

用水路・側溝での水難事故発生の危険性に関する研究

Study on Drowning Accident Risk at Irrigation Channel and Side Ditch

戸田圭一⁽¹⁾・岡本隆明⁽¹⁾・岡宗佑⁽¹⁾・當麻泰史⁽¹⁾

Keiichi TODA⁽¹⁾, Takaaki OKAMOTO⁽¹⁾, Sosuke OKA⁽¹⁾ and Yasufumi TOUMA⁽¹⁾

(1) 京都大学大学院工学研究科

(1) Graduate School of Engineering, Kyoto University, Japan

Synopsis

Due to the torrential rain, drowning accident of a small child frequently occurs in a side ditch and narrow irrigation channel. Therefore, it is very important to study the hydrodynamic force on the human body there. In this study, the flume experiment was conducted using a model of the human body (1/4 scale). The drag force exerted on the small child body was measured in a narrow channel. The experiment data showed that the drag force exerted on the body in the narrow channel is 2-3 times larger than that in the wide channel. Also, the buoyancy force acting on the body increases due to the backwater rise and the hydrostatic pressure exerted on the body increases, too. Consequently, the drowning accident risk increases even in a low velocity condition.

キーワード: 抗力係数, 座位, 側溝, 堰上げ水深, 静水圧, 水難事故危険性の増大

Keywords: drag force coefficient, sitting position, side ditch, effect of backwater rise, hydrostatic pressure, increase of drowning accident risk

1. はじめに

近年, 温暖化の影響で短時間集中豪雨が増加しており, 河川だけでなく側溝や用水路での水難事故が頻発している(毎日新聞ニュース). 特に幅の狭い側溝・用水路では河川では考えられないような0.1m程度の低い水深でも水難事故(2018年甲賀市など:産経ニュース)が起きており, 危険性が指摘されている. これまで流水中での避難困難度や人体にかかる流体力については多くの既往研究がみられ, 様々な指標が提案されている.

高橋ら(1992)は実際の人を対象に実スケールの流れを水槽内で再現して水理実験を実施した. 流水中での人の転倒を力学メカニズムから滑り型転倒と倒

れこみ型に分け, 越波時の人の転倒限界を定量的に示した. 須賀ら(1994)は水害避難を想定した水中歩行実験を行い, 歩行者の心理状態と歩行速度を測定し安全避難歩行領域を求めた. 小川ら(2014)は歩行が困難となる度合いを人体抗力と静止摩擦力の比によって定量的に評価し, 2009年佐用川の氾濫解析結果と組み合わせて歩行危険度の時間空間分布を評価した.

北村・西田(2017)や著者らの既往研究(2018)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, 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, 幅の狭い側溝ではなぜ水深が浅くても水難事故が起きるのか, 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

