

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.06.011

王龙, 陆晓平, 薄以霆. 颗粒形状及级配对粗颗粒土休止角的影响[J]. 水利水运工程学报, 2017(6): 79-84. (WANG Long, LU Xiaoping, BO Yiting. Influence of particle size and gradation on repose angle of coarse-grained soil [J]. Hydro-Science and Engineering, 2017(6): 79-84. (in Chinese))

## 颗粒形状及级配对粗颗粒土休止角的影响

王 龙<sup>1</sup>, 陆晓平<sup>2</sup>, 薄以霆<sup>3</sup>

(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. 江苏省秦淮河水利工程管理处, 江苏 南京 210022; 3. 昆山市水利局, 江苏 昆山 215300)

**摘要:** 为了准确且方便地测量粗颗粒土的休止角, 研制了一种基于旋转容器法的粗颗粒土休止角测定仪。利用此装置, 对2种粗颗粒土分别进行了15种级配下的休止角试验, 并研究了颗粒形状和级配对粗颗粒土休止角的影响。试验结果表明: 对于级配相同、颗粒形状不同的粗颗粒土, 颗粒呈棱角状砾石料的休止角大于颗粒圆滑的卵石料, 不同最大粒径下砾石料的休止角平均值比卵石料高 $1.3^{\circ}\sim 2.0^{\circ}$ ; 对于颗粒形状相同、级配不同的粗颗粒土, 休止角随最大粒径的增加而增大, 最大粒径为20~40 mm时, 休止角平均值增长曲线平缓, 最大粒径为40~60 mm时, 休止角平均值增长速率明显变快; 休止角随平均粒径的增大而减小, 随不均匀系数的增加而增大。

**关键词:** 粗颗粒土; 休止角; 测定仪; 颗粒形状; 级配

**中图分类号:** TU43      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1009-640X(2017)06-0079-06

粗颗粒土通常是指由石、砾、砂、土粒等大小不等、性质不一的颗粒相互填充而成的粗颗粒土石混合物<sup>[1]</sup>。近年来我国土石坝大量兴建, 粗颗粒土由于具有取材方便、储量丰富以及良好的工程性能等优点, 被广泛应用于土石坝填筑工程中<sup>[2]</sup>。建坝过程中, 开采的土料与开挖废弃料需要堆放。土料堆积过程中, 堆积体临空面形成的边坡可能会发生失稳, 引起坡面崩塌。这不仅会给工程造成极大危害, 而且还会危及施工人员的生命安全。休止角作为粗颗粒土重要的物理力学特征参数之一, 反映了粗颗粒土的流动性, 是评价粗颗粒土堆积体稳定性的重要指标。因此, 研究粗颗粒土休止角对于指导现场粗颗粒土的堆放和评价粗颗粒土堆积体稳定性是必要的。

目前, 休止角传统试验方法的对象主要集中于粮食作物<sup>[3]</sup>、沙漠沙<sup>[4]</sup>、砂土<sup>[5]</sup>等粉粒状物料。近年来, 国内外学者对休止角进行了大量的研究, 并取得一系列成果。Carrigy<sup>[6]</sup>利用研制的旋转式休止角测定仪, 以玻璃球、铜块和砂等为试验材料, 研究了不规则程度对休止角的影响以及同种材料的休止角在水和空气这两种不同介质中的差异; Zhou等<sup>[7]</sup>采用离散元数值模拟和试验相结合的方法, 研究了单一尺寸球体休止角的影响因素; 孟震等<sup>[8]</sup>进行了泥沙颗粒水下休止角和内摩擦角的物理试验, 对二者的差异进行了研究; 孙开畅等<sup>[9]</sup>通过边坡堆积试验, 研究了均质碎石粒径以及级配参数 $d_{50}$ 和 $C_u$ 对碎石料休止角的影响; 卜祥航等<sup>[10]</sup>研究了散粒体斜坡失稳破坏内部因子与休止角的关系, 并提出休止角估算模型。但是这些研究中, 对颗粒尺寸较大的粗颗粒土研究不多, 对粗颗粒土的休止角性质了解也很少, 有必要进行深入研究。

本文研制了一种新型的粗颗粒土休止角测定仪, 对2种粗颗粒土进行了不同级配土料的休止角试验, 研

收稿日期: 2017-04-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51479052); 水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室开放研究基金资助项目(YK915001)

作者简介: 王 龙(1991—), 男, 山东枣庄人, 博士研究生, 主要从事土体基本性质及本构关系研究。

E-mail: hohaiwl@163.com

究不同颗粒形状、级配下的休止角差异,为粗颗粒土物理力学指标的研究提供参考。

## 1 粗颗粒土休止角测定仪的研制

### 1.1 常用休止角试验方法分析

目前,散体材料休止角最常用的试验方法有注入法、排出法和旋转容器法。注入法为通过固定漏斗等加料装置将物料在水平面堆积成圆锥体,圆锥体母线与水平面的夹角即为休止角,如图1(a)所示。排出法是主动去除物料约束,物料会在重力作用下滑动并形成一稳定坡面,坡面与水平面的夹角即为休止角,如图1(b)所示。旋转容器法是将物料放入圆柱型的旋转容器,容器内物料会形成连续坡面,坡面与水平面的夹角即为物料的休止角,如图1(c)所示。

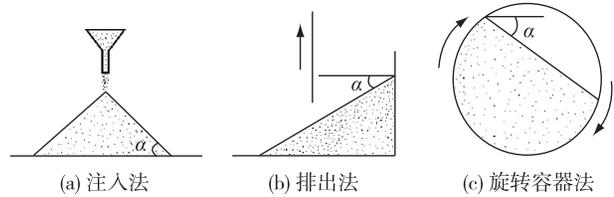


图1 常用休止角试验方法

Fig. 1 Schematic of typical methods for measuring of repose angle

但是,使用注入法测定粗颗粒土休止角时,存在一定的缺陷。由于粗颗粒土颗粒较大且棱角分明,颗粒间的嵌入和咬合作用会阻碍加料装置中土料的下落。此外,粗颗粒下落后会对已形成的堆积体造成较大冲击,形成“削顶”现象。

本文拟研制一种旋转容器法的休止角测定仪,并利用该仪器进行粗颗粒土休止角测定。

### 1.2 粗颗粒土休止角测定仪

在综合考虑了排出法和旋转容器法的试验原理后,本文研制了一种粗颗粒土休止角测定仪(如图2)。该仪器主要由装料斗、金属支架和手动升降装置3部分组成。通过旋转装料斗的方式使土体发生滑动,避免了注入法存在的土料难下落以及“削顶”现象,提高了测量精度。

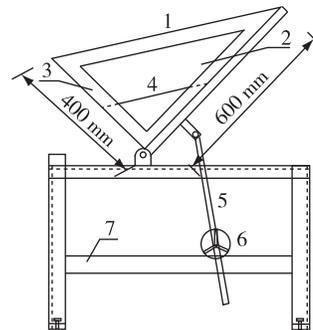
装料斗形状为三棱柱,尺寸为400 mm×400 mm×600 mm,其中装料斗底板尺寸为400 mm×400 mm(见图2)。由于装料斗底板与土料的摩擦会影响休止角试验结果,摩擦系数过高会导致所测休止角过大,过低则导致休止角过小,因此为保证试验土料有一定休止角,装料斗底板采用较为粗糙的铁片制作。另外,为了减小背面和侧面摩擦对试验结果的影响且利于观察,装料斗背面和侧面均采用钢化玻璃制作。挡板的设置主要是为了使得试验用土料尽量少。

粗颗粒土休止角测定仪的具体使用步骤如下:

(1)仪器调平:仪器放置于水平地面,将装料斗调至水平位置。借助水平尺,调节支架底部4个调平螺丝,保证装置各个方向都处于水平状态。检查装料斗背面5个刻度条是否均垂直且紧贴钢化玻璃。确定无误后方可装料。

(2)试样装填:按照试验土料级配一次性称取10 kg土料,放置于称料容器中。充分搅拌均匀后,用取土器将土料移至装料斗内。装料时尽可能轻地将土料倒入装料斗中,以减小对装料斗中试样的扰动,即保证土样处于自然松散堆积状态。待该次装料完毕,重复上述操作,直至装料斗装满土料。

