

砂土边坡稳定性土工离心模型试验

罗 强^{1,2}, 朱江江^{1,2}, 张瑞国^{1,2}, 蒋良滩^{1,2}, 张 正^{1,2}

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 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 610031)

摘要: 基于土工离心模型试验技术, 研究砂土边坡稳定性随边坡坡度和含水率变化的规律, 分析离心荷载作用下砂土边坡的变形特性及破坏模式, 讨论较高含水率砂土存在的水分迁移现象对边坡稳定性的影响机制; 同时, 作为 2013 年全国岩土工程离心模型平行试验的内容之一, 结合其他实验室的测试数据, 对砂土边坡离心模型试验的误差概率特征进行了分析。研究表明: 砂土边坡的变形表现出显著的脆性破坏特征, 破坏模式为近似直线状破裂面的浅层溜滑。在水分迁移微弱条件下, 各实验室平行试验的模型边坡破坏离心加速度与边坡坡度的关系具有高度的一致性; 较高含水率的砂土在试验过程中存在水分迁移现象引起砂土强度显著改变, 是影响砂土边坡稳定性的本质原因; 砂土边坡破坏离心加速度的统计值具有正态分布特征, 试验误差以随机为主, 但也存在明显的系统误差。研究成果加深了对土工离心模型试验技术的认识。

关键词: 边坡工程; 离心模型试验; 砂土边坡; 稳定性; 水分迁移; 平行试验

中图分类号: P 642

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2018)05 - 1252 - 08

Geotechnical centrifugal model test on sandy soil slope stability

LUO Qiang^{1,2}, ZHU Jiangjiang^{1,2}, ZHANG Ruiguo^{1,2}, JIANG Liangwei^{1,2}, ZHANG Zheng^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China; 2. MOE Key Laboratory of High-speed Railway Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: The effects of slope gradient and soil moisture content on the stability of sandy soil slopes were investigated with the geotechnical centrifugal model test, the deformation characteristics and failure modes of sandy soil slopes under centrifugal load were analyzed and the mechanism of water migration influencing the slope stability was discussed. Meanwhile, the test results together and the data from other laboratories in the parallel tests of geotechnical centrifugal modeling that were performed in 2013 were analyzed on the characteristics of error probability of centrifugal model test on sandy soil slopes. It is shown that the deformation of the sandy soil slope presents obvious brittle failure characteristics, and the failure mode features the shallow slippery with a straight linear failure plane. There is a close relationship between the centrifugal acceleration at failure and the slope gradient under the condition of weak water migration. The water migration that exists in sand with high moisture content leads to the remarkable variation of the sand strength, which is the essential factor affecting the stability of the sandy soil slope. The statistical data of centrifugal acceleration at failure present the feature of normal distribution. Notable systematic error is observed in the test process, though the test error is mainly the random one.

收稿日期: 2017 - 09 - 07; **修回日期:** 2017 - 12 - 26

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2013CB036204); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2682013ZT12)

Supported by the National Key Basic Research and Development Program of China(973 Program)(Grant No. 2013CB036204) and Fundamental Research Funds for the Central Universities(Grant No. 2682013ZT12)

作者简介: 罗 强(1963 -), 男, 1984 年毕业于长沙铁道学院土木工程系, 现任教授、博士生导师, 主要从事土力学与路基工程方面的教学与研究。E-mail: LQrock@swjtu.cn

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.1132

Key words: slope engineering; centrifugal model test; sandy soil slopes; stability; water migration; parallel test

1 引 言

离心模型试验的基本原理最早由法国工程师 E. Phillips 在 1869 年提出, 经过长期发展已推导出了离心模型与原型之间的相似性, 如几何、力学、运动相似原则和相似比尺等^[1-2]。离心模型试验最重要的相似关系是其具有与原型相同的应力状态, 因而得到了较快的发展。从目前已公开发表的土工离心模型试验研究成果上看, 其应用领域已经从早期的堤坝工程、地基处理、挡土墙等, 发展到了基础工程、地下空间、加筋土结构、港口与海洋工程等岩土工程的各个领域, 取得了大量有开创性的研究成果, 同时也对土力学的一些理论原理的验证产生了积极的作用。

土工离心模型试验技术在边坡稳定性分析中, 可以直观地反映边坡的失稳形式, 再现边坡的变形破坏全过程等优点, 得到了广泛应用。P. J. Avgherinos 等^[3-4]较早将离心模型试验技术用于边坡稳定性分析, 讨论了水位骤降引发的边坡失稳机制; 汪小刚等^[5-6]利用离心模型试验技术先后研究了水电站边坡、降雨条件下膨胀土边坡的稳定性, 取得了较好应用效果; 唐茂颖^[7]在路堑土质高边坡的离心模型试验中创新性地开展了边坡开挖过程的下滑推力和水平变形测试; 张 敏和吴宏伟^[8]研发了一种在离心模型试验中的模拟降雨系统, 用于研究边坡土体的降雨入渗过程; 姚裕春等^[9-20]开展了边坡在降雨条件下的离心模型试验; 张 嘎等^[11]研究了离心加载过程中的边坡土体的应力场和位移场变化过程及特征; 李邵军等^[12]开展了三峡库区水位升降外部环境因素影响下边坡变形演化和破坏形态、失稳模式的离心模型试验模拟; 李天斌等^[13]针对攀枝花机场高填方边坡整体滑动的工程问题, 开展了高填方边坡失稳机制及破坏模式的离心模型试验研究。这些试验研究工作不仅直观地反映了相应岩土边坡的稳定状态, 同时结合数值分析结果, 解决了工程建设中的技术难题, 有力地促进了土工离心模拟技术在岩土工程领域的应用, 也为岩土工程技术的进步提供了丰富和有价值的试验资料。

