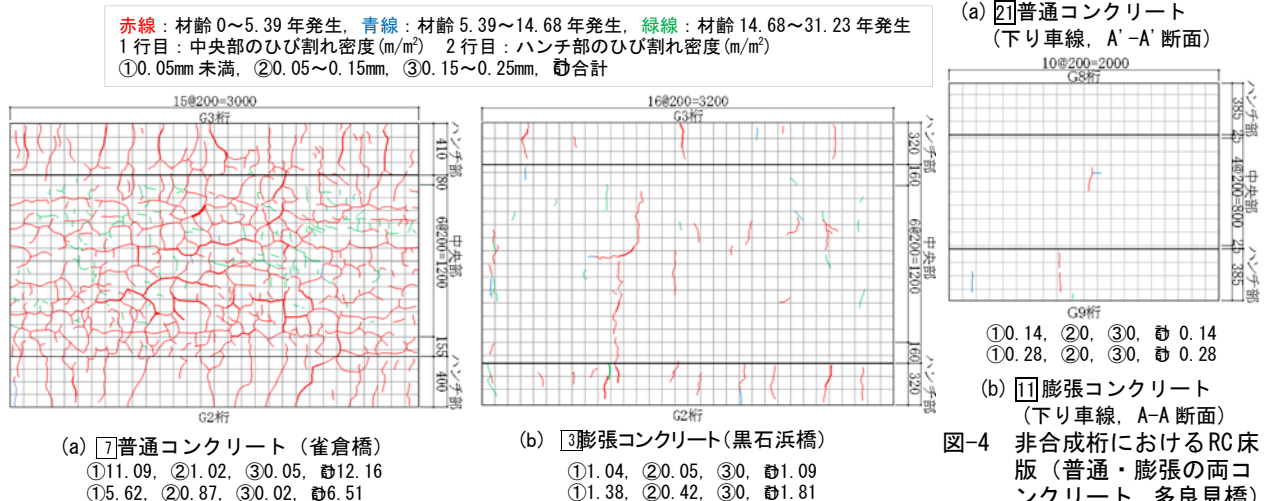


図-3 合成桁における RC 床版 (普通・膨張の両コンクリート) のひび割れ

図-4 非合成桁における RC 床版 (普通・膨張の両コンクリート, 多良見橋) のひび割れ

のひび割れ密度の経時変化は、図-5 と図-6 から、普通コンクリート床版の場合、供用開始し輪荷重が作用する前の材齢初期に多く発生しており、材齢の経過とともにひび割れ延長が増加しひび割れ幅が増大する傾向が認めら

れる。一方、膨張コンクリート床版の場合、約 1.0N/mm² のケミカルプレストレスが導入されている⁵⁾ため、材齢 1 年半頃より徐々に発生するがその量は極めて少なく、ほとんどが 0.05mm 未満の微細ひび割れであり、進行速

