

都市域における内水氾濫と地下鉄に接続する 地下空間の浸水に関する数値解析

NUMERICAL ANALYSIS OF INUNDATION PROCESS IN UNDERGROUND SPACE CONNECTING TO A SUBWAY STATION

関根正人¹・河上展久²

Masato SEKINE¹ and Nobuhisa KAWAKAMI²

1 正会員 工博 早稲田大学理工学部社会環境工学科 (〒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)

Inundation process in underground space which connecting to a subway station in urban area was studied numerically. Actual data sets of (1) road network, (2) drainage network and (3) underground space in the area around Shibuya Station were considered here, and a simplified numerical model was constructed. Based on the results of numerical computation, the characteristics and the weak points of the drainage system in this area were quantitatively understood. It was revealed that (1) the local area whose ground elevation is relatively lower and (2) the underground space are the possible area where extensive damage will result if there happens to be the rainfall whose intensity exceeds the designed one.

key word : inundation, underground space, drainage network, subway

1. 序論

近年、我が国の大都市では時間雨量が 100mm を越える集中豪雨が増加するような傾向にある。この豪雨は、台風による豪雨のようにある程度の予測がつくものではなく、ゲリラ的に都市を襲うことが知られている。現在の都市の排水能力としては、概ね時間雨量 50mm の雨が処理できる程度のもので整備されているため、前述のような豪雨に対して都市域は脆弱であると言わざるを得ない。また、1999 年の東海豪雨や、福岡博多駅を中心とした氾濫被害のように、都市を舞台に氾濫が生じると、その地域の下に広がる地下空間への浸水被害が引き起こされ、人命まで失われる例さえ見受けられる。本研究では、地下空間を有する都市域における内水氾濫に焦点を絞り、検討を進める。都市域が豪雨に見舞われたときにその氾濫被害がより深刻になってしまう要因には大別して次の二点が考えられる。第一の要因としては、都市の構造、すなわちハード面に関するものが挙げられる。現在の都市、とりわけ政令指定都市のような大都市では、街のほとんどがコンクリートとアスファルトで覆われ、地表面を介しての雨水の浸透や地表面における一時貯留などは期待できな

い。また、都市の地表面下には多くの地下空間が開発されており、地下鉄・地下街といった公共の施設ばかりではなく、地下駐車場や個人住宅の地下室といった小規模な地下空間も年々増加している。さらに、大規模なビルの中には未だに地下階に電気室や機械室などを設けているものも少なくない。従って、地下空間が浸水被害に見舞われると建物の機能が失われることになる。第二の要因としては、水害に対する関心・知識・対策といったソフト面に関するものが挙げられる。震災や火災などと比べ、都市域に暮らす人々の水害に対する防災意識は希薄であると言わざるを得ない。しかも、これまで多くの水災害や土砂災害は、河川の近辺か山間部において生じてきており、大都市域の特に周辺に河川がない環境下では、自らが被災するというイメージを描けないとしても何ら不思議はない。また、2003 年の福岡豪雨では隣り合うホテルで被害の度合いが大きく異なることとなったが、これは防災意識や対応のわずかな違いによって被害が軽減できることを示す例と言える。そこで、今後速やかに都市の内水氾濫に関する情報をとりまとめ、これを地下空間の管理者や所有者のみならずその利用者にも広く周知していくことが必要である。

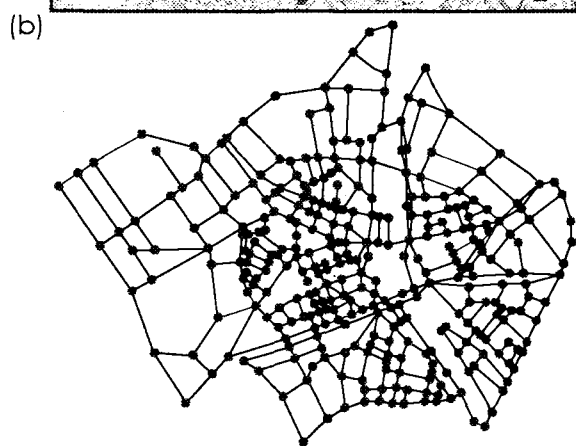
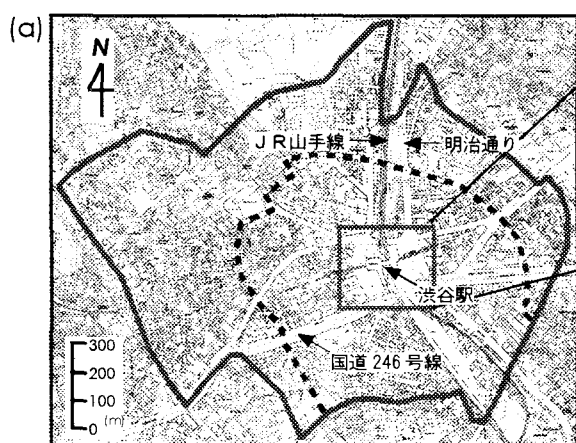


