

砂雨法制备三轴砂样的影响因素及均匀性研究

程朋^{1,2}, 王勇², 李雄威³, 孔令伟², 王艳丽⁴

(1.安徽理工大学 土木建筑学院,安徽 淮南 232001; 2.中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室,武汉 430071; 3.常州工学院 土木建筑工程学院,江苏 常州 213002; 4.长江科学院 水利部岩土力学与工程重点实验室,武汉 430010)

摘要: 为了得到较为真实的室内重塑砂土样,利用自制的落砂装置,开展一系列福建标准砂的砂雨法制样试验,研究落距、漏斗管径和细颗粒含量等因素对室内土工三轴试验砂样制备的影响。结果表明:砂样相对密度随落距的增加而增加,而增速随落距的增加逐渐变缓并趋于稳定;相同落距下,漏斗管径越大,砂样的相对密度越小;漏斗管径的减小,可以得到较宽范围的砂样密度;随着砂土中细颗粒含量的增加,制备的砂样相对密度减小。利用牛顿第二定律和能量守恒定律能够较好地阐释落距、漏斗管径和细颗粒含量等因素对砂土制样的影响规律。采用 225kV-3D 微分辨率 ICT 对砂雨法制备的砂样进行细观扫描,并借助 ImageJ 软件,重构砂样三维模型,计算出沿砂样高度方向的每层孔隙占比,验证了砂雨法制备砂样的空间均匀性,并给出砂雨法制备室内三轴试样的合理化建议。

关键词: 砂雨法; 砂样制备; 砂土; CT 扫描; 均匀性

中图分类号: TU41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-5485(2016)10-0079-05

1 研究背景

由于砂土易受扰动,室内土工试验中很难获得原状砂样。因此,采用何种方法重塑砂样就显得尤为重要。砂雨法是土工试验中无黏性砂土试样制备的重要方法,然而,土工试验方法标准^[1]和水电水利工程土工试验规程^[2]中均未规定砂雨法具体的制样方法。事实上,不同的制样过程和方式对砂土的力学特性有很大影响^[3-5]。砂样制备作为土工试验中重要且最基础的环节,需要进行细致而深入的研究。

国外对砂土制样的方法研究起步较早,Miura 等^[3]利用自制空中落砂装置,研究了落距和出砂口大小对日本丰浦砂相对密度的影响,结果表明,出砂口大小是影响砂土相对密度的主要变量,通过调节出砂口大小和落距可以获得较大范围的砂样密度;Vaid 等^[4-6]指出砂雨法中落距是影响砂土密度的主要因素,落距对水中砂雨法制备砂样的密度没有影响;Lagioia 等^[7]分别对砂雨法、水中砂雨法和真空

砂雨法进行了研究,结果表明,真空砂雨法是制备砂样的理想方式,通过真空负压和调节高度,可制备出更宽密度范围的砂样,并推荐该方法作为测定砂样最大干密度的标准方法。

国内针对室内三轴小尺寸砂样的砂雨法研究不多,吴建平^[8]较早系统地研究了砂雨法制样的影响因素,总结了漏斗形状、落距等对砂土相对密度的影响,给出了砂雨装置选择的参考指标,将落距高度 150 cm 作为落距上限,并建议选用管径和砂土最大粒径之比为 2.35~5.2 的漏斗比较适宜。近年来,随着国内离心模型试验的快速发展,一些学者针对模型试验中砂土砂雨法制样开展了相应的研究^[9-11],但对制备砂样的均匀性检验方法尚有待提高。

综上,国内外学者针对砂雨法重塑制备砂样的研究主要集中在落距和出砂口大小等方面,对其它影响因素的分析较少,且大都从宏观特性检验所制备砂样的均匀性和稳定性,从细观检验其颗粒空间分布均匀性的不多。因此,本文将研究落距、出砂口和细颗粒含量对砂样制备的影响,并利用微分辨率 ICT 对制备好的砂样进行 CT 扫描,借助 ImageJ 软

收稿日期: 2016-04-18; 修回日期: 2016-05-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51579237, 51309027); 江苏省自然科学基金项目(BK20131141); 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室基金项目(SKLGDUK1110)

