

論文 アスファルト舗装を有する道路橋 PC 箱桁の含水状態に関する検討

湯浅 康史*1・西原 知彦*2・菊地 智彦*3・千々和 伸浩*4

要旨: 道路橋における床版の含水状態は、橋面に敷設されたアスファルト舗装の影響を受けると考えられるが、これらの影響を調査した例は少ない。本検討では、道路橋 PC 箱桁の長期変形予測の高精度化を図る基礎検討として、防水工の有無をパラメータとする既設道路橋 PC 箱桁の 2 橋を対象に、コンクリート内部に温湿度センサを埋設し、約 1 年間の経時的な測定を実施した。その結果、舗装直下の上床版は外気のみと接する下床版に比べて高い含水状態にあること、上床版の高い含水状態は舗装面から水分供給を受けた可能性が高いことが認められた。

キーワード: 既設道路橋, PC 箱桁橋, 内部相対湿度, アスファルト舗装, 橋面防水工

1. はじめに

コンクリートの含水状態は乾燥収縮やクリープ挙動に影響を与え、PC 部材の長期変形挙動に影響を与える。コンクリート標準示方書に基づく PC 箱桁の長期変形の予測では、設計上安全側に変形量を算出するため、上床版の乾燥収縮ひずみがゼロとなるように上床版の相対湿度を 95%と設定することが示されている¹⁾。しかし、長期変形予測の高精度化を図るためには、実構造物の含水状態を適切に反映することが重要と考えられ²⁾、近年、水掛かりの影響や様々な外気相対湿度、配合、骨材収縮ひずみの影響を考慮した収縮ひずみの検討が行われ、収縮ひずみの評価式が提案されている³⁾。これにより、一般的な暴露環境におけるコンクリートの収縮ひずみは、一定の精度で評価可能になりつつある。

一方、道路橋 PC 箱桁の上床版では、上面にアスファルト舗装が設置され、舗装面からの熱や水分の影響を受けるため一般的な日射や降雨の影響を受ける暴露環境と異なる。実環境における箱桁部材の熱影響については調査・検討例が認められる^(例えば4)が、含水状態を測定・検討した例は少ない。また、道路橋では床版への水の浸入が耐久性に多大な影響を及ぼすことから、供用段階で橋面防水工（以下、防水工と称する）を設置する例が多くなっているが、防水工が上床版の含水状態に与える影響を検討した例は認められない。

そこで、本検討では、道路橋 PC 箱桁の長期変形予測の高精度化を図る基礎検討として、防水工の設置有無に違いがある既設道路橋 PC 箱桁 2 橋を対象に、コンクリート内部に温湿度センサを設置して約 1 年間の経時的な測定を実施し、PC 箱桁の含水状態、防水工が床版の含水状態に与える影響について検討した。

2. 調査概要

2.1 対象橋梁

調査対象は都市高速道路で供用されている箱桁断面の、橋面にアスファルト舗装が敷設されている PC 橋梁とし、防水工の無い K 橋と約 10 年前に防水工が施工された I 橋を選定した。橋梁概要および外観を表-1、写真-1に示す。対象とした 2 橋は建設時期、コンクリートの設計基準強度、実圧縮強度が比較的近く、硬化コンクリートの特性も類似すると推定される。また、2 橋ともに周辺に遮蔽物はなく日射の影響を直接受ける環境にある。一方、2 橋では、防水工の有無の違いに加え、山間部と都市平野部という架設環境の違い、箱桁内空の大きさ、箱桁内に立ち入るための検査孔の蓋が K 橋ではグレーチング、I 橋では鋼板と、蓋の種類に違いがある。

表 - 1 橋梁概要

	K 橋	I 橋
架設環境	山間部	都市平野部
所在地	神戸市北区	大阪府池田市
構造形式	PC2 径間連続 ラーメン箱桁橋	PC3 径間連続 箱桁橋
建設年 (橋齢)	1997 年 (27 年)	1994 年 (30 年)
設計基準強度	40 (N/mm ²)	40 (N/mm ²)
実圧縮強度※	51.4 (N/mm ²)	47.3 (N/mm ²)
箱桁内空幅、高さ	4.2~4.7m, 1.7~4.9m	4.1~4.5m, 1.2~1.3m
検査孔の蓋	鋼製グレーチング	鋼板
橋面防水工	無し	有り (塗膜系 2011 年施工)

