

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2021.01.009

筋-土界面刚度软化对加筋土挡墙动力特性的影响*

刘飞禹¹, 童艳光², 汪 歆¹, 陈加亮³

(1. 上海大学土木工程系, 上海 200444; 2. 广州环投花城环保能源有限公司, 广东 广州 510830; 3. 宁波市交通规划设计研究院有限公司, 浙江 宁波 315000)

摘要: 加筋土挡墙被广泛应用于公路工程、铁路工程、水利工程、边坡等支挡结构中, 筋土界面的动力剪切特性对加筋土挡墙的稳定性和耐久性有重要的影响。采用室内直剪试验研究了不同剪切频率(1 Hz, 2 Hz, 3 Hz)和不同竖向压力(50 kPa, 100 kPa, 150 kPa)条件下粗粒土与格栅界面的循环剪切特性。通过对循环剪切试验数据的拟合分析得到了筋土界面剪切刚度变化的经验公式, 然后编制 fish 语言将该公式导入 FLAC^{3D} 软件。通过分析考虑筋土界面剪切刚度变化规律的加筋土挡墙三维计算模型, 并与振动台试验的试验数据进行了对比验证, 发现了考虑筋土界面刚度软化的模型更符合实际情况。采用验证以后的三维计算模型对地震作用下考虑筋土界面和不考虑筋土界面剪切刚度软化的加筋土挡墙动力特性进行了对比分析。结果表明: 考虑筋土界面剪切刚度的软化对地震作用下加筋土挡墙有明显的影 响, 在地震峰值加速度为 0.4g 时, 考虑软化后墙体水平位移比不考虑软化增大了 8.8%, 加速度放大系数比不考虑软化增大了 1.76%, 筋材的最大拉力比不考虑软化的减小了 6.9%。因此筋土界面的剪切刚度软化对地震作用下加筋土挡墙的影响不可忽略。

关键词: 加筋土挡墙; 直剪试验; 筋土界面; 剪切刚度软化; 加速度放大系数

中图分类号: U416.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)01-0075-10

Effect of Stiffness Softening of Reinforcement-soil Interface on Dynamic Characteristics of Reinforced Retaining Wall

LIU Feiyu¹, TONG Yanguang², WANG Xin¹, CHEN Jialiang³

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

2. GZEPI Huacheng Environmental Protection Energy Co., Ltd., Guangzhou, 510830, China;

3. Ningbo Communications Planning Institute Co. Ltd., Ningbo 315000, China)

Abstract: The reinforced retaining wall is widely used in highway engineering, railway engineering, hydraulic engineering, slopes and other supporting structures. The cyclic shear behavior of the soil-geogrid interface has an important influence on the stability and durability of the reinforced retaining wall. The cyclic shear characteristics of the soil-geogrid interface were studied at different shear frequencies (1 Hz, 2 Hz, and 3 Hz) and normal stresses (50 kPa, 100 kPa, and 150 kPa) by using a large-scale direct shear apparatus. Through fitting analyses of the cyclic shear test data, the empirical formula of the shear stiffness of the soil-geogrid interface is obtained. Then the FISH script is compiled into the software FLAC3D, and a three-dimensional calculation model of the reinforced retaining

* 收稿日期: 2019-08-03; 修回日期: 2019-09-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(52078285, 51678352, 51878402)、宁波市交通运输委员会科技项目(201505)资助
作者简介: 刘飞禹(1976—), 男, 教授, 博士。主要从事土动力学和地基处理方面的研究。E-mail: lfyjzu@shu.edu.cn

wall is established considering the variation law of the shear stiffness of the soil-geogrid interface, which is compared and verified with the test data of the shaking table test. It is found that the model considering the softening of the soil-geogrid interface is more in line with the actual situation. After verification, the three-dimensional calculation model is used to investigate the influence of shear stiffness softening on the dynamic characteristics of the reinforced retaining wall. The results show that the softening of the shear stiffness has a significant effect on the reinforced retaining wall under seismic loads. When the peak acceleration of the earthquake is 0.4 g, the horizontal displacement of the wall is 8.8% larger than that without considering the stiffness softening. The acceleration amplification factor is increased by 1.76% compared with that neglecting the stiffness softening effect. Simultaneously, the maximum internal force of the geogrid is reduced by 3.8%. Therefore, the shear stiffness softening at the soil-geogrid interface is not negligible for the reinforced retaining wall under seismic loads.

Keywords: reinforced retaining wall; direct shear test; soil-geogrid interface; shear stiffness softening; acceleration amplification factor

引 言

加筋土技术是目前挡土墙中经常用于加固土体提高结构整体稳定性的一种方法,被广泛应用于公路工程、铁路工程、水利工程、边坡等支挡结构中^[1-2]。其中,筋材与土体接触面的相互作用较为复杂,它是加筋土工程设计中的关键所在。目前研究加筋土界面力学特性的方法主要有直剪试验^[3-4]、拉拔试验、三轴试验、扭剪试验和数值模拟。实际中往往通过直剪试验分析筋土界面剪切特性,可以有效地模拟加筋土结构中筋材沿破坏面方向滑移的破坏模式。

