

セルラオートマトンによる橋梁排水柵の最適配置

The optimal allocation of drain on road surface of bridge using cellular automaton

保田敬一*, 白木 渡**, 島村洋平***, 堂垣正博****

Keiichi YASUDA, Wataru SHIRAKI, Yohei SHIMAMURA and Masahiro DOGAKI

**博士(工学) (株) ニュージェック, 総合計画・環境部 (〒542-0082 大阪市中央区島之内 1-20-19)

**工博 香川大学教授, 工学部信頼性情報システム工学科 (〒761-0396 高松市林町 2217-20)

***芦屋市建設部 (〒659-0064 芦屋市精道町 7-6)

****工博 関西大学教授, 工学部土木工学科 (〒564-8680 吹田市山手町 3-3-35)

The optimal allocation of drain on the road surface of bridge is very important to keep a safety driving under heavy rains. However, this issue has not been taken seriously in bridge design. In recent years, many troubles for drain have occurred due to concentrated heavy rains. In this study, a simulation method for modeling the water flow and the optimal allocation of drain on the road surface of bridge is proposed using cellular automaton.

Key Words: Cellular Automaton, drain of road surface, bridge

キーワード: Cellular Automaton, 路面排水, 橋梁

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。

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。一方、集中豪雨の増加など自然環境は変化してきていることや、周辺環境への配慮から夜間作業の増加など道路工事環境も変化してきている。このように、工事条件はますます厳しくなっているため、これまで以上に現場の自然条件や地形条件の十分な調査と、これに的確に対応した設計、施工、維持管理などが今まで以上に必要となる。

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、最初は同じような排水能力になるように設定するが、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。

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、正常に排水枦が機能しているかを検討する。

2. 路面排水

2.1 排水施設の必要性

道路表面には、路面の排水を考慮して横断勾配が設けられている。そこで、道路構造令²⁾では、車道と路肩、分離帯を除く中央帯に横断勾配を設けるよう定めている。勾配の大きさは路面の状態により異なるが、セメントコンクリート舗装およびアスファルトコンクリート舗装の場合1.5%~2.0%、その他の場合は3.0%以上5.0%以下となっている。このように路面に勾配を設けるのは、降水を路面から排除するためである。しかし、排水効果を上昇させるために勾配を大きく設けると、走行時に車が滑りやすくなる。また、運転時のハンドル操作に違和感を感じるようになる。このため、気象状況、線形、道路の幾何構造、2車線道路での対向車の影響などを総合的に判断し、運転上安全で路面排水が円滑にできるように決定されたのが上記に示した値である。

以上の理由から、路面に大きな勾配を設けることで排水を良好にすることはできない。そこで、その他の方法を用いて路面排水を改善する必要がある。その一つとして、排水施設を設ける方法がある。この施設は、道路交通の安全、道路構造の保全を確保するのに重要な役割をもつものである。これを的確に設置することで、上述したように勾配を大きくすることなく、水を排水することが可能になる。

2.2 排水の効果

排水施設の整備によって得られる効果には、以下のものが挙げられる。

- ・降雨や融雪による地表水、地下水、地下水から浸透してくる降水などによる道路の弱体化を防止する。
- ・雨水による斜面の洗掘や崩落を防止する。
- ・路面の滞水による交通の停滞やスリップ事故などを防止する。

排水計画は、上記の項目を考慮して行われる。

現状の排水施設の計画では、道路排水の対象は主として降雨であり、いかなる強い降雨の場合でも完全に排水することが望ましいが、経済的に得策ではないので、道路の安全を保持し、維持するために必要な排水能力は、計画道路の種類、規格、交通量および沿道の状況を十分考慮して選定される。具体的には、道路の計画交通量と道路種別から排水能力の高さと降雨確率年を定めている。また、個々の排水施設についても、排水の目的、排水施設の立地条件、計画流量を超過した場合に予想される周辺地域に与える影響、経済性を考慮して排水施設の規模を決定している。したがって、排水計画は、前述したような排水効果を得るという面だけでなく、コスト面も考慮する必要がある。

2.3 現状の排水枦の設置位置

道路橋示方書³⁾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

分な大きさの排水枦を設けるものとする。箱げた、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、その排水枦の設置条件などは、以下のように記されている。

