

浸水時の多層地下空間からの避難に関する研究

STUDY OF EVACUATION BEHAVIOR IN INUNDATION IN MULTILAYERED UNDERGROUND SPACE

錦織俊之¹・戸田圭一²・間嶋真嗣³・岩村真理⁴

Toshiyuki NISHIKORI, Keiichi TODA, Shinji AIHATA and Shinri IWAMURA

¹ 正会員 工修 (株)東京建設コンサルタント (〒171-0014 東京都豊島区池袋 2-43-1 池袋青柳ビル)

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 学生員 京都大学大学院 工学研究科 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

⁴ 学生員 京都大学 工学部 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

This paper treats an evacuation model from a multi-storied underground space in urban flooding. The mathematical evacuation model based on the network theory is developed, in which the evacuation actions with inundation flow are taken into account. The model is applied to the underground space in Kyoto, Japan. Through the analysis, it was confirmed that the important factors for safe evacuation are evacuation order and its issuing time. Also, the effects of flash-board and step of stair entrance are studied in detail by the inundation simulation and evacuation analysis. These devices are found to be very effective for safe evacuation as they protect and/or retard inundation water intrusion in underground space.

Key Words : *evacuation, inundation, underground space, urban flood countermeasures*

1. 緒論

近年, 局地的豪雨が増加しており, 特に昨年は台風や, 活発化した前線の影響により, 各地で洪水災害が発生した。都市水害の発生時には, 地下空間も浸水する可能性があり, 場合によっては人命に関わることもある。このような中で, 浸水時の地下空間における避難体制の強化は実際に水害が起きた場合に, 特に人的被害を防ぐという観点から非常に有効と考えられる。しかし, 災害時の避難行動を実験的手法で解析するには, さまざまな制約のために困難が伴う。そこで, 適切な避難経路を設定するなどの対策を講じるための災害時の避難行動解析には, 計算機によるシミュレーションが大きな意味を持つことになる。

避難に関する研究は, 分野を問わず, さまざまな角度から行われている。例えば, 建築や土木の分野では, 清野ら¹⁾は, 従来, 地盤解析や構造解析などの分野で用いられてきた個別要素法を, 地下街を対象とした被災時の人間行動に応用した。横山ら²⁾は, 各避難者の性格や知識など, 個人特性の影響を取り入れた大規模空間の避難行動シミュレーションを行う手法を提案している。この

手法では, 対象とする空間を, 避難に関する各要因の影響を表すポテンシャルの時間・空間分布として各避難者ごとにモデル化し, 得られたポテンシャル場から進行方向を決定している。これらのモデルは, 主に地震や火災を想定して, その際の避難について検討している。浸水時の避難に関して行われてきた研究では, 西原³⁾は, 二次元非定常流としての氾濫解析モデルと避難解析モデルとを結合して, 同時に解析するモデルを確立している。対象とする領域の避難経路はネットワークで表し, 実際の避難解析に際しては, 浸水深による避難経路長の補正, 住民の疲労と群集密度による歩行速度の低下を考慮している。高橋ら⁴⁾は, 西原³⁾のモデルを応用した形の避難解析モデルを開発している。避難経路の設定には Warshall-Floyd 法を用いて避難所までの最短経路を算出しているが, 氾濫範囲などを考慮する付加条件を与えることで避難先, 避難経路の変更をモデル化しており, より実際に近いモデルの構築が可能であるとしている。これらのモデルは浸水を想定しているものの, 対象としているのは地上部であり, 多層化した地下空間における浸水時の避難に関する研究は, 筆者の知るところ, ほとんど行われていない。

