2016年3月 JOURNAL OF SHIJIAZHUANG TIEDAO UNIVERSITY (NATURAL SCIENCE) Mar. 2016

堆载诱发型滑坡变形演化机理的模型试验研究

胡田飞

(中国铁道科学研究院研究生部,北京 100083)

摘要:基于模型试验,对堆载诱发型边坡滑坡的变形机理及演化过程进行研究。研究结果 表明:(1)堆载诱发型滑坡的变形演化规律可归纳为:后缘压缩阶段→蠕动变形阶段→加速滑动 阶段→剧滑阶段,且剧滑启动之前的加速变形过渡时间极短;(2)利用 FLAC3D 软件进行堆载滑 坡演化过程的动态数值分析,模拟过程中坡体应力场和位移场的演化特征表现为从上向下逐步 贯通,与模型边坡破坏过程相符;(3)堆载诱发型滑坡破坏过程历时短、突发性强,在坡脚产生持 续位移时即应做出滑坡预警。

关键词:堆载;滑坡;变形机理;演化过程;模型试验;数值模拟

中图分类号:U455.7+1 文献标志码: A 文章编号: 2095-0373(2016)01-0038-06

0 引言

在公路、铁路、矿山、水利水电等众多领域的建设过程中,开挖和填筑等工程行为会产生大量侧向临 空的边坡体,自然界中也存在着大量受地形地貌和地质构造控制的斜坡地质体,上述坡体在各种人为和 自然因素的作用下逐渐演化,极端情况下会变形滑移导致严重的滑坡灾害^[1]。在各类边坡的滑坡灾害案 例中,堆载是滑坡的一个重要诱发因素,主要包括边坡体上的人工堆载和天然斜坡体后缘崩塌堆积物产 生的天然堆载^[24]。对于堆载诱发型滑坡,明确其演化规律和变形机理对其防灾减灾和预测预报具有重 要的意义。孙红月等^[3]认为高填方路基使坡体产生垂直方向的压缩变形,也使坡体向坡脚方向产生一定 的挤出变形,最后诱发了推动式滑坡。董夫钱等^[6]认为松散堆积体边坡上的堆载在引起坡体局部破坏的 同时,还导致地下水渗流系统的破坏和入渗条件的改变,最终导致滑坡的发生。雍睿等^[7]通过模型试验 研究认为崩坡积物加载于滑坡后缘堆积体上引起的推移式滑坡沿滑带发生整体滑移破坏,演化过程分为 后缘压缩阶段、匀速变形阶段、加速变形阶段3个阶段。陈春利等^[8]认为边坡堆载改变了坡体的应力分 布,致使坡体中、下部土体剪应力逐渐接近其抗剪强度,边坡的稳定性随之降低直至失稳破坏。刘悦等^[9] 通过固结不排水剪试验认为堆载作用下不利于黄土材料强度保持的含水量和围压的组合会首先导致黄 土微观结构的变形破坏,进而诱发坡体的变形破坏。

本文设计了一组边坡模型试验,通过分级加载的方法模拟了堆载滑坡的演化过程,结合滑体表面水 平位移实测数据分析了滑坡演化过程的空间变形破坏特征。在此基础上利用 FLAC3D 三维数值分析软 件建立相同条件的数值计算模型,以实测位移数据为依据反演出模型边坡应力场和位移场的演化过程, 分析了其变形机理和演化规律。

- 1 试验设计
- 1.1 试验模型

模型试验采用相似材料的机制模拟法,建立研究对象和物理模型之间的相似关系,从而保证模型试

收稿日期:2014-12-20 责任编辑:刘宪福 DOI:10.13319/j.cnki.sjztddxxbzrb.2016.01.07 基金项目:铁道部科技研究开发计划课题(2010G018-C-3)

作者简介:胡田飞(1988-),男,助理工程师,工学硕士,主要从事岩土工程和工程地质方面研究。E-mail:hutianfei0508@163.com 胡田飞.堆载诱发型滑坡变形演化机理的模型试验研究[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2016,29(1):38-42. 验中出现的物理现象与原型相似。实验室模型箱几何尺寸为:长×宽×高=140 cm×80 cm×100 cm,由角钢和高密度板制作而成。根据试验条件,以某黄土边坡为地质原型,确定几何相似系数为 10,容重相似系数为 1(即模型试验与地质原型的材料重度相同),边坡模型尺寸如图 1 所示。

1.2 相似材料及边界条件

滑床及滑体配比材料主要由 85%的黄土、 13%的水及 2%的膨润土构成,含水率为 15%,膨润土起到减小变形模量、使滑体易于 成型的作用。边坡模型采用人工分层夯实法



图 1 试验模型尺寸示意图(单位:cm)

