

報告

高速道路における橋梁RC床版の水による疲労・劣化の原因 とその非破壊検査法に関する研究

豊福俊泰*, 藤岡靖**, 緒方辰男***

*工博, 西日本高速道路エンジニアリング九州株式会社技術顧問 (〒810-0073 福岡市中央区舞鶴 1-2-22)

**博(工), 西日本高速道路エンジニアリング九州株式会社営業本部営業部担当部長

(〒810-0073 福岡市中央区舞鶴 1-2-22)

*** 株式会社高速道路総合技術研究所道路研究部橋梁研究担当部長 (〒194-8508 東京都町田市忠生 1-4-1)

昭和50年頃から東名高速道路などで水による疲労・劣化問題が多発化し、この対策として鋼橋RC床版への膨張コンクリート、防水工、PC床版の採用などの対策が図られてきたが、施工時の床版コンクリートの品質との関係は不明であり、この点検・診断技術は未だに確立されていない。そこで本報告は、40余年に亘る研究成果から、水による疲労・劣化の原因が、乾燥し易い気象条件下でコンクリートを打込み単位水量が多い箇所を発生させた場合であること、点検・診断法としてダブルチャンバー式加圧透水・透気試験機(WAPP)法が極めて有効であること等を、解明したものである。
キーワード: 水, 疲労・劣化, 非破壊検査法, 加圧透水試験, 表層透水係数

1. まえがき

昭和50年頃から東名高速道路などで橋梁RC床版などの劣化問題が多発し、これを解決するため昭和51年度から旧日本道路公団試験所では、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、鋼橋RC床版の疲労・劣化の原因とその対策工に関する研究を行い、「ひび割れ侵入の水により疲労・劣化すること」を解明した^{1)~3)}。この研究成果から、鋼橋RC床版への膨張コンクリート⁴⁾、防水工、PC床版の採用などが漸次効果的に図られ、耐久性を考慮したコンクリートの強度向上と低透水性化の研究⁵⁾、基準化^{6),7)}等が進められた。

一方、施工時の床版コンクリートの品質との関係の解明とともに、この点検・診断技術を開発する研究の推進が重要課題であった。そこで、九州産業大学においてこの課題を解決する研究^{8)~12)}が継続して実施され、水密性の評価法としてダブルチャンバー式加圧透水・透気試験機(WAPP)法が開発されるに至り、ここに、鋼橋RC床版の水による疲労・劣化の原因とその有効な非破壊検査法であることの研究成果を報告するものである^{8)~16)}。

2. 鋼橋RC床版の水による疲労・劣化の原因

2.1 乾燥による初期ひび割れの発生現象

鋼橋RC床版上面の水による疲労・劣化(砂利化現象)状況は、劣化箇所が不規則に点在しているのが通常であ



写真-1 鋼橋RC床版上面の水による疲労・劣化状況(雄の山橋, 劣化箇所が、点在している)

る(写真-1)が、この原因究明が進められた。

鋼橋RC床版施工時の代表例として、白滝川橋(大分自動車道の4径間連続トラス橋、図-1)におけるひび割れ発生状況⁸⁾を示す。床版コンクリートの打設は、昭和61年3月29日~4月7日間(表-1)であるが、3月31日打込みコンクリート(ブロックNo.②, スランプ7.5cm, 空気量4.2%, 28日圧縮強度31.6N/mm², 天候晴れ, 気温8~12°C, 風速平均3.9m/秒, 最大6.3m/秒)に著しく多く発生し、貫通ひび割れとなっていた。5日間の湿潤養生終了日にあたる4月6日は湿度が平均33%, 最小10%の強乾燥日で、気温が最高21.5°C, 最低3.7°Cと日変化が大きく、しかも風速が最大8.4m/秒, 平均4.2m/秒の強風日であったことから、ひび割れが点在し著しく発生した原因は強風, 強乾燥, 温度差大の気象条件にも拘らず、これに対応した