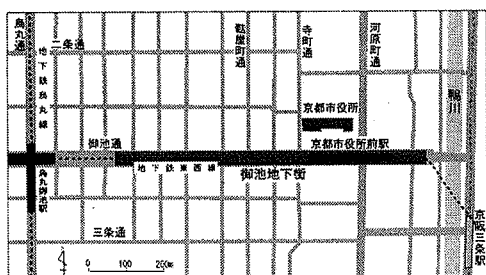


図-1 対象領域図

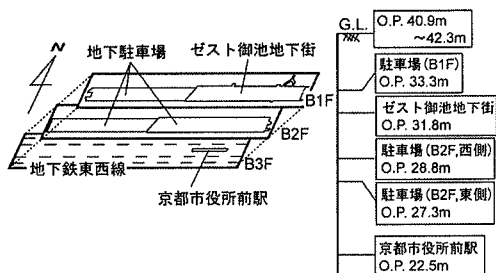


図-2 京都御池地下街の概要

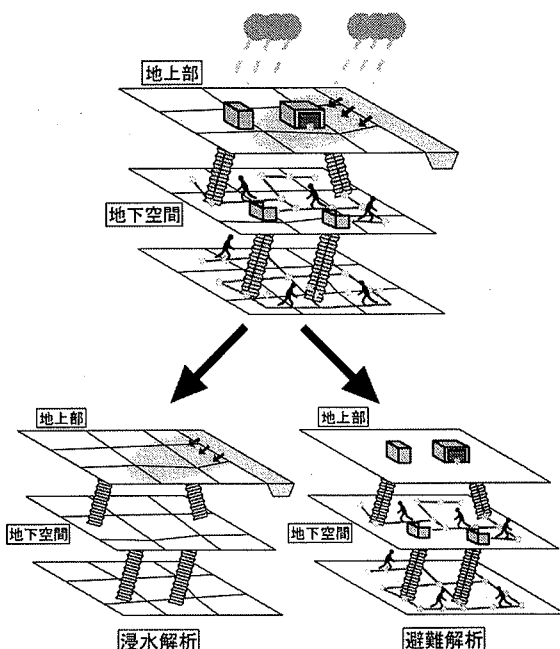


図-3 モデル概念図

本研究では、多層化した地下空間における浸水時の避難がどの程度危険であるのかを評価するために、従来の避難行動解析モデル³⁾⁴⁾を地下空間の場に適用できるものに拡張した。そして、京都御池地下街を対象に地上と地下空間とを統合した氾濫解析結果を基に避難行動解析を実施した。さらに、避難行動解析を通して、ソフト、ハード両面によるさまざまな対策の効果についてもあわせて検討を加えている。

2. 解析モデル

(1) 対象領域

本研究は、多層化した地下空間を対象に、浸水時の避難解析を行うことを目的としているため、対象とする地下空間を選ぶ上での前提条件としては、浸水する可能性のある地下空間であることが挙げられる。また、扱うデータ量についても勘案すると、多層化していながらもさほど複雑でないことが望ましい。そのような観点から、対象空間を京都御池地下街とする。

図-1に示すように、京都御池地下街は、京都市中心部を東西に走る御池通の地下、約650mにわたって位置しており、東端付近を鴨川が流れている。地下街は図-2に示すように3層構造であり、地下1階は、東側がゼスト御池（ショッピングモール）と地下鉄コンコース、西側が駐車場、地下2階は全面駐車場、地下3階は、地下鉄東西線・京都市役所前駅ホームで構成されている。地盤高は東側の方が1.5m低く、また、地下3階の地下鉄ホームは地下1階の東側コンコースとだけ接続している。