作者简介: 程朋(1992-),男,江苏沛县人,硕士研究生,主要研究方向为海洋含气沉积物的声学特性,(电话) 18761723710(电子信箱) cheng95peng@163.com。

通讯作者: 王勇(1977-),男,河南周口人,副研究员,博士,主要从事特殊土力学与灾害防治研究,(电话) 13517246178(电子信箱) wang831yong@163.com。

件对图像进行三维重构并处理分析,检验砂雨法制样的空间均匀性。

2 试样材料与装置

2.1 试验材料

试验材料采用烘干状态下的福建标准砂,其基本物理参数见表 1。采用英国马尔文公司 MS2000G 激光粒度分析仪测试其粒度分布和累计体积百分数,图 1 为测试的该标准砂粒径级配。

表 1 福建标准砂基本参数

Table 1 Parameters of Fujian sand

平均粒径 d_{50}/mm	土粒比重 G_s	最小干密度 $\rho_{dmin}/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	最大干密度 $\rho_{dmax}/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$
0.773	2.66	1.505	1.854

2.2 试验装置

自行设计一套砂雨法制样装置,其结构如图 2(a) 所示。该装置可以进行偏心旋转以制备更加均匀的砂样。图 2(b) 是按照传统的制样方法,不移动漏斗制备宽粒组级配砂时出现的情况,小颗粒主要

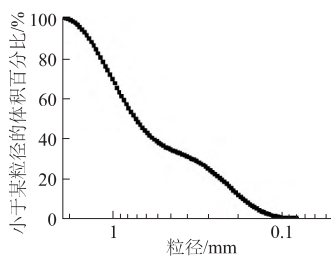
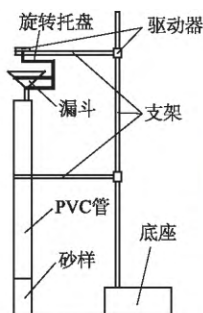


图 1 福建标准砂级配曲线
Fig.1 Gradation curve of Fujian sand

分布在中心位置,粗颗粒分布在四周,直观地反映出所制备砂样颗粒分布的不均匀性。而针对本文自制装置制备砂样的均匀性评测,将在本文中的第 4 节详述。此外,试验所用漏斗编号分别为 1, 2, 3 号,对应的管径分别为 5, 10, 15 mm。



(a) 砂雨制样装置结构示意图



(b) 漏斗不转动时的砂样

图 2 砂雨制样装置结构与漏斗不转动时的制备砂样
Fig.2 Structure of sample preparation device and sand specimens prepared by sand pourer with static funnel

3 砂雨法制样的影响因素分析

影响砂土制样的因素很多,根据自制的砂雨法制样装置的特性以及制样设计方案,主要研究落距、管径大小和细颗粒含量对砂土制样密实度的影响。

3.1 落距的影响

砂雨法制样要测定落距与相对密度的关系,通过控制管口与砂面表面之间的距离,测定该落距对应的砂样相对密度,具体操作如下:

准备好烘干的福建标准砂备用,选用内筒为 50 mm×100 mm 的模具,置于平台上;遥控旋转漏斗,进行砂雨试验。控制不同的落距,控制出砂口与砂面距离分别为 0, 30, 60, 90, 120 cm,每级落距下进行 5 次试验,每次试验后测定砂样的密度,取其均值并计算出该落距下的砂样相对密度。

砂样制备的可重复性是保证土工试验开展的重要前提,砂雨法制样成功的关键在于是否具备可重复性。图 3 是每个落距下相对密度与落距的关系曲线。由图 3 可看出,5 次重复制备所得样品的相对密度最大偏差值在平均值的 5% 以内波动,说明本文方法制备的砂样具备可重复性。

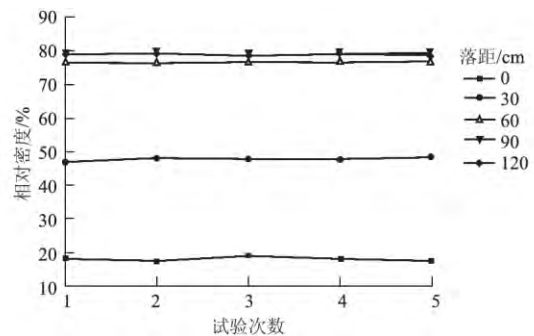


图 3 重复性试验下砂样的相对密度
Fig.3 Relative density of sand under repeated test of different drop heights

