

I-24 セラオートマトンによる橋梁路面排水シミュレーション

Drain simulation on road surface of bridge using cellular automaton

保田敬一¹・白木 渡²・島村洋平³・堂垣正博⁴

Keiichi Yasuda, Wataru Shiraki, Yohei Shimamura, and Masahiro Dogaki

抄録：路面の排水は非常に重要であり、近年の集中豪雨の増加など環境条件も変化している中で、安全で円滑な道路交通の確保が困難になることが多くなっている。本研究では、セラオートマトンを用いて路面の水の流れをモデル化し、橋梁路面の排水シミュレーションモデルを構築することを目的とする。多数のセルに分割した空間と大阪の標準降雨強度 90mm/h を用い、様々な勾配と排水柵の間隔を仮定して解析し、橋梁路面排水シミュレーションを行う。そして、得られた結果を検証し、正常に排水柵が機能しているかを検討する。

abstract : Drainage of a road surface is very important. While environmental conditions, such as an increase in local severe rain in recent years, are also changing, reservation of safe and smooth road traffic becomes difficult more often. In this research, the flow of the water of a road surface was modeled using the cellular automaton. It aims at building the drainage simulation model of a bridge road surface. The interval of various slopes and drain is assumed and analyzed using standard rain on-the-strength 90 mm/h of space and Osaka divided into many cells, and a bridge road surface drainage simulation is performed. And the obtained result is verified and it examines whether drain is functioning normally.

キーワード：セラオートマトン，路面排水，橋梁

keywords : Cellular Automaton, drain of load surface, bridge

1. はじめに

我が国は地形が急峻で地盤条件が悪く、しかも台風などにより降水量が多いなど自然条件が厳しい。そのため、降水や地下水による道路の弱体化や法面崩壊、降雨や融雪などによる水溜りが原因で引き起こされる交通事故、あるいは、排水管のつまりによる構造物の機能損失などを防ぐためにも道路排水施設の重要性は極めて高く、道路を築造する場合の最も基礎的な問題として位置づけられる¹⁾。

近年、道路整備の進展とともに道路の建設や管理をとりまく状況は変化し、道路土工の内容も高度化、多様化してきている。同時に、道路に対する社会的ニーズも高まってきており、なかでも、安全で円滑な道路交通の確保に対する要求が非常に強い。このような状況の中で、道路の排水施設の役割はさらに重要になりつつある。ゴミなどによる排水管のつまりや排水しきれなかった水による路面の水たまりにより、安全で円滑な道路交通の確保が困難になることが多い。近年は

集中豪雨が多くなっているように環境条件も変化していく中で、交通量の増大に対して路面の排水をいかに確保していくかが課題となっている。

現在の橋梁の路面排水における排水柵の設置方法の問題点を以下に示す。

①設置した排水柵の全てが有効に機能しているかどうか不明である。例えば、曲線区間内で縦横断勾配が複雑に変化するような場合や幅員が大きく変化するような場合、最初は全ての排水柵が同じような排水能力になるように設定するが、施工誤差やその他様々な要因により柵の能力に必ず差が出る結果となる。

②特定の排水管や排水柵の詰まりにより排水機能が低下した場合、路面排水状態の変化を追従できない。例えば、特定の排水柵の排水不良が他の排水柵に与える影響が不明であること、すなわち、残りの排水柵で排水がどの程度可能であるのかが不明である。

③最大降雨強度から排水柵間隔を設定しているが、降雨強度が変化した場合や、最大強雨強度以下の場合でも安全であるという保証はない。

1: 正会員 博(工) (株)ニュージェック 東京本社 道路グループ

(〒135-0007 東京都江東区新大橋 1-12-13 Tel.03-5625-1801 E-mail: yasudakc@newjec.co.jp)

2: 正会員 工博 工学部 信頼性情報システム工学科 〒761-0396 高松市林町 2217-20

3: 非会員 芦屋市建設部 〒659-0064 芦屋市精道町 7-6

4: 正会員 工博 工学部 都市環境工学科 〒564-8680 吹田市山手町 3-3-35

橋梁の排水樹設置後、排水管や排水樹の詰まりも含めて、全ての樹が有効に機能しているかどうかを再照査することは現在行っていないのが現状である。汎用の流出解析ソフトを用いることで特定の樹の詰まりや路面勾配の変化などはある程度対応できるが、曲線区間で縦横断勾配が複雑に変化するような場合や幅員が大きく変化するような場合、勾配が緩い場合などは解析結果に大きな誤差が生じる可能性がある。これは、入力条件や境界条件の与え方にもよるが、元々、汎用の流出解析ソフトはもっと広範囲の区域を対象にした流出解析を扱うものであり、範囲が狭く局所的で複雑な路面形状への対応は難しいと考えられるためである。

