

选择性起动条件下砾石沉积物 转动角的实验室测量*

李振林 秦蕴珊

(中国科学院海洋研究所, 青岛 266071)

Paul D. Komar

(美国俄勒冈州大学海洋学院)

提要 沉积物颗粒与下覆颗粒间转动角是制约沉积物颗粒起动的一个重要因素。本文样品采集于1987年。作者通过一系列实验探明了沉积物转动角同颗粒形状、相对粒径比以及迭瓦状构造等因素之间的相互关系。在均匀粒径条件下, 球状砾石转动角的测量数值同理论数值相吻合, 但随粒径的减小而增大。这一结果同前人利用球状砂粒进行实验所获得的结果相一致。利用球状、椭球状及棱角状砾石进行的实验表明, 沉积物转动角 ϕ 随相对粒径的增大而减小, 随颗粒扁平度及颗粒棱角度的增大而增大。扁平砾石的迭瓦状构造将导致转动角的增大, 其增大值约等于砾石的迭瓦角。若其它因素相同, 沉积物起动的难度自球状、椭球状、棱角状及迭瓦状构造而依次增强。这些结果将有助于对颗粒粒径、形状、构造同沉积物搬运临界状态以及沉积物选择性起动之间的相互关系进行定量分析。

关键词 砾石 转动角 选择性起动

前人对沉积物颗粒转动角 ϕ 值的测量仅局限于砂粒径, 所测得角度远远大于颗粒静止角和崩溃角的原因尚不清楚, 而且测量数据同理论公式(1)的系统偏差也有待于探讨。这些差异很可能是细颗粒所具有的静电力、湿度及其它表层粘合效应所导致。本文所进行的研究工作试图对这些差异进行解释, 从而更好地理解 ϕ 同 D/K 及颗粒形状间的关系。

一、测量方法

沉积物颗粒起动动力的分析, 必须考虑沉积颗粒围绕同下覆颗粒支点^[1,2,4]所进行的旋转运动(图1)。当水流的拖曳力大于沉积颗粒的重量时, 它就会开始运动而离开其静止位置。图1所示的转动角 ϕ 的大小则是控制这一临界起动状态的重要因素。

Eagleson 和 Dean^[3]在沉积物临界值的分析中曾对各种 D/K 比值下的 ϕ 进行了测量, 这里 K 是底层沉积物颗粒的粒径, D 是上覆单一颗粒的粒径。通过对不同粒径和密度的球状颗粒转动角的测量(D/K 比值约为1.1—6.3), 他们发现 ϕ 随 D/K 的增大而减小, 从而验证了图1所表示的几何关系。Eagleson 和 Dean 还将他们的测量结果同球状

* 中国科学院海洋研究所调查报告第2082号。系在美攻读博士学位期间的合作研究。
接受日期: 1989年6月20日。

颗粒转动角的理论公式进行了比较:

$$\tan\phi = \frac{\gamma}{\sqrt{(D/K)^2 + 2(D/K) - \frac{1}{3}}} \quad (1)$$

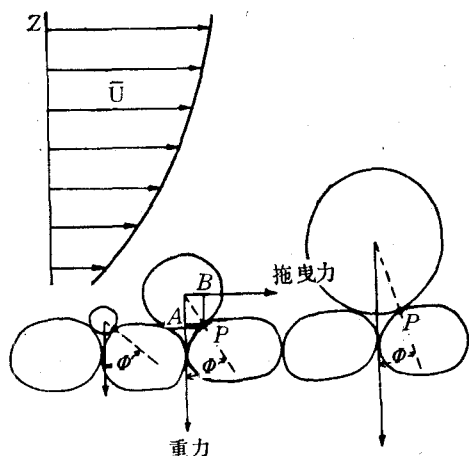


图1 在平均水流速度 $\bar{U}$ 和临界起动状态下的砾石沉积物转动角 ϕ

Fig. 1 Gravel pivoting angles ϕ under average current $\bar{U}$ and critical entrainment

