

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201911049

循环荷载作用下三明治形加筋土挡墙的模式 试验与数值模拟*

齐 添¹, 王亚伟², 丁光亚³, 颜思琪⁴

(1. 广州环保投资集团有限公司, 广东 广州 510330; 2. 广州环投花城环保能源有限公司, 广东 广州 510830;
3. 温州大学建筑工程学院, 浙江 温州 325035; 4. 上海大学力学与工程科学学院, 上海 200444)

摘要: 为研究循环荷载作用下三明治形加筋土挡墙的受力特性, 进行了一系列砂土加筋土挡墙和三明治形加筋土挡墙的动加载室内模型试验。针对不同的加载特征, 分析加筋土挡墙的变形和应力响应。采用FLAC3D建立三明治形加筋土挡墙的数值计算模型, 通过与模型试验的对比, 验证了计算模型的可靠性, 分析了循环荷载下挡墙的变形、加速度和潜在破裂面。研究表明: 三明治形加筋土挡墙变形与竖向土压力随荷载幅值、荷载频率和激振器个数的增加而增大; 荷载对土压力的影响随距振源距离的增大而减小; 相同加载条件下, 三明治形挡墙的顶部沉降更大; 随着挡墙高度的增加, 土压力的振动幅值逐渐增大, 土压力峰值减小; 挡墙沉降并非成层均匀沉降, 内部分层沉降出现双峰值; 随墙高减小加速度衰减, 加速度峰值在挡墙上部的平均衰减率最大; 三明治形加筋土挡墙与砂土加筋土挡墙破裂面位置相近。地面交通荷载引起的振动对挡墙结构产生不利影响是加筋挡墙的研究重点。

关键词: 循环荷载; 模型试验; 数值模拟; 加筋土挡墙

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)06-1339-11

Model Test and Numerical Analysis of Sandwich-shaped Reinforced Retaining Wall under Cyclic Loading

QI Tian¹, WANG Yawei², DING Guangya³, YAN Siqu⁴

(1. Guangzhou Environmental Protection Investment Group Co., Ltd., Guangzhou 510330, China;
2. GZEPI Huacheng Environmental Protection Energy Co., Ltd., Guangzhou 510830, China;
3. College of Architecture and Civil Engineering, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China;
4. School of Mechanics and Engineering Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: In order to study the characteristics of a sandwich-shaped reinforced retaining wall under cyclic loading, a series of dynamic loading indoor model tests on reinforced retaining walls were carried out. Deformation and stress response of two reinforced retaining walls were studied with different loading characteristics. At the same time, the numerical model of the sandwich-shaped reinforced retaining wall was established by FLAC^{3D}. The reliability of the model was verified by comparing with the results of model test. The deformation, acceleration and potential fracture surface of the retaining wall under cyclic loading were analyzed. The results show that the deformation and vertical earth pressure of the sandwich-shaped reinforced retaining wall increase with the increase of load amplitude, vibra-

* 收稿日期:2019-11-18;修回日期:2020-02-04

基金项目:国家自然科学基金项目(51578425)、浙江省自然科学基金项目(LY18E080027)资助

作者简介:齐添(1981—),男,高级工程师,博士。主要从事岩土工程、环保工程等方面的研究。E-mail: zjuqitian@126.com

tion frequency and number of exciters. The influence of load on earth pressure decreases with the increase of the distance to the vibration source. Under the same loading conditions, the top settlement of the sandwich-shaped retaining wall is larger. As the increase of the height of the retaining wall, the vibration amplitude of earth pressure increases gradually and the peak value of earth pressure decreases. The settlement of the retaining wall is nonuniform, and the internal settlement has double peaks. The acceleration decreases as the wall height decreasing. The average attenuation rate of the peak acceleration on the top of the retaining wall is the largest. The location of the potential slip surface of the sandwich-shaped reinforced retaining wall is similar to that of the reinforced retaining wall filled with sand. The adverse effects of vibration caused by ground traffic loads on the structure of retaining walls are the focus of research on reinforced retaining walls. This study is of great significance for understanding the dynamic characteristics of retaining walls and guiding the engineering application of sandwich-shaped reinforced retaining walls.

Keywords: cyclic loading; model test; numerical simulation; reinforced retaining wall

引言

加筋土挡墙因其节约用地、造型美观以及工期较短等优点,被广泛应用于铁路、公路、港口、海堤等岩土工程中,取得了显著的经济、社会和环境效益^[1],国内外学者对加筋土挡墙的工作性能进行了大量研究,推动了加筋土技术在挡墙工程中的应用。

李丽华等^[2]研究了替换加筋材料(单向土工格栅和废旧轮胎)等因素,对墙顶荷载作用下的加筋土挡墙性能的影响。Ch.Zh.Xiao等^[3]研究了墙顶荷载、筋长以及筋材连接方式等因素,对模块式加筋土挡墙极限承载力和面板水平位移的影响。王贺等^[4]指出模块式加筋土挡墙的实测附加应力扩散角基本在 $40^{\circ}\sim 75^{\circ}$ 。杨广庆等^[5]通过3组不同平台宽度的台阶式加筋土挡墙室内模型试验研究了平台宽度对下墙墙体垂直应力的影响。杜运兴等^[6]研究了混合加筋土挡墙(无黏结预应力筋和玻纤格栅交替布置)的力学性能。R.K.Rowe等^[7]指出了对面板水平变形影响最大的材料参数是筋材刚度和回填土摩擦角。周淮等^[8]采用PFC建模,研究了H-V加筋土挡墙的作用机理及破裂面形式。柳军修等^[9]指出刚/柔性组合墙面加筋土挡墙中拉杆刚度对连接件承受荷载的比例起关键作用。F.Song等^[10]采用有限元强度折减法研究了填土黏聚力等因素,对挡墙破坏面位置的影响。A.Ardah等^[11]通过现场监测以及PLAXIS^{2D}有限元模拟对比分析了条形荷载作用下加筋土挡墙结构的受力与变形特性。B.Huang