本文通过砂土边坡的离心模型试验, 研究边坡坡度和砂土含水率变化对边坡稳定性的影响, 掌握砂土边坡的变形随离心加速度的变化规律, 观察砂土边坡的失稳破坏模式; 同时, 通过测试离心加载

前、后砂土边坡的含水率变化情况, 分析试验过程中存在的砂土水分迁移现象对边坡稳定性的影响, 探讨砂土边坡离心模型试验的含水率控制原则, 以及降低离心模型试验误差的技术路径。最后, 作为 2013 年全国岩土工程离心模型平行试验内容之一的砂土边坡稳定性试验的一组试验, 还将结合其他实验室的测试数据, 采用综合分析方法, 讨论土工离心试验技术的误差概率特征。研究成果可为国内土工离心模型试验技术的规范化和标准化提供参考。

2 试验设计及方案

2.1 模型材料

边坡模型所用材料为福建标准砂, 依据标准^[14]测得最大干密度 $\rho_{dmax} = 1.633 \text{ g/cm}^3$ 、最小干密度 $\rho_{dmin} = 1.337 \text{ g/cm}^3$ 、颗粒相对密度 $G_s = 2.64$, 采用 2, 1, 0.5, 0.25 及 0.075 mm 标准土工筛获得的级配曲线如图 1 所示, 可知为均匀级配细砂。

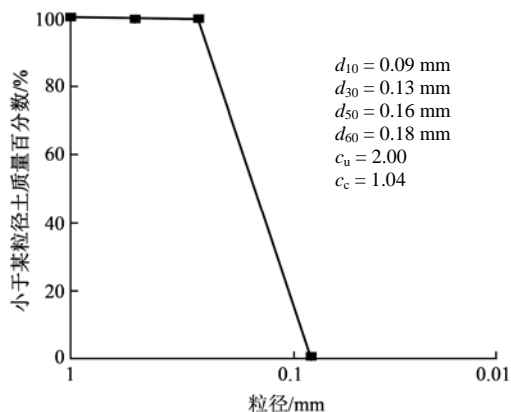


图 1 标准砂级配曲线

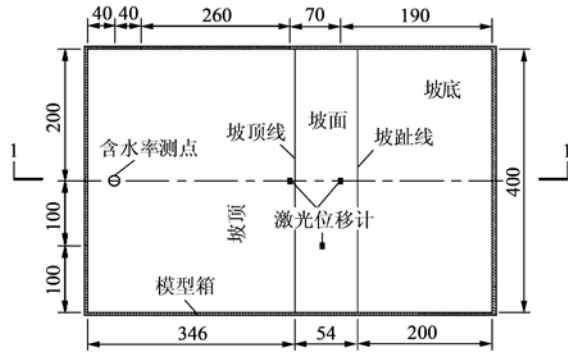
Fig.1 Grading curve of standard sand

2.2 试验设备

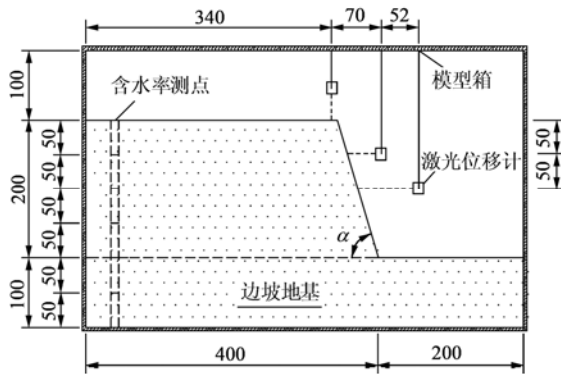
离心模型试验所用设备为西南交通大学的 TLJ-2 型土工离心机, 最大容量 $100 \text{ g} \cdot \text{t}$ 、最大加速度 200 g 、有效旋转半径约 2.7 m , 模型箱尺寸(小号)为长 0.6 m 、宽 0.4 m 、高 0.4 m 。

测试系统以位移观测为主, 使用了 3 支一维激光位移计, 精度 $0.1\% \text{ FS}$, 量程分别为 50 mm (1 支) 和 5 mm (2 支)。其中, 量程 50 mm 的用于观测距离坡顶 100 mm 处坡面的水平位移, 为主监测点; 量程 5 mm 的一支用于观测距离坡顶 50 mm 处坡面的水平位移, 另一支用于观测坡顶面的下沉。具体布