※ウェブの小径コアによる推定圧縮強度



写真-1 対象橋梁外観 (左: K 橋, 右: I 橋)

*1 (一財) 阪神高速先進技術研究所 調査研究部 総括主任研究員 博(工) (正会員)

*2 阪神高速道路(株) 技術部 技術推進室 主任

*3 内外構造(株) 調査事業本部 点検調査部 主任

*4 東京科学大学 環境・社会理工学院 教授 博(工) (正会員)

2.2 調査内容

調査対象部位は、上床版と舗装面以外の環境が同じ下床版を対象とした。なお、2橋ともに上床版の床版厚が300mmであり、下床版は橋軸方向で床版厚が変化する構造であったが上床版と比較するため床版厚 300mm の断面（断面①）位置で調査することとした。

1橋あたりの調査内容および測定概要図を表-2、図-1に示す。測定項目はコンクリート内部の温湿度（以下、それぞれ内部温度、内部相対湿度と称する）と環境温湿度とした。コンクリート内部の温湿度は、部材の深さに応じて温湿度が異なると想定されたため、3深度（箱桁内側表面からセンサまでの距離が240,150,100mm）を設定し、側面からの影響を受けないよう箱桁中央付近で測定することとした。また、舗装面にはクラック等の損傷がないことを検査記録から確認しているが、上床版は舗装の継ぎ目や微細なクラック等の影響で含水状態にばらつきが生じる可能性が想定されたため、上床版の測定は2断面（基準断面①と①から橋軸方向に5m程度離れた断面②）、下床版は1断面で測定することとした。なお、今回測定した上下床版ではコンクリート表面にひび割れ等の損傷がないことを確認している。また、上下床版の環境作用を把握するため、箱桁内外の温湿度（桁内：断面①～②間、桁外：断面①から1～5m離れた下床版下面付近）も測定した。

2.3 測定方法

内部温湿度、環境温湿度の測定は、ともにセンサテック社製の汎用の温湿度センサ（RHT-3）を用いた。センサの仕様を表-3に示す。測定湿度範囲は0～100%であるが、90%以上の環境に長時間曝される場合に測定精度が低下する場合があるとメーカー仕様書に示されており、高湿度範囲は参考値と認識して使用することとした。

硬化コンクリート内部への温湿度センサの設置は、ドリル削孔した孔に温湿度センサを封入する方法により行

った。上床版への温湿度センサの設置概要及び設置前写真を図-2に示す。上床版のセンサの設置は、径の異なるドリルを用いて2段階で削孔し、 $\Phi 16.5$ の孔へのセンサを設置するとともに、空気抜きのパイプ等を設置を行った。その後、比較的粘性の高いエポキシ樹脂充填材（DECOLUXE社GL430）を注入孔からの充填し、空気抜きから充填材が漏出することを確認して設置した。下床版では削孔、センサ設置までは上床版と同じ手順とし、充填は充填材の注入パイプをセンサ位置付近まで差し込み、充填しながら徐々にパイプを引き上げて施工した。測定位置は3深度を計画し、センサー位置が削孔面から240,150,100mmの高さになるように設定したため、図-2に示した $\Phi 26$ mmのドリル削孔深さXは、それぞれ200,110,60mmと設定した。今回舗装面からの水分の供給が想定されたため、センサはできる限り舗装面に近づけて設置することとしたが、供用中の橋梁であること、削孔作業に誤差があること等を考慮し、240mmのケースで舗装から50mmの位置までの削孔とした。

本測定方法は、厳密にはセンサ高さ位置の温湿度ではなく、削孔穴先端の円筒空間（ $\Phi 16.5$ mm、長さ50mm）の温湿度を測定することとなるが、測定値は深さ方向50mmの範囲のコンクリートの温度、コンクリート細孔空隙の湿度と経時的に平衡状態となるため、測定値を50mm範囲のコンクリートの平均温度、細孔空隙の平均相対湿度とみなして評価することとした。

