

DOI: 10.11779/CJGE201410005

## 砂雨法试样制备平行试验研究

马险峰<sup>1, 2</sup>, 孔令刚<sup>3</sup>, 方 薇<sup>4</sup>, 龚壁卫<sup>5</sup>, 李 浩<sup>6</sup>, 徐光明<sup>7</sup>, 赵 维<sup>8</sup>, 张雪东<sup>9</sup>, 陈云敏<sup>3</sup>

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 3. 软弱土与环境土工教育部重点实验室(浙江大学), 浙江 杭州 310058; 4. 长沙理工大学交通运输工程学院道路工程系, 湖南 长沙 410004; 5. 长江科学院水利部岩土力学与工程重点实验室, 湖北 武汉 430010; 6. 西南交通大学高速铁路线路工程教育部重点实验室, 四川 成都 6110031; 7. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程国家重点实验室, 江苏 南京 210029; 8. 大连理工大学土木水利学院岩土工程研究所, 辽宁 大连 116024; 9. 中国水利水电科学研究院岩土工程研究所, 北京 100048)

**摘 要:** 在中国各类基础设施大规模、高速度建设的历史背景下, 岩土工程学科也面临空前的机遇和挑战, 以岩土离心机为代表的大型试验装备也得到迅速发展, 为理论研究、实践指导提供了十分重要的研究手段。为推动我国离心模拟技术标准化及在实际工程中的应用, 扩大离心模拟技术在工程界的影响力, 开展了全国岩土工程离心模拟的平行试验, 试验内容包括砂土模型地层的制备、桩基础承载力以及边坡稳定共 3 大类试验。介绍的是采用砂雨法制备砂土地层的相关试验成果, 共有 8 家单位参与了此项研究工作。试验材料采用福建标准砂, 出砂头采用圆筒网眼式或者线型鸭嘴式, 落砂装置各单位自备。试验结果分析得到落距-相对密实度标定曲线, 并设定土体目标相对密实度(55%和 75%), 验证曲线的可靠性; 同时考察制备模型地基的相对密实度在空间上的均质性, 并对出砂头的类型及孔径大小、流量、出砂头水平移动速度对相对密实度的影响做了初步探讨。

**关键词:** 模型试验; 砂雨法; 标准砂相对密实度; 平行试验

**中图分类号:** TU41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2014)10-1791-11

**作者简介:** 马险峰(1972-), 男, 副教授, 主要从事岩土离心模型试验, 地下结构抗震, 数值分析等方面的研究和教学。E-mail: xfma@tongjt.edu.cn。

## Parallel tests on preparation of samples with sand pourer

MA Xian-feng<sup>1, 2</sup>, KONG Ling-gang<sup>3</sup>, FANG Wei<sup>4</sup>, GONG Bi-wei<sup>5</sup>, LI Hao<sup>6</sup>, XU Guang-ming<sup>7</sup>, ZHAO Wei<sup>8</sup>, ZHANG Xue-dong<sup>9</sup>, CHEN Yun-min<sup>3</sup>

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. MOE Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 4. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410004, China; 5. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of Ministry of Water Resources, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China; 6. MOE Key Laboratory of High-Speed Railway Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 7. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 8. Institute of Geotechnical Engineering, School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 9. Department of Geotechnical Engineering, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

**Abstract:** Unprecedented opportunities and challenges have been confronted in geotechnical engineering practices in the context of all infrastructure in large-scale and high-speed construction of infrastructures in China. Large test equipments represented by geotechnical centrifuge has been developed rapidly, providing important tools for theoretical researches and practical problem-solving. To promote the standardization of centrifuge modeling techniques and its application in the practice, at the same time, to expand influence of centrifuge modeling techniques in the engineering, the parallel tests on geotechnical centrifuge modeling are carried out in China, including the preparation of sand stratum model, bearing capacity of pile foundation as well as slope stability. The relevant experimental results among 8 institutions, for preparation of samples with sand pourer are introduced. Fujian standard sand is chosen as the experimental material, the type of sand rainner outlet, includes cylindrical mesh type and linear duckbill type, and the shakeout device is prepared by each participant institution. Based on the

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41272290)

收稿日期: 2013-12-27

test results, the drop height-relative density calibration curve is summarized, and reliability of the curve is verified by setting the target density of sand to be 55% and 75% respectively. The homogeneity of relative density in the model foundation is also investigated. Preliminary studies are conducted on the influences of the type of sand rainner outlet, pore size, flow rate, and the horizontal movement speed of the sand rainner outlet on the relative density.

**Key words:** model test; sand pourer; standard sand; relative density; parallel test

## 0 引言

近 30 年来, 中国现代化进程及城市化进程持续发展, 各类基础设施建设速度快、规模大。高速公路和铁路、港口大坝、地铁、跨江海工程、能源基础设施等建设的数量为世界罕见。许多工程往往尺度大、结构复杂、环境特殊, 其设计和施工给岩土工程学科带来了重大的挑战和机遇。在上述的建设背景下, 岩土工程学科近年也有了长足发展, 尤其是以物理模型试验设备为代表的试验研究手段发展较快, 其中岩土离心机以其诸多优势更得到长足发展。从图 1 可以看出从 20 世纪 80 年代开始中国离心机数量的增长, 至 90 年代已经有 9 台离心机设备开发完成, 其中大部分在水利工程研究院。在此期间离心模型试验主要用于研究关于大坝建设或者其他水利工程结构。此后的 10 年里, 土工离心机的发展速度减慢, 2000 年以来, 国内土工离心机的数量再次快速增加, 目前中国各地已有超过 21 台土工离心机设备。

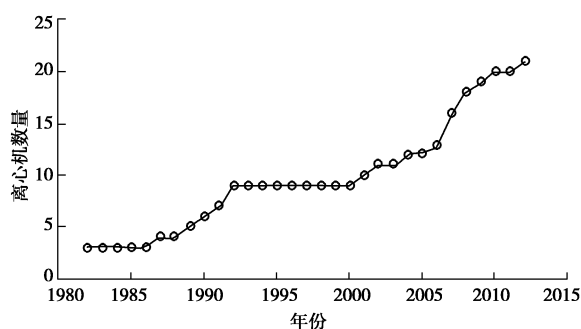


图 1 中国岩土离心机数量的增长

Fig. 1 Development of geotechnical centrifuges in China

土工模型试验中, 试样制备是试验过程中基础而重要的环节。砂土试样制备主要通过相对密实度进行控制, 常见砂土试样制备方法有振动法、击实法、插捣法和砂雨法等<sup>[1]</sup>。探究装样方法的目的在于在试验过程中实现指定相对密实度的模型砂样, 并保证其均匀性和可重复性。

土工离心模型实验能够提供与原型地基应力场高度相似的模拟环境, 成为科学研究中的重要物理模拟手段。同时也对其模型的试样制备质量提出了更高的要求。1989—1994 年美国的 VELACS 项目动用了 9 台带有振动台的土工离心机, 并且进行了平行试验。

