

急勾配階段状水路の雨水排水路への適用について

ON THE APPLICATION OF STEPPED STEEP CHANNELS TO DRAINAGE WORK

成合功光¹・大本照憲²・矢北孝一³・田中 清⁴・太郎良菊憲⁵

Norimitsu NARIAI, Terunori OHMOTO, Kouichi YAKITA,
Kiyoshi TANAKA and Kikunori TAROURA

¹正会員 工修 熊本大学大学院 自然科学研究科 博士後期課程 社会人特別選抜
(〒860-0862 熊本市黒髪2-39-1) (第一復建株式会社 技術統括本部 技術開発室)

²正会員 工博 熊本大学 工学部環境システム工学科 (〒860-0862 熊本市黒髪2-39-1)

³正会員 熊本大学技官 熊本大学 工学部環境システム工学科 (〒860-0862 熊本市黒髪2-39-1)

⁴正会員 第一復建株式会社 技術第2本部 水工部 (〒816-0094 福岡市博多区諸岡1丁目7-25)

⁵非会員 第一復建株式会社 技術第2本部 水工部 (〒816-0094 福岡市博多区諸岡1丁目7-25)

Stepped steep channels have been used as effective energy dissipators for steep channel flow with high kinetic energy. In addition, they are used in water treatment plants to enhance the transfer of atmospheric gases through the free surface into wastewater. However, the hydraulic design manual has not been provided yet.

In this study, a one twenty-fifth scale model experiments were executed to apply stepped steep open channels to drainage works in steep landform. The results gave the verification of stable flow regime in design flood discharge, the determination of the optimum step height, the evaluation of fluid dynamic force in a bend.

Key Words : stepped steep channel, energy dissipator, skimming flow, model experiment

1. はじめに

急勾配水路における流れの減勢施設として、跳水式や自由落下式の減勢工などがある。しかし、都市域においては、用地の条件や騒音発生の問題などで下流に上記の施設を設けられない場合がある。この様なときに有効な手段として下流に大規模な減勢施設を必要としない階段状水路が考えられる。但し、階段状水路は、現在のところ、基本的な形状・寸法および技術基準等が整備されていないため、設計にあたっては担当者の経験や模型実験に頼らざるを得ないのが現状である。

また、主に階段状水路のエネルギー減勢効果を目的とした研究¹⁾²⁾がなされているものの、高速流で水深が小さく、気泡混入量や水面変動が大きいと、水深の評価に曖昧さが残る。そのため、各研究者によってエネルギー損失係数の評価が異なり³⁾⁴⁾、実験データのばらつきも大きい。また、実験に工夫の施された研究例⁵⁾もあるが、その算定方法は確立されたとはいえない。

本研究は、急峻な地形に計画した流域面積約30ha、最

大設計流量が約20m³/sの雨水排水用階段状水路を設計するために、模型実験を行い、その結果について報告するものである。

当初は急傾斜地の水路において高速流が予想されるため、高さ約40mの流入立坑により減勢させる計画を立てたが、騒音への懸念や管理上の問題が発生したことから、現況地形の勾配(約1/2)に合わせた急勾配階段状水路を含む縦断計画に変更した。

この縦断計画では、その地形および用地的な制約により、急勾配階段状水路が連続し、平面線形が蛇行するなど境界条件が複雑であるために、設計流量における流況を数値計算などの手段により予測することは困難なことから模型実験を行った。

本実験の目的は、設計流量における流況の把握、勾配変化が流速および水深に与える影響、適切な落差高の決定、屈曲部を含んだ平面形状の治水安全度の確認などである。本実験結果により治水上安全な構造物を設計することができた。