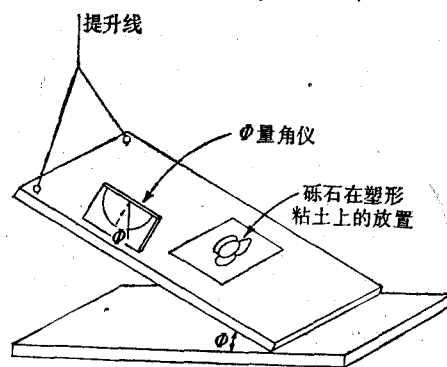


图2 砾石沉积转动角测量仪简图

Fig. 2 Sketch of apparatus for measuring the gravel pivoting angles

Miller 和 Byrne^[5] 对 ϕ 与 D/K 的依从关系进行了详细研究, 测量了砂粒球体、自然海滩砂及棱角状粉碎石英岩砂的转动角。由测量结果得出了如下经验公式:

$$\phi = e(D/K)^{-f} \quad (2)$$

式中系数 e 决定于颗粒形状, 而 f 则代表底层沉积颗粒的分选效应(因为底层颗粒粒径不再是均匀的)。

本文基本采用了谢尔兹 1936 年所建议的测量方法, 测量仪由一块 $15 \times 58\text{cm}$ 的木板组成, 顶层木板一端由折页同底层木板相连, 另一端则同一滑轮相连, 以保证顶层木板的倾斜运动的平稳。粒径相同的底层砾石由塑性粘土固定在木板上, 单一颗粒则放于它们之间形成的三角空隙之上。尔后利用滑轮缓慢倾斜顶层木板, 当顶层砾石旋转滚落时, 两木板间的夹角即为该砾石组合的转动角(图 2)。这一角度由量角仪和铅垂线直接读出, 精确度为 $\pm 0.1^\circ$ 。

在每组测量中, 底层砾石粒径 (K) 不变, 顶层砾石粒径 (D) 不断变化, 从而得到一系列的 D/K 比值。实验所用的球体为钢质滚球和玻璃球, 直径为 $0.23-3.77\text{cm}$ 。由于在临界起动时, 颗粒重量的垂直分力同水平分力相平衡, 因而密度变化对 ϕ 值大小并无影响。椭球状砾石的三轴直径由卡钳测得, 其中轴直径变化范围为 $0.4-5.0\text{cm}$ 。棱角状砾石直径的直接测量极为困难, 因而仅测量了每个砾石的重量, 计算出砾石的等值粒径(所用密度为 2.93g/cm^3), 它们的等值粒径变化区间为 $0.58-4.67\text{cm}$ 。

二、球状砾石的转动角

对球体转动角的测量,可为形状复杂颗粒转动角的比较提供依据。 ϕ 与 D/K 的测量数据绘于图 3。图 3 绘出了公式(1)所给出的理论曲线,测量数据同这一理论曲线的平均偏差为 1° ,因而实验测得的数据同理论计算结果是一致的。数据回归分析表明,图 3 中的经验曲线与公式(2)相吻合。当砾石为颗粒间转动时,回归曲线为一直线, e 和 f 系数分别为 20.4 和 -0.75 ,回归系数 $R^2 = 0.997$ 。若砾石为颗粒顶转动,回归曲线的坡度在 $D/K = 1$ 处发生偏折;当 $D/K < 1$ 时, $e = 36.3$, $f = 0.55$;当 $D/K \geq 1$ 时, e 不变,而 f 为 -0.72 。导致这一坡度变化的原因,一方面是由于测量值趋于同理论曲线相平行。另一方面是由于在 $D/K > 1$ 的情况下,顶层颗粒转动总是偏离顶部中线,从而导致较小的转动角,因此在 $D/K > 1$ 时,经验曲线低于理论曲线;当 $D/K \leq 1$ 时,顶层颗粒基本沿顶部中线转动,而静电力、湿度等表面粘合力也随 D 的减小而增大,所以经验曲线略高于理论曲线。在颗粒间转动条件下,颗粒总是沿着颗粒间的鞍谷转动,在 $D/K > 1$ 时,转动角的测量值同理论值相近;而随 D/K 的减小,表面粘合作用增强,经验曲线也渐高于理论曲线。

