

## ◆ 危機管理特集 ◆

## 階段を通じた地下空間への氾濫水流入に関する実験

館健一郎\* 武富一秀\*\* 水草浩一\*\*\* 末次忠司\*\*\*\* 吉谷純一\*\*\*\*\*

## 1. はじめに

平成 11 年 6 月の福岡豪雨災害では、河川・下水道からの氾濫により地下街やビルの地下室への浸水が多数生じた。この災害では、ビルの地下 1 階にいた人が浸水により死亡するという痛ましい事故が起こった。さらに、同年 7 月に東京都新宿区で発生した豪雨でも、家屋の地下室の浸水により人が死亡した。地下空間の浸水被害そのものは従来から発生していたものの、これらの災害を契機として、「都市型地下水害」が注目されるようになった。

地下水害の実態及び対策全般については、参考文献<sup>1)</sup>に詳しくまとめられている。都市内の地下空間は公共、民有を問わず無数にあるが、鉄道等一部の公共施設を除き多くは対策がとられていないのが実状である。したがって、前述のような被害は、全国至る所の地下空間において発生する可能性がある。今後、地下空間の浸水危険性を認識させ、浸水対策の実施や適切な避難行動の啓蒙を進めるためには、地下空間の浸水により生じると考えられる事態についての情報提供が不可欠である。そのためには、まず、地下空間への氾濫水の流入特性を明らかにしておかなければならない。

地下空間の浸水に関する水理学的検討としては、地下街の浸水過程を取り込んだ氾濫解析<sup>2)</sup>や、階段入口から地下へと流入する流量の評価式の検討<sup>3)</sup>などが行われている。本研究では、特に、地下空間への氾濫水の流入が人に及ぼす危険性を把握するため、模型実験による検討を行った。

## 2. 研究方法

地下空間の出入口(地上と地下を繋ぐ階段部分)を模擬した模型を実験水路に設置し、それを用いて氾濫水が地下空間へ流入する際の氾濫流の挙動に関する実験を行った。

縮尺模型の地上階段出入口部分から氾濫水を流入させ、地上部分での水深及び流入流量を測定し、両者の関係から地下空間への流入量の推定式を

作成した。また、階段上を流下する流れの流況観察、流速・水深分布の計測より、階段上の氾濫水の流れ方を検討した。

さらに、階段上の人の足の模型に加わる力を計測し、歩行者への危険性を検討するとともに、実物大を想定した階段模型を用いた被験者による歩行実験を行って、階段上の歩行限界となる単位幅流量や流体力を実測した。

## 3. 縮尺模型実験

## 3.1 模型概要

階段模型(木製)は、階段部分と地上アプローチ部分からなる。段数は 17 段、階段横幅は 1.00m(実物 3.00m)であり、実物の 1/3 縮尺を想定している。一般的な階段の値を参考に、蹴上(一段の高さ)は 0.06m(実物 0.18m)、踏み面(一段の奥行き)は 0.09m(実物 0.27m)とした(図-1)。模型は既存の実験水路の内部に設置した。

模型縮尺を考慮するに際しては、フルードの相似則を適用した。本報告では、実験に関する全ての数値を実物値で示している。

## 3.2 地下空間への流入量推定式の作成

今回の実験で、地下空間の出入口に地面よりやや高いステップ(高さ 0.18m、奥行き 0.90m)を設けた場合について、階段模型の地上アプローチ部分の水位  $H$  と流入量  $Q$  との関係性を求めた結果、

