

小規模地下空間の浸水実験

HYDRAULIC MODEL TEST OF INUNDATION WATER INTRUSION INTO SMALL SCALE UNDERGROUND SPACE

山本大介¹・戸田圭一²・米山望³・間島真嗣⁴

Daisuke YAMAMOTO, Keiichi TODA, Nozomu YONEYAMA and Shinji AIHATA

¹ 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)

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 正会員 工(博) 京都大学助教授 防災研究所 (〒 611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

⁴ 正会員 工修 国土交通省信濃川下流河川事務所 (〒 951-8153 新潟県新潟市文京町 14-13)

A hydraulic model test is conducted by use of the undistorted hydraulic model with 1/15 scale. The studied underground space is a basement of a standard small-scale building comprising two stairs, hallway and five rooms. Inundation process there is studied in detail and evacuation possibility is examined based on the depth of inundation flow and refuge limit at door and stairs. 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. 緒論

わが国の都市ではとくにその中心部に人や資産が集中し、建物の高層化や地下利用が進んできた。この結果、都市には地下街や地下鉄といった大規模な地下空間や、中小ビルの地下階や個人宅の地下室といった小規模な地下空間が存在している。このような地下空間は都市の限られた土地の有効利用に役立っている。一方、水害時に地下は危険な空間となるが、比較的大規模な地下空間の浸水過程については研究が進められてきており¹⁾²⁾、最近は対策にも配慮がなされつつある。それに比べ小規模地下空間の浸水時の対策は十分であるとは言い難い。そのことを証明するかのように、小規模地下空間の水害に対する脆弱性を露呈する災害が発生している。その被災事例を以下に示す。

1999年6月29日、福岡市では観測史上最大の時間降雨量77mmを含む豪雨に見舞われた。これにより市内を流れる御笠川およびこれに合流する山王放水路が溢水した。この氾濫水は地盤高の低いJR博多駅方面に向かって流れ、駅およびその周辺の地下街、ビル地階、地下鉄空間に流入し、各施設は浸水被害を受けた。そして駅から約400m離れたビル地階にある飲食店の従業員が氾

濫水の流入により浸水する店から逃げ遅れて水死するという事故が発生した。³⁾

2005年9月4日の首都圏各地での局所的豪雨では、都内7観測所で1時間100mm以上の降雨を記録した。都内全域で5千棟にもおよぶ浸水被害が発生し、特に半地下の車庫や地下室への浸水が目立った。⁴⁾

上記の被災事例で挙げたビルの地下階や住宅の地下室などの小規模な地下空間は大規模な地下空間と比較して床面積や容積が小さく、浸水深の急激な増加が予想される。そのため人命を失うような状況が発生する可能性が高く、浸水時の氾濫水の挙動を正確に把握することは防災上の急務といえる。本研究では水理模型実験により小規模地下空間の浸水過程を明らかにし、そこからの避難可能性について考察する。さらに得られた実験結果を用いて既存の地下浸水の数値解析手法の適用性の検討を行う。

2. 浸水実験

(1) 水理実験模型

本研究で使用した実験模型は、京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリーに設置された地下室模型である。対象とした地下室は1辺がおよそ15m四方の大き

