

地上一地下鉄トンネルの統合氾濫解析による 地下鉄路線およびその周辺地域の 水害脆弱性に関する基礎的検討

FLOOD VULNERABILITY ANALYSIS OF SUBWAY AND SURROUNDING
URBAN AREA BY USING AN INTEGRATED INUNDATION MODEL OF
SURFACE AND SUBWAY FLOODS

朝日一堯¹・戸田祐嗣²・辻本哲郎³
Kazuaki ASAH, Yuji TODA, Tetsuro TSUJIMOTO

¹学生会員 名古屋大学大学院工学研究科博士課程前期課程 社会基盤工学専攻
(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

²正会員 博(工) 名古屋大学大学院工学研究科准教授 社会基盤工学専攻

³フェロー会員 工博 名古屋大学大学院工学研究科教授 社会基盤工学専攻

Recently the inundation hazards in underground space and subway have occurred frequently. The inundation in subway space is known to yield big economic loss, negative effects to daily life as well as loss of human life. In this study, an integrated inundation analysis model was developed, which can predict the propagations of surface flood and subway flood simultaneously. Analyzed by this model with simolifies the subway in operation. It was revealed that subway without flood control management, flood propagation of subway proceeds rapidly. There is only a few minutes until the water depth reaches the ceiling at subway tunnel when flooding has begun. Tide gate or water stop door is effective in reduction of the flood hazards

Key Words : flood, subway, inundation hazard, integrated model, urban area, tide gate

1. はじめに

近年、地下空間の発展とともに、豪雨や地震、台風によって引き起こされる洪水、津波、高潮などの氾濫水が地下空間に流入する事故が多発している。また今後、地球温暖化など様々な要因による降雨強度の増加や集中豪雨の頻度増加が予測され、将来的な洪水被害が増加することが見込まれている。また、南海トラフ巨大地震による津波の襲来など、地上の浸水規模についても、従来の想定を大幅に上回るものが相次いで発表されている。これらによると、地下鉄駅が存在する地上部でも、河川周辺や低平地においては、数mの浸水深が発生する可能性がある¹⁾³⁾。そのような状態では地下鉄路線に流入した氾濫水が、流入箇所とは別の地下鉄駅や坑口などから地上に逆流し、地表流の浸水想定区域外でも浸水が生じることも予想される。このように、地下空間の浸水は氾濫水が地下鉄トンネルを経由して移動するため、思いも

よらぬところで浸水が発生する可能性がある。地下空間の浸水は直接的な人命への危険だけでなく、都市の交通網といった都市機能の一部を麻痺させ、経済的損失も引き起こす。

地下空間での氾濫水の挙動を考えると、特に地下鉄では氾濫水は地下鉄路線に沿った一方向のみにしか伝搬することができず、一次元的な挙動をみせるものと考えられる。一方で、地上の氾濫水は、地形勾配や粗度に応じて様々な方向に進み、二次元的に伝搬、拡散する。このため、地上と地下鉄では氾濫水の伝搬過程には何らかの差異があると考えられる。

以上のことより、本研究では、地下空間における人的被害の回避策や、発展を続ける都市空間の総合的な治水対策の在り方を考えるための第一歩として、巨大な高潮・洪水・津波による洪水を想定し、地上と地下の氾濫伝搬の差異について数値解析により検討を行う。具体的には、浸水過程の水理特性の変化、浸水に要する時間、地下空間への浸水防止対策の効果などを把握する。

2. 地上と地下空間を考慮した浸水解析手法

(1) 地上の解析手法

地上の氾濫解析は土木学会・水理公式集例題プログラム⁴⁾をベースとし、解析に必要な種々の改良を行った。

主な改良としては氾濫水の流入の表現手法の変更がある。例題プログラムは破堤による氾濫を対象としていたプログラムであったため、氾濫水の流入は1区画のみのフラックスとして与えられていた。また、流入区画の水深は算出されなかった。本研究では流入が多数区画に及ぶ高潮や津波を対象とするため、多数区画からの同時流入を表現する必要があった。このため、流入区画の連続式において、流入流量分の水深を上昇させることによって表現した。

