

直階段から地下空間へ流入する流量の評価 に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON THE EVALUATION ON DISCHARGE OF INUNDATING WATER FLOWED OVER STRAIGHT STAIR TO UNDERGROUND SPACE

多田彰秀¹・井上啓由²・本田洋平³・古本勝弘⁴

Akihide TADA, Takayoshi INOUE, Yohei HONDA and Katsuhiko FURUMOTO

¹正会員 博(工) 長崎大学助教授 工学部社会開発工学科(〒852-8521 長崎市文教町1-14)

²学生会員 長崎大学大学院 工学研究科社会開発工学専攻(〒852-8521 長崎市文教町1-14)

³学生会員 長崎大学大学院 生産科学研究科環境システム工学専攻(〒852-8521 長崎市文教町1-14)

⁴正会員 工博 長崎大学教授 工学部社会開発工学科(〒852-8521 長崎市文教町1-14)

This study concerns the evaluation on the discharge of inundating water flowed over a straight stair to underground space. First of all, survey at the entrances to the underground mall in JR Hakata Station is executed. Secondly, hydraulic experiments are carried out using a model of a straight stair. The obtained results are able to propose an empirical formula for evaluating the discharge to underground space. In particular, it is realized that the straight stair setting a footstep on the ground level's entrance has an effect on the mitigation of inundation flow in underground space.

Key Words : Inundation flow, underground space, straight stair, discharge, boundary condition

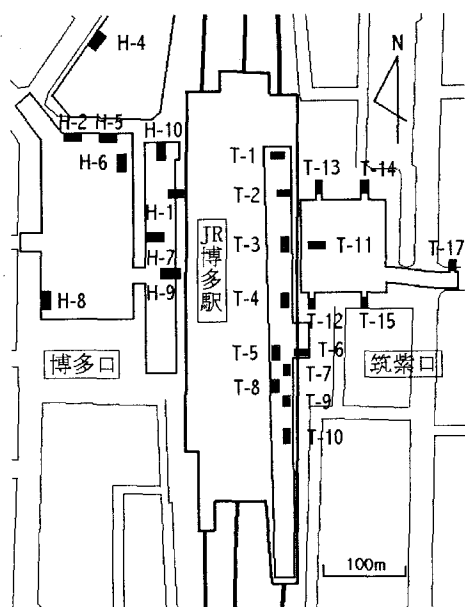
1. はじめに

わが国では、地下鉄、地下街および地下駐車場等といった様々な形で地下空間の有効利用がなされており、地下空間は今や日常生活にとって必要不可欠な空間となっている。さらに、地下空間での防災対策は、今まで『防火』が中心であったため、そこでの水害対策はほとんど議論されておらず、地下浸水の危険性さえも意識されてこなかった。このような背景の中、1999年6月には福岡市で、同年7月には東京都内で地下空間へ流れ込んだ大量の氾濫水によって溺死者を出すという惨事が発生した。言い換えれば、大都市部の地下空間が内水や外水に伴う浸水に対して如何に脆いものであるかを露呈したといっても過言ではない。このような事態は、豪雨時ばかりでなく、高潮時や地震時にも生じる可能性が高いものと予想される。したがって、地下空間での河川水や海水による浸水被害の予測、浸水防御策、避難誘導システムおよび復旧対策などに対して有用な情報を提供するため、地下空間への浸水の流入過程および伝播過程につい

て水理学的な解析を行っておくことは、防災工学上も重要な課題である。

一方、地下空間への水の浸水過程に着目した既往の研究は極めて数が少なく、1) 洪水氾濫水の地下街への浸入シミュレーション¹⁾および2) 大規模な高潮と洪水が重畳した場合を想定し、地下空間における氾濫水の広がりについて水理学的な数値解析²⁾がなされているに過ぎない。これらの研究では、①平面二次元氾濫解析モデルを適用しているものの、地下空間特有の管路・開水路共存状態の遷移流れ³⁾を考慮した解析はなされていないこと、②地上開口部から地下街への流れが段落ちモデルで説明できるものとみなして、地下空間への流入流量を評価していることが共通点である。