众多国内外学者已经对静力作用下筋-土界面的剪切特性进行了研究,并取得了一定的成果。M. Touahmia等^[5]通过有限元Plaxis研究了土工格栅在静载荷作用下的拔出性能,结果表明,数值模型可以很好地预测土工格栅在静载荷作用下的拔出荷载。P. Punetha等^[6]通过改进的大型直剪箱和扫描显微镜研究了砂土-土工膜界面的剪切机制及不同参数对剪切机理的影响,得出了筋-土界面的剪切机制很大程度上取决于砂的正常应力和饱和度。M. Suzuki等^[7]通过直剪试验研究了粒状膨润土含水率变化时与土工织物之间的剪切特性。M. Hyodo等^[8]研究了硅砂在两种初始密度和0.1~5 MPa围压下单调和循环剪切特性以及颗粒破碎。M. M. Biabani等^[9]通过一系列直剪试验研究了土工膜和土工格栅的界面剪切特性,实验结果表明,剪切速率对剪切强度有重要的影响。唐晓松等^[10]通过室内试验发

现了土工格栅特有的网孔尺寸对筋-土界面剪切特性会产生一定的影响。F. M. Ezzein等^[11]通过透明模型盒和透明颗粒土壤来跟踪土颗粒的位移,实验结果表明:土工格栅在土体内的刚度大于在空气中相同位移速率下进行的恒定应变率测试所推导的刚度。王军等^[12]通过试验分析了不同玻璃纤维土工格栅横肋、纵肋及格栅的几何尺寸对筋土界面强度特性的影响。M. R. Abdi等^[13-15]对三明治形加筋土结构进行了拉拔试验,研究了不同薄砂层的厚度下筋土界面的力学特性。赵雨滕等^[16]通过室内单剪试验仪,研究了不同种类的土工格栅,格栅的层数和格栅的布置形式对筋土界面力学特性的影响。戴北冰等^[17]通过室内大型直剪仪,研究了4种颗粒摩擦情况对加筋土结构力学特性的影响,提出了颗粒滑动的功能方程。

但在实际工程中,加筋土结构经常受到动荷载作用,如地震、波浪、交通荷载等。P. Vangla等^[18]通过3D光学轮廓仪研究了循环剪切作用下,不同粒径、不同形态的土颗粒对筋土界面剪切强度的影响。王军等^[19]通过大型室内循环直剪试验,研究了密实度对筋土界面剪切强度的影响,试验表明:砂土密实度达到75%,筋土界面的呈现剪切软化的现象。刘飞禹等^[20]通过循环剪切试验,研究了薄砂层厚度对三明治形加筋土界面剪切特性的影响。G. Tavakoli等^[21]经过36次循环加载试验,研究了4种不同的土颗粒尺寸,2种不同的格栅孔径尺寸和3种不同尺寸的加载板对加筋土结构承载能力的影响,试验结果表明,土工格栅的孔径尺寸在大约0.2倍的基础宽度的时,加筋结构承载能力最好。

R.Freire 等^[22]过轴向循环试验,研究了格栅与沥青土体的混合物界面的力学特性。

综上所述,对动力作用下筋土界面刚度软化特性的研究较为缺乏,本文以室内循环直剪试验为基础,通过对试验数据进行拟合分析得到筋土界面刚度软化经验公式,通过 fish 语言将经验公式编入 FLAC^{3D} 软件中,采用数值模拟软件对地震作用下考虑筋土界面刚度软化和不考虑软化的加筋挡土墙动力特性进行对比分析。

1 试验过程

1.1 试验设备与材料

本次试验采用室内大型动态直剪仪,如图 1 所示。该直剪盒的尺寸(长×宽×高)分别为,上剪切盒的有效尺寸为 600 mm×200 mm×50 mm,下剪切盒的有效尺寸为 800 mm×200 mm×50 mm。振动形式可控的动态直剪仪可以精确分析地震波激振作用下筋土界面动力剪切强度,然后分析加筋土结构在地震作用下的稳定机理。循环直剪试验均采用位移控制方式进行。该装置可以是荷载控制或位移控制的,并且水平和垂直运动由液压伺服执行器引起,由线性可变差动变压器(LVDT)记录,最大测量值为 150 mm。最大法向施加力和最大剪切力为 60 kN 和 35 kN,精度为±1%,并且压缩或剪切力的最大频率为 5 Hz。



图 1 室内大型直剪仪

Fig.1 Large-scale direct shear apparatus

在剪切过程中,上剪切盒位置固定不动,下剪切盒从平衡位置开始,沿着路径①-②-③-④-①进行剪切,最终回到平衡位置,此过程为一个循环,如图 2 所示,在剪切过程中剪切的面积固定不变。

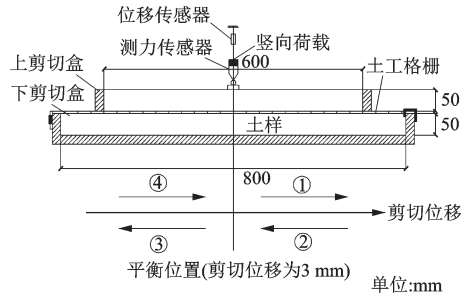


图 2 循环剪切路径

Fig.2 Cyclic shear path

1.2 试验材料

试验材料为石英粗粒土,如图 3 所示,其干密度为 1.84 g/cm³,粒径为 0.075~9.5 mm,不均匀系数 $C_u=6.33$,曲率系数 $C_c=1.18$,颗粒级配曲线如图 4 所示,物理性质指标见表 1。加筋材料采用双向聚丙烯土工格栅,各项技术指标见表 2。



