

複雑な地下空間の浸水実験

HYDRAULIC MODEL TEST OF INUNDATION WATER INTRUSION INTO COMPLICATED UNDERGROUND SPACE

戸田圭一¹・井上和也²・大八木 亮³・中井 勉⁴・竹村典久⁵

Keiichi TODA, Kazuya INOUE, Ryo OYAGI, Tsutomu NAKAI and Norihisa TAKEMURA

¹ 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)

² フェロー 工博 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 正会員 工修 阪神高速道路公団 (〒 541-0056 大阪市中央区久太郎町 4-1-3)

⁵ 非会員 住友信託銀行 (〒 103-8440 東京都中央区日本橋本町 4-11-5)

A hydraulic model test is conducted by use of the undistorted hydraulic model with 1/30 scale. The studied underground space is the complex one comprising the shopping mall, the parking lot and the subway station. Inundation process there is studied in detail and evacuation possibility is examined based on the depth and velocity of inundation flow. It is found that if the inundation flow invades the studied underground space, the inundation area expands rapidly and the water depth rises very quickly. The studied space also becomes very dangerous by the difficulty of evacuation.

Key Words : *underground space, hydraulic model test, flood inundation, urban flood, evacuation*

1. 緒言

福岡水害 (1999 年, 2003 年) や東海水害 (2000 年) に見られるように, 都市域での洪水氾濫は地下空間への浸水という危険性を有している。地下空間における氾濫水の挙動を知ることが防災面から非常に重要であり, 数値モデルに基づく数値解析法の研究が進められてきた。しかしながら, それらの手法を実領域に適用した場合の結果の妥当性については十分検証されていない。また数値解析では, 避難の際に重要な階段部などの局所的な流況までは適切に表現されないといった問題もある。

このような状況の下で, 本報では, 実際の地下街を精緻に再現した模型を用いた水理実験により地下空間内の浸水過程を明らかにしている。具体的には, 京都市中京区に位置する御池地下街, 地下駐車場, 京都市営地下鉄東西線の京都市役所前駅から構成される地下空間を対象とし, 条件の異なる様々なケースで浸水過程を詳細に調べる実験を行っている。そして得られた実験結果を用いて著者らの数値解析モデルを検証している。さらに階段部での水理量を計測し, 氾濫水の浸入時の流況を避難行動の難しさと関連付けて調べている。また避難の困難性から地下空間の浸水時の危険性を考察している。

2. 水理模型実験

(1) 対象領域

図-1 に対象とした京都御池地下街周辺の平面図を示す。御池地下街は御池通の地下, 東西約 650 m 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, 地下 1 階は麩屋町通より東側がゼスト御池 (ショッピングモール) と地下コンコース, 西側が駐車場, 地下 2 階は全面駐車場, 地下 3 階は地下鉄東西線の京都市役所前駅ホームで構成されている。地下 1, 2 階は, 平面積が約 650 m × 40 m の長方形で, 天井高は 3.5 m, また地下 1, 2 階とも縦断方向中央部 (麩屋町通) に段差があり, 東側は西側より床面が 1.5 m 低くなっている。地下 3 階は平面積約 100 m × 8 m の長方形, 天井高は 2.7 m で, 乗客の乗降時の安全を考慮して駅ホームに直立壁が設置されており, 電車の発着時のみ扉が開く構造となっている。したがって電車の存在しない通常時は, ホームはほぼ密閉に近い状態となっている。床面からおよそ 2.4 m の高さに小さな開口部が存在し, 水圧により扉が壊れなければ, 浸水深がその高さに達した後, オリフィス流となり地下鉄軌道部へ流出する。扉が開いている場合はホームから段落ち流れとなって地下鉄軌道部に流出する。全階層をあわせた延べ床面

