

交通荷载作用下堆积层边坡稳定性试验研究

贾玉跃, 吕伟, 贺可强, 刘俊伟, 崔林, 于秀霞

(青岛理工大学土木工程学院, 山东青岛 266520)

摘要: 为探究交通荷载下堆积层边坡的破坏模式及抗滑桩的加固效果, 通过室内相似试验, 开展有抗滑桩和无抗滑桩两组堆积层边坡模型试验, 研究了坡体表面不同位置处的加速度响应和坡体内部的动土压力响应以及抗滑桩桩身的弯矩响应规律, 并结合 DIC 技术, 研究了交通荷载施加过程中坡面的应变场和运动场情况。试验结果表明: 交通荷载作用下, 无抗滑桩支护的堆积层边坡堆积体动力响应存在趋高趋表效应, 坡顶位置响应最为强烈, 因此靠近坡顶位置应作为重点防护位置; 堆积层边坡上部最先出现应变集中区域, 裂缝形态呈“局部单一”特征, 破坏时边坡表面出现张裂和崩塌, 裂缝表现出“交错溃散”的特征; 抗滑桩支护后堆积层边坡稳定性明显提升, 边坡整体性增加, 边坡的动态响应更易传递; 动力荷载的幅值会影响土压力与加速度的相应幅值, 呈正相关, 与动力荷载加载点的距离呈负相关。

关键词: 交通荷载; 抗滑桩; 数字图像相关 (DIC) 技术; 动力响应; 边坡稳定

中图分类号: TU473.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2023)03-0065-09

Experimental Study on Slope Stability of Accumulation Layer Under Traffic Load

JIA Yuyue, LV Wei, HE Keqiang, LIU Junwei, CUI Lin, YU Xiuxia

(School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao, Shandong 266520, China)

Abstract: To explore the failure modes of slopes consisting of accumulation layers under traffic loads and the reinforcement effect of anti-slip piles, two groups of accumulation layer slope model tests were conducted, one with anti-slip piles and the other without, through indoor similarity experiments. The acceleration response at different positions on the slope surface, the earth moving pressure response inside the slope, and the bending moment response of the anti-slip pile body were studied. The Digital Image Correlation (DIC) technology was used to analyze the strain field and motion field of the slope during the application of traffic loads. The test results show that, under traffic loads, the dynamic response of the accumulation body slope without anti-slip pile support exhibits a surface effect with a tendency for higher response at the surface. Therefore, the position near the top of the slope should be used as a key protection position. The upper part of the slope of the accumulation layer first exhibits a strain concentration area, and the fracture morphology is characterized by "local single". When the slope fails, tensile and collapse occur on the slope surface, and the cracks show the characteristics of "staggered collapse". After anti-slip pile support, the stability of the accumulation layer slope is significantly improved, the integrity of the slope is increased, and the dynamic response of the slope is easier to transmit. The amplitude of the dynamic load affects the corresponding amplitude of the earth pressure and acceleration, which is positively correlated and negatively correlated with the distance from the dynamic loading point.

Keywords: traffic loads; anti-slip piles; digital image correlation (DIC) technology; dynamic response; stable slope

收稿日期: 2023-01-15

修稿日期: 2023-02-27

基金项目: 国家自然科学基金(42277135); 山东省优秀青年人才基金(ZR2021YQ31); 国家自然科学基金联合基金重点项目(U2006225); 山东省海外高层次人才工作站

作者简介: 贾玉跃(1986—), 男, 博士研究生, 主要从事岩土与桩基工程研究工作。E-mail: jiayuyue@qut.edu.cn

通讯作者: 刘俊伟(1983—), 男, 博士, 教授, 主要从事近海岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: liujunwei@qut.edu.cn

边坡发育过程中会产生向下运动的趋势,在边坡内布置抗滑桩,可阻碍其滑动,将滑坡体的推力通过抗滑桩传至下方基岩,从而形成桩土作用体系。国内外学者针对边坡-抗滑桩体系进行了大量的研究。理论方面,Kamran Panaghi 等^[1]、严秋荣^[2]研究了岩土体参数和其本构原理对坡体稳定性的影响。夏海波^[3]、龚晓南^[4]、谢和平等^[5]推导和构建出结构物与地质岩土体的组合力学方程,并建立了桩顶水平位移与抗滑桩水平承载力之间的联系。试验方面,席强^[6]、于玉贞等^[7]等进行离心试验总结出抗滑桩与桩周土体的受力变形特点。王超^[8]、李哲等^[9]基于室内模型试验,以透明土代替天然砂土建立了桩-土体可视化模型,直观地反映出桩土协同作用下的破坏特征。数值模拟方面,Jeong S 等^[10]、Wei 等^[11]、胡时友等^[12]对抗滑桩加固滑坡的过程进行了三维有限元模拟,分析了其单桩效应、群桩效应和桩土体的应力应变关系。

