

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20221006002

# 不同含水率下考虑筋土界面刚度软化的加筋边坡地震响应\*

李水江<sup>1</sup>, 童艳光<sup>1</sup>, 刘飞禹<sup>2</sup>, 陈舒祺<sup>2</sup>

(1. 广州环保投资集团有限公司, 广东 广州 510330; 2. 上海大学力学与工程科学学院, 上海 200444)

**摘要:** 加筋土结构具有较好的整体变形协调能力以及抗震性能, 被广泛应用于边坡工程中。基于不同含水率下残积土及筋土界面室内直剪试验数据, 在有限差分软件中考虑不同含水率下土体和筋土界面抗剪强度参数, 并通过 FISH 语言编程在数值计算中实现筋土界面剪切刚度动态变化过程, 分析加筋边坡在不同含水率、筋材长度、筋材间距及地震峰值加速度工况下的位移、应力、加速度响应。模型计算结果表明: 相比不考虑筋土界面刚度软化情况, 考虑筋土界面剪切刚度软化情况下含水率对加筋边坡水平位移和加速度放大系数的影响较大; 坡面侧向位移、坡顶沉降和筋材拉应力与回填土含水率呈正相关, 加速度放大系数与含水率呈负相关; 在一定范围内增加筋材长度能够有效降低加筋边坡坡面的水平位移; 筋材间距对含水率越低的加筋边坡坡面侧向位移影响越大; 地震峰值加速度越大, 含水率对坡面水平位移影响越大。

**关键词:** 加筋边坡; 含水率; 筋土界面; 剪切刚度; 地震响应

**中图分类号:** TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)04-0862-09

## Seismic Response of Reinforced Soil Slope Considering Interface Stiffness Softening under Different Water Content

LI Shuijiang<sup>1</sup>, TONG Yanguang<sup>1</sup>, LIU Feiyu<sup>2</sup>, CHEN Shuqi<sup>2</sup>

(1. Guangzhou Environmental Protection Investment Group co., ltd. Guangzhou 510330, China;

2. School of Mechanics and Engineering Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

**Abstract:** Reinforced soil structure has better overall deformation coordination ability as well as seismic performance, which is widely used in slope engineering. Based on the laboratory direct shear test data of residual soil and reinforcement-soil interface, the interface shear strength parameters of soil and reinforced soil under different water contents were considered in the finite difference software, and the dynamic process of interface shear stiffness of reinforced soil was realized in numerical calculation by using FISH programming language. The displacement, stress and acceleration responses of a reinforced soil slope under different water contents, reinforcement lengths, reinforcement spacings and seismic peak acceleration conditions were analyzed. The results show that compared to the case without considering the stiffness softening of the reinforcement-soil interface, the effect of water content

\* 收稿日期: 2022-10-06; 修回日期: 2022-12-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52078285, 52378355)资助

作者简介: 李水江(1970—), 男, 高级工程师。主要从事环保工程、工程管理等方面的研究。E-mail: lishuijiang@gzepi.com.cn

通讯作者: 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: lfyju@shu.edu.cn

on the horizontal displacement and acceleration amplification coefficient of the reinforced soil slope is greater than that considering the shear stiffness softening. The lateral displacement of slope surface, the settlement at slope top and the tensile stress of reinforcement are positively correlated with the water content of backfill soil, while the acceleration amplification coefficient is negatively correlated with the water content of backfill soil. Increasing the length of reinforcement in a certain range can effectively reduce the horizontal displacement of the slope. The bar spacing has a greater influence on lateral displacement of the reinforced slope with lower water content. The greater the peak seismic acceleration, the greater the effect of water content on the horizontal displacement of the slope.

**Keywords:** reinforced soilslope; water content; reinforcement-soil interface; shear stiffness; seismic response

## 0 引言

加筋土结构具有柔性、节约成本、施工方便等特点,在我国边坡工程中的应用越来越广泛。加筋土结构种筋材分层布置于回填土内,通过筋材反包土工袋作为面层,形成加筋土复合结构体系,该体系能够提高土体抗剪强度与边坡稳定性。

目前,国内外学者对加筋土结构的研究主要通过模型试验和数值模拟等方法,研究加筋土结构在静力作用下的力学特性已有许多成果。H.Wang等<sup>[1]</sup>研究带有土工袋变形缓冲带的加筋土挡墙在静载下的结构行为,结果表明缓冲带能减小挡墙侧向变形。徐鹏等<sup>[2-3]</sup>研究整体式和分离式两种面板形式和填土相对密实度对加筋土挡墙变形、格栅拉力、土压力等力学特性的影响。张垭等<sup>[4]</sup>采用数值模拟方法研究了不同面板倾角下加筋土挡墙的面板侧向位移和筋材应变,并从应力角度分析面板倾角的作用机理。陈建峰等<sup>[5]</sup>建立了加筋土挡墙离散-连续耦合数值模型,研究了刚柔组合墙面加筋土挡墙在静力作用下筋材拉力、挡墙变形、潜在破坏面的演化过程。J.Mamaghanian等<sup>[6]</sup>、H.R.Razeghia等<sup>[7]</sup>和U.R.Albino等<sup>[8]</sup>通过离心模型试验和数值模拟研究了以土工复合层和土工布作为内排水系统的加筋土挡墙力学、变形和渗流特性。李丽华等<sup>[9]</sup>研究在墙顶超载作用下筋材材料、层数及长度对加筋土挡墙变形、极限承载力、竖向土压力、筋材应变的影响。杨广庆等<sup>[10]</sup>研究在不同台阶宽度、填土压实度等条件下加筋土挡墙水平位移发展情况,并提出临界台阶宽度和上墙墙底水平位移模式。

