京 都 大 学 防 災 研 究 所 年 報　第47号B 平成16年4月
Annuals of Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., No. 47 B, 2004

地下空間を含む都市洪水氾濫に関する水理模型実験

石垣泰輔・中川　一・馬場康之・技術室氾濫模型実験グループ

要　旨

本報は，地下空間を含む市街地における洪水氾濫水の挙動を把握するとともに，氾濫解析モデルの高度化のためのデータ取得を目的とし，京都市の中心部を対象とした縮尺1/100の水理模型を用いて行った地下空間を含む市街地における都市洪水氾濫に関する水理模型実験の結果を取りまとめたものである。実験結果より，多量の氾濫水が地下空間に流入すること，氾濫時の水深および速度は避難に支障をきたすものであることなど，防災対策において考慮すべき多くの事項が指摘された。

キーワード：都市型水害，洪水氾濫，地下空間，水理模型実験

1.　はじめに

近年，都市型水害により多大な被害が発生している（1999，2003 福岡，2000 名古屋など）。このような被害を防止・軽減するため，複雑かつ多層な都市空間における洪水氾濫水の挙動を把握することが急務となっている。本水理模型実験は，地下空間を含む市街地における洪水氾濫水の挙動を把握するとともに，氾濫解析モデルの高度化のためのデータ取得を目的として行ったものである。本実験は，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（代表：京都大学防災研究所・河田恵昭）」のサブテーマ「洪水氾濫災害の危険度の評価（代表：京都大学防災研究所・井上和也）」に関する研究として平成 13～15 年度に実施したものである。以下に，既発表の結果（辰巳ら，2003；中川ら，2003；Ishigaki et al.，2003；中川ら，2004）も含め，本研究で行った一連の実験結果を取りまとめた。なお，著者として記した技術室洪水氾濫模型実験グループのメンバーは，多河英雄，吉田義則，辰己賢一，松浦秀起，冨阪和秀，西村和浩の６名である。

2.　都市洪水氾濫水理模型

2.1　対象領域

外水氾濫の可能性がある，市街地の沿川に地下街や地下鉄等の地下空間が存在する，道路と住区のモデル化が容易である，領域が近くて調査が容易である，などの点を考慮して対象領域を選定した。

対象としたのは，Fig. 1 に示した京都市内の鴨川右岸（西側）地区である。この地区には東西方向に長い２カ所の地下空間，すなわち，御池通り地下にある地下街，地下駐車場および地下鉄駅と線路からなるゼスト御池と呼ばれる地下空間と，四条通り地下にある阪急電鉄の地下線路の駅および地下歩道からなる地下空間が存在する。この領域を対象にフルードの相似則に基づく無歪み水理模型を作成した。

2.2　実験装置

地上部の洪水氾濫水に関する実験を行うため，Fig.2 に示した実験装置の氾濫台上に，縮尺 1/100 の市街地模型を設置した（Photo 1）。模型は，Fig. 1 に示した京都御所南側の丸太町通から南側 2km と鴨川から西側 1km の範囲を対象とし，道路と住区ブロック（ビル，住家等で構成され，周囲を道路でかこまれた集合部分を住区と呼ぶ）で構成された模型である（Photo 2）。模型では，1/2500 の都市計画図を参考に南北方向に 1/200 の勾配（北高南低）とし，東西方向には勾配なしとした。なお，この区間の鴨川は堀込み河川であり堤防は存在しないが，現地では河原町通から鴨川に向かって 1m 程度高くなっているため，模型においても同様の設定とした。

東西方向に位置する御池通地下空間と四条通地下空間への出入口は，Photo 3 上段に示す車両用のもの

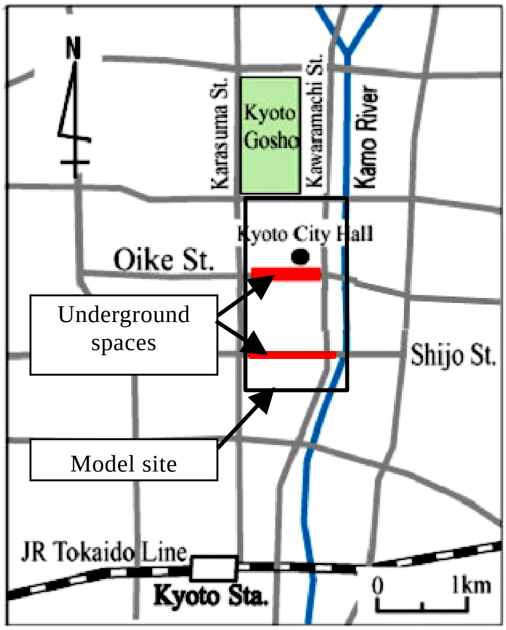


Fig.1 Model site in Kyoto, Japan. The Area is 1 km in East-West and 2 km in North-South, and there are two under-ground spaces under Oike street and Shijo street.

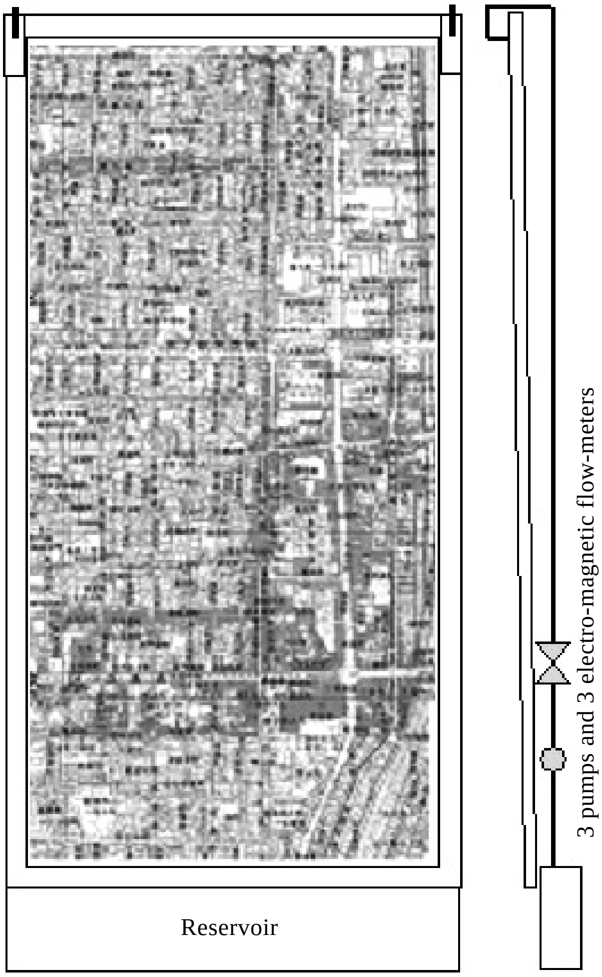


Fig.2 Urban flood model of Kyoto. (Scale=1/100)

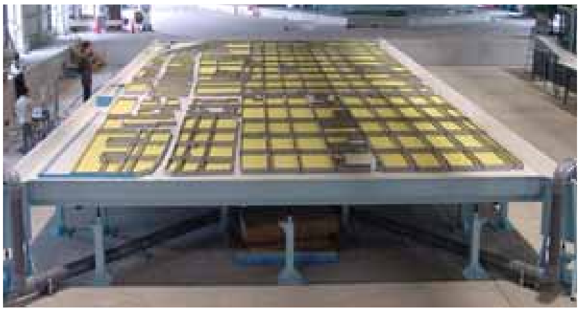


Photo.1 Urban flood model of Kyoto.

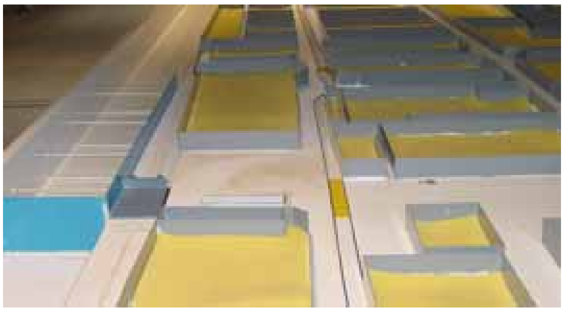


Photo 2 Streets and blocks on the model.

と下段に示した歩行者用があり，対象領域では Fig.3 に示した御池通り沿いの 29 箇所（車両用は No.11，14，15，16，29）と，四条通りの 19 箇所の合計 48 カ所が対象である。これら地下空間への出入り口を Photo 4 に示すように出入り口の方向を原型と同じになるように，コの字形の囲いを用いて模型上に再現している。なお，四条通地下空間の多くの出入口は沿道の建物内に設置されており，模型でも住区ブロック内に設置した。

3. 実験方法

対象領域の東端を流れる鴨川からの氾濫地点を，次の２箇所に想定した。一つは，東からの氾濫であり，氾濫地点として鴨川右岸の御池大橋西詰めからの氾濫を想定し，その氾濫幅を，模型で 0.422ｍとした。もう一つは，北からの氾濫であり，対象領域の北約 1.5ｋｍ上流で高野川と合流して鴨川となる

Photo 3　Entrances to Oike underground space.
(top :Car entrance, bottom :Pedestrian entrance)

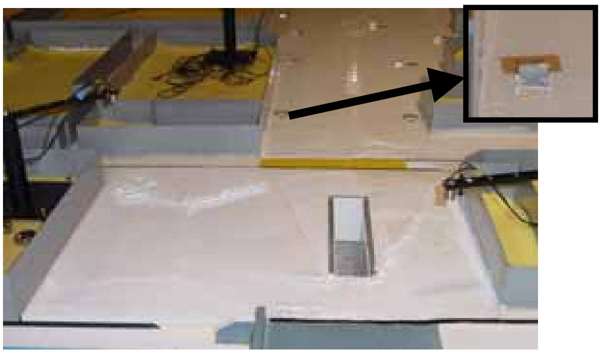


Photo 4　Entrances to underground space on the model and ultra-sonic level-meters for water-depth measurements.