図-1 解析対象区域の概要：

(a) 解析範囲（実線の範囲内。図中の点線は外側では道路ならびに下水道の解像度を下げている），(b) 道路ネットワーク，(c) 下水道ネットワーク

このような点に鑑み，近年，都市域における内水・外水氾濫に関する研究や，地下空間の浸水に関する研究が精力的に進められてきている。著者らの研究もその一つであり，地下街を含む新宿駅周辺の地域を対象として，地下空間への浸水を含む内水氾濫解析モデルの構築^{1),2)}に努め，都市水害の予測，被害軽減の手法などを水理学的に検討してきている。本研究では，東京を代表するもう一つの繁華街を有する東京都渋谷駅周辺を研究対象として内水氾濫解析を行い，その被害実態把握に努めた。これは，今後，

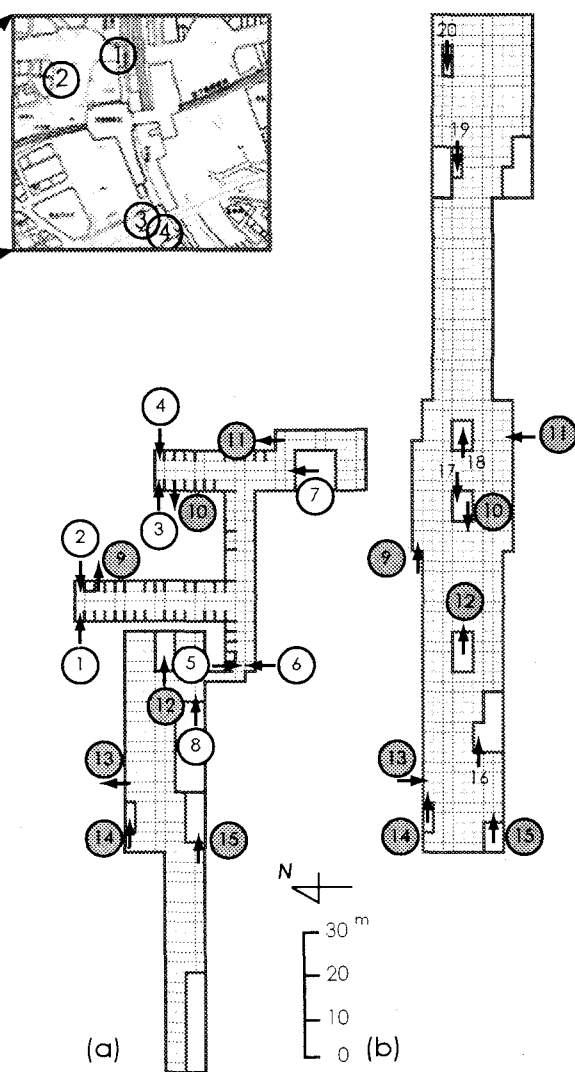


図-2 地下空間の概要：(a) 地下1階，(b) 地下2階
数字は連絡階段の番号を表し，図中の白○印は地上と地下1階を，グレーの○印は地下1階と地下2階を，また無印は地下2階と地下3階（地下鉄ホーム）を結んでいる。

この駅周辺の地下空間が，新たな地下鉄の乗り入れなどによって大幅に再構築される予定であることを念頭においてのことであり，少なくとも現状を水理学的に把握しておく必要であると判断したためである。著者らの解析モデルは，地表の氾濫水の流動，下水道網による排水，下水道網から地表への逆流，三層構造の地下空間への雨水の浸入，などを同時に考慮するものである。

