東京都心部の地下空間への氾濫水の流入危険度 とトンネル内の浸水域拡大過程に関する検討

NUMERICAL ANALYSIS OF INUNDATION IN UNDERGROUND SPACE AND SUBWAY TUNNEL IN TOKYO

関根正人¹・関根貴広²

Masato SEKINE¹ and Takahiro SEKINE²

¹ 正会員 工博 早稲田大学理工学術院教授 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)

² 学生会員 早稲田大学大学院創造理工学研究科 (同上)

Recently, localized torrential rain occurs frequently. In order to clarify inundation risk of Tokyo metropolitan area, numerical simulation of urban inundation was conducted. In this study, following three investigations were conducted. First, numerical simulation of inundation event which occurred on June 29, 2014 was carried out by using the actual rain data which was obtained by X-band MP radar. Based on this result, validity of this prediction technique was confirmed. Another investigation was done to find out the inundation risk of each entrance gate to judge whether the inundated water on road could flow into the space of subway stations through it. We specified such entrances gate. And then, we attempted to understand the expanding process of water in the subway tunnel by another numerical computation.

Key words : urban inundation, localized torrential rain, underground space, subway tunnel

1. 序論

近年、地球規模で進行する気象の極端化により、東京をはじめとした大都市では設計強度を大きく超える豪雨が発生している。今後は、豪雨時に予想される浸水の規模ならびにプロセスを可能な限り正確に予測し¹⁾、その結果を被害軽減対策に反映させていく必要がある。さらに、いざという時に有益な情報を提供するリアルタイムの浸水予報の技術を開発・実用化していくこともあわせて重要である。

東京都心部が豪雨に襲われたときに深刻な被害が懸念されるのが地下空間である。著者らは、東京丸の内にある大規模地下空間²⁾や地下鉄溜池山王駅さらには新宿サブナードなどを対象に、地上の内水氾濫と連動した浸水予測を行ってきた。都心部の地下には地下鉄が縦横に延びており、地下鉄駅と道路面をつなぐ連絡口は1,000を超える。もし地上に深刻な浸水被害が発生すると、氾濫水がこれらの連絡口を通じて流れ込み、地下鉄駅が浸水するおそれがある。地下鉄駅を含む地下空間の浸水を防ぐための対策として、近年、連絡口に止水板や防水扉が取り付けられるようにする工事が進んでいる。ところが、その多くが手動で設置するものであるため、設置のタイ

ミングに遅れが生じることがないとは言えず、氾濫水が浸入する危険を0にすることは不可能に近い。ただし、氾濫水が流入する可能性のある連絡口を予め特定しておけば、効果的な対策を講じることができる。

本研究では、首都機能が集中する東京都心部に相当する「芝浦ならびに三河島下水道処理区」からなる広大なエリアを対象に検討を行った。ここでは、リアルタイム浸水予報の実現を目指した検討のひとつとして、国土交通省のXバンドMPレーダによって観測された高空間分解能(約250mメッシュ)のXRAINのデータを用い、これを入力値とした浸水計算を行った。さらに、その計算結果を当時の画像データなどとの比較・検討を行った。これにより、実降雨データを入力値とした予測計算手法の妥当性を検証することを目指した。第二に、著者らのこれまでの検討と同様に2005年に東京都杉並区で観測された豪雨(杉並豪雨と呼ぶ)を対象とした浸水予測の結果に基づき、都心部に位置する地下鉄駅(都営地下鉄を除く)を対象に、地上で生じる浸水のプロセスやその規模の評価を行った。さらに、その結果を踏まえて、この区域内に存在する地下鉄駅へとつながるすべての連絡口を対象に、道路から氾濫水が流れ込む可能性について精査した。また、氾濫水が地下鉄のトンネルまで到達し

