

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.04.015

双向地震作用对台阶型加筋边坡动力响应的影响*

樊成, 王春海, 刘华北

(华中科技大学土木工程与力学学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 以我国西南部一实际工程为背景, 分析了双向地震作用下台阶型加筋边坡的动力响应特点及规律。利用经过验证的PLAXIS有限元分析方法, 首先在不同地震强度下, 对比了水平及双向地震分别作用后加筋边坡的动力响应, 然后研究了竖向地震的影响。结果表明, 地震作用下, 填土的塑性变形呈弥散型分布, 随着竖向地震分量的增大, 加筋土体横向变形增大, 筋材内力提高, 同时, 竖向地震的震动压实作用使土体侧向围压提高, 土体发生硬化, 刚度增加, 坡面横向位移减小; 随着竖向地震分量进一步增大, 土体硬化改变了边坡自振特性, 在本研究地震激励下, 加筋土体动力响应加剧, 上坡有发生整体剪切破坏的趋势, 并向外偏转, 坡面横向位移增大。竖向地震对边坡动力响应的影响随地震强度的增大变得明显。

关键词: 台阶型加筋土边坡; 双向地震; 数值模拟; 动力响应

中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)04-0606-08

Influences of the Combined Horizontal and Vertical Excitations on the Seismic Responses of Tiered Geosynthetic Reinforced Slope

FAN Cheng, WANG Chunhai, LIU Huabei

(School of Civil Engineering and Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: A validated finite element approach was employed to investigate the seismic responses of a tiered reinforced slope under the combined loading of horizontal and vertical excitations. The seismic performances with different earthquake intensities and different vertical excitations were analyzed. It is shown that the plastic deformation of the backfill soil distributed in a dispersed manner. With the increase of the vertical excitation intensity, the reinforcement loads increased. The earth pressure also increased due to soil compaction caused by vertical acceleration. The increase of earth pressure resulted in an increase of the soil stiffness, which led to a decrease of the surficial lateral displacement. But with a further increase of the vertical excitation intensity, the soil-hardening modified the natural vibration characteristics of the slope, which resulted in an aggravation in the seismic response. The upper tier tended to rotate externally and caused the increase of the surficial lateral displacement. With the increase of the earthquake intensity, the influences of the upper tier on the lower tier aggravated, and the influences of vertical excitation became more evident.

Keywords: tiered reinforced slope; horizontal and vertical excitations; numerical simulation; seismic response

* 收稿日期: 2018-07-05; 修回日期: 2018-08-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51778259)资助

作者简介: 樊成(1994-), 男, 硕士。主要从事加筋土边坡的地震动响应研究。Email: fancl130@163.com

通讯作者: 刘华北(1973-), 男, 教授, 博导, 博士。主要从事加筋土工程与地下结构工程方面的研究。Email: hbliu@hust.edu.cn

引言

台阶型土工合成材料加筋土结构具有安全、经济、施工方便、抗震性能优越^[1-3]等优点,国内外应用越来越广泛,但国内规范^[4-6]并未提出明确的抗震设计方法。国内外学者进行了研究,刘飞禹等^[7-8]通过室内试验研究了砂土颗粒级配、循环剪切速率等因素对筋土动力相互作用的影响,H.Liu等^[9-13]结合缩尺试验和数值模拟方法对台阶型加筋土挡墙的动力特性进行了分析,关于台阶型加筋土边坡动力特性的研究则偏少。

大量数据显示,竖向地震峰值加速度通常为横向的0.5~0.7倍,在震中附近强震区,该比值可达1.0以上^[14];同时,多次竖向地震作用破坏被观察到^[15]。在双向地震方面,国内外学者开展了一系列工作:Z.Zhang等^[16-17]对双向地震的反应谱特征进行了讨论,刘华北等^[18-19]以加筋土挡墙为对象,分析了其在双向地震作用下的动力响应以及竖向地震强度的影响,H.I.Ling等^[20-21]对素土边坡的双向地震响应进行了分析,但关于台阶型加筋土边坡双向地震响应的研究^[22-23]还较为有限。另一方面,工程中地基土往往不是理想水平土层,多为倾斜分布。地震作用下地基土的不均匀性将导致边坡内潜在滑裂面的发育。

在此背景下,首先以印度理工学院振动台的试验挡墙为原型,利用PLAXIS建立数值模型,验证了有限元数值模拟方法的有效性^[24];本文中,作者将以我国西南地区一实际加筋边坡工程为对象,利用标定过的数值模拟方法,对双向地震作用下台阶型加筋土边坡的动力响应进行研究。

