

(II-3)

シュート&プールの抵抗則に関する基礎的研究

防衛大学校 学生員 三浦 明夫・南 新作

防衛大学校 土木工学教室 正員 山田 正

防衛大学校 土木工学教室 正員 池内 正幸

1. はじめに

正弦波形をいた二次元水路床において、射流の流れが、常流に遷移する場合、水表面に激しい表面渦を伴う不連続な不等流、いわゆる、シュート&プールと呼ばれる流れが生じる。本研究は、正弦波形をいた固定床流れにおいて現れるシュート&プールの抵抗則を明らかにすることを目的としたものである。

2. 実験装置および実験方法

実験に使用した水路は、側面がガラス張り、路床は塗装されたスチール製で、水路長12.6m、幅0.5m、深さ0.6mの可変勾配の長方形断面開水路である。底面形は、図1に示すように波長50cm、波高5cmの正弦波形であり、表面は、水理学的になめらかとなるようにタキロン板を使用している。上流側の端から1.4m区間に水平な部分を設け、その後、 0.5×14 波=7mを正弦波形とし、下流端0.6mを再び水平床にいた。

流量の測定は、水平部分のところで、ピトー管により測定した。水面形の測定は、測定区間の開水路のほぼ中央付近の水面を上流から1cm間隔で、ポイントゲージを用いて測定した。圧水水頭は、図2に示すように、底面のタキロン板に、直径1mmの孔を31ポイントあけ、傾斜マノメータによって測定した。底面のせん断応力は、図3に示すように、総圧管を各ポイント上に垂直かつ流れに平行に密着させて、総圧(P₀)を測り、その位置の静圧(P)から、ブレンストンの式によって求めた。一波長にわたる抗力の流れ方向成分および一波長平均の摩擦損失係数 f' の算定においては、各測定間の底面に沿う圧力およびせん断応力より、圧力およびせん断応力のそれぞれの水平成分の和(PH, τH)を計算する。さらに、摩擦損失係数 f' を圧力の水平成分の和(PH)およびせん断応力の水平成分の和より、以下の式によって求まる。

河床面に働く抗力の水平方向成分Fと摩擦損失係数 f' は、(1)式によって関係づけられる。

$$F = f' \cdot \rho \cdot l \cdot \frac{U^3}{2} \quad (1)$$

$$F = PH + \tau H \quad (2)$$

(1)式、(2)式より、摩擦損失係数 f' は次式で与えられる。

$$f' = \frac{(PH + \tau H)}{\rho \cdot l \cdot \frac{U^3}{2}} \quad (3) \quad \left\{ \begin{array}{l} l: \text{測定区間長 } 53 \text{ cm} \\ U: \text{測定区間の平均流速} \end{array} \right.$$

3. 摩擦損失係数に関する理論的考察

正弦河床をモデル化し、図4に示すような河床形状が連続して設置されているとして以下の考察を行った。まず最初に、

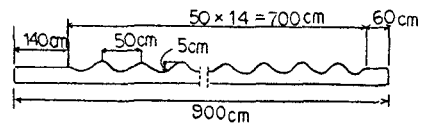


図1. 実験に用いた水路形状の概要

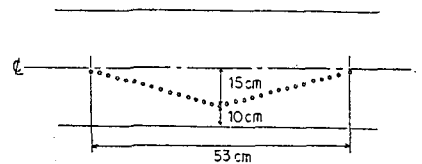


図2. 圧水水頭測定における孔の位置

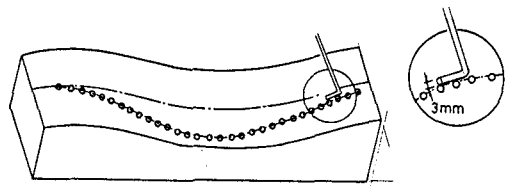


図3. 底面せん断応力の測定方法

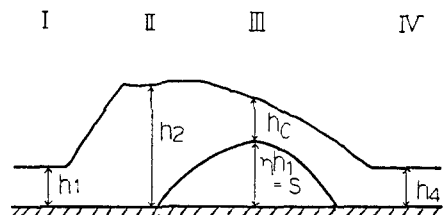


図4. 正弦波河床のモデル化

断面Ⅰ-Ⅲ間において、跳水により失なわれるエネルギーロスを求め、次に断面Ⅰ-Ⅳ間において抗力により失なわれるエネルギーロスを求める。次に、この2つのエネルギーロスをたしあわせ、断面Ⅰ-Ⅳ間で失なわれる総エネルギーロスを求め、摩擦損失係数 f' を算出する。

(i) 断面Ⅰ-Ⅲ間の跳水により失なわれるエネルギーロス ah

$$ah = (h_1 + \frac{v_1^2}{2g}) - (\eta h_1 + h_c + \frac{v_2^2}{2g}) \quad (4)$$

ここに、 $\eta = \frac{S}{h_1}$ (S : 底面からの物体の高さ)