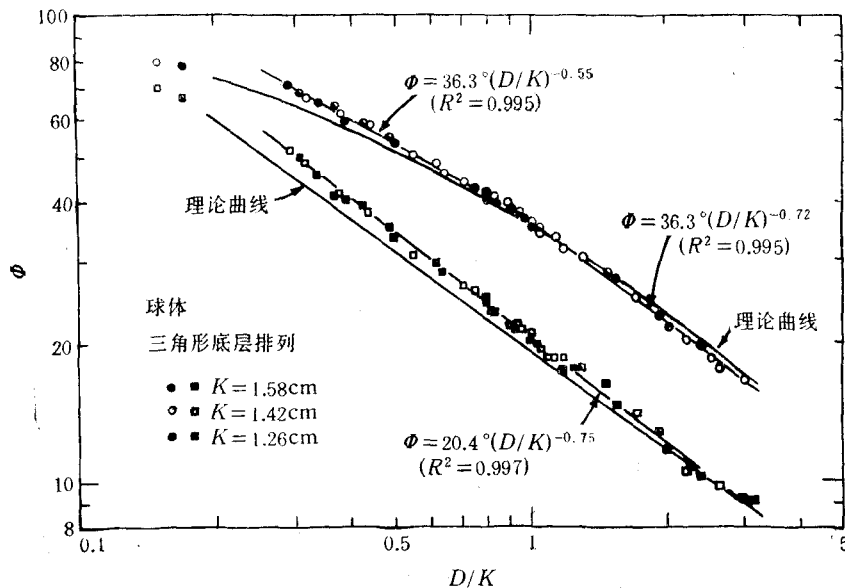


图 3 球状砾石转动角同相对粒径比 (D/K) 的相互关系

Fig. 3 Correlation between spherical gravel pivoting angles and relative grain size ratio (D/K)

上线为颗粒顶转动;下线为颗粒间转动。

在 $D/K=1$ 均匀粒径的条件下,图 3 给出 $\phi=36.3^\circ$ (颗粒顶转动)和 $\phi=20.4^\circ$ (颗粒间转动)。这与理论值 35° 和 19.5° 以及沉积物静止角 33° 很近似,但与 Eagleson 和 Dean 以及 Miller 和 Byrne 所获得的 $45^\circ-50^\circ$ 的值相去甚远。为了解释这一差异,对不同粒径球体在 $D/K=1$ 条件下的转动角进行了测量。测量粒径区间为 $1.58-0.12\text{cm}$ 。颗粒顶转动角的测量结果见图 4,颗粒间转动条件下的测量结果可参考文献[6]。图 4 中

的测量结果表明,随着 D 值的增加, Φ 值渐近于 35° 的理论值;而随着 D 值的减小, Φ 值迅速增加,本文的测量结果与 Eagleson 和 Dean, Miller 和 Byrne 的测量趋势是一致的^[3,5]。

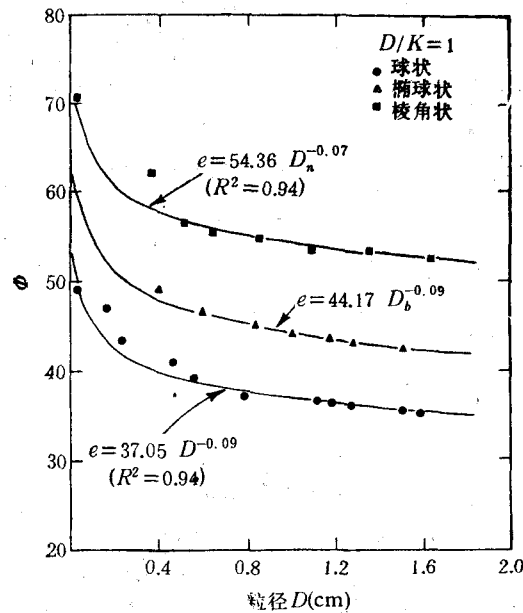


图4 均匀粒径 $D/K = 1$ 条件下沉积物转动角随粒径变化的经验曲线 ($\Phi = e$)