以上多是静力条件下。Hardy 等^[13]假设交通附加动力为正弦方程,并研究了对路面的影响,但是未涉及路面以上边坡的动力响应问题;Jones 等^[14-15]采用 Fourier 变换研究了矩形荷载、条形荷载作用下的地基响应,但是交通荷载不仅为矩形和条形荷载的形式。Hung Wenyi 等^[16]采用离心机试验研究了地震与降水影响下的砂质堆积体稳定性,发现振动、降水对坝体稳定性影响显著。刘美辰等^[17]基于 DIC 技术开展振动台试验,分析了含水堆积坝的振动破坏规律。

然而,国内外对各类型边坡的研究成果日益丰富,但关于竖向荷载下堆积层边坡的稳定性研究较少,尤其是结合数字图像技术研究堆积层边坡表面破坏过程的成果鲜有报道。为研究竖向交通荷载下

堆积层边坡的稳定性及抗滑桩的支护效果,本文结合 DIC 技术开展了交通荷载下堆积层边坡稳定性模型试验,分析了土压力、加速度和坡面应变响应,得到了加载过程中坡面的应变场和裂缝发展过程,对比了抗滑桩加固前后边坡的稳定性,为 DIC 技术应用于边坡工程提出了良好的建议。

1 工程背景

本次研究取青岛市崂山区一典型堆积层边坡。滑坡位于返岭前村,中心经纬度为东经 120°40'49.31",北纬 36°50'50.11",面积约 0.25 km²。总体地形为前缘较缓,中后部较陡的斜坡地形。省道 212 公路在 22 m~27 m 高程处由东北向西南横穿该滑坡体。



图 1 返岭前滑坡位置图

区内地层出露比较简单,从老至新依次为中生界白垩系下统莱阳群止凤庄组(KIZ)、新生界第四系全新统山前组(QS)。滑坡区内上部地段可见基岩出露,岩性为燕山晚期花岗岩($\gamma 35$),滑坡体附近一般有厚约 3 m~6 m 残坡积物覆盖,植被较发育,或为梯田,上部基岩裸露。综合地层柱状剖面图见表 1。

表 1 综合地层柱状剖面

年代地层				岩石地层		柱状图	厚度/m	岩性描述
界	系	统	群	组	代号			
新生界	第四系	全新统	山前组	QT	QY		QY 中积相 黄色、灰黄色含砾混粒砂,厚 2.5 m	
				QS	QXk		QXk 滨海相 灰黄色、浅灰白色细砂、中细砂、含细砾砂及少量淤泥层,厚 20 m	
QL		QT 洪积相 黏土质砂质砾石,厚 5 m						
QS		QL 冲积相 褐黄色、灰黄色黏土质粉砂、含砾中粗粒砂、黏土,厚 16 m						
中生界	白垩系	下白垩统	莱阳群	止凤庄组	KIZ		>1116.2 青灰色角岩化细粒长石砂岩夹青灰色角岩化细砂质粉砂岩、粗粒长石砂岩、含砾中粗粒长石砂岩、中细粒长石砂岩、粉砂质细粒长石砂岩	

边坡现在已有明显的滑动变形迹象,导致公路

路面靠近后缘一侧发生了较明显的蠕动变形,出现

数据采集系统及测试元件主要包括土压力盒,应变片,加速度传感器(如图 5 所示)以及 DIC 位移监测系统。其中土压力盒用来监测边坡内部的动土压力,桩身粘贴应变片以获取施加交通荷载过程中抗滑桩的弯矩响应,加速度传感器测量坡面不同位置的加速度响应;DIC 设备(Digital Image Correlation, i. e. DIC)是一种三维、全场、无接触测量任何材料物体轮廓、位移、振动和应变的光学测量系统。在本次试验中主要用来监测边坡表面位移及裂缝的产生情况。

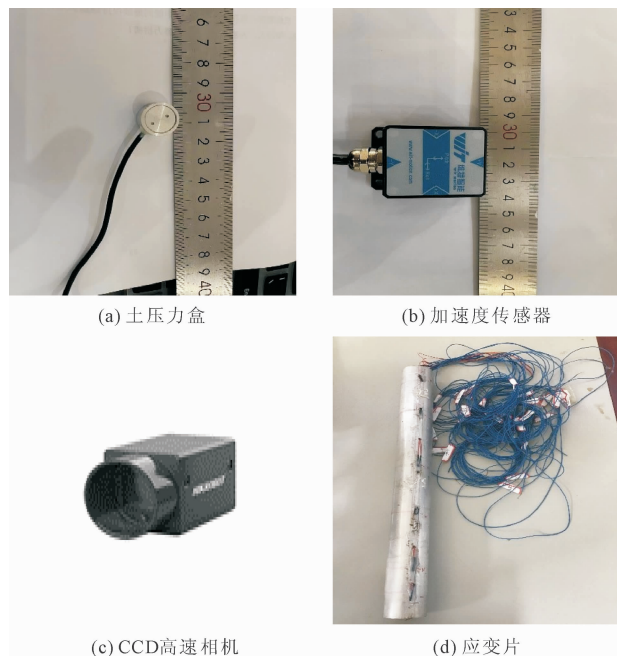


图 5 监测元件

2.4 监测方案

加载位置下方每隔 5 cm 埋设土压 P1、P2、P3、P4;坡顶、坡中和坡脚分别粘贴加速度传感器,监测坡面不同位置的加速度响应;抗滑桩桩身粘贴应变片;边坡表面采用 CCD 高速相机进行拍摄(见图 6),图像用 DIC 技术进行处理。

