

## 地下浸水時の人体にかかる流体力と転倒危険性に関する実験的研究

京都大学 学生員 ○渡辺 力  
 京都大学 学生員 岡 宗佑  
 京都大学 正会員 岡本隆明  
 京都大学 フェロー会員 戸田圭一

### 1. はじめに

近年、集中豪雨や勢力の強い台風の発生頻度が高くなっている。これらにより都市部で水害が発生した場合、浸水した幅の狭い通路や地下空間等で避難および救助活動を行う必要がある。こうした浸水部での避難・救助活動を安全に行うためには、どれほどの流速や水深で人が転倒したり流されたりするのかを把握する必要がある。本研究では集団で避難している状況および歩行時に水流が身体の横から押し寄せる状況を想定して実験を行い、避難行動時の危険性を評価した。

### 2. 流水中で人体に作用する流体力

流水中で人体にかかる流体力の計測では、身長 1.8 m、体重 65 kg の成人男性が流水に入ったことを想定し、1/6 スケールで実験を行った。模型の全長は頭部込みで 0.3 m である。模型の関節部分は可動で、様々な姿勢に変化させることが出来る。本実験で用いた実験装置を図-1 に示す。水路は全長 10 m、幅 0.4 m、高さ 0.5 m の可変勾配型水路であり、等流状態になるように水路勾配を変化させた。計測対象となる人体模型の背後に薄い板を取り付け、水路内のフォースゲージ(日本電産シンボ製 FGP-5)に固定することで、人体模型にかかる流体力を計測した。

集団避難を想定した計測では、図-2 のように水路内に 2 体の人体模型を上流側向きに立位姿勢で等間隔に並べた。また、堰上げの影響を詳細に分析するために、塩ビボックスで水路幅を狭め、模型スケールで水路幅 0.3 m となるケースについても計測を行った。

流水に対して横向きに歩行している状況を想定した計測では、人体模型を図-3 のように流水に対して横向きに設置し、直立時と開脚時のそれぞれの状態について計測した。本実験での水理条件を表-1 に示す。模型スケールで流速  $u=0.2\sim 1.2$  m/s(実スケールで流速  $u=0.5$

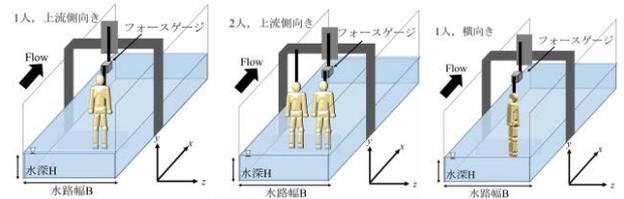


図-1 流体力実験装置図 図-2 集団避難時流体力計測装置図 図-3 横向き歩行時流体力計測装置図

表-1 水理条件

実スケール			模型スケール		
通路幅(m)	流速(m/s)	水深(m)	水路幅(m)	流速(m/s)	水深(m)
2.4	0.5	0.2	0.4	0.2	0.033
	0.5	0.4		0.2	0.067
	0.5	0.6		0.2	0.1
	1	0.2		0.41	0.033
	1	0.4		0.41	0.067
	1	0.6		0.41	0.1
	1.5	0.2		0.61	0.033
	1.5	0.4		0.61	0.067
	1.5	0.6		0.61	0.1
	2	0.2		0.82	0.033
	2	0.4		0.82	0.067
	3	0.2		1.22	0.1
1.8	0.5	0.2	0.3	0.2	0.033
	0.5	0.4		0.2	0.067
	0.5	0.6		0.2	0.1
	1	0.2		0.41	0.033
	1	0.4		0.41	0.067
	1	0.6		0.41	0.1
	1.5	0.2		0.61	0.033
	1.5	0.4		0.61	0.067
	1.5	0.6		0.61	0.1

~3.0 m/s)ごとに模型スケールで水深  $H=0.033\sim 0.10$  m(実スケールで水深  $H=0.2\sim 0.6$  m)の 3 パターンで計測した。

### 3. 転倒耐力の計測

流水中で立位姿勢の人間が転倒する限界値を調べるために、図-4 のようにロープを介して電子はかりと繋がっている長方形の布を被験者の脚部に引っ掛けて引っ張り、流水中で身体に流体力が作用する状況を再現した。被験者が転倒または滑り始めた時の電子はかりの値を転倒耐力として計測した<sup>1)</sup>。上流側向きでの立位

キーワード 地下浸水、避難行動、転倒危険性、流体力  
 連絡先 〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂 C1-3-258

