

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201901009

地震作用下混合式加筋土挡墙动力特性*

刘飞禹¹, 汪 歆¹, 李婧婷¹, 张振光²

(1. 上海大学土木工程系, 上海 200444; 2. 上海公路桥梁(集团)有限公司, 上海 200433)

摘要: 为了研究混合式加筋土挡墙在地震作用下的动力特性, 采用FLAC^{3D}动力分析模块建立了混合式加筋土挡墙的三维动力分析模型, 对挡墙背填土为全砂土和混合式(薄砂层厚度分别为3、5、8、10 cm)2种情况下的加筋土挡墙在地震作用下的水平位移响应、筋材内力以及破坏模式、加速度响应进行了计算。通过对比分析了2种情况下加筋土挡墙受力及受形特性, 揭示了混合式加筋土挡墙的作用机制。分析结果表明: 混合式加筋土挡墙的薄砂层厚度存在一个最优值; 在同样的地震峰值加速度作用下, 在薄砂层厚度由3 cm增加到10 cm的过程中, 水平位移、加速度放大系数、筋材最大内力均呈现出先减小后增大的变化趋势; 在地震峰值加速度为0.4g的情况下, 薄砂层厚度为5 cm时, 水平位移达到最小值31 cm, 加速度放大系数达到最小值1.74, 筋材最大内力达到最小值22.5 kN。

关键词: 混合式加筋土挡墙; 地震作用; 动力响应; 抗震设计

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)03-0612-10

Dynamic Characteristics of Mixed Reinforced Earth Retaining Wall under Earthquake Loading

LIU Feiyu¹, WANG Xin¹, LI Jingting¹, ZHANG Zhenguang²

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2. Shanghai Highway Bridge (Group) Co. LTD, Shanghai 200433, China)

Abstract: In order to study the dynamic characteristics of the mixed reinforced earth retaining wall under earthquake loading, the dynamic analysis module of FLAC^{3D} is introduced to module a three-dimensional dynamic analysis model of such retaining wall. The backfilling material of the retaining wall is pure sand or mixed reinforced soil (the thickness of the mixed thin sand layer is 3 cm, 5 cm, 8 cm, and 10 cm, respectively). The horizontal displacement response, the internal force of the reinforcement, the failure mode and the acceleration response of the reinforced earth retaining wall are analyzed. By comparing and analyzing the respective characteristics of the two cases, the working mechanism of the mixed reinforced earth retaining wall is revealed. The analyses show that for the mixed reinforced earth retaining wall, there is an optimum value for the thickness of the thin sand layer. Under the same seismic peak acceleration, the horizontal displacement, the acceleration amplification factor, and the maximum internal force of the geogrid show a trend of decreasing first and then increasing when the thickness of the thin sand layer increases from 3 cm to 10 cm. When the peak acceleration of the earthquake is 0.4 g, and the thickness of the thin sand layer is 5 cm, the horizontal displacement

* 收稿日期:2019-01-17;修回日期:2019-02-27

基金项目:国家自然科学基金项目(52078285,51878402,51678352,51478255)资助

作者简介:刘飞禹(1976—),男,教授,博导,博士。主要从事加筋土研究。E-mail: lfyjzu@shu.edu.cn

has a peak of 28 cm, and the minimum values of the acceleration amplification factor and the maximum internal force of the geogrid are 1.74 and 22.5 kN, respectively.

Keywords: mixed reinforced earth retaining wall; seismic loading; dynamic response; seismic design

引言

加筋土挡墙因性能良好,造价低廉,设计相对灵活,较传统刚性重力式挡墙具有较好的抗震并承担变形的能力^[1-2]。筋土界面相互作用对加筋土结构的加筋效果有着重要的影响,国内外已有很多学者对此展开了一系列研究。I. Scotland等^[3]通过有限元软件研究了包裹式加筋土挡墙在不同高度、加筋间距、坡度等因素下的变形情况。黄睿^[4]研究了地震作用下部分浸水条件下的临水加筋土挡墙,推导出了地震作用下筋材拉力系数的计算公式。K. Sukmak等^[5]研究了不同填土参数对加筋土挡墙水平变形的影响,填土由砂土和黏土按不同比例混合而成。

模块式加筋土挡墙因施工方便、外表美观等特点在国内外备受青睐,其常见的研究方法有试验分析法和有限元分析法。许多学者利用试验分析法展开了一系列研究,G.M.Latha等^[6]通过室内振动台模型试验讨论了不同地震加速度和频率对土工格栅挡土墙的影响。王贺等^[7]结合室内实验研究了模块式面板加筋土挡墙在列车载荷作用下的动力响应作用机理。分析了墙面水平变形、墙体加速度及土工格栅拉伸应变等分布规律。蔡晓光等^[8]通过大型振动台模型试验,研究了双级加筋土挡墙在水平地震荷载作用下的动力特性,得出了挡墙水平位移、顶部沉降及分层沉降的变化规律。陈建峰等^[9]采用K-刚度法分析模块式加筋土挡墙,研究了模块式加筋土挡墙墙趾界面剪切特性。

许多学者利用有限元分析法展开了一系列研究,H.B.Liu等^[10]通过有限元软件对比分析了单级加筋土挡墙和多级加筋土挡墙2种情况下在地震作用下的水平位移、筋材内力、加速度放大系数等,揭示了多级加筋土挡墙的动力学特性。K.Z.Z.Lee等^[11]建立有限元模型,分析了土体的摩擦角、墙体的角度等因素,验证了模型边界的范围以使边界效应最小化。H.B.Liu等^[12]考虑加筋区边缘填土会发生蠕变,通过有限元程序研究了加筋土挡墙在使用寿命期间承受地震荷载的变形模式。程亚男等^[13]运用拟动力法和水平条分法,对水平和竖向地震力