填筑,以保持制样的均匀性,材料参数见表 1。滑带采用滑石粉泥浆填充的双层聚乙烯薄膜,通过直剪试 验测得 c=1.5 kPa, $\varphi=24.2^{\circ}$,模拟滑带较低的抗剪强度。为消除边坡滑动时模型箱两侧箱体摩阻力的影 响,在模型箱侧壁上铺设双层塑料薄膜,以模拟实际边坡的自由边界。

介质	E/MPa	υ	$\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	c/kPa	$arphi/(\circ)$
坡体	17	0.35	18	34.8	31.3

1.3 试验方法

坡顶堆载对边坡稳定极为不利^[10],因此试验过程中对坡顶平台分级施加竖向荷载。为保持荷载恒 定,采用放置质量 0.25 kN 铅砂袋的方式,每级加载 0.75 kN。为使堆载充分作用于滑体,每级加载后最 少保持 10 min,待位移稳定后再施加下级荷载。位移监测系统采用机械式百分表,量程 50 mm。考虑到 滑坡后缘存在应力集中,滑坡侧壁位移受边界效应影响,为不失一般性,在模型边坡中部剖面的平台和坡 脚位置设置两个沿滑坡走向的监测点形成测线,如图 1、图 2 所示。影像采集系统采用 1 台高清数码摄像 机,安装在模型箱的正面,实时记录边坡破坏过程。



(a)坡脚



(b)平台

图 2 位移监测点

2 试验结果及分析

2.1 变形演化过程

试验过程中,第1次加载(0.75 kN)后,百分表指针出现微小变化并瞬间稳定。第2次加载(1.5 kN) 后,变形集中发生在前5 s之内,变形迅速停止。第3次加载(2.25 kN)后,前10 s各百分表指针缓慢转 动;之后变形持续约2 min 时间,刷方平台变形稳定速度较坡脚快,在刷方平台位移停止后,坡脚位移又持 续约1 min。第4次加载(3 kN)后,百分表指针转动较快,坡脚出现第1道裂缝 L1,如图3(a);2 min 之后 指针转动趋缓,但变形仍在持续,裂缝 L1继续扩大;5 min 之后变形基本停止。第5次加载(3.75 kN)后, 30 s之内坡脚水平位移已达3 mm,平台水平位移达约2 mm,裂缝 L1 扩大,如图3(b);3 min 之后变形趋 于缓慢;8 min 之后变形基本停止。第 4、5 次加载后在坡体明显产生变形位移的情况下最后仍可以保持 稳定,是由于坡体蠕滑导致重心下移增大了滑带的抗滑力。第 6 次加载(4.5 kN)后,百分表指针剧烈跳 跃,持续约 1.5min,裂缝 L1 附近土体脱落,在裂缝 L1 上方约 5 cm 处出现第 2 道裂缝 L2,并逐渐扩大,如 图 3(c)所示;4 min 后裂缝 L1、L2 突然扩大,坡脚土体瞬间解体碎裂并水平移出,边坡整体滑移。



(a) 堆载 3 kN 时坡脚出现裂缝

(b)堆载 3.75 kN 时坡脚裂缝扩大

1 And and

2.2 位移数据分析

监测点累计水平位移如图 4 所示,曲线清晰 地反映了影像采集系统中堆载型滑坡演化过程 的 4 个阶段。第 1 阶段(0.75 kN、1.5 kN、2.25 kN)为边坡模型后缘压缩阶段,属于坡体变形初 期,变形持续时间较短。第 2 阶段(3 kN、3.75 kN)为坡体的蠕动变形阶段,滑动面逐渐贯通至 坡脚。第 3 阶段(4.5 kN)为边坡加速滑动阶 段,滑坡变形速率急剧增加。第 4 阶段为剧滑阶 段,失稳时水平位移曲线近乎直立。堆载试验 过程中,可明显观察到滑坡发育及瞬态发生过 程,与自然滑坡漫长发育的渐进性破坏特征和 降雨诱发型滑坡启动的滞后性特征不同,其加



速滑动阶段与剧滑启动的过渡时间极短,滑动面贯通后前缘坡体会迅速解体剪出。

3 数值模拟

在室内试验基础上,建立相同尺寸、材料参数及边界条件的数值计算模型,将试验监测数据和数值模 拟相结合,建立地质体可测物理量(地表位移)和内部破坏状态之间的联系,以实测数据为依据,反演出坡 体位移场、应力场演化过程。

Ζ

3.1 计算模型与方法

3.1.1 计算模型

利用 Midas/GTS—FLAC3D 耦合建模技术建立与室 内模型试验几何尺寸、材料物理力学参数、位移监测点位 置、荷载条件和边界条件完全相同的计算模型,共划分 9 809个节点、8 512 个单元,网格模型如图 5 所示。模型 底部为固定边界约束,四周为滚支边界约束。