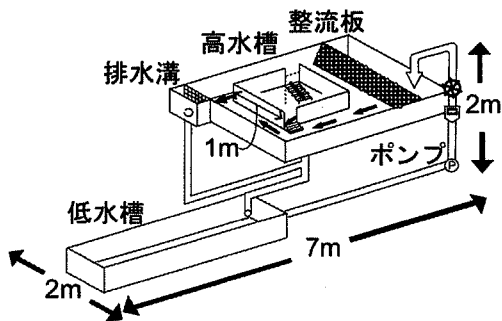


図-1 実験装置の概要

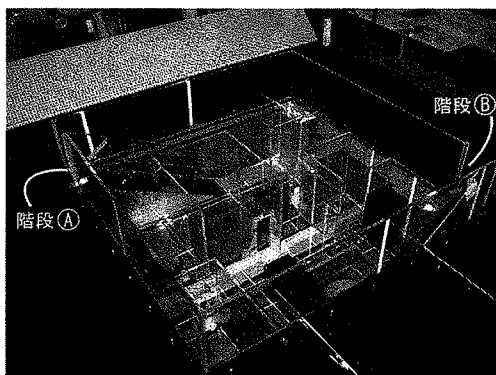


写真-1 地下室模型写真

さの都市域で見られる標準的な小規模なビルの地下階である。縮尺は1/15でフルード相似則を適用すると、水量の模型値と実物値との比の値は、長さ：1/15、流速：1/3.87、時間：1/3.87、流量：1/871となる。図-1にこの実験装置の概要図を、写真-1に地下室模型の写真を示す。低水槽や高水槽などを含めた装置全体の面積は7m×2mで、そのうち地下室に相当する部分は1m×1m、天井の高さは0.30mである。模型はアクリル製で、2箇所の階段部、廊下、部屋（ドアの開閉が可能）があり、廊下には仕切り壁（高さ0.10m）、障害物（地下室の状況に変化をもたせるため）の設置も可能になっている。流況を観察しやすいように階段、障害物以外は無色透明とした。地下室模型では上方からのビデオ撮影や水深の測定のために、天井は設けていない。

次に実験装置の水の循環経路について述べる。水は図-1の低水槽からポンプによって高水槽に運ばれる。高水槽の下流側の排水溝には地上水深調整堰があり、それにより、高水槽の水深を一定に保つことができる。また写真-1に示すように地下室模型への階段流入口は2つあり、それらを開放することにより地下室模型内に水を流入させる。高水槽の底面が地上に相当し、高水槽の水深が地上水深である。また流入口の手前に高さ1.8cmの段差を設定しており、高水槽の水深から段差の高さを差し引いた分が越流水深に相当する。

(2) 実験方法

本実験の前に地上水深調整堰の調節とポンプの流量の調節を行った。ポンプの流量はパソコンで制御した。実

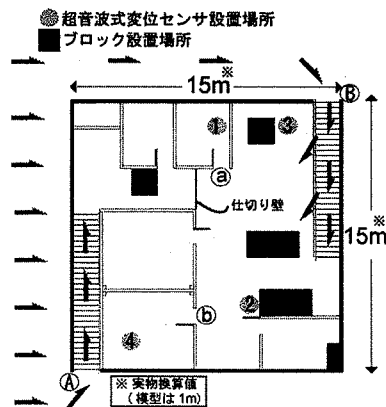


図-2 対象地下室平面図

表-1 実験ケース

	地上水深(m)(実物換算値)	越流水深(m)(実物換算値)	流入口	ドア	仕切り壁
ケース1	0.77	0.50	A開放	全て開放	なし
ケース2	0.77	0.50	A開放	全て開放	あり
ケース3	0.77	0.50	B開放	全て開放	なし
ケース4	0.77	0.50	両方開放	全て開放	なし
ケース5	0.47	0.20	両方開放	a,b開放	なし
ケース6	0.77	0.50	B開放	a,b開放	なし

験では地下室への流入口を閉じた状態で所定の水深になるまで高水槽に水を貯留し、実験ケースに応じて地下室への流入口を開放して水を流入させた。流入開始とともに図-2に示す合計4地点で水深の測定を開始した。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。さらに模型上方にビデオカメラを設置し、浸水の先端の拡がりも撮影した。

(3) 実験ケース

本実験では流入口や地上水深、地下室内の状況（ドアの開閉、仕切り壁の有無）などを種々変化させて実験を行った。ここでは表-1に示すケース1からケース4の実験結果（流況、水深の時間変化）を紹介する。なおこれ以降、数値はすべて実物に換算した値を用いて表現することとする。ここで表-1の地上水深0.77m(越流水深0.50m)は階段を上がって地上に避難することができないような流量の氾濫水が流下してくるときの地上水深を、地上水深0.47m(越流水深0.20m)は階段を上がって地上への避難が可能などときの地上水深を想定している。

a) ケース1

ケース1は地下室内のすべてのドアを開いた状態にし、地上水深0.77m、越流水深0.50mに設定し、地上部の流入口Aを開放し水を流入させた。

b) ケース2

ケース2は図-2の廊下に高さ1.5mの仕切り壁を設置した。その他の条件はケース1と同様である。仕切り壁の上流側（地下室の左半分）の水深が仕切り壁と同じ高さになるまでは下流側（地下室の右半分）には水が流れ込まない。



