

小規模地下空間の浸水時の危険性について INUNDATION HAZARD ANALYSIS IN SMALL UNDERGROUND SPACE

戸田 圭一¹・山本 大介²・米山 望³・間島 真嗣⁴
Keiichi TODA・Daisuke YAMAMOTO・Nozomu YONEYAMA・Shinji AIHATA

A storage pond model is developed for inundation analysis in underground space. The continuity equation, momentum equation without advection, and drop formula are used in the model. The model is applied to 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 evacuation limit at door and stairs. The computation results shows good agreement with the hydraulic model test results. 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. Flash-board is found to be very effective for safe evacuation as it retards inundation water intrusion into underground space.

Key Words : small scale underground space, urban flood, inundation analysis, evacuation

1. はじめに

わが国では都市に人口や資産が集中し、地上には多くの建造物が林立し、地表面で利用可能な土地は限られている。この結果、都市で地下空間は、地下街や地下鉄などの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として有効に利用されるようになった。一方、地下空間は地上より地盤が低い、地上の氾濫水が流入しやすく危険な空間となる。大規模な地下空間の浸水時の危険性については比較的、研究が進められており¹⁾²⁾、最近で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が十分であるとは言い難い。実際に、近年の水害で小規模地下空間が関係する事例が発生している。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し、避難可能性を検証しておくことは防災上の急務と

キーワード：小規模地下空間，都市型水害，浸水解析，避難

¹ 正会員 京都大学防災研究所 教授

² 学生員 京都大学大学院工学研究科 都市社会工学専攻

³ 正会員 京都大学防災研究所 助教授

⁴ 正会員 国土交通省信濃川下流河川事務所

いえる。本研究では水理模型実験により浸水過程を明らかにし、得られた実験結果を用いて地下浸水の数値解析手法の適用性の検討を行う。さらにその解析結果をもとに地下浸水時の避難可能性について考察する。

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、水理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。模型はアクリル製で、2箇所の階段部（幅0.10m）、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。

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は高さ1.8cmの段差を設置しており、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

実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地点で超音波式変位センサを用いて水深の測定を開始した。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、地下室の状況（ドアの開閉、仕切り壁の有無）など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とケース2の実験結果を紹介する。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。なお、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が流下してくる時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

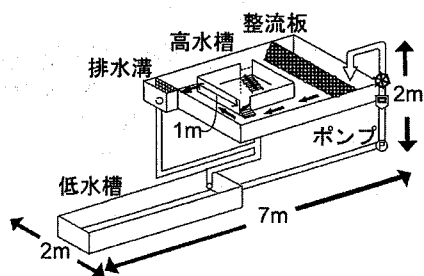


図-1 実験装置の概要

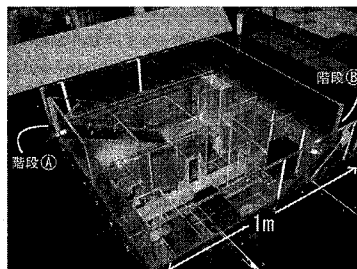


写真-1 地下室模型写真

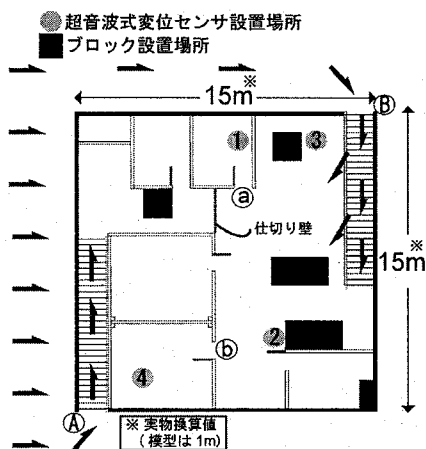


図-2 対象地下室平面図

表-1 実験・解析ケース表

	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	図-7 参照 (後述)				
			B開放	a,b開放	なし

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。

(4) 浸水実験の結果

浸水実験の結果（水深の時間変化，流況）を図-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。60秒後にはほぼ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。

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を越えて，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の領域と⑥の領域の一部まで水が拡がり，100秒後にはほぼ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

