

文章编号: 1673-9469 (2017) 03-0041-04

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2017.03.009

级配对粗颗粒土休止角影响试验研究

刘天^{1,2}, 朱俊高^{1,2}, 薄以霆^{1,2}, 蒋明杰^{1,2}

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏南京 210098; 2. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏南京 210098)

摘要: 为探究级配对粗颗粒土休止角的影响, 人工设计了不同级配土料, 计算出级配参数最大粒径 $d_{\max}$ 、不均匀系数 c_u 和曲率系数 c_c , 并由试验测定各个级配土料对应的休止角, 研究了级配参数对休止角的影响。结果表明: 随着最大粒径 $d_{\max}$ 、不均匀系数 c_u 、曲率系数 c_c 的增大, 休止角整体有增大的趋势, 其中最大粒径 $d_{\max}$ 对休止角的影响更为显著。在此基础上, 提出了一种将休止角与级配之间归一化的方法, 拟合了休止角与级配参数 $d_{\max}$ 、 c_u 和 c_c 之间的关系公式, 并通过室内试验验证了公式的合理性。

关键词: 粗颗粒土; 级配; 公式拟合; 休止角

中图分类号: TU43

文献标识码: A

Experimental research on the influence of gradation on angle of repose of coarse-grained soils

LIU Tian^{1,2}, ZHU Jungao^{1,2}, BO Yiting^{1,2}, JIANG Mingjie^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to explore the effect of gradation on the angle of repose of coarse grain soil, gradation parameters $d_{\max}$, c_u and c_c are calculated for different graded soils, the angle of repose of each gradation soil material is tested by experiment, the influence of gradation parameters on the angle of repose is studied. The results show: with the increase of $d_{\max}$, c_u and c_c , the angle of repose increases. On the basis of this, a method of normalizing the angle of repose and gradation is proposed, the relationship between the angle of repose and the gradation parameters $d_{\max}$, c_u and c_c is found. The rationality of the formula is verified by laboratory experiments.

Key words: coarse-grained soil; gradation; formula fit; angle of repose

粗颗粒土在自然界中分布十分广泛, 它不仅储量丰富, 而且具有良好的工程特性^[1], 被广泛应用于工程建设中。休止角是土体内摩擦角的外在表现^[2], 休止角的测量较为简便^[3]。对于休止角影响因素的研究, 主要集中在研究岩性、级配、含水率、颗粒粗糙程度等与休止角的关系。许多学者做过级配方面的研究^[4-7], 级配对休止角影响的研究却相对较少。孙开畅等的研究认为随均质粒径碎石料粒径的增大, 休止角逐渐增大, 颗粒级配分布越不均匀, 散粒体边坡休止角越大^[8]; 刘建宝等认为休止

角与粒径有较大关系, 另外级配、粗糙度、含水量等也会影响休止角的大小^[9]; 荀涛、胡鹏研究了颗粒相对较粗的珊瑚砂(粗砂、中粗砂为主), 发现其干砂休止角等于其内摩擦角, 砂粒间含水量升高, 休止角变小, 砂粒的休止角与其粒径呈正相关关系^[10]; 熊绍隆^[11]通过试验得出了散粒体天然沙水下休止角与 d_{50} 的关系公式; 张洪武得出了散体沙水下休止角随着粒径增大而增大的结论^[12]。以粗颗粒土为研究对象的相关研究很少, 而且没有实现级配对休止角影响的定量描述, 有待于深入研究。本文以

收稿日期: 2017-05-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51479052); 江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目(20141B1605313)

作者简介: 刘天(1991-), 男, 河北保定人, 硕士, 主要研究土体基本性质及本构关系。

粗颗粒土为研究对象,通过室内试验结果总结分析不同级配参数的变化对休止角的影响,并进一步探讨了级配与休止角的关系公式。

1 试验简介

休止角的室内测定方法主要有三种:注入法、排出法、容器倾斜法,试验选用容器倾斜法测定粗颗粒土的休止角,所谓容器倾斜法即将装有散粒物料的长方形容器倾斜或将圆筒形容器波动,静止后物料表面所形成的角度为休止角。试验材料选用小浪底堆石料,人工设计了12组不同级配,最大粒径分别为60、40和20 mm,每个最大粒径下有4种不同级配,考虑到级配相近时休止角可能相差不大,因此试验级配参数尽量相差较大。为了保证试验结果的准确性,每组级配土料采取3组平行试验,取3组试验结果的平均值作为该级配土料最终的休止角值。试验级配及试验成果见表1,计算了不同级配试样的不均匀系数和曲率系数,测定了不同级配试样的休止角。