等^[12]研究了墙趾约束条件对模块式加筋土挡墙性状的影响。H.Liu等^[13]研究了墙背填土、加筋长度、筋材间距、刚度和蠕变速率对加筋土挡墙长期工作性能的影响。

以上均为对墙顶静载作用下各类加筋土挡墙的研究,考虑到公路加筋土挡墙除了承受上部结构静载外,地面交通荷载引起的振动对挡墙结构以及周围环境产生不利影响,加筋土挡墙的动力特性也是研究的重点。杨果林等^[14]研究了动载下加筋土挡墙的累计变形特性,并指出可根据Palmgren-Miner疲劳损伤积累理论计算疲劳损伤。刘泽等^[15]设计并制作了土工格栅包生态袋加筋土模型挡墙,研究了挡墙在重复交通荷载作用下的动力特性和累积变形发展的规律。王家全等^[16]通过室内大模型试验研究了交通荷载作用下模块式加筋土挡墙的动力响应。赵晓彦等^[17]研究了台阶式加筋土挡墙在铁路荷载作用下潜在破裂面的位置和形状。F.Tatsuoka等^[18]通过现场试验分析了加筋土挡墙加速度、动土压力及面板变形等规律。从已有文献可以看出,不同填料的各类加筋土挡墙在交通荷载作用下的动力响应具有显著的复杂性和差异性。

填料作为加筋土挡墙结构的重要组成部分,其选取与加筋土挡墙的工作性能和经济效益密切相关。三明治形加筋土是一种混合填料的加筋土结构,由黏土层从上下两侧夹住加筋砂土层而形成层状混合式加筋结构,该结构在保证良好的界面摩擦强度的同时可较大提高工程的经济性。由于三明治加筋土是一种新型混合填料的加筋土结构,目前对此类填土方式的加筋土的研究主要在单元体尺

度,而对三明治形加筋土挡墙的研究尚属起步阶段。M.R.Abdie等^[19-20]、刘飞禹等^[21]研究了三明治形加筋土界面相互作用特性,尤其是夹砂层厚度的影响。刘飞禹等^[22-24]研究了该种挡墙在条形荷载下的变形特性及地震作用下的动力特性,而交通荷载等动荷载作用下的加筋土挡墙的研究较少。本文通过室内加载模型试验和FLAC^{3D}数值模拟,研究了荷载幅值、振源频率、激振器数目对三明治形加筋土挡墙与纯砂土加筋土挡墙变形和土压力的影响,以及循环荷载作用下两类加筋土挡墙的沉降、面板水平位移以及挡墙潜在破裂面的分布规律。

1 室内加载试验模型

1.1 试验设备

模型试验采用温州大学自主研制的室内加载模型试验设备,由模型槽、液压动力系统、主机控制系统组成,如图1所示。实验采用模型箱来代替模型槽,模型箱采用钢板制成。加载系统通过3个由计算机独立控制的激振器分别施加动荷载,即通过液压千斤顶和反力架施加,液压千斤顶动态加载极值为10 kN。测量系统是通过主机上的外接口连接数据线和传感器相连接进行数据采集。



图1 模型试验设备

Fig.1 Overview of model testing apparatus

1.2 试验材料

加筋土填料采用黏土和福建标准砂,对黏土样进行烘干处理,然后加水搅拌控制其含水率为28%,再密闭静置24 h以使土样含水率保持均匀,回填黏土基本物理力学参数见表1,砂土的颗粒级配曲线如图2所示。

本试验加筋挡墙面板基础以及面板模块均是将原材料按水:水泥:砂:石子=0.47:1:1.342:3.129的比例制成的混凝土模块。面板模块尺寸分别为

15 cm×7.5 cm×3 cm和7.5 cm×7.5 cm×3 cm。采用水泥砂浆错缝砌筑挡墙面板。本试验筋材采用聚丙烯双向土工格栅,其各项技术指标见表2。

表1 试验用黏土物理参数

Table 1 Physical parameters of testing clay

相对体积质量Gs	孔隙比e	重度r/(kN·m ⁻³)	饱和度Sr	液限W _L /%	塑限W _p /%
2.74	1.53	16.7	99.6	56.5	28

表2 试验用格栅的技术参数

Table 2 Technical parameters of testing geogrid

单位面积质量/(g·m ⁻²)	不同方向的极限延伸率/%		不同方向的极限抗拉强度/(kN·m ⁻¹)	
	横向	纵向	横向	纵向
300	6	6	80.1	98.4

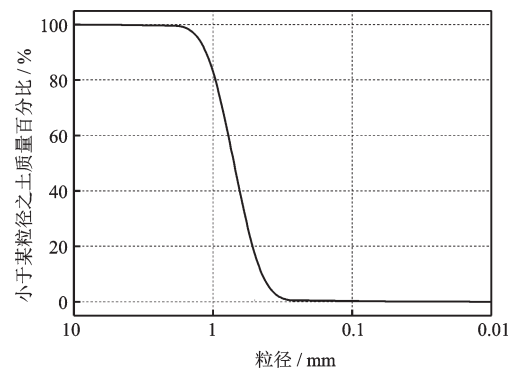


图2 试验用砂土颗粒级配曲线

Fig.2 Gradation curves of testing sand

1.3 模型制作

根据相似比原则,模型制作按照1:10的比例进行设计。模型尺寸为1 m×0.9 m×0.6 m(长×宽×高),数据测量设备参数见表3,几何尺寸及测试元件的布置情况如图3(a)所示。