ところで、限界水深を h_c とすると、文献(1)で著者が既に提案している水面形の基本式 $f(h) = g^2 - (1 + \frac{1}{2}Fr^2 - \eta)g^2 + \frac{1}{2}Fr^2 = 0$ を用いて、 $df/dg = 0$ により得ることができ、

$$h_c = \frac{2}{3}(1 + Fr^2 - \eta) \quad (5)$$

となる。 h_1 と h_2 の関係は、跳水の共役関係式(6)式で与えられる。

$$\frac{h_2}{h_1} = -\frac{1}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{1 + 8Fr^2} \quad (6)$$

(4)式に(5)式、(6)式を代入して変形すると、跳水により失なわれるエネルギーロス ah は、 $ah = \frac{v_1^2}{2g} [1 - \frac{1}{2}(\sqrt{1 + 8Fr^2} - 1)]^3$ (7)

(ii) 断面Ⅰ-Ⅳ間の抗力に起因するエネルギーロス h_d

Ⅰ-Ⅳ断面で、運動量保存則、エネルギー保存則を立て、エネルギーロス h_d を物体表面に働くせん断抵抗に起因すると考える。

$$h_d = \frac{\tau \cdot A_s \cdot A_o}{\rho g A_o v_1} \quad (8)$$

を得る。つぎに連続の条件を運動量保存則、エネルギー保存則に適用するとせん断力 τ は、 $\tau = \frac{A_o}{A_1 A_s} D$ (9) (A_s : 物体の表面積)となる。一方、抗力 D は一般に次のように定義される。

$$D = \frac{1}{2} C_D \rho v_1^2 A_o \quad (10)$$

(10)式を(9)式に代入し、求められた τ を(8)式に代入すると h_d は次のように求まる。 $h_d = (\frac{A_o}{A_1}) \cdot C_D \cdot \frac{v_1^2}{2g}$ (11)

(iii) Ⅰ-Ⅳ断面全体のエネルギーロス

断面Ⅰ-Ⅳ間で失なわれる総エネルギーロスは、 $ah + h_d$ で表わす。これを摩擦損失係数 f' に換算する。

$$ah + h_d = f' \times \frac{1}{h_1} \times \frac{v_1^2}{2g} = [1 - \frac{1}{2}(\sqrt{1 + 8Fr^2} - 1)]^3 + (\frac{A_o}{A_1}) C_D \frac{v_1^2}{2g}$$

$$f' = [1 - \frac{1}{2}(\sqrt{1 + 8Fr^2} - 1)]^3 + (\frac{A_o}{A_1}) C_D \frac{h_1}{L} \quad (12)$$

4. 実験との比較

図5、図6、図7は、 C_D をそれぞれ0, 0.5, 1としたときのマニングの粗度係数 n に関して、理論値と実験値の比較である。図より、 $C_D = 0.5$ とみると、実験値と理論値は非常に良く一致する。このとき、抗力によるエネルギーロスは、全体のエネルギーロスの約1割を占めている。これらの結果より次のように結論されよう。シュート&プールの抵抗は、主にプール部における跳水によるエネルギーロスで説明し得るが、抗力によるエネルギーロスを考慮すると、さうによく実験と一致する。

謝辞 本研究の遂行にあたり、著者の一人(山田)は文部省科学研究員(代表吉川秀夫大教授)の補助を受けている。

ここに記して感謝の意を表す。

参考文献 (1) 山田正石・井文雄・村上良宏 第12回関東支部技術研究発表会講演集: 昭和60年, P83~P84

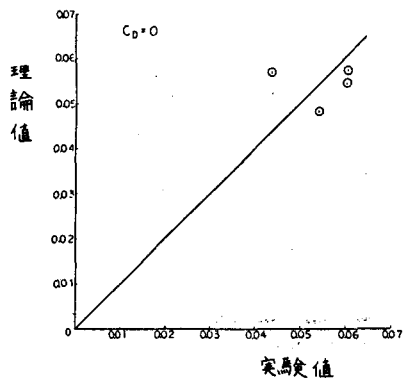


図5. マニングの粗度係数 n に関する理論値と実験値の比較

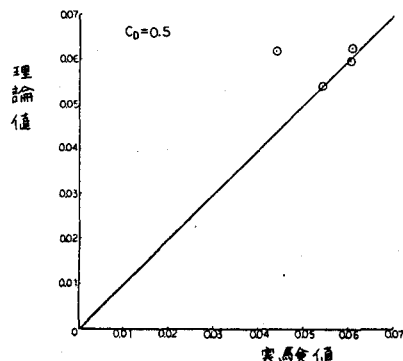


図6. マニングの粗度係数 n に関する理論値と実験値の比較

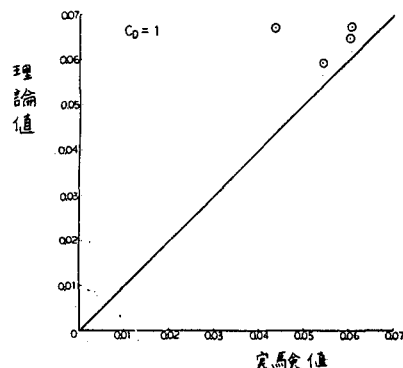


図7. マニングの粗度係数 n に関する理論値と実験値の比較