以上のようなことを考慮すれば、地下空間における浸水対策の一つとして、洪水氾濫水に伴う浸水の流入・伝播過程を水理学的に明らかにするとともに、浸水予測シミュレーションを実施し、地下空間での浸水に対する避難誘導システムを確立することが早急に望まれる。本研究では、このような課題を解決するための第一段階とし



■ : 調査対象とした階段入口

図-1 現地調査したJR博多駅周辺の階段入口

て、地下空間での浸水予測シミュレーションを実施する際の境界条件となる階段入口の流入流量に着目し、その水理特性に影響を及ぼすと予想される階段入口の構造形式・各種諸元をJR博多駅地下街で現地調査している。ついで、得られた現地調査の結果に基づき作製された階段模型を用いて水理実験を行い、階段入口から地下空間へ流入する流量の評価式を提案する。とくに、階段入口の地上部に段差（ステップ）を設けた場合と設けない場合の流入流量の比較から、地上部での段差の設置効果についても検討を加えている。

2. 階段入口の構造形式に関する現地調査

(1) JR博多駅地下街を対象とした現地調査の概要

1999年6月の福岡豪雨に伴って地下空間への浸水被害が発生したJR博多駅を対象に、地上部から地下街への通路となっている筑紫口方面16ヶ所、博多口方面9ヶ所、計25ヶ所の階段入口（図-1参照）で現地調査を1999年12月9日に実施した⁴⁾。調査方法は、巻尺、定規およびデジタルカメラを用いて、地下街へ通じる階段入口の①幅員、②階段の勾配、③地上部と地下街との高低差（階高）、④階段ステップの高さ（けあげ高）、⑤階段ステップの幅（踏み幅）、⑥階段総数、⑦踊り場の踏み幅、⑧段差（ステップ）の有無および⑨段差（ステップ）の高さ・延長などを詳細に測量した。

(2) 現地調査結果およびその考察

現地調査から得られた測量データに基づいて、複雑な

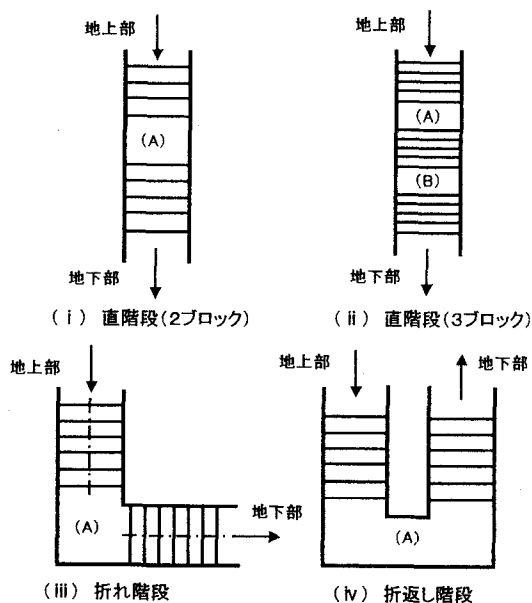


図-2 階段入口の構造形式に関する分類

構造を有する階段入口の形式について分類を試みた。その結果、図-2に示すような4つの基本パターンに大別されることが分かった。すなわち、25ヶ所の階段入口のうち、直階段が13ヶ所（2ブロック：6ヶ所、3ブロック：7ヶ所）と最も多く、ついで折れ階段（右折れ：5ヶ所、左折れ：1ヶ所）が6ヶ所、折返し階段が4ヶ所であった⁴⁾。残り2ヶ所については、特殊な形状（直階段と螺旋階段がつながった形状および直階段の踊り場から他の階段につながった形状）のため基本パターンから除外した。なお、図-2(i)に示す直階段は、地上部から踊り場(A)、踊り場(A)から地下部をそれぞれ1ブロックとみなし、2ブロックから構成されているものと考えた（図-3参照）。表-1は、図-3に定義されている直階段（2ブロック）の場合の各諸元について整理したものである。この表より、階段の幅員は3.9m、けあげ高は0.15m、踏み幅は0.31m、1ブロック当りの階段総数は15段、踊り場の踏み幅は1.41mなどが確認できる。これらの平均値は、表-2に示す立体横断施設（例えば、歩道橋）の標準値⁵⁾を満足している。