本研究では、人工生命 (AL) 技術の一つであるセルラ・オートマトン (Cellular Automaton) を用いて、路面の水の流れをモデル化し、橋梁路面排水のシミュレーションを行った。CA は、任意の次元の格子空間にセルを配置し、自己と近傍セルの状態に基づくローカルな遷移ルールに従い、単位時間ごとにそれらの状態を変化させるシステムである。このローカルルールを決定することで、大規模な最適化問題も比較的小規模な計算機で解くことが可能になり、多様な現象をシミュレートできる。このような特徴から CA は、様々な分野で見出される複雑な現象をモデル化するのに非常に有効な手法である。現在では、最適解の導出についての有用性が認められ、様々な分野に適用されている。しかし、CA の土木工学分野への適用例は未だ少なく、その研究対象は、機械工学分野や生物工学分野などに集中しているのが現状である。

本研究では、AL 技術の一種である CA によって、多数のセルに分割した空間と大阪の標準降雨強度 90mm/h を用い、様々な勾配と排水樹の間隔を仮定して解析し、橋梁路面排水シミュレーションを行う。そして、得られた結果を検証し、正常に排水樹が機能しているかを検討する。

2. 路面排水

(1) 現状の排水樹の設置位置

道路橋示方書²⁾には、「橋面には排水をすみやかに行うために必要な横断こう配をつけ、路肩には必要な間隔に十分な大きさの排水樹を設けるものとする。箱桁、トラス部材などの閉断面および床版で、構造上、水のたまりやすい場所には水抜き孔を設けるのがよい。」と記載されている。また、その排水樹の設置条件などは、以下のように記されている。

- ・20m 以下の間隔で排水樹を配置する。
- ・縦断勾配が凹となる区間では、その底部に排水樹を必ず 1 個、その両側にそれぞれ 3~5m 程度離して設ける。ただし、あまり間隔が短すぎると床版へ悪影響を

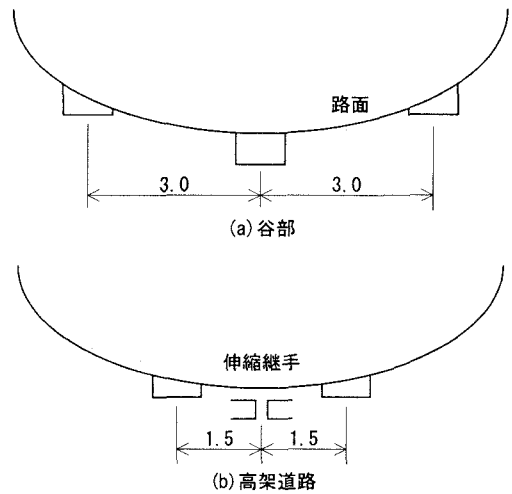


図-1 谷部や高架道路の場合の樹配置 (単位:m)

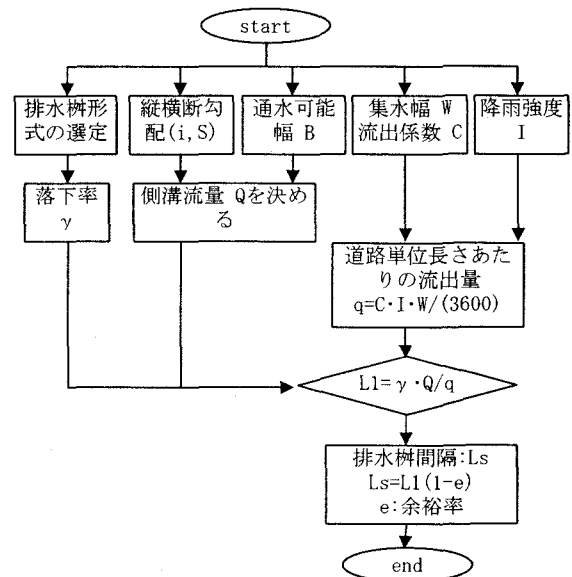


図-2 排水樹間隔決定のフロー

与えたり、維持管理上好ましくないので注意を要する (図-1 参照)。

- ・伸縮装置付近には、排水樹を設けて伸縮装置への流入量を減らすなどの配置が望ましい。また、縦断勾配の凹となる区間の中心に伸縮装置が設置される場合、この両側に 1.5m 程度離して排水樹を設置する (図-1 参照)。
- ・緩曲線区間あるいは S 字曲線区間の変曲点付近に生じる横断勾配が水平か、水平に近い区間では、縦断勾配も考慮して排水樹の設置位置を十分検討しなければならない (図-1 参照)。
- ・舗装面より 5~10mm 程度低い位置に排水樹を設置する。そのために、床版などの鉄筋をやむをえず切断する場合、切断した鉄筋に相当する補強鉄筋を排水樹の周囲に配置しなければならない。
- ・床版や高欄および舗装の施工に際しては、排水樹に