图 3 粗粒土试样

Fig.3 Coarse grained soil specimens

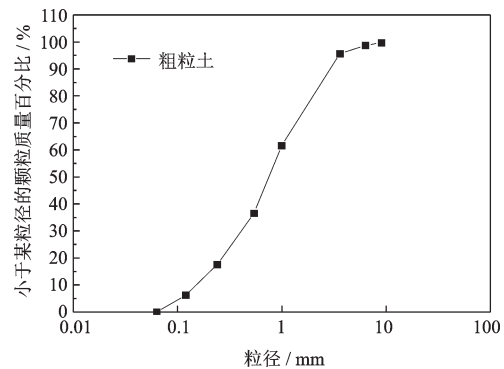


图 4 粗粒土颗粒级配曲线

Fig.4 Particle size distribution curves of the coarse-grained soil

表 1 粗粒土的基本物理参数

Table 1 Basic physical parameters of the coarse-grained soil

参数	颗粒粒径/mm				C_u	C_c	e_{max}	e_{min}
	d_{10}	d_{30}	d_{50}	d_{60}				
数值	0.15	0.41	0.72	0.95	6.33	1.18	0.7	0.49

表2 聚丙烯土工格栅技术指标

Table 2 Technical parameters of the geogrid

技术指标	单位面积质量/ (g·m ⁻²)	网孔尺寸/mm	极限延伸率/%		极限抗拉强度/(kN·m ⁻¹)		纵横肋尺寸/mm	
			横	纵	横	纵	横	纵
数值	280	30×30	13	15	20	20	5	5

2 试验方案

本次试验分别考虑了竖向应力为50、100、150 kPa和剪切频率为1、2、3 Hz条件下粗粒土的循环剪切试验。粗粒土的相对密实度达到94%，剪切幅值设定为3 mm。采用分层填筑的方法对粗粒土进行装样，粗粒土分为2层(每层25 mm)压实至指定高度。试验方案见表3，研究竖向压力、剪切频率对筋土界面剪切特性的影响。

表3 试验方案

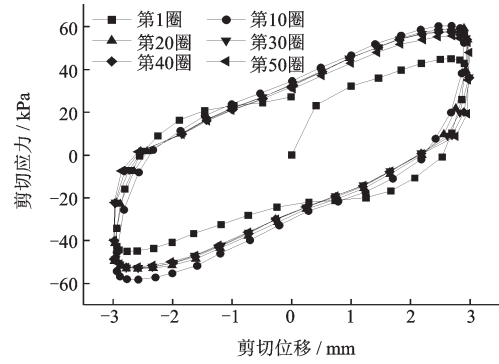
Table 3 Test programs

试验类型	竖向应力/kPa	剪切频率/Hz	剪切幅值/mm	循环次数/次	相对密实度/%
循环剪切	50、100、150	1、2、3	3	50	94

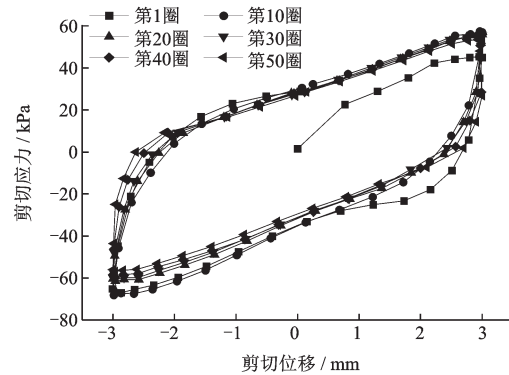
3 试验结果分析

3.1 剪切频率的影响

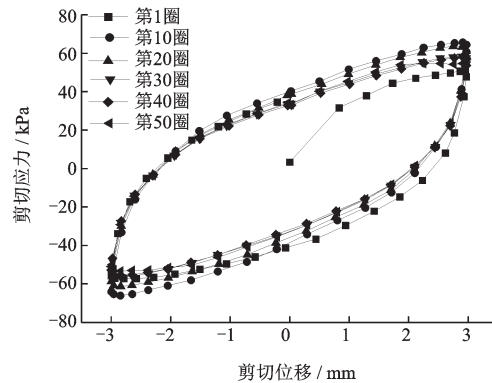
图5给出了竖向压力为50 kPa时，不同剪切频率的条件下，格栅与粗粒土界面的剪切应力—剪切位移关系曲线。由于砂土的各向异性导致正负方向的剪切力峰值存在一定差异，本文中规定一个滞回圈中峰值剪应力为该循环圈的正负剪应力峰值的平均值。可以看出：(1)3种频率(1、2、3 Hz)最大剪应力峰值和残余峰值剪应力分别为59.25、62.97、66.36和54.9、57.69、57.9 kPa，表明了随着循环次数的增加，界面的剪切力—剪切位移滞回曲线发展模式为先由内向外扩张再由外向内缩减，最终趋于重合，格栅与粗粒土界面呈现剪切软化现象。这是由于在循环剪切过程中，格栅的磨损，降低了与土颗粒之间的摩擦作用。土颗粒破碎使土体的摩擦角变小，界面抗剪切强度弱化。(2)在一个完整的滞回圈内，曲线是闭合的，且在加载段和卸载段基本保



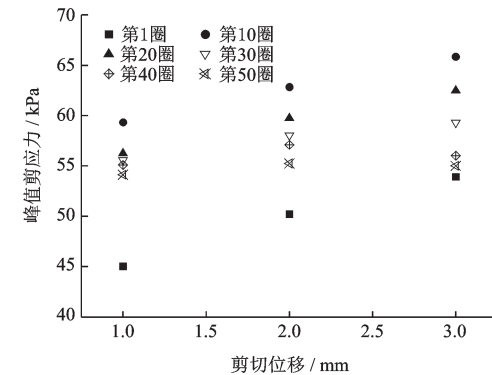
(a) 1 Hz



(b) 2 Hz



(c) 3 Hz



(d) 三种频率下各滞回圈峰值剪应力

图5 不同剪切频率下格栅-粗粒土界面的剪应力

Fig.5 Shear stresses of coarse-grained soil-geogrid interface under three different shear frequencies