考虑到实际工程中复杂多变的动力荷载,如地

震荷载、交通荷载等,研究加筋土结构的动力特性具有重要意义。P.Xu等<sup>[11]</sup>研究了不同面板形式加筋土挡墙在地震作用下的动力响应。S.H.Liu等<sup>[12-13]</sup>研究发现加筋土工袋挡墙具有良好的抗震性能。王家全等<sup>[14-15]</sup>对加筋土挡墙模型施加静载和随时间逐级递增的循环动载,研究了不同外力作用、格栅长度、格栅型式下挡墙墙面变形、墙顶沉降和竖向土压力等指标的分布规律。曹建洲等<sup>[16]</sup>建立加筋路堤数值模型,推出了筋材最大内力与地震动、结构参数的关系式。蔡晓光等<sup>[17]</sup>、C.C.Huang<sup>[18]</sup>和曹礼聪等<sup>[19]</sup>研究了不同地震波形和地震峰值加速度条件下双级加筋土挡墙、返包式加筋土挡墙以及条带式刚性面板加筋土挡墙的格栅应变、破裂面、土压力、加速度响应等规律,研究发现墙体破坏由挡墙中部向下逐渐发展,且中下部更易破坏。肖成志等<sup>[20]</sup>研究了基础位置、循环荷载频率、循环次数等因素对加筋土挡墙变形、筋材应变等力学与变形特性的影响,还提出了基础最优距离和挡墙破坏形式。

综上所述,目前已有许多学者研究分析了面板形式、面板坡度、填土密实度、筋材间距、地震波形等因素对加筋土结构力学性和变形特性的影响,而针对回填土含水率因素的研究较缺乏。以室内大型循环剪切试验数据为基础,考虑筋土界面剪切刚度软化特性,利用有限差分软件研究含水率、筋材长度、筋材间距及地震峰值加速度对加筋边坡变形、应力、加速度等地震动响应的影响。

## 1 筋土界面剪切刚度软化特性

剪切刚度是土体动力响应中重要的动力参数之一,能够分别反映土体在动荷载作用下的刚度情

况。基于筋土界面在循环剪切作用下的剪切位移-剪应力滞回曲线, C.J.Nye等<sup>[21]</sup>、C.S.Vieira等<sup>[22]</sup>将剪切刚度 $K$ 应用于筋土界面动剪切特性分析。

图1为通过室内循环剪切试验得到的剪切频率为1 Hz时不同含水率(13%、19%、25%、32%)和竖向应力(50、100、150 kPa)条件下花岗岩残积土-格栅界面剪切刚度 $K$ 随时间 $t$ 的变化规律。如图可

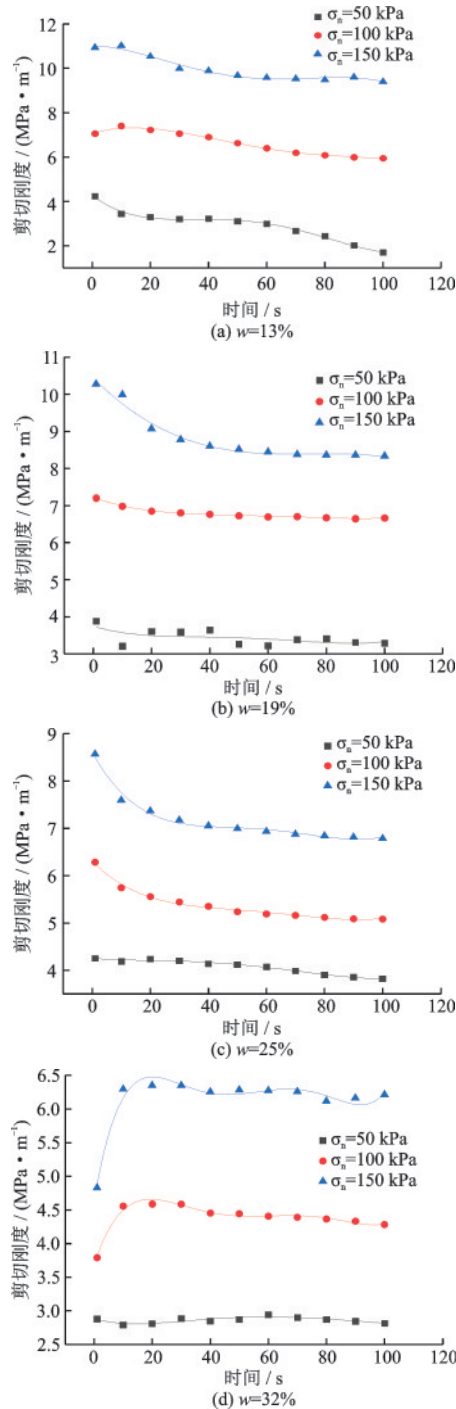


图1 不同含水率下筋土界面剪切刚度随时间变化规律  
Fig.1 Variation of the interfacial shear stiffness of reinforced soil with time under different water contents

