

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2018.05.20

高填方滑坡抗滑桩地震动力响应分析

牌立芳^{1,2}, 吴红刚^{2,3,4}, 杨涛⁵

(1. 兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 西部环境岩土及场地修复技术工程实验室, 甘肃 兰州 730000; 3. 中铁西北科学研究院有限公司, 甘肃 兰州 730000; 4. 中国中铁滑坡工程实验室, 甘肃 兰州 730000; 5. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 实践证明抗滑桩具有良好的加固效果, 但高填方滑坡抗滑桩对其进行加固时, 其在地震作用下的动力响应问题仍未定论。本文以晋城沁水中木亭 K2 + 892 ~ K3 + 115 段高填方滑坡治理工程为依托, 以 SIMQKE-GR 软件拟合地震设计反应谱, 利用 FLAC^{3D} 有限差分软件建立数值模型, 对比地震作用抗滑桩设立与否不同参数条件下滑坡体的动力响应变化规律。结果表明: (1) 滑坡体内加速度放大系数整体沿坡内向上呈上升趋势, 相对位移随着高度的增加也逐渐增大, 而速度、位移放大系数随着高度的增加逐渐减小。 (2) 通过加速度、速度、位移放大系数可以看出, 有支挡结构较无支挡结构, 抗滑桩的施加对减小坡面和坡体内部放大系数及抵抗坡体相对水平位移的效果显著。 (3) 岩土分层界面会导致相关系数出现明显的拐点, 甚至系数急剧变化, 而抗滑桩能抑制这种突变, 使得数值变化更加平稳。 (4) 对本文分析模型来说, 抗滑桩支护措施在地震荷载作用下降低了桩身一定范围内砂岩及泥岩的系数值, 减弱顺坡下部土体的影响。

关键词: 地震; 反应谱; FLAC^{3D}; 滑坡; SIMQKE-GR; 抗滑桩

中图分类号: U416

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2018)05-0126-09

Seismic dynamic response analysis of anti-slide piles supporting the high fill landslide

PAI Lifang^{1,2}, WU Honggang^{2,3,4}, YANG Tao⁵

(1. Lanzhou Jiaotong University School of Civil Engineering, Lanzhou, Gansu 730000, China; 2. Western Environmental Geotechnical and Site Rehabilitation Technology Engineering Laboratory, Lanzhou, Gansu 730000, China; 3. China Northwest Research Institute Co. Ltd. of CREC, Lanzhou Gansu 730000, China; 4. China Railway Landslide Engineering Laboratory, Lanzhou, Gansu 730000, China; 5. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: It has been proved that anti-slide piles have good reinforcement effect. However, when the anti-slide piles for high-fill landslides are applied, the dynamic response of the anti-slide piles to earthquake is still inconclusive. Based on the project of K2 + 892 ~ K3 + 115 high-fill landslide at Jincheng Qinchui, the seismic design response spectrum was fitted by SIMQKE-GR software. The numerical model was established using FLAC^{3D} