

都市における内水氾濫と地下街浸水の被害予測 に関わる数値解析

NUMERICAL SIMULATION OF INUNDATION PROCESS IN URBAN AREA WITH UNDERGROUND SPACE

関根正人¹・河上展久²

Masato SEKINE and Nobuhisa KAWAKAMI

1 正会員 工博 早稲田大学教授 理工学部土木工学科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

2 学生会員 早稲田大学大学院理工学研究科 (同上)

The inundation process in urban area was investigated numerically in the present study. The numerical simulation model was developed by coupling the following three sub-models; the model of overland flow on the road network, the model of flow in drainage network and that of the flow in underground space, respectively. The water exchange among these three sub-processes is the key point to be handled reasonably in this kind of model. As a result of some series of numerical simulations, the effect of drainage network on the inundation damage itself was understood quantitatively. In case of downtown Shinjuku, the severe inundation damage is expected to occur in both an underground space and some local areas where the ground level is much lower than any other region here under the heavy rainfall even if the drainage network works effectively.

Key Words : *inundation process, underground space, heat island, road and drainage network*

1. 序論

近年, 都市への人口と資産の集中が急速に進み, いわゆる都市化が進むことによって, 都市域の環境は悪化の一途をたどってきた. 水田や湿地の宅地化や地表面の舗装化などが進み, 雨水の地表における貯留あるいは地下への浸透が著しく阻害されるようになったことから「都市水害」と呼ばれる水害を招くようになった.

一方, 都市環境の変化に目を向けると, 地表面における湿度の低下が生じたほか, ビルや舗装道路が増加し, これらが太陽熱を蓄えることによって地表の温度の上昇が引き起こされた. いわゆる「ヒートアイランド現象」であり, これに伴い新たな水害の危険性を生むこととなった. 同現象はこの10年間で顕在化しており, 地表で温められ軽くなった空気が上昇気流を形成し, 積乱雲を発生させるために, 夏季にゲリラ的な激しい集中豪雨が頻繁に起きるようになってきている. 気象庁によると, 1時間に100mmを越す激しい雨の発生件数

は, 1990年代前半では年0~2回ほどであったのに対し, 1999年には10回, 2000年には6回となるなど増加の傾向を見せている. 従来の水害は台風や梅雨といった1日かそれ以上の時間スケールで対策を考えるべきものであったのに対し, 近年の局地的な集中豪雨は数時間単位程度とその時間スケールは短いものの, 単位時間当たりの降雨強度が異常に大きいという特徴をもつ. そこで, 前者を対象に排水整備を進めてきた都市域では, 後者の集中豪雨に対しても十分に安全性を確保できるかどうかについて早急に検討する必要がある.

また, 都市域では, 空間の高度かつ集約的な利用の観点から地下空間の開発が進み, 大都市の地下には地下街や地下鉄が縦横に伸び, 地下室を持つ個人の住宅も増えているという状況にある. こうした地下空間は利用目的ゆえに地上とのアクセスが容易であるように設計されている. これは, 裏を返せば, 連絡階段が地下への絶好の水の通り道となることを意味する. こうしたことから, 地下空間の危険性も一層認識されるようになってきている.

