

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

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

* 関西大学工学部

要 旨

市街地および地下空間における洪水氾濫に関する研究を行ってきた結果、浸水時の地下空間の危険性が明らかとなった。その対策として、地下空間からの避難が最重要であるが、避難困難度に関する定量的な評価があまりなされていなかった。本報は、実物大の階段模型および地下室のドア模型を用い、浸水時の避難体験実験をするとともに、水深、流速などの水理量および避難時の脚部に作用する力の計測などを行い、地下空間からの避難に関する定量的な検討を行った。その結果、階段実験では地上水深0.3m、ドア模型ではドア前面水深0.4mが、避難困難となる水深であることが知れ、今後の防災対策に有用な知見を得た。

キーワード：都市型水害、地下空間、避難、実物大模型、水理実験

1. はじめに

1999年および2003年に福岡、2000年に名古屋で発生した水害は、複雑かつ多層な都市空間において洪水氾濫による地下空間の危険性を顕在化させた。その対策として、地下空間からの避難が最重要であるが、避難困難度に関する定量的な評価があまりなされていなかった。本報は、実際に地下街や地下鉄駅に連絡する階段と同じ仕様で実物大の階段模型を作成し、地下空間浸水時における階段からの避難を想定した実験を行うとともに、実物大ドアを用い、地下室ドアを開けて地上へ避難する場合を想定した実験も行い、地下空間からの避難困難度の定量的評価を試みた結果をまとめたものである。

本研究は、著者らが、平成13年度～15年度に実施した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)」に関する研究成果(中川ら, 2003; Ishigaki et al., 2003;

中川ら, 2004; 石垣ら, 2004; Toda et al., 2004; Ishigaki et al., 2004)より、地下空間からの避難を検討する必要性を強く認識したことから始めたものである。これらの成果に基づき、実験装置の設計・製作および実験条件を決定した。

2. 実物大階段模型による避難に関する実験

2.1 実物大階段模型

実験に用いた装置の概要をFig.1に示す。装置は、高水槽とそれに続く地上を想定した平坦部、踏み板長さ0.3m、け込み0.15mの20段からなる高低差3mの階段部、5mの踊り場(下流2mはグレーチング)および6.8mの水路から構成されている。階段部の幅は1mである。高水槽から平坦部を通り階段を流下した水は、水路および踊り場下の4箇所の排水口より低水槽に戻り、4台のポンプにて最大 $0.8\text{m}^3/\text{s}$ までの流量が高水槽に循環される。実験では、高水槽の平坦部での水深を地上水深として条件設定を行った。

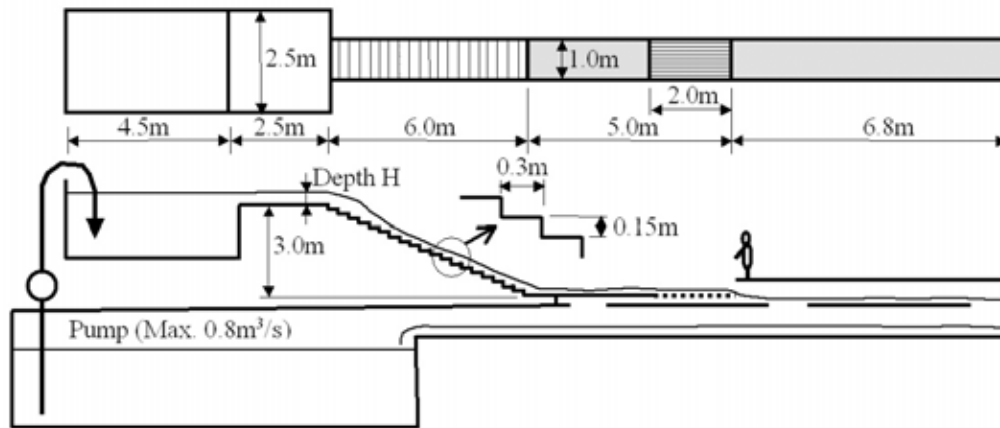


Fig.1 Real size model of staircase.