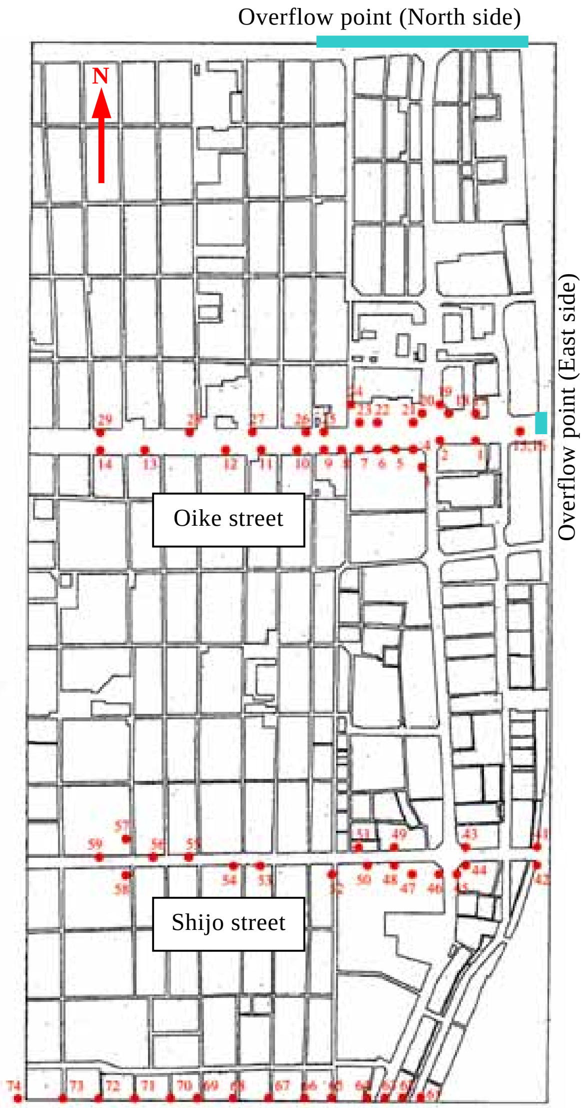


Fig.3 Points for discharge measurements.

賀茂川の右岸が破堤し，京都御所の東側を流下して対象領域北端境界の丸太町通に達し，鴨川右岸と寺町通の間から領域内の氾濫する場合を想定し，模型北端境界において，幅 3.615m から一様に氾濫する条件とした。いずれの場合にも，一定流量（原型：$100m^3/s$，模型：$0.001m^3/s$）が氾濫したとして，氾濫水の挙動，道路の流下流量，地下空間への流入流量，氾濫水の水深，氾濫水の速度，を計測した。計測方法を本章で示す。なお，本実験では，フルードの相似則を用いており，長さ，速度，時間，流量および粗度の縮尺は以下のように表され，ここでは，この関係を用いて模型量を原型量に換算した。

長さ：　$L_r=1/100$
速度：　$V_r=L_r^{1/2}=1/10$
時間：　$T_r=L_r^{1/2}=1/10$
流量：　$Q_r=L_r^{5/2}=1/100000$
抵抗（マニングの粗度係数）：　$n_r=L_r^{1/6}=1/2.15$

3.1　氾濫水の挙動の可視化

Photo 5 は，東からの氾濫のケースにおける氾濫水の挙動を可視化した例である。このケースでは，9 台のビデオカメラを天井に配置して鉛直上方から流れを可視化するとともに，河原町通りおよび御池通り沿いの流れを観察するため，さらに 2 台のビデオカメラにより斜め画像を撮影している。また，北から氾濫する場合には，鉛直画像の撮影用に用いた 12 台のビデオカメラと斜め画像撮影用の 2 台，合わせて 14 台のカメラを用いた。実験は，写真に示すよう

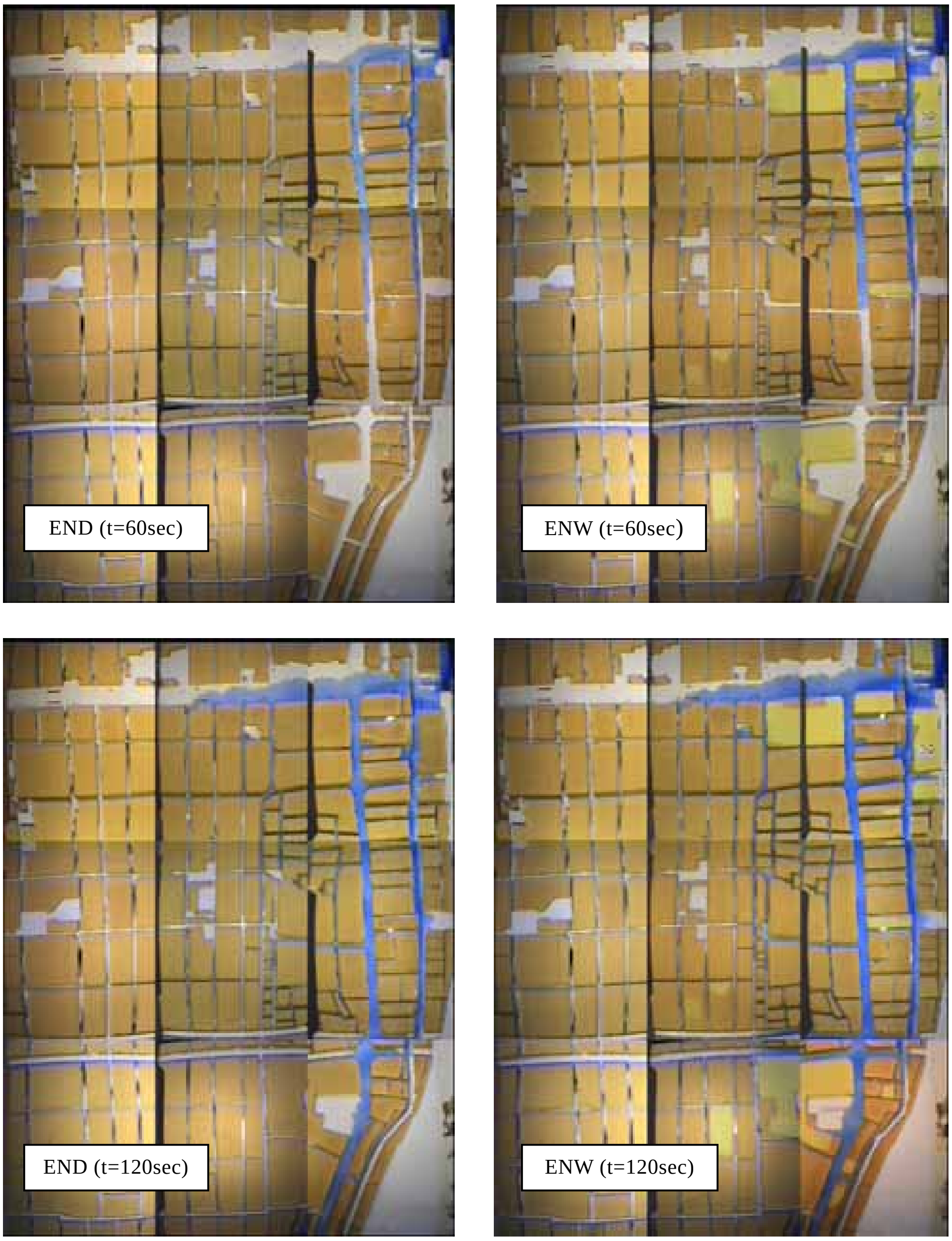


Photo 5　Comparison of flood spreading on dry and wet beds at 60 and 120 second past from the beginning of overflow in the model.

に，青のポスターカラーを用いて着色した氾濫水が市街地内に氾濫する状況を撮影する方法を用いた。これにより，道路および住区内に浸水する状況を把握するとともに，数値計算結果の検証に用いるための動画像を得た。

ここで，この写真を用いて模型表面の状態（乾燥か湿潤）が結果に与える影響について見る。写真は，最も基本となるケース，すなわち，氾濫水が道路のみを流下するケースにおいて，氾濫開始から１分後と２分後（原型では 10 分後と 20 分後）の状況を，東からの氾濫するケースについて，模型表面が初期に乾燥状態であった場合（写真では，END と表示）

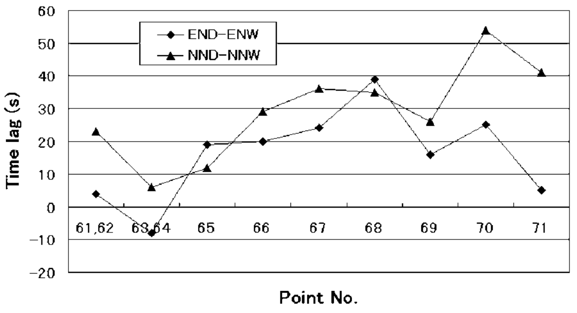


Fig. 4　Arrival time of flood at the downstream end of each street in the model.