(2) 地下の解析手法

本研究では、地下空間の氾濫流解析にポンドモデル⁵⁾を用いた。これまで多くの解析で用いられてきた従来のポンドモデル^{5),6)}は、各貯留槽が水平であるとみなし、ポンド間の流量を段落ち公式で算出するものである。このモデルには、通水能を表現する諸変数やパラメータの設定が複雑なこと、区画内の流速などの情報が得にくいことなどの欠点があった。

本研究では池内ら⁷⁾が開発したポンドモデルを用いた。このポンドモデルは、中央防災会議「大規模水害対策における専門調査会」が荒川決壊時に氾濫水が地下鉄に及ぼす影響を検討するために開発したモデルである。このモデルには貯留槽に勾配があると考え、流速を Manning 公式で算出するという特徴がある。これにより、従来のポンドモデルで必要だった通水能を表現する諸変数やパラメータの設定の合理化と簡易化が可能である。さらに、本ポンドモデルでは流速を算出するため、避難困難度の算出に用いる比力の計算なども可能となった。

地下—地上間の流出入量の算定は越流公式、オリフィス公式を用いて行った。地下空間での上層と下層の水の移動を表現した式としては、段落ち式⁵⁾や運動量式⁵⁾、越流公式、オリフィス公式などがある。これらの式は、地下街での上層と下層の水の移動や、従来のポンドモデルで、ポンド間の水の移動を表現することに用いられてきた。川池ら⁸⁾は、地上—下水道間での氾濫水の移動を再現するために、以下の4つの式を用いた。本研究でも、地上—地下鉄トンネル間の水の移動量を算定するためにこれらの式を用いた。これらの式は地上水深や地下鉄水深などの大小によって4種類の式を使い分ける。

① 地下水位 < 地上高さ

$$Q_{ing,i} = \mu B D_{fg} \sqrt{g D_{fg}} \quad (1)$$

② 地上高さ < 地下水位 ≤ 地上水位

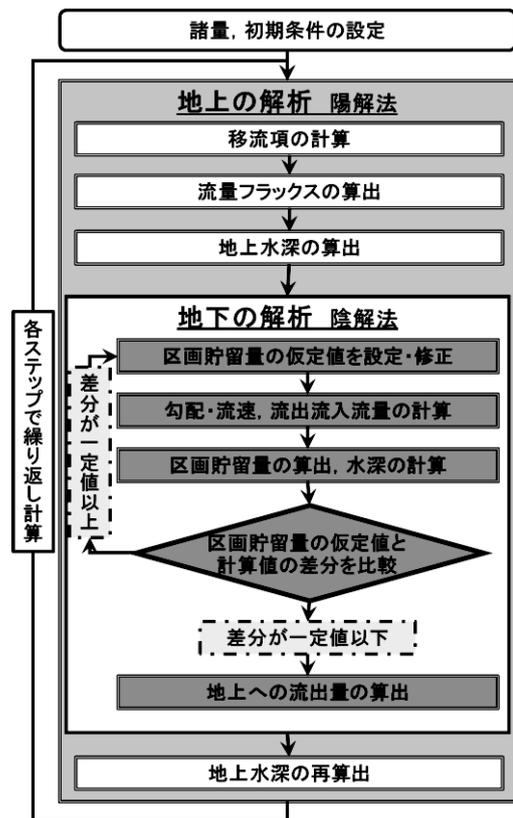


図-1 解析のフローチャート

$$Q_{ing,i} = \mu B (h_{fg} - f_{fu}) \sqrt{g (h_{fg} - h_{fu})} \quad (2)$$

③ 地上水深 ≤ 2/3(地上水位 - 地上高さ) 完全越流

$$Q_{outg,i} = \mu' B h_{fu} \sqrt{2 g h_{fu}} \quad (3)$$

④ 地上水深 > 2/3(地上水位 - 地上高さ) 潜り越流

$$Q_{outg,i} = \mu'' B D_{fg} \sqrt{2 g (h_{fu} - h_{fg})} \quad (4)$$

ここで、 $Q_{ing,i}$: 地上から地下への流入量、 $Q_{outg,i}$: 地下から地上への流出量、 μ 、 μ' 、 μ'' : 係数(=0.544, 0.35, 0.91)、 B : 出入口幅、 D_{fg} : 地上水深、 D_{fu} : 地下水深、 h_{fg} : 地上水位、 h_{fu} : 地下水位である。