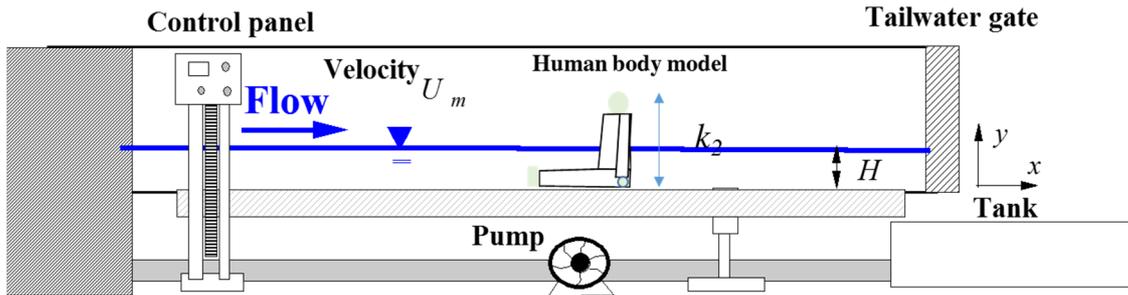


Fig.1 Experimental setup

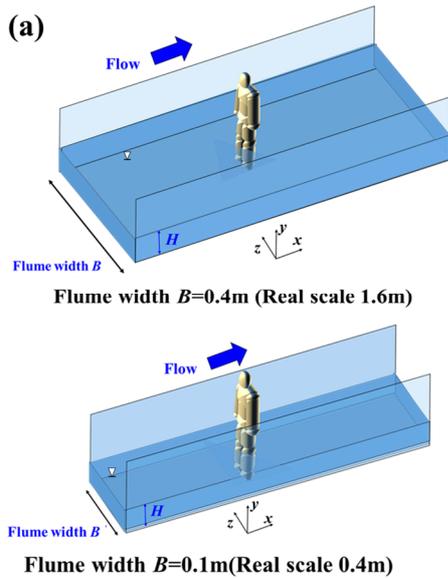


Fig.2(a) Change of flume width

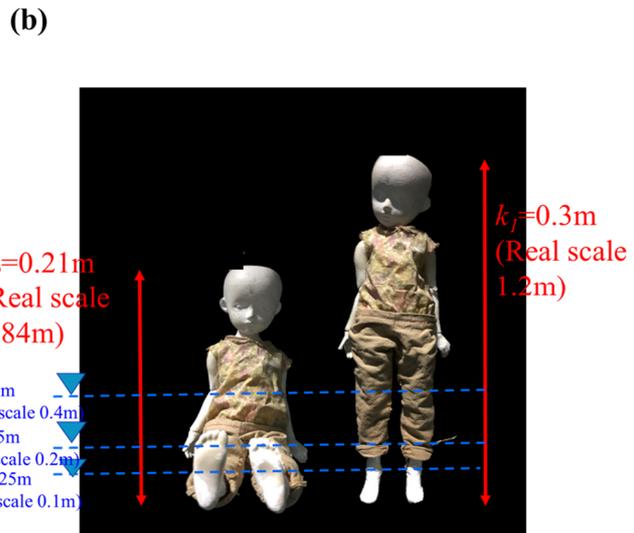


Fig.2(b) Posture change of human body model

は明らかにされていない。

そこで本研究では水路幅、水深を系統変化させ多様な条件下で水路実験を行い、幅の狭い水路での人体抗力の変化について調べた。また転倒した人間の流れへの抵抗力を計測し、評価した。さらに幅の狭い水路での人体による水深せき上げを考慮して水難事故の危険流速、水深を評価した。

2. 実験装置、実験方法

本研究では Fig.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。Fig.2(a) のように幅の狭い側溝を想定し、塩化ビニールボックスを用いて水路幅を $B=0.1, 0.2, 0.4\text{m}$ (実スケールで $B=0.4, 0.8, 1.6\text{m}$) に変化させている。

幅の狭い側溝では河川では考えられないような低

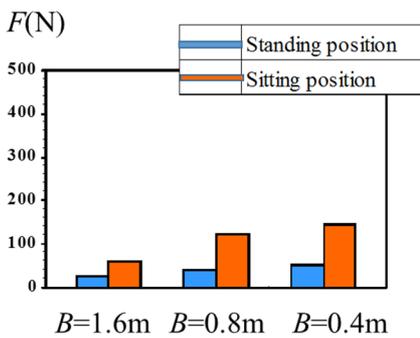
い水深でも水難事故が発生するため、低い水深ケースの実験をする必要がある。著者らの既往研究(2018)の模型(子どもを想定すると 1/8 スケール)では側溝を想定した低水深ケース(実スケールで $H=0.1\text{-}0.2\text{m}$)の水深が小さくなりすぎて実験をすることが困難なため、より大きな人体模型(1/4 スケール)を用いた。人体模型の関節部分は可動で、流水による転倒を想定して立位と座位状態に変化させることが可能である。立位時の模型高さは $k=0.3\text{m}$ (実スケール身長 1.2m、8 歳児を想定)、座位時の模型高さ $k=0.21\text{m}$ (実スケール 0.84m) である。また着衣の影響を考慮して Fig.2(b) 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 1/1000N、日本電産シンボ製 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

