

多層化した地下空間の浸水実験

Hydraulic Model Test of Inundation Water Intrusion in Multiple Storied Underground Space

戸田圭一¹・井上和也²・中井勉³・大八木亮⁴

Keiichi TODA, Kazuya INOUE, Tsutomu NAKAI and Ryo OYAGI

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 in the underground space 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

1999年，2003年の福岡水害や2000年の東海水害のような大規模な都市型水害が近年頻発している．市内中心部での洪水氾濫発生時には，高度に発達した都市構造の影響をうけて，地上の氾濫水は複雑な挙動を示すとともに，ビルの地下室，地下街や地下鉄といった地下空間に氾濫水が流入する．地下空間は市街地の最深部に位置し，氾濫水が最終的に集中することから，外力や地理的条件によっては巨大災害に結びつく危険はきわめて高く，その浸水防御システムの整備は重要でかつ緊急を要する課題と認識されよう．

地下空間への浸水が発生したとき，地下空間での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，数学モデルに基づく数値解析法の研究が高橋ら¹⁾や筆者ら²⁾により進められてきた．しかしながら，都市部の複雑な地下空間内の拡がり表現するには課題もいくつか残されている状況であり，また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も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調べ実験を行っている．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に関連

「キーワード」 地下空間，水理模型実験，洪水氾濫，都市水害，避難

- 1 正会員 Ph.D. 京都大学助教授 防災研究所
- 2 フェロー会員 工博 京都大学教授 防災研究所
- 3 正会員 工修 阪神高速道路公団
- 4 学生員 京都大学大学院

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

2.1 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 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、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 650m × 40m の長方形で、天井高は 3.5m、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 1.5m 低くなっている。地下 3 階は平面積約 100m × 8m の長方形、天井高は 2.7m で、乗客の乗降時の安全を考え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 2.4m 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、地下鉄軌道部への流出が生じる。全階層をあわせた延べ床面積は約 $50 \times 10^3 \text{m}^2$ 、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。

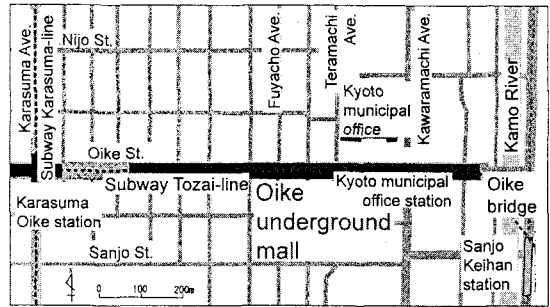


図-1 京都御池地下街周辺図

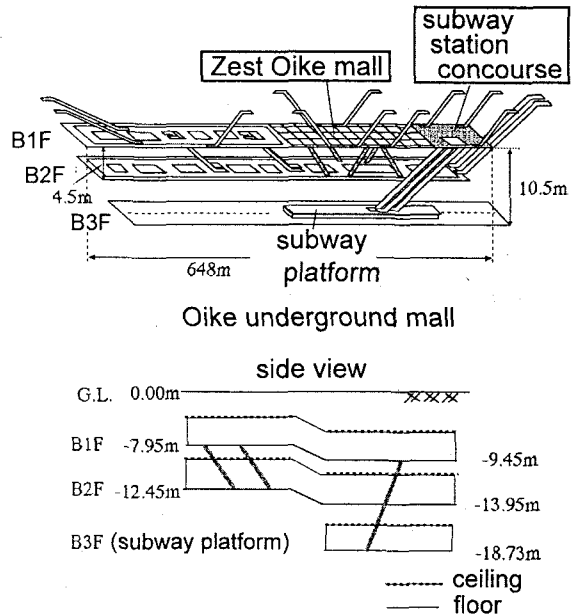


図-2 御池地下街の構造図

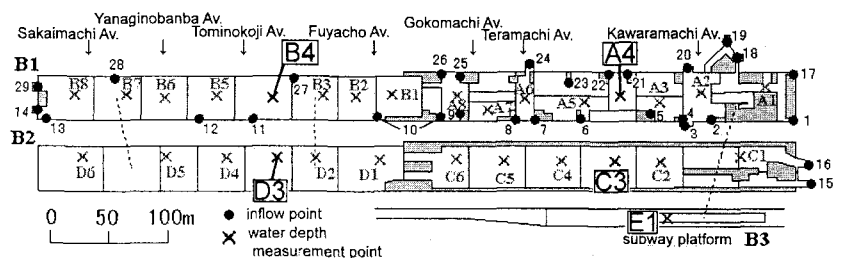


図-3 御池地下街の出入口と水深計測地点

2.2 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 と表される。

写真-1 は実験装置の全景で手前側に高水槽が設置されている。写真-2 は御池地下街模型である。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口へと到達するが、その手前に設けられたバルブによって任意の流量に調節される。注水口を出た水はいったん注水槽（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。