置如图 2 所示。



(a) 平面图



(b) I-I 剖面图

图 2 砂土边坡模型设计(单位: mm)

Fig.2 Sandy soil slope model(unit: mm)

2.3 试验方案

试验主要考虑边坡坡度 α 和含水率 w 两因素变化对边坡稳定性的影响, 试验方案如表 1 所示, 砂土边坡模型设计如图 2 所示。

表 1 离心模型试验方案

Table 1 Test conditions of centrifugal model

试验编号	干密度 $\rho_d / (g \cdot cm^{-3})$	坡高 h/mm	坡度 $\alpha / (^\circ)$	含水率 $w/\%$
S1			75	5
S2	1.53	200	65	5
S3			65	8

离心加速度按增量 5 g 梯级施加, 每级稳定 2 min, 加载历程曲线如图 3 所示。当坡顶沉降或坡面水平位移出现突变时表示边坡失稳, 停止试验, 记录此时的离心加速度、模型位移等数据。为了准确掌握模型边坡的含水率变化, 在离心加载前、后还进行了边坡不同深度处的砂土含水率测试。

2.4 模型制作

边坡模型填筑前, 需对干燥的标准砂, 根据目标含水率加水拌合均匀, 密封闷料 24 h。模型按设

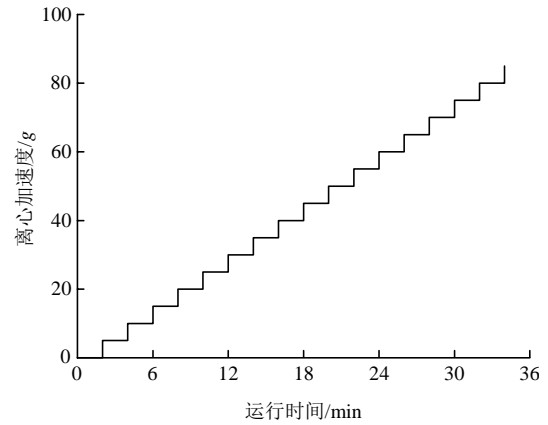


图 3 离心加速度 - 时间曲线

Fig.3 Time curve of centrifugal acceleration

计的干密度 $\rho_d = 1.53 g/cm^3$ 分 8 层填筑, 每层 50 mm 厚。填筑完成后再按照预先确定的边坡坡度进行削坡, 达到如表 1 和图 2 所示的技术要求, 图 4 为模型 S1 制作完成后的俯视图(左)和侧视图(右)。

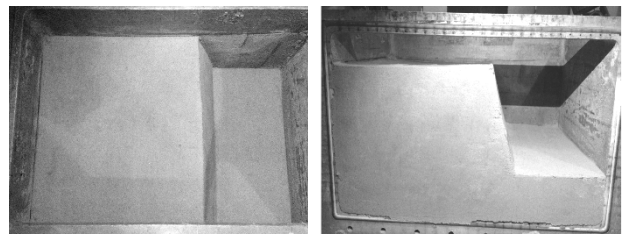


图 4 模型制作完成后的俯视图(左)和侧视图(右)

Fig.4 Top view and side view of model

3 试验数据及分析

3.1 砂土边坡变形特征及破坏模式

通过安装的激光位移计, 以 1 Hz 的频率记录边坡位移(距坡顶 50 mm 处用以测量水平位移的激光位移计在试验过程中出现了故障), 用于反映随离心加速度的增大, 边坡坡顶沉降和坡面水平位移的变化过程, 如图 5 所示, 加速度为边坡模型质心位置处的离心加速度。

由图 5(a)可知, 模型 S1, S2, S3 在距离坡顶 100 mm 的坡面处水平位移均呈现出初期小、后期突发显著增大的特点。可认为变形突变时刻边坡发生了结构性破坏, 对应的离心加速度即为破坏加速度, 分别为 23 g, 45 g, 42 g, 如表 2 所示; 同时也表明砂土边坡具有脆性破坏特征。

