

RC 床版の実測形状表面における排水シミュレーション

Drainage simulation on the measured surface of RC slab

北海道大学大学院工学院
北海道大学大学院工学研究院

○学生員 安田優子 (Yuko Yasuda)
正会員 松本高志 (Takashi Matsumoto)

1. はじめに

降雨降雪により橋面に存在する水の排水は維持管理上重要であり、特に舗装面からの浸透水が床版面で速やかに排水されなかった場合、床版劣化が促進すると考えられている。そのため橋梁においては、橋面上の水を排出するために排水設備が設置される。排水桝、導水パイプ、床版水抜きなどの排水設備について防水便覧などで設置間隔が例示されているが、各設備及び橋面全体の排水能力については定量的な分担や性能が必ずしも明瞭になっていない。また、排水設備に至る以前に、床版表面上では部分的に滞水が発生し得る。こうした部分的な滞水はその箇所での床版劣化を周辺より著しく促進する可能性がある。床版表面における部分的滞水現象には床版表面形状が影響すると考えられるが、道路構造令¹⁾や道路橋床版防水便覧²⁾に部分的滞水の発生に関連した床版表面形状についての基準や規定は明記されていない。

このように、効果的な排水のためには床版表面から排水設備へと体系的で定量的な排水性能の把握と評価が必要となる。

本研究の主目的は、床版表面の勾配や形状が排水機能に与える影響を明らかにすることである。後述の寒地土木研究所との共同研究での現場計測により、床版表面には高低差 20mm 程度の凹凸が施工により生じていることが明らかになっている³⁾。本研究では、この実測された凹凸による排水挙動の阻害を、OpenFOAM を用いた数値流体解析によるシミュレーションで確認する。表面の勾配と形状を変えたいくつかの条件についてシミュレーションを行い、排水挙動の結果の比較検討を行う。

2. 新設橋梁の現場計測

2. 1 対象橋梁

本解析で対象とした橋梁の諸元を表-1 に示す。本橋梁は未開通であり、防水層、舗装の施工前に表面形状測定及び散水試験を行った。

2. 2 試験方法と結果

図-1 中の斜線で示す、L 側車線の約 4 分の 1 にあたる 5m×15.47m の範囲を試験範囲とし、床版表面形状の測定を行った。また、同範囲において散水し、表面湿潤状態の経時変化を測定した。測定範囲の横断勾配下部には縦断方向 X=4、8、12m の地点に水抜き穴、X=0、15.45 の地点に排水桝が設置されている。

表面形状の測定には牽引式路面性状測定装置（株式会社クマタカエンジニアリング、MRP-3000）を用いた。測定は試験範囲を 500mm×500mm の格子状に区切ったときの格子線上（縦断方向 11 測線、横断方向 31 測線）で実施した。表面形状測定で得られた床版表面の凹凸を

表-1 橋梁の諸元

道路規格	第 1 種第 3 級
設計速度	V=80km/h
構造形式	単純合成鋼鈑桁橋
橋長	38m
支間	36.4m
幅員	19.842m~18.238m
曲線半径	2000m
斜角	80° 00'00"
縦断勾配	-0.33825%
横断勾配	2%
設計荷重	B 活荷重