同时作用下的加筋土挡墙进行了研究,推导出了筋材拉力总和与临界破裂角的计算公式。汪益敏等^[14]基于FLAC^{3D}软件,对高6 m的模块式加筋土挡墙进行了数值模拟,考虑了地震持续时间、地震波和地震峰值加速度对挡土墙的影响,并将计算结果与我国现行《公路加筋土工程设计规范》^[15]和美国FHWA设计规范^[16]的计算结果进行对比。贾亮等^[17]基于塑性极限理论上限法,建立了地震作用下模块式加筋土挡墙模型,计算地震作用下加筋土挡墙的整体稳定系数。B.V.S.Viswanadham等^[18]研究了模块式加筋土挡墙在渗流作用下的性能。

混合式加筋土是一种新型加筋土,采用黏土夹格栅加筋砂层的填料形式。这种新型的结构具有以下几个优点:黏土较廉价,取材较方便,砂土界面的剪切强度较高。M.R.Abdie等^[19-21]研究了静力作用下混合式加筋土的筋土界面的相互作用。刘飞禹等^[22]采用大型循环直剪试验对混合式加筋土的筋土界面剪切特性进行了研究,尤其是薄砂层的厚度对筋土界面剪切特性的影响。

然而,目前的文献还未考虑地震作用下混合式加筋土挡墙的动力特性,尤其是混合式挡土墙中薄砂层厚度对动力响应的影响。基于此,本文采用FLAC^{3D}软件,首次建立了混合式加筋土挡墙的三维动力分析模型,通过对挡墙背填土为全砂土和混合式(薄砂层厚度分别为3、5、8、10 cm)2种情况下加筋土挡墙在地震荷载作用下的特性进行对比分析,揭示了混合式加筋土挡墙的作用机制。

1 数值模型建立

1.1 混合式加筋土挡墙模型

拟建模型为混合式加筋土挡墙。其中挡墙地面以上墙高 H 为6 m,墙面竖直,考虑地基计算深度为6 m,墙趾外计算宽度为10 m,墙体长度为20.3 m,墙体宽度为5 m,筋材竖向间距 S_v 为0.5 m,长度 L 为6 m,总共铺设12层筋材,底层的筋材距离地基的表面为0.25 m,材料为聚酯PET土工格栅。面板采用0.25 m×0.3 m×0.5 m(高×长×宽)的混凝土模块,模块下部有混凝土模块基础,挡墙背填土采

用黏土夹格栅加筋砂层的混合形式,黏土的压实度为94%,土工格栅上下层薄砂层厚度各为5 cm,挡墙采用分层填筑,具体混合方式如图1所示。通过对不同的模型尺寸和不同网格的试算,确定了如图2所示的计算模型网格。

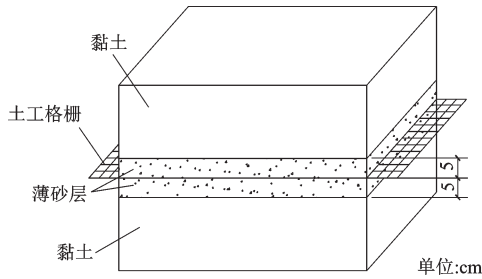


图1 混合式加筋土示意

Fig.1 Schematic diagram of the mixed reinforced soil

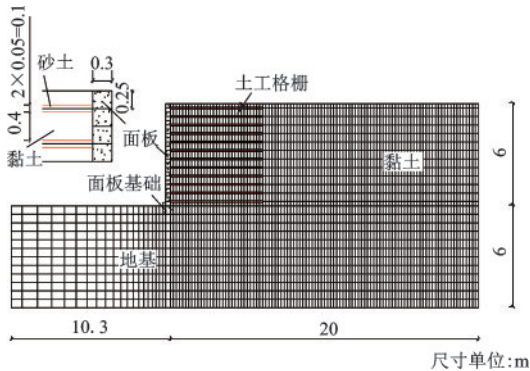


图2 有限元网格

Fig.2 Meshing of the finite element model

在静力计算时,将模型底部3个方向全部固定住,同时约束住模型四周的水平变形,在动力计算时,为了模拟模型四周的无限边界情况,在模型周围设置自由场界,从而消除模型边界上地震波的反射对挡墙动力响应的影响,主体网格的侧边通过阻

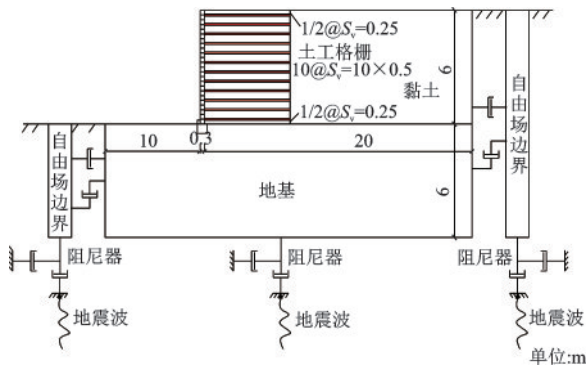


图3 混合式加筋土挡墙边界条件

Fig.3 Boundary conditions of the mixed reinforced earth retaining wall

尼器与自由场网格进行耦合,如图3所示。

采用莫尔-库伦本构模型模拟地基土、砂土和黏土的弹塑性特性,采用线弹性模型模拟混凝土模块和面板基础,计算参数主要引用文献[21]中的大型振动台试验参数,见表1,筋材采用FLAC^{3D}自带的Geogrid结构单元进行模拟,面板与筋材之间的连接为刚性连接,计算参数见表2,面板与面板之间以及面板与填土之间的接触特性通过FLAC^{3D}中的Interface单元进行模拟,计算参数见表3。