根据现有的循环加载模式,本次试验采用正弦波荷载来模拟交通荷载^[18],其动载表达式为:

$$F(a) = P_a + P_b \sin \omega t \quad (1)$$

式中: P_a 为车轮荷载, P_b 为振幅, ω 为振动频率。

采用作动器进行加载,为了更好的模拟公路,在边坡平台上放置木板,作动器加载于木板上。

2.5 基岩制作过程

首先进行下方基岩的填筑,将模拟材料放入搅拌机,加水搅拌均匀后填入模型箱,每 5 cm 使用橡胶锤进行夯实,共填 40 cm,随后进行堆积层边坡的

填充。在侧壁上用马克笔画出边坡的形状和几何尺寸后,将堆积层模拟材料填入模型箱。每隔 5 cm 使用橡胶锤夯实一次。填筑过程中分别在深 5 cm、10 cm、15 cm、20 cm 处埋置土压力盒。边坡制作完后养护一周。

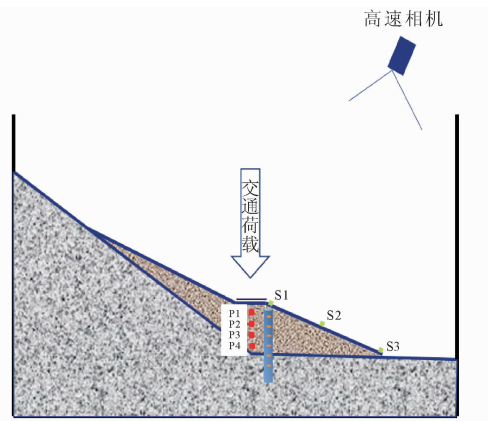


图 6 模型试验监测示意图

由于堆积层边坡结构过于松散,无法像其他固体材料(如混凝土、岩石)在表面喷涂哑光漆制作散斑,本次模型试验采用图钉作为标记点,为保证采集图像的质量,使标记点和边坡的对比更明显,使用黑色墨水喷涂坡面,使用白色聚乙烯染料对图钉进行染色,如图 7,将图钉按矩阵排布扎于坡面上。



图 7 坡面追踪点排布

3 交通荷载下堆积层边坡稳定性模型试验结果分析

3.1 堆积体边坡破坏分析

3.1.1 土压力响应

不同深度处的土压力响应如图 8 所示。可以看出无论交通荷载多少,埋深较浅处(埋深 5 cm ~ 10 cm),衰减速率较慢,2 kN 时衰减了 17.8%,3 kN 时衰减了 15.54%,4 kN 时衰减了 19.8%。随后衰减加速,到达较深处衰减速率再次减慢。另外,不同交通荷载下,可以发现随着峰值荷载的增加,同一深度处的土压力也随之增加,埋深 5 cm 处,土压力分别增加了 46.72%、25.86%,埋深 15 cm 处,随着埋

深的增加,土压力的增加幅度减小,埋深为 15 cm 时,土压力分别增加了 40.87%、20.05%,究其原因,是由于随着交通荷载的不断增大,堆积层变得更加密实,从而使土压力难以传递到深处。

