

幅の狭い地下通路における浸水時の危険性の 評価に関する実験的研究

岡本 隆明¹・戸田 圭一²・岡 宗佑³・當麻 泰史³

¹正会員 京都大学大学院工学研究科助教 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: okamoto.takaaki.8x@kyoto-u.ac.jp

²フェロー会員 京都大学大学院工学研究科教授 (同上)

E-mail: toda.keiichi.4z@kyoto-u.ac.jp

³学生会員 京都大学大学院 工学研究科 (同上)

近年, 集中豪雨が増加傾向にあり都市部で内水氾濫が頻発している. 都市部では地上が氾濫すると地下空間に氾濫水が侵入し, 甚大な人的被害が生じる. これまで地下空間での避難対策については, 洪水シミュレーションを駆使した多くの既往研究がみられ様々な場で報告がなされている. しかしながら, 地下空間での避難や水難事故に関する研究は人がいない状態で氾濫流の水位, 流速を解析したものがほとんどで, 狭い通路内での人体による水深せき上げを考慮していない. 本研究では人型模型を用いて流水中の人体に掛かる力を水路幅を変化させて計測し, 特に狭い地下通路内での浸水時の漂流危険性について調べた. 実験データをもとに避難限界指標となる危険流速—水深判読図を作成した.

Key Words: narrow underground pass, drag force coefficient of human body, backwater rise, drowning risk

1. はじめに

近年, 集中豪雨が増加傾向にあり都市部で内水氾濫が頻発している. 都市部で氾濫が起きると地下空間に氾濫水が侵入し, 甚大な人的被害が生じる. これまで地下空間での避難対策については, 洪水シミュレーションを駆使した多くの既往研究がみられ様々な場で報告がなされている.

須賀ら(1994)¹⁾は水害避難を想定した水中歩行実験を行い, 歩行速度を測定し安全避難歩行領域を求めた. 藤田ら(2011)²⁾は洪水時の歩行避難限界を比較・整理し, さらに布を脚に巻き付けてバネばかりで引っ張ることで, 立位状態における転倒への抵抗限界値を評価した. 浅井ら(2009)³⁾は実物大階段模型と通路模型を用いて地下空間での避難体験実験を行い, 高齢者を含めた避難困難度の定量的な評価を行った. 北村・西田(2017)⁴⁾や著者らの既往研究(2019)⁵⁾では流水中で転倒することで人体にかかる抗力が増加し, 水難事故の危険性が増すことを指摘している.

しかしながら, しかしながら, これらの研究は十分に幅の広い流れ場を対象としているため, 狭い通路内での

人体による水深せき上げを考慮しておらず, 身体が水の流れをせき止めることでどのようにリスクが高まるかまでは明らかにされていない. そこで本研究では 1/6 スケールの人型模型を用いて流水中の人体に掛かる力を水路幅を変化させて計測し, 特に狭い地下通路内での浸水時の水難事故の危険性について調べた. さらに実験データをもとに避難限界指標となる危険流速—水深判読図を作成した.

2. 実験装置

本研究では図-1に示すように全長10m, 幅0.4m, 高さ0.50mの可変勾配型直線水路にて水路実験を実施した. x , y および z はそれぞれ, 流下方向, 鉛直方向および横断方向の座標軸である. $x=0$ は人体模型の立位時のかかと, 座位時の臀部の位置, $y=0$ は水路底面, $z=0$ は水路壁とした. H は水深である. 幅の狭い地下通路を想定し, 塩化ビニールボックスを用いて図-2に示すように水路幅を $B=0.2, 0.4\text{m}$ (実スケールで $B=1.2, 2.4\text{m}$)に変化させている.