Photo 6　Weirs, level meters, and buckets for discharge measurements. (left : downstream end, right : beneath the model)

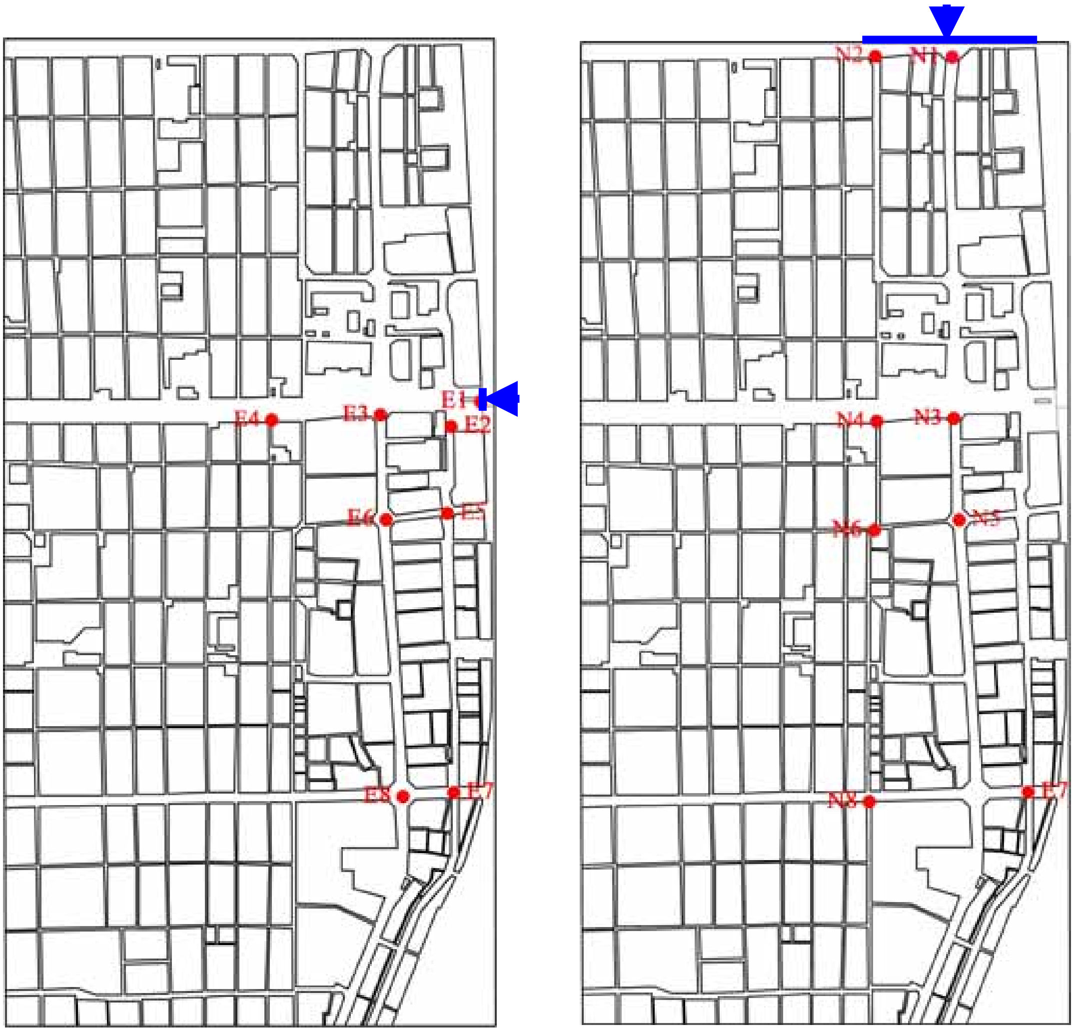


Fig. 5　Points for water depth measurements in the East-side and North-side overflow cases.

と湿潤状態であった場合（写真では，ENW と表示）を比較して示したものである。写真より分かるように，模型表面の状態により氾濫水の拡がりに顕著な差異は認められない。また，Fig. 4 は，氾濫水が Fig. 3 に示した模型下流端への到達時間について，模型表面が乾燥状態と湿潤状態との差を，東から氾濫する場合（END と ENW）と北から氾濫する場合（NND と NNW）について示したものである。正値は湿潤状態の場合の方が到達の早いことを示し，負値はその逆を示している。図より，いずれのケースにおい

ても，湿潤状態の場合の方が下流端への到達が早い点が多いが，全氾濫水の4割近くが流下する No.63, 64の結果を見ると，乾燥状態での到達が早くなっている。この結果と，平均的には模型で20秒程度，原型に換算すると200秒程度でその差は小さいことを考慮し，本模型では，表面状態の影響はそれほど顕著でないと判断した。したがって，本研究では，乾燥状態で行った一連の実験結果を用いることとした。

3.2　道路上を流下する流量の計測

Fig. 3は，本実験における流量の計測点を示したものである。これらの計測点は，道路を流下して対象領域外に出てゆく流量を計測する点（番号 61～74）と，対象領域内に存在する地下空間へ，出入口を通して流入する流量を計測する点（番号1～29と41～59）に分けられる。各点での計測方法は，予備実験により得られた積算流量に基づき，１）計量堰＋サーボ式水位計を用いる方法，２）貯水容器＋容量式水位計を用いる方法，および，３）貯水容器を用いる方法のいずれを適用するかを決定し，流量の時間変化（１）および２）の方法）あるいは積算流量（３）の方法）を計測した。

道路上を流下する流量は，Photo 6左側の写真に示すように模型の下流端に計量堰あるいは貯水容器を設置して計測した。計量堰を用いた点では，その堰内の水位をサーボ式水位計で計測し，流量の時間変化も計測した。なお，得られた水位の経時変化データを，あらかじめ検定しておいた水位と流量の関係式を用いて流量に換算し，それより，流量の経時変化と積算流量データを得た。

3.3　地下空間への流入流量計測

Fig. 3に示した48箇所の地下空間への出入口に流入する流量を，Photo 6右側の写真に示すように，それぞれの出入口からビニルホースで模型下部に設置した計量堰，貯水容器，あるいはバケツに導き，それぞれの水位を計ることにより各出入口から地下空間に流入する流量を計測する方法を用いた。堰およびいくつかの貯水容器の水位は，サーボ式水位計あるいは容量式水位計を用いて計測し，流量の経時変化を計測した。また，積算流量が少ない地点の流量はバケツで積算流量を計測した。なお，11，14，15，16，29は車両用出入口であり，これら以外はすべて歩行者用出入口である。

3.4　氾濫流の水深計測

Photo 4に示すように超音波式水位計を主要交差点に配置し，Fig. 5に示す位置において氾濫水水深の経時変化を計測した。計測には超音波水位計を用いたが，この計測器を用いた理由は，氾濫前の模型表面が乾いた状態から計測を行うためである。

3.5　氾濫流の速度計測

主要な道路上において氾濫水の表面流速を計測した。方法としては，紙トレーサが一定距離を流下する時間を計測して速度を求める方法と，水面におが屑散布してその動きをビデオ撮影した結果から速度を計測する粒子画像流速測定法（PIV 法：Particle Image Velocimetry）を用いた。なお，計測点については後述する（Table 6）。

4.　実験条件の設定

実験条件として，境界条件の氾濫地点，氾濫流量と，初期条件である模型表面の粗度，湿潤状態，地下への流入の有無，住区への浸水の有無を選択する必要がある。本研究では，簡単のため，氾濫流量に関する条件および粗度を一定とし，その他の条件が氾濫水の挙動に与える影響について検討することを目的として実験ケースを決定した。それぞれの条件については以下のように設定した。

4.1　氾濫流量

現在，鴨川の治水対策は，計画規模 1/100で検討されており，計画基準点の荒神橋地点では，1400m^3/sの計画規模である。しかしながら，現況の疎通能は，荒神橋地点で 900～1000m^3/s であり，本実験対象の区間は荒神橋地点より川幅が狭くなっていて疎通能はさらに小さく，計画規模に対応した河道断面とはなっていないのが現状である。このような鴨川の疎通能，および模型上の流れが乱流となることなどを考慮し，氾濫流量として原型で 100m^3/s に相当する流量（模型では 0.001 m^3/s）を想定した。また，実験では，原型で5時間に相当する氾濫時間30分と，その後の15分（原型では2.5時間）の合計45分間を計測時間とした。

4.2　模型表面粗度

模型表面は，塗装した鉄板であり，予備実験の結果から，マニングの粗度係数として，n_m=0.01 という値を得た。原型量に換算すると，n_p=0.0215である。

4.3　模型表面の湿潤状態

表面が乾燥している場合と湿っている状態では，氾濫水の広がりに差が生じると考えられたため，実験前に十分乾燥させた場合と，実験開始直前に 15 分間通水した後に 15 分間放置した状態を湿った状態とし，いくつかのケースで検証実験を行った。そ