持平行。(3)随着剪切频率的增加,峰值剪切力增大,增幅却逐渐减小。

图6给出了不同剪切频率、竖向压力50 kPa下,粗粒土格栅界面的竖向位移—剪切位移关系曲线。由图可见:(1)不同频率下粗粒土竖向位移随着循环次数的增大而增大,且在每一个循环周期内,剪胀现象与剪缩现象交替出现,这表明土颗粒在循环剪切过程中从无序状态转变成有一定方向的有序

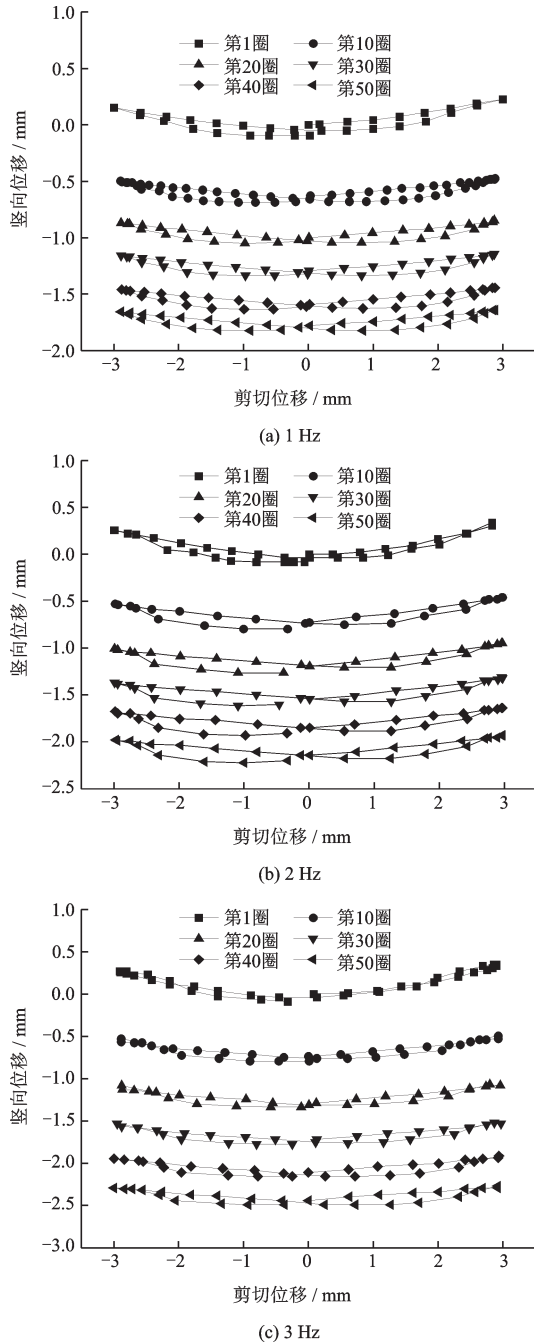


图6 粗粒土的竖向位移—剪切位移关系曲线

Fig.6 Vertical displacement-shear displacement behavior of coarse-grained soil-geogrid interface

状态。(2)竖向位移在循环剪切初始阶段增加比较快,随后因为密实度的增大,增量逐渐减小;随着循环次数的增加,粗粒土剪缩的速率先增大后减小。(3)在3种剪切频率(1、2、3 Hz)下,粗粒土在循环50次后的最终剪缩量分别为:1.8、2.176和2.477 mm,表明随着剪切频率的增加,试样的最终剪缩量不断增大,增幅却逐渐减小。

在地震和波浪的循环荷载作用下,土体的剪切模量是必不可少的动力学参数,通常用于等效线性地震动分析。参照C.J.Nye等^[23],C.S.Vieira等^[24]筋土界面的剪切刚度定义,按文献[23-24]的剪切刚度的公式进行下列分析。图7给出了不同剪切频率,竖向压力为50 kPa下,界面剪切刚度随循环次数的发展规律。可以看出:(1)3种剪切频率(1、2、3 Hz)的界面剪切刚度从15、17.1、18 MPa/m增大到19.8、21.03、22.12 MPa/m再减小到18.3、19.23、19.8 MPa/m。随着循环剪切次数的增加,界面剪切刚度先增大再减小最后趋于稳定,筋土界面出现剪切刚度软化现象。(2)3种剪切频率(1、2、3 Hz)循环50圈之后的最终剪切刚度分别为18.3、19.23、19.8 MPa/m,表明随着剪切频率的增加,剪切刚度逐渐增大,相应的增幅却逐渐减小。

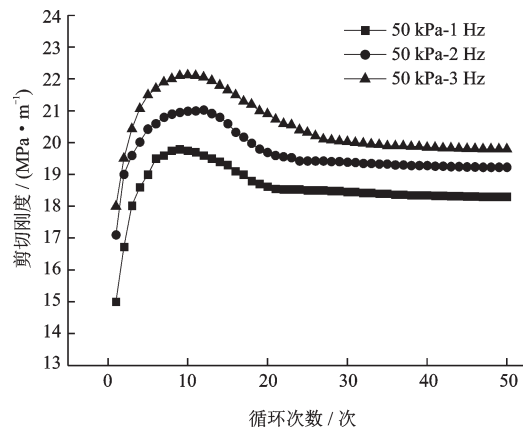


图7 不同频率下筋土界面剪切刚度随循环次数的发展规律

Fig.7 Development of shear stiffness of the soil-geogrid interface with the number of cycles under different frequencies