在完成试验材料的准备以及仪器的检查后,在模型箱底部铺设0.05 m高的填土,放置面板基础后继续铺设至厚度为0.15 m。首先铺设底层土工格栅,并埋设土压力计,用砂浆(层厚0.01 m)砌筑混凝土面板模块至面板高度为0.17 m,挡墙由下而上分层填筑夯实。对于纯砂土加筋土挡墙,每层铺设砂土高0.15 m,分4层填筑。填筑时完成土压力计以及分层沉降仪磁环的埋设。填筑完成后,在挡墙顶部铺设89.5 cm×85 cm×6 cm的混凝土板。将百分表固定至面板及墙顶监测点位置。在正式试

验开始前先进行预加载试验,确定设备正常工作后,将数据清零开始加载试验。铺设三明治形加筋土挡墙的填料时,根据所设定的密实度计算各层所需填料质量,并压实至指定高度。每层先铺设0.015 m厚的砂土,后铺设0.14 m厚的黏土。图3为制作的挡墙模型。

表3 试验用测量元器件参数
Table 3 Parameters of test elements

名称	型号	量程	测点数
百分表	5系数数显百分表	0~12.7 mm	6
土压力计	YT-200G	0.1 MPa	4
全站仪	TKS-202N	24 000观测点	9
数据采集系统	DH3815	16通道	12

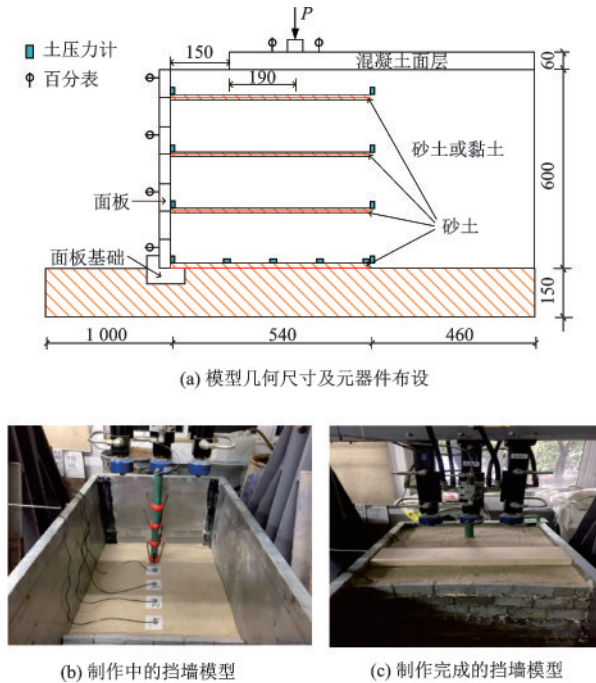


图3 挡墙模型

Fig.3 Model of retaining wall

1.4 荷载施加

鉴于交通荷载的复杂特性,本试验只考虑竖向加载部分,并采用半波正弦曲线作为加载曲线^[25],其函数表达式为:

$$Q_t = q_0 |\sin \pi f t|$$

式中, Q_t 为模拟交通荷载、时间为 t 的半波正弦函数; q_0 为激振器的激振幅值; f 为加载频率。

蔡袁强等^[26]分析认为,根据车辆速度、行车密度、路基深度、土性参数与路面结构等不同,交通荷载在路基中所产生动应力频率一般分布为 0.1~

10.0 Hz。本试验根据荷载幅值试验设为4个加载阶段,每个阶段的荷载频率分别为4、6、8、10 Hz。每种幅值在不同频率时,竖向荷载的作用时间为5 min,故每种荷载幅值作用时间为20 min,每个模型累计荷载作用时间为60 min。

2 模型试验结果分析

2.1 荷载幅值的影响

图4为荷载频率为10 Hz时,不同幅值循环荷载作用下砂土加筋土和三明治形加筋土挡墙面板水平位移沿墙高的变化曲线。由图可见,两类挡墙水平位移与静载作用下挡墙水平位移变化规律一致,均为随墙高增大而增大,两类挡墙均呈外倾式变形,顶部面板水平位移最大。当荷载幅值从1 kN增大至5 kN,三明治形加筋土面板最大水平位移从0.43 mm增大至0.79 mm,砂土加筋土挡墙的面板最大水平位移从0.42 mm增大至0.71 mm,循环荷载幅值对三明治形加筋土挡墙面板水平位移的影响较砂土加筋土挡墙大。

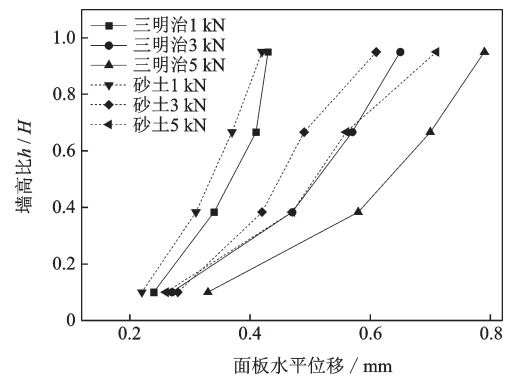


图4 面板沿高度的水平位移曲线

Fig.4 Horizontal displacement curve of panel

注: h/H 为距墙底的测点高度与挡墙模型总高度的比值

图5为荷载频率为10 Hz时,不同幅值循环荷载作用下两类挡墙顶部沉降随荷载的变化曲线。由图可见,两类挡墙顶部沉降随幅值的增加而增大,增幅逐渐减小。当荷载幅值从1 kN增大至5 kN,三明治形加筋土挡墙顶部沉降从1.08 mm增大至2.28 mm,砂土加筋土挡墙顶部沉降从0.96 mm增大至1.64 mm,循环荷载幅值对三明治形加筋土挡墙面板顶部沉降的影响较砂土加筋土挡墙大。这是由于三明治形加筋土挡墙中的黏土的刚度相对砂土较小,且黏土的压缩性更高,导致循环荷载幅