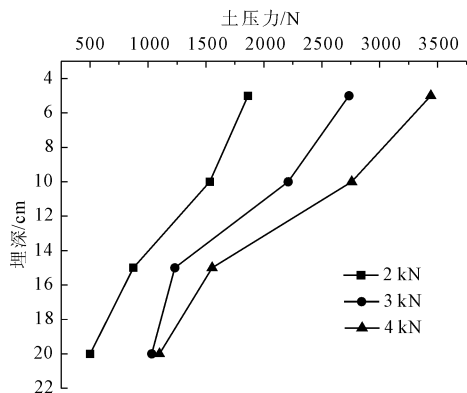


图8 不同荷载下无桩边坡动土压力响应

3.1.2 加速度响应

坡顶和坡脚的 z 方向的加速度-循环时间曲线如图9所示。

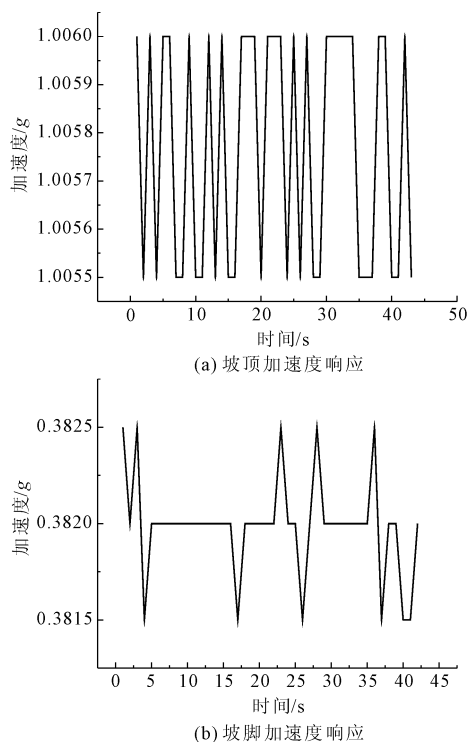


图9 交通荷载下无桩边坡加速度响应

由图9可知,给边坡施加交通荷载时,坡顶和坡脚的加速度呈半弦波变化,峰值较稳定,维持在 $1.006g$ 之内。坡顶加速度的变化周期较小,每加载 1~2 个循环,坡顶加速度便会出现峰值或谷值。坡脚加速度波动更小,维持在 $0.3825g$ 之内,循环周期

更长,以 $0.382g$ 为中线波动。坡顶峰值加速度为 $1.0065g$,坡脚峰值加速度为 $0.3825g$,这主要是由于交通荷载在边坡土体内具有一定的加速度的高程效应,坡顶对加速度响应有较大的高程放大作用,因此该边坡坡顶处应采取防护措施,如增设锚杆、微型桩等支护结构。

3.1.3 坡面应变响应

试验每次加载后,对坡体表面进行观察记录。0.5 kN~5 kN 加载期间,坡面无明显现象。当加载至 5 kN 时,坡面开始出现裂缝,并不断发展,直至最后裂缝交错溃散,坡面张裂崩塌。

为探究边坡的破坏过程及破坏模式,对施加的峰值荷载为 5 kN 时边坡表面 X 方向和 Y 方向的应变场进行了分析,如图10和表4。

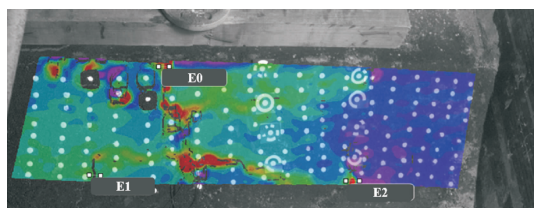


图10 裂缝位置

在裂缝发展阶段,如图10所示,出现 E0, E1, E2 三条裂缝。E0 贯通基本整个坡面, E1 和 E2 位于坡脚处。峰值荷载为 5 kN 时,不同循环次数下边坡表面 X 方向和 Y 方向应变场如图11所示。坡面首先出现应力集中,随着循环加载的继续,坡面中部出现裂缝,并不断向坡顶和坡脚延伸,最终形成裂缝 E0。加载至第7个循环时,坡体有迁移趋势,坡脚出现应力集中现象,加载至第8个循环时,坡脚出现裂缝。第10个循环时,坡面产生剪切裂隙,裂缝贯通,产生局部崩塌,示踪点发生缺失,边坡发生滑坡。

可以看出无桩边坡在交通荷载下的破坏过程可分为4个阶段:

(1) 振动密实阶段。试验初期阶段,坡体的破裂尚未开始,损伤尚未发展,坡体表面无裂隙生成,堆积体因振动变得密实。

(2) 应变累积阶段 ($N=2\sim7$)。该阶段堆积体边坡损伤开始逐渐发展。此阶段初期,堆积层边坡上部出现应变集中区域,这是由于堆积体动力响应存在趋高趋表效应,坡顶位置响应最为强烈的缘故,交通荷载作用下靠近坡顶位置应作为重点防护位置。

