



基于图像分析的土坡离心模型试验变形场测量

张 嘎, 牟太平, 张建民

(清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

摘 要: 开发了离心场条件下土坡离心模型试验变形场非接触测量技术并进行了实际应用。基于图像相关分析理论, 开发了新的土坡离心模型试验过程中土体位移非接触测量系统以观测离心机运行中土坡的位移。针对简单土坡进行了离心模型试验, 测量了土坡的位移场变化过程。测量结果规律性好, 表明该非接触测量技术能够较好地测定离心模型试验中土体侧面任意点在任意时刻的位移, 适用于离心场环境中土坡变形过程的测量。加载导致土坡在某些位置出现变形集中, 意味着这些位置发生了应变局部化。应变局部化的发展与土坡破坏有着密切联系。

关键词: 土坡; 试验; 离心模型试验; 测量; 图像分析

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2007)01-0094-04

作者简介: 张 嘎(1976-), 男, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程的理论及工程应用等方面研究。E-mail: zhangga@tsinghua.edu.cn。

Displacement measurement using image analysis in centrifuge modeling of slopes

ZHANG Ga, MU Tai-ping, ZHANG Jian-min

(State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A new displacement measuring system was presented and applied in centrifuge model tests on soil slopes. The non-contact measuring system was developed based on the correlation-based image analysis to measure the displacements of a soil slope in centrifuge tests. The histories of displacement fields of soil slopes in centrifuge were automatically measured. The measured results exhibited a good regularity. The measuring system was verified to effectively measure the displacement at any spot of a slope at any time with accuracy in centrifuge. It was shown that the deformation was concentrated due to loading, which demonstrated the occurrences of strain localization in the slope. The strain localization had a close relation with the failure process.

Key words: slope; test; centrifuge modeling; measurement; image analysis

0 前 言

土坡稳定性分析具有重要的理论和实践意义, 受到广泛的研究, 并已取得了大量成果^[1-3]。调查及分析结果表明土坡的破坏一般是渐进的, 破坏过程与土坡的变形过程特别是应变局部化有着密切联系。尽管目前已经对土坡的渐进破坏或应变局部化进行了一些理论分析和数值模拟, 但还未形成合理描述土坡破坏过程的系统方法。造成这一情况的主要原因之一, 就是缺乏丰富的土坡变形直至破坏的完整的变形记录成果, 未能深入认识各种条件下土坡变形发展、应变局部化形成及其与破坏过程的关系。

离心模型试验具有使模型与原型的应力应变相等、变形相似、破坏机理相同等优点, 在土坡稳定性研究中得到较广泛的应用。不过, 已有的土坡离心模型试验研究主要集中在对实际边坡的稳定性评价以及探讨边坡形状、材料性质、加载方式等因素对边坡稳

定性的影响等方面^[4-6]。对于加载条件下土坡的变形发展乃至破坏的过程等方面还缺乏深入系统的研究。

本文基于图像分析理论, 开发了新的离心场环境中土体位移的非接触测量技术, 能够测量土坡的变形发展直至破坏的全过程。在此基础上进行了不同加载条件下的土坡离心模型试验, 测量了整个试验过程中土坡位移场的发展变化过程。

1 非接触位移场测量技术

本文的土坡离心模型试验采用的是清华大学的TH-50gt土工离心机^[7], 其可提供的最大离心加速度为250 g。

目前在离心模型试验中测量位移主要采用传感器

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50309008, 50679033)

收稿日期: 2005-10-11

或者人为布置标志物等方法。但是, 传统的位移测量方法存在着工作量大、测量精度较低、测量点有限、对模型扰动大等缺陷。而且, 由于试验前很难准确确定土坡发生较大变形乃至应变局部化区域的具体位置, 因此这些通过事先确定测量点来测量位移的方法不能很好地满足研究土坡变形和应变局部化等问题的使用要求。

为克服已有方法的缺点, 新的用于离心场环境中位移测量方法得到了探索和应用。其中基于数字图像的位移测量技术因其无需人为标点等优点已在离心模型试验中得到了一些应用^[8]。本文基于数字图像相关分析原理, 针对黏性土开发了一种新的离心场非接触位移测量技术, 由固定在模型箱上的摄像头透过有机玻璃对土坡侧面进行录像, 然后根据录像来确定土坡各点的位移。图1示出了该技术的测量原理, 具体步骤为: ①采用嵌入不同颜色土颗粒等方法在土坡模型侧面形成具有随机性分布的较大色彩差的测量区域, 如图1所示; ②通过固定在模型箱上的摄像头记录试验过程中模型的变化; ③将录像拆分成数字照片序列; ④根据测量需要确定测点网格; ⑤采用相关分析软件处理数字照片序列, 确定测点在不同照片上的相关点, 并根据图像的比例尺得出各测点的实际位移。