Table 1 Hydraulic condition

Real scale			Model scale			Fr	Posture of human body model
B (m)	U _m (m/s)	H (m)	B (m)	U _m (m/s)	H (m)		
1.6	1	0.1	0.4	0.5	0.025	1.01	standing, sitting
		0.2			0.05	0.71	standing, sitting
		0.3			0.075	0.58	standing, sitting
		0.4			0.1	0.5	standing, sitting
	1.5	0.1		0.025	1.51	standing, sitting	
		0.2		0.05	1.07	standing, sitting	
		0.3		0.075	0.87	standing, sitting	
		0.4		0.1	0.76	standing, sitting	
0.8	1	0.1	0.2	0.5	0.025	1.01	standing, sitting
		0.2			0.05	0.71	standing, sitting
		0.3			0.075	0.58	standing, sitting
		0.4			0.1	0.5	standing, sitting
0.4	1	0.1	0.1	0.5	0.025	1.01	standing, sitting
		0.2			0.05	0.71	standing, sitting
		0.3			0.075	0.58	standing, sitting
		0.4			0.1	0.5	standing, sitting
	0.4	0.12, 0.15, 0.2		0.03, 0.0375, 0.05	0.37, 0.33, 0.29	sitting	
	0.6	0.12, 0.15, 0.2		0.03, 0.0375, 0.05	0.55, 0.49, 0.43	sitting	
	0.8	0.12, 0.15, 0.2		0.03, 0.0375, 0.05	0.73, 0.66, 0.57	sitting	
	1	0.12, 0.15, 0.2		0.03, 0.0375, 0.05	0.92, 0.82, 0.71	sitting	
1.2	0.12, 0.15, 0.2	0.03, 0.0375, 0.05	1.1, 0.99, 0.86	sitting			

(a) U_m=1.0m/s, H=0.2m



(b) U_m=1.0m/s, H=0.4m

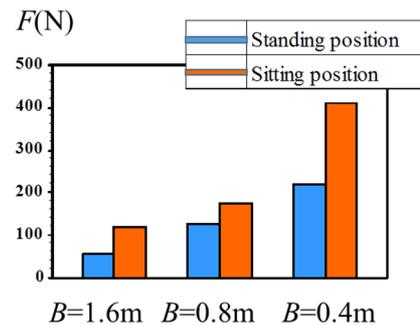


Fig.3 Drag force exerted on human body (effect of flume width)

なくすため、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。

Table 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=0.1, 0.2, 0.4m(実スケールで 0.4, 0.8, 1.6m)の 3 通り、水深 H=0.025, 0.05, 0.075, 0.1m(実スケールで 0.1, 0.2, 0.3, 0.4m) の 4 通り、断面平均流速は U_m=0.5, 0.75m/s(実スケールで 1.0, 1.5m/s) の 2 通りに変化させている。

さらに水路幅が狭いB=0.1m(実スケールで0.4m)のケースについては水難事故の危険流速、水深をより詳細に調べるために、側溝を想定した低水深ケース(水深H=0.03, 0.0375, 0.05m(実スケールで0.12, 0.15, 0.2m))について断面平均流速を細かく系統変化させている(U_m=0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6m/s(実スケールで0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2m/s))。

3. 実験結果

3.1 水路幅が狭い側溝での水深・人体抗力の変化

著者らの既往研究(2018)では水路幅が広いケース(実スケール B=1.6m)について考察したが、実際の側溝は幅が狭いケース(実スケール B=0.4-0.8m)が多く、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えられる。本節では実際の側溝に近い水路幅が狭いケースでの人体抗力の変化について考察する。

Fig.3 に水路幅の十分に広いケース(B=1.6m)と狭いケース(B=0.8, 0.4m)の人体模型にかかる抗力値 F(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=1.0m/s、水深は H=0.2, 0.4m である。水路幅が狭いケース(B=0.4m)では水路幅が十分に広いケース