著者らの既往研究⁵⁾の模型(1/10スケール)では低水深ケース(実スケールで $H=0.1\text{--}0.2\text{m}$)の水深が小さくなりすぎ

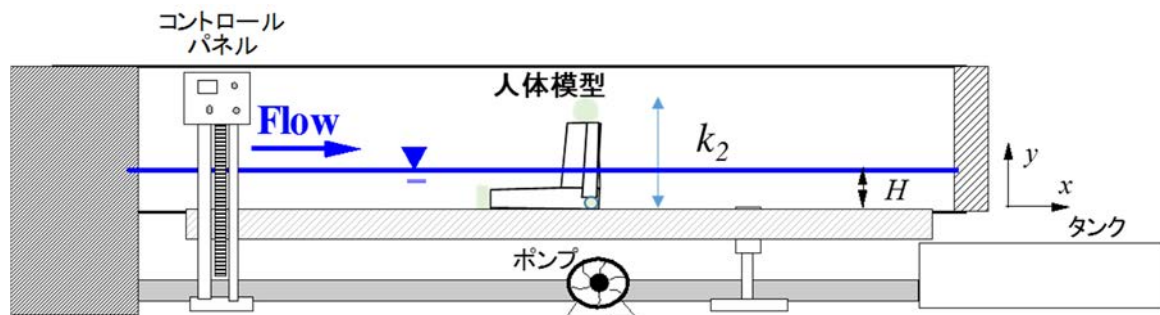


図-1 人体模型（1/6 スケール）を用いた水路実験

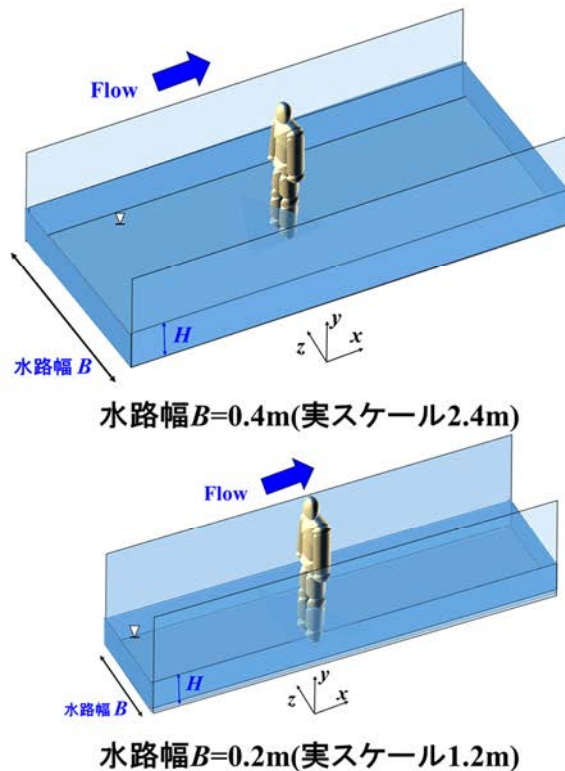


図-2 地下通路（1/6 スケール）の通路幅変化

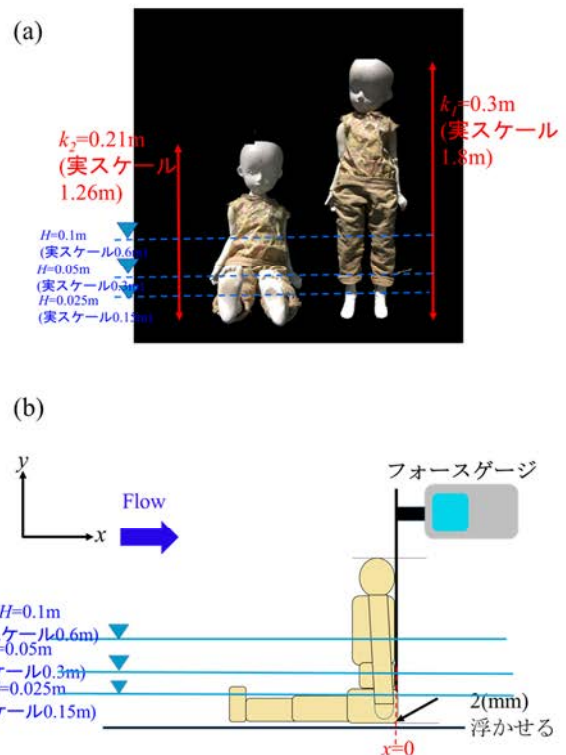


図-3 (a) 人体模型（1/6 スケール）の姿勢変化
(b) 人体に作用する流体力と座標

て実験をすることが困難なため、図-3に示すようにより大きな人体模型(1/6スケール)を用いた。人体模型の関節部分は可動で、流水による転倒を想定して立位と座位状態に変化させることが可能である。立位時の模型高さは $k=0.3\text{m}$ (実スケール身長 1.8m ，成人男性を想定)，座位時の模型高さ $k=0.21\text{m}$ (実スケール 1.26m)である。また着衣の影響を考慮して図-2(a)のように木綿で作成した服を着せて人体抗力の計測を行った。

流体力の計測にはフォースゲージ(分解能 $1/1000\text{N}$ ，日本電産シンガ製FGP-2)を用いた。PCに時系列データを記録して60秒間の平均値を計測値とした。サンプリングレートは 10Hz である。フォースゲージに支持棒を介して人体模型を取り付けており、模型が水流から受ける抗力 F は金属棒を中継してフォースゲージで計測される。抗力計測時に底面摩擦の影響をなくするため、図-3(b)のよ

うに人体模型を上から支柱によって吊り下げ、底面から 2mm 程度浮かした状態で固定した。

表-1 に実験条件を示す。水路幅、水深を系統変化させ多様な条件下で水路実験を行った。流水による転倒を想定して人体模型の姿勢を立位，座位状態に変化させている。人体模型は着衣状態とした。水路幅 $B=0.2, 0.4\text{m}$ (実スケールで $1.2, 2.4\text{m}$)の2通り，水深 $H=0.025\text{--}0.1\text{m}$ (実スケールで $0.15\text{--}0.6\text{m}$)，断面平均流速は $U_m=0.2\text{--}0.6\text{m/s}$ (実スケールで $0.49\text{--}1.47\text{m/s}$)に変化させている。