图 5(b)反映出坡顶沉降随离心加载呈逐渐发展的趋势。图中曲线的沉降值出现波动现象, 推测可能受 2 种情况干扰: 一是在离心机高速旋转下固定

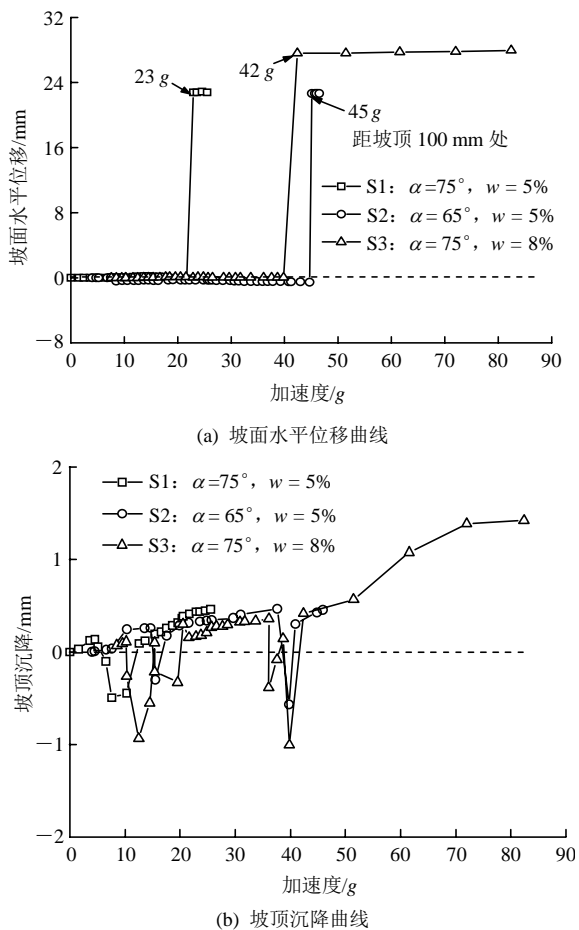


图 5 坡面及坡顶位移曲线

Fig.5 Displacements at slope surface and slope top

表 2 离心模型试验的破坏加速度
Table 2 Results of centrifugal model test

编号	坡高 h/mm	坡角 $\alpha/(\text{°})$	制备含水率 $w/\%$	破坏加速度/ g
S1	200	75	5	23
S2	200	65	5	45
S3	200	65	8	42

激光位移计的夹具受工作环境影响发生间歇抖动所致；另一种可能是离心加载过程中，机室存在较为复杂的电磁环境，对精度较高的激光位移计及测试系统电子设备产生了干扰，出现了脉冲电信号。但 2 种可能性均需作进一步验证才能判定。

离心加载完成后，停机观察砂土边坡的破坏形态，发现 3 组模型边坡均为浅层溜滑的破坏模式，破裂面基本呈直线状。图 6 为模型 S1 破坏后的形态。

由模型 S1 和 S2 的对比可发现，在含水率基本相同($w \approx 5\%$)情况下，边坡坡度 α 由 65° 增大到 75° 时，边坡失稳时的临界加速度由 45 g 降至 23 g ，降低了约 49%，十分显著，表明边坡的坡面越陡，失



图 6 模型破坏后的俯视图(左)和侧视图(右)
Fig.6 Slope failure (top and side views)

稳时的离心加速度越小，稳定越差，即边坡坡度对稳定性影响明显。

但对模型 S2 和 S3 的对比却反映出，在边坡坡度相同($\alpha = 65^\circ$)的情况下，含水率 w 由 5% 增至 8% 时，临界加速度仅由 45 g 降至 42 g ，只下跌了约 7%，不甚明显。考虑到离心模型试验技术自身存在的误差，砂土边坡含水率变化对稳定性的影响是否显著？还需做进一步的分析才能得出可靠判断。

3.2 砂土边坡含水率变化及水分迁移特点

由于土工材料的工程性质对含水率有显著的依赖性，在模型制作时精准控制填料含水率、并在模型试验过程中尽量减小含水率变化是土工模型试验普遍遵循的基本准则。相较于颗粒细的黏性土，砂土颗粒较粗，表面吸附力较低，持水能力较差。在土工离心模型试验中，由于离心加速度的作用，砂土中的水分易发生迁移现象，致使模型试验产生较大误差。因此，掌握砂土含水率在离心加载过程中的变化规律，对分析边坡失稳机制、解释试验现象有较大帮助。

离心加载试验前、后，采用空心薄壁小铝管模拟钻机钻孔的方式，自模型边坡的坡顶面沿铅锤方向以 50 mm 厚为一个土层单元进行取样，如图 7 所示，采用烘干法测试含水率，得到了 3 组模型试验的砂土含水率变化及沿深度分布规律，如图 8 所示。

由图 8 可知，在离心加载前，模型 S1, S2, S3 的砂土含水率沿深度变化不大，均值分别为 5.4% , 4.7% , 8.2% ，与对应目标含水率 5% , 5% , 8% 比较差异不大，表明模型制作过程的砂土含水率控制较好。在离心加载后，各模型的砂土含水率均有不同程度的变化，其中模型 S1, S2 的变化微弱，仅降低了 $0.2\% \sim 0.3\%$ ，未超过含水率的测试误差范围，表明模型 S1, S2 的含水率在整个试验过程中基本保持稳定；而模型 S3 的变化十分明显，减小了 4.4% ，砂土含水率的大幅降低将显著提高边坡的稳定性。边坡砂土含水率均值变化情况如表 3 所示。