(2) 浸水解析モデル

解析モデルを構築するにあたり、図-3に示すように浸水解析と避難解析とを分割して考えることとする。浸水

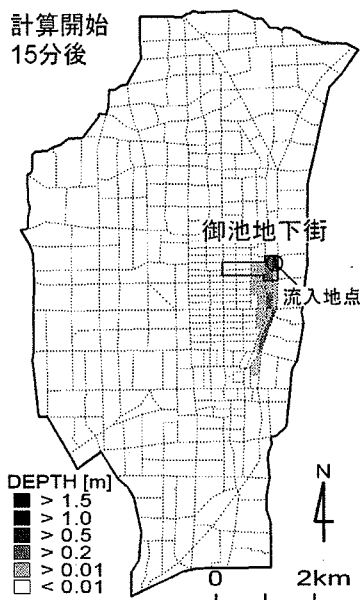


図-4 地上の浸水深図

解析は間島ら⁵⁾の手法を参考に地上と地下空間とを統合して、ポンドモデルを用いて解析している。ポンドモデルは、地上ならびに地下街を貯留槽（ポンド）が3次元的に連結した空間として捉え、貯留槽間の水の流れを解析する手法である。

この解析手法を用いて、京都御池地下街および京都市地上部を対象に浸水解析を行う。解析条件として鴨川からの溢水を想定し、流入流量は $100(\text{m}^3/\text{s})$ を計算開始と同時に御池大橋北側右岸側の格子に流入させる。計算時間は60分、計算時間ステップは $\Delta t = 0.05(\text{s})$ である。なお、地上部から地下空間への流入口には一律に10cmの段差があるものとした。

図-4は、計算開始15分後の地上部の解析結果である。これより御池地下街が浸水域に存在することがわかる。

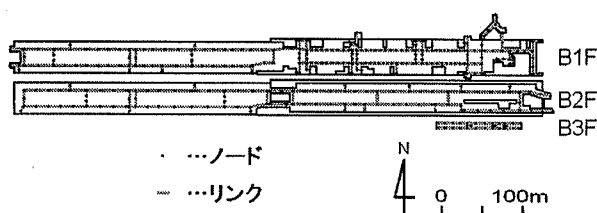


図-5 避難ネットワーク図

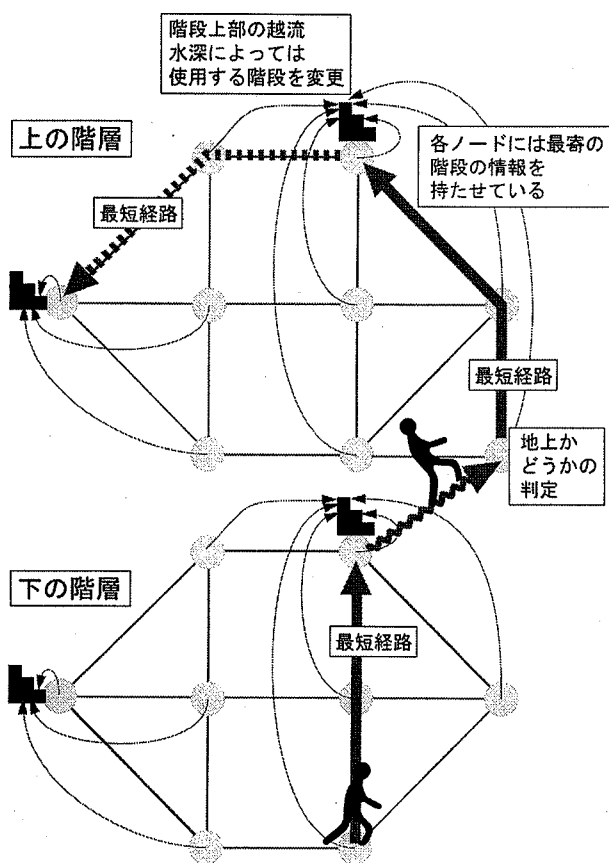


図-6 避難経路設定の概念図

(3) 避難解析モデル

本研究では、対象とする地下空間が多層化しており、一定の幅を有する通路から構成されているとみなせることから、対象とする地下空間にネットワークを張りめぐらせ、人はそのネットワーク上を動く点として扱うことで避難行動をモデル化している。まず、図-5は京都御池地下街に張りめぐらせた避難ネットワークを示す。避難ネットワークはノードとリンクからなり、リンクの両端には必ずノードが存在する。リンクは、地下空間内の通路および階段を表している。ノードは、通路の交差点、避難解析の際の人の初期位置、また避難方向の決定地点としての役割を持っている。リンクは439本（うち階段51本）、ノードは399個（うち地下部367個）である。