图 4 是使用 1 号漏斗,依次增加落距,得到的砂样密度曲线(其落距与相对密度关系见下文 3.2 节图 5 中的 1 号漏斗曲线)。可以看出,随着落距的增加,砂样密度逐渐增大,但增长速率逐渐减小,当落距达到 60 cm 以后,砂样相对密度趋于稳定。

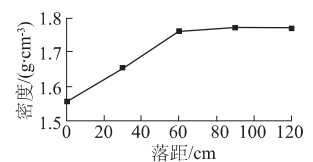


图 4 1 号漏斗落距与密度曲线
Fig.4 Curve of drop height vs. density

因此,吴建平^[8]给出的落距上限 150 cm 是合理的。Vaid^[4-5]假设砂颗粒下落后,砂土动能影响下部砂体的密度,在考虑砂颗粒下落时阻力和浮力的影响,单个粒子自由下落的动量关系可以描述为

$$ma = mg - V\rho g - C_d \rho A \frac{v^2}{2} \quad (1)$$

式中: m 为单个砂颗粒的质量; a 为颗粒下落过程中的加速度; g 为重力加速度; V 为砂颗粒的体积; ρ 为砂颗粒的密度; A 为砂颗粒的投影面积; C_d 为阻

力系数,取决于雷诺数; v 为砂颗粒的速度。

式(1)适用于单位时间内质量 m 的砂颗粒自由下落至砂颗粒表面这段时间,当接触到下部砂颗粒时,还需考虑砂颗粒弹跳的影响。式(1)仅考虑单个砂颗粒的运动,并认为砂颗粒的动能瞬间传递给下部砂颗粒,这与实际情况有所差距。根据牛顿第二定律和能量守恒定律,砂颗粒下落接触到表面砂颗粒时会发生弹跳(试验过程中回弹现象非常显著),当下落的砂颗粒接触到下部表面砂颗粒时,能量转化可以描述为:

$$E_1 = E_2 + E_3 + E_4 ; \quad (2)$$

$$E_3 = E_{41} + E_5 。 \quad (3)$$

式中: E_1 为砂土接触下部砂颗粒时具有的总能量; E_2 为传递给下部砂颗粒的能量,亦是影响密度的主要因素; E_3 为砂颗粒弹跳时具有的总能量; E_4 为颗粒间碰撞的能量损失; E_{41} 为砂颗粒弹跳过程中的能量损失; E_5 是砂颗粒弹跳动能转化为重力势能的能量。

当砂颗粒接触到表面砂颗粒时,动能 E_1 瞬时转化为几部分,包括传递给下部砂颗粒的能量 E_2 ,这部分能量使砂样的相对密度显著增加,但砂颗粒不会立即静止,而是会发生弹跳,部分能量转化为重力势能 E_5 ,其余能量 E_{41} 将转化为与上部落下的砂颗粒碰撞,造成能量损失。接下来,重力势能 E_5 会重复式(2)和式(3)的过程,直至被上部砂颗粒淹没后静止。当漏斗管径一定时,单位时间内出砂口的流量相同。随着落距的增加,砂颗粒重力势能增加,下落至表面时,将传给下部砂颗粒更多的能量 E_2 ,砂样的相对密度就越大;同时砂颗粒弹跳越高并且会增加多次弹跳的几率,损失的能量 E_4 与 E_{41} 等也就越多。砂土的相对密度提高的速度变缓,逐渐达到密实堆积状态,颗粒也趋于更稳定的排列方式。随着落距的增大,砂样相对密度首先呈线性增加,当落距增大到一定值后,砂样相对密度逐渐变缓,趋于稳定。因此,当落距增大到一定高度,砂样相对密度几乎不变。

3.2 漏斗管径的影响

漏斗管径大小决定了砂土下落时单位时间内的流量。使用 1—3 号漏斗,在不同落距下制样,落距和相对密度关系曲线见图 5 所示。从图 5 可看出,同一落距下,随着出砂口流量的增加,砂样的相对密度减小;漏斗管径越小,所制备砂样的相对密度区间越大,也即可以制备出较宽密度区间范围的砂样。