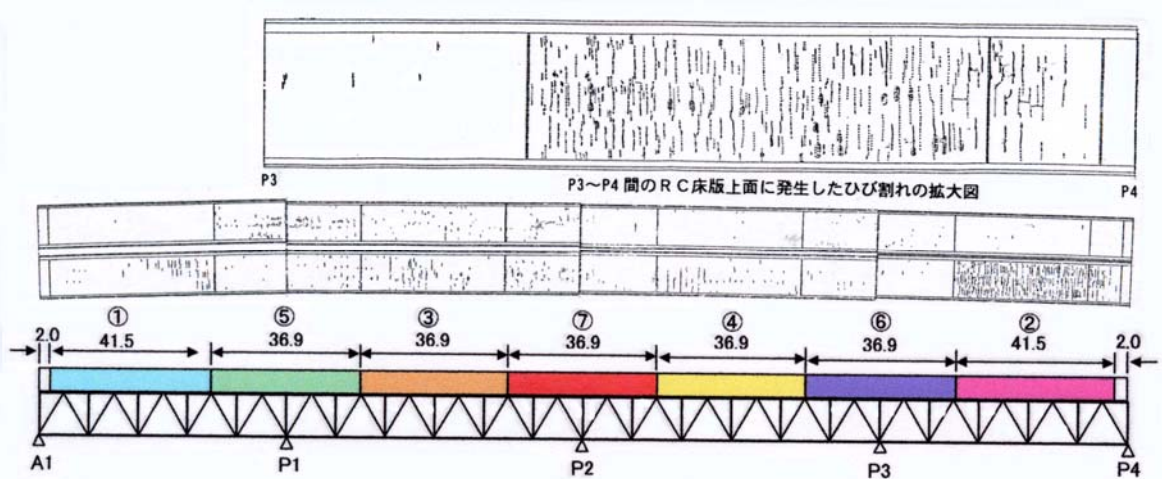


図-1 白滝川橋のコンクリートの打込み順序 (昭和61年打設) と RC 床版の上面に発生したひび割れとの関係⁸⁾

表-1 コンクリート打込み日の気象条件 (大分気象台気象記録)⁸⁾

打込み ブロック No.	月日 (昭和61年)	気温 (°C)			相対湿度 (%)		風速 (m/s)		日最大 風向 (16方位)	降水量 (mm)	日照 時間 (h)
		平均	最高	最低	平均	最小	日平均	日最大			
	3月28日	10.6	12.1	8.6	95	88	1.4	4	NE	15.5	0
①	3月29日	13.4	17.6	10.4	77	55	3.0	5.8	NNW	0	7.7
	3月30日	11.5	16.4	7.9	83	59	1.7	4	NNE	1.5	4.7
②	3月31日	11.7	16.2	6.9	56	30	3.9	6.3	NW	0	11.2
③	4月1日	9.3	15.1	3.1	54	26	2.3	4.9	ENE	0	11.5
④	4月2日	11.1	19.1	2.4	50	24	2.3	4.4	ENE	0	10.9
⑤	4月3日	12.3	17.0	8.6	72	51	2.3	4.9	ESE	0	0
	4月4日	13.2	16.2	10.9	86	77	2.1	4.7	ENE	0.5	0
⑥	4月5日	13.1	18.3	6.7	53	23	3.0	6.1	NNE	0	10.8
	4月6日	13.6	21.5	3.7	33	10	4.2	8.4	W	0	11.8
⑦	4月7日	10.4	15.7	5.2	38	19	3.8	6.7	NNW	0	11.9
	4月8日	11.2	15.0	4.5	54	36	1.9	4.1	N	0	2.7
	4月9日	14.8	17.5	11.8	84	65	2.2	5.4	S	9.5	0

(注) 網掛け部は、最小相対湿度が30%以下、日最大風速が5.0m/s以上の日

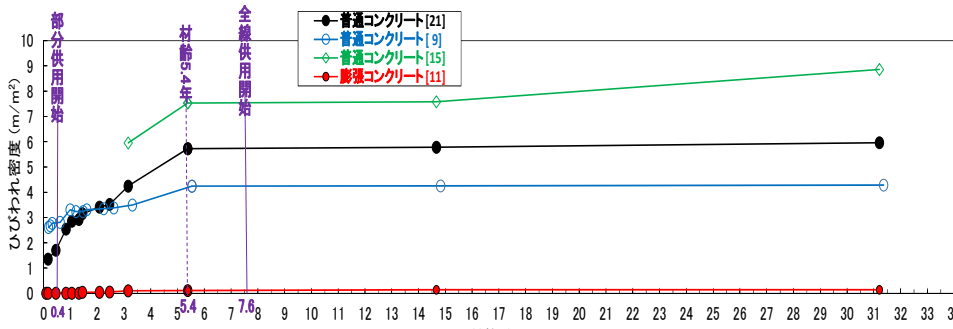


図-2 多良見橋の RC 床版下面 (昭和 57 年打設, 走行車線部, [21] 下り P₃~A₂間中央, [9] 上り A₁~P₁間中央, [15] 下り P₂ 支点, [11] 下り A₁~P₁間中央) の材齢とひび割れ密度との関係⁴⁾

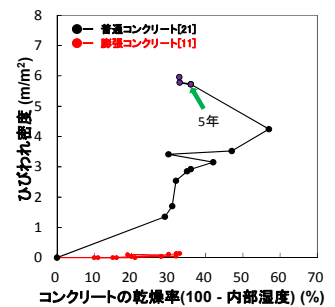


図-3 RC 床版 (普通コンクリート[21]と膨張コンクリート[11]の下面から2cm) の乾燥率とひび割れ密度⁴⁾

施工がされなかったことに起因するものと判断された。

次に、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、長崎自動車道黒石浜橋(鋼単純合成4主桁橋, 膨張コンクリート RC 床版, 昭和55年10月31日打設), 雀倉橋(鋼単純合成4主桁橋, 普通コンクリート RC 床版, 同年月17日打設) および多良見橋(鋼4径間連続非合成5主桁橋, 膨張・普通コンクリート RC 床版, 昭和57年6月25日打設) に初めて適用し, その効果を施工時から33, 31年間に亘って普通コンクリートの場合と比較して追跡調査した^{2), 4)}。