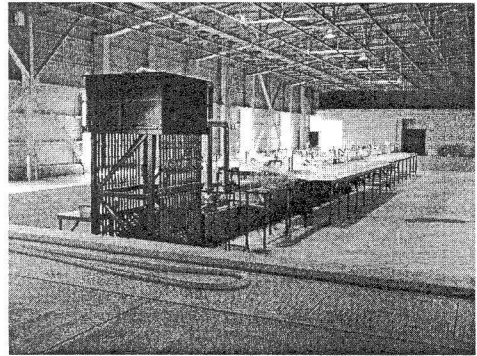


写真-1 実験装置

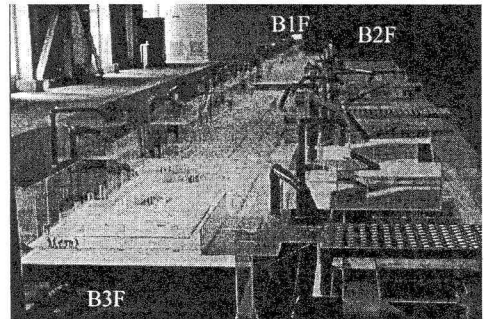


写真-2 地下街模型

3. 地下空間の浸水過程の実験

3.1 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するとともに、地下鉄軌道からの流出量を把握した。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パイプ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 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。

3.2 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 4 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 $q=0.60\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ 、 $1.00\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ は、地上浸水深を h 、重力加速度を g で表した段落ち式 $q=\mu h\sqrt{gh}$ で、流量係数 $\mu=0.544$ として $h=0.5\text{m}$ 、 0.7m 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 1～3 は、鴨川からの溢水による外水氾濫を想定し、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、ケース 2 は $q=0.60\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ で、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 $q=1.00\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ で地下鉄ホーム扉が閉じた状態である。ケース 4 は、別途、京都大学防災研

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]
Case1	1,2,15~19	7	0.60	close	14.15
Case2	1,2,15~19	7	0.60	open	14.15
Case3	1,2,15~19	7	1.00	close	23.46
Case4	experiment results of ground inundation			close	31.63

表-2 流入条件 (ケース4)

No. of stairs	inflow starting time	inflow discharge [m ³ /s]
1	0	1.58
15+16	6min18sec	14.08
3	10min03sec	1.32
5	10min14sec	2.13
4	10min30sec	1.88
2	10min47sec	2.63
18+19	11min25sec	0.38
6	11min53sec	1.31
17	12min42sec	2.00
7	14min09sec	1.08
9	23min06sec	1.10
10	24min01sec	0.54
8	24min28sec	0.94
11	27min18sec	0.67
total		31.63

研究所治川水理実験所で実施された京都市市街地模型（地上模型）による市街地氾濫実験の結果に基づき、御池大橋付近から 100m³/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4の流入条件を表-2に示す。この地上模型の実験では流入口の開口部の向きも考慮されている。なお，表-2を見ると，流入口15,16の流入流量が御池地下街全体への流入流量の半分近くを占めているが，これは流入口15,16が鴨川の最も近くに位置し開口部が鴨川に向いていること，車両用スロープで開口幅が大きいためによる。ケース4では各流入口で流入開始時刻が異なっているため，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。

3.3 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。

(1) ケース1，2，3

ケース1～3の代表地点での浸水深の時間変化を図-4，ケース1，ケース3の浸水深図（平面図）を図-5，図-6にそれぞれ示す。図-4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，ケース2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ことがわかる。ケース3では，流入開始3分で水深が0.5mを超え，流入開始約20分で水深は1.4mに達し，その後は一定となっている。また図-5，図-6より，ケース1，ケース3ともに地下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1～3の条件下では，地下1階と2階は完全に独立しており，図-4のように地下2階の流況はケース1，ケース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)はおおよそ2.5m，西側(D)はおおよそ1.2mに達している。一方，ケース3では，流入開始おおよそ45分で東側(C)の水深が1.5mを超え，西側(D)に流入している。その後はケース1，ケース2よりも水深の上昇が速く，160分後には東側(C)が水深3.5mと完全に水没してしまう。

