

論文 道路橋コンクリート床版の仕上げ面の平坦性と滞水現象に関する一考察

田中 泰司*1・高橋 茂樹*2・荒井 明夫*3

要旨：道路橋コンクリート床版の仕上げ面の平滑性を計測したところ、施工基準の範囲内ではあるが、かなりの凹凸を有していることが確認された。平坦性は橋梁によって大きく異なるものの、構造形式ごとに傾向が見受けられた。また、平坦性は施工規模の影響を大きく受けることが示唆された。さらに、滞水量の分析を行ったところ、従来施工では滞水量の低減には限界があり、機械仕上げの導入により施工精度を改善することによって、滞水量を大幅に低減できることが示された。

キーワード：コンクリート床版、平坦性、仕上げ、滞水

1. はじめに

道路橋コンクリート床版は、輪荷重による繰り返し作用を受ける部材であり、耐疲労性を確保することが求められる。コンクリート床版の疲労強度は水の存在によって大きく低下することが既往の研究¹⁾により明らかにされており、設計においては排水勾配を設け、防水層を敷設することによって、水による疲労の促進が回避されている。凍結防止剤が散布される環境において、道路橋コンクリート床版上に滞水が生じた場合には、凍害に加え、塩害やアルカリシリカ反応が生じる恐れもある。滞水の影響を受けるのはコンクリート床版だけではない。床版コンクリート上面に滞水した水が凍結すれば、膨張圧によって、アスファルト舗装が損傷する。アスファルト舗装の水中疲労も促進される。アスファルトが破壊され砂利化すれば、その砂利がボールミルのような役割を果たし、防水層を簡単に破る。さらに、水中疲労状態になったコンクリートが骨材に叩かれることによって、やがて上面から粉砕される。

このように、道路橋コンクリート床版に滞水が生じると、様々なメカニズムによって不具合が起こる。そのため、滞水が生じないように、確実に排水が行われることが肝要である。床版上面の排水は、橋面勾配と排水升・ドレーンの組み合わせで対処される。図-1に示すように、たとえ舗装面が設計どおりに平滑に仕上げられていてもそれだけでは排水が不十分である場合もある。雨水は舗装の境界や打継ぎ部などから、防水層またはコンクリート上面へと浸入しえる。その際、コンクリート床版上面の凹凸が大きいと、滞水が生じる原因となる。コンクリート床版上面の平滑性は舗装も含めた床版システム全体の健全性と耐久性を確保するために重要な要素である。

そこで本研究では、実橋梁のコンクリート床版の表面

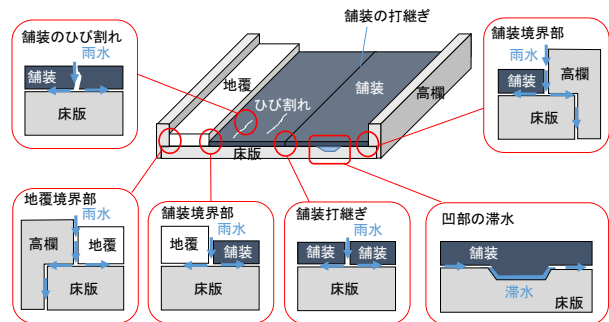


図-1 コンクリート床版上面での水の浸入経路と凹部での滞水

形状計測結果を分析することによって、表面仕上げの精度と滞水現象との関係を把握し、確実な排水が実現される条件を検討することを研究目的とした。

2. 道路橋コンクリート床版の平坦性の計測

2.1 計測対象

床版が施工され、かつアスファルト舗装敷設前の状態にある道路橋を対象にコンクリート床版上面の高さ分布を計測した。本研究で対象とする橋梁は、鋼橋 RC 床版が 2 橋（うち 1 橋は車線ごとに計測）、合成床版が 3 橋、プレキャスト PC 橋が 2 橋、場所打ち PC 橋が 2 橋（うち 1 橋は車線ごとに計測）の計 9 橋である。実橋梁床版に加え、仕上げ精度の改善を目的に作製した中規模試験体の表面形状も計測した²⁾。中規模試験体は一般的な人力仕上げ部（4.5 m × 10 m）と簡易機械仕上げ部（3.0 m × 10 m）により構成される（写真-1）。人力仕上げ部では、レーキ敷均し後、トロウエル仕上げを行い、最後にこて仕上げを行った。簡易機械仕上げ部では、高さ調整された鋼製レールの上に摺り切り式の仕上げ機をセットして、レーキ敷均し後のコンクリート上面を平滑に仕上げた。なお、本研究で用いた簡易仕上げ機は、コンクリート舗