2. 解析概要

(1) 解析対象区域と降雨データ

本研究における検討対象は，東京渋谷駅周辺の図-1(a)の実線で囲まれた区域である。この区域には，国道246号線ならびに明治通りという幹線道路が，

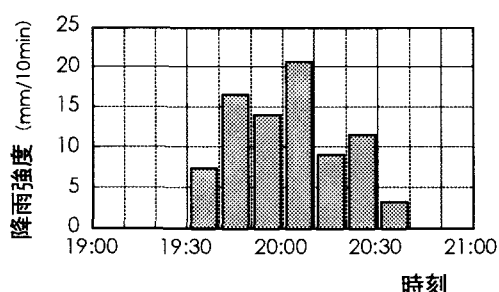


図-3 渋谷における実績降雨 (1999年8月29日)

それぞれ東西あるいは南北方向に通っている。また、明治通りの西側には、通りに沿うようにJR山手線の路線がある。図-1(b)にはこの地域の道路ネットワークをまとめて示した。この地域は前報¹⁾の新宿と同様に高度に都市化されており、空地はほとんどなく、宮益坂、道玄坂といった急勾配の坂道が多い。そして、この地形の最深部に当たる位置に渋谷駅があるような地形となっていることから、この区域に降った雨水は駅周辺に向かって集められる。そして、この駅前に位置する通称スクランブル交差点の直下には、本研究で注目する地下鉄へと繋がる地下街が広がっている。この地下街の構造は図-2に示した通りであり、路上に存在する連絡階段を通じて水が浸入することで、この地下街は1999年に浸水被害に見舞われている。この地下空間は、地下1階に地下街と地下鉄への連絡通路、地下2階に地下鉄連絡通路があり、地下3階が地下鉄のホームに当たるような三層構造となっている。この地下街は、地下鉄とJR線、あるいは隣接するビル群の地階とを結んでいるため、早朝から深夜まで利用者の流れが絶えることはなく、きわめて利用頻度が高いといえる。さらに、この付近には道路がJR線の下をくぐるように立体交差する高架下の窪地が2箇所あり、地下街と同様に冠水被害を経験してきている。また、図-1(c)にはこの地域の路面下に広がる複雑な下水道網を示しており、これにより雨水が区域外へと排除される。以上が対象区域の特徴である。

本研究で対象とする降雨は、1999年8月29日にこの渋谷で観測された実績の降雨であり、そのハイエトグラフは図-3に示した通りである。降雨継続時間は1時間と短い、時間雨量が約100mm/hrという典型的な集中豪雨であった。この降雨では、前述の地下街と2つの高架下で浸水被害を受けている。

(2) 地表の氾濫計算

解析に先立ち、実際のデータを数値化した上で図

-1(b)のような道路ネットワークを作成した。具体的には、交差点間距離、道路幅ならびに交差点標高などの数値データを作成し、これを元にネットワークを忠実に再現した。この図は、道路を線分として描き、その交点、つまり交差点を○で表現することで示したものである。図-1(a)の点線の内側は路地の一本一本に至るまですべての道路を再現したが、その外側に関しては解析の簡略化のため幅員の狭い道路を省き、主要な道路のみ考慮した。本解析では、交差点を計算点にとり、交差点間の中点を通る面を境界面とするコントロール・ボリュームに対して体積保存の関係を考慮し、道路上の氾濫水の水深を算定した。水流の流れは、拡散波近似の考え方に従い、Manningの平均流速式を援用して評価している。なお、このコントロール・ボリューム内の路上には、雨水を下水道へと運ぶための雨水ますが設置されている。そこで、雨水ますを介しての路上と下水道との水のやりとりを考慮する。雨水ますの形状は、概ね直径0.5m、高さ0.8mの円筒であり、路肩に沿って20m間隔に設置されている。また、下水道が満管になり、雨水ますを介して路上への逆流が生じる場合があるが、これについても考慮する。また、コントロール・ボリューム内に地下街への連絡階段がある場合にもその流入量を評価し、路上水深の計算の際に考慮している。なお、路上から地下空間や雨水ますへの流入には、段落ちの考え方を適用している。