さらに、図-4は1ブロック毎の階段落差 F_i と水平距離 L_i との関係を示したものである。図中には、折れ階段および折返し階段の場合のデータも同様な処理を施して併記されている。図より、階段入口の形状に関係なく F_i と L_i とは比例関係にあることが確認できる。なお、図中の実線は、最小二乗法より算出した回帰式である。この式より階段の平均勾配は $\theta = 25^\circ$ となる⁴⁾。

また、写真-1に示すような地上部の階段入口に設けられた段差（ステップ）についても調査を行った。その結果、JR博多駅地下街に向かう階段入口での段差（ステップ）の設置率は44%（11/25）と予測していたほど大きくなかった。とくに、段差（ステップ）が設けられ

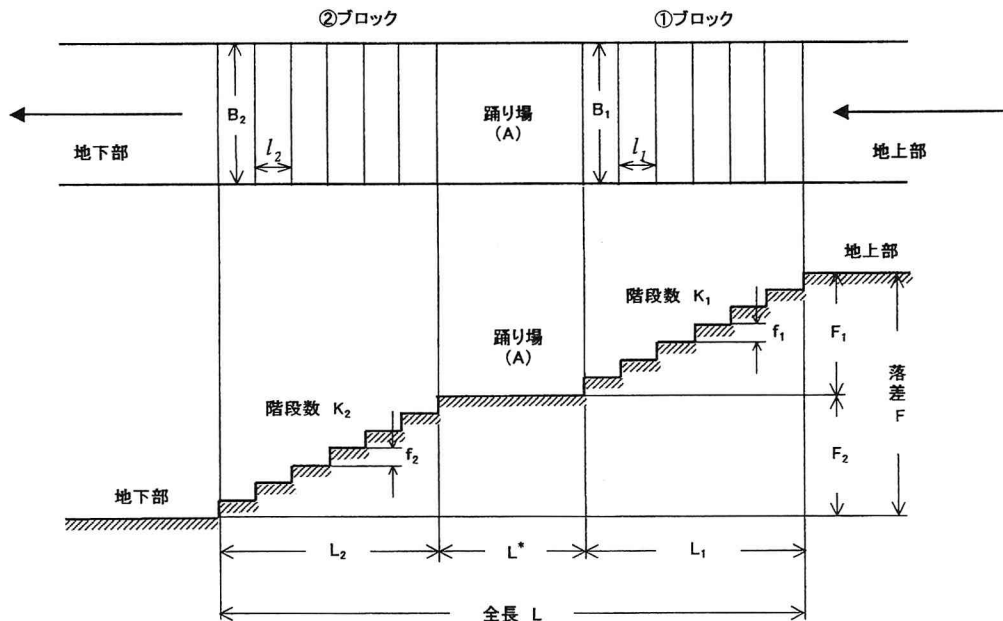


図-3 直階段（2ブロック）の場合の構造特性

表-1 現地調査した階段入口の諸元〔直階段（2ブロック）〕

（単位：mm）

	①ブロック							②ブロック							L*	材質
	k ₁	f ₁	l ₁	F ₁ =f ₁ k ₁	L ₁ =(k ₁ -1)l ₁	F ₁ /L ₁	B ₁	k ₂	f ₂	l ₂	F ₂ =f ₂ k ₂	L ₂ =(k ₂ -1)l ₂	F ₂ /L ₂	B ₂		
T-2	15段	146	326	2190	4564	0.4798	4434	16段	148	326	2368	4890	0.4843	4434	1516	A
T-4	17段	151	315	2567	5040	0.5093	4520	14段	151	313	2114	4069	0.5195	4520	1515	A
T-5	16段	154	315	2464	4725	0.5215	4400	16段	146	317	2336	4755	0.4913	4400	1510	A
T-8	16段	153	315	2448	4725	0.5181	3500	16段	155	324	2480	4860	0.5103	3500	1510	A
T-9	13段	154	323	2002	3876	0.5165	2960	19段	148	326	2812	5865	0.4795	2960	1220	A
H-4	18段	154	300	2772	5100	0.5435	3778	18段	154	300	2772	5100	0.5435	3777	1204	B
平均	16段	152	316	2407	4672	0.5148	3932	17段	150	318	2480	4923	0.5047	3932	1413	—