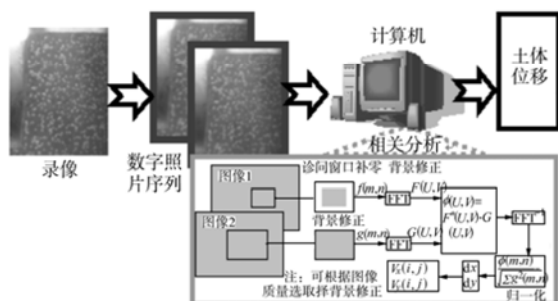


图1 离心场非接触位移测量系统流程图

Fig. 1 Flow chart of displacement measuring system in centrifuge

其中, 第⑤步是该测量技术的关键。笔者等已基于数字图像相关分析理论, 提出了一种新的补零相关分析算法以确定不同图像上的相关标记点, 给出了具体算法和使用方法, 其测量精度达亚像素量级^[9]。本文基于该算法编写了用于离心模型试验条件下土体位移测量的程序。十余个离心模型试验的实际应用表明, 本测量技术在测定离心模型试验中土体侧面的变形方面具有如下优点: ①不干扰测量对象; ②多点测量, 无需预先确定测点, 可根据需要在试验后确定测点, 从而可以多次根据不同的需要处理同一个试验结果; ③多时刻测量; ④稳定性好, 对图像质量要求低, 抗干扰能力好, 在离心加速度达 150 g 时仍能正常工作;

⑤自动化程度高; ⑥操作简便、工作量大; ⑦测量精度高, 结果规律性好。

2 试验条件及内容

试验所用的模型箱由铝合金制成, 尺寸长 60 cm、高 52 cm、宽 20 cm。模型箱的一个侧面为厚 58 mm 的有机玻璃板, 用以观测试验过程中土坡模型的变形情况。在模型箱中首先按水平地基制样, 分六层击实至给定的干密度。水平地基制完后, 卸下模型箱侧面的玻璃板, 削去多余土样形成试验用的土坡。为了减小模型箱底板与坡体摩擦对土坡变形和破坏的影响, 模型保留约 5 cm 厚的水平土层与底板接触。为了减小模型箱侧壁与土体的摩擦, 本文采用在模型箱有机玻璃的内侧涂硅油, 并在相对的另一模型箱侧壁涂上硅油后再贴上塑料条带的措施。另外, 保证坡脚距离模型箱的边壁不小于 20 cm, 以保证试验中土坡可以在临空面方向自由变形。

试验采用小浪底粉质黏土, 其相对密度为 2.71, 塑限为 16, 塑性指数为 14, 最优含水率为 16.3%。土坡模型的干密度为 1.65 g/cm³, 含水率为 15%, 坡角 α 为 84°, 坡高 H 取 25 cm。

土坡模型制作完成后, 将模型箱装入离心机挂斗, 安装测量设备。然后开机, 每一级加速度增量为 4 g, 待该级加载完成后土坡的位移稳定一段时间后进行下一级加载, 直至土坡发生破坏。还进行了平行试验以保证试验结果的可靠性。

从置于坡顶的位移传感器测得的坡顶沉降量随离心加速度的变化可以看出在加载过程中土坡的顶部沉降量不断发展, 在离心加速度达到 45 g 时沉降突然迅速增大, 表明此时土坡发生了最终破坏。

3 测量结果

采用本文新开发的离心场非接触位移测量技术对土坡在离心模型试验过程中的位移进行了测量。由于该技术无需在试验前布置测点且是自动测量, 因此可根据试验得到的图像系列根据研究需要布置大量的测点。下文将给出部分测量结果, 并基于该测量结果对土坡的变形过程进行简要分析。

需要说明, 由于试验过程中离心加速度是变化的, 因此本文将按照模型尺寸给出土坡的变形量, 而没有根据加速度进行换算。规定水平位移以向左为正, 竖直位移以向下为正。