コンクリートあるいはアスファルト合材などが入らないよう事前に十分な処理をとらなければならない。

・排水柵の設置後、未舗装で長時間放置する場合には、柵の側面に孔（φ20~30mm）を開けて排水する。

(2) 排水柵間隔の設定方法

排水柵間隔の設定方法は以下のとおりである。

- ①初期値の設定（柵形式 [落下率]、通水可能幅、降雨強度、縦横断勾配、集水幅、流出係数など）
- ②側溝流量Qの算出（流水断面積：A、径深：R、粗度係数；n、縦断勾配：i より）
- ③道路単位長さ当たりの流出量qの算出（流出係数：C、降雨強度：I、集水幅：Wより）
- ④排水柵間隔の決定

排水柵間隔の決定フローを図-2に示す¹⁾。

3. セラオートマトン(Cellular Automaton:CA)

CA法は von Neumann がその概念を提唱し, Ulam との対話によってその基礎が築かれたものとされている。1986年に Wolfram が物理的考察を行い, 物理系への応用がなされるようになった。数学的には「空間状態と時間に対する離散的なモデル」と言うことが出来るが, 具体的には次のような手続きによる³⁾。

- ・解析対象をセルと呼ばれる領域で定義する。
- ・各々のセルの状態を離散量で定義する（本来は何らかの物理的な意味を持っている）。
- ・次の時間の着目セル状態は現時刻の近傍のセルとの相互作用（近傍則またはルールと称する）のみによって決定される。
- ・時間発展させ各時間での状態量を順次求める。

これを数式で表現すると, 式(1)のようになる。

$$a_i^{(t+1)} = F[a_{i-r}^{(t)}, a_{i-r+1}^{(t)}, \dots, a_i^{(t)}, \dots, a_{i+r}^{(t)}] \quad (1)$$

ここで時刻 t の i 番目のセルの状態をとし, i 番目のセル状態は近傍 i-r から i+r までのセルの状態を変数とする遷移関数 F で与えられる。この遷移関数 F が近傍則に相当する³⁾。

CA法においては「近傍則」がもっとも重要である。従来の系全体の支配方程式に換わるもので系の特性を十分吟味して決定する必要がある。また, 系全体の情報を得ることなく近傍のみの情報で系の挙動を表現するため, 原理的に高度な並列性を持っている³⁾。