表1 材料模型参数

Table 1 Mechanical parameters of the materials

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	1.5×10 ²	0.30	2.3	40.5	1 580
砂土	36	0.30	0	38	1 430
黏土	15.65	0.35	45	20	1 850
墙面模块	2×10 ³	0.20	/	/	2 000
面板基础	1.12×10 ⁴	0.15	/	/	2 400

表2 加筋材料技术参数

Table 2 Technical parameters of geogrid

单元类型	弹性模量/MPa	泊松比	筋-土黏聚力/kPa	筋-土摩擦角/(°)	密度/(kg·m ⁻³)
Geogrid	4 000	0.42	16	34	2 370

表3 接触面模型参数

Table 3 Mechanical parameters of the interfaces

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

1.2 材料阻尼设置和地震波选择

本文中选用临界阻尼比为5%,最小中心频率为20 Hz。加载的水平地震波为1995年神户地震波南北分量(Kobe),由于非线性地震波计算分析所需时间较长,选取其中振动较为剧烈的10 s内的地震波,记录的数据时间间隔为0.02 s,地震波由模型底部输入,滤掉Kobe波5 Hz以上的频率成分,并对经过滤波操作的地震波进行校正。本文分析讨论地震峰值加速度为0.1g、0.2g、0.3g、0.4g时,混合式加筋土挡墙薄砂层厚度为5 cm时的动力特性,为了达

到上述峰值加速度,将校正后的地震波加速度按照

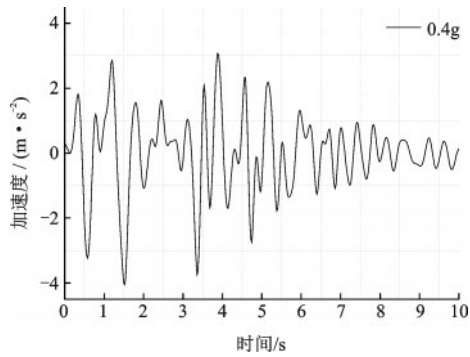


图4 输入加速度时程曲线

Fig.4 Time-history of input seismic acceleration

一定比例缩小,调整后的地震加速度曲线如图4所示。

1.3 计算模型分析结果与试验结果对比

为了验证混合式加筋土挡墙数值模拟的正确性,对文献[23]中的大型振动台试验(wall 1)进行了数值模拟计算,并将试验结果的实测值与模拟值进行了对比。验证模型中的模型尺寸以及相关参数均采用文献[23]的试验参数,面板采用混凝土模块,尺寸为0.24 m×0.3 m×0.45 m(高×长×宽),筋材采用聚酯PET土工格栅,试验中的回填砂土密实度为55%。首先对挡土墙和格栅结构单元进行自重平衡的计算,然后在挡土墙底部分别施加两组振动,第一段振动的峰值加速度为0.4g,第二段振动的峰值加速度为0.8g。

由于目前缺少混合式加筋土挡墙的试验实例,因此只能退化到非混合式加筋土挡墙与现有的资料进行对比验证,以确保动力计算结果的正确性。通过计算得到了第一种模块式挡土墙动力作用下的水平位移和加速度随墙高的变化曲线,并与文献[23]中所得出的试验实测结果进行了对比,如图5、图6所示。

从图5中可以看出,本文FLAC^{3D}模拟所得的面板水平位移随墙高变化的趋势与文献[23]的振动台试验的实测结果基本吻合,对于第一段振动震中峰值墙顶面板水平位移FLAC^{3D}模拟结果和试验实测结果分别为4.5 mm和4.4 mm,两者相差2.3%,第二段振动最大水平位移FLAC^{3D}模拟结果和试验实测结果分别为95 mm和95.9 mm,两者相差0.95%,吻合较好。从图6中可以看出,本文FLAC^{3D}模拟所得的加速度随墙高变化的趋势与文

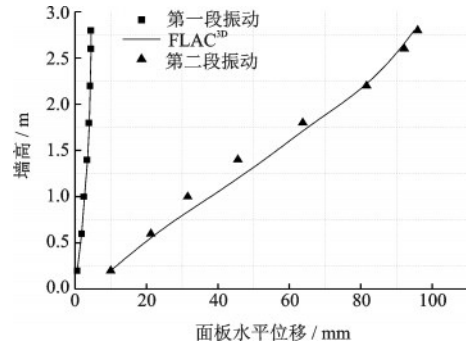


图5 FLAC^{3D}模拟和振动台模型试验震中峰值水平位移比较

Fig.5 Comparison of horizontal displacement of peak in epicenter in FLAC^{3D} simulation and shaking table model test

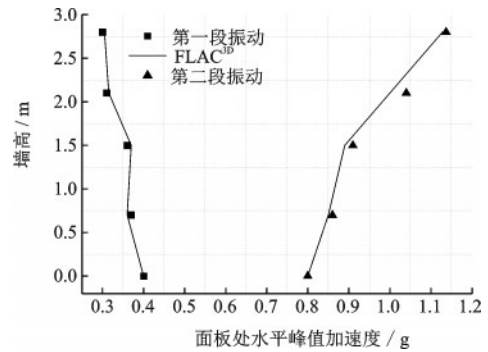


图6 FLAC^{3D}模拟和振动台模型试验面板处峰值加速度比较

Fig.6 Comparison of peak acceleration of the panel in FLAC^{3D} simulation and shaking table model test

献[23]的振动台试验的实测结果计算结果较为一致,对于第一段振动墙顶面板处水平峰值加速度,FLAC^{3D}模拟结果和试验实测结果分别为0.31g和0.3g,第二段振动墙顶面板处水平峰值加速度FLAC^{3D}模拟结果和试验实测结果分别为1.128g和1.137g。经过以上计算,验证了本文动力计算模型的正确性,也为后续动力计算分析提供了理论基础。

