

地下空間浸水時の歩行避難の転倒危険性 に関する実験的研究

渡辺 力¹・岡本 隆明²・岡 宗佑³

¹ 学生会員 京都大学大学院 工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)
E-mail: watanabe.chikara.26s@st.kyoto-u.ac.jp

² 正会員 京都大学大学院工学研究科助教 (同上)

³ 非会員 東京電力 (〒390-1401 長野県松本市波田 10195-2)

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・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手前から押し寄せる状況を想定して実験を行い, 避難行動時の転倒危険流速を評価した.

Key Words: narrow underground pass, walking evacuation, falling down motion, crossing running water, drowning risk

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・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. これまで地下空間での避難対策については, 浸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.

尾崎ら¹⁾は大阪市を対象に地下街の浸水解析を行い, 雨の降り方の違いによる浸水特性を明らかにした. 村瀬ら²⁾は名古屋と大阪の地下空間を対象に洪水破堤による浸水解析を行い, 両者の比較を行うことで地形や地盤高分布の違いによる浸水の特徴を明らかにした.

浅井ら³⁾は実物大階段模型と水路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. 藤田ら⁴⁾は洪水時の歩行避難限界を評価するために, 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計測した. 北村・西田⁵⁾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.

多くの研究では十分に幅の広い流れ場を対象としているため, 著者ら⁶⁾は幅の狭い水路内で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, 1 体の

人体前面の堰上げによる抗力増加について調べたが, 集団避難する状況や流水を横断避難するような状況は対象としていなかった. そこで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手前から押し寄せる状況を想定して実験を行い, 避難行動時の転倒危険性を評価した. 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, 人数, 身体の手前を変化させて計測した. また成人男性を対象に布と電子ばかりを使って, 身体の手前を変えたときの転倒耐力を計測した. さらに流体力と転倒耐力を比較することで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

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-1 のように水路内に

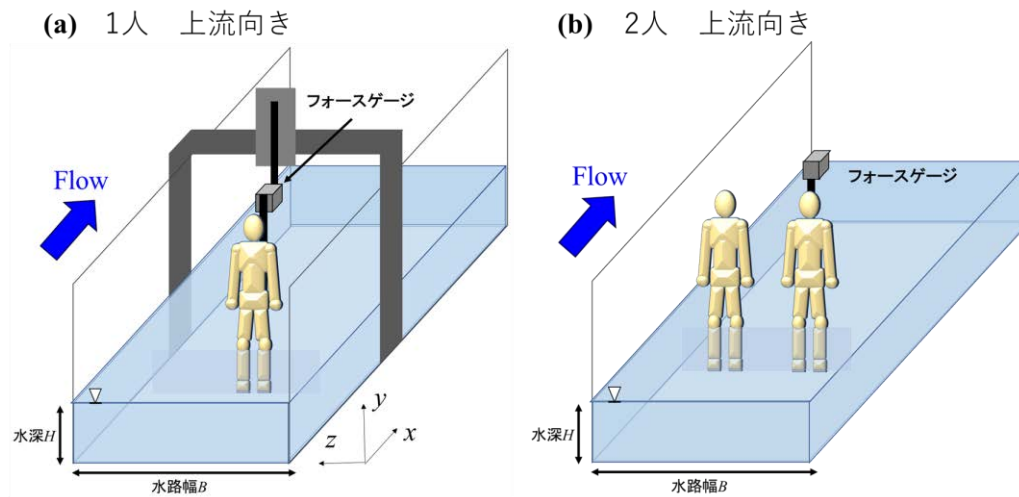


図-1 人体にかかる流体力計測(人数, 通路幅を変化)