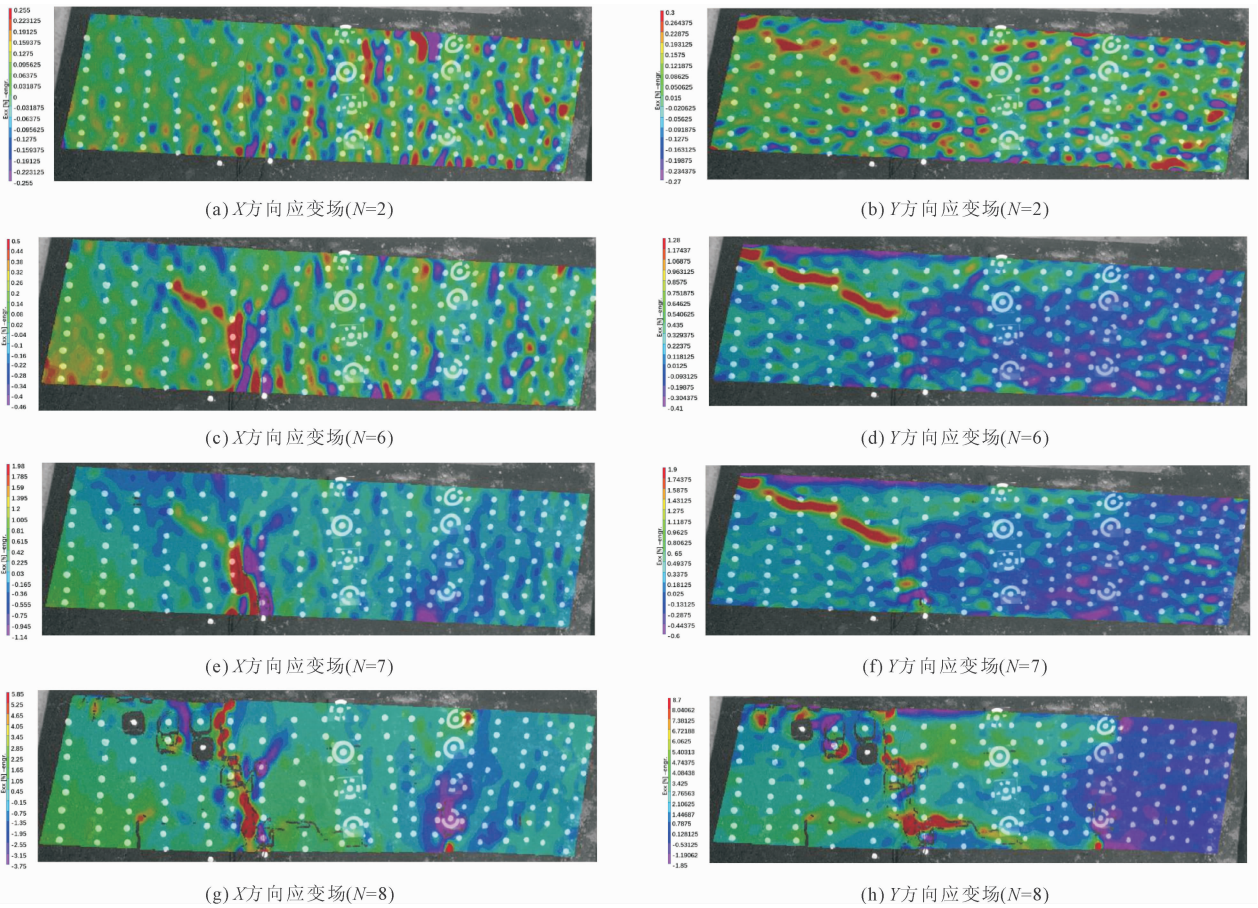


图 11 边坡表面应变场

(3) 裂缝扩展阶段($N=7\sim 8$)。该阶段堆积层边坡表面逐渐达到新的应力平衡,新的有一定规律的高应变带出现,局部化带宽度明显增加,并扩展至整个试样上下,能够清晰地表示裂隙的扩展过程。

(4) 裂缝贯通阶段。裂隙相互贯通并向坡脚延伸,堆积体存在大量裂隙,最终裂缝贯通,边坡表面出现张裂和塌陷,边坡发生破坏。

为更深入了解交通荷载下堆积层边坡的破坏过程,对边坡运动变化情况进行分析,图 12 为峰值荷载 5 kN 时,边坡表面的运动场。箭头长短代表位移的大小。如图 12(a)所示,第一个循环加载后,加载中心最先开始发生位移,边坡边缘处未移动。距离加载中心位置越近,位移越大,整体位移场呈现从中间到两边逐渐减小的趋势。加载至第 10 个循环时(如图 12(b)),坡面破裂。相比于一个循环加载状况,箭头长度明显增长,坡面整体出现位移,加载中心处位移最大,水平方向上,由加载中心至两侧位移逐渐减小,竖直方向上,由坡顶到坡脚,位移逐渐增大。由此可见,随着加载循环次数的增加,边坡的位移逐渐增大,且位移最大处主要位于交通荷载施加

处一定范围内。

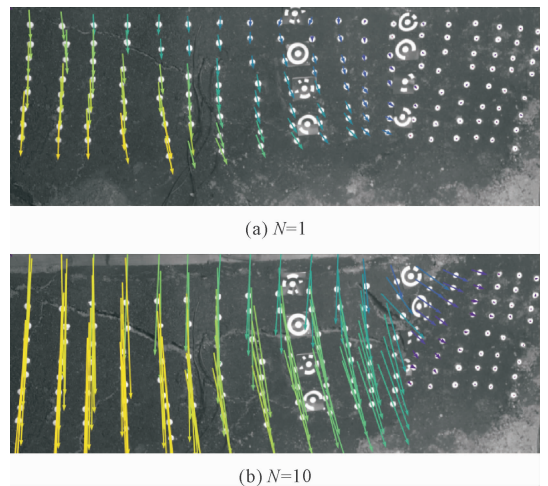


图 12 边坡表面运动场(5 kN)

3.2 抗滑桩加固后堆积层边坡稳定性分析

为探究抗滑桩加固后堆积层边坡的稳定性及桩土相互作用,在边坡中放入抗滑桩后再对其进行加载。Ito 等^[19]、Lee 等^[20]、Hassiotis 等^[21]通过 Bishop 法和莫尔圆破坏公式推导确定出上部为软岩下伏硬