(3)休止角测定:装料完成后,缓慢匀速地转动手摇转轮。当装料斗倾斜到一定角度,土料开始滑动时,土料坡面与水平面的夹角即为土料的休止角。此时停止转动装料斗,根据装料斗背部刻度条读数、装料斗底板与水平面的夹角及底板土料距水平面高度,计算休止角。也可待转动装料斗底板至水平位置,土样不再出现滑动,此时土料坡面与水平面夹角即为休止角。



1-装料斗;2-钢化玻璃;3-装料斗外框;4-挡板;  
5-升降螺杆;6-手摇转轮;7-支撑框架

图2 休止角测定仪示意

Fig. 2 Schematic of the measuring apparatus for the angles of repose of coarse-grained soils

(4) 本次试验完成后, 取出装料斗内所有剩余土料。重复上述步骤(1)~(3), 可再次进行休止角试验。

## 2 粗颗粒土休止角试验方案

为研究不同颗粒形状的粗颗粒土的休止角, 试验采用2种不同粗颗粒土, 分别是小浪底心墙堆石坝堆石料和长河坝心墙堆石坝覆盖层料。小浪底料为砾石料, 颗粒呈棱角状, 母岩为砂岩(简称砾石料)。长河坝料为砂卵石料, 多数颗粒圆滑, 少有棱角(简称卵石料)。

本文对上述两种不同颗粒形状的粗颗粒土分别进行了15组不同级配土料的休止角试验(试验编号1~15), 研究休止角随级配的变化特征。试验1~5的最大粒径60 mm, 6~10的最大粒径40 mm, 11~15的最大粒径20 mm。各组试验土料级配曲线示于图3。

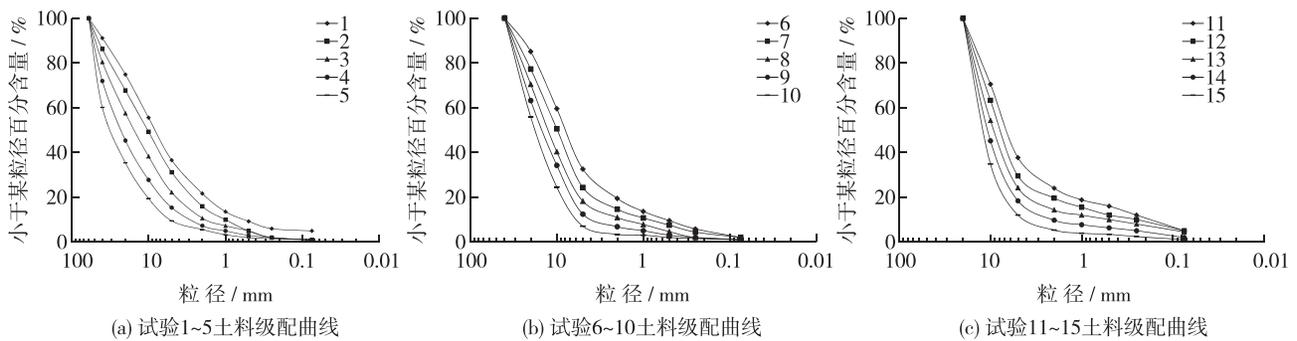


图3 试验土料级配曲线

Fig. 3 Gradation curves of test soil samples

试验时, 装料斗转至水平位置装料并削平表面; 然后, 缓慢转动手轮, 待装料斗底板水平后停止并读取相关读数, 如图4所示。

休止角按下式进行计算:

$$\alpha = \tan(H/b) \quad (1)$$

式中:  $\alpha$  为土料的休止角;  $H$  为装料斗背面5个刻度条读数的平均值;  $b$  为装料斗底板宽度。

每种级配土料的休止角试验均进行3次平行试验, 最终取3次休止角的均值作为本级配土料的休止角。

## 3 试验成果与分析

### 3.1 颗粒形状对休止角的影响

图5给出了两种不同颗粒形状的粗颗粒土15组试验的休止角。从图5中可以看出, 砾石料的休止角在 $36.5^\circ \sim 43.9^\circ$ 之间波动, 卵石料的休止角在 $35.7^\circ \sim 41.5^\circ$ 之间波动。总体上, 砾石料的休止角大于同级配卵石料的休止角。试验1~5, 6~10, 11~15砾石料的休止角平均值分别比卵石料的休止角平均值高 $1.3^\circ$ ,  $2.0^\circ$ 和 $1.6^\circ$ 。

