

## 直階段から地下空間へ流入する流量の評価法に関する研究

### Evaluation on Discharge of Inundating Water Flowed over a Straight Stair to an Underground Space

多田彰秀<sup>1</sup>・井上啓由<sup>2</sup>・本田洋平<sup>3</sup>・古本勝弘<sup>4</sup>

Akihide TADA, Takayoshi INOUE, Yohei HONDA and Katsuhiko FURUMOTO

This paper deals with the hydraulic experimental investigation for evaluating the discharge of inundating water flowed over a straight stair to an underground space. First of all, survey at the entrances to the underground space in the JR Hakata Station is executed. Secondly, hydraulic experiments are carried out by using a model of the straight stair. The results of experiments are able to propose an empirical formula evaluating the discharge. 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 urban flood.

*Keywords*; inundation flow, underground space, straight stair, discharge

#### 1. はじめに ;

わが国では、地下鉄、共同溝および地下街など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『防火』が中心であるため、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水によって溺死者を出すという惨事が発生した。すなわち、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。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<sup>1)</sup>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<sup>2)</sup>がなされているに過ぎない。これらは、①平面二次元氾濫解析モデルを適用していること、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、地下街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、洪水氾濫に伴う浸水の流入・伝播過程

---

キーワード; 氾濫浸水, 地下空間, 直階段, 流入流量

1)正 会 員 博士(工) 長崎大学助教授 工学部社会開発工学科

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

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

4)正 会 員 工博 長崎大学教授 工学部社会開発工学科

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システムを確立することが早急に望まれる。本報では、このような課題を解決するための第一段階として、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思われる階段入口の構造形式を JR 博多駅地下街で現地調査した。ついで、得られた調査結果に基づいて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法を提案する。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(ステップ)の設置効果についても検討を加えている。

## 2. 1999 年 6 月 29 日福岡豪雨の概要

### 2.1 気象概況

6 月 29 日午前の天気図に基づけば、低気圧から延びる寒冷前線が北部九州を北西から南東へ通過した。その影響で、午前 8 時ごろから約 3 時間にわたり福岡市を中心に集中豪雨が発生した。図-1 は、気象庁発表のデータに基づいて作成された 6 月 29 日の福岡県下における日雨量の等雨量線図<sup>3)</sup>である。各地の午前中の 1 時間雨量は、前原市で 77mm (午前 8 時～9 時)、篠栗町で 100mm (午前 8 時～9 時)、大宰府市で 59mm (午前 9 時～10 時)、飯塚市で 59mm (午前 9 時～10 時)などであった。また、図-2 から明らかなように福岡管区气象台で観測された 3 時間雨量は 126mm、1 時間雨量 (午前 8～9 時) は、6 月の観測史上第二位の 77mm を記録した<sup>4)</sup>。さらに、29 日午前 0 時から午後 0 時までの 12 時間雨量も 148mm に及んだ。なお、図-2 には大宰府で観測された時間雨量も併記されている。福岡管区气象台での時間雨量と比較すれば、雨域が時間の経過とともに南下し、御笠川下流域 (福岡市博多区) から上流域 (大宰府市) へと移動していることが確認できる。

### 2.2 内水氾濫および外水氾濫の状況

福岡市内の下水道は 5 年に 1 度の大雨 (時間雨量 52mm) に耐えうるように設計されており、河川への自然排水に加えて、市内に 34 ヶ所あるポンプ場から河川あるいは海へ強制排水するシステムが採用されている。上述の時間雨量 77mm の大雨は、下水道の雨水排水能力をはるかに超えるものであったため、雨水をすべて排水処理することができず、一部で内水氾濫を招いた。なお、この内水氾濫は午前 10 時ごろには減水し始めていたと言われている<sup>3)</sup>。

一方、福岡市の南側に位置する筑紫野市、太宰府市および大野城市を経て福岡市博多区を流下する御笠川では、流域に降った大雨と博多湾の満潮時間 (午前 9 時 32 分) とが重なり、感潮区間 (河口から金島橋付近までの区間) の水位の急増を助長させた。その結果、午前 9 時 30 分から午前 10 時ごろにかけて比恵橋と