岩的堆积层滑坡最优加固桩位在坡中和坡顶之间,均质土坡最有效的抗滑桩布设位置为坡顶处,陡坡的最优桩位为坡顶处,总体来看当抗滑桩布设于边坡坡中和坡顶对边坡稳定性的影响最大。因此,本次试验抗滑桩设于坡顶处。

3.2.1 桩身弯矩响应

图 13 为不同循环荷载作用下桩身弯矩随埋深变化曲线。可以看出,桩身弯矩分布沿桩身向下呈现出先增大后减小的趋势,最大弯矩位置保持在土体表面以下 3 倍桩径处,桩身弯矩随峰值荷载的增加而增大,弯矩的增加幅度也随峰值荷载的增加而增大。各级荷载下最大弯矩分别为 41.65 N·m、42.42 N·m、43.54 N·m、44.96 N·m、51.81 N·m。

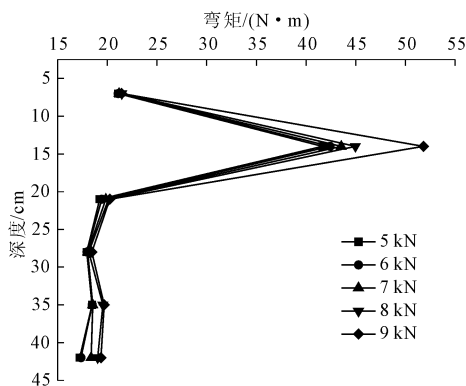


图 13 不同荷载下桩身弯矩响应

3.2.2 动土压力响应

抗滑桩加固后,边坡土压力响应如图 14 所示。随埋深不断衰减,衰减速率呈先增大后减小的趋势。随着峰值荷载的增大,土压力不断增大,由于堆积层被压密,影响了竖向荷载的传递,土压力增大幅度减小。在较浅处,相同荷载下抗滑桩加固后的边坡动土压力响应比未被抗滑桩加固的边坡更小,抗滑桩的存在增加了边坡的整体性,对交通荷载起到更好的分散作用,减少了应力集中和累积,从而限制了竖向土压力的传递。

3.2.3 加速度响应

各荷载量级下 S1、S2、S3 处的 X 方向的加速度响应如图 15 所示。峰值荷载为 6 kN 时,S1、S2、S3 处的加速度随时间的变化趋势较为缓和,最大加速度分别为 1.49g、1.18g、1.33g。随着峰值荷载的增大,加速度波动也随之变大,边坡稳定性有所下降。

