

非定常開水路流れにおける底面せん断応力と水深の位相差に与える粗面の影響と新しい非定常パラメータの提案

京都大学大学院工学研究科環境地球工学専攻 フェロー 瀬津 家久

京都大学大学院工学研究科環境地球工学専攻 正会員 牛島 省

京都大学大学院工学研究科修士課程

学生員 ○坂根由季子

1. はじめに

非定常開水路流れの諸特性を理解するためには、流れ場の非定常性の大きさを定量的に評価できる非定常パラメータを用いて、実験結果を整理することが望ましい。瀬津ら¹⁾は、流速 U 、水深 h および水位上昇時間 T_d を用いて式(1)で表される非定常パラメータ α を定義し、底面せん断応力と水深の無次元位相差 T_{lag}/T_d が α の線形的な関係で表されることを報告している。本研究では、多変量データを主要な変動に縮約してその特徴を把握する統計的手法である主成分分析手法を用いて、粗面が T_{lag}/T_d に与える影響を評価するとともに、粗面情報を考慮した新しい非定常パラメータを提案する。

$$\alpha = \frac{1}{(U_b + U_p)/2} \frac{h_p - h_b}{T_d} \quad (1)$$

2. 実験方法

本研究では、瀬津ら¹⁾の実験データベースに加えてさらに等価砂粗度 $k_s = 1.5\text{cm}$ の粗面非定常開水路流れ場のケースを計測した。実験は長さ 10mの強化ガラス製可変勾配型循環式水路を使用し、瞬間流速測定および水深変化測定にはそれぞれ高精度レーザー流速計 (LDA) と超音波波高計、容量式波高計を用いて瀬津らと同じ方法で行った。表-1に瀬津ら¹⁾の実験データベースおよび本研究で用いた実験ケース (rc1~rc3) を示す。

3. 主成分分析

この全 30 ケースの実験を対象に主成分分析²⁾を行う。表-2に固有値および累積寄与率、表-3に測定項目と主成分の相関を表す因子負荷量を示す。表-2から第4固有値までの累積寄与率は90%を越え、分析に必要な主成分は4つで十分であることがわかる。また、表-3から等価砂粗度 k_s と第4主成分の因子負荷量は0.804であり、高い正の相関をもつことから第4主成分が粗面情報を表す成分であるといえる。したがって、第4主成分と各実験ケースの T_{lag}/T_d の関係から、底面粗度と T_{lag}/T_d の関係が考察できる。図-1は、ケースごとの主成分の影響の大きさを表す主成分スコア(項目ごとの正規化データと固有値の積の全ケース総和)と各実験ケースの T_{lag}/T_d の関係を示したものである。ばらつきがあるものの主成分スコア Z_4 と T_{lag}/T_d は正の相関をもつことがわかり、この結果から流れ場に及ぼす底面粗度の影響が大きいほど T_{lag}/T_d が大きくなり、底面粗度の存在が T_{lag}/T_d の位相差に関係があることが予測される。

4. 底面粗度の影響を考慮した非定常パラメータ

前節の結果から非定常パラメータに粗面の影響を取り入れる必要があることがわかる。そこで本

Iehisa Nezu, Satoru Ushijima, and Yukiko Sakane

研究では式(2)で定義される新しい非定常パラメータ α' を提案する.

$$\alpha' = \alpha \times \frac{1}{(1 - k_s / h_c)}$$

ただし $h_c = (h_b + h_p) / 2$ である.

(2)