た場合を想定して、その水が実在するトンネル内をどのようなプロセスを経て広がっていくのかについて理解するために、数値計算を通じた検討を行った。

既往の研究のうち本研究と最も関連性が高いのは、荒川の堤防決壊を想定し、その際の地下鉄トンネル内の浸水解析を行った池内らの研究³⁾を挙げることができる。

2. 解析の概要

(1) 対象区域の特徴

本研究で対象とするのは、東京都下水道局の芝浦処理区と三河島処理区をあわせたエリアである。ここには、JR 山手線内全域が含まれている。この区域内の地上（道路上）の標高の違いを色分けして示したのが図-1 のコンター図である。ここでは、1m メッシュ毎に計測された LP データを用いて標高を評価した。この区域内には千代田区をはじめ 12 の行政区が含まれ、その地表の総面積は約 104km² である。対象区域の東側と北側には隅田川、南側には目黒川が流れており、西側の境界は JR 山手線上とほぼ一致するように設定されている。下水道に関しては、対象区域の境界と上記のふたつの処理区の外縁線とが一致している。そこで、境界線をまたぐような水の流れは、地上ならびに下水道内とにもないと考えてよい。なお、南北に接する二つの処理区の間には、ほぼ東西に神田川が流れており、下水道内の水の一部は雨水吐を通じて、この神田川に流出するようになっている。また、南側の芝浦処理区内には渋谷川（下流側で古川と名称を変える）が延びており、ここにも下水道からの水が流れ込む。さらには、隅田川に面する東側の低地には多くのポンプ所や水再生センターがあり、下水道内の雨水の多くはこれらの施設を通じてポンプ排水されている。この区域の地形的な特徴として、東側から西側に向かって標高が高くなる傾向にあり、谷地形が西側に向かって入り込んでいる。また、この谷筋に沿って幹線道路が延びており、その道路面下には幹線下水道が整備されているものの、深刻な浸水が生じることが懸念される。

このエリアの地下には、地下鉄の全 13 路線が縦横に延び、100 を超える地下鉄駅が存在する。地上で深刻な浸水が生じると、その氾濫水が連絡口から流入して地下浸水が発生することが懸念される。

(2) 対象降雨

本研究では、二種類の降雨データに対してそれぞれ浸水予測計算を行った。第一は、2014 年 6 月 29 日に東京都 23 区全域で発生した集中豪雨であり、その際に計測された実降雨データを用い、当時の浸水状況の再現計算を行った。この結果については 3. で説明する。第二は、2005 年 9 月に東京都杉並区下井草で観測された豪雨（杉並豪雨）のデータであり、これを用いた計算によって 4. で説明する地下鉄駅連絡口からの氾濫水の流入危険度

図-1 検討対象区域の概要と地上標高コンター図

評価を行った。

まず、2014 年 6 月 29 日の豪雨は短時間ながら極めて高強度であり、対象区域には 15:45 ～ 16:45 の 60 分間にわたって降り続いた。ここでは、国土交通省の X バンド MP レーダによる高精密降雨データ（XRAIN）を用いた。これは、約 250m 毎のメッシュに対する降雨量が 1 分間隔で得られており、これまでにない高分解能を有するデータである。ここでは、対象区域内の各メッシュ毎の降雨量を時々刻々変化するものとして与え、17:15 までの 90 分間にわたる浸水計算を行った。

一方、杉並豪雨は東京都 23 区内でこれまでに記録されている中でも最大級のものである。下水道の設計強度である 50mm/h 以下の降雨の時間帯を除いて比較すると、この雨は、2000 年に名古屋で発生した東海豪雨に匹敵する豪雨と言える。総雨量 263mm、最大時間雨量 112mm であり、降雨開始 50 分後から 140 分間にわたって 50mm/h を超える高強度の雨が降り続いた。本検討では、当時のハイエトグラフに基づき、対象区域内にこの雨が一樣に降るものとして浸水予測計算を行った。

(3) 予測計算手法

計算には、第一著者による浸水予測手法¹⁾を用いた。この解析手法は「地上・下水道・都市河川」の水の流れを一体的に解くものであり、解析に当たっては次のような詳細なデータベースを作成した上で、これを忠実に反映させた計算を行った。すなわち、(1) 路地に到るまでのすべての道路ネットワークの情報、(2) 枝管路まで含めた東京都の下水道ネットワークの情報、(3) 神田川・日本橋川・亀島川、渋谷川・古川といった都市河川の情報や、(4) 建ぺい率や容積率に代表される街区の土地利用状況に関する情報などであり、都市インフラに関わる

ほとんどすべての情報が考慮されている。このほか、道路と下水道とをつなぐ雨水ますや、下水道と都市河川を結ぶ雨水吐、ポンプ所や水再生センターなどについての情報も現実に即して忠実に考慮され、その機能が現実のとおり発揮されるように留意した。これにより考え得る限りの精緻な浸水予測が行われた。