2 试验结果分析

2.1 最大粒径对休止角的影响

编号1到4对应的最大粒径为60 mm, 编号5到8对应的最大粒径为40 mm, 编号9到12对应的最大粒径为20 mm,从图1可以看出,小浪底堆石料休止角与最大粒径的规律比较明显,最大粒径为60 mm条件下的休止角整体上大于最大粒径为40 mm条件下的休止角,最大粒径为40 mm条件下

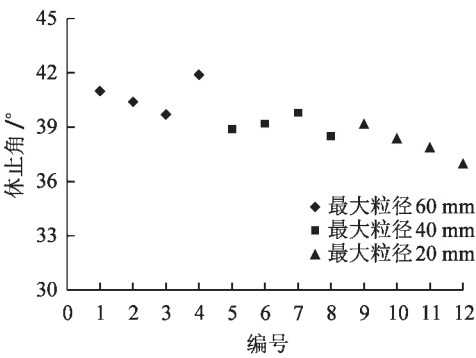


图1 最大粒径与休止角关系图
Fig.1 The relationship between the maximum particle size and the angle of repose

的休止角整体上大于最大粒径为20 mm条件下的休止角,随着最大粒径的减小,休止角整体上下下降。这主要是因为小浪底堆石料大颗粒表面粗糙,较大颗粒虽然下滑力较大,但是摩擦力也很大,另外颗粒较大棱角分明,颗粒填充于堆积体中的咬合力大,因此,最大粒径大的试料一般能达到更大的休止角。同种最大粒径下休止角变化也较大,特别是最大粒径60 mm时,休止角较为离散,最大最小休止角相差大,这说明粗粒料休止角不仅受最大粒径影响,与其他级配参数也有很大关系。

2.2 不均匀系数和曲率系数对休止角的影响

不均匀系数 c_u 和曲率系数 c_c 是评价土的级配好坏的重要指标,影响粗粒料的工程性质,通常对于纯净的砾石和砂,当 $c_u \geq 5$,并且 $c_c = 1 \sim 3$ 时,土料的级配是良好的,级配良好的土能达到很好的压实性能,其抗剪强度也较高。

图2和图3分别给出了不均匀系数 c_u 和曲率系数 c_c 和休止角的关系。从图中可以看出,不均匀系

表1 试验用粗颗粒土级配及试验成果
Tab.1 Gradation of testing soil and test results

试样 编号	不同粒组 (mm) 含量/%							不均匀 系数 c_u	曲率 系数 c_c	休止角 / $^\circ$
	60 ~ 40	40 ~ 20	20 ~ 10	10 ~ 5	5 ~ 2	2 ~ 1	<1			
1	19.5	22.9	19.3	16.1	11.5	3.4	7.3	12.9	1.5	41.0
2	28.0	26.6	17.6	12.4	8.1	2.3	5.0	9.8	1.2	40.4
3	39.8	24.8	15.9	10.0	3.9	2.3	3.3	6.7	1.0	39.7
4	8.8	16.3	19.3	19.0	14.9	8.1	13.6	23.1	2.5	41.9
5		29.6	30.1	22.1	7.3	3.1	7.8	10.4	2.3	38.9
6		22.8	26.7	26.2	9.7	3.9	10.7	11.3	1.9	39.2
7		15.0	25.5	27.0	13.1	5.8	13.6	21.3	3.0	39.8
8		44.2	31.3	17.5	3.6	0.4	3.0	3.7	1.2	38.5
9			45.7	20.1	19.9	2.3	12	19.6	3.3	39.2
10			34.5	32.8	16.7	5.2	10.8	9.8	2.6	38.4
11			54.8	26.8	8.7	2.0	7.7	6.1	1.9	37.9
12			65.2	22.8	6.7	1.4	3.9	3.2	1.4	37.0