図-3 流況

c) ケース 3

ケース 3 では地上部の流入口 B を開放し水を流入させた。その他の条件はケース 1 と同様である。階段 B の側面には壁がないので階段の側面から水が一部横に流出する。

d) ケース 4

ケース 4 では地上部の流入口を両方開放し水を流入させた。ケース 3 と同様に階段 B の側面には壁がないので側面から水が一部横に流出する。

(4) 浸水実験の結果

浸水実験の結果 (流況, 水深の時間変化) をそれぞれ

図-3, 図-4 に示す。

a) ケース 1

ケース 1 では流入開始から 20 秒後には, ②, ③, ④の領域に水が拡がり, 40 秒後には⑥の領域にも水が拡がる。70 秒後には地下室全域に水が拡がる。次に水深の時間変化については, 流入開始から 150 秒後までは各地点間の水深に差が見られた。とくに流入開始から 70 秒後では地点 1 と地点 4 の間に 0.35m の水深の差が見られた。流入開始から 160 秒後には地下室内のすべての地点で水深が 0.70m を越えた。なお 0.70m は後述する成人男性の歩行による避難限界である。

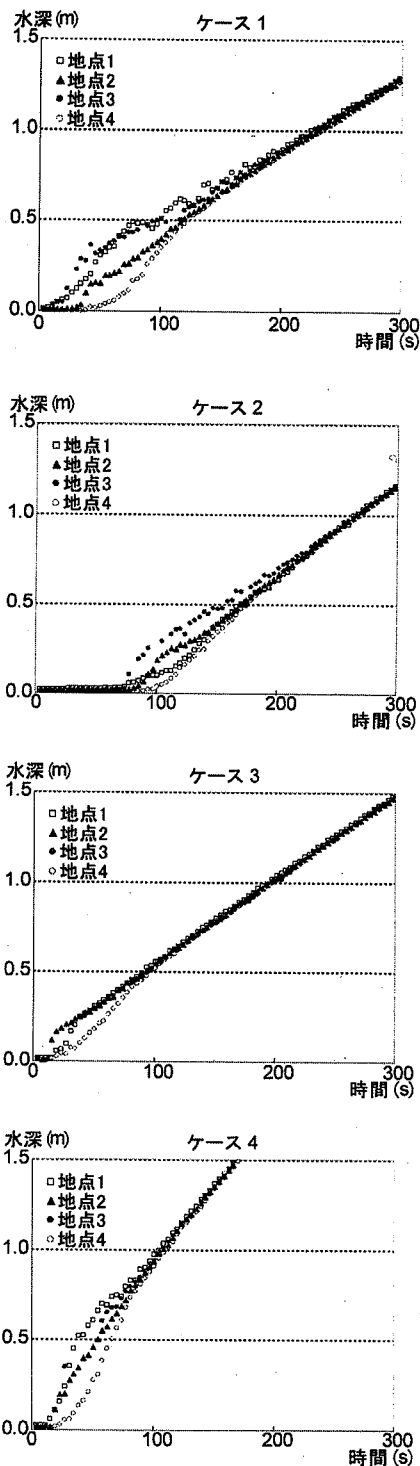


図-4 水深の時間変化

b) ケース 2

ケース 2 では流入開始から 10 秒後には浸水の先端が仕切り壁に達し、60 秒後には、仕切り壁の上流側の水深が仕切り壁の高さと等しくなり、下流側に水が流入し始める。流入開始から 80 秒後には③、④の領域に水が広がる、100 秒後には⑥の領域にも水が広がる。110 秒後には地下室全域に水が広がる。次に水深の時間変化については、流入開始から 180 秒までは各地点間の水深に差が見られた。流入開始から 110 秒後には地点 3 と地点 4 の間に 0.25m の水深の差が見られた。流入開始から 210 秒後