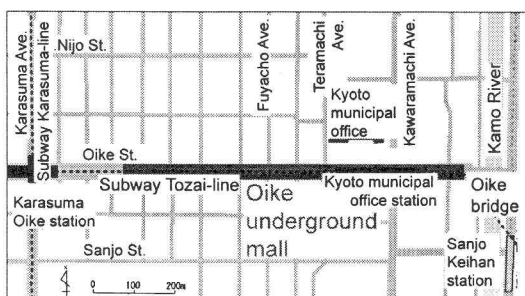


図-1 京都御池地下街周辺図

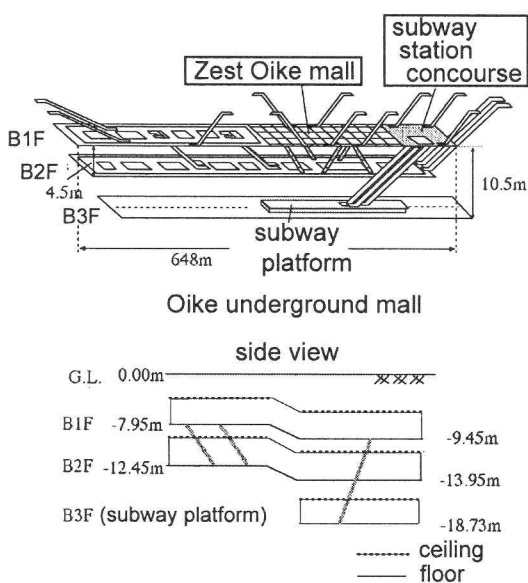


図-2 御池地下街の構造図

積は約 $50 \times 10^3 \text{ m}^2$ 、容積は約 $180 \times 10^3 \text{ m}^3$ である。

図-3 に地上と地下街との出入口を示す。便宜上、図のように階段に番号を付している。地上と地下1階を結ぶ通路は、歩行者専用の階段（エスカレータを含む）が24箇所（1～10, 12, 13, 17～28）、車両専用のスロープが3箇所（11, 14, 29）存在する。地上と地下2階を結ぶ通路は、東端の2箇所の車両専用スロープ（15, 16）であり、地下1階と地下2階を結ぶ通路は、西側の2箇所の車両専用スロープ（図中の点線）である。地下3階の地下鉄ホームは図中の点線で示されているように、地下1階コンコースのみと接続しており、地下2階とは接続していない。なお、地上と地下を結ぶ通路の幅は0.8m～6.0mの範囲にある。

(2) 実験装置

使用した実験装置は、京都大学防災研究所に設置された縮尺1/30の御池地下街模型および循環装置である。フルードの相似則を適用すると、水理量の模型値と実物値との比の値は、長さ：1/30、流速：1/5.48、時間：1/5.48、流量：1/4930となる。

図-4 に循環装置の概略を示す。写真-1 は御池地下街

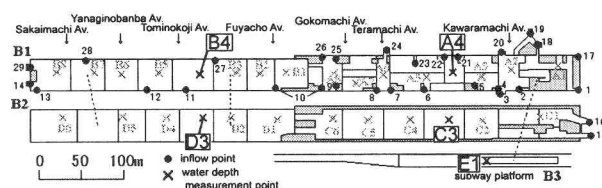


図-3 御池地下街の出入口と水深計測地点

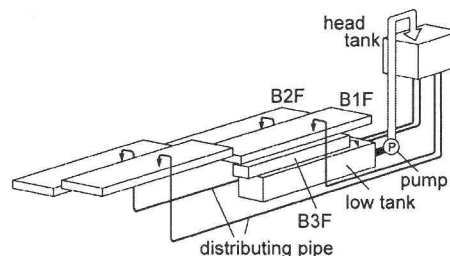


図-4 循環装置の概略図

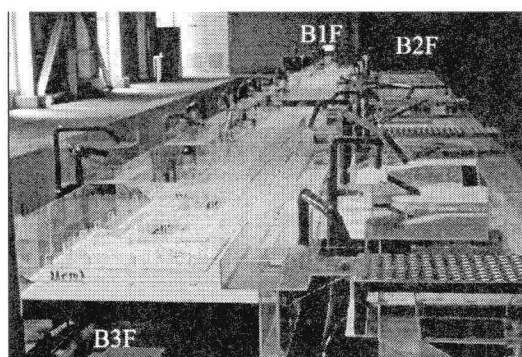


写真-1 地下模型

模型である。模型はアクリル製で、御池地下街の階段や柱、壁などの形状を詳細に再現している。なお地下1階の店舗の前面は、飲食店の場合は壁として取り扱った。また地下鉄ホームの扉や壁上部の開口部も再現し、さらに地下鉄軌道部も一部再現している。模型では流況観察や水理量の計測のために、地下1, 2階部分に天井を設けず、また地下2階を側方（北側）にずらしている。

