

6. 都市水害の実験による検証

—その2 地下空間浸水に関わる事象—

石垣 泰輔*・戸田 圭一**

6.1 はじめに

長崎水害では、地下空間に浸水して建物附属施設の被害が生じた。人的被害はなかったものの、都市型水害例として認識された初めて事象と言える。その後、地下空間の浸水は、1983年の赤坂見附駅、1999年と2003年のJR博多駅地下街、2000年の名古屋市営地下鉄で発生しており、1999年には福岡と新宿で地下室浸水による犠牲者がでている。このような被害は、わが国だけではなく、2001年のソウル地下鉄駅、2002年プラハの地下鉄駅など、国外でも発生した。このような背景から、地下空間における浸水に関する研究が行われ、浸水対策ガイドライン（日本建築防災協会、2002）が策定されている。ここでは、2001年より実施された京都大学防災研究所の大型実験設備を用いた地下空間浸水に関する研究成果と、それに続く地下浸水と避難に関する京都大学防災研究所と関西大学との共同研究成果を用い、その概要を紹介することとする。

6.2 地下空間浸水に関する実験

外水氾濫あるいは内水氾濫に関する検討は、多くの研究者により、数値モデルを用いて行われ、浸水実績との比較が行われてきた。市街地を対象とした実験はされていたものの（福岡ら、1998）、地下空間浸水を含む実験結果や災害調査は少なく、数値モデルの精度を検証する実績データが不

* 関西大学

** 京都大学防災研究所

足していた。このようなデータを取得し、モデルの検証と地下浸水現象を把握する大型模型実験が、2001年度から京都大学防災研究所で行われた。実験では、京都市内の鴨川右岸の地下鉄および地下街を含む、東西1 km、南北2 kmを対象とした縮尺1/100模型（写真6-1）、および縮尺1/30の東西650 m、南北40 mの3層構造の地下空間模型（写真6-2）が用いられた。その結果、市街地の氾濫過程、地下空間への流入量、地下街の浸水過程に関するデータ等、数値モデルが検証できるデータが得られた（石垣ら、2004、戸田ら、2004）。また、これらの実験より、地下空間に流入する流れの複雑な挙動と、その速度の大きさに関するデータが得られたことから、地下空間浸水時の避難に関する研究が始まった。

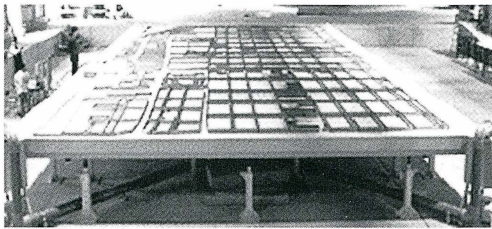


写真6-1 市街地氾濫模型（縮尺1/100）

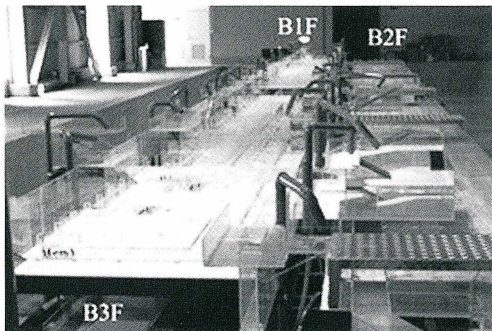


写真6-2 地下空間氾濫模型（縮尺1/30）

6.3 地下空間浸水時の避難に関する実験

地下空間浸水時の避難が困難であることは前述した実験結果より、容易に推測されたが、安全な避難を行うための指標が必要である。その指標を得るための実験は行われていたが（武富ら、

2001）、用いられた装置の規模では前述した実験の現象を再現することが難しく、現状に近い実物大の装置を用いた避難に関する実験を行った（石垣ら、2006、大西ら、2008、浅井ら、2009）。実験では、小規模地下空間であるビルの地下室からの避難を想定したドア模型と、地下通路と地上に続く階段という避難経路を想定した高低差3 mで20段の階段（写真6-3）および30 mの通路（写真6-4）模型が用いられた。

ドア模型を用いた開扉実験結果より、成人男性では40 cm、成人女性では35 cmが開扉可能限界の目安となることが知れた。その後実施した可搬式のドア模型を用いた実験（中畑ら、2010）によると、若年者を含むすべての人が開扉できる水深が10 cmであり、20 cmになるとドアを開けることができない人がいることが知れた。この結果は、地下室のドアを開けて避難可能な時間が非常に短い時間であることを意味している。



