

地下空間への浸水過程について

井上和也・戸田圭一・中井勉*・竹村典久**・大八木亮***

* 阪神高速道路公団

** 住友信託銀行

*** 京都大学大学院 工学研究科

要 旨

京都市の御池地下街を対象として、縮尺1/30の模型を用いた浸水実験を行い、地下空間内での浸水過程を実験的に考察した。また避難経路となる階段部の水理特性を明らかにした。対象とした地下空間では浸水深の上昇や浸水域の拡がりが多いこと、また地下空間全体の浸水過程は氾濫水の流入箇所が大きく依存すること、階段部では地上浸水深0.5mに相当する流量で避難が困難になることが明らかとなった。御池地下街東の鴨川が $100\text{m}^3/\text{s}$ 溢水する場合を想定した条件では、溢水開始後わずか20分で地下1階からの避難が困難になるという危険性が指摘された。

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. はじめに

1999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は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開発が、高橋ら(1990)や筆者ら(1999,2003)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や挙動を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が適切に表現できない、といったことも考えられる。

本報では、実際の地下街を表す精緻な模型を用い、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、京都市の御池地下街、地下駐車場、地下鉄東西線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る実験を行っている。さらに、階段部での水理量を計測し、氾濫水の浸入時の挙動を、避難行動の難しさに関連づけて調べている。なお、一連の実験データは、地下空間の浸水を扱う数値解析モデルの検証にも有用なものとなる。

2. 水理模型実験

2.1 対象領域

Fig.1に対象とした京都御池地下街周辺の平面図

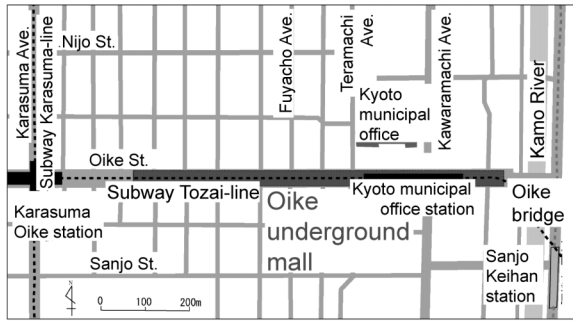


Fig.1 Location of Kyoto Oike underground space

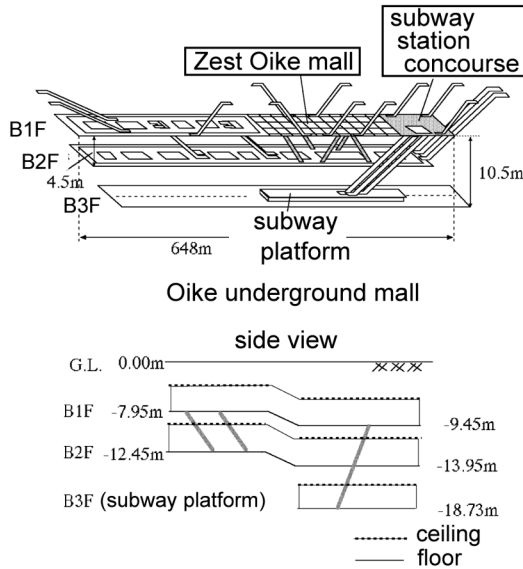


Fig.2 Structure of Kyoto Oike underground space

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、Fig.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・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50×10³m²、容積は約180×10³m³である。

Fig.3に地上と地下街との出入口を示す。便宜上、

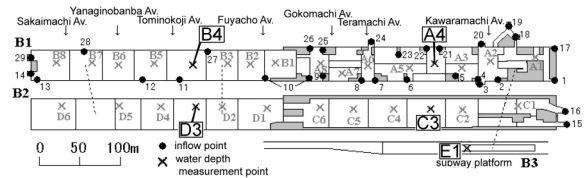


Fig.3 Entrances to underground and depth measurement points

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（エスカレーターを含む）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。階段の形状、幅（実物値）をTable 1に示す。

2.2 実験装置

使用した実験装置は、京都大学防災研究所宇治川水理実験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実物値と模型値の関係は以下のように表される。

$$\text{長さ } L_m/L_p=1/30$$

$$\text{流速 } V_m/L_p=1/5.48$$

$$\text{時間 } T_m/T_p=1/5.48$$

$$\text{流量 } Q_m/Q_p=1/4930$$

添字の m, p はそれぞれ、模型値、実物値を表す。

Fig.4に実験装置の概要図、Photo 1に模型写真を示す。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。なお各階の天井高を実物に換算すると、地下1、2階では1m、地下3階では0.2mほど実物よりも高くなっているが、これは天井の厚みを考慮していないためである。