次に、具体的な避難経路の設定について説明する。まず、避難経路設定の概念図を図-6に示す。各避難者はそれぞれノードに初期配置されるが、配置されたノードから最寄りの階段を用いて上の階層に行くものとする。こ

のとき、地下にあるノードにはそれぞれ最寄りの階段の情報が与えられているため、各避難者は、初期配置されたノードによって必然的に使用する階段が決まる。

次に、その階段までは、初期位置を始点、使用する階段の下側ノードを終点とする最短経路を用いて避難するものとする。この最短経路を求めるのには、高橋ら⁴⁾と同様に、最短経路選択問題の解法として最も簡便であり、またよく用いられている Warshall-Floyd 法を適用している。

避難開始は、各人の足もとに5cm以上の浸水が認められれば、その時点で自主的に避難を開始するとしている。このときの歩行速度は1.00(m/sec)とし、西原³⁾にならって、換算距離の方法により浸水による移動能力の低下を考慮している。

しかし、必ずしも初めに決めた階段を使用して地上に行くとは限らない。階段の下まで来てから、その階段から水が入ってきているために自発的に避け、別の階段を使用して地上に行くことが考えられる。そこで、本研究では、階段の下側ノードに達すると、そこでその階段を実際に使用するかどうか選択できるようにしている。具体的には、階段上部の越流水深が10cmを超えるとその階段を使用しないものとし、別の階段を選択する。この際、次に選ぶ階段の選択肢としてはいくつもあるが、以下の二つの理由から、今いる地点よりも「西側でなるべく近い階段」を選ぶものとしている。一つは、浸水解析の結果から、この地下空間では東側から浸水が進むと考えられるためであり、もう一つは、いち早く地下空間から脱出したいという意識を考慮するためである。ここで、階段を変更した際にも、次に選択した階段の下側ノードまでの最短経路を Warshall-Floyd 法を用いて求め、それにより移動するものとしている。最終的には、この動作を繰り返し、階段の下側ノードに到達した際の階段上部の越流水深が10cm未満である階段を用いて地上に向かう。

本研究では、多層化した地下空間を対象としているため、階段を上っても地上とは限らない。そこで、使用した階段の上側ノードに達すると地上かどうかの判定を行っている。そして、その階段の上側ノードがまだ地下にあると判定されれば、そのノードを新たな初期位置として、一連の計算を行い、上の階層に到達した際に地上であると判定されるまで、繰り返すことになる。

最後に、自力で避難できるかどうかの判定基準について説明する。水平部では、避難の途中でその地点の水深が1mになれば自力での避難が「不可能」とし、計算を終了している。また、避難の途中でその地点の水深が50cmになれば自力での避難が「困難」としている。ただし、自力での避難が困難と判定されても計算は継続している。同様に、階段部においては、階段上部の越流水深が30cm