床版下面のひび割れ密度の経時変化(図-2, 図-3)は, 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である施工時期に多くが発生しており, 材齢の経

過とともにひび割れ延長が累乗式的に増加しており, 材齢約5.4年に変曲点が認められ, これ以後はひび割れの進行が直線的に変化している。このひび割れの進行は, 気象・施工条件と主桁の拘束条件とに支配される下面の乾燥との関係の方が, 大型車交通量との関係よりも卓越しており, ひび割れ密度 (m²/m²) の倍率が合成桁(雀倉橋) 1.5~2倍>非合成桁(多良見橋 P₁~A₂), 雀倉橋の支間中央部 1.5倍>支間部, 多良見橋の中間支間部 1.5倍>支間中央部, 走行車線部 1.2倍>追越車線部となっている。一方, 膨張コンクリート床版の場合, ひび割れは材齢1年半頃より微細ひび割れが発生したがその量は極めて少なく, 鋼道路橋 RC 床版のひび割れ劣化対策には, 施工時の初期ひび割れの発生を防止することの重要

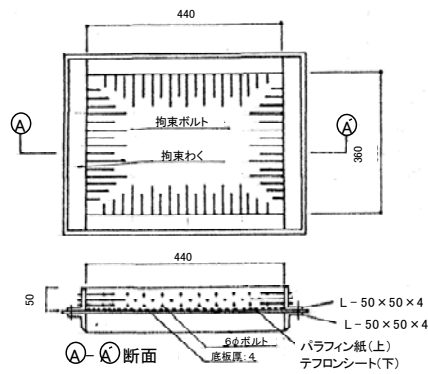


図-4 ひび割れ発生型枠⁸⁾

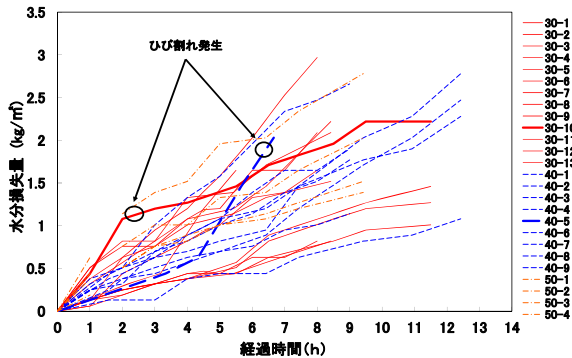


図-5 経過時間と水分損失量 WL との関係⁸⁾

性が確認された。砂利化現象が点在した原因は、コンクリート打設箇所の配合、気象条件、鋼桁の拘束度に応じた乾燥対策なしの箇所が、点在したためと判断される。

2.2 気象条件による初期ひび割れの発生と活荷重・水によるRC床版の疲労・劣化（砂利化）の促進

そこで、気象条件による初期ひび割れの発生試験⁸⁾を、図-4の型枠にコンクリート（細骨材：海砂，粗骨材：最大寸法15mmの碎石，水セメント比：30～50%）を打込み，実施した。供試体に作用する要因は，気象条件として外気の温度，湿度を，風洞装置により風速を変化させ，コンクリート面のひび割れ発生を観察するとともに水分損失量 WL (kg/m²，ASTM C-156の水分損失量試験)を測定した。また，水分損失量 WL と透水量 w (g，JIS A 1404の透水試験) との関係求めた。

水分損失量 WL は，いずれの場合も打込み直後からほぼ直線的に増加しており，矢印で示す経過時間 2.5h，6.3h の時点（図-5，時間あたり水分損失量が 0.6 kg/m²/h を超える急激な水分逸散で水セメント比 40% 以下の場合）で，ひび割れが発生した。これらから，初期ひび割れの発生が予測される気象条件を求めると，図-6 に示す赤色囲みの部分の気象領域であり，低湿度ほど危険側で，高風速・高温になるほど該当範囲が広がる。この図に，気象予報から，コンクリートの打込み予定期間（時間）における湿度，風速，気温をプロットすることにより，初期ひび割れ発生（洗濯日和で水分損失量増大）の危険性を予測することが可能である。また，水分損失量が増加するほど透水量が増加すること（図-7），打込み箇所