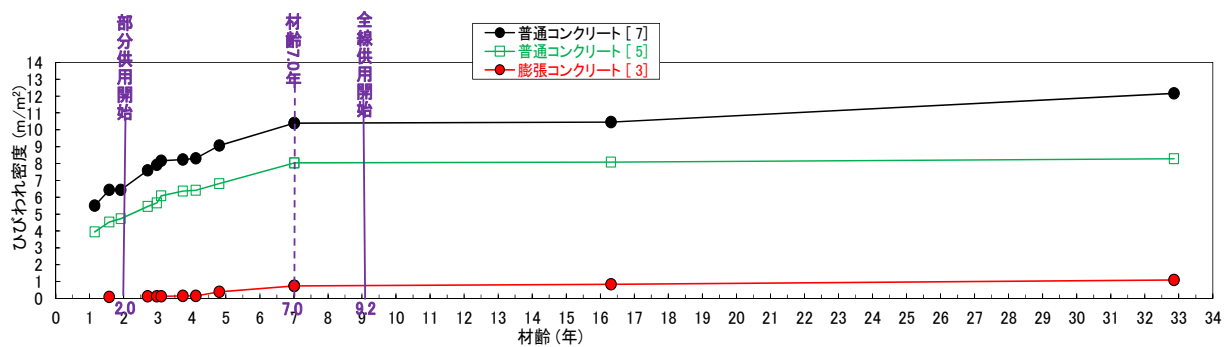


図-5 合成桁RC床版(中央部)の材齢とひび割れ密度との関係

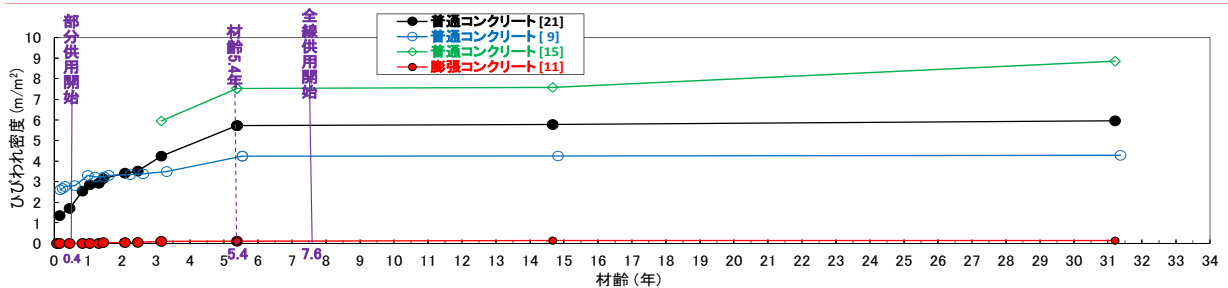


図-6 非合成桁RC床版(中央部)の材齢とひび割れ密度との関係

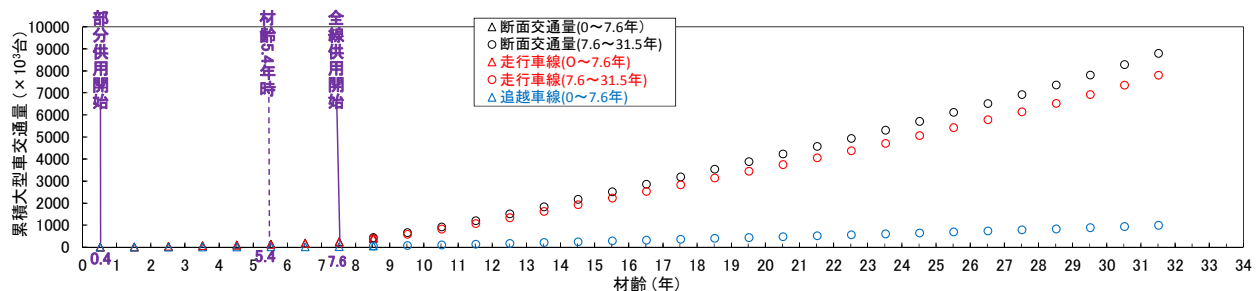


図-7 材齢と累積大型車交通量(多良見橋)

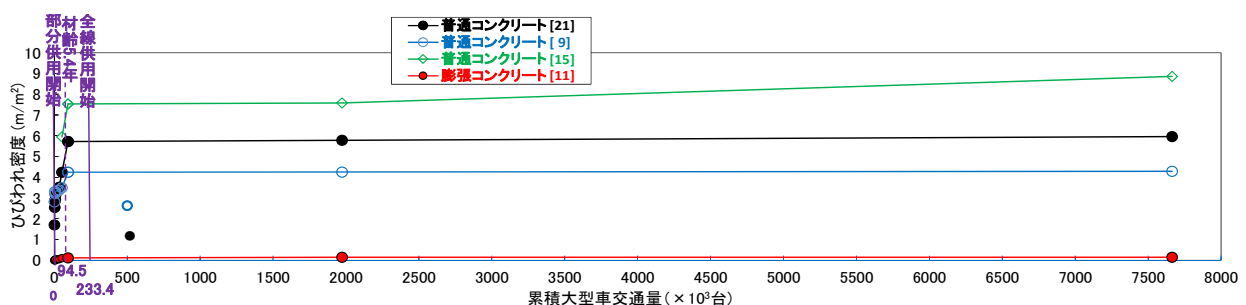


図-8 累積大型車交通量とひび割れ密度(多良見橋)

度も小さい。また、普通コンクリート床版は、合成桁RC床版の場合：材齢約7.0年、非合成桁RC床版の場合：材齢約5.4年に変曲点が認められ、いずれもこれ以前はひび割れが累乗式的に進行しているが、これ以後はひび割れの進行が直線式的に変化している。このひび割れの進行は、乾燥収縮や大型車交通量¹⁾などとの関係があると考えられ、合成桁RC床版の場合、支間中央部[7]が約10m/m²であるのに比べ、支点部[5]が約8m/m²と小さくなっている。また、非合成桁RC床版の場合、同様に変曲点が認められ、P₂橋脚上でひび割れ密度が大きい下り車線の中間支点部[15]が約7.5m/m²であるのに対し、同車線の支間中央部[21]が約6m/m²であり、これに比べ上り車線の支間中央部[9]が約4m/m²と小さくなっている。