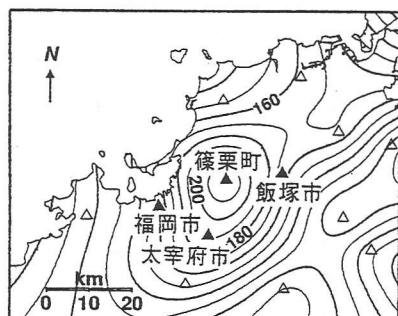


図-1 6 月 29 日の日雨量<sup>3)</sup>

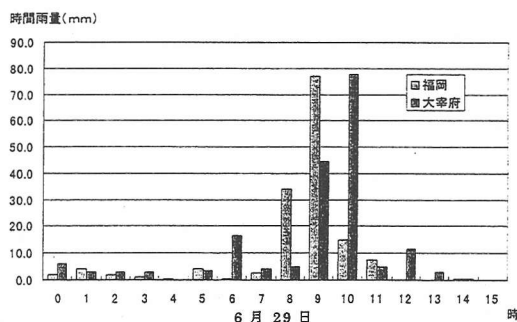


図-2 6 月 29 日の福岡の時間雨量<sup>4)</sup>

比恵大橋に挟まれた区間の左岸側から外水氾濫が開始し、午前10時30分から午前11時頃にピークを迎えたと言われている<sup>5)</sup>。氾濫水は、道路を水路のようにして流下し、地盤の最も低いJR博多駅筑紫口周辺に到達し滞留した(写真-1<sup>6)</sup>参照)。さらに、その一部が後述するようにビルの地下施設やJR博多駅地下街などに流入した。



写真-1 JR博多駅筑紫口周辺の浸水状況<sup>6)</sup>

## 2.3 地下空間への氾濫水の浸入状況

降雨によって路面に溢れた雨水(内水)および御笠川から越水した氾濫水(外水)は、地上部より低い地下空間へと流れ込んだ。その結果、地下鉄駅構内をはじめJR博多駅地下街、JR博多駅周辺のホテル・ビルの地下テナントおよび地下駐車場等で浸水が発生した。とくに、JR博多駅から南東方向に400m離れた博多駅2丁目に位置するビルの地下飲食店では従業員が溺死する惨事まで起きた。ここでは、JR博多駅地下街に注目してそこでの浸水被害を紹介する。すなわち、JR博多駅地下街は、図-3に示すように地下鉄コンコース、デイトス商品街、一番街およびバスチカデナールなどから構成されており、その総面積は約 $3.3 \times 10^4 \text{m}^2$ である。さらに、JR博多駅を中心に筑紫口方面の地下街と博多口方面の地下街とにそれぞれ分かれており、両者を井筒屋遊食彩館が結んでいる。JR博多駅東側に位置する筑紫口方面には20ヶ所程度、西側に位置する博多口方面には15ヶ所程度の地下街へ通じる階段入口がある。これらから流入した氾濫水の浸水状況(写真-2<sup>6)</sup>参照)は、表-1<sup>7)</sup>に示すとおりである。

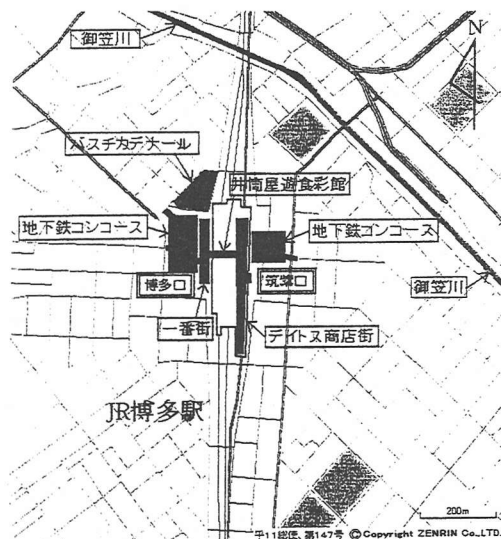


図-3 JR博多駅地下街の位置

## 3. 階段入口の構造形式に関する現地調査

### 3.1 現地調査の概要<sup>8)</sup>

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-4参照)で現地調査を1999年12月9日に実施した。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地上部段差(ステップ)の有無および⑨地上部の段差の高さ・延長などを詳細に測量した。