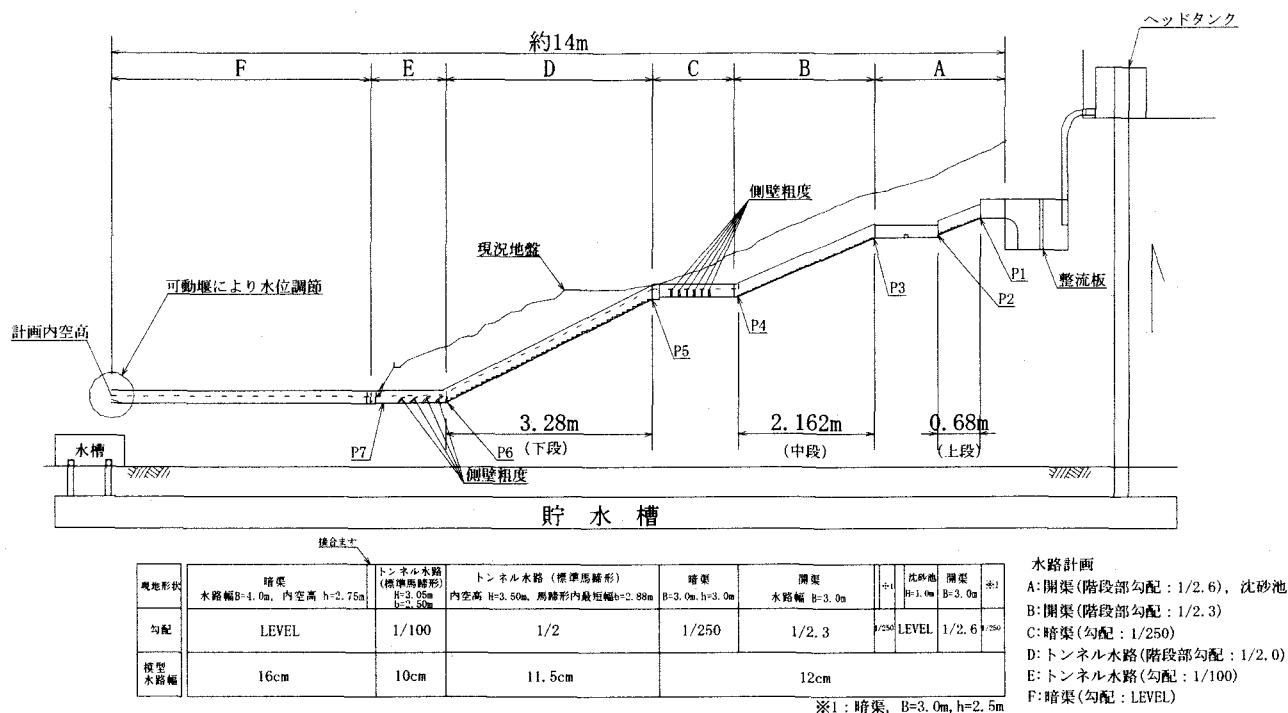


図-1 模型縦断面図

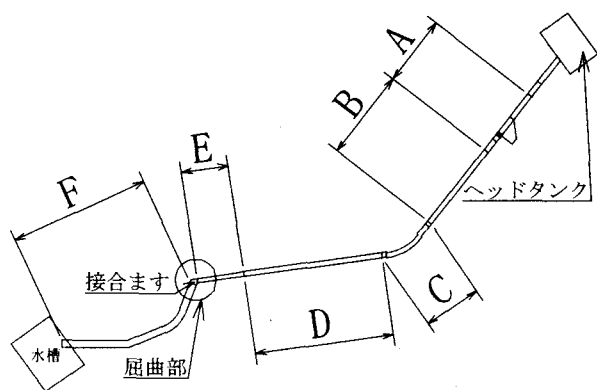


図-2 模型平面図

表-1 各物理量の縮尺

項目	縮尺	S=25のとき
距離	1:S	1/25
面積	1:S ²	1/625
体積	1:S ³	1/15,625
流速	1:S ^{1/2}	1/5
流量	1:S ^{5/2}	1/3,125
粗度係数	1:S ^{1/6}	1/1.71