なお、地上から地下への流入は、地下鉄駅の存在する区画において地上水深が浸水判断水深を超えた場合、瞬時に地下鉄路線に水の流入が始まり路床に氾濫水が到達すると仮定して解析を行った。また、地下空間の解析には陽解法ではなく陰解法を用いた。これは計算結果の精度を向上させ、計算負荷を軽減するためである。

(3) 地上と地下の統合解析手法

従来の解析では、地上と地下の解析は分離されることが多かった。例えば池内⁷⁾は、以下の手順で解析を行った。初めに、地上部の氾濫解析を土木研究所⁹⁾が示した手法で解析を行い、ついで地上水深を元に地下への流入量を算出し地下の解析を行っている。この方法では、氾濫水のデータは地上から地下へ受け渡されるのみであり、地下での氾濫水の挙動による地上の浸水への影響を検討することができない。

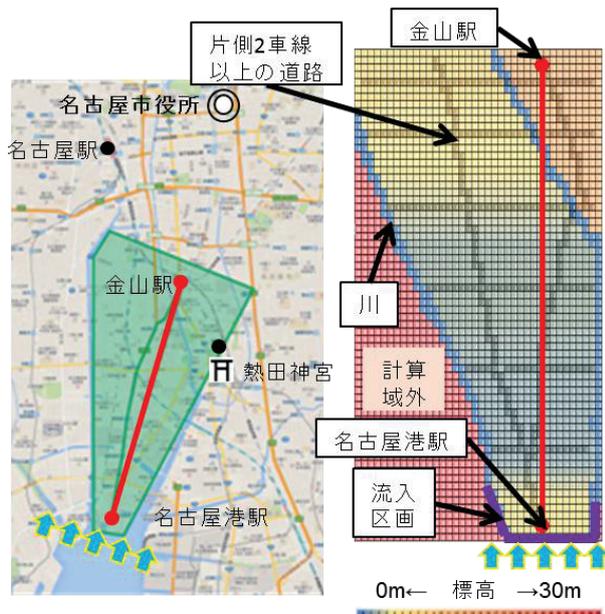


図-2 (a) 想定路線の概要図 (b) 地上解析の設定図

本研究では、地下空間と地上の計算を同時並行的に進め、地上での氾濫水の地下への流入、地下から地上への流出を双方向同時に解析するために、氾濫水のデータを地下空間のプログラムと地上のプログラムで相互に受け渡し連動させた。解析手順を図-1に示す。解析は以下の順序で行った。始めに、地上水深を地上解析プログラムで計算する。地上水深のうち、地下鉄路線の上部に相当する部分の水深を用いて、地下プログラムで地上から地下への流出入量を計算する。ついで、地下プログラムで地下の氾濫水の挙動を計算する。その後、地下水深から地上への流出入量を計算する。下式に示すように、地上水深の連続的に地下からの流出入量を代入して、地上水深を再計算する。

$$h_{i,j}^{n+1} = h_{i,j}^n + \frac{dt \times (Q_{ing,i}^n - Q_{outg,i}^n)}{dx dy} \quad (5)$$

ここで、 h 、 Q の上付き添え字 n は時間ステップを表わし、 dt ：計算時間間隔、 dx 、 dy ： x および y 方向の地上区画サイズである。

3. 解析の条件

2章で構築した統合解析モデルを用いて、本研究では実在する地下鉄路線をモデルに仮想的な地形を設定し、津波による災害を想定したシミュレーションを行った。

仮想的な地形を設定するにあたって参考とした路線は名古屋市営地下鉄名港線である。想定される水害としては、スーパー伊勢湾台風²⁾などの台風による高潮浸水や、南海トラフ巨大地震³⁾などによる津波による浸水が挙げられる。