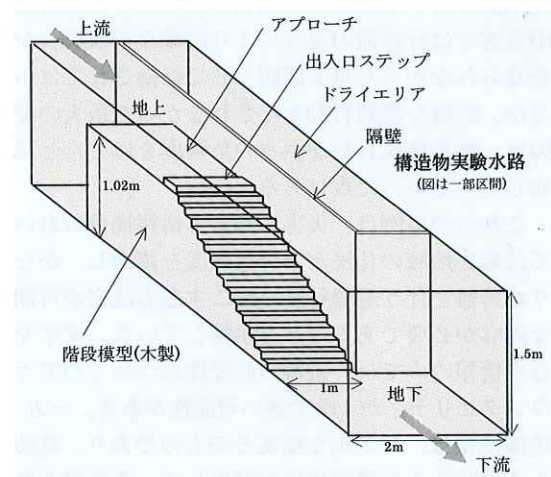


図-1 模型概要

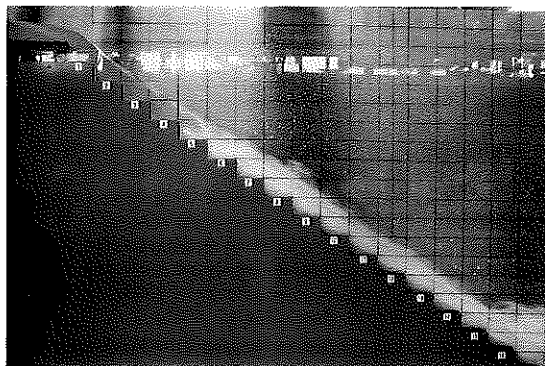


写真-1 階段上の流れ (単位幅流量は実物スケールで  $0.312\text{m}^2/\text{s}$ )  
 流入量  $Q$  は、概ね、 $H$  の 1.65 乗に比例していた。  
 水位  $H$  は出入口ステップの下流側の端から 1.5m 上流側の位置における値であり、地上アプローチ部分の高さを基準としている。水位  $H$  は地上の浸水深に対応するものと考えられる。通常用いられている流量公式では  $Q$  は  $H$  の  $3/2$  乗となる<sup>4)</sup> ことを考えると、ステップを有する階段出入口の流れでは、水位が高くなるほど流れ込み易さの度合いが大きくなる傾向にあるといえる。実験結果より回帰式を求めると、地上浸水位  $H$  と流入量  $Q$  の関係は次のように表せる。

$$Q = 1.59BH^{1.65} \quad (1)$$

ここに、 $B$  は階段出入口の幅である。

### 3.3 地下空間の浸水にかかる時間の検討

ここで、氾濫水の流入による地下空間内の水深変化を検討してみる。

まず、出入口ステップを有する場合の地下室への流入量  $Q$  を次の式形で表す。

$$Q = C_1BH^{C_2} \quad (2)$$

ここに、 $H$  は地上の浸水深であり、 $B$  は階段出入口の幅、 $C_1$ 、 $C_2$  は係数である (前述の実験結果では、ステップを有する場合  $C_1$  は 1.59、 $C_2$  は 1.65)。

また、地下室入口からの流入量  $Q$  と地下空間内の浸水の関係は次のように表せる。

$$Q = S \frac{dH_B(t)}{dt} \quad (3)$$

ここに、 $S$  は地下空間の床面積、 $H_B(t)$  は地下空間内の水深である。

したがって、ステップ高さを  $h_s$  とし、道路上浸水深の上昇速度を  $V(\text{m/s})$  とすると、道路上の浸水が始まってから  $t$  (秒) 後の地下空間内の水深

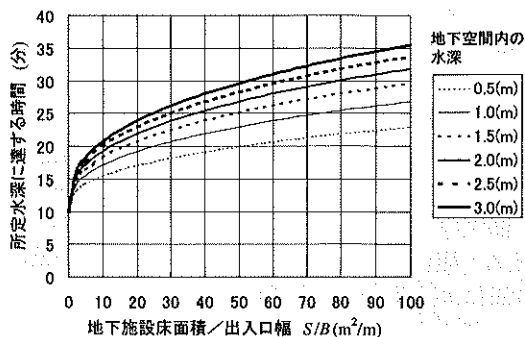


図-2 地下空間内の水深変化の計算例

$H_B$  は次のように表現できる。

$$\begin{cases} H_B = 0 & t < \frac{h_s}{V} \quad (4) \\ H_B = \frac{C_1 B}{(C_2 + 1) S V} (Vt - h_s)^{C_2 + 1} & t \geq \frac{h_s}{V} \quad (5) \end{cases}$$

また、上式より、地下空間内の水深が  $H_B$  になるまでにかかる時間は次のように表せる。

$$t = \frac{h_s}{V} + \left\{ \frac{(C_2 + 1) S H_B}{C_1 B V C_2} \right\}^{\frac{1}{C_2 + 1}} \quad (6)$$

