

洪水氾濫時の地下階段部の危険性に関する実験的研究

Hydraulic Experiment for Evacuation Possibility through Underground Stairs in Flood Inundation

大八木亮¹・間畠真嗣²・戸田圭一³・谷美智成⁴

Ryo OYAGI, Shinji AIHATA, Keiichi TODA and Michinari TANI

A hydraulic experiment is conducted by use of the undistorted stairs models with 1/10 scale. The stairs models used have different shapes. The water depth and velocity of inundation flow through stairs are measured at several points under different discharge condition. Evacuation possibility of a human being is examined based on the depth and velocity. It is found that evacuation possibility is influenced by the discharge per unit width to stairs, not by shapes of stairs greatly, and according to the existing criteria it seems impossible to pass through stairs at the overflow depth of 30cm.

「Key Words」 *underground space, urban flood, hydraulic experiment, stairs, evacuation*

1. 緒言

1999 年, 2003 年の福岡水害や 2000 年の東海水害のような大規模な都市型水害が近年頻発している. 市内中心部での洪水氾濫発生時には, 高度に発達した都市構造の影響を受けて, 地上の氾濫水は複雑な挙動を示すとともに, ビルの地下室, 地下街や地下鉄といった地下空間に氾濫水が流入する. その際, 地下空間にいる人間は主に階段を利用して地上へ避難することになるが, 同時に, 氾濫水は階段をとおして地下空間に流下するため, 避難経路の階段が氾濫水の流入経路と重なる. そのため, 氾濫水の流入規模や階段形状など, 階段を取り巻くさまざまな条件が人間の避難にどのような影響を及ぼすか, ということを考えておくことは重要である.

館ら¹⁾は, まず階段の流況を調べるため, 縮尺が 1/3 の階段模型を用いて水理実験を行った. この模型は勾配が 2:3, 全部で 17 段からなり, 踊り場等のない一様な形状である. これにより, 階段の地点別水深, および, 歩行者の足に見立てた丸棒を用い, 棒にかかる力を測定した. さらに, 全部で 5 段からなる実物大の階段模型を用い, 被験者を用いた歩行実験を行った. 被験者は 20 代から 40 代の 14 名(うち女性 3 名)で行い, アンケートの結果から流速の 2 乗と階段ステップ中央からの水深の積が 1.5 を超えると歩行困難としている. しかし, 階段の段数が 5 段と少ないため, 現実の階段より恐怖感が少なくなることを指摘している. 井上ら²⁾は京都市御池地下街を対象とした縮尺 1/30 の水理模型の階段部を利用して実験を行った. 彼らはさまざまな形状の階段に対して, その踊り場や階段ステップ部分での水深, 流速を測定している. しかし, 縮尺が 1/30 と決して大きくはなく, また, その水理模型は地下街の浸水実験用に作られていて階段部の測定地点に制約があった.

「キーワード」 地下空間, 都市型水害, 水理実験, 階段, 避難

1 正会員 工修 三井住友建設

2 学生員 京都大学大学院

3 正会員 Ph.D. 京都大学教授 防災研究所

4 非会員 日本工業試験所

本研究では氾濫水の流入によって階段部の避難がどの程度困難になるかを詳しく調べるために、縮尺 1/10 の階段模型で実験を行う。そして、流入の際の越流水深、階段の形状を変えながら水深と流速を地点別に測定する。そして、その実験結果を館ら¹⁾による従来の指標に適用し、階段で避難することの難しさが、さまざまな条件によってどのように変化するか、ということについて考察する。

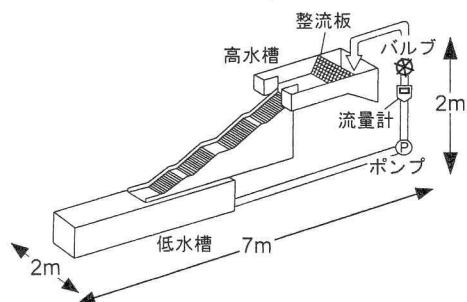


図-1 階段実験模型の概要図

2. 模型の概要

実験で用いた水利模型は京都大学防災研究所宇治川水利実験所に設置された縮尺 1/10 のものである。フルードの相似則を適用したときの模型値と実物値の関係を以下に示す。