根据式(2)和式(3)可以解释这些现象:当漏斗管径增大,单位时间内下落的砂颗粒增加,假设不同漏斗管径砂雨试验中单个砂颗粒下落过程是基本一

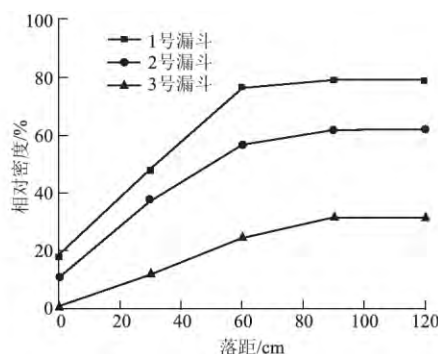


图 5 落距与相对密度曲线

Fig.5 Curves of drop height vs. relative density

致的,当砂颗粒下落接触表面砂颗粒时,管径较大漏斗同时下落的砂颗粒增多,因此在其发生弹跳的过程中有更大几率和上部砂颗粒碰撞,造成更多能量损失 E_4 ,弹跳的砂颗粒再次下落后,被淹没和碰撞的几率也是增大的。因此,能量损失 E_{41} 也增大,导致 E_2 的减小,从而导致了砂土相对密度的减小。

3.3 细颗粒含量的影响

采用烘干的福建标准砂,将粒径范围 1~2 mm 的作为粗粒径组,选用粒径 0.075~0.25 mm 作为细颗粒组,然后进行混合配比。其不同细颗粒含量砂土基本参数见表 2,密度曲线见图 6(a),采用 2 号漏斗进行砂雨法试验。

表 2 不同颗粒含量砂土基本参数

Table 2 Parameters of sand with different contents of fine particles

粗细颗粒质量比	细颗粒含量/%	最小干密度 $\rho_{dmin} / (g \cdot cm^{-3})$	最大干密度 $\rho_{dmax} / (g \cdot cm^{-3})$
粗颗粒	0	1.400	1.694
4 : 1	20	1.556	1.936
3 : 2	40	1.573	1.951
2 : 3	60	1.573	1.846
1 : 4	80	1.458	1.706

细颗粒含量对砂样相对密度的影响机理比较复杂,图 6(b) 是不同落距下细颗粒含量与相对密度关系曲线。从图 6(b) 中可看出,随着细颗粒含量的增加,砂样相对密度减小,减小趋势逐渐变缓。此外,随着细颗粒含量的增加,砂土的密度区间整体下移;

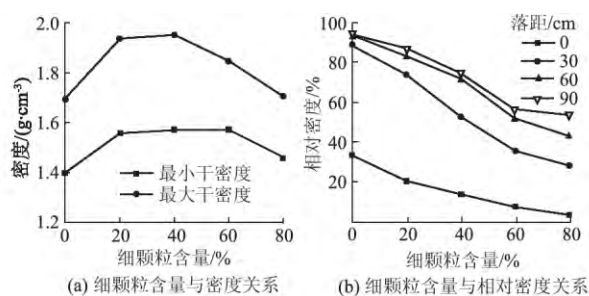


图 6 细颗粒含量与密度和相对密度的关系曲线

Fig.6 Curves of fine particles' contents vs. density and relative density

相同细颗粒含量时,随落距的增加,砂土相对密度增速变缓。在漏斗管径一定、落距相同的情况下,随着细颗粒含量的增加,单位时间内落下的砂颗粒的数量增多。根据式(1)可知,细颗粒增多会使砂样在下落的过程中遇到更多的阻力和浮力。因此,在接触砂颗粒表面时的 E_1 比同等质量大颗粒下落时的要小。由式(2)和式(3)可知,砂颗粒在弹跳的过程中,由于砂颗粒数目增多,会损失更多的能量 E_{41} ,从而影响了砂样的相对密度。

4 试样空间均匀性检验

近年来,国内学者逐渐重视工程领域内 CT 技术的应用,目前已经在岩石断裂损伤、砂土颗粒细观机理等领域^[12-18]开展了研究。

本文通过 225kV-3D 微分辨率 ICT 进行扫描,利用 X 射线显微层析成像。该设备扫描标准测试样品空间分辨率达到 $5 \mu\text{m}$,精度达到砂样要求。将制备的砂样安放在 CT 基座上,调整位置并按压使其固定在基座的中心上,然后进行 CT 扫描,将砂样旋转 360° ,采用步长 0.5° ,重建过程采用传统 FDK 算法,它是二维扇束 CT 的滤波反投影(FBP)算法的三维近似^[19]。在一个 2048×2048 的矩阵中重构 1536 个图像切片,耗时约 60 min。