*1 東京大学生産技術研究所 特任准教授 博（工）（正会員）

*2 （株）高速道路総合技術研究所 道路研究部舗装研究室長 博（工）

*3 （株）NIPPO 執行役員 総合技術部長兼生産機械センター長

表－１ コンクリート床版上面の平坦性計測対象一覧

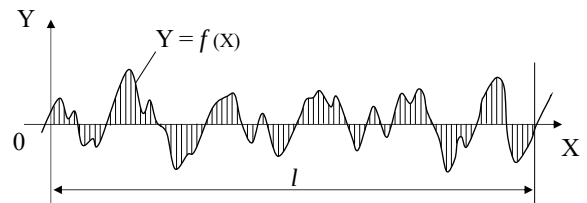
	橋名	床版の種類	橋梁種別	橋長 (m)	幅員 (m)	算術平均粗さ (mm)	PrI (cm/km)	滞水量 (ml/m ²)
実橋梁	JK 橋	プレキャスト床版	PC 橋	31	10.5	3.75	49	326
	NT 橋	プレキャスト床版	PC 橋	23	10.5	3.39	70	514
	O3 橋	現場打ち	PC 橋	80	10.5	5.21	84	156
	KS 橋	現場打ち	鋼橋	56	10.3	5.61	70	355
	JK2 橋	現場打ち	鋼橋	30	10.3	3.63	51	9
	SB 橋 1	現場打ち	鋼橋	266	10.3	6.20	53	286
	10 橋	現場打ち	鋼橋	40	14.5	6.18	75	132
	OK 橋	現場打ち	PC 橋	58	10.5	6.18/9.00	107/100	157/113
	MS 橋	現場打ち	鋼橋	45	11.7	6.17/4.76	139/118	109/232
中 規 模	人力	—	—	10	4.5	2.56	25	295
試験	機械	—	—	10	3.0	1.52	21	94



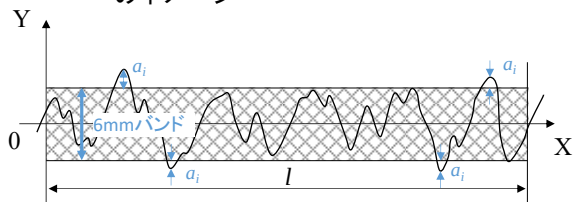
(a) 簡易機械

(b) 従来施工

写真－１ 中規模試験体の仕上げ状況



図－２ 算術平均粗さ R_a を算出するための諸数値のイメージ



図－３ プロフィールインデックス PrI の解析方法

装の表面仕上げ機の原理を準用し、有スランブコンクリート用に軽量化された試作機である。

2.2 計測方法

高さ計測は、基本的には自動追尾機能を有するプリズム型のトータルステーションを用いて計測を行った³⁾。また、一部の橋梁では、水準測量により高さ分布を計測した。中規模試験体ではノンプリズム型のトータルステーションを用いて計測を行った。いずれの橋梁においても 50cm 間隔で計測を行った点は共通している。橋面には勾配が付けられていることが多いので、標高分布から表面の凹凸の状況を把握することは難しい。そこで、高さ分布の整理にあたっては、計画高さと計測高さの差を用いることにした。

