

II-203

急勾配階段状水路におけるエネルギー減勢について

第一復建株式会社 正員 ○成合 功光
 熊本大学工学部 正員 大本 照恵、矢北 孝一
 熊本大学大学院 長屋 孝介
 九州建設コンサルタント 末松 誠二

1. はじめに

急勾配階段状水路は、堰やダムの洪水吐、雨水排水路等におけるエネルギー減勢工として利用されて来たが、近年、景観効果や空気連行による水質浄化機能も有することから注目を集めている^{1,2)}。しかし、フルード数の大きい階段状水路の流れは、水面変動や空気混入が大きいため計測が困難であり^{3,4)}、その内部構造に不明な点が多い。本研究では、急傾斜地に設置される雨水排水路のエネルギー減勢工として階段状水路を設計する際の基礎的知見を得るために、水面変動、圧力および流速について実験的検討を行った。

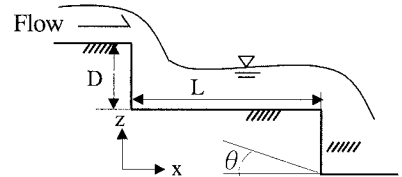


図-1 実験水路の概要

2. 実験装置および方法

実験に用いた水路は、長さ6m、幅40cmの亚克力樹脂製可変勾配水路で、その概要を図-1に示す。階段部は、亚克力で作製し、ステップ高さを1cm、ステップ長を10cmとしてその比を水路勾配1/10に一致させている。流速は境界層型ピトー管と差圧計を用い、水面変動は超音波水位計、底面圧力は円盤高さ1.8mm、直径4mmの小型圧力センサーによって測定した。流速、水面および圧力の変動量は、サンプリング周波数100Hz、1測点のデータ個数を4096に設定して統計処理が施されている。実験条件を表-1に示す。

表-1 実験条件

流量	$Q=3000\text{cm}^3/\text{s}$
限界水深	$hc=1.79\text{cm}$
フルード数	$Fr=3.76$
レイノルズ数	$Re=6600$
水路勾配	$i_0=1/10$
ステップ高	$D=1\text{cm}$
ステップ長	$L=10\text{cm}$

3. 実験結果と考察

階段状水路の流れは、流量と勾配が小さく自由水脈と階段背面にエア・ボケットが形成された場合をナップ流れ(nappe flow)、流量と勾配が大きく階段隅角部に渦が形成され層状に流れる場合をスキミング流れ(skimming flow)に大別されている。目視観察によれば、表-1に示された流れはスキミング流れの領域に入る。広範な実験データを整理することによって得られたH. Chansonの判別式は、 $hc/D > 1.057 - 0.465 \times D/L$:skimming flow, $hc/D \leq 1.057 - 0.465 \times D/L$:nappe flowである。ただし、 hc :限界水深、 D :ステップ高さ、 L :ステップ長とする。上式は、実験範囲が $D/L=0.2 \sim 1.25$ 、勾配 $i_0=0.2 \sim 1.25$ から得られたものであるが、勾配 $i_0=0.1$ である本実験のケースにも適用可能であった。図-2は、局所水深と単位幅流量との関係を示す。図中には、階段を設置する前の滑面水路における水深を比較のために示す。階段エッジから $x=5\text{cm}$ および 9cm の局所水深は、流量が小さく自由水脈の影響が強い場合には、滑面水路の等流水深に比べて小さく、流量増大し階段隅角部の渦が卓越したスキミング流れにおいては、滑面水路の等流水深に比べて大きいことが分かる。ステップ長間の平均水深と単位幅流量との関係を図-3に示す。階段状水路の流量は、水深の $5/3$ 乗にほぼ比例して増大し、

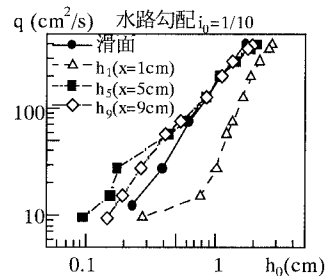


図-2 水深と単位幅流量との関係

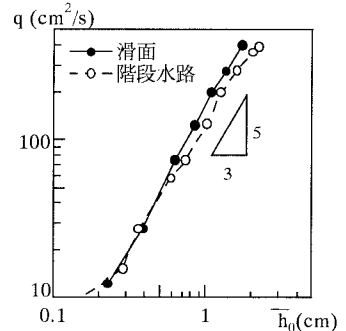


図-3 平均水深と単位幅流量の関係

キーワード：急勾配階段流れ、エネルギー減勢、薄層流、粗度係数、後流
 連絡先（熊本市黒髪2-39-1・電話 096-342-3543・Fax 096-342-3507）

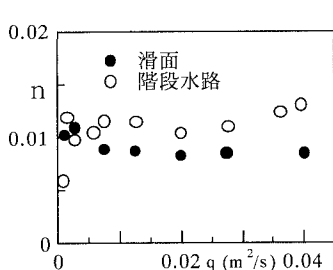


図-4 マニングの粗度係数 n

マニング式が適用可能であること、および滑面水路の場合に比べてその指数が若干小さいことが分かる。図-4は、マニングの粗度係数 n と単位幅流量との関係を示す。滑面水路では流量の小さい2ケースをのぞいて、粗度係数 n は0.0083～0.0089の範囲にありほぼ一定の値に近いが、階段水路の流れでは流量の増大に伴って粗度係数 n が増大し、階段隅角部に形成される渦の流れへの影響が流量に増大に伴って強くなっていることが示唆される。