図-2(a)の緑色で塗られた部分を浸水想定区域とした。地下鉄路線は実際には緑色の実線であるが、解析を簡単にするため赤色の直線と考えた。地上地形は、黒田¹⁰⁾

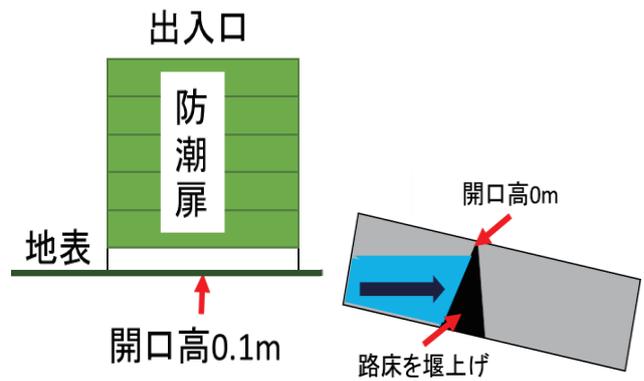


図-3 防潮扉・止水板のイメージ

を元に 100m メッシュで作成した。従来の氾濫解析では建物などはその形状を標高として取り込むことによって、通水能を表現することが多かった。本研究ではデータ作成の便宜を図るために、建物などは形状として表現せず、粗度係数を大きめ(0.067)にすることで考慮した。道路は氾濫水の進行経路になりうると考え、片側2車線以上の道路に関しては、道路の存在する区画の粗度係数を0.040として表現した。作成した地上地形を図-2(b)に示す。このうち灰色で塗られている部分は道路区画であり、赤の実線は地下鉄経路である。なお、図中、左下の桃色で塗られている区画は、河川によって隔てられているため、氾濫解析の対象外とした。

地下鉄トンネルの基準点からの高さや地上部の標高は名古屋市交通局の資料¹¹⁾を元に作成した。駅の出入口数は実際の地下鉄駅と同数(A駅：6、B駅：3、C駅：4、D駅：4、E駅：2、F駅：4、G駅：2)とした。駅出入口の幅は2.5mとした。車両基地の坑口は幅30mの出入口が2つあるものとして表現した。

計算時間間隔はクーラン条件を考慮し0.05(秒)とした。計算総ステップは360000回で時間換算すると5時間に相当する。トンネル幅、トンネル高さ、トンネル粗度係数は新田¹²⁾を参考に3m、4m、0.03とした。地下解析の計算メッシュ長は100mとし、トンネルの総区画数は67であり、総延長は6.7kmである。地上の区画は100m×100mの正方形格子であり、区画数はトンネル横断方向×トンネル方向で39×67である。

想定する災害は津波とし、流入地点の水深を解析開始時から終了時まで常に2mとなるように連続式において表現した。流入地点は図-2(b)に紫の実線で示した区画である。なお、河川からの津波の遡上は考慮していない。