2.3 表面不陸の分析

(1) 分析方法

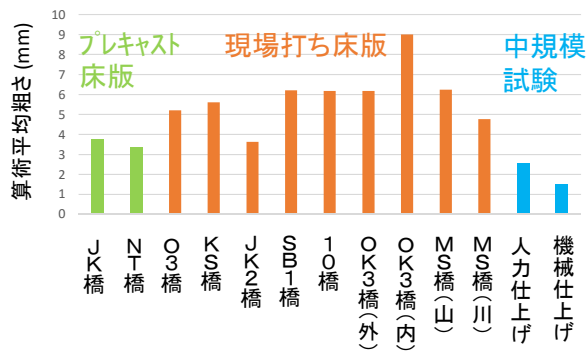
床版仕上げ面の凹凸を数値化して相互比較するため

に、図－２および式(1)で表される算術平均粗さ R_a を指標として用いることにした。

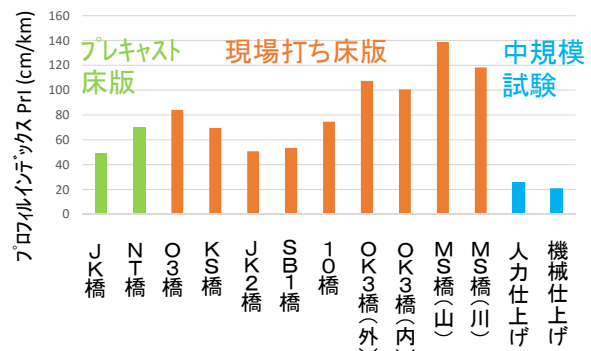
$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |f(X)| dX \quad (1)$$

ここに、 l : 計測長さ、 $f(X)$; 座標 X 地点における平均高さからの標高差、である。本研究では、50cm 間隔で計測された標高データをもとに、Kriging によって 10cm 格子データに内挿したうえで粗さ指標の算出と滞水分布の分析を行った。算術平均粗さは、10cm 格子データの橋軸方向の測線で計算を行った。

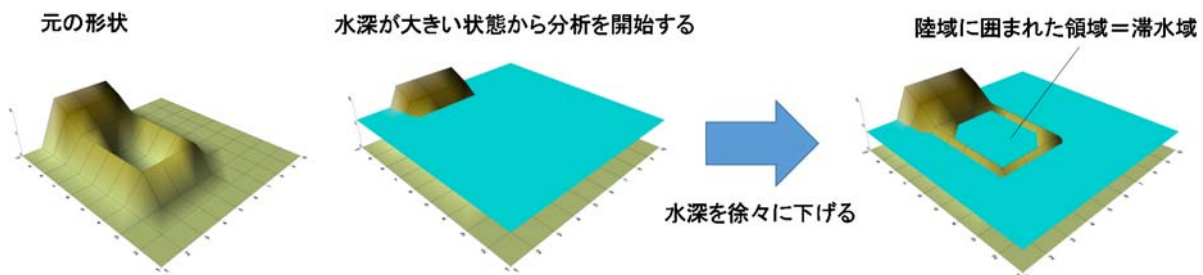
算術平均粗さに加えて、本研究では舗装面の平坦性を表す指標であるプロフィールインデックス PrI⁴⁾も参考値として算出した。PrI は、舗装面を車両が通行する際の乗り心地を表すために制定された平坦性の指標であって、式(2)および図－３により算出される。



図－４ 算術平均粗さの算出結果



図－５ プロフィールインデックス PrI の算出結果



図－６ 滞水領域の算出方法の概念図

$$P_{ri} = \frac{1}{l} \sum a_i \quad (2)$$

プロフィールインデックスの算出に当たっては、平均高さから±3mmの範囲に6mm幅のバンドを設け、このバンドの外側に突出している部分の高さ a_i をすべて加算し、これを距離で除して値を求める。PrIについても、10cm格子データすべてを使用し、橋軸方向について計算を行った。

(2) 分析結果

図－４に算術平均粗さの算出結果を示す。算術平均粗さでは床版の種類による違いが比較的確確に見られた。プレキャスト床版では比較的算術平均粗さが小さいのに対し、現場打ち床版では比較的大きな値となった。プレキャスト床版は工場製作により高精度に床版上面が仕上がっていること、場所打ち部の面積が比較的小さく、プレキャスト部がガイドとなって仕上げやすいことから算術平均粗さが小さくなったものと考えられる。現場打ち床版の仕上げ精度は橋梁によってかなりのばらつきがあり、同じ橋梁でも車線によって異なる結果となった。精度が良い場合にはプレキャスト床版と同程度となるものの、たいていの場合は算術平均粗さが5～7mm程度となるようである。算術平均粗さは、計画高さからの差の期待値を表す指標であるので、今回計測した場所打ち床版の場合には、床版厚が平均で5～7mm計画値よりずれて