见,非饱和含水率下(13%、19%、25%),筋土界面剪切刚度与时间呈负相关,呈现筋土界面剪切刚度软化特征,且50 kPa的低竖向应力作用下,13%含水率筋土界面剪切刚度降幅最大,为22.2%,而100、150 kPa的中高竖向压力作用下,含水率越高,筋土界面剪切刚度软化越显著。饱和含水率下筋土界面在100、150 kPa竖向应力作用下剪切刚度呈现明显的先升高后缓慢降低的趋势,前期增幅分别为22.21%和34.12%。

从整体上看,界面最大剪切刚度与含水率呈负相关。为实现结构动力计算过程中筋土界面剪切刚度动态变化过程,将图1中筋土界面剪切刚度与时间的变化关系进行拟合,得到 $K-t$ 关系曲线见表1,并通过FISH语言将 $K-t$ 关系曲线应用于FLAC<sup>3D</sup>软件数值计算。

表1 不同含水率和竖向应力下筋土界面 $K-t$ 关系曲线  
Table 1  $K-t$  curve of soil-reinforcement interface under different water contents and normal stresses

含水率/%	竖向应力/kPa	筋土界面 $K-t$ 关系曲线
13	50	$K=4.29 \times 10^6 - 1.025 \times 10^5 t + 3.37 \times 10^3 t^2 - 45.15 t^3 + 0.191 t^4$
	100	$K=7.06049 \times 10^6 + 3.995 \times 10^4 t - 1.83 \times 10^3 t^2 + 20.905 t^3 - 0.0773 t^4$
	150	$K=1.10198 \times 10^7 - 1.19 t \times 10^3 - 1.68 \times 10^3 t^2 + 30.66 t^3 - 0.1536 t^4$
19	50	$K=3.75123 \times 10^6 - 2.457 \times 10^4 t + 786 t^2 - 10.83 t^3 + 0.05076 t^4$
	100	$K=7.22829 \times 10^6 - 2.984 \times 10^4 t + 724.1 t^2 - 8.12 t^3 + 0.033 t^4$
	150	$K=1.04475 \times 10^7 - 7.94 \times 10^4 t + 963.341 t^2 - 2.963 t^3 - 0.008567 t^4$
25	50	$K=3.90383 \times 10^6 + 3.278 \times 10^4 t - 1.030 t^2 + 11.142 t^3 - 0.042652 t^4$
	100	$K=6.31027 \times 10^6 - 6.239 \times 10^4 t + 1530 t^2 - 17.573 t^3 + 0.073028 t^4$
	150	$K=8.61339 \times 10^6 - 1.116 \times 10^5 t + 2950 t^2 - 34.06 t^3 + 0.13955 t^4$
32	50	$K=2.88042 \times 10^6 - 1.022 \times 10^4 t + 459.8 t^2 + 6.2167 t^3 + 0.02577 t^4$
	100	$K=3.68469 \times 10^6 + 1.3253 \times 10^5 t - 6.290 t^2 + 126.41 t^3 - 1.14818 t^4$
	150	$K=4.63021 \times 10^6 + 2.5249 \times 10^5 t - 1.227 t^2 \times 10^4 + 259.513 t^3 - 2.4 t^4$

## 2 加筋边坡数值模型

### 2.1 模型建立

根据某加筋边坡工程中的典型剖面,在FLAC<sup>3D</sup>软件中建立双级反包式加筋边坡数值模型,边坡总高度 $H$ 为16 m,上、下墙高度8 m,台阶宽度2 m,1:1放坡。实际工程中坡面处为土工格栅反包式加筋,在数值软件中采用墙面单元简化处理。考虑到模型尺寸效应的影响,根据前人经验和试算,模型整体尺寸设定如图2所示。回填土为花岗岩残积土,地基土为中风化砂岩,均采用摩尔-库伦模型。

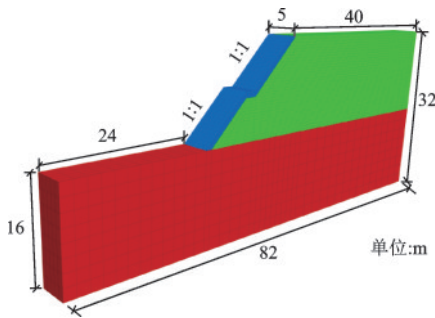


图2 模型尺寸

Fig.2 Model size drawing

参考直剪试验和岩土工程勘察报告初步设定模型基本参数,再对照实际加筋边坡工程在静力作用下的地表位移与沉降监测点的监测数据反算验证,多次反算后加筋边坡坡顶水平位移和最终沉降的数值计算结果和实测值误差控制在5%以内,如表2所示,最终确定模型基本参数(表3~5)。

本工程案例中地基土为模量较大的中风化砂岩,在模型四周设置自由边界条件,底部无需施加静态边界条件。自由场边界条件实现了无限场地的建模,便于分析边坡等半无限体结构的动力响应。通过APPLY命令和TABLE命令直接在数值