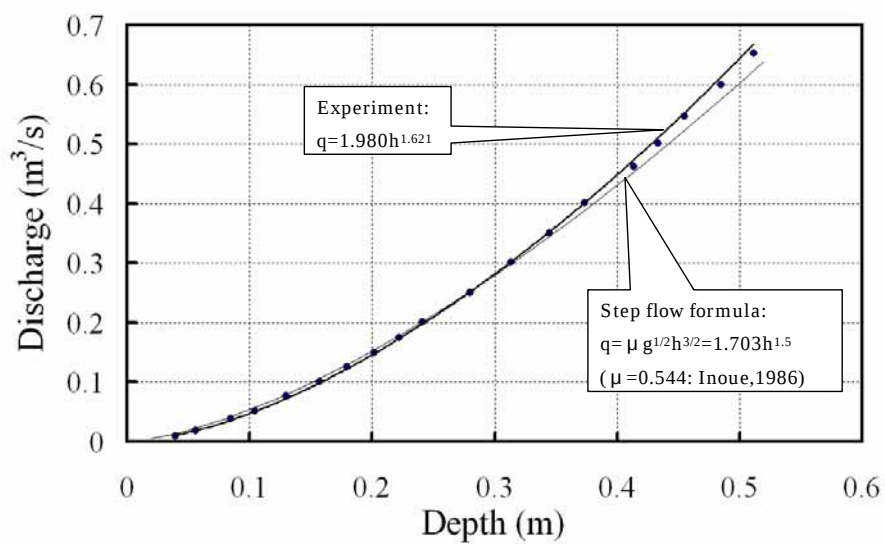


Fig.2 Depth-Discharge curve.



Photo1 Velocity measurement by flow visualization method. (left: illuminated tracers, right: staircases)

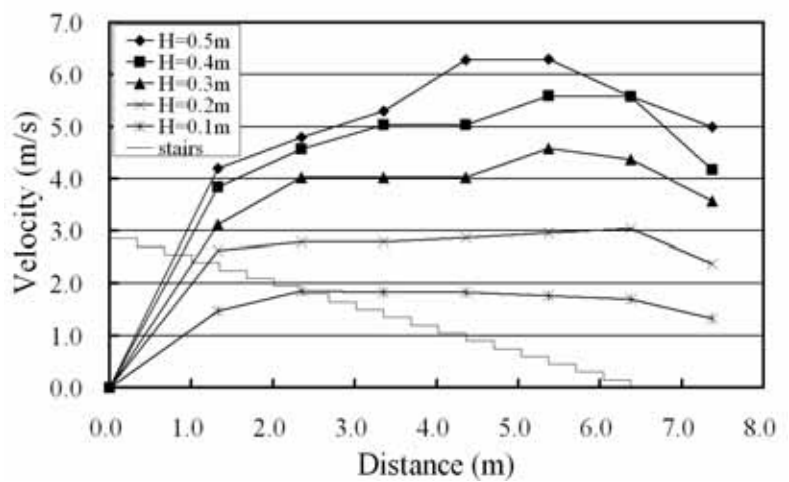


Fig.3 Velocity distributions.

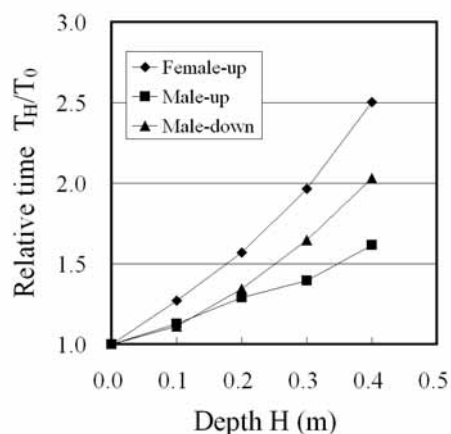


Fig.4 Evacuation time.

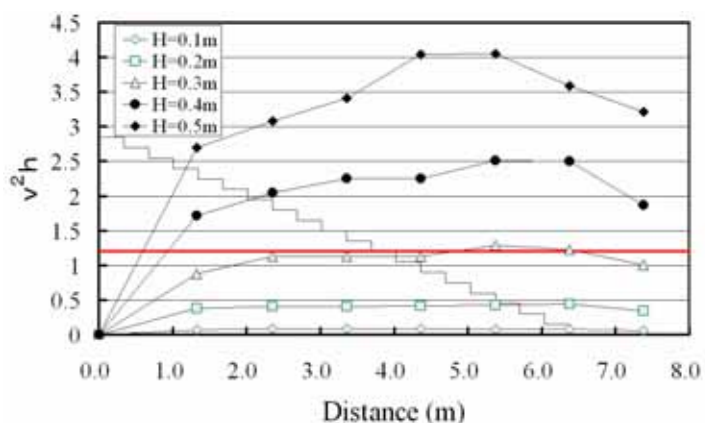


Fig.6 Distribution of momentum, v^2h .