次に水の循環経路について述べる。Fig.4の低水槽から高水槽に送られた水は、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に給水された後、そこか

Table 1 Width and shape of entrances

No. of stairs	width(m)	shape
1	1.8	stairs
2	3.21	stairs
3	0.81,0.99	escalator
4	3.21	stairs
5	2.7	stairs
6	2.85	stairs
7	2.7	stairs
8	2.7	stairs
9	3.21	stairs
10	3.27	stairs
11	4.29	car slope
12	1.65	stairs
13	1.65	stairs
14	3.54	car slope
15	3.6	car slope
16	3.6	car slope
17	2.61	stairs
18	6	stairs
19	2.7	stairs
20	3.0, 1.0, 1.0	stairs, escalator
21	3.21	stairs
22	3.21	stairs
23	3.21	stairs
24	4.0, 1.0, 1.0	stairs, escalator
25	3.21	stairs
26	3.21	stairs
27	1.65	stairs
28	1.65	stairs
29	3.54	car slope

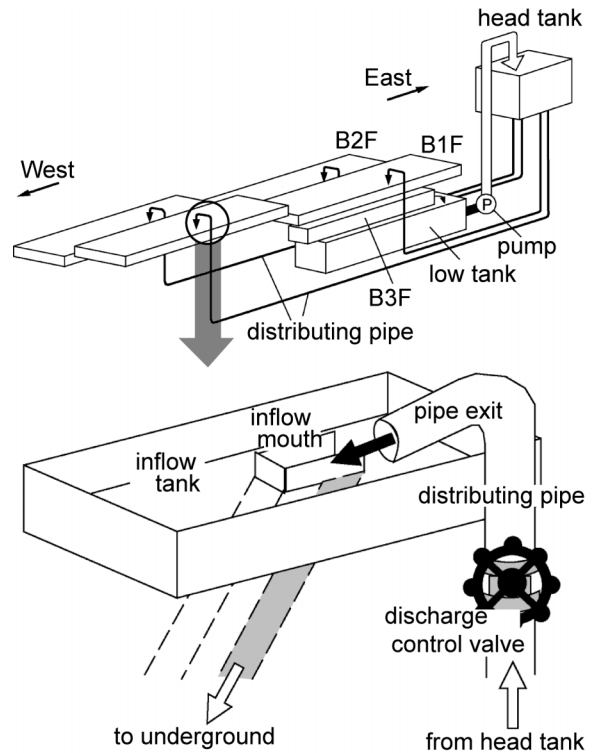


Fig.4 Experimental set-up

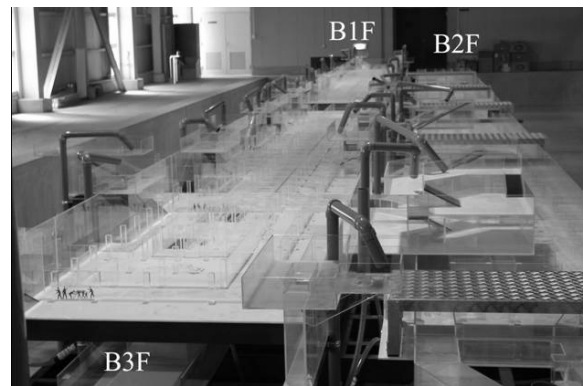


Photo 1 Hydraulic model of underground

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る。

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や地下空間内の貯留量を把握した。

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 (Fig.4 参照) を用いた。なお流量の検定は三角

堰を用いて行った。

Fig.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。変位センサの数の制約で、一度に最大8地点しか計測できないため、同じ条件での実験を4回繰り返し行った。連続して実験を行う場合には、模型表面に前回の実験の水が残ってしまい、実験結果に影響を及ぼすことが危惧されたが、初期水深がある場合とない場合で予備実験を実施し両者を比較したところ、立ち上がりの数 mm

Table 2 Test cases

	inflow stairs	number of inflow stairs	discharge per unit width [$\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$]	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	10~14,27~29	8	0.28	close	5.92
Case5	experiment results of ground inundation			close	31.63

Table 3 Inflow condition of Case5

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

程度の差しか生じなかったことから、連続した実験を行っても問題は無いものと判断した。

また地下鉄軌道からの流出流量の測定は、軌道から低水槽へと排水される水を樋で受けて三角堰へ送り、サーモ式水位計を用いて三角堰内の水深を1秒ごとに測定し、流量を算出した。