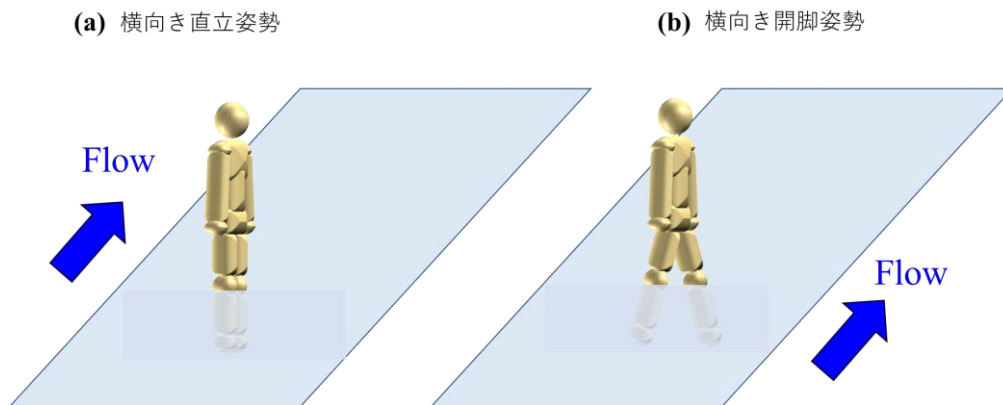


図-2 人体にかかる流体力計測(姿勢を変化)

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-2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。

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向きを上流向き、横向きに変化させている。人体模型は着衣状態とした。水路幅 $B=0.3, 0.4\text{m}$ (実スケールで1.8, 2.4m)の2通り、水深 $H=0.033\sim 0.10\text{ m}$ (実スケールで水深 $H=0.2\sim 0.6\text{ m}$)、断面平均流速は $U_m=0.2\sim 1.2\text{ m/s}$ (実スケールで流速 $0.5\sim 3.0\text{ m/s}$)に変化させている。

3. 歩行時の転倒耐力の計測

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⁴⁾。上流側向きでの直立姿勢、横向きでの直立姿勢、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, 0.6 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。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。

歩行中の主な姿勢を図-3(d)のような3パターンに分ける。パターンAは立っている状態で、流体力と耐久力はどちらも横向きの直立姿勢時の値を適用する。パターンBは歩行時に脚部を前後に開脚して両足とも接地している状態で、流体力は歩行姿勢時、耐久力は歩行(両足接地)姿勢時の値を適用する。パターンCはパターンBの状態から歩行しようと後ろ足を地面から離れた直後の状態で、流体力は歩行姿勢時の値を、耐久力は歩行(片足接地)姿勢時の値を適用する。

歩行姿勢を変化させたときの横方向からの流水による

表-1 実験条件

実スケール				模型スケール			姿勢
通路幅(m)	流速(m/s)	水深(m)	Fr	通路幅(m)	流速(m/s)	水深(m)	
2.4	0.5	0.2	0.36	0.4	0.20	0.033	1人直立(上流向き), 2人直立(上流向き), 1人直立(横向き), 1人開脚(横向き)
	0.5	0.4	0.25		0.20	0.067	
	0.5	0.6	0.21		0.20	0.100	
	1	0.2	0.71		0.41	0.033	
	1	0.4	0.51		0.41	0.067	
	1	0.6	0.41		0.41	0.100	
	1.25	0.4	0.63		0.51	0.067	
	1.5	0.2	1.07		0.61	0.033	
	1.5	0.4	0.76		0.61	0.067	
	1.5	0.6	0.62		0.61	0.100	
	1.75	0.4	0.88		0.71	0.067	
	2	0.2	1.43		0.82	0.033	
	2	0.4	1.01		0.82	0.067	
	2.5	0.2	1.79		1.02	0.033	
	2.6	0.2	1.86		1.06	0.033	
	3	0.2	2.14		1.22	0.033	
	3.5	0.2	2.50		1.43	0.033	
1.8	0.5	0.2	0.36	0.3	0.20	0.033	2人直立(上流向き)
	0.5	0.4	0.25		0.20	0.067	
	0.5	0.6	0.21		0.20	0.100	
	0.95	0.6	0.39		0.39	0.100	
	1	0.2	0.71		0.41	0.033	
	1	0.4	0.51		0.41	0.067	
	1	0.6	0.41		0.41	0.100	
	1.4	0.4	0.71		0.57	0.067	
	1.5	0.2	1.07		0.61	0.033	
	1.5	0.4	0.76		0.61	0.067	
	1.75	0.4	0.88		0.71	0.067	
	2	0.2	1.43		0.82	0.033	
	2.5	0.2	1.79		1.02	0.033	
	3	0.2	2.14		1.22	0.033	
	3.5	0.2	2.50		1.43	0.033	