には下流側のすべての地点で水深が 0.70m を越えた。

c) ケース 3

ケース 3 では流入開始から 10 秒後には③、④の領域に水が広がり、20 秒後には①、②、⑥の領域にも水が広がる。30 秒後には⑧の領域以外の全域に水が広がる、40 秒後には地下室全域に水が広がる。次に水深の時間変化については、流入開始からすべての地点の水深がほぼ等しく、その後水深が一様に上昇していく。流入開始から 130 秒後には地下室内のすべての地点で水深が 0.70m を越えた。

d) ケース 4

ケース 4 では流入開始から 10 秒後には①、④の領域に水が広がり、20 秒後には②、③、⑥の領域にも水が広がる。流入開始から 30 秒後には⑧の領域以外の全域に水が広がる、40 秒後には地下室全域に水が広がる。次に水深の時間変化については、流入開始から 80 秒後までは各地点間の水深に差が見られた。流入開始から 40 秒後には地点 1 と地点 4 の間に 0.35m の水深の差がみられた。そして流入開始から 80 秒後には地下室内のすべての地点で水深が 0.70m を越えた。

(5) 浸水実験の考察

流況に関しては、地上水深が同じで流入口が 1 箇所の場合でも、ケース 1 では地下室全域に水が広がるのに 70 秒、ケース 3 では 40 秒と、かなりの時間差が見られた。ケース 3 では階段 B の側面から水が流出する分、階段から流下した水が⑥の領域に広がると同時に、④の領域にも広がるため地下室全域に水が広がる時間が短かったものと思われる。またケース 3 とケース 4 では流入流量はケース 4 の方が多いが、地下室全域に水が広がるのに要した時間は 40 秒で同じであった。この地下室では流入口 B から浸水すると水の広がりが速いことが分かり、氾濫水の流入口が異なると、小規模な地下空間とはいえ、初期の浸水過程に大きな影響を与えることがわかった。

次に水深の時間変化に関しては、紹介した 4 ケースの中でケース 1 はすべての地点の水深が等しくなるまでに、測定地点間の水深の差がとくに大きいことがわかる。それは階段 A から勢いよく地下室内に流入してきた水がブロックや階段に流れを阻害され④の領域にたまることにより地点 1、3 の水深が速く上昇したと思われる。逆に地点 4 ではそれに加え、階段 A から廊下をコの字型に迂回するように流れてくるため水深の上昇が遅かったものと思われる。この地下室のような小規模な地下空間では障害物、部屋、廊下などの配置が浸水過程にかなり影響を与えると思われる。