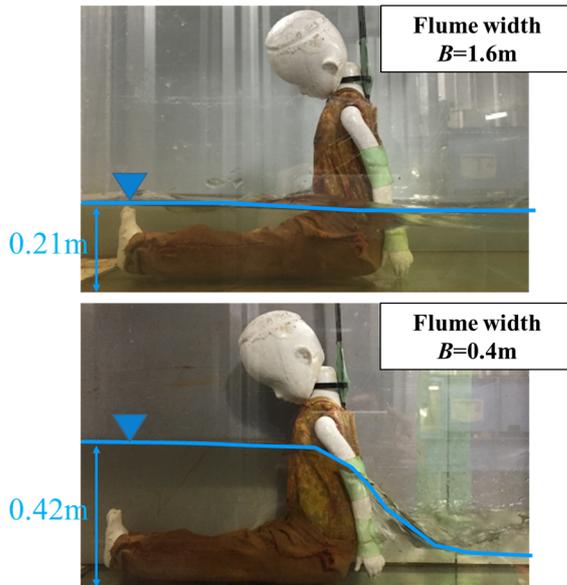


Fig.4 Backwater rise in narrow side dieth

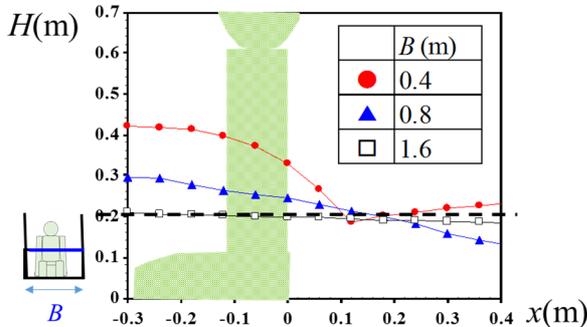


Fig.5 Flow depth change in narrow side dieth

に比べて人体にかかる抵抗力が増加している。すなわち、水路幅が狭くなると広いケース($B=1.6\text{m}$)に比べ、立位状態で人体抵抗力が2.0倍、座位状態では2.5倍となっている。これは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を示している。水路幅が $B=0.8\text{m}$ のケースでも水路幅の影響がみられ、立位状態で人体抵抗力が1.7倍、座位状態では2.1倍となっている。水路幅の影響は座位ケースほど顕著にみられた。水深 $H=0.4\text{m}$ では $H=0.2\text{m}$ のケースより水路幅の影響が顕著で、狭くなることで抵抗力が大きくなっている。

Fig.4に水路幅の十分に広いケース($B=1.6\text{m}$)と狭いケース($B=0.4\text{m}$)での人体による水深上昇の様子を示す。Fig.5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 $U_m=1.0\text{m/s}$ 、水深は $H=0.2\text{m}$ である。

水路幅の十分に広いケース($B=1.6\text{m}$)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、水路幅が狭いケース($B=0.4\text{m}$)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 0.4m となっている。Fig.3で水路幅が狭いケースで人体抵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抵抗力が増加したためと考えられる。

3.2 転倒して座位をとった人間の流水への抵抗力の計測

次に、側溝に転落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(2011)は布を脚に巻きつけてバネばかりで引っ張ることで流水中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Fig.6に示す。長方形型の布の両端と電子は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抵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。Fig.7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。

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

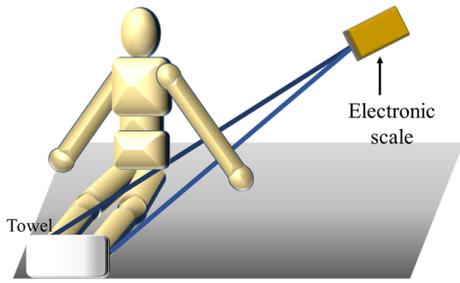


Fig.6 Measurement of resistance force by electronic scale and rope

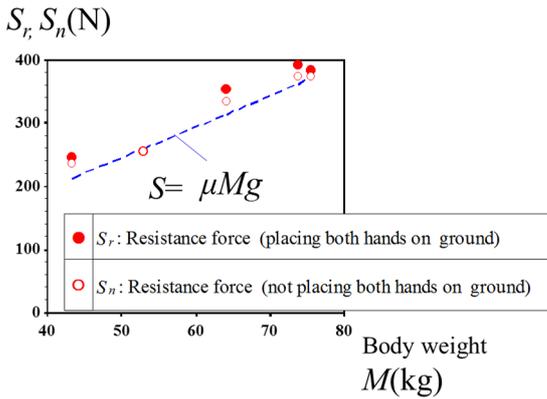


Fig.7 Relation between resistance force and static friction force

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.