この式を用いれば、地下室の広さ、地下室入口の幅、水面上昇速度等に基づいて、地下室内の水深の時間変化を求めることができる。

平成 11 年に発生した地下室での事故では、浸水開始から極めて短時間で氾濫水が流入したために避難の時間的余裕が無かったことが致命的であった。地下空間内の水深が所定の値に達するまでの時間と、地下空間の床面積と階段出入口幅の比  $S/B$  ( $\text{m}^2/\text{m}$ ) との関係でみたのが図-2 である。ここでは、都市河川研究室の実験結果より係数  $C_1$  は 1.59、 $C_2$  は 1.65 と置いており、ステップ高さ  $h_s$  は 20cm、道路上浸水深の上昇速度  $V$  は  $2\text{cm}/\text{分}$  としている。なお、平成 11 年の事故での  $S/B$  は、福岡で約  $20\text{m}^2/\text{m}$  ( $18\text{m}^2/\text{m}$ )、新宿で約  $50\text{m}^2/\text{m}$  ( $45\text{m}^2/\text{m}$ ) であった。

図-2 から分かるとおり、地下空間内の水深が天井 (3m) に達するまでの時間は、 $S/B$  の値が  $20\text{m}^2/\text{m}$ 、 $50\text{m}^2/\text{m}$  それぞれに対して、道路浸水開始から 24 分、30 分 (ステップを越えて流入が始まってからなら 14 分、20 分) である。 $S/B$  の値が小さくなるほど、すなわち、地下空間の床面積に対して階段出入口の幅が大きいほど、地下空間内の水深上昇速度は大きい。なお、地下空間内に扉がある場合、外開き扉の場合は扉内外の水位差が 26cm、内開き扉の場合は 47cm 程度で開くことが出来なくなる<sup>5)</sup> ことから、浸水に気付いてからで

は扉が開かなくなっている可能性があり、外部への避難は困難であるといえる。

### 3.4 階段上の流れの特性

次に、階段上の流れに関して考察する。

個々の段上の流れは、**流況 A**：階段に沿う流れ（水表面には段差に応じた水面波）、**流況 B**：階段踏み面から離れた水脈が直下の段の踏み面に落下する流れ（水脈と踏み面の間には空隙）、**流況 C**：踏み面上に渦（可視）を発生し、水表面が気泡の混入により白濁している流れ、**流況 D**：水表面が階段勾配と等しくなり踏み面上に渦（不可視）を発生する流れに分類できる（図-3）。

図-4 に、落差  $z$  と実験で計測された踏み面上（踏み面中心位置）水深  $h$  との関係を示す。落差  $z$  は階段最上段高さ と 踏み面高さの差

であり、例えば、今回のモデルの蹴上は 0.18m なので、地下空間の出入口ステップを 0 段として 17 段目の踏み面の落差  $z$  は 3.06m となる。図-4 には水深計測点における流況区分も示している。流量が増加するにつれて水深が増加している。

各流量ケースとも、階段上を流下していくにつれ、重力により加速され、水深が低下する。また、流量によっては流下過程で流況タイプが変化する。例えば、単位幅流量が  $0.208\text{m}^2/\text{s}$ 、 $0.312\text{m}^2/\text{s}$  のケースでは、最上段から流入した直後は流況 A であるが、すぐに流況 D に変換し、さらに数段流下すると、空気混入が始まり流況 C に変化する。

概ね落差  $z$  が 2m 以上になると、水深の変化は少なくなる傾向がある。この状態を等流（重力と段差による損失が釣り合った状態）と考えれば、等流での流れは流量が増加するにつれて流況 B → 流況 C → 流況 D へと変化する。すなわち、流量が小さい場合（今回の実験では単位幅流量が  $0.104\text{m}^2/\text{s}$ ）は階段の段差を水脈が落ちる流れ、流量が増加する（今回の実験では単位幅流量が  $0.208\text{m}^2/\text{s} \sim 0.520\text{m}^2/\text{s}$ ）と段差により乱れが生じて水表面に飛沫を発生する流れ、さらに流量が