- ・20m 以下の間隔で排水枦を配置する。
- ・縦断勾配が凹となる区間では、その底部に排水枦を必ず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、排水枦を設けて伸縮装置への流入量を減ずる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 程度離して排水枦を設置する(図-1 参照)。
- ・緩和曲線区間あるいは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枦の設置位置を十分検討しなければならない(図-1 参照)。

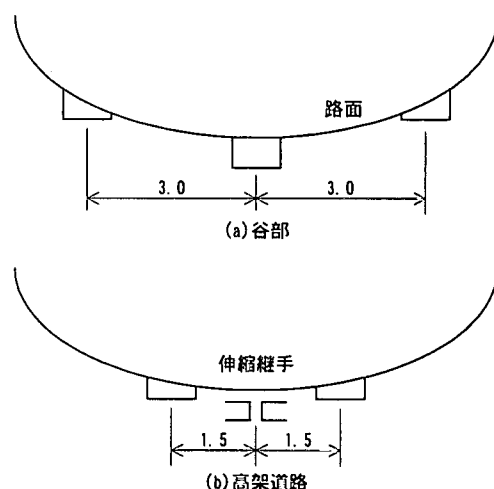


図-1 谷部や高架道路の場合の枦配置 (単位:m)

- ・舗装面より5~10mm 程度低い位置に排水枦を設置する。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枦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、排水枦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。
- ・排水枦の設置後、未舗装で長時間放置する場合には、枦の側面に孔(φ20~30mm)を開けて排水する。

2.4 排水枦間隔の設定方法

排水枦間隔の設定方法は以下のとおりである。

- ①初期値の設定(枦形式[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

3. 空間のモデル化

3.1 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。ここの道路幅は、道路構造令に示されている道路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 $1.75\text{m} \times 103\text{cm}^2$ 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-2に縦断勾配1.0%、横断勾配1.5%の路面と等高線を示す。なお、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。

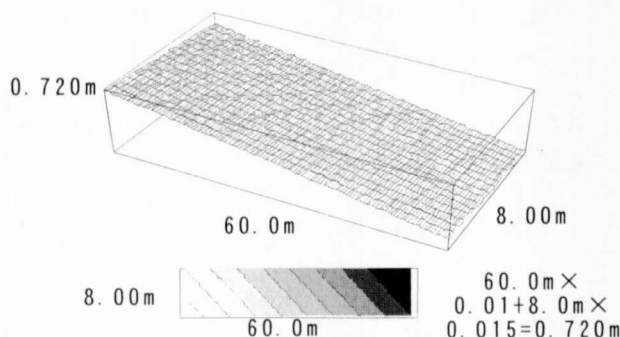


図-2 縦断勾配1.0%、横断勾配1.5%の地形図と等高線

3.2 解析上の仮定

解析上の仮定は、つぎのとおりである。

- 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) 排水柵の落下率は、変化しないものとする。
- 4) 水の流速は一定とする。

3.3 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、先に与え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-3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 ある間隔で排水柵を設置する。
- 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 排水柵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。