温湿度の測定は、各センサからデータロガーに接続して記録した。計測インターバルは1時間とし、K橋では2023年11月、I橋では2023年10月から測定を開始し、2024年10月末まで測定を行った。なお、次章以降で結果を示すセンサの名称は図-3のように表記を統一する。

表-3 温湿度センサの仕様

測定湿度範囲	0～100%
標準湿度精度	±3% (25°C,10～90%RH環境)
測定温度範囲	-30～80°C
標準温度精度	±0.5°C (25°C環境)

表-2 調査内容（1橋あたり）

項目	部位(場所)	断面位置	測定位置	測定期間
内部温湿度	上床版	①	3深度	1年
		②		
	下床版	①		
環境温湿度	(桁外)	—	—	
	(桁内)	—	—	

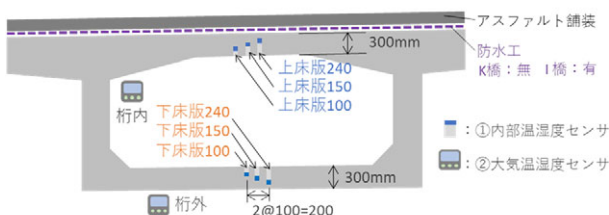


図-1 測定概要図

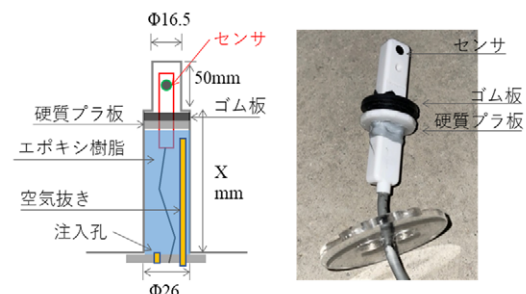


図-2 センサの設置概要（上床版）



図-3 センサの名称

3. 調査結果

3.1 箱桁内外の温湿度

コンクリートの内部の相対湿度は部材周囲の相対湿度の影響を受けるため、はじめに箱桁内外の温湿度の測定結果を整理する。箱桁内外で測定した温湿度の月間平均値の推移を図-4に示す。なお、相対湿度のグラフには、架橋地点周辺（K橋：約1km、I橋：約0.5km）における阪神高速道路の気象観測点で計測した月間降水量のデータを併記している。なお、K橋では測定機器の電源不具合により、2月下旬～6月初旬まで測定データを得ることができなかった。このため、3～5月の温度は、前述の阪神高速道路の気象データで補完した。一方、相対湿度は、周辺の観測値が無かったため、欠測状態でグラフ化した。

架橋地点の外気温については、欠測した3～5月でK橋の温度がやや低いものの、2橋で概ね同等である結果となった。一方、桁内温度については、K橋は外気温と同等である一方、I橋は外気温に比べ高く、特に4～9月には最大5℃程度高くなる結果となった。これは、箱桁内の気密性に起因するものと推察され、I橋は検査孔の蓋が鋼板で気密性が高く、日射によって桁内の空間が暖められた影響と推察される。

桁外の相対湿度については、12～2月においてK橋の相対湿度がI橋に比べて高く、夏季は同等となる結果であった。桁内の相対湿度については、K橋では冬季で外

気よりやや高いが概ね同等であった。一方、I橋の桁内相対湿度は、外気に比べて低い傾向にあり、特に4～10月に最大10%程度に差が拡大した。これは、桁内は水分量が概ね一定で、I橋の気密性が高く温度が外気に比べて高くなった影響で飽和水蒸気量が増加したために、桁内の相対湿度が低下したものと考えられる。

本測定結果は1年のみの結果であり、本結果で架設地点の環境を評価することは難しいが、I橋はK橋に比べて外気の温湿度は同等であるものの、桁内の気密性が高く相対湿度が低くなることから、I橋はK橋に比べコンクリート部材は乾燥しやすい環境にあったものと推定される。