写真-2 ⑮番入口より流れ込む濁流<sup>6)</sup>

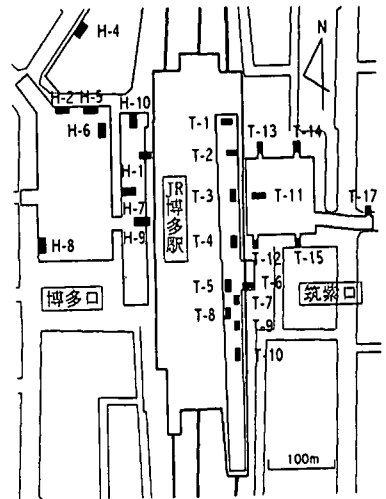
表－1 JR 博多駅地下街の浸水面積<sup>7)</sup>

| 地図<br>番号 | 施設名称                   | 全体面積<br>( $\text{m}^2$ ) | 浸水面積( $\text{m}^2$ ) |        |         |        | 備考   |
|----------|------------------------|--------------------------|----------------------|--------|---------|--------|------|
|          |                        |                          | 5cm未満                | 5～20cm | 21～25cm | 合計     |      |
| A        | 地下鉄コンコース<br>筑紫口        | 3,500                    | 0                    | 2,170  | 1,330   | 3,500  |      |
| B        | デイトス商店街<br>(博多ターミナルビル) | 8,640                    | 0                    | 8,640  | 0       | 8,640  |      |
| C        | 井筒屋遊食彩館                | 1,590                    | 0                    | 0      | 0       | 0      | 浸水なし |
| D        | 一番街<br>(博多ステーションビル)    | 8,080                    | 1,420                | 0      | 0       | 1,420  |      |
| E        | 地下鉄コンコース<br>博多口        | 5,880                    | 0                    | 0      | 0       | 0      | 浸水なし |
| F        | バスチカデナール<br>(交通センタービル) | 5,040                    | 1,620                | 140    | 0       | 1,760  |      |
| 計        |                        | 32,730                   | 3,040                | 10,950 | 1,330   | 15,320 |      |

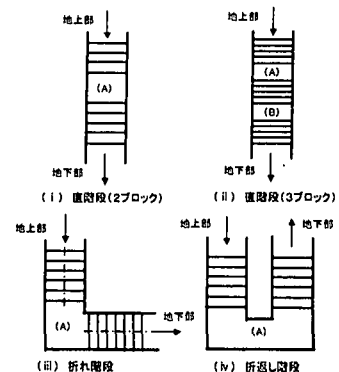
### 3.2 現地調査結果とその考察<sup>8)</sup>

現地調査から得られた測量データに基づいて、複雑な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－5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。残り2ヶ所については特殊な形状のため基本パターンから除外した。なお、図－5(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。表－2は、図－6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－3に示す歩道橋の標準値<sup>9)</sup>を満足している。さらに、図－7は1ブロック毎の階段落差 $V_i$ 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 $V_i$ 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。

また、写真－3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設置率は44%（11/25）と予測していたほど大きくなかった（表－4参照）。さらに、段差が設けられている階段入口の地上部は、すべて屋外に面していることも表－4から確認できる。なお、段差高さの平均値は0.11m、その延長は2.1mであった。