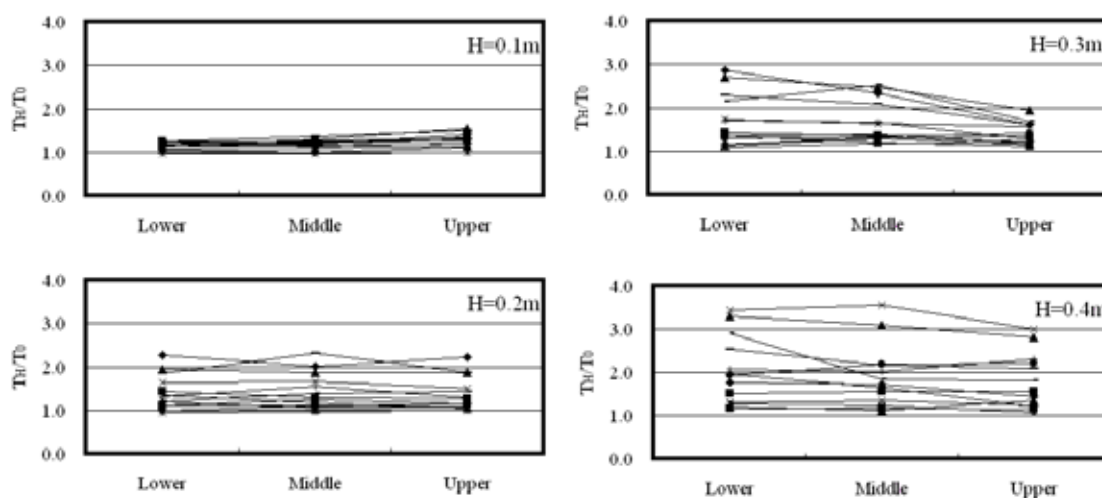


Fig.5 Evacuation time of female at the lower, middle and upper of staircase..

2.2 階段上の流れ

(1) 地上水深と流量の関係

地上水深と流量の関係を Fig.2 に示す。高水槽より地上部を想定した平坦部の流れは流速を有しているため、図に示した水深は、この速度に見合う速度水頭を考慮した補正を行ったものである。図に示すように、測定結果は、従来の数値計算に用いられている段落式にほぼ近いものとなっている。実験結果と段落式との差異は、水深が大きな範囲で若干認められるものの、その差は小さく、図に示した段落式を用いることの妥当性を示す結果となっている。図中には、実験結果より得られる近似式を併示した。

(2) 階段上の流速

高速流で気泡を多く含む流れであるため、従来の実験室で用いている計測器の使用が困難であったため、可視化法により流速を計測した。Photo 1 に示す

ように紫外ランプを照明に使用し、蛍光のテニスボールをトレーサとしてビデオ撮影を行い、あらかじめ設定した側線を通過する時間を画像解析により計測する方法で流速を算定した。Fig.3 はその結果であり、地上水深が 0.3m で流速は 4m/s 程度となり、地上水深が 0.4m 以上では、階段の中段より下流では 5m/s を超える高速流となっている。次節で検討するが、この高速流が避難者に恐怖感を与えている。

2.3 避難体験実験

Fig.1 に示した階段模型を用い、浸水時の階段を昇降する避難体験実験を 2004 年 8 月 18 日, 19 日, 31 日および 9 月 22 日の 4 回に分けて行った。協力を得た体験者は、女性 16 名, 男性 33 名の合計 49 名であり、20 代が 25 名, 30 代 7 名, 40 代 5 名, 50 代 10 名, 60 代 2 名という年代構成である。

実験では、最初に流水なしの状態での昇降時間を測定し、その後、上流端（地上と想定）での水深を

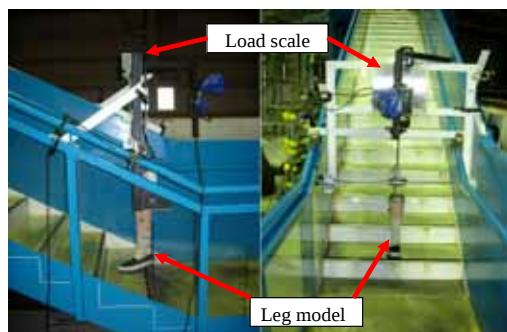


Photo 2 Measurement of force acting on a leg model.