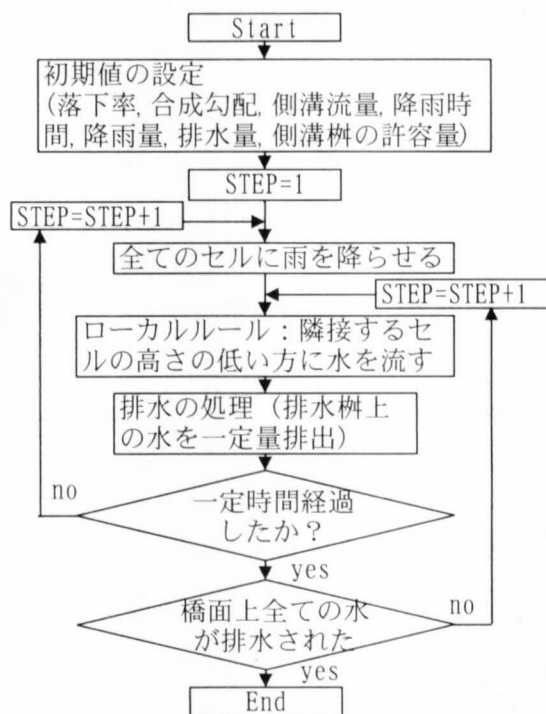


図-3 解析のフローチャート

3.4 条件設定

①路面の傾き

路面の傾き方向は、図4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。

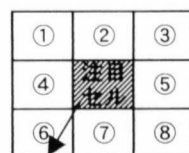


図-4 近傍セル

②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。

②流量配分

縦断勾配と横断勾配の合成勾配から決定する。

③地覆部分

水は流れない。

3.5 現状の設定方法による排水柵間隔

本研究の目的の一つが、現在の排水柵間隔で正常に排水柵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枡間隔を求め、それを用いて解析する。そこで、以下に従来の排水枡間隔を求める計算式およびその結果を記述する。側溝枡の形状は図-5に示す。落下率は阪神高速道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。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, マニングの粗度係数は0.013を用いる。

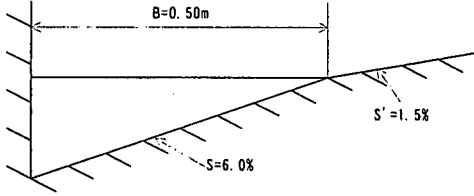


図-5 排水断面形状

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

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

$$\text{径深 } R(\text{m}) \quad R = \frac{A}{P} \quad (3)$$

$$\text{側溝流量 } Q(\text{m}^3/\text{s}) \quad Q = \frac{1}{n} \cdot A \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot i^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$\text{排水枡の排水量 } Q'(\text{m}^3/\text{s}) \quad Q' = r \cdot Q \quad (5)$$

道路単位長さ当たりの流出量 $q(\text{m}^3/\text{s})$

$$q = \left(\frac{1}{3600} \right) \cdot C \cdot I \cdot W \quad (6)$$

$$\text{最大枡間隔 } L_1(\text{m}) \quad L_1 = r \cdot \frac{Q}{q} \quad (7)$$

$$\text{排水枡の間隔 } L_s(\text{m}) \quad L_s = L_1 \times (1 - 0.1) \quad (8)$$

ここで、 n ：マニングの粗度係数

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%：排水枡間隔は 11m。

縦断勾配 3.0%・横断勾配 1.5%：排水枡間隔は 18m。

縦断勾配 5.0%・横断勾配 1.5%：排水枡間隔は 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。

3.6 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。

3.7 降水流量の設定

降水流量は、従来の方法と同様に式(9)の合理式を用いて計算する。

$$Q = \frac{1}{3600} \cdot C \cdot I \cdot A \quad (9)$$

ここで、 Q ：雨水流出量(m^3/s)

C ：流出係数

I ：降雨強度(mm/h)

A ：集水面積(km^2)

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。

$$\frac{I}{60 \times 60 \times 1000} \times A_s = R_f \quad (10)$$

ここで、 R_f ：各セルに降る雨量(m^3/s)

A_s ：セルの面積(m^2)

I ：降雨強度(mm/s)

である。ここで得られた R_f 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 $1.9 \times 10^{-5} \text{m}^3$ 。

縦断勾配 3.0%・横断勾配 1.5%：降水流量は $1.4 \times 10^{-5} \text{m}^3$ 。

縦断勾配 5.0%・横断勾配 1.5%：降水流量は $1.1 \times 10^{-5} \text{m}^3$ 。

4. CA によるシミュレーション結果とその考察

4.1 流出量と排水枡の排水量の関係

図-6(a)～6(c)に解析対象物から流出していく水量と排水枡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枡が、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枡の排水量が増加しているのは、排水枡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、狭い間隔で排水枡を設置している縦断勾配 1.0%の方が、排水枡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っ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。