■：調査対象とした階段入口  
図－4 JR 博多駅周辺の調査地点



図－5 階段入口の構造形式

表－２ JR 博多駅で現地調査した階段入口の構造諸元〔直階段（２ブロック）〕 (mm)

|     | ①ブロック |       |       |              |                  |           |       | ②ブロック |       |       |              |                  |           |       | L*   | 材質 |
|-----|-------|-------|-------|--------------|------------------|-----------|-------|-------|-------|-------|--------------|------------------|-----------|-------|------|----|
|     | $k_1$ | $v_1$ | $l_1$ | $V_1=v_1k_1$ | $L_1=(k_1-1)l_1$ | $V_1/L_1$ | $B_1$ | $k_2$ | $v_2$ | $l_2$ | $V_2=v_2k_2$ | $L_2=(k_2-1)l_2$ | $V_2/L_2$ | $B_2$ |      |    |
| 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 | —  |

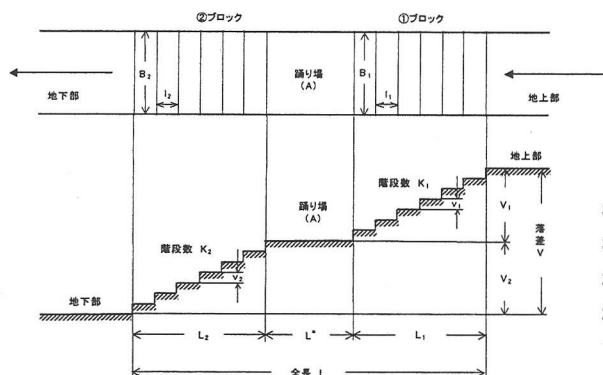
〔材質〕 A：プラスチックパネル B：石タイル

表－３ 歩道橋の標準値<sup>9)</sup>

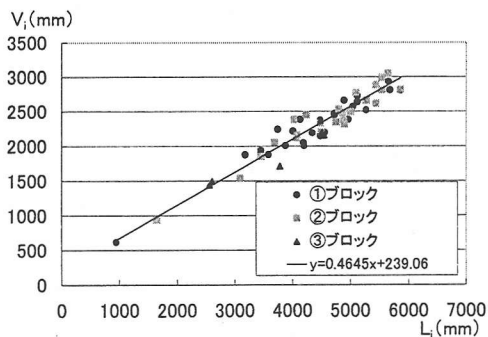
|         |        |
|---------|--------|
| 階段のけあげ高 | 15cm   |
| 階段の踏み幅  | 30cm   |
| 踊り場の踏み幅 | 1.2m以上 |

出典；日本道路協会

「立体横断施設技術基準・同解説」



図－６ 直階段（２ブロック）の構造諸元の定義

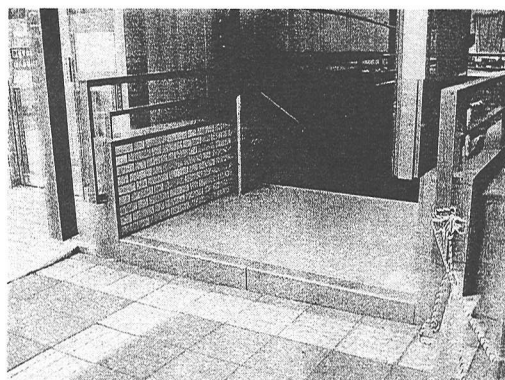


図－７ 階段落差  $V_i$  と水平距離  $L_i$  の関係

表－４ 階段入口の段差高および延長

(単位:mm)

|      | ステップ高さ | ステップ延長 | 地上部の位置 |    |
|------|--------|--------|--------|----|
|      |        |        | 屋外     | 屋内 |
| T-1  | —      | —      |        | ○  |
| T-2  | —      | —      |        | ○  |
| T-3  | —      | —      |        | ○  |
| T-4  | —      | —      |        | ○  |
| T-5  | —      | —      |        | ○  |
| T-6  | —      | —      |        | ○  |
| T-7  | —      | —      |        | ○  |
| T-8  | —      | —      |        | ○  |
| T-9  | —      | —      |        | ○  |
| T-10 | —      | —      |        | ○  |
| T-11 | —      | —      |        | ○  |
| T-12 | 158    | 1800   | ○      |    |
| T-13 | 134    | 1802   | ○      |    |
| T-14 | —      | —      | ○      |    |
| T-15 | 64     | 4478   | ○      |    |
| T-17 | 52     | 550    | ○      |    |
| H-1  | 95     | 1800   | ○      |    |
| H-2  | 54     | 2410   | ○      |    |
| H-4  | —      | —      |        | ○  |
| H-5  | 214    | 2438   | ○      |    |
| H-6  | 148    | 2138   | ○      |    |
| H-7  | 110    | 2100   | ○      |    |
| H-8  | 104    | 1800   | ○      |    |
| H-9  | 60     | 1790   | ○      |    |
| H-10 | —      | —      |        | ○  |
| 平均   | 108    | 2100   | —      | —  |