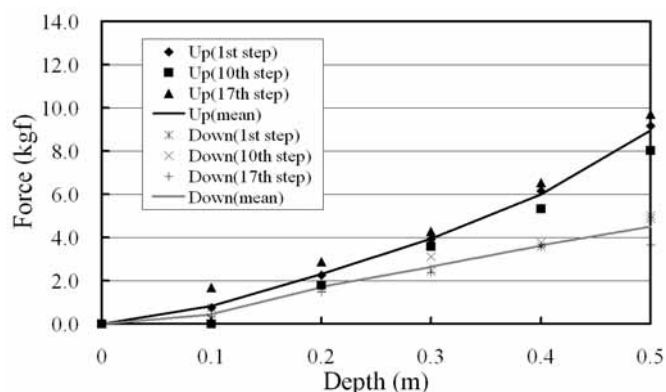


Fig.7 Acting force on a leg model at different positions of staircase.



Photo 3 Four kinds of footwear.

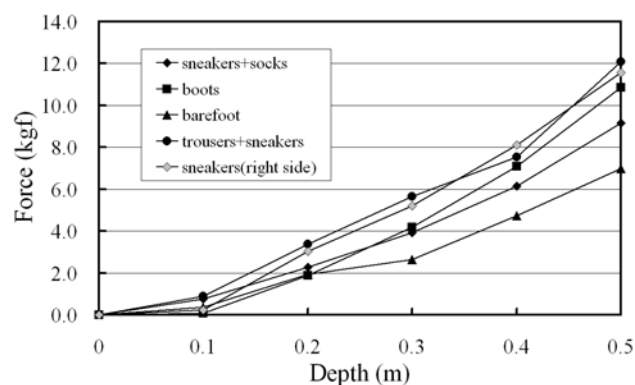


Fig.8 Acting force in the case of four footwear.

0.1m ,0.2m ,0.3m ,0.4m として昇降時間を測定した。なお、体験者の安全のため、0.3m および 0.4m のケースにおいては命綱およびヘルメットを装着し、上流側に待機した実験補助者によって体験者の昇降に合わせて命綱の長さを調節し、安全性を確保した。また、女性体験者は、安全のため昇りのみとした。また、4 台のビデオカメラを用い、実験補助者が体験者の様子を確認できるように状況をモニターしながら実験を行った。なお、録画したビデオ映像は、詳細な解析にも使用した。

Fig.4 は、体験者が、通路部分 5m と階段 20 段を昇降するのに要した時間（避難時間）の平均値を水流なしの値で無次元化し、女性と男性に分けて整理した結果である。なお、男性の 0.4m 下りについては、33 名中 17 人が手すりを使用、8 名が 0.3m 時より早い、1 名が転倒するなど、78.7% のデータがそのままは使えなかった。それらについては、個々の被験者のデータを用い、0.4m の時間を推定した値を用いた。また、女性の途中棄権者のデータについても個々人のデータから推定した値を用いた。図より、地上水深 H の増加に伴って避難時間は増加しており、水深の上昇とともに避難が困難になることが分かる。

また、女性では 0.2m 以上、男性では 0.3m 以上で避難時間の増加する勾配が大きくなっており、0.2m から 0.3m の範囲で避難困難度が変化するとと言える。また、この値を流水なしの時間で無次元化した避難時間で示すと、 $T_h/T_0 > 1.5$ となる。これらの値については、体験後に行ったアンケート調査において 7 割の体験者が、水深が 0.3m より大きくなると避難が困難になると答えていることから、その妥当性が確認された。