写真6-3 階段模型（幅1 m、30段）



写真6-4 通路模型（幅1 m、30 m）

地下室等のドアを開扉した後、通路と階段を経て地上に避難する必要がある。その際の指標として、写真6-3および写真6-4に示した実験より、流体力と水圧の和である単位幅比力 ($M_0 = V^2 h/g + h^2/2$) を用いた指標の適用が妥当であることが知れた。その指標は、表6-1に示すように、自力で安全に避難できる限界指標と、自力での避難が困難となる限界指標があり、性別年齢により異なる。一般の人々が理解できるように、これらの指標を水深と流速で表示すると図6-1のようになり、図に示した指標線を超えると危険な状態となることを示すことができる。この結果より、大多数の人が安全な避難ができるのは、高齢女性の指標である単位幅比力が0.08以下（図6-1の左下部）の領域になるまでに避難を完了する必要があることが分かる。なお、この指標は、地下空間浸水時のみではなく、地上での浸水時や水難事故にも適用が可能である。

本実験では、避難困難度指標が得られるとともに、浸水時の単位幅比力と歩行速度の関係も得られている（浅井ら、2009）。

表6-1 単位幅比力による避難困難度指標 (m³/m)

	安全避難限界	自力避難限界
成人男性	0.125	0.250
高齢男性	0.100	0.200
成人女性	0.100	0.200
高齢女性	0.080	0.160

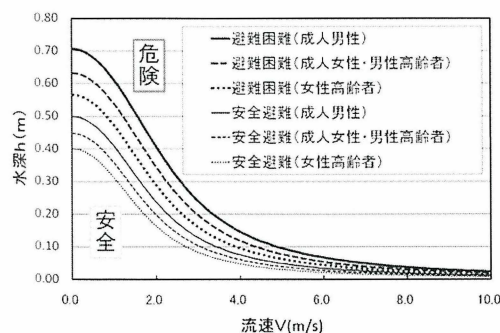


図6-1 水深と流速で表示した避難困難度指標

6.4 地下空間浸水時の浸水特性と避難

地下空間の浸水解析は、これまでに行われており（例えば、戸田ら、2003）、水深および流速の時間変化を計算することが可能である。このように、時々刻々の水深と流速が分かれば、前述した単位幅比力を計算することが可能となり、各位置での避難困難度および歩行速度を算定することができる。例えば、個々の避難者の行動が扱えるマルチエージェントモデルでの解析に、単位幅比力による歩行速度の変化を適用すると、より高度な避難解析が可能となり、避難誘導計画立案に有益な結果を得ることが可能である（関根、2010、川中ら、2012）。

わが国の多くの都市は、低平な沖積平野上に発達しており、地下鉄・地下街・地下駐車場・地下室などの地下空間の多層化が進んでおり、地下空間への浸水が、外水氾濫、内水氾濫、高潮、津波によって引き起こされるリスクが高い。近年、記録的短時間降雨の発生頻度が高くなっており、都市の雨水排水能力を超える事態が頻発するようになってきているため、ここでは、わが国の代表的な地下街である大阪市内の地下街を対象とした解析結果（森兼ら、2012）を示し、大規模地下空間の浸水特性と避難の安全性について述べる。

都市域の内水氾濫を検討するためには、雨水排水施設を考慮する必要がある、図6-2に示す大規模地下街が含まれる処理区の雨水排水網とポンプ場を考慮し、2008年8月29日に発生した岡崎豪雨

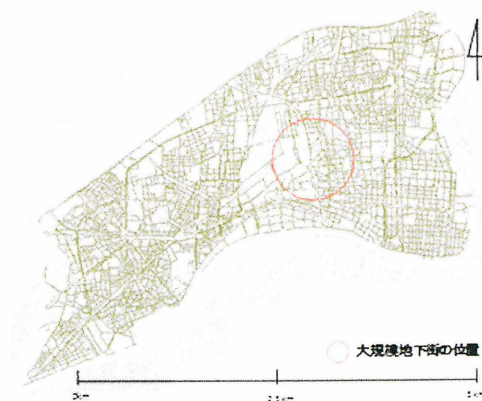


図6-2 対象排水区（管路網）と大規模地下空間

(最大1時間降水量146.5mm、総降雨量242mm)を対象に大規模地下街への流入について計算すると、図6-3に示す出入口から流入し、そのピークは降雨ピークより約1時間遅れ、エリアBでの総量は $20\text{m}^3/\text{s}$ に達する。このような流入がある場合に、安全な避難が困難になるまでの時間を計算することが可能であり、このケースでは、図6-4のようになる。図に示すように、同じ地下空間でも場所により結果がことなることを示している。