ImageJ 是由 National Institutes of Health 开发的基于 Java 语言并可运用于多种平台的公共图像处理和软件^[20],目前国内主要应用于生物医学领域,工程领域应用较少。

本文利用 ImageJ 软件对 225kV-3D 微分辨率 ICT 扫描的砂样灰度图进行图像增强处理,然后通过噪声滤波器对图像降噪处理,完成二值化操作后,进行砂土三维立体图像重构,然后对图像进行切割。由于 ImageJ 软件只能同时运行 618 M 容量图片,不能对 CT 扫描的 1536 张切片进行重构。因此,本文仅对其中的 350 张切片进行三维重构。经过处理的砂样各剖面图见图 7。图 7 各剖面图可以直观地反映出砂颗粒的分布情况,横剖、竖剖和任意方向剖面图中砂颗粒分布情况基本一致。说明本砂雨装置制备三轴砂样具有可行性,在细观层面检验了砂样颗粒排列分布的空间均匀性,与图 3 砂颗粒分布的不均匀性形成鲜明对比。

任取 110 张 CT 扫描切片,通过 ImageJ 软件中的已有算法,计算每张切片的孔隙分布,从结果表中可以直接读出每层孔隙区域的面积、标准偏差、平均灰度值、偏斜度等。图 8 为每层切片的孔隙区域面积。

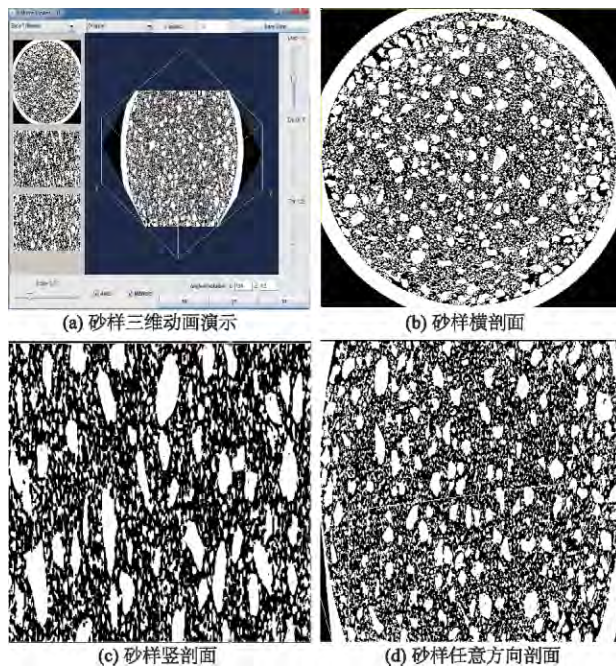


图 7 三维重构砂样各剖面图

Fig.7 Sections of sand specimens by 3D reconstruction

结果表明,每层孔隙面积占比基本相同。砂样上下均匀性良好,符合土工试验中砂样制备的要求,因此砂雨法制备的小尺寸砂样空间均匀性良好。

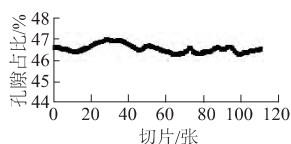


图 8 孔隙占比曲线
Fig.8 Curve of void fraction

5 结论

本文通过自制的落雨装置,研究了落距、漏斗管径和细颗粒含量对室内制备三轴砂样的影响,利用 CT 技术扫描砂雨法制备的砂样,并借助 ImageJ 检验了制备砂样的空间均匀性,得出以下结论:

(1) 随着砂雨法中的落距增大,制备砂样的密度增加,当落距增大到一定高度,颗粒趋于稳定的排列方式,砂样密度增速减缓,极限落距不宜超过 120 cm。

(2) 同一落距下,随着漏斗管径的增大,砂样的相对密度减小。在合理范围内,漏斗出口管径越小,可以得到较宽范围的密度区间和更大的相对密度。

(3) 随着细颗粒含量的增加,砂样相对密度减小,减小趋势逐渐变缓并且砂土的密度区间整体下移,相对密度范围基本相同,而且随落距的增加,砂土相对密度增速变缓。

(4) ImageJ 图像分析结果表明,本文砂雨法制备砂样的均匀性良好。利用 CT 扫描和图像处理技术能更加直观和有效地检验出制备砂样的均匀性。

除本文研究的主要影响因素外,影响砂雨法制

样的因素还有漏斗旋转速度、出砂口类型等因素,需要今后作进一步的研究。由于砂雨法所制备的砂样密度范围有限,对于细粒砂土将难以获得密实度较高的砂样,而含粉粒和黏粒较多的砂土则不宜采用该方法制样。

参考文献:

- [1] GB/T50123—1999,土工试验方法标准[S].北京:中国计划出版社,1999.
- [2] DL/T5355—2006,水电水利工程土工试验规程[S].北京:中国电力出版社,2006.
- [3] MIURA S, TOKI S. A Sample Preparation Method and Its Effect on Static and Cyclic Deformation-Strength Properties of Sand[J]. *Soils & Foundations*, 1982, 22: 61-77.
- [4] VAID Y P, NEGUSSEY D. Preparation of Reconstituted sand Specimens[C]//Proceedings of the Symposium on Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock. ASTM. Louisville, Kentucky, June 19-20, 1988.
- [5] VAID Y P, NEGUSSEY D. Relative Density of Pluviated Sand Samples[J]. *Soils & Foundations*, 1984, 24: 101-105.
- [6] CHANEY R C, DEMARS K R, VAID Y P, *et al.* Influence of Specimen-Reconstituting Method on the Undrained Response of Sand[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 1999, 22(3): 187-195.
- [7] LAGIOIA R, SANZENI A, COLLESELLI F. Air, Water and Vacuum Pluviation of Sand Specimens for the Triaxial Apparatus[J]. *Soil & Foundations*, 2006, 46(1): 61-67.
- [8] 吴建平, 顾尧章. 砂雨法成型中影响试样密度的因素[J]. *水电自动化与大坝监测*, 1990, (3): 33-39.
- [9] 马险峰, 孔令刚, 方 薇, 等. 砂雨法试样制备平行试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2014, (10): 1791-1801.
- [10] 丛 郁, 马险峰, 袁聚云, 等. 离心试验砂雨法试样制备研究[J]. *路基工程*, 2014, (5): 77-80.
- [11] 李 浩, 罗 强, 张 正, 等. 砂雨法制备砂土地基模型控制要素试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2014, (10): 1872-1878.
- [12] 董 良, 赵毅鑫. 基于 CT 图像的煤岩非均质性研究[C]//北京力学学会第 19 届学术年会论文集.北京:北京力学学会学术委员会, 2013: 312-313.
- [13] 程展林, 左永振, 丁红顺. CT 技术在岩土试验中的应用研究[J]. *长江科学院院报*, 2011, 28(3): 33-38.
- [14] 李 波, 龚壁卫, 刘 军, 等. 基于 CT 技术的砂雨法制样的空间均匀性研究[C]//第七届全国岩土工程物理模拟学术研讨会论文集.北京:中国水利学会岩土力学专业委员会物理模拟技术委员会, 2013: 155-157.
- [15] 左永振, 程展林, 丁红顺. 基于 CT 技术的砾石土浸润试验研究[J]. *长江科学院院报*, 2011, 28(2): 28-31.
- [16] 冯 杰, 郝振纯. CT 扫描确定土壤大孔隙分布[J]. *水科学进展*, 2002, 13(5): 611-617.
- [17] 郑剑锋, 赵淑萍, 马 巍, 等. CT 检测技术在土样初始损伤研究中的应用[J]. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2009, 45(2): 20-25.
- [18] 刘小红, 晏鄂川, 朱杰兵, 等. 三轴加卸载条件下岩石损伤破坏机理 CT 试验分析[J]. *长江科学院院报*, 2010, 27(12): 42-46.
- [19] 付国涛, 曹大泉, 赵 维, 等. 锥束微焦点 CT 系统对比度灵敏度测量研究[J]. *原子能科学技术*, 2012, 46(10): 1270-1273.
- [20] PEREZ J M M, PASCAU J. Image Processing with Image [J]. *Biophotonics International*, 2003, 11(5/6): 36-42.