考虑土体的非线性本构关系及变形对应力的影响,滑体及滑床采用弹塑性模型,屈服条件采用 Mohr-coulomb

Y X

图 5 网格模型

准则,材料参数取值与模型试验中表 1 相同。滑动面采用 Interface 接触面单元模拟,其计算采用 Mohr-



⁽c)堆载 4.5 kN 时坡脚第 2 道裂缝

Coulomb 本构方程,计算参数见表 2_{\circ}

表 2 接触面模型的计算参数

介质	$k_n/(\mathrm{MN} \cdot \mathrm{m}^{-1})$	$k_s/(\mathrm{MN} \cdot \mathrm{m}^{-1})$	c/kPa	$arphi/(\degree)$
滑动面	2.7	2.7	1.5	24.2

3.1.2 计算方法

根据模型试验应力条件,边坡以自重应力分布为主,首先依据弹性求解法,利用弹性模型计算初始地 应力,计算完成后将速度场和位移场归零。然后输入滑坡模型的计算参数,通过改变滑坡体顶部平台应 力边界条件的方法,模拟在自重和顶部分级加载条件下模型边坡的演化过程。每级荷载作用下以不平衡 力与典型应力的比值小于 1×10⁻⁵ 作为收敛条件,保证滑坡模型内部应力状态充分调整。

3.2 计算结果与分析

3.2.1 监测点位移

由图 6 可知,在每级堆载作用下,数值模拟监测点累 计水平位移与模型试验基本相同,变形演化过程和数码 摄像内容一致,说明数值模拟的边坡动态发展过程与模 型试验相符。

3.2.2 合位移场

主控剖面(Y=40 cm)的合位移场如图 7 所示,堆载 0.75 kN 后,坡顶后缘出现张拉位移,坡脚变形大于坡顶 变形。堆载 1.5 kN 后,坡顶产生垂直方向的压缩变形, 并使坡体向临空方向产生一定的挤出变形,坡顶变形大 于坡脚变形,说明堆载 0.75 kN 时出现的坡脚位移大于



水平位移对比曲线

坡顶的现象主要是由于自重作用造成的。堆载 2.25 kN 后,压缩变形和挤出变形进一步向坡体下部发展,最大累计变形增至 0.4 mm,对应实际边坡的 4 mm,量值较小,但由位移场可知变形已分布在大部分 滑体范围内,说明堆载对于边坡稳定的影响范围极大。堆载 3 kN 后,边坡出现连续位移,累计位移达到 $3\sim4$ mm,上部位移尚未传递至坡脚,滑动面未贯通。堆载 3.75 kN 后,滑面范围内坡体位移接近一致, 滑动面基本贯通,坡脚位移增幅较大。堆载 4.5 kN 后,滑动面贯通,累计位移达到 40~50 mm,对应实际 边坡的 40~50 cm,边坡整体滑移。位移场演化过程中下滑趋势在边坡上部较大,表现出明显的推动式滑 坡的特点。



3.2.3 剪应变增量场

主控剖面(Y=40 cm)的剪应变增量场如图 8 所示,堆载 0.75 kN 后,坡顶后缘和坡脚前缘出现剪应 变,说明滑动面后缘附近的岩土体首先由于堆载出现应变,坡脚剪应变则主要是自重作用的结果,与位移 场表征的结果相同。堆载 1.5 kN 后,顶部表面土体出现挤压剪应变,但未对滑面造成明显影响,且对上 部滑床有挤压作用,与堆载初期的垂向压缩变形一致。堆载 2.25 kN 后,剪应变开始沿滑面向下发展,坡 体应变范围有所增大。堆载 3 kN 后,剪应变进一步沿深度和临空面方向发展。堆载 3.75 kN 后,坡脚剪 应变分布状态改变,坡脚附近滑动面上下开始出现新的剪应变,说明滑动面此时基本贯通,但边坡中下部 滑面处未出现明显的应变分布,说明在堆载作用下,坡脚也是容易出现破坏的部位。堆载 4.5 kN 后,边 坡整体范围均出现剪应变分布,同时上部和下部的剪应变比中部要高,说明堆载挤密和坡体重心下移对 中部抗滑段有利。剪应变增量场发展过程与位移场特征一致,与试验过程中坡顶压缩、坡面裂缝、结构面 滑移、坡脚碎裂解体现象相符。



图 8 边坡剪应变增量场演化过程(10⁻³)

由位移场和剪应变增量场演化规律可知,堆载边坡与牵引式滑坡不同,堆载初期的坡顶变形对堆载 作用更为敏感,主要表现为垂向压缩变形,堆载量增大后边坡变形逐渐变为以向临空面的挤出变形为主。 滑面贯通后,坡脚变形变得对堆载作用同样敏感,坡脚鼓胀变形后很快解体剪出,因此堆载诱发型滑坡属 于推动式滑坡。

