

## 階段入口から地下空間へ横流入する流量の評価法について

Evaluation on Lateral Discharge of Inundating Water Flowed  
from Stair's Entrance into Underground Space

多田彰秀<sup>1</sup>・古本勝弘<sup>2</sup>・田辺雅一<sup>3</sup>

Akihide TADA, Katsuhiko FURUMOTO and Masakazu TANABE

This study deals with the evaluation on the lateral discharge of inundating water flowed from a stair's entrance into underground space. Hydraulic experiments are carried out using a model of a straight stair which is perpendicular to the main flow's direction on the ground. The obtained results are able to propose an empirical formula for evaluating the lateral discharge into underground space. In particular, it is realized that Froude number  $F_r$  of the main flow on the ground and the aspect ratio  $L/B$  play an important role in the inundation flow from a stair's entrance into underground space, where  $L$  is a width of a stair's entrance and  $B$  is the main flow's width on the ground.

*Keywords ; inundation flow, underground space, stair, lateral discharge, boundary condition*

### 1. はじめに

大都市部においては、地下鉄、地下街や地下駐車場など地下空間の開発・利用が盛んである。一方、洪水や高潮等によって地下空間への浸水が一度生じれば、大量の水が短時間に流入し<sup>1)</sup>、地下空間の危険度および被害は地上部よりも甚大なもの予想される。このような地下空間における浸水災害の特徴を鑑み、地上部の洪水氾濫解析とともに地下空間の浸水を数値シミュレーションしようとする研究<sup>2), 3)</sup>がなされている。その際に、境界条件として地下空間に通じる階段入口から流入する流量を評価する必要があり、地上部の主流方向に開口する階段から地下空間に流入する流量の評価については、著者らの研究<sup>4)</sup>がある。



写真-1 階段入口から地下へ流入する流れ<sup>1)</sup>

本研究では、これに引き続き、地上部の主流方向

キーワード； 氾濫浸水，地下空間，階段，横流入量，境界条件

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)正 会 員 工博 長崎大学教授 工学部社会開発工学科

3) 大分県

に対して直角に開口する階段入口から地下空間へ流入する流量の評価法を水理実験データに基づいて確立しようとするものである。

## 2. 水理実験の概要

水理実験には図-1に示すような延長400cm、幅 $B=60\text{cm}$ の水平矩形水路を用いた。水路の左岸側および底部は木板で、右岸側は流況が目視できるようにアクリル板で製作されている。水路下流端から200cm上流の右岸側に主流方向に対して直角に開口する階段入口のアクリル製模型（模型縮尺：1/15）を設置している。水平矩形水路の全流量 $Q$ は、水路下流端のバルブの開度によって変化させるとともに、上流端近傍で整流している。さらに、下流端に堰を設けて階段入口の流況特性を変化させて水理実験を行った。開口部の構造条件としては、階段入口の幅員 $L$ を3種類、地上部に設けた段差（蹴上高 $w=1\text{cm}$ ）の有無で6つの実験ケースを行った（表-1参照）。地上部に相当する水平矩形水路下流端の流量 $Q_t$ および階段入口から横流入する流量 $Q_w$ は、それぞれ三角堰を用いて計測した。とくに、予備的に行った水理実験<sup>5)</sup>では軽減策が施されなかった表面張力の影響を出来る限り除外するため、本実験では階段入口の越流水深が3.00cm以上のケースを中心に横流入流量の計測を行うことにした。一方、越流水深が3.00cmよりも小さいケースについては、医療現場