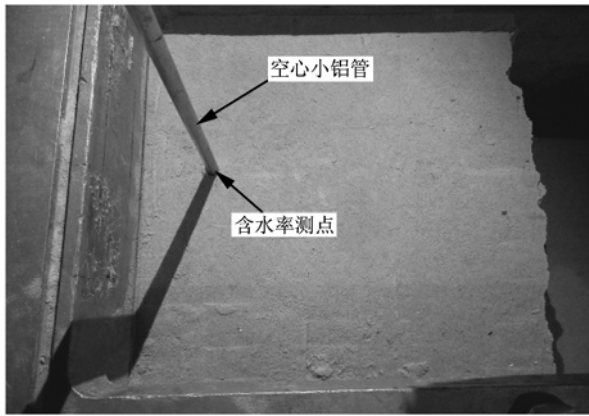


图7 边坡砂土含水率测试

Fig.7 Moisture content test

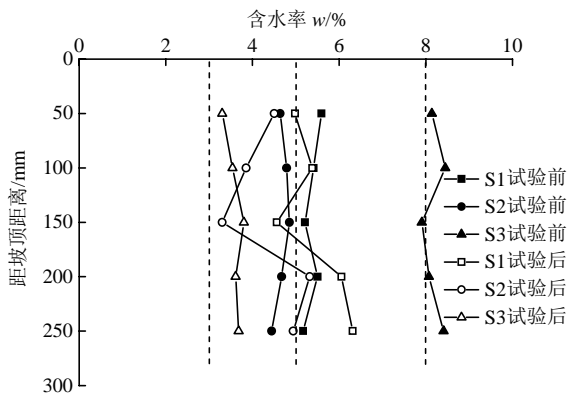


图8 边坡砂土含水率变化

Fig.8 Moisture contents before and after experiment

表3 边坡砂土试验前、后的含水率均值

Table 3 Average moisture content before and after experiment

编号	试验前含水率/%	试验后含水率/%	减少值/%
S1	5.4	5.2	0.2
S2	4.7	4.4	0.3
S3	8.2	3.8	4.4

砂土模型在离心加载后的含水率沿深度分布表现出上低下高的变化趋势，其中模型 S1, S2 的浅层砂土含水率略低于离心加载前，深部则略高，表明试验过程中砂土平均含水率变化较小的模型 S1, S2 仅在竖向产生了含水率的小幅调整；而模型 S3 在全深度区域均明显低于试验前，水分在边坡高度范围内的迁移现象十分显著。试验结束后还观察到，模型 S1, S2 的试验箱底部基本没有自由水流出，而模型 S3 则较多。

可见，初始含水率不同的 3 组模型的砂土边坡含水率变化和水分迁移现象并不一致，初始含水率较低的模型 S1, S2 变化小，初始含水率较高的模型 S3 水分迁移现象明显。

在离心荷载作用下，初始含水率不同的砂土中表现出不一致的水分迁移现象与非饱和土的水 - 汽运动规律密切相关。I. S. Queen 等^[15-17]基于土 - 水特性曲线，将土体吸附水分的能力分为 3 个区域：(1) 毛细作用区，土粒表面以厚水膜吸附形式为主保持水分；(2) 水膜吸附区，水分主要以薄水膜附着于颗粒表面；(3) 牢固吸附区，通过强大的分子间作用力联结在一起。在半对数坐标下，每一区域内的基质吸力与土体含水率近似呈线性关系，如图 9 所示。

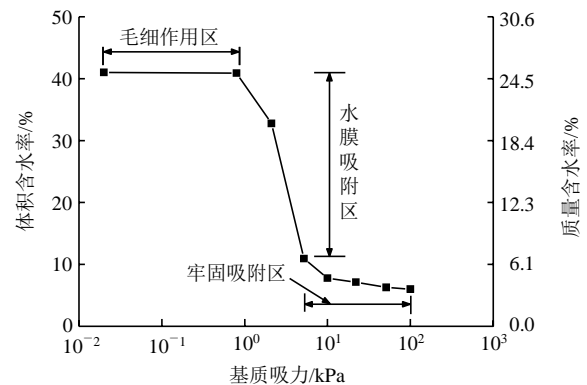


图9 试验用标准砂土 - 水特征曲线

Fig.9 Soil-water characteristic curve of standard sand

图 9 所示的土 - 水特征曲线是根据程展林等^[18]研究得出，其质量含水率通过砂土实测密度转换获得。可见，试验所用砂土处于牢固吸附区范围的质量含水率基本未超过 5%，残余含水率(基质吸力 ≥ 100 kPa)约为 3.5%。

模型 S1, S2 的初始质量含水率在 4.7%~5.4%，位于牢固吸附区附近，试验过程的离心加载(< 100 kPa)影响十分有限，与试验后的含水率只有小幅波动、均值微量降低吻合。而模型 S3 的初始质量含水率达到了 8.2%，处于水膜吸附区范围，在离心力作用下发生了水分迁移，最终稳定在牢固吸附区以内。模型 S3 试验后的含水率为 3.8%，位于牢固吸附区 5.0%~3.5% 范围，模型测试数据与土工试验参数具有良好映射关系。

关于不同初始含水率的砂土在离心荷载作用下的含水率变化情况，作为平行试验参加单位之一的长江科学院进行了更全面的测试^[19]，认为随着离心加速度增大，含水率逐渐减少，表层变化大于深部，最终趋向一个稳定的数值(约 4% 的残余含水率)，且初始含水率大的砂土稳定更快。

通过砂土边坡在离心模型试验过程中存在的含

水率变化和水分迁移现象可知，对于砂土这类渗透性强、蓄水能力差的土工材料，宜将模型制作时的含水率限制在牢固吸附区的上界限以内，防止水分发生明显迁移，实现模型含水状态的可靠控制。此外，还可得到一个重要的认识，砂土含水率对边坡稳定性影响的本质是处于牢固吸附区范围的含水率(接近残余含水率)，而不是模型制作时的初始含水率。边坡坡度相同、制备含水率不同的模型 S2 和 S3 破坏加速度差别不大的试验结果是对该结论的最好验证。