最後に地下3階ホームであるが，浸水開始時刻は3ケースであまり差はないが，ケース1では流入開始11

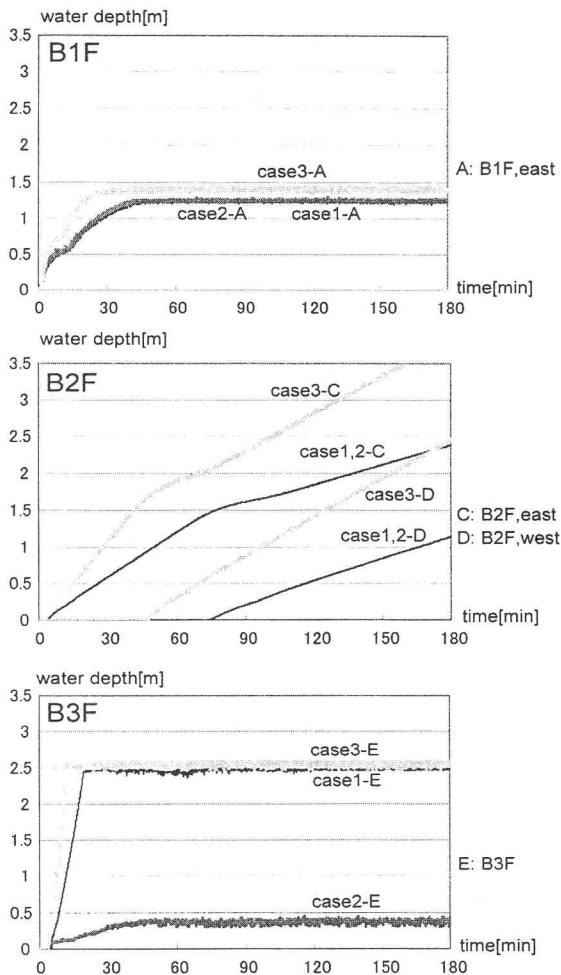


図-4 浸水深の時間変化 (ケース 1, 2, 3)

分後に水深 1m, 20 分弱で水深 2.5m となるが, ケース 3 では 7 分後に水深 1m, 12 分後に水深 2.5m と明らかに水深の上昇が速くなっている。一方, 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。

(2) ケース 4

ケース 4 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く, また流入口によって流入開始時刻が異なっているのが特徴である。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。

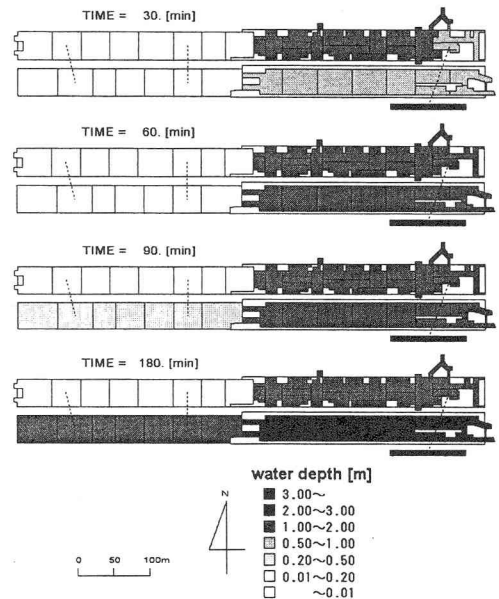


図-5 浸水深分布 (ケース 1)

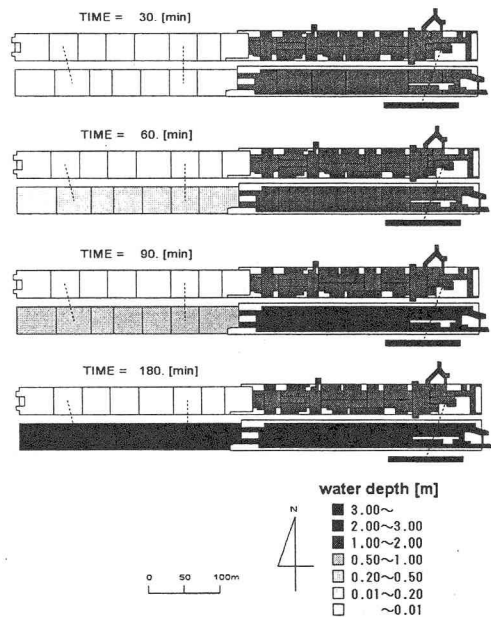


図-6 浸水深分布 (ケース 3)

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、ケース3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。