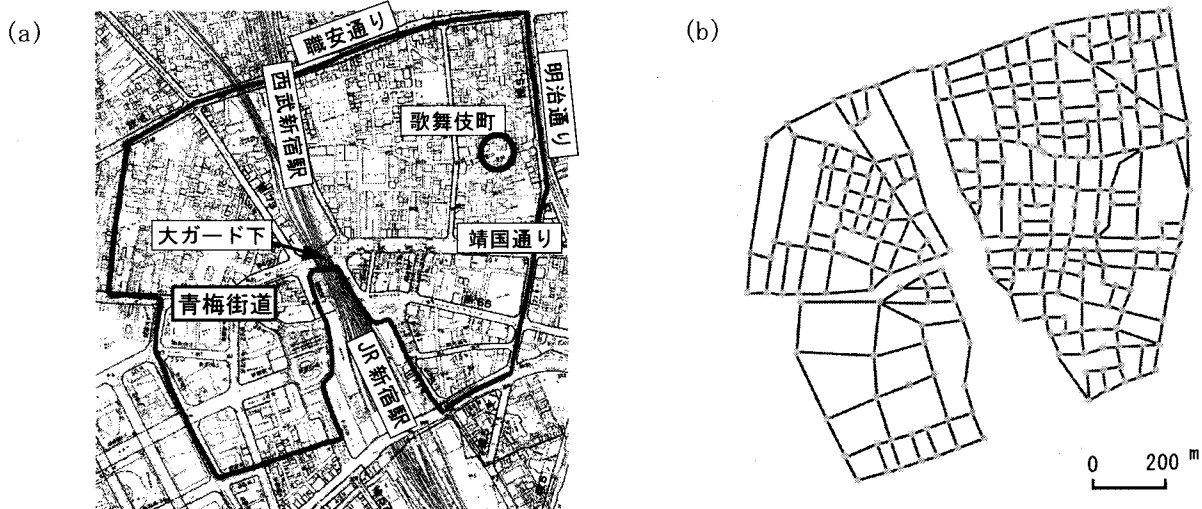


図-1 計算対象領域: (a) 道路網, (b) 計算格子網

このように、東京をはじめとした大都市では、従来の想定とは異なる集中豪雨に見舞われる可能性が高まってきている。そして、その規模がさらに増大すると、深刻な内水氾濫を引き起こす恐れがあり、その場合にはその地下に存在する地下空間への浸水が懸念される。これに対して、東京新宿といった繁華街では、住民・利用者ともに必ずしも十分な情報を持っていないのが現状である。こうした点に鑑み、本研究では、新宿駅周辺の繁華街を対象として、内水氾濫が生じるプロセスならびに被害の規模を評価することを目的として数値予測を行った。

2. 解析の概要

(1) 対象区域ならびに降雨データ

本研究では、図-1(a)に示す新宿駅周辺の太線で囲まれた範囲を対象に雨水の氾濫解析を行う。この対象区域内には、靖国通りの真下を中心に「新宿サブナード」と呼ばれる地下街が広がっており、地上の道路に雨水が氾濫した場合には、この地下街の浸水も懸念される。そこで、本解析では、豪雨に伴って生じるこの地域の地上の内水氾濫過程に加え、下水道網による氾濫水の排除過程、ならびに地下街へ雨水が流入する場合にはその浸水被害拡大過程を、相互の水のやりとりを合理的に取り扱いつつ、全体の被害予測を可能にするモデルの構築に努めた。

ところで、ここで対象とする区域は、東西南北にほぼ各1kmの辺を持つ正方形の形をしており、その中央をほぼ南北にJR山手線が、また東西に青梅街道と靖国通り(両者は一本の連続した道路であるが、途中から名称が変わる)が、それぞれ貫くように通っている。そして、JR山手線とこの道路との立体交差部分は「大ガード下」と呼ばれており、道

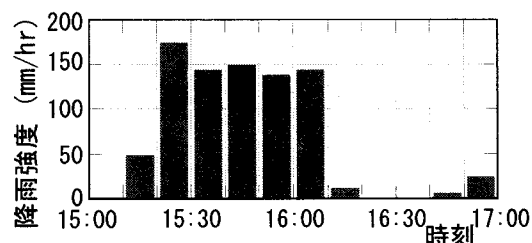


図-2 解析対象とする降雨データ

注) 10 分間雨量を時間雨量に換算している

路は線路下をくぐるような構造になっているため、この部分の路面は周囲よりかなり低くなっている。また、この区域は、全般的に「すり鉢」状の地形になっており、その最深部が「大ガード下」であり、また図-1(a)に○印を付した「歌舞伎町」の地点である。解析対象区域の境界については、周囲より標高が高い道路上かそれに準じた幹線道路の中央分離帯上にとることにし、その境界線からの水の出入りがないように配慮した。

降雨データとしては、図-2に示すような平成11年7月21日に東京練馬で実際に降った記録的な集中豪雨のハイトグラフを対象とする。

(2) 地上の内水氾濫解析モデル

ここでは、地上の表面流の解析について説明する。概略については次のようにまとめることができる。すなわち、(1)対象区域内のすべての交差点の標高、道路幅、交差点間距離などのデータを基に道路ネットワークを構築した。ここでは、東京都作成の5000分の1の地図を使用した。計算格子網は図-1(b)に示す通りであり、格子点は全て道路の交差点上に配置されている。図に示された格子点間の線は、氾濫水が滞留あるいは流下する道