3.2 竖向压力的影响

图8给出了3种不同竖向压力(50, 100, 150 kPa),剪切频率为3 Hz时,格栅与粗粒土界面的峰值剪切力。由图可见:(1)随着循环剪切次数的增加,各竖向应力下,峰值剪应力先增大后减小,格栅与粗粒土界面剪切强度呈现剪切软化的变化趋势。

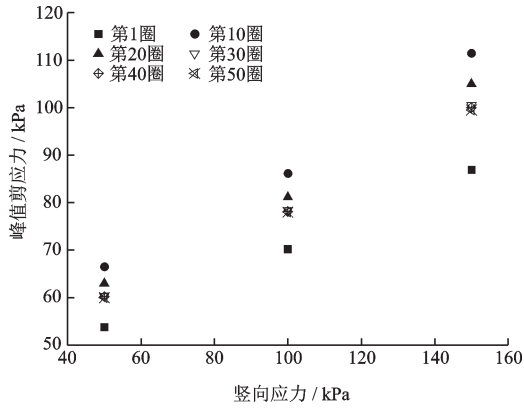


图8 不同竖向压力下格栅-粗粒土界面的峰值剪应力
Fig.8 Peak shear stresses of coarse-grained soil-geogrid interface under different vertical pressure

(2) 3种竖向压力(50、100、150 kPa)循环50圈之后的峰值剪切力分别为57.9、77.22、99.8 kPa。表明随着竖向压力的增加,峰值剪切力增大,增幅也逐渐增加。这是由于竖向压力的增加使土体更加密实,较小的剪切位移也会产生较大的剪应力。

图9给出了不同竖向压力下,界面剪切刚度随循环次数的发展规律。从图中可以看出不同竖向压力下剪切刚度随着循环次数的增加先增大后减少,出现剪切刚度软化现象。而且,随着竖向应力的增大,剪切刚度也逐渐增大。在3种竖向压力(50、100、150 kPa)下,界面剪切刚度在达到峰值之后分别下降了10.8%、10.5%、10.4%。

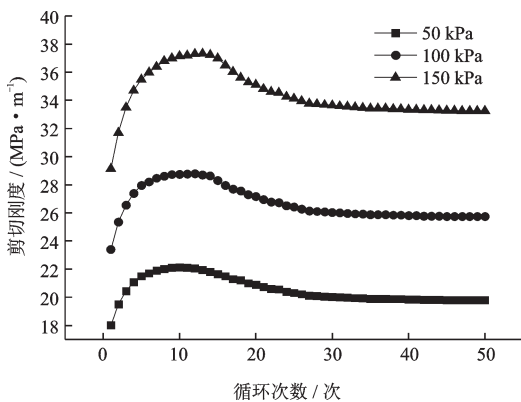


图9 不同竖向力下界面剪切刚度随循环次数的发展规律
Fig.9 Development of shear stiffness of soil-geogrid interface with the number of cycles under different normal stresses

综上所述,筋土界面的剪切特性对加筋土结构的稳定性和耐久性有重要的影响。因此为了更准确的模拟地震作用下加筋土挡墙的动力特性,就不能忽视筋土界面剪切刚度的软化现象,在三维加筋

土挡墙模型计算中考虑界面刚度软化是有必要的。

4 加筋土挡墙计算模型

本文采用FLAC^{3D}软件来分析地震作用下考虑筋土界面软化的加筋土挡墙的动力特性,采用摩尔-库伦模型模拟粗粒土、黏土和地基土。用弹性模型模拟墙面模块和模块基础的弹性特性。用一维单元 geogrid 来模拟土工格栅。假设筋材与面板刚性连接,地震荷载采用频率为3 Hz的Kobe波的南北分量,地震波由模型底部输入,如图10所示。采用Rayleigh阻尼应用于结构与弹性连续介质的动力分析。通过试算确定了如图11所示的计算网格,模型的几何尺寸如图12所示。粗粒土、筋材的参数取自土工试验。其余的计算参数来自引用文献[25]中的大型振动台试验,面板采用预制混凝土模块,模块尺寸为0.25 m×0.3 m×0.5 m(高×长×宽),材料的基本参数见表4,筋材参数见表5,接触面参数见表6。