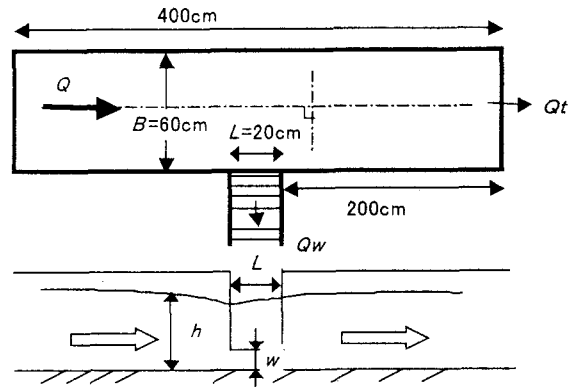


図-1 実験装置の概要

表-1 実験ケースと実験パラメータ

| 実験ケース<br>パラメータ | Run-1 | Run-2 | Run-3 | Run-4 | Run-5 | Run-6 |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $L/B$          | 1/3   | 1/3   | 1/4   | 1/4   | 1/6   | 1/6   |
| $w(\text{cm})$ | 0     | 1     | 0     | 1     | 0     | 1     |

で用いられる点滴装置によって界面活性剤を階段入口の直上流の右岸から注入することにより、表面張力の影響を軽減することにした。なお、ここでは、水道水2lに対して食器用洗剤100mlを添加したものを界面活性剤として用いた。さらに、JIS（規格番号：JISB8302）に従って、階段入口部に設置する段差を新しく製作した。その形状は図-2に示すとおりである。これによって、段差の頂部においても表面張力の影響が除外されるように試みられた。

## 3. 横越流堰からの流量の評価式に関する既往研究

本研究で対象とする流れの形態は、河川における横越流と同様なものと考えられる。すなわち、代表的な横越流堰からの越流量の評価については、室田ら<sup>6)</sup>およびForchheimer<sup>7)</sup>による研究がある。

(1) 室田ら<sup>6)</sup>による評価式

$$Q = C_w \sqrt{2gL} (H_a - w)^{3/2} \quad (1-1),$$

$$C_w = -0.076F_a + 0.29(L/B) - 0.70 \quad (1-2)$$

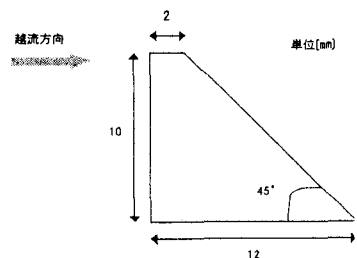


図-2 段差の形状 (JISB8302)

ここに、 $Q$ :横越流量、 $L$ :横越流幅、 $B$ :水路幅、 $H_a$ 、 $F_a$ :横越流堰がない場合の水路床基準の全水頭およびフルード数  $F_a=Q_0/Bh(gh)^{0.5}$ 、 $Q_0$ :水路全流量、 $h$ :水深、 $w$ :堰高である。既往の横越流堰からの流量式は、河川の治水用横越流堰を対象としているため、水路幅  $B$  に対して越流幅  $L$  が非常に大きい場合について求められている。すなわち、(1-1)～(1-2)式の適用範囲は  $L/B=3\sim 9$  である。一方、本研究で対象とする  $L/B<1$  のような場合に(1-2)式を適用すると、 $C_w$ は負値となり全く適合しない。そこで、本研究では(1-1)式が階段入口から流入する流量の評価に適用できるものと考え、 $C_w$ の表示式を実験データに基づき求めることにした。

## (2) Forchheimer<sup>7)</sup>による評価式

Forchheimer は、漸縮水路内の常流を対象とするとともに、Engelsの実験結果を用いて

(2)式に示すような横越流量の評価式を理論的な解析に基づいて提案した。

$$Q = \frac{2\sqrt{2g}}{3} \mu L \left( \frac{h_0 + h_1}{2} \right) \quad (2)$$

ここに、 $Q$ :横越流量、 $\mu$ :流量係数( $=0.644$ )、 $L$ :横越流堰長、 $h_0$ 、 $h_1$ :堰の上流端および下流端における越流水深である。