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 **Table 2** に示す5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 $q=0.28\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, $0.60\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, $1.00\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ は、地上浸水深を h 、重力加速度を g で表した段落ち式

$$q = \mu h \sqrt{gh} \quad (1)$$

で、流量係数 $\mu=0.544$ として $h=0.3\text{m}, 0.5\text{m}, 0.7\text{m}$ 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1～3は、鴨川の御池大橋付近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は京都市北区で賀茂川が外水氾濫を起こして氾濫水が流下してくる場合を想定したもので、流入口は麩屋町通付近以西の8箇所で、 $q=0.28\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ と設定し、ホーム扉は閉じた状態である。

ケース5は、別途、京都大学防災研究所宇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、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5の流入条件を **Table 3** に示す。これらは、鴨川が御池大橋から $100\text{m}^3/\text{s}$ 溢水する条件下での御池地下街の各流入口への流入流量である。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、**Table 3** を見ると、流入口15,16の流入流量が

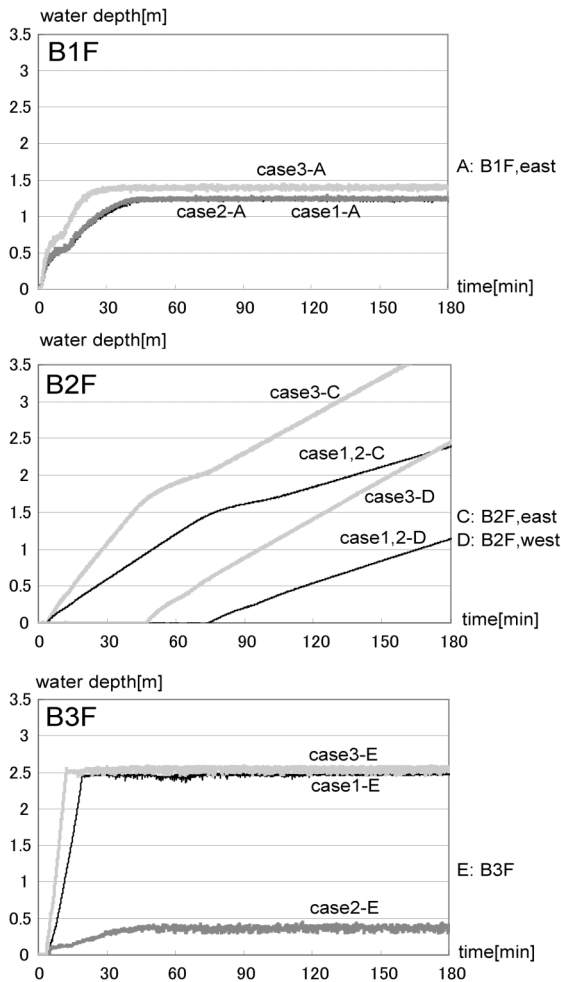


Fig.5 Time change of inundation water depth (Case1,2,3)

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ことによる。ケース 5 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。

ケース 1 ~ 4 では実験開始とともに所定の流入口から同時に設定流量を給水し、実験継続時間は 2000 秒 (実物時間約 180 分) とした。またケース 5 では各流入口に所定の時刻から給水し、実験時間は 1300 秒 (実物時間約 120 分) とした。

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 (Fig.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,

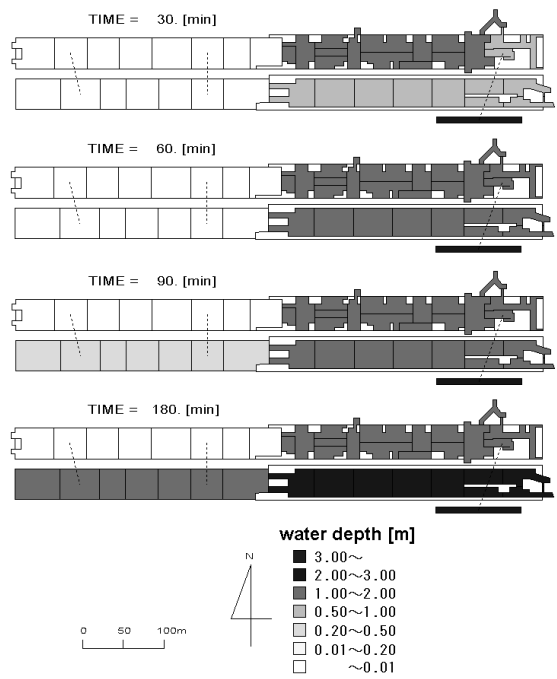


Fig.6 Inundation water depth distribution (Case1)