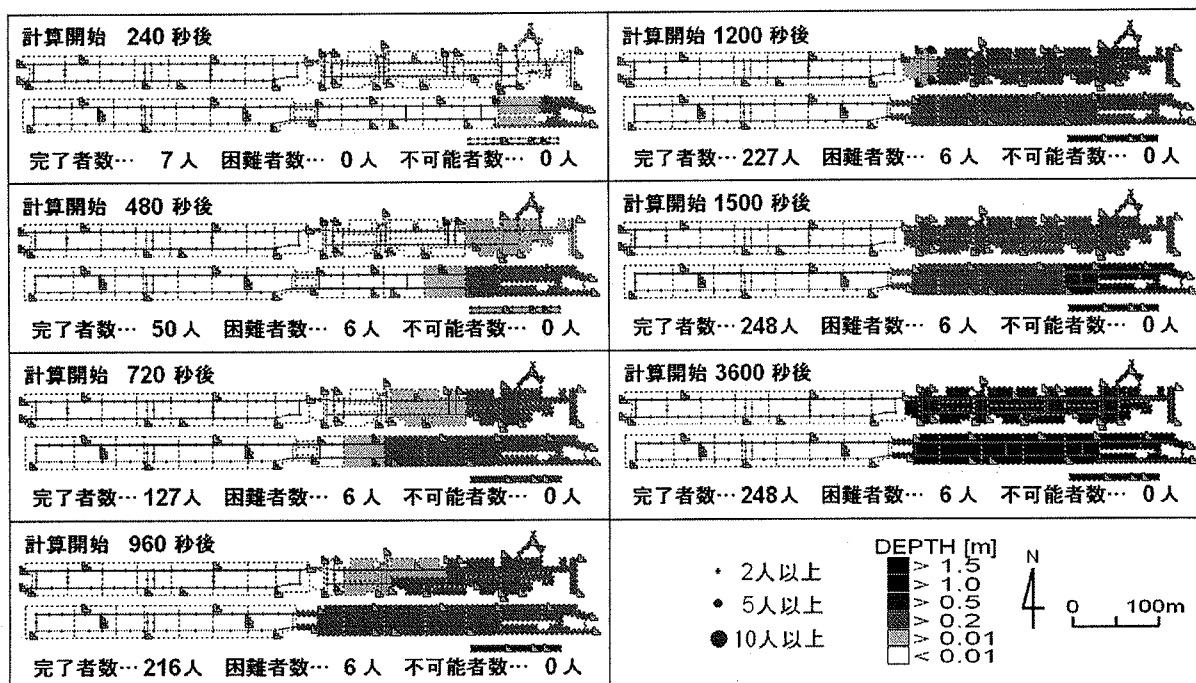


図-7 浸水深の時間変化と避難状況図

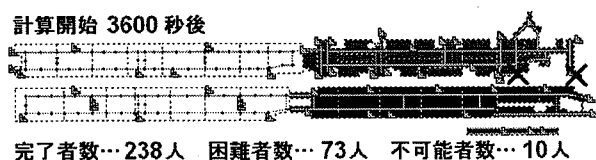


図-8 解析結果（階段選択なし）

になれば自力での避難が「不可能」とし⁶⁾、計算を終了している。また、階段上部の越流水深が 20cm になれば自力での避難が「困難」としている。ただし、水平部の場合と同様、自力での避難が困難と判定されても計算は継続している。

3. 解析結果と各対策の効果

(1) 避難解析結果

まず、地下にある 367 個のノードに 1 人ずつ配置し、避難解析を行う。避難解析の計算時間ステップは $\Delta t = 1.0(s)$ 、計算時間は 3600 秒である。計算時間の基準は浸水解析を始めた時刻、すなわち鴨川からの溢水が始まった時刻としている。このときの浸水深の時間変化と避難状況を図-7 に示す。図中の「完了者数」は地上に到達した合計人数を示し、「困難者数」は自力での避難が困難と判定された人数、「不可能者数」は自力での避難が不可能と判定された人数を示す。

まず、浸水解析の結果については、計算開始 240 秒後にすでに地下街での浸水が始まり、一部では 20cm 以上の浸水が認められる。したがって、この京都御池地下街は鴨川からの溢水が起きた場合に、浸水し始めるまでの時間がきわめて短く、危険性が高いことがあらためて確認される。また、全体を通して地下 3 階地下鉄ホームにお

ける浸水深の上昇度が非常に大きく、一瞬の判断によって生死が分かれる可能性があることが想像される。

避難解析の結果については、自力での避難が「不可能」と判定されている人はいないが、「困難」と判定されている人が 6 人現れており、浸水時の危険性は高いと思われる。

なお、このケースは各避難者が階段を選択しながら避難しているが、これは周囲の状況を把握し、冷静に避難している状況と考えられる。そこで、周囲の状況がわからない、あるいは冷静さを失った場合を想定し、階段選択を行わず、必ず最寄りの階段を用いて避難するケース（階段選択なしのケース）について解析を行う。このときの解析人数も地下にある 367 個のノードに 1 人ずつ、計 367 人で行っている。図-8 にこのケースの最終的な結果を示す。図中の×印は自力避難不可能と判定された人がどこでどのように判定されたのかを示す。