表-2 立体横断施設の標準値⁵⁾

階段のけあげ高；f	15cm
階段の踏み幅；l	30cm
踊り場の踏み幅；L*	1.2m以上

出典：日本道路協会
「立体横断施設技術基準・同解説」

〔材質〕 A：プラスチックパネル B：石タイル

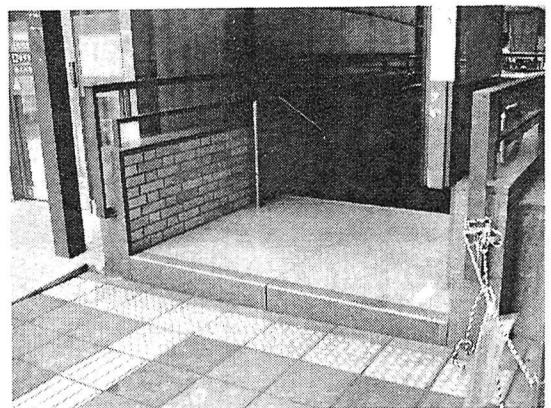


写真-1 地上部の階段入口に設けられた段差

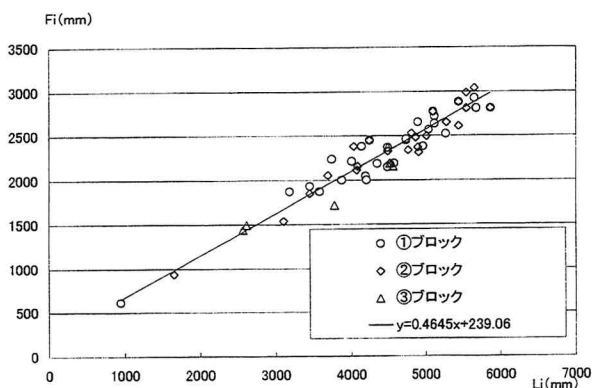


図-4 階落差Fiと水平距離Liとの関係

ている階段入口は、すべて屋外に面していた。なお、段差（ステップ）のけあげ高の平均値は0.11m、段差（ステップ）の踏み幅の平均値は2.1mであった。

3. 階段入口から流入する流量の評価式の検討

(1) 水理実験の概要

構造形式として半数を占めた直階段を対象として地下空間へ流入する流量の評価式を提案するため、フルード相似則（縮尺 1/15）を採用して図-5に示すようなアクリル製の階段模型を製作し、水理実験を行った⁶⁾。なお、模型の各諸元については表-3に示すとおりである。実験は、図-5のA点の水深(h_p)をパラメータとして