Fig.5 は、女性の被験者を対象とし、ビデオ映像を用いて、階段下段部（2～6 段）、中段部（8～12 段）および上段部（14～18 段）の昇降時間を計測した結果を流水なしでの昇降時間で無次元化して整理したものである。図より、1) 水深が大きくなるにつれてデータのバラツキが大きくなるとともに、下限値が大きくなる、2) 上段部より下段部での昇降時間が長くなる、などの傾向が認められる。この結果より、水深が 0.3m 以上になると、すべての被験者が流水なしの場合と同じようには避難することが困難になること、下段部付近の流れに恐怖感を覚えて避難を躊躇する傾向があること、などが指摘できる。

武富ら（2001）は、氾濫水が流入する場合の階段

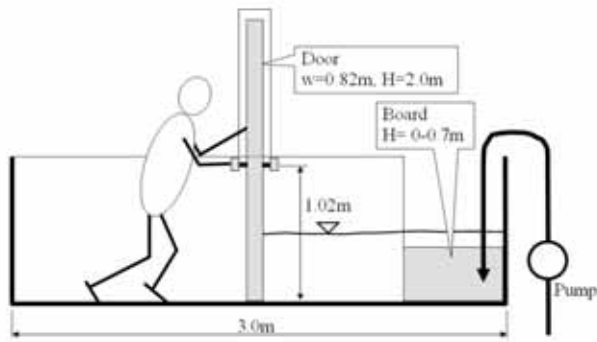


Fig. 9 Real size door model.

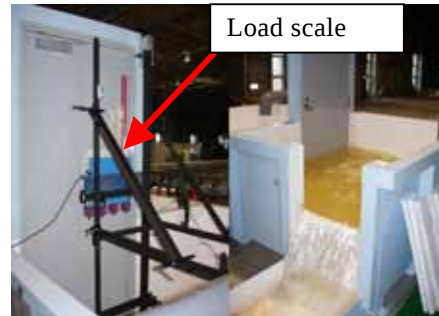


Photo 4 Measurement of force.

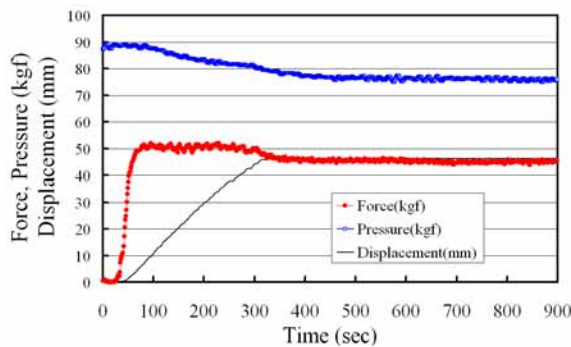


Fig. 10 Force, pressure and displacement.



Photo 5 Measurement of human power.

上の歩行者に与える危険性を示す指標に、流水の速度と水深から計算される運動量 V^2h を用い、避難困難度を示す値として $V^2h > 1.5$ を提示している。前節で示した階段上の流れに関する実験結果を用いて、武富らの指標を整理すると、Fig.6 のようになる。図より、 $V^2h > 1.5$ となるのは $H=0.4\text{m}$ 以上であるが、前述した避難時間やアンケート結果を考慮すると、 $V^2h=1.5$ より少し小さな値である水深 0.3m に相当する $V^2h=1.2$ 程度が妥当と考えられる。このように、指標の値が小さくなった理由として、武富らの実験に用いた階段の段数が、本実験の 20 段より少ない 5 段であったことが上げられる。

以上の結果より、 $T_h/T_0 > 1.5$ (女性で 0.2m 、男性で 0.3m)、 $V^2h > 1.2$ 程度を避難困難度の指標とするのが妥当ではないかと考えられる。

2.4 避難時の脚部に作用する流体力

Photo 2 に示すように、マネキンの足を、ひざ高 (50cm) に相当する高さを支点とした天秤の片側に固定し、他端をロードセルで支える方式を用いて流体力を計測した。流速の計測結果でも分かるように、段数位置によって条件が異なるため、下より 1 段目、10 段目、17 段目において、スニーカーを履かせた状態で、昇りおよび降り時に片足に作用する力を計測した。Fig.7 は、踝高さ位置に集中荷重が作用すると

仮定して算定した結果を地上水深 H で整理したものである。図より、階段位置による差は顕著ではないことが分かる。また、降り時よりも昇り時に大きな力が作用することが分かる。しかしながら、実感としては降り時の方がより危険と感じる体験者が多かった。これは、後方から力が作用した場合には、膝を曲げることによって力を吸収することが困難となるため、結果的に耐力が小さくなるためと考えられるが、詳細については今後の検討が必要である。