(3) 下水道網の計算

下水道網における解析は、地表の路上におけるものとほぼ同様である。解析に当たっては、図-1(c)に示したような下水道ネットワークを再現した。図-1(a)の点線内に関しては実在するすべての下水管を考慮し、その外側ではネットワークの一部として考慮した道路下に埋設されている下水管のみ考慮した。解析は、下水管の接続点に計算点をおき、これを中心としたコントロール・ボリューム内の体積保存の関係から管内の水深を求める。そのため、下水管相互の接続点間の距離、管径、接続点の標高(管底)を数値データとして用意し、これを元に下水道ネットワークを再現した。本研究では、計算が煩雑になるのを避けるため、下水管を面積の等価な正方形断面の管に置き換えて考えており、管径が異なる下水管が接続されているコントロール・ボリュームでは、接続する複数の管の長さに応じた重み付き平均をとることで一様な管径を定めることにした。また、管内の流れが満管状態となることを考慮し、スロット

モデルを導入した取り扱いをしている。なお、スロット幅は計算の安定を考慮し、平均管径の5%とした。

地表と下水道との間の水のやりとりに関しては、雨水排除システムの中で重要な役割を担っている「雨水ます」を考慮に入れた解析を行っている。本解析の難しさはこの点にあり、前述の道路網上のコントロール・ボリュームと下水道網のコントロール・ボリュームとは当然のことながら一致しない。そこで、双方のネットワーク上で、相互に関連し合うものを特定し、この間の水のやりとりをそれぞれの水深を考慮に入れながら、雨水ますを介した水の出入りを評価することが必要となる。

(4) 地下空間の浸水解析

地下空間においては、地上より浸入してきた氾濫水が、連絡階段を通じてどのように流れ広がるかを解析し、地下空間の各地点における浸水深の時間変化を評価した。本研究で対象とした地下空間は、図-2のように地下1階が地下街と地下鉄への連絡通路、地下2階が連絡通路、地下3階が地下鉄ホームになっていることは述べた。ここで想定される地表水の地下空間への浸入は、地上からの連絡階段を通じて生じる。そこで、連絡階段の入り口が位置する地表のコントロール・ボリューム内の水深が、ステップ高である40cmを越える場合には、地下空間への浸水が始まるものとして解析を行った。

さて、地下空間における具体的な計算は以下のように行った。まず、地下1、2階に関しては、地下街の店舗の基本サイズである $3 \times 3 \text{ m}$ を計算格子サイズとしたスタッガード格子を設定し、平面二次元流解析を行った。地下鉄のホームならびに線路に当たる地下3階に関しては、ここでの流れを詳細に計算することはせず、浸水量ならびに浸水深を評価するに留めた。すなわち、ここを貯水槽のように取り扱い、その底面積をホームの長さ（約300m）、上り下りそれぞれの線路の幅（約5m）などを考慮して、 3000 m^2 とした。

(5) 計算条件

地表、下水道ならびに地下空間における水の流れは、前述の通り基本的には拡散波近似に基づき解析している。その際に必要となるManningの粗度係数は、上記のそれぞれに対して0.05、0.013、0.02とした。これは、それぞれに想定される値の範囲内で試行錯誤をした上で決めた値である。この値が真に妥当であるか否かを検証するためには、観測データが必要であるが、現在のところこれが得られていないと言うのが現状である。これについては今後の課題