1 有限元模型

1.1 有限元模型简介

有限元分析对象为我国西南地区一机场导航台高填方工程中的台阶型返包式加筋土边坡,边坡总长度为265 m,高度为7~18 m。本模型取其最大高度截面,基本几何参数如图1所示,地基土呈倾斜分布,倾角约为7°。其中上层边坡(简称上坡)高度为 $H_1=8$ m,下层边坡(简称下坡)高度为 $H_2=10$ m,坡度均为1:0.5,埋深为2 m,台阶宽度为 $b=2$ m。上层筋材长为12 m,抗拉刚度取为620 kN/m,下层

筋材长为20 m,抗拉刚度取为1 160 kN/m,筋材竖向间距均为 $S_v=0.6$ m。土层参数及本构模型选取见表1。有限元模型底部边界完全固定,侧边界应用PLAXIS提供的吸收边界进行模拟。土层参数根据该工程地勘报告及文献^[25-28]确定。填土本构模型为HSS(Hardening Soil with small-strain stiffness)模型^[29-30],其参数 E_{50}^{ref} 、 E_{oed}^{ref} 、 E_{ur}^{ref} 分别为三轴试验参考刚度、主固结仪参考刚度和卸载-再加载参考刚度, $\gamma_{0.7}$ 、 G_0^{ref} 为反应动力作用下土体小应变特性的参数; G_0^{ref} 为参考初始剪切模量, $\gamma_{0.7}$ 为 G 衰减至 G_0 的70%时的偏应变^[26]。

土工格栅采用PLAXIS中的土工格栅单元进行模拟,它是一种弹性线单元,只有法向刚度而没有弯曲刚度,且只能承受拉力。PLAXIS通过界面单元来模拟筋土相互作用,筋土界面的粗糙程度通过界面强度折减因子 R_{inter} 来模拟,其定义为界面强度与相应土体剪切强度的比值,取值范围为0.01~1.0^[31], R_{inter} 取值见表1。

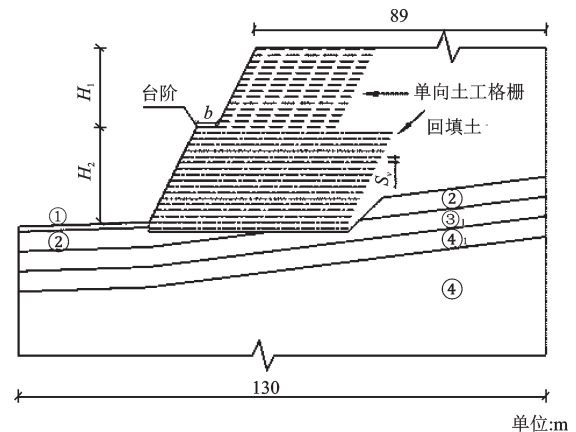


图1 基本模型示意

Fig.1 Basic model

1.2 地震输入

依据地勘资料及相关规范^[12],该地区抗震设防烈度为7度,设计地震分组为第一组,设计基本地震加速度值为0.10g,场地类别按Ⅱ类考虑。随后根据设计反应谱,利用软件Shake_GR生成多条地表地震波。为使结果更接近于真实情况,文中PLAXIS模型地震波由基岩输入。采用软件PROSHAKE建立一维土体模型,由上述地表地震波反推基岩地震波。文献[24]给出了以上过程的详细说明。

图2为其中一条基岩地震波加速度时程曲线,其峰值加速度为0.06g。为了研究输入地震强度的影响,本文也分析了峰值加速度为0.2g的工况。

表1 各土层模型参数

Table 1 Parameters of soil layers

土层号		①	②	③ ₁	④ ₁	④
土层名称	填土	杂填土	粉质黏土	强风化泥岩	中风化泥岩	中风化砂岩
厚度/m	—	0.5	2	2	2	—
本构模型	HSS	HSS	HSS	摩尔-库仑	摩尔-库仑	线弹性
重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	20	19	19.3	23.5	24.5	23.5
黏聚力 $c/(\text{kPa})$	5	15	25	12	24	—
内摩擦角 $\phi_0/(\text{°})$	42.4	15	13.2	18	22	—
剪胀角 $\varphi_0/(\text{°})$	6.6	—	—	—	—	—
刚度 $E^{\text{ref}}/\text{kPa}$	—	—	—	10 000	45 000	75 000
$E_{50}^{\text{ref}}/\text{kPa}$	44 000	8 000	5 000	—	—	—
$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}/\text{kPa}$	25 000	8 000	5 000	—	—	—
$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/\text{kPa}$	155 000	40 000	30 000	—	—	—
泊松比 ν	—	—	—	0.3	0.3	0.25
卸载-再加载泊松比 ν_{ur}	0.2	0.2	0.2	—	—	—
幂 m	0.4	0.67	0.8	—	—	—
破坏比 R_t	0.9	0.9	0.9	—	—	—
$\gamma_{0.7}$	0.000 1	0.000 1	0.000 2	—	—	—
$G_0^{\text{ref}}/\text{kPa}$	180 000	60 000	112 140	—	—	—
界面强度折减因子 R_{inter}	0.75	0.75	0.75	1	1	1