(编辑: 姜小兰)

Factors and Homogeneity of Triaxial Sand Specimens Preparation with Air Pluviation

CHENG Peng^{1,2}, WANG Yong², LI Xiong-wei³, KONG Ling-wei², WANG Yan-li⁴

(1.School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2.State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 3.School of Civil Engineering & Architecture, Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213002, China; 4. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of the Ministry of Water Resources, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: The influences of drop height, funnel diameter and fine particles' contents on sand specimen preparation for indoor geotechnical triaxial test were studied through preparation test of Fujian standard sand with self-manufactured air pluviation device. Results showed that the relative density of sand specimens increased with the increasing

(下转第 92 页)

Sensitivity Analysis of Foundation Pit Rebound in Thick Alluvial Clay Based on Improved Nishihara Model

WANG Guo-fu^{1,2}, WANG Dan², LU Lin-hai², SUN Jie-cheng²

(1.College of Civil Engineering & Architecture , Shandong University of Science and Technology , Qingdao 266590 ,China; 2.Engineering and Technology Research Center , Jinan Rail Transit Group Co. Ltd. , Jinan 250101 , China)

Abstract: The upward displacement of pile and floor is a damage for the balance of support system during the excavation foundation of pit in thick alluvial clay Nishihara model improved with Newton fluid could well describe the behavior of creep deformation during pit excavation and also trace the behavior of interface between pile and soil. The regularities of upward displacement of floor in the presence of different ratios of inserted pile depth to excavation depth , side lengths and spacings of support pile as well as the rebound of column pile in the presence of different depths in soil positions and types of column pile were analyzed via field data improved Nishihara model and secondary development of FLAC^{3D}. The deep foundation pit of Culture Center of Jinan Province was taken as an engineering background. Results revealed that the sensitivity of the upward displacement of pit floor to different factors follows the order of: distance of adjacent support pile>ratio of inserted depth to excavation depth>length of support pile; and the sensitivity of the rebound of column pile follows the order of depth of column pile in soil>position of pile>shape of plie. The results could be a guidance for reducing the influence of excavation on the upward displacement of pile and floor.

Key words: improved Nishihara model; thick aluvial; rebound of foundation pit; column pile rebound; sensitivity analysis

~~~~~  
( 上接第 66 页)

and landscape. Floating debris is an environmental problem in engineering ,but current approaches could not meet the requirements of large-scale treatment. To improve the passive and inefficient way of treating floating debris , we present an integrated hydraulic approach of treating floating debris by blocking ,guiding ,and removing debris under the joint action of hydraulics of river and floating row itself. Yangtze River Scientific Research Institute carried out tests using the floating bridge-style row equipped with guiding water power in front of the Three Gorges Dam in flood season of 2014. The floating debris were blocked and guided to a certain location and were removed concentratedly. During the test the facility was proved safe and reliable after going through extreme conditions inclusive of ship collision , waves , water level fluctuation , and counter-terrorism exercises on the water , providing a protective barrier in front of the dam on water surface.

**Key words:** floating debris; integrated hydraulic approach; floating barrier; safety of hydropower station; in front of Three Gorges Dam

~~~~~  
(上接第 83 页)

of drop height , and the growth rate slowed down and tended to be stable. The relative density of sand specimens decreased along with the increase of funnel diameter under the same drop height. A wider range of relative density can be achieved with the decrease of funnel diameter. The relative density of sand specimens decreased with the increasing of fine particles' contents. The influences of drop height ,funnel diameter and fine particles' contents on the relative density of sand specimens can be well explained by Newton's second law and conservation of energy. The gray image scanned with the 225 kV micro-computerized tomography of sand specimens prepared by air pluviation was analyzed by ImageJ software. The spatial homogeneity of sand specimens can be verified by reconstructing the three-dimensional model of sand specimens and calculating the proportion of sand pore area along the height of sand specimen. Furthermore , reasonable suggestions on preparing triaxial sand specimens were proposed.

Key words: air pluviation; sand preparation; sand; CT scanning; homogeneity