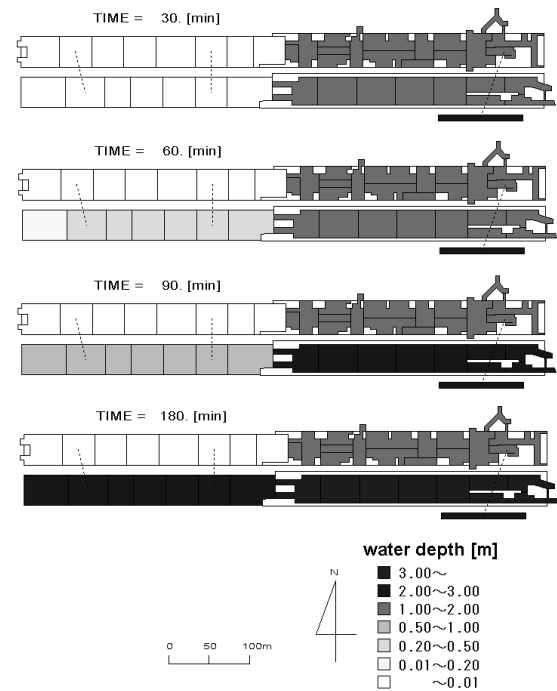


Fig.7 Inundation water depth distribution (Case3)

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 Fig.5, ケース 1, ケース 3 の浸水深図 (平面図) を Fig.6, Fig.7 にそれぞれ示す。

Fig.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, ケース 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 Fig.6, Fig.7 より、ケース 1, ケース 3 とともに地下 1 階東側 (A) の水深が、180 分後も中央部の段差 1.5m を超えず、地下 1 階西側 (B) は浸水しないことがわかる。

続いて地下 2 階を見る。ケース 1, ケース 2 においては、地下 1 階と地下 2 階は完全に独立しており、Fig.5 のように地下 2 階の流況は両ケースで等しくなる。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。一方、ケース 3 では、流入開始およそ 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 で天井高と等しくなり、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 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。

これら 3 ケースの浸水過程をまとめると、ケース 1 とケース 2 の浸水の時間変化は地下 3 階ホーム以外ではほぼ等しい。またケース 3 はケース 1 と比較すると、Fig.6, Fig.7 に示されているように、全体として浸水域の拡がりや水深の増加が速くなっている。とくに地下 3 階ホームは、浸水を確認してから 3 分で水深が 1m に達し、氾濫水が流入した際には大変危険な箇所となることが予想されよう。

(2) ケース 4

ケース 4 の浸水深の時間変化を Fig.8 に、浸水深図 (平面図) を Fig.9 に示す。ケース 4 は $q=0.28\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ で、流入箇所は西側の 8 箇所であるため、前のケースとは異なった浸水過程が見られる。Fig.8 より、流入開始とともに流入箇所である地下 1 階西側 (B) が浸水し、地下 1 階西側 (B) と地下 2 階西側 (D) を結ぶ連絡通路を通じて地下 2 階西側 (D) が浸水し始める。その後、地下 1 階では流入開始 80 分以降は東西ともに水深は約 0.3m で一定となる。地下 2 階では、

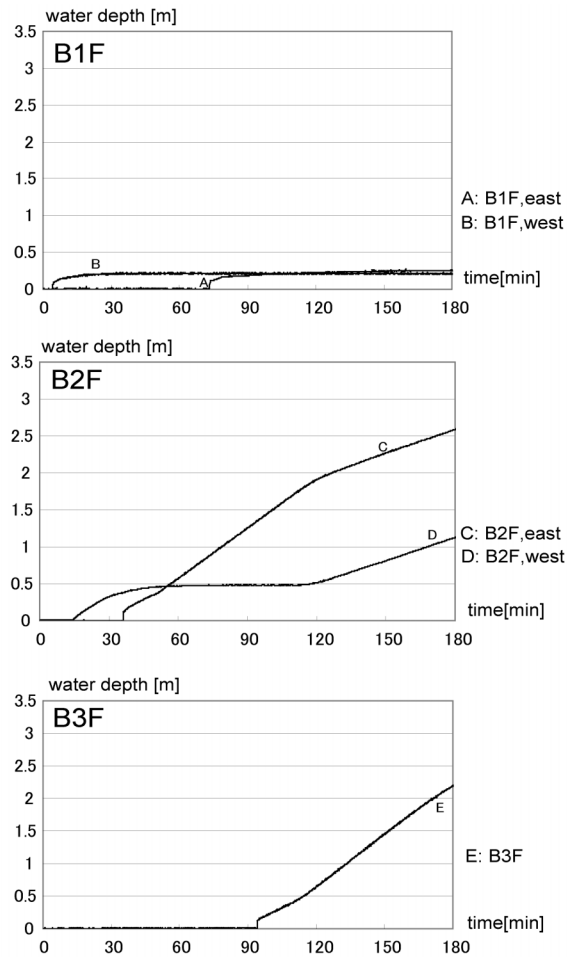


Fig.8 Time change of inundation water depth (Case4)

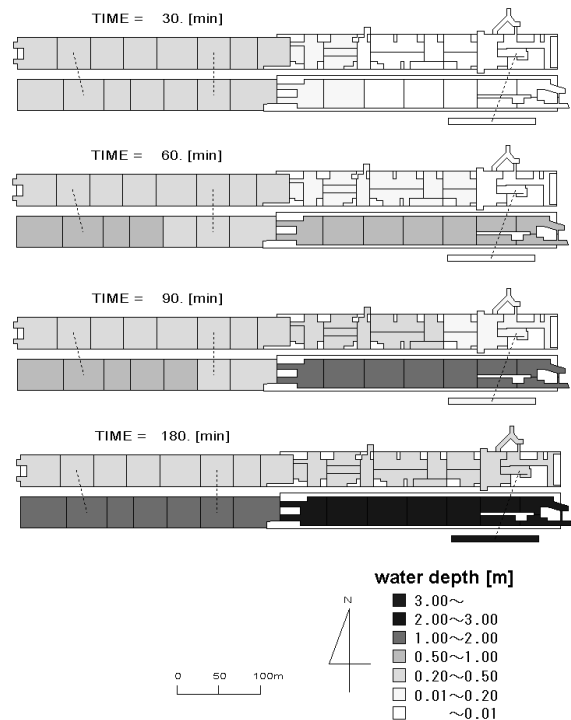


Fig.9 Inundation water depth distribution (Case4)

西側 (D) の水深は 0.5m 前後で一定となり、その後東側 (C) の水深が 2m を超える 120 分後あたりで東西の水位が等しくなり、西側 (D) の水深もともに上昇している。

また地下 3 階ホームでは流入開始 95 分後に氾濫水が流入し、徐々に水深は増加するが、180 分後にもホームは満杯にならず、地下鉄軌道には流出しない。またケース 1、ケース 3 と比較して水深の上昇が緩慢となっている。

Fig.9 からわかるように、氾濫水が相対的に床面高の低い地下 2 階東側 (C) に集中する結果となり、地下 1 階西側 (B) では、浸水域の拡がりは早いものの水深はさほど増加しない。また地下街全体が浸水するが、前のケースに比べて流入流量が少ないため全体的に水深の増加が遅い結果となっている。

(3) ケース 5

ケース 5 の浸水深の時間変化を Fig.10 に、浸水深図 (平面図) を Fig.11 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。前述したように、最初に氾濫水が流入口 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する。まず地下 1 階では、Fig.10 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。

Fig.11 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) 地下街の浸水過程の特徴

地下街に氾濫水が流入した場合、浸水域の拡大が予想以上に早く、水深も短時間で急激に上昇する傾

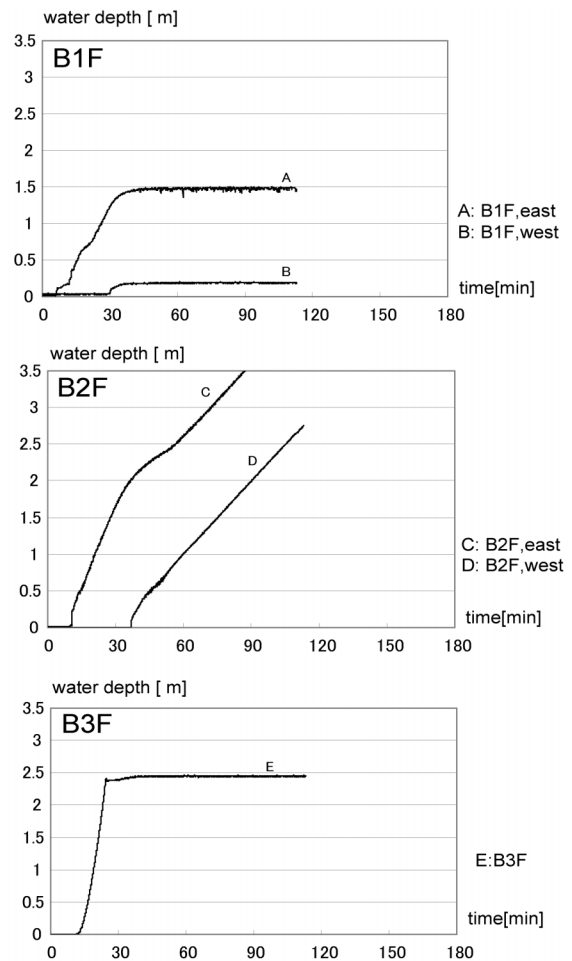


Fig.10 Time change of inundation water depth (Case5)

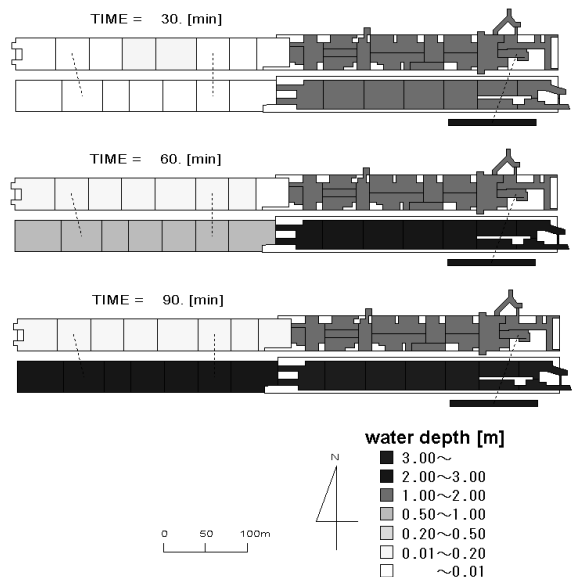


Fig.11 Inundation water depth distribution (Case5)

向にあることがわかる。とくに地下 3 階ホームではホーム扉が閉じている場合にはその傾向が顕著であり、ホーム扉が開いている場合でも、流入開始後は

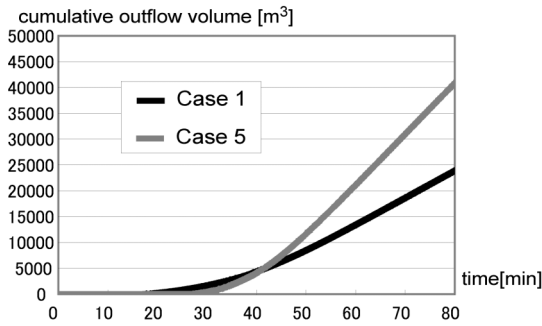


Fig.12 Cumulative outflow to subway track

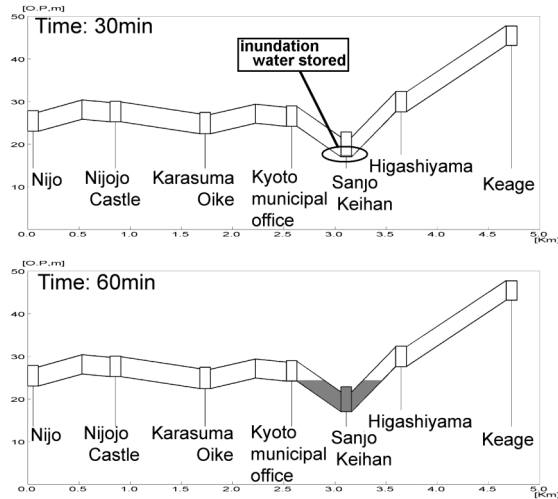


Fig.13 Inundation situation at subway track

ホーム内を流れる氾濫水の勢いが強く、人間が地下鉄軌道に押し流される危険性もあり、避難が困難になる危険性がきわめて高い。

3.4 地下鉄軌道への流出

ケース 1, ケース 5 で地下鉄軌道下端から低水槽への流出流量を測定した。模型では、地下鉄軌道部に流入した水はそこに滞留せず軌道部下端に流下するため、この流量はほぼ地下 3 階ホームから地下鉄軌道部への流出流量とみなすことができる。流入開始時刻の設定は、地下街の浸水過程の実験と同様である。実験では流出流量が一定となった 80 分で測定を終了している。流出量 (流出流量の累加) を Fig.12 に示す。地下鉄軌道からの流出が始まったのはケース 1 では 17 分後、ケース 5 では 26 分後である。地下街へ流入開始 1 時間後にはケース 1 で約 $13,000\text{m}^3$ 、ケース 5 で約 $20,000\text{m}^3$ もの水量が地下鉄軌道へ流出している。地下鉄東西線の構造図をもとに、地下鉄空間部を V 字形の貯留槽が連結した場ととらえ、ケース 5 の浸水の拡がりの時間変化を示したものが Fig.13 である。30 分後には三条京阪駅の最深部で浸水が見られ、60 分後には三条京阪駅が完全に水没する結果となっている。