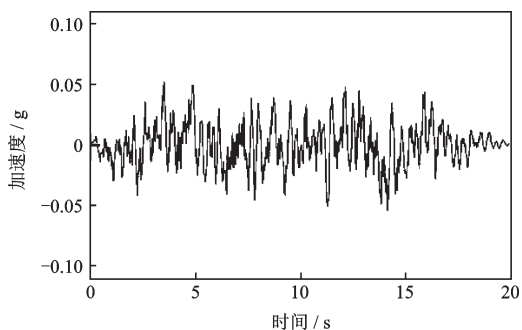


图2 基岩地震波

Fig.2 Input earthquake excitations from the bedrock

2 有限元结果分析

本章首先在不同地震强度下,对比了水平及双向地震分别作用后加筋边坡的动力响应,然后研究了竖向地震对加筋边坡动力响应的影响。

本文共分析7种工况,表2给出各小节的工况组合,其中 a_h 为有限元模型底部输入水平地震的峰值加速度, $\lambda = a_v/a_h$ 为峰值加速度比, b 为台阶宽度。分析以建造开始前所得到的应力状态作为初始应力状态,讨论中边坡的变形包括了建造期间边坡的变形,且无特殊说明均以下坡坡脚作为参照点,筋材内力包括建造期间填土自重引起的内力。

表2 工况组合

Table 2 Load case combinations

小节	主要变量	不变量
3.1	$a_h=0.06g$ 和 $0.2g$, $\lambda=0$ 和 0.67	
3.2	$\lambda=0, 0.25, 0.5, 0.67$ 和 1.0	$a_h=0.2g$

2.1 水平及双向地震作用下边坡动力响应对比

本节分析了小震和大震情况下(a_h 分别为 $0.06g$ 及 $0.2g$)的边坡动力响应。选取图2中的基岩地震波,保持其周期特性不变等比例放大其幅值,作为水平地震波由原模型基底输入。每种情况同时给出水平及双向地震(λ 分别为 0 和 0.67)作用的对比。

图3给出了水平及双向地震作用下加筋土体横向位移的对比。图4为各层筋材最大内力 T_{max} 沿高程分布情况的对比。

首先分析水平地震作用下($\lambda=0$)横向位移随 a_h 的变化情况。图3表明,随着 a_h 的增大,加筋土体整体外倾,横向变形增大。从图4可知水平地震作用下 T_{max} 随 a_h 的增大而增大,且 T_{max} 沿高程的分布较为一致,这说明在一定范围内 a_h 的增大主要加剧了加筋土体的横向变形,对其内部应变分布形式影响不

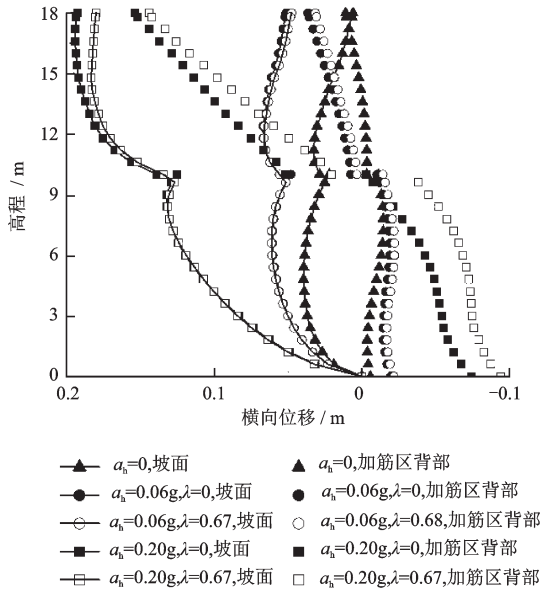


图3 水平及双向地震作用下横向位移对比

Fig.3 Comparison of lateral displacements under horizontal and bidirectional excitations