4. 路面排水空間のモデル化

(1) 解析する対象物

本研究では, 第1種第1級のアスファルト舗装された幅員 8.0m×橋長 60m の2車線道路を解析対象物とする。ここでの道路幅は, 道路構造令⁴⁾に示されてい

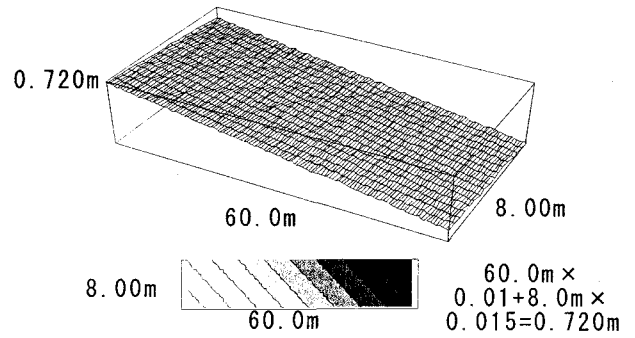


図-3 縦断勾配 1.0%, 横断勾配 1.5%の地形図と等高線

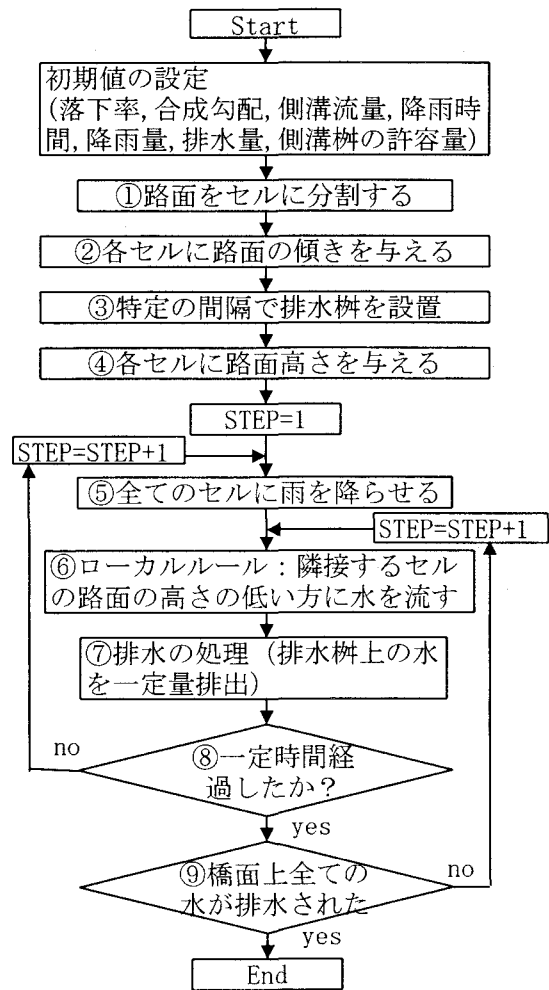


図-4 解析のフローチャート

る道路1車線の幅員 3.5m を2車線と, 両端に設置した路肩の幅 0.50m を採用した。また, 本研究で解析する排水柵の最大設置間隔が 20m であるため, このときに排水柵を数個配置できることを考慮して橋長を決定した。排水柵のふたには落下穴面積 1.75m×103cm²の格子を用いた, 縦断勾配は 1.0%, 3.0%, 5.0%の3ケース, 横断勾配は 1.5%片勾配を採用した。図-3に縦断勾配 1.0%, 横断勾配 1.5%の路面と等高線を示す。な

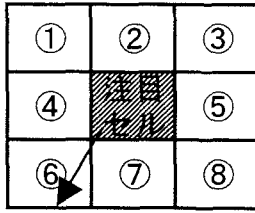


図-5 近傍セル

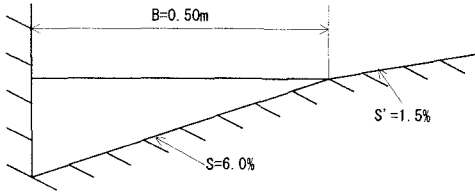


図-6 排水断面形状

お、路面の要素分割は $0.50\text{m} \times 0.50\text{m}$ のメッシュとし、 $8.0\text{m} \times 60.0\text{m}$ の路面を $16 \times 120 = 1920$ に分割した。

(2) 解析上の仮定

解析上の仮定は、次のとおりである。

- 1) 解析対象には、降雨以外の水の供給はないものとする。
- 2) 降雨は、常に同じ降雨強度を保つ。
- 3) 排水樹の落下率は、変化しないものとする。
- 4) 水の流速は一定とする。

(3) 数値解析の手順

本研究における数値解析では、まず、多数のセルに分割した路面に傾き方向を与える。つぎに、1ステップごとに計算で得られた雨量を降らす。その後、先にごった路面の傾き方向で設定したローカルルールに基づき水を流す。以上の手順を、路面上の水がすべて排水されるまで繰り返す。ただし、降雨時間は1時間と定める。以上の解析手順を以下に示す。また、図-4に解析のフローチャートを示す。

- ① 析対象物を多数のセルに分割する。
- ② それぞれのセルに路面の傾き方向を与える。
- ③ ある間隔で排水樹を設置する。
- ④ 各セルに地盤の高さを与える。
- ⑤ ステップごとに各セルに雨を降らす。
- ⑥ 路面の傾き方向で設定したローカルルールに基づき水を流す。
- ⑦ 排水樹のセル上にある水を一定量排水する。
- ⑧ 1時間経過すれば手順⑨へ進み、1時間以内ならば手順⑤へ戻る。
- ⑨ すべての水が排水されるまで、以上のステップを繰り返す。
- ⑩ 排水完了。

(4) 条件設定

a) 路面の傾き

路面の傾き方向は、図-5に示すように、着目しているセルとその周辺のセルが縦断勾配と横断勾配により、どの方向に傾いているかを求め、各セルにその傾き方向を設定する。なお、様々な路面に対応できるように傾き方向を作成した。

b) ローカルルール

隣接するセルの高さの低い方に水を流す。すなわち、水の流れ方は、①で説明した傾き方向に対応させて決定し、任意の方向に水が流れるように設定する。このときの流量配分は、路面の縦断勾配、横断勾配、合成勾配の比で決定する。この際、路面の傾きのみを考慮しており、水面の傾きは無視している。

c) 流量配分

縦断勾配と横断勾配の合成勾配から決定する。

d) 地覆部分

水は流れない。

(5) 現状の設定方法による排水樹間隔

本研究の目的の一つが、現在の排水樹間隔で正常に排水樹が機能しているかを確認することである。そのため、従来の方法を用いて本研究で採用した解析対象物の排水樹間隔を求め、それを用いて解析する。そこで、以下に従来の排水樹間隔を求める計算式およびその結果を記述する。