3. 地下室の浸水時の避難可能性

ここでは表-1 に示すケース 5、6 について浸水時の避

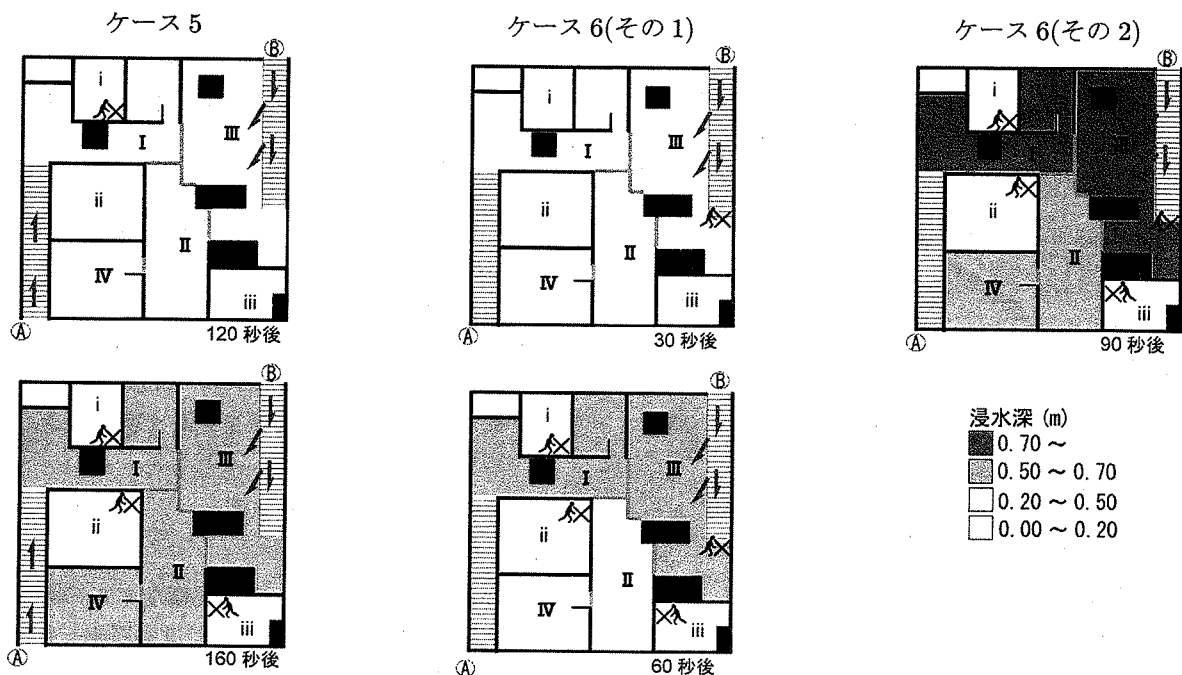


図-5 地下室からの避難可能性

避難可能性の検討を行う。図-5 に地下室からの避難可能性を示す。地下室を4つの領域に分割し、実験で水深を計測した4つの地点(図-2 参照)の水深がそれぞれの領域の水深を表すと考え、ここで平面部の避難限界を①水深が0.20m以上で子供、②0.50m以上で成人女性、③0.70m以上で成人男性が歩行困難になるとした。⁵⁾ また階段部の避難限界は流入口の越流水深0.30mを避難限界とし、部屋の中からドアを開けることのできる限界のドア前面の水深を0.40mに設定した。⁶⁾ 避難が不可能になった階段や水圧で開けることのできないドアには印(X)をつけている。

ケース5においては両方の流入口の越流水深が0.20mであるから階段の下まで到達することができれば、地上へ避難することが可能である。流入開始から50秒後には領域I、60秒後には領域II、IIIで水深が0.20mを越え、流入開始から1分で子供がこの地下室から避難することが不可能になる。120秒後には領域Iの水深が0.40mを越え、iの部屋からの避難が不可能になる。130秒後には領域IIの水深も0.40mを越え、ii、iiiの部屋からの避難も不可能になる(この時点で部屋の外にいる成人はまだ避難が可能である)。そして160秒後にはすべての領域で水深が0.50mを越え成人女性がこの地下室から避難することが不可能になり、230秒後にはすべての地点の水深が0.70mを越え、約4分でこの地下室からの避難が完全に不可能になる。

ケース6においては、まず階段Bは流入開始時から越流水深が0.30mを越えているので、階段Bを利用して地上に避難することは不可能である。流入開始から30秒後には領域I、II、IIIで水深が0.20mを越え、子供が

この地下室から避難することが不可能になる。60秒後には領域Iの水深が0.50m、領域IIの水深が0.40mを越え、i、ii、iiiの部屋からの避難が不可能になり、さらに成人女性がこの地下室から避難することが不可能になる。90秒後には領域I、IIIの水深が0.70mを越え、この地下室からの避難が完全に不可能になる。

4. 地下浸水解析モデルの適用性の検討

ここではケース1の実験結果をもとに貯留槽モデル(ポンドモデル)¹⁾の適用性について考察を行う。このモデルは①地下室を複数の領域に分割し、各領域を固有の容積をもった貯留槽と見立てる。②地下室を貯留槽が2次元的に連結した空間として考える。③貯留槽間の流量の算定には、移流項を省略した非定常流式を適用する、という方法である。図-6に解析結果と実験での地点2と地点4の水深の時間変化を比較した結果を、図-7に流入開始から20秒後の浸水域の広がりを示す。なお貯留槽に与える階段からの流量は実験結果から逆算した。地点2では計算結果は実験結果を良好に再現しているが、地点4では120秒後までは計算結果のほうが実験で計測した水深よりも高く、最大で0.20m程度の差が見られる。浸水先端の広がりについては、実験結果よりも少し速い傾向にある。