シミュレーションは浸水防止対策を行った場合と、行っていない場合、地下鉄が存在しないと考えた場合の3ケースを想定して行った。

浸水防止対策なしのケースでは災害対策を一切講じていないと考え、出入口高さは3m、坑口も未閉鎖、トンネル内の止水板などは設定していないと仮定し解析を行った。

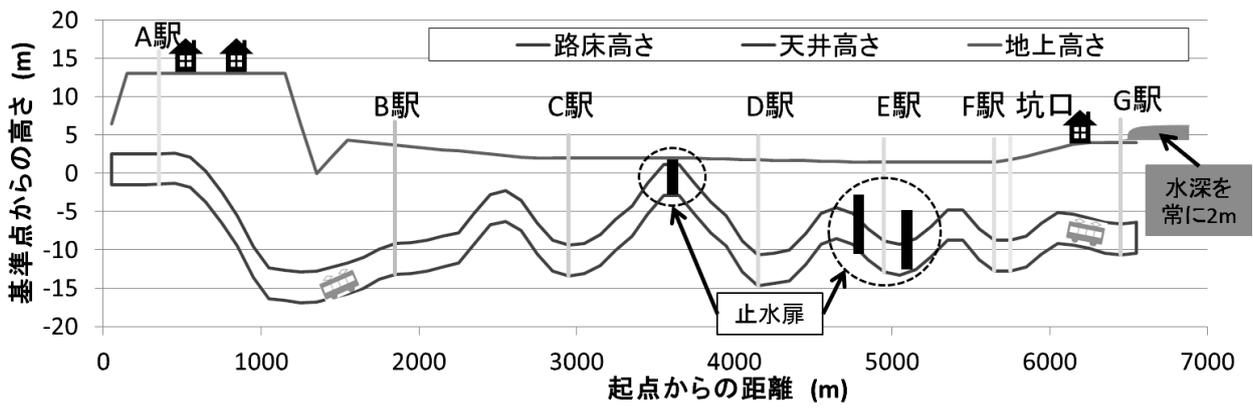


図-4 仮想路線の縦断面図

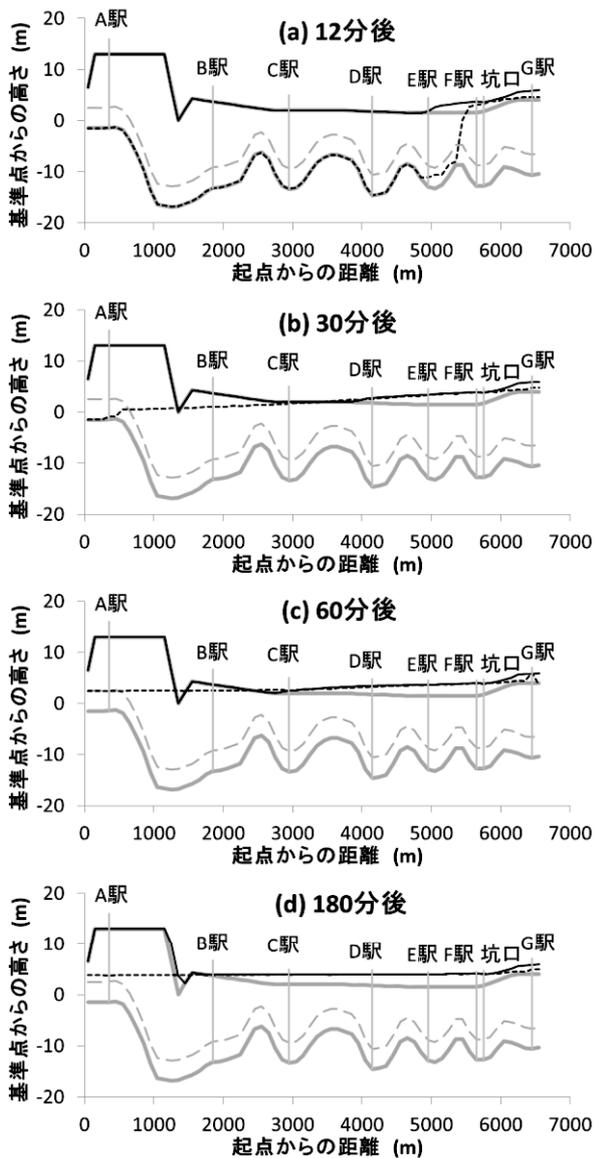


図-5 浸水対策ありの場合の水深の空間分布

講じたと考え、出入口での防潮扉を閉鎖したが、僅かな隙間が空いたと仮定し、出入口開口高さ、坑口高さを地上から0.1mとし、止水板をD駅-E駅間、E駅-

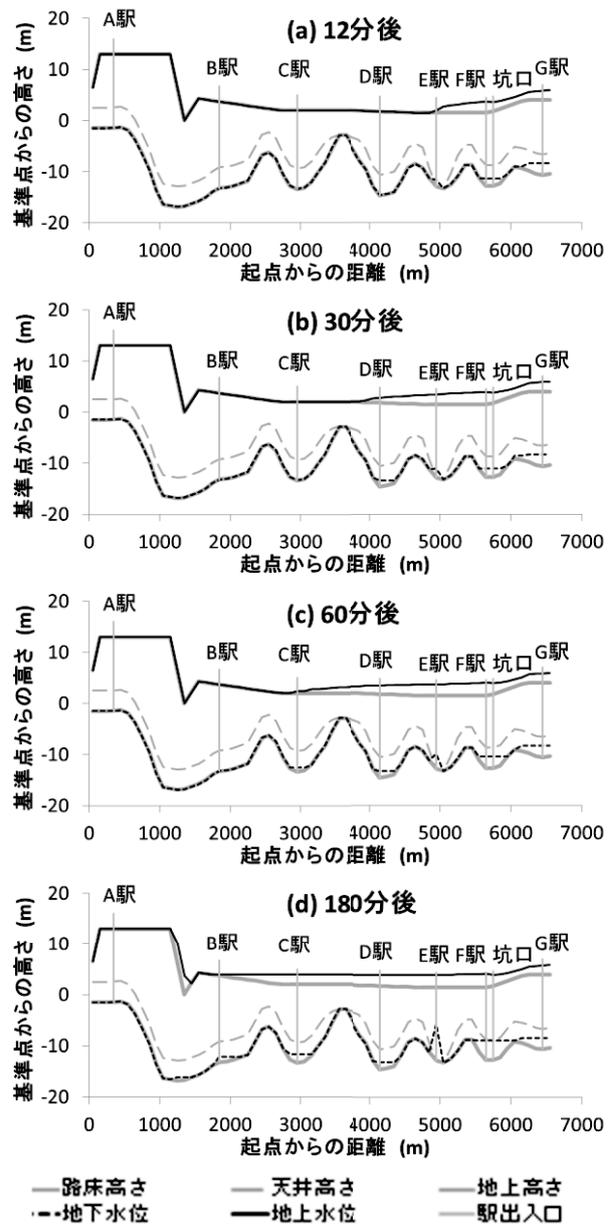


図-6 浸水対策なしの場合の水深の空間分布

F駅間に設置したと考え、それぞれ通水能を0とした。防潮扉、止水板のイメージ図を図-3に示す。

地下鉄なしのケースでは、地下鉄による影響が無い

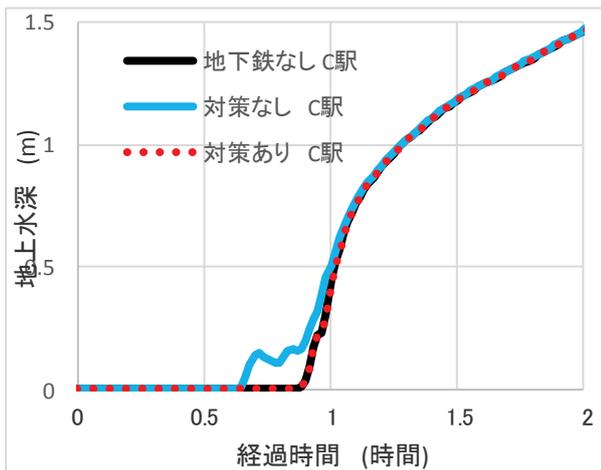


図-7 地上水深の変化

