

坡面非均匀沙输移机理实验方法^{*}

王协康¹ 方 铎¹ 曹叔尤¹ 姚令侃²

(1 四川大学高速水力学国家重点实验室 成都 610065; 2 西南交通大学铁道工程系 成都 610031)

提 要 在分析坡面泥沙输移现象的基础上, 以室内沙堆模型实验量化其输沙特征, 得出其在空间上具有自相似分形的动力学过程, 从理论上应用水动力学弥散特性进一步证实, 结果符合较好。

关键词 非均匀沙 泥沙输移 自相似分形 水动力学弥散

分类号 《中图法》P512.2 N928.42 **文献标识码** A

坡面侵蚀问题因其与人类的密切关系而愈来愈为世界各国关注, 其侵蚀产沙过程观测及实验研究在国外开展较早。国外学者曾将裸露山坡上的土壤侵蚀过程分为两个阶段: 颗粒分离和分离颗粒被地表径流的搬运。岩石风化是产生颗粒分离的最主要来源^[1]。岩石风化成颗粒后, 按照其本身的特性在坡面上堆积成丘, 一般处于休止角状态。由于坡面上泥沙堆积体基本成离散分布, 且泥沙颗粒间的孔隙多互相连接, 当坡面形成径流时, 水流可在其间渗透通过, 并挟带泥沙颗粒输移。一般认为底床坡度、水流条件和颗粒级配是决定泥沙输移的主要因素。为了探索坡面泥沙输移的机理, 本研究从最简单的模型入手, 逐级深入研究。

1 实验研究

1.1 水槽沙堆模型实验

为与今后系列实验配套比较研究, 这里研究最简单情况, 即坡面坡降近似为零, 水流条件固定, 并只考虑一个泥沙堆积体。实验在宽 30 cm、槽坡设置为水平的玻璃水槽中进行。一次实验时先在水槽中放满深 20 cm 的清水, 然后在静水中建造一个高约 15 cm 的沙堆。为了在放水时沙堆在垂直于水流方向上能受力均匀, 将沙堆形状设计成象一座横断面为等腰三角形的沙坝(沙坝两端受水槽约束)。沙堆是用漏槽通过从顶部表面缓慢加沙的方式构造的, 新加沙粒或停止在顶部或滚落至某一位置, 当以自然状态堆积的沙堆逐渐增大到倾斜, 而后角度(即沙坝横断面三角形的底角)等于泥沙的水下休止角时, 认为已达到要求的初始临界状态。然后以固定的提升量打开尾门放水, 放水过程中沙堆在动水作用下将会失稳坍塌, 一部分沙粒会运移至沙堆在水槽底平面上的投影面积之外, 将这部分沙粒叫做流沙体。水槽中的水放完后, 通过称重确定流沙体占每次实验用沙总量的比例。本实验中放水时水槽水位的最大下降速度均控制在 0.9 cm/min 左右, 这样不会有泥沙因水流速度过大而转化为悬移质, 失稳的泥沙只能在重力作用下滑动或以推移质形式移运一小段距离, 流沙体仍能在沙堆附近呈整体堆积, 使得流沙体的收集测量操作比较容易。此外, 实验中可观察到, 当流沙量较少时, 沙堆外形总体上变化不大, 大部分部位其斜度并未明显偏离临界斜度; 而当流沙量较大时, 流沙体前沿又自然地形成临界坡。因此认为沙堆的所有活动均是临界状态附近的行为。实验中还要求每个沙堆用沙量都 > 10 kg, 以保证称重的精度。

1.2 实验结果与分析

^{*}国家自然科学基金资助项目(编号: 49771055); 国家自然科学基金委员会与水利部联合资助项目(编号: 59890200)。

收稿日期: 1998-08-27; 改回日期: 1998-10-01。

本实验以姚令侃对非均匀沙系统的研究为基础^[3], 取泥沙非均匀系数 $\varphi = \sqrt{d_{75}/d_{25}} > 2.55$ 为非均匀沙。实验用沙特征值及结果见表 1 和表 2。