$$\text{長さ } L_m / L_p = 1/10$$

$$\text{流速 } V_m / V_p = 1/\sqrt{10} = 1/3.16$$

$$\text{時間 } T_m / T_p = 1/\sqrt{10} = 1/3.16$$

$$\text{流量 } Q_m / Q_p = 1/100\sqrt{10} = 1/316$$

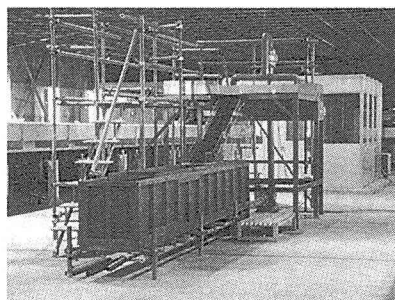


写真-1 階段実験模型の全体写真

ただし、 m は模型の値を、 p は実物の値を表す。

まず、模型装置全体の構造について述べる。図-1 に模型の概要図を示す。写真-1 は模型装置の全体写真である。低水槽の水は電動式のポンプを通して高水槽へと汲み上げられる。その際、バルブにより汲み上げる流量を調節できる。汲み上げられた水は高水槽に流入する前に整流板を通る。整流板は金属製で直径 5mm 程度の穴が無数に開いており、その穴を通して高水槽の水面が安定する。なお、階段の最上段と高水槽の底面は同一平面上にあり、階段の最上段と高水槽の底面の間に段差は存在しない。つまり、地上の水深に相当する高水槽の水深が、そのまま階段を流下する際の越流水深となる。そして、階段を流下した水が低水槽に流れ落ち、水が循環する仕組みとなっている。

次に階段部について述べる。模型はアクリル製で、実際に存在する階段形状を基本とした上で、勾配や踊り場の長さが異なる形状についても、階段部のみを交換することで実験を行えるようにした。形状はエスカレーター、勾配が 1:2 の階段、勾配が 1:4 の階段の 3 種類である。そのうちエスカレーターと勾配が 1:2 の階段が京都御池地下街に実際に存在する階段である。エスカレーターは上り用と下り用の 2 基存在し、ともに模型で再

表-1 階段、エスカレーターの各諸元(模型値)

	実際に存在する階段		勾配や踊り場の長さを変えた階段		
	エスカレーター	階段 (勾配 1:2)	階段 (勾配 1:2)	階段 (勾配 1:2)	階段 (勾配 1:4)
全高	94.5cm	94.5cm	94.5cm	94.5cm	94.5cm
全長	180cm	271cm	219cm	323cm	460cm
横幅	8.0cm (上り), 10.1cm (下り)	32.1cm	32.1cm	32.1cm	32.1cm
蹴上高 ¹⁾	2.1cm	1.5cm	1.5cm	1.5cm	1.5cm
踏み面 ²⁾	4.0cm	3.0cm	3.0cm	3.0cm	6.0cm
段数	45 段	63 段	63 段	63 段	63 段
踊り場	0cm	52cm	0cm	104cm	52cm

*1) 階段 1 ステップあたりの高さ

*2) 階段 1 ステップあたりの奥行き

現されている．また，勾配が 1:2 の階段については，階段途中の踊り場 1 箇所，踊り場がないもの(0cm)，実物に合わせた長さ(52cm)，実物の 2 倍の長さ(104cm)の 3 段階に調節できる．勾配が 1:4 のものについては 52cm で固定されている．表-1 および図-2，図-3 に階段，エスカレーターの各諸元をまとめる．

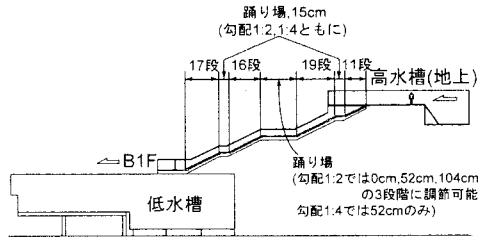


図-2 階段の概要

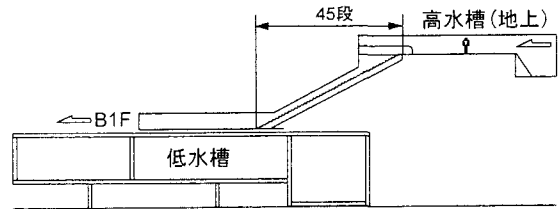


図-3 エスカレーターの概要

3. 実験方法

実験では地点ごとの水深と流速を流入流量別，階段の形状別に測定した．以下の段落ち式を用いて高水槽の水深 1cm，2cm，3cm，4cm，5cm に対応する流量を与えて実験を行った．