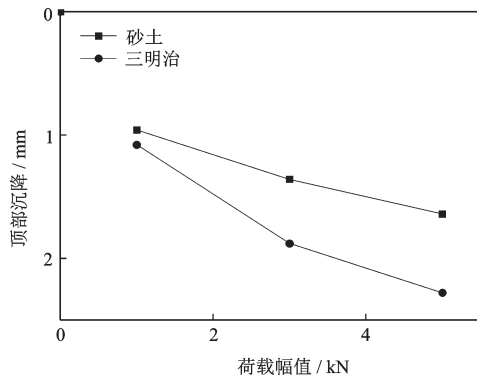


图5 荷载—沉降曲线

Fig.5 Pressure—settlement curves

值影响较大。

图6为荷载频率为10 Hz时,不同幅值循环荷载作用下两类挡墙底层筋材处竖向土压力的变化曲线。由图可见,两类挡墙底层土工格栅处土压力在中部出现最大值,向两端减小,这是受循环荷载附加应力衰减影响的结果。荷载对土压力的影响随振动源距离的增大而衰减,中部振源附近的影响比两端大。当荷载幅值从1 kN增大至5 kN,三明治形加筋土挡墙最大竖向土压力从17.25 kPa增大至23.33 kPa,砂土加筋土挡墙最大竖向土压力从17.86 kPa增大至21.57 kPa。5 kN荷载作用下,砂土加筋土挡墙底层筋材处最大竖向土压力较三明治形加筋土挡墙小8%。

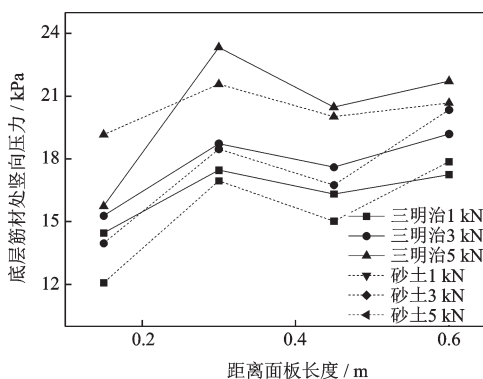


图6 底层土工格栅处竖向压力分布

Fig.6 Vertical earth pressure on the bottom geogrid

2.2 荷载频率的影响

图7为荷载幅值为5 kN时,不同荷载频率作用下两类挡墙面板水平位移沿墙高的变化曲线。由图可见,两类挡墙面板位移随着荷载频率的增大呈现增大趋势。4 Hz和10 Hz频率作用下三明治形加筋土挡墙面板最大位移分别为0.51 mm和0.79 mm

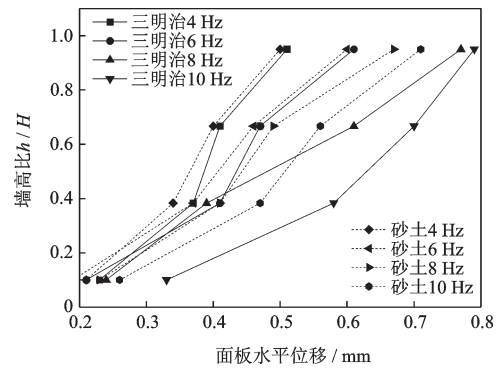


图7 面板沿高度的水平位移曲线

Fig.7 Horizontal displacement curve of panel

和10 Hz的最大水平位移比4 Hz大35%;4 Hz和10 Hz频率作用下砂土加筋土挡墙面板最大位移分别为0.50和0.71 mm,10 Hz的最大水平位移比4 Hz大30%。这可能是由于循环荷载作用下,三明治形加筋土挡墙填料颗粒发生滑移,加筋土挡墙填料颗粒重新排列,对加筋土密实度以及挡墙结构稳定性产生影响。在道路工程应用中,薄砂层厚度、填料强度以及筋材长度等挡墙设计因素对三明治形挡墙的影响值得进一步探究。

图8为荷载幅值为5 kN时,不同荷载频率作用下两类挡墙顶部沉降随荷载的变化曲线。由图可见,频率对两类挡墙顶部沉降的影响较小。当荷载频率从4增大至10 Hz,三明治形加筋土挡墙顶部沉降从2.08 mm增大至2.28 mm;砂土加筋土挡墙顶部沉降从1.54 mm增大至1.64 mm。

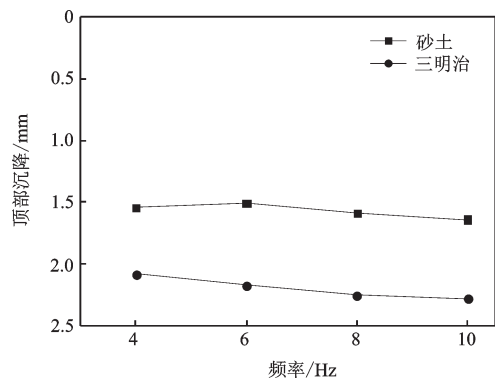


图8 荷载—沉降曲线

Fig.8 Pressure-settlement curves

图9为荷载幅值为5 kN时,不同荷载频率作用下两类挡墙底层筋材处竖向土压力的变化曲线。由图可见,两类加筋土挡墙随着荷载频率的增大,挡墙土压力也逐渐增大。两类挡墙底层土工格栅处土压力分布规律一致,最大值出现在中部,向两

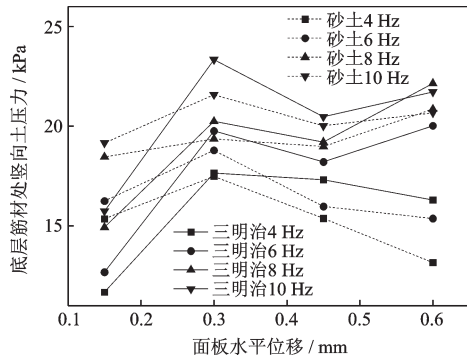


图9 底层土工格栅处竖向压力分布

Fig.9 Vertical earth pressure at the bottom geogrid

端逐渐减小。荷载对土压力的影响随振动源距离的增大而衰减,中部振源附近的影响比两端大。

2.3 激振器数目的影响

考虑到工程实际交通中多列车并行的情况,进行了3个激振器的激振试验,图10为荷载幅值为5 kN、荷载频率为10 Hz时,不同激振器个数作用下两类挡墙面板水平位移沿墙高的变化曲线。由图可见,不同激振器个数下两类挡墙面板水平位移随墙高的变化趋势一致,均为外倾式变形,在挡墙中上部出现轻微鼓胀现象。激振器数目从1增至3时,三明治形加筋土挡墙面板位移明显增大,面板最大位移增大约11%。