4. 階段部の実験

4.1 実験のねらい

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。また階段とスロープといった形状の違いも避難行動の限界に影響を及ぼすのではないかと考えられる。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。

4.2 実験方法

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-9に流入口の平面図、縦断図を示す。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、地上の浸水深 h が $h=0.1\text{m}, 0.3\text{m}, 0.5\text{m}$ に相当するときの段落ち式で算出される(単位幅)流量 q を与えた。なお、 $h=0.1\text{m}, 0.3\text{m}$ に対応する q は、 $q=0.05\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ 、 $0.28\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ である。流速の測定は蛍光色を塗布した約5mm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。

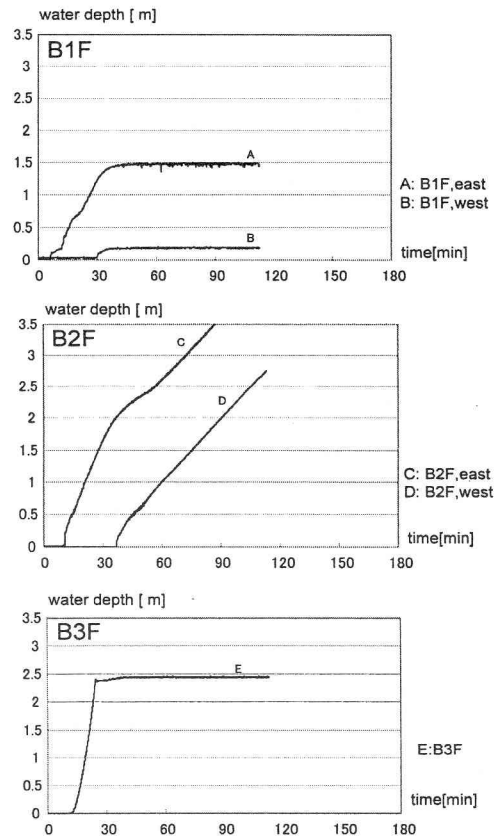


図-7 浸水深の時間変化(ケース4)

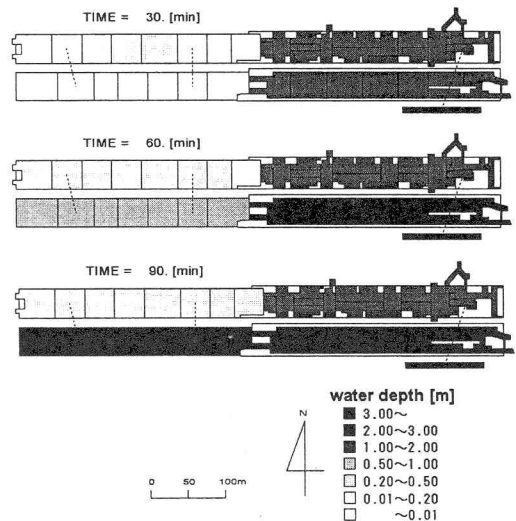


図-8 浸水深分布(ケース4)