と考えている。また、計算に当たっての初期状態として、いずれも水深が0であるとするDry Conditionを適用している。

3. 結果と考察

(1) 地表の内水氾濫

図-4および図-5に地表の氾濫状況について解析した結果を示した。後述するいくつかの地点を除いてほとんどの地域で深刻な被害になるような水深には到らないことが理解された。図-4には矢印で示した注目地点の浸水深の時間変化（横軸は降雨開始からの時刻を表す）を示したが、図中の楕円で囲んだ明治通り上の地点Cを除けば、それほど大きな水深にはなっていない。これに対して、この地点(c)や、図-5に示した駅前の4地点ではある程度深刻な状態になることが見て取れる。図-5中の①と③および④は、道路が鉄道の下をくぐっているいわゆる高架下に相当する。また、②が通称スクランブル交差点と呼ばれている地点であり、この下に地下空間が広がっている。これらの図から、図-4に楕円で示された地点Cや、駅前の上記交差点付近、国道とJR線の高架下には特に注意が必要である。定量的に見てみると、図-5より、高架下③および④では、降雨開始後40分ほどで水深が1mほどになることがわかる。また、図-4の楕円の区域では下水道からの逆流が生じ、本解析の範囲内でもその総逆流量が 125 m^3 にも及び、逆流が生じた地点近傍の水深が0.4mを越えることになった。なお、これ以外の地域で下水道から地上への逆流が生じることはなかったものの、下水管内の流れはほぼ満管状態となり、地表の氾濫水を効率よく排除できない箇所が多数存在するとの解析結果を得た。たとえば、地表の水深が概ね10cm以上の地点では、その直下の下水道が満管になる傾向にある。また、この区域で最も浸水が懸念される地域は交差点②付近であり、その水深が0.4mを越えるために、降雨開始30分ほどでその直下にある地下空間への浸水が開始する結果となった。この地下空間への総浸水量の時間変化は図-6に示す通りである。なお、この浸水は図-2の連絡階段5および6からのものであった。

(2) 地下空間の浸水

次に、地下空間の浸水状況について説明する。まず、図-7は地下1、2階の浸水深のコンター図を立体的に描いたものである。ここには浸水開始から10、30、60分後（各々降雨開始から40、60、90分後）の結果が示されている。また、図-6には各階