3.3 転倒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(2018)では模型スケールが小さく、側溝を想定した低水深ケース(実スケールで $H=0.1-0.2m$)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水路幅が広いケース ($B=1.6m$)について大きな模型(1/4 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

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

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. Fig.8 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(2018)の模型実験(1/8 スケール)の結果も併示している.

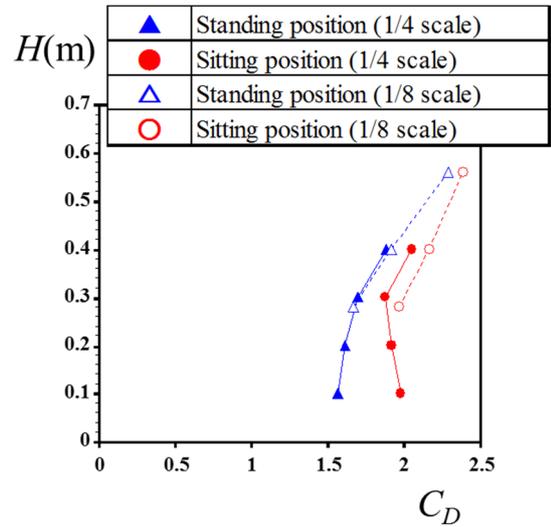


Fig.8 Drag force coefficient of human body in wide open-channel

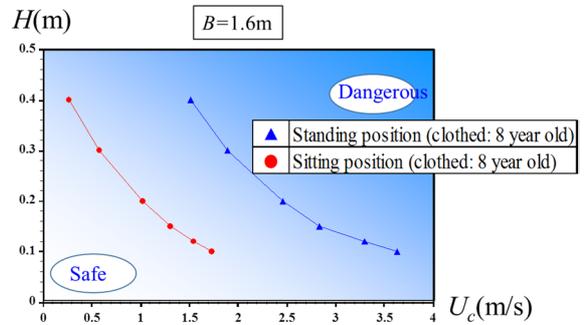


Fig.9 Critical condition for drowning accident (8 year old)

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. また水深の大きなケース ($H>0.3m$) で比較すると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.

低水深ケースの子ども(8歳児, 体重 23kgを想定)が水難事故に遭う危険水深と流速の判読図を Fig.9 に示す. Fig.8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_0)を算出した. 人体と水路床の静止摩擦係数は過去の事例(須賀ら(1994)より 0.7で, 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0.15mでは1.3m/s, 水深0.12mでは1.5m/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

側溝ではFig.3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、側溝の幅の影響も調べる必要がある。

3.4 水路幅が狭い側溝での水難事故危険性の増大と危険流速の評価

3.1 節の結果から実際の側溝を想定した水路幅が狭いケース($B=0.4\text{--}0.8\text{m}$)では水深せき上げが起こり、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(2018)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、側溝を想定した幅が狭いケース($B=0.4\text{m}$)の水難事故の危険流速は評価できていない。Fig.10 に水路幅の狭いケース($B=0.4\text{m}$)で断面平均流速を細かく変化させたときの座位状態の人体にかかる抗力の値 $F(\text{N})$ を比較した。図中には各水深の人体(8歳児を想定)の抵抗力 S_r (水深せき上げを考慮しない場合)を併示している。Fig.7 から抵抗力 S_r は体重に比例するが、水深が大きくなると浮力がかかって抵抗力が小さくなる。水深 $H=0.2\text{m}$ で 0.4m/s 程度、水深 $H=0.15\text{m}$ で 0.6m/s 程度の流速でも抵抗力を超える力が作用している。