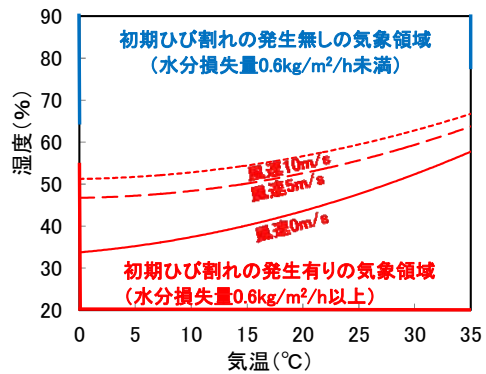


図-6 初期ひび割れ発生（洗濯日和で水分損失量増大）の気象領域⁸⁾に補筆

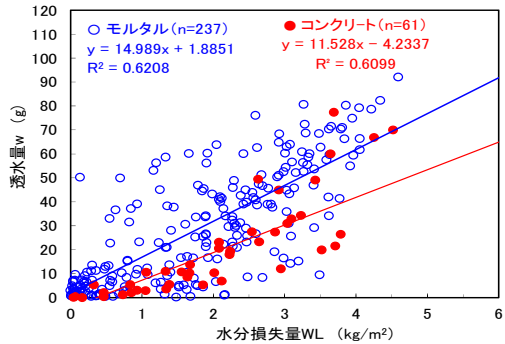


図-7 水分損失量 WL と透水量 w

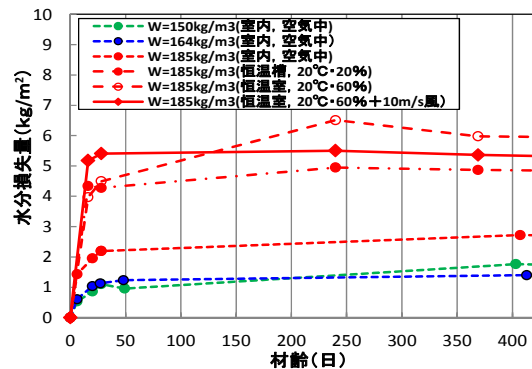


図-8 材齢と水分損失量 WL

の単位水量が多く気象条件が乾燥側にあるほど水分損失量（透水量）が増加すること（図-8）が確認された。

次に，このように初期ひび割れが発生するのみならず，水分損失量（透水量）が増大した RC 床版の活荷重・浸透水による疲労・劣化を再現するすりへり試験を実施した（図-9）．最大摩耗深さ Ab (mm) は， $Ab = \beta \sqrt{E_R}$ 式（ここで， β ：すりへり速度係数，mm/J）との関係から求められ，車両の通行（活荷重）による累積衝突エネルギー E_R (J) = $\sum (N \cdot MV^2/2)$ に相当する鋼球の衝突回数 N (回，通行台数に相当)，質量 M (g，活荷重に相当)，速度 V (km/h) が大きく，コンクリートが低強度（透水量が大）であるほど大きくなる（何れも累乗式関係，図-10）¹²⁾．鋼橋 RC 床版の場合，上面に露出するモルタル部のうち水が浸透しやすい箇所においてこのすりへり現象が促進されるが，内在する粗骨材はこの作用を受けないため，モルタルが粉碎・液状化されることにより砂利化現象が進行することが解明された。