側溝樹の形状は図-6に示す。落下率は阪神高速道路路公団が採用している0.70、降雨強度は排水工指針に記載されている大阪の標準降雨強度 90mm/h を採用する。本研究では、標準降雨強度である 90mm/h の1ケースしか計算を行っていないが、その理由として、設計で用いるのがこの値のみであり、他の値を用いて計算を行う必要がないことがあげられる。本来は、 70mm/h や 50mm/h 、あるいは 90mm/h を超える場合も計算を行い、排水がうまく行えることを示す必要があると考えられるが、本研究ではローカルルールの妥当性を確認することが目的であったため、設計で用いる 90mm/h しか適用しなかった。今後は、 70mm/h や 50mm/h 、あるいは 90mm/h を超えるケースについても分析を行い、更なる知見を得る必要があると考える。また、本研究ではアスファルト舗装の道路を採用することから流出係数は0.90、マンシングの粗度係数は0.013を用いる。

$$\text{通水面積 } A(\text{m}^2) = \frac{1}{2} \times (B \times S) \times B \quad (2)$$

$$\text{潤辺 } P(\text{m}) = \frac{B}{2} \times \sqrt{1 + S^2} \quad (3)$$

$$\text{径深 } R(\text{m}) = \frac{A}{P} \quad (4)$$

側溝流量 Q(m³/s) $Q = \frac{1}{n} \cdot A \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot i^{\frac{1}{2}}$ (5)

排水柵の排水量 Q' (m³/s) $Q' = r \cdot Q$ (6)

道路単位長さ当たりの流出量 q(m³/s)

$q = \left(\frac{1}{3600} \right) \cdot C \cdot I \cdot W$ (7)

最大柵間隔 L1(m) $L_1 = r \cdot \frac{Q}{q}$ (8)

排水柵の間隔 Ls(m) $L_s = L_1 \times (1-0.1)$ (9)

ここで、n：マンニングの粗度係数

i：縦断勾配

r：落下率

C：流出係数

I：降雨強度(mm/h)

W：集水幅(m)

である。

上記の式に値を代入して計算すると以下の結果が得られる。

縦断勾配 1.0%・横断勾配 1.5%：排水柵間隔は 11m.

縦断勾配 3.0%・横断勾配 1.5%：排水柵間隔は 18m.

縦断勾配 5.0%・横断勾配 1.5%：排水柵間隔は 20m.

ただし、縦断勾配 5.0%・横断勾配 1.5%の場合、計算上では 23m となるが排水工指針の規定により 20m となる。

(6) 1ステップに値する時間

1ステップに値する時間は、縦断勾配と横断勾配から得られる合成勾配を用いて流速を求め、各セルの長さである 0.50m を、先に求めた流速で割ることにより得られる。この時間を1ステップとして用いる。以下にそれぞれ得られた解を記述する。

縦断勾配 1.0%・横断勾配 1.5%：流速 0.17m/s, 1ステップの時間 3.0 秒。

縦断勾配 3.0%・横断勾配 1.5%：流速 0.23m/s, 1ステップの時間 2.2 秒。

縦断勾配 5.0%・横断勾配 1.5%：流速 0.28m/s, 1ステップの時間 1.8 秒。

(7) 降水流量の設定

降水流量は、従来の方法と同様に式(10)の合理式を用いて計算する。

$Q = \frac{1}{3600} \cdot C \cdot I \cdot S$ (10)

ここで、Q：雨水流出量(m³/s)

C：流出係数

I：降雨強度(mm/h)

S：集水面積(km²)