$$Q = \mu B h \sqrt{gh} \quad (1)$$

ここで， B :階段の横幅， h :高水槽の水深， g :重力加速度である．また， μ は流量係数で， $\mu = 0.544$ とした．表-2 に高水槽の水深とポンプの流量との関係を示す．

階段の形状は，エスカレーターと勾配 1:2 の階段と 1:4 の階段，1:2 の階段については踊り場が 0cm，52cm，104cm の 3 種類あるため，あわせて 5 通りについて実験した(表-1 参照)．

まず，水深の測定方法について述べる．図-4 のように，階段ステップの最も外側から鉛直方向の水深(h_0)を測定した．水位変動が激しいため，測定には定規を用い，変動する水深の平均値を測定した．ポイントゲージを用いず定規を用いたのは，この平均値を測定することが困難だったためである．次に，測定した水深(h_0)を水面方向に以下のように補正した．まず水面形を階段と同じ勾配で一様な平面と仮定した．そして，階段ステップ外縁部から水面までの距離を補正後の水深(h_1)とした．つまり，階段の勾配を 1: n として， h_1 を以下のように求めた．

表-2 高水槽の水深とポンプの流量の関係

h(cm)	エスカレーター		階段	
	q(cm ³ /s/cm)	Q(cm ³ /s)	q(cm ³ /s/cm)	Q(cm ³ /s)
1.0	17.0	0.31×10 ³	17.0	0.55×10 ³
2.0	48.2	0.87×10 ³	48.2	1.55×10 ³
3.0	88.5	1.60×10 ³	88.5	2.84×10 ³
4.0	136	2.47×10 ³	136	4.37×10 ³
5.0	190	3.45×10 ³	190	6.11×10 ³

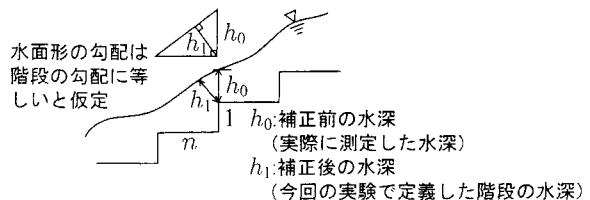


図-4 水深の定義

$$h_1 = \frac{n}{\sqrt{n^2 + 1}} h_0 \quad (2)$$

この実験では h_1 を階段の水深と定義した．

次に，流速の測定方法について述べる．流速は水面に浮かべた紙片を高速度ビデオカメラで撮影することで測定した．紙片はビデオカメラに映りやすいようにオレンジ色に着色した．高水槽の水深が大きいケース(3cm，4cm，5cm)には約 1cm 四方の紙片を用い，小さいケース(1cm)には約 5mm 四方の紙片を用いた．これは，水深が大きいケースで小さな紙片を用いると水表面の激しい変動によりビデオカメラに映りにくく，水深が小さい

ケースで大きな紙片を用いると流量に対して紙片が大きすぎ流れにくいのである。ビデオカメラは1秒間を1000コマに分割できるものであり、これを用いて階段模型の真上に組んだ高さ約4mの足場の上から撮影した。そして、測定地点を含む10cm区間を紙片が通過するのに要する時間を測定することで流速を測定した。

水深、流速ともに壁面の近傍以外はとくに変化が見られなかったので横断方向についてはとくに区別することなく水路中央で測定した。水深は1地点について3回測定し、その平均値をその地点の水深とした。流速は1地点について5回測定し、その最大値と最小値を除いた3個のデータの平均値をその地点の流速とした。

4. 実験結果と考察

4.1 実在する階段、エスカレーター

実在する階段、エスカレーターの実験結果について考察を行う。階段(勾配 1:2, 踊り場 52cm)とエスカレーターの水深と流速を高水槽の水深別にそれぞれ図-5、図-6に示す。測点位置は図中に示す階段の縦断図と対応している。また、右端の点は高水槽での水深を示している。