表-1 実験条件

case no.	Tlag/Td	Td	hb	hp	Ub	Up	hp-hb	(Ub+Up)/2	$\alpha (\times 10^{-3})$	ks
sa3-1~3	0.110, 0.030, 0.000	60, 90, 120	7.0	9.9	17.9	37.7	2.9	27.80	1.76, 1.18, 0.88	0
sa4-1~3	0.130, 0.120, 0.010	60, 90, 120	7.0	11.1	17.9	45.3	4.1	31.60	2.07, 1.43, 1.09	0
sa5-1~3	0.180, 0.120, 0.030	60, 90, 120	7.0	12.1	17.9	51.9	5.1	34.90	2.32, 1.63, 1.24	0
sb3-0~3	0.170, 0.150, 0.060, 0.050	30, 60, 90, 120	4.0	5.9	15.6	32.1	1.9	23.85	2.25, 1.29, 0.92, 0.69	0
ra3-1~3	0.100, 0.070, 0.040	60, 90, 120	6.9	9.7	18.1	38.9	2.8	28.50	1.54, 1.07, 0.84	1.2
ra4-1~3	0.100, 0.050, 0.050	60, 90, 120	6.9	9.7	18.1	38.9	2.8	28.50	1.86, 1.32, 1.04	1.2
ra5-1~3	0.250, 0.140, 0.080	60, 90, 120	6.9	9.7	18.1	38.9	2.8	28.50	2.12, 1.49, 1.18	1.2
rb3-0~3	0.200, 0.150, 0.080, 0.050	30, 60, 90, 120	6.9	10.8	18.1	46.6	3.9	32.35	2.09, 1.23, 0.90, 0.68	1.2
rc1	0.032	60	4.0	6.3	75.0	104	2.3	89.45	0.43	1.5
rc2	0.026	90	4.0	6.4	75.0	102	2.4	88.70	0.30	1.5
rc3	0.021	120	4.0	6.4	75.0	102	2.4	88.40	0.23	1.5

Td(s):水位上昇時間

Ub(cm/s):ベース時の速度

hb(cm):ベース時の水深

Up(cm/s):ピーク時の速度

hp(cm):ピーク時の水深

ks(cm):ガラスビーズの粒径

表-2 固有値および累積寄与率

固有値	寄与率	累積寄与率
4.289	0.429	0.429
2.670	0.267	0.696
1.902	0.190	0.886
0.751	0.075	0.961

表-3 因子負荷量

	第1主成分	第2主成分	第3主成分	第4主成分
tlag/Td	0.550	0.384	0.662	0.099
Td	-0.272	-0.541	-0.731	0.107
hb	0.600	-0.740	-0.010	0.089
hp	0.575	-0.807	0.110	0.044
Ub	-0.892	-0.206	0.358	-0.167
Up	-0.747	-0.456	0.462	-0.134
hp-hb	0.481	-0.802	0.246	-0.013
(Ub+Up)/2	-0.826	-0.344	0.419	-0.151
$\alpha (\times 10^{-3})$	0.829	0.133	0.507	-0.068
ks	-0.516	-0.035	0.288	0.804

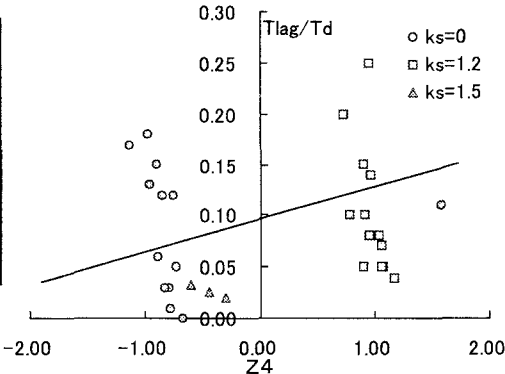


図-1 第4主成分スコアと T_{lag} / T_d の関係

従来の α および α' と T_{lag} / T_d の相関係数はそれぞれ 0.80, 0.85 であり, 粗面効果を考慮した新しいパラメータの方が高い相関関係をもつことがわかり, このパラメータの妥当性が示された.

5. おわりに

主成分分析手法から底面粗度の影響が大きいほど T_{lag} / T_d が大きくなることがわかった. また T_{lag} / T_d とより若干高い線形相関をもつ, 底面効果を考慮した新しい非定常パラメータを提案した. 最後に, 本研究を行うにあたりご指導頂いた京都大学鬼束幸樹助手及び博士後期課程山上路生氏に感謝の意を表します.

参考文献 1) 瀬津家久・門田章宏・中川博次: 非定常開水路流れの乱流構造に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.491/II-27, pp.81-88, 1994. 2) 新村秀一: データ解析の進め方, 共立出版, 1989.