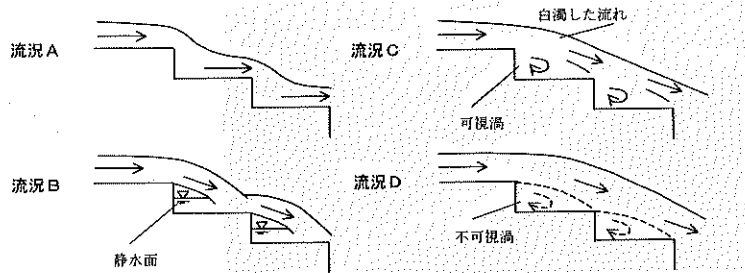


図-3 階段上流況のタイプ

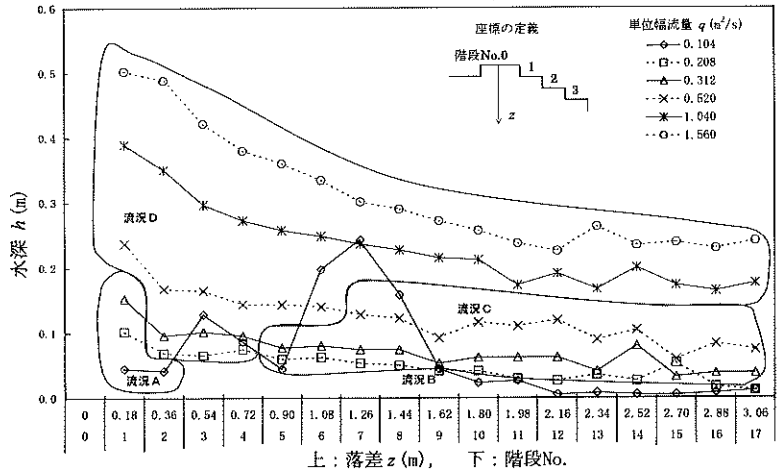


図-4 踏み面上水深  $h$  及び流況タイプと落差  $z$  の関係

増加する（今回の実験では単位幅流量が  $1.040\text{m}^2/\text{s}$  以上）と段差が粗度として働くような流れとなる。なお、流況 A は、流量が小さい場合で、重力により加速される前の段階で生じる過渡的な流況であるといえる。

### 3.5 階段上の歩行危険性の推定

地下空間へ流入する氾濫水による階段上歩行者への危険性を検討するため、階段上の流れが歩行者の足に加える力の推定を試みた。

そのため、階段模型上を流下する水により人の足を模した直径 4cm の丸棒（直径 12cm の人の足を想定）に加わる力を計測した。模型階段上の氾濫水が丸棒の一端に及ぼす力のモーメントと、回転軸を挟んだもう一端に加わる力のモーメントの釣り合いから、氾濫水が丸棒に及ぼす力を推定する方法を用いた（図-5）。丸棒にかかる力は、ピアノ線で繋いだロードセル（定格容量 19.61N）により引張力として計測した。円柱模型を設置したのは、最上段から 9 段目の踏み面上（落差  $z = 1.62\text{m}$ ）である。この測定結果を用い、階段上の氾濫水の流れから人の足に加わる力を推定する。

階段上の流れにより円柱（人の足）に加わる抗

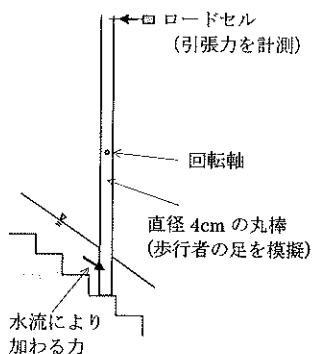


図-5 歩行者の足の模型に加わる力の計測

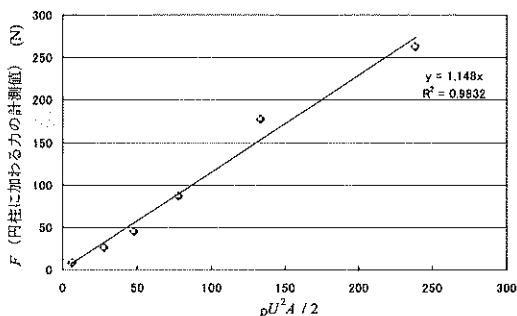


図-6  $F$  (ロードセル計算値より求めた) と  $\rho U^2 A / 2$  (踏み面上) の関係  
力を  $F$  とし、 $F$  を以下のように表す。

$$F = C_d \frac{\rho U^2 A}{2} \quad (7)$$

ここに、 $C_d$  は階段上流れに対する円柱の抗力係数、 $\rho$  は水の密度、 $U$  は階段踏み面上の流速 (水平方向成分)、 $A$  は円柱の流れ方向の投影面積である。