まず階段について述べる。写真-2は高水槽の水深3cmのときの流況である。縦断方向の変化を見ると、いずれのケースでも高水槽から流下すると同時に流速が急上昇し、水深が急激に減少する。そして、その後は水深、流速ともに大きくは変化していない。高水槽の水深の変化に対しては、高水槽の水深が大きくなるにしたがって、水深、流速ともにほぼ全地点で顕著に増加する。縦断方向の階段形状よりも単位幅あたりの流入流量が流況に大きな影響を及ぼしていることがわかる。流速に注目すると、高水槽の水深が1cmのケースでは下流に行くにしたがって流速がわずかに減少している。それに対して高水槽の水深が4cmや5cmのケースのように、階段への流入流量が大きくなると、下流に行くにしたがって流速がわずかに増加している。これは、流入流量が小さいときは階

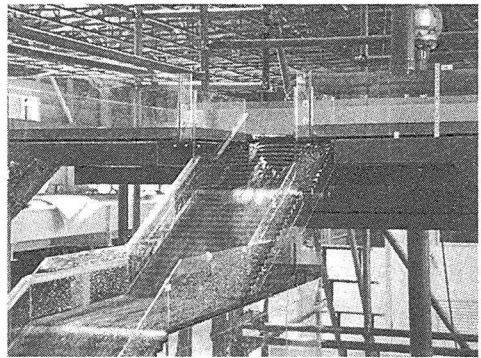


写真-2 高水槽の水深3cmのときの流況
(勾配 1:2, 踊り場 52cmの階段)

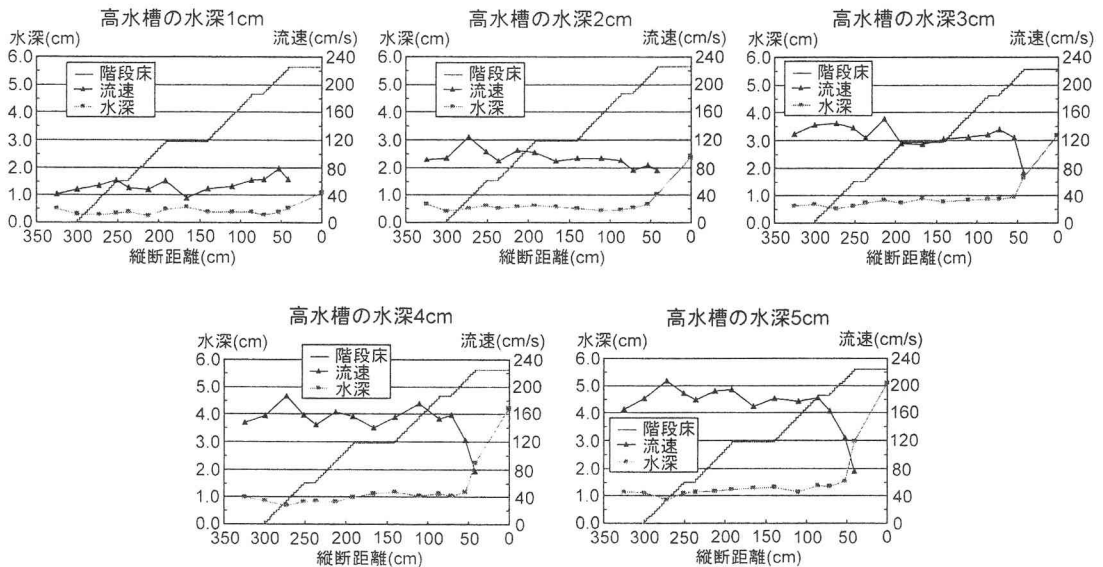


図-5 階段の水深と流速(勾配 1:2, 踊り場 52cm)