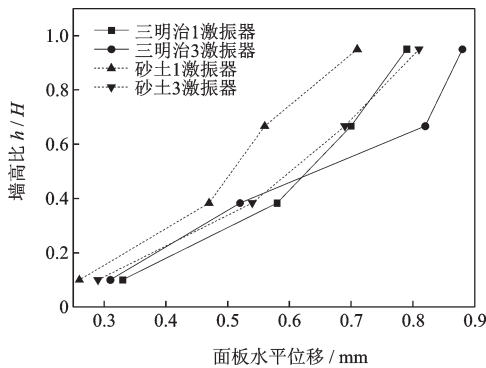


图10 面板沿高度的水平位移曲线

Fig.10 Horizontal displacement curve of panel

图11为荷载幅值为5 kN、荷载频率为10 Hz时,不同激振器个数作用下两类挡墙顶部沉降随荷载的变化曲线。由图可见,激振器个数对挡墙顶部沉降影响较大。3个激振器作用下三明治形加筋土挡墙的顶部沉降约是1个激振器沉降的1.4倍;3个激振器作用下砂土加筋土挡墙的顶部沉降约是1个激振器沉降的1.3倍。

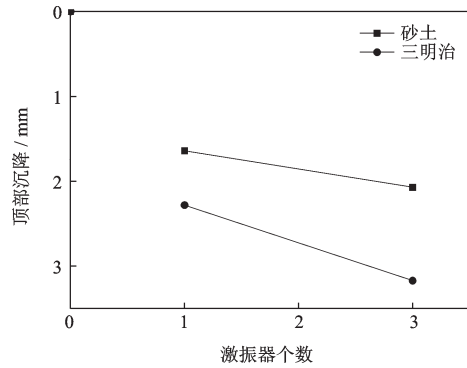


图11 荷载—沉降曲线

Fig.11 Pressure—settlement curves

图12为荷载幅值为5 kN,荷载频率为10 Hz时,不同激振器数目作用下两类挡墙底部竖向土压力的变化曲线。由图可知,当激振器的数量从1个增加到3个,两类挡墙底层土工格栅处竖向压力沿距面板长度方向分布的趋势不变,底部土工格栅处竖向土压力增加迅速。三明治形加筋土挡墙的最大竖向土压力出现在筋材中部,3个激振器作用下三明治形加筋土挡墙最大竖向土压力约为1个激振器的1.4倍。这是由于3个激振器协同工作时,路基的振动波会相互干扰。

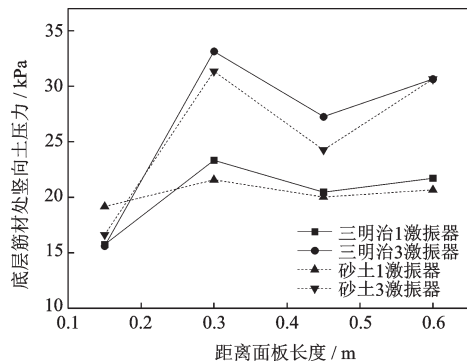


图12 底层土工格栅处竖向压力分布

Fig.12 Vertical earth pressure on the bottom geogrid

3 数值计算模型

3.1 几何模型及边界条件

研究对象为模块式土工格栅三明治加筋土挡墙,模型宽度为9 m。模块式墙面竖直,墙高自地面以上 $H=6$ m,挡墙面板模块尺寸为 $0.5\text{ m}\times 0.3\text{ m}\times 0.25\text{ m}$ (长 \times 宽 \times 高)。考虑地基计算深度为6 m,墙趾外计算宽度为5 m,墙后填土长度为10 m。铺设土工格栅加筋带予以加筋,筋材竖向间距

0.5 m,长度为5.4 m,总共铺设12层筋材。挡墙采用分层填筑,土工格栅上下两侧均匀铺设0.08 m厚的砂土,外侧均匀铺设重塑黏土。动力特性分析时,挡墙顶部铺设0.6 m的路面结构层。计算时假定有列车中轴线与路面中轴线重合,汽车作用位置为挡墙顶端中部,将轮胎与路面的接触面等效为矩形,接地面积为0.2 m×0.3 m。网格划分如图13所示。

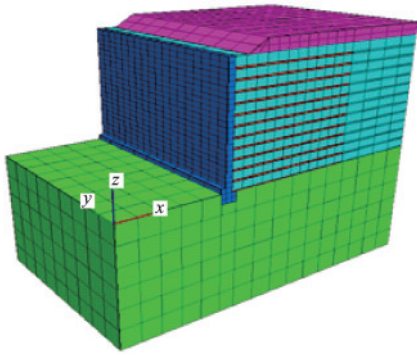


图13 FLAC^{3D}网格划分

Fig.13 FLAC^{3D} mesh generation

为了减小边界上应力波反射对动力分析结果的影响,将模型底部的边界条件设为静态(黏性)边界,在模型四周施加自由场模拟模型四周的无限边界情况,主体网格的侧边通过阻尼器与自由场网格进行耦合,将地基及墙体的阻尼率均设为0.05%。墙趾前方的地面、挡墙面和路面均为自由面。