表2 数值模型验证

Table 2 Numerical model validation

	数值模拟结果	实测值	误差/%
坡顶最终水平位移/mm	11.22	10.7	4.86
坡顶最终沉降/mm	11.61	11.2	3.66

表3 材料模型参数

Table 3 Material model parameter

材料名称	弹性模量/MPa	泊松比	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	含水率/%	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
回填土	36	0.25	2 000	13	25.70	33.05
地基土	35	0.2	2 590	19	17.25	29.78
墙面	38	0.2	2 000	25	27.71	19.79
				32	24.22	5.710
				/	33.00	30.00
				/	/	/

表4 接触面模型参数

Table 4 Interface model parameters

接触面位置	法向刚度/(MPa·m <sup>-3</sup> )	切向刚度/(MPa·m <sup>-3</sup> )	黏聚力/kPa	摩擦角/(°)
地基土-墙	1 000	40	45.7	57
回填土-墙	100	1	46	48

表5 土工格栅单元参数

Table 5 Geogrid element parameters

单元类型	弹性模量/MPa	泊松比	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	含水率/%	筋土界面黏聚力/kPa	筋土界面内摩擦角/(°)
格栅单元	4 000	0.42	2 370	13	5.62	35.72
				19	8.92	32.76
				25	20.91	24.21
				32	12.29	19.57

模型底部输入频率为1 Hz的Kobe波南北分量加速度时程曲线,如图3所示,地震持时20 s。岩土体阻尼比 $D$ 为5%,设定局部阻尼系数为 $0.05\pi$ 。

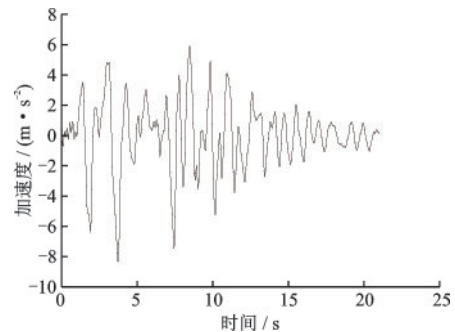


图3 地震波加速度时程曲线

Fig.3 Seismic wave acceleration time history curve

### 2.2 计算工况

根据加筋边坡工程的特征,本章研究的边坡地

震动响应影响因素包括土体含水率(13%、19%、25%、32%)、筋材间距(0.5、1、1.5、2 m)、筋材长度(10、15、20、25 m)、地震峰值加速度(0.1g、0.2g、0.3g、0.4g),以含水率为主研究变量,共40种工况,分析各工况在地震作用下的坡面水平位移、坡顶竖向沉降、坡体加速度放大系数和筋材拉应力。

### 3 地震响应敏感性分析

#### 3.1 筋土界面刚度变化对加筋边坡动响应的影响

图4为不考虑筋土界面剪切刚度软化和考虑筋土界面剪切刚度软化情况下不同含水率土体加筋边坡坡面水平位移沿距坡底竖向距离分布曲线。根据各工况下的模拟结果,饱和含水率(32%)下加筋边坡发生滑坡破坏,不具有比较意义,因此本节后续分析仅对非饱和含水率下边坡的地震动响应进行对比分析。如图4所示,无论是否考虑筋土界面剪切刚度软化,各含水率坡面水平位移均随着距坡底竖向距离的增加而增加,其中含水率为13%和19%时二者近似线性增长关系。此外,含水率为13%、19%、25%时,考虑筋土界面剪切刚度软化的坡顶水平位移相比不考虑筋土界面剪切刚度软化时的坡顶水平位移增加了8.12%、9.33%、11.75%,这可能是因为筋土界面剪切刚度降低,筋土界面相互作用减弱,土工格栅限制土体侧向变形的效果降低。

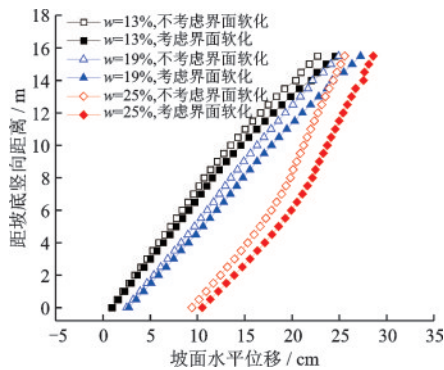


图4 加筋边坡坡面水平位移分布曲线  
Fig.4 Horizontal displacement distribution curve of reinforced slope surface

图5为不同含水率下加速度放大系数最大值在是否考虑筋土界面剪切刚度软化情况下的对比结果。含水率越高,加速度放大系数最大值越小,降幅越小。含水率为13%、19%、25%时,考虑筋土界

面剪切刚度软化的速度放大系数最大值相比不考虑筋土界面剪切刚度软化时的速度放大系数最大值增加了5.50%、7.82%、9.37%,表明含水率越大,是否考虑筋土界面剪切刚度软化对于加筋边坡地震加速度响应的影响越大。从上述坡面水平位移响应和加速度响应的对比分析中可知在加筋边坡地震动响应数值分析中考虑筋土界面剪切刚度软化是有必要的,基于室内剪切试验数据得到的筋土界面剪切刚度变化规律亦提高了数值模型可靠性。