3.2 コンクリートの内部温度

コンクリートの内部相対湿度は温度と正の相関にあることが確認されており⁵⁾、内部相対湿度の評価の前に、コンクリート内部の温度について整理する。コンクリートの部材平均内部温度の日平均温度の推移を図-5に示す。2橋ともに測定開始から3月頃まで、上床版と下床版の温度は同程度で推移しているが、4月以降は上床版の温度が上昇し、下床版や外気温より高くなる結果となった。これは、4月以降、日射量が増加することによって、舗装の温度が高くなり熱流が上床版に作用した影響と考えられる。また、4月以降にK橋の下床版は外気温より低い値で推移するのに対し、I橋の下床版は外気温より高い結果となった。気密性の高いI橋では、日射の

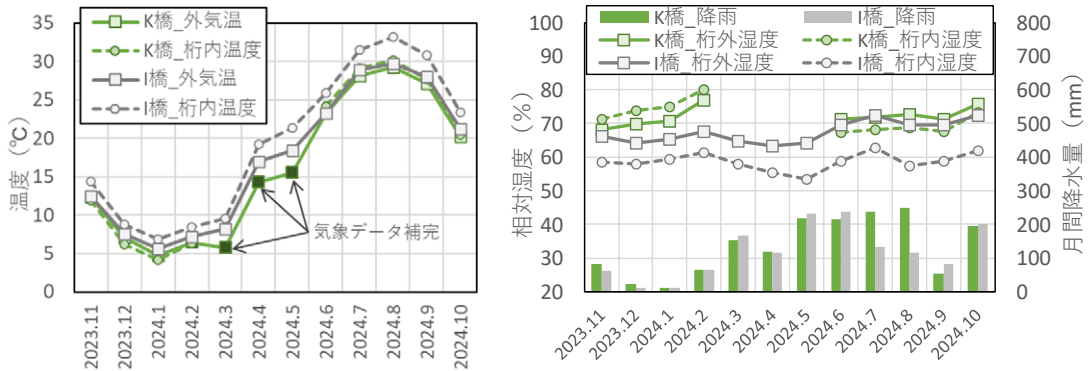


図-4 箱桁内外の月間平均温湿度の推移（左：温度，右：相対湿度）

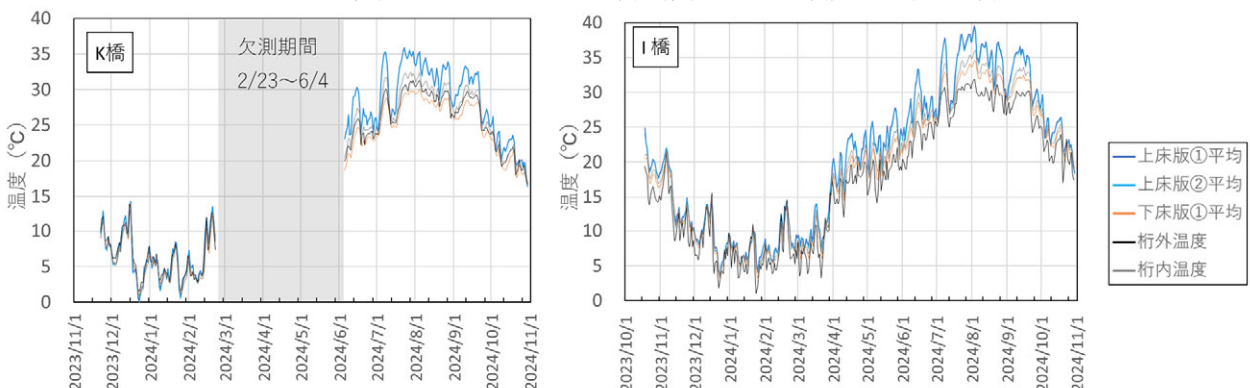


図-5 コンクリート内部温度の推移（日平均）（左：K橋，右：I橋）

影響で上床版とともに桁内空間の温度が高くなり、その影響を受け下床版の温度も高くなり、外気より高くなったものと推察される。

次に、日射が部材温度に与える影響を把握するため、内部温度の日較差（1日のうちで最高値と最低値の差）に着目し、その推移を図-6に示す。なお、上床版は断面での温度差が小さいため、断面①の結果を抜粋して示す。2橋ともに通年にわたって、舗装面に近い上床版240のセンサの日較差が最も大きく、次に上床版の150,100、下床版の日較差が最も小さい結果であった。このことから、上床版は舗装の熱影響を受け、温度環境が外気と異なると推定される。また、1年継続して測定データが得られたI橋において、上下床版の温度に乖離が見られた4月以降を確認すると上床版の日較差も増加する時期に一致することが認められる。これらより、4月以降の上床版と下床版の温度の乖離は日射による影響と推察される。

