

内水氾濫に起因する道路交通障害予測 に関する研究

STUDY ON PREDICTION OF TRAFFIC DIFFICULTIES CAUSED BY URBAN INUNDATION BY HEAVY RAINFALL

深草新¹・戸田圭一²・宇野伸宏³

Shin FUKAKUSA, Keiichi TODA and Nobuhiro UNO

¹正会員 修士(工学) 株式会社建設技術研究所 (〒540-0008 大阪市中央区大手前1-2-15)

²正会員 Ph.D. 京都大学教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

³正会員 博士(工学) 京都大学准教授 大学院工学研究科 (〒615-8510 京都市西京区京都大学桂)

This study treats the degree and characteristics of traffic difficulties caused by urban inundation by heavy rainfall. The studied area is Kyoto City, Japan. First, in the normal condition, time-of-day user equilibrium traffic assignment is performed and traffic condition on network is computed. Next, assuming heavy rainfall, inundation flow analysis is executed to obtain the water depth distribution. The similar traffic analysis is performed in the inundation condition, by changing run speed and traffic capacity based on the computed water depth of each link. Then, degree of congestion and travel time between major ODs are compared and discussed for the normal condition and the inundation one. As a result, it is found that inundation at underpass link of JR line has huge effect on the traffic network all over the city.

Key Words : urban flood, inundation by heavy rainfall, inundation flow analysis, time-dependent traffic assignment, degree of congestion

1. はじめに

わが国では、大都市に人口や資産が集中し、網の目のように張り巡らされた道路を多くの人々が毎日当たり前のように利用している。道路交通は我々の生活にとって切っても切り離せないものである。しかし、近年では、都市部で内水氾濫が多発し、道路浸水による大きな被害が報告されるようになっており、我々の生活にも影響が及んでくる。実際、1989(平成元)年9月14日に兵庫県南東部で発生した豪雨¹⁾では、西宮市で最大112mmの時間雨量を観測し、国道2号・国道171号など幹線道路の浸水が阪神間の通勤・通学に多大な影響を及ぼした。

水害時の道路交通障害に関する従来の研究としては、加賀屋ら²⁾は、札幌市東北部を走る主要幹線を対象ネットワークとし、平常時と浸水時それぞれについて配分計算を行った上で、ネットワーク交通容量を比較することで浸水の道路交通に及ぼす影響について議論している。また、交通対策を施すべき箇所についても解析結果をもとに考察している。浸水時の条件として、彼らは、豊平

川流域の内水氾濫シミュレーションの結果から水深が20cm以上となるリンクを途絶させた状態のネットワークを用いている。

また、筆者ら³⁾は、京都市中心部を対象とし、鴨川の溢水を想定して、ポンドモデルによる浸水解析から得られる道路部の浸水深の分布をもとに日交通量配分を行い、浸水が発生した際の道路交通障害の程度を予測することを試みた。浸水時の条件として、ある時刻の道路リンクの浸水深に応じて走行速度・交通容量を変化させるかたちで交通量の配分計算を行った。そして、浸水時の道路交通障害について、混雑度や所要時間を平常時の結果と比較することで考察を行った。

本研究は、筆者らがこれまでに用いてきた解析モデルを進展させ、非構造格子モデルを用いることにより浸水解析の精度向上を図ること、ならびに、時間帯別交通量配分を用いることにより浸水解析と交通量解析の時間的な整合性の向上を図ることを目指し、水害時の道路交通障害を精度よく予測することを主たる目的としたものである。また、モデルの適用をとおして、起こりうる道路交通障害を軽減する方策についても考察を加えている。