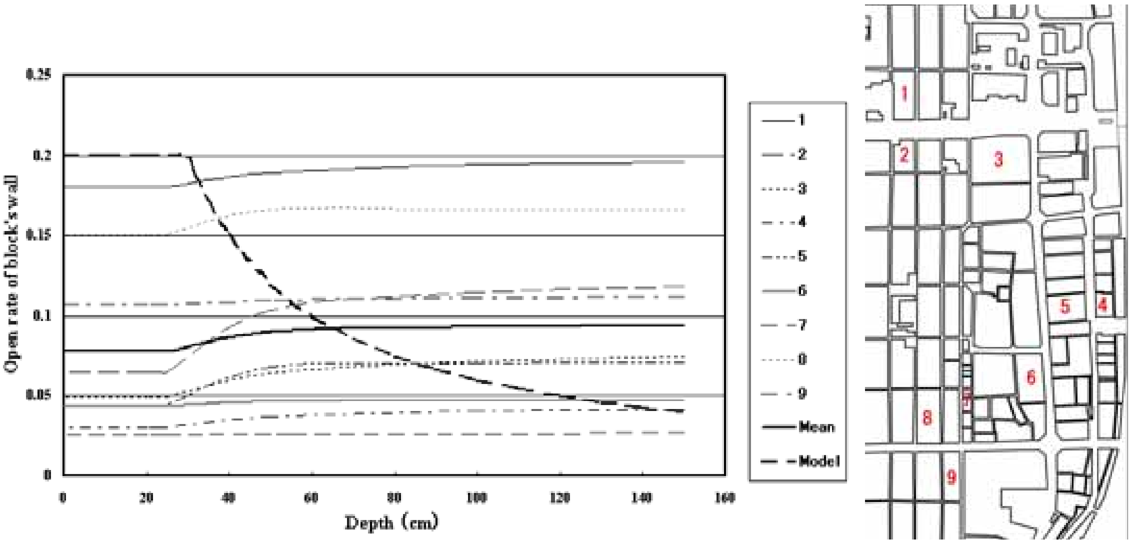


Fig. 6　Open rate of block's wall obtained by the field survey and the rate in the model.

Table 1　Conditions of hydraulic model tests.

Case	Overflow point	Inundation into building block	Inundation into underground space	Model surface
END(ENW)	East side of the site：right bank of Kamo river（Oike bridge）	Non	Non	Dry(Wet)
EYD(EYW)			Yes	Dry(Wet)
EFND		Yes（from slits on the wall, 2cm x 0.3cm at each 10cm）	Non	Dry
EFYD			Yes	Dry
NND(NNW)	North side of the site：right bank of upper Kamo river（Kamo river to Teramachi street）	Non	Non	Dry(Wet)
NYD(NYW)			Yes	Dry(Wet)
NFND		Yes（from slits on the wall, 2cm x 0.3cm at each 10cm）	Non	Dry
NFYD			Yes	Dry

の結果，3.1 に示したように，氾濫水の広がり，水位，地下への流入流量には顕著な差異が見られず，本実験では有意な差が見られなかった（条件表示：Dry，Wet）。したがって，乾燥状態のケースについて一連の実験を行い，湿潤状態のケースは，予備実験とした。

4.4　地下への流入の有無

48 箇所の地下空間への出入り口を閉じたケースと開いたケースでの実験を行い，氾濫水の広がりなどについて比較することを目的とした。（条件表示：地下あり，地下なし）

4.5　氾濫地点

外水氾濫を想定した鴨川は，対象領域の東側を南流している。そこで，領域内で氾濫するケースとして，御池大橋の西詰めからの氾濫を想定した。さらに，領域の北約 1.5ｋｍ上流で賀茂川と高野川が合流して鴨川となるが，西側の賀茂川右岸が破堤して対象領域の北側から氾濫水が流入する場合を想定したケースについて実験を行い，氾濫地点による差異を検討した。（条件表示：東からの氾濫（御池大橋），北からの氾濫（賀茂川右岸：鴨川～寺町通））

4.6　住区への浸水の有無

模型は道路と住区ブロックで構成されている。住区への浸水を許さないケースと，住区への浸水を許すケースについて実験を行い，氾濫水の挙動等を比較することを目的とした。住区への浸水があるケースでは，住区ブロック周長の 20%に相当する長さの

スリットを設け，そこからの浸水を許した。なお，スリットは長さ 2cm，高さ 0.3cm とし，10cm 間隔に設置した。

＊住区ブロックの開度について

模型では，各住区ブロックの北東角から時計回りに，8cm の閉口部の後に，長さ 2cm，模型表面から高さ 0.3cm の開口部を隔壁に空けるパターンでスリットを設け，住区への浸水を許すこととした。いま，これらの氾濫水浸入口の面積が，住区ブロック外周長とブロック周辺の浸水深の積で表される面積に占める割合を“開度”と定義すると，開度は浸水深により変化し，水深が 0～1.5ｍの範囲での模型開度は，Fig. 6 に示すように，0.2～0.05 の範囲で変化する。そこで，この条件設定の妥当性を，実際の市街地における状況を調査して確認した。調査は，Fig. 6 の付図に示すように，対象領域内においてブロックの形態（商店，町屋，ビルなど）が偏らないように９ブロックを選定し，その外周に沿って，開口部（氾濫水が住区ブロックに浸水可能な部分）の種類，長さ，地盤高を，あらかじめ定めた方法に従って測定した。その方法は，開口部の種類を，ドアおよび窓，駐車場および広場，路地の３種類に分類し，長さを歩測あるいは半間（90cm）単位の目測するとともに，地盤高を，25cm 以下，50cm 以下，100cm 以下，100cm 以上の４段階で判断する方法である。これらの結果より，各ブロックの開度と水深の関係が求められる。しかしながら，洪水時に，駐車場および広場，路地への浸水については防御策がなされることは少ないが，ドアと窓については，居住者により何らかの対策が行われるため，開口面積を補正する必要がある。Fig. 6 には，ドアおよび窓の面積の 5%が有効面積（完全に止水はされない状態であり，5%に相当する隙間から氾濫水が浸入するとして評価した面積）として各ブロックの開度を計算した結果を示した。図のように。ブロックにより開度は，0.03～0.2 の範囲にばらつくが，平均開度で見ると，0.1 程度である。これらの計算結果と模型の開度を比較すると，変化傾向は異なるものの，その範囲は同じであり，本実験で設定した開度の妥当性が認められる。なお，有効面積を 100%とした場合（ドアおよび窓が全開の状態）でも，平均開度は 0.3～0.35 程度であった。

4.7 実験ケース

以上のように，氾濫条件は，東からの氾濫と北からの氾濫の２種であるが，住区への浸水の有無，地下への流入の有無および模型表面の状態に関する条件を組み合わせた実験を行う必要がある。Table 1 は，実験条件をまとめたものであり，ケース名が実験条件を表している。ただし，3.1 で述べたように，本実験の条件では，模型表面の状態による差異が顕著ではないため，湿潤状態での実験は予備実験とし，乾燥状態での実験を本実験とした。ケース名が E より始まる実験条件は，東からの氾濫ケースを表し，N から始まるケースは北からの氾濫ケースである。また，EF および NF で始まるケースの条件は，住区への浸水があることを表している。ケース名末尾の２文字は，ND が地下流入なし（No）で，乾燥状態（Dry）の条件を，YD が，地下流入あり（Yes）で，乾燥状態（Dry）の条件を表している。これらの条件を組み合わせ，Table 1 に示す８ケースを，本実験として行った。なお，各ケースとも，同一条件で，予備実験，流量計測，氾濫状況可視化，水深計測，速度計測の５回の実験を実施し（乾燥，湿潤を考慮するケースではこの倍の回数），再現性を確認しながら計測を行った。

5. 実験結果および検討

5.1 氾濫水の拡がり状況

Photo 7～Photo 14 に，各ケースにおける氾濫状況を示す。これらの図は，９台あるいは 12 台のビデオカメラのそれぞれで撮影した動画を，氾濫開始から同経過時間において静止画をキャプチャーし，歪み処理等を行った後に合成したものである。Photo 7～Photo 10 は，東からの氾濫ケースにおける結果を，Photo 11～Photo 14 は，北からの氾濫ケースにおける結果であり，氾濫開始より 30 分後（模型では３分後）の氾濫水の拡がり状況である。これらの図から，地下空間流入の有無（Photo 7 と 8, Photo 9 と 10, Photo 11 と 12，Photo 13 と 14），氾濫地点の違い（Photo 7 と 11，Photo 8 と 12，Photo 9 と 13，Photo 10 と 14）および住区浸水の有無（Photo 7 と 9, Photo 8 と 10, Photo 11 と 13，Photo 12 と 14）について検討した。その結果，1) 南北方向の拡がりに差異ないが，東西方向の拡がりは条件により大きく異なる，2) 地下空間流入および住区浸水がある場合，ない場合に比べて東西方向の拡がりは小さく，とりわけ住区浸水の有無が大きく影響する，3) 北からの氾濫の方が東西への拡がりが大きくなる，などの点が指摘される。

5.2 道路上を流下する流量

模型の下流端から対象領域外に流出する流量を，Fig. 3 に示した番号 61～74 の点において計測した。ただし，62 番および 64 番の道路は幅が狭く流量も少ないため，それぞれ，61 番（木屋町通）および 63

Photo 7　Visualization of inundation.
(Case END: T=30 min. in prototype)

Photo 8　Visualization of inundation.
(Case EYD : T=30 min. in prototype)

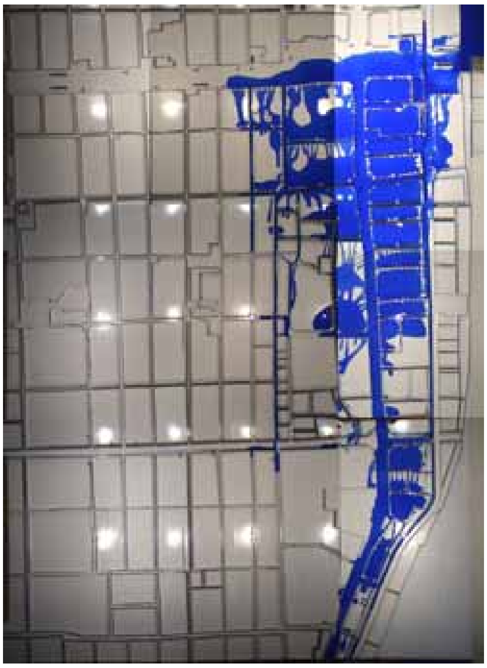


Photo 9　Visualization of inundation.
(Case EFND: T=30 min. in prototype)