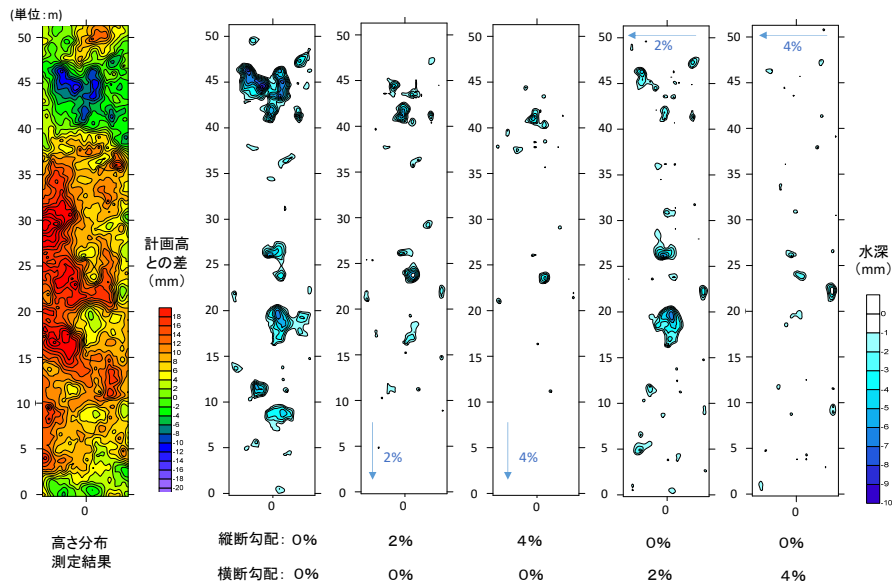
いると解釈できる。中規模試験体では、人力左官仕上げの場合においても算術平均粗さが小さくなった。その要因としては、仕上げ面積が実橋梁の1/5～1/10程度と小さく、丁寧に仕上げる事ができたこと、幅が4.5mと実橋梁に比べて小さく、仕上げ高さが目視で認識しやすかったことなどが考えられる。簡易仕上げ機により表面仕上げを行った場合には算術平均粗さが1.5mmと小さな値となった。平坦性改善の観点からは機械仕上げの効果が大きいことがわかる。

図－５にプロフィールインデックスの算出結果を示す。式の大小関係は算術平均粗さと同様であり、プレキャスト床版が比較的小さく、現場打ち床版が大きくなる傾向となった。現場打ち床版では橋梁によって大きな違いがある点も同様であった。舗装仕上げ面のプロフィールインデックスの標準値はジョイントを含まない構造物区間で8cm/km以下と定められていることから、従来のコンクリート床版の仕上げ方法では凹凸が大きく、舗装のレベリング層による平坦性の確保がいかに必要かが分かるデータといえる。中規模試験では、人力仕上げと機械仕上げの両方で、実橋梁と比較してプロフィールインデックスが顕著に小さな値となった。