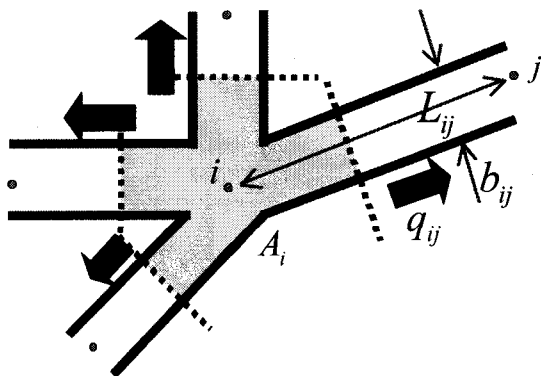


図-3 地表流解析の模式図

路を表しており、計算では各格子点における水深の時間変化を求める。(2)道路に囲まれた区域には高層のビル群が林立するが、このビルに降った雨については、ビルの施設内に一時貯留された後に時間遅れをもって下水道に入るため、現モデルではこれを考慮せず、道路網の上に降った雨のみを対象とする。(3)中央分離帯のある幹線道路に関しては左右別の道路として取り扱い、交差点において相互に連結するものとする。(4)前述の通り大きな窪地のような構造になっている「大ガード下」については、左右両側から水が流入する貯水池のように取り扱う。(5)基本的な解析は、図-3の模式図に示したようなコントロール・ボリュームにおける体積保存の関係から次のように行う。このコントロール・ボリュームの境界は、隣接する交差点間の中央にとり、この境界面を通しての水の出入りに関しては、交差点間の水面勾配を基にして拡散波近似の考え方に従って評価する。また、このコントロール・ボリューム内に「地下街」への連絡階段があり、そこから雨水の流入が生じる場合には、その流量がこのコントロール・ボリュームから失われることになる。また、下水道へと繋がる雨水ますへの流出についても同様に取り扱う。いま、格子点番号*i*を中心としたコントロールボリュームについて体積保存の関係を考えると、 Δt 時間内に生じる水深の変化量は次のように表される。

$$\Delta h_i = \left[r_e \cdot A_i + Q_{ex} - \sum_{j=1}^n (q_{ij} \cdot b_{ij}) \right] \times \frac{\Delta t}{A_i} \quad (1)$$

ここに、 n ：隣接する格子点数、 r_e ：降雨強度、 A_i ：対象区域の面積、 b_{ij} ：隣接する格子点*j*とを結ぶ道路の幅、 q_{ij} ：格子点*i*および*j*の間の境界面を通じての単位幅当たりの流量であり、 Q_{ex} はコントロールボリューム内に存在する全ての雨水ますと地下街への連絡階段に向かって流出する流量、を表す。

(3) 下水道網による氾濫水の流送モデル

次に、下水道網による氾濫水の排出計算について説明する。解析に際しては、図-6に示すような下水道ネットワークを構築し、各々の下水管が接続されている点に計算格子点を設け、その点における体積保存の関係から水深の時間変化を求める。その計算方法は前述の地表面流の場合と同様であり、原則として開水路流れとして解いている。下水道ネットワークに関しては、東京都下水道局から提供された資料に基づき、実際のものをできるだけ忠実に再現することに努めた。さて、地上の氾濫水の下水道への流入を考える際には、両者を結ぶ「雨水ます」を介した水のやりとりを考える必要がある。地表に氾濫した水は、道路沿いに流動した後、近傍の雨水ますに一時集められ、そこでの水深がある量を越えると、接続された管を通じて下水道へと排出される。対象区域に関していえば、この雨水ますは、道路の側溝に約20mおきに埋設されており、その形状は直径50cm、高さ80cmの円筒状のものとされる。ここでは、雨水ますにおける水の体積保存のに基づき解析を進める。雨水ますへの流入量については、その流入地点において限界水深をとるものとし、雨水ます近傍の地上氾濫水の水深を基にベルヌーイの定理からこれを算定する。また、雨水ます内の水深の時間変化ならびにこれに接続された管(ここでは直径20cmの円管)から下水道への排出流量の時間変化については、摩擦損失等を考慮に入れつつ純粋に水理学な手法を用いてこれを算定している。しかし、現実には水理学で取り扱われるような理想的な状態が維持されているわけではなく、雨水ますの上縁面あるいは内部には落ち葉やたばこの吸い殻などが貯まっていることが予想されるため、必ずしも効率よく雨水の処理が行われているとは考え難い。そこで、雨水ますへ流入あるいは流出する水量に関しては、理想的な状態を対象として算定される量に割引係数を乗じた量とし、現実近づけた解析も試みている。なお、時間の経過に伴って雨水ます内の水深がますの高さを越える場合には、地上の氾濫水が雨水ますに流入することはない。