高水槽に貯められた水は、そこから配水管を通して各注水槽（地上部を模した水槽）に給水された後、そこから階段やスロープを経て地下街へと流入する。流入水は、地下街、地下駐車場内に滞留するものを除き、地下3階ホームから地下鉄軌道へと流出し、低水槽へと排水され、ポンプにより高水槽へ戻される。

3. 地下空間の浸水過程の実験

(1) 実験方法

地下街につながる階段やスロープ箇所から給水し、地下空間各地点の浸水深の時間変化を計測した。階段やスロープといった流入地点ごとの流量の調整には配水管の注水口手前に設けた流量調節バルブを用い、流量の検定は三角堰を用いて行った。図-3 に示す地下空間内の多地点で浸水深の時間変化を計測した。計測は、地下1階で

表-1 実験ケース

	inflow stairs	number of inflow stairs	discharge per unit width [m ³ /s/m]	platform door	total inflow discharge [m ³ /s]
Case 1	1, 2, 15~19	7	0.60	close	14.15
Case 2	1, 2, 15~19	7	0.60	open	14.15
Case 3	experiment results of ground inundation			close	31.63

表-2 流入条件 (ケース 3)

No. of stairs	inflow starting time	inflow discharge [m ³ /s]
1	0	1.58
15+16	6 min 18 sec	14.08
3	10 min 03 sec	1.32
5	10 min 14 sec	2.13
4	10 min 30 sec	1.88
2	10 min 47 sec	2.63
18+19	11 min 25 sec	0.38
6	11 min 53 sec	1.31
17	12 min 42 sec	2.00
7	14 min 09 sec	1.08
9	23 min 06 sec	1.10
10	24 min 01 sec	0.54
8	24 min 28 sec	0.94
11	27 min 18 sec	0.67
total		31.63

16 地点 (A1~A8, B1~B8), 地下 2 階で 12 地点 (C1~C6, D1~D6), 地下 3 階地下鉄ホーム 1 地点 (E1) の計 29 地点で実施した。各地点の水深は、超音波式変位センサにより 1 秒おきに計測し、データ収集システムを通してパソコンに取り込んだ。

(2) 実験ケース

氾濫水の流入地点や流入口数、流入流量、地下鉄ホームの扉の開閉状態を種々変化させて実験を行った。ここでは表-1 に示す 3 ケースの実験結果を紹介する。なお、これ以降、とくに断りのない限り、数値はすべて実物値に換算した値を用いて表現する。表中にある単位幅流量 $q=0.60 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ は、地上浸水深を h 、重力加速度を g で表した段落式 $q = \mu h \sqrt{gh}$ で、流量係数 $\mu=0.544$ として $h=0.5 \text{ m}$ に対して算出された値である。なお、実験中に流入流量は変化させず、一定流量を流入させている。

ケース 1, 2 は、鴨川からの外水氾濫を想定し、河原町通以東の流入口から流入させたものである。ケース 1 は地下鉄ホーム扉が閉じた状態、ケース 2 は開いた状態である。ケース 3 は、別途、京都大学防災研究所で実施された縮尺 1/100 の京都市市街地模型 (地上模型) による市街地氾濫実験の結果¹⁾に基づき、御池大橋付近から $100 \text{ m}^3/\text{s}$ 溢水する条件下での氾濫水の流入口、流入流量、流入開始時刻を決定したものである。ケース 3 の流入条件を表-2 に示す。単位幅流量は $0.04 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m} \sim 1.96 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ の範囲にある。地下鉄ホーム扉は閉じた状態である。ケース 3 では各流入口で流入開始時刻が異