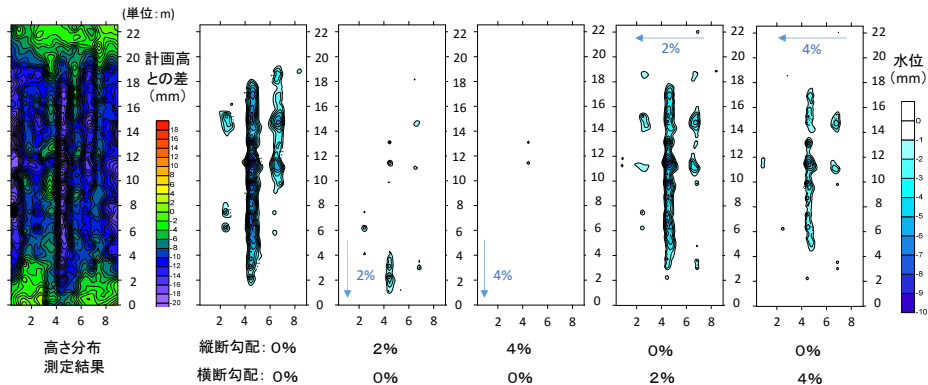
2.4 滞水の分析

(1) 分析方法

先述の粗さ分析は、仕上げ面の平坦性の大小を比較できるものの、降雨等によってどの程度の滞水が生じるの



図ー７ 場所打ちコンクリート床版の高さ分布測定結果と滞水分布の計算結果（KS 橋）



図ー８ プレキャスト床版の高さ分布測定結果と滞水分布の計算結果（NT 橋）

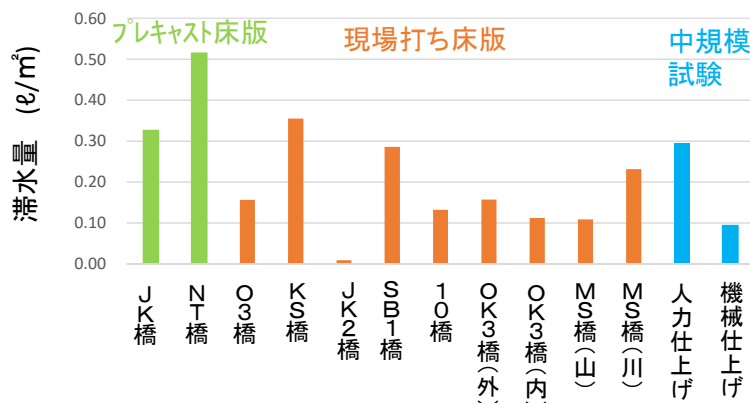
かを直接確認することはできない。そこで、表面形状測定結果を用いて数値解析によりどの程度の滞水が生じるのかを計算することにした。図ー６に滞水領域の算出方法の概念図を示す。まず、水深が十分に大きい状態を仮定する。水深を徐々に下げ、各格子点の陸域－水域の判定を行うとともに、陸域に囲まれた水域がないかを探索する。陸域に囲まれた水域は滞水域として判定し、水深や滞水量を記録する。この作業を全領域で水深がゼロになるまで繰り返す。本研究では、水深を 1mm 刻みで低下させて、繰り返し計算を行った。また、高さ計測の精度を勘案して、陸域に囲まれた水域のうち、1mm より大きな水深がある箇所を滞水域と判定して整理を行った。

(2) 滞水分布の計算結果

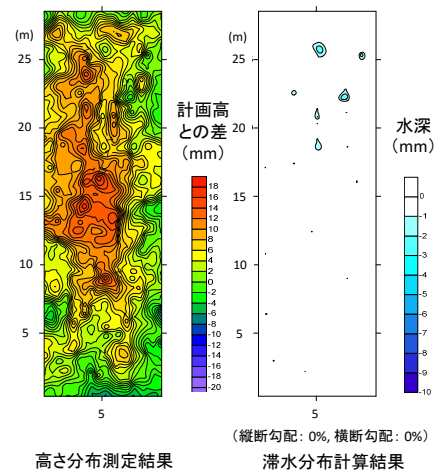
場所打ち床版の計画高さからの差の分布と滞水領域の算出結果の一例を図ー７に示す。高さ分布より、床版面には比較的緩やかな凹凸がついていることが見て取れる。場所打ち床版の場合は橋梁によって凹凸の位置や傾向が異なり、共通した特徴は見取れなかった。いずれ

の橋梁においても計画高さとの差は±20mm 以内にほとんど収まっており、国土交通省の施工管理基準⁵⁾を満たしていると判断された。縦断勾配および横断勾配が 0% の場合には、かなり多くの領域で滞水が生じる結果となった。仮想的に高さ分布の格子データに 2% または 4% の縦断勾配および横断勾配を与えた場合の滞水状況もあわせて計算した。その結果、対象橋梁においては、勾配が大きくなるほど滞水領域が減少することが確認できたが、4% の勾配を与えた場合でも滞水域はゼロにはならなかった。