である。

上式から、降雨強度 90mm/h の雨が1ステップごとに各セルに降る雨量を求める。この結果を以下に示す。

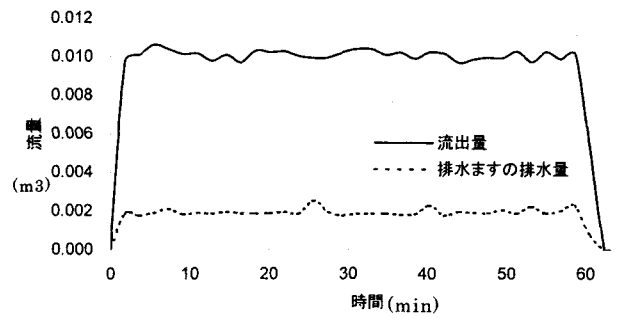


図-7 縦断勾配 1.0%における流出量と排水柵の排水量の関係

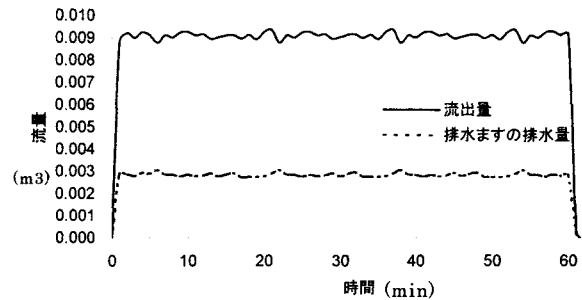


図-8 縦断勾配 3.0%における流出量と排水柵の排水量の関係

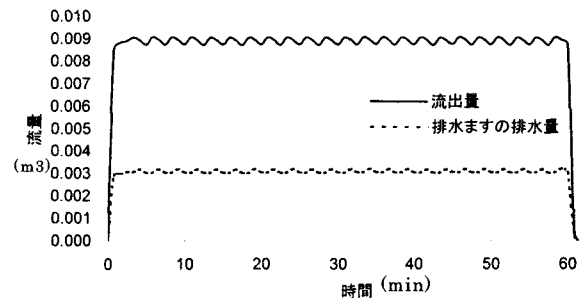


図-9 縦断勾配 5.0%における流出量と排水柵の排水量の関係

$\frac{I}{60 \times 60 \times 1000} \times A_s = R_f$ (11)

ここで、Rf：各セルに降る雨量(m³/s)

As：セルの面積(m²)

I：降雨強度(mm/s)

である。ここで得られた Rf に、それぞれの解析対象物における1ステップの時間との積から得られた雨量を、ステップごとに各セルに降らせる。その結果を以下に記述する。

縦断勾配 1.0%・横断勾配 1.5%：降水流量は 1.9×10-5m³.

縦断勾配 3.0%・横断勾配 1.5%：降水流量は 1.4×10-5m³.

縦断勾配 5.0%・横断勾配 1.5%：降水流量は 1.1×10-5m³.