図-5は、表-1の実験条件における水位および水面変動量の標準偏差の流下方向変化を示す。水深は、水路先端より3cm下流付近までは一様に減少し、それより下流ではほぼ等流に近い。図より、限界水深 $h_c=1.79\text{cm}$ であることから流れは全区間で射流を呈し、水位は流下に従って漸減し、ステップ区間での局所水深は階段エッジから中央の間で急激に減少し、それより下流ではほぼ一定、全体では一様減少傾向にある。水面変動の強さを表す標準偏差は、階段エッジから $x=2.5\text{cm}$ において極大値を示し、水深が大きく変化しない区間ではほぼ一様に近いことが分かる。図-6は、平均圧力の流下方向変化を示す。平均圧力の極大値は、 $x=3\text{cm}$ において現れており、この位置でステップからの剥離流が下流側のステップに再付着することが流速測定の結果から認められ、この位置で動圧と遠心力の効果が強く現れたことが推察される。また、水面変動の標準偏差が極大値を示す位置ともほぼ一致していることが分かる。図-7は、再付着点より下流側における主流速の鉛直分布を示す。図中には、同一条件における滑面水路の主流速分布を併示している。階段水路における主流速は、再付着点より下流では、水面付近では流下方向に大きく変化せず、底面付近で加速流となっていることが分かる。図-8および図-9は、さらに詳細に見るために底面付近における主流速および加速度の流下方向変化を示す。主流速が急激な加速を示すのは、ほぼ極大圧力の直下流からであり、主流速が平衡に達する流下距離は、路床から離れるにしたがって短くなることがわかる。また、図-9より加速度が $x=6\text{cm}\sim 10\text{cm}$ で大きくなったのは、図-5の階段エッジ付近で水脈が湾曲したことによる遠心力の効果が予想される。水路先端より3cm以降の下流位置において流れは、ほぼ等流と見なせることからステップ間でのエネルギー損失水頭は、ステップ高さに等しい。この間のエネルギー損失は、階段隅角部の渦による形状損失と再付着点より下流における底面の摩擦損失によって支配されていると考えられる。また、摩擦損失にDarcy-Weisbachの式を適用し、表-1の条件における摩擦損失水頭 h_f を試算したところ、 $h_f=0.92\text{cm}$ となることから、1ステップ間に占める摩擦損失は約9割で残り1割が形状損失であった。

参考文献

- 1) H. CHANSON: Hydraulic Design of Stepped Cascades, Channels, Weirs and Spillways, Pergamon Press, 1994
- 2) 柏井孝介: ダム景観設計における水理的課題に関する一考察, ダム技術 No. 120, 1996, 9
- 3) 石川誠、赤司信義、斉藤隆: 土木学会第43回年次学術講演会第11部門, 1988, pp. 428-429
- 4) 安田陽一、遠藤和雄、大津岩夫: 土木学会第51回年次学術講演会第11部門, 1996, pp. 236-237

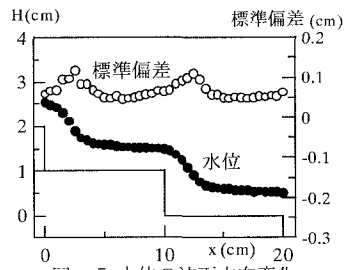


図-5 水位の流下方向変化

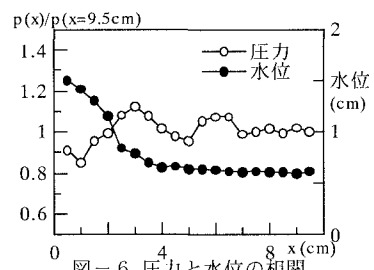


図-6 圧力と水位の相関

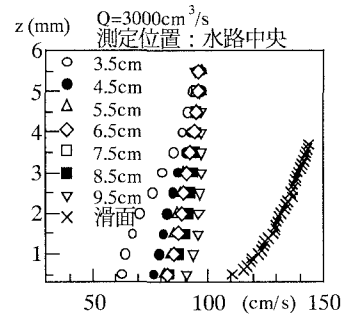


図-7 主流速の鉛直分布

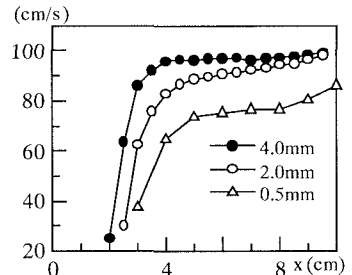


図-8 主流速の流下方向変化

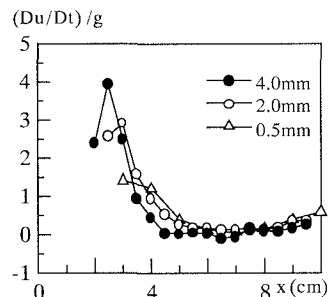


図-9 各位置での加速度