2 数值计算结果分析

2.1 混合式和全砂土式加筋土挡墙对比分析

2.1.1 水平地震位移响应与分析

图7给出了在地震峰值加速度为0.1g~0.4g时4种情况下,混合式和全砂土式的加筋土挡墙面板各监测点震后残余水平位移沿墙高方向的变化曲线。由图可见,两种加筋土挡墙的变化规律基本一致,同一地震峰值加速度作用下,从墙底部到墙顶

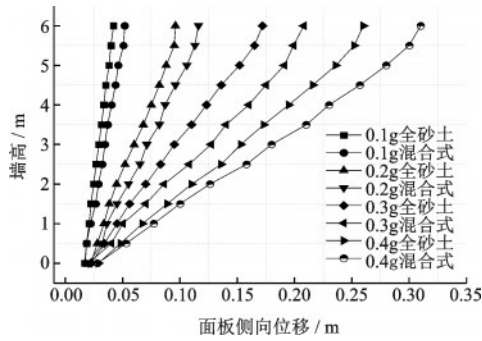


图7 墙面水平位移沿墙高分布曲线

Fig.7 Horizontal displacement profiles of the facing along the wall height

单位墙高的水平位移增长速率逐渐趋缓。随着地震峰值加速度的增加,墙面板均向背离土体的方向发生移动,两种加筋土挡墙所产生的最大水平位移都出现在墙顶位置,地震峰值加速度从0.1g到0.4g,全砂土式加筋土挡墙面板顶部的水平位移分别为4.2、9.6、17.2、26 cm,分别为墙高的0.7%、1.6%、2.9%、4.3%。混合式加筋土挡墙面板顶部的水平位移分别为5.1、11.6、20.8、31 cm,分别为墙高的0.85%、1.9%、3.5%、5.2%。两者的面板顶部水平位移分别相差0.9、2、3.6、5 cm。根据数值模拟结果,地震加速度较小时,水平位移相差较小,地震加速度较大时,水平位移相差较大,差值不超过5 cm,根据抗震设计规范“小震不坏,中震可修,大震不倒”的设计原则,水平位移比分别控制在1.5% H 、5.0% H 、7.0% H 以内,由此可见两种形式的填土在小震、中震、大震均能够满足抗震设防要求,但就经济效益而言,混合式应为首选。

图8给出了不同地震强度下,两种加筋土挡墙墙顶的水平位移随时间的变化曲线。由图可见,两种不同填土形式的加筋土挡墙墙顶部位的水平位移随时间的变化规律基本一致,两种挡土墙在8 s左右的时间内动力水平位移基本趋于稳定,在一定的位移范围内小幅度振动,达到了收敛的状态。

图9给出了在峰值加速度0.4g的地震作用下,两种加筋土挡墙水平方向的最终位移云图,位移等值线均呈现水平层状分布,平滑延伸至未加筋的填土区域,且挡墙上部的水平位移比下部的水平位移大,在墙顶处达到了最大值,地震响应沿着高度方向不断放大,混合式挡墙底部变形范围略大于全砂土式,略有“鼓胀”的趋势。

2.1.2 加速度放大系数

挡土墙内各测量点的地震加速度峰值与输入

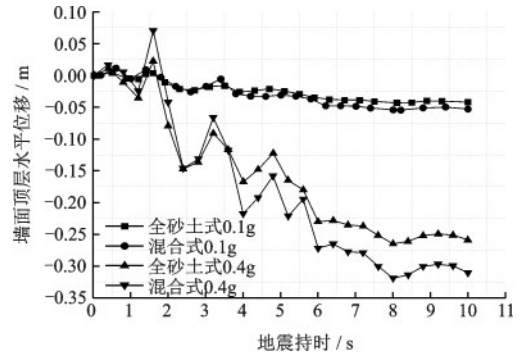


图8 墙面顶层水平位移随时间的变化曲线

Fig.8 Time-history curves of horizontal displacements of the top facing

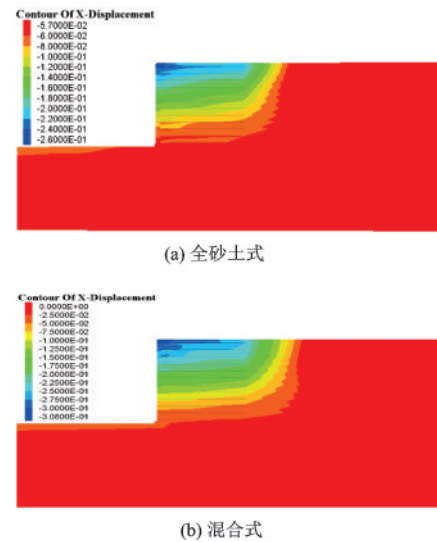


图9 地震峰值加速度0.4g两种加筋土挡墙侧向变形云图
Fig.9 Horizontal deformation contour of two reinforced earth retaining walls under 0.4g acceleration

地震加速度峰值的比值为加速度放大系数。加速度监测点的位置取自距离面板1.5 m处。图10给出了地震峰值加速度为0.1g~0.4g时,混合式和全砂土式的加筋土挡墙6 m高度的加速度时程响应曲线。图11给出了地震峰值加速度为0.1g~0.4g时,混合式和全砂土式的加筋土挡墙在不同震级下加筋土挡墙加速度放大系数沿墙高的变化情况。由图可见,地震峰值加速度从0.1g到0.4g,全砂土式加筋土挡墙的顶部加速度放大系数分别为1.93、1.9、1.83、1.7;混合式加筋土挡墙的顶部加速度放大系数分别为1.95、1.93、1.86、1.74。两者的顶部加速度放大系数分别相差0.02、0.03、0.03、0.04。根据数值模拟结果,无论地震的强度大小,两种填土形式的加筋土挡墙的加速度放大系数相差都很小,同样考虑到经济效益,混合式作为首选。