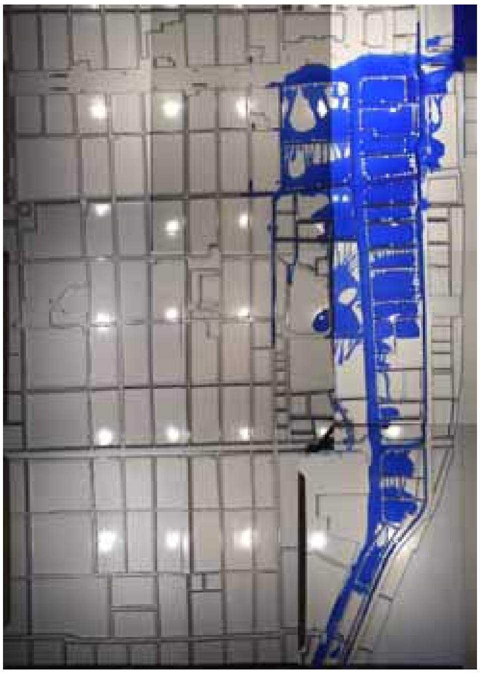


Photo 10　Visualization of inundation.
(Case EFYD : T=30 min. in prototype)

Photo 11　Visualization of inundation.
(Case NND: T=30 min. in prototype)

Photo 12　Visualization of inundation.
(Case NYD: T=30 min. in prototype)

Photo 13　Visualization of inundation.
(Case NFND: T=30 min. in prototype)

Photo 14　Visualization of inundation.
(Case NFYD: T=30 min. in prototype)

Table 2　Rate(%) of discharge through each street to the total volume of overflow ($1.8x10^6m^3$ in prototype)

No.	END	EYD	EFND	EFYD	NND	NYD	NFND	NFYD
61,62	13.97	7.65	11.29	7.47	4.70	2.91	7.98	5.49
63,64	41.15	28.01	44.22	38.45	37.18	22.16	44.37	37.09
65	5.33	2.74	7.19	5.68	8.00	4.30	7.72	6.31
66	4.12	2.96	4.61	3.26	6.24	3.57	4.47	3.98
67	4.85	1.66	2.22	1.56	3.59	2.04	3.02	0.63
68	5.28	2.31	4.57	2.63	6.20	3.99	6.04	4.29
69	3.32	1.56	2.93	1.95	4.99	3.80	4.53	0.94
70	2.29	1.37	1.91	1.51	3.38	2.20	4.69	0.00
71	2.00	0.39	1.50	0.56	1.53	1.13	2.04	0.00
72	1.81	0.00	1.15	0.14	1.49	1.12	1.50	0.00
73	3.42	0.55	1.14	0.00	3.17	4.14	2.38	0.00
74	0.00	0.00	0.00	0.00	15.19	0.60	0.64	0.00
Total(%)	87.53	49.20	82.72	63.21	95.65	51.36	89.39	58.74

Table 3　Arrival time of flood at the downstream end of each street in the prototype. (Unit: sec)

No.	END	EYD	EFND	EFYD	NND	NYD	NFND	NFYD
61,62	1270	1060	1640	1550	1750	1650	1820	2050
63,64	1050	1150	1240	1420	1360	1340	1500	1660
65	1950	2240	2350	3440	1760	1810	2380	2540
66	2050	2320	2740	3490	1960	1870	2580	2630
67	2400	3160	4210	4890	2380	2400	4410	4240
68	2590	3330	4560	5480	2460	2420	4240	4540
69	2760	4920	5790	7290	2610	2880	4650	5810
70	2940	4900	6060	8720	2850	3180	4860	6450
71	3140	5490	2880	10490	2920	3490	6070	8030
72	3400		7510	15800	3500	3880	6580	8050
73	3230	6950	10360		2980	3500	6590	7330
74					3500		14400	

番（河原町通）に含めた。また，65 番は寺町通，66 番は御幸町通，67 番は麩屋町通，68 番は富小路通，69 番は柳馬場通，70 番は堺町通，71 番は高倉通，72 番は間之町通, 73 番は東洞院通のそれぞれの道路からの流出量を，74 番は模型西端からの流出量を計測した点である。Table 2 の数値は，実験時間内（原型で 7.5 時間，模型で 45 分間）における各点の積算流出量が総氾濫量（原型で 180 万 m^3，模型で $1.8m^3$）に占める割合を示している。地下流入がないケース（END,EFND,NND,NFND）では，83%～96%と 9 割が，地下流入があるケースで住区浸水なし（EYD,NYD）では約 5 割，地下流入ありで住区浸水あり（EFYD，NFYD）では約 6 割が道路を通して対象領域外に流出している。これは，この領域が南北方法にかなり急な勾配（1/200）を有しているためであり，氾濫水の大部分が南に向かって流下するという結果になっている。通りごとに比較してみると，鴨川と平行な南北の通りである河原町通を流下する流量（63，64）が最も多く，道路を流下する全流量の 4 割～ 6 割と，おおよそ半分の流量がこの通に集

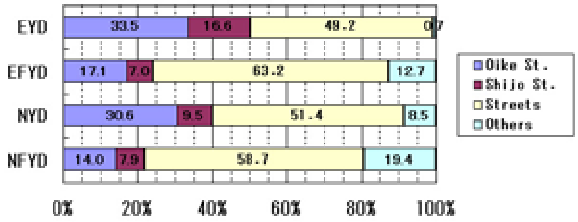


Fig.7　Distribution of volume of inundation.

中している。この通りは，市の繁華街の主要通りであり，交通量，歩行者ともに最も多く，社会資本も集中しているため，ひとたび氾濫が生じると多大な人的・物的被害を被る可能性があるため，早急に水害対策の整備が必要であることは言うまでもない。

次に，氾濫水が模型下流端に到達するまでの時間を計測した結果を示すと Table 3 のようになる。なお，計測点は Table 2 と同じである。これより，地下空間への流入および住区ブロックへの浸水により，氾濫水の到達が遅くなることが分かる。しかしながら，一部の計測点で相反する結果が得られており，本実験で対象としたような道路網における流れは複雑であり，このことは，予想される到達時間とは異なる地点が存在する可能性を考慮することの必要性を示している。

5.3　地下空間への流入流量

Fig. 7 は，御池および四条地下空間への積算流入量と道路下流端から対象外へ流出する積算流量を，総氾濫流量（原型で 180 万 m^3，模型で 1.8m^3）に占める割合で示したものである。住区浸水がない場合は，40～50%，ある場合は 20～25%が地下空間に流入する。Table 4 は，地下空間へ各入口から流入する積算流量を，Fig. 7 と同様の比率で示したものである。この結果より，鴨川に近い車両用の 15, 16 の出入口からの流入が多いこと，御池通りと四条通りのいずれでも地盤の低い通り南側の出入口からの流入量の多いこと，北からの氾濫に比して東から氾濫する場合に全流入量が若干多いこと，氾濫地点により流入する出入口の数が異なること，などが分かる。この結果は，洪水対策を施す必要のある出入口と，そこからの流入流量が，想定する洪水氾濫により異なることを示唆しており，防災対策を立案する場合には洪水の特性を考慮した検討が必要であることを示している。

Fig. 8，Fig. 9 は，御池地下空間における出入口毎の積算流入量を，総氾濫量に対する比率で示したものである。また，横軸は，付図に示した出入口の番号を示し，番号末尾の英字は，それぞれの出入口の方向（東向き：E，西向き：W，南向き：S，北向き：

Table 4 Rate(%) of discharge into underground space through each entrance to the total volume of overflow (1.8x10^{6}m^3 in prototype).