3.3 コンクリートの内部相対湿度

コンクリート内部の日平均相対湿度の推移を図-7に示す。グラフには、前述した阪神高速道路の気象データの日雨量も併記した。

はじめに、K橋の測定結果について述べる。K橋の上床版では、欠測までの期間においては内部相対湿度が測定できていたものの、測定再開の段階では上床版①150、100と上床版②100のセンサを除いて、相対湿度が100%に達していた。また、温度が低下する9月以降において

も、多数のセンサの内部相対湿度は低下しておらず、高湿度環境に長期間曝された結果、センサが故障した可能性が高いと考えられる。このため、測定再開後は上床版の多くのセンサのデータが評価できない結果であった。

これらを踏まえ、はじめに季節変動に着目すると、内部相対湿度は冬季に低く夏季に高くなる傾向が認められた。これは、既往の研究でも確認されている挙動^{例えぼ5)}と同様であり、内部相対湿度は温度と正の相関関係にあり、温度変化に伴って内部相対湿度も変動した影響によるものと考えられる。なお、温度と内部相対湿度が正の相関関係となる原因は、内部温度の上昇によりコンクリートの平衡含水率が低下すること⁵⁾やインクボトル内の凝集水が温度ポテンシャルの増加に伴ってより大きい細孔空隙に移動して水蒸気に変化すること⁶⁾等が考えられる。

次に、上床版の内部相対湿度を下床版と比較する。内部相対湿度は温度の影響を受けるため、上床版と下床版の温度差が小さい計測開始から2月末までの値を確認すると、2橋ともに上床版の内部相対湿度はどの深さ位置においても下床版に比べて、10~25%程度高い値で推移しており、上床版は下床版に比べ高い含水状態になっている状況が認められた。

また、外気の相対湿度と上床版・下床版の内部相対湿度を比較すると、下床版は外気と比較的同等の値で推移するものの、上床版は外気よりも高い値で推移していることが認められる。雨掛かりの影響を受けないコンクリ