在静力计算的时候,地基地部水平和垂直方向固定,同时约束模型前后的水平位移,地基左右两侧的水平位移,填土右侧的水平位移。在动力计算

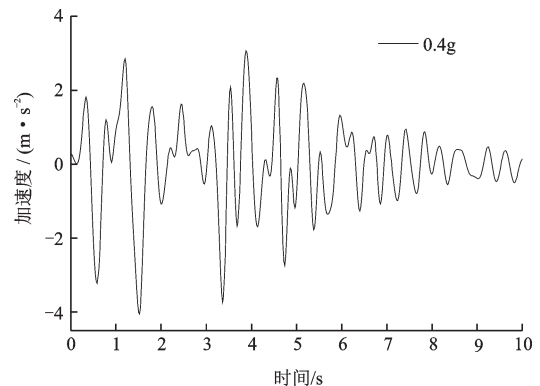


图10 输入加速度时程曲线
Fig.10 Input acceleration time history curve

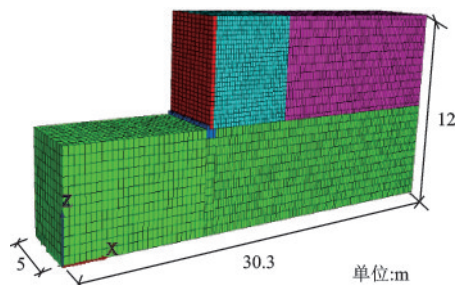


图11 三维模型网格划分
Fig.11 Diagram of the 3D mesh model

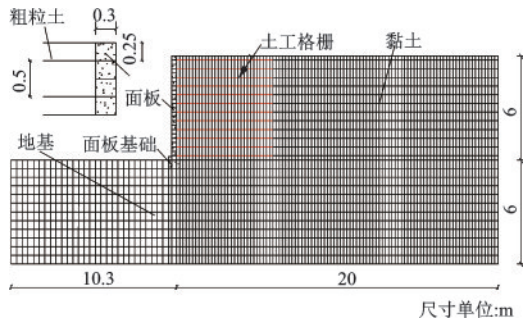


图 12 几何尺寸

Fig.12 Geometric size

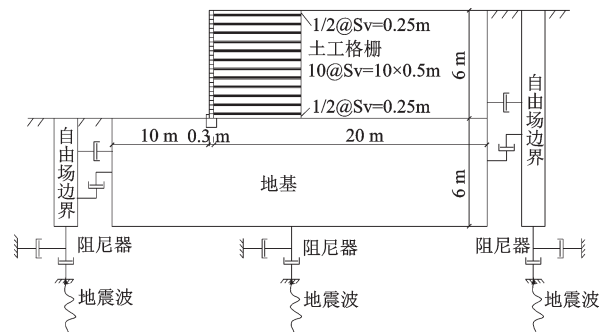


图 13 边界条件

Fig.13 Boundary conditions

表 4 材料模型参数

Table 4 Material model parameters

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
黏土	15.65	0.35	30	15	1 730
粗粒土	38	0.3	0	36	1 840
墙面模块	2×10 ³	0.2	—	—	2 000
面板基础	1.12×10 ⁴	0.15	—	—	2 400

表 5 格栅物理参数

Table 5 Technical parameters of geogrid

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

表 6 接触面模型参数

Table 6 Contact surface model parameters

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-模块	1 000	40	45.7	57

的时候,为了模拟无限边界情况,设置自由场边界,如图 13 所示。

本文采用地震频率为 3 Hz,分析在 3 Hz 频率下筋土界面的剪切刚度软化特性,通过对土工试验数据进行拟合分析,采用如下多项式对 $K-t$ 关系曲线进行拟合可以得到比较理想的结果,拟合曲线如图 14 所示,经验公式如下:

$$K=1.69 \times 10^7 + 4.6 \times 10^6 t - 1.42 \times 10^6 t^2 + 1.98 \times 10^5 t^3 - 1.47 \times 10^4 t^4 + 562 t^5 - 8.8 t^6 \quad (1)$$

式中, K 为筋土界面剪切刚度; t 为地震荷载作用时间。

编制 fish 语言将式(1)导入 FLAC^{3D} 软件中模拟筋-土界面的剪切刚度变化规律。

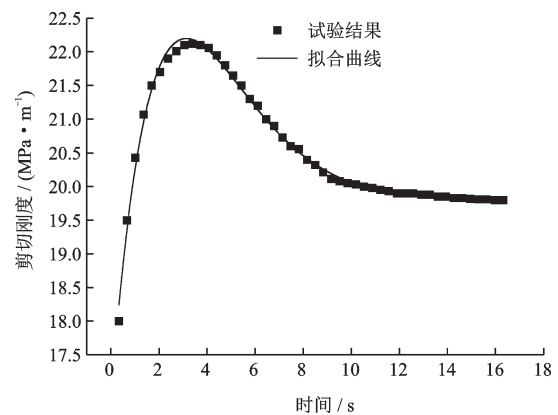


图 14 界面剪切刚度 $K-t$ 拟合曲线

Fig.14 Interface shear stiffness $K-t$ fitting curve

5 考虑与不考虑刚度软化对比分析

5.1 实例验证

为了验证考虑筋土界面刚度软化的合理性,为此,对文献[26]中的大型振动台试验(text1)中的 wall7 工况进行了数值模拟计算,并且将试验结果的实测值与模拟值进行了对比。峰值加速度为 0.5g,地震作用时间为 10 s。验证模型中的模型尺寸以及相关参数均采用文献[26]的试验参数,面板采用预制混凝土模块,尺寸为 0.2 m×0.2 m×0.02 m(高×长×宽)。

图 15 为墙体位移与墙高的关系曲线,由图可见,考虑筋土界面刚度软化的墙体位移的数值计算

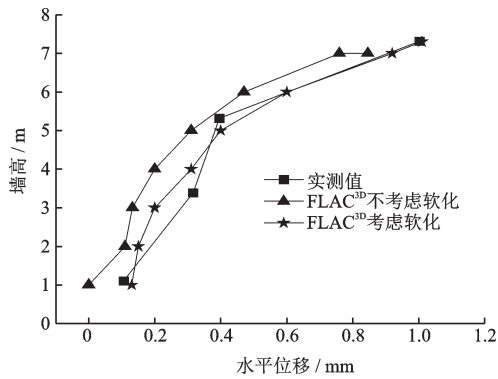


图 15 FLAC^{3D}模拟和振动台试验水平位移比较

Fig.15 Comparisons of horizontal displacements between FLAC3D simulation and shaking table test results

值与实测值吻合较好,考虑筋土界面刚度软化的墙顶面板水平位移FLAC^{3D}模拟的结果和试验的实测结果分别为1.01和1.0 mm,不考虑筋土界面刚度软化的墙顶面板水平位移FLAC^{3D}模拟的结果比实测值小18.5%。因此,考虑筋土界面刚度软化更接近实际。