Fig. 4 Experimental curve of gravel pivoting angles depending on the grain size under condition of uniform grain size ($D/K = 1$) ($\Phi = e$)

图4的结果还表明公式(2)中的系数 e 取决于粒径 D ,因为当 $D/K = 1$ 时, $\Phi = e$ 。在 D/K 变化的条件下,图3的经验曲线给出 $e = 36.3^\circ$ 。若将底层颗粒的平均粒径 $\bar{K} = \frac{1}{3}(1.58 + 1.42 + 1.26) = 1.42\text{cm}$ 代入图4中的 $e-D$ 经验曲线, e 约为 36° ,可见二者是相互吻合的。因而图4可以用来对公式(2)中的 e 系数进行预测,为此,这些数据的回归方程也在图4中给出,以便应用。

三、椭球砾石的转动分析

椭球状砾石转动角的实验结果绘于图5和图6中。在测量过程中,砾石的长轴同倾斜方向垂直,短轴同木板平面相垂直,因而颗粒将沿中轴方向转动,故在下述分析中椭球状砾石的中轴直径 D_b 和 K_b 分别用来取代 D 和 K 。图5,图6表明,椭球状砾石 Φ 同 D_b/K_b 的依从关系同球体实验的结果相似,即在颗粒间转动条件下,经验曲线为一直线;而在颗粒顶转动条件下,曲线在 $D_b/K_b = 1$ 处发生转折。本文所获得的 e 和 f 系数同 Miller 和 Byrne 获得的数据是一致的。

在实验中,发现较扁的砾石常常是以滑动的方式起动,而只有圆形砾石才以转动的方式起动。滑动颗粒趋于给出大的 Φ 值,因而多位于回归曲线之上;转动颗粒的 Φ 值较小,多位于回归曲线之下;混合起动颗粒则靠近回归曲线分布(图5,6)。这一现象乃是由颗粒

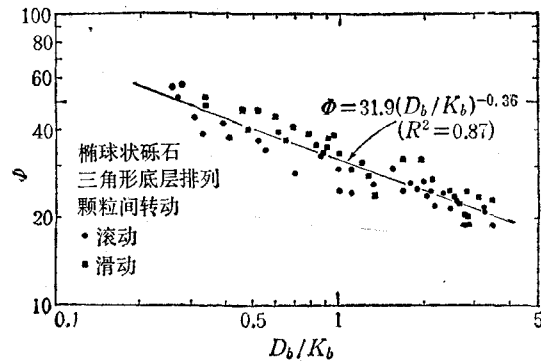


图 5 颗粒间转动条件下椭球状砾石转动角 Φ 随相对粒径 D_b/K_b 变化的经验曲线

Fig. 5 Experimental curve of ellipsoidal gravel pivoting angles depending on the relative grain size D_b/K_b under condition of saddle rotation

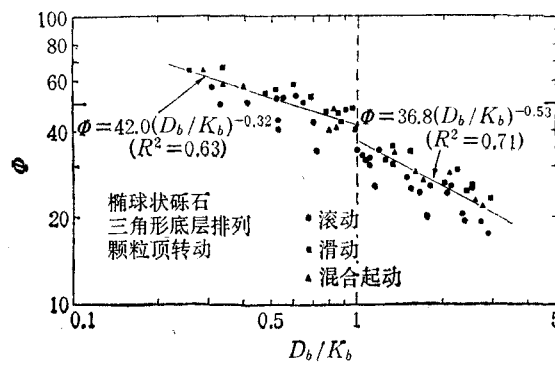


图 6 颗粒顶转动条件下椭球状砾石转动角 Φ 随相对粒径 D_b/K_b 变化的经验曲线

Fig. 6 Experimental curve of ellipsoidal gravel pivoting angles depending on the relative grain size D_b/K_b under condition of grain-top rotation