図には示していないが、 $H=0.1\text{--}0.2\text{m}$ のケースでは抗力をせき上げ前の水深を用い無次元化した抗力係数は $U_m=0.4\text{m/s}$ で $C_D=15.0\text{--}19.0$, $U_m=0.6\text{m/s}$ で $C_D=12.0$, $U_m=1.0\text{m/s}$ で $C_D=5.0$ となった。流速が小さいケースほど抗力係数が大きく評価されるのは、水深せき上げに伴う静水圧差による人体抗力の増加が顕著にみられるためである。側溝内での人体の抗力係数は断面平均流速によって変化しているため、前節のように式(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。

そこで本研究では側溝を想定した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 Fig.10 のように比較して直接、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。

水路幅が狭いケース($B=0.4\text{m}$)の子ども(8歳児を想定)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 Fig.11(a)に示す。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(Fig.9)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。身長 1.2m の子どもが側溝内で転倒すると、水深 0.15m で流速 0.6m/s , 水深 0.12m で流速 0.8m/s 程度で水流によって押し流される危険性が高い。

実際には Fig.4 のような水深せき上げによって人

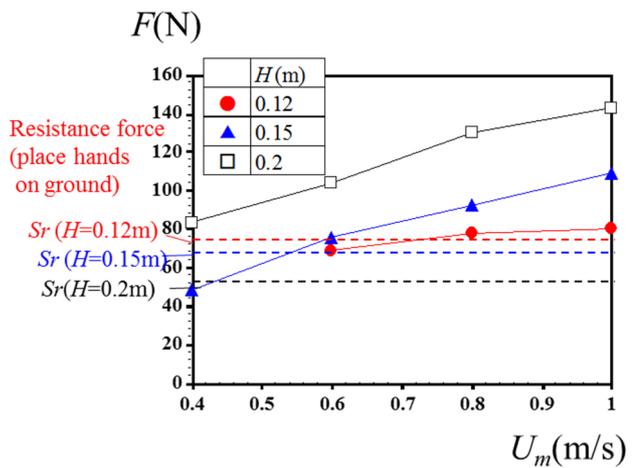


Fig.10 Drag force exerted on human body in narrow side ditch

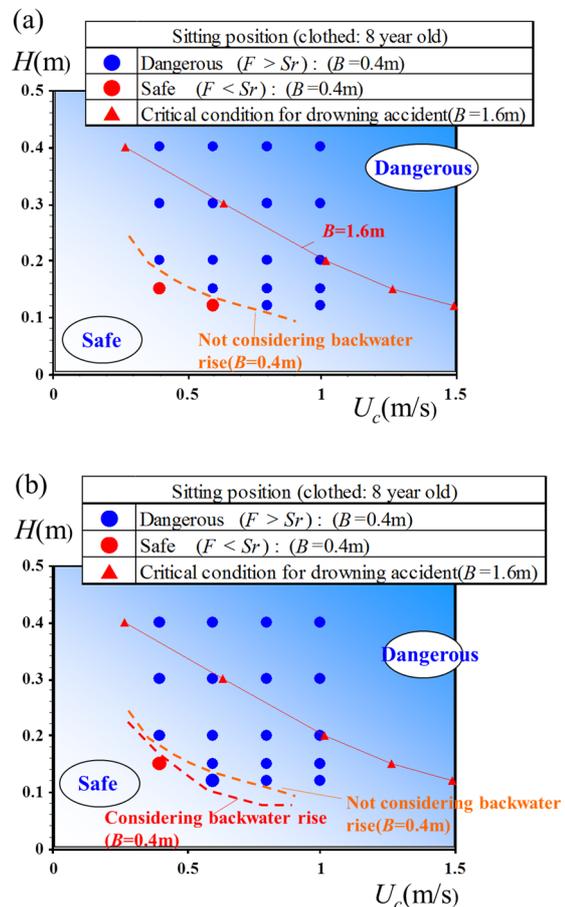


Fig.11 Critical condition for drowning accident in narrow side ditch

体にかかる浮力も増加すると考えられる。水深せき上げを考慮したときの水難事故の危険水深と流速を Fig.11(b)に示す。水難事故の危険流速はさらに小さくなり、水深 0.12-0.15m では流速 0.6m/s となった。水深 0.1m 程度で流速 0.6m/s でも事故が起き、甲賀市の事例とも対応している。流速値は不明であるが、 Manning式を用いて側溝内の流速を概算すると、側溝の粗度係数を 0.015、水深 0.1m で勾配 1/200 では流速 0.77m/s、勾配 1/100 とでは流速 1.09m/s となり、本研究の限界流速より大きい。

これらの結果から幅の狭い用水路や側溝に転落すると、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增大することがわかった。

4. おわりに

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、実際の側溝や用水路を想定して、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、幅の狭い側溝(実スケール $B=0.4m$)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) 幅の狭い側溝($B=0.4m$)では水路幅が十分に広いケースに比べて体にかかる抗力が増加するのがみられた。