引起上述现象的原因应该是: 粗颗粒土堆积体内摩擦力主要来自于颗粒间的摩擦力和颗粒嵌入和连锁作用产生的咬合力。内摩擦力越大, 休止角越大。砾石料



图4 试验测定的休止角

Fig. 4 The angle of repose of the test samples

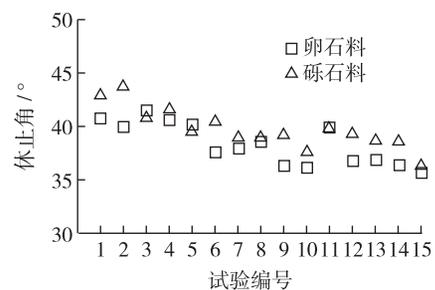


图5 试验土料休止角

Fig. 5 Results of the angles of repose of test samples

棱角分明,颗粒嵌入咬合得好,咬合力大;且颗粒表面粗糙,颗粒滑动所受的摩擦力较大。而卵石料多为表面圆润光滑的椭球体,与砾石料相比,颗粒间摩擦力和咬合力都要小。因此卵石料的休止角普遍小于同级配砾石料的休止角。

### 3.2 级配对休止角的影响

已有研究表明,土体级配对其物理力学性质有重要影响<sup>[11-14]</sup>。对于粗颗粒土,阻止坡面上颗粒下滑的因素应该与颗粒大小及其分布情况有关。对前者,在一定程度上能用最大粒径  $d_{\max}$  和平均粒径  $d_{50}$  来反映。对后者,即大小颗粒分布情况则可以用不均匀系数  $C_u$  来反映。因此,本节选取最大粒径  $d_{\max}$ 、平均粒径  $d_{50}$ 、不均匀系数  $C_u$  来研究级配对粗颗粒土休止角的影响。 $d_{50}$  为粒径分布曲线上小于某粒径的土粒含量为 50% 所对应的粒径。不均匀系数  $C_u = d_{60}/d_{10}$ ,  $d_{10}$ ,  $d_{60}$  分别为粒径分布曲线上小于某粒径的土粒含量为 10%, 60% 时所对应的粒径。

**3.2.1  $d_{\max}$  对休止角的影响** 对照图 5 和图 3, 试验编号 1~5, 6~10 和 11~15 分别对应最大粒径  $d_{\max} = 60, 40$  和 20 mm, 可见两种粗颗粒土的休止角整体上随着  $d_{\max}$  的减小而减小。为了更清楚地反映  $d_{\max}$  对休止角的影响, 根据试验结果整理了砾石料试验编号 1~5 ( $d_{\max} = 60$  mm), 6~10 ( $d_{\max} = 40$  mm), 11~15 ( $d_{\max} = 20$  mm) 各组的休止角平均值, 分别为  $41.9^\circ, 39.3^\circ$  和  $38.7^\circ$ ; 同样, 卵石料试验 1~5, 6~10, 11~15 各组的休止角平均值分别为  $40.6^\circ, 37.3^\circ$  和  $37.2^\circ$ 。图 6 为两种粗颗粒土各组试验休止角的平均值与  $d_{\max}$  的关系。可见,  $d_{\max}$  为 20~40 mm 时, 两种粗颗粒土休止角平均值的的增长曲线较为平缓; 当  $d_{\max}$  为 40~60 mm 时, 休止角随  $d_{\max}$  增长趋势较为明显, 曲线明显变陡。