模拟地震的振动模型试验内容包括: 水平自由地基; 倾斜地基; 组合地基 (一半是密砂, 另一半是松砂); 成层水平地基 (刚性箱和柔性箱各一种); 护岸的重力式挡土墙; 堤坝; 心墙坝; 砂基础上的刚性建筑物。欧洲 5 个主要的离心实验室联合开展不同尺寸微型 CPT 联合测试工作, 考虑尺寸效应和边界效应进行分析。国际土协 TC2 技术委员会组织了砂土制备平行试验, 收到了 27 个离心实验中心的研究成果, 采用统一的 Toyoura 干砂, 试验主要包括获得落距—标定曲线, 从多方面考察制备技术稳定性, 测定砂土密度分布规律从而测试土样的均匀性。

国际上开展大规模平行试验数量仍有限, 国内尚未开展过大规模平行试验研究, 此次开展国内离心机平行试验, 内容包括砂土模型地层的制备、桩基础承载力以及边坡稳定共 3 大类试验, 目的在于促进我国土工离心试验室的学术和技术交流, 推动我国离心模拟技术标准化, 促进离心模拟技术在实际工程中的应用, 扩大离心模拟技术在工程界的影响力。本文重点介绍其中的砂雨法制备试样结果。

吴建平等<sup>[1]</sup>针对动三轴、共振柱一类试验, 在砂雨法成型的试验研究中, 总结了漏斗的形状和砂土的平均落距对试样密度以及密度大小分布范围的影响规律, 提出了漏斗管径与砂土最大粒径比值在 2.35~5.2 的范围以内比较理想。周云东等<sup>[2]</sup>通过饱和砂土的真三轴试验研究, 提出不同装样方法将产生不同程度的各向异性, 而分层振捣砂雨法可以产生较小的初始各向异性。但上述研究中采用的试验方法通常应用于动静三轴、共振柱等单元试样试验, 并不能直接应用于离心模型试验。濮家骝等<sup>[3]</sup>在研究浅基础承载力的离心机模型试验中, 采用砂雨法制备试样, 在作往复运动的漏斗中装砂、通过漏斗底部一狭长槽孔落砂于试验模型箱内, 结果表明试样的容重取决于槽孔宽度和槽孔与试样表面的距离。徐光明等<sup>[4]</sup>采用单孔漏斗分层将砂样均匀分层洒入离心模型箱中, 探讨粒径效应和边界效应的作用规律和影响范围。杨俊杰等<sup>[5]</sup>采用空中落砂法制备模型地基, 试验之前在内壁涂上润滑剂并贴薄膜以减少摩擦, 为了避免因吊装土槽对砂土地基的扰动, 将土槽固定在离心机吊篮平台上之后制作模型地基。柳飞等<sup>[6-11]</sup>采分层夯实法制备了砂土模

型地基, 并对埋深效应进行了分析。曾虹静等<sup>[7]</sup>自主研制了一套装样设备, 并进行多组砂雨法装样的对比试验, 定量给出了砂样流速、落距及装样容器对试样相对密实度的影响。胡宏<sup>[8]</sup>在砂土地基中条形锚板承载力及破坏机理研究中, 采用砂雨法制备砂试样, 通过控制喷嘴的落距、喷嘴管径大小来控制试样的密度。剑桥大学的 Madabhushi 等<sup>[9]</sup>及 Zhao 等<sup>[10]</sup>在制备离心机模型试样时, 通过自主研发的自动砂雨装置将该地区典型细石英砂在 1g 条件下进行装样, 指出了装置中漏斗孔径与砂流速度的对应关系, 通过漏斗让砂自然洒落的方法所得砂样更接近天然砂土层, 均匀性也更好。

综合以上文献, 影响砂雨法所制备砂土地基模型的相对密实度因素有落距、出砂口类型及尺寸, 出砂口流量及其水平移动速度等, 但各因素对相对密实度的影响程度或方式尚不明确, 因此开展了砂土制备平行试验方案, 共有 8 家单位参与, 参加单位设备概况如表 1 所示。

表 1 各参加单位设备概况

Table 1 Equipment overview of participating units					
编号	有效容量/(g·t)	旋转半径/m	最大加速度/g	吊篮尺寸/cm	主要设备
1	450	4.5	150	1.5×1.2×1.5	静力加荷试验装置; 微型 CPT; 激光位移传感器
2	450	5.0	300	1.5×1.0×1.5	四轴机器人
3	450	0.7	600	直径 1.4 m 鼓式	三维作动器; CPT; 激光位移传感器
4	400	5.0	200	1.2×1.2×1.1	四轴机器人
5	200	3.7	200	1.2×1.0×1.5	静态数据采集系统 40 通道; 照相拍摄系统
6	150	3.0	200	1.2×1.0×2.1	激光式位移传感器
7	150		150	1.168×0.92×1.5	定点摄影系统; 闭路监视器系统
8	100	2.7	200	1.0×0.8×1.0	脉冲调宽式模数转换; 摄影测量系统

1 试验设计

1.1 试验材料

试验材料为福建标准砂, 图 2 给出该砂的颗分曲线, 表 2 为关键物理指标。

表 2 砂的物理指标

Table 2 Physical indices of sand			
平均粒径/mm	土粒比重	最大孔隙比	最小孔隙比
0.16	2.633	0.952	0.607

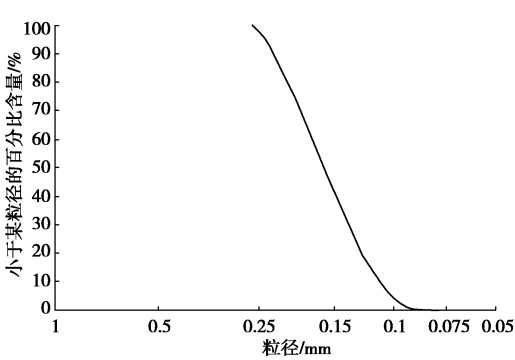


图 2 颗分曲线

Fig. 2 Gradation curve

1.2 试验设备

除编号 3 采用自主开发的基于伺服电机驱动系统的自动撒砂设备外, 其余 7 个编号的撒样装置是类似的, 可以概括为上部的装砂器, 中间的软管及出砂头, 如图 3 所示。

出砂头主要分为鸭嘴式和网眼式, 此外还有线式出砂口, 见图 4, 表 3。

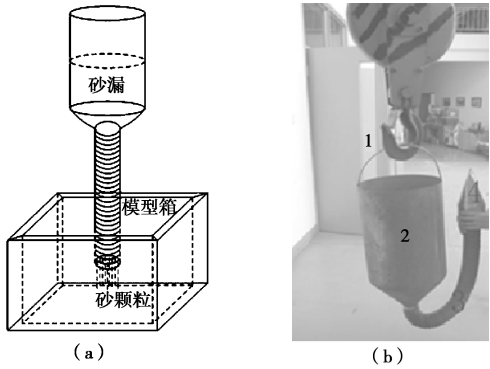
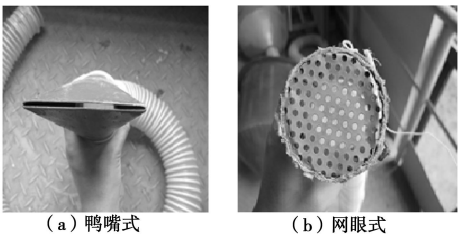
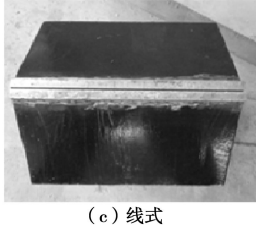