对于 X 方向,随着施加峰值荷载的增大,其振动响应越来越明显,加速度幅值也越大,加速度幅值

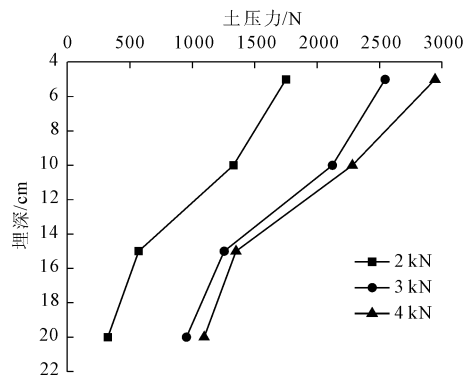


图 14 抗滑桩加固后不同荷载下动土压力响应

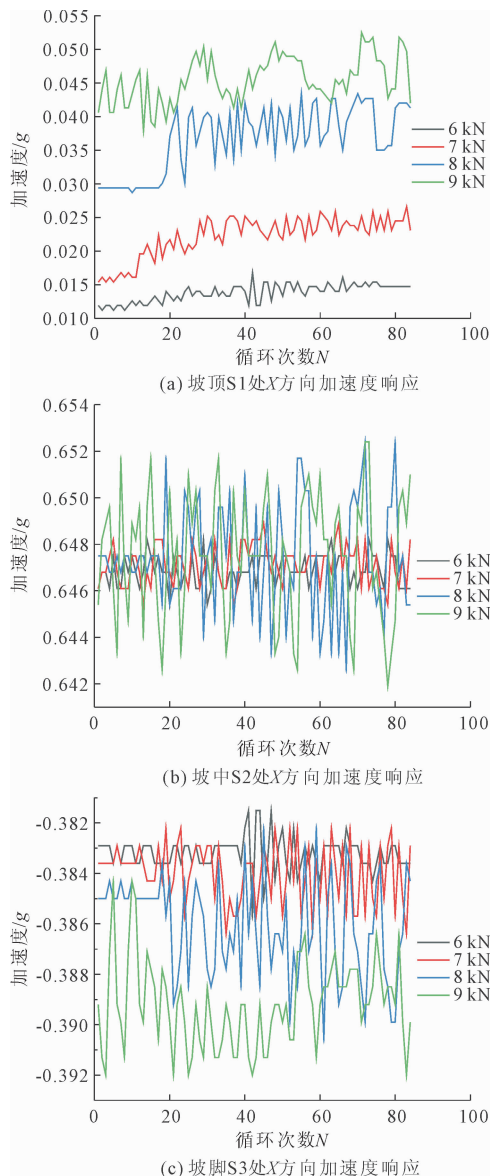


图 15 不同位置处 X 方向加速度响应

$S2 > S3 > S1$,表明边坡中部临空位置较两边的振动响应更加强烈,主要是由于振动时土体的滑移趋势使得加速度较大。随着坡高的增加,加速度幅值逐

渐变小,因此在边坡中部和坡脚附近更易发生自然灾害。

Z 方向波的传播规律与 X 方向相似,如图 16 所示,总体表现为随着峰值荷载的增加,其振动响应增强的趋势,加速度幅值 $S1 > S3 > S2$ 。在边坡坡顶处的振动响应最为强烈,表现为易发生垂直力作用下的自然灾害,如整体性崩塌。

通过曲线还可以看出,垂直向的加速度响应明显大于水平向,表明边坡受垂向力的作用更加明显。随着循环次数的增加,加速度峰值不断增加。抗滑桩加固后的边坡测得的动态响应明显大于无抗滑桩的边坡,抗滑桩的存在提高了边坡的整体刚度,有利于坡体动态响应的传递。

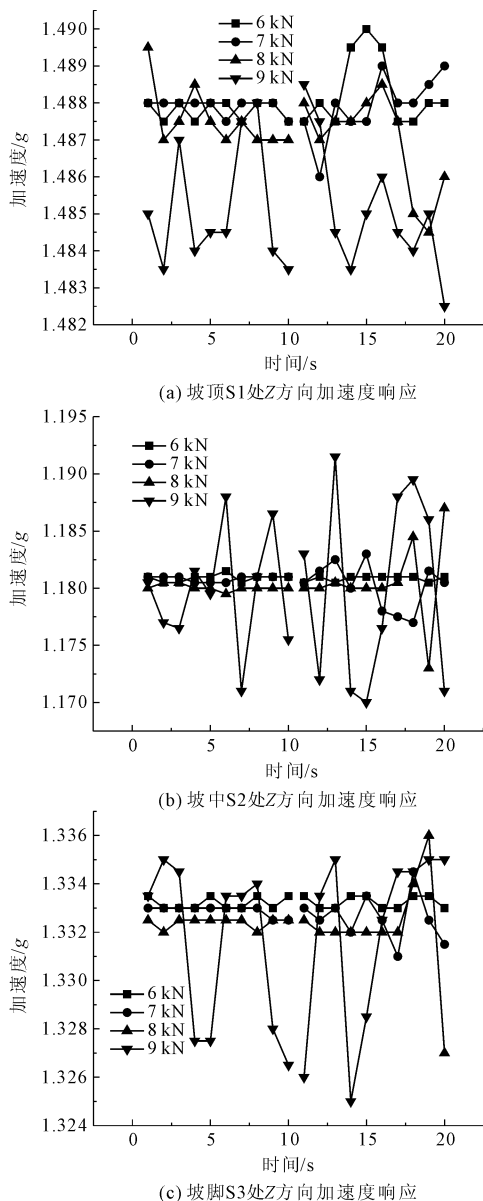


图 16 不同位置处 Z 方向加速度响应

3.2.4 坡面应变响应

对抗滑桩加固下边坡表面的应变响应进行分析,坡面的应变场如图 17 所示。

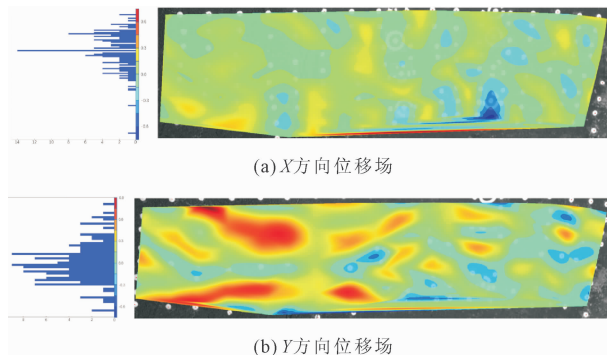


图 17 抗滑桩加固后边坡位移场

峰值荷载为 5 kN 时,坡面整体处于平稳状态,位移场非常小,几乎可以忽略不计。边坡表面各部分应变较无桩边坡也非常小,边坡只经历了振动压实阶段和应变累积阶段。这主要是因为抗滑桩能承担并分担边坡堆积层的下滑力,使边坡整体水平位移减小,有效地限制边坡上方堆积体的滑移,减少交通荷载作用下边坡发生失稳的风险。可见交通荷载下,边坡经抗滑桩加固后边坡承载能力可以得到显著提升,堆积层边坡的稳定性大大提高。

4 结论

为了解交通荷载下抗滑桩加固堆积层边坡的抗滑机理及堆积层边坡的动力响应规律,本文进行了抗滑桩加固前后交通荷载下堆积层边坡的稳定性模型试验研究,主要得到以下结论:

(1) 堆积层边坡在交通荷载下的破坏过程可分为 4 个阶段,应变局部化现象是堆积层边坡局部发生变形破坏的前兆。

(2) 交通荷载作用下,无抗滑桩支护的堆积层边坡堆积体动力响应存在趋高趋表效应,坡顶位置响应最为强烈,因此靠近坡顶位置应作为重点防护位置。堆积层边坡上部最先出现应变集中区域,裂缝形态呈“局部单一”特征,破坏时,边坡表面出现张裂和崩塌,裂缝表现出“交错溃散”的特征。

(3) 抗滑桩支护后堆积层边坡稳定性明显提升。未支护抗滑桩时,坡面运动场较明显,整体呈现由加载点至两侧减小的趋势,加载至 5 kN,边坡发生破坏;支护抗滑桩后,坡面运动场较小,加载至 9 kN 时,边坡依旧没有破坏趋势。

(4) 在交通荷载作用下,未支护抗滑桩时,坡面

加速度的高程效应明显;支护抗滑桩后,边坡整体性增加,加速度响应明显提升,在坡面不同位置,加速度响应呈现随高程先增大后减小的趋势。

(5) 加速度响应、动土压力响应与应变响应与动力荷载特性相关,动力荷载的幅值会影响土压力与加速度的相应幅值呈正相关,与动力荷载加载点的距离呈负相关。

参考文献:

- [1] Panaghi K, Mahboubi A. Analysis of the effects of soil behavior law on the transfer and impedance functions in soil-pile interaction models[J]. *Advances in Analysis, Modeling & Design*, 2010(49):2982-2991.
- [2] 严秋荣. 堆积体边坡扰动带变形机理及抗滑桩支护新方法研究[D]. 重庆:重庆大学,2016.
- [3] 夏香波. 基于应变楔理论的护壁抗滑桩计算及桩前被动土拱效应研究[D]. 西安:长安大学,2017.
- [4] 龚晓南. 桩基工程手册[M]. 第2版. 北京:中国建筑工业出版社,2016.
- [5] 谢和平,陈忠辉,周宏伟,等. 基于工程体与地质体相互作用的两体力学模型初探[J]. *岩石力学与工程学报*,2005(9):1457-1464.
- [6] 席强. 抗滑支挡结构离心模型试验与计算分析[D]. 成都:西南交通大学,2009.
- [7] 于玉贞,邓丽军. 抗滑桩加固边坡地震响应离心模型试验[J]. *岩土工程学报*,2007,29(9):1320-1323.
- [8] 王超. 抗滑桩与土微观相互作用机理的研究[D]. 成都:西南交通大学,2019.
- [9] 李哲,朱振国,张娟,等. 黄土边坡悬臂式与全埋式单桩抗滑桩现场模型试验[J]. *公路交通科技*, 2020,37(8):32-40.
- [10] Jeong S, Kim B, Won J, et al. Uncoupled analysis of stabilizing piles in weathered slopes[J]. *Computers and Geotechnics*, 2003,30(8):671-682.
- [11] Wei W B, Cheng Y M. Strength reduction analysis for slope reinforced with one row of piles [J]. *Computers and Geotechnics*, 2009,36(7):1176-1185.
- [12] 胡时友,蔡强,李乾坤,等. 抗滑短桩加固滑坡体模型试验三维数值模拟分析[J]. *工程地质学报*,2018,26(4):969-977.
- [13] Hardy M S A, Cebou D. Importance of speed and frequency in flexible pavement response [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1994,120(3):463-482.
- [14] Jones D V, Petyt M. Ground vibration in the vicinity of a rectangular load on half space [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1993,166(1):141-159.
- [15] Jones D V, Petyt M. Ground vibration due to a rectangular harmonic load [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1998,212(1):61-74.
- [16] Hung Wenyi, Tran Minhcanh, Yeh Fuhsuan, et al. Centrifuge modeling of failure behaviors of sandy slope caused by gravity, rainfall, and base shaking [J]. *Engineering Geology*, 2020,271:105609.
- [17] 刘美辰,赵怡晴,金爱兵,等. 基于DIC的含水尾砂堆积坝振动破坏研究[J]. *金属矿山*,2022(1):221-230.
- [18] Zhuang Yan, Wang Kangyu. Finite element analysis on the dynamic behavior of soil arching effect in piled embankment [J]. *Transportation Geotechnics*, 2018,14:8-21.
- [19] Ito T, Matsui T. Methods to estimate lateral force acting on stabilizing piles [J]. *Soils and Foundations*, 1975,15(4):43-59.
- [20] Lee C Y, Hull T S, Poulos H G. Simplified pile-slope stability analysis [J]. *Computers and Geotechnics*, 1995,17(1):1-16.
- [21] Hassiotis S, Chameau J L, Gunaratne M. Design method for stabilization of slopes with piles [J]. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 1997,125(4):314-323.