(4) 地下街浸水モデル

地下街における浸水過程解析としては、地下空間というシステムの中に進入した水が連絡階段を通じて階下へと伝播し、結果としてどのように浸水被害が広がっていくかを数値計算する。計算では、図-7に示すように対象とする地下街の各階を*x* - *y*座標面上に展開し、これを等間隔に配置された格子網で覆いつくし、格子点上の水深ならび

(a) 降雨開始から 60 分後 (b) 降雨開始から 90 分後 (c) 降雨開始から 120 分後

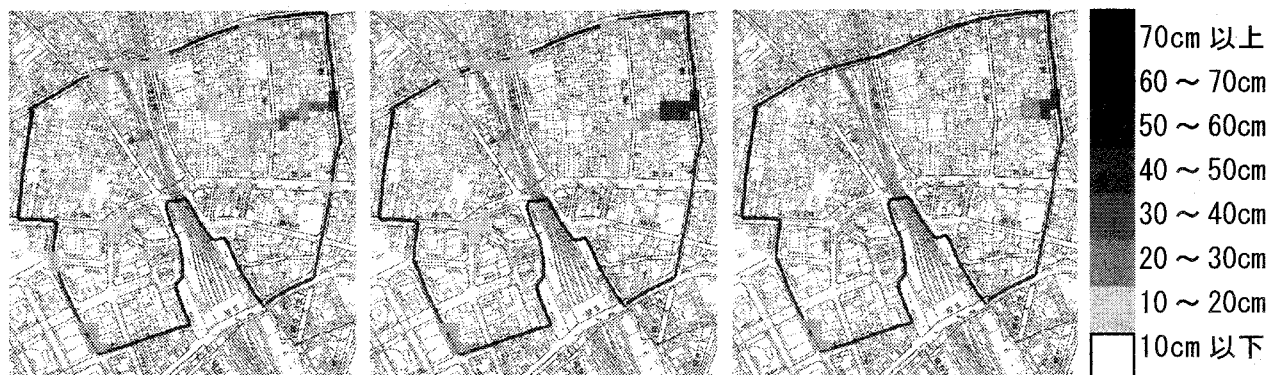


図 - 4 ハザードマップ

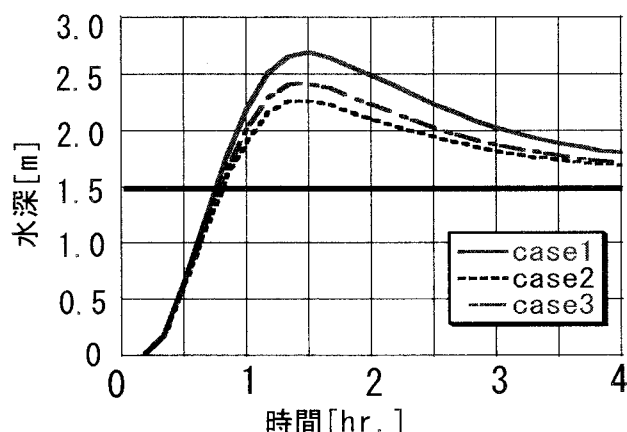


図 - 5 大ガード下の水深

に流速ベクトルを求めることにする。このように、地下街の浸水モデルに関しては浅水流方程式に基づく平面二次元解析となっている。この地下街は、商業店舗が通路の両側に並んでいる地下 1 階と地下駐車場である地下 2 階とからなる二層構造となっており、本解析では、店舗の基本的な大きさを 1 つの計算格子とし、8 m 間隔の格子点網に対して数値解析を行った。

3. 結果および考察

東京新宿駅周辺の内水氾濫被害の進行過程とその規模とを把握する目的から、様々な条件下で数値シミュレーションを行った。このうち、ここでは次の 3 ケースについて説明する。Case 1 は下水道網が一切機能しない(下水道モデルを組み込まない)とした場合の解析を表す。また、Case 2 は、地上の氾濫水が雨水ますを介して水理学的に導かれる関係式通りに下水道へと運ばれると仮定した場合の解析であり、現有的下水道システムによる雨水排除機能が最大限に発揮されるとした場合にあたる。しかし、このいずれも両極端を表しており、