表 1 实验泥沙颗粒级配统计表

Table 1 Experimental data of sediment distribution

编号	各粒径(mm)的级配数(%)														非均匀系数 $\varphi = \sqrt{d_{75}/d_{25}}$			
	0.2	0.4	0.6	0.9	1.25	2	2.5	3	4	5	7	10	15	20		30	40	
I	0	7.7	15.4	23.1	30.8	38.5	46.2	53.9	61.6	69.3	77.0	84.7	92.9	100				2.55
II	0	11	20	27	34	43	48	52	58	66	75	84	97	100				2.96
III	0	9	22	30	35	44	49	51	60	65	72	82	91	96	98.5	100		3.50
IV	0	10	25	30	35	45	49	51	55	60	64	70	75	100				5.00

表 2 实验结果统计表

Table 2 The analysis of the experimental data

泥沙组号	系数 φ	样本容量	均值 $E(x)$ %	标准差 $D(x)$	变差系数 Cv	大于均值概率(%)	用 χ^2 检验, 在水平 0.05 下对样本正态分布检验
I	2.55	61	10.80	6.97	0.645	37.7	
II	2.96	64	9.00	6.49	0.721	32.8	拒绝样本来自正态分布总体的假设
III	3.50	58	10.92	6.88	0.630	32.8	
IV	5.00	54	8.95	7.46	0.834	27.8	

从实验结果表 2 中可以看出, 流沙体占总量比例 X 不服从正态分布, 同时可以直观地看出 X 具有值越大出现的频度越小的趋势, 将 $\varphi = 2.55$ 泥沙组实验记录列于表 3 作为示例。现令以同组实验中所有流沙体用沙总量比例大于 X 的发生次数为 N , 通过回归分析, 可得 I ~ IV 四组泥沙 X 与 $> X$ 的发生次数 N 之间的关系式如表 4 所示。

由表 4 可得 $N(> X) \propto X^{-b}$, 其中 $b = 1.57 \sim 1.71$, 利用标度不变性理论^[4] 可认为沙堆流沙量在统计意义上具有无规分形的特性。以李后强等^[3] 提出的在重对数轴上标绘 $N(> X)$ 与 X 数值之间的经验关系, 用最小二乘法拟合出一条直线, 可用下式表示

$$\ln N(> X) = A - D \ln X \quad (1)$$

式中 A 为系数, D 为所求分维数, 由表 4 可知, 沙堆流沙量的分维数统计平均为 $D = 1.65$ 。

2 理论分析与比较

从本实验条件可知, 每一组实验的水流条件、底床坡度、泥沙级配以及堆积量都一致, 但沙堆流沙量在统计平均上具有无规分形特性, 这主要是由于每一次堆放时, 非均匀沙堆孔隙的存在, 使得流速在孔隙中的分布无论其大小和方向都不均一。在多孔介质内, 通过任意孔隙横截面上的流速分布其大小和方向都不相同。一般可分为三种情况:

1. 同一孔隙中, 水质点流速不等于实际平均流速, 由于流体的粘滞性, 使得单个孔隙通道轴处的流速大, 固体表面处的流速接近于零, 类似于笔直的毛细管中的流体速度的抛物线状分布(如图 1);
2. 不同孔隙中水质点的实际流速也是不同的(图 2), 单个孔隙中质点的最大流速随孔隙的大小而变化;