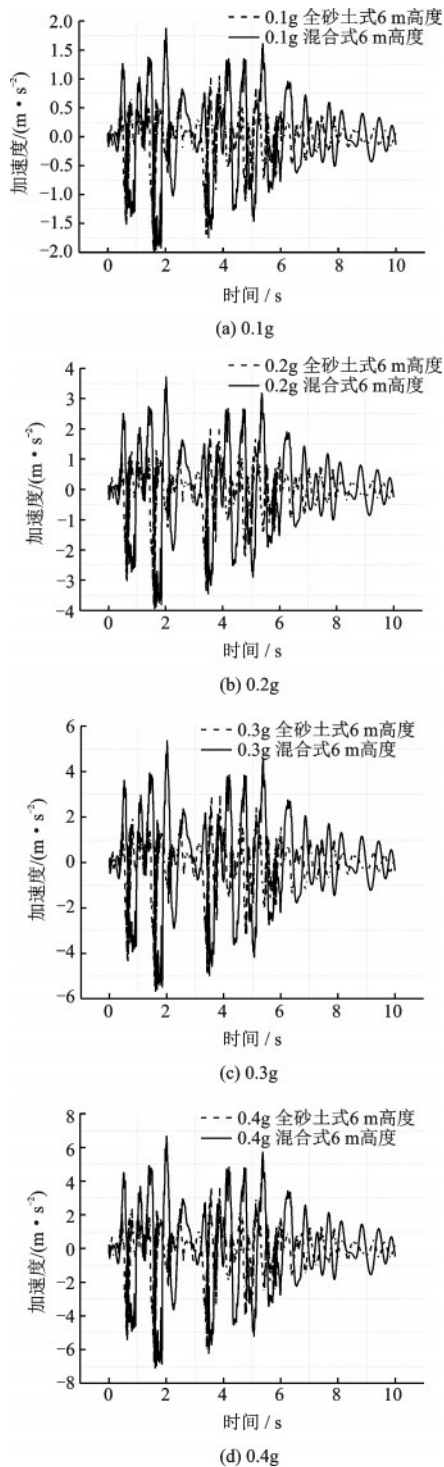


图10 加筋土挡墙加速度响应时程曲线
Fig.10 Time-history curves of acceleration response

从总体趋势来看,在地震波向上传播的过程中,沿着墙高存在明显放大的趋势,两种加筋土挡墙的加速度放大系数的增量一开始较大,之后趋于平缓,并且在墙顶处加速度放大最为明显。随着峰值加速度的增加,水平加速度放大系数有所减小。由于土体具有非线性的特性,随着输入地震加速度

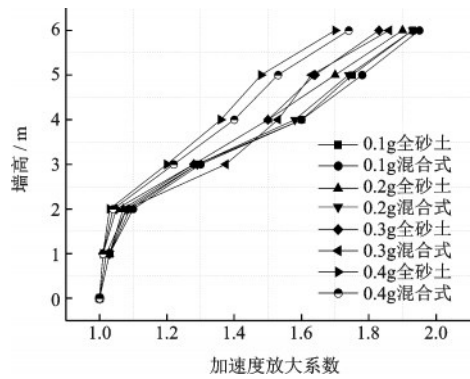


图11 加速度放大系数沿墙高的分布曲线
Fig.11 Profiles of the acceleration amplification factor along the wall height

的增加,土体的滤波作用逐渐增强,从而使得加速度放大系数反而变小。

2.1.3 筋材内力

图12给出了地震峰值加速度0.1g~0.4g时,混合式和全砂土式的加筋土挡墙各层筋材最大内力沿墙高的分布情况。由图可见,地震峰值加速度从0.1g到0.4g,全砂土式加筋土挡墙的筋材最大内力分别为14.9、16.1、18.48、21 kN;混合式加筋土挡墙的筋材最大内力分别为15.45、17.43、19.8、22.5 kN。两者的筋材最大内力分别相差0.55、1.33、1.32、1.5 kN。混合式加筋土挡墙的筋材内力比全砂土式分别大了3.6%、7.6%、6.7%、6.7%。根据数值模拟的结果,两种填土形式的加筋土挡墙的筋材内力相差都很小,差值均在10%以内,同样考虑到经济效益,首选混合式。从总体上看,在不同的地震峰值加速度作用下,两种加筋土挡墙随着墙高的增加均呈现先增大后减小的变化趋势,筋材内力最大的位置均处于加筋土挡墙的中下部,内力的分布范围为15~23 kN/m。

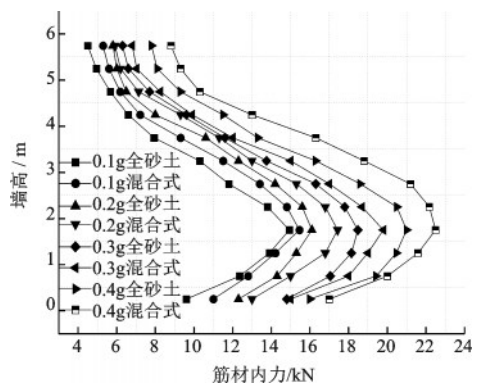


图12 筋材内力沿墙高的分布曲线
Fig.12 Internal force profiles of geogrid along the wall height

图 13 给出了 3 种情况下,混合式 and 全砂土式的加筋土挡墙的潜在破裂面,该破裂面为各层筋材的最大内力离开面板的水平位置的连线。全砂土式加筋土挡墙的潜在破裂面距离墙面板为 1.7 m,为 0.28H。混合式加筋土挡墙的潜在破裂面距离墙面板为 1.8 m,为 0.3H。静力作用时,两种加筋土挡墙的潜在破裂面差别不大。地震峰值加速度为 0.1g 和 0.4g,全砂土式加筋土挡墙的潜在破裂面距离墙面板分别为 2.6 m 和 3 m,为 0.43H 和 0.5H。混合式加筋土挡墙的潜在破裂面距离墙面板分别为 2.8 m 和 3.3 m,为 0.47H 和 0.55H。两者的潜在破裂面距离墙面板的位置分别相差 0.2 m 和 0.3 m。根据数值模拟的结果,两种填土新形式的挡墙中下部潜在破裂面位置基本重合,挡墙中上部有些差别,同样考虑到经济效益,优先考虑混合式。