段のステップや踊り場などの形状により水が減勢するのに対し、流入流量が大きくなるとその効果がなくなるためであると考えられる。また、階段中央部の踊り場を見ると踊り場中央部の流速は最大で2割程度減少するものの、踊り場上流端と下流端を比べた場合、踊り場の前後で流速はほとんど変化しないことがわかる。つまり、踊り場には減勢効果がないことがわかる。水深に注目しても、高水槽の水深が大きいケースほど下流に行くほど水深が減少していく。つまり、流入流量が増加すると、流速が下流方向に向かって加速するということが確認された。また、踊り場下流端は踊り場中央部よりも流速が増加する傾向があるのに対し、水深は流速の増減ほど顕著ではない。これは、踊り場を超えた水はしばらくの間階段を沿わずに流れ、階段と水表面との間に空隙または気泡が存在するため、水深測定の際に大きな誤差が生じたからではないかと考えられる。

次にエスカレーターについて述べる。写真-3に高水槽の水深3cmのときの流況を示す。エスカレーターについても階段の場合と同様、縦断方向に見ると、高水槽から流下すると同時に流速が急上昇し、水深が急激に減少する。そして、その後は水深、流速ともに大きくは変化していない。高水槽の水深の変化に対しては、高水槽の水深が大きくなると、ほぼ全ての地点で水深、流速が大きく増加する傾向も階段の場合と同様である。エスカレーターには踊り場が存在しないが、水深や流速は一定にならず、増減している。階段の場合と比較すると、勾配の差がほとんどないにもかかわらず、むしろ流速は小さく、水深は大きく出る傾向にある。これは階段よりもエスカレーターのほうがステップ1段あたりの大きさが大きく、それにより段差の減勢効果が大きくなったためではないかと考えられる。ただし、階段の場合と同様、これらの階段形状が水深、流速に及ぼす影響はわずかであり、流況は高水槽の水深、つまり流入する単位幅流量に大きく左右されることがわかった。

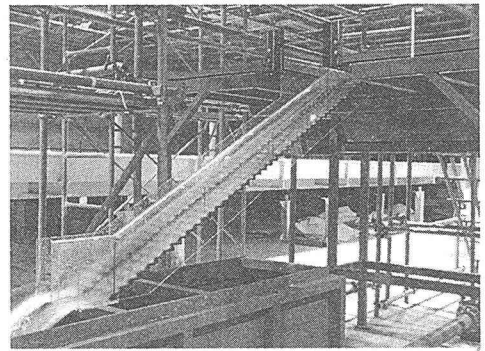


写真-3 高水槽の水深3cmのときの流況
(エスカレーター)

4.2 階段形状の違いによる比較

上記のように、階段とエスカレーターの形状の違いではさほど大きな変化が見られなかった。ここでは階段の形状を大きく変えたものと4.1で述べた階段との比較を行う。図-7に勾配1:2で踊り場0cm、52cm、104cmの階段の水深、流速の関係を、図-8に勾配1:2、勾配1:4の階段の水深、流速の関係を示す。