数和曲率系数的变化对休止角的影响有相似性:休止角随不均匀系数变化的关系图和随曲率系数变化的关系图均有明显的层次性,这是因为最大粒径对休止角的影响,最大粒径为 60 mm 的关系曲线在最上层,最大粒径为 20 mm 的关系曲线在最下层;在相同最大粒径条件下,休止角整体上随不均匀系数和曲率系数的增加而增加,这是因为不均匀系数和曲率系数是描述了土样的级配良好情况的,不均匀系数的大小可以用来衡量土中土粒的均匀程度,曲率系数反映了粒径分布曲线的形状,不均匀系数大则土的粒径范围大,各粒径土料含量越不均匀,大颗粒形成的孔隙有足够的小颗粒充填,能达到更大的堆积高度。曲线局部存在波动,这说明休止角并不是受单一因素的影响,而是受最大粒径、不均匀系数和曲率系数的综合影响。

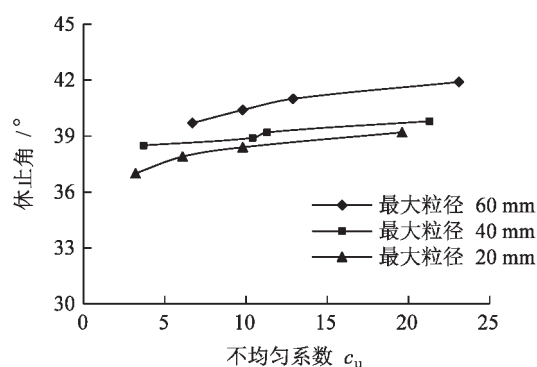


图2 不均匀系数与休止角关系图

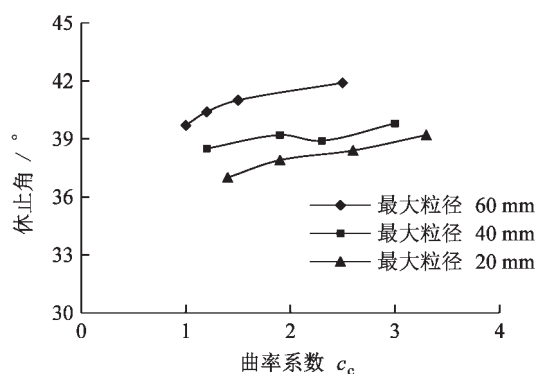
Fig.2 The relationship between the c_u and the angle of repose

图3 曲率系数与休止角关系图

Fig.3 The relationship between the c_c and the angle of repose

3 级配对休止角影响的定量描述

3.1 级配与休止角关系公式的拟合

从以上分析可以看出,级配对休止角的影响是最大粒径 $d_{\max}$ 、不均匀系数 c_u 和曲率系数 c_c 的综合

影响,考虑由这三个参数拟合级配与休止角的关系公式。

令 $n = \lg(d_{\max}) \cdot \sqrt{c_u/c_c}$, 将表 1 中的数据整理,计算每一个级配编号下土料的 n 值,得到 n 与休止角 ψ 的关系图,如图 4。

从图 4 中可以看出,对于 $n-\psi$ 关系,所有各点具有很好的归一性,不同级配试样的休止角 ψ 落在同一条曲线附近。对于 $n-\psi$ 关系,采用三次多项式拟合,如图 4 所示,拟合公式为:

$$\psi = an^3 + bn^2 + cn + d$$

式中, a 、 b 、 c 、 d 为参数,对本文采用的小浪底堆石料,参数 $a=3.566 \times 10^{-1}$, $b=3.892 \times 10^0$, $c=1.448 \times 10$, $d=2.083 \times 10$ 。