表-2 階段設置区間

水路の位置	勾配	現地計画	現地延長(m)	模型延長(m)	模型水路幅(m)
A(上段)	1/2.6	開渠	17.00	0.680	0.12
B(中段)	1/2.3	開渠	54.05	2.162	0.115
D(下段)	1/2.0	標準馬蹄形	82.00	3.280	0.16

表-3 落差高の組み合わせ

	現地(m)			模型(cm)		
	Case1	Case2	Case3	Case1	Case2	Case3
A(上段)	0.5	0.5	1.0	2	2	4
B(中段)	0.5	0.5	1.0	2	2	4
D(下段)	0.5	1.0	1.5	2	4	6

表-4 実験流量

流量ケース	Q1	Q2	Q3
実験流量(L/s)	6.7	5.8	4.4
設計流量(m ³ /s)	20.8	17.9	13.7
流量の規模(計画降雨降水量の超過確率年の逆数)	1/100の1.3倍	1/30の1.3倍	1/30
降雨強度(mm/hr)	271	233	179
備考	トンネル河川設計流量 ⁶⁾	暗渠の設計流量	開渠の設計流量
レイノルズ数(模型)	5.6×10 ⁴	4.8×10 ⁴	3.7×10 ⁴
流量ケース	Q4	Q5	Q6
実験流量(L/s)	3.3	1.5	0.74
設計流量(m ³ /s)	10.2	4.6	2.3
流量の規模(計画降雨降水量の超過確率年の逆数)	1/5	1~6回/年	5~20回以上/年
降雨強度(mm/hr)	133	60	30
備考	中小規模洪水流量		
レイノルズ数(模型)	2.7×10 ⁴	1.3×10 ⁴	0.6×10 ⁴

2. 実験条件および方法

(1) 水路断面

本水路は、全区間が自由水面を有する開水路流れとして計画していることから、フルードの相似則を適用し、縮尺を1/25とした。各物理量の縮尺を表-1に示す。水路は全区間矩形断面で、階段部分とともに全てアクリル板で製作した。また、標準馬蹄形であるトンネル水路断面も矩形断面に置き換えたのは、本実験が水路全体の流況の把握を目的にしており、縦断方向の水面形状の変化に対して横断方向の変化は微小であると判断したからである。なお、矩形断面幅は標準馬蹄形内の最短幅に設定し断面を最小としている。

(2) 水路形状および落差形状

図-1に模型縦断面図、図-2に模型平面図を示す。図-2に示すように、本水路は、用地上の制約から平面的に屈曲した線形をとらざるを得なかった。

水路の放流先は、感潮区間にあたる河口であるので、干潮と満潮の水位を設定できるように可動堰を設置した。

階段設置区間を表-2に示す。最も延長の長い下段は落差高を現地の寸法で0.5,1.0,1.5mの3ケースを、上段および中段の階段は、宅地内の開渠であることから落差高を大きくした場合に騒音の懸念があるため、0.5,1.0mの2ケースとし、表-3のように落差高をCase1～3の3パターンに組み合わせて実験を行った。また、階段の減勢効果を確認するために、滑面水路の場合の実験も行った。

(3) 粗度係数

トンネル河川および開渠・暗渠の流速算定時の粗度係数は、河川砂防技術基準⁶⁾および水路管理者であるA市の設計指針によると、それぞれ現地寸法で0.015および0.02である。これを表-1に従い模型の粗度係数に換算すると、0.009および0.012となる。アクリル板の粗度係数は一般に0.009～0.01といわれている⁷⁾ことから、粗度係数の整合は図られていると判断した。

(4) 実験流量

実験流量は、各区間において設計流量が異なるため、それらの設計流量を通水させた。また、比較的発生頻度の高い流量での流況も検証するために、中小規模の洪水流量も通水させた。表-4に実験流量を示す。なお、各流量における模型実験での最小のレイノルズ数も併記している。これから、本実験条件での流れは、完全発達した乱流である。