3.2 模型参数选取

数值计算中采用莫尔-库伦模型模拟地基与填土,用弹性模型模拟模块式面板,填料、地基以及面板的参数具体见表4。

土工格栅采用FLAC^{3D}自带的Geogrid结构单元进行模拟,筋材参数见表5。面板模块与模块以及面板与填土间的接触特性通过FLAC^{3D}中的Interface单元进行模拟,接触面参数见表6。

表4 面板及土体参数

Table 4 Material properties

材料名称	弹性模量/ MPa	泊松 比	黏聚力/ kPa	摩擦 角/(°)	密度/ (kg·m ⁻³)
地基	50	0.3	22	20	1 700
砂土	40	0.3	0	35	1 800
黏土	25	0.3	30	5	1 900
面板模块	23×10 ³	0.15	—	—	2 400
路面结构层	1.4×10 ⁵	0.25	—	—	2 500

表5 筋材参数

Table 5 Geogrid properties

弹性模量/ (kN·m ⁻¹)	泊松 比	密度/ (kg·m ⁻³)	筋-土黏聚 力/kPa	筋-土摩擦 角/(°)
800	0.33	1 300	10.3	32

表6 接触面参数

Table 6 Interface properties

	法向刚度/ (MPa·m ⁻¹)	切向刚度/ (MPa·m ⁻¹)	黏聚力/ kPa	摩擦角/ (°)
模块-模块	100	1	0	48
模块-砂土	88	0.8	25	33
模块-黏土	1 000	40	45.7	57

3.3 数值计算模型验证

图14为不同荷载幅值作用下FLAC^{3D}模拟的三明治形加筋土挡墙以及模型试验的三明治形加筋土挡墙沿墙高方向面板水平位移的变化曲线。由图可知,试验模拟与模型试验结果均为:随着挡墙高度增加,面板水平位移逐渐增大,且增大速率逐渐减小,面板呈外倾式变形。本文模型的数值模拟结果与室内试验结果的变化趋势一致且数值大小相近,由此可证明数值计算模型的可靠性。

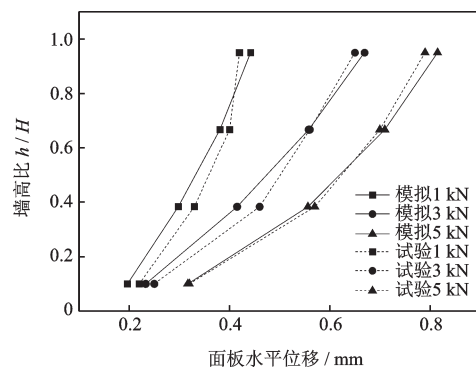


图14 模型验证

Fig.14 Model validation

4 数值模拟结果分析

4.1 挡墙变形

图15为循环荷载作用下两类挡墙路面沉降的时程曲线。从图中可以看出,随着循环加载次数的增加,两类加筋土挡墙沉降增长的速率逐渐减缓,但总体保持增长的趋势。加载初期沉降最大,以砂土为填料的加筋土挡墙的首次循环顶部沉降值约

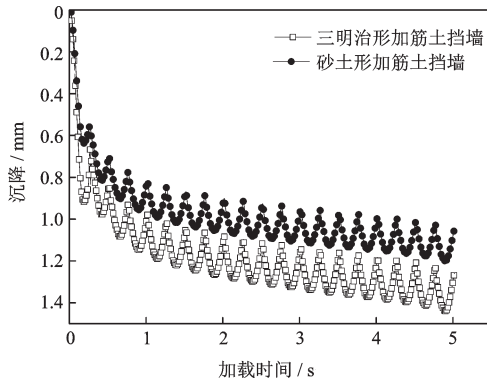


图 15 20次循环荷载作用下路面沉降值

Fig.15 Settlement of surface after 20 times cyclic load

占20次沉降总值的56%；三明治形加筋土挡墙的首次循环顶部沉降值约占20次沉降总值的64%。顶部循环荷载作用下三明治形加筋土挡墙的墙顶20次循环总沉降较砂土加筋土挡墙大，差值约为14%，首次循环沉降差值约为32%。

图16为20次循环荷载作用后三明治形挡墙加载位置正下方内部沉降随墙高(以0.5 m为一层,共12层)的变化。由图可以看出,挡墙沉降并非成层均匀沉降。内部分层沉降出现双峰值,在挡墙底层(0~0.5 m)填土处以及中上层(4.5~5 m)填土处沉降值较大。循环荷载作用下,三明治形加筋土挡墙内部分层沉降沿墙高先减小而后增大,随后再次减小。这可能是因为砂土加筋层对墙高1.0~4.5 m段的沉降有较好的控制作用。

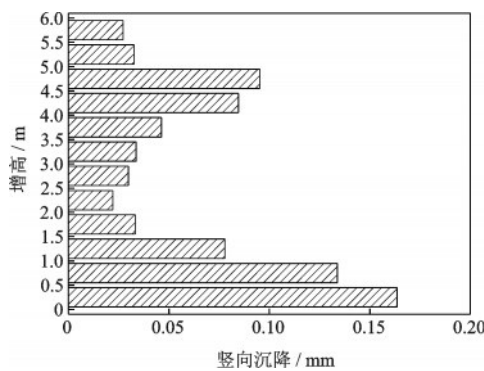


图 16 20次循环荷载作用后三明治形挡墙内部沉降

Fig.16 Internal settlement of the retaining wall after 20 times cyclic load

4.2 加速度

图17为振源下不同墙高位置处三明治形加筋土挡墙的加速度随时间的变化曲线,测点分别位于墙高0.5、1.5、2.5、3.5、4.5和5.5 m处。由图可知,测点距离振源最近位置处加速度最大。随着墙高的