3. 流水中の転倒による人体抗力の変化

著者らの既往研究⁵⁾では通路幅が広いケースについて考察したが，実際の地下通路は幅が狭いケースもみられ，転落時に流れがせき止められて人体抗力も変化すると考

表-1 実験条件

実スケール			実験時のスケール			フルード数Fr	人体模型の姿勢
水路幅B(m)	流速 U_m (m/s)	水深H(m)	水路幅B(m)	流速 U_m (m/s)	水深H(m)		
2.4	1.22	0.15	0.4	0.50	0.025	1.01	座位, 立位
		0.30			0.05	0.71	座位, 立位
		0.45			0.075	0.58	座位, 立位
		0.60			0.1	0.51	座位, 立位
	1.84	0.15		0.75	0.025	1.52	座位, 立位
		0.30			0.05	1.07	座位, 立位
		0.45			0.075	0.87	座位, 立位
		0.60			0.1	0.76	座位, 立位
1.2	1.22	0.15	0.2	0.50	0.025	1.01	座位, 立位
		0.30			0.05	0.71	座位, 立位
		0.45			0.075	0.58	座位, 立位
		0.60			0.1	0.51	座位, 立位
	0.49	0.18,0.225,0.30		0.20	0.03,0.0375,0.05	0.37, 0.33,0.29	座位
	0.73	0.18,0.225,0.30		0.30	0.03,0.0375,0.05	0.55,0.49,0.43	座位
	0.98	0.18,0.225,0.30		0.40	0.03,0.0375,0.05	0.74,0.66,0.57	座位
	1.22	0.18,0.225,0.30		0.50	0.03,0.0375,0.05	0.92,0.82,0.71	座位
	1.47	0.18,0.225,0.30		0.60	0.03,0.0375,0.05	1.1,0.99,0.86	座位