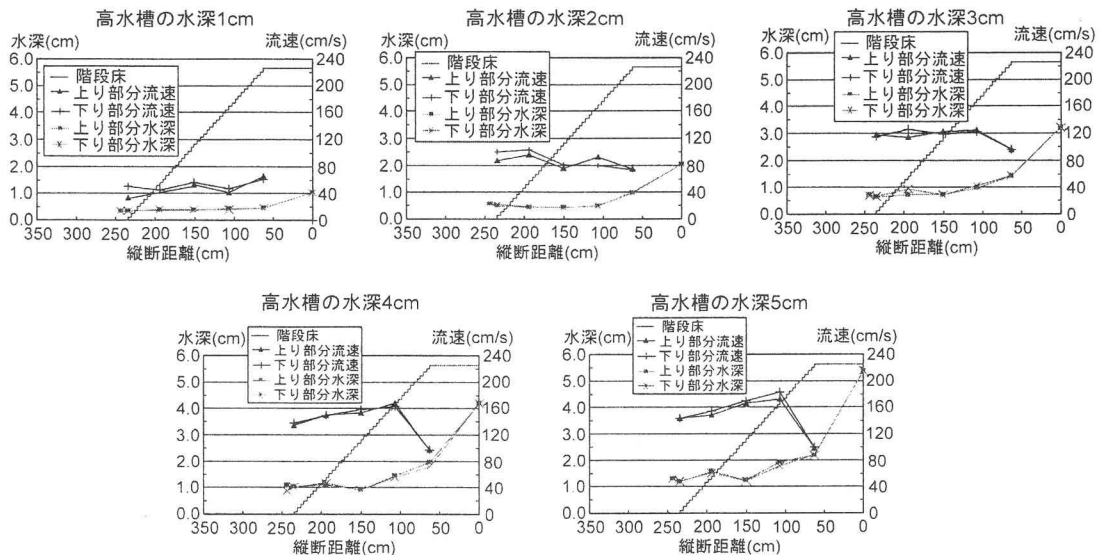


図-6 エスカレーターの水深と流速

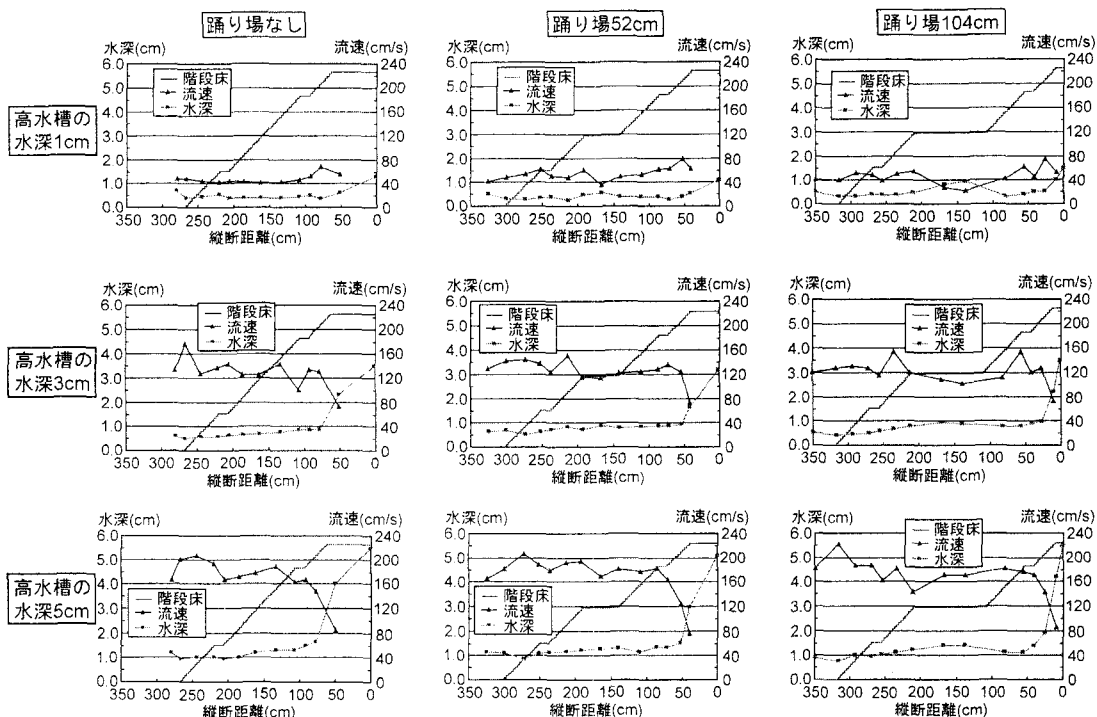


図-7 勾配 1:2 で踊り場 0cm, 52cm, 104cm の階段の水深と流速

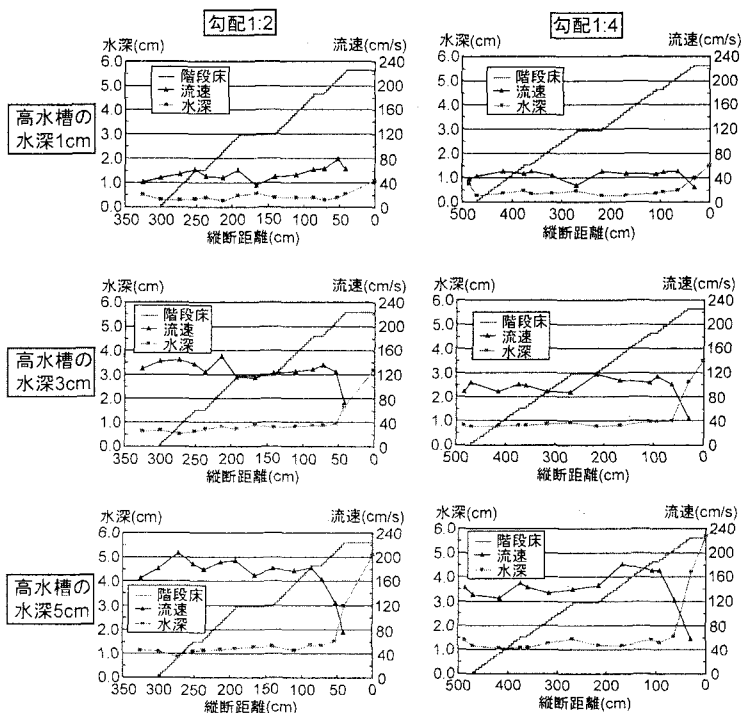


図-8 勾配 1:2, 勾配 1:4(踊り場 52cm)の階段の水深, 流速

まず、踊り場の長さが異なるケースについて比較する。踊り場を長くするにしたがって、踊り場中央部で流速が減少する傾向が強くなる。しかし、踊り場が52cmの場合も104cmの場合も、踊り場の上流端と下流端ではほとんど流速に変化がなく、踊り場の長さを変化させても流況を大きく変化させるほどの効果がないことがわかった。

次に、階段の勾配が異なったケースについて比較する。勾配が1:2の場合は流入流量が大きくなると、下流に行くにしたがって流速が増加する傾向があったのに対し、勾配が1:4の場合は流入流量が大きくなっても流速は増加しない。勾配1:4では踊り場の上流端と下流端を比べるとおおむね2割程度流速が減少する傾向にあり、若干ではあるが減勢効果があるといえる。勾配1:4の場合は勾配1:2の場合に対し、多くの地点で流速が小さくなる傾向にあるが、その割合は1割からせいぜい2割程度であり、勾配の違いが流況を大きく変えたとまではいえない。

以上のように流況は階段の形状によって少しは変化するものの、その差異は決して小さくなく、単位幅あたりの流入流量が支配的であることがわかった。

5. 階段部の危険性

館ら¹⁾は階段を流下する氾濫水が歩行者に与える危険性について実験を行った。その結果、階段上の流速を u 、踏面中心部とそこから鉛直方向に見た水面との距離を h としたとき、 u^2h が $1.5(\text{m}^3/\text{s}^2)$ 程度を超えると足をとられ歩行が困難になるとしている。ここでは $u^2h = 1.5$ を一つの指標として用いる。ただし、この値は階段

の形状や個人差により異なる、ある程度の幅を持った関係であることに留意する必要がある。また、実験では階段ステップ外縁部から鉛直方向の水深(h_0)を測定した。しかし、この指標では水深を踏面中心部から鉛直方向の水面までの距離として定義している。そこで、実験で測定した水深(h_0)の1段上(または1段下)の水深も h_0 に等しいと考え、図-9のように踏面中心部から鉛直方向の水面までの距離(h_2)を実験で測定した水深(h_0)と h_0 に蹴上高(s)を加えたもの($h_0 + s$)の平均と考え、以下のように定義した。