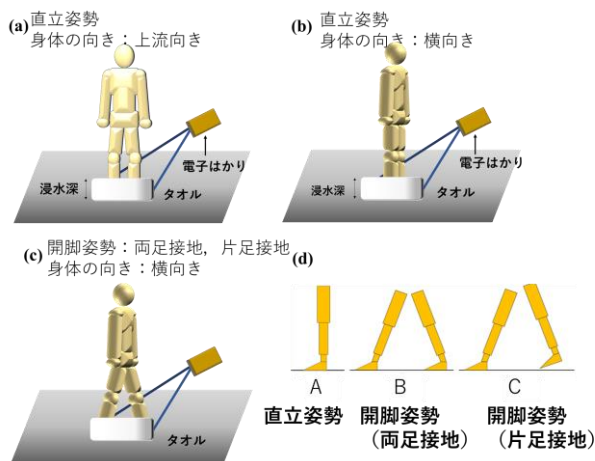


図-3 人間の転倒耐力の計測(身体の向き・姿勢を変化)

転倒耐久力を比較した(図-4)。上流向きと横向きの直立姿勢では横向きの直立姿勢の方が転倒耐力が少し小さくなる。横向きの直立から歩行姿勢になると耐久力 R が減少する、さらに歩行姿勢で片足をあげると耐久力 R が大幅に減少している。流水に対して身体の向きが上流側のケースより流水に対して身体の向きが横向きのケースは転倒の危険が大きくなることがわかった。

4. 集団避難時・横断避難時の人体抗力の変化

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

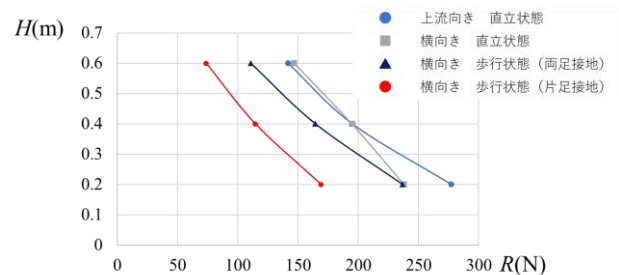


図-4 転倒耐力の姿勢による変化

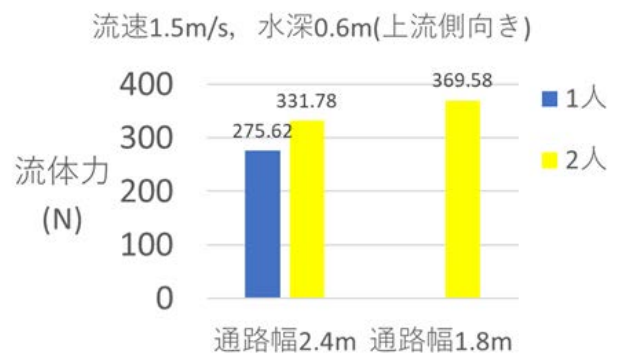


図-5 人体にかかる流体力(通路幅、人数を変化)

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 1.8m 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。通路幅 2.4m で 1 人で立っている状態と横に 2 人並んでいる状態を比較すると、2 人並ぶことによって流体力は約 1.20 倍に増加している。そこからさらに通路幅が狭くなって幅 1.8m となった場

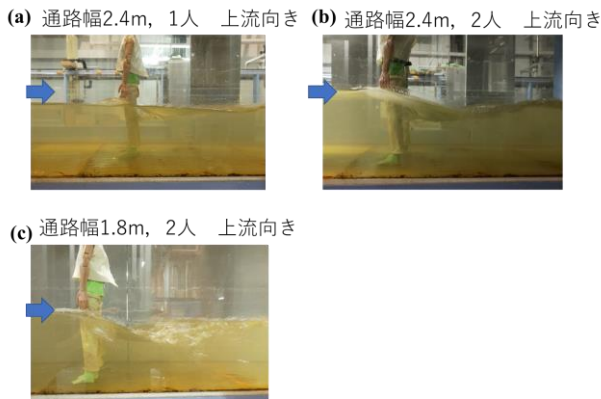


図-6 人体周りの水深変化(人数, 通路幅を変化)