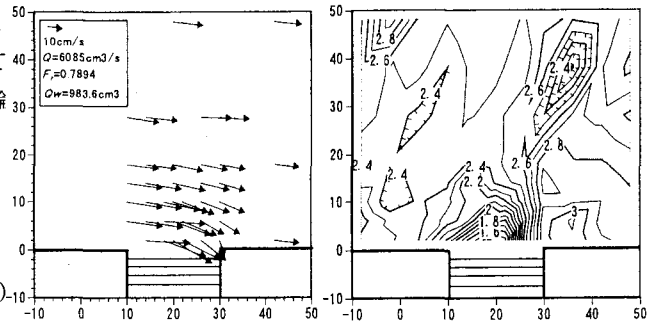


図-3 流速ベクトルと等深線 ( $F_r = 0.79$ )

## 4. 実験結果および考察

### (1) 予備実験の結果

図-3および図-4は、上流端流量が等しく下流端条件の異なる流れの流速ベクトルと等水深線(図中の数字は水深(cm))を示したものである。前者の下流端条件は堰上げなし、後者は堰上げ2cmの場合の実験ケースである。堰上げなしの実験ケースでは、水深が小さく流速が速い。一方、下流端で堰上げが2cmの場合には水深が大きく流速が遅くなっていることが分かる。その結果、主流方向の流速の大きな前者の方が後より階段に流れ込む流量は小さくなっている。このように階段入口から流入する流量は、主流のフルード数  $F_r$  に大きく影響されることが確認された。

さらに、予備実験で得られた階段流入量( $Q_w$ )、水路床基準の主流の全水頭( $H$ )、階段入口の幅員( $L$ )および段差の蹴上高( $w$ )を(1-1)式に代入して  $C_w$ を求め、階段入口上流部の主流のフルード数  $F_r$ との関係を示したものが、図-5である。図中には  $L/B$ および  $w$ を実験パラメータとして

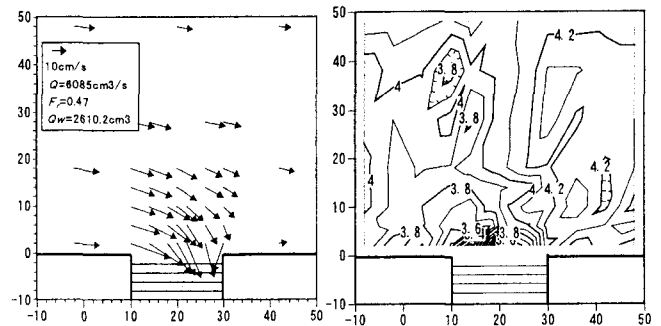


図-4 流速ベクトルと等深線 ( $F_r = 0.47$ )

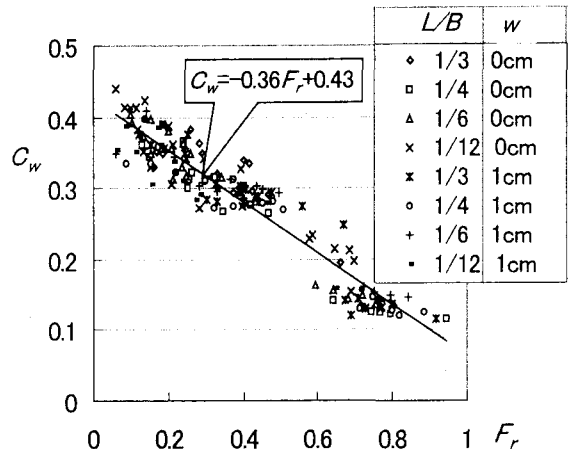


図-5 流量係数  $C_w$  とフルード数  $F_r$  の関係

変化させた結果がプロットされているものの、これらの値の違いによる有意な差を認めることができない。本来、 $L/B$ 、 $\Delta h/w$  ( $\Delta h$ : 越流水深) などは越流水脈の縮流に関するパラメータとして流量係数  $C_w$  に影響を及ぼすものである。しかし、ここでの実験水深が比較的小さい値であったために、主流の表面波、流れ自身の不安定性および階段入口の不整形等の影響を受けて、データのばらつきが大きく、それら実験パラメータの相違に基づく関係を明確に見出せなかった。そのため、流量係数  $C_w$  は主流のフルード数のみに支配されるものと見なして、階段入口から流入する流量の評価式として次式を得た。

$$Q_w = C_w \sqrt{2g} L (H - w)^{3/2} \quad (3-1)$$

$$C_w = -0.36 F_r + 0.43 \quad (3-2)$$

ここに、 $H$ : 階段入口直上流の全水頭 ( $= h + Q_0^2 / (2gB^2 h^2)$ ) および  $F_r = Q_0 / (\sqrt{gh} Bh)$  である。