一方、膨張コンクリート床版[11]は、ひび割れの進行が普通コンクリート床版に比べると殆ど認められない。

3.3 累積大型車交通量とひび割れ密度との関係

多良見橋の膨張コンクリート床版は、1982(昭和57)年6月25日に打設された。その後、全工事完成し供用開始により交通荷重が作用するところとなったが、諫早～長崎多良見IC間の年平均日交通量は、大村～長崎多良見IC間が供用開始(1982年11月17日、材齢145日・0.40年)した1982年時は4,104台/日であった。接続する大村～鳥栖IC間完成により長崎自動車道が全線供用開始(1990年1月26日、材齢7.6年)したのに伴い交通量が急増しており、材齢9年に相当する1991(平成3)年時に10,766台/日、材齢15年に相当する1997(平成9)年

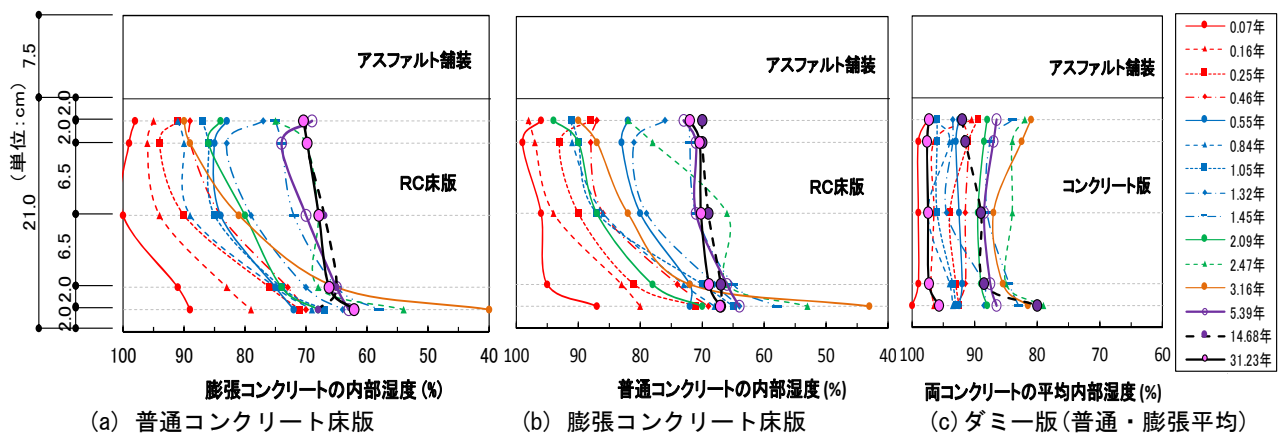


図-10 コンクリートの内部湿度(多良見橋:地上高さ30m, ダミー版:地上高さ30cm)

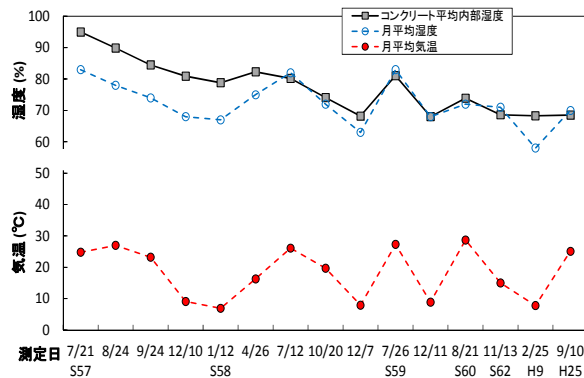


図-9 測定日の気温、湿度、コンクリート(測定位置①, ②, ③, ④, ⑤)の平均内部湿度(多良見橋)

時に15,168台、材齢30年に相当する2012(平成24)年時に24,080台/日(対前年比1.03、年平均大型車交通量2,607台/日、大型車混入率10.83%)と、年増加率4.5~12.5%で推移している(図-7参照)。なお、車線別交通量は、2013年平均のトラフィックカウンターによる計測結果から、下りの大型車交通量のうち走行車線89.1%、追越車線10.9%となっており、この値を通年値とした。

RC床版のひび割れには大型車の通行量が影響することから、諫早~長崎多良見IC間の累積大型車交通量とひび割れ密度との関係を求めると、図-8に示すように、全体的に累積大型車交通量が増加するとともにひび割れ密度が増加しているが、約8.9万台を変曲点として勾配が緩くなる傾向が認められる。この変曲点は、材齢5年に相当する交通量であり、この前後で区分して累積大型車交通量とひび割れ密度との関係を求めると、図-6と同様に、いずれもこれ以前はひび割れが累乗式関係で進行しているが、これ以後はひび割れの進行が直線式関係に変化しており、強い相関が認められる。