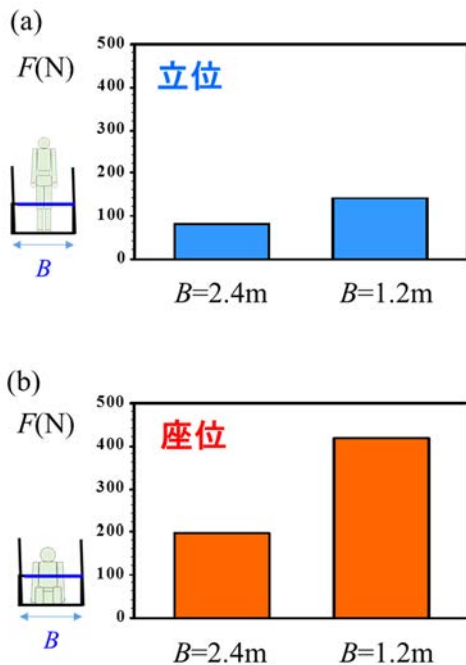


図-4 幅の狭い通路内で人体にかかる抗力の変化(通路幅の影響 $U_m=1.2\text{m/s}$, $H=0.3\text{m}$) (a)立位, (b)座位

えられる。本節では通路幅が狭いケースでの浸水時の人体にかかる抗力の変化について考察する。

図-4に通路幅の十分に広いケース($B=2.4\text{m}$)と狭いケース($B=1.2\text{m}$)の人体模型にかかる抗力値 $F(\text{N})$ を比較した。抗力値は実スケール換算している。人体模型設置前の断面平均流速は実スケール換算して $U_m=1.2\text{m/s}$ 、水深は $H=0.3\text{m}$ である。通路幅が狭いケースでは水路幅が十分に広いケースに比べて人体にかかる抗力が増加している。すなわち、通路幅が狭くなると広いケースに比べ、立位状態で人体抗力が1.7倍、座位状態では2.1倍となってい

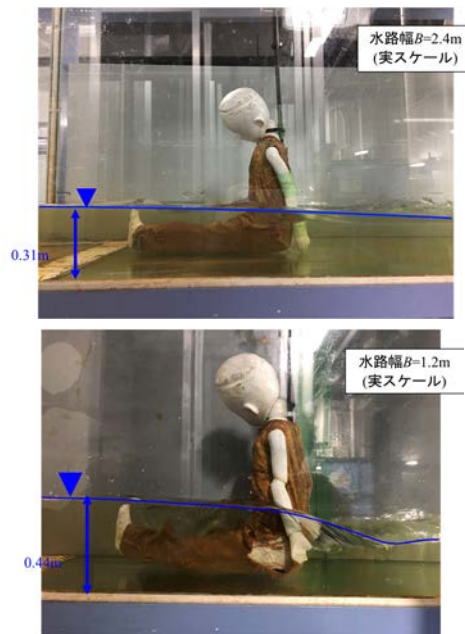


図-5 地下通路内での人体による水深せき上げ($U_m=1.2\text{m/s}$, $H=0.3\text{m}$)

る。紙幅の都合でここでは示していないが、この傾向は他の流速、水深のケースでもみられた。これは狭い通路では水流によって押し流される危険性が増すことを示している。通路幅の影響は座位ケースほど顕著にみられた。

図-5に通路幅の十分に広いケース($B=2.4\text{m}$)と狭いケース($B=1.2\text{m}$)での人体による水深上昇の様子を示す。図-6に人体模型周りの水深の流下方向分布 $H(x)$ を示す。人体模型設置前の断面平均流速は実スケール換算して $U_m=1.2\text{m/s}$ 、水深は $H=0.3\text{m}$ である。