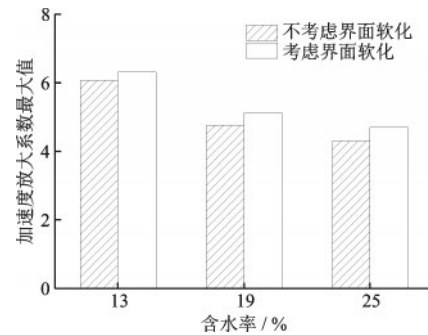


图5 不同含水率下加速度放大系数最大值  
Fig.5 Maximum acceleration amplification coefficient under different water contents

#### 3.2 含水率的影响

图6为考虑筋土界面刚度软化时不同含水率下加筋边坡坡面水平位移变化情况。含水率越大,坡面水平位移越大,这主要是因为含水率越高,筋土界面剪切刚度越小,抵抗侧向变形能力越弱。坡面水平位移均随着坡高的升高而增大,在坡顶处达到水平位移最大值。含水率为13%、19%、25%时,坡

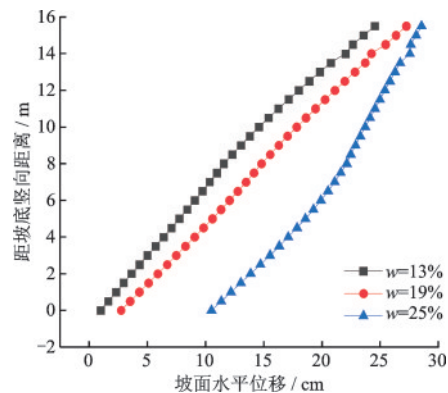


图6 不同含水率下加筋边坡坡面水平位移  
Fig.6 Horizontal displacement of reinforced slope under different water contents

顶处坡面水平位移为 24.5~28.5 cm, 差距较小, 坡顶水平位移分别为坡脚水平位移的 24.84 倍、9.95 倍、2.72 倍, 由此可见含水率越低, 坡面水平位移随坡高变化的增幅越大。

图 7 为考虑筋土界面刚度软化时不同含水率下加筋边坡坡顶沉降情况。如图所示, 随着距离坡面水平距离的增大, 坡顶沉降量先急剧增加后缓慢减小, 且在距坡面水平距离 4 m 处达到坡顶沉降最大值。13%、19%、25% 含水率下, 坡顶在距坡面水平距离 4 m 范围内沉降最明显, 最大竖向沉降量分别为 20.01、22.66、26.40 cm, 各含水率下沉降量增幅达到 173.6%、179.5%、218.7%, 这说明含水率越高的土体坡顶沉降量越大, 沉降幅度越大。

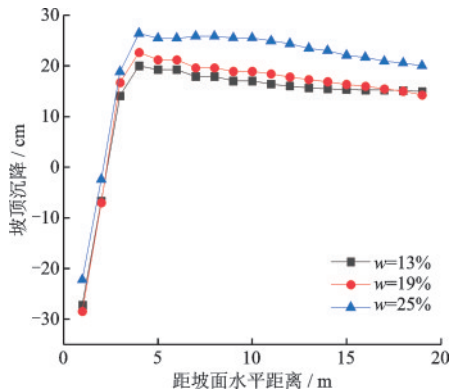


图 7 不同含水率下加筋边坡坡顶沉降

Fig.7 Settlement at top of reinforced slope under different water contents

图 8 为考虑筋土界面刚度软化时不同含水率下加筋边坡加速度放大系数沿坡高的变化规律。可以发现, 随着高度的升高, 各含水率下坡体加速度放大系数先升高后降低, 在坡高为 4~5 m 处, 即下

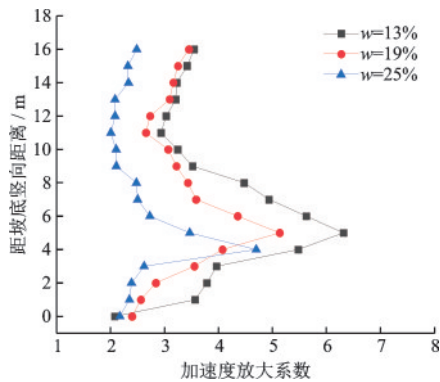


图 8 不同含水率下加筋边坡加速度放大系数

Fig.8 Acceleration amplification coefficient of reinforced slope under different water contents

墙中部, 取得加速度放大系数峰值。13%、19%、25% 含水率下边坡加速度放大系数峰值分别为 8.51、5.13、4.70。13% 含水率下边坡加速度放大系数峰值明显高于 19%、25% 含水率, 为 19%、25% 含水率下边坡加速度放大系数峰值的 1.66 倍、1.81 倍, 表明加筋土结构中回填土含水率越低, 加筋边坡在 earthquake 作用下的加速度放大系数越大。

图 9 为考虑筋土界面刚度软化时不同含水率下各层筋材的最大拉应力。含水率越高, 筋材拉应力越大。含水率为 13% 和 19% 时, 第一层筋材拉应力最大, 为 36.454、37.583 kPa; 含水率为 25% 时, 第二层筋材拉应力最大, 为 104.58 kPa。含水率虽不同, 但筋材最大拉应力均出现在下墙的下部。此外, 在坡高为 8 m 左右处筋材最大拉应力出现极大值, 说明分级台阶处筋材拉应力较大。上墙中, 随着坡高的增加, 筋材最大拉应力逐渐降低, 这可能是因为上覆土层厚度越来越小, 筋材受竖向土压力降低, 筋土间剪应力下降。