広いケース($B=1.6m$)に比べ、立位状態で人体抗力が 2.0 倍、座位状態では 2.5 倍となった。水路幅が $B=0.8m$ のケースでも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) 幅の狭い側溝($0.4m$)では人体が水の流れをせき止めることで、座位状態では水深が 2 倍になった。水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($B=1.6m$)について大きな模型(1/4 スケール)を使って、低水深ケース

(実スケール $H=0.1-0.2m$)の人体抗力係数を評価した。着衣状態の立位ケースでは $C_D=1.6-1.9$ 、着衣状態の座位ケースでは $C_D=2.0$ となった。また水深の大きなケース($H>0.3m$)では従来のものと比較して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。身長 1.2m の子どもが側溝内で転倒して座位になると水深 0.15m では 1.3m/s、水深 0.12m では 1.5m/s 程度の流速で水難事故に遭う危険性がある。

6) 側溝を想定した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。幅の狭い側溝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。子どもが側溝内で転倒して座位になると水深 0.2m では流速 0.4m/s、水深 0.12-0.15m では流速 0.6m/s であっても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。

本研究から幅の狭い側溝・用水路では河川では考えられないような低い水深、流速でも水難事故が発生する危険があることがわかった。防災教育を通して、子供達に降雨時には側溝、用水路に近づかないように周知することが大切である。また通学路にある側溝、坂道の側溝は危険が大きく、管理者は蓋をするなどの対策が必要である。

最後に体験実験に協力頂いた京都大学大学院工学研究科水理環境ダイナミクス研究室の皆様へ感謝の意を表します。

参考文献

- 小川芳也・瀬良昌憲・澤井健二・足立考之・小笠原裕介・正岡聡(2014)：氾濫解析とリンクした洪水時の避難判断支援情報の提供に関する研究，自然災害科学，Vol.33, No.1, pp.43-52.
- 岡本隆明・戸田圭一・當麻泰史(2018)：流水によって人体が受ける流体力と水難事故の危険性に関する実験的研究，河川技術論文集，第24巻，pp.493-498.
- 北村光司・西田佳史(2017)：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。

産経ニュース, <https://www.sankei.com/west/news/180507/wst1805070059-n1.html> 2018年5月7日アクセス.

須賀堯三・上坂恒雄・吉田高樹・浜口憲一郎・陳志軒(1994): 水害時の安全避難行動(水中歩行)に関する検討, 水工学論文集, 第39巻, pp.879-882.

高橋重雄・遠藤仁彦・室善一朗(1992): 越波時における防波堤上の人の転倒に関する研究(第2報) -親水性港湾構造物に関する水工的研究-, 港湾技術研究

所報告, 第31巻, pp.3-32.

藤田一郎・伊藤崇博(2011): 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.

毎日新聞, <https://mainichi.jp/articles/20190123/k00/00m/040/092000c> 2019年5月28日アクセス.

(論文受理日: 2019年6月13日)