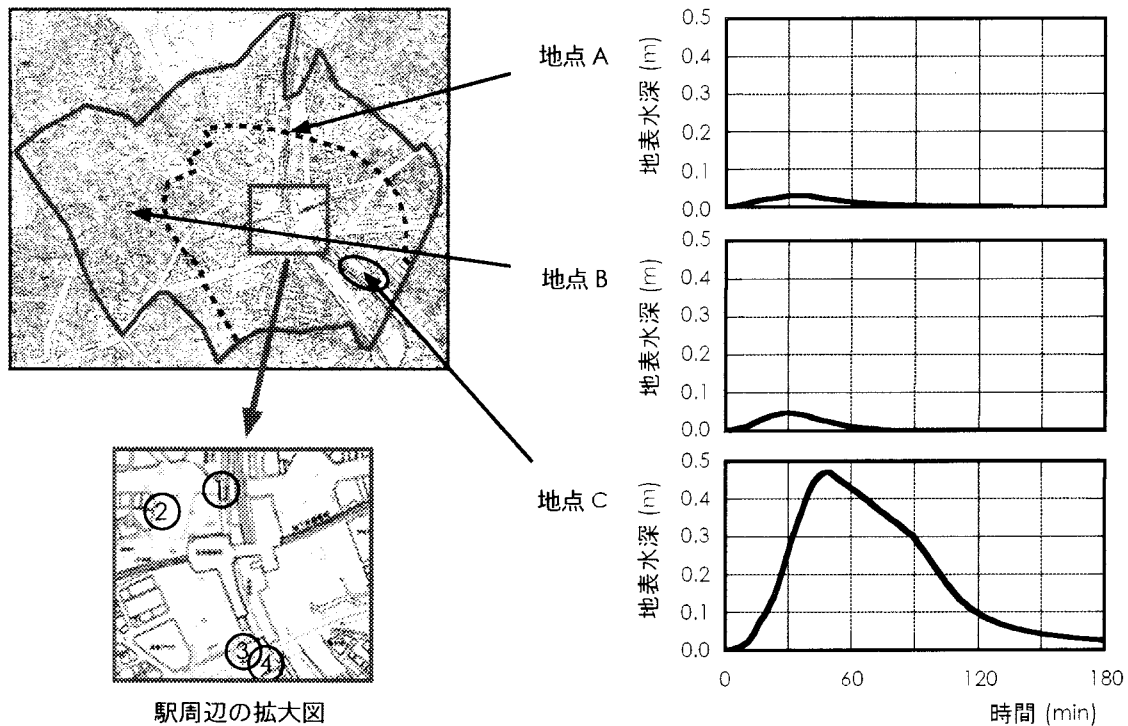


図-4 地表氾濫水の水深の時間変化

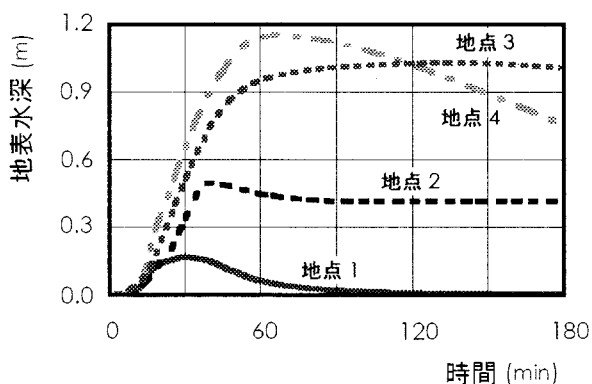


図-5 駅周辺の注目点における水深の時間変化

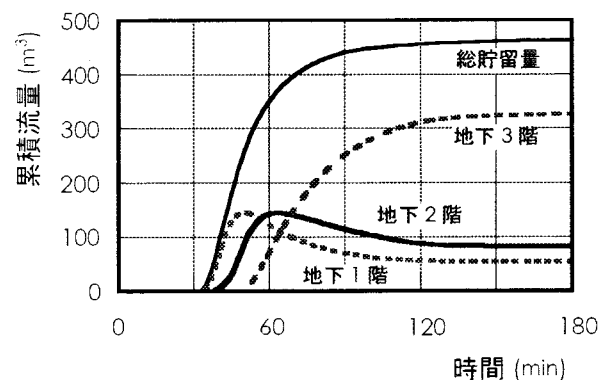


図-6 地下空間内の各階における貯留水量の時間変化

に貯留されている水量の時間変化を示してある。図-7より、浸水開始から30分後には地下空間のほぼ全域に氾濫水が到達することがわかる。しかし、60分後以降になると水深は減り始め、全域で3～4 cm程度となることがわかる。これは、図-6よりわかる通り、地下空間に浸入した氾濫水の多くが地下1階、地下2階を経由して地下3階へと流入したためである。地下3階にあたる地下鉄構内に関しては、線路上の水深の変化を図-8に示してある。この線路部分では降雨開始後60分（浸水開始後30分）程度で3 cmほどの水深となり、150分後以降ほぼ約11 cmに収束するようである。なお、この地下鉄駅は周囲に比べて地中の深い位置にあるため、この解析条件の下では、連続する線路を通じて浸水した水が輸送されるには到らないことが理解された。さらに、

図-9には、図-2に示した連絡階段のうち主要なものを通じて浸入した水量の累積値の時間変化を示してある。この図を見ることにより、この地下空間内の浸水進行状況を理解することができる。まず、地上からは連絡階段No.5およびNo.6を通じて浸水するが、その後の水の流れは、浸水点近傍の連絡階段No.9, 11, 12を通じて地下2階へと運ばれ、最後はNo.16, 17, 18を通じて地下鉄構内へと浸入する、という経路をとるものと判断される。このことを避難誘導の観点から捉え、上記の階段を避けた安全なルートを予め見いだしておくことが可能であることを意味する。