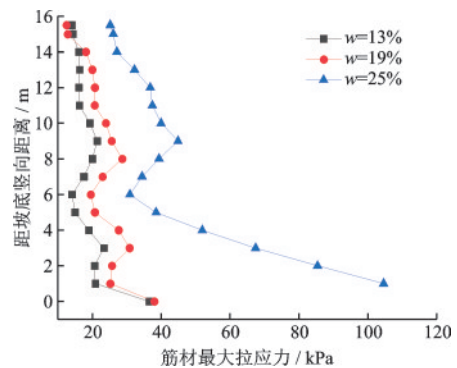


图 9 不同含水率下各层筋材最大拉应力

Fig.9 Maximum tensile stress of each layer under different water contents

### 3.3 筋材长度的影响

采用控制变量的方法, 研究含水率为 19% 时不同筋材长度对坡面水平位移响应的影响。筋材长度变量取值为 10、15、20、25 m, 分别对应 0.6 H、0.9 H、1.2 H、1.6 H。在考虑筋土界面刚度软化下, 不同含水率下筋材长度与坡面最大水平位移的关系曲线如图 10 所示。各含水率下, 坡面最大水平位移均随着筋材长度的增加而降低, 且筋材长度越长, 坡面最大水平位移降幅越小。含水率为 13%、19%、25% 的边坡在筋材长度为 20 m 时的坡面最大水平位移降幅分别为 3.0%、5.5%、13.2%, 在筋材

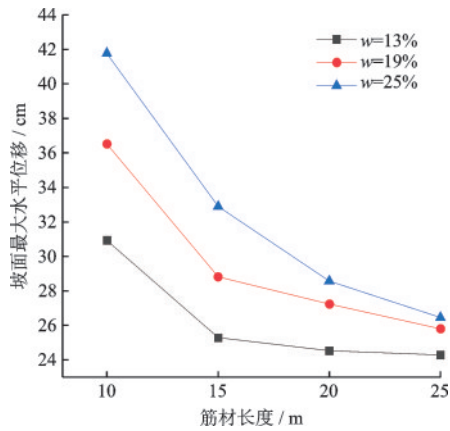


图10 筋材长度和坡面最大水平位移关系

Fig.10 Relationship between length of reinforcement and maximum horizontal displacement of slope

长度为20 m时的坡面最大水平位移降幅分别为1.0%、5.3%、7.4%。另外,增加筋材长度能够有效限制含水率升高时加筋土结构坡面的水平位移。

图11为考虑筋土界面刚度软化时不同含水率下筋材长度与坡顶最大沉降的关系曲线。从图中可以看出,各含水率下,筋材长度越大,坡顶最大沉降量越小。当筋材长度超过15 m后含水率为13%和19%时坡顶沉降量降幅较小,筋材长度为20 m时降幅分别为3.0%和8.0%,筋材长度为25 m时降幅分别为0.39%和0.10%,表明在13%和19%含水率下,筋材长度在15 m及以上时筋材长度对坡顶地面沉降影响较小,筋材长度取15 m最佳。当含水率高达25%时,随着筋材长度的增加,降幅分别为31.7%、23.3%、9.6%,坡顶地面沉降降幅虽然逐渐减小,但是限制坡顶沉降的效果依然显著,说明含水率越高的加筋边坡在地震作用后的竖向沉降响应对于筋材长度越敏感。

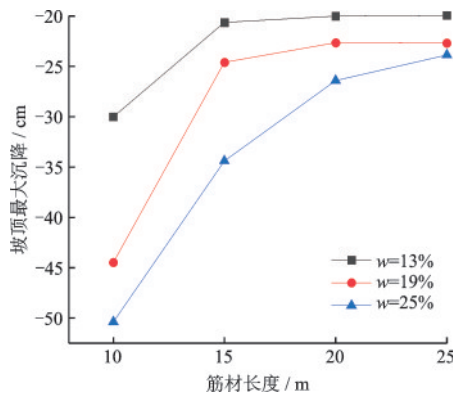


图11 筋材长度和坡顶最大沉降关系

Fig.11 Relationship between length of reinforcement and maximum settlement at slope top

### 3.4 筋材间距的影响

图12为考虑筋土界面刚度软化时不同含水率下筋材间距与坡面最大水平位移的关系曲线。各含水率下,随着筋材间距的增大,坡面最大水平位移亦不断增大。以19%含水率为例,筋材间距为0.5、1.0、1.5、2.0 m时,坡面最大水平位移增幅为41.8%、18.4%、13.7%,可见当筋材间距为0.5~2.0 m时,随着筋材间距的缩小,即土工格栅布置越密集,坡面水平位移降幅越大,坡面水平位移约束效果越显著。当筋材间距从0.5 m增至2.0 m,13%、19%、25%含水率下坡面最大水平位移整体增幅分别为118.1%、102.4%、79.8%,可见含水率越低,筋材间距对坡面水平位移地震响应影响越大。