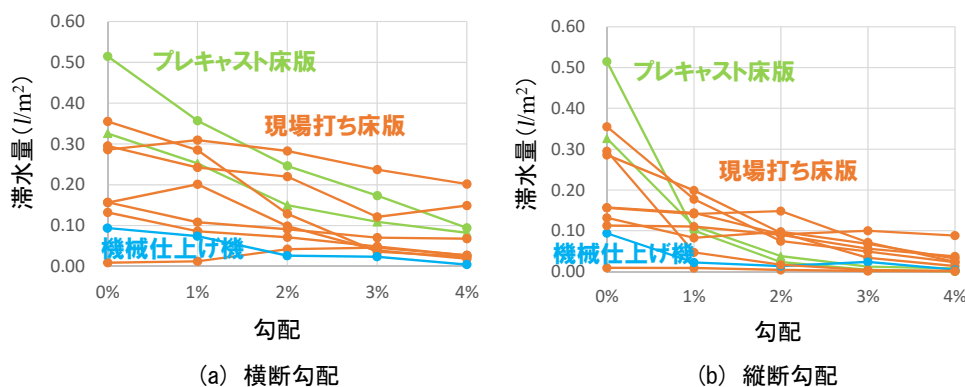
図ー８にプレキャスト床版の高さ分布計測結果と滞水分布の計算結果を示す。高さ分布計測より、対象橋梁では橋軸方向に沿って、低い部分ができていることがわかる。計画高さに比べて大か小かの違いはあるものの、他のプレキャスト床版も同様の測定結果であった。プレキャスト桁と間詰部との間で高さの差が生じやすいためと考えられる。縦断勾配および横断勾配が 0% である場合の滞水領域の計算結果は、高さ分布測定結果に対応し



図－9 滞水量の計算結果（縦断勾配，横断勾配なし）



図－10 中央部が高く滞水しにくい場所打ち床版の例（JK2橋）



図－11 勾配による滞水量の減少過程の計算結果

て、橋軸方向に沿った高さの低い部分で滞水が生じる結果となった。この溝状の領域に溜った水は、縦断勾配があると速やかに排水されるものの、横断勾配だけがある場合には抜けにくく、横断勾配が4%の場合でも滞水が残る結果となった。このように、プレキャスト床版の場合には、横断勾配よりも縦断勾配の方が排水に対して大きな影響を与えるといえる。

(3) 滞水量の計算結果

滞水量の計算結果を図－9に示す。図－4に示した軸方向の算術平均粗さとは異なり、勾配がない場合には、プレキャスト床版の方が現場打ち床版に比べて滞水量が多くなる結果となった。これは、図－8の滞水分布で示したように、プレキャスト床版の場合には、間詰部とプレキャスト部で高さの差が生じやすく、それにより比較的広い範囲で滞水が生じるためである。現場打ち床版の滞水量は、橋梁によって大きく異なり、図－10に例示するように中央部の標高が周囲よりも高い場合には滞水量が小さくなり、図－7のように低い場所が中央部にある場合には滞水量が多くなる傾向が確認できた。

図－11に縦断勾配，横断勾配による滞水量の減少過程を示す。プレキャスト床版は、勾配がまったくない場合

には滞水量が比較的多いが、勾配が増加するにつれて、滞水量が減少する計算結果となった。特に、横断勾配に比べて縦断勾配の方が排水効果大きい。現場打ち床版の場合には縦断勾配が大きくなると排水が促進される結果はプレキャスト床版と同様であったが、その効果はプレキャスト床版に比べて緩慢であった。また横断勾配に関しては縦断勾配よりも排水効果が全体的に小さく、表面形状によっては勾配を付けることによってむしろ滞水量が増加するものもあった。機械仕上げによる中規模試験体では、勾配がない状態でも実橋梁に比べて滞水量が小さかったが、勾配がある場合にはさらに排水が促され、縦断勾配で1%程度，横断勾配で2%程度となると滞水量はほぼゼロになった。機械仕上げによって凹凸量が小さく抑えられると、勾配による排水効果も一層高まるためと理解できる。

耐久性の観点から、滞水量をどの程度に抑えるべきかを定めるのは難しいものの、滞水量の目標値を仮に0.1 l/m²に設定した場合の必要横断勾配量を表－2に示す。目標値を0.1 l/m²とした場合には、縦断勾配が0%の条件ではプレキャスト床版で4%、現場打ち床版で平均3%の横断勾配が必要とされる結果となった。縦断勾配が1%