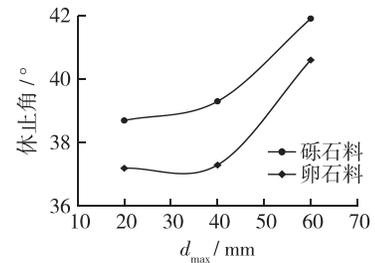


图 6 各组休止角平均值与  $d_{\max}$  关系

Fig. 6 Variation of the average repose angle with  $d_{\max}$

发生上述现象可以解释为:随着  $d_{\max}$  的增大,组成土骨架的颗粒粒径相应增大,颗粒不规则程度增大,颗粒间的接触点数增加,颗粒间的摩擦力和咬合力随之增大,堆积体的内摩擦力增大,引起休止角的增大。但是,当粗颗粒土的  $d_{\max}$  较小时,粗颗粒形成的土骨架对于休止角的增强作用并不明显。只有当  $d_{\max}$  大于一定值时,土骨架才开始明显发挥作用。

**3.2.2  $d_{50}$  对休止角的影响** 图 7 给出了砾石料和卵石料两种粗颗粒土的试验编号 1~15 的休止角与  $d_{50}$  的关系。其中,试验编号 1~5, 6~10, 11~15 分别对应 3 种不同最大粒径。

由图 7(a)可见,对相同  $d_{\max}$  的砾石料,试验编号 1~5, 6~10, 11~15 的休止角整体上随  $d_{50}$  的增大呈减小趋势。 $d_{50}$  每增加 1 mm, 试验编号 1~5, 6~10, 11~15 各组试验休止角相应减小约  $0.15^\circ, 0.20^\circ$  和  $0.28^\circ$ 。由图 7(b)可见,卵石料也呈现相似规律,即休止角大致随  $d_{50}$  的增大而减小。 $d_{50}$  每增加 1 mm, 试验编号 1~5, 6~10, 11~15 各组试验休止角相应减小  $0.01^\circ, 0.19^\circ$  和  $0.51^\circ$ 。

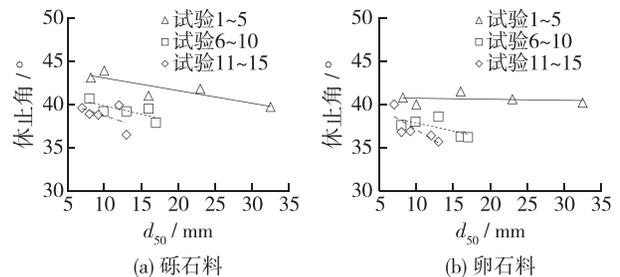


图 7 两种粗颗粒土休止角与  $d_{50}$  关系

Fig. 7 Relationship between the repose angles and  $d_{50}$  of two kinds of coarse-grained soils

上述现象似乎与休止角随  $d_{\max}$  的增大而增大的趋势相矛盾。笔者认为,  $d_{50}$  除了反映粒径大小外,还在一定程度上反映了级配。结合图 3, 分析引起上述现象的原因可能为:  $d_{50}$  一定程度上反映了粗颗粒土中细颗粒含量的多少。从图 3 可以看出, 试验 1~5 (6~10, 11~15) 土料的  $d_{50}$  不断增大, 级配曲线逐渐变陡, 细颗粒含量不断减少。细颗粒含量的减小, 引起粗颗粒孔隙的填充作用逐渐减弱, 导致休止角不断减小。

**3.2.3  $C_u$  对休止角的影响** 图 8 给出了两种粗颗粒土 15 种级配土料的休止角与  $C_u$  的关系。由图 8 可见, 无论是砾石料还是卵石料, 相同  $d_{\max}$  时, 其休止角均随  $C_u$  的增大而增大。 $C_u$  每增加 1, 砾石料试验编号 1~5,

6~10, 11~15 各组的休止角平均值分别增加  $0.17^\circ$ ,  $0.11^\circ$  和  $0.04^\circ$ ; 卵石料试验编号 1~5 的休止角基本保持稳定, 6~10, 11~15 各组的休止角分别增加  $0.11^\circ$  和  $0.07^\circ$ 。