5. 結論

本研究により得られた結果を以下にまとめる。

- 都市中心部の標準的なビル地下階の縮尺1/15の地下室模型を用いて浸水実験を行った。地上水深

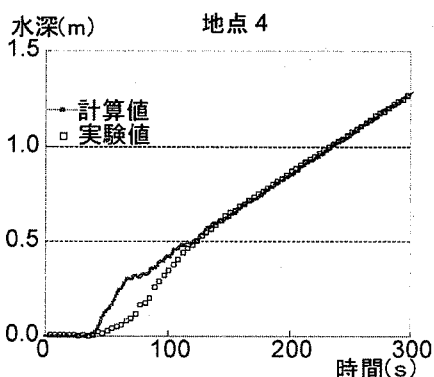
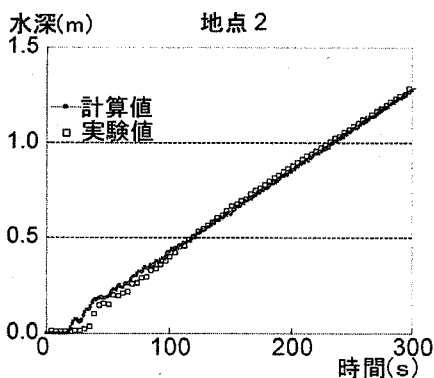


図-6 水深の時間変化の比較

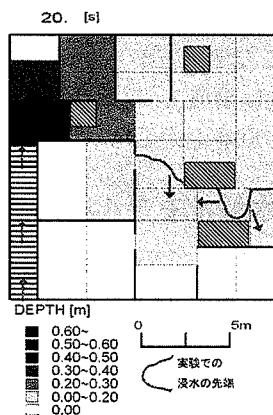


図-7 浸水域の比較

0.77m(越流水深0.50m)一定のもとでは地下室に浸水がはじまってから2~3分ですべての場所で水深が0.70mに達し、小規模地下空間では浸水時に急激に水深が上昇することが確認された。

- 浸水実験の結果(とくにケース1, 2, 4)から地下室

のような小規模地下空間といえども、地下室内のすべての地点の水深が等しくなり、水深の時間変化率が一定になるまでは地点間でかなりの水深の差が見られることが分かった。

- 地下室からの避難を考える際には、ドアや階段の避難限界が地下空間からの避難可能性に大きく影響を与えることがわかった。また水深の上昇も速いため避難が非常に困難であることが再確認された。
- 貯留槽モデルは水深の時間変化を概ね適切に再現できることがわかった。しかし浸水が地下室全域に広がるまでの初期過程を正しく表現できない点に留意する必要がある。

今後の課題として以下のようなことが挙げられる。

- 今回は地下1階のみの小規模なビルの地下階の浸水過程を扱ったが、都市部では多層化した小規模地下空間も多く存在する。そのような場所での浸水過程についても解析を進める。
- 浸水時の氾濫水の流速や人間の動きなどを考慮した避難行動のシミュレーション解析を進める。

最後に、実験で熱心にご指導頂きました、京大防災研究所馬場康之先生に心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 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，pp.877-882，2003。
- 2) 関根正人・河上展久：地下街を抱える高度に都市化された地域の内水氾濫に関する数値解析，土木学会論文集 No.789/II-71，pp.47-58，2005。
- 3) 井上和也・戸田圭一・市川温・多田彰秀：1999年福岡市における都市型水害について，京大防災年報第43号B-2，pp.307-323，2000。
- 4) 野村孝雄：集中豪雨による東京都内における水害について(速報)，土木学会誌，Vol.90，No.11，2005。
- 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。
- 6) 石垣泰輔・戸田圭一・馬場康之・井上和也・中川一・吉田義則・多河英雄：実物大階段およびドア模型を用いた地下空間からの避難に関する水理実験，京大防災年報第48号B，pp.639-646，2005。

(2006. 4. 6受付)