

京都大学防災研究所 正員 芦田和男
 京都大学防災研究所 正員 高橋 保
 名城大学理工学部 正員 新井宗之
 京都大学 工学部 学員 八木秀樹

1. まえがき : 本研究は、防災設計上重要な流路弯曲部における土石流の流動特性に関して実験的研究を行い、射流弯曲部に特有な水面形ならびに転波列の特性を種々の濃度($C=0\sim0.4$) に対して明らかにするとともに、衝撃波理論を用いた Knapp の式および自由渦の条件を用いた C.W. Lenau の理論を検討して、流路弯曲部における水面形の予測を提案するものである。

2. 実験条件および方法 : 実験水路は幅 20 cm 長さ約 17 m の直線部と偏角 45° の弯曲部からなっている。直線部の水路には粗度として 5 mm の礫が貼付してある。弯曲部の水路は流下方向に 10° の勾配を持っており、半径方向には水平である。実験条件、実験材料は表 1 に示す通りである。水位の測定には 16 ミリシネカメラ、35 ミリカメラを用いた。また、清水($C=0$) の実験ではポイントゲージも用いた。

3. 実験結果の考察 : Lenau は台形断面、及び矩形断面の弯曲部における射流の水面形を解析した。エネルギー式、連続式、および自由渦の条件式は円筒座標系で矩形断面について、

$$\frac{V_r^2 + V_\theta^2}{2g} + h = \frac{V^2}{2g} + h_0 \quad \dots (1), \quad \frac{\partial(hV_r)}{\partial r} + \frac{\partial(hV_\theta)}{\partial \theta} = 0 \quad \dots (2)$$

$$\frac{\partial V_r}{\partial \theta} = \frac{\partial(VV_\theta)}{\partial r} \quad \dots (3)$$

を用い、 $\varepsilon = h_0/r_0$ に関するホー一次摂動解として次式を得ている。

$$h = h_0 + E \quad \dots (4)$$

$$E = \frac{V h_0^2}{\sqrt{g h_0} r_0} \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \left\{ \delta \left[x - (R_p + \frac{1}{2}P - y) F_0 \right] - \delta \left[x - (R_p + \frac{1}{2}P + y) F_0 \right] \right\} \quad \dots (5)$$

ここで、 $x = R_0/h_0$, $y = (R - r_0)/h_0$, $P = b/h_0$, $F_0 = U/\sqrt{g h_0}$, $U: \theta = 0$ における流速, r_0 : 水路の中心曲率半径, h_0 : $\theta = 0$ における水深, b : 水路幅, g : 重力加速度, h : 水深である。また、 $\delta(t)$ は $\delta(t) = 0$ ($t \leq 0$), $\delta(t) = t$ ($t > 0$) とする関数である。Lenau の取扱いは Knapp らのもののように限界角変化量に相当する制限がない。

3.1 外壁水深: 実験結果によると外壁水深は濃度が高くなると若干高くなる傾向があるが、顕著な差は認められなかった。図 1(a)~(d) は $r_c = 40, 100$ cm, $Q = 1, 3 \frac{1}{2}$ s および $C = 0 \sim 0.4$ の水路外壁に沿う水面形の実測値 (○印) および計算値 (破線は Knapp の式、実線は Lenau の式) を示している。図中の横軸は外壁に沿った長さ及び偏角を示している。水深は転波列を除いた部分の平均値である。Knapp による計算値は実験値よりやや大きな値になる傾向があり、Lenau による計算値は比較的良好に一致している。図 1(c), (d) において破線が途中でなくなっているのは Knapp の式では適用限界の角

表 1

実験条件

容積濃度	流量 Q /s	曲率半径 cm
0	1	40
0.2	2	60
0.4	3	100

実験材料 ($\sigma = 2.65 \text{ g/cm}^3$)

- 粒状大理石 (3 mm)
- 珪砂 7 号 (0.15 mm)

1:1

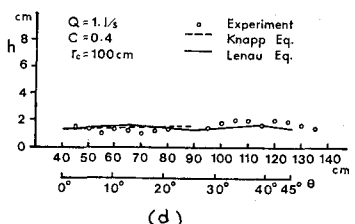
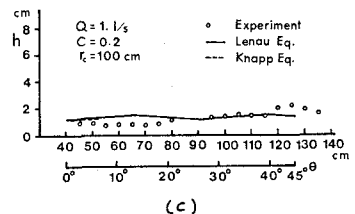
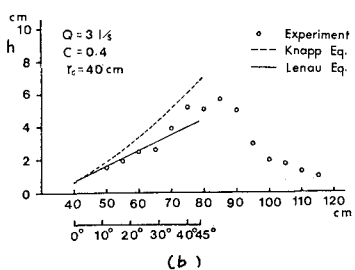
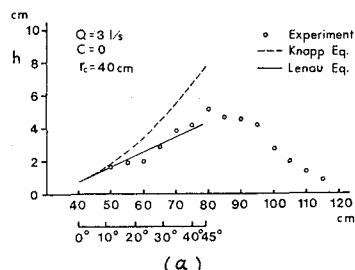


図 1 外壁水深

変化量があるからで、Lenauの式にはそのような制約がない。

3.2 横断水面形：Lenauの式では半径方向の水深も計算できる。図2は実験結果と計算値の例である。よく一致している。

3.3 転波列による外壁水深：転波列を除いた水深を h_0 、転波列による水深を h_w とすれば、外壁の水深 H は

$$H = h_0 + h_w \quad \dots (6)$$

である。 h_w についてもLenauの式で外壁沿いの変化が計算できるものと仮定し、彎曲入り口における h_w として、転波の波高系列から $1/3$ 有義波高を求めて用いた。