このケースでは、自力での避難が不可能と判定された人が 10 人現れ、また、自力での避難が困難と判定された人数が最終的に 73 人と、避難完了者のおよそ 1/3 を占めていることから、自力で地上まで避難できた人の中にも、かろうじて逃げられた人が数多くいたということになる。また、自力での避難が不可能と判定された人は全て階段部において判定されている。したがって、地下空間からの避難においては階段部分がネックになると考えられる。

(2) 各対策の効果

前節では、地下浸水時の避難状況について示した。ここでは、さまざまな対策の持つ効果を避難行動解析を通して定量的に評価する。そして、最悪の状況を緩和する

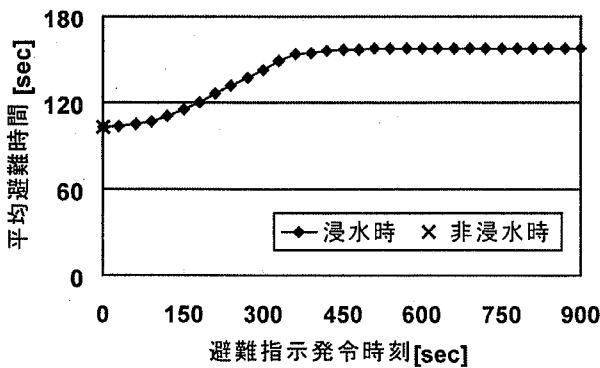


図-9 避難指示発令時刻と平均避難時間との関係

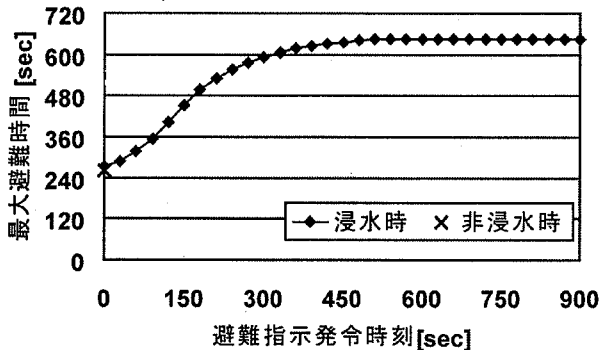


図-10 避難指示発令時刻と最大避難時間との関係

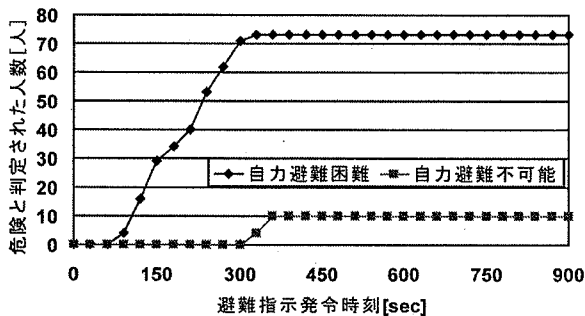


図-11 避難指示発令時刻と自力避難不可能者数、困難者数との関係

という視点から、前節における「階段選択なし」のケースを「標準ケース」として解析を行う。

まず、ソフト面による対策として、「避難指示」とその指示発令時刻が避難行動に及ぼす影響について検討する。初期配置は前節と同様として解析を行う。図-9は、避難指示発令時刻が、鴨川溢水時を基準として30秒ずつ遅れたときの平均避難時間との関係を示し、図-10は、最大避難時間との関係を示している。ここで、「平均避難時間」とは、避難を開始した人の平均避難時間であり、「最大避難時間」とは、避難を開始した人の中で地上に到達するまでに最も時間を要した人の避難時間である。図中の非浸水時とは、浸水解析を行わず、計算開始とともに強制的に移動を開始させた場合の平均避難時間、最大避難時間である。また、図-11は、浸水時に、避難指示発令時刻が30秒ずつ遅れたときの自力での避難が不可能あるいは困難と判定された人数との関係を示している。