		EYD	EFYD	NYD	NFYD
South side of Oike St.	1 E	1.62	0.99	3.85	2.44
	2 E	2.74	1.86	2.31	1.85
	3 E	1.36	0.96	0.85	1.44
	4 E	1.90	1.41	1.75	0.80
	5 W	2.11	1.39	2.82	2.48
	6 W	1.26	0.00	2.09	1.46
	7 W	1.02	0.00	2.08	0.00
	8 W	0.89	0.05	0.96	0.74
	9 W	1.04	0.01	1.14	0.66
	10 W	0.54	0.00	1.23	0.00
	11 E	0.62	0.01	2.40	0.49
	12 E	0.00	0.00	1.15	0.00
	13 W	0.00	0.00	0.00	0.00
	14 W	0.00	0.00	0.00	0.00
North side of Oike St.	15 E 16	15.63	9.18	0.00	0.00
	17 E	1.87	1.23	0.62	0.00
	18 S	0.40	0.00	1.25	0.00
	19 W	0.00	0.00	0.15	0.00
	20 N	0.00	0.00	1.71	0.99
	21 E	0.00	0.00	0.49	0.00
	22 W	0.54	0.00	1.33	0.50
	23 W	0.00	0.00	0.44	0.00
	24 N	0.00	0.00	1.11	0.12
	25 W	0.00	0.00	0.46	0.00
	26 W	0.00	0.00	0.46	0.00
	27 E	0.00	0.00	0.00	0.00
	28 E	0.00	0.00	0.00	0.00
	29 W	0.00	0.00	0.00	0.00
Subtotal of Oike St.		33.53	17.08	30.64	13.98
South side of Shijo St.	42N	2.25	0.34	0.00	0.00
	44N	1.99	1.28	1.69	1.26
	45N	4.35	2.04	2.28	3.18
	46E	1.22	0.00	0.83	0.00
	47N	1.51	1.10	0.29	1.16
	48N	1.55	1.44	0.03	1.33
	50N	1.19	0.00	1.00	0.00
	52E	0.56	0.26	0.67	0.46
	53N	1.27	0.49	1.52	0.00
	54N	0.55	0.00	0.72	0.41
	58E	0.00	0.00	0.00	0.00
North side of Shijo St.	41S	0.03	0.00	0.00	0.00
	43S	0.01	0.00	0.00	0.00
	49S	0.12	0.00	0.00	0.00
	51S	0.00	0.00	0.00	0.00
	55S	0.00	0.00	0.39	0.00
	56S	0.00	0.00	0.09	0.00
	57E	0.00	0.00	0.00	0.00
	59S	0.00	0.00	0.02	0.06
Subtotal of Shijo St.		16.61	6.95	9.53	7.86
Total	(%)	50.13	24.04	40.16	21.84

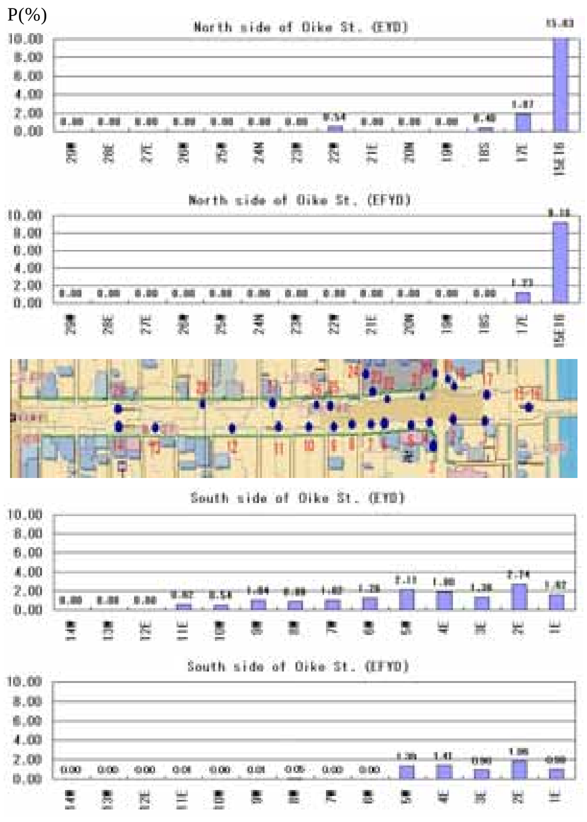


Fig.8 Rate(%) of dischrage into underground space through each entrance to the total volume of overflow (1.8x10^{6}m^3 in prototype) in the east-side overflow cases.

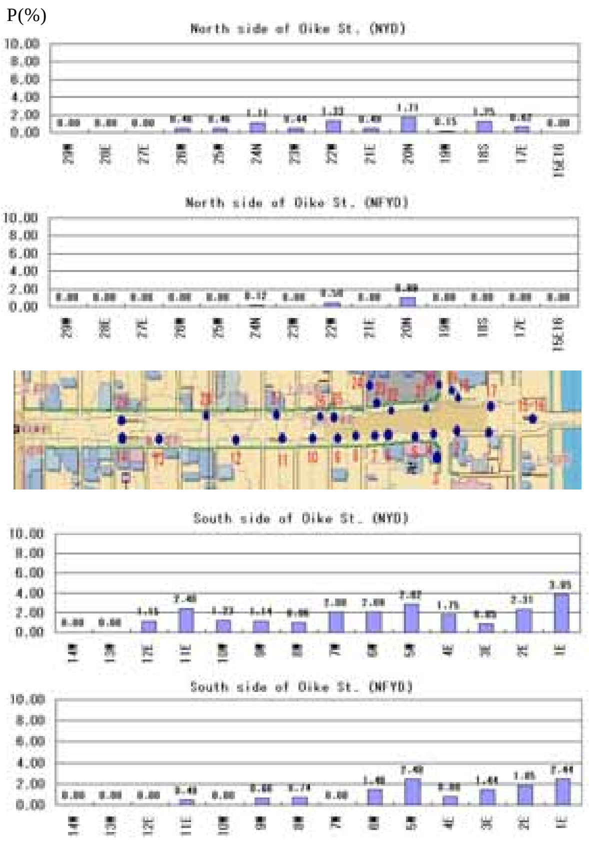


Fig.9 Rate(%) of dischrage into underground space through each entrance to the total volume of overflow (1.8x10^{6}m^3 in prototype) in the north side overflow cases.

N）を表している。図より，通りの南側出入口からの流入が多い，御池大橋からの氾濫では車両の出入口から大量の流入がある（No.15,16），出入口の方向による差異はそれほど顕著ではない，氾濫地点に近い出入口から流入する，などの特徴が伺える。さらに，これらの結果を，川からの距離と単位時間の流入量の関係を見るために整理したものが Fig. 10 である。なお，流量は積算流量の経時変化計測データを用いて算定した（模型で 15 分～20 分，原型で 150 分～200 分の変化率から算定)。上段および中段の図より，御池通りの鴨川に最も近い車両出入口を除き，御池通りと四条通りのいずれの通りにおいても，河川からの距離に拘わらず，毎秒 2 m^3 前後の流量が各出入口から流入しており，この結果より，地下空間に大量の氾濫水が流入して非常に危険な状態となることが容易に予測できる。一方，下段に示した道路上を流下する流量を見ると，いずれのケースにおいてもピークとなっている河原町通りでは 23～38m^3/s と小河川並の流量が流れる結果となっており，その他の通りでも 5m^3/s 前後と大量の氾濫水が流下する非常に危険な状況となることが分かる。

5.4 氾濫流の水深

Table 5 は，それぞれのケースにおいて，Fig. 5 に示した点において超音波水位計で計測した水位データを用い，氾濫開始から 15 分～20 分間（原型では，150 分～200 分）の平均値から求めた水深を原型量で示したものである。Fig. 12～Fig. 19 に示した水深の経時変化でも分かるように，この時間帯には，流れは定常状態に達している。表より，水深は数点を除き，0.5m～1.2m の範囲であり，歩行困難な水深である 0.5m を越えている。また，地下流入のある場合は，ない場合に比べて水深が小さくなる傾向が見られる。一方，住区浸水のある場合も，ない場合に比べて水深が小さくなる傾向がある。しかしながら，これらの条件の違いによる影響の大小は，計測点により異なり，地下流入と住区浸水のいずれの影響が大きいかについては明確ではない。

これらの結果を，河原町通に沿った 3 地点での氾濫水深で比較したものが Fig. 11 である。地下空間への流入により水位が下がる点は共通しているものの，氾濫地点および住区浸水の有無による条件ごとの影

Table 5　Mean depth of inundation in the prototype.（Unit：m）

	END	EYD	EFND	EFYD		NND	NYD	NFND	NFYD
					N1	0.81	0.81	0.58	0.66
					N2	0.85	0.83	0.62	0.61
E1	1.03	0.70	1.21	0.67					
E2	1.15	0.97	0.88	0.86					
E3	0.74	0.53	0.59	0.57	N3	0.92	0.79	0.74	0.67
					N4	0.89	0.70	0.79	0.68
E4	0.66	0.52	0.42	0.34					
E5	0.66	0.51	0.47	0.43					
E6	0.72	0.59	0.70	0.66	N5	0.67	0.60	0.59	0.58
					N6	0.74	0.57	0.67	0.72
E7	0.43	0.27	0.00	0.00					
E8	0.84	0.53	0.74	0.58	N7	0.80	0.44	0.72	0.56
					N8	0.81	0.55	0.62	0.66

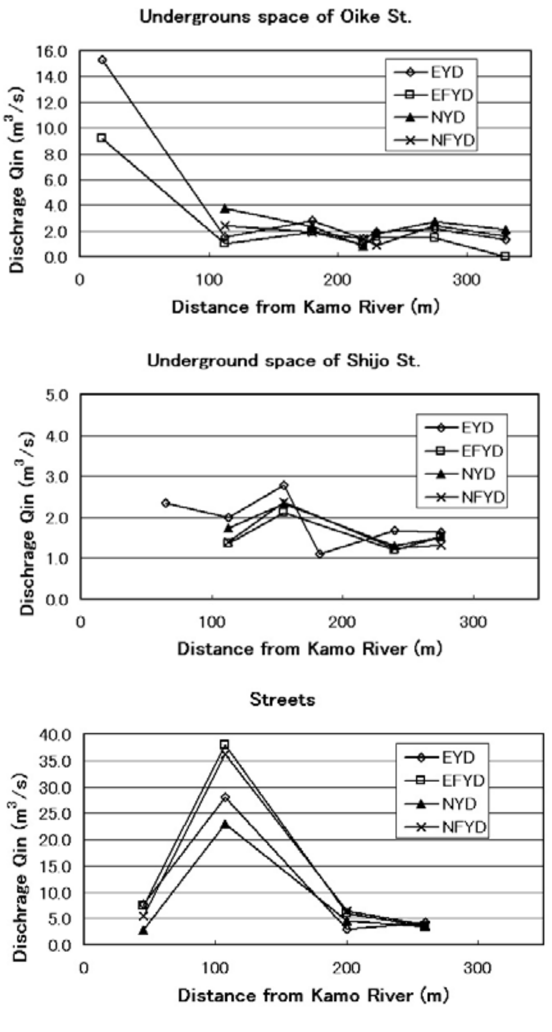


Fig. 10　Discharge into underground spaces (top and middle) and discharge of flowing out through streets (bottom), those are plotted to the distance from the river.