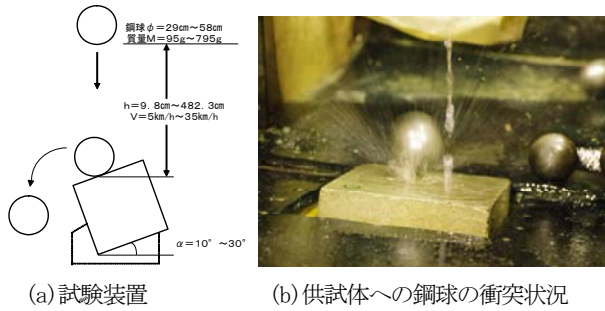


図-9 浸透水による疲労・劣化を再現するすりへり試験¹²⁾

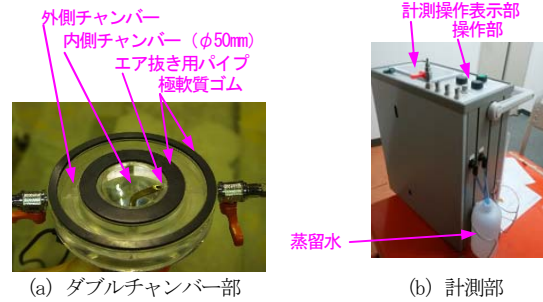


写真-4 ダブルチャンバー式加圧透水・透気試験機 (WAPP) 法の概要¹⁴⁾⁻¹⁶⁾

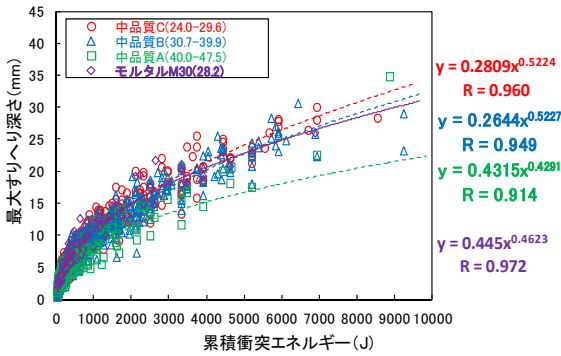


図-10 衝突エネルギーと最大すりへり深さの関係 (中品質: 圧縮強度 24.0-49.9N/mm²)¹²⁾

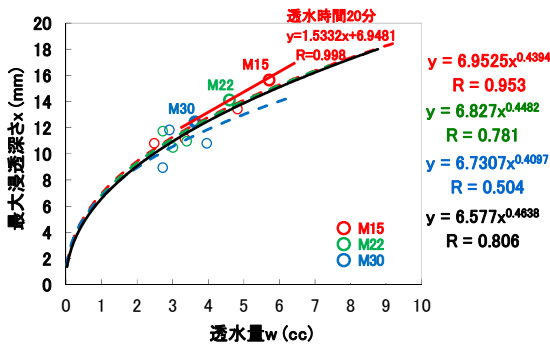


図-11 WAPP 法における透水量 w と最大浸透深さ x との関係 (透水時間 5・10・15・20 分, 透水水圧 55kPa, 普通 15・普通 22・普通 30 のモルタル M15・M22・M30)¹⁶⁾

3. 水による疲労・劣化の非破壊検査法

3.1 WAPP 法の概要

WAPP 法 (写真-4) は、表層透水係数 P 値 ($\times 10^{-10}$ m/s) を式(1)で求める非破壊検査試験機法である⁸⁾⁻¹⁶⁾。

$$P = \frac{G\rho w^2}{2tA^2P_u} \times 10^{-4} \quad (1)$$

ここに、 w : 透水量 (cc, 加圧開始 3 秒後 0 点),
 G : 重力加速度 (m/sec²),
 ρ : 水の単位容積質量 (g/cm³),
 t : 透水時間 (sec, 標準 20 分),
 A : 内側チャンバーの断面積 (cm²),
 P_u : 透水水圧 (kPa, 標準 55kPa)

性能評価は、表-2 の各種コンクリート試験や実橋梁への適用によって確認されており、計測された w , P のデータから表層の透水性が検査される (図-11, 深さ 16mm

表-2 性能確認試験 (データ数 $n=248$)¹⁴⁾⁻¹⁶⁾

区分	コンクリートの種類 (注)	水セメント比 W/C (%) (W/C, kg/m ³)	材齢	供試体の種類 (寸法, 測定面)	暴露条件 (測定面の養生方法)
W 増減	普通30W185	61(185/304)	4週	・柱部材(高さ 60×幅50× 20cmの片側側面) ・床部材(高さ 20×幅60× 50cmの上面・ 下面) ・柱部材・床部材から採取した φ10×20cmの コア	材齢: 4週~2年 ・屋内暴露 (空気中, 屋内暴露) ・屋内暴露 (5日間湿潤養生, 屋内暴露)
	普通30W164	54(164/304)	7週		
	普通30W150	49(150/304)	1年		
W/C 増減	普通15	87(166/192)	2年	・屋外暴露 (空気中, 屋内暴露約3か月後屋外暴露) ・屋内暴露 (5日間湿潤養生, 屋内暴露約3か月後屋外暴露)	
	普通15	86(165/192)	3年		
	普通22	68(165/243)	4年		
	普通30	54(164/304)	5年		
	普通30	52(163/314)	6年		
	普通40	45(172/383)	7年		
	普通45	38(180/474)	8年		
普通45	37(179/484)	9年			
普通60	30(170/567)	9年			

(注)
 ・スランブ: 8±2.5cm, 空気量: 4.5±1.5%, 粗骨材の最大寸法: 25mm, セメント: 普通ポルトランドセメント, 細骨材: 玄界灘産海砂+老岐沖産海砂, 粗骨材: 古賀産砕石, 混和剤: AE減水剤, 高性能AE減水剤 (普通60のみ) を使用し, 単位セメント量C変化のコンクリート
 ・普通30W185・普通30W150: 普通30のW=164kg/m³をW=185kg/m³・150kg/m³ (C=304kg/m³で一定) とし, スランブが変化のコンクリート
 ・普通30W164: 普通30のW=164kg/m³のコンクリート (スランブ: 8±2.5cm)

程度までの空隙や品質, 普通 15・22・30 のモルタル)。

3.2 RC 構造物の水作用による劣化性能の評価結果

水セメント比 W/C と P 値との関係 (図-12) は, W/C 増減に比べ W 増減の場合, $W/C50\sim55\%$ (コンクリート標準示方書⁷⁾の透水係数 K_k (m/s) の式 $\log K_k = 4.3W/C - 12.5$ の $W/C=50\%$, 55% (水密性の規定値) に該当の $K_k=0.45 \times 10^{-10}$, 0.73×10^{-10} m/s) 程度を変曲点として急激に P 値が増加している。これに該当する B_{1-1} (一般の RC 用), B_{0-1} (RC 床版用) コンクリートの場合, 配合・施工条件 (W が大の箇所) と共に乾湿繰返しの環境条件によって, P 値が 5.31×10^{-10} m/s ($W/C 75\%$ に相当) をも超える事例が発生し, 実橋梁床版では経年によっても P 値が増大する事例 (図-13) が発生しており, 透水性大により劣化が進行する現象が定量的に評価されている。