5.2 挡墙面板水平位移

图 16 给出了在地震峰值加速度为 0.1g~0.4g 时,加筋土挡墙在考虑和不考虑筋土界面刚度软化的两种情况下,挡墙面板水平位移沿墙高的分布曲线。由图可见:(1)两种情况下墙面水平位移沿墙高的变化规律基本一致,沿着墙高方向水平位移逐渐增大,增幅却逐渐减小。(2)地震峰值加速度为 0.4g 时,考虑和不考虑筋土界面刚度软化两种情况下,墙顶的侧向位移分别为 26.2、23.9 cm。比较考虑软化与不考虑界面刚度软化两种情况,加筋土挡墙水平位移增加了 8.8%。表明筋土界面的刚度软化特性会影响到挡墙的整体水平位移和筋材的内

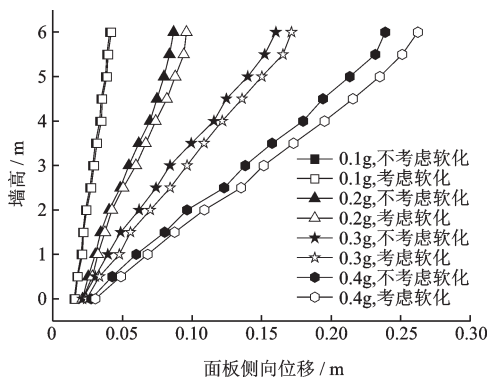


图 16 墙面水平位移沿墙高分布曲线

Fig.16 Distribution curves of wall horizontal displacements along the wall height

力。这主要是由于在循环剪切的过程中土颗粒破碎,格栅发生磨损破坏等物态变化,从而降低了筋土界面之间的相互作用,使得格栅对加固挡土墙整体稳定性的效果减弱,所以考虑筋土界面刚度软化墙体的变形会增加。

5.3 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 17 给出了地震峰值加速度为 0.1g~0.4g 时,考虑筋土界面刚度软化和不考虑筋土界面刚度软化的加筋土挡墙加速度放大系数沿墙高的变化情况。由图可见:(1)两种情况下沿着墙高加速度放大系数有明显放大的趋势,在墙顶处达到最大。(2)随着峰值加速度的增加,加速度放大系数减小。这是由于加速度增加使得地基变得较为密实,地基上部土体运动不一致导致刚度弱化,从而使得加速度放大系数反而变小,土体起到了减震隔震的作用。(3)地震峰值加速度从 0.1g 到 0.4g,考虑筋土界面软化的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。不考虑筋土界面软化的加筋土挡墙的顶部加速度放大系数分别为 1.923、1.89、1.807、1.67。考虑软化情况比不考虑软化情况增大了 0.36%、0.53%、1.26%、1.76%。因此在地震作用下的加筋土挡墙的动力分析中考虑筋土界面刚度软化是有必要的。

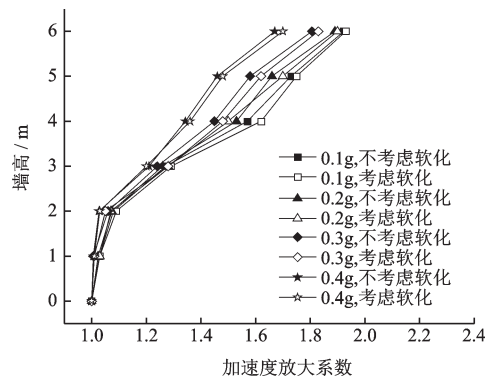


图 17 加速度放大系数沿墙高的分布曲线

Fig.17 Distribution curves of acceleration amplification coefficients along the wall height

5.4 筋材内力

图 18 给出了地震峰值加速度为 0.1g~0.4g 时,考虑筋土界面软化和不考虑筋土界面刚度软化的加筋土挡墙各层筋材最大内力沿墙高的分布情况。

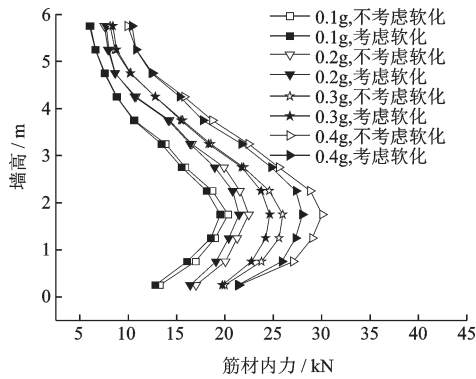


图 18 筋材最大内力随墙高的分布曲线

Fig.18 Distribution curves of maximum internal forces of the reinforcement with the wall height

由图可见:(1)在不同的地震峰值加速度作用下,两种情况的加筋土挡墙筋材最大内力先增大后减小。(2)地震峰值加速度从0.1g到0.4g,考虑筋土界面刚度软化的加筋土挡墙的筋材最大内力分别为19.51、21.46、24.63、27.99 kN。不考虑筋土界面刚度软化的加筋土挡墙的筋材最大内力分别为20.31、22.47、25.96、30.06 kN。对比考虑与不考虑界面刚度软化两种情况,筋材最大内力减小了3.9%、4.5%、5.1%、6.9%。

6 结 论

本文研究了在不同剪切频率和不同竖向压力筋土界面剪切刚度软化的规律,采用数值模拟的方法对比分析了在地震作用下加筋挡土墙考虑筋土界面软化和不考虑筋土界面刚度软化的动力特性,得到如下结论:

(1)在循环剪切试验下,随着剪切频率和竖向压力的增加,峰值剪切应力逐渐增大。随着循环次数的增加,格栅-粗粒土界面剪切刚度先增大后减小,呈现剪切刚度软化现象。

(2)经过验证考虑软化的更接近于地震荷载作用下振动台的模型试验。考虑筋土界面剪切刚度的软化对地震作用下加筋土挡墙有明显的影

(3)比较两种情况下加筋土挡墙的墙面水平位移、加速度放大系数和筋材的最大内力,在考虑软化后墙体水平位移、加速度放大系数较大,筋材的最大内力较小。

参考文献:

[1] Fattah M Y, Mahmood M R, Aswad M F. Stress dis-

tribution from railway track over geogrid reinforced ballast underlain by clay [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2019, 18(1): 77-93.