(5) 計測位置および方法

計測位置を図-1に示す。P1, P2, P3, P5, P7は、ポイントゲージにより断面内の左岸、水路中央、右岸の3

点の水深を計測し平均した。流速は求めた水深より、連続の式を使用して逆算した。なお、平面線形の蛇行による偏流が発生するP5は、水面形を曲線近似し流積を求め、流速を算出した。

また、階段部分のうち、P4およびP6は、気泡混入が激しく、既往の計測機器の使用は難しいことから、発泡スチロール製の球形粒子（直径20mm）を用い、表面流速を計測した。その手順は、水路鉛直上方からデジタルビデオカメラ（撮影最小単位：1/30s）で、個別に流下させた20個の粒子を撮影し、その画像から粒子の移動距離を計測して、流速を算出し平均した。なお、階段状水路末端部の水深は、水路勾配に対して鉛直方向を水深とした。

また、下流の屈曲部には、計画断面が標準馬蹄形から矩形断面に変わるため、接合ますを設置する。その側壁には、設計流量が流下する際に発生する偏流によって、大きな流体力が作用するが、本流体力は、P7の流速より算出した。

(6) その他

本水路には2箇所側壁粗度を設置している。

区間Cの側壁粗度は、Q1の流量流下時に、曲線による偏流と高流速による区間Dの流入部での流水のジャンプが発生したため、それを抑えるために設けた。

また、区間Eの側壁粗度は、水路管理者との協議により流速をP7で7m/s以下に低減させる必要があったために設置した。この区間は、トンネル水路となるので、飛沫を考慮しても十分な空面積が確保できるように傾斜角を設定した。

3. 実験結果

以下に、模型実験結果について示す。ただし、結果はすべて現地の寸法で表記した。

(1) 階段部の流況

階段状水路の流況は、流量と勾配が小さく水脈と階段背面にエアポケットが形成されステップ状で跳水が発生するNappe Flowと、階段隅角部にローラー状の渦が形成され流水が各ステップのエッジを連ねた線上を流下するSkimming flowの2つに大別されている。その流況を判別する式として、代表的なものに広範囲の実験データから得られたH.Chanson¹⁾の式がある。

$$\left. \begin{aligned} h_c/D &\leq 1.057 - 0.465 \times D/L : \text{Nappe flow} \\ h_c/D &> 1.057 - 0.465 \times D/L : \text{Skimming flow} \end{aligned} \right\} (1)$$

ここに、 D ：階段の高さ(m)、 h_c ：限界水深(m)、 L ：階段の長さ(m)である。なお、式(1)は $D/L=0.2\sim 1.25$ の範囲から得られたものである。

また、ステップが $D/L=0.4\sim 0.9$ において整理されたRajaratnam⁸⁾の判別式は、次式となっている。

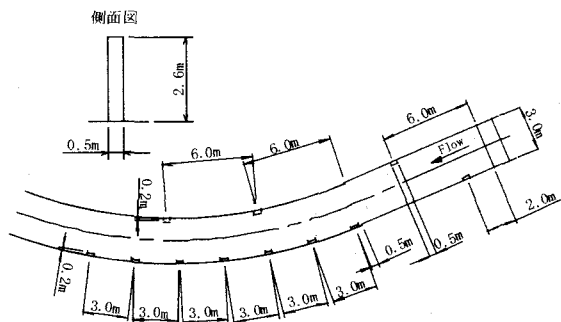


図-3 側壁粗度

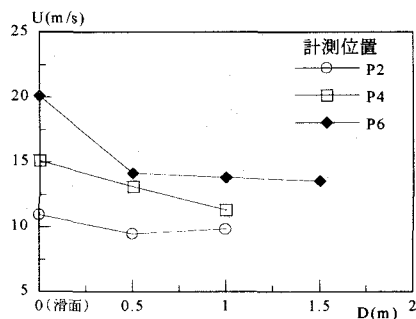


図-4 落差高と流速(Q1)