一方, 前述のすりへり試験における P 値の測定結果 (図-14) から, P 値が 0.45×10^{-10} m/s ($W/C=50\%$) 程度を変曲点として急激にすりへり速度係数 β が増加^{9), 10), 16)}する関係が示されており, 施工時に水分損失量を増大させた箇所ほど活荷重・水の作用によって疲労・劣化 (砂利化現象) が促進されることが再現されている。

また, 鋼桁の拘束が大きい合成桁の普通コンクリート

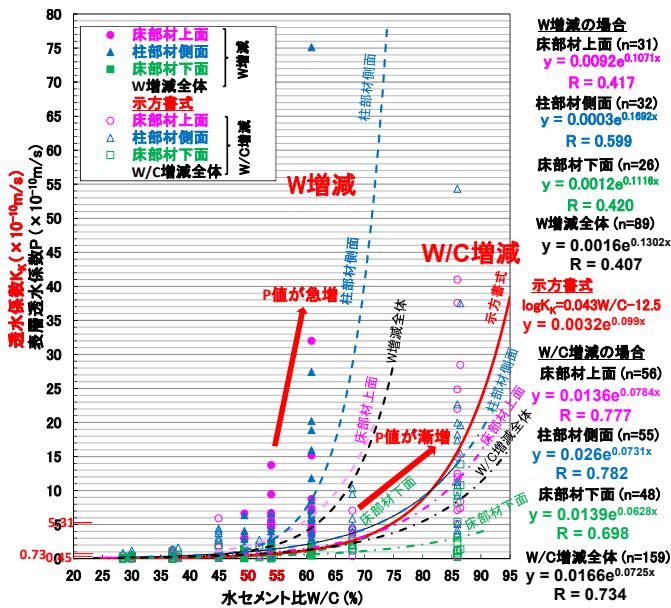


図-12 W/C と P 値との関係 (W 増減と W/C 増減の全部材, 屋内屋外暴露, 材齢 4 週~9 年)¹⁶⁾

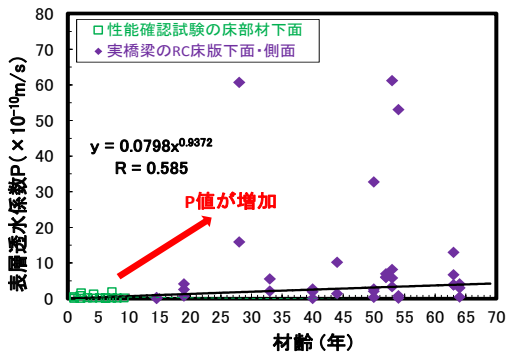


図-13 実橋梁 RC 床版の経年と P 値との関係

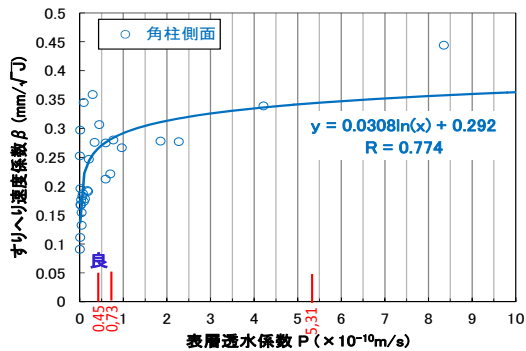


図-14 P 値とすりへり速度係数 beta との関係 (材齢 12 年)¹⁶⁾

RC 床版 (雀倉橋) の場合, 潜在的にひび割れがあるためチャンバー部分が吸着せず P 値の測定数が少ないが, P 値が小さい (膨張コンクリート RC 床版, 黒石浜橋) ほどひび割れ密度も小さくなる傾向が認められる (図-15)^{10), 16)}. 非合成桁の場合 (多良見橋) も同様の傾向であり, P 値の測定によってひび割れの進行度合いも測定可能であることが, 示されている。