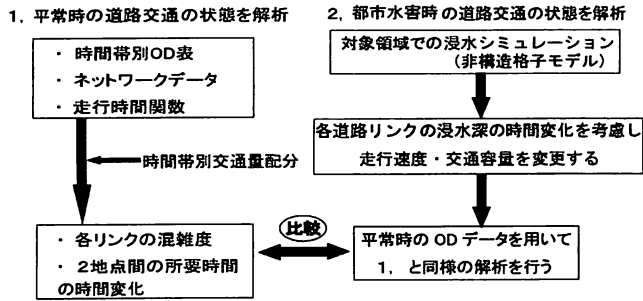


図-1 研究の手順

2. 解析手法および計算条件

まず、対象ネットワークで通常の時間帯別利用者均衡配分を行い、平常時の交通量とした。次に、浸水解析の結果から道路の浸水深を求め、それに伴って走行速度と交通容量を変化させた上で平常時と同様の手法により交通量を算出し、これを浸水時の交通量とした。交通量と交通容量の比を混雑度とし、平常時および浸水時の各リンクの混雑度や代表的な地点間の所要時間を比較し、浸水が道路ネットワークの機能に及ぼす影響について考察した。図-1 に本研究の手順を示す。

(1) 浸水解析

a) 非構造格子モデル

浸水解析には非構造格子モデル⁴⁾を用いた。これは、複雑な地形を考慮して詳細な水の挙動を表現できる平面二次元解析モデルである。このモデル中で下水道の影響や地下空間への浸水を考慮し、詳細な地目特性も反映させた。平地の内水氾濫では大きな流速は発生しないと予想されることから、基礎式には、以下に示す連続式および移流項を省略した運動量式を用いた。

$$\text{＜連続式＞} \quad \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = r_e - r_d \quad (1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{gn^2 M \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (2)$$

＜運動量式＞

$$\frac{\partial N}{\partial t} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{gn^2 N \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (3)$$

ここに、 h ：格子水深、 t ：時間、 x, y ：平面二次元座標、 M, N ： x, y 方向の流量フラックス、 r_e ：有効降雨量、 r_d ：下水道による雨水排除量、 g ：重力加速度、 H ：格子水位、 n ：Manningの粗度係数、 u, v ： x, y 方向の流速である。

b) 対象領域

対象領域は京都市の平地部とした。図-2 に対象領域を示す（面積：約80.1km²）。この領域を2504個の解析格子に分割し、京都市発行の縮尺1/2500の都市計画地図をもとに入力データを作成した。解析格子と地盤高を

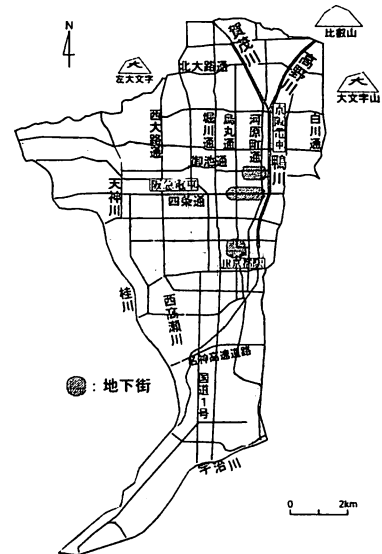


図-2 対象領域

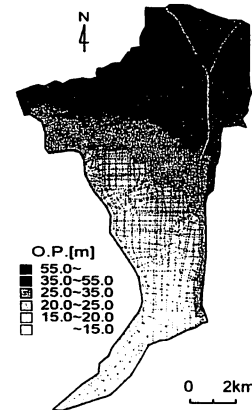


図-3 解析格子および地盤高

図-3 に示す。京都市は北から南に、また、東から西に向かうにつれて、地盤が低くなっていくことがわかる。

c) 構造物に関する計算条件

格子の底面積に占める実際に水が溜まる底面積の割合を有効率、格子境界の長さに占める実際に水が通過できる長さの割合を通過率と定義し、これを構造物の密集度合に応じて格子ごとに決定し、連続式、運動量式に反映させた⁴⁾。

d) 中小河川に関する計算条件

対象領域内に位置する比較的大きな河川（鴨川・賀茂川・高野川）については、地盤高の充分低い格子として認識させ、堤防の有無によって越流公式または段落ち式を用いて氾濫水の河道への流入を表現した。