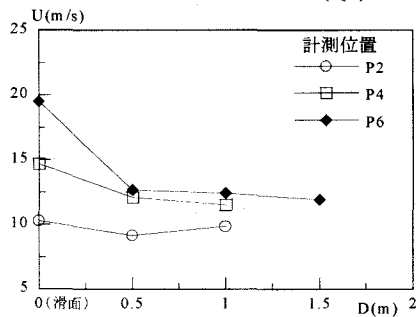


図-5 落差高と流速(Q2)

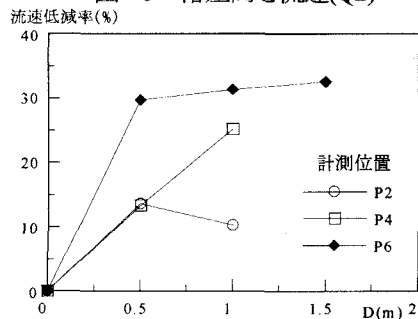


図-6 落差高と流速低減率(Q1)

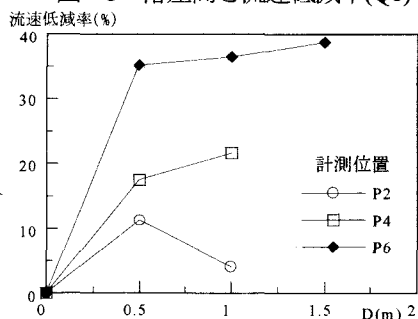


図-7 落差高と流速低減率(Q2)

$h_c/D \geq 0.80$: Skimming flow

$h_c/D < 0.80$: Nappe flow

表-5に式(1)と(2)をもとに判定した流況と本実験での

表-5 流況の判定と実験結果

流量 ケース	式(1)での 判定			式(2)での 判定			実験結果 (目視観察)		
Q1	S	S	S	S	S	S	S	S	S
Q2	S	S	S	S	S	S	S	S	S
Q3	S	S	S	S	S	S	S	S	S
Q4	S	S	S	S	S	S	S	S	S
Q5	S	S	N	S	S	N	S	N	N
Q6	N	N	N	N	N	N	N	N	N

N : Nappe flow, S : Skimming flow

※判定は上段(左), 中段(中), 下段(右)で, 階段形状は, 表-3, Case2の場合である。

表-6 落差高の組み合わせとP7での流速(Q1)

落差高	Case1	Case2	Case3
流速(m/s)	7.2	6.0	5.9

※P7直前の区間Eの側壁粗度の傾斜角は90°である。

表-7 各測点での流速

流量ケース	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6
測点	U (m/s)	U (m/s)	U (m/s)	U (m/s)	U (m/s)	U (m/s)
P1	4.5	4.3	4.0	3.6	2.2	1.8
P2	9.5	9.1	8.5	9.5	6.9	5.1
P3	6.0	5.2	5.5	5.6	4.2	2.9
P4	13.1	12.1	12.0	10.4	6.0	5.2
P5	5.3	5.3	5.7	5.4	4.2	3.3
P6	13.8	12.4	12.2	10.4	6.1	4.8
P7	6.3	5.6	5.2	4.2	2.9	1.9

※P7直前の区間Eの側壁粗度の傾斜角は45°である。

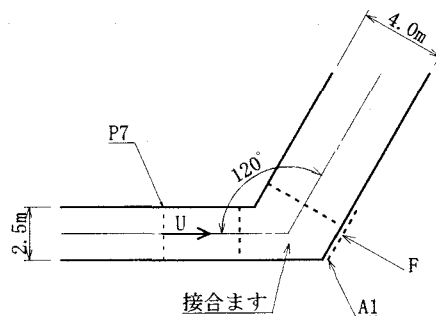


図-8 屈曲部

流況を比較したものを示す。

これより, 各設計流量であるQ1, Q2, Q3における階段状水路の流況は, 区間Cに図-3に示すような側壁粗度を設け, 偏流を抑制し, 流れを一様化することにより, Skimming Flowとなることがわかった。