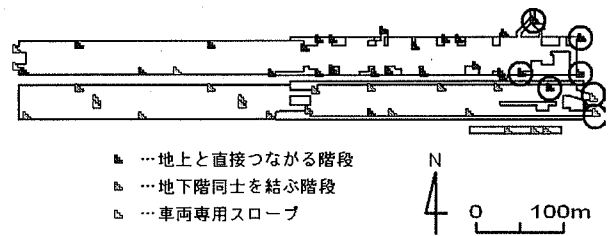


図-12 対策を施す入口

これらの図より知られる最も重要なことは、避難解析の結果が避難指示発令時刻に強く影響されているということである。そこで、これらの図についてももう少し詳細に検討する。

まず、避難指示があり、またその発令時刻が鴨川からの溢水が始まった時刻と同じであれば、平均避難時間、最大避難時間とも非浸水時の場合とほぼ同じであるため、安全に避難できると言える。これはまた、鴨川からの溢水が始まる前までに避難指示を発令し、全員が速やかに避難を開始することができれば、地下街にいる人は全員安全に避難を完了できることを意味する。しかし、避難指示発令時刻が遅くなるにつれ、平均避難時間、最大避難時間とも増加し、地下街の危険性が非常に速く増加する。

これらのことは、避難指示発令時刻と自力避難不可能者数、困難者数との関係からもわかる。避難指示発令時刻が鴨川からの溢水が始まった時刻とほぼ同じであれば、自力での避難が不可能、あるいは困難と判定される人がいないため、安全に避難できる。早期の避難指示の有効性がここでも確認される。

しかし、このようなソフト面による対策は不確実性が高い。そこで、より確実性の高いハード面による対策について検討する。ここでは、高さ50cmの止水板と高さ15cmの段差の設置について検討する。なお、この段差は、浸水解析の際に導入した車道と歩道との段差とは異なり、地下街への入口に設けられた段差を表している。これ以降、浸水解析の際の段差と区別するために、この入口に設けられた段差を「ステップ」と呼ぶ。これらの設備を設置する入口は、図-12に示す鴨川に近い東側の7カ所の入口であり、浸水解析の結果から氾濫水の流入が予想される箇所である。

図-11より、避難指示発令時刻が鴨川溢水後330秒以上遅れると自力での避難が不可能と判定される人が現れる。そこで、地下にある367箇所のノードに1人ずつ配置し、計算開始360秒後に避難指示が発令されるものとして、現状と止水板を設置したケース、ステップを設置したケースとを比較する。図-13、図-14、図-15は、それぞれ、現状、止水板を設置したケース、ステップを設置したケースの最終的な解析結果を示している。

まず、止水板を設置すると、氾濫水の流入自体をかなり防いでいることがわかる。その結果、特に危険になる

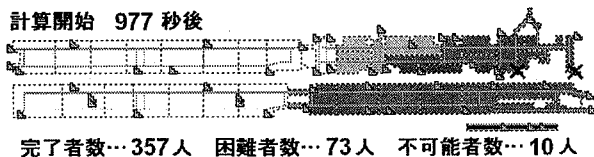


図-13 解析結果 (現状)

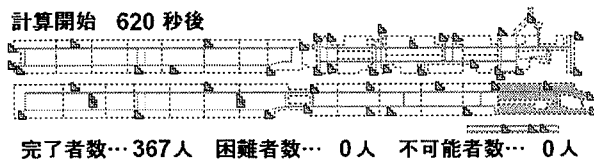


図-14 解析結果 (高さ 50cm の止水板を設置した場合)