e) 地下空間に関する計算条件

対象領域内に位置する地下街への浸水を考慮した。地下空間への入口（階段など）では、15cmのステップ高を考慮し、段落ち式により氾濫水の地下への流入量を算出した。

f) 下水道に関する計算条件

合流式幹線下水道の受け持つ地区に関しては、戸田ら⁹⁾の手法にならい、下水の流入箇所ごとに複数の格子か

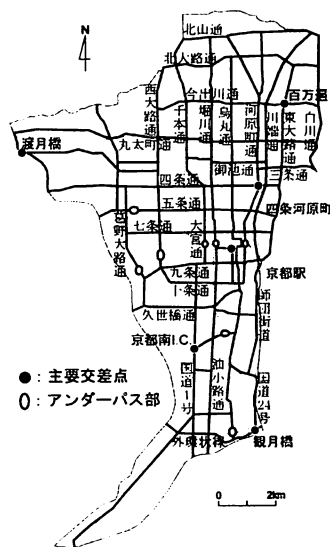


図-4 対象ネットワーク

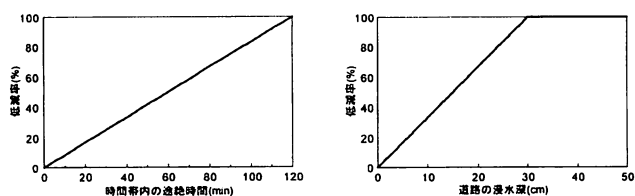


図-5 走行速度・交通容量の低減率

ら成る集水区を決定し、下水処理場の最大排水流量を、受け持つそれぞれの集水区の面積で案分することで、集水区ごとに最大排水量を決定した。なお、このように算出した合流式幹線下水道の排水能力が36.4mm/hr（下水道の当面の設計値⁶⁾である52mm/hrの7割の値）に満たない場合には、その差分は合流式幹線地区の全格子から横流出として連続式から一律に差し引くこととした。

それ以外の地区では、下水道による排水能力として全格子から一律36.4mm/hrを横流出として差し引くこととした。また、アンダーパス部ではポンプによる排水能力100mm/hrを上乗せして計算を行った。

(2) 交通量解析

a) 時間帯別利用者均衡配分および対象ネットワーク

時刻と交通量の関係を反映させるため、交通量解析には時間帯別利用者均衡配分⁷⁾を用いた。主に京都市内で基盤の目状に広がる主要道路を対象とし、国道、府道の大部分と一部市道を含めた。浸水解析の対象領域に含まれる区間のみを取り出し、浸水による影響の小さいと思われる高速道路を除外して、対象ネットワークとした。ネットワークを図-4に示す。市内の実測交通量データを基に作成した時間帯ごとのOD表や、実際の道路状況に応じて設定した各道路リンクの自由走行時間・交通容量などをインプットデータとして計算を行った。

時間帯別利用者均衡配分では、各時間帯の終端時間に

において目的地まで到達できずにネットワーク上に残留する交通が発生する。この2つの時間帯に影響を与える残留交通量を、交通流保存条件を満足しつつ効率的に処理するため、本研究ではOD修正法⁷⁾を採用した。紙幅の制限のため詳細な説明は参考文献⁷⁾等に譲るが、OD修正法を採用したことで、需要変動型交通均衡問題として定式化することが可能となり、数値計算法として広く用いられているFrank-Wolfe法が適用可能となる。

配分計算の結果より、平常時の所要時間や混雑度の時間変化を算出した。なお、時間帯の幅は2時間とした。

b) 内水氾濫時の計算条件

浸水の道路交通への直接的な影響は、各道路リンクの走行速度と交通容量の低下のみであると仮定し、災害情報による外出の見合わせ等、交通需要の発生に関わる不確定要素の多い項目については考慮しないこととした。それゆえ、浸水時にも平常時と同じOD表を用いて交通量配分を行った。