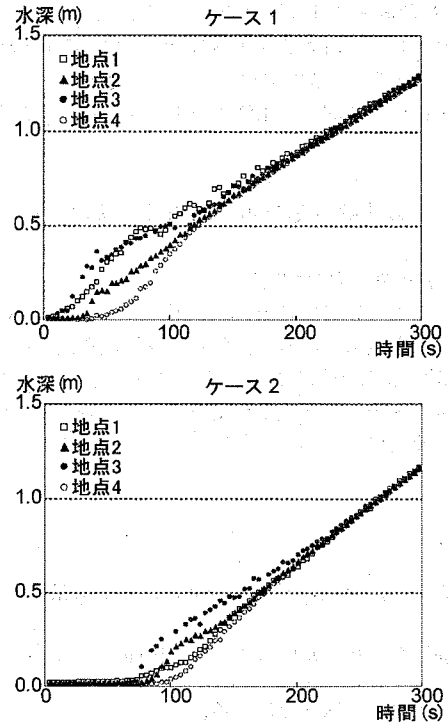


図-3 水深の時間変化

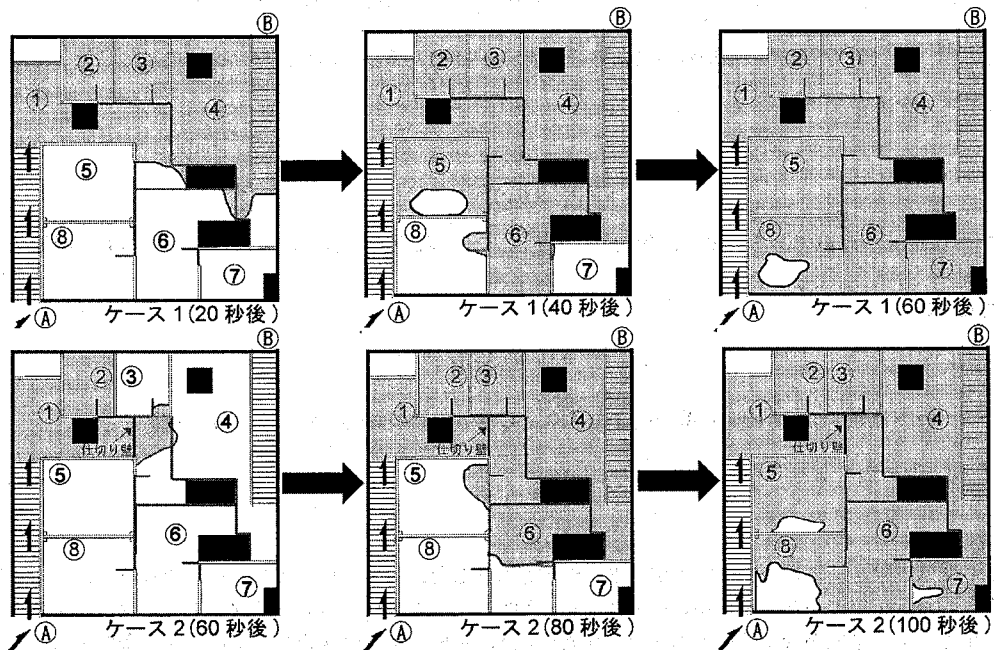


図-4 流況

180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110秒後には地点3と地点4の間に0.25m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。

以上2ケースの実験結果から、地下室に浸水がはじまって数分ですべての場所で水深が0.70mに達し、小規模地下空間での水深の急上昇が再確認された。

3. 数値解析モデルの適用性の検討

(1) 基礎式及び解析手法

ここでは実験結果を基に貯留槽モデル（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。そうすると地下室を貯留槽が2次的に連結した空間として考えることができる。地下室内の浸水の拡がりは、その貯留槽間を流れる流量を求めることで表現できる。まず貯留槽間の連続式は、以下のように表す。