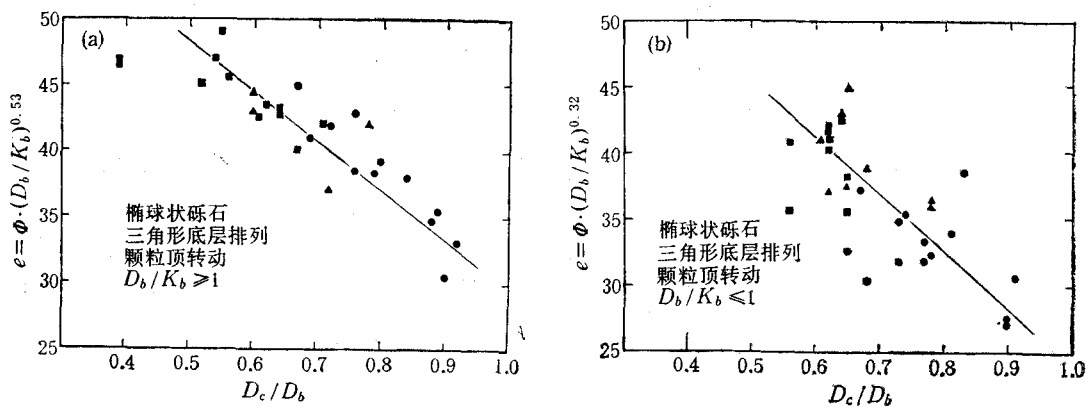


图 7 颗粒顶转动条件下, 椭球状砾石转动角随扁平度 D_c/D_b 变化的经验曲线(图例同图 6)

Fig. 7 Experimental curve of ellipsoidal gravel pivoting angles depending on the flatness D_c/D_b under condition of grain-top rotation

形状的变化所致,砾石短轴直径同中轴直径的比值 D_c/D_b 决定着砾石的滚动能力,因而可以推断上述差异将随 D_c/D_b 的变化而变化。假定在某一特定颗粒组合中, f 系数不变,从而 e 值可由所测得的 Φ 及 D_b/K_b , 方程(2)计算获得。正如所推断的那样,图 7 表明随着 D_c/D_b 的增大,颗粒越近于球形, e 值逐渐减小,颗粒多为转动起动;而随着 D_c/D_b 的减小,颗粒越扁平, e 值增大,颗粒则多为滑动起动。

从上述分析中可以看出,椭球状砾石沉积的 e 系数和转动角,不仅取决于颗粒粒径,而且也受颗粒形状的影响,这些依从关系对于沉积物以形状和粒度发生选择性起动过程的研究是十分重要的。

四、迭瓦状构造对转动角的影响

在上述利用椭球状砾石进行的实验中,砾石的 D_c 和 D_b 轴直径均与倾斜面平行。而在河流中却常发现砾石多成迭瓦状构造,尤其扁平状砾石更是如此。在这种构造中,长轴直径 D_c 仍同水流方向垂直,但中轴直径则向上游方向倾斜,故扁平状砾石同河床以一定角度相重迭,其迭瓦角的平均值约为 23° 。