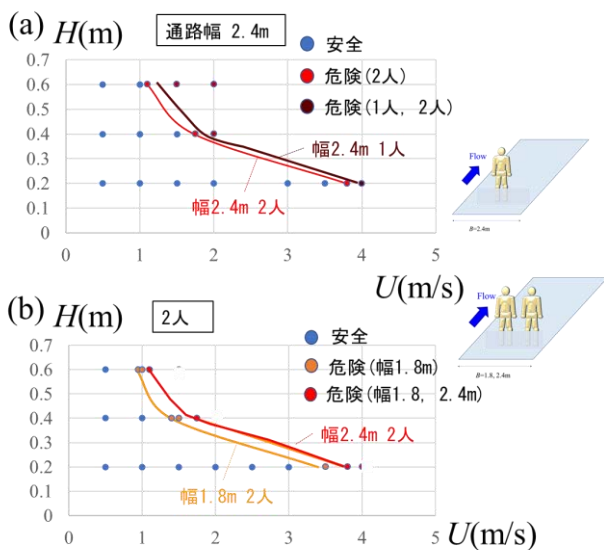


図-7 転倒限界曲線(通路幅, 人数を変化)

合, 通路幅 2.4m 2 人のケースと比較して流体力は約 1.13 倍に増加する. 通路幅が狭まり, 人数が増えることで流れが身体でせきとめられ水深がせき上げされるためである.

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図-6に示す. 通路幅 2.4m で1人のケースでは図-6のように人体前方で初期水深60cm(実スケール)から 2.7cm のせき上げが発生している. 一方で, 人体模型の前後に大きな水深差は発生していないので, 通路幅の影響は少ないと考えられる. 横に2人並んで直立姿勢となっているケースの実験では初期水深から 7.8cm のせき上げが発生し, 人体模型の前後で水深差が発生する. 通路幅 1.8m で横に2人並んだケースでは初期水深から実スケールで 10.8cm のせき上げが発生している.

次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



図-8 横断歩行時の人体にかかる流体力

に対して, 転倒耐力 R で抵抗すると仮定する.

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

ここで, F は流体力, C_D は人体の抗力係数, 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. $R \leq F$ の時に転倒する危険性が高いと考えられる. 通路幅 2.4m, 1.8m で 1 人, 2 人並んだケースでは水深せき上げが起きていると流速を変化させたときに抗力係数が一定にならないため, 断面平均流速を細かく系統的に変化させて抗力と転倒耐力 R を比較して転倒限界曲線を評価した(図-7). 通路幅の狭いケースや横に2人並んだケースでは曲線がグラフの下部に位置しており, 人体にかかる流体力が大きくなり立位姿勢を維持するのが困難なことが分かる. 通路幅 2.4m で 1 人のケースでは水深 0.6m で流速 1.5m/s, 水深 0.4m で流速 2.0m/s, 通路幅 1.8m で横に2人並んだケースでは水深 0.6m で流速 1.0m/s, 水深 0.4m で流速 1.4m/s, 水深 0.2m で流速 3.5m/s で直立姿勢を維持することが困難となる.

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直立姿勢, 横向き開脚姿勢での流体力を図-8に示す. 横向き開脚姿勢の方が横向き直立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.

流水を横断歩行避難する状況において, どの程度の流速や水深まで転倒せずに直立, 歩行姿勢を維持できるかという転倒限界を評価する. 通路幅 2.4m で 1 人の横向きで直立しているケースでは身体の投影面積が小さく水深せき上げの影響がほとんどない. 衣服による投影面積の増加を考慮せず, 非着衣時の投影面積を用いて抗力係数を算出している. 耐久力 R , 抗力係数 C_D , 投影面積 A を水深 h の関数で表すことで, $R=F$ となる転倒限界曲線を評価する. 横向きで開脚しているケースでは水深せき上げが起きるため, 転倒限界曲線は前節と同様に, 断面平均流速を細かく変化させて身体にかかる流体力を

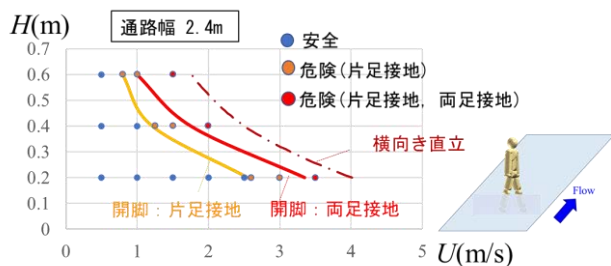


図-9 横断歩行時の転倒限界曲線(姿勢を変化)

$F(N)$ と流水に対する耐久力を $R(N)$ を直接比較して判定した。横向きの直立姿勢、開脚姿勢(両足接地)、開脚姿勢(片足接地)の転倒限界曲線を図-9に示す。