4 平行试验结果对比

土工试验因受多种不确定因素的影响而存在较大变异性，土工离心模型试验更因设备复杂、昂贵、在工程界的应用困难较大，试验技术的规范化和标准化工作尚处于初创阶段。为此，中国水利学会岩土工程专业委员会物理模拟技术委员会，于 2013 年组织国内具有土工离心机的单位开展了离心模型试验技术的平行试验工作，包括：砂土模型制备方法、单桩静载试验和砂土边坡稳定性试验等项目，目的在于对比各实验室砂土制备方法的准确性和均匀性，分析试验设备条件、操作工艺、测试方法等对模型试验结果的影响规律，推动土工离心模型试验技术进步。

砂土边坡稳定性的平行试验共有 7 家单位的实验室参加，表 4 为任意排序的各实验室测试成果^[18]，图 10 为各实验室的破坏离心加速度值比较。

表 4 模型边坡的破坏离心加速度^[18]
Table 4 Centrifugal acceleration in slope failure^[18]

实验室 编号	破坏离心加速度/g		
	S1	S2	S3
1	13.3(舍)	45.5	31.9(舍)
2	24.6	44.3(舍)	40.0
3	35.0(舍)	44.5	50.0
4	29.5	61.0	79.3(舍)
5-1	24.9	60.7	63.1
5-2	-	64.3(舍)	61.1
6	29.9	63.5	-
7(本文)	23.0	45.0	42.0
均值	26.3	53.4	51.2
最大值	29.9	63.5	63.1
最小值	23.0	44.5	40.0
最大值 - 最小值	6.9	19.0	23.1

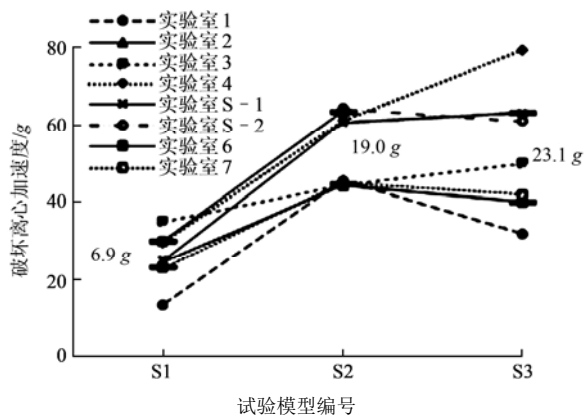


图 10 模型边坡的破坏离心加速度比较

Fig.10 Centrifugal acceleration in slope failure

对比模型 S1, S2 的各家试验成果可知，在含水率相同($w=5%$)、水分迁移微弱的条件下，各实验室的模型边坡破坏离心加速度随坡度变化规律高度一致，即边坡坡角与破坏离心加速度呈反比关系，砂土模型边坡的坡度增加，其稳定性将降低；除去最高和最低值的破坏加速度均值降幅约 51%，与本试验对应的 49%降幅高度吻合。

但各实验室的模型 S2, S3 试验数据却未显示出相同的变化趋势，坡度相同($\alpha=65^\circ$)的边坡模型，随着砂土含水率由 5%增至 8%，边坡的破坏离心加速度，有的显著减小(如实验室 1)、有的明显增大(如实验室 4)，当然更多的是小幅波动；特别是实验室 5 针对模型 S2, S3 开展了 2 次重复试验，在设备条件、制备工艺、测试方法等基本相同情况下，破坏离心加速度与含水率的关系依旧表现出不确定性特征。

可见，对于离心加载过程中存在水分迁移的砂土边坡，初始含水率与稳定性的关系并不紧密，边坡破坏时的残余含水率才是关键因素，即残余含水率决定破坏时的砂土强度，进而影响边坡稳定性。

根据图 9 可知，试验所用砂土在离心加载条件下的残余含水率在 5.0%~3.5%。尽管各家在模型制作时的初始含水率不尽相同，只要存在明显的水分迁移现象，在模型破坏时的含水率已降至牢固吸附区范围，意味着由不同含水率制作而成的模型边坡，破坏时的砂土强度基本相当。平行试验中各家所做模型 S2, S3 的试验结果均值非常接近(除去最高和最低值的破坏加速度均值由 53.4 g 变为 51.2 g，仅降低了约 4%，低于本试验 7%的对应降幅)，就应该是发生水分转移后的 2 组模型残余含水率差异不大所导致；当然，随着离心加速度和初始含水率增加，各家的模型试验结果表现出了更大的差异性和变异

性(模型 S1, S2, S3 的破坏加速度波动带宽分别为 6.9 g, 19.0 g, 23.1 g, 呈增大趋势), 则可能是由于模型制作方式、运转过程控制以及离心机性能等因素的差异引起。