この地下空間の場合の浸水の進行状況を、前報^{1), 2)}までに説明してきた新宿のものと比べると、渋谷の地下空間の方がその変化が速やかであり、結果とし

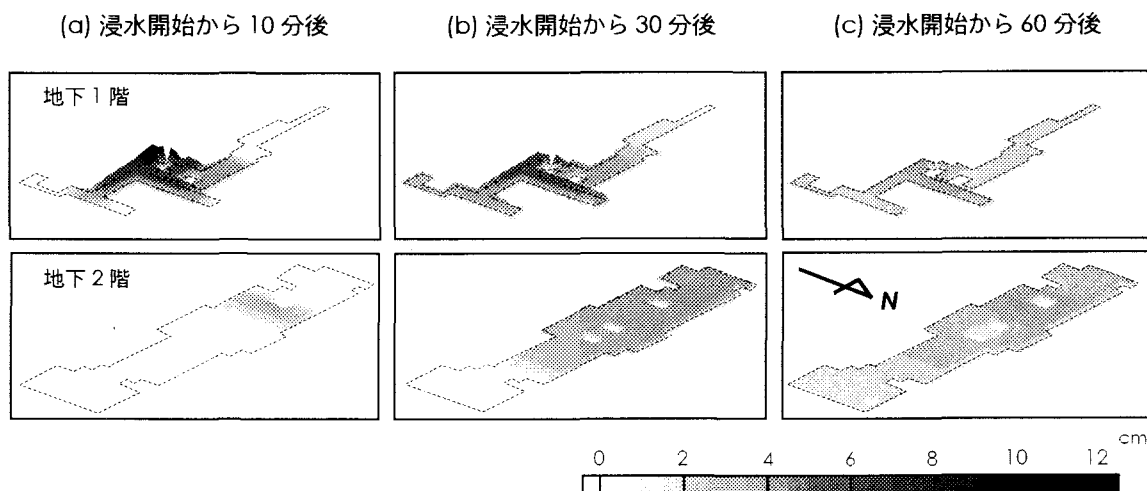


図-7 地下空間内の浸水深のコンター図
(上段：地下1階，下段：地下2階，図中の点線は各階の概形を表す。浸水開始は降雨開始から30分後。)

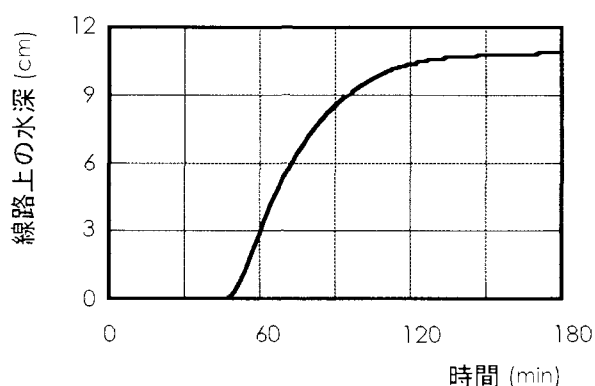


図-8 地下鉄駅構内の線路上の水深の時間変化

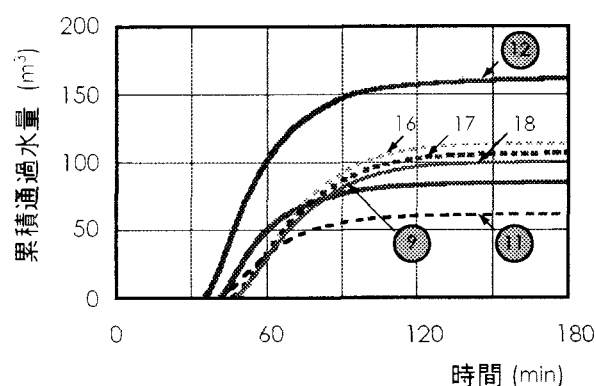


図-9 連絡階段毎の通過水量の累積値

て最下層に水が到達するのにあまり多くの時間を要しないことが理解された。両者の地下空間の構造を比較検討したところ、主要な水の経路となる連絡階段の幅が新宿におけるものに比べて2倍ほどの大きさをもつことが顕著な差異であり、これが直接的原因であると判断された。このように、多層構造をもつ地下空間の場合には、その浸水状況を支配する要因として連絡階段の規模が重要であると考えられる。

4. 結論

本研究では、著者らのこれまでの解析モデル^{1), 2)}を東京渋谷駅周辺地域に適用し、この地域の内水氾濫特性とその下に広がる地下空間への浸水過程について検討を加えた。解析モデルに関しては、さらに精緻化に努め、雨水ますを介した地上と下水道との間の水のやりとりを合理的に取り扱うよう配慮した。検討の結果、地下空間の浸水過程において連絡階段の規模の影響に留意する必要があることが改め

て認識された。本文中にも記したが、現状では、実測データの不足から、モデルに含まれる諸係数を的確に設定することが容易ではない。今後は、解析手法の開発と合わせて、その妥当性を検証するための実測データを得ることが不可欠である。

謝辞：本研究の遂行に当たり、東京都建設局米澤彰三氏ならびに東京地下鉄(株)工務部武藤義彦氏のご協力を得た。また、データの数値化に当たり当大学学生の中村淳君の協力を得ている。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 関根正人，河上展久：集中豪雨による都市域の内水氾濫と地下街浸水の被害軽減に関する研究，河川技術論文集，第9巻，149-154，2003。
- 2) 関根正人，河上展久：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，水工学論文集，第47巻，889-894，2003。

(2004.9.30 受付)