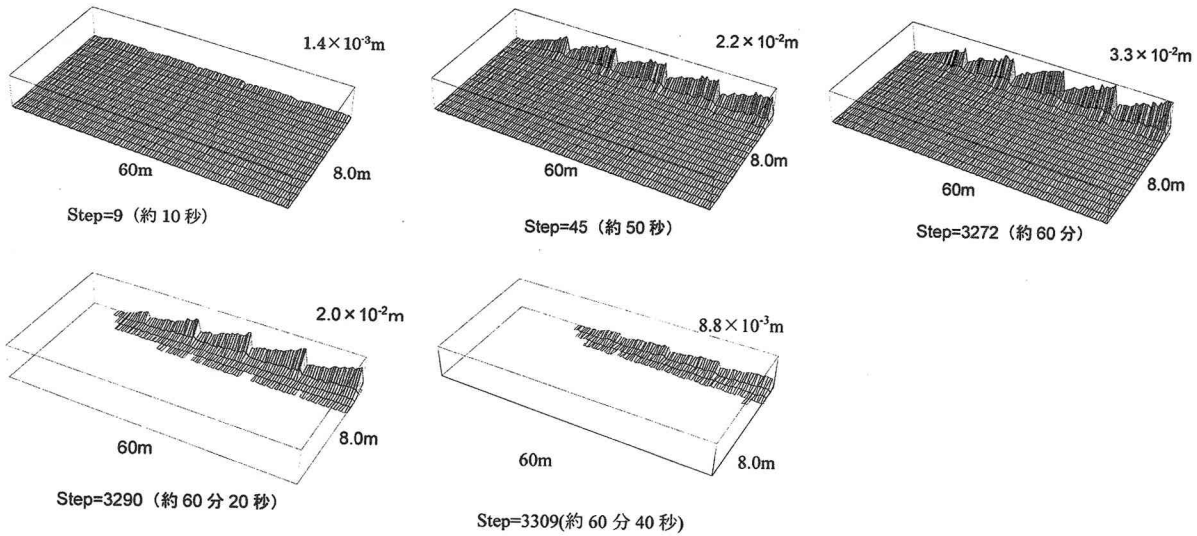


図-10 縦断勾配 1.0%, 横断勾配 1.5%における水の流れ

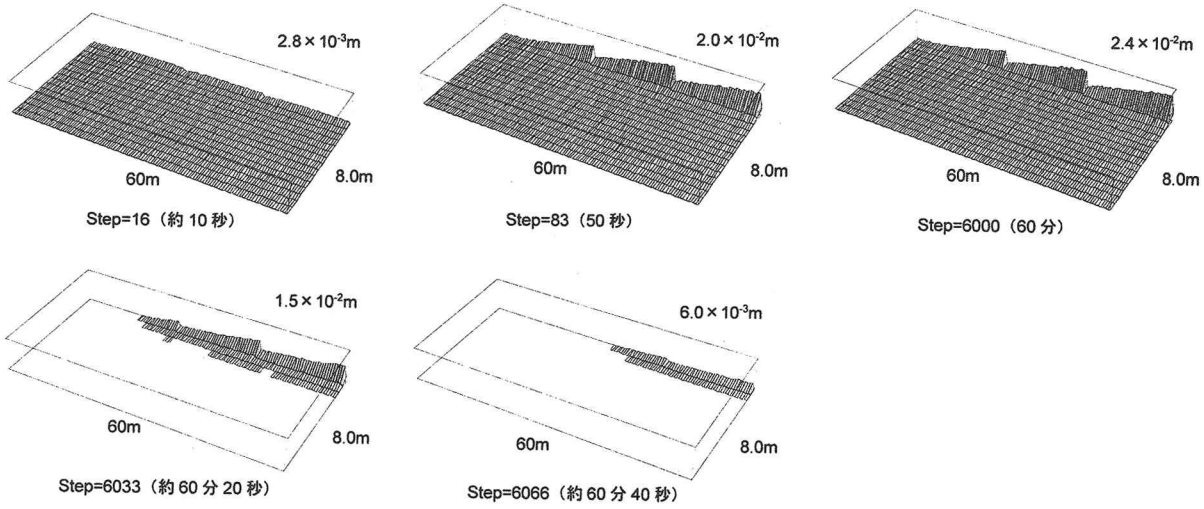


図-11 縦断勾配 3.0%, 横断勾配 1.5%における水の流れ

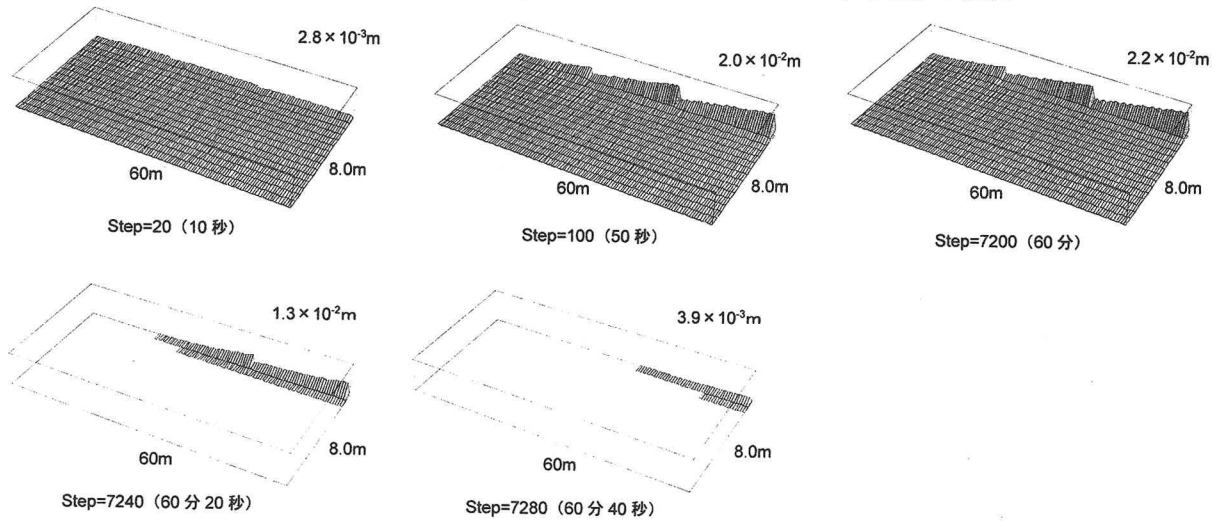


図-12 縦断勾配 5.0%, 横断勾配 1.5%における水の流れ

5. CAによるシミュレーション結果とその考察

(1) 流出量と排水柵の排水量の関係

図-7～図-9 解析対象物から流出していく水量と

排水樹の排水量の関係を示す。これらの結果、解析対象物から流出していく流量が、ある一定値の付近で維持されていることがわかる。これは、この状態における排水樹が、排水できる許容量に達していることを表している。

縦断勾配を大きくするにつれて排水樹の排水量が増加しているのは、排水樹1つの排水量が、勾配を大きくすることにより増加していることに起因している。そのため、狭い間隔で排水樹を設置している縦断勾配1.0%の方が、排水樹の個数は他のものに比べ多いが、排水量は他のものに比べ小さくなっている。さらに、流出量を比較すると、縦断勾配3.0%と5.0%では多少の違いは見られるが、縦断勾配1.0%はその2つに比べて流出量が大きくなっている。これは、この解析対象物内で排水できなかつた水量の多さを示している。つまり、縦断勾配3.0%、5.0%においては、ある程度の排水をしているが、縦断勾配1.0%においては、他の2つに比べると排水できていないことを示している。これらのことから、この解析対象物において縦断勾配1.0%では、この雨量を排水することは困難であることがわかる。