图 3 砂雨制样装置

Fig. 3 Sample preparation devices



(a) 鸭嘴式 (b) 网眼式



(c) 线式

图 4 出砂头类型

Fig. 4 Types of sand rainner outlet

表 3 各单位雨砂头类型和尺寸

Table 3 Type and size of sand rainner outlet

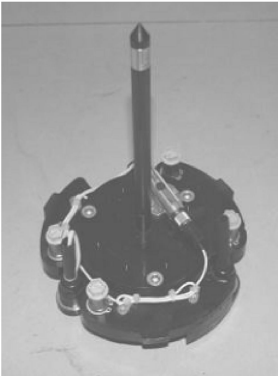
编号	出砂头类型和尺寸
1	网眼式 (孔径 3 mm); 鸭嘴式 (宽 2 mm)
2	鸭嘴式 (宽 2 mm)
3	筛网 (孔径 1 mm)
5	鸭嘴式 (宽 2 mm)
6	网眼式 (孔径 3 mm); 鸭嘴式 (宽 2 mm)
7	网眼式 (孔径 1.2 mm 和 1.8 mm)
8	网眼式 (孔径 2 mm 和 4 mm); 鸭嘴式 (宽 1.9 mm 和 3.23 mm); 线式 (2.15 mm)

编号 4 试验中所采用的微型 CPT 探头如图 5 所示, 设备参数如表 4 所示。

表 4 CPT 设备参数

Table 4 Device parameters of CPT

编号	探杆直径/mm	长/mm
1	12	500
2	12	500



(a) 编号1



(b) 编号2

图 5 CPT 实物图

Fig. 5 Photos of CPT

2 试验方案

本次试验主要包括出砂口落距-相对密实度标定试验 (T1), 目标相对密实度 (55%和 75%) 验证试验 (T2), 空间上均匀性检验 (T3 和 T4) 4 部分。T1 和 T2 都有 8 家单位参与, T3 有 5 家单位参与, T4 有 3 家单位参与。

2.1 落距-相对密实度标定曲线 (T1)

砂雨法制样要先测定落距-相对密实度关系曲线, 即保持管口与砂土表面距离恒定, 测定不同落距所对应的砂土相对密实度, 具体操作过程如下:

(1) 准备一标定容器, 经准确测定获得该容器容积, 并称量该容器质量。

(2) 在试验过程中, 始终保持砂雨装置出砂口距模型箱内土体表面等距离; 不同单位采用的落距控制方法是不同的, 如编号 1 是通过调整小锤的位置, 使其始终接近砂面; 而编号 2, 编号 6 采用分层法。

(3) 称重充满砂容器质量, 计算砂的质量; 根据容器体积计算砂土模型密度以及相对密实度  $D_r$ , 从而

得到某一落距  $h$  时砂的相对密实度  $D_r$ :

$$D_r = \frac{(\rho_d - \rho_{dmin})\rho_{dmax}}{(\rho_{dmax} - \rho_{dmin})\rho_d} \quad (1)$$

(4) 重复 (2) 和 (3) 过程, 得到一系列落距  $h$  时的相对密实度值, 求此时的相对密实度。

(5) 一般重复 3 组, 然后进行落距-相对密实度的标定工作, 最终获得落距-相对密实度关系曲线。

在进行标定试验时, 同时研究除落距外, 其他各影响因素对相对密实度的影响, 采用控制变量法, 如孔径大小、出砂头移动速度等。

2.2 目标相对密实度验证 (T2)

各单位根据 T1 所得的落距-密度标定曲线可以得到目标密度 (55%和 75%) 所对应的落距, 按照 T1 的操作步骤, 在模型箱中制备砂土试样, 计算出实际相对密实度, 并与目标相对密实度进行比较, 从而验证 T1 标定曲线的正确性。

2.3 空间均匀性检验 (T3)

验证其在空间上的均匀性, 包括平面和深度两方面, 设定目标相对密实度, 从标定曲线中获得其所需的落距, 模型箱分层, 在每层都对称布置如图 6 所示的小标定盒, 其体积通过简单试验测得; 以编号 1 为例, 其标定盒平面布置如图 7。

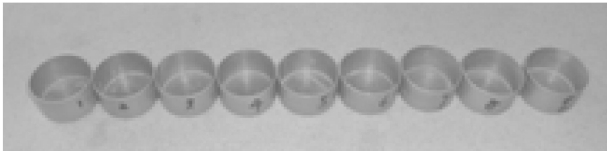


图 6 标定盒

Fig. 6 Calibration boxes

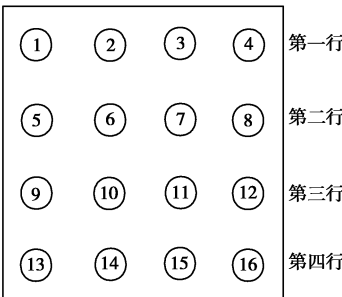


图 7 标定盒平面布置图

Fig. 7 Plan layout of calibration boxes

2.4 空间均匀性检验 (T4)

运用机载微型 CPT 测试 1g 或高 g 条件下模型地基空间分布上的均匀性, CPT 设备具有高精度、高重复性、小尺寸等特点; 将金属探头以一定的速度连续压入土中, 测定探头所受的阻力, 通过以往的试验资料 and 理论分析得出的比贯入阻力与土的某些物理性质的相关关系, 定量地确定土的某些指标; 各单位在不同 g 值下, 根据测得探头所受阻力与深度关系对砂土

制模的均匀性进行了检测。

3 试验结果概述

试验过程中, 除编号 3 外, 手动控制出砂口移动, 移动路径以弓字型为主, 此外还有直线形, 如图 8 所示。

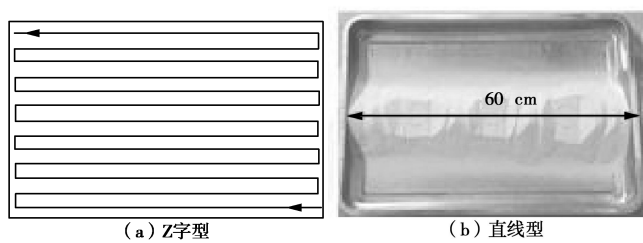


图 8 出砂头的移动路径  
Fig. 8 Moving track of sand rainner outlet

3.1 落距-相对密实度关系

通过对图 9 的分析, 可以得出: 对于某一特定的出砂头, 砂土相对密实度随落距的增大而增大, 但增长速率逐渐减小。即在相对密实度较低的范围, 落距的变化对相对密实度影响较明显; 在相对密实度较高的范围, 落距变化影响不明显。但是很难判断出哪种类型的出砂头更好, 由于其他因素各单位控制的都不相同, 而且同一出砂头不同孔径得到的标定曲线也是存在差距的。