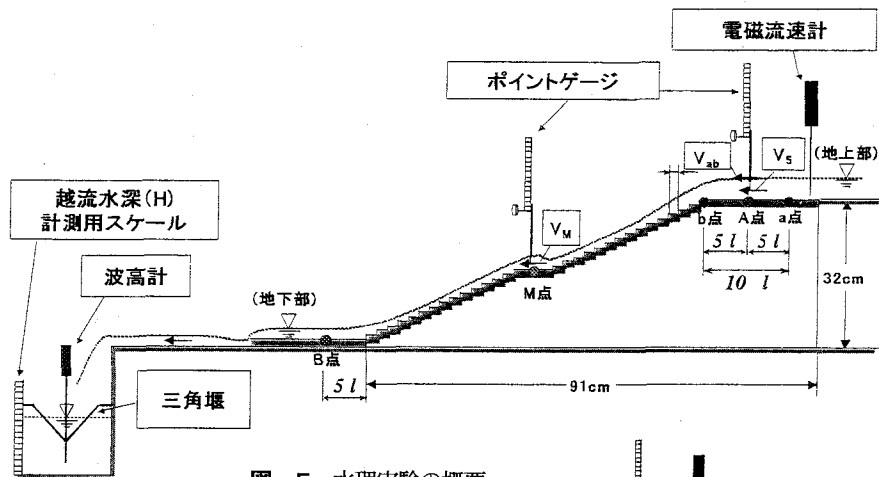


図-5 水理実験の概要

表-3 階段模型の諸元

	実階段の諸元(平均値; JR博多駅)	水理模型の諸元(縮尺1/15)
階段入口の幅員 (B)	3.00m	20.0cm
階段のけあげ高 (f)	0.15m	1.0cm
階段の踏み幅 (l)	0.30m	2.0cm
1フロック当りの階段数	15段	15段
踊り場の踏み幅 (L')	1.50m	10.0cm
段差(ステップ)のけあげ高	0.11m	0.8cm
段差(ステップ)の踏み幅	2.10m	14.0cm

Run-1、Run-3

- ①A点の水深 h_s を変化させて V_s 、 Q_D 、 H を計測
直角三角堰を越流する流量 Q_D は、ストップウォッチとメスシリンダーを用いて直接測定

直角三角堰の流量公式

$$Q = \frac{8}{15} C_* \sqrt{2g} H^{5/2} \dots\dots\dots (1)$$

Q : 直角三角堰の越流量(cm^3/s), C_* : 流量係数
 g : 重力加速度($980\text{cm}/\text{s}^2$), H : 直角三角堰の越流水深(cm)

- ②計測された Q_D と H を(1)式に代入し、最小二乗法を用いて C_* を算定
A点での平均断面流速 V_s (2点法)より流入流量 Q_{CV} を算定

- ③地下空間へ流入する流量の評価式

$$Q = C_* B h_s^a \dots\dots\dots (2)$$

C_* : 直階段の流量係数, B : 階段の幅員(cm)
 h_s : A点での水深(cm), a : 定数

上式((2)式)に計測した h_s 、 Q_D を代入し、最小二乗法より C_* 、 a を算出

Run-2、Run-4

- ④A点の水深(h_s)を変化させて水面形、三角堰の越流水深(H_s)、踊り場M点の水深(h_M)、地下部B点の水深(h_B)を計測
⑤トレーサーによる流下時間の計測
⑥ H_s およびRun-1(Run-3)の実験結果より特定した C_* を(1)式へ代入し、越流量 Q_D を算出
⑦ h_s を(2)式に代入して流入流量 Q を算定

図-6 流量評価式の誘導フローチャート

表-4 流量評価式(2)の流量係数 C_* と定数 a

実験ケース名	C_*	a	段差の設置
Run-1	20.98	1.88	なし
Run-3	30.55	1.38	あり

流量 $Q(\text{cm}^3/\text{s})$

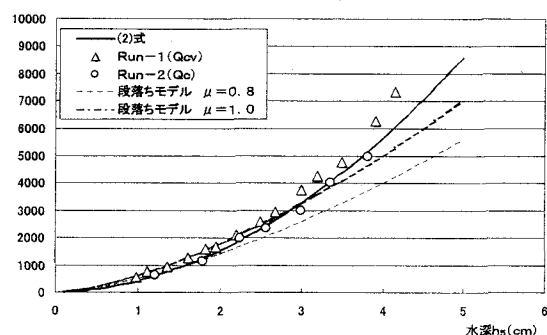


図-7 階段入口からの流入流量(段差なし)

変化させ、流れが定常になったことを確認した後、①階段部へ流入する流量(Q)、②A点の断面平均流速 V_s (2点法)、③地上部(b点～a点の区間)の水面形などについて三角堰、電磁流速計およびポイントゲージ等を用いて計測した。とくに、階段入口の地上部に段差(ステップ)を設けない場合(Run-1, Run-2)と段差(ステップ)を設けた場合(Run-3, Run-4)の比較を通して、地上部での段差の設置効果についても検討を加えた。

(2) 水理実験結果およびその考察

図-6に示すフローチャートに従って、階段入口から地下部へ流入する流量 Q の評価式を誘導した。その結果、表-4のように(2)式の流量係数 C_* および定数(べき乗) a が求まった⁶⁾。

図-7は、地上部A点の水深 h_s と(2)式で評価される流量 Q との関係(Run-1, 段差なし)を太線で示したものである。図中には、A点で計測した断面平均流速 V_s より

表-5 実験ケースの水量 (Run-2およびRun-4)

ケース名	越流水深 $H_*(\text{cm})$	A点の水深 $h_{5*}(\text{cm})$	越流量 $Q_c(\text{cm}^3/\text{s})$	M点の水深 $h_M(\text{cm})$	B点の水深 $h_B(\text{cm})$	レイノルズ数 $Re=U_5 h_{5*}/\nu$	流入流量 $Q(\text{cm}^3/\text{s})$
Run-2-1	4.26	1.21	624.4	0.44	0.41	2,383	600.4
Run-2-2	5.43	1.79	1,145.3	0.57	0.51	4,371	1253.7
Run-2-3	6.77	2.25	1,987.9	0.85	0.69	7,587	1927.3
Run-2-4	7.22	2.57	2,334.9	0.89	0.74	8,912	2474.6
Run-2-5	7.98	3.00	2,798.9	1.12	1.17	11,446	3310.0
Run-2-6	8.97	3.36	4,017.1	1.45	1.28	15,332	4095.9
Run-2-7	9.77	3.81	4,973.6	1.73	1.84	18,983	5187.7
Run-4-1	2.42	0.62	144.3	0.55	0.58	551	315.9
Run-4-2	3.30	0.91	313.4	0.50	0.55	1,196	536.4
Run-4-3	5.66	1.53	1,207.5	0.70	0.56	4,609	1098.8
Run-4-4	6.76	2.03	1,882.4	0.83	0.83	7,185	1623.3
Run-4-5	7.70	2.76	2,606.6	0.95	1.02	9,949	2480.3
Run-4-6	8.55	3.35	3,386.6	1.14	1.20	12,928	3240.4

レイノルズ数(Re); $U_5=Q_c/(Bh_{5*})$, $\nu=1.310\times10^{-2}\text{cm}^2/\text{s}$ (10°C)

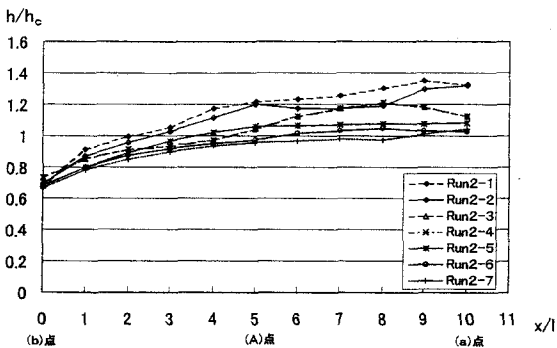


図-8 地上部b点～a点間の水面形 (段差なし)