通路幅の十分に広いケースでは人体による水深のせき上げはほとんどみられない。これに対して、通路幅が狭いケースでは人体が水の流れをせき止めることで水深が上昇し、座位状態では水深0.44mとなっている。図-4で通

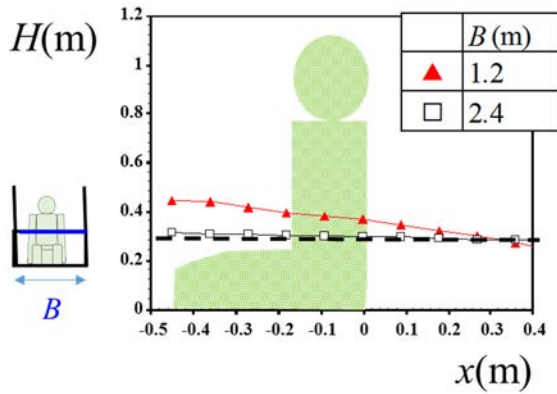


図-6 通路内でのせき上げによる水深の流下方向変化
($U_m=1.2\text{m/s}$, $H=0.3\text{m}$, 座位)

路幅が狭いケースで人体抗力が増加していたのは人体前面で水深が増加し、人体上流側と下流側の静水圧差から抗力が増加したためと考えられる。

4. 転倒したときの流水への抵抗力

次に、流水中で転倒した場合を想定して水難事故の危険流速を計算するために、座位状態の人間の流水への抵抗力を評価する。流水に対しての人間の抵抗力を静止摩擦力 S と同じとすると流水に流される限界状態は

$$F = S = \mu(Mg - F_b) \quad (1)$$

$$F_b = \rho g V_o \quad (2)$$

ここで μ : 人体と地面の静止摩擦係数, M : 人体の質量, g : 重力加速度, F_b : 人体模型に作用する浮力, V_o : 水中に水没した人体の体積である。式(1)の左辺の水流から受ける流体力が右辺の抵抗力 S と釣り合った時の流速を水難事故の危険流速として算出する。

後ろに手をついて踏ん張ることで抵抗力が大きくなる可能性も考えられるが、これまで検証はあまりされていない。立位状態の流れに対する抵抗力については藤田ら⁹⁾は布を脚に巻きつけてバネばかりで引っ張ることで汜濫流の流体力の疑似体験キットを作成して計測している。

本研究では座位状態で人間が地面に手をつくことで、流水に対しての抵抗力が増加するか、水がない状態で検証実験を行った。検証実験の模式図を図-7 に示す。長方形の布の両端と電子ばかりをロープで繋ぎ、座位状態の被験者の足裏に布を引っ掛けて後ろから引っ張り、被験者が滑り始めた時の抗力計の値を計測した。20代の5人の被験者に対して、被験者が手をつかない自然座位状態と後方の手をついて踏ん張った抵抗状態の計測を行い、滑り始める限界値がどれくらい変わるのかを比較