表－２ 滞水量が 0.10 l/m^2 以下となる横断勾配

縦断勾配 構造種別	0%	1%	2%	3%	4%
プレキャスト床版	4%	0%	0%	0%	0%
現場打ち床版	3% (0～7%)	2% (0～6%)	1% (0～3%)	0%	0%
機械仕上げ	0%	0%	0%	0%	0%

*現場打ち床版は平均値に加え、最大値と最小値を記載

の場合には、必要とされる横断勾配が、現場打ち床版で2%まで小さくなり、さらにプレキャスト床版の場合には0%でも十分に排水できると判定された。縦断勾配が3%以上の場合には、構造種別によらず、横断勾配が0%でも十分に排水が行われる結果となった。現場打ち床版の場合には、橋梁によって凹凸の形状や大小が異なるため、排水に必要な横断勾配の計算結果にも大きなばらつきが生じた。縦断勾配が0%の場合には、横断勾配が0%でも排水状況が十分に目標値に達するものもあれば、7%程度の横断勾配を要するものもあった。道路橋の設計においては排水のために設定可能な横断勾配が2%程度であることを踏まえると、縦断勾配が1%以上あれば、丁寧な施工を条件として、構造種別によらず従来の施工方法で排水性は確保できるといえる。一方、縦断勾配がない条件であると、従来の施工方法では横断勾配が2%程度であっても排水性が不足する可能性が高く、何らかの改善が必要と言え。たとえば、本研究で検討対象とした、簡易仕上げ機を使用した場合には、縦断勾配および横断勾配がともに0%であっても目標値である 0.10 l/m^2 を満たすことができるため、仕上げ精度の改善が、排水性を確保するためのひとつの解決策といえる。

滞水量の目標値を 0.2 l/m^2 に設定した場合に必要な横断勾配を表－3に示す。全体の傾向は目標値が 0.1 l/m^2 のときと同じであり、必要とされる横断勾配の値は、目標値 0.10 l/m^2 のときと比べて、1～2%程度小さくなる結果となった。縦断勾配が0%であると、プレキャスト床版や、現場打ち床版で施工が悪かった場合に滞水が生じる可能性が高い点は目標値 0.10 l/m^2 の場合と同様であった。いずれの閾値が良いかは、現場の実際の滞水状況等を勘案して、今後検討を進める必要がある。

3. まとめ

本研究では、実橋梁のコンクリート床版上面の高さ分

表－３ 滞水量が 0.20 l/m^2 以下となる横断勾配

縦断勾配 構造種別	0%	1%	2%	3%	4%
プレキャスト床版	2～3%	0%	0%	0%	0%
現場打ち床版	1% (0～5%)	1% (0～3%)	0%	0%	0%
機械仕上げ	0%	0%	0%	0%	0%

布の計測結果から、床版仕上げ面の平坦性の現状を分析した。また、数値計算により滞水箇所と滞水量を推定したところ、施工方法による滞水の特徴を捉えることができた。一般的な施工方法により床版面を仕上げた場合には、縦断勾配がない状況であると、多少の横断勾配があっても滞水が生じる可能性が高いことが明らかとなった。また、機械仕上げ機のように、従来に比べて平坦に仕上げることができる技術を用いることで、勾配がほとんどない場合であっても、排水性を確保することが可能になることが示された。

参考文献

- 1) 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.627-632，1991
- 2) 小松怜史，田島涼，田中泰司，斉藤徹，荒井明夫：簡易仕上げ機を用いたコンクリート床版の平滑度の向上と表層コンクリートの品質評価，土木学会 347 委員会報告書・シンポジウム論文集，2015.9
- 3) 塚本真也，増戸洋幸，大西玲，大澤正三，高橋茂樹：コンクリート床版面の詳細な高さ測定例とその対応策，土木学会 347 委員会報告書・シンポジウム論文集，2015.9
- 4) 東日本高速道路株式会社・中日本高速道路株式会社・西日本高速道路株式会社：8m プロフィールメータによる路面凹凸測定方法，NEXCO 試験方法，試験法 220-1992
- 5) 国土交通省：土木工事施工管理基準及び規格値（案），2013.3