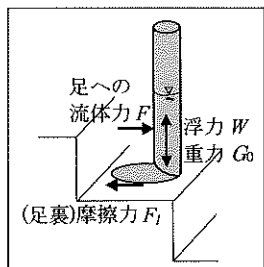


図-7 人に加わる力  
仮定として、足の裏に働く摩擦力が足に加わる抗力  $F$  よりも大きければ、歩行者が流れに耐えられるものとする。すなわち、階段上の歩行者が流れに耐えられる (少なくとも立っていられる) 条件は、以下ようになる (図-7)。

$$F < F_l \quad (8)$$

$F_l$  は足の裏に生じる摩擦力である。 $F_l$  は以下のように求められる。

$$F_l = f(G_0 - W) \quad (9)$$

$$G_0 = \frac{T}{2}g \quad (10)$$

$$W = \rho \left(\frac{D}{2}\right)^2 \pi h g \quad (11)$$

ここに、 $f$  は (人の足の裏の) 摩擦係数、 $G_0$  は 1 本の足に加わる重力、 $W$  は 1 本の足に加わる浮力、 $T$  は体重、 $g$  は重力加速度、 $\rho$  は水の密度、 $D$  は円柱と見なした足の直径、 $\pi$  は円周率、 $h$  は踏み面上の水深である。

図-8 は、階段最上段からの落差  $z$  (階段最上段高さ) と踏み面上水深  $h$  (模型実験の測定値をもとにした近似曲線) の関係である。近似式は以下のとおりである。

$$h = 0.2305q^{0.9728}z^{-0.4021} \quad (12)$$

ただし、 $q$  は単位幅流量 ( $m^2/s$ ) である。

また、図-9 は、階段最上段からの落差  $z$  と足への抗力  $F$  及び足裏の摩擦力  $F_l$  の関係である。それぞれの図は、単位幅流量  $0.25$  から  $1.50m^2/s$  の場合について示してある。また、足への抗力  $F$  を求めるに当たっては、抗力係数  $C_d$  を  $1.1$  としており、足裏の摩擦力  $F_l$  の関係を求めるに当たっては、人の足の摩擦係数を須賀ら<sup>6)</sup> にならって  $0.7$  としている。円柱近似した人の足の径は  $0.12m$ 、体重は  $60kg$  とおいた。

足裏の摩擦力  $F_l$  は、落差  $z$  (及びそれに応じた踏み面上水深  $h$ )、流下する水の単位幅流量に関わらず  $200N$  程度となっている。それに対し、足に加わる抗力  $F$  は単位幅流量が増えるにつれて増加しており、さらに、同じ単位幅流量でも、落差  $z$  が大きくなる (階段上流下距離が長くなる) につれて増加している。図-9 に示した単位幅流量では、 $q = 0.25m^2/s$  の場合は  $F < F_l$  となっており、足の裏の摩擦力が抗力に勝っている。しかし、 $q \geq 0.50m^2/s$  で落差  $z \geq 2m$  の場合は  $F > F_l$  となっており、足の裏の摩擦力は抗力に抗しきれない結果となっている。このことから、理論上は単位幅流量が  $0.50m^2/s$  以上が危険であると想定される。

#### 4. 歩行実験による歩行限界の実測

##### 4.1 歩行実験の概要

上記の検討は、あくまでも円柱近似した足に加わる抗力と足裏の摩擦力の比較によるものであり、実際の歩行者の特性が反映されているとは

いいきれない。実際に人が歩行することが可能かどうかを正確に判断するためには、被験者による歩行実験が必要となる。そこで、実物大(蹴上0.18m、踏み面0.27m、段数5段、地上出入口ステップは無し)階段模型を水路内に設置し、被験者が水が流れる階段上を歩行する実験を行って、歩行限界を実測した。

上流部(地上部)水深を0.05m、0.10m、0.20m、0.30m、0.40m、0.50mの6段階(単位幅流量は $0.018\text{m}^2/\text{s} \sim 0.580\text{m}^2/\text{s}$ )に変化させ、20代から40代の被験者14名(うち女性3名)に階段を上ってもらって恐怖感や歩行の容易さ等をアンケートした。また、ふらつき具合等、歩行の様子を観察した。階段上の流れは、流量が増えるにつれ、図-3で示した流況Bから流況Dへと変化していた。

なお、実物大模型の段数は5段と少なく、高さも低いため、見た目の恐怖感は実際よりも小さくなっていると考えられる。さらに、流れが十分加速されず、実際よりも穏やかな流れとなっているものと考えられる。今回の実験結果の評価にあたっては、この点を考慮しておく必要がある。