(2) 落差高の決定

図-4にQ1における階段状水路の落差高と末端部流速の関係を示す。これから, 流速は滑面および階段とも下流に向かうに従い増大し, 加速している。また, 滑面と比較すると階段により流速が低減していることがわかる。

全体的には, 本実験の範囲内では, 落差高の増大に伴って流速は低減するが, その効果はそれほど顕著には

見られなかった。これらの傾向は、図-5のQ2における階段状水路の落差高と末端部流速の関係でもみられた。

図-6および図-7は、滑面水路に対する流速の低減率の関係を示したものである。区間Aの階段の末端部P2では、10%程度の流速の低減が見られる。区間Bの末端部P4では15%~20%低減しており、ここでは落差の増大が流速の低減につながっている。最下流の最も延長の長い区間Dの末端部P6においては、落差高による流速の低減率の顕著な差は見られないものの、30%以上の流速の低減が認められた。

表-6は、落差高の組み合わせとP7での流速を示したものである。Case2およびCase3において、P7での流速が7m/s以下となるが、落差高の増大による流速の低減効果がそれほど見られないことや、下段の落差高を増大させることは、トンネル断面が拡大し不経済になることから、表-3に示すCase2の階段形状を選択した。なお、階段形状を決定した際の区間Eの側壁粗度の傾斜角は90°としたが、この区間は、トンネル水路となるので、飛沫を考慮しても十分な空面積が確保できるような傾斜角を求める実験を別途行った結果、傾斜角は45°となった。

決定した階段形状の組み合わせにおけるQ1からQ6の各測点の流速を表-7に示す。年間に5~20回発生するQ6の場合で、流速が最大で5m/s程度となり、水路内のコンクリートの摩耗は少ないと考えられる。

(3) 屈曲部の側壁に作用する流体力

下流の屈曲部の接合ますの側壁に作用する流体力を実験結果より算出する。図-8に屈曲部を示す。ここで、A1面に作用する力を直前のP7の流速より求めた。

$$F = \frac{P}{A} = \frac{\rho Q U \cos 30^\circ}{A}$$

ここに、 F ：側壁に作用する単位面積あたりの力(tf/m²)、 P ：側壁に作用する力(tf)、 A ：対象面積(m²)、 ρ ：密度(g/cm³)、 Q ：流量(m³/s)、 U ：流速(m/s)である。

これから、流量がQ1の場合で F を計算すると3.0(tf/m²)となる。これを接合ますの構造計算を行う際の荷重条件に加えて、部材厚および鉄筋径を決定することで、偏流に対しても安全な構造物を設計した。

4. 考察

(1) 階段部分の粗度係数の推定

階段状水路では、流況がNappe Flowや、Skimming Flow、または、それらの遷移領域など不確定な形態となり、落差高や流量に伴って流況も変化することから、階段に対する適切な粗度を設定することは困難である。