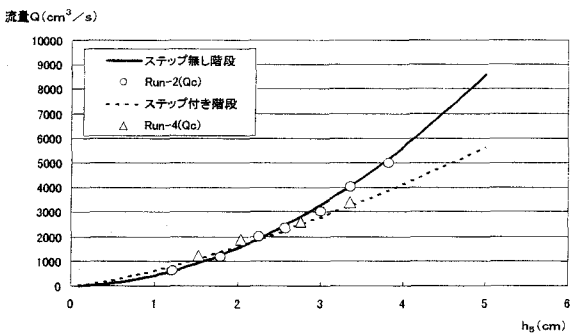


図-9 流入流量に及ぼす段差(ステップ)の影響

算定された Q_{cv} (Δ) と (1) 式より求めた Run-2 の Q_c ($\circ$) がプロットされている。 Q_{cv} の値は、すべての実験ケースで (2) 式の値よりも大きくなっている。これは A 点の断面平均流速 V_5 を流心軸上で 2 点法によって算出したため、 Q_{cv} を過大評価しているものと考えられる。一方、 Q_c は (2) 式よりも小さいことが分かる。しかし、両者は (2) 式の曲線を挟んで分布しており、平均的には (2) 式の妥当性が確認できる。さらに、図中には段落ちモデル¹⁾ に流量係数 $\mu=0.8$ および $\mu=1.0$ を与えた場合の流量がそれぞれ細破線および太破線で示されている。 A 点の水深 h_5 が 3cm 以下の場合には、流入流量 Q をここで提案する (2) 式から算出しても段落ちモデルで求めても大差がないことが明らかとなった⁶⁾。また、表-5 に示す Q_c および Q の比較より、 (2) 式は、 A 点の水深 h_5 が、 $h_5<1\text{cm}$ および $h_5>4\text{cm}$ の範囲では適用が難しいものと判断される。一方、 $1\text{cm}\leq h_5\leq 4\text{cm}$ の範囲内では、ほぼ $0.95<Q/Q_c<1.05$ の関係が成立していることも確認できる。なお、既往の研究では段落ち部の流量を次式より算定している⁷⁾。

$$Q = CBh_f^{3/2} \tag{3}$$

但し、 h_f : 段縁の水深、 C : 流量係数、 B : 水路幅である。本研究では、洪水氾濫に伴う地下空間への浸水の予測シミュレーションを実施する上で重要となる境界条件を明らかにするという主な目的のため、流入流量 Q を評価す

る際に必要な水深 (越流水深 ; h_5) を『段縁 (b 点) から上流側へ 5 l の A 点』でしか測定していない。一般的に、数値シミュレーションを実施する際に用いられる計算格子の水深は、格子サイズ内で平均化され、格子中央部で定義されることが大半である。ここでも、水理実験に際して、計算格子のサイズを階段入口の幅員 (B) と同じ程度、すなわち 10 l と考えた。このため、格子中央は b 点から上流側へ 5 l の位置となり、 A 点を選択されたのである。さらに、既往の研究に基づけば⁷⁾、流量の増加とともに限界水深の発生位置が変化するので、それに伴って越流水深 (h_5) の測定位置を変化させる必要がある。したがって、流量評価式に採用する越流水深 h_5 の測定位置については、今回採用した h_5 以外にも h_b や h_f 等の妥当性について検討する余地が残されている。

図-8 は、地上部の階段端部 b 点 (段縁) から上流側へ取った距離 x と h/h_c (h_c : 限界水深) との関係を示したものである。各ケースとも h/h_c の値は上流側に向かうほど増加している。また、流入流量 Q の増加 (表-5 参照) とともに同一測点での h/h_c の値が減少傾向にある。これは、流入流量 Q の増加に伴って、 b 点 (段縁) 近傍に出現する射流区間 ($h/h_c<1.0$) が上流側へ拡大していくものと解釈できる。なお、 b 点 (段縁) より下流側の階段直上の流れはすべて射流であり、 $h_5\geq 3\text{cm}$ の条件下で流

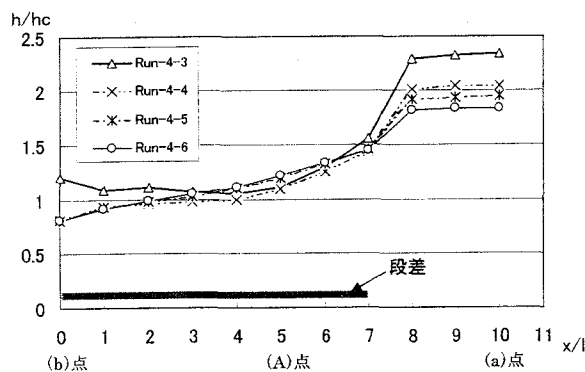


図-10 地上部b点～a点間の水面形（段差あり）

況が大きく変化する。すなわち、踊り場の段縁から流水が地下部に向けてジャンプするとともに、踊り場の段縁から下流側に5～6段の範囲で流水下が空洞となることも明らかとなった。

図-9は、Run-2およびRun-4の場合の Q_c と表-4に示す2つの流量評価式とを併記して、比較したものである。A点の水深 h_s が2 cmを超えるあたりから、同一水深でも段差（ステップ）を設置している場合の方が階段へ流入する流量は小さくなることが分かる。図-10は、段差（ステップ）を設置している場合のb点（段縁）から上流側へ取った距離 x と h/h_c （ h_c ：限界水深）との関係を示したものである。図より、①段差の存在に伴ってb点～a点区間の流れの大半が常流となっていること、さらに、②段差が設置されていない場合より h/h_c （ >1.0 ）の値が大きくなっていることが確認できる。これらが、図-9の流入流量の評価式（段差がある場合）において同一水深でも流量が小さくなった理由であると考えられる。