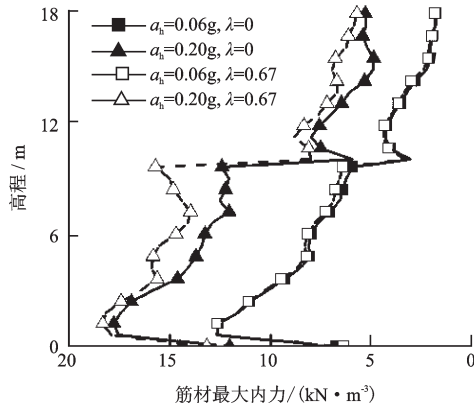


图4 水平及双向地震作用下各层筋材最大内力 T_{max} 分布
Fig.4 Comparison of the maximum internal force in each reinforcement layer under horizontal and bidirectional excitations

大。双向地震作用下,由图3可知, a_h 较小时, λ 对横向位移无明显影响; a_h 较大时, λ 的增大使横向变形增大,而上坡坡面横向位移 Δ 减小,这一变形模式在下文中详细说明。图4表明 a_h 较大时, λ 的增大使下坡上部 T_{max} 有明显提高。

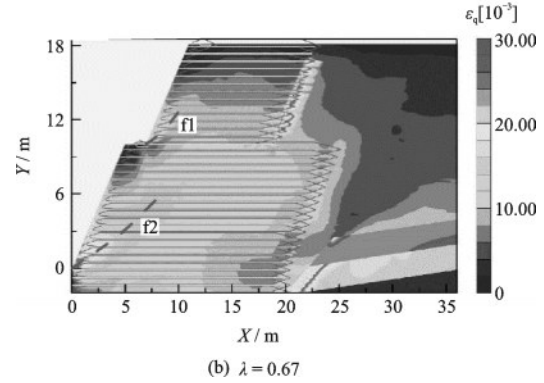
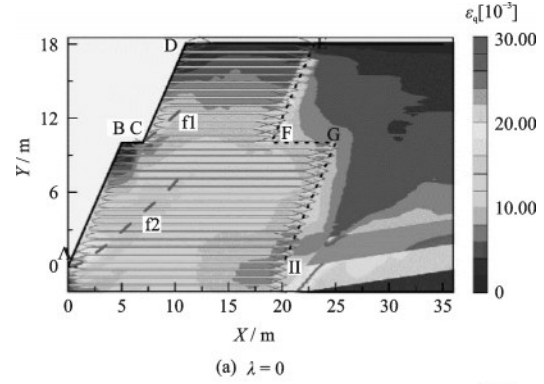


图5 $a_h=0.06g$ 时偏应变云图

Fig.5 Deviator strain contour when $a_h=0.06g$

本文根据偏应变云图来判断潜在滑裂面的形状,并用趋势线来表征。偏应变 ϵ_q 为表示土体变形的物理量,其表达式如下:

$$\epsilon_q = \sqrt{\frac{2}{3} \left[\left(\epsilon_{xx} - \frac{\epsilon_v}{3} \right)^2 + \left(\epsilon_{yy} - \frac{\epsilon_v}{3} \right)^2 + \left(\epsilon_{zz} - \frac{\epsilon_v}{3} \right)^2 + \frac{1}{2} (\lambda_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \lambda_{zx}^2) \right]} \quad (1)$$

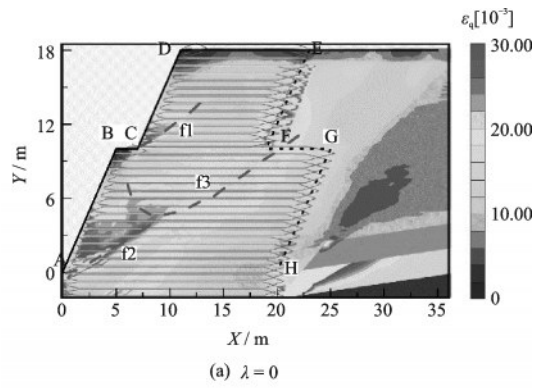
$$\epsilon_v = \epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz} + \epsilon_{xx}\epsilon_{yy} + \epsilon_{xx}\epsilon_{zz} + \epsilon_{yy}\epsilon_{zz} + \epsilon_{xx}\epsilon_{yy}\epsilon_{zz} \quad (2)$$