写真－４ 階段入口の地上部の段差(ステップ)

#### 4. 階段入口から流入する流量の評価法の検討

##### 4.1 水理実験の概要<sup>10)</sup>

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-8に示すような階段模型を製作し、水理実験を行った。すなわち、図-8のA点の水深( $h_a$ )をパラメータとして変化させ、流れが定常になったことを確認した後、①階段部を流下する流量( $Q$ )、②A点の断面平均流速  $V_a$ (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を設けない場合(Run-1, Run-2)と設けた場合(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。

##### 4.2 水理実験結果およびその考察<sup>10)</sup>

図-9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(1)式の流量係数  $C_*$  および定数(べき乗)  $a$  が求まった。

図-10は、 $h_a$  と(1)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点で計測した平均流速  $V_a$  より算定した  $Q_{cv}(\Delta)$  と直角三角堰公式より求めた  $Q_c(\bigcirc)$  がプロットされている。 $Q_{cv}$  の値は、(1)式よりもすべてのケースで大きくなっている。これはA点の平均流速  $V_a$  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(1)式よりも小さいことが分かる。しかし、両者は(1)式の曲線を挟んで分布しており、平均的には(1)式の妥当性が確認できる。さらに、図中には段落ちモデル<sup>1)</sup>に流量係数  $\mu = 0.8$  および  $1.0$  を与えた場合の流量がそれぞれ細線および破線で示されている。 $h_a$  が3cm以下の場合には、流入流量  $Q$  を本研究で提案する(1)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。

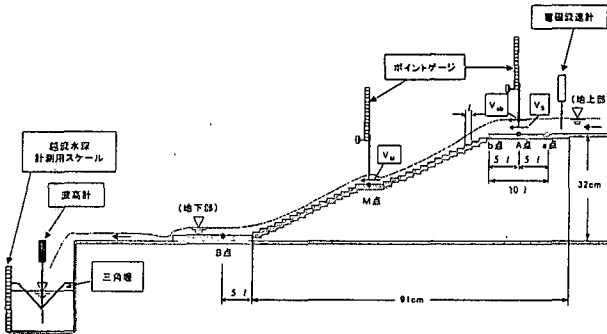


図-8 水理実験の概要

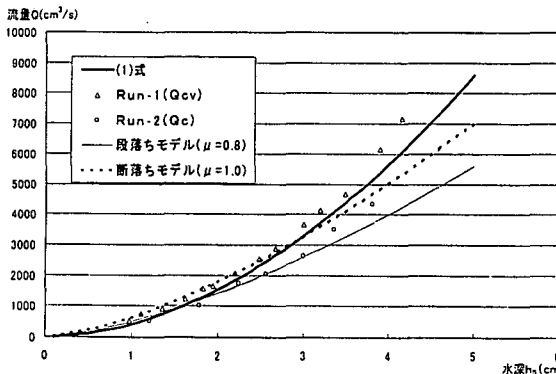


図-10 階段入口からの流入流量(段差なし)