30cm以上の浸水が起きると、自動車のマフラーなどの冠水によりエンジンが停止してしまうことが考えられる⁸⁾。そのため、浸水深が30cm以上になると、その道路リンクは道路としての機能を失い実質上の途絶状態に陥ると仮定した。浸水解析結果より道路部の浸水深に注目し、途絶している時間の長さおよびそれ以外の時間の平均浸水深から走行速度・交通容量の低減率をそれぞれ設定し（図-5参照）、以下の式から道路リンクごとに各時間帯内での低減率を算出した。

$$(1 - D/100) = (1 - D_1/100) \times (1 - D_2/100) \quad (4)$$

ここに、 D ：各時間帯での低減率[%]、 D_1 ：途絶時間による低減率[%]、 D_2 ：非途絶時の平均浸水深による低減率[%]である。この低減率より時間帯ごとに走行速度・交通容量を決定し、その条件下での時間帯別配分から、水害時の混雑度や所要時間の時間変化を求めた。

3. 解析結果

(1) 平常時の解析結果

混雑度の分布を図-6に、代表的な地点間の所要時間の変化を図-7に示す。平常時においては、8時（午前8時。以下、時刻は全て24時間表記。）頃から一部区間で混雑が始まり、10時～12時の間に混雑のピークが現れる。その後、18時頃まで一部区間では混雑状態が継続する。ピーク時間帯には、南部の国道24号や外環状線、西部の一部区間など、交通容量の小さい区間が混雑状態に陥っている。この結果は、実際の京都市の交通事情をおおむね適切に表現できていると言える。