式中, ϵ_v 为体应变; ϵ_{xx} 、 ϵ_{yy} 、 ϵ_{zz} 分别为 x 、 y 、 z 方向对应的应变。

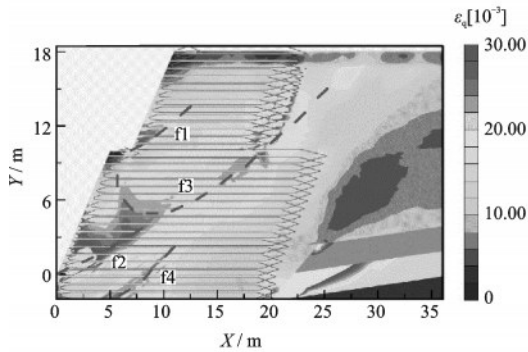
图5为 a_h 为0.06g时的偏应变云图,可见塑性变形呈弥散型分布,主要有两条潜在滑裂面f1和f2。图6为 a_h 为0.2g时的偏应变云图,可以看出竖向地震强度的增大导致上坡对下坡的影响加剧,滑裂面f3由上坡坡脚向下开展,然后穿过上坡后方土体,其后半部分与f2连接成为一体。

加筋区底部另有一条滑裂面f4开展,原因可能是地基土体的不均匀性。图7给出了在图6(b)基础上将地基土换填为均匀土体(中风化砂岩)后的偏应变云图,滑裂面f4消失。

图8为 a_h 对高度为13.6m的加筋层内力沿筋材纵向分布的影响。 $\lambda=0.67$ 时,随 a_h 的增大,筋材内力分布逐渐形成一个平台。如图8(b)所示,筋材中部内力差异最大可达45.5%,这说明 a_h 较大时,竖向



(a) $\lambda=0$



(b) $\lambda=0.67$

图6 $a_h=0.20g$ 时偏应变云图

Fig.6 DDeviator strain contour when $a_h=0.20g$

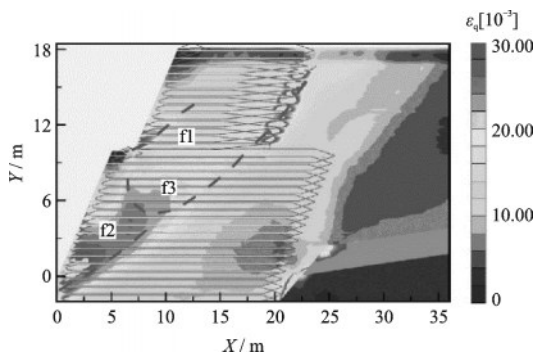


图7 地基土换填后的偏应变云图

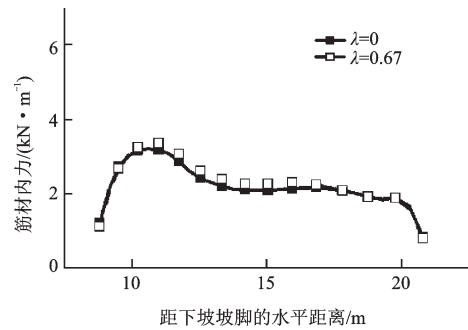
Fig.7 Deviator strain contour with replaced foundation soil

地震使筋材中部利用率提高,并且竖向地震对边坡动力响应的影响随 a_h 的增大变得明显。

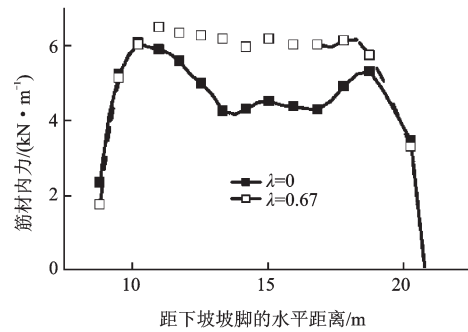
2.2 竖向地震强度的影响

为进一步分析竖向地震对加筋土边坡动力响应的影响,共选取5种不同峰值的竖向加速度激励。保持输入的水平地震峰值加速度不变($a_h=0.2g$), λ 分别设为0, 0.25, 0.5, 0.67和1.0。