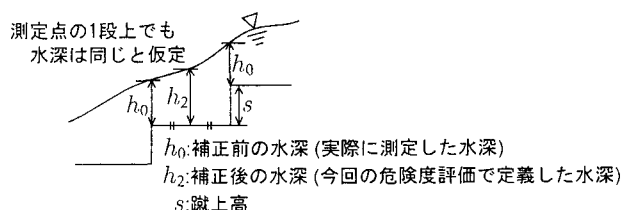


図-9 水深の変換

$$h_2 = \frac{h_0 + (h_0 + s)}{2} \quad (3)$$

式(3)で定義した h_2 を館ら¹⁾の h とした。なお、この章では、実験で測定した水深、流速を、フルードの相似則に従い実物値に換算して表記する。

実際に存在する階段とエスカレーターに対して、実験結果をもとに考察する。実験で測定した流速 u と水深 h の関係を越流水深ごとに図-10に示す。図中の各点は階段部の実験で測定したデータを測定した地点に関係なくすべてプロットしたものである。そして、 $u^2h \geq 1.5$ のときを避難不可能とし、 $u^2h < 1.5$ のときを避難可能とする。越流水深が上昇するほど測定結果にばらつきが出てくるものの、おおむね測定箇所に関係なくほぼ一定の値をとることがわかる。また、階段とエスカレーターを比較すると、エスカレーターのほうが、流速が小さく、水深が大きく出る傾向にある。これは越流水深が上昇するほどその傾向は顕著になる。越流水深が10cmと20cmのケースでは全ての測定箇所でも避難可能となっているのに対し、越流水深が30cmのケースではほとんど全ての点で避難不可能となっている。そして、越流水深が大きいケース(40cm, 50cm)では全ての測定箇所でも避難不可能となっている。通行(避難)できるかどうかの限界となる越流水深は30cm程度であると思われる。なお、階段全体で避難不可能とならなくても、どこか1箇所でも通行できない箇所が存在すると、その階段を通して避難することはできなくなることも留意しておく必要がある。

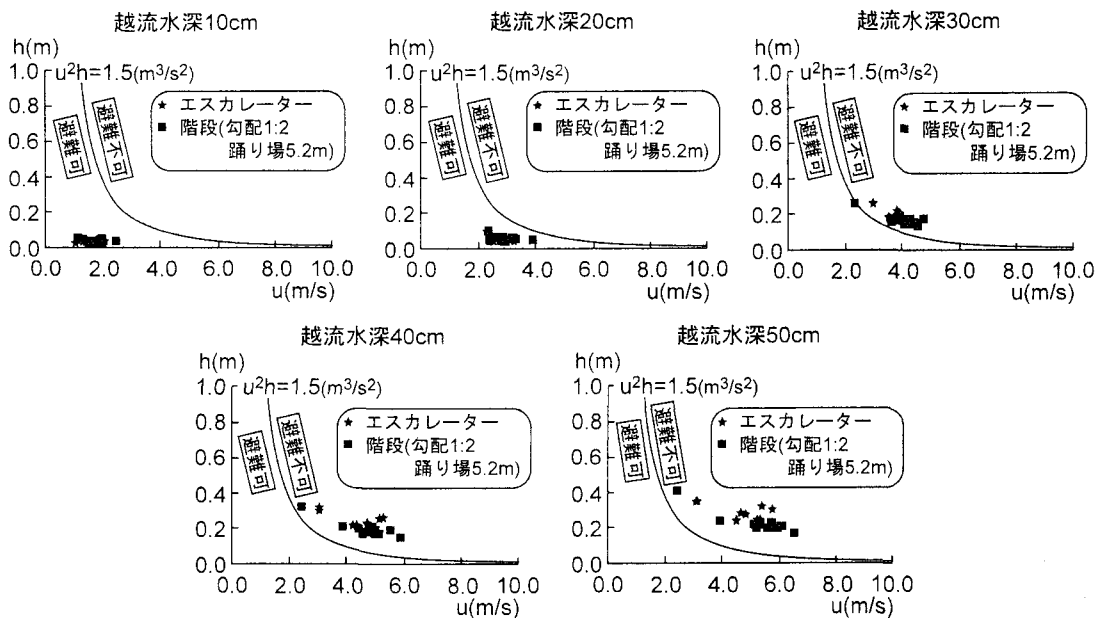


図-10 流速の水深の関係

6. 結言

本研究を通して得られた結論は以下のとおりである。

- (1) 階段部での避難のしやすさは、階段形状の影響は大きくは受けず、階段部への単位幅流入流量が支配的であることがわかった。
- (2) 階段部の実験で測定した結果を階段部の避難限界を示す指標に適用すると、越流水深 30cm 程度の流入流量が階段部の通行が困難となる限界であることがわかった。

謝辞：本研究の一部は(財)国土技術研究センターの研究開発助成の補助を受けた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 舘 健一郎・武富一秀・水草浩一・末次忠司・吉谷純一：階段を通じた地下空間への氾濫水流入に関する実験，土木技術資料 43-2 pp.22-27, 2001.
- 2) 井上和也・戸田圭一・中井 勉・竹村典久・大八木 亮：地下空間への浸水過程について，京都大学防災研究所年報 第 46 号 B, pp.263-273, 2003.