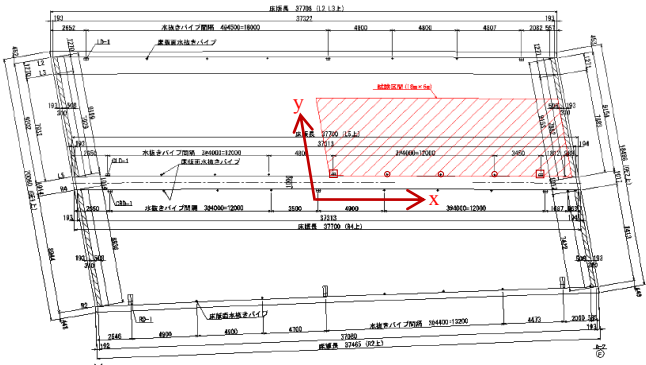


図-1 試験範囲

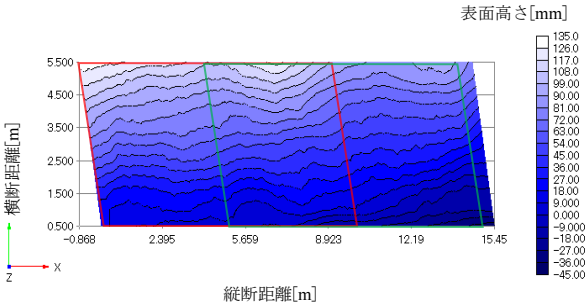


図-2 表面形状のコンター図

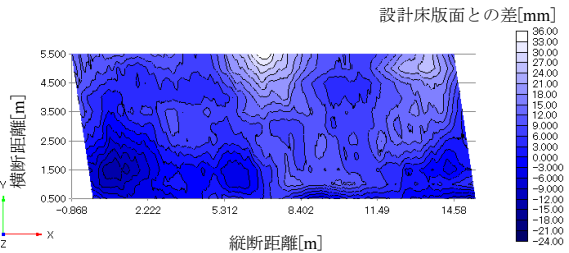


図-3 設計床版面との差



写真-1 散水状況

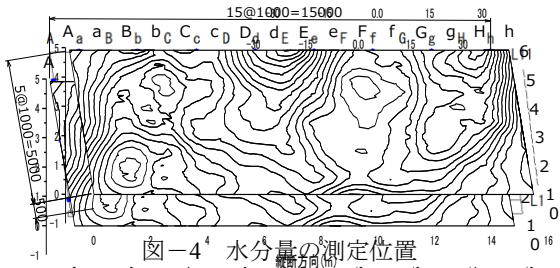


図-2 のコンター図に、設計床版面との差を図-3 に示す。

散水試験においては、まず 12 時 00 分に試験範囲全面に対し総容量 40L の散水を行い、2 時間後の 14 時 00 分に 1 回目の測定を行った。その後 14 時 30 分に試験範囲全面に 30L の追加散水を行い、その 30 分後の 15 時 00 分および 1 時間 15 分後の 15 時 45 分に 2 回目および 3 回目の測定を行った。なお、試験時の環境条件は気温 22.4℃、湿度 77%であった。写真-1 には散水状況を示す。図-4 の青点に水分量の測定位置を示す。各時間での表面水分量を図-5 のコンター図に示した。

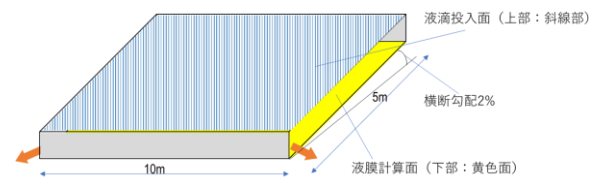
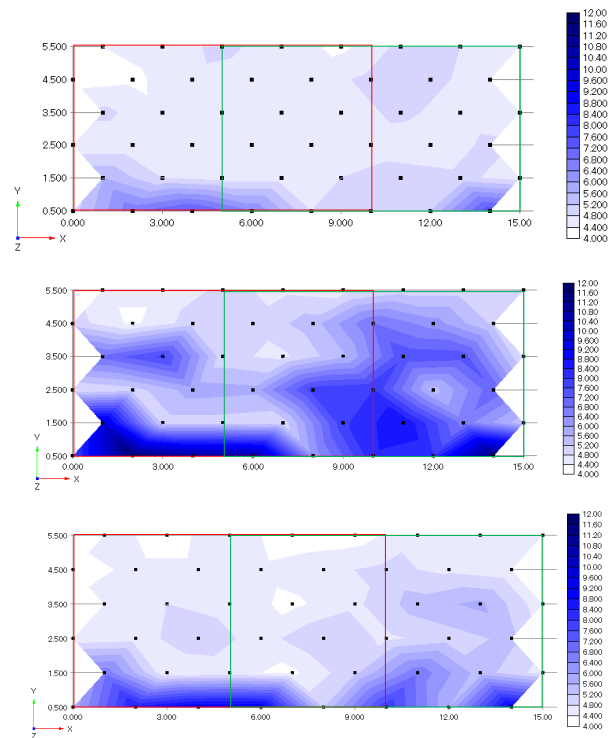
3. 解析手法