(2) 内水氾濫時の解析結果

外力として1999年に発生した福岡水害時の降雨（図

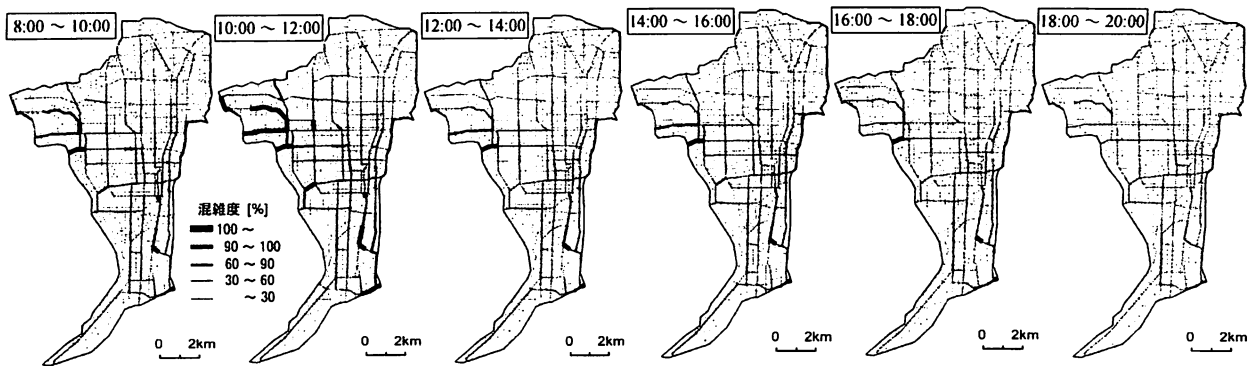


図-6 平常時の混雑度

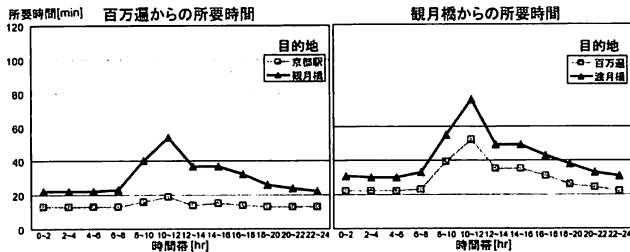


図-7 平常時の所要時間

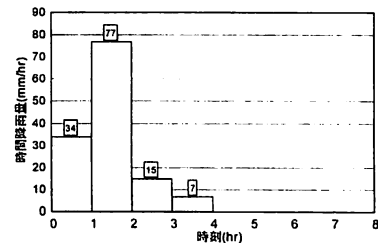


図-8 福岡水害時の時間降雨量

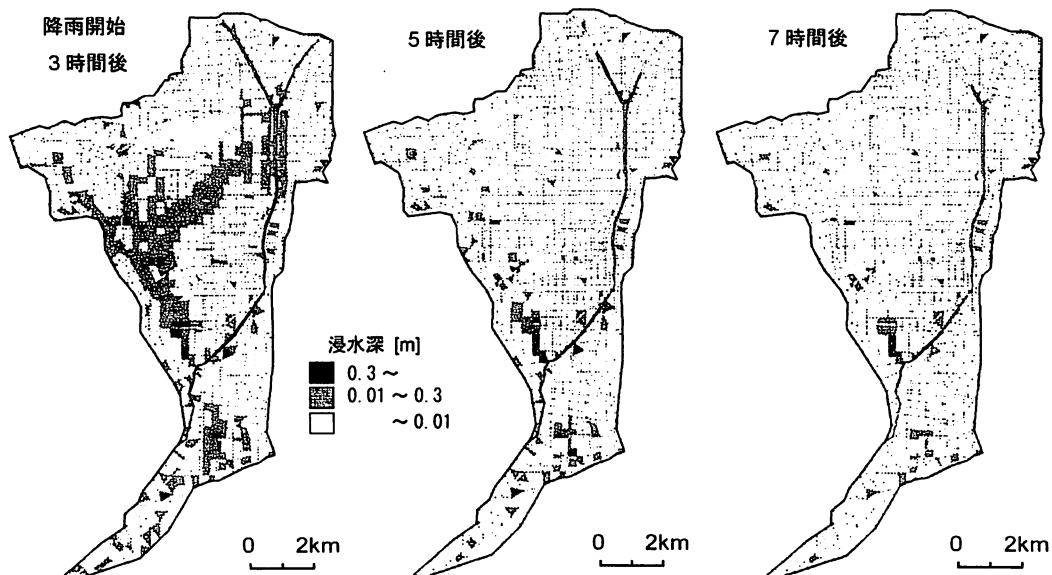


図-9 内水氾濫を想定した浸水解析結果

-8 参照) を想定し、流出率を85%としたものを対象領域全体に与えて内水氾濫計算を行った。降雨開始後3時間、5時間、7時間経過時の内水氾濫状況を図-9に示す。地盤の傾斜に沿って南西方向に氾濫水が流下し、西高瀬川沿いの地域において大きな浸水深が現れたほか、宇治川に近い南部でも浸水箇所が見られる。この傾向は過去の浸水解析事例⁵⁾と同様である。今回、非構格子を用いて微地形を詳細に表現しており、交通量解析とリンクした従来の浸水解析³⁾よりも道路の水深変化の精度向上を図っている。次に、降雨開始時刻を変化させた内水氾濫時の交通量解析4ケース(表-1 参照)のうち、ケース2、3について詳述した後、4ケースの比較を行う。ケース2、3の解析結果(混雑度の分布)をそれぞれ図-10、11に、所要時間の変化を4ケースまとめて図-12に示す。

表-1 内水氾濫時の交通量解析ケース

解析ケース	外力	降雨開始時刻
ケース1	福岡水害('99)時の降雨 (85%有効降雨)	0:00
ケース2		6:00
ケース3		12:00
ケース4		18:00

a) ケース2 (降雨開始6:00)

8時~9時頃に浸水深が最大となり、広い範囲で途絶区間が出現した。特に、堀川通、西大路通、葛野大路通といった幹線道路がJRの線路を南北に渡るアンダーパス部の浸水で途絶したため、それ以外の河原町通、烏丸通、大宮通などに交通が集中し、かなりの混雑が引き起こされている。10時~12時頃にも多くの途絶は解消されず、ピーク所要時間が大幅に増加している。また、油小路通