(2) 水の流れ

図-10に、縦断勾配1.0%で横断勾配1.5%の場合、図-11に縦断勾配3.0%で横断勾配1.5%の場合、図-12に縦断勾配5.0%で横断勾配1.5%の場合における水の流れ図を示す。ここで、図-10、11、12において、60mというのは橋梁の延長で、8.0mは橋梁の幅員を、縦軸の値は地覆部分の水深を表している。これらの結果、縦断勾配1.0%の場合において、水が設定した通水幅を超えてしまうことがわかった。すなわち、設定している通水断面を若干越えてしまう結果(通水断面の高さ:0.03mより最大水深:0.033mが大きくなる)となった。しかも、降雨開始後2分程度で通水断面を越えてしまう。他の2つの縦断勾配については、通水幅を超えるほどの量の水が溜まることはなかった。しかし、本解析において、落下率の変化、および雨以外の水の供給を考慮していないため、実際にこのような雨が降った場合、どのような結果が得られるか定かではない。また、低い方にいけばいくほど側溝樹に溜まる水が増加しているため、この道路の下方部分では側溝樹を水があふれている可能性がかなり高いと思われる。そのため、降雨強度90mm/hの雨において、本研究の設定では水が側溝樹をあふれ出すことはなかったが、もう少し長ければあふれ出していたと考えられる。さらに、落下率が減少していくことを考慮すれば、このときもあふれ出していたと考えられる。このため、本研究を発展させていかなければ正確なことはいえないが、現在の排水樹間隔では、設定した降雨量を排水することは困難であると考えられる。

5. 検証

CAを用いた橋梁路面排水シミュレーションでは結果が現実とうまく合致しているかに関して検証するのが難しい。そこで、本研究では以下の2つの方法で結果の妥当性を検証した。

①設定した時間内に降らせた降雨量と全ての樹から排出された排水量の合計とが一致していることを確認した。

②汎用の流出解析プログラムを用いて、ノードに排水樹を、リンクには排水樹間の長さ、排水断面形状、粗度係数などを与え、流出解析を行った。得られた流路の時間経過ごとの水深と本研究で得られたCAによる水の流れを比較し、結果に大差ないことを確認した。

ただし、本研究で用いた橋梁路面は一定勾配で幅員も一定であり、CAによる解析結果が汎用流出解析ソフトに比べて特に優れているとはいえない。縦横断勾配が複雑に変化したり、幅員が極端に変化するような条件でないとCAの有効性を検証したことにはならないと思われるが、少なくとも単純なモデルではCAと汎用解析の結果とが大差ないことだけは確認できたといえる。

また、計算時間やモデル化、入力データの作成時間についても、CAと汎用解析手法とで比較を行った。CAの場合、格子状に区切った路面データの高さだけを計算するだけなので、時間はそれほどかからないが、プログラミングには時間がかかる。計算時間は使用するコンピュータの能力にもよるが、本研究で用いた単純なモデルでは汎用解析プログラムの方が計算終了時間は倍以上早かった。もっとも、路面高倍が複雑あるいは定式化が困難、汎用解析プログラムでは計算が困難な事例になってくると計算時間の差は少なくなるかあるいは逆転することも考えられるが、今回のケースではCAが有利とはならなかった。

本研究では、路面排水モデルでCAが適用できることを示すことが目的であったため、定式化が困難な事例、路面勾配が複雑なモデルなどは扱っていない。今後、このような事例でも検証を重ね、路面排水モデルでのCAの有効性を高めていくことが課題である。

6. おわりに

本研究では、CAを用いて橋梁路面排水シミュレーションモデルの構築を試みた。高さが低い方に水が流れるという単純なローカルルールにより路面排水がうまくCAで表現できることが示された。本研究の特徴は以下のとおりである。

1) アスファルト舗装された道路を解析対象とし、これ

を多数のセルに分割して、各セルにそれぞれ地盤の高さを与えた。

2) すべての路面に雨を降らせ、側溝柵が正常に機能しているかを検証し、かつ、側溝柵に水が溜まる経過を数値的に観測できるよう設定した。

3) ローカルルールに従って、路面上の水がすべて排水されるまでシミュレーションを繰り返すよう設定した。

4) 路面の勾配によって生じる傾きに基づきローカルルールを設定した。

今回の研究では、縦横断勾配が一定の単純なモデルであったが、今後は曲線区間で縦横断勾配が複雑に変化するようなケースでのシミュレーション、特定の排水柵が管などの詰まりなどにより機能しなくなった場合のシミュレーション、また、降雨強度が変化した場

合のシミュレーション、さらには排水柵の自動生成などにも対応できるように改良を加えていく必要がある。また、必要に応じて実測や実験による検証も行っていきたいと考える。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路土工 排水工指針，1987年6月。
- 2) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説，I 共通編，1996年12月。
- 3) http://www.fuji-ric.co.jp/prom/fukuzatsu/what_ca.html
- 4) (社)日本道路協会：道路構造例の解説と運用，1983年2月。
(2004.5.20受付)