3.3 RC 構造物の水作用による劣化性能の評価結果^{15), 16)}

普通コンクリート (W/C=50%, W=167kg/m³) の試験体の場合 (図-16(a)), w=5.22cc, 乾燥収縮ひずみ 800μ で

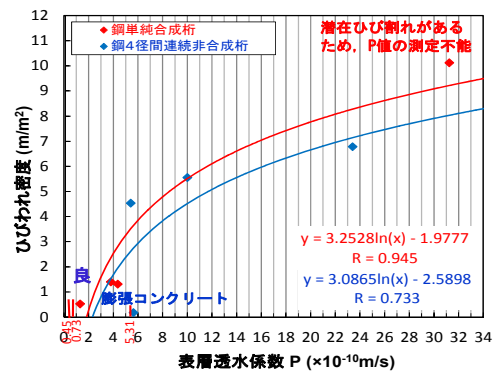
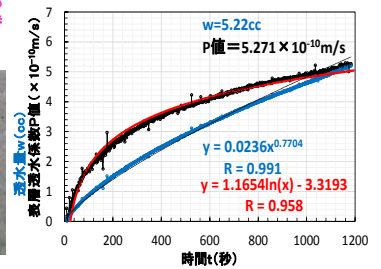
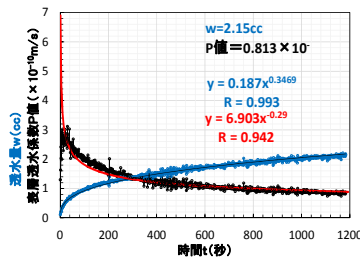


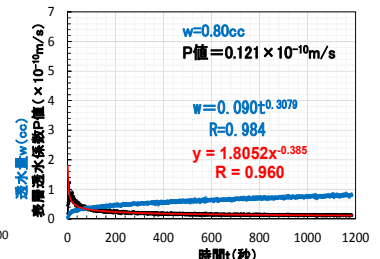
図-15 P 値とひび割れ密度 CR との関係 (材齢: 合成桁 33 年, 非合成桁 31 年)¹⁶⁾



(a) 潜在ひび割れありの高透水性の普通コンクリートの場合 (w=5.22cc, P 値=5.271 × 10⁻¹⁰ m/s, 乾燥収縮ひずみ 800μ)



(b) 一般的な普通コンクリートの場合 (w=2.15cc, P 値=0.813 × 10⁻¹⁰ m/s)



(c) 水密性の低収縮コンクリートの場合 (w=0.80cc, P 値=0.121 × 10⁻¹⁰ m/s)

図-16 w と P 値の測定結果 (材齢 2 年 2 箇月) の代表例¹⁵⁾

潜在ひび割れあり, 図-11 から最大浸透深さ $x \approx 15\text{mm}$, 透水時間 t と透水量 w との関係 (青色曲線) を比較すると, 時間 0 付近の勾配が急で次第に直線的になる (コンクリート表面部の空隙率が大きく, 内部の空隙率がほぼ一定となる) 傾向が認められる. この勾配の変化の違いによって, P 値がコンクリート表面から内部に向かって増加するもの (潜在ひび割れあり, 表面部の P 値はひび割れに水が充填し小さい) と逆に減少するもの (図-16(b), w=2.15cc, $x \approx 10\text{mm}$, ひび割れなし) との違いが認められ, 同一配合であっても施工法により表層部のコンクリート品質の変動発生を測定可能であると判断される。

一方, 低収縮コンクリートの試験体の場合 (図-16(c)), w=0.80cc, $x \approx 6\text{mm}$) となっており, 何れも P 値が表面部より内部になるほど正しく減少している (収縮ひずみが小さく, 潜在ひび割れ無しである)。

WAPP 法は, 測定開始時のダブルチャンバー内のコンクリート表面の状態から, 測定終了時までの透水曲線を観察し, この変化から空隙やひび割れの有無の状態が診

表-3 水密性・耐久性から規定される最大水セメント比 W/C に対応した表層透水係数 P 値の判定^{7),13),15)}

土木学会コンクリート標準示方書で、最大水セメント比が規定されるコンクリートの種類	最大水セメント比 W/C	最大表層透水係数 P 値 ($\times 10^{10}$ m/s) ※	P 値のグレーディングの目安 ($\times 10^{10}$ m/s)
海洋コンクリート（一般の現場施工の場合で、環境区分が海上大気中・飛沫帯および干満帯、工場製品の場合で、環境区分が飛沫帯および干満帯）、化学的侵食抵抗性（凍結防止剤を用いる場合）、耐凍害性（凍結融解試験における相対動弾性係数 90%）	45%以下	0.27 以下	(優良) 0~0.10 (良) 0.10~0.17 (一般) 0.17~0.27 (劣) 0.27~0.45 (低劣) 0.45~
一般的な環境下における耐久性を満足する通常のコンクリート構造物（柱、はり、スラブ）、海洋コンクリート（一般の現場施工の場合で、環境区分が海中、工場製品の場合で、環境区分が海上大気中・海中）、化学的侵食抵抗性（ SO_4 として0.2%以上の硫酸塩を含む土や水に接する場合）、一般の水中コンクリート	50%以下	0.45 以下	(優良) 0~0.17 (良) 0.17~0.27 (一般) 0.27~0.45 (劣) 0.45~0.73 (低劣) 0.73~
一般的な環境下における耐久性を満足する通常のコンクリート構造物（橋脚）、水密性を有するコンクリート、耐凍害性（凍結融解試験における相対動弾性係数 85%）	55%以下	0.73 以下	(優良) 0~0.27 (良) 0.27~0.45 (一般) 0.45~0.73 (劣) 0.73~1.20 (低劣) 1.20~
耐凍害性（凍結融解試験における相対動弾性係数 70%）	60%以下	1.20 以下	(優良) 0~0.45 (良) 0.45~0.73 (一般) 0.73~1.20 (劣) 1.20~1.97 (低劣) 1.97~
耐凍害性（凍結融解試験における相対動弾性係数 60%）	65%以下	1.97 以下	(優良) 0~0.73 (良) 0.73~1.20 (一般) 1.20~1.97 (劣) 1.97~3.24 (低劣) 3.24~