发生上述现象的原因为:  $C_u$  反映了土颗粒的不均匀程度,  $C_u$  愈大, 土颗粒的不均匀程度愈大, 粗颗粒与细颗粒的大小相差愈大, 就有足够的细颗粒去填充粗颗粒形成的孔隙, 土颗粒之间的接触就愈充分, 颗粒间的滑动摩擦力和咬合力就愈大, 休止角就愈大。

另外, 从图 8 中可以看出, 两种粗颗粒土休止角随  $C_u$  的变化规律并不十分明显, 有一定的波动性。其主要原因为粗颗粒土颗粒较大, 每次试验土料颗粒的接触和排列方式都不相同, 使试验结果有一定的离散性。

## 4 结 语

利用研制的粗颗粒土休止角测定仪, 对两种不同颗粒形状的粗颗粒土进行了 15 种不同级配土料的休止角试验, 研究不同颗粒形状、级配时粗颗粒土的休止角差异, 主要结论如下:

(1) 与使用注入法测粗颗粒土休止角相比, 本文试验方法具有操作方便, 避免了物料成堆过程中的扰动, 测量精度高等优点。

(2) 粗颗粒土的颗粒形状影响粗颗粒土休止角的大小。最大粒径  $d_{\max}$  相同时, 砾石料休止角的平均值比卵石料高  $1.3^\circ \sim 2.0^\circ$ 。

(3) 粗颗粒土休止角随  $d_{\max}$  的增大而增大。  $d_{\max} = 20 \sim 40$  mm 时, 休止角随  $d_{\max}$  增长较平缓; 而  $d_{\max} = 40 \sim 60$  mm 时, 休止角随  $d_{\max}$  增长明显变陡。

(4) 最大粒径  $d_{\max}$  一定时, 粗颗粒土休止角与  $d_{50}$  呈负相关关系; 与  $C_u$  呈正相关关系, 但变化规律并不十分显著。

由于仪器容量的限制, 本文粗颗粒土最大的最大粒径  $d_{\max}$  只有 60 mm, 与实际粗颗粒土边坡填筑土料的粒径相比要小很多, 不能完全反映实际情况。因此将来可加强适用于更大粒径粗颗粒土的休止角测定仪器和测量方法方面的研究, 以便更好地满足实际工程的需求。

## 参 考 文 献:

- [1] 郭庆国. 关于粗粒土抗剪强度特性的试验研究[J]. 水利学报, 1987(5): 59-66. (GUO Qingguo. Experimental study on the shear strength of coarse-grained materials[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1987(5): 59-66. (in Chinese))
- [2] 朱俊高, 王元龙, 贾华, 等. 粗粒土回弹特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(6): 950-954. (ZHU Jungao, WANG Yuanlong, JIA Hua, et al. Experimental study on resilience behavior of coarse grained soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(6): 950-954. (in Chinese))
- [3] ILELEJI K E, ZHOU B. The angle of repose of bulk corn stover particles[J]. Powder Technology, 2008, 187(2): 110-118.
- [4] 刘建宝, 王乃昂, 李亚军, 等. 沙漠沙休止角一种新的测定方法[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2010, 46(4): 37-41. (LIU Jianbao, WANG Nai'ang, LI Yajun, et al. A new experiential measurement for the angle of desert sand[J]. Journal of Lanzhou University(Natural Sciences), 2010, 46(4): 37-41. (in Chinese))
- [5] ROUSÉ P C. Comparison of methods for the measurement of the angle of repose of granular materials[J]. Geotechnical Testing Journal, 2014, 37(1): 164-168.
- [6] CARRIGY M A. Experiments on the angles of repose of granular[J]. Sedimentology, 2010, 14(3-4): 147-158.
- [7] ZHOU Y C, XU B H, YU A B, et al. An experimental and numerical study of the angle of repose of coarse spheres[J]. Powder Technology, 2002, 125(1): 45-54.