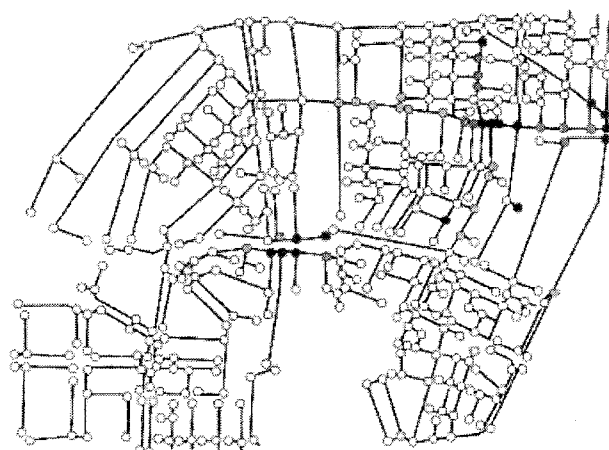
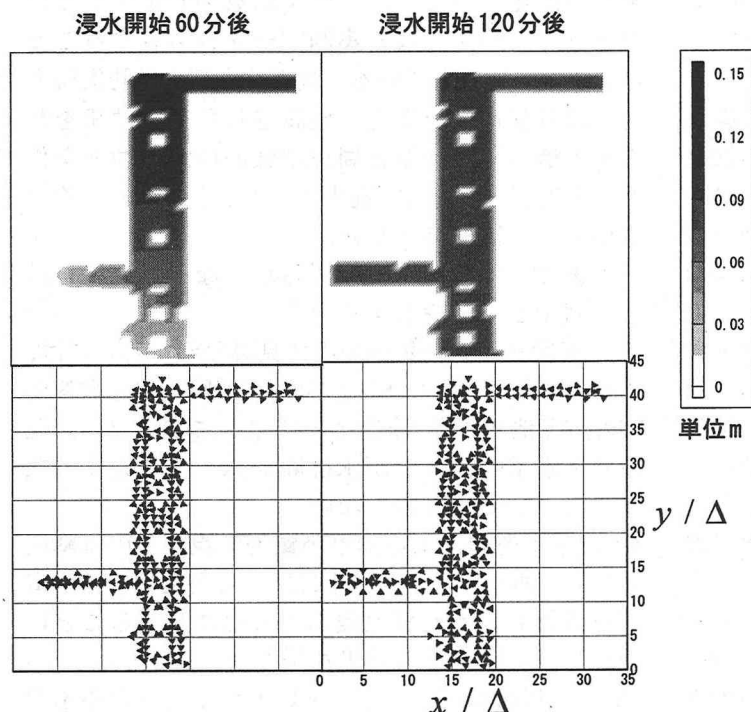


図 - 6 下水道網の主要地点における状況

Case 1 では想定される最大の被害を、Case 2 では最小の被害をそれぞれ再現することが予想され、実際の被害はこの中間の状態となると推定される。たとえば、現実には、道路面上にある雨水ますのメッシュ状の蓋の周辺にはゴミが付着していたり、バイクや自転車をはじめとした障害物がある。また、雨水ますの中にもたばこの吸い殻や落ち葉などのゴミがたまっている。これらは、地表から下水道への水の流入を阻害する要因であり、被害に少なからぬ影響を与えることが予想される。そこで、ここでは、雨水ますへの流入、あるいは雨水ますから下水道への流出については、理想化された条件下で水理学的に評価される水の流出入量を求め、これにある係数を乗じることで、上記の影響を間接的に勘案することにした。ここでは、この割引係数を 0.5 とした場合の計算例を Case 3 とする。