图9给出了 λ 对台阶处(B点)水平峰值加速度 a_{hb} 和坡顶(D点)水平峰值加速度 a_{hd} 的影响,可见随



(a) $a_h=0.06g$



(b) $a_h=0.20g$

图8 λ 对高为13.6m的加筋层内力纵向分布的影响

Fig.8 Influence of λ on the internal forces in the reinforcement at $h=13.6m$

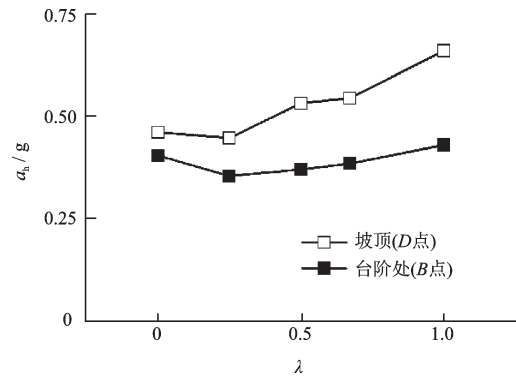


图9 λ 对水平峰值加速度的影响

Fig.9 Influence of λ on the peak horizontal accelerations

着 λ 的增大, a_{hd} 逐渐增大, a_{hb} 则变化较小,这说明 λ 的增大使上坡动力响应加剧。

图10为 λ 对最大坡面横向位移 Δ_{max} 的影响。随着 λ 的增大, Δ_{max} 先减小后增大, λ 为0.5时取得最小值。

图11为 λ 对筋材最大内力总和 ΣT_{max} 的影响,可见 ΣT_{max} 随 λ 的变化呈折线关系,这说明 λ 大于0.5时,边坡动力响应加剧使加筋土体应力应变状态发生明显改变。

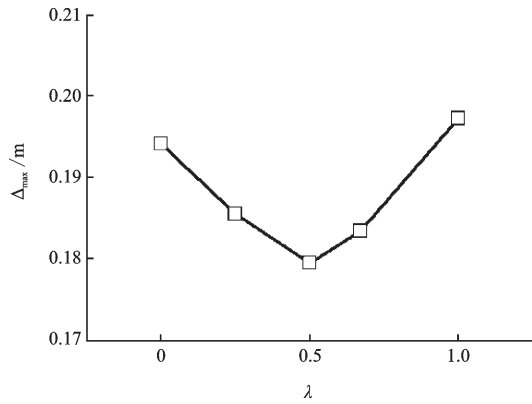


图10 λ 对最大坡面横向位移的影响

Fig.10 Influence of λ on the maximum surficial lateral displacements

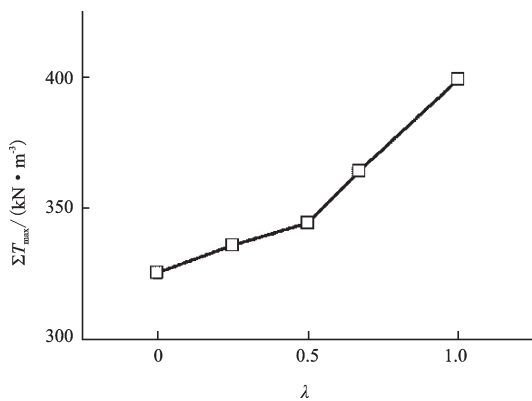


图11 λ 对筋材最大内力总和 ΣT_{max} 的影响

Fig.11 Influence of λ on the maximum of the sum of reinforcement forces

3 竖向地震作用机理讨论

图12给出了坡面横向位移 Δ 与加筋区背面横向位移 Δ_b 随 λ 变化的情况。 λ 由0增大到0.5时,上

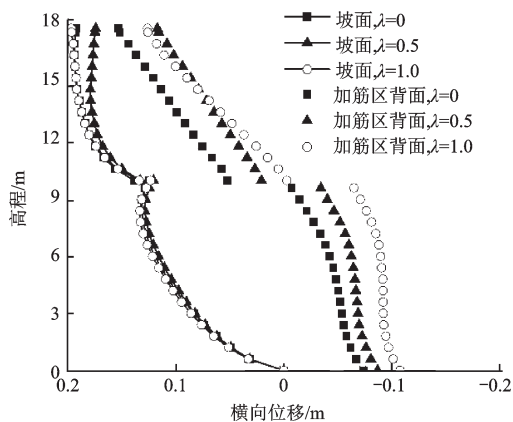


图12 λ 对坡面和加筋区背面横向位移的影响

Fig.12 Influence of λ on the lateral displacements on the face and the back of reinforcement region

坡中 Δ 减小,这是由于竖向地震的震动压实作用使土体侧向围压提高,土体发生硬化^[15],刚度与强度增加^[32],使得 Δ 相对减小。

λ 由0.5变化到1.0的过程中,经过对图12中曲线的量测,可以得出,加筋土体横向变形进一步增大,同时上坡出现外倾位移,这是由于竖向地震引起的土体硬化改变了边坡的自振特性,在本研究的地震激励下,加筋土体的动力响应加剧,上坡向外偏转,使得 Δ 增大。上坡合力作用点及其方向发生改变,导致下坡筋材出现提兜状变形,筋材中部内力提高,这与图4给出的信息一致。