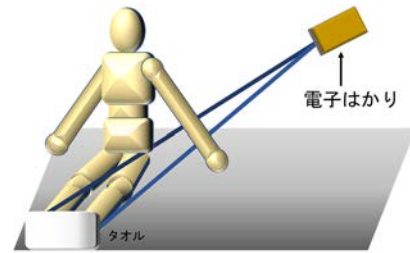


図-7 座位で手をついた状態での人体の流水への抵抗力の計測

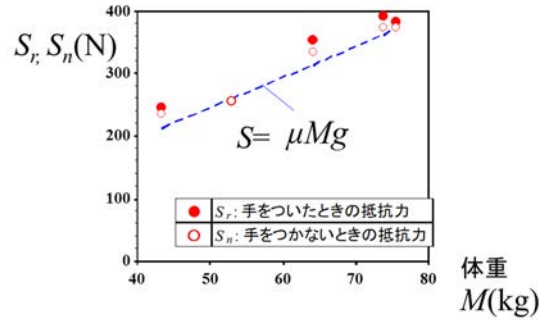


図-8 座位で手をついた状態での人体の流水へ抵抗力と静止摩擦力の比較

した。計測は全て同じ材質の床(静止摩擦係数 $\mu \approx 0.50$)で行い、また被験者が着用している服の材質の違いを無くすために、それぞれの被験者の腰に同一の布を巻いてから計測した。図-8 に静止摩擦力と後ろに手をついた状態の抵抗力 S_r を比較した。手をついた状態の抵抗力 S_r は体重に比例しており、静止摩擦力 S より少し増加している。個人差はあるが増加率は概ね 5-10%程度であった。手をついて抵抗することを考慮すると流水に流される限界状態では、以下の式となる。

$$F = S_r = \alpha S \quad (3)$$

手をついた場合は流水に対しての人間の抵抗力を静止摩擦力からの増加率は平均して 7%程度($\alpha=1.07$)として計算すればよいと考えられる。また手をついた状態の抵抗力 S_r は手をつかない状態の抵抗力 S_n より 3-5%大きい。

5. 幅の狭い通路内で水深せき上げを考慮した水難事故の危険水深、流速の評価

著者らの既往研究⁹⁾では模型スケールが小さく、低水深ケース(実スケールで $H=0.1-0.2\text{m}$)の水難事故の危険流速は評価できていない。そこで本研究では十分に通路幅が広いケース($B=2.4\text{m}$)について大きな模型(1/6スケール)を使って、低水深ケースの人体抗力係数を評価する。人体にかかる流体力 F は

$$F = 0.5\rho C_D U_m^2 A_x \quad (4)$$

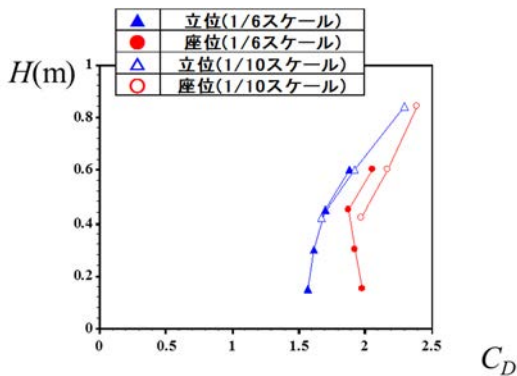


図-9 十分に幅が広いケース($B=2.4\text{m}$)での人体の抗力係数

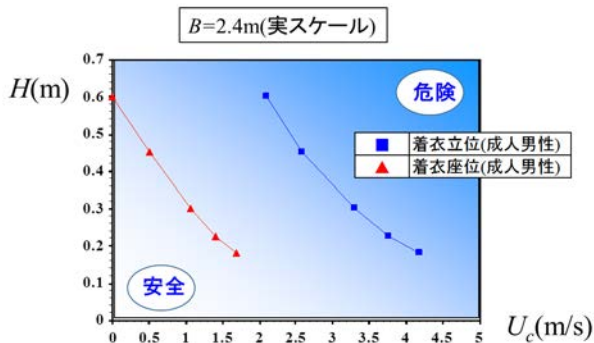


図-10 十分に幅が広い通路での水難事故に遭う危険水深と流速の判読図(成人男性を想定)

と表現される．ここで、 C_D ：抗力係数、 ρ ：水の密度、 $A_x(y)$ ：人体が水没している部分の x 方向の投影面積である．図-9に座位と立位ケースの人体模型の抗力係数の鉛直プロット $C_D(y)$ を示す．比較のため、著者らの既往研究⁹⁾の模型実験(1/10スケール)の結果も併示している．

着衣状態の立位ケースでは $C_D=1.6\sim 1.9$ 、着衣状態の座位ケースでは $C_D=2.0$ となる．人体が転倒して座位状態になると人体の x 方向の投影面積が増すだけでなく、抗力係数も大きくなっている．模型スケールの違いによる人体の抗力係数の変化はあまりみられなかった．