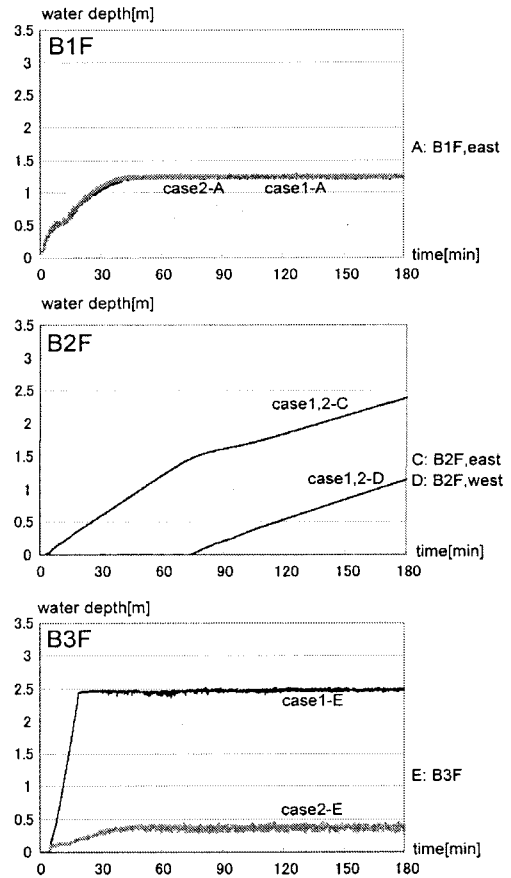


図-5 浸水深の時間変化 (ケース 1, 2)

なっているため、氾濫水が流入口 1 から流入開始した時刻をこのケースの流入開始時刻としている。

(3) 地下街への浸水過程の実験結果

いくつかの代表地点での浸水深の時間変化を調べているが、選定した地点は、地下 1 階東側中央 (A4), 地下 1 階西側駐車場中央 (B4), 地下 2 階東側駐車場中央 (C3), 地下 2 階西側駐車場中央 (D3), 地下 3 階地下鉄ホーム (E1) である (図-3 参照)。なお、これ以降各地点 A4, B4, C3, D3, E1 をそれぞれ, A, B, C, D, E と表す。

a) ケース 1, 2

ケース 1, 2 の代表地点での浸水深の時間変化を図-5, ケース 1 の浸水深図 (平面図) を図-6 に示す。図-5 の地下 1 階東側 (A) での浸水深の時間変化を見ると、ケース 1, 2 とともに流入開始 10 分で水深が 0.5m を超え、流入開始 40 分を過ぎたあたりから水深は 1.2m となり、その後は一定となっている。地下 1 階の浸水深の時間変化が両ケースともほぼ同じであることから、地下 3 階ホーム扉の開閉は地下 1 階コンコースの流況に影響しない

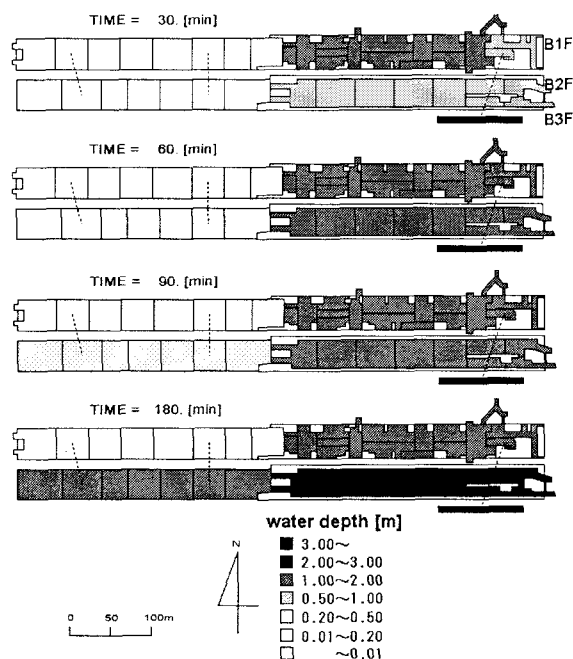


図-6 浸水深分布 (ケース 1)