4 结论

根据有限元数值模拟,分析了倾斜地层情况下,双向地震作用后台阶型加筋土边坡的动力响应,所得结论如下:

(1)地震作用下填土塑性变形呈弥散型分布,主要存在两条浅层潜在滑裂面和一条深层滑裂面。

(2)竖向地震强度的影响规律如下:①竖向地震强度较小时,随着峰值加速度比的增大,加筋土体横向变形增大,筋材高拉力区增加,筋材中部利用率提高;同时,竖向地震的震动压实作用使土体侧向围压提高,土体发生硬化,刚度增加,坡面横向位移相对减小;②随着峰值加速度比进一步增大,竖向地震引起的土体硬化改变了边坡自振特性,在本研究的地震激励下,加筋土体动力响应加剧,上坡有发生整体剪切破坏的趋势,并出现外倾位移,坡面横向位移增大,局部破坏演变为整体性破坏。

(3)水平地震作用下,在一定范围内,地震强度的增大主要加剧了加筋土体的横向变形及其整体外倾,对加筋土体内部应变分布形式影响不大。

(4)竖向地震对边坡动力响应的影响随地震强度的增大变得明显。

以我国西南部一实际工程为背景,该工程有其特殊性,如倾斜地基土层的不均匀性可能是坡底潜在滑裂面发育的原因之一,故结论的普适性需要探讨。此外,仅分析了加筋边坡的震后状态,其动力过程中的应力应变状态有待后续研究。

参考文献:

[1] 杨广庆,徐超,张孟喜.土工合成材料加筋土结构应用技术指南[M].北京:人民交通出版社,2016.

- Yang G Q, Xu Ch, Zhang M X. Geosynthetics reinforcement soil structure application guidance [M]. Beijing: China Communications Press, 2016. (in Chinese)
- [2] Hsu H M, Hwang L C, Cheng A, et al. Seismic response of a geosynthetic-reinforced slope in northeastern Taiwan [C]// Fourth Geo-China International Conference, [S.l.]:[s.n.], 2016:90-97.
- [3] Guo D, Hamada M. Observed stability of natural and reinforced slopes during the 2008 Wenchuan earthquake [J]. Earthquake Engineering Symposium, 2012, 68 (2):481-494.
- [4] 公路土工合成材料应用技术规范: JTG/T D32—2012 [S]. 北京:人民交通出版社, 2012. Technical specifications for application of geosynthetics in highway: JTG/T D32—2012 [S]. Beijing: China Communications Press, 2012. (in Chinese)
- [5] 铁路路基土工合成材料应用设计规范: TB 10118—2006 [S]. 北京:中国铁道出版社, 2006. China railway code for design for applications of geosynthetics on subgrade of railway: TB 10118—2006 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2006. (in Chinese)
- [6] 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010 [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010. Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [7] 刘飞禹, 王攀, 王军, 等. 不同剪切速率下格栅-土界面循环剪切及其后直剪特性 [J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(2):387-395. Liu F Y, Wang P, Wang J, et al. Cyclic and post-cyclic shear behavior of sand-geogrid interface under different shear rates [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(2):387-395. (in Chinese)
- [8] 刘飞禹, 林旭, 王军. 砂土颗粒级配对筋土界面抗剪特性的影响 [J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32 (12):2 575-2 582. Liu F Y, Lin X, Wang J. Influence of particle size gradation on shear behavior of geosynthetics and sand interface [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(12):2 575-2 582. (in Chinese)
- [9] Liu H. Comparing the seismic responses of single and multi-tiered geosynthetic reinforced soil walls [J]. Geofrontiers Congress, 2011, 2(211):3 478-3 486.
- [10] Liu H, Yang G, Ling H I. Seismic response of multi-tiered reinforced soil retaining walls [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2014, 61-62 (6):1-12.
- [11] Mohamed S B A, Yang K H, Hung W Y. Finite element analyses of two-tier geosynthetic-reinforced soil walls: comparison involving centrifuge tests and limit equilibrium results [J]. Computers and Geotechnics, 2014, 61(2):67-84.
- [12] 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)
- [13] 张世暖, 蔡晓光. 地震作用下双级加筋土挡墙的动力响应研究 [J]. 长江科学院院报, 2017, 34(1):129-134. Zhang Sh N, Cai X G. Dynamic response of two-stage reinforced soil-retaining wall under seismic action [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(1):129-134. (in Chinese)
- [14] 胡聿贤. 地震工程学 [M]. 北京:地震出版社, 2006. Hu Y X. Earthquake engineering [M]. Beijing: Seismological Press, 2006. (in Chinese)
- [15] 辛娅云. 竖向地震作用的重要性 [J]. 工程抗震与加固改造, 2005(增1):54-56. Xin Y Y. Importance of the vertical seismic effect [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2005 (Sup 1):54-56. (in Chinese)
- [16] Zhang Z, Chen X, Gao M, et al. Simulation of the microtremor H/V spectrum based on the theory of surface wave propagation in a layered half-space [J]. Acta Geophysica, 2018(1):1-10.
- [17] 杨永强, 谢礼立, 李明, 等. 汶川余震加速度记录的反应谱特征研究 [J]. 土木工程学报, 2010(增1):37-41. Yang Y Q, Xie L L, Li M, et al. Response spectrum characteristics of Wenchuan after shock acceleration records [J]. China Civil Engineering Journal, 2010 (Sup 1):37-41. (in Chinese)
- [18] 刘华北. 水平与竖向地震作用下土工格栅加筋土挡墙动力分析 [J]. 岩土工程学报, 2006, 28 (5):594-599. Liu H B. Analysis on seismic behavior of geogrid-reinforced retaining wall subjected to horizontal and vertical excitations [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(5):594-599. (in Chinese)
- [19] Li X, Su L, Wu Y, et al. Seismic stability of gravity retaining walls under combined horizontal and vertical accelerations [J]. Geotechnical & Geological Engineering, 2015, 33 (1):161-166.
- [20] Ling H I, Leshchinsky D, Mohrii Y. Soil slopes under combined horizontal and vertical seismic accelerations [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics,