図-9は、表-6の落差形状での実験結果から得られた階段状水路末端部の流速よりManningの式で逆算した現地換算の粗度係数 n と流量の関係を示したものである。

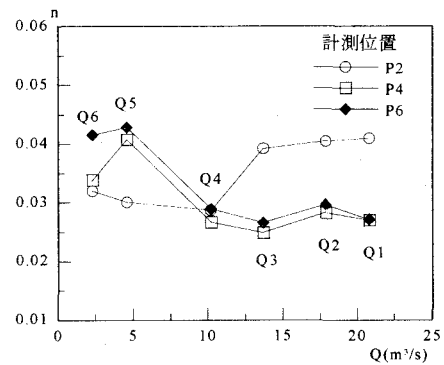


図-9 流量と粗度係数

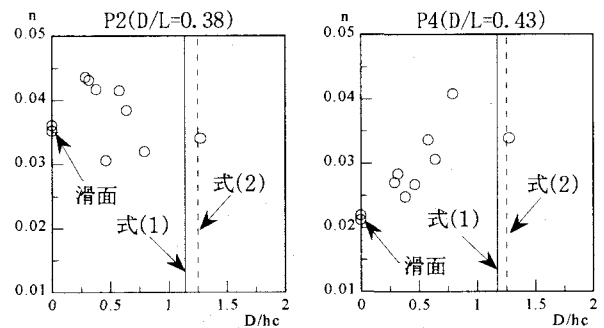


図-10 P2での粗度係数 図-11 P4での粗度係数

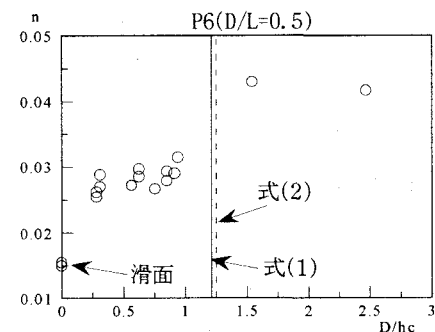


図-12 P6での粗度係数

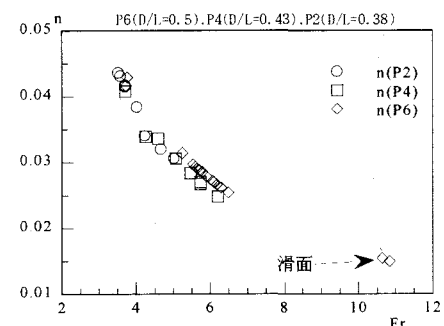


図-13 Fr数と粗度係数

これから、P2では、流量がQ4からQ3になると急激に粗度係数が大きくなり、逆にP4およびP6では、流量がQ5からQ4にうつると急激に粗度係数が小さくなった。

表-5による実験結果の流況から、粗度係数の急激な変化は、流況がNappe FlowかSkimming Flowによる違いで発生したものと考えられる。また、P2が他の2点と異なる傾向にあるのは、最上流であり、他の区間に比べて区間距離も短いことから流れが平衡場に達していないことが考えられる。

図-10~12に各実験ケースでのP2、P4、P6における

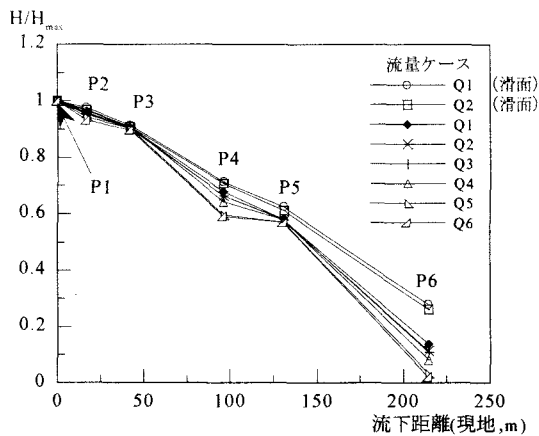


図-14 各測点での水頭比

粗度係数を示す。図中の実線および点線は、式(1)および式(2)の判定式による値をプロットしたもので、 D/hc がそれ以下であればSkimming Flowである。

図-10を見ると、P2の粗度係数は、全体的にばらついており、その特徴を把握することは難しい。図-11のP4での粗度係数でも、全体的には滑面の粗度係数よりは大きい、まとまった傾向として表れていない。

図-12のP6での粗度係数をみると、滑面では、アクリルの粗度係数の0.01に近い0.015付近にあり、流れが等流に近いと考えられる。階段部分の粗度係数は、0.025～0.03の領域に点在していることから、階段により粗度係数を1.5～2倍程度に増大させることができたといえる。