ことがわかる。また図-6 より地下1階東側 (A) の水深は180分後も中央部の段差1.5mを超えず、地下1階西側 (B) は浸水しない。

続いて地下2階を見る。ケース1, 2の条件下では、地下1階と2階は完全に独立しており、図-5のように地下2階の流況はケース1, 2で等しくなる。これらのケースでは、流入開始75分後に東側 (C) の水深が1.5mを超え西側 (D) に流入している。その後水深は増加し、180分後には東側 (C) はおよそ2.5m、西側 (D) はおよそ1.2mに達している。最後に地下3階ホームであるが、ケース1では流入開始11分後に水深1m、20分弱で水深2.5mとなるが、ケース2では、30分後に水深0.4mとなりそれ以降一定となっている。

b) ケース 3

ケース3の浸水深の時間変化を図-7に、浸水深図 (平面図) を図-8に示す。このケースでは、とくに地下2階へ直接流入する流量が多い。まず地下1階では、図-7に示すように、流入開始およそ15分で東側 (A) の水深が0.5mを超え、45分後には水深が1.5mに達する。一方、流入開始30分から地下1階西側駐車場中央付近の流入口からの流入により、西側 (B) での浸水が始まる。しかしながら、そこに流入した水は、より床面高の低い地下2階西側 (D) へと連絡通路を通して流出し、結局地下1階西側 (B) は流入開始100分経過後でも水深は最大0.2m程度にとどまる。

一方、地下2階では、流入開始8分後には東側の浸水が始まる。流入開始30分後に東側 (C) の水深は1.5mとなり、西側 (D) への流出が始まる。西側 (D) では地下1階からの流入もあるが、それは東側 (C) からの流入量に比べてわずかであるため、浸水過程にはさほど影響し

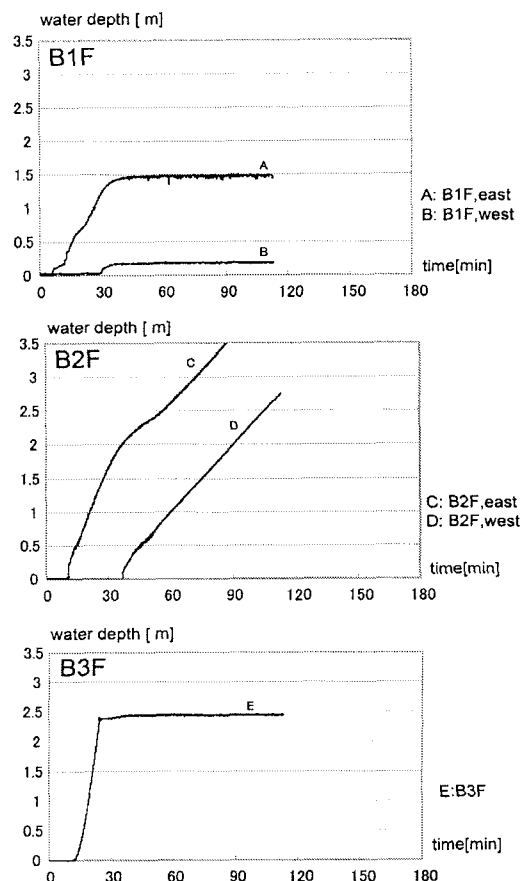


図-7 浸水深の時間変化 (ケース 3)

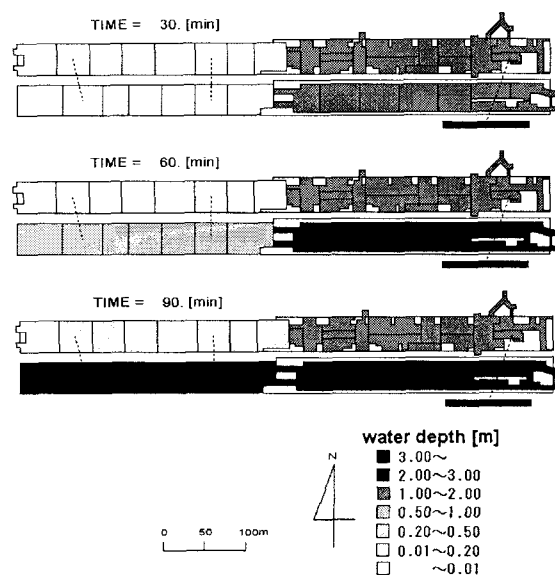


図-8 浸水深分布 (ケース 3)