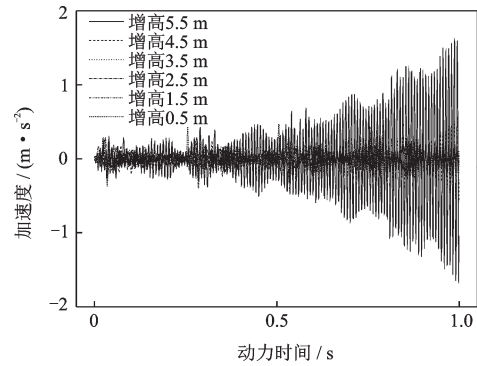


图 17 不同墙高位置处的加速度随时间的变化曲线

Fig.17 Variation curve of acceleration time history at different heights

减小,加速度逐渐衰减。距振源距离从0.5 m增大至1.5 m时,加速度峰值骤减,即挡墙上部的平均衰减率最大。此外,挡墙下部的峰值加速度大于中部的峰值加速度。

图18为循环荷载作用下三明治形加筋土挡墙振源下方不同墙高位置处的竖向土压力的时程曲线。从图中可以看出,土压力随时间的变化曲线与所施加荷载的周期一致。随着挡墙高度的减小,即距振源的距离增加土压力的振动幅值逐渐减小。随着挡墙高度的增加土压力峰值减小。挡墙上部受振源影响较大,荷载对挡墙内部土压力响应随距振源距离的增大而衰减,挡墙上部土压力峰值与中部土压力峰值相近。

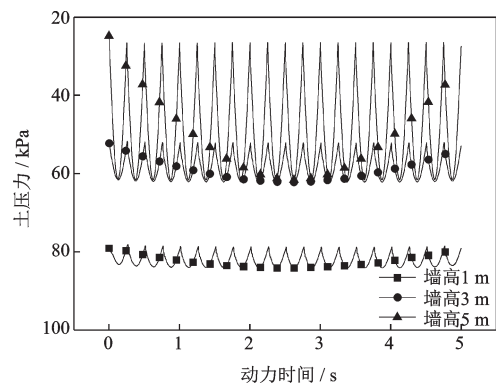


图 18 20次循环荷载作用下土压力时程曲线

Fig.18 Time history curve of earth pressure after 20 times cyclic load

4.3 潜在破裂面

参考 T.Konami^[27]的最大筋材拉力面分析挡墙潜在破裂面。图19给出了挡墙顶部循环荷载作用下,三明治形加筋挡墙与纯砂加筋挡墙筋材的潜在破裂面位置。由图可知,两类潜在破裂面形状与

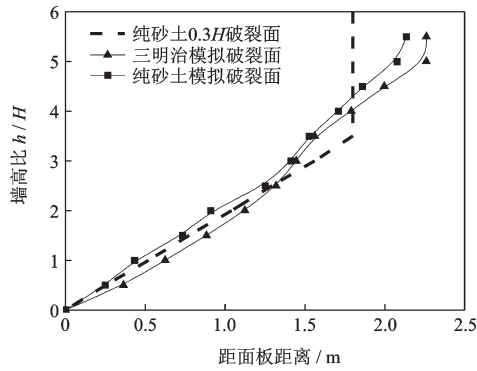


图19 循环荷载作用下加筋土挡墙潜在破裂面
Fig.19 Potential failure surface under cyclic load

“ $0.3H$ ”法^[28]计算的纯砂土加筋挡墙破裂面。两类挡墙破裂面位置相近,三明治形加筋土挡墙破裂面离面板距离略远,两者差距约为8%。

5 结 论

(1)三明治形加筋土挡墙变形与竖向土压力随循环荷载的幅值、振源频率的增加而增大。荷载对土压力的影响随振源距离的增大而衰减,中部振源附近的影响比两端大。

(2)激振器数目对加筋土挡墙的工作性能的影响显著。多个激振器协同工作时,挡墙面板水平位移、顶部沉降、竖向土压力均有增加。

(3)循环荷载作用下,三明治形加筋土挡墙的墙顶20次循环总沉降较砂土加筋土挡墙大,差值约为14%,首次加载沉降差值约为32%。

(4)挡墙变形与土压力的变化周期与加载周期一致。随着加载次数的增加累积变形增大,且增大的速率逐渐减缓。相较于砂土挡墙,三明治形加筋土挡墙破裂面离面板距离略远,两者差距约为8%。

参考文献:

[1] 叶观宝,张振,邢皓枫,等.面板对路堤式加筋土挡墙力学特性的影响[J].岩土力学,2012,33(3):881-886.
Ye G B, Zhang Zh, Xing H F, et al. Influence of facing on mechanical behavior of reinforced retaining wall for embankment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(3): 881-886. (in Chinese)

[2] 李丽华,石安宁,肖衡林,等.加筋土挡墙静载模型试验及其力学性能研究[J].岩土力学,2018,39(12):4360-4368.

Li L H, Shi A N, Xiao H L, et al. Model test and mechanical properties study of reinforced earth retaining wall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(12): 4360-4368. (in Chinese)

[3] Xiao Ch Zh, Han J, Zhang Zh. Experimental study on performance of geosynthetic-reinforced soil model walls on rigid foundations subjected to static footing loading[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2016, 44(1): 81-94.

[4] 王贺,杨广庆,熊保林,等.模块面板式加筋土挡墙结构行为试验研究[J].岩土力学,2016,37(2):487-498.
Wang H, Yang G Q, Xiong B L, et al. An experimental study of the structural behavior of reinforced soil retaining wall with concrete-block panel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(2): 487-498. (in Chinese)

[5] 杨广庆,刘华北,吴连海,等.台阶宽度对加筋土挡墙垂直应力的影响研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(1):209-216.
Yang G Q, Liu H B, Wu L H, et al. Effect of offset distance on vertical stresses in geosynthetic reinforced soil retaining wall[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(1): 209-216. (in Chinese)

[6] 杜运兴,刘辉,周芬.混合加筋土挡墙的力学性能[J].中南大学学报(自然科学版),2018,49(4):940-948.
Du Y X, Liu H, Zhou F. Mechanical properties of hybrid reinforced soil retaining wall[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(4): 940-948. (in Chinese)

[7] Rowe R K, Ho S K. Horizontal deformation in reinforced soil walls[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, 35(2): 312-327.