迭瓦状构造形成了完全不同的颗粒旋转、起动几何形态,因而进行了一系列实验来分析该构造对沉积物转动角的影响。实验先测量了扁平状椭球砾石(平均 D_c/D_b 值为 0.4)在正常排列情况下的转动角,而后把它们以 23° 的倾斜角排列成迭瓦状,重新对转动角进行测量。所有测量中,砾石均以颗粒顶转动的形式排列,由于砾石为扁平状,其起动形式多为滑动起动。测量结果绘于图 8 中。在正常排列,即砾石最大投影面同倾斜面平行的情况下,对测量结果进行回归分析,得出 $e = 37.8$ 和 $f = 0.33$, 近似于图 5 所给出的测量结果。由于实验中采用的最大 D_b/K_b 比值仅为 1.6(更高的比值往往难以形成迭瓦构造),因而回归曲线在 $D_b/K_b = 1$ 处没有发生坡度的偏转。迭瓦状构造下的 f 系数同正常排列下没有大的变化(分别为 0.32 和 0.33),但系数 e 却由 37.8° 增至为 63.6° 。若把 23° 的迭瓦角同正常排列时的 $e = 37.8^\circ$ 相加可得出 $37.8^\circ + 23^\circ = 60.8^\circ$, 这同迭瓦构造下 $e = 63.6^\circ$ 的值很相近。因而可以近似地认为,迭瓦状构造将会增大沉积物的转动角,其增大值则约等于迭瓦构造中的迭瓦角。

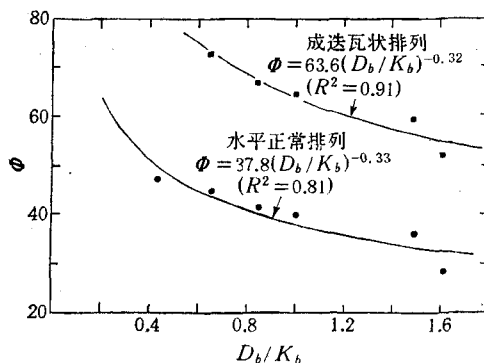


图 8 迭瓦状构造对扁平状砾石转动角的影响
Fig. 8 Effect of imbricated structure on flat gravel pivoting angles

五、棱角状砾石转动角的测量

先将 24 颗棱角状砾石均匀地粘于木板上,而后将单一的顶层砾石随机地放于这些底层砾石上,每一组合的转动角均测量 10 次,在分析中则取其平均值。这种随机放置的方法,包括颗粒顶和颗粒间的两种转动方式,因而 Φ 值的变化范围也较大。

图 9 的 D_n 和 K_n 分别为顶层和底层砾石的等值粒径,它们是由测量到的砾石的重

量计算而来,故近似于椭球状砾石的中轴直径,而根据定义则为具有相对密度和体积的球体直径。由图 9 可以看出,棱角状砾石的转动角也是随相对粒径比 D_n/K_n 的增大而减小。回归分析给出 $f = 0.33$, 接近于椭球状砾石的 f 系数(图 5、图 6)。图 9 还表明,在粒径相同条件下,棱角状砾石的 e 系数和转动角 ϕ , 要远大于球状和椭球状砾石所给出的数值。这种较高的 e 和 ϕ 值是由于棱角状砾石容易相互连结、扣锁所致,因而阻碍了它们在水流中的起动。

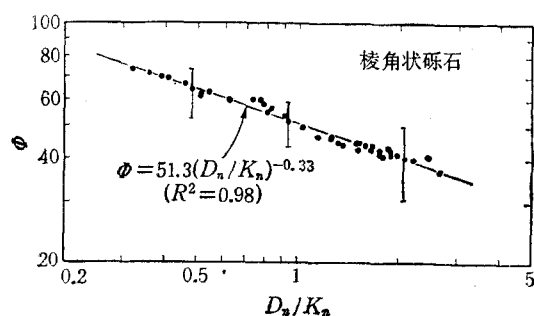


图 9 棱角状砾石转动角随相对粒径比 (D_n/K_n) 变化的经验曲线
Fig. 9 Experimental curve of angular gravel pivoting angles depending on the relative grain size ratio D_n/K_n