ない。流入開始87分後には地下2階東側 (C) の水深は天井高である3.5mに達する。地下3階地下鉄ホームでは、流入開始12分後に浸水が始まり、19分後には水深1m、25分後には水深が2.5m程度となり、地下鉄軌道への流出が始まっている。

図-8より、全体的な浸水の傾向を見るとケース1に似ているが、このケースでは地下2階西側の浸水も無視できない結果となっている。

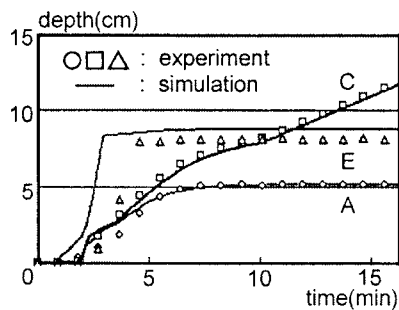


図-9 実験結果と解析結果の比較 (模型値)

(4) 数値解析手法の検証

ケース 3 の実験結果を基に貯留槽モデルに基づく数値解析モデル²⁾の検証を行った。このモデルは、従来から地上の氾濫解析に広く用いられてきたポンドモデル³⁾の考え方に従っており、①地下空間を地盤高や階層によって小領域に分割し、各小領域を貯留槽とみなす、②地下空間をこれらの貯留槽が連結した空間と考える、③貯留槽間の流量の算定には流量公式あるいは移流項を省略した開水路非定常流式を用い、これらの式と各貯留槽での連続式を基礎式とする、というものである。ケース 3 の A, C, E 点の数値解析結果 (計算時間ステップ 0.05 秒) と実験結果を比較したものが図-9 である。モデルの検証を行っているのでここでは模型値で示している。E 地点の立ち上がりの部分を除いて数値解析結果は実験結果を概ね再現しており、貯留槽モデルが地下空間の浸水解析に適用可能であることが確認された。

4. 階段部の実験

(1) 実験のねらいと実験方法

地表氾濫時には大量の氾濫水が階段を流下して地下空間へと流入するが、同時に階段は地下空間からの避難経路でもある。かなりの流速をもって流下するであろう氾濫水に抗して階段を上ることは危険を伴い、避難行動の限界も存在するものと考えられる。そこで階段部まで忠実に再現された地下空間模型を用いて、いくつかの代表的な形状の階段部での流速・水深を計測し、得られた結果をもとに流況と避難行動との関係について考察する。

実験に用いた階段形状の流入口は、図-3 の No.2, 3, 11(直線形状) と No.5, 9(折れ曲がり形状) の計 5 種類である。図-10 に対象とした流入口を示す。流入口 3 はエスカレータである。また流入口 11 はスロープである。各流入口への流量は地下空間への浸水過程の実験に準じ、想定される地上浸水深を基に段落式で算出される (単位幅) 流量 q を与えた。流速の測定は蛍光色を塗布した約 5 mm 四方の紙片をトレーサーとして流して、それを 200 倍の高速ビデオカメラで撮影し、トレーサーの移動距離を読み取った。水深の測定にはポイントゲージを用いた。