解析には OpenFOAM を用いる。OpenFOAM はフリーウェアとして OpenFOAM Foundation または、OpenCFD 社からリリースされている流体及び連続体解析が可能なツールボックスである。本研究の解析では既存の粒子計算ソルバー reactingParcelFoam を利用する。排水シミュレーションは、完全に平坦な面のモデル（平坦表面モデル）と表面に凹凸のあるモデル（凹凸表面モデル）において同条件の解析計算を行い、結果の比較を行う。

4. 解析条件

4.1 モデル形状

モデルは直方体形状をしている。縦断方向長さは 10m とし、横断方向長さは測定範囲と同じ 5m とする（図-6）。ただし、簡単のために対象橋梁の斜角 80 度は 90 度に変更しており、モデルの平面形状は平行四辺形ではなく長方形とした。縦断方向長さ 10m は道路橋床版防水便覧²⁾より排水設備の設置間隔の目安として広く用いられている値として採用した。また、一般的に用いられている横断勾配としてすべてのモデルの横断方向に 2% の勾配を設ける。モデル下面に液膜領域を作成し、液膜計算面とする。液膜計算面の境界条件は noSlip（すべりなし）条件を用いる。コンクリートは多孔質であるが、本解析の条件においてコンクリート面にあたるモデ



ル下面での吸水、吸湿は考慮していない。

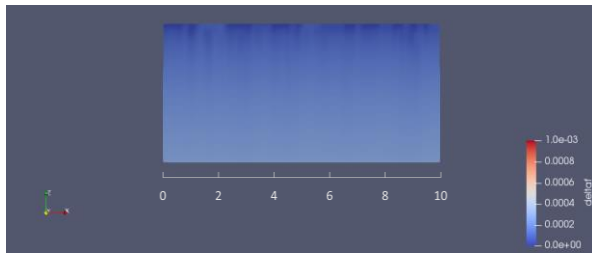
まず、同じ寸法で縦断勾配がなく、平坦な表面を持つモデル（1 ケース）と凹凸のある表面を持つモデル（2 ケース）を作成して、解析結果を比較する。次に、凹凸表面モデルに縦断勾配として 1% の勾配を設けたモデル（2 ケース）を作成して、他は同じ条件で解析を行った。よって合計 5 ケースの解析を実施した。

凹凸表面モデルの作成には図-2 に示した表面形状の現場計測データを用いる。データを 0.5m 毎にサンプリングし、データ間はスプライン曲線で補完する。現場計測結果のうち、縦断方向 X=0~10m のデータから作成した凹凸表面モデル 1、X=5~15m のデータから作成した凹凸表面モデル 2 の 2 種類の異なる表面をもつモデルで解析を行った。

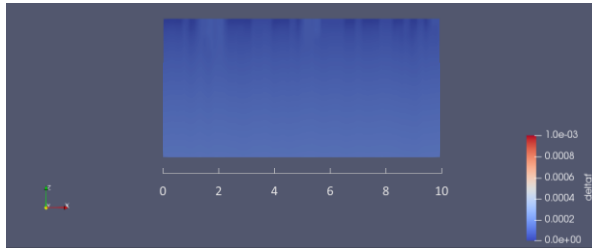
4.2 粒子投入条件

図-6 に示したモデル上面から下面の液膜計算面全面が湿潤状態となるように液滴を投入する。液滴投入点として横断方向 25 点×縦断方向 50 点の 1250 点をランダムに配置した。計算の簡単のため、液滴直径は 1cm としている。投入する液滴の総質量は 30kg とし、計算開始時点から 5 秒間内で一様に、計 30kg を投入するものとする。粒子投入条件は全 5 ケースで同じとしている。