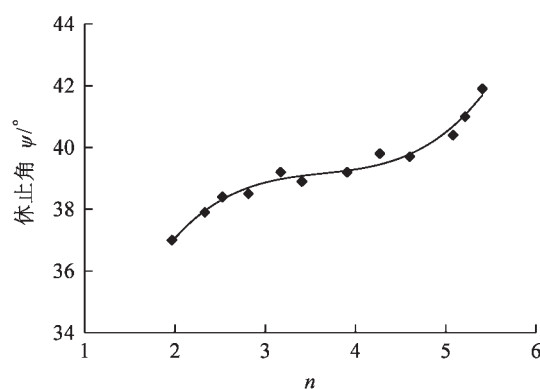


图4 级配与休止角关系拟合曲线

Fig.4 The fitting curve between gradation and the angle of repose

3.2 级配与休止角关系公式的试验验证

为了验证拟合公式的合理性,又配置了最大粒径分别为 60、40、20 mm 各一组级配土料进行室内试验测定相应的休止角,试验用级配如图 5。

分别计算三种级配土料对应的级配参数不均匀系数 c_u 和曲率系数 c_c ,将每种级配下的最大粒径、不均匀系数和曲率系数代入计算公式,将计算的 n

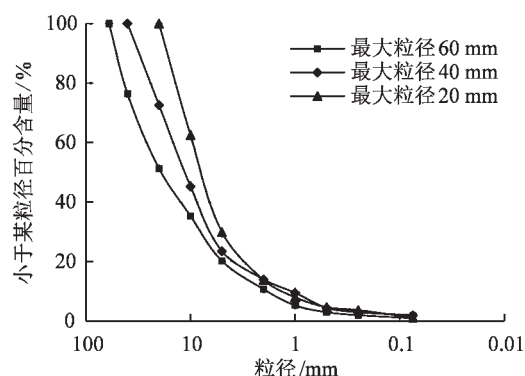


图5 试验级配曲线

Fig.5 Test gradation curve

表2 休止角的计算值与实测值
Tab.2 Calculated and measured values of the angle of repose

最大粒径/mm	不均匀系数 c_u	曲率系数 c_c	n	计算休止角值/°	实测休止角值/°
60	13.3	1.7	4.9	40.4	40.2
40	17.8	2.7	4.1	39.3	39.3
20	7.2	2.1	2.4	38.1	38.2

值代入拟合公式, 计算三种级配土料的计算休止角值。计算结果和试验实测休止角值见表2。

从表2可以看出, 由拟合公式计算的休止角值与试验实测的休止角值接近, 偏差较小, 验证了公式的合理性。由此可以由拟合公式预测小浪底堆石料某一级配下的休止角, 对于其他性质的土料只需由试验测定该土料级配与休止角关系曲线的 a 、 b 、 c 、 d 值, 再将某一级配下的级配参数代入计算即可。

4 结论

1) 随着级配参数最大粒径 $d_{\max}$ 、不均匀系数 c_u 、曲率系数 c_c 的增大, 休止角整体有增大的趋势, 其中最大粒径 $d_{\max}$ 对休止角的影响更为显著。

2) 建立了休止角与级配参数最大粒径 $d_{\max}$ 、不均匀系数 c_u 、曲率系数 c_c 的关系公式, $\psi=an^3+bn^2+cn+d$ 。经试验验证该公式合理, 可以预测某一级配下的该公式止角, 用以指导工程实践。

参考文献:

- [1] 日本土质工学会. 粗粒料的现场压实[M]. 郭熙灵, 文丹译. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [2] 卢廷浩. 土力学[M]. 南京: 河海大学出版社, 2002: 237-238.

- [3] 阙云, 王成华, 张小刚. 川藏公路典型溜砂坡形成机理与整治[J]. 山地学报, 2003, 21(4): 595-598.
- [4] 黄达, 曹彬, 王庆乐. 粗粒土孔隙比及级配参数与渗透系数概率的相关性研究[J]. 水利学报, 2015, 46(8): 900-907.
- [5] 朱俊高, 翁厚洋, 吴晓铭, 等. 粗粒料级配缩尺后压实密度试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(8): 2394-2399.
- [6] 苏立君, 张宜健, 王铁行. 不同粒径级砂土渗透特性试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(5): 1289-1294.
- [7] 王双, 李小春, 王少泉, 等. 碎石土级配特征对渗透系数的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(2): 4394-4402.
- [8] 孙开畅, 刘林峰, 明华军, 等. 不同粒径及级配碎石料休止角影响的试验研究[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(8): 91-95.
- [9] 刘建宝, 王乃昂, 程弘毅, 等. 沙丘沙休止角影响伊苏实验研究[J]. 中国沙漠, 2010, 30(4): 758-762.
- [10] 荀涛, 胡鹏. 西沙群岛珊瑚砂运动特性试验研究[J]. 水道港口, 2009, 30(4): 277-281.
- [11] 熊绍隆. 深水孔口门前冲刷漏斗形态研究[J]. 西北水电, 1983(4): 10-21.
- [12] 张洪武, 汪家寅. 沙石及模型水下休止角试验研究[J]. 泥沙研究, 1989(9): 91-95.