対象区域内には、神田川とその支川ならびに渋谷川・古川という二水系の都市河川が流れている。これらは雨水吐を通じて下水道とつながっている。そのため、都市の浸水予測を行う際には、河川内の流れ（洪水流）についてもあわせて解く必要がある。河川の水位が上昇して、下水道末端に位置する雨水吐の天端の高さを超えるようになると、河川から下水道への逆流が生じることもあり得る。この予測計算手法では、雨水吐につながる下水管の上流端での全水頭と下流端における河川水位との関係から、雨水吐を通じた下水道―河川間の流量を計算した。河川から下水道に向かう逆流についても忠実に再現できるようにになっている。河川における流れの計算は、川幅や河床高・護岸天端高などの実データを踏まえて、一次元不定流計算を行った。渋谷川・古川は、その上流端につながる幹線下水道も含めて、その全流域が対象区域内に位置する。また、神田川はその上流域がこの西側に広がっているが、ここではこの上流域には雨が降っていないものとして計算を行った。ただし、神田川ならびにその支川の流れについては、源流である上流端から河口まで計算するようにした。参考までに、この上流域における同様の計算はすでに報告済み⁴⁾であり、現時点で両者を結合し、神田川流域全体を一括して予測計算できるようになっている。しかし、コンピュータの記憶容量ならびにその演算速度の関係から、ここではあえて全域を一括して計算することはしなかった。

3. 2014 年 6 月に発生した豪雨時の浸水プロセス

本章では、2014 年 6 月 29 日に発生した豪雨時の再現計算の結果について説明する。図-2 に数値予測計算の結果を示す。この図には、当日の 16:00、16:15、16:30 の 3 つの時刻における結果がまとめられている。継続時間の短い豪雨であったことから、深刻な浸水は報告されておらず、数値予測計算の結果も同様であった。このため、紙面の関係で浸水深について詳しく述べることはせず、その一部をふれるにとどめた。

図-2 の上段には XRAIN による各時刻における降雨の面的な分布を示した。この図は、それぞれの時刻に道路上の各地点に降ったとされる雨の強さを、時間雨量に換算した上で、それを異なる色で塗り分けて示した。XRAIN による降雨強度のデータは、対象区域全域を網羅するようにとられており、各メッシュの大きさは東西方向に 283m、南北方向に 231m である。そこで、道路計算点の各々が位置するメッシュを判別し、そのメッ

シュに対して得られた降雨強度の雨がその道路上に降るものとした。図中に紫色で示されるエリアには時間雨量 100mm を超える極めて強い雨が降っていたことになる。また、紫色・赤色・オレンジ色で塗られたエリアでは、下水道の設計強度である 50mm/h を超える雨が降っていたことを表す。

また、図-2 の下段には下水道満管率のコンター図を示した。図中に赤色で塗られた管路が満管状態の流れになっていることを意味する。満管状態の下水管内では水压が高くなっており、そこに到る直前に雨水ますやマンホールから地上に向かって水が溢れ出ることがある。

図-3 は、渋谷駅周辺に注目して計算の結果をまとめたものである。図-3(a) の①は「スクランブル交差点」として知られている地点である。この地点から②の方向に JR 山手線の下をくぐるよう延びるアンダーパスが延びている。NHK による当時の画像を解析すると、16:30 の時点でこの②の地点の浸水深が 0.2m 程度と判断された。これに対して、同地点における浸水深ハイドログラフは図-3(c) 中の青色の実線のようになり、この値は同時刻での計算結果とほぼ一致する。また、16:30 の時点で、図-3(b) 中の③に当たるスクランブル交差点付近、ならびに④に当たるバスターミナル前では、マンホールの蓋に空けられた穴から空気混じりの水が吹き出していたことがわかっている。同時刻に④のバスターミナル前で撮影された写真を図-3(e) に示す。一方、地点③④に位置するマンホール点での下水道満管率のハイドログラフを示したのが図-3(d) である。これらのマンホール地点では 16:30 の直前の 10 分間ほどの間に雨水が急速に集中し、満管状態の流れとなっていたことが確認された。このように、本予測手法による計算により、実現象がかなり良好に再現できていると判断される。今後、さらに多くの観測情報が得られれば、それとの照合を通じて予測手法のさらなる信頼性の検証が可能となる。

4. 地下鉄駅連絡口からの氾濫水の流入危険性

ここでは、道路上の氾濫水が連絡口を通じて地下鉄駅（都営地下鉄の駅を除く）構内に流れ込む可能性に関わる検討結果について説明する。この検討には、2005 年 9 月に杉並区下井草で観測された豪雨データを用いた。図-4(a) には、この豪雨により浸水が最も深刻な状態となる時点（降雨開始 140 分後）の道路上浸水深のコンター図を示した。この図より、図-1 に水色で表示された標高の比較的低い東側のエリアにおいて、特に大きな浸水が生じており、地点によっては浸水深が 1m を超えることが確認された。

地上から地下鉄駅構内につながる階段の上部に位置する連絡口毎の氾濫水流入危険度の評価は、2014 年 9 月の時点での各連絡口に関わる詳細なデータに基づいて行われた。具体的には、各連絡口がどの道路交差点に面し