本解析における粒子投入条件は、2 章に示した現場計

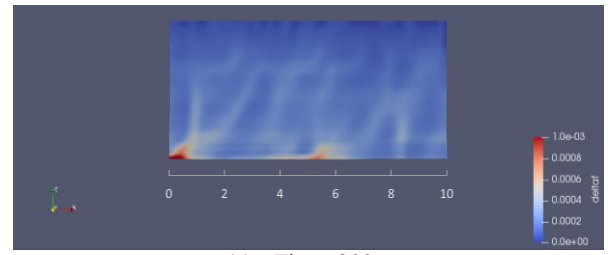


(a) Time=300s

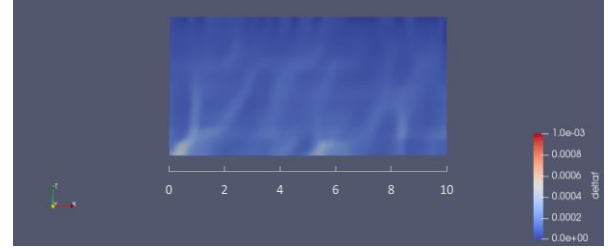


(b) Time=900s

図—7 平坦表面モデル（縦断勾配 0%）の解析結果

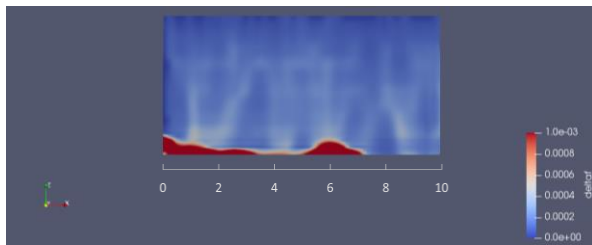


(a) Time=300s

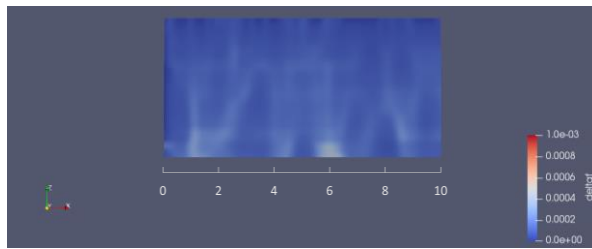


(b) Time=900s

図—10 凹凸表面 1（縦断勾配 1%）の解析結果

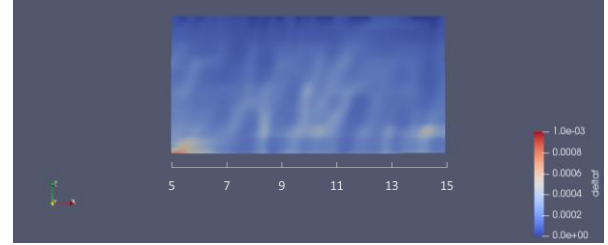


(a) Time=300s

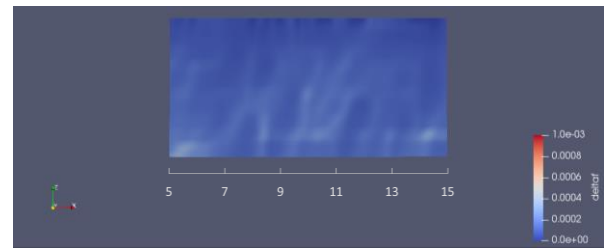


(b) Time=900s

図—8 凹凸表面 1（縦断勾配 0%）の解析結果

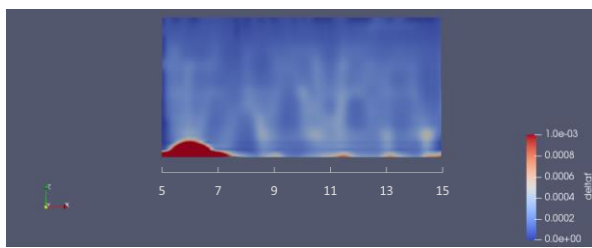


(a) Time=300s

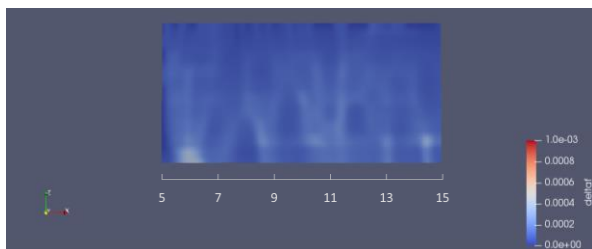


(b) Time=900s

図—11 凹凸表面 2（縦断勾配 1%）の解析結果



(a) Time=300s



(b) Time=900s

図—9 凹凸表面 2（縦断勾配 0%）の解析結果

測での散水量を参考にして決定している。現場計測の散水範囲の縦断方向長さ 15.45m に対し、計算面は縦断方