場合の参照ケースとして、出入口・坑口の開口高さを0mとし、地上—地下鉄間の流入流出流量を0とした。想定した地下鉄トンネルの縦断面図を図-4に示す。

4. 解析結果

図-5、図-6は、地下水位と地上水位の変化を流入開始から12分、30分、60分、180分経過ごとに洪水対策なしのケース、洪水対策ありのケースそれぞれについて示したものである。図-7は、C駅での地上水深の解析ケースごとの時間変化を示したものである。

いずれの解析ケースでも、津波襲来とともに、地上部の浸水区域の拡大が始まった。地上の浸水区域は解析開始後30分間でD駅付近にまで到達した。

浸水防止対策なしのケース（図-5）では、津波浸水開始とほぼ同時に、地上が浸水した駅において地上から地下に水が流入した。氾濫水が流入する駅は時間の経過とともに地上部の浸水域の増加と同様に増加した。およそ1時間経過時点で、地下鉄トンネルは完全に水没している。C駅では、地上からの氾濫水の到達よりも、地下からの氾濫水の逆流の方がおよそ20分ほど早かった（図-7）。このため、地下鉄トンネルから地上への逆流水によって、地上の浸水が開始した。この逆流による浸水深はおよそ25cmであった。C駅は地上部の基準点からの高さが2mと他の駅と比較して低いわけではないが、より海側のD～G駅が完全に水没しており、地上の水位差などによって水が逆流したと考えられる。