#### 4.2 歩行実験の結果

図-10は、階段模型の下流において下から階段を見たときに、階段を歩いて上れると思うか質問した回答である。単位幅流量が増えるにつれて流れの激しさが増し、「上れない」と感じる人が増えている。上流水深0.50m(単位幅流量 $0.580\text{m}^2/\text{s}$ )の場合は、全員が「壁等につかまれば上れる」から「上れない」の範囲と感ずる結果となった。

実際に階段を上った際、上から1段目(下から4段目)の階段上で観察された歩行の様子を示したのが図-11である。流量が増加するにつれ、「おそおそと歩く」人が増え、上流水深0.50m(単位幅流量 $0.580\text{m}^2/\text{s}$ )になると、歩行が非常に困難となる被験者がほとんどとなり、壁につかまらなると上れない状況となった。下から眺めたときの感覚(図-10)では、激しい水音や飛沫のため実際よりも上り難いと判断する傾向があるもの

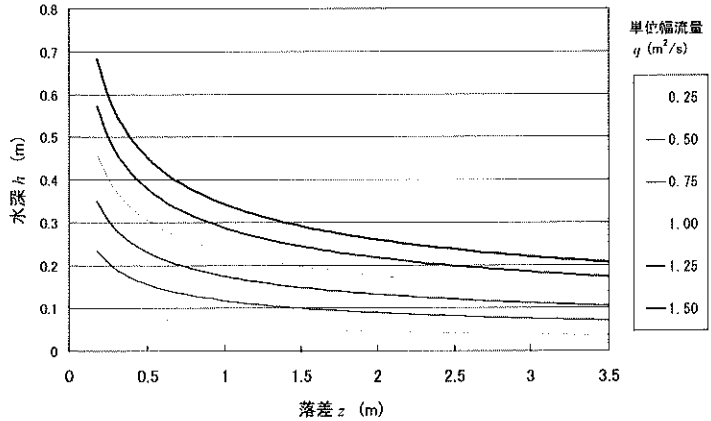


図-8 階段最上段からの落差  $z$  と踏み面上水深  $h$  の関係

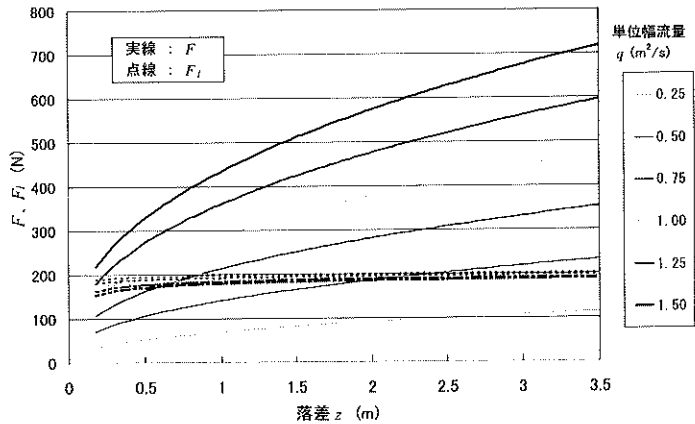


図-9 階段最上段からの落差  $z$  と足への抗力  $F$  及び足裏の摩擦力  $F_f$  の関係

単位幅流量が $0.415\text{m}^2/\text{s}$ のケースで上るのが困難となり、単位幅流量 $0.580\text{m}^2/\text{s}$ になると足をとられて流される危険があるといえる。

図-12は観察された歩行の様子(全ての段上)と踏み面上の $U^2h$  ( $\text{m}^3/\text{s}^2$ )の関係を示したものである(理論上は、歩行者の足に加わる抗力 $F$ と $U^2h$ は図-6のように比例関係にあると考えられる)。階段上を歩けるかどうかという感覚は、個人によって非常にばらつきがあるものの、概ね $U^2h$ が $1.5\text{m}^3/\text{s}^2$ 程度で階段上の歩行が困難になるといえる。

$U^2h$ が $1.5\text{m}^3/\text{s}^2$ という値は、図-9と同条件で計算した場合、概ね抗力 $F = 100\text{N}$ に相当する。

すなわち、足裏の摩擦力から単純に計算した $F_f$ で判断した歩行可能性(概ね抗力 $F = 200\text{N}$ )よりも、実際の歩行は困難であるといえる。これは、階段上を歩行する場合、激しい乱れにより足を取られ、足を踏み出すのが難しくなることによる。