图2给出了所采用的位移测量网格图, 共 333 个测点。其中根据试验观察结果在位移变化较大处对测点进行了加密, 加密处相邻测点的水平距离为 4 mm。

测量时根据土坡的加载、变形情况从开始加载至达到破坏状态分为 35 个测量步 (记作 step 0~step 34)。

图 3 给出了不同测量步时土坡的水平位移等值线图, 图中等值线的间距如未特别说明均为 0.5 mm。从图 3 (a) 可以看出土坡在初始加载时的水平位移等值线分布较为均匀, 并未出现应变局部化; 到 step 8 (图 3 (b)) 时土坡的坡脚处和坡顶中部附近位置均出现一定的等值线集中分布, 表明此时土坡出现一定的应变局部化。坡顶处的等值线随着加载的进行不断加密, 意味着应变局部化不断加强, 但该区域并未向下延伸, 而是基本保持不变, 至 step 20 时已基本稳定。这表明该处的应变局部化并未导致土坡发生整体破坏。与坡顶不同, 坡脚处的等值线在加载过程中不断加密, 同时等值线密集区还不断向上扩展。这意味着应变局部化在坡脚处不断加强, 并向上发展, 最终扩展至坡顶附近与坡面相交, 形成贯通的滑动面, 如图 3 (e) 所示。该滑动又导致坡顶出现新的应变局部化, 从而形成最终的贯通土坡的滑裂面, 土坡发生整体破坏。

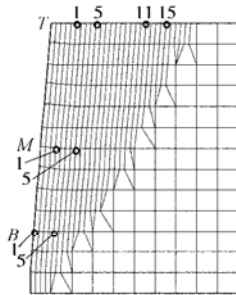


图 2 土坡位移测量网格示意图

Fig. 2 Meshes for measurement

根据图 3 的分析结果, 图 4 给出了应变局部化较

明显几个区域的部分测点的水平位移 disp_x 和竖直位移 disp_y 在加载过程中的变化。分别在土坡顶部 (T)、中部 (M) 和底部 (B) 等处取了 4 个区域, 每个区域选择了 5 个连续的测点 (水平间距为 4 mm), 具体位置如图 2 所示。从图 4 可以看出, 土坡的坡脚处 (B1~B5) 在 step 7 和 step 8 时在相邻测点 (B2、B3、B4) 已发生较大的相对变形, 表明此处发生了较大的应变, 而且该相对变形在加载过程中持续增大, 直至达到最终破坏状态时才趋于稳定。土坡中部 (M1~M5) 的测点在 step 10 以后才逐渐发生较大的相对变形, 而且该相对变形总是小于坡脚处, 这表明土坡中部的应变局部化比坡脚晚, 可以推断其出现是坡脚应变局部化发展的结果。而坡顶处 (T1~T5) 在 step 20 以后才发生一定的相对位移, 直到 step 30 以后才趋于明显。通过这 3 个区域的变形发展过程分析, 可以明显看出应变局部化是从坡脚向坡顶发展的过程。另外, 与图 3 类似, 坡顶 (T11~T15) 在 step 7 时已出现相对变形, 且不断增大, 但是在 step 20 时各测点变形均不再变化, 表明该处出现应变局部化, 但逐渐趋于稳定。

上述分析表明, 加载过程中土坡在某些位置出现变形集中的现象, 也就是出现了应变局部化, 这些应变局部化有的逐渐趋于稳定, 有的不断发展并最终导致土坡发生破坏。根据本文的土坡位移测量结果还可以看出, 土坡破坏时的应变局部化范围 (滑裂带厚度) 大约是在 1~2 倍的测点间距, 即 6~8 mm 左右。