针对平行试验 7 家单位实验室提供的 3 组模型试验数据, 采用适合小样本空间($3 \leq n \leq 50$) 的 W 检验方法^[20]进行了随机分布规律的相关性分析。基于每组模型的 7~8 个数据获得的 W 检验结果如表 5 所示。W 检验的判别准则为, 统计量 $W >$ 界限值 W_α 时, 表示总体服从正态分布, 即试验数据以随机误差为主; $W \leq W_\alpha$ 时, 不接受正态分布假设, 表示试验数据存在较大系统偏差。对于模型 S1, S3 的试验数据, 取显著水平 α 分别为 0.01, 0.05, 0.10 得到的界限值 W_α 均小于计算统计量 W , 正态分布假设成立; 但模型 S2 的试验数据只有在 $\alpha = 0.01$ 时才能通过正态分布检验, α 取 0.05, 0.10 时均表示拒绝。由此可知, 本次平行试验获得的破坏离心加速度统计值具有较强的正态分布特征, 主要表现为随机误差, 但同时受模型制作、加载、尺寸等因素的影响而存在较大的系统误差。

表 5 W 检验计算结果
Table 5 Results of W-test

模型编号	计算统计量 W	$\alpha = 0.01$ 界限值 W_α	$\alpha = 0.05$ 界限值 W_α	$\alpha = 0.10$ 界限值 W_α
S1	0.927	0.749	0.818	0.851
S2	0.755	0.749	0.818	0.851
S3	0.961	0.73	0.803	0.838

基于平行试验数据以随机误差为主, 也存在较大系统误差的基本情况, 在舍掉每组模型试验的最大和最小值后, 进行算术平均和极差值计算, 结果如表 4 和图 10 所示。可见, 每组模型试验的均值位

表 6 试验数据的截尾相对误差
Table 6 Censored relative error of test data

实验室编号	截尾相对误差/%		
	S1	S2	S3
1	-	-14.8	-
2	-6.5	-	-21.9
3	-	-16.7	-2.3
4	12.2	14.2	-
5-1	-5.3	13.7	23.2
5-2	-	-	19.3
6	13.7	18.9	-
7	-12.5	-15.7	-18.0

于误差极值的中点附近, 相对于均值破坏加速度最大偏幅在 3.5 g~11.6 g 范围变化。定义截尾相对误差为舍掉最大和最小值后, 试验数据与均值的差值除以均值, 得到 3 组模型试验数据的截尾相对误差如表 6 所示。可知, 平行试验的相对误差均值为 -17%~18.6%, 未超过 20%。

对各家试验数据的截尾相对误差进行对比分析还可看出, 基本上都呈现出一致性偏大或偏小特征, 只有 5 号实验室既有偏大也有偏小的数据, 但也依然存在结构性偏离趋势, 表明不同实验室之间的试验数据系统误差不可小视。对于重要工程和复杂问题, 组织相关实验室进行平行试验是压制系统误差的有效途径。

5 结 论

采用土工离心模型试验技术, 研究了砂土边坡的变形特性和失稳模式, 讨论了砂土的水分迁移现象对边坡稳定性的影响特点; 基于国内多家离心机实验室的平行试验数据, 分析了砂土边坡破坏加速度的随机变化特征。主要结论如下:

(1) 在离心荷载作用下, 砂土边坡的变形具有脆性破坏的显著特征, 为浅层溜滑的破坏模式, 破裂面基本呈直线状。在砂土水分迁移现象微弱条件下, 各实验室平行试验的模型边坡破坏离心加速度随坡度变化的规律具有高度一致性。

(2) 在离心荷载作用下, 较高含水率的砂土边坡存在明显的水分迁移现象, 能显著改变边坡破坏时的砂土强度。影响砂土边坡稳定性的关键参数是处于土-水特征曲线牢固吸附区范围的残余含水率, 而非模型制备时的初始含水率。

(3) 由国内 7 家实验室开展平行试验获得的砂土边坡破坏离心加速度统计值具有正态分布特征, 以随机误差为主, 同时也存在较大的系统误差。试验表明, 相对于算术均值, 破坏离心加速度的最大偏幅在 10 g 左右, 相对误差一般不超过 20%。研究成果对完善土工离心模型试验技术有积极作用。

致谢 本文引用了长江科学院、浙江大学、同济大学、长沙理工大学、大连理工大学、清华大学六家单位实验室所做的平行试验数据, 在此表示特别感谢!

参考文献(References):

[1] CRAIG W H. Edouard Phillips and the idea of centrifuge modelling[J].