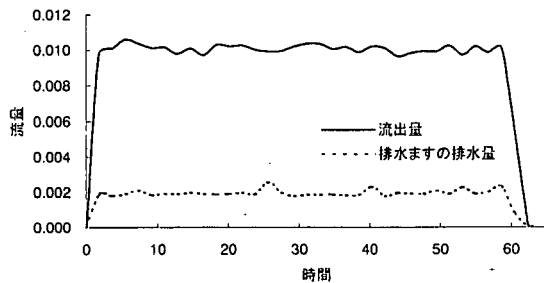


図-6(a) 縦断勾配 1.0% における流出量と排水枡の排水量の関係

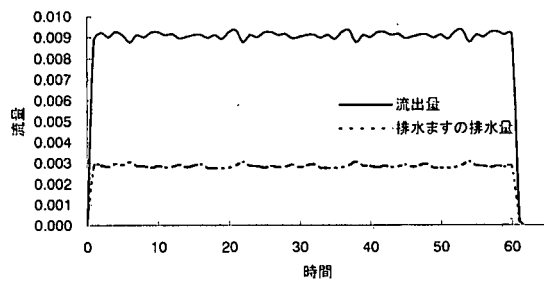


図-6(b) 縦断勾配 3.0% における流出量と排水枡の排水量の関係

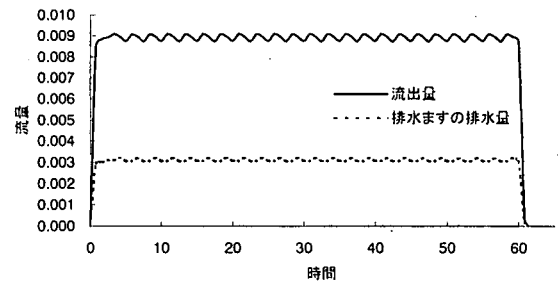


図-6(c) 縦断勾配 5.0% における流出量と排水枡の排水量の関係

4.2 水の流れ

図-8(a)に、縦断勾配 1.0% で横断勾配 1.5% の場合、図-8(b)に縦断勾配 3.0% で横断勾配 1.5% の場合、図-8(c)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枡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枡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枡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言いえないが、現在の排水枡間隔では、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。