最終調査を行った31.23年(11,400日)経過後までの累積大型車交通量は、5,365,592≒537万台であるが、輪荷重走行試験機による疲労試験結果¹⁾で「最終のひび割れ密度がほぼ10m/m²になること」と同様とみなされる。

3.4 床版の乾燥収縮(内部湿度)とひび割れ密度との

関係

(1) 外気の湿度とコンクリートの平均内部湿度

コンクリートの内部湿度の長期変動を基に、架設箇所の環境条件(気象庁データの湿度・気温:長崎)と実橋床版の膨張、普通の両コンクリート(測定位置①~⑤)の平均内部湿度の推移を図-9に示す。材齢当初(26日:1982年7月~201日:1983年1月)は平均内部湿度が、外気の湿度より高く湿潤となっているが、乾燥の進行に伴い、1年経過後(382日:1983年7月)に両者の差が無くなっている。なお、長崎の1981年から2010年までの年平均の気温17.2℃、湿度70%である⁸⁾。

(2) 床版内部の湿度分布

乾燥の進行に伴う床版内部の湿度分布の変化⁵⁾は、図-10に示すとおりである。実橋床版の場合、材齢の経過に伴い、橋梁下を通過する吹きさらしの風によって床版下面から乾燥するため、内部湿度の分布は左に凸の曲線となって内部湿度の勾配が大きく生じている⁷⁾。このため、上に凸となるように変形しようとするのに対し鋼桁の拘束・自重があることから、床版下面に引張応力が上面に圧縮応力が作用することとなっており、さらに、中央部は圧縮、上下面側は引張となるように内部応力が生じているとみなされる^{5) 6)}。しかし、材齢30年を経過した今回の調査結果からは、床版の乾燥が終了して全体的に内部湿度が均一化しており、長崎の年平均湿度とほぼ同一の69%となっている。

一方、ダミー版の場合、地上に置いた枕木の上(高さ約20cm)に設置しているため、吹きさらしの風による乾燥がほとんどなしであり、逆に地上からの植物や降雨の蒸発水の影響を受けて、舗装面にコケ類が繁茂している。このため、内部湿度は、5年目以降逆に増加しており、全体的に内部湿度の勾配が小さく、上に凸となるように変形しようとする現象も生じていないとみなされる。