- Geotechnique, 1989, 39(4): 697 - 700.
- [2] FUGLSANG L D, OVESEN N K. The application of the theory of modelling to centrifuge studies[C]// CRAIG W H, JAMES R G, SCHOFIELD A N, ed. Centrifuge in Soil Mechanics. Rotterdam: AA Balkema, 1988: 119 - 138.
- [3] AVGHERINOS P J, SCHOFIELD A N. Drawdown failures of centrifuged models[C]// Proc. 7th Int. Conf. Soil Mech. and Found. Mexico: [s. n.], 1969: 497 - 505.
- [4] SCHOFIELD A N. Use of centrifugal model testing to assess slope stability[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1978, 15(1): 14 - 31.
- [5] 汪小刚, 张建红. 用离心模型研究岩石边坡的倾角破坏[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(5): 14 - 21.(WANG Xiaogang, ZHANG Jianhong. Investigations on mechanism of slope toppling failure by centrifuge model testing[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(5): 14 - 21.(in Chinese))
- [6] 程永辉, 程展林, 张元斌. 降雨条件下膨胀土边坡失稳机制的离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(增 1): 409 - 414.(CHENG Yonghui, CHEN Zhanlin, ZHANG Yuanbin. Centrifugal model tests on expansive soil slope under rainfall[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(Supp.1): 409 - 414.(in Chinese))
- [7] 唐茂颖. 土质路堑高边坡变形特性的离心模型试验研究[硕士学位论文][D]. 成都: 西南交通大学, 2005.(TANG Maoying. Centrifugal model test study on deformation of high cut slope of soil[M. S. Thesis][D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2005.(in Chinese))
- [8] 张 敏, 吴宏伟. 边坡离心模型试验中的降雨模拟研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(增): 53 - 57.(ZHANG Min, WU Hongwei. Rainfall simulation techniques in centrifuge modelling of slopes[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(Supp.): 53 - 57.(in Chinese))
- [9] 姚裕春, 姚令侃, 袁碧玉. 降雨条件下边坡破坏机制离心模型研究[J]. 中国铁道科学, 2004, 25(4): 64 - 68.(YAO Yuchun, YAO Lingkan, YUAN Biyu. Analysis of centrifugal model of slope damage mechanism during rainfall[J]. China Railway Science, 2004, 25(4): 64 - 68.(in Chinese))
- [10] 钱纪芸, 张 嘎, 张建民, 等. 降雨时黏性土边坡的离心模型试验[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2009, 49(6): 813 - 817.(QIAN Jiyun, ZHANG Ga, ZHANG Jianmin, et al. Centrifuge model tests of cohesive soil slopes during rainfall[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2009, 49(6): 813 - 817.(in Chinese))
- [11] 张 嘎, 王爱霞, 牟太平, 等. 边坡破坏过程离心模型试验的应力位移场研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(10): 2 637 - 2 641.(ZHANG Ga, WANG Aixia, MOU Taiping, et al. Study of stress and displacement fields in centrifuge modeling of slope progressive failure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(10): 2 637 - 2 641.(in Chinese))
- [12] 李绍军, KNAPPETT J A, 冯夏庭. 库水位升降条件下边坡失稳离心模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1 586 - 1 593.(LI Shaojun, Knappett, FENG Xiating. Centrifugal test on slope instability influenced by rise and fall of reservoir water level[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(8): 1 586 - 1 593.(in Chinese))
- [13] 李天斌, 田晓丽, 韩文喜, 等. 预加固高填方边坡滑动破坏的离心模型试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(11): 3 061 - 3 070.(LI Tianbin, TIAN Xiaoli, HAN Wenxi, et al. Centrifugal model tests on sliding failure of a pile-stabilized high fill slope[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(11): 3 061 - 3 070.(in Chinese))
- [14] 中华人民共和国国家标准编写组. GB/T50123—1999 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.(The National Standards Compilation Groups of the People's Republic of China. GB/T50123—1999 Standard for soil test method[S]. Beijing: China Planning Press, 1999.(in Chinese))
- [15] QUEEN I S, MILLER R F. Calibration and evaluation of a wide-range gravimetric method for measuring moisture stress[J]. Soil Science, 1968, 106(3): 225 - 231.
- [16] QUEEN I S, MILLER R F. Approximating soil moisture characteristics from limited data: Empirical evidence and tentative model [J]. Water Resources Research, 1974, 10(3): 521 - 527.
- [17] MILLER R E, ELRICK D E. Dynamic determination of capillary conductivity extended for non-negligible membrane impedance[J]. Soil Science Society of America Journal, 1958, 22(6): 483 - 486.
- [18] 程展林, 侯瑜京, 马险峰, 等. 砂土边坡稳定性离心模型平行试验研究[C]// 第七届全国岩土工程物理模拟学术研讨会论文集. 杭州: [s. n.], 2013: 57 - 63.(CHENG Zhanlin, HOU Yujin, MA Xianfeng, et al. Geotechnical centrifugal model test research on sand slope stability[C]// China 7th Geotechnical Engineering Conference on Physical Simulation. Hangzhou: [s. n.], 2013: 57 - 63.(in Chinese))
- [19] 程展林, 龚壁卫, 李 波, 等. 砂土边坡稳定性离心模型试验研究[J]. 水利学报, 2015, 46(增 1): 12 - 17.(CHENG Zhanlin, GONG Biwei, LI Bo, et al. Centrifuge modelling of the stability of the sandy soil slope[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(Supp.1): 12 - 17.(in Chinese))
- [20] 钟继贵. 误差理论与数据处理[M]. 北京: 水利水电出版社, 1993: 38 - 42.(ZHONG Jigui. Error theory and data analysis[M]. Beijing: China Water Power Press, 1993: 38 - 42.(in Chinese))