<連続式>

$$A \frac{dh}{dt} = \sum_{i=1}^m Q_i + Q_{in} \quad (1)$$

ここに、 A ：貯留槽の底面積、 h ：水深、 t ：時間、 Q_i ：貯留槽が有する i 番目の接面から流入する流量、

m ：流量の出入りが行われる接面数、 Q_{in} ：地上あるいは上層階からの流入流量である。次に、貯留槽間の運動量式は次式を用いる。

<運動量式>

$$\frac{L}{gBh_b} \frac{dQ}{dt} = \Delta H - \alpha L Q |Q| \quad (2)$$

ここに、 ΔH ：水位差、 Q ：流量、 g ：重力加速度、 t ：時間、 L ：隣接した貯留槽の図心間の距離、 B ：

接面の幅、 h_b ：隣接貯留槽の平均水深である。また、 α は損失係数であり、マンニングの粗度係数 n を用いて、次式のように表す。

$$\alpha = \frac{n^2 s^{4/3}}{(Bh_b)^{10/3}} \quad (3)$$

ここに s は接面の潤辺である。また、仕切り壁を越えて水が流れる場合の流量は次に示す本間の越流公式を用いる。

<越流公式>

$$Q = \mu h_{up} B \sqrt{2gh_{up}} \quad (4)$$

ここに、 Q ：流量、 h_{up} ：仕切り壁の高さを基準とした上流側の貯留槽の水位、 μ ：流量係数で、 $\mu = 0.350$ 、

B ：仕切り壁の幅である。

(2) 計算条件

ここでは実験ケース1、2についてポンドモデルを適用した。対象領域は実験を行った地下室模型を実物大に換算した地下室である。地下室の階段Bの下は空間となっており、階段の下部、上部に水が溜まるので計算をする際には階段がないものと考えた。また階段Aは対象領域には含めていない。流入条件として階段下部に一定流量 $0.80\text{m}^3/\text{s}$ を与えた。与えた流量は実験結果から逆算した。地下室における粗度係数は $n=0.020$ と

し、計算ステップは $\Delta t=0.001s$ とした。

(3) 計算結果

図-5に水深の時間変化を比較した結果を、図-6に初期の浸水域を比較した結果を示す。

a) ケース1

地点2では計算結果は実験結果を良好に再現している。ただし、流入口から最遠方の地点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。浸水先端の拡がりについては、実験結果よりも少し速い傾向にある。

b) ケース2

地点2では計算結果は実験結果を良好に再現している。ただし、地点4では150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0.15m程度の差が見られる。浸水先端の拡がりについては、おおむね実験結果と一致しているといえる。

以上より貯留槽モデルは、浸水の初期過程の表現には課題が残るものの、水深の時間変化を概ね適切に再現でき、小規模地下空間の浸水解析に適用可能であることがわかった。

4. 地下室の浸水時の避難可能性

ここでは実験で対象とした地下室にポンドモデルを用いた浸水解析を適用し、その解析結果をもとに、表-1に示すケース3について浸水時の避難可能性の検討を行う。ケース3は越流水深が図-7に示すように変化する状態を想定している。さらにケース3について階段の流入口に高さ0.20mの止水板、高さ0.40mの止

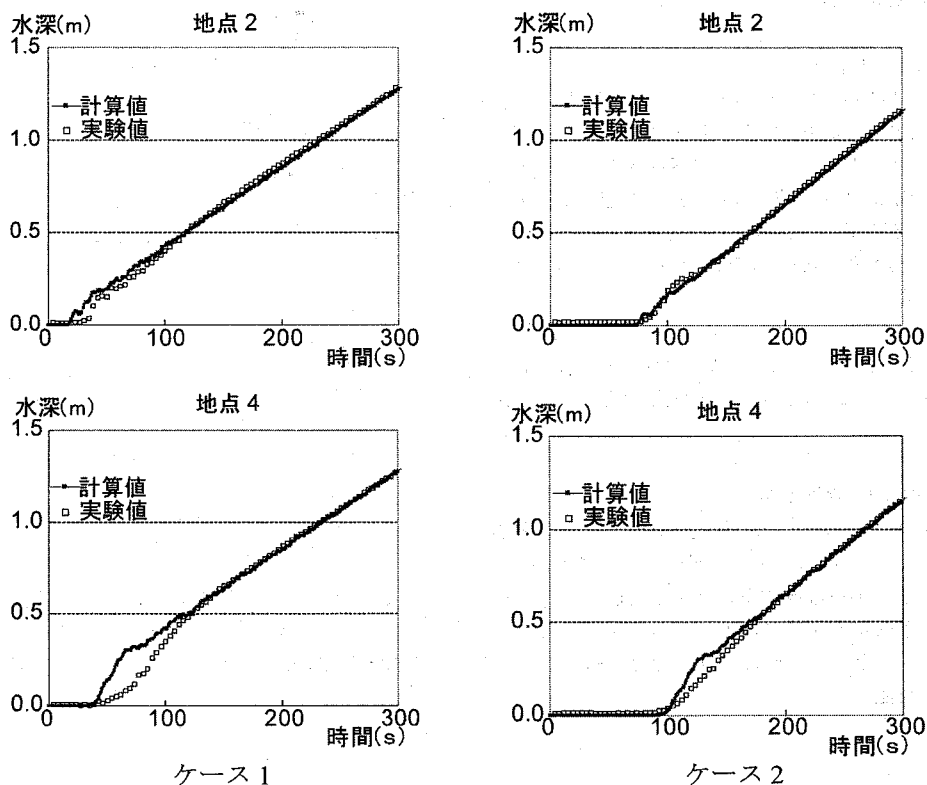


図-5 水深の時間変化の比較

水板を設置した場合の避難可能性についても検討する（以後、それぞれケース4、ケース5と呼ぶ）。

図-8 に地下室からの避難可能性を示す。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。⁹ また階段部で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。⁹ 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（×）をつけている。