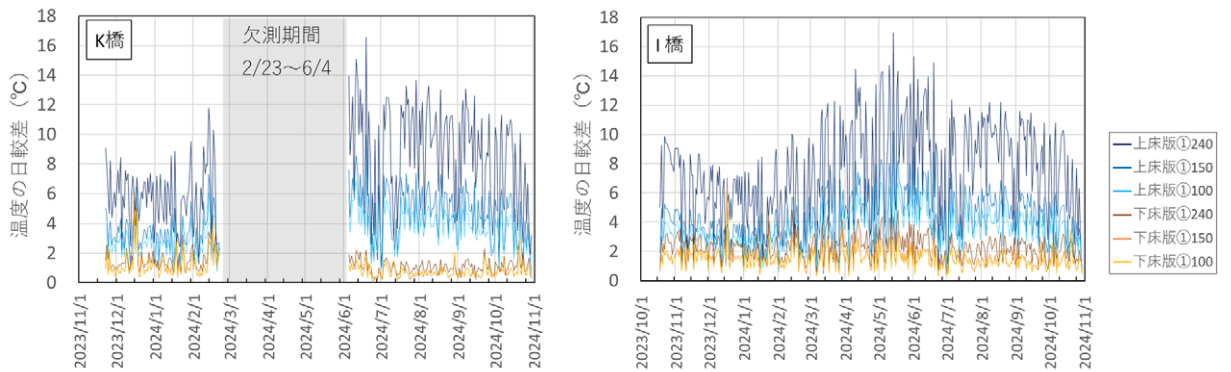


図-6 コンクリート内部温度の日較差（左：K橋，右：I橋）

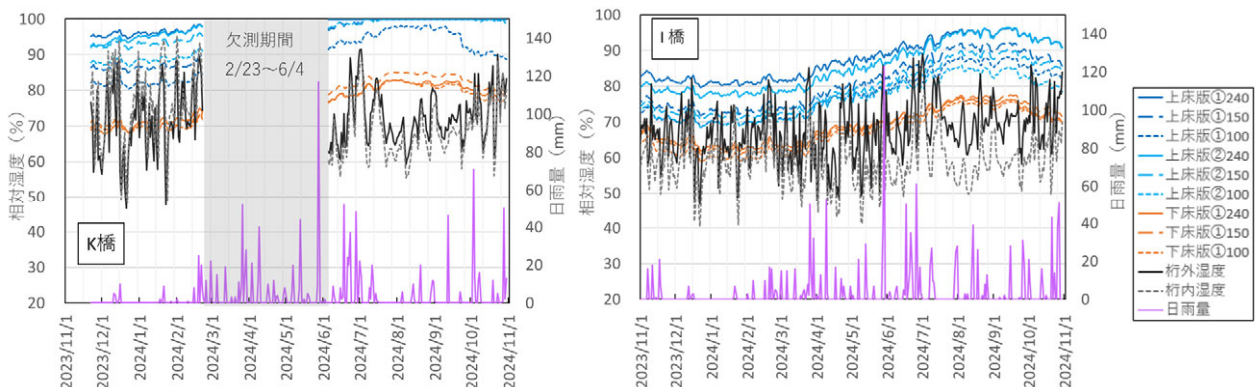


図-7 コンクリート内部相対湿度の推移（日平均）（左：K橋，右：I橋）

ート部材においては、下床版のように内部相対湿度は経年により外気の相対湿度に近づくと考えられるが、上床版はその傾向が認められなかった。これは、上床版は舗装面から水分供給を受けることを示唆する結果と考えられる。次に、上床版の深さ位置の違いに着眼すると、K橋では断面①,②で内部相対湿度に差異が認められるが、2橋ともに、内部相対湿度は高い順から240, 150, 100の順となった。つまり、上床版は舗装面に近いほど内部相対湿度が高くなる結果となっており、上床版は舗装面からの水分供給を受けたことを示唆される結果となった。

ここで、上床版は舗装面からの水分供給が示唆される結果が複数認められたが、その水分供給要因は降雨時における舗装面からの供給⁷⁾が考えられる。このため、内部相対湿度と日雨量の推移を確認したが、明確な関係性は認められなかった。これは、本測定でのセンサの位置は舗装面から50mm以上の離隔があり、水分が舗装面からセンサ位置まで浸透して測定値に影響するまで比較的長時間が必要なこと⁸⁾、その間に内部相対湿度は内部温度の影響を受けて変動することが要因と考えられる。これらを踏まえ、舗装面からの水分の作用については、長期的な分析を4.2で実施・考察する。

最後に、欠測までの期間においてK橋とI橋を比較すると、上床版、下床版ともにK橋の内部相対湿度はI橋に比べて、10～15%程度高い結果となった。

4. 考察

4.1 上床版の含水状態

上床版の含水状態は、3.3で示したように、下床版や外気の相対湿度より高い値で推移していたことから、部材全体として高い含水状態にあることを確認している。但し、内部相対湿度は、コンクリートの水分状態による変動に加えて、内部温度にも連動して変動することから、内部温度と内部相対湿度の関係を踏まえた考察を加える。ここで、1月下旬～7月末の温度上昇時期における内部温度と内部相対湿度の関係を図-8に示す。中田ら⁴⁾は内部相対湿度の測定にあたって封緘の重要性を示唆してい

たが、今回の計測では封緘が適切に実施できた結果、内部相対湿度は内部温度と強い正の相関があることが認められた。このグラフより、上下床版を比較すると、2橋のどの内部温度においても、上床版の内部相対湿度は下床版より高く、上床版は高い含水状態にあることが認められた。