影响相对密实度除落距外, 还有其他影响因素, 如编号 7 研究了出砂头水平速度对其的影响, 编号 8 研究了孔径大小对其的影响等, 还有流量等其他一些影响因素, 将在后面第 4 节进行深入研究。

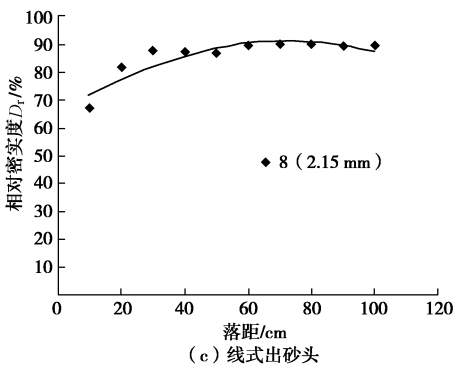
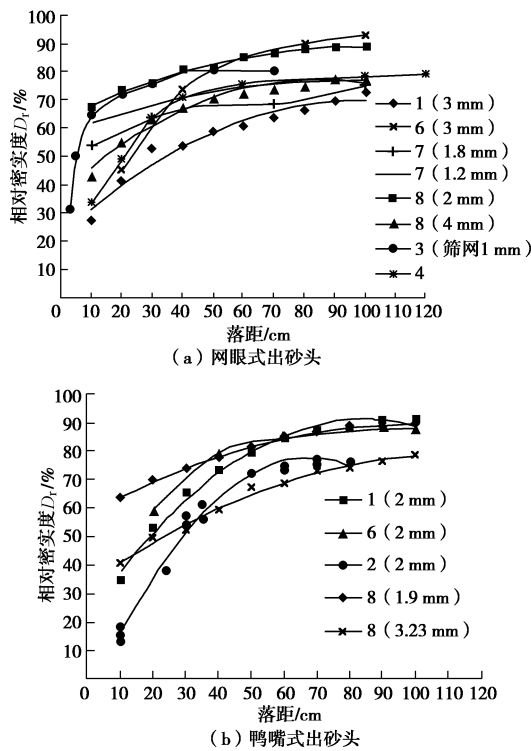


图 9 落距-相对密实度关系曲线  
Fig. 9 Curves of drop height vs. relative density

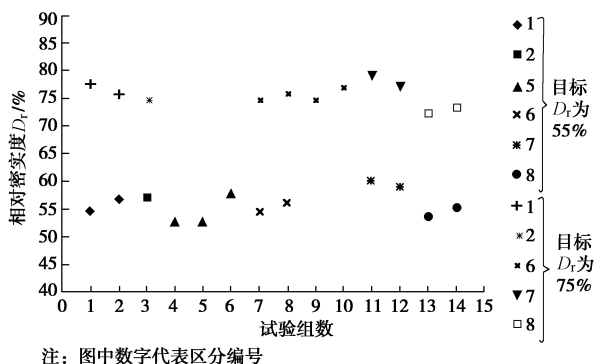
3.2 目标相对密实度验证 (T2)

根据 T1 试验中各个单位的落距与密实度的标定曲线, 可以分别得到相对密实度为 55%, 75%模型土制备的所需的落距, 进而验证标定曲线的正确性, 表 5 列出了各单位目标相对密实度所对应的落距, 实际相对密实度及其误差, 图 11 进行了汇总, 可以看出, 砂雨法所得砂土相对密实度与目标相对密实度较为接近。

表 5 误差分析 Table 5 Error analysis						
编号	目标相对密实度 55%			目标相对密实度 75%		
	所需落距 /cm	实际 $D_r$ /%	误差 /%	所需落距 /cm	实际 $D_r$ /%	误差 /%
1	鸭嘴式 19	54.53 56.70	-0.47 1.70	35	77.70 75.70	2.70 0.70
2	鸭嘴式 30	56.94	1.94	鸭嘴式 65	74.60	-0.40
4	25			57		
5	67	53.00	-2.00	鸭嘴式 43.5	74.86	-0.14
		53.00	-2.00		76.00	1.00
		58.00	3.00	网眼式 34	74.92	-0.08
6	鸭嘴式 25	54.32 56.24	-0.68 1.24	100(孔径 1.8 mm, 水平移动速度 8 cm/s)	77.08	2.08
7	网眼式 10 (孔径 1.2 mm, 水平移动速度 4 cm/s)	60.00	5.00	网眼式 100(孔径 1.2 mm, 水平移动速度 4cm/s)	79.00	4.00
		59.00	4.00		77.00	2.00
8	网眼式 (4 mm) 13.6	53.42	-1.58	网眼式 (4 mm) 38	72.26	-2.74
	鸭嘴式 (3.23 mm) 18.1	55.25	0.25	鸭嘴式 (3.23 mm) 44.9	73.40	-1.60

从图 10 可以看出, 各单位所得的实际相对密实

度与目标相对密度偏差不大,可以验证各标定曲线的正确性。



注: 图中数字代表区分编号

图 10 实际相对密度统计表

Fig. 10 Statistics of actual relative density

### 3.3 均匀性检测(T3)

为了验证相对密度分布的均质性,包括平面和深度两个方面,小标定盒的体积通过简单的试验测得;编号 1 研究了同层模型土相对密度分布的均匀性,其试验条件为出砂头水平移动速度为 135 mm/s,流量为 30 g/s,如图 11 所示。

模型箱边缘的砂土相对密度较大,中间区域相对密度较小,每行相对密度偏差不超过该行平均密度的 13%。这可能是由于在模型箱边缘处落距较大引起的。从不同位置相对密度的离散性来看,中间位置离散性较小,而靠近边缘的离散性较大。

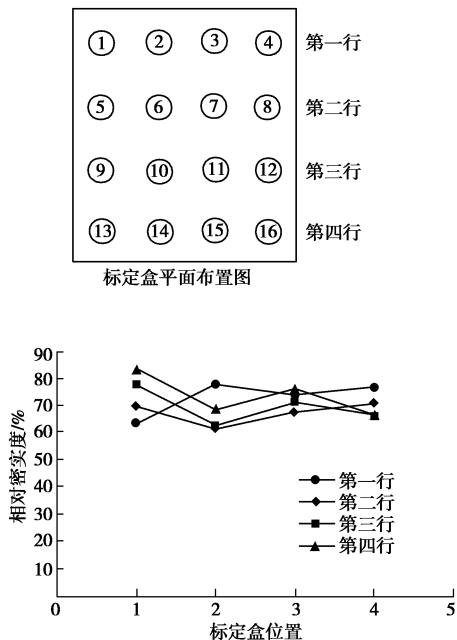


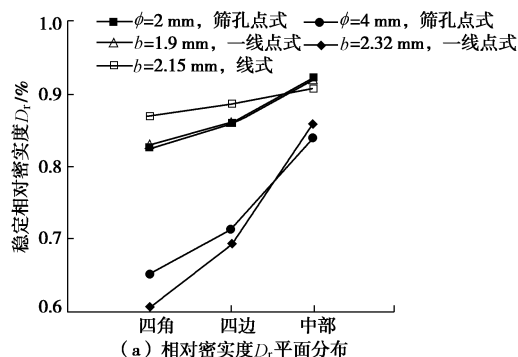
图 11 相对密度的空间分布 (编号 1)