既述したように Forchheimer が理論的な解析で提案した横越流堰の流量評価式は、横越流堰前面の越流水深を用い、(3-1) 式の  $C_w \sqrt{2g}$  が  $(2\sqrt{2g}/3)\mu$  ( $\mu = 0.644$ ) と置かれている。予備実験データの整理に際しては、横流出の影響が及ばない直上流の水深を用いている。

これは、氾濫解析で求められる地下入口上流部の水深から流入量を計算できるようにするためである。(3-2) 式で  $F_r \rightarrow 0$  における  $C_w$  の値を  $\mu$  に換算すると、 $\mu = 0.645$  となり Forchheimer が用いた値とほぼ一致する結果となっている。

## (2) 本実験の結果

水平矩形水路の全流量  $Q (= Q_w + Q_t)$  と階段入口から地下空間へ流入する流量  $Q_w$  との関係を明らかにするため、本研究では  $Q_w/Q$  を流量分配率と定義する。図-6 は、実験ケース Run-1、Run-2 および Run-5 の流量分配率  $Q_w/Q$  と階段入口より上流側の主流フルード数  $F_r$  との関係を整理したものである。図より、主流フルード数  $F_r$  の増加とともに流量分配率  $Q_w/Q$  が減少していることが分かる。すなわち、階段入口から地下空間へ横流入する流量は、地上部主流の有する慣性力 (フルード数  $F_r$ ) の大きさに著しく支配されているものと判断される。また、3つの実験ケースを比較すると、Run-1 の流量分配率  $Q_w/Q$  が他の2ケースよりも大きな値となっている。このことから、 $L/B$  および  $w$  は階段入口から横流入する流量  $Q_w$  に影響を及ぼすパラメータと考えられる。

階段入口から地下空間へ流入する流量  $Q_w$ 、水路床を基準とした主流の全水頭  $H$ 、階段入口の幅員  $L$  および蹴上高  $w$  を (1-1) 式に代入して流量係数  $C_w$  を求めるとともに、主流のフルード数  $F_r$  との関係を整理したものが図-7および図-8である。両図中には最小2乗法で求められた回帰直線が、実線、破線および一点鎖線で併記されている。同一の  $L/B (= 1/3)$  の条件下で段差の有無による相違を明らかにした図-7では、段差を設けた Run-2 の方が段差を設けなかった

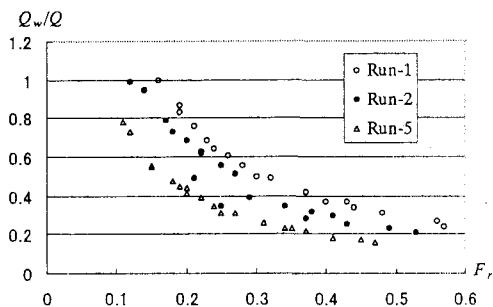


図-6 分配率とフルード数  $F_r$

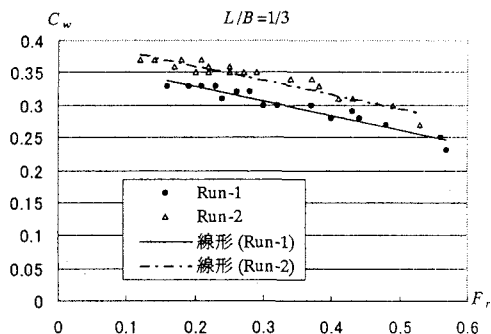


図-7  $C_w$  と  $F_r$  の関係 ( $L/B = 1/3$ )