図3(a),(b)は計算結果の例である。一点破線が H の計算値で○が実験結果である。計算値と実験値は比較的良好に一致している。

4. 外壁水位低下法：図3を見てわかるように、外壁の水位上昇は非常に高く、これを低下させることができれば設計上有利である。外壁の水位の上昇を軽減させる方法をLenauの式から考察してみよう。(5)式による最大水位は、

$$E_{\max} = \frac{v^2}{gr} \quad \dots (7)$$

であり、これは遠心力と横断水面勾配とがつり合うとする考えによる結果と同じである。いま水路幅 b を n 分割したとする。内壁の曲率半径を r_2 、内壁から i 番目の壁までの距離を b_i とする。それぞれの壁における $E_{\max}$ が同じになるように b_i の位置を決めると、

$$\left. \begin{aligned} b_i/b &= \sqrt[n]{(r_2/b)^n + (r_2/b)^{n-1}} - r_2/b \\ b_i/b &= \frac{(b_{i-1}/b) - (b_i/b) \cdot \frac{r_2}{b}}{r_2/b + b_i/b} \cdot \frac{r_2}{b} \\ b_n/b &= 1, \quad \text{ただし, } 2 \leq i \leq n-1 \end{aligned} \right\} \quad \dots (8)$$

となる。さらに n 分割した $E_{n\max}$ と分割しない $E_{\max}$ との比は、

$$\frac{E_{n\max}^*}{E_{\max}} = \frac{(\sqrt[n]{1+b/r_2} - 1) / (\sqrt[n]{1+b/r_2} + 1)}{(b/r_2) / (2 + b/r_2)} \quad \dots (9)$$

である。図4は $E_{n\max}^*$ と b/r_2 との関係が示されている。これは流路を n 分割すると b/r_2 が小さい場合 $E_{\max}$ は $1/n$ になることを示している。

また、流量 Q を一定として水路幅 b を変えた場合、 $E_{\max}$ を生じる水深 $h_{\max}$ と b との関係は、 $h_{\max} = h_0 + E_{\max} = b^{-\frac{2}{3}} \left(\frac{nQ}{T} \right)^{\frac{2}{3}} + b^{\frac{1}{3}} \left(\frac{T^2 Q^4}{K^2} \right)^{\frac{1}{3}} \frac{1}{gr_0} (K\text{流}) \quad \dots (10)$

$$h_{\max} = h_0 + E_{\max} = b^{-\frac{2}{3}} \left(\frac{Q}{K} \right)^{\frac{2}{3}} + b^{\frac{1}{3}} \left(\frac{Q}{K} \right)^{\frac{2}{3}} \frac{K'}{gr_0}, \quad (\text{土石流}) \quad \dots (11)$$

ただし、 $K = \frac{2}{5d} \cdot \left\{ \frac{g \sin \theta}{a_i \sin \alpha} \cdot [C_d + (1-C_d) \cdot \frac{\rho}{\alpha}]^{\frac{1}{2}} \cdot \left[\left(\frac{C_d}{C_d} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right] \right\}$ となり土石流の場合は水路幅 b が大きい程 $h_{\max}$ は小さくなるが、水流の場合は r_0 の条件によって $h_{\max}$ を最小にする b が存在する。

5. おわりに：流路彎曲部における水面開高は衝撃波の概念を用いたKnappらの式よりも自由渦仮定を用いたLenauの式の適用性のよいことを実験的に明らかにした。特に横断方向の水面形もうまく計算できることがわかった。また転波列の増幅については(6)式のように水深を分割して、それぞれにLenauの式を適用するとうまく説明できることがわかった。土砂濃度の影響については $C=0 \sim 0.4$ で上記のよみと取り換えることがわかったが、さらに高濃度の場合について確かめる必要がある。外壁の水位を低下させる方法として彎曲部水路幅を分割する方法について述べたが、施工上の問題など今後検討しなければならない。

参考文献 C. W. Lenau; Supercritical Flow in Bends of Trapezoidal Section, ASCE, EM1, FEB., 1979, pp. 43-54.

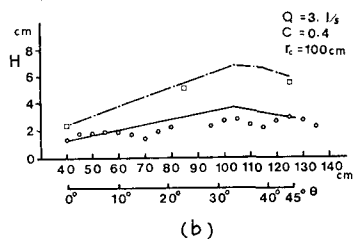
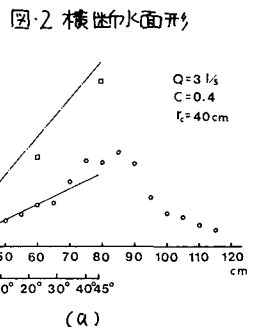
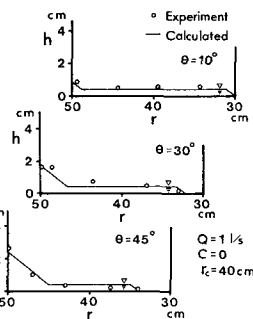


図3 転波列による外壁水深

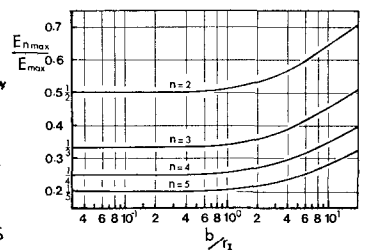


図4 $E_{n\max}^*/E_{\max}$ と b/r_2 の関係