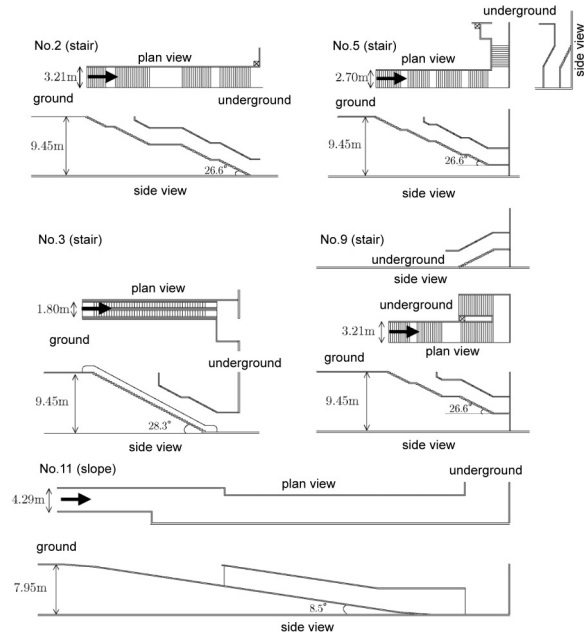


Fig.14 Studied stairs

4. 階段部の実験

4.1 概説

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御池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

実験に用いた流入口は、Fig.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。Fig.14 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 $h=0.1, 0.3, 0.5\text{m}$ に相当するときの段落ち式 (式 (1)) で算出される (単位幅) 流量を与えた。なお、 $h=0.1\text{m}$ に対応する q は、 $q=0.05\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ 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、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。

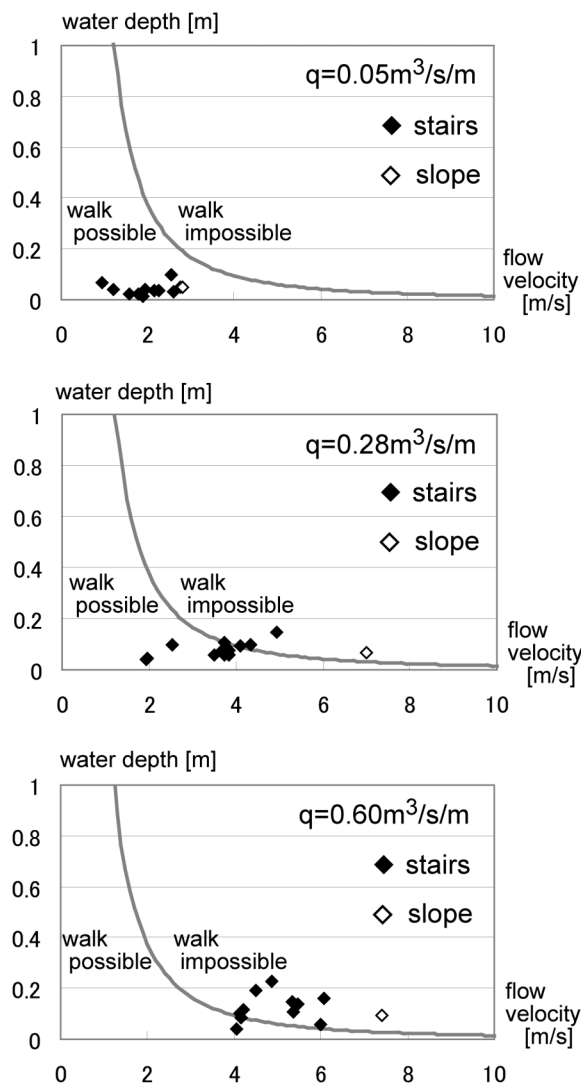


Fig.15 Evacuation possibility at stairs

4.3 実験結果と避難行動限界との関係

武富ら(2001)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。ただしこの u^2h の値は階段の蹴上高・踏面などの形状の違いや個人差などにより異なり、ある程度の幅をもった値であると考えられるが、ここでは避難行動の可能性を調べるために $u^2h=1.5\text{m}^3/\text{s}^2$ を一つの指標として用いることとする。

Fig.15 は、地上浸水深が 0.1, 0.3, 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 $u(\text{m}/\text{s})$ 、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 $q=0.28\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ （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