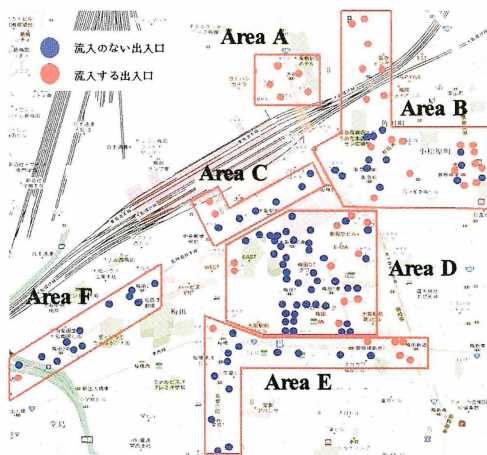


図6-3 地下空間エリア分けと流入出入口

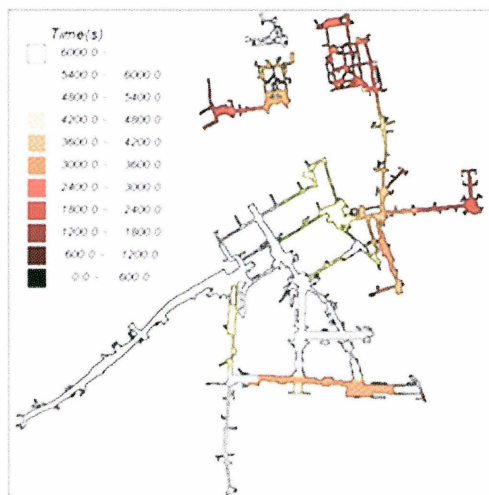


図6-4 高齢女性の安全避難が限界となる時間

6.5 おわりに

ここでは、著者らの得た結果を紹介したが、地下空間の構造と地上の条件は地区ごとに異なり、上記した検討を個々の地下空間について行い、避難計画を策定する必要がある。

以上述べたように、地下空間からの安全避難には、個々人が避難を開始する場の状況を知る必要があり、如何にしてローカルでパーソナルな情報を伝えるのが今後の課題である。

参考文献

- 財団法人日本建築防災協会：地下空間における浸水対策ガイドライン・同解説，2002.
- 福岡捷二・川島幹男・横山 洋・水口雅教：密集市街地の氾濫シミュレーションモデルの開発と洪水被害軽減対策の研究，土木学会論文集，No. 600/II-27，pp.23-35，1998.
- 石垣泰輔・中川 一・馬場康之・技術室氾濫実験グループ：地下空間を含む都市洪水氾濫に関する水理模型実験，京都大学防災研究所年報，47号B，pp.527-544，2004.
- 戸田圭一・井上和也・大八木亮・中井 勉・竹村典久：複雑な地下空間の浸水実験，土木学会水工学論文集，第48巻，pp.583-588，2004.
- 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，土木学会第56回全国大会講演概要集，II-22，2001.
- 石垣泰輔・戸田圭一・馬場康之・井上和也・中川 一：実物大模型を用いた地下空間からの避難に関する実験的検討，土木学会水工学論文集，第50巻，pp.583-588，2006.
- 大西良純・石垣泰輔・馬場康之・戸田圭一：地下空間浸水時における避難困難度指標とその適用，土木学会水工学論文集，第52巻，pp.841-846，2008.
- 浅井良純・石垣泰輔・馬場康之・戸田圭一：高齢者を含めた地下空間浸水時における避難経路の安全性に関する検討，土木学会水工学論文集，Vol. 53，pp.859-864，2009.
- 中畑佳城・石垣泰輔・島田広昭・戸田圭一：可搬式ドア模型による浸水時避難体験実験参加者の水防意識について，土木学会水工学論文集，第54巻，pp.913-918，2010.
- 関根正人：複雑な構造をもつ地下鉄駅構内の浸水過程と避難誘導に関する数値解析，土木学会水工学論文集，第54巻，pp.907-912，2010.

川中龍児・石垣泰輔：地下空間浸水時のアナウンスが安全避難成功率に及ぼす影響について，地下空間シンポジウム論文・報告集，第17巻，pp. 163-168, 2012.

森兼政行・井上知美・石垣泰輔・尾崎 平・戸田圭一：地下駅を考慮した大規模地下空間での浸水特性と浸水対応策の効果に関する検討，土木学会論文集 B1 (水工学)，Vol. 68, No. 4, I_1003-I_1008, 2012.