Fig. 11 Spatial distribution of relative density (No. 1)

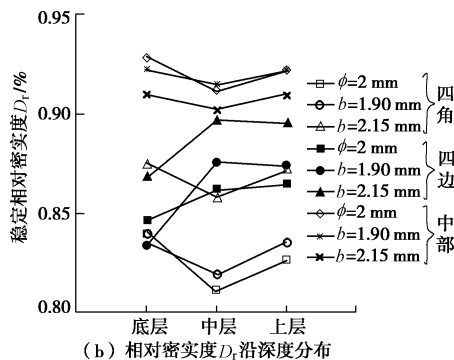
编号 8 研究了详细的  $D_r$  空间分布,包括平面分布和深度分布两方面,如图 12 所示。

相对密度  $D_r$  均匀性的平面分布表现为模型箱

四角处相对密度最小,四边处次之,中部最大,主要是由于模型箱边界存在边壁效应。在深度分布上表现为模型箱中部相对密度的均匀性明显优于四角及四边处。



(a) 相对密度  $D_r$  平面分布

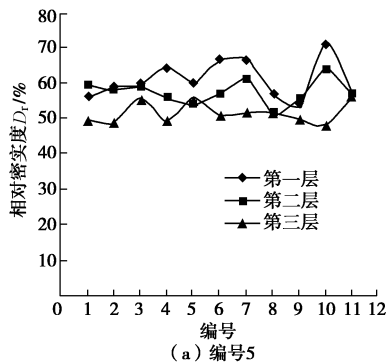


(b) 相对密度  $D_r$  沿深度分布

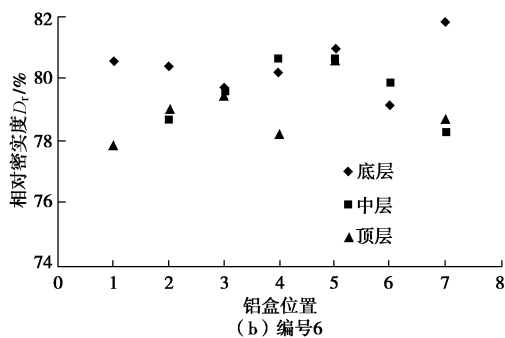
图 12 相对密度的空间分布 (编号 8)

Fig. 12 Spatial distribution of relative density (No. 8)

从图 12 (b) 和图 13 中可以看出,试样顶层的相对密度一般都比最终的相对密度要低。



(a) 编号 5



(b) 编号 6

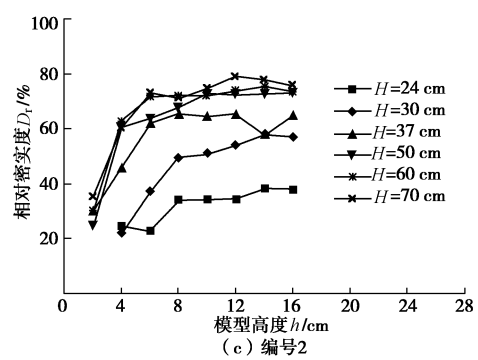


图 13 相对密度的空间分布

Fig. 13 Spatial distribution of relative density

3.4 均匀性检测 (T4)

图 14 是编号 1 在 1g 和 40g 采用微型 CPT 测试模型地基空间均质性, 验证的目标相对密度为 75%。

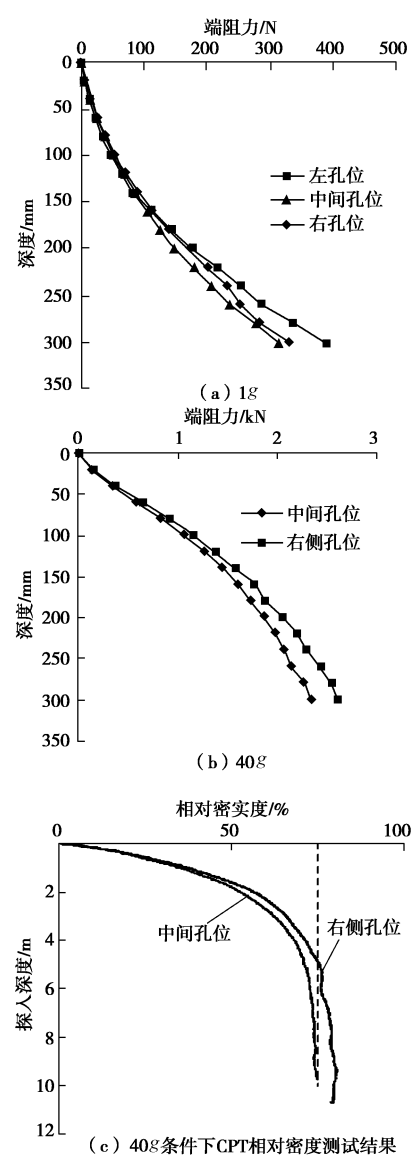


图 14 CPT 测试结果

Fig. 14 CPT test results

从图 14 (a)、(b) 可以看出, 模型箱中间区域砂

土相对密度较低, 且中间区域地基土相对密度更接近目标相对密度。图 14 (c) 表明一定深度范围内, 地基土相对密度与目标相对密度较接近。

编号 2 针对制备的砂土模型, 分别进行 30g, 50g 和 75g 离心加速度下的静力触探试验, 换算到原型的试验结果如图 17 所示, 试验布置点如图 15 所示; 试验点与试验 g 值对应如表 6 所示, 验证的目标相对密度为 55%, 65%, 75%。

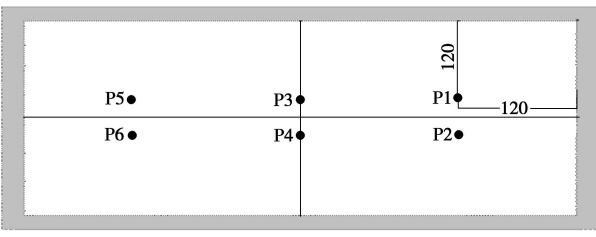


图 15 CPT 试验点布置

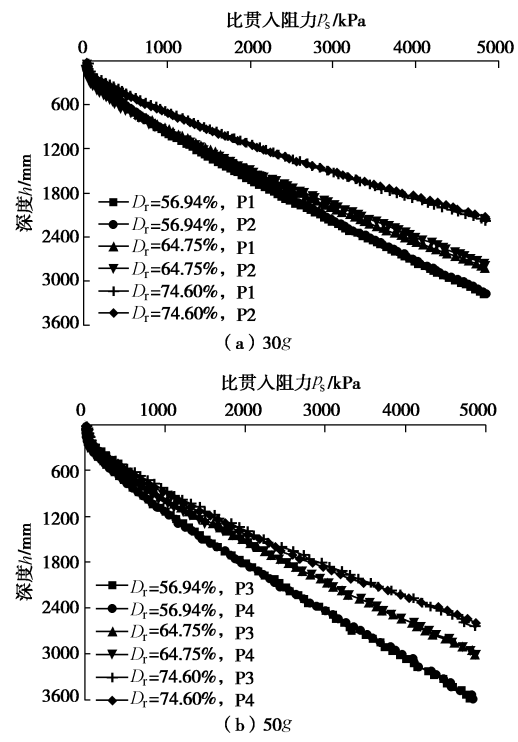
Fig. 15 Arrangement of CPT test points

表 6 试验点与试验 g 值对应表

Table 6 Mapping table of test points and test g-values			
试验 g 值	30	50	75
试验点	P1,P2	P3,P4	P5,P6