本論文では、いずれのケースについても被害が進行する過程に大きな違いがないことから、Case 3 の結果を中心に説明し、最後に三者の違いにつ

(a) 地下1階



(b) 地下2階

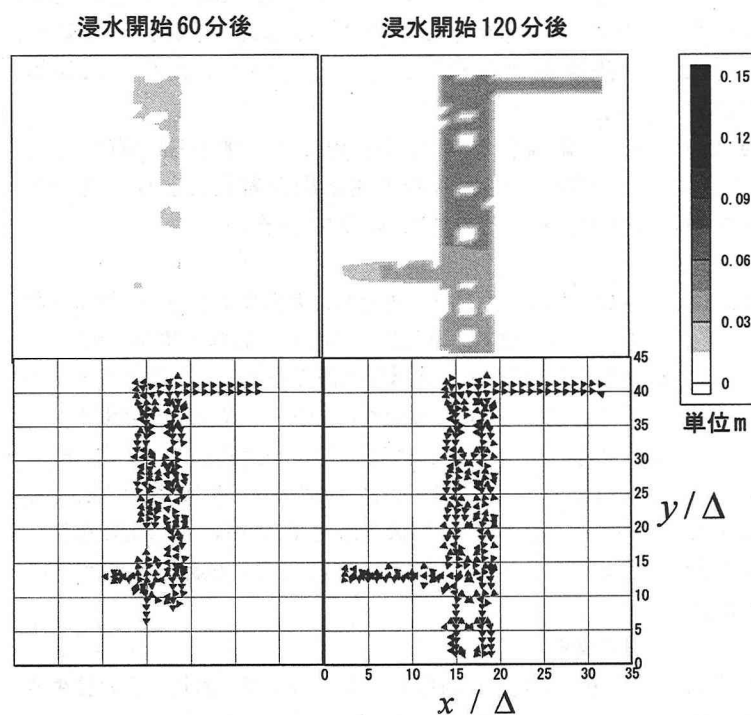


図-7 地下街の浸水状況変化

いて触れる。

まず、図-4に降雨開始60, 90, 120分後の地表(道路上)の氾濫水の浸水深の等値線図(いわゆるハザード・マップ)を示した。大ガード下の地点に関しては同図中には結果を示しておらず、図-5にその水深の時間変化をまとめて示した。図-4より浸水区域が全域に及ぶことはなく、図-1に○印で示した「歌舞伎

町」の標高の低い区域に被害が集中することがわかる。これは、この辺りが谷沿いの道のような地形になっており、実状に即した結果といえる。また、大ガード付近に関しては、降雨開始後90分程度で2 mを越える浸水深となり、降雨が弱まりやがて停止するにともなってその水位は低下する。しかし、この区域には「新宿サブナード」と呼ばれる地下街への連絡階段があり、この地点の水深が約1.5 m (図-5参照)を越えると地下街への浸水が開始する構造になっている。このことは、止水板等による現状の対策を行ったとしても、地下街への浸水の被害が生じることを表している。なお、図-5において、90分以降水位が低下しているが、これはこの区域の氾濫水の多くが地下街に流れ込んだ結果である。

次に、地下街の浸水被害の拡大過程を見ておくことにする。前述の通り、この地下街は地下1階の商店街と地下2階の駐車場とからなる二層構造になっている。計算結果を図-7に示す。降雨開始後45分ほどで浸水が開始し、降雨開始105分(浸水開始60分)後には地下1階の全域に被害が及んでいることがわかる。その最大浸水深は約12.5 cmであり、この間の浸水深の時間変化は極めて急であると言える。一方、降雨開始105分後になると、地下1階から地下2階への流出が活発になることから、これ以降の地下1階の浸水被害はほとんど拡大しない。これは、地下1階から2階への連絡階段が、進入した水を階下に運ぶ水路の役目を担ったためであることは言うまでもない。地下1階の商店街の物的人的被害を最小限に抑えるという観点に立てば、地下1階の水を階下へ速やかに運ぶことが望ましい。これを実現するためには、連絡階段の構造・規模ならびに平面配置を工夫し、地下2階への通水性を高めることが必要であり、これによって地下1階の被害を軽減させることができるのではないかと考える。

また、下水道内の排水状況について簡単にしておく。図-6には降雨開始60分後の下水道網の主要地点における水深の状況を示してある。ここでは、管の内径に対する水深の比を表しており、100%が満管状態にあることを意味している。この