4.2 舗装面からの水分供給性状

3.3において、上床版は舗装面から水分供給を受けることを示唆されたが、供給される期間や要因については評価が困難な状況であった。ここで内部温度と内部相対湿度の関係(図-8)から、考察を加える。下床版の内部温度と内部相対湿度の関係は測定された温度帯において、2橋ともに線形関係を維持していることが認められる。下床版は直接水の作用を受ける環境になく、水が作用しない場合には、短期的には外気温湿度の変動に影響を受けず、内部相対湿度は内部温度と線形関係を維持するものと考えられる。

一方、上床版に着目すると、I橋の25℃以下の相対湿度は、センサの信頼性が確保できる90%以下の範囲にあり、約20℃以上になると20℃以下の線形関係から逸脱する挙動が認められた。この線形関係からの逸脱は舗装面から水分供給を受けた影響と考えられる。なお、240のセンサは25℃以上で、高湿度領域になり参考値ではあるが、150,100のセンサと同様の挙動を示しており、本検討では高湿度領域でも一定の傾向を捉えることができたものと推察した。線形関係から逸脱した20～30℃の温度帯は、図-5の内部温度から判断すると概ね4月初旬～7月下旬の時期で、図-4の月間降水量から降水量の多い時期と概ね合致している。このことから、春から夏の多雨時期において、水分供給が床版全体の含水状態に与える影響が大きいことが示唆された。また、K橋の上床版の内部相対湿度は、欠測期間までは温度と線形関係が認められるが、測定再開後は線形関係を仮定した内部相対湿度より2～5%程度高い状況となり、線形関係から逸脱した。欠測期間の影響でI橋のような評価は困難であるが、I橋と同等の時期での水分供給の影響が大きいと推

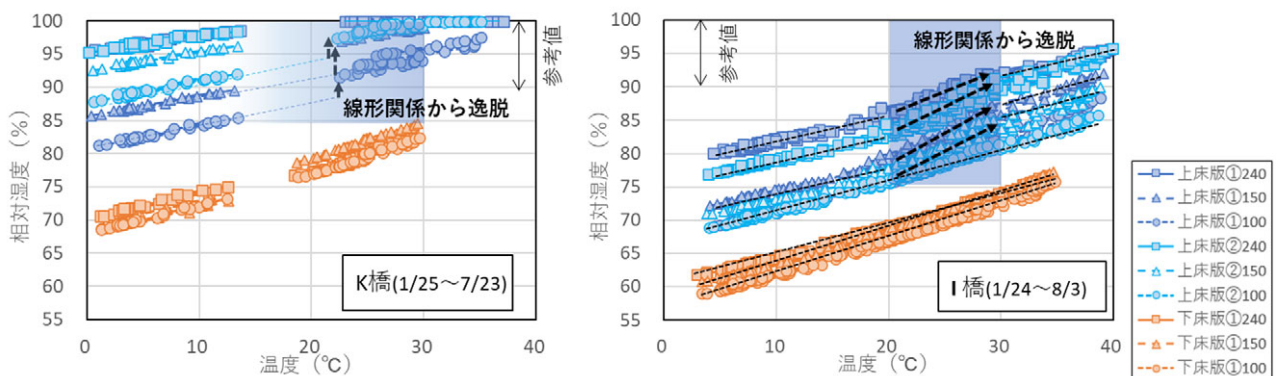


図-8 内部温度と内部相対湿度の関係(日平均)(左:K橋, 右:I橋)

察される。

4.3 防水工が上床版の含水状態に与える影響

3.3 において、防水工を施工した I 橋は、上床版の内部相対湿度が K 橋に比べ 10~15%小さく、I 橋の上床版の含水状態が低いことが認められている。但し、2 橋では防水工の有無のほか、今回の測定で暴露環境の違いも確認されたことから、この差異について考察した。

暴露環境について、上床版下面と接する箱桁内部の温湿度は、3.1 で示したように、箱桁の内空の大きさや機密性の違いから、I 橋は K 橋に比べ温度が高く、湿度が小さい、乾燥しやすい環境であることが確認された。また、防水工の効果については、図-8 で示したように、防水工が施工された I 橋でも内部温度が 20~30°C 程度の範囲において、線形関係から逸脱する挙動が認められ、舗装面からの水分供給を示唆する結果が得られた。このことから、測定段階での防水工は施工から 10 年程度が経過し、水分の遮水性能が低下し舗装面からの水分供給が再開した可能性が高いと考えられる。