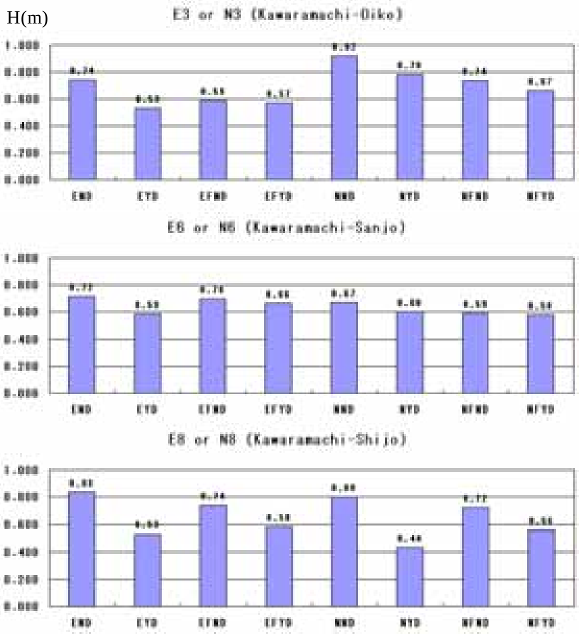


Fig. 11　Water depth along Kawaramachi street.

響の表れ方は地点毎に異なり，道路網内の流れが複雑なものになっていることが知れる。また，Fig.12～Fig. 19 は，それぞれのケースにおける水深の経時変化を示したものであるが，これらより，氾濫開始から１時間半（模型では９分）程度で定常水深に達するものの，初期の変化については，氾濫の到達を示す立ち上がり時間がケース毎に異なるなど，道路網を流れる氾濫水の複雑な状況を反映しており，明確な特性を見いだすのは困難である。また，水深が増加後，減少し，再度増加して一定値に近づくという傾向を示す計測点がある。このような複雑な変化は，実験時に観察される複雑な現象，すなわち，最

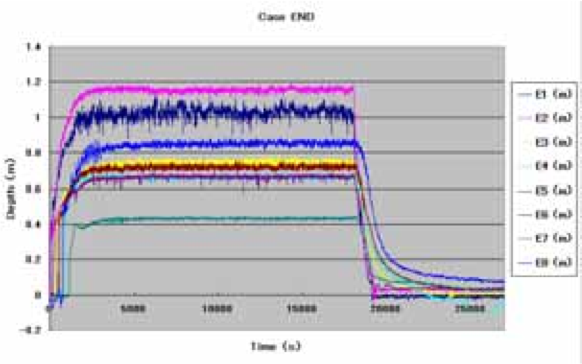


Fig. 12 Water depth of Case END in prototype.

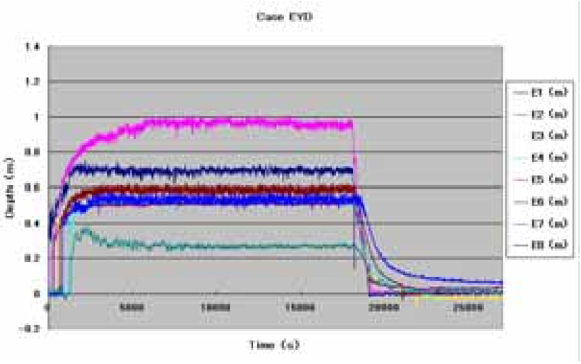


Fig. 13 Water depth of Case EYD in prototype.

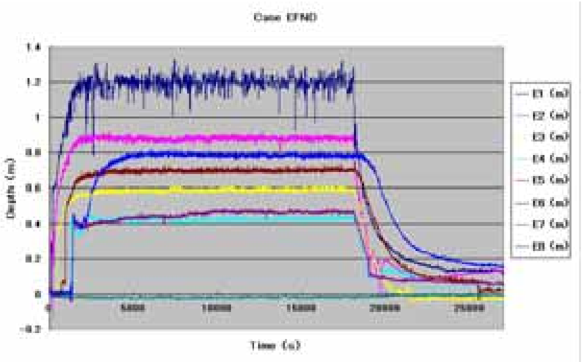


Fig. 14 Water depth of Case EFND in prototype.

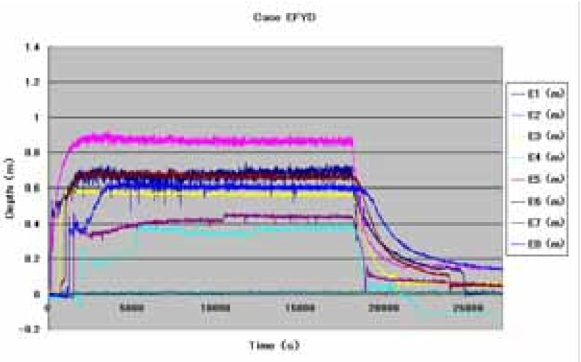


Fig. 15 Water depth of Case EFYD in prototype.

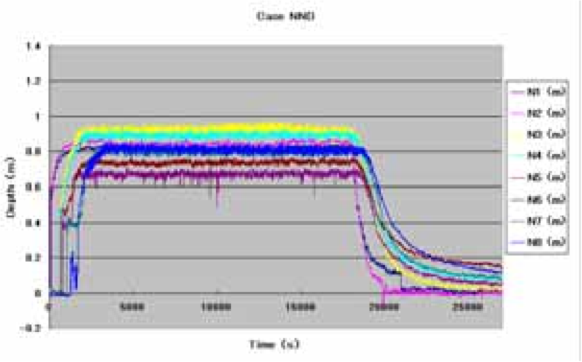


Fig. 16 Water depth of Case NND in prototype.

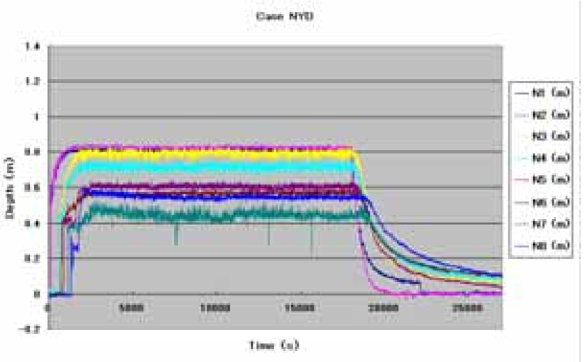


Fig. 17 Water depth of Case NYD in prototype.

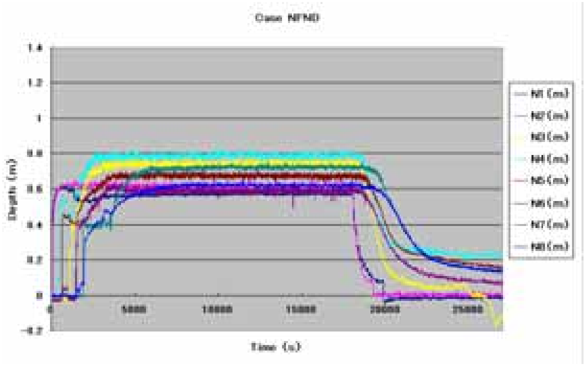


Fig. 18 Water depth of Case NFND in prototype.

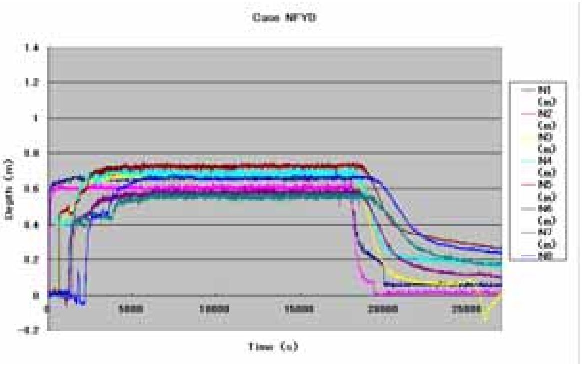
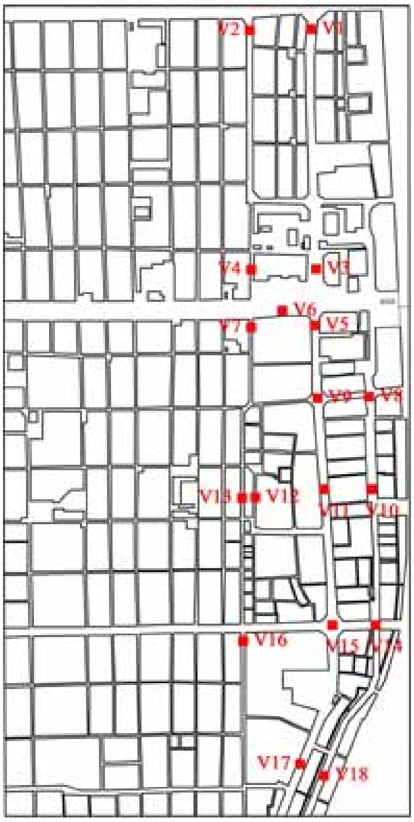


Fig. 19 Water depth of Case NFYD in prototype.