水深 0.6m では流水を横断歩行しようと開脚状態で片足をあげた姿勢になると、流速 0.8m/s で転倒する。水深 0.4m では流速 1.25m/s、水深 0.2m では流速 2.6m/s で転倒してしまうことがわかった。通路幅 2.4m 上流向きのケース(水深 0.6m で流速 1.5m/s、水深 0.4m で流速 2.0m/s、水深 0.2m で流速 4.0m/s)と比較して流水に向かって避難するより流水を横断避難する方が転倒危険性が高いことがわかった。

5. 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、通路幅、人数、人間の身体の向き、姿勢を変化させて人体抗力の増加について考察した。また成人男性を被験者として身体の向きを変えて転倒耐力を計測した。さらに流体力と転倒耐力を比較することで避難限界指標となる危険水深、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) 実際に人間が被験者となり実測した転倒耐久力 R は水深が大きくなると大幅に小さくなっており、水深が大きいほど転倒のリスクが大きいことがわかった。
- (2) 流速 1.5m/s、水深 0.6m の流水中で、通路幅 2.4m で1人で立っている状態と横に2人並んでいる状態を比較すると、2人並ぶと人体前面で水深がせき上げされ1人の人間にかかる流体力は約 1.20 倍に増加する。さらに通路幅 1.8m 横に2人並んだ場合、通路幅 2.4m 2人のケースと比較して流体力は約 1.13 倍に増加し、狭い水路で人数が増えると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。

- (3) 転倒耐久力と抗力のつり合い式から直接、流水に流される危険度を判定した。幅が狭い通路で人数が増えると水深せき上げで流体力が増し、立位姿勢を維持するのが困難となることがわかった。通路幅 2.4m で1人のケースでは水深 0.6m で流速 1.5m/s、水深 0.4m で流速 2.0m/s、水深 0.2m で流速 4.0m/s、通路幅 1.8m で横に2人並んだケースでは水深 0.6m で流速 1.0m/s、水深 0.4m で流速 1.4m/s、水深 0.2m で流速 3.5m/s で直立姿勢を維持することが困難となる。
- (4) 上流向きと横向きの直立姿勢では横向きの直立姿勢の方が転倒耐力が少し小さくなる。横向きの直立から歩行姿勢になると耐久力 R が減少する、さらに歩行姿勢で片足をあげると耐久力 R が大幅に減少している。
- (5) 流水に向かって避難するより流水を横断避難する方が転倒危険性が高いことがわかった。横向きの転倒限界曲線から水深 0.2m では流水を横断歩行しようとすると、歩行状態で片足をあげた姿勢になると流速 2.6m/s で転倒してしまうことがわかった。

参考文献

- 1) 尾崎平, 浅野統弘, 石垣泰輔, 戸田圭一: 短時間集中豪雨に伴う内水氾濫による地下街浸水特性の考察, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol. 72, pp. I_1417-1422, 2014.
- 2) 村瀬将隆, 中島勇介, 武田誠, 川池健司, 松尾直規: 地下鉄を考慮した名古屋と大阪の大規模浸水解析, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol. 73, pp. I_1441-I_1446, 2017.
- 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) 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.
- 5) 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.
- 6) 岡本隆明, 戸田圭一, 岡宗佑, 當麻泰史: 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 地下空間シンポジウム論文・報告集, 第25巻, pp.196-201, 2020.

EXPERIMENT STUDY ON FALLING DOWN RISK OF EVACUATION WALKING IN FLOODED UNDERGROUND PASS

Chikara WATANABE, Takaaki OKAMOTO and Sosuke OKA

In recent years, more torrential rains and strong typhoons have occurred frequently. The rainfall events can cause flash floods in an underground area. Therefore, it is very important to study the falling down risk of evacuation walking in flood water. In this study, two kinds of experiments were conducted focusing on "group evacuation" and "water rushing against the side of the body". First, we conducted the flume experiments using a human body model (1/6 scale). The drag force exerted on the human body was measured in a narrow channel by changing the direction of the body, flow velocity, water depth and number of people. Secondly, we conducted the measurement experiment of the fall resistance using a cloth and an electronic weighing machine. We measured the endurance to keep the body from falling down against the drag force. The experiment data showed the critical condition for falling down in evacuation walking.