总体上看,在不同的地震峰值加速度作用下,两种加筋土挡墙的潜在破裂面的位置均向背离墙面板的方向发展,并且发展曲线呈现一个弧形。

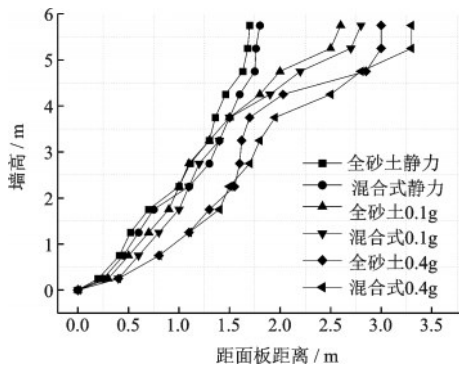


图 13 两种加筋土挡墙潜在破裂面的比较
Fig.13 Comparison of possible failure surfaces with two kinds of reinforced earth retaining walls

2.2 薄砂层厚度的影响

采用上述地震响应中所述的计算模型,对地震荷载作用下的混合式加筋土挡墙进行了计算分析,部分研究结果如下所示。

2.2.1 水平地震位移

图 14 给出了在地震峰值加速度为 0.2g 和 0.4g 两种情况下,薄砂层厚度为 3、5、8、10 cm 的混合式加筋土挡墙面板各监测点累积水平位移沿墙高方向的变化曲线。由图可见,在地震峰值加速度为 0.2g 和 0.4g 时,薄砂层厚度分别为 3、5、8、10 cm 时,对应的最大水平位移分别为 17.3、11.6、13.4、15.4、36、31、32.8、34.5 cm。图 15 给出了不同薄砂层厚度

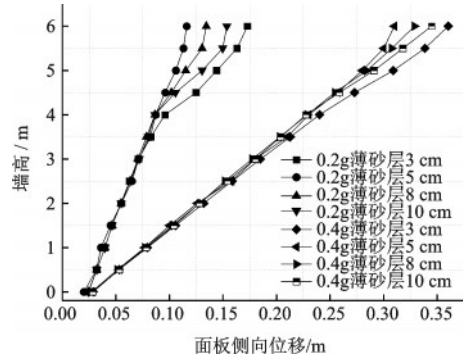


图 14 不同薄砂层厚度时墙面水平位移沿墙高分布曲线
Fig.14 Horizontal displacement profiles of the facing along the wall height under different thicknesses of thin sand layer

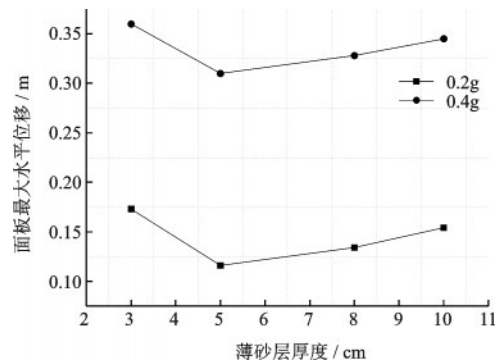


图 15 不同薄砂层厚度与面板最大水平位移关系
Fig.15 Relationship between thickness of thin sand layers and maximum horizontal displacement of the panel

与面板最大水平位移关系曲线。由图可见,不同薄砂层厚度的面板最大水平位移与薄砂层厚度为 5 cm 的情况的差值分别为 5.7、1.8、3.8、5、1.8、3.5 cm。根据数值模拟的结果,随着薄砂层厚度的增加,面板的最大水平位移呈现先减小后增大的变化趋势,这表明存在一个最优薄砂层厚度。本文中薄砂层厚度为 5 cm 时,面板的最大水平位移达到最小值。这是由于砂土的界面剪切强度较高,加筋效应随着离土距离越远,这种效应越弱,加筋的效应只在距离筋材一定范围内的土体中发挥作用,在能够发挥加筋效应的土体内,界面剪切强度随着薄砂层厚度的增加而增大,然而薄砂层的厚度超出影响范围时,超出区域的土体界面抗剪强度降低。

从总体上看不同薄砂层厚度的混合式加筋土挡墙在峰值加速度为 0.2g 和 0.4g 时,分布规律基本一致,均呈现上大下小的趋势,不同薄砂层厚度的水平位移差值随着地震峰值加速度的增加而增大。

2.2.2 加速度放大系数

图 16 给出了在地震峰值加速度为 0.2g 和 0.4g 两种情况下,薄砂层厚度为 3、5、8、10 cm 的混合式加筋土挡墙加速度放大系数随墙高方向变化的曲线。由图可见,在地震峰值加速度为 0.2g 和 0.4g 时,薄砂层厚度分别为 3、5、8、10 cm 时,对应的最大加速度放大系数分别为 1.97、1.93、1.96、1.98、1.9、1.74、1.87、1.88。图 17 给出了不同薄砂层厚度与墙顶加速度放大系数关系曲线。由图可见,不同薄砂层厚度的墙顶放大系数与薄砂层厚度为 5 cm 的差值分别为 0.04、0.03、0.05、0.16、0.13、0.14。根据数值模拟的结果,随着薄砂层厚度的增加,混合式加筋土挡墙的最大加速度放大系数呈现先减小后增大的变化趋势,从中可以看出,薄砂层的厚度为 5 cm 时,混合式加筋土挡墙顶层的加速度放大系数达到最小值。