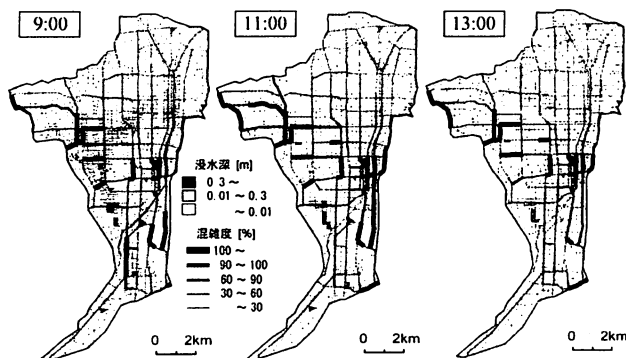


図-10 内水氾濫時（ケース2）の混雑度

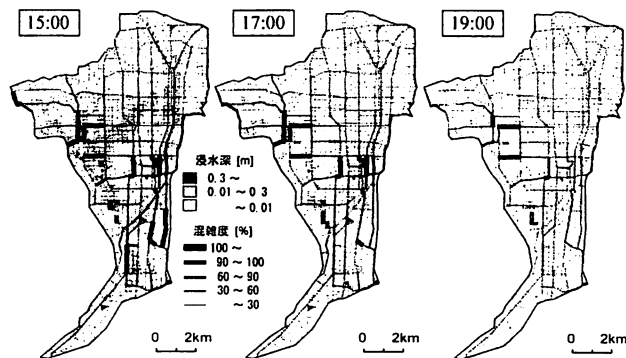


図-11 内水氾濫時（ケース3）の混雑度

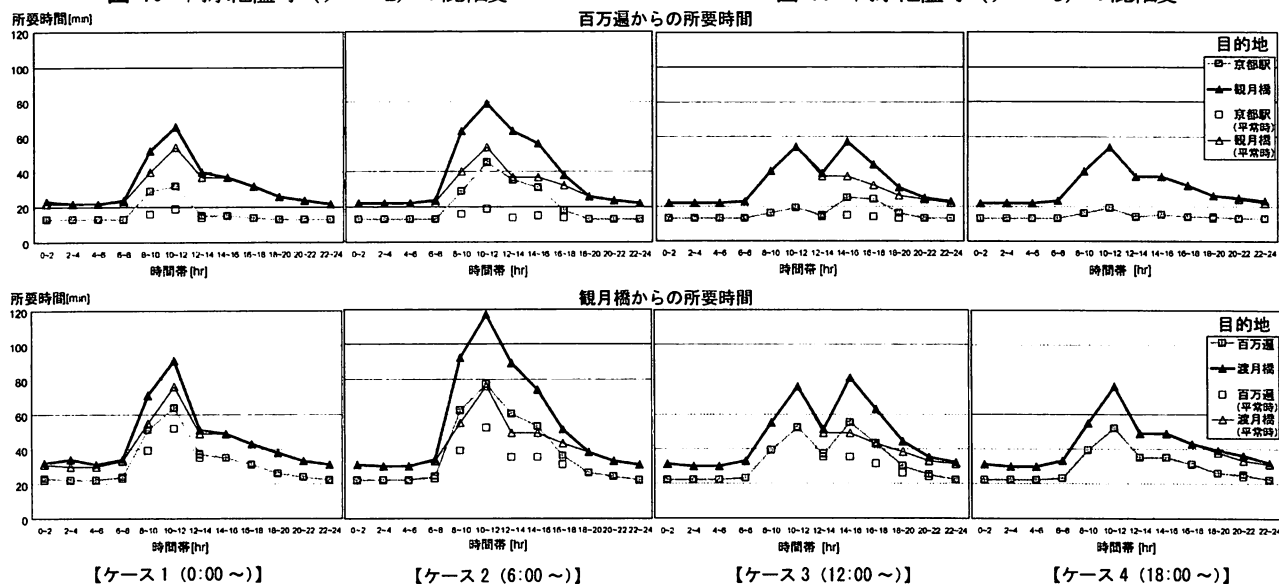


図-12 内水氾濫時の所要時間

の一部区間が一時的に途絶状態となったために、国道1号や国道24号などに迂回する車両が増加し、南部の地域でも混雑が引き起こされている。

b) ケース3（降雨開始12:00）

交通量の午前のピークを過ぎた頃に降雨が開始しており、午後のピークに達する14時～16時頃に中心部や南部で多くの区間が混雑している。そのため、1日を通じての交通量のピークである10時～12時より大きな所要時間が14時～16時に現れ、その後、夜まで影響が継続する。