図-2 道路上の降雨強度・下水道満管率のコンター図：上段が降雨強度，下段が下水道満管率の結果を表す。

図-3 渋谷駅周辺の検討結果：(a) 道路上の浸水深コンター図の拡大図(16:30時点)，(b) 下水道の満管率コンター図の拡大図(同上)，(c) 地点①②の浸水深ハイドログラフ，(d) 地点③④のマンホールにおける下水道満管率のハイドログラフ，(e) 地点④の当時の浸水状況を撮影した画像(16:30時点，NHKを通じて視聴者より提供)。

ているかを調べ、浸水予測結果を踏まえてその点で生じると計算された最大の浸水深と、各連絡口の入口高さとを比較することにより、これを判定した。ただし、連絡口にはすでに止水板を設置するための工事が完了している点も多い。そのため、実際に準備されている止水板の高さについての情報を踏まえ、もし事前に止水板の設置が完了しているとすればその連絡口では氾濫水の流入を防げるのか、といった検討もあわせて行った。

図-4(b)は、各連絡口を通じて道路上の氾濫水が流入する危険性についての検討結果をまとめたものである。

図中に示された四色の●印が連絡口のある地点を表し、その色によって以下の4つの状態のいずれに当たるかが判別できるようになっている。なお、地下鉄駅構内に隣接する建物内部からアクセスでき、道路に面していない連絡口やエレベーターについては、この検討の対象外とした。その結果、対象区域内には合計93の駅があり、そこにつながる連絡口の総数は776箇所であった。詳細に検討したところ、「止水板がない状態で氾濫水が流入する連絡口」(黄色の●印)が288箇所、「止水板が未整備でしかも水の流入が生じる連絡口」(オレンジ色の●

図-4 豪雨による地上の浸水状況と連絡口の氾濫水流入に関わる検討結果：(a) 道路上の浸水深コンター図（降雨開始 140 分後の時点），(b) 各連絡口の氾濫水流入危険度の判定結果．黄色の●印：止水板を取り付けいない状態で氾濫水が流入する連絡口，オレンジ色の●印：止水板が未整備でしかも水の流入が生じる連絡口，赤色の●印：準備されている止水板を遅れなく設置したとしても水が流入する連絡口，水色の●印：氾濫水が流入しないと判断された連絡口．

印) が 54 箇所、「準備されている止水板の高さが不足するため、これを遅れなく設置したとしても氾濫水の流入を防ぎきれない連絡口」（赤色の●印）が 4 箇所、「水が流入することはないと判断された連絡口」（水色の●印）が 430 箇所であり、「止水板を設置することで流入を防げる連絡口」が 230 箇所という結果になった。

この検討結果から、(1) 止水板が設置されない状態では、連絡口の約 37% にあたる箇所から氾濫水が流入する、(2) ただし、整備されている止水板を遅れなく設置することができれば、ほとんどの連絡口において氾濫水の流入を防ぐことができる、ことなどが明らかになった。調査時点では止水板の高さが不足していた連絡口 4 箇所については、速やかな対処が望まれる。また、止水板が未整備である連絡口についても直ちに対策を講じる必要がある。ここで、一例としてこのうちの H 駅について述べると、止水板を事前に設置しておかないと合計 15 箇所の連絡口から氾濫水が流入する可能性がある。複数の連絡口から氾濫水が流入すると急激に浸水域が広がるとともに、複雑な浸水拡大プロセスとなる恐れがある。ただし、この 15 箇所の連絡口から流入が始まる時刻とその流量には差異があることから、対処に当たり優先順位をつけることができ、この順に止水板を設置していけばよいということになる。事前の検討により、このような科学的根拠を得ておくことが重要である。