从总体上看不同薄砂层厚度的混合式加筋土挡墙在峰值加速度为 0.2g 和 0.4g 时,加速度放大系数的变化趋势基本一致,均呈现非线性的增长

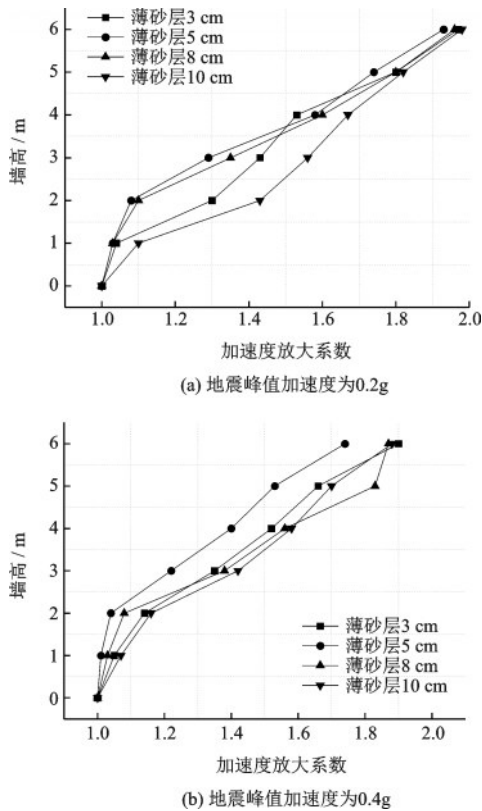


图 16 不同薄砂层厚度时加速度放大系数沿墙高的分布曲线

Fig.16 Acceleration amplification factor along the wall height under different thicknesses of thin sand layer

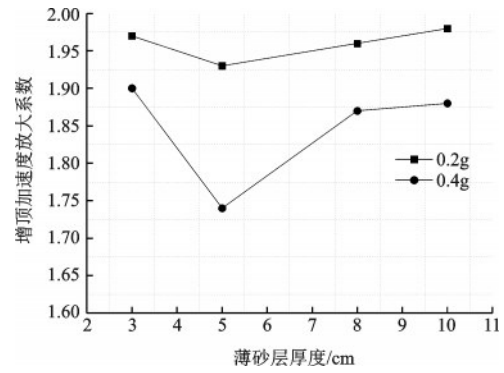


图 17 不同薄砂层厚度与墙顶加速度放大系数关系

Fig.17 Relationship between thickness of different thin sand layers and magnification factor of wall top acceleration

趋势。

2.2.3 筋材内力

图 18 给出了在地震峰值加速度为 0.2g 和 0.4g 两种情况下,薄砂层厚度为 3、5、8、10 cm 的筋材内力沿墙高方向的变化曲线。在地震峰值加速度为 0.2g 和 0.4g 时,薄砂层厚度分别为 3、5、8、10 cm 时,对应的筋材最大内力分别为 21.61、17.43、18.82、19.87、26.3、22.5、24.2、25.44 kN。图 19 给出了不同薄砂层厚度与筋材最大内力关系曲线。由图可见,不同薄砂层厚度的筋材最大内力与薄砂层厚度为 5 cm 时的差值分别为 4.18、1.39、2.44、3.8、1.7、2.94 kN。根据数值模拟的结果,随着薄砂层厚度的增加,筋材的最大内力先减小后增大,同样可以看出薄砂层厚度为 5 cm 时,筋材的最大内力达到最小值。

从总体上不同薄砂层厚度的混合式加筋土挡墙在峰值加速度为 0.2g 和 0.4g 时,分布规律基本一致,呈现先增大后减小的趋势。同一地震加速度作

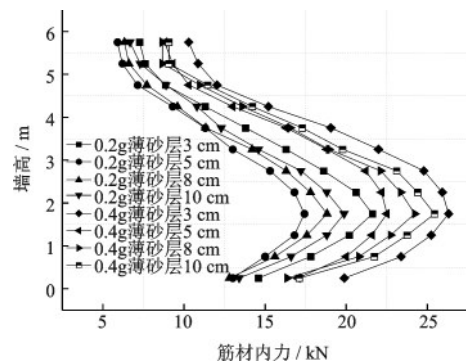


图 18 不同薄砂层厚度时筋材内力沿墙高的分布曲线

Fig.18 Internal force of geogrid along the wall height under different thicknesses of thin sand layer

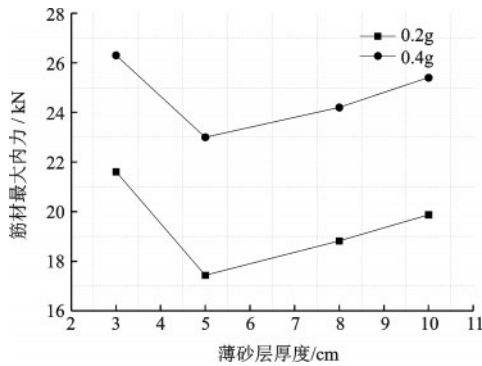


图 19 不同薄砂层厚度与筋材最大内力关系

Fig.19 Relationship between thickness of different thin sand layers and maximum internal force of geogrid

用下,薄砂层的厚度为 3 cm 时,筋材内力均为最大。

3 结 论

混合式和全砂土式加筋土挡墙的对比结果表明,薄砂层厚度对挡墙的抗震变形特性有影响,分析数据得出以下结论:

(1)混合式加筋土挡墙在不同的地震峰值加速度作用下,随着薄砂层厚度的增加,残余水平地震位移、加速度放大系数、筋材最大内力均呈现先减小后增大的趋势,这表明存在一个最优薄砂层厚度,在这个薄砂层厚度下残余水平位移、加速度放大系数、筋材最大内力均达到最小值。

(2)混合式和全砂土式加筋土挡墙在地震作用下的水平位移,加速度放大系数,筋材最大内力相差不多,但是从经济的角度考虑,首选混合式。

(3)在混合式加筋土挡墙中砂土和黏土是两种不同特性的土体,在 0.4g 地震峰值加速度作用下,能够很好地维持并且传递振动,表现出较好的抗震性能。

(4)无论地震波的震级如何变化,混合式加筋土挡墙的潜在破裂面均向土体的内部延伸。

(5)混合式加筋土挡墙对加速度沿墙高方向有显著的放大效应,随着震级的增加,土体的滤波作用逐渐增强,从而使得加速度放大系数反而变小。

参考文献:

[1] 朱宏伟,姚令侃,张旭海.两种加筋土挡墙的动力特性比较及抗震设计建议[J].岩土工程学报,2012,34(11):2072-2080.