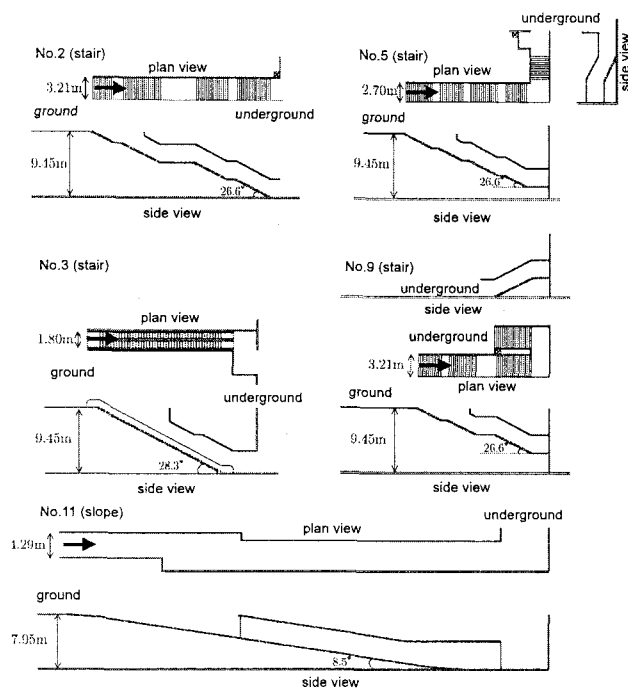


図-9 対象とした階段

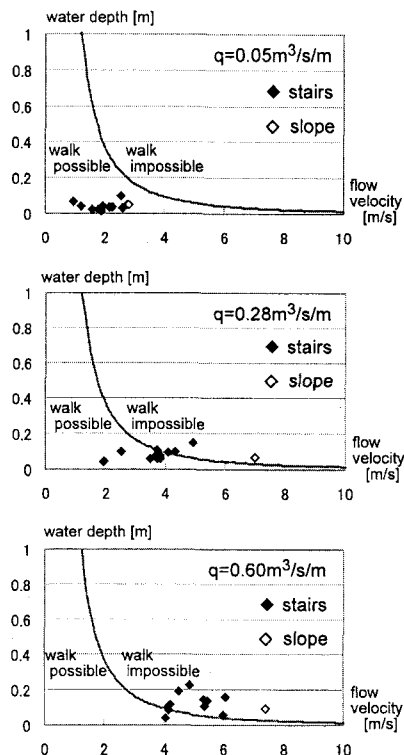


図-10 階段部での避難可能性

4.3 実験結果と避難行動限界との関係

武富ら³⁾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を調べるための一つの指標としてこの関係を用いることとする。

図-10 は、地上浸水深が 0.1m、0.3m、0.5m に相当する 3 種類の単位幅流量に対して、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 $q=0.28\text{m}^3/\text{s/m}$ （地上浸水深 0.3m）以下の流量では、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、 $q=0.60\text{m}^3/\text{s/m}$ （同 0.5m）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階段形状にさほど依存せず、流入流量が支配的であること、地上浸水深が 0.5m 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 4）

地下空間における浸水対策検討委員会⁴⁾によると、洪水時には平面部で、水深が成人男性で 70cm 以上、成人女性で 50cm 以上、小学校 5～6 年生で 20cm 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 $0.60\text{m}^3/\text{s/m}$ 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ている。ケース 4 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-11 である。水深 20cm 以上、50cm 以上の箇所を色分けして示し、流入単位幅流量が $0.60\text{m}^3/\text{s/m}$ 以上になる階段は通行不能として X 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 20cm 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20cm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50cm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50cm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といえる。

このように、御池地下街内では水深の上昇が速く、浸水域の拡がりも速い。また時間がたつにつれ、避難できる階段も限られ、かなりの短時間で避難が困難となることがわかる。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拡がりが予想以上に速く、とくに床面高の低い地下3階ホームにおいて急激に水深が増加する。ここでは地下1階からの流入が激しく、浸水を確認してからでは避難できない場合もあり、非常に危険な場所であるといえる。

(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、階段の形状にかかわらずおよそ単位幅流量が $0.60\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ 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50cmを超え、避難不可能となる。

今後の課題としては、地下空間浸水時の適切な避難誘導システム、救助・救援システムの検討が挙げられる。

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。また実験や解析に協力いただいた住友信託銀行竹村典久氏（元京都大学学生）に謝意を表します。

参考文献

- 1) 高橋保・中川一・野村出：洪水氾濫に伴う地下街浸水シミュレーション，京都大学防災研究所年報第33号B-2，pp.427-442，1990.
- 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) 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.
- 4) 地下空間における浸水対策検討委員会：地下空間における浸水対策ガイドライン同解説＜技術資料＞，2002.

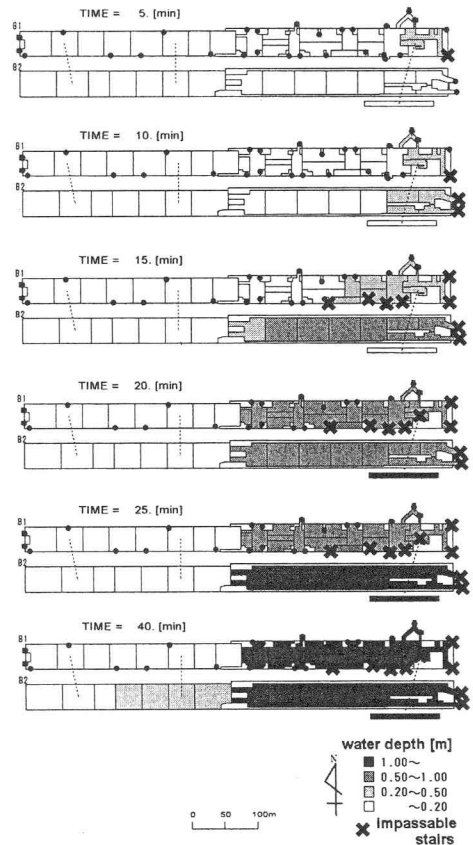


図-11 避難可能性（ケース4）