

第II部門

地下浸水時の避難行動における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多くなっている。これらによって都市部で大規模な水害が発生した場合、浸水した幅の狭い通路、地下空間等での避難、救助活動をしなければならない。浸水部での避難、救助活動を安全に行うために、どれほどの流速、水深で人が転倒してしまうのかまた流されてしまうのかを把握しておく必要がある。本研究は歩行時に流水が身体の横から流れてく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 71 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。人体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、立位姿勢、転倒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、模型にかかる流体力を計測する。人体模型は流水に対して横向きに設置する。立位時の姿勢としては直立姿勢と開脚姿勢の 2 パターンで計測した。転倒時の姿勢としては図-2 のように模型を横転させて流体力を計測した。本実験での水理条件を表-1 に示す。立位時は模型スケールで流速 $u=0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.2, 1.6$ m/s(実スケールで流速 $u=0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0$ m/s)ごとに模型スケールで水深 $H=3.3, 6.6, 10$ cm(実スケールで水深 $H=0.2, 0.4, 0.6$ m)の 3 パターンで計測した。転倒時は模型スケールで水深 $H=3.3, 5.0, 6.6$ cm(実スケールで水深 $H=0.2, 0.3, 0.4$ m)の 3 パターンで計測した。

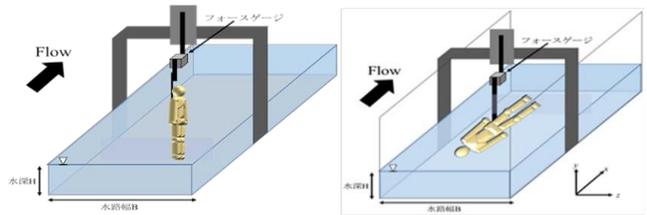


図-1 流体力実験装置図

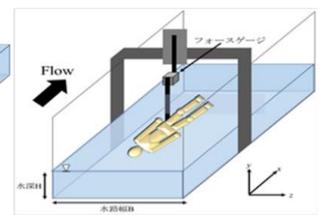


図-2 転倒姿勢

表-1 水理条件

実スケール			模型スケール			人体模型の姿勢
通路幅(m)	流速(m/s)	水深(m)	通路幅(m)	流速(m/s)	水深(cm)	
2.4	0.5	0.2	0.4	0.2	3.33	立位, 転倒
	0.5	0.3		0.2	5	転倒
	0.5	0.4		0.2	6.67	立位, 転倒
	0.5	0.6		0.2	10	立位
	1	0.2		0.41	3.33	立位, 転倒
	1	0.3		0.41	5	転倒
	1	0.4		0.41	6.67	立位, 転倒
	1	0.6		0.41	10	立位
	1.5	0.2		0.61	3.33	立位, 転倒
	1.5	0.3		0.61	5	転倒
	1.5	0.4		0.61	6.67	立位, 転倒
	1.5	0.6		0.61	10	立位
	2	0.2		0.82	3.33	立位, 転倒
	2	0.3		0.82	5	転倒
	2	0.4		0.82	6.67	立位, 転倒
	3	0.2		1.22	3.33	立位, 転倒
3	0.3	1.22	5	転倒		
4	0.2	1.63	3.33	転倒		

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-3 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脚部に引っ掛けて引っ張り、流水中で身体に作用する流体力を再現する。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。立位時の姿勢としては直立姿勢と開脚姿勢と片足での直立姿勢の 3 パターンで計測した。浸水深は 0.2, 0.4, 0.6 m 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。計測は全て同じ材質の床(摩擦係数 $\mu=0.5$)で行った。図-4 に姿勢ごとの転倒耐力を示す。横向きに足を開くもしくは片足を上げるほど流体力に対する転倒耐力が小さくなる事が分かる。

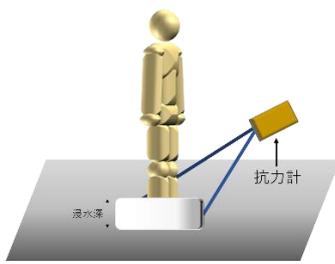


図-3 転倒耐力計測概要図

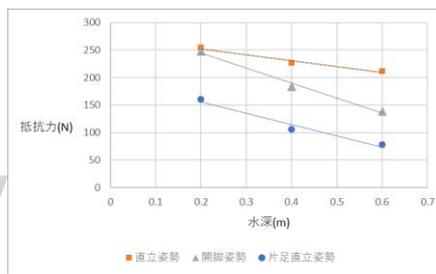


図-4 姿勢ごとの転倒耐力

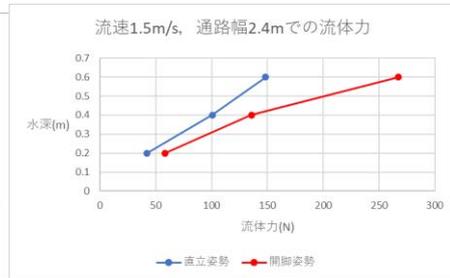


図-5 姿勢ごとに作用する抵抗力値の鉛直分布

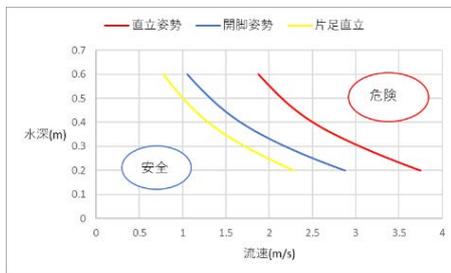


図-6 転倒限界曲線

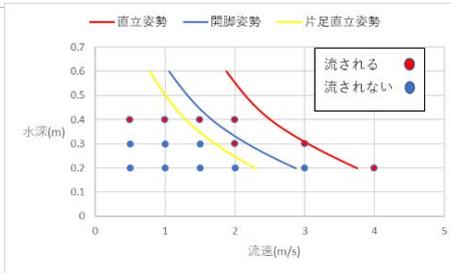


図-7 転倒状態で流される危険性判定図(図-6を併示)

4. 実験結果

横向き歩行時に姿勢を変えると、人体に作用する流体力がどのように変化するか述べる。実スケールで通路幅 2.4 m、流速 1.5 m/s のケースの直立姿勢と開脚姿勢での流体力を図-5 に示す。抵抗力は実スケール換算している。図より直立姿勢での流体力より開脚姿勢の流体力の方が大きいことが分かる。この結果は他の水理条件下でも得られた。これは、開脚姿勢の方が直立姿勢より水面下の投影面積が大きいことによると考えられる。

身体が流体力を受けて転倒してしまう水深、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。

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

$R \leq F$ の時に転倒する危険性が高い。 F は流体力、 C_D は抵抗力係数、 ρ 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。実スケール通路幅 2.4 m のケースの流水に対して横向きに歩行している時の転倒限界曲線を図-6 に示す。水深 0.4 m で流速 2.0 m/s のケースでは、直立姿勢ならば転倒する危険性は低いだが、開脚姿勢もしくは片足での直立姿勢をとると転倒する危険性が高まる。

横向きの転倒状態で流される限界値として静止摩擦力を算出し、その値を転倒状態で身体が受ける流体力と比較し、横向き転倒状態で流される危険性を評価す

る。水路実験で計測した流体力の値が浮力を考慮した静止摩擦力よりも大きい場合、流水中で流される危険性が高いと判断した。静止摩擦力は浮力を考慮して次の式で算出した。

$$S = \mu(Mg - \rho Vg) \quad (2)$$

S は静止摩擦力、 μ は摩擦係数(=0.50)、 M は体重(=71 kg)、 ρ 水の密度、 V は身体の浸水体積、 g は重力加速度である。これらの静止摩擦力と流体力の大小関係を比較して、実スケール通路幅 2.4 m のケースで転倒状態の時に流されてしまう危険性を判定したものが図-7 である。比較のため実スケール通路幅 2.4 m のケースの流水に対して横向きに歩行している時の転倒限界曲線を併示している。水深 0.3 m 以上では片足直立状態の転倒限界流速を超えて転倒した場合、流されてしまう。水深 0.2 m では流速 4.0 m/s 程度の規模で転倒してしまい、そのまま流されてしまう。一方、水深 0.4 m では流速 0.5 m/s 程度の流速でも流される。

今後は、他の流速や浸水深での流体力計測や転倒耐力計測を行う。

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.