Photo 3 および Fig.8 は、履物・衣服の違いによる流体力の差異を見るため、素足、スニーカー、長靴、スニーカーにズボンという 4 種の条件で、1 段目の昇り時を対象に計測を行い、Fig.7 と同様に踝高さに作用する力を整理した結果である。図より、地上水深が 0.3m 以上になると、条件による差異が顕著となり、素足、スニーカー、長靴、ズボンの順により大きな力が作用することがわかる。また、同図に、階段の端 (実験では左端) をスニーカーを履いて昇る条件での計測結果を併示しており、それより、中央を昇る場合より 3 割程度大きな力が作用することが知れる。これらの結果より、履物や階段の水平位置により脚部に作用する流体力の大きさが変化することが知れた。

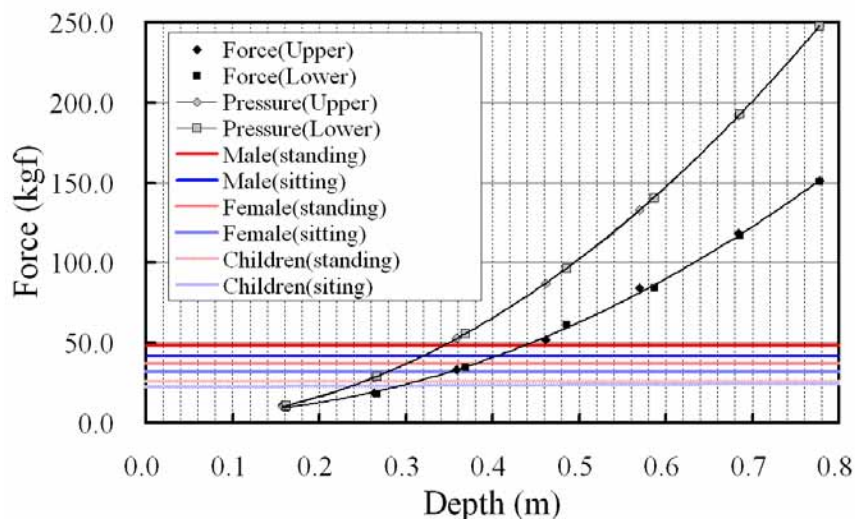


Fig.11 Necessary force to open the door.

3. 地下室ドアからの避難に関する実験

3.1 実物大ドア模型と実験方法

2 章では、氾濫水が階段を通じて地下空間に流入することを想定した場合について検討したが、都市において、水害時の危険性を考慮しておくべきもう一つの地下空間として、ビルおよび住居の地下室が上げられる。ここでは、これらの小規模な地下空間から、地下室のドアを開けて避難する場合を想定した検討結果を示す。

Fig.9 に、実験に用いた実物ドア模型の概要を示す。これは、二つの水槽の間に実物の鋼製ドアを設置し、低水槽からポンプを用いて水をくみ上げ、いずれか一方の水槽に水を溜めることによりドア前面の水深を設定できる装置である。そのドア前面水深は、水槽の一部に設置した角落しの高さを変えることにより調節が可能である。なお、角落しを越流した水は低水槽に戻るようになっている。

避難の限界を定量的に評価することを目的に、Fig.9 のドア模型を用い、種々のドア前面水深に対し、ドアを押し開けるために必要な力の計測を行った。実験では Photo 4 に示すように、ドア押し開けに必要な力の計測にロードセルを用い、ジャッキにて押し開ける場合の力を計測した。また、Photo 5 に示すように、立位および座位での成人男子による押し開け時の力を計測し、避難可能限界のドア全面水深に関する検討を行った。

Fig.10 は、ドア前面の初期水深が 46.1cm のケースにおける全水圧、ドアの変位および力の時間変化を示したものである。計測では、ジャッキを用いてほぼ一定の速度でドアを開け、ロードセルにより計測された力のピーク値を、ドア押し開けに必要な力と