地下鉄トンネルの各区画において、浸水が開始してから、浸水深が地下鉄天井に到達するのに要した時間の平均値は5.85分であった。地下鉄トンネルにおいて、一旦浸水が始まった場合、水深の上昇は非常に早く、その時点からの避難は困難になると考えられる。このため、地震が発生した場合は、早急に地上に避難することが必要であると考えられる。

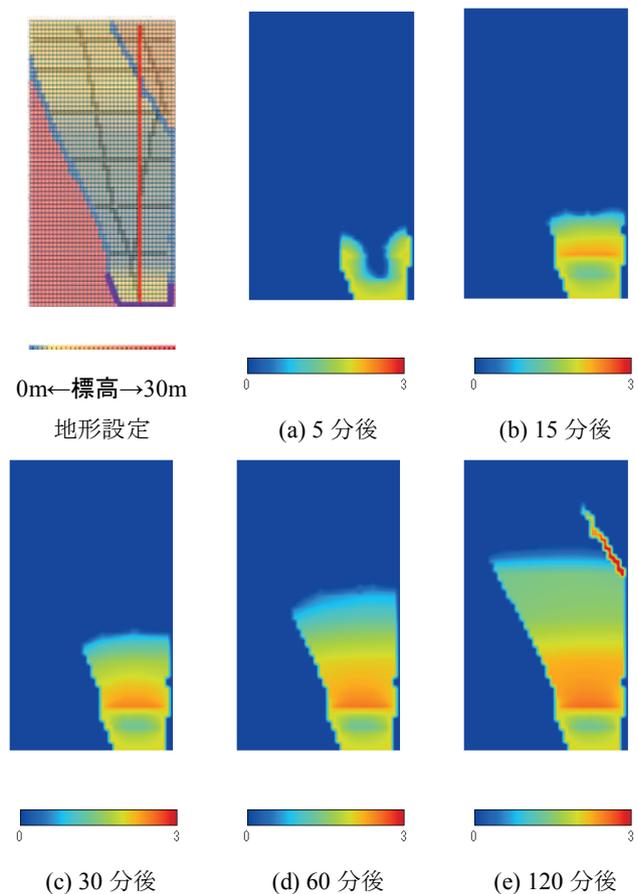


図-8 洪水対策なしケースでの地上水深の空間分布

浸水防止対策ありのケース（図-6）では、3時間経過時点でも水没した区画は駅区画など計3区画に限られた。出入口や坑口などの開口高さを小さくすることによって、流入量が小さくなったためと考えられ、浸水防止対策が非常に有効であったと考えられる。また、止水板や路線の自然形状によって氾濫水の行き来は大幅に抑えられた。一方で、E駅では地下水深が隣接区画よりもかなり大きくなった。これは、E駅ではトンネルの両端を止水板によって閉鎖されたため、流入した氾濫水が排水されず、貯留され続けたためと考えられる。このため、駅部にトンネル内防水ゲートを設ける場合は、逆流の危険性を考慮する必要がある。

洪水対策なしケースでの地上部での氾濫の伝搬過程を図-8に示す。今回の解析では、氾濫水の流入区画を地上部の海側に設定している。そのため、氾濫伝搬の初期段階では流入区画周辺から内陸の区画へ徐々に浸水が進行する。このため、図-8(a)に示されるように、陸域地形に半島状の微高地が存在すると、3方向から津波に取り囲まれる危険性があることがわかる。その後、浸水は道路区として設定した区画が若干先行し（図-8(a)）、周辺区画の浸水がそれに追従する形で内陸部へ進行している。

その後も浸水は進行するが、氾濫水の先端が地形上の逆勾配区画に到達すると浸水の進行速度は遅くなり、浸水の進行は停止する（図-8(d)）。その後は、氾濫水は

浸水区画に貯留され、浸水深が上昇している。浸水開始から120分経過時点では、浸水深と地形設定図を比較すると(図-8(e)), 地上水位(地上水深+地表高)は浸水域の中央部では地点によらず、おおむね一定となることがわかる。