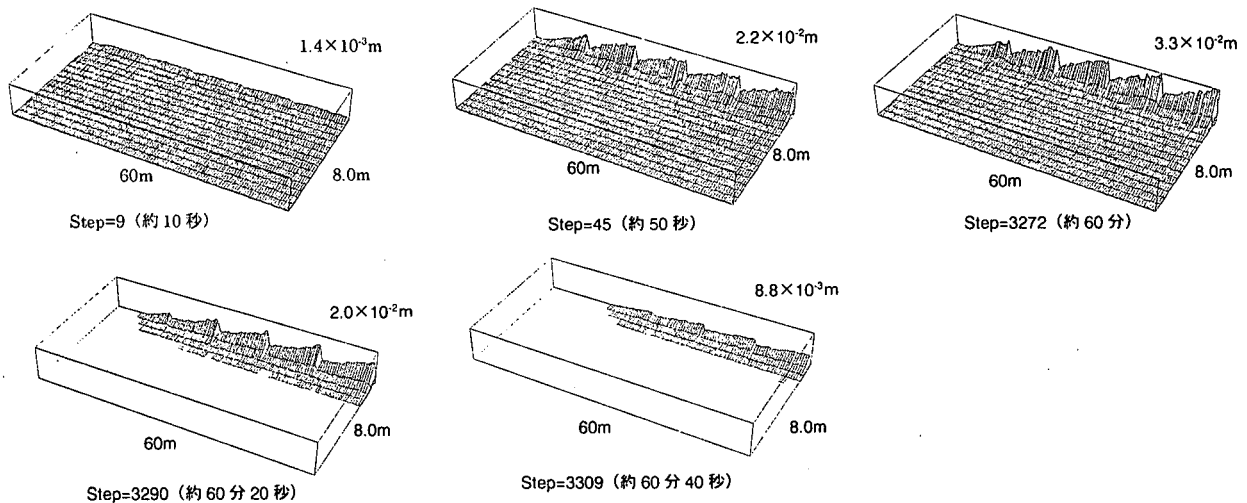


図-8(a) 縦断勾配 1.0%, 横断勾配 1.5% における水の流れ

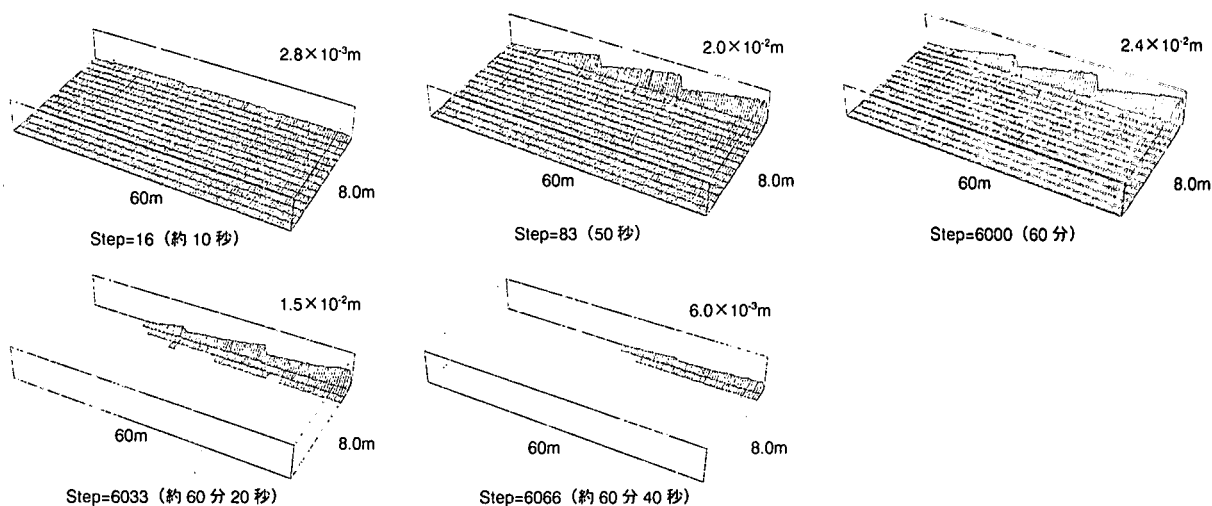


図-8(b) 縦断勾配 3.0%, 横断勾配 1.5%における水の流れ

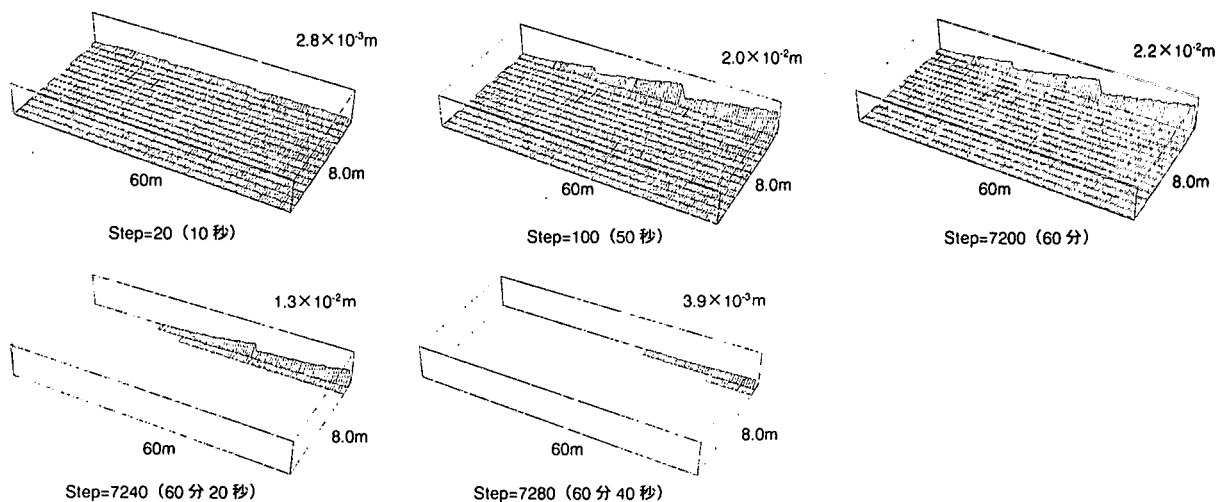


図-8(c) 縦断勾配 5.0%, 横断勾配 1.5%における水の流れ

5. おわりに

本研究では、CA を用いることにより、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せた。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、側溝枡が正常に機能しているかを検証し、かつ、側溝枡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、特定の排水枡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、さらには排水枡の自動生成などにも対応できるように改良を加えていきたいと考えている。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路土工 排水工指針，1987.6.
- 2) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説，I 共通編，1996.12.
- 3) (社)日本道路協会：道路構造例の解説と運用，1983.2.