※ 土木学会コンクリート標準示方書⁷⁾の透水係数 K_k (m/s) の規定式 $\log K_k = 4.3W/C - 12.5$ および水密性・耐久性を満足する最大水セメント比 W/C の規定値から計算

断され、P値の大小から、表層コンクリートの水密性（耐久性、表-3）を判定可能であることが確認されている¹³⁾。

4. 結論

橋梁RC床版上面の水による疲労・劣化の最大原因は、乾燥し易い気象条件下（図-6の気象領域）でコンクリートを打込み、単位水量が多い箇所を発生させ、水分損失量が増大する施工を行った場合であり、乾燥による空隙率の増大と初期ひび割れの発生とに起因して、床版表層部への浸透水量が増大するためであることが解明された。

WAPP法は、測定時の透水曲線を観察し、この変化から空隙や潜在ひび割れの有無の状態が診断される。最終的に測定されるP値の大小から、表層コンクリートの水密性・耐久性の診断が可能であることが確認された。

参考文献

- 1) 武田昭彦, 遠藤武平, 藤田信一: 鋼橋 RC 床版の破損機構に関する一考察, 土木学会第 37 回年次学術講演会講演概要集第 5 部, pp.9-10, 1982.10
- 2) 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
- 3) 日本道路公団試験所コンクリート試験室: 道路橋鉄筋コンクリート床版の損傷機構に基づく健全度判定と補修工法の選択, 試験所技術資料第 413 号, pp.1-319, 1985.3
- 4) 豊福俊泰, 内野雅彦, 松井秀誠, 篠原知則: 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, 日本コンクリート工学会, コンクリート工学年次論文集 2017, Vol.39, No.2, pp.1225-1230, 2017.7
- 5) 財団法人高速道路技術センター: 耐久性を考慮したコンクリートの強度向上と低透水性化の研究, 分科会報告書, pp.1-36, 1997.3
- 6) 緒方辰男, 久保圭吾, 本間雅史: 土木学会鋼構造シリーズ

- 27 道路橋床版の維持管理マニュアル 2016, コンクリート工学, Vol.55, No.6, pp.495-501, 2017.6
- 7) 土木学会: 2017 年制定コンクリート標準示方書[設計編]・[施工編], 2018.3
- 8) 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
- 9) 豊福俊泰, 彌永育代, 中山慎也, 龍幸廣: ダブルチャンバー透気性試験法・透水性試験法・水分計法・反発度法・エコーチップ法によるかぶりコンクリートの品質診断法の開発, 平成 25 年度土木学会西部支部技術発表会論文集, pp.31-36, 2013.11
- 10) Toshiyasu Toyofuku et al.: Technical Development of Nondestructive Inspection Method of Cover Concrete Using Water Permeability Tester, International Conference on the Regeneration and Conservation of Concrete Structures (RCCS), FF0063, 2015.6.1-3
- 11) 高橋典子, 白谷祐太, 豊福俊泰, 永松武則: ダブルチャンバー透気性・透気性試験機による表層コンクリートの非破壊検査法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.2025-2030, 2016.7
- 12) 豊福俊泰, 永松武則, 鶴窪廣洋, 豊福俊英, 中山慎也: コンクリートのすりへりの進行予測に関する研究, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol.72, No.4, pp.380-399, 2016.1
- 13) ユニセンス株式会社, エフティーエス株式会社: ダブルチャンバー式加圧透水・透気試験機「W.A.P.P.」(登録番号 QS-170036-A), 国土交通省, NETIS 新技術情報提供システム, 2018.1
- 14) 豊福俊泰, 永松武則, 峰村富夫, 添田政司: ダブルチャンバー式加圧透水試験機による表層コンクリートの水密性と耐久性の非破壊検査法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, [1281], pp.1719-1724, 2018.7
- 15) 豊福俊泰, 峰村富夫, 野中英: ダブルチャンバー式加圧透水・透気試験機 (WAPP) 法による高耐久性コンクリートの水密性の非破壊検査報告, 日本非破壊検査協会, コンクリート構造物の非破壊検査シンポジウム論文集 (Vol.6), pp.165-170, 2018.8
- 16) 豊福俊泰, 広瀬剛, 飛田一彬: 高速道路における橋梁 RC 床版の水による疲労・劣化の評価法に関する研究, 土木学会第 73 回年次学術講演会, V-178, pp.355-356, 2018.8 (2018 年 7 月 20 日受付)