5. まとめ

本研究では、地下氾濫流の解析にはマニング式を抵抗則としたポンドモデルを、地上の解析には浅水流方程式による氾濫解析モデルを用い、地上一地下間の氾濫解析モデルを構築した。地上一地下間の流入、逆流を再現するために、連続式を介して両モデルを連成させた。構築した解析モデルを用いて、実在する地下鉄路線をモデルとした仮想的な地上地形と地下鉄路線を設定し、解析を行った。

本研究で開発した地下部のプログラムでは、路線全体での氾濫水の俯瞰的な挙動は再現出来ているが、駅部での氾濫水の挙動や地上から地下への流入時の階段部での流れの挙動などを考慮していない。そのため、駅部の詳細な氾濫水の挙動を別途シミュレーションや実験などで把握し、本プログラムに反映させる必要がある。

以下に本研究で得られた主要な成果をまとめ、結論とする。

津波などの災害によって、浸水防止策が取られていない地下鉄トンネルに浸水が発生した場合、地下鉄トンネルに氾濫水が到達してから、水位が天井に到達するまでには5分前後の時間しかない。このため、浸水が発生してからの避難は困難であると考えら、人命を救うためには早期の避難が重要である。浸水防止対策としては、地下空間に水を入れないことが最も重要である。このためには、水が流入する可能性のある出入口や換気口の防水対策を入念に講じることが重要である。止水扉を駅出入口に設けることにより、地下への流入量を減少させることが可能となり水深の上昇速度を小さくすることができる。

浸水が地下空間にまで及んだ場合、氾濫の拡大を防止するためにはトンネル内防水ゲートが重要である。トンネル内防水ゲートを設定すると、氾濫水のトンネル内での伝搬を制御し、氾濫水を特定の箇所へ誘導することが可能となる。トンネル内止水ゲートを凹部に設置する場合、止水ゲートにかかる水圧は相当なものになると予想

される。このため、水圧による破壊を防ぐために十分な検討が必要と考えられる。

また、地下鉄トンネルの形状や標高差、トンネル内防水ゲートの設定状況によっては、氾濫水の貯留が特定の箇所へ集中し、地上に逆流する可能性がある。これを防止するための対策として駅の出入口の地上部にも止水扉を設ける方策などが考えられる。

参考文献

- 1) 鈴木一輝：東海・東南海・南海三連動型巨大地震による津波伝搬・浸水予測に関する研究，名古屋大学修士論文，pp.1-44，2012.
- 2) 東海ネーデルランド高潮・洪水地域協議会：危機管理行動計画(第2版)，東海ネーデルランド高潮・洪水地域協議会，pp.1-158，2009.
- 3) 内閣府(防災担当)：南海トラフ巨大地震の被害想定(第二次報告)，2013.
- 4) 土木学会：洪水氾濫流の解析，土木学会水理公式集例題プログラム集平成13年度版，2-3，pp.1-8，2001.
- 5) 井上和也・戸田圭一・栗山健三・大八木亮：地下空間における浸水過程の解析について，京都大学防災研究所年報，第45号B，pp.173-184，2002.
- 6) 井上和也：洪水氾濫解析モデル，京都大学防災研究所年報，第48号B，pp.1-13，2005.
- 7) 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，pp.136-147，2012.
- 8) 川池健司・中川一・今井洋兵・山田裕三：都市域の内・外水氾濫解析における下水道システムのモデル化，京都大学防災研究所年報，第51号B，pp.591-601，2008.
- 9) 土木研究所：氾濫シミュレーションマニュアル(案)，土木研究所資料，第3400号，pp.1-137，1996.
- 10) 黒田茂夫：ライトマップル愛知県道路地図，昭文社，pp.12-15，2012.
- 11) 名古屋市交通局(1986)：資料集・名古屋の地下鉄建設，名古屋市交通局，pp.1-213，1986.
- 12) 新田博之・秀島榮三・山本幸司：列車退避判定モデルによる都市水害時の地下鉄列車の待避計画に関する一考察，土木計画学研究・論文集，Vol.21No.2，pp.317-324，2004.

(2014. 4. 3受付)