した。

3.2 避難限界となるドア前面水深の検討

系統的なデータは得ていないが、見学者等に体験してもらった結果では、男性で 0.4m、女性で 0.3m がドアを押し開けることができる限界であった。また、0.3m の水深については、小学生 2 名が力を合わせても押し開けることができなかった。なお、ドアを引き開ける限界の水深は、さらに浅くなることが分かり、地下室に閉じ込められた人を救助するには、浸水のごく初期段階でない限り、不可能であることが知れた。この結果は、地下室からの避難および救助は短時間の内に行われなければならないことを示唆している。

Fig.11 は、種々の水深時における全水圧とドア押し明けに必要な力を整理したものであり、これより、ドアを開けるには全水圧の 6 割程度の力が必要ながことが知れる。また、Photo 5 に示した計測結果より、立位では体重の約 74%、座位では約 64%の力が発揮できるという目安を得たため、体重を男性 65kg、女性 50 kg、児童(10 歳)35kg とし、その目安を Fig.10 に併示した。この結果より、男性で 41~43cm、女性で 35~38cm、児童で 29~31cm 程度が避難限界の上限値であると判断される。なお、ここでは、発災時には条件が悪く、これより低い水深でも避難が困難と考えられるため上限値と考えた。

4. おわりに

ここでは、高さ 3m、幅 1m、20 段の実物大階段に水を流し、地下空間からの避難に関する体験実験および水理量と脚部に作用する流体力の計測を行った

結果と、実物大のドア模型を用いて地下室からの避難時におけるドア押し開け力の測定結果を用い、地下空間からの避難について検討を行った。得られた主な結果は、以下のとおりである。

- 1) 階段を通して流入する流量は、従来、数値計算で用いられている段落ち式で表されることが確認された。
- 2) 階段からの避難が困難になる地上水深は、0.3mであり、武富らの示した運動量をあらかず指標の $V^2h=1.5$ より少し小さな値である水深 0.3m に相当する $V^2h=1.2$ 程度が妥当と考えられる。
- 3) 階段上の流れは非常に高速となり、地上水深が 0.3m で流速は 4m/s、地上水深が 0.4m 以上では、階段の中段より下流では 5m/s を超える。
- 4) 脚部に作用する流体力は、昇り時より降り時の方が小さいが、降り時の方が危険に感じる。また、履物や階段水平位置によって脚部に作用する流体力の大きさが変わることより、避難時の状況により流水抵抗が異なることが知れた。
- 5) ドアの押し開け実験より、避難限界のドア前面水深は、男性で 0.4m、女性で 0.35m、小学 5 年生で 0.3m 程度である。

以上が得られた主な結果であるが、いずれの実験も実際の水害時に比較すると好条件下で行われているため、今後は、停電を想定したような実際に近い条件での検討を予定している。最後に、体験実験に協力頂いた方々および計測に協力頂いた方々に感謝の意を表します。

参考文献

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.

武富一秀・館健一郎・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，土木学会第 56 回全国大会講演概要集，II-122.

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.

Ishigaki, T., Nakagawa, H. and Baba, Y. (2004): Hydraulic model tests and calculation of flood in urban area with underground space, Proc. of 14th Congress of APD-IAHR, Hong Kong, Vol.2, pp.1411-1416.

Toda, K., Inoue, K., Nakai, T. and Oyagi, R. (2004): Hydraulic model test of inundation water intrusion in underground space”, Proc. of 14th Congress of APD-IAHR, Hong Kong, Vol.2, pp.1403-1409.

Experimental Study on Evacuation from Underground Space by using Real Size Models

Taisuke ISHIGAKI, Keiichi TODA, Yasuyuki BABA,
Kazuya INOUE, Hajime NAKAGAWA,
Yoshinori YOSHIDA, Hideo TAGAWA

Synopsis

Many floods caused by heavy rainfalls and typhoons hit Japan in recent years, and some floods attacked fully urbanized areas. Tokyo, Nagoya and Fukuoka were inundated by urban floods, and some parts of flood water intruded into underground spaces. During the floods, underground shopping arcades and subway stations were inundated. The inundation in underground space is one of problems to resolve urgently. One of effective measures to reduce the damage of flood disaster is quick evacuation from the underground spaces. In this paper, evacuation from underground spaces has been tested by using real scale models of staircases and doors. From the results, it found that water depth of 0.3m on the ground is a critical depth for evacuation from underground space through staircases and 0.4m deep in front of the door is the limit to open the door.

Keywords: urban flood; underground space; evacuation through staircase and door; real scale model