5. 地下鉄トンネル内の浸水拡大プロセス

本研究では、地下鉄 T 線を具体的な検討対象として、トンネル内に入り込んだ氾濫水が広がるプロセスについ

て検討した。ここでは、これについて説明する。この路線は、東京都 23 区の西部と千葉県西北部を結んでおり、その総延長は約 30km である。このうち、途中の約 17km 分が地下トンネル区間に当たる。このトンネル内の水の流れを、下水道内のものと同様の手法を用いて、一次元非定常流れとして数値計算した。ここでは、計算点を 10m 間隔に設定した。この区間のトンネルは区間により矩形あるいは円形断面となっている。そこで、円形断面区間に関しては、面積の等価な矩形断面に置き換えて解いている。実際のトンネルは東向きと西向きの軌道が異なる位置に敷設されている区間と、同一の横断面内に両方が存在する区間とがある。前者に関しては、方向別に独立したトンネルとし、水深ならびに流速をそれぞれ計算した。一方、後者では、両方の軌道に対する値が同一となるため、そのような計算方法によりその流れを解いた。本計算では、図-5 中の三地点 A～C にそれぞれ $1\text{m}^3/\text{s}$ 、 $0.5\text{m}^3/\text{s}$ 、 $1\text{m}^3/\text{s}$ の流量の水が同時に流入し続けると想定し、この状態が 24 時間にわたるとした。なお、この流入地点は、いずれもプラットフォームにつながる階段のある位置にとられており、その流量はこれまでの浸水予測計算の結果などを踏まえて決定した。連絡口の幅を 2m、越流水深を 0.3m とすると $1\text{m}^3/\text{s}$ 程度の流量となることから、ここではこの程度の流入を想定したことになる。それぞれの地点は、神田川、日本橋川、隅田川に近い位置にあり、河川からの氾濫が生じた場合にはこれよりもさらに大きな規模の流入となる可能性がある。

図-5 には、氾濫水の流入開始から 120、300、960、1200 分後の水面形が示されている。これはあくまでもひとつの計算事例にすぎないが、このような計算を行う

図-5 路線上の水面形の縦断図：上から順に氾濫水の流入開始から120, 300, 960, 1200分後の状態を表す。各縦断図の原点は標高0mを示し、縦軸の1目盛が高低差10mに相当する。黄色の矢印は氾濫水が流入するとした地点、青色、黄色で塗りつぶされた箇所が浸水している区間、トンネルの西向き路線をそれぞれ表す。

ことによって、トンネル内で生じる流入水の流動の傾向を窺い知ることができる。なお、ここでは三地点からの水の流入を想定したが、計算時間内に各々から流入した水がトンネル内で出遭うことはなかった。このため、それぞれを独立した事象として解釈することが可能である。トンネル内の水は当然ながら水位の低い地点を目指して流れるが、トンネルには峠と谷に相当する凹凸が存在するため、その冠水範囲の拡大は必ずしも連続的に単純なものではないことがわかる。それぞれの峠の部分に遮られるためであり、これを超えられるまではその上流側で水深が増大していく時間がある。ただし、この流入がさらに長時間にわたって継続すると、範囲の拡大を妨げていた峠を超えて水が流れるようになるため、やがてはトンネル全体が水没する事態にまで到ると考えられる。このような情報は、移動車両をどの駅で停車させると利用客の避難上望ましいのか、車両まで水没することは避けるにはどの場所に停車させるとよいか、といった点を考える上での根拠のひとつとなる。

6. 結論

本研究では、東京都心部に位置する広い範囲を対象として、浸水の数値予測計算を行った。また、その結果を踏まえて、区域内に位置する全ての地下鉄駅に対して、そこにつながる連絡口からの氾濫水の流入危険性の判定を行った。これにより、どの連絡口から水が浸入する可能性が高いかが明らかになった。なお、この情報はすでに管理者に伝えられ、浸水被害軽減対策に活かされている。最後に、実際の地下鉄のトンネルを対象として、トンネル内の流入水の流動についての数値解析を行った。

その結果、トンネル内に峠のような凸地形があることが重要であり、これがトンネル内の水の流れを大きく支配することが確認された。

謝辞：本研究の一部は東京地下鉄株式会社との共同研究の成果であり、データの提供を含めて多大な協力をいただいた。河川ならびに下水道に関する情報は東京都建設局ならびに下水道局から、XRAINによる降雨データは国土交通省からそれぞれ提供を受けた。また、2014年6月29日の豪雨時の浸水状況に関しては、NHKの担当者から画像の提供を受けるなどご協力いただいた。本研究の遂行に当たり、中沢優也君・中村光宏君・鈴木昌宏君（当時、早稲田大学学部学生）の協力を得た。ここに記して感謝申し上げたい。

参考文献

- 1) 関根正人：住宅密集地域を抱える東京都心部を対象とした集中豪雨による内水氾濫に関する数値解析，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.67，No.2，70-85，2011。
- 2) 関根正人・古木雄・関根貴広：東京都心部の内水氾濫と大規模地下空間浸水の危険度に関わる数値解析，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.71，No.4，I_1435-I_1440，2015。
- 3) 池内幸司・越智繁雄・安田吾郎・岡村次郎・青野正志：大規模水害時における地下鉄等の浸水想定と被害軽減方策の効果分析，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.68，No.3，136-147，2012。
- 4) 関根正人・浅井晃一：神田川流域を対象とした豪雨による浸水・氾濫に関する数値予測，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.71，No.4，I_1429-I_1434，2015。

(2015. 9. 30 受付)