Zhu H W, Yao L K, Zhang X H. Comparison of dynamic characteristics between netted and packaged reinforced soil retaining walls and recommendations for seismic design [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(11):2072-2080. (in Chinese)

[2] Ruan X B, Sun S L. Seismic stability of reinforced soil walls under bearing capacity failure by pseudo-dynamic method[J]. Journal of Central South University, 2013, 20(9): 2593-2598.

[3] Scotland I, Dixon N, Frost M, et al. Modelling deformation during the construction of wrapped geogrid-reinforced structures [J]. Geosynthetics International, 2016, 23(3): 1-14.

[4] 黄睿.地震作用下临水加筋挡墙的加筋条拉力系数计算[J].岩石力学与工程学报,2018,37(增1):3666-3673.

Huang R. Calculation of reinforcement tension coefficient of waterfront reinforced wall under seismic actions [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(Sup1): 3666-3673. (in Chinese)

[5] Sukmak K, Han J, Sukmak P, et al. Numerical parametric study on behavior of bearing reinforcement earth walls with different backfill material properties[J]. Geosynthetics International, 2016, 23(6): 1-17.

[6] Latha G M, Manju G S. Seismic response of geocell retaining walls through shaking table tests[J]. International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, 2016, 2(1): 1-15.

[7] 王贺,杨广庆,刘华北,等.模块面板式土工格栅加筋土挡墙动态特性试验研究[J].振动与冲击,2016,35(7):1-9.

Wang H, Yang G Q, Liu H B, et al. Test for dynamic characteristics of a geogrid reinforced soil retaining wall with concrete block panels[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(7):1-9. (in Chinese)

[8] 蔡晓光,李思汉,黄鑫.双级加筋土挡墙动力特性振动台试验[J].中国公路学报,2018,31(2):200-207.

Cai X G, Li S H, Huang X. Shaking table tests on dynamic characteristics of two-stage reinforced soil-retaining wall[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(2):200-207. (in Chinese)

[9] 陈建峰,张琬.采用K-刚度法设计的模块式加筋土挡墙数值模拟[J].岩土工程学报,2017,39(6):1004-1011.

Chen J F, Zhang W. Numerical modeling of a reinforced soil segmental retaining wall designed using the

- K-stiffness method [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(6): 1004-1011. (in Chinese)
- [10] Liu H B, Yang G Q, Ling H I. Seismic response of multi-tiered reinforced soil retaining walls [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2014, 61-62: 1-12.
- [11] Lee K Z Z, Chang N Y. Predictive modeling on seismic performances of geosynthetic-reinforced soil walls [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2012, 35(35):25-40.
- [12] Liu H B, Wang X Y, Song E X. Reinforcement load and deformation mode of geosynthetic-reinforced soil walls subject to seismic loading during service life [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2011, 29(1): 1-16.
- [13] 程亚男,孙树林,阮晓波,等.加筋土挡墙地震稳定性的拟动力分析[J].*岩土力学*,2013,34(12):3573-3579.
Cheng Y N, Sun Sh L, Ruan X B, et al. Pseudo-dynamic analysis of seismic stability of reinforced soil walls [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(12): 3573-3579. (in Chinese)
- [14] 汪益敏,张晖,黎寰,等.考虑地震时程的加筋土挡土墙动力分析[J].*振动与冲击*,2013, 32(24):187-191.
Wang Y M, Zhang H, Li H, et al. Dynamic analysis of reinforced soil retaining walls considering time history of seismic acceleration [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2013, 32(24):187-191. (in Chinese)
- [15] 公路加筋土工程规范:JTJ 015—91[S].北京:人民交通出版社,1999.
Specification for design of highway reinforced earth engineering: JTJ 015—91[S]. Beijing: People's Communications Press, 1999. (in Chinese)
- [16] Federal Highway Administration and U. S. Department of Transportation. FHWA-NHI-10-024 Design and construction of mechanically stabilized earth walls and reinforced soil slopes: Volume I[S]. Washington, D C: Federal Highway Administration and U. S. Department of Transportation, 2009.
- [17] 贾亮,朱彦鹏,来春景.地震作用下加筋挡土墙稳定性分析[J].*西南交通大学学报*,2016,51(4):697-703.
Jia L, Zhu Y P, Lai Ch J. Stability analysis of reinforced earth retaining wall under earthquake [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2016, 51(4): 697-703. (in Chinese)
- [18] Viswanadham B V S, Razeghi H R, Mamaghanian J, et al. Centrifuge model study on geogrid reinforced soil walls with marginal backfills with and without chimney sand drain [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2017, 45(5): 430-446.
- [19] 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.
- [20] Abdi M R, Sadrnejad 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.
- [21] Abdi M R, Zandieh A R. Experimental and numerical analysis of large scale pull out tests conducted on clays reinforced with geogrids encapsulated with coarse material [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2014, 42(5): 494-504.
- [22] 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)
- [23] Ling H I, Mohri Y, Leshchinsky D, et al. Large-scale shaking table tests on modular-block reinforced soil retaining walls [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2005, 131(4): 465-476.

(本文责编:池营营)