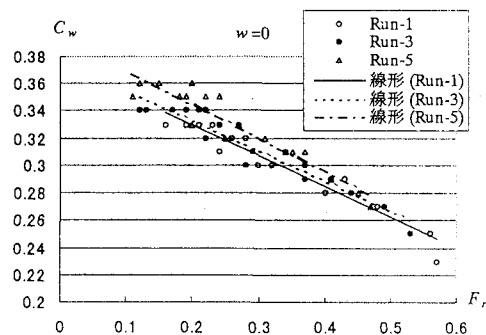


図-8  $C_w$  と  $F_r$  の関係 ( $w=0$ ; 段差なし)

Run-1 の流量係数  $C_w$  よりも常に大きくなっている。

一方、段差のない場合の実験ケース Run-1、Run-3 および Run-5 を対象に、 $L/B$  の値が流量係数  $C_w$  に及ぼす影響を比較したものが図-8 である。図中の 3 ケースの回帰直線は次のとおりである。

$$L/B = 1/3 \text{ (実線)}: C_w = -0.22 \cdot F_r + 0.37 \quad (4-1)$$

$$L/B = 1/4 \text{ (破線)}: C_w = -0.22 \cdot F_r + 0.38 \quad (4-2)$$

$$L/B = 1/6 \text{ (一点鎖線)}: C_w = -0.25 \cdot F_r + 0.39 \quad (4-3)$$

なお、上述の 3 つの式の相関係数は、それぞれ 0.93、0.92、0.90 であった。これらの式より、傾きは 3 ケースともほぼ同じ値であることが、切片の値 ( $F_r = 0$  のときの  $C_w$  の値) は全て異なった値となっていることが分かる。したがって、 $L/B$  の影響が流量係数  $C_w$  の値に現れたものと考えて、階段入口から地下空間へ横流入する流量の評価式として次式を提案する。

$$Q = C_w \sqrt{2gL(H-w)^{3/2}} \quad (5-1)$$

$$C_w = -0.22F_r - 0.12(L/B) + 0.41 \quad (5-2)$$

## 7. おわりに

地上部の氾濫水が地下空間に流入するような流れを数値シミュレーションする場合、階段入口から流入する流量を評価することが境界条件として必要不可欠である。本研究では、主流方向に対して直角に開口する階段入口から地下空間へ流入する流量の評価式を水理実験データに基づいて求めた。とくに、予備実験の結果から改善すべき点であった表面張力の影響を軽減できるような対策を施しながら水理実験を行った。その結果、流量係数  $C_w$  は地上部主流のフルード数  $F_r$  と  $L/B$  に影響されることが明らかになった。さらに、(5-1) 式および (5-2) 式が提案されたものの、段差のある場合については適用可能性に関するさらなる検討の余地が残された。

## 謝 辞：

本研究は、(財) 国土技術研究センター研究開発助成「地下空間の水害危険度評価手法の開発と防御システムに関する研究」(代表者：戸田圭一) の援助を受けて実施されたものである。ここに記して、(財) 国土技術研究センターおよび京都大学防災研究所教授戸田圭一先生に対し謝意を表します。

## 《参考文献》

- 1) (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、2000.
- 2) 井上和也・中川 一・戸田圭一・溝田敏夫：地下空間の氾濫水の解析、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) 戸田圭一・井上和也・栗山健作・前田 修：大都市の地下空間の氾濫浸水シミュレーション (その 2)、地下空間シンポジウム論文・報告集、第 6 巻、B1-3、pp.109-115、2001.
- 4) 多田彰秀・井上啓由・本田洋平・古本勝弘：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、水工学論文集、第 45 巻、pp.901-906、2001.
- 5) 松尾卓也・多田彰秀・本田洋平・古本勝弘：洪水氾濫に伴う地下空間への横流入量の実験的評価、平成 13 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-80、2002.
- 6) 室田 明・福原輝幸・鯨田義浩：横越流堰の越流量の評価に関する研究、土木学会論文集、第 363 号/II-4 (ノート)、pp.249-252、1985.
- 7) 土木学会編：水理公式集、昭和 60 年度版、p.294、1985.