表 3 $\varphi = 2.55$ 泥沙组实验记录表

Table 3 The Results of Experimental sediment

编号	流沙量 l(kg)	总沙量 z(kg)	流沙占总量比例 $x=l/z(\%)$	编号	流沙量 l(kg)	总沙量 z(kg)	流沙占总量比例 $x=l/z(\%)$
1	5.50	17.90	30.7	32	1.40	17.10	8.2
2	5.20	17.40	29.9	33	1.45	17.65	8.2
3	5.20	18.10	28.7	34	1.40	17.35	8.1
4	5.20	18.30	28.4	35	1.40	17.55	8.0
5	4.25	18.35	23.2	36	1.35	17.35	7.8
6	3.90	17.90	21.8	37	1.35	18.30	7.4
7	3.80	17.50	21.7	38	1.30	17.90	7.3
8	3.45	17.80	19.4	39	1.25	17.45	7.2
9	3.45	17.95	19.2	40	1.25	18.30	6.8
10	3.25	17.55	18.5	41	1.15	17.40	6.6
11	2.90	17.80	16.3	42	1.18	18.08	6.5
12	2.85	17.55	16.2	43	1.10	18.00	6.1
13	2.65	17.65	15.0	44	1.05	18.20	5.8
14	2.73	18.28	14.9	45	0.95	16.65	5.7
15	2.45	17.35	14.1	46	1.00	17.40	5.7
16	2.45	17.55	14.0	47	1.00	17.40	5.7
17	2.20	18.10	12.2	48	0.95	17.20	5.5
18	2.00	17.30	11.6	49	1.00	18.35	5.4
19	2.05	17.85	11.5	50	0.95	17.85	5.3
20	1.95	17.10	11.4	51	0.90	17.50	5.1
21	1.90	17.40	10.9	52	0.85	16.95	5.0
22	1.80	17.55	10.3	53	0.90	17.95	5.0
23	1.70	16.90	10.1	54	0.85	17.40	4.9
24	1.70	17.20	9.9	55	0.85	17.70	4.8
25	1.80	18.30	9.8	56	0.85	18.20	4.7
26	1.70	17.45	9.7	57	0.80	17.65	4.5
27	1.65	18.20	9.1	58	0.75	16.70	4.5
28	1.55	17.85	8.7	59	0.65	15.97	4.1
29	1.50	18.05	8.3	60	0.65	17.75	3.7
30	1.40	16.90	8.3	61	0.55	17.15	3.2
31	1.40	17.00	8.2				

3. 受相互连通的孔隙空间的形状影响, 即固体骨架的阻挡, 孔隙空间的流线相对于平均流动绕流。(如图 3), 使水质点的实际运动曲折起伏。

质点流速的不一样及不同孔隙中水质点实际流速的差异产生了纵向机械作用; 而固体骨架的阻挡作用产生了横向机械作用, 其中横向作用大概可以波动一个颗粒直径大的范围。人们把质点流速相对孔隙平均流速的差异所引起的物质运移现象归于水动力弥散作用的结果。

表 4 回归分析结果

Table 4 The results of linear analysis

泥沙组 编 号	非均匀 系数 φ	回归方程 (在 $\alpha=0.01$ 水平上显著)
I	2.55	$\ln N < X) = 6.58 - 1.57 \ln X$
II	2.96	$\ln N < X) = 6.06 - 1.64 \ln X$
III	3.50	$\ln N < X) = 6.87 - 1.71 \ln X$
IV	5.00	$\ln N < X) = 6.24 - 1.69 \ln X$

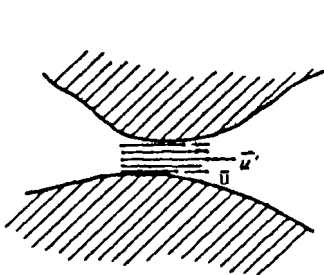


图 1 单孔隙中流速的分布
Fig. 1 Velocity distribution of single pole

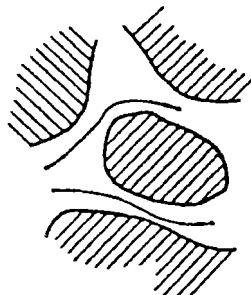


图 2 不同孔隙中流速的差异
Fig. 2 The difference of velocity in different poles

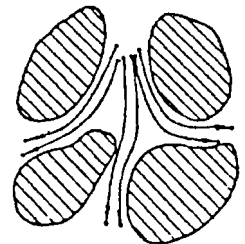


图 3 水质点的散布
Fig. 3 The distribution of water points

在水动力弥散理论中^[7], 用弥散度(α)来表示孔隙介质的弥散特征。根据 Bear(1972)的定义, 弥散度是反映孔隙介质骨架结构的特征长度(量纲为 $[L]$), 也就是说这一“特征长度”反映了对弥散作用起决定性影响的孔隙介质性质, 即孔隙度、颗粒形状、颗粒不均匀系数、颗粒大小、孔隙连通性与弯曲性等。