Table 6　Velocity on the surface of flood flow (Unit: m/s, in prototype)

	END	EYD	EFND	EFYD	NND	NYD	NFND	NFYD
V1					3.23	3.31	2.85	2.79
V2					2.75	2.95	2.97	2.93
V3					3.69	3.74	3.62	3.57
V4					3.33	3.33	3.2	3.07
V5	2.87	*	1.93	1.76	2.64	2.70	2.72	2.62
V6			1.66	1.51				
V7			2.03	1.67	2.95	2.81	2.74	2.67
V8	3.28	2.89						
V9	3.35	2.77						
V10	4.13	3.57	3.27	3.31				
V11	3.87	3.54**	3.74	3.41	3.39	3.12	3.29	3.26
V12			1.91	1.47	1.94	1.78	1.92	1.56
V13			2.63	2.15	2.61	2.3	2.56	2.49
V14	3.42	3.06						
V15	2.78	2.89	4.22	4.32	2.83	2.23	4.15	4.11
V16			1.42	1.32	2.47	1.88	1.71	1.59
V17		2.67	2.71	2.78				
V18			2.50	2.24				

* 2.18m/s (by PIV method), ** 3.40m/s (by PIV method)



初に到達した氾濫水と，道路網内の局所的な水位差により生じる２次的な流れや住区内へ浸水した後に下流側から流出する流れが集中・発散する，と言った現象の組み合わせの結果生じるという説明が可能である。このことは，道路網内の局所的な現象が，氾濫水深に影響することを意味している。

5.5　氾濫流の速度

5.4 では，氾濫流の水深が，ほとんど地点で歩行困難な 0.5m を越えていることを示したが，歩行を困難にするものとして流れの速度も重要な要素である。Table 6 は，付図に示した位置において，一定距離（30cm～50cm）を流下するトレーサ（紙片等）の通過時間を計測する方法で測定した速度をまとめたものである。トレーサによる方法では，流れの中心部にトレーサが集まるため，速度の速い部分を計測することになる。結果を見ると，遅い地点でも 1m/s を越えており，最も早い地点では 4.3m/s に達している。この速度では，歩行者の避難は困難であり，水深が 0.5m を越えていることを考慮すると，道路上の車両も押し流されることが容易に想像できる。また，Fig. 20 に示した PIV 法で得られた道路上速度の横断分布（V5 と V11 は同じ道路の上流と下流の計測点）をみると，下流に行くに連れて流れは加速しており，危険度が増して行くことが知れる。さらに，道路を一様に流れるのではなく，片側に偏るなど複雑な流れとなっている。これらの結果から，氾濫時には歩行困難になること，車両等が押し流されて２次被害が生ずることなど，防災対策上，考慮すべき多くの事項が指摘されるとともに，市街地の道路網では，複雑な流れによる予測不可能な現象が，被害を大きくするとともに，予想外の被害を発生させる要素であるという重要な結論が得られる。

6.　おわりに

京都市の中心部を対象とした縮尺 1/100 の水理模型を用い，想定氾濫流量を $100m^3/s$ とした場合について，地下空間を含む市街地における都市洪水氾濫に関する実験を行った。本実験を通して得られた主な結論をまとめると以下のとおりである。

1) 地上における氾濫実験の結果は，大量の氾濫水が道路を流下するとともに地下空間に侵入して急激な水深上昇が生ずる可能性があることを示しており，住民および外来者が洪水氾濫時の危険性を認識し，早期に避難することの重要性を示唆するものである。
2) 氾濫水の拡がり状況についてみると，南北方向

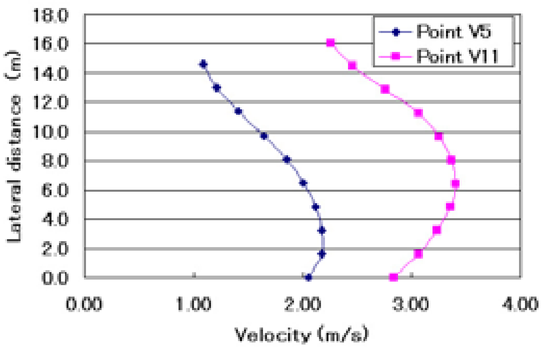


Fig. 20　Lateral distribution of velocity.
(Case EYD, obtained by PIV method)

の拡がりに差異ないが東西方向の拡がりは条件により大きく異なる，地下空間流入および住区浸水がある場合には，ない場合に比べて東西方向の拡がりは小さく，とりわけ住区浸水の有無が大きく影響する，北からの氾濫の方が東西への拡がりが大きくなる，などの点が指摘された。

3)　道路上を流下する流量については，地下流入がないケースでは，約９割が，地下流入があるケースで住区浸水なし）では約５割，地下流入ありで住区浸水ありのケースでは約６割が道路を通して対象領域外に流出している。これは，この領域が南北方法にかなり急な勾配（1/200）を有しているためであり，氾濫水の大部分が南に向かって流下する。鴨川と平行な南北の通りである河原町通を流下する流量が最も多く，道路を流下する全流量の４割～６割と，おおよそ半分の流量がこの通りに集中している。この通りは，市の繁華街の主要通りであり，交通量，歩行者ともに最も多く，社会資本も集中しているため，ひとたび氾濫が生じると多大な人的・物的被害を被る可能性があるため，早急に水害対策の整備が必要であることは言うまでもない。

4)　地下空間への流入量は，住区浸水がない場合は，全氾濫量の 40～50%，ある場合は 20～25%が流入する。地盤高の低い通りの南側出入口からの流入が多い，御池大橋西詰めからの氾濫では車両の出入口から大量の流入がある，出入口の方向による差異はそれほど顕著ではない，氾濫地点に近い出入口から流入する，などの特徴が伺えた。

5)　氾濫水の水深は，歩行困難な水深である 0.5m を越えている。また，地下流入のある場合は，ない場合に比べて水深が小さくなる傾向が見られる。一方，住区浸水のある場合も，ない場合に比べて水深が小さくなる傾向がある。しかしながら，これらの条件の違いによる影響の大小は，計測点により異なり，地下流入と住区浸水のいずれの影響が大きいかについては明確ではない。

6)　氾濫流の水深は複雑な変化をする。このような複雑な変化は，最初に到達した氾濫水と，道路網内の局所的な水位差により生じる２次的な流れや住区内へ浸水した後に下流側から流出する流れが集中・発散する，と言った現象の組み合わせの結果生じるという説明が可能である。このことは，道路網内の局所的な現象が，氾濫水深に影響することを意味している。

7)　氾濫流の速度は，遅い地点でも 1m/s を越えており，最も早い地点では 4.3m/s に達している。この速度では，歩行者の避難は困難であり，水深が 0.5m を越えていることを考慮すると，道路上の車両も押し流されることが容易に想像される。また，道路を流下するに連れて流れは加速しており，危険度が増して行くことが知れる。さらに，道路を一様に流れるのではなく，片側に偏るなど複雑な流れとなっている。

8)　以上の結果から，洪水氾濫時には歩行困難になること，車両等が押し流されて２次被害が生ずることなど，防災対策上，考慮すべき多くの事項が指摘されるとともに，市街地の道路網では，複雑な流れによる予測不可能な現象が，被害を大きくするとともに，予想外の被害を発生させる要素であるという重要な結論が得られた。

謝　辞

ここに，本実験にご協力頂いた防災研究所教授井上和也先生，戸田圭一先生，研究支援推進員の北川吉男氏，京都大学大学院生の八木博嗣君，藤本幸史君，ならびに関係諸氏に感謝の意を表します。

参考文献

辰巳賢一・多河秀雄・吉田義則・三浦勉・松浦秀起 (2003)：市街地模型氾濫実験について，京都大学防災研究所年報，46 号Ｂ，pp.275-286.

中川一・石垣泰輔・武藤裕則・井上和也・戸田圭一・多河秀雄・吉田義則・辰巳賢一・張浩・八木博嗣 (2003)：都市における洪水氾濫—大規模な洪水氾濫模型装置を用いた実験と解析—，京都大学防災研究所年報，46 号Ｂ，pp.575-584.

中川一・石垣泰輔・武藤裕則・八木博嗣・張浩(2004)：都市域を対象とした洪水氾濫模型実験と解析，土木学会水工学論文集，第 48 巻（１），pp.571-576.

Ishigaki, T., Toda, K. and Inoue, K.(2003): Hydraulic model tests of inundation in urban area with underground space, Proc. of 30th IAHR Congress, B, pp.487-493.

Hydraulic Model Tests of Urban Flood considering Underground Space by using Large City Model of Kyoto

Taisuke ISHIGAKI, Hajime NAKAGAWA, Yasuyuki BABA
and Division of Technical Affairs of DPRI

Synopsis

Urban flood induces new types of disasters, one of which is an inundation into an underground space. Hydraulic model tests on the inundation into underground space have been conducted. The objectives of the model tests are to get precise data for the improvement of numerical models, and to investigate the behaviour of local flow. The Kyoto city model is a ground-surface model of 1/100 scale to simulate surface flow and discharge into underground spaces. Results of a predictable case are shown in this paper. The results show that about 50 percent amount of total volume of flood flow into underground spaces and that high speed flow over 2 m/s runs through a wide street. These results indicate that the flood hazard in urban area including underground space should be much taken care of.

Keywords: urban flood disaster, inundation, underground space, hydraulic model test