図-13に階段状水路末端部のFr数と粗度係数の関係を示す。Fr数は全て1を越え射流である。これから、流下するにつれて流速が増大し、Fr数が増大するほど階段による粗度係数は反比例して減少するが、少なくとも滑面の1.5～2倍程度の粗度係数を確保することができたと考えられる。

(2) エネルギー損失

図-14は、P1での全水頭を H_{max} として、各地点の全水頭との比をプロットしたものである。上流のP2およびP3では、各流量の水頭比に差は見られないが、P4およびP6では、Q5およびQ6の水頭比が小さく、エネルギー損失が大きくなっている。これらの流量での流況はNappe Flowであることから、本実験条件では、Skimming Flowよりもエネルギーを減勢させるといえる。

しかし、Nappe Flowでは、ステップ上で跳水が発生し、流水が剥離し水脈となり、階段隅角部にエアポケットが形成される。そのため、Skimming Flowと比べて流れが不安定になることが考えられる。また、設計流量においてNappe Flowを発生させるためには、落差を大きくしなければならず、トンネル水路では、落差高の増加に伴う断面の拡大により、建設用地をより多く確保しなければならないため、今回のように用地の制約のある場合では適用は難しい。

5. まとめ

本研究では、急峻な地形に計画した雨水排水路に階段状水路を適用し、河川砂防技術基準⁶⁾等を満足するとともに、適切な落差高を決定し、屈曲部を含んだ平面形状の治水安全度を確認するために、模型実験を実施した。本実験結果により、設計に関して有用な情報を収集することができ、治水上安全な構造物を設計することができた。得られた成果をまとめると次のようになる。

- (1) 各設計流量における階段状水路の流況は、区間Cに側壁粗度を設けて偏流を抑制し、流れを一様化することにより、Skimming Flowとなる。
- (2) 階段を設けることで、滑面に対して最大で30%以上の流速の低減があり、エネルギー減勢工として有効な方法であるといえる。また、本実験の範囲内では、落差高の増大による流速の低減効果はそれほど顕著ではなかった。
- (3) 下流における屈曲部の側壁に作用する流体力を実験結果より算出し、これを接合ますの構造計算を行う際の荷重条件に加えて、偏流に対しても安全な構造物を設計した。
- (4) 射流においては、階段の粗度係数は、滑面に対して少なくとも1.5～2倍の粗度を確保することができた。また、本実験条件では、Fr数には反比例する。
- (5) 水頭比から、本実験条件では、Skimming Flowに比べてNappe Flowの方がエネルギー損失は大きい、流れの不安定性や建設用地の制約などから、当該設計箇所でのNappe Flowの適用は難しい。

参考文献

- 1) Chanson, H.: Hydraulic Design of Stepped Cascades, channels, Weirs spillways, Pergamon Press, 1994.
- 2) Chamani, M. R. and Rajaratnam, N. : Characteristics of skimming flow over stepped spillways, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.125, No.4, pp361-368, 1999.
- 3) Kells, J.A : Discussion on "Comparison of energy dissipation between nappe and skimming flow regimes on stepped chutes", *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 33, pp. 128-134. 1995.
- 4) Veerabhadra Rao, P : Discussion on "Hydraulic of skimming flows over stepped channels and spillways", *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 33, pp. 414-419.1995
- 5) 安田陽一, 高橋正行, 大津岩夫: 階段状水路の流水抵抗, 水工学論文集, 第44巻, pp527-532, 2000.
- 6) 建設省河川局, (社)日本河川協会編: 改訂新版 建設省河川砂防技術基準(案) 同解説, 設計編(I), p.119, 1997.
- 7) 建設省土木研究所河川部都市河川研究室: 首都圏外郭放水路の流入立坑に関する水理模型実験, p.6, 1994.
- 8) Rajaratnam, N. : Skimming Flow in Stepped Spillways, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.116, No.4, pp587-591, 1990.

(2001. 4. 16 受付)