[8] 周淮,张孟喜.水平-竖向加筋土挡墙作用机理的离散元数值模拟[J].上海交通大学学报,2012,46(10):1548-1552,1557.
Zhou H, Zhang M X. Numerical simulation on mechanism of soil retaining wall reinforced with h-v inclusions by dem[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2012, 46(10): 1548-1552,1557. (in Chinese)

[9] 柳军修,陈建峰.刚/柔性组合墙面加筋土挡墙受力机制分析[J].西南交通大学学报,2015,50(6):984-992.
Liu J X, Chen J F. Mechanical performance analysis of reinforced soil walls with flexible/rigid facings[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015, 50(6): 984-992. (in Chinese)

[10] Song F, Liu H, Ma L, et al. Numerical analysis of geo-

- cell-reinforced retaining wall failure modes[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2018, 46(3): 284-296.
- [11] Ardah A, Abu-Farsakh M, Voyiadjis G. Numerical evaluation of the performance of a geosynthetic reinforced soil-integrated bridge system (GRS-IBS) under different loading conditions [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2017, 45(6): 558-569.
- [12] Huang B, Bathurst R J, Hatami K, et al. Influence of toe restraint on reinforced soil segmental walls [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2010, 47(8): 885-904.
- [13] Liu H, Won M S. Long-term reinforcement load of geosynthetic-reinforced soil retaining walls [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(7): 875-889.
- [14] 杨果林, 肖宏彬, 王永和. 加筋土挡墙动变形特性试验与疲劳损伤分析[J]. 振动工程学报, 2002, 15(2): 53-57.
Yang G L, Xiao H B, Wang Y H. Experiment dynamic behaviour and analysis of fatigue damage of reinforced earth wall [J]. Journal of Vibration Engineering, 2002, 15(2): 53-57. (in Chinese)
- [15] 刘泽, 史克友, 雷勇. 重复荷载作用下土工格栅生态袋加筋土挡墙动力特性试验研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(9): 88-94, 119.
Liu Z, Shi K Y, Lei Y. Model test on dynamic characteristics of geogrid reinforced earth retaining wall packet ecological bag under repeated loading [J]. Journal of Vibration Engineering, 2015, 34(9): 88-94, 119. (in Chinese)
- [16] 王家全, 张亮亮, 赖毅, 等. 加筋土挡墙静动力学特性大模型试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 49(2): 1-9.
Wang J Q, Zhang L L, Lai Y, et al. Large-scale model tests on static and dynamic mechanical characteristics of reinforced earth retaining wall [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 49(2): 1-9. (in Chinese)
- [17] 赵晓彦, 范宇飞, 刘亮, 等. 铁路台阶式加筋土挡墙潜在破裂面特征模型试验[J]. 岩土力学, 2019, 40(6): 1-11.
Zhao X Y, Fan Y F, Liu L, et al. Model test on potential failure surface characteristics of railway stepped reinforced soil retaining wall [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(6): 1-11. (in Chinese)
- [18] Tatsuoka F, Tateyama M, Koseki J, et al. Geosynthetic-reinforced soil structure for railways in Japan [J]. Transportation Infrastructure Geotechnology, 2014, 1(1): 3-53.
- [19] Abdi M R, Sadrejad S A, Arjomand M A. Clay reinforcement using geogrid embedded in thin layers of sand [J]. International Journal of Civil Engineering, 2009, 7(4): 224-235.
- [20] Abdi M R, Arjomand M A. Pullout tests conducted on clay reinforced with geogrid encapsulated in thin layers of sand [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2011, 29(6): 588-595.
- [21] 刘飞禹, 张涛, 施静. Sandwich形加筋土筋土界面的循环剪切特性[J]. 中国公路学报, 2017, 30(5): 38-43.
Liu F Y, Zhang T, Shi J. Cyclic shear behavior on soil-geogrid interface of sandwich reinforced soil [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(5): 38-43. (in Chinese)
- [22] 齐添, 应梦杰, 刘飞禹, 等. 考虑筋土界面软化的三明治形加筋土挡墙地震响应分析[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(25): 10399-10406.
Qi T, Ying M J, Liu F Y, et al. Seismic response of Sandwich reinforced retaining wall considering the softening of soil-geogrid interface [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(25): 10399-10406. (in Chinese)
- [23] 刘飞禹, 汪歆, 李婧婷, 等. 地震作用下混合式加筋土挡墙动力特性[J]. 防灾减灾工程学报, 2021, 41(3): 612-621.
Liu F Y, Wang X, Zhang J T, et al. Dynamic characteristics of mixed reinforced earth retaining wall under earthquake loading [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(3): 612-621. (in Chinese)
- [24] 刘飞禹, 童艳光, 汪歆, 等. 筋-土界面刚度软化对加筋土挡墙动力特性的影响[J]. 防灾减灾工程学报, 2021, 41(1): 75-84.
Liu F Y, Tong Y G, Wang X, et al. Effect of stiffness softening of reinforcement-soil interface on dynamic characteristics of reinforced retaining wall [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(1): 75-84. (in Chinese)
- [25] 崔兵, 王军, 丁光亚, 等. 低路堤软土地基在交通荷载作用下的动力特性试验研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(25): 131-136.
Cui B, Wang J, Ding G Y, et al. Model test on dynamic characteristics of low embankment on soft clay foundation under traffic loading [J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(25): 131-136. (in Chinese)
- [26] 蔡袁强, 赵莉, 曹志刚, 等. 不同频率循环荷载下公路路基粗粒填料长期动力特性试验研究[J]. 岩土力学与工程学报, 2017, 36(5): 1238-1246.
Cai Y Q, Zhao L, Cao Zh G, et al. Experimental study on dynamic characteristics of unbound granular materi-