向長さ 10m である。そのため写真—1 の 1 回目の散水量は 40L であるが、このように解析モデルの計算面全体を湿潤状態にするために十分な量として液滴の総質量を 30kg とし、開始から短時間で散水、その後の排水の時間経過を観察している。

総散水量 30kg を 1 時間当たりで考えると、1 時間降水量 0.6mm/hour の弱い雨となる。5 秒当たりで考えると 1 時間降水量 432mm/hour となる。気象庁の基準では 80mm/hour 以上を猛烈な雨としており、本解析の開始後 5 秒間と同じペースでの長時間の降雨は現実的ではない。本解析に近い降水の記録としては、日本において 10 分間降水量の最高記録は 50mm となっており⁴⁾、これは 5 秒あたりでは 0.42mm の降水である。

4. 3 計算の制御の設定

計算間隔には時間刻み幅自動調整を使用し、結果の出力間隔は 1 秒とした。計算は 900 秒時点で各値の経時変化が小さくなり、おおよその排水傾向が確認できたため 900 秒で終了とした。

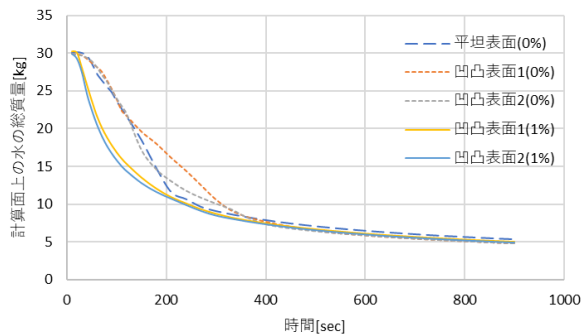


図-12 計算面上の水の総質量[kg]

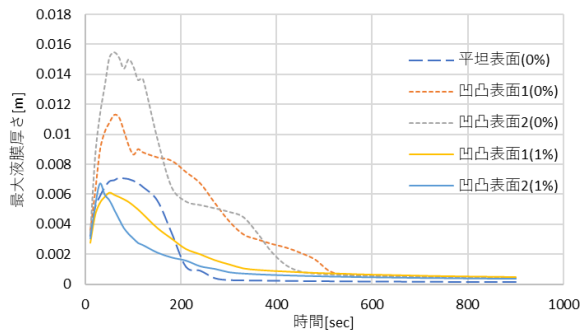


図-13 最大液膜厚さ[m]

表-2 900 秒時点の最大液膜厚さ[mm]

モデル名(縦断勾配)	900 秒時点での最大液膜厚さ
平坦表面(0%)	0.16
凹凸表面 1(0%)	0.32
凹凸表面 2(0%)	0.41
凹凸表面 1(1%)	0.50
凹凸表面 2(1%)	0.34