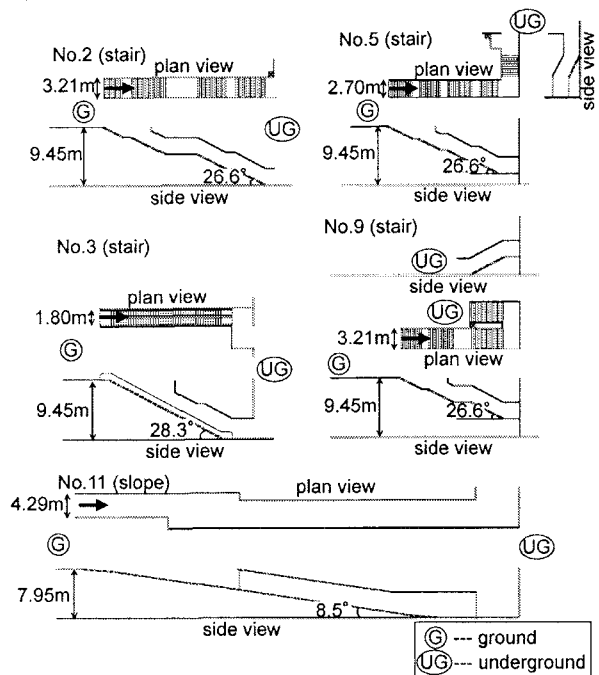


図-10 対象とした流入口

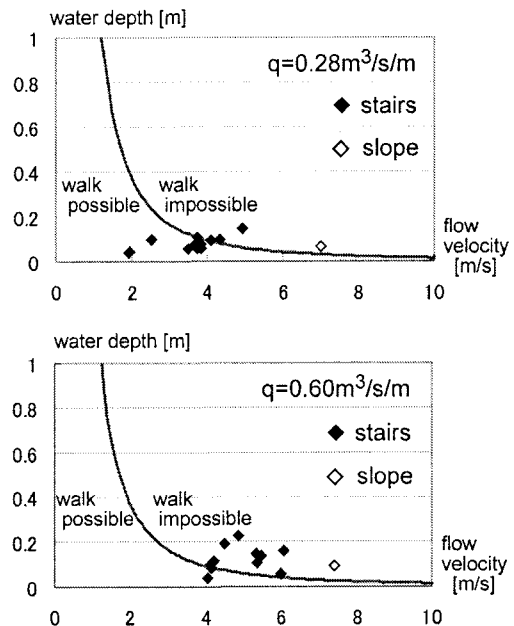


図-11 階段部での避難可能性

(2) 実験結果と避難行動限界との関係

武富ら⁴⁾は階段を流下する氾濫水が歩行者に与える危険性について実験を行い、階段上の流速を u 、水深を h として u^2h が $1.5 \text{ m}^3/\text{s}^2$ 程度を超えると、足をとられ歩行が困難になるとしている。ここでは避難行動の可能性の一つの指標としてこの関係を用いることとする。

図-11 は、地上浸水深が 0.3 m, 0.5 m に相当する 2 種類の単位幅流量 ($q=0.28 \text{ m}^3/\text{s/m}$, $0.60 \text{ m}^3/\text{s/m}$) に対して、横軸に流速 $u(\text{m/s})$ 、縦軸に水深 $h(\text{m})$ をとり、踊り場の部分を除くすべての階段部 (スロープを含む) での実験値をプロットしたものである。図中の曲線は、 $u^2h=1.5 \text{ m}^3/\text{s}^2$ を示している。この図より $q=0.28 \text{ m}^3/\text{s/m}$ 以下の流

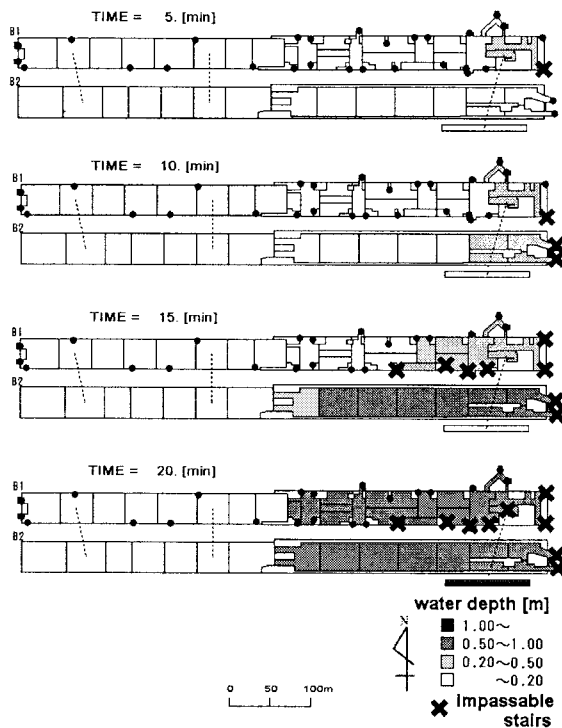


図-12 避難可能性 (ケース 3)