(1) ケース3（止水板なし）

計算開始から60秒後には階段Bの越流水深が0.30mを越え、階段Bを利用して地上に避難することが不可能となる。90秒後には地下室全域で水深が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。120秒後には地下室全域で水深が0.40mを越え、成人は廊下部からは避難はできても、部屋の中からの避難が不可能になる。140秒後には地下室全域で水深が0.50mを越え、成人女性はこの地下室からの避難が不可能になり、170秒後には地下室全域で水深が0.70mを越え、約3分でこの地下室からの避難が完全に不可能になる。

(2) ケース4（止水板20cm）

計算開始から30秒後までは地下室に水が流れ込まない。120秒後には階段Bの越流水深が0.30mを越え、階段Bを利用して地上に避難することが不可能になる。170秒後にはすでに地下室全域で水深が0.20mを越えており、子供がこの地下室から避難することが不可能となる。210秒後には地下室全域で水深が0.40mを越え、部屋の中からの避難が不可能になる。240秒後には地下室全域で水深が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、300秒後には地下室全域で水深が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。

(3) ケース5（止水板40cm）

計算開始から90秒後までは地下室に水が流れ込まない。440秒後には地下室全域で水深が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り、12分を過ぎると地下室全域で水深が0.40mを越え、部屋の中からの避難が不可能になる。15分を過ぎると地下室全域で水深が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、20分を過ぎると地下全域で水深が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) 考察

ケース3においては計算開始から約3分で地下室からの避難が完全に不可能になる。ケース4においては水の流入を30秒遅らせることができ、地下室からの避難が完全に不可能になるのは計算開始から5分後であり

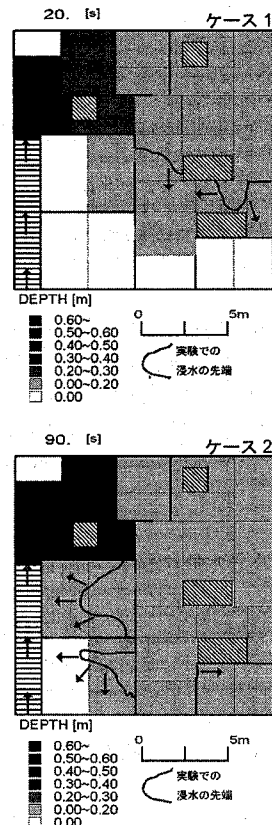


図6 浸水域の比較

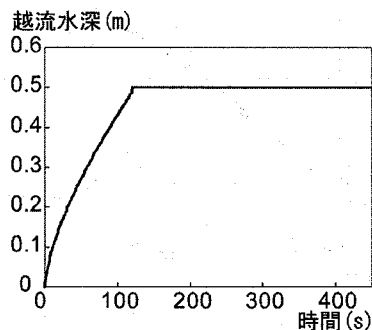


図7 越流水深の時間変化（ケース3）

ケース 3 (止水板なし)

ケース 4 (止水板 20cm)

ケース 5 (止水板 40cm)