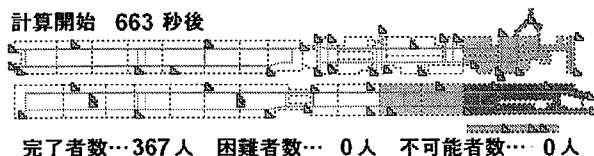


図-15 解析結果 (高さ 15cm のステップを設置した場合)

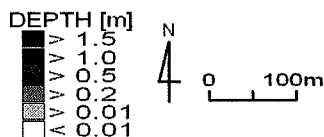


図-16 ハード対策による遅延時間

難がどの程度危険であるのかを評価するために、従来の避難行動解析モデルを地下空間の場に適用できるものに拡張した。そして、京都御池地下街を対象に、地上と地下空間を統合した浸水解析結果を基に避難行動解析を実施した。また、さまざまな対策による効果について考察を行った。本研究により得られた結果を以下にまとめる。

- 避難行動シミュレーションのモデル化にあたって、従来の避難行動解析モデルを多層化した地下空間の場に適用できるものに拡張した。この中で、浸水時の避難行動を考えて、階段を選択しながら上の階層に行く状況も表現できるようにした。
- 地下浸水時の避難では、特に階段部がネックになることがわかった。
- 地下浸水対策について、ソフト面による対策としては、避難指示が重要である。ハード面による対策としては、止水板による対策で完璧に近いと言えるが、避難という点では、高さ 15cm のステップを設置するだけでも十分効果があることがわかった。

参考文献

- 1) 清野純史・三浦房紀・瀧本浩一：被災時の群集避難行動シミュレーションへの個別要素法の適用について，土木学会論文集 No.537/I-35, pp.233-244, 1996.
- 2) 横山秀史・目黒公郎・片山恒雄：避難行動解析へのポテンシャルモデルの応用，土木学会論文集 No.513/I-31, pp.225-232, 1995.
- 3) 西原巧：氾濫解析に基づく避難システムの河川工学的研究，京都大学学位論文，1983.
- 4) 高橋保・中川一・東山基：洪水氾濫水の動態を考慮した避難システムの評価に関する研究，京都大学防災研究所年報，第 32 号 B-2, pp.757-780, 1989.
- 5) 間島真嗣・戸田圭一・大八木亮・井上和也：都市域の地上・地下空間を統合した浸水解析，水工学論文集 第 49 巻，pp.601-606, 2005.
- 6) 岩村真理・戸田圭一・間島真嗣：地下浸水時の危険性についての一考察，平成 17 年度関西支部年次学術講演概要，2005. (印刷中)

(2005. 4. 7 受付)

こともなく、速やかに避難を完了している。一方、ステップを設置した場合は、高さが低くなっている分、止水板を設置したときよりも氾濫水の流入自体を防ぐことはできていないが、特に自力での避難が不可能や困難と判定される人もなく、安全に避難できているものと考えられる。

次に、これらのハード面による対策が持つ時間的な効果について説明する。まず、対策を施すことでどの程度浸水が遅れるのかを検討する。そこで、地下にあるノードのうち、現状の場合に浸水が認められた 248 カ所のノードについて、現状の場合の浸水開始時刻と対策後の浸水開始時刻との差を考える。その結果を図-16 に示す。なお、計算開始 3600 秒後 (60 分後) においても浸水しなかった場合は、600 秒以上遅れるグループに含めている。

この図より、止水板を設置するとほとんどの場所において 600 秒 (10 分) 以上浸水開始が遅れており、その効果の大きさが想像される。ステップを設置した場合、止水板ほどの効果は見られないが、平均的には 120 秒から 300 秒遅れており、この地下空間の大きさを考えれば、かなりの時間的余裕を生み出していると考えられる。

4. 結論

本研究では、多層化した地下空間における浸水時の避