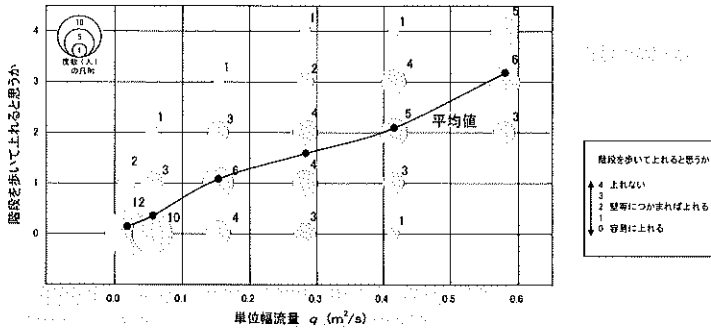


図-10 模型階段の下から眺めて「階段を歩いて上れると思うか」

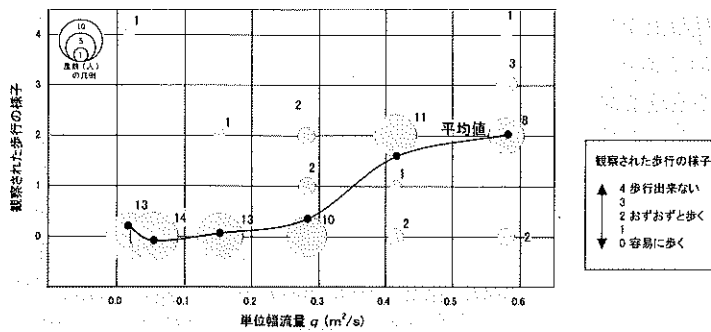


図-11 階段上(上から1段目)において観察された被験者の歩行の様子

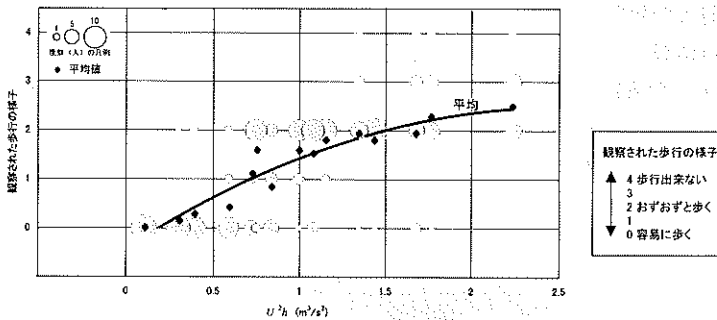


図-12 階段上の  $U^2h$  と観察された被験者の歩行の様子の関係

### 5. おわりに

都市で洪水氾濫が発生した場合の地下空間の浸水は、周辺微地形に応じて発生する。地下空間マップの整備や微地形を考慮した浸水予測シミュレーション等により、危険性を把握し、対策の実進を進めていく必要がある。今後も都市型水害に関する調査・研究を進め、防災対策の充実に目指していく予定である。

### 参考文献

- 1) 末次忠司：都市型地下水害の実態と対策，雨水技術資料，Vol.37，pp.7-18，2000.6.
- 2) 戸田圭一、井上和也、谷野知伸、前田修：地下街の氾濫浸水解析，京都大学防災研究所年報，第41号B-2，pp.313-323，1998.4.
- 3) 本田洋平、井上啓由、多田彰秀、木村克志：階段入口から地下空間へ流入する流量の評価式について，土木学会第55回年次学術講演会講演概要集(CD-ROM)，2000.9.
- 4) 高橋保、中川一、野村出：洪水氾濫に伴う地下街浸水のシミュレーション，京都大学防災研究所年報，第33号B-2，pp.427-442，1990.4.
- 5) 地下室の洪水時における注意事項検討会：浸水時の地下室の危険性について - 地下室を安全に使用するために -，(財)日本建築防災協会，2000.6.
- 6) 須賀寛三、上阪恒雄、白井勝二、高木茂知、浜口憲一郎、陳志軒：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.

館健一郎\*



国土交通省土木研究所河川部都市河川研究室研究員  
Kenichiro TACHI

武富一秀\*\*



同 都市河川研究室  
Kazuhide TAKEDO-MI

水草浩一\*\*\*



同 都市河川研究室  
Koichi MIZUKUSA

末次忠司\*\*\*\*



同 河川研究室長、同 都市河川研究室長  
工博  
(前 都市河川研究室長)  
Dr.Tadashi SUETSUGI

吉谷純一\*\*\*\*\*



同 都市河川研究室長  
Junichi YOSHITANI