- 2015, 26 (12): 1 231-1 241.
- [21] Huang C C. Effects of horizontal and vertical seismic loads on the bearing capacity of a surface footing adjacent to a slope[J]. Soils and Foundations, 2009, 49 (2): 249-258.
- [22] Grasso A S L, Maugeri M, Recalcati P. Seismic behaviour of geosynthetic-reinforced slopes with overload by shaking table tests [C] // Geo-frontiers Congress, [S.l.]:[s.n.], 2005:1-14.
- [23] Vieira C S. An approach to estimate required geosynthetic strength in reinforced slopes with inclined back-slope for static and seismic loading[J]. Journal of Geo-engineering, 2016, 11(1):13-25.
- [24] 樊成, 刘华北. 台阶型加筋土边坡动力响应研究[J]. 土木工程与管理学报, 2018, 35(6):171-177.
Fan Ch, Liu H B. Seismic responses of tiered geosynthetic reinforced slope[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2018, 35(6):171-177. (in Chinese)
- [25] 张钦杰, 张晓燕. HSS模型在深基坑工程中的有限元分析研究[J]. 上海水务, 2015(1):29-32.
Zhang Q J, Zhang X Y. Research on the finite element analysis of HSS model in deep foundation of Shanghai subway station[J]. Shanghai Water, 2015(1):29-32. (in Chinese)
- [26] 刘志祥, 张海清. PLAXIS高级应用教程[M]. 北京:机械工业出版社, 2015.
Liu Zh X, Zhang H Q. PLAXIS advanced application tutorial[M]. Beijing: China Machine Press, 2015. (in Chinese)
- [27] 张咸恭. 中国工程地质学[M]. 北京:科学出版社, 2000.
- Zhang X G. Engineering geology of China[M]. Beijing: Science Press, 2000. (in Chinese)
- [28] 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册[M]. 4版. 北京:中国建筑工业出版社, 2007.
Editorial Board of Project Geology Handbook. Project geology handbook [M]. 4th ed. Beijing: China Architecture and Building Press, 2007. (in Chinese)
- [29] 田利勇, 于文华, 卢育芳. Plaxis在板桩结构分析中的应用[J]. 水运工程, 2015(4):194-200.
Tian L Y, Yu W H, Lu Y F. Application of Plaxis in analysis of sheet-pile structure[J]. Port and Waterway Engineering, 2015(4):194-200. (in Chinese)
- [30] 施有志, 林树枝, 杨荣华. 小应变硬化模型(HSS)在Rayleigh波作用下场地响应分析中的应用[J]. 地震工程学报, 2016, 38(6):896-902.
Shi Y Zh, Lin Sh Zh, Yang R H. Application of hardening small strain model in the site response analysis under Rayleigh wave excitation[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2016, 38(6):896-902. (in Chinese)
- [31] Brinkgreve R B J, Vermeer P A. Plaxis: Finite element code for soil and rock analyses[M]. Netherlands: Material Model Manual, 1998.
- [32] 王军, 王攀, 刘飞禹, 等. 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, et al. 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)

(本文责编:周小潭)