低水深ケースの大人(体重 71kg を想定)が水難事故に遭う危険水深と流速の判読図を図-10に示す．図-9の抗力係数の鉛直プロットから内挿して抗力係数を求め、抗力と抵抗力のつり合い式(3)、(4)から水難事故危険流速(限界流速 U_c)を算出した．人体と水路床の静止摩擦係数は過去の事例より 0.7 で⁹⁾、立位では抵抗力は静止摩擦力 S と同じとし、座位では手をついた状態では抵抗力 S_r は静止摩擦力よりさらに 7% 増加するとしている．

低水深ケースでは、転倒してしまうと水深 0.225m では 1.4m/s 、水深 0.18m では 1.7m/s 程度の流速で水難事故に遭う危険性が高い．しかしながら、実際の狭い地下通路では図-4のように人体にかかる抗力が大きくなってより低い流速で流されてしまう可能性があり、通路幅の影

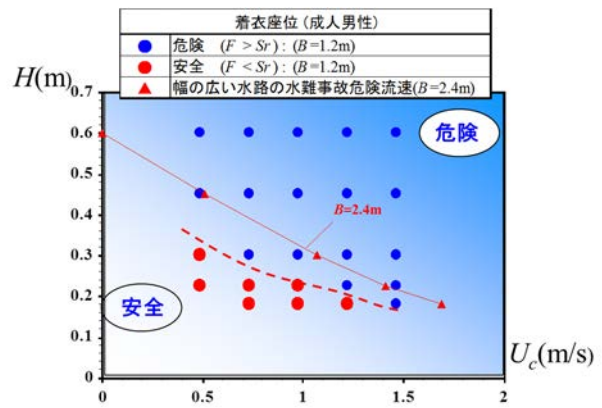


図-11 幅の狭い通路内($B=1.2\text{m}$)での水難事故危険水深・流速の判読図

響も調べる必要がある．

3節の結果から通路幅が狭いケース($B=1.2\text{m}$)では水深せき上げが起これ、人体にかかる抗力が増加することがわかった．著者らの既往研究⁹⁾では水深せき上げが起きない十分に幅の広い水路を対象としているため、通路幅が狭いケース($B=1.2\text{m}$)の水難事故の危険流速は評価できていない．

水深せき上げが起きるようなケースでの人体の抗力係数は断面平均流速によって変化するため、(4)節のように式(3)、(4)を使って水難事故の危険流速を評価することは困難である．

そこで本研究では通路幅が狭いケース($B=1.2\text{m}$)について断面平均流速を細かく系統変化させて人体抗力を計測し、各ケースについて式(3)の静止摩擦力を補正した流水抵抗力 S_r と F を比較して直接、水難事故の危険度を判定した．すなわち、計測した人体抗力の値が浮力を考慮した抵抗力よりも大きいと水難事故に遭う危険性が高いとした．

通路幅が狭いケース($B=1.2\text{m}$)の成人男性が水難事故に遭う水難事故の危険水深と流速の判読図を図-11に示す．図-4のような水深せき上げによって人体にかかる浮力の増加も考慮している．静止摩擦係数、座位時の抵抗力 S_r は前節と同じである．比較のため幅の広いケースの危険流速・水深(図-10)を併示している．水路幅が狭くなると十分に幅が広いケースの水難事故の危険流速よりも小さくなる．成人男性が転倒すると、水深 0.225m で流速 1.22m/s 、水深 0.18m で流速 1.47m/s 程度で水流によって押し流される危険性が高い．

これらの結果から幅の狭い地下通路では浸水時に、水深が上昇し、①人体にかかる抗力が増加すること、②水深上昇によって浮力が増加することの2つの要因から浅い水深、低流速でも水難事故が発生する危険性が増大することがわかった．

6. 結論

本研究では模型スケールの大きな人体模型を用いて水理実験を行い、幅の狭い地下通路を想定して、水路幅が狭いケースでの水深せき上げ、人体抗力の変化について考察した。さらに低水深ケースについて断面平均流速を細かく系統変化させて、幅の狭い地下通路での水難事故に遭う危険水深、流速を求めた。得られた主な結論は以下のとおりである。

- (1) 通路幅が狭くなると広いケースに比べ、立位状態で人体抗力が1.7倍、座位状態では2.1倍となった。通路幅が狭くなると人体抗力の増加がみられ、狭い水路では水流によって押し流される危険性が増すことがわかった。
- (2) 通路幅が狭いケースでは人体が水の流れをせき止めることで水深が上昇し、座位状態では水深が1.4倍になった。通路幅が狭いケースで人体抗力が増加するのは人体前面で水深が増加し、人体上流側と下流側の静水圧差から抗力が増加したと考えられる。
- (3) 人間が姿勢を変えることで、流水に対しての抵抗力が増加するかどうか検証実験を行った。後ろに手をつけて踏ん張った状態の抵抗力 S_r は静止摩擦力 S より少し増加しており、増加率は平均して 7%程度であった。
- (4) 座位で十分に水路幅が広いケースについて大きな模型(1/6 スケール)を使って、低水深ケース(実スケール $H=0.1\sim0.2\text{m}$)の人体抗力係数を評価した。着衣状態の立位ケースでは $C_D=1.6\sim1.9$ 、着衣状態の座位ケースでは $C_D=2.0$ となった。模型スケールの違いによる人体の抗力係数の変化はあまりみられなかった。

(5) 十分に水路幅が広いケースについて人体の抗力係数をもとに抗力と抵抗力のつり合い式を用いて、低水深条件下の水難事故危険流速 U_c を算出した。成人男性が転倒してしまうと水深 0.225m では 1.4m/s、水深 0.18m では 1.7m/s 程度の流速で水難事故に遭う危険性がある。

(6) 通路幅が狭いケースについて断面平均流速を細かく系統変化させて人体抗力を計測し、各ケースについて抵抗力と抗力のつり合い式から直接、水難事故の危険度を判定した。幅の狭い通路では水深がせき上げられ、上下流の水圧差から抗力が大きくなること、浮力が増加することの2つの理由から水難事故の危険流速がより小さくなる。成人男性が転倒すると、水深 0.225m で流速 1.22m/s、水深 0.18m で流速 1.47m/s 程度で水流によって押し流される危険性が高いことがわかった。

参考文献

- 1) 須賀堯三・上阪恒雄・白井勝二・高木茂知・浜口憲一郎：避難時の水中歩行に関する実験，水工学論文集，第38巻，pp.829-832，1994.
- 2) 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.
- 3) 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，水工学論文集，第53巻，pp.859-864，2009.
- 4) 北村光司，西田佳史：河川の流水による子どもの流され状況の再現実験とライフジャケット着用の必要性に関する研究，日本子ども安全学会第四回大会資料，2017.
- 5) 岡本隆明・戸田圭一・當麻泰史・石垣泰輔：地下浸水時の人体に作用する流体力とその危険性に関する実験的研究，地下空間シンポジウム論文・報告集，第24巻，pp.150-155，2019.

EXPERIMENT STUDY ON DROWING ACCIDENT RISK IN FLOODED NARROW UNDERGROUND PASS

Takaaki OKAMOTO, Keiichi TODA, Sosuke OKA, Yasufumi TOUMA

The rainfall events cause flash floods and drowning accident occurs in an underground area. Therefore, it is very important to study the hydrodynamic force exerted on the human body in flood water. In this study, the flume experiments were conducted using a the human body model (1/6 scale). The drag force exerted on the human body was measured in a narrow channel which assumes the underground pass. The experiment data showed that the drag force exerted on the body in the narrow channel is 2 times larger than that in the wide channel. Also, the buoyancy force acting on the body increases due to the backwater rise. Consequently, the drowning accident risk increases even in a low velocity condition.