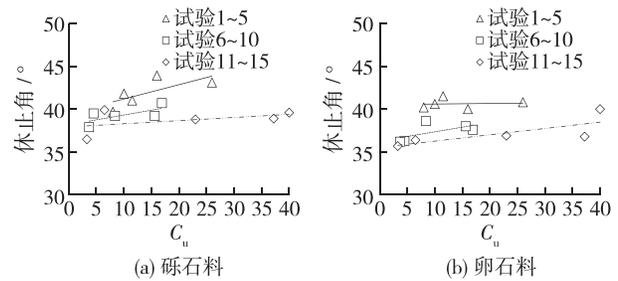


图 8 两种粗颗粒土休止角与  $C_u$  关系

Fig. 8 Relationship between the repose angles of two kinds of coarse-grained soils and  $C_u$

- [8] 孟震, 杨文俊. 泥沙颗粒水下休止角与内摩擦角差异化初步探索[J]. 泥沙研究, 2012(4): 76-80. (MENG Zhen, YANG Wenjun. Preliminary exploration of difference between submarine angle of repose and internal friction angle of sediment particles [J]. Journal of Sediment Research, 2012(4): 76-80. (in Chinese))
- [9] 孙开畅, 刘林锋, 明华军, 等. 不同粒径及级配对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. (SUN Kaichang, LIU Linfeng, MING Huajun, et al. Experimental research on the influence of particle size and gradation on repose angle of rockfill [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2016, 33(8): 91-95. (in Chinese))
- [10] 卜祥航, 傅荣华, 李仅德, 等. 散粒体斜坡失稳破坏内部因素试验研究[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(9): 116-120. (BU Xianghang, FU Ronghua, LI Jinde, et al. Internal factors of the failure of granular mixtures slope [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2016, 33(9): 116-120. (in Chinese))
- [11] 丁树云, 蔡正银, 凌华. 堆石料的强度与变形特性及临界状态研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(2): 248-252. (DING Shuyun, CAI Zhengyin, LING Hua. Strength and deformation characteristics and critical state of rock fill [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(2): 248-252. (in Chinese))
- [12] 王俊杰, 卢孝志, 邱珍锋, 等. 粗粒土渗透系数影响因素试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2013(6): 16-20. (WANG Junjie, LU Xiaozhi, QIU Zhenfeng, et al. Experimental studies on influence factors of permeability coefficients of coarse-grained soil [J]. Hydro-Science and Engineering, 2013(6): 16-20. (in Chinese))
- [13] 蒋明镜, 郑敏, 王闯, 等. 不同颗粒级配的某火山灰的力学性质试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(增刊2): 64-66. (JIANG Mingjing, ZHENG Min, WANG Chuang, et al. Experimental investigation on mechanical properties of a volcanic ash with different grain size gradations [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(Suppl2): 64-66. (in Chinese))
- [14] WANG J J, ZHAO D, LIANG Y, et al. Angle of repose of landslide debris deposits induced by 2008 Sichuan Earthquake [J]. Engineering Geology, 2013, 156(2): 103-110.

## Influence of particle size and gradation on repose angle of coarse-grained soil

WANG Long<sup>1</sup>, LU Xiaoping<sup>2</sup>, BO Yiting<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Geomechanics and Embankment Engineering of Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Management Division of Qinhuai River Hydraulic Engineering of Jiangsu Province, Nanjing 210022, China; 3. Water Conservancy Bureau of Kunshan City, Kunshan 215300, China)

**Abstract:** In order to measure the repose angle of the coarse-grained soils accurately and easily, an apparatus based on rotatable-vessel method is described in this paper. 15 tests with different gradations were carried out on two kinds of coarse-grained soils with the proposed apparatus, respectively. The influences that the particle shape and gradation have on the repose angles of coarse-grained soils are investigated. The results show that for soils with the same gradation, the repose angles of gravel with angular particles are higher than those of the cobble with smooth particles, and the average repose angles of gravel are  $1.3^{\circ} \sim 2.0^{\circ}$  higher than those of cobble with different maximum grain sizes. For soils with the same shape, the angles of repose increase with the increase of the maximum particle size. When the maximum particle size equals  $20 \sim 40$  mm, the average repose angles increase slowly, while the increasing rate increases with the maximum particle size of  $40 \sim 60$  mm. The repose angles decrease with the increase of the mean particle size and increase with the increase of the non-uniform coefficient.

**Key words:** coarse-grained soils; angle of repose; measuring apparatus; particle shape; gradation