これらより、今回の 2 橋では上床版の環境作用が大きく異なること、また防水工の遮水性能が低下している可能性があり、水分供給の再開時期やその程度が不明であることから、今回 2 橋の比較により、防水工の影響を評価することは困難な状況となった。防水工の影響を評価するためには、防水工を予定する橋梁で施工前から長期的な測定を行うか、箱桁内部の温湿度環境が比較的近い 2 橋を選定し、防水工の機能が十分発揮された箇所での測定を行うなどの対応が必要と考えられる。

5. まとめ

防水工の有無をパラメータとする既設道路橋 PC 箱桁の 2 橋を対象に、コンクリート内部の温湿度を測定した結果、以下の知見を得た。

- (1) 箱桁内部の温湿度は、桁内空間の大きさや検査孔の蓋の構造等の桁内の気密性に影響を受け、桁内空間が狭く気密性が高い場合には外気温より温度が高く相対湿度が低くなり、日射の影響が大きい夏場ほどその影響が顕著となる。その結果、これら特徴の箱桁内では外気より乾燥しやすい環境となる。
- (2) 上床版のコンクリートの内部相対湿度は下床版や外気の相対湿度より高いことが認められ、上床版は下床版に比べ高い含水状態にある。
- (3) 上床版の高い含水状態は、降雨によって舗装面から水分供給を受ける可能性が高いことが示唆され、床版全体の含水状態に影響を与える水分供給は、春から夏の多雨時期である可能性が示唆された。
- (4) 防水工施工から約 10 年経過した段階の今回の調査では、上床版は舗装面からの水分供給を受けている

挙動が認められた。このため、本検討では防水工が上床版の内部相対湿度に及ぼす影響を評価することは困難であった。

本検討の結果を踏まえ、今後は上床版と舗装との境界面における温度や水分の環境作用の程度を材料構造応答連動解析を用いて検討し、今回測定された上床版の内部相対湿度状態の再現を試みるとともに、アスファルト舗装下のコンクリートの収縮ひずみについて検討を行う予定としている。また、降雨が上床版の内部相対湿度に与える影響、防水工が上床版の内部相対湿度に与える影響については、本検討で十分明らかすることができなかつたため、今後の検討課題と考えている。

謝辞

本検討の実施にあたり、(一財)阪神高速先進技術研究所 コンクリート構造物検討委員会・WG において、委員長の京都大学宮川名誉教授をはじめとする各委員から有益なご助言を頂いた。ここに深く感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書(設計編)，2022.3
- 2) Nobuhiro Chijiwa, Shuntaro Hayasaka, Koichi Maekawa, Long-Term Differential and Averaged Deformation of Box-Type Pre-stressed Concrete Exposed to Natural Environment, Journal of Advanced Concrete Technology, vol.16 Issue1, pp.1-17, 2018.1
- 3) 渡辺健, 中村麻美, 石田哲也, 渡邊忠朋：混合セメントおよび水掛かりの影響を考慮したコンクリートの収縮ひずみ予測式の提案, 土木学会論文集 E2, Vol.78, No.1, pp.105-120, 2022.3
- 4) 橋本和明, 明石行雄, 川西弘一：橋種別の熱的環境と部材内の熱流を考慮した赤外線サーモグラフィ法の留意点, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.2041-2046, 2009
- 5) 中田清史, 松沢晃一, 有木克良, 鹿毛忠継：築後 46 年を経過した RC 造建築物におけるコンクリートの内部温湿度の年間変動, 日本建築学会技術報告集, 第 29 巻 第 72 号, pp.645-650, 2023.6
- 6) Koichi Maekawa, Tetsusya Ishida, and Toshiharu Kishi : Multi-scale Medeling of Structural Concrete, Talor & Francis, 2009
- 7) 寺田剛, 渡邊真一, 藪雅行：床版が損傷した橋面舗装の実態調査, 土木学会論文集 E1, Vol.75, No.2, I-201-207, 2020.2
- 8) 鈴木浩明, 上田洋：コンクリートの品質が水分浸透深さの時間依存性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, 2014.6