(3) 床版内部の湿度とひび割れ密度の関係

床版下面からの乾燥がひび割れ発生の原因となると仮定し、図-10から、床版コンクリートの乾燥率(%)=

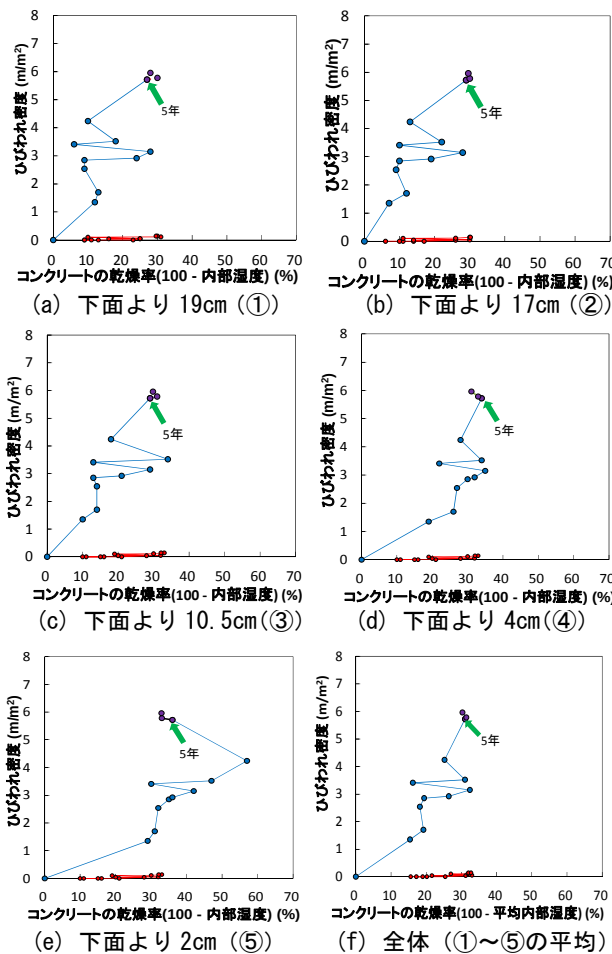


図-11 RC床版の乾燥率とひび割れ密度（多良見橋）

(100-内部湿度)として、内部湿度の測定位置(①, ②, ③, ④, ⑤)ごとにひび割れ密度との関係を求めると、図-11に示すように、コンクリートの打込み直後の湿潤でひび割れなしの時を起点として、全体的に乾燥(内部湿度の低下)に伴いひび割れ密度が増加する関係が認められる。ここで、図-10から、乾燥が最も遅くなる床版内中央部の平均的な湿度分布である下面から17cm(②)および下面から10.5cm(③)の箇所の平均湿度は、材齢の経過とともに図-12に示すとおりに変化するが、一方、図-9から、架設箇所の環境条件(年平均湿度70%)の変化は、図-12に合わせて示すとおりである。これから、床版内中央部の平均湿度は、材齢の経過とともに低下(乾燥)し、材齢約5年目に架設箇所の環境条件(月平均湿度)と同一になっており、乾燥収縮が終了したものとなされる。図-11で、内部湿度とひび割れ密度との関係を材齢5年に着目して見てみると、普通コンクリート床版のひび割れ密度は、材齢5年までは乾燥率の増加に伴い増加する関係が認められるが、それ以後はいずれも変化が小さくなっている。以上から、RC床版のひび割れは、コンクリート品質に応じた材齢初期からの乾燥収縮と温度変化によるRC床版の変形を鋼桁が拘束すること

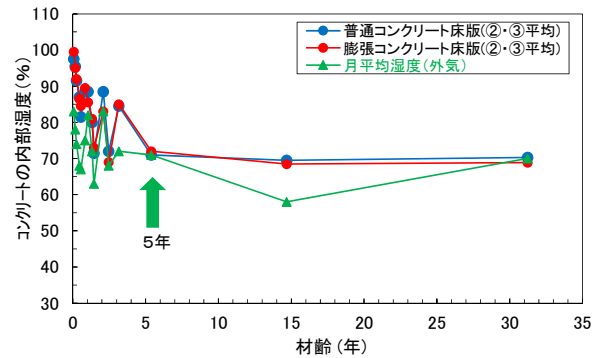


図-12 材齢とコンクリートの平均内部湿度（多良見橋）

によって発生するひび割れが、乾燥収縮が終了する材齢までは、輪荷重によるひび割れよりも卓越して進行し、その後輪荷重によるひび割れが進行することが判明した。

4. まとめ

膨張コンクリートによる鋼道路橋 RC 床版のひび割れ対策工追跡調査結果をまとめると、次のとおりである。

- 1) 鋼道路橋 RC 床版のひび割れは、材齢初期からコンクリートの乾燥収縮と温度変化による変形に対する鋼桁の拘束条件に応じて発生し、その後輪荷重(大型車通行)が作用して進行・劣化することが、実証された。
- 2) 建設時に材料費アップであっても、膨張コンクリートを採用する工法は、ひび割れ劣化対策として有効な高耐久性の RC 床版が確保されることが、実証された。

参考文献

- 1) 松井繁之：道路橋床版 設計・施工と維持管理，森北出版株式会社，pp.1-4，pp.57，pp.233-234，2007.10
- 2) 日本道路公団：維持修繕要領（橋梁床版編），1978.7
- 3) 武田昭彦・中村修吾・豊福俊泰：膨張コンクリートによる鋼橋床版のひびわれ対策—長崎自動車道・黒石浜橋（諫早 IC 第四橋）の追跡調査—，コンクリート工学，Vol.21，No.3，pp.31-39，1983.3
- 4) 豊福俊泰・西田巖・鶴窪広洋：鋼道路橋 RC 床版のひびわれと膨張コンクリートによる対策工—長崎自動車道・多良見橋の追跡調査—，コンクリート工学，Vol.24，No.2，pp.18-29，1986.2
- 5) 豊福俊泰・西田巖・藤田栄三・寺井幸吉：鋼道路橋 RC 床版のひびわれと膨張コンクリートによるその改善に関する研究，コンクリート工学，Vol.27，No.9，pp.91-106，1989.9
- 6) 豊福俊泰・中村修吾・神保和己・城国省二：温度応力に起因する鋼道路橋コンクリート床版の初期ひび割れ，第7回コンクリート工学年次講演会論文集，pp.13-16，1985.6
- 7) 豊福俊泰・潮先正博：コンクリート構造物の初期ひび割れの発生予測とこれに対応した膜養生剤の開発，コンクリート工学，Vol.44，No.4，pp.33-42，2006.4
- 8) 国立天文台編：理科年表 平成25年，丸善出版株式会社，2012.11