watanabe.chikara.26s@st.kyoto-u.ac.jp

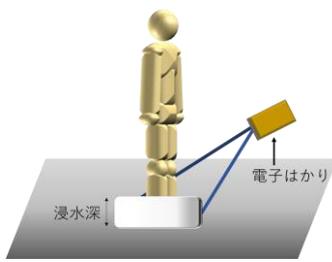


図-4 転倒耐力計測概要図

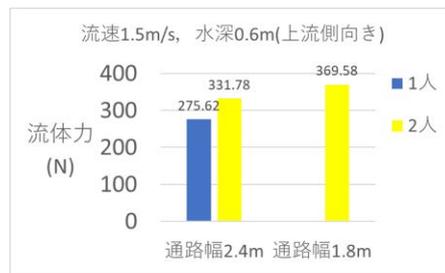


図-5 立位姿勢人体にかかる抗力値

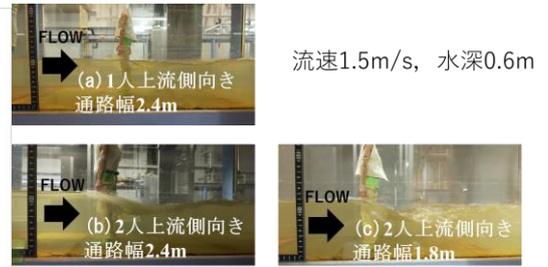


写真-1 人体周りの水深

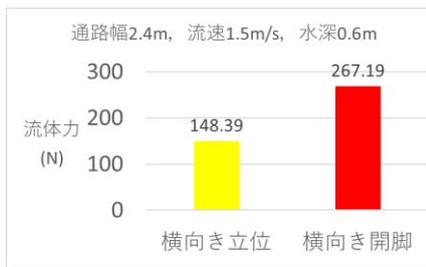


図-6 横向き歩行姿勢人体にかかる抗力値

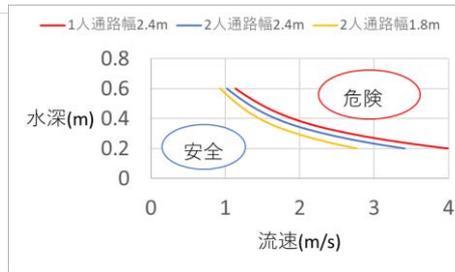


図-7 転倒限界曲線(上流側向き, 立位姿勢)

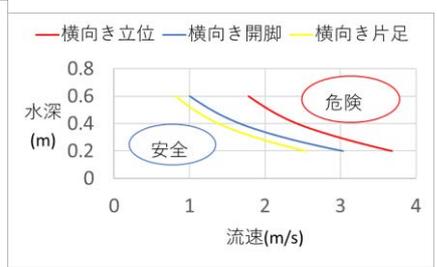


図-8 転倒限界曲線(通路幅 2.4 m, 横向き歩行時)

姿勢, 横向きでの立位姿勢, 開脚姿勢および片足での立位姿勢の計4パターンで計測した. 浸水深は0.2, 0.4, 0.6mの3パターンで姿勢ごとに11人の被験者に対して計測した. なお, 計測は全て同じ材質の床(摩擦係数 $\mu=0.5$ )の上で実施した.

#### 4. 実験結果

まず, 集団避難時を想定して人体模型を2体並べたケースと人体模型を1体並べたケースで流体力がどのように変化するかを述べる. 実スケールで流速1.5 m/s, 水深0.6 mのケースにおいて, 幅2.4 mの通路に人体模型1体, 2体を並べたケースと幅1.8 mの通路に人体模型2体を並べたケースの流体力を比較したものが図-5である. 人体模型は上流側を向けて立位姿勢で設置している. 抗力値は実スケール換算している. 人体模型の数を増やすほど, もしくは通路幅を狭めるほど流体力が増加した.

図-5で流体力を示した3ケースについて, 各ケースにおける人体周りの水深変化の様子を写真-1に示す. 写真より, 人体模型の数を増やすほど, もしくは通路幅を狭めるほど堰上げが生じている様子が確認された.

次に, 人体模型を横向きに設置したケースで人体に作用する流体力がどのように変化するかを述べる. 実スケールで通路幅2.4 m, 流速1.5 m/s, 水深0.6 mのケースにおいて横向き立位姿勢, 横向き開脚姿勢での流体力を図-6に示す. 横向

き開脚姿勢の方が横向き立位姿勢よりも水面下の投影面積が大きいため, 流体力が増加したと考えられる.

最後に, 身体が流体力を受けて転倒してしまう水深および流速を算出する. 流水中で人間は身体に作用する流体力に対して, 転倒耐力 $R$ で抵抗すると仮定する.

$$R \leq F = C_D \frac{\rho A u^2}{2} \quad (1)$$

ここで,  $F$ は流体力,  $C_D$ は抗力係数,  $\rho$ は水の密度,  $A$ は水面下における身体の投影面積,  $u$ は流速である.  $R \leq F$ の時に転倒する危険性が高いと考えられる. 左辺の転倒耐力が右辺の流体力と釣り合った時( $R = F$ )の流速を流水中で人間が転倒する限界流速として算出する. 上流側向きのケースにおける転倒限界曲線を図-7に示す. 通路幅が狭くなるほど, また通路内の人数が増えるほど, 転倒する危険性が高くなった. 横向きのケースにおける転倒限界曲線を図-8に示す. 歩行しようと足を開いたり, もしくは足をあげたりするだけで転倒する危険性が高くなることが明らかになった.

今後は, 転倒耐力の計測人数を増やし, より正確な転倒限界曲線の描画を目指していく.

#### 参考文献

- 1) 藤田一郎・伊藤崇博: 平成21年8月兵庫県佐用町河川災害における氾濫解析と避難行動判断基準に関する研究, 河川技術論文集, 第17巻, pp.431-436, 2011.