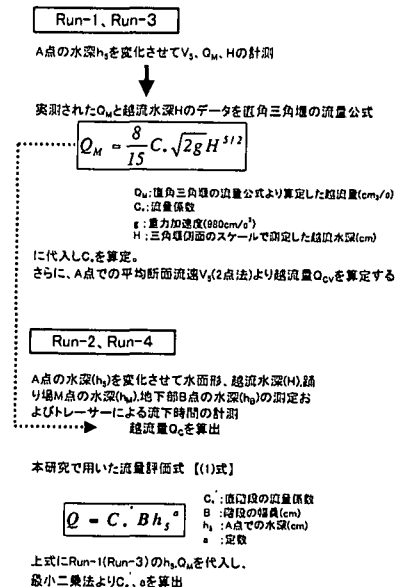


図-9 水理実験データの解析フローチャート

図-11は、階段端部b点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、階段部への流入流量  $Q$  の増加とともに同一測点での  $h/h_c$  の値が減少傾向にある。すなわち、流量  $Q$  の増加に伴って、b点近傍に出現する射流区間( $h/h_c < 1$ )が上流側へ拡大していくものと解釈できる。なお、b点より下流側の階段直上の流れは、すべて射流であった。

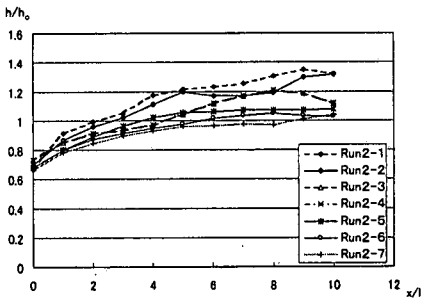


図-11 b点～a点間の水面形（段差なし）

図-12はRun-2, Run-4の場合の  $Q_c$  と表-5に示す2つの場合の流量評価式とを併記している。図から、A点の水深  $h_5$  が2 cmを超えるあたりから、同一水深でも段差を有する方が階段部へ流入する流量は小さくなるのがわかる。すなわち、段差の設置効果が確認された。

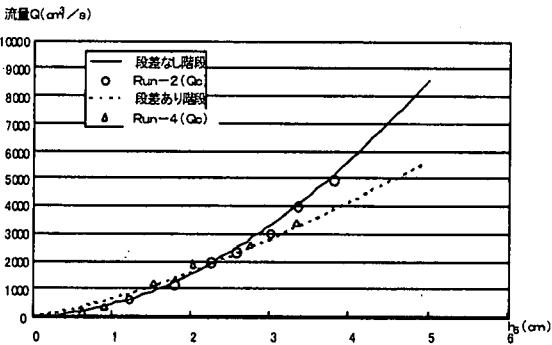


図-12 流入流量の評価式に及ぼす段差の影響

表-5 (1)式の流量係数  $C_{*}'$  と定数  $a$

|       | $C_{*}'$ | $a$ | 段差の設置 |
|-------|----------|-----|-------|
| Run-2 | 21.0     | 1.9 | なし    |
| Run-4 | 30.5     | 1.4 | あり    |

## 5. おわりに

本報では、地下空間における浸水対策の一つとして、洪水氾濫に伴う浸水の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システムを早急に確立するための第一段階として、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、その定量的な評価法について提案を行った。まず、地下空間へ流入する流量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・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て水理模型実験を行い、階段入口から地下空間へ流入する流量の評価法を検討した。その結果、流入流量はA点の水深  $h_5$  の指数形式（図-9の(1)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) 井上和也・戸田圭一・市川 温：1999年6月福岡市の都市水害, 自然災害科学, Journal of JSNDS, 18-2,

pp.177～181,1999.

4) 朝日新聞(日刊) : 1999 年 9 月 23 日.

5) 戸田圭一: 1999 年 6 月福岡市の都市型水害について, 平成 11 年度科学研究費補助金研究成果報告書『1999 年 6 月西日本の梅雨前線豪雨による災害に関する調査研究』, pp.137～146, 2000.

6) (財)建設工法研究所:《グラビア》福岡豪雨災害 6.29,九州技報,第 26 号,pp.9～11,2000.

7) 6.29 博多駅周辺浸水調査連絡会: 6.29 福岡豪雨にともなう「博多駅周辺地下空間浸水状況調査結果」, 記者発表資料(平成 11 年 8 月 26 日発表) ,pp.1～9,1999.

8) 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.

9) (社)日本道路協会: 立体横断施設技術基準・同解説, pp.31～32, 1979.

10) 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.