从本文所给出的测量结果来看, 本文开发的土坡试验测试技术所测得的土坡变形分布合理, 具有较高的精度, 能够较好地满足离心模型试验条件下土坡变形测量的要求。

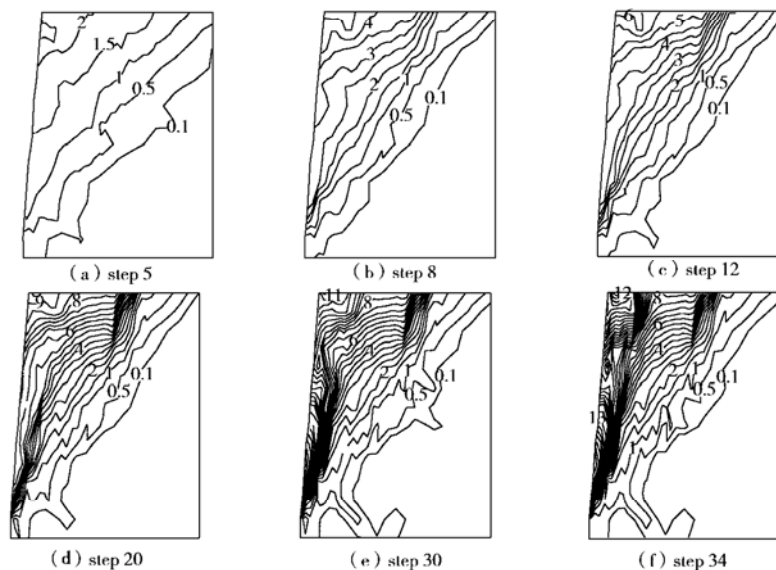


图 3 土坡水平位移场分布

Fig. 3 Horizontal displacement fields in centrifuge

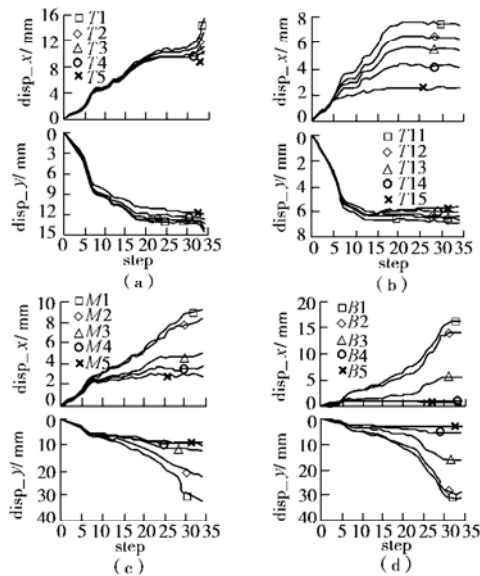


图4 土坡不同测点的位移变化

Fig. 4 Development of displacements at points in centrifuge

4 结 语

基于图像相关分析位移测量理论,开发了一套新的土坡离心模型试验非接触位移测量技术,研制和开发了相应的软硬件系统。初步应用表明,该测量技术能较好地测定离心模型试验中土体侧面任意点在任意时刻的位移,并具有不干扰测量对象、无需预先确定测点、稳定性和抗干扰能力好、自动化程度高、工作量大等优点,测量精度能够较好地满足离心模型试验条件下对土坡变形测量的要求。

土坡离心模型试验的位移场变化过程的测量结果表明加载导致土坡在某些位置出现变形集中的现象,也就是出现了应变局部化。这些应变局部化有的逐渐趋于稳定,有的不断发展并最终导致土坡发生破坏。应变局部化的发生条件和发展过程与土坡的破坏过程及结果有着密切联系,需要进一步加以研究。

参考文献:

[1] BJERRUM L. Progressive failure in slopes of overconsolid-

ated plastic clay and shales [J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1976,93(SM5): 3 - 49.

[2] SKEMPTON A W. Residual strength of clay in landslide, folded strata and the laboratory test [J]. Geotechnique, 1985,35(1): 1 - 18.

[3] GU W H, MORGENSTERN N R, ROBERTSON P K. Progressive failure of lower san fernando dam [J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1993,119: 333 - 349.

[4] 油新华, 李 晓, 等. 国外离心模型试验技术在边坡工程中的应用现状与展望[J]. 工程地质学报, 2000,8(4): 442 - 446.(YOU XH, LI X, et al. Current status and prospect of application of centrifuge model test to slope engineering [J]. Journal of Engineering Geology, 2000,8(4): 442 - 446.(in Chinese))

[5] 介玉新, 李广信, 陈 轮. 纤维加筋土和素土边坡的离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 1998,20(4): 12 - 15.(JIE Y X, LI G X, CHEN L. Study of centrifuge model tests on texsol and cohesive soil slopes [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998,20(4): 12 - 15.(in Chinese))

[6] MARK C, GEMPERLINE D, HON Y. Centrifuge model tests for ultimate bearing capacity of footing on step slopes in cohesionless soils [C]// Proc of Int Conference Centrifuge'88, 1988: 203 - 221.

[7] PU J L, LIU F D, LI J K, et al. Development of medium-size geotechnical centrifuge at tsinghua university[C]// Proc of Int Conference Centrifuge 94, Singapore, 1994: 53 - 56.

[8] WHITE D J, TAKE W A, BOLTON M D. Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry [J]. Geotechnique, 2003,53(7): 619 - 631.

[9] 张 嘎, 张建民, 梁东方. 土与结构接触面试验中的土颗粒细观运动测量[J]. 岩土工程学报, 2005,27(8): 903 - 907.(ZHANG G, ZHANG J M, LIANG D F. Soil particle movement measurement in soil-structure interface test[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005,27(8): 903 - 907.(in Chinese))