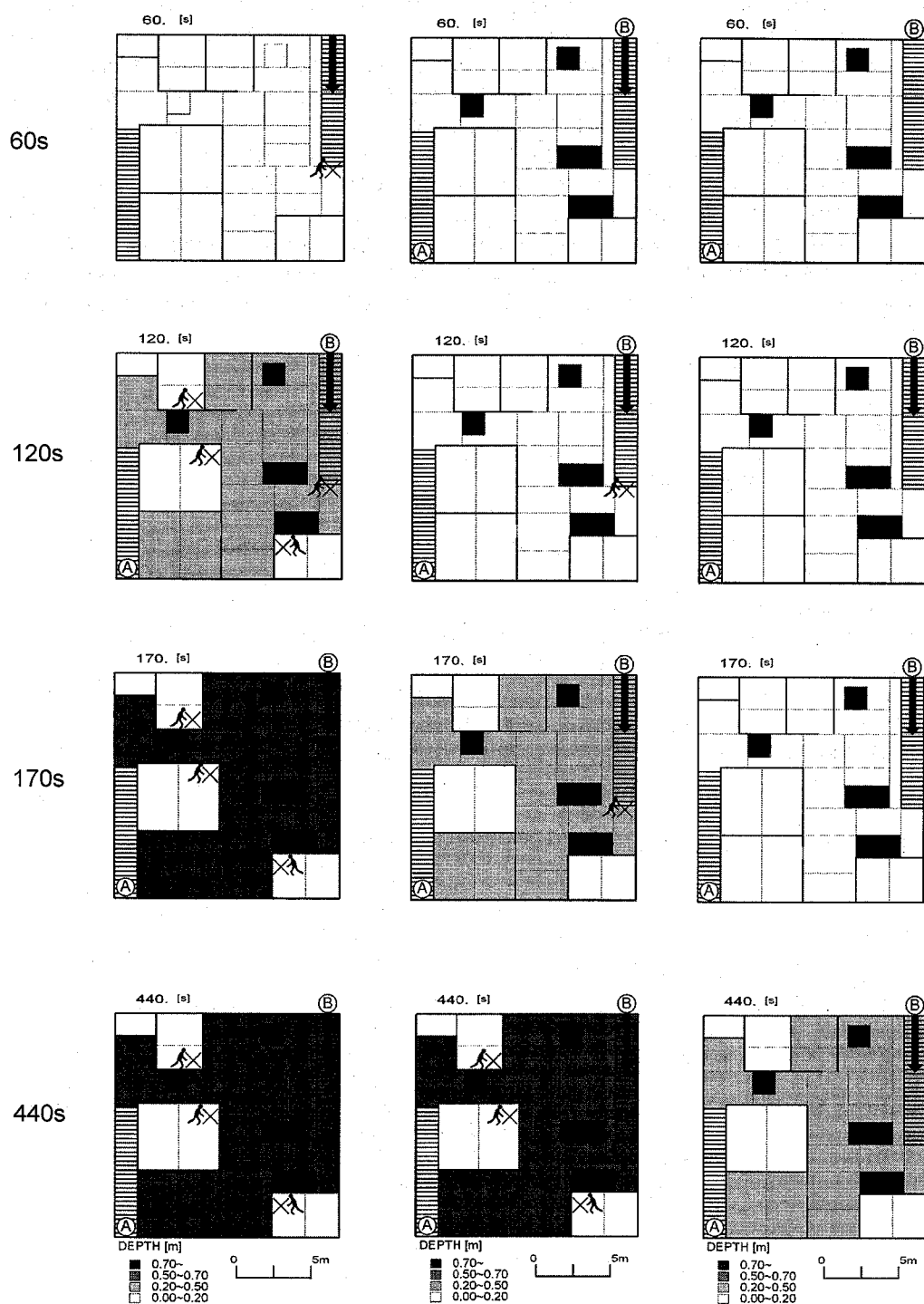


図-8 地下室からの避難可能性

2分程度の時間的余裕を生み出せることがわかった。しかし計算開始2分後には階段Bが利用できなくなり、地上への避難経路が限られてしまい、浸水開始直後に避難を開始しないと避難の厳しさは変わらない。一方、ケース5においては、水の流入を90秒遅らせることができる。地下室からの避難が完全に不可能になるのは計算開始からおよそ20分後であり17分程度の時間的余裕を生み出せることがわかった。さらに階段Bの越流水深が0.30m以上になることはないので地下室から避難する際、階段は両方とも利用可能である。

最後に、ケース3において避難が完全に不可能になる170秒後、ケース4において避難が完全に不可能になる300秒後に地下室内に流入した水の総量を各ケースにおいて比較する。170秒後にはケース3では101m³が流入している。ケース4では37 m³、ケース5では5m³が流入しており、ケース3と比較して地下室内への流入流量はそれぞれ約63%、約95%減少したことがわかる。300秒後でケース4とケース5を比較するとケース4では100m³、ケース5では17m³が流入し、ケース5はケース4と比較して流入流量は83%減少したことがわかる。

以上より止水板を設置することで、氾濫水の流入が遅れて避難がしやすくなり、とくに40cmの止水板では十分な効果があることがわかった。またドアや階段が地上へ避難できるかの支配的要因となることが確認された。

5. おわりに

本研究で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数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。
- ・貯留槽モデルは浸水の初期過程を完全には表現できないものの、水深の時間変化を概ね適切に表現でき、小規模な地下空間にも適用可能であることが明らかになった。
- ・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。
- ・止水板を設置することにより、氾濫水の地下室内への流入を遅らせ、地下空間の規模を考慮すると避難に対してかなりの時間的余裕を生み出せることがわかった。

謝辞：実験で熱心にご指導頂きました、京都大学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，No11，pp.51-52，2005.
- 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.