量では、スロープ 11 と一部の階段で歩行が困難になるもののほぼ全ての階段で歩行可能といえる。しかし、 $q=0.60 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ になるとほぼすべての階段で歩行困難となる。以上の結果から、階段部において歩行可能性は流入流量が支配的であること、地上浸水深が 0.5 m を超えると、地下から地上への避難が困難になるといえる。

5. 浸水時の御池地下街の危険性 (ケース 3)

亀井⁵⁾によると、洪水時には平面部で、水深が成人男性で 70 cm 以上、成人女性で 50 cm 以上、小学校 5~6 年生で 20 cm 以上になると歩行困難になるとされている。また前章の実験ならびに解析結果より、階段部では流入単位幅流量が $0.60 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ 以上になると、人間は歩行による避難が困難になるとの知見が得られた。ケース 3 の浸水実験結果での地下街と階段部の避難可能性を図示したものが図-12 である。水深 20 cm 以上、50 cm 以上の箇所を色分けして示し、流入単位幅流量が $0.60 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ 以上になる階段は通行不能として×印を付している。

流入開始 5 分で地下 1 階コンコースが水深 20 cm となり、東端の出入口が通行不能となる。10 分後には地下 2 階で浸水が始まり、さらに東端の 2 つの出入口が通行不能となる。15 分後には地下 1 階のゼスト御池中央付近まで浸水が拡大している。水深は 20 cm 程度であり、大人であればまだ歩行可能状態にあるものの、地下 1 階の出入口は 6 箇所が通行不能となっており、避難は容易

ではない。避難に時間がかかってしまうと、20 分後にはゼスト御池全体で 50 cm を超えてしまい、大人でも避難困難な状況に陥ってしまう。また、図-7 に示されるように、地下 3 階ホームでは、15 分後から 20 分後にかけての 5 分間で水深が急激に上昇し、しかも地下 1 階の水深が 50 cm 以上となって地下 3 階からの避難通路となる階段が通行不能となるため、非常に危険性が高い。

地下街からの避難を考えるにあたり、平面部と階段部の避難可能性をともに考慮することで、地下空間の浸水に対する危険性をあらためて確認することができた。

6. 結言

本研究を通して得られた結論は以下のとおりである。

- (1) 対象地下空間内では、地上からの氾濫水の流入時、水深の上昇や浸水域の広がりが予想以上に速く、とくに床面高の低い地下 3 階ホームにおいてホーム扉が閉じていると急激に水深が増加する。
- (2) 階段部において避難する際の危険度は主に流入流量に支配されており、単位幅流量が $0.60 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ を超えると階段からは避難不可能となる。
- (3) 鴨川が御池大橋から $100 \text{ m}^3/\text{s}$ 溢水する場合には、対象地下空間は流入開始 20 分後に地下の各階の東側で水深が 50 cm を超え、避難不可能となる。

最後に、地下街ならびに地下鉄に関する資料を提供いただいた京都市役所の関係各位に感謝いたします。

本研究は、科学技術振興調整費「都市複合空間水害の総合減災システムの開発に関する研究 (代表：河田恵昭 京都大学教授)」および文部科学省科学研究費補助金、基盤研究 (B)(2) (代表：井上和也、課題番号：14380201) の援助の下に実施された。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 中川 一・石垣泰輔 他：都市における洪水氾濫一大規模な洪水氾濫模型装置を用いた実験と解析一、京都大学防災研究所年報第 46 号 B, 2003, (印刷中)。
- 2) 戸田圭一・栗山健作・大八木 亮・井上和也：複雑な地下空間における浸水解析、水工学論文集第 47 巻、土木学会水理委員会, pp. 877-882, 2003。
- 3) 例えば、鶴巻有一郎、奥田 朗、神月隆一：平面流れとして取り扱った氾濫シミュレーションについて、第 25 回水理講演会論文集、土木学会水理委員会, pp. 249-256, 1981。
- 4) 武富一秀・館健一郎・水草浩一・吉谷純一：地下空間へ流入する氾濫水が階段上歩行者に与える危険性に関する実験、第 56 回土木学会年次学術講演会講演概要集第 2 部, pp. 244-245, 2001。
- 5) 亀井 勇：台風に対して、天災人災 住まいの文化誌、ミサワホーム総合研究所, 1984。

(2003. 9.30 受付)