5. 解析結果

図-7 から図-11 に解析結果の一部を示す。300 秒および 900 秒時点における液膜計算面上の表面液膜厚さを示すコンター図である。カラーバーの範囲は 0mm から 1mm であり、1mm 以上の液膜厚さはすべて赤色で示されている。

縦断勾配を設置していないケースにおいて、液膜計算面上の水は 2%の横断勾配に沿って横断方向に流れた後に、勾配下部で緩やかに縦断方向に流れて側面から排出されている。

5.1 現場測定結果と解析結果との比較

図-5 に示した現場計測における散水試験の結果と図-8、9 に示した解析結果とを比較すると、排水の経過時間、排水設備の設置位置は異なるが、解析結果に見られる滞水箇所と現場計測における水分量の多い箇所は概ね一致している。特に横断勾配下部において、現場計測結果から縦断方向の排水が滞っていると見られる箇所(X=2、6、11、14m 付近)は、解析結果においても計算終了時点で液膜厚さが周辺よりも厚い箇所がある。よって現場計測と解析結果とはある程度似た滞水傾向を示

していると言える。

5.2 1%縦断勾配を設けたモデルとの比較

図-10、図-11 に示したのはそれぞれ図-8、図-9 に示した結果の凹凸表面モデルに 1%の縦断勾配を設けたモデルにおける解析結果である。それぞれの 300 秒時点の表面液膜厚さのコンター図を見て明らかであるように、縦断勾配を設けた影響で初期の排水はより速やかに進行していることが分かる。これは図-12 に示した計算面上の水の総質量の時間経過変化にも明らかである。また、図-13 の計算面上の最大液膜厚さの経時変化から分かるように、計算開始から 300 秒程度の間では、勾配下部の滞水も 1%勾配によって速やかに軽減されていることが分かる。

一方で、900 秒時点における部分滞水の傾向は縦断勾配のあるモデルとないモデルでの解析結果とで 300 秒時点ほどの大きな違いは確認できなかった。900 秒時点での各ケースの最大液膜厚さを表-2 に示す。この表から平坦表面のケースが最も 900 秒時点での最大液膜厚さが小さく、それと比較すると凹凸表面の解析ケースはいずれも液膜の厚い箇所があることが分かる。また、凹凸表面 1 のケース 2 つの 900 秒時点の結果を比較すると、縦断勾配 1%を設けたモデルにおける最大液膜厚さのほうが縦断勾配のないモデルに最大液膜厚さより大きい。このことから 1%縦断勾配が必ずしも部分滞水の軽減に効果的ではないと言える。

6. まとめ

本解析では、現場計測の散水試験の再現と縦断勾配が橋面排水に及ぼす影響のシミュレーションを行った。

これは、防水層や舗装のない状態であり必ずしも実橋での滞水状況を示すものではないが、解析条件の範囲内で床版上に生じる部分的な滞水と床版表面形状には関連性があることを確認できた。

また、1%の縦断勾配を設けた条件における解析結果より、同条件において 1%の縦断勾配がより速やかな排水を促すことが明らかになった。一方で部分滞水の軽減には期待したほどの効果が見られなかった。また、凹凸表面の形状によって 1%縦断勾配の影響の大きさにもばらつきがあることを確認した。

今後の課題としては、縦断勾配の大きさが異なるケースの排水挙動の比較、表面形状の凹凸の多寡・大小による排水挙動の比較等が必要だと考えられる。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路構造令の解説と運用、2015。
- 2) 日本道路協会：道路橋床版防水便覧、2007。
- 3) 安田優子、角間恒、白戸義孝、松本高志：RC 床版で発生する部分滞水現象の調査、土木学会北海道支部論文報告集、2018。
- 4) 気象庁：過去の気象データ／歴代全国ランキング（最終閲覧日：2019 年 11 月 29 日）