図-11は、階段の踊り場M点および地下部B点での平均流速 $V_M (= Q_c / (Bh_M))$ および $V_B (= Q_c / (Bh_B))$ とA点水深 h_s との関係を示したものである。水深 h_s の増加とともに V_M および V_B は増加していることが分かる。とくに、 $h_s = 3.0$ cm（実物大では $h = 0.45$ m）の時、階段の踊り場M点の平均流速 V_M は117.0 cm/sとなった。この流速を実物大の流速に換算すると4.53 m/sであり、歩行者が階段部を通行できるような流速ではないものと判断される。なお、本研究は、「定常流で階段部に流入する流量 Q が、下流水路の直角三角堰を越流する流量 Q_c に等しい」という前提条件に基づいて実施されている。このため、(2)式で評価される流入流量 Q および下流水路の越流量 Q_c の精度については、越流水深の測定器の精度および流量係数 C_d の算定法に関する精度を詳細に検討し、その後に考察する必要があるものと判断される。

4. おわりに

本研究では、地下空間での浸水予測シミュレーション

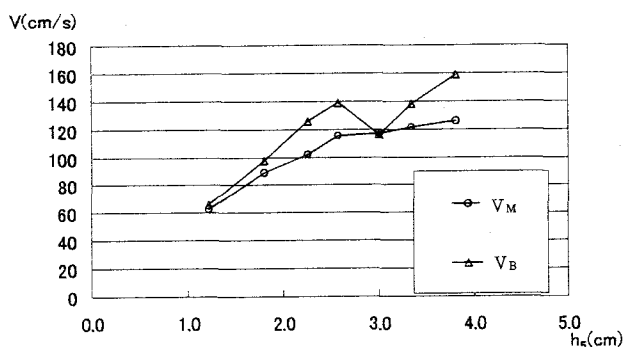


図-11 平均流速 V_M および V_B と水深 h_s との関係

を実施する際の境界条件となる階段入口から地下空間へ流入する流量に着目し、その定量的な評価式について検討を加えた。まず、地下空間へ流入する流量の水利特性に影響を及ぼすと予想される階段入口の構造形式・各種諸元について、JR博多駅を対象に現地調査を実施した。次いで、構造形式の半数を占めた直階段を対象とした水利実験を行い、階段入口から地下空間へ流入する流量の評価式を提案した。その結果、流入流量は地上部A点の水深 h_s の指数形式（図-6の(2)式）で評価できることが明らかとなった。さらに、階段入口の地上部に段差（ステップ）を設けた場合と設けない場合の流入流量の特性を比較した。その結果、地上部の階段入口に設置されている段差は、少なくとも地下空間での浸水被害を軽減もしくは遅延させる効果を有していることが水理学的に確認された。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 井上和也・中川 一・戸田圭一・溝田敏夫：地下空間への氾濫浸水の解析、地下空間シンポジウム論文・報告集、第2巻、土木学会、pp. 95～102, 1997.
- 3) 細田 尚・井上和也・多田彰秀・北原政宏：管路・開水路流れ境界面の伝播を考慮した非定常流の数値解析法、京都大学防災研究所年報、第36号 B-2, pp. 593～605, 1993.
- 4) 井上啓由・本田洋平・木村克志・多田彰秀：階段入口から地下空間へ流入する流量の評価に関する考察、平成11年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集、第2分冊Ⅱ-34, pp. 224～225, 2000.
- 5) (社)日本道路協会：立体横断施設技術基準・同解説、pp. 31～32, 1979.
- 6) 本田洋平・井上啓由・木村克志・多田彰秀：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、第2分野、Ⅱ-197, pp. 394～395, 2000.
- 7) 土木学会編：水理公式集、昭和60年度版、p. 288, 1985.

(2000.10.2受付)