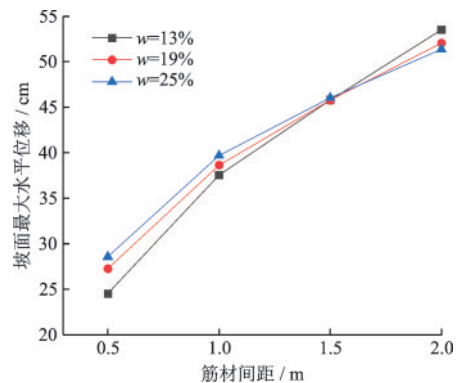


图12 筋材间距和坡面最大水平位移关系

Fig.12 Relationship between bar spacing and maximum horizontal displacement of slope

图13为考虑筋土界面刚度软化时不同含水率下加筋边坡中筋材最大拉应力随筋材间距的变化规律曲线。从整体上看,筋材最大拉应力随着筋材间距的增大而增大,且含水率越大的边坡在地震作用下筋材最大拉应力越大。各筋材间距下,含水率为25%时的筋材最大拉应力显著高于含水率为13%和19%时的筋材最大拉应力,约为13%和19%含水率时的3.5倍和3.3倍。19%和25%含水率下边坡筋材最大拉应力与筋材间距呈正相关,而13%含水率下筋材最大拉应力先降低后增大,在筋材为1.0 m时取得最小值。但从整体上看,含水率为13%、19%、25%时,筋材间距在0.5~2.0 m间变化,筋材最大拉应力变化幅度分别为12.5%、20.6%、21.6%,表明筋材间距对筋材拉应力的影响在中高含水率下(19%、25%)更为显著。

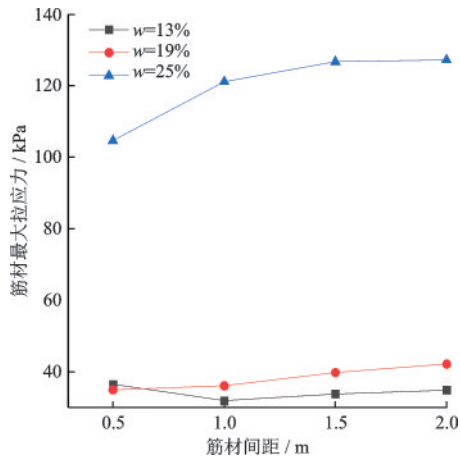


图13 筋材间距和筋材最大拉应力关系

Fig.13 The relationship between bar spacing and maximum tensile stress

### 3.5 地震峰值加速度的影响

图14为考虑筋土界面刚度软化时不同含水率下地震峰值加速度和坡面最大水平位移的关系曲线。从图中可以看出,坡面水平位移与地震峰值加速度呈正相关,且含水率越高,坡面最大水平位移更大,坡面最大水平位移随地震峰值加速度变化的增幅越大。随着地震峰值加速度的提高,各含水率下坡面最大水平位移也不断增大,但增幅逐渐降低,此外,随着地震峰值加速度的提高,13%、19%和25%含水率下坡面最大水平位移差距逐渐增大,说明含水率越高,地震峰值加速度越大时,加筋边坡坡面侧向位移越大。当地震峰值加速度较小时,13%、19%和25%含水率下坡面最大水平位移相差不大,说明低地震峰值加速度下坡面水平位移对含水率因素不敏感。

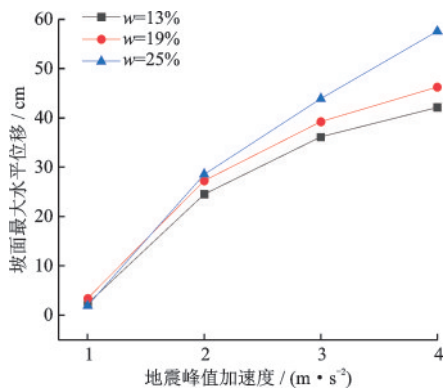


图14 地震峰值加速度和坡面最大水平位移关系

Fig.14 Relationship between peak seismic acceleration and maximum horizontal displacement of slope

图15为考虑筋土界面刚度软化时不同含水率下加速度放大系数最大值随地震峰值加速度变化的规律曲线。如图所示,中低含水率下(13%、19%)的边坡加速度放大系数最大值与地震峰值加速度呈正相关,其中13%含水率下,当地震峰值加速度为0.2g时加速度放大系数最大值增幅最大,为48.9%,地震峰值加速度为0.3g及以上时加速度放大系数最大值增幅分比为6.4%和1.0%,均较小,说明含水率为13%的边坡受地震峰值加速度较高的地震作用时,加速度放大效应受地震峰值加速度影响较小;中低含水率下(25%),当地震峰值加速度从0.1g增至0.4g,加速度放大系数最大值从5.04降至4.14,可见边坡加速度放大系数最大值与地震峰值加速度呈负相关,且降幅较小,说明地震峰值加速度对高含水率边坡加速度响应影响小。

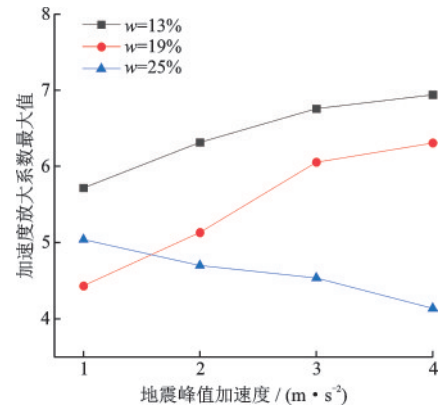


图15 地震峰值加速度和加速度放大系数最大值关系

Fig.15 Relationship between peak seismic acceleration and maximum acceleration amplification coefficient

## 4 结论

(1)加筋边坡坡面水平位移随着坡高的增大而增大,且含水率越高,坡面水平位移越大,坡顶沉降量越大,沉降幅度越大,加速度放大系数越小,筋材拉应力越大。

(2)在一定范围内增加筋材长度能够有效降低加筋边坡坡面的水平位移,对坡顶沉降的约束作用在高含水率边坡中的效果更显著。

(3)含水率越低,筋材间距对地震下坡面水平位移影响越大,对坡顶沉降和筋材拉应力的影响越小。

(4)地震峰值加速度越大,坡面水平位移对含

水率因素越敏感,地震峰值加速度对高含水率边坡加速度响应影响较小。

## 参考文献:

- [1] Wang H, Yang G Q, Wang Z J, et al. Static structural behavior of geogrid reinforced soil retaining walls with a deformation buffer zone [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2020, 48(3):374-379.
- [2] 徐鹏,蒋关鲁,王珣,等.面板对加筋土挡墙影响的离心模型试验研究[J].*岩土力学*,2019,40(4):1427-1432.  
Xu P, Jiang G L, Wang X, et al. Centrifuge model tests on influence of facing on reinforced soil retaining walls [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(4): 1427-1432.(in Chinese)
- [3] 徐鹏,蒋关鲁,王宁,等.填土相对密实度对加筋土挡墙的影响研究[J].*岩土力学*,2018,39(11):4010-4016.  
Xu P, Jiang G L, Wang N, et al. Centrifugal model test on influence of relative compactness on reinforced soil retaining walls [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(11): 4010-4016.(in Chinese)
- [4] 张垭,汪磊,刘华北.面板倾角对模块式面板加筋土挡墙筋材内力的影响[J].*岩土工程学报*,2017,39(9):1680-1688.  
Zhang Y, Wang L, Liu H B. Influence of facing batter angle on reinforcement load of reinforced soil retaining wall with modular block facing [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(9): 1680-1688.(in Chinese)
- [5] 陈建峰,田丹,柳军修.刚/柔性组合墙面加筋土挡墙内部破坏机制[J].*岩土力学*,2018,39(7):2353-2360.  
Chen J F, Tian D, Liu J X. Internal failure mechanism of reinforced soil walls with rigid/flexible facings [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(7): 2353-2360.(in Chinese)
- [6] Mamaghanian J, Viswanadham B V S, Razeghi H R. Centrifuge model studies on the performance of geocomposite reinforced soil walls subjected to seepage [J]. *Geosynthetics International*, 2019, 16(4): 371-387.
- [7] Razeghia H R, Viswanadhamb B V S, Mamaghanian J. Centrifuge and numerical model studies on the behaviour of geogrid reinforced soil walls with marginal backfills with and without geocomposite layers [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2019, 47(5):671-684.
- [8] Albino U R, Portelinha F H M, Futai M M. Numerical simulation of a geotextile soil wall considering soil atmosphere interaction [J]. *Geosynthetics International*, 2020, 27(4): 394-413.
- [9] 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)
- [10] 杨广庆,刘伟超,刘华北,等.台阶式加筋土挡墙水平位移模式研究[J].*岩石力学与工程学报*,2018,37(增1):3652-3658.  
Yang G Q, Liu W C, Liu H B, et al. Horizontal displacement modes of tiered geosynthetic reinforced soil retaining wall [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(Sup1): 3652-3658.(in Chinese)
- [11] Xu P, Hatami K, Jiang G. Shaking table study of the influence of facing on reinforced soil wall connection loads [J]. *Geosynthetics International*, 2020, 27(4):364-378.
- [12] Liu S H, Jia F, Chen X L, et al. Experimental study on seismic response of soilbags-built retaining wall [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2020, 48(5): 603-613.
- [13] Liu S H, Fan K W, Xu S Y. Field study of a retaining wall constructed with clay-filled soilbags [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2019,47(1): 87-94.
- [14] 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*,2019,40(2):497-505.  
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, 40(2): 497-505.(in Chinese)
- [15] 王家全,徐良杰,黄世斌,等.动载下土工格栅加筋桥台挡墙承载性能分析[J].*岩土力学*,2019,40(11):4220-4228,4269.  
Wang J Q, Xu L J, Huang S B, et al. Bearing capacity analysis of geogrid reinforced abutment retaining wall under dynamic load [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(11): 4220-4228,4269.(in Chinese)
- [16] 曹建洲,刘华北,樊成.双面加筋路堤的地震动力响应分析[J].*岩土工程学报*,2019,41(5):918-926.  
Cao J Z, Liu H B, Fan C. Seismic response analysis of back to back mechanically stabilized earth (MSE) walls [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(5): 918-926.(in Chinese)
- [17] 蔡晓光,李思汉,黄鑫.水平地震作用下双级加筋土挡墙格栅应变及破裂面分析[J].*岩土工程学报*,2018,40(8):1528-1534.

(本文编辑:周小潭)

(下转第 877 页)