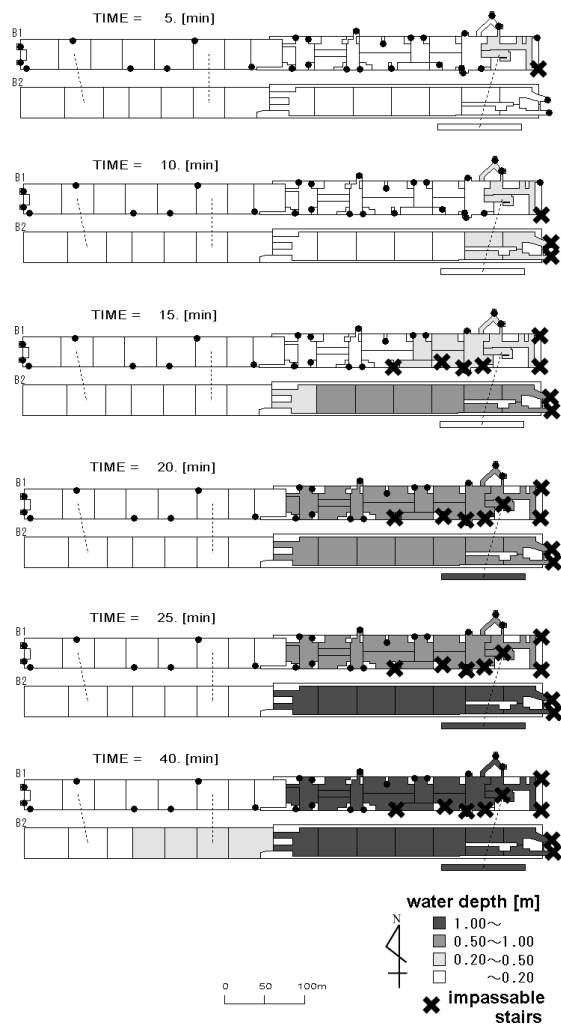


Fig.16 Evacuation possibility (Case5)

といえる。しかし、 $q=0.60\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ （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よう。

5. 浸水時の御池地下街の危険性

ケース 5 の浸水実験の条件下での御池地下街からの避難の可能性を、平面部、階段部の両面の状況から総合的に検証し、地下浸水時の危険性について考察を深める。

地下空間における浸水対策検討委員会(2002)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により、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ている。

地下街と階段部の避難可能性を図示したものが **Fig.16** 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 $0.60\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ 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。避難に時間がかかると、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、**Fig.10** 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. おわりに

本研究では、京都市御池地下街を対象とした精緻なモデルを使用して浸水過程を調べる水理実験を実施した。得られた知見を要約すれば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. 地下街の平面部では水深 20cm と 50cm を基準として避難の可能性を考察した。その結果、鴨川

が御池大橋から $100\text{m}^3/\text{s}$ 溢水する場合のケース 5 では、流入開始 20 分後に地下 1, 2 階東側で水深が 50cm を超え、避難不可能となることがわかった。

今後の課題としては、以下のことが挙げられる。

1. 階段部での水深・流速を測定したが、制約条件が多いため測定箇所が限定されてしまった。より大きな縮尺の階段部模型を用いて詳細な測定を行うことが必要と考えられる。
2. 本実験で得られたデータを用いて地下空間の浸水解析モデルの検証を行い、必要に応じて解析モデルの改良を進めることが望まれる。
3. 地下空間浸水時には、停電による混乱や階段を流下する水に対する恐怖心などから避難行動が滞ることが予想される。浸水時の避難行動について人間の心理的側面も考慮した避難行動解析を行うことが望まれる。

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。また実験に協力いただいた京都大学防災研究所技術室の方々にも謝意を表します。

本研究は、平成 13~14 年度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:河田恵昭京都大学防災研究所教授)」および平成 14 年度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)の援助のもとに実施された。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 高橋保・中川一・野村出(1990): 洪水氾濫に伴う地下街浸水のシミュレーション, 京都大学防災研究所年報第 33 号 B-2, pp.427-442.
- 武富一秀・舘健一郎・水草浩一・吉谷純一(2001): 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.
- 地下空間における浸水対策検討委員会(2002): 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>
- 戸田圭一・井上和也・前田修・谷野知伸(1999): 大都市の地下空間の氾濫浸水解析, 水工学論文集第 43 巻, 土木学会水理委員会, pp.539-544.
- 戸田圭一・栗山健作・大八木亮・井上和也(2003): 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.

On the Inundation Process in the Underground Space

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

* Hanshin Expressway Public Corporation

** The Sumitomo Trust and Banking Co.Ltd.

*** Graduate School of Engineering, Kyoto University

Synopsis

A hydraulic model test was 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 through inundation flow configuration. 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.

Keywords : underground space; hydraulic model test; flood inundation; urban flood; evacuation