六、结 论

1. 利用球状砾石进行的转动角的测量结果同公式(1)相一致,所测数据同该公式的偏差小于 1° , 而这一结果不同于前人利用砂粒球体所测得的结果。
2. 在均匀粒径条件下,球体及其它形状颗粒的转动角 ϕ 同颗粒粒径有关。 ϕ 值随颗粒粒径的增大而减小。 ϕ 值同粒径的这一关系解释了前人利用砂粒测得较大转动角的原因,但造成这一关系的物理机制尚不清楚。
3. 椭球状砾石的转动角同砾石的形状,尤其是轴径比 D_c/D_b 有关。 D_c/D_b 比值决定了砾石的转动或滑动能力,从而影响了 ϕ 值的大小。
4. 成迭瓦状构造砾石的转动角远远大于水平状正常排列砾石的转动角, ϕ 值增大的幅度约等于砾石的迭瓦角。
5. 棱角状砾石容易相互连锁、扣结,阻碍砾石在水流中的起动,因而砾石沉积物的转动角还随棱角度的增大而增大。
6. 公式(2)中的系数 e 自球状砾石、椭球状砾石、棱角状砾石到迭瓦状构造依次增大,这表明砾石沉积物转动角随形状、棱角度及构造而变化。系数 f 则按同样顺序而减小,表明 ϕ 同 D/K 的关系依次减弱,而形状、棱角度及构造的影响则依次增强。

参 考 文 献

- [1] Bagnold, R. A., 1941, The Physics of Blown sand and Desert Dunes, Methuen, London, 265 pp.
- [2] Chepil, W. S., 1959, Equilibrium of soil grains at the threshold of movement by wind, *Proc. Soil Sci. Soc. Am.*, 23: 422—428.
- [3] Eagleson, P. S. and Dean, R. G., 1961, Wave-induced motion of sediment particles, *Trans. Am. Soc. Civ.*

- Engrs.*, 126: 1162—1186.
- [4] Komar, P. D. and Li Z., 1986, Pivoting analyses of the selective entrainment of sediments by shape and size with application to gravel threshold, *Sedimentology*, 33: 425—436.
- [5] Miller, R. L. and Byrne, R. J., 1966, The angle of repose for a single grain on a fixed rough bed, *Sedimentology*, 6: 303—314.
- [6] White, C. M., 1940, The equilibrium of grains on the bed of a stream, *Proc. R. Soc.*, A174: 253—338.

LABORATORY MEASUREMENTS OF GRAVEL PIVOTING ANGLES UNDER SELECTIVE ENTRAINMENT*

Li Zhenlin, Qin Yunshan

(*Institute of Oceanology, Academia Sinica, Qingdao 266071*)

Paul D. Komar

(*College of Oceanography, Oregon State University, U. S. A.*)

ABSTRACT

The pivoting angle of a grain about its contact point with the under-lying grains is very important to grain entrainment. A series of experiments were conducted to investigate how this angle depends on grain shape, relative grain size ratio and factors such as imbrication.

The pivoting angles of uniform grain size spheres reasonably agreed with that from a theoretically derived equation, but increased with decreasing grain size. This is consistent with earlier studies limited to sand-size spheres. Experiments with spherical, ellipsoidal and angular pebbles demonstrated that sediment pivoting angles increase with decreasing relative grain size, increasing particle flatness, and angularity. Imbricated arrangement of flat pebbles enlarged greatly their pivoting angles. The increase in pivotal angle approximately equal to the imbrication angle. Other factors being equal, the orders of increasing difficulty of entrainment are spheres, ellipsoidal grains, angular grains and imbricated grains. These results will be helpful for quantitative evaluation of size, shape and structural effects on grain threshold, as well as evaluation of the selective entrainment of grains from a bed of mixed sizes.

Key words Gravel, Pivoting angles, Selective entrainment.

* Contribution No. 2082 from the Institute of Oceanology, Academia Sinica.