図より、降雨開始60分後には、図-4において地上の氾濫水位が大きくなった「歌舞伎町」の区域の下を流れる下水道本管が満管に近い状態となっていることがわかる。

最後に、ここで対象とした3つのケースの違いについて見ておく。全体の傾向として、被害の拡大過程に大きな違いは見られず、被害の規模において以下に記す差異が見られた。まず、下水道網が全く機能しないとしたCase 1において、地上水深ならびに地下街の浸水被害とも最大となった。この様子は図-5に明瞭に現れている。一方、雨水ますを介しての地上氾濫水の下水道への輸送効率に関して、これを理想的な状態に保って効率よく排除するとしたCase 2では、これを現実に近い扱いとしたCase 3に比べてその被害がある程度小さくなることがわかった。このことは、雨水ますの水処理効率を上げるためにその周辺のメンテナンスを行えば、図-5に示された程度の被害軽減が期待できることを示唆するものと理解することもできる。ただし、Case 2の場合には下水道内の水深が大きくなり、その一部区間において流れが満管状態に達した。現モデルでは、下水道内で開水路流れが生じるものと仮定しており、もし満管状態となった地点については水深が管径に等しいものとするなど、このような流れを理論的に取り扱うものとはなっていない。そこで、上記の結果の解釈に当たっては、この点に留意する必要がある。

また、結論として、ここで想定したような規模の集中豪雨に見舞われた場合に、現有の下水道による雨水排除システムでは、内水氾濫の危機を回避できない恐れがあるのではないかと考える。

4. 結論

本研究では、東京新宿駅周辺の内水氾濫被害の規模を予測することを目指し、著者らのこれまでの地表における氾濫被害予測モデルと地下街の浸水予測モデルに加え、新たに下水道網による雨水排除システムのモデルを作成し、これらを互いにリンクさせることで「統合型の解析モデル」を作成した。さらに、このモデルを用い、東京練馬で実測された集中豪雨に対して、対象地域がどのような被害に見舞われる恐れがあるかを数値的に再現した。ただし、モデルの中に含まれる定数(たとえば地表面流に対するマンシングの粗度係数など)をどのように設定するか、といった問題が残されており、更なる精度の向上を考えたとき、こうした係数を同定するのに十分な実測データがないことが大き

な障害となっている。そこで、こうした数値解析モデルの開発に加えて、モデル係数を同定するためのベンチマークとなる実測データを共有することが必要な時期に来ている。最近、京都大学防災研究所では京都市役所周辺に建設された地下鉄駅を含む地下街の縮尺模型と周辺地域の街路模型を作り、実験を計画的に実施するとのことであり、その成果を大いに期待したい。

最後に、本研究により明らかになった成果を以下に列挙し、結論とする。

(1) 新宿駅周辺が集中豪雨に見舞われた場合には、標高の低い「大ガード下」付近の道路凹部と歌舞伎町の該当地域に浸水被害が生じる。この結論は、現在の下水道網による雨水排除システムが完全に機能したとしても変わらない。

(2) 下水道網による効果が顕著に現れるのは降雨停止後であり、降雨継続中に関して言えば、下水道網を考慮しても地表氾濫水を大幅に減じることにはつながらないとの結果を得た。

(3) 「新宿サブナード」という地下街への雨水の浸入は避けられない。これに対する行政側の対応は近年進みつつあるが、万一浸水被害が生じた場合にその規模を最小化するため、利用者に被害の可能性を知らせることをはじめとした更なる対策が必要である。

(4) 歌舞伎町の該当区域には、地下室を有するものが多く、氾濫水の予測水深を考えたとき、速やかな対応をとることが必要である。

謝辞：本研究の遂行に当たり、東京都下水道局、新宿区ならびに新宿地下駐車場株式会社から資料の提供を戴いた。また、新宿区役所の高橋和雄助役をはじめとした方々との意見交換は、大変有益なものであり、現状を理解する大きな助けとなりました。ここに記して謝意を表します。また、京都大学中川 一教授(防災研究所宇治川実験所所長)ならびに里深好文助教授(大学院農学研究科)には実験模型のご披露とご説明とを戴きました。ここに感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 末次忠司：都市型地下水害の実態と対策，雨水技術資料，Vol. 37，7-18，2000。
- 2) 関根正人，前川桂恵三：都市地下空間の浸水被害シミュレーションの試み—新宿地下街を対象として—，河川技術論文集，第7巻，161-166，2001。
- 3) 関根正人，河上展久，安武弘道，三好 裕：新宿駅周辺を対象とした内水氾濫ならびに地下街浸水過程の数値シミュレーション，河川技術論文集，第8巻，43-48，2002。

(2002. 9. 30受付)