c) ケース1～4の比較

4ケースを比較すると、障害の程度は、ケース2が最も大きく、ケース4が最も小さいことがわかる。すなわち、交通量の多い時刻（朝～昼）に大きな道路交通障害が引き起こされる。また、紙面の都合で詳しく示すことはできないが、アンダーパスの浸水による長時間の途絶が道路交通障害を引き起こす大きな要因となっている。

ケース3は交通量のピーク直後である正午に浸水が発生したため、昼過ぎから夜まで道路が途絶しているのに対して、ケース2では朝に浸水が発生し、道路の途絶は朝から昼過ぎまでで、交通量のピーク時刻と重なっている。これが、両ケースの結果を分けた要因である。交通量がピークとなる10時～12時の時間帯よりも浸水の発生

時刻が前か後かによって障害の程度が変わってくる。

4. アンダーパス部の対策

(1) ボトルネックとなるアンダーパスの探索

JRの線路を渡る箇所は、南北交通にとってボトルネックとなりやすい。そこで、重点的に対策を講じるべきアンダーパスの探索を行う。

対象とするのは、河原町通、堀川通、西大路通、葛野大路通のアンダーパス部（図-4 参照）である。ケース2と同じ外力（福岡水害、85%有効降雨、6:00～）を与え、それぞれのアンダーパスについて、窪みをなくし（地盤高を両側の格子の平均とし）、排水ポンプを取り除いた（通常の下水のみで排水する場合、すなわち、アンダーパスが解消された場合に、どれだけ混雑が解消されるか解析した。混雑解消の度合いが大きいアンダーパスほど、道路交通に大きな影響を及ぼす箇所であることになる。1ヶ所ずつ解消させて解析を行い、領域内の混雑（混雑度100%以上）もしくは途絶している区間の長さおよび総走行時間（全車両の移動時間の合計）を時間帯ごとに比較した結果をそれぞれ図-13, 14 に示す。

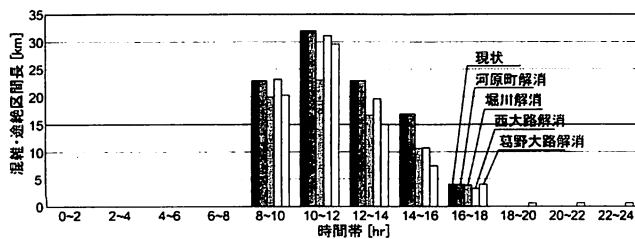


図-13 アンダーパス解消時の混雑・途絶区間長の比較

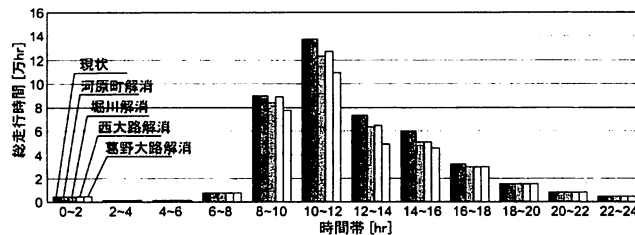


図-14 アンダーパス解消時の総走行時間の比較

図より、地盤が低く浸水深の大きくなりやすい葛野大路通と交通量の多い堀川通のアンダーパスの影響が他に比べて大きいことがわかる。

(2) アンダーパス部の排水能力増強策

葛野大路通および堀川通のアンダーパスを解消すればかなりの道路交通障害抑制に繋がることわかったが、そのような大規模な事業を行うことは現実的でない。そこで、代替案として、葛野大路通および堀川通のアンダーパス部における排水能力の増強策を提案し、その効果を図-10、図-12【ケース2】との比較により検討する。

排水能力増強を表現するため、該当箇所のポンプの能力を100mm/hrから200mm/hrに変更した。ケース2と同じ外力を与えて解析を行った場合の混雑度、所要時間の変化をそれぞれ図-15、16 に示す。