[2] Tavakoli M G, Ghanbari A, Mehdizadeh H. Experimental study on the behaviour of geogrid-reinforced slopes with respect to aggregate size [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2016, 44(6): 862-871.

[3] Sayeed M M A, Ramaiah B J, Rawal A. Interface shear characteristics of jute/polypropylene hybrid non-woven geotextiles and sand using large size direct shear test [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2014, 42(1): 63-68.

[4] 徐超, 陈洪帅, 石志龙, 等. 筋-土界面力学特性的水平循环剪切试验研究 [J]. 岩土力学, 2013, 34(6): 1553-1559.

Xu Ch, Chen H Sh, Shi Zh L, et al. Research on the mechanical behavior of soil-reinforcement interface by horizontal cyclic shear test [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(6): 1553-1559. (in Chinese)

[5] Touahmia M, Rouili A, Boukendakdji M, et al. Experimental and numerical analysis of geogrid-reinforced soil systems [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2018, 43: 5295-5303.

[6] Punetha P, Mohanty P, Samanta M. Microstructural investigation on mechanical behavior of soil-geosynthetic interface in direct shear test [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2017, 45(3): 197-210.

[7] Suzuki M, Koyama A, Kochi Y, et al. Interface shear strength between geosynthetic clay liner and covering soil on the embankment of an irrigation pond and stability evaluation of its widened sections [J]. Soils and Foundations, 2017, 57(2): 301-314.

[8] Hyodo M, Wu Y, Aramaki N, et al. Undrained monotonic and cyclic shear response and particle crushing of silica sand at low and high pressures [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, 54(2): 207-218.

[9] Biabani M M, Indraratna B. An evaluation of the interface behaviour of rail subballast stabilised with geogrids and geomembranes [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2015, 43(3): 240-249.

[10] 唐晓松, 郑颖人, 王永甫, 等. 关于土工格栅合理网孔尺寸的研究 [J]. 岩土力学, 2017, 38(6): 1583-1588. Tang X S, Zh Y R, Wang Y F, et al. Study on the reasonable size of geo-grid meshes [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(6): 1583-1588. (in Chinese)

[11] Ezzein F M, Bathurst R J. A new approach to evaluate soil-geosynthetic interaction using a novel pullout test apparatus and transparent granular soil [J]. Geotextiles

- and Geomembranes, 2014, 42(3): 246-255.
- [12] 王军, 林旭, 刘飞禹, 等. 砂土与格栅界面相互作用的直剪试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(增1): 113-120.
Wang J, Lin X, Liu F Y, et al. Research on large size direct shear test for geocell reinforced soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(Sup 1): 113-120. (in Chinese)
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 赵雨朦, 徐东升, 刘华北. 土工格栅与砂土相互作用的单剪试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(增1): 3722-3728.
Zhao Y M, Xu D Sh, Liu H B. Study of interaction behavior between geogrids and sand with simple shear test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(Sup 1): 3722-3728. (in Chinese)
- [17] 戴北冰, 杨峻, 周翠英. 颗粒大小对颗粒材料力学行为影响初探[J]. 岩土力学, 2014, 35(7): 1878-1884.
Dai B B, Yang J, Zhou C Y. A preliminary investigation on effect of particle size on mechanical behavior of granular materials[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(7): 1878-1884. (in Chinese)
- [18] Vangla P, Gali M L. Shear behavior of sand-smooth geomembrane interfaces through micro-topographical analysis[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2016, 44(4): 592-603.
- [19] 王军, 王攀, 刘飞禹. 密实度不同时格栅-砂土界面循环剪切及其后直剪特性[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(2): 342-349.
Wang J, Wang P, Liu F Y. Cyclic and post-cyclic direct shear behaviors of geogrid-sand interface with different soil densities[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(2): 342-349. (in Chinese)
- [20] 刘飞禹, 施静, 张涛. 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, Shi J, Zhang T. 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)
- [21] Tavakoli M G, Khazaei M. Scale effect on the behaviour of geogrid-reinforced soil under repeated loads[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2017, 45(6): 603-615.
- [22] Freire R, Hervé Di Benedetto, Sauzéat Cédric, et al. Linear viscoelastic behaviour of geogrids interface within bituminous mixtures[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2018, 22(6): 2082-2088.
- [23] Nye C J, Fox P J. Dynamic shear behavior of a needle-punched geosynthetic clay liner[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(8): 973-983.
- [24] Vieira C S, Lopes M D L, Caldeira L. Sand-geotextile interface characterisation through monotonic and cyclic direct shear tests [J]. Geosynthetics International, 2013, 20(1): 26-37.
- [25] 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.
- [26] Komak Panah A, Yazdi M, Ghalandarzadeh A. Shaking table tests on soil retaining walls reinforced by polymeric strips [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2015, 43(2): 148-161.

(本文责编:周小潭)