从以上分析可认为弥散度对本实验沙堆流沙量服从无规分形具有决定性作用。由于实验在两侧固定的水槽中进行, 因而忽略横向弥散度对流沙量的影响, 认为纵向弥散度是造成流沙量差异的决定性因素。Neuman(1990)^[6]根据前人文献中所记载的 130 多个纵向弥散度进行线性回归分析, 综合该作者等人发展的准线性扩散理论, 得出了纵向弥散度具有分形特征。陈崇希等^[7]在总结前人对弥散度的研究, 分析了大量文献中记录的弥散度数值, 利用类似式(1)的重对数轴的方法, 求得纵向弥散度的分维数 $D=1.627$, 这与沙堆流沙量的统计分维数 1.65 非常接近, 由上述分析可得, 非均匀沙堆流沙量在统计意义具有分形特性, 是非均匀沙堆介质的外在表现, 其决定性因数是纵向弥散度的作用, 它代表了非均匀沙堆的统计特征。

3 结 语

1. 本文利用概化实验研究坡面非均匀沙输移机理, 认为沙堆流沙量具有统计意义上的分形特征, 对坡面非均匀沙输移机理有了进一步的了解。

2. 由分析可知, 尽管影响泥沙输移的底坡、水流条件、颗粒级配在每一组实验中是一致的, 但流沙量服从分形特性, 利用纵向弥散度可以更好地解释非均匀沙堆流沙量的统计特征, 沙堆流沙量服从无规分形正是非均匀介质的弥散度具有分形特征的外在表现。

参 考 文 献

- 1 Reiche P.. A Survey of Weathering Processes and Products. Univ. New Mexico pub. in Geology, No. 3. Revised ed., 1950, P95
- 2 钱宁, 万兆惠. 泥沙运动力学. 北京: 科学出版社, 1983. 27
- 3 姚令侃, 方铎. 非均匀沙自组织临界性及其应用研究. 水利学报, 1997, (3): 26~32
- 4 T. A. Witten and L. M. Sander. Diffusion-limited Aggregation, *Phys. Rev.* B27(1983), P5686
- 5 李后强, 汪富泉著. 分形理论及其在分子科学中的应用. 北京: 科学出版社, 1993. 186~187
- 6 Neuman, S. P. and Sorek, S. Eulerian-Lagrangian Methods for Advection-Dispersion. In: *Finite Element in Water Resources, Proceedings of the 4th International Conference*, Springer-Verlag Berlin, 1982, 14. 41~68
- 7 陈崇希, 李国敏编著. 地下水溶质运移理论及模型. 武汉: 中国地质大学出版社, 1996. 10~30

第一作者简介 王协康, 见本刊(原名《山地研究》)1998 16(4): 267。

EXPERIMENT STUDY ON TRANSPORT THEORY OF NON-UNIFORM SEDIMENT IN THE SLOPE

WANG Xie-kang¹ FANG Duo¹ CAO Shu-you¹ YIAO Ling-kan²

¹ *Sichuan University State Key Hydraulics Laboratory of High Speed Flows Chengdu Chengdu 610065;*

² *Department of Railway Engineering of South-West Jiaotong University Chengdu 610031)*

Abstract The slope soil erosion and its transport is a complex problem, because the velocity of runoff, sediment diameter and its distribution and other factors also affect the soil erosion and transport processes. Some researchers pointed out that this phenomenon could be divided into two processes, one is soil particle dispersion, the other is sediment transport of runoff. Based on the analysis of the phenomenon of sediment transport in the slope, the characteristics of sediment transport was summarized by means of experimental model. During the experiment of sediment transport, we finished five groups of sedimental models in different sedimental distribution, the experimental result of each group was analyzed and discussed, according to the analysis of experimental result in the table 2, 3, 4, we believed that the characteristics of sediment transport in the slope was self-similar fractal dynamic process in the space, which was verified in the theory by advection-dispersion of water dynamics, because the result of the linear analysis shows that the average fractal dimension of sediment transport is 1.65, the value is almost the same as the fractal dimension of advection-dispersion (1.627). According to the research result, the quantity of sediment transport of non-uniform sediment piles shows fractal characteristic from the statistical significance, which is the external appearance of non-uniform sediment piles. Furthermore, the degree of longitudinal advection-dispersion can explain the statistical characteristic of sediment transport rate, which will give a new method to study the characteristic of non-uniform sediment. That is to say, we can obtain signals of the sediment transport rate through the research result, which is important for hydraulic engineering projects involving sediment in practice.

Key Words non-uniform sediment, sediment transport, self-similar fractal process, advection-dispersion of water dynamics