最大浸水深の発生時（このケースでは交通量のピーク時間帯に重なる）前後では、排水能力を増強したにも拘らず葛野大路通、堀川通を含む多くの区間で途絶状態に陥った。しかし、その時刻以降では徐々に効果が現れ、ケース2と比較して市内中心部の混雑度が改善した。所要時間を見ても、最大浸水深の発生時前後にはあまり効果が現れていないが、それ以降で、南北交通の所要時間が大幅に短縮されているのがわかる。

5. おわりに

下水道や地下空間への浸水、詳細な地目特性を考慮した非構造格子モデルおよび時間帯別交通量配分を組み合わせることにより、内水氾濫の発生箇所や発生時刻に応じたかたちでの道路交通障害の予測を可能にした。また、モデルの適用をとおして、障害の発生状況や対策についての考察を加えた。結論を以下にまとめる。

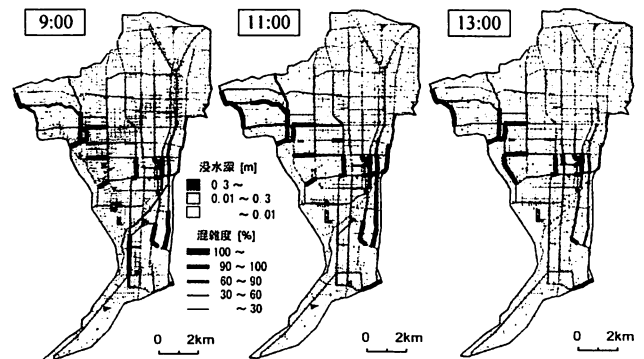


図-15 対策時の混雑度

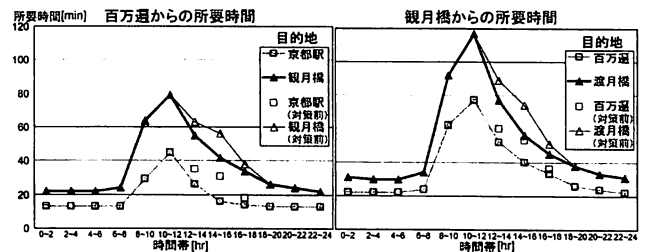


図-16 対策時の所要時間

- 対象領域で福岡水害なみの短時間豪雨があった場合、広域にわたり混雑度や車両の移動時間が増加することが構築したモデルにより表現できた。
- 短時間豪雨の発生時間帯によって道路交通障害の程度が異なってくることが明らかとなった。
- アンダーパス部の排水能力増強策は、最大浸水深発生時の道路交通障害の軽減には有効でないものの、それ以降に継続する障害の軽減には有効である。

参考文献

- 神戸新聞, 1989.9.14 (夕刊)
- 加賀屋誠一・内田賢悦・萩原 亨: 札幌市東北部における水災害時のネットワーク交通容量変化に関する研究, 自然災害科学, 21-4, pp.401-415, 2003.
- 深草新・戸田圭一・宇野伸宏: 都市水害に起因する道路交通障害について—京都市域を対象として—, 自然災害科学, 26-2, pp.177-188, 2007.
- 川池健司・井上和也・戸田圭一・野口正人: 寝屋川流域を対象とした氾濫解析モデルの高度化, 水工学論文集, 第47巻, pp.919-924, 2003.
- 戸田圭一・井上和也・村瀬賢・市川温・横尾英男: 豪雨による都市域の洪水氾濫解析, 土木学会論文集, No.663/II-53, pp.1-10, 2000.
- 京都市下水道局: 京都市下水道マスタープラン, 2001.
- 土木学会土木計画学研究委員会: 道路交通需要予測の理論と適用 - 第II編 利用者均衡配分モデルの展開, 2006.
- 国土交通省九州地方整備局HP: 洪水氾濫シミュレーション (<http://www.qsr.mlit.go.jp/kozui/main2.htm>)

(2008. 4. 3受付)