4 结论

(1)堆载诱发型滑坡的空间变形演化规律可归纳为:后缘压缩阶段→蠕动变形阶段→加速滑动阶段
→剧滑阶段。数值模拟的位移场和剪应变增量场表现为从坡顶压缩变形开始,逐渐沿深度和临空面方向
发展,最后形成推动式滑坡的特征,与模型试验变形过程相符。

(2)滑坡灾害中,构筑物的破坏主要发生在边坡的加速滑动和剧烈滑坡阶段。堆载诱发型滑坡与自 然滑坡漫长发育的渐进性破坏特征和降雨诱发型滑坡启动的滞后性特征不同,其剧滑启动之前的加速滑 动时间极短,滑动面贯通后前缘坡体会迅速解体剪出。因此该类滑坡的预测预报工作应重视趋势预报和 始滑预报,在坡体尤其是坡脚部位产生持续水平位移时,即应做出始滑预报。

参考文献

[1]王恭先,徐峻龄,刘光代,等.滑坡学与滑坡防治技术[M].北京:中国铁道出版社,2004.

[2] 宋磊,左三胜,丁军,等. 四川都江堰红梅村滑坡复活成因与机制分析[J]. 中国地质灾害与防治学报,2012,12(6):34-37.

(下转第92页)

Disruption Management for Permutation Flowshop Problem with New Orders Arrival

Liu Yajing¹, Zhao Qinan², Wang Jianjun¹

(1. Institute of Systems Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China;

2. School of Public Management & Law, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

Abstract: In Permutation flowshop scheduling, the initial schedule is obtained via minimizing the makespan. A set of new arrival jobs make the initial schedule not optimal or feasible. Initial scheduling should be revised to trade off the original objective and deviation cost, and a bi-objective disruption management model is built up. Given the characteristics of the model and the complication of the problem, with concern of the Particle Swarm Algorithm with strong global search ability and the Pareto solutions with excellent comprehensive properties obtained by the Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II), we propose the Hybrid Particle Swarm Optimization algorithm (HPSO) to obtain the (approximate) optimal solutions. By solving bi-objective flow shop problems in classic literatures and randomly generated flowshop problems with new arrival orders, the proposed HPSO outperforms NSGA-II and MOPSO is verified as an effective approach to coping with disruptions.

Key words: disruption management; rescheduling; new orders arrival; Pareto fronts; hybrid algorithm

[3] 石建勋,刘新荣,廖绍波,等. 矿区排土场堆载对边坡稳定性影响的分析[J] 采矿与安全工程学报,2011,28(2): 258-262.

[4] 张保军,李振作,程俊祥卫,等. 茅坪与新滩滑坡体变形机理类比研究[J] 长江科学院院报,2008,25(1):40-43.

[5] 孙红月,吕庆. 高填方路基诱发滑坡机理分析[J]. 自然灾害学报,2006,15(5):168-171.

[6] 董夫钱,缪志顺,吕庆,等. 公路堆载诱发型滑坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(增1):4517-4520.

[7] 雍睿,胡新丽,唐辉明,等. 推移式滑坡演化过程模型试验与数值模拟研究[J]. 岩土力学,2013,34(10):3018-3027.

[8] 陈春利,李同录,贺凯,等. 人工堆载诱发黄土滑坡失稳机制分析[J]. 中国地质灾害与防治学报,2014,25(1):1-5.

[9] 刘悦,黄极兵. 模拟堆载作用的黄土边坡土体变形机理试验[J] 地球科学与环境学报,2007,29(2):183-187.

[10]王洪兵,姚磊华,文海. 基于 FLAC3D 进行堆载作用下边坡稳定分析[J]. 勘察科学技术,2012(4):5-10.

Model Test Study of Deformation Mechanism of Landslide Induced by Loading

Hu Tianfei

(Graduate Faculty, China Academy of Railway Sciences, Beijng 100081, China)

Abstract: Based on the model test, this paper studies the deformation mechanism and evolutionary process of landslide induced by accumulation load. The research results indicate that: (1) the evolutionary process of landslide induced by loading can be summarized as: trailing edge compression phase \rightarrow creeping slip phase \rightarrow accelerated slip phase \rightarrow overall slip phase, the transition time of accelerated deformation before overall slip was very short. (2) the evolutionary process is simulated by FLAC3D, the evolutionary characteristics of stress field and displacement field are consistent with the model test, characterized by damaging from top to bottom gradually. (3) the failure process of landslide induced by loading has short duration and strong burst, therefore early warning should be sounded when continuous displacement at slope toe occur.

Key words: loading; landslide; deformation mechanism; evolutionary process; model test; numerical simulation