从图 16 可以看出, 在雨砂法制备的不同相对密度的模型中进行微型 CPT 试验, 对于相同的相对密度, 在同一 g 值下不同两点的比贯入阻力随深度变化曲线基本重合, 说明试样均匀性良好。

从图 17 可以看出, 在相同离心加速度条件下, 相对密度高的模型中, 相同深度处的比贯入阻力较大, 说明模型越密实, 贯入所需能量越大。



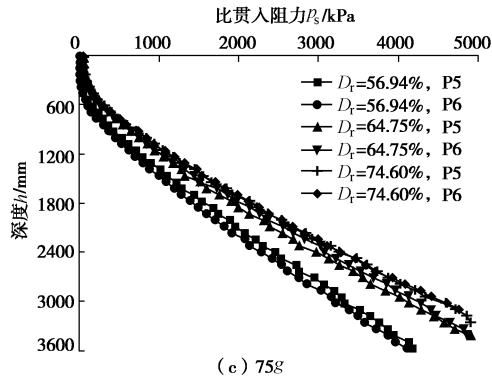


图 16 不同  $g$  值下比贯入阻力-深度关系曲线

Fig. 16 Specific penetration resistance-depth curves under different  $g$ -values

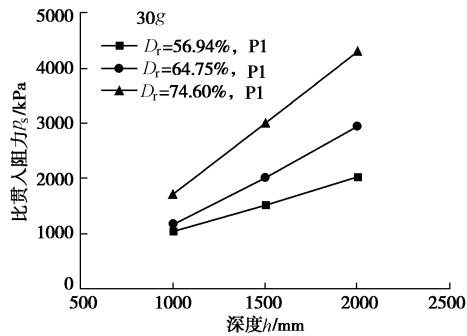


图 17 不同相对密度模型在典型高度处的比贯入阻力  
Fig. 17 Specific penetration resistances of model with different relative densities at typical height

编号 3 的试验点布置如图 18 所示,测试结果如图 21 所示,验证的目标相对密度为 55%。

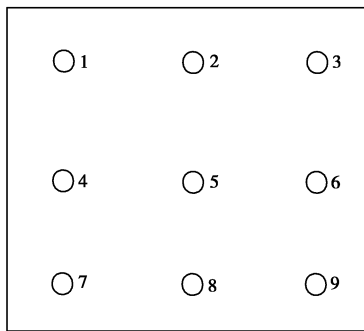


图 18 贯入位置布置  
Fig. 18 Layout of penetration positions

从图 19 可以看出,在贯入起始 0~30 mm 范围内,由于侧向土压力较小,导致测得的锥尖阻力也很小。此范围内锥尖阻力的波动也较大。因此本试验忽略 30 mm 之前的贯入阻力,取贯入深度 30 mm 处的贯入阻力为锥尖阻力的相对零点。

通过贯入深度和锥尖阻力关系曲线,可以看到各组试验的重合度较好,且在深度大于 45 mm 时,贯入深度与锥尖阻力近似呈线性关系。

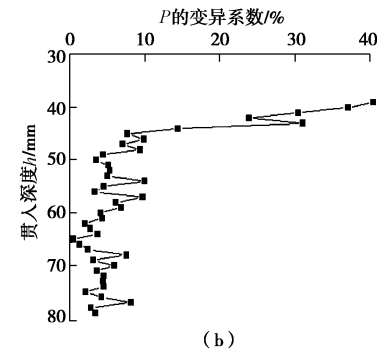
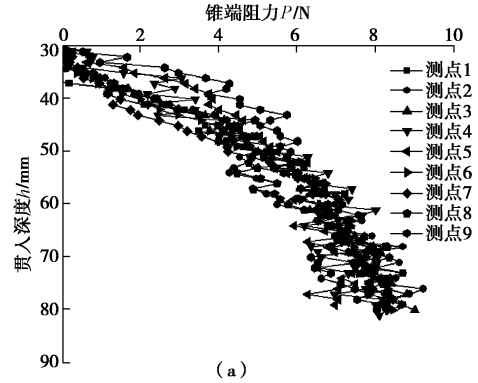


图 19 CPT 测试结果  
Fig. 19 CPT test results

在起始 45 mm 范围内,由于锥尖阻力较小,变异系数波动较大,但在深度大于 45 mm 范围内,变异系数波动小,其平均值为 4.86%。说明试样的均匀性较好。

综上所述,3 个单位的 CPT 试验结果均验证了砂雨法成型的模型均匀性较好。

## 4 相对密度各影响因素分析

从砂雨法制样技术的基本原理中不难发现,落距是相对密度的主要影响因素之一,有些情况下,流量对相对密度的影响也很大,此外,出砂头类型及孔径大小,模型高度,出砂头移动速度,有无筛网及筛网的层数都对相对密度有一定的影响,掌握其变化规律对砂雨法制样技术的精确性、可靠性是很有利的。

### 4.1 出砂口尺寸与相对密度的关系

结合图 9 和表 3 可以看出,在其余因素恒定不变时,对于同一类型出砂口,孔径越大,其相对密度越小;选取其中一部分曲线,如图 20 所示,编号 8 研究网眼式出砂头和鸭嘴式出砂头不同孔径大小对相对密度的影响,可以明显得到上述结论。

### 4.2 出砂头移动速度对于相对密度的影响

在其他因素保持不变的情况下,出砂头的移动速率越大,其制备的砂土相对密度就越大;在速度较



小的范围内, 其改变对相对密实度的影响较为显著, 随着速度的增大, 影响趋于平缓; 如图 21 所示 (图 21 所示的为编号 3, 5, 7 的研究成果)。

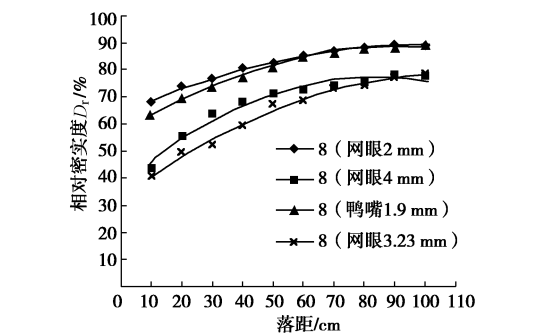


图 20 出砂口尺寸对相对密实度的影响

Fig. 20 Effect of sand rainner outlet size on relative density

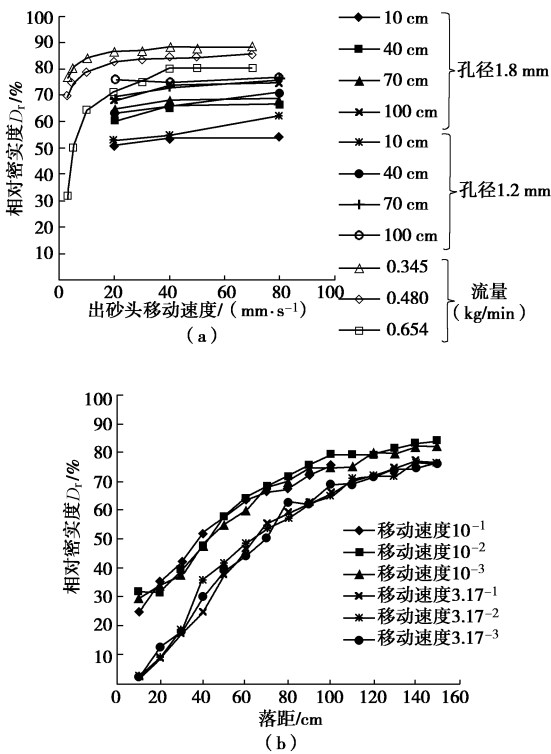


图 21 出砂头移动速度与相对密实度关系曲线

Fig. 21 Movement speed of sand rainner outlet relative density curves

4.3 流量对于相对密实度的影响

如图 22 所示, 当砂样流量较小时, 落距的变化对试样相对密实度的影响不太明显; 随着流量的增大, 落距的变化对相对密实度的影响也逐渐增大; 在相同的落距下, 流量越大, 砂样的相对密实度越小。并且落距越小, 此差别越明显 (图 22 为编号 3 的研究成果)。

编号 8 研究了出砂量与稳定相对密实度的关系, 其试验结果表明, 70~100 cm 对应的  $D_r$  均值为稳定相对密实度, 该范围内  $D_r$  均值如表 7 和图 23 所示,

出砂口流量与稳定相对密实度并无明显的规律性关系, 对砂土稳定相对密实度的影响并不明显。

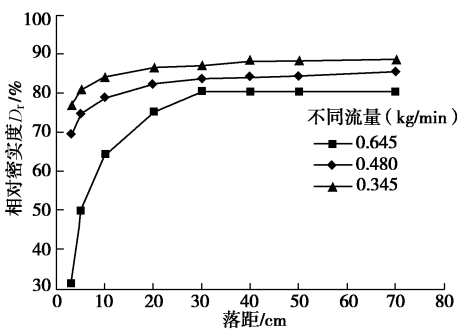


图 22 流量对相对密实度的影响

Fig. 22 Influence of flow rate on relative density

表 7 70~100 cm 落距范围  $D_r$  均值

Table 7 Average values of $D_r$ between drop height 70~100 cm		
参数	孔径/mm	$D_r$ /%
网眼式	2	92.2
	4	84.1
鸭嘴式	1.9	92.0
	2.15	86.0
线式	2.15	90.8

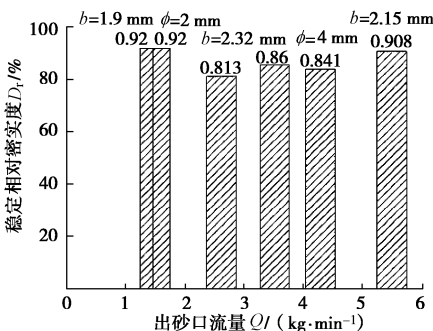


图 23 流量与稳定相对密实度的关系图

Fig. 23 Relationship between flow rate and final relative density

4.4 有无筛网及筛网的层数对于相对密实度的影响

筛网的主要作用为分散下落的砂, 使制得的砂样均匀。筛网的孔径、层数不仅对均匀性有影响, 对砂样相对密实度也有很大的影响。

在相同流量下, 有无筛网对相对密实度有很大的影响; 而筛网层数对相对密实度的影响不明显。相同落距下, 无筛网时的相对密实度将远远小于有筛网的情况; 筛网影响扩散程度, 层数越多, 扩散程度越大。由此可以推断出扩散程度越大, 制得的砂样相对密实度越大, 如图 24 所示 (图 24 为编号 3 的研究成果)。

4.5 出砂头移动路径对相对密实度的影响

如图 25 所示, 出砂口移动速度相同的条件下, 直线型和 Z 字型相同得到的砂土地基相对密实度基本一致 (图 25 为编号 5 的研究成果)。

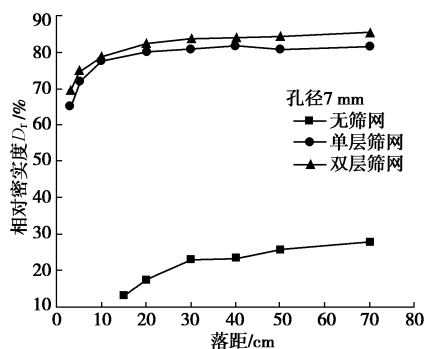


图 24 筛网影响下的落距-相对密度曲线

Fig. 24 Drop height-relative density curves under influence of sieve types

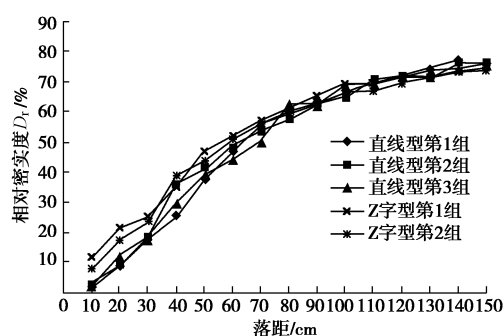


图 25 相对密度与出砂头移动路径关系图

Fig. 25 Relationship between relative density and moving path of sand rainner outlet

## 5 结 论

从砂雨法制样技术的基本原理中不难发现, 落距是相对密度的主要影响因素之一, 此外, 出砂口的形状, 孔径大小, 模型高度, 出砂头移动速度, 流量, 有无筛网等都对相对密度的大小有一定的影响。

(1) 对于某一特定的出砂头, 砂土相对密度随出砂口与砂面的高度的增大而增大, 但增长速率逐渐减小, 即在相对密度较低的部分, 高度的变化对相对密度影响大; 在相对密度较高的部分, 高度变化影响不明显。

(2) 在其余因素恒定不变时, 对于同一类型出砂口的孔径越大, 其相对密度越小; 出砂口移动速度相同条件下, 直线型和弓字型相同得到的砂土地基相对密度基本一致。

(3) 在其他因素保持不变的情况下, 出砂头的移动速率越大, 其制备的砂土相对密度就越大; 在速度较小的范围内, 其改变对相对密度的影响较为显著, 随着速度的增大, 影响趋于平缓。

(4) 当砂样流量较小时, 落距的变化对试样相对密度的影响不太明显; 随着流量的增大, 落距的变

化对相对密度的影响也逐渐增大。在相同的落距下, 流量越大, 砂样的相对密度越小。并且落距越小, 此差别越明显。出砂口流量对砂土稳定相对密度的影响并不明显。

(5) 在相同流量下, 有无筛网对相对密度有很大的影响; 而筛网层数对相对密度的影响不明显。相同落距下, 无筛网时的相对密度将远远小于有筛网的情况。筛网影响扩散程度, 层数越多, 扩散程度越大, 由此可以推断出扩散程度越大, 制得的砂样相对密度越大。

(6) 针对目标相对密度 55% 和 75%, 从标定曲线中获得所需的落距, 从而验证其正确性, 通过分析表明, 砂雨法所得砂土相对密度与目标相对密度较为接近。通过对其均匀性的检验, 可得砂雨法成型的均匀性较好。但是平面分布的均匀性还需进一步研究。

(7) 除上述影响因素外, 还有一些细节因素值得探讨, 比如砂土的不垂直落入问题 (自由落体加水平移动)、筛网的扩散程度对均匀性的影响、模型箱的边界效应等, 这些因素都有可能影响模型制样的均匀性及相对密度。

**致 谢:** 论文第 3 至第 8 作者及所在单位排名不分先后。限于论文篇幅, 下列参与同志未能署名论文作者, 在此一并表示感谢 (排名不分先后): 丛郁、顾行文、蒋良淮、李波、李志飞、李志阳、罗强、彭仁、任国峰、孙庆雷、王忠涛、午鹏奇、姚宏波、曾昭茂、张正、张良、周志刚、左永振。

## 参考文献:

- [1] 吴建平, 顾尧章, 余祖国. 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, 1995(3): 33 - 39. (WU Jian-ping, GU Yao-zhang, YU Zu-guo, et al. Factors affecting specimen density in pluviation[J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 1995(3): 33 - 39. (in Chinese))
- [2] 周云东, 张坤勇, 戴兆婷. 真三轴试验中初始各向异性的消除[J]. 低温建筑技术, 2005(6): 105 - 106. (ZHOU Yun-dong, ZHANG Kun-yong, DAI Zhao-ting, et al. Elimination of the initial anisotropy in true triaxial test[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2005(6): 105 - 106. (in Chinese))
- [3] 濮家骝, 高汉棣. 浅基础承载力离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 1988, 10(6): 1 - 18. (PU Jia-liu, GAO Han-yan. A study of bearing capacity by centrifugal footing tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1988, 10(6): 1 - 18. (in Chinese))
- [4] 徐光明, 章为民. 离心模型中的粒径效应和边界效应研究[J].

- 岩土工程学报, 1996, **18**(3): 80 - 86. (XU Guang-ming, ZHANG Wei-min. Study of particle size and boundary effects in centrifuge model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, **18**(3): 80 - 86. (in Chinese))
- [5] 杨俊杰, 柳 飞, 丰泽康男, 等. 砂土地基承载力离心模型试验中的粒径效应研究[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(4): 477 - 483. (YANG Jun-jie, LIU Fei, TOYOSAWA Y, et al. Particle size effects on bearing capacity of sandy ground in centrifugal tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(4): 477 - 483. (in Chinese))
- [6] 柳 飞, 郑西来, 杨俊杰, 等. 基础埋深对承载力离心模型试验中粒径效应的影响[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(10): 1621 - 1627. (LIU Fei, ZHENG Xi-lai, YANG Jun-jie, et al. Influence of foundation depth on particle size effects in centrifuge tests on bearing capacity[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(10): 1621 - 1627. (in Chinese))
- [7] 曾虹静, 王忠涛, 罗 强, 等. 自制砂土装样设备及其控制要素分析[J]. 人民长江, 2012, **43**(11): 66 - 70. (ZENG Hong-jing, WANG Zhong-tao, LUO Qiang, et al. Introduction to a new sand pourer and its control element analysis[J]. Yangtze River, 2012, **43**(11): 66 - 70. (in Chinese))
- [8] 胡 宏. 砂土地基中条形锚板承载力及破坏机理研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013. (HU Hong. Investigation of pullout capacity and failure mechanism of strip anchor in sand[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013. (in Chinese))
- [9] MADABHUSHI S P G, HOUGHTON N E, HAIGH S K. A new automatic sand pourer for model preparation at University of Cambridge[C]// International Conference on Physical Modeling in Geotechnics, ICPMG 2006. Hong Kong: The Hong Kong University of Science and Technology, 2006.
- [10] ZHAO Y, ELSHAFIE M Z E B, DEEKS A D, et al. Calibration and use of a new automatic sand pourer[C]// International Conference on Physical Modeling in Geotechnics, ICPMG 2006. Hong Kong: The Hong Kong University of Science and Technology, 2006.
- [11] 柳 飞. 模型试验中地基材料粒径与基础尺寸效应研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013. (LIU Fei. Study on the particle size effect and scale effect in model test[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010. (in Chinese))

## 第四届全国环境岩土工程与土工合成材料学术研讨会（二号通知） 2014年11月7日~9日，重庆大学

**主办单位:** 中国岩石力学与工程学会环境岩土工程分会; 中国土木工程学会土力学及岩土工程分会; 中国土工合成材料工程协会; 国家自然科学基金委员会工程与材料学部。

**承办单位:** 重庆大学; 解放军后勤工程学院; 重庆交通大学; 河海大学; 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室; 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室。

**协办单位:** 重庆市地质矿产勘查开发局; 重庆科技学院; 重庆工程职业技术学院。国家内河航道整治工程技术研究中心; 招商局重庆交通科研设计院; 重庆市高新岩土勘察设计院; 西南交通大学; 西安建筑科技大学; 重庆岩石力学与工程学会; 《岩石力学与工程学报》编辑部; 《地下空间与工程学报》编辑部。

**主要学术议题:** 城市建设引起的岩土工程问题; 自然灾害区域环境岩土工程问题; 城市垃圾及污染废弃物的处理技术; 污染土壤及修复技术; 环境岩土工程相关试验与监测技术; 地下工程施工中的环境问题; 土工合成材料在环境土工中的应

用; 土工加筋与加固技术及其应用; 低碳环境与岩土工程。

**学术报告及论文出版安排:** 学术特邀报告和主题报告由大会学术委员会提名并邀请, 每人报告30分钟。分组学术报告及讨论: 每人15分钟。本次会议的论文录用工作已经结束, 分别在岩石力学与工程学报正刊、增刊, 地下空间与工程学报正刊、增刊出版, 请录用论文的作者与相应编辑部做好出版准备工作。

**大会日程安排:** 11月7日: 报到, 环境岩土工程学会换届大会; 11月8, 9日: 开幕式、特邀报告、专题报告、闭幕式。

**注册费用:** 正式代表: 1000元/人; 学生及陪同代表: 600元/人。

**会议住宿:** 本届会议协议酒店有丽苑大酒店和重庆大酒店两家。

**大会秘书处:** 联系地址: 重庆市沙坪坝北街83号重庆大学土木工程学院; 邮政编码: 400045; 钟祖良13594058380; 卢谅18602319075; 梁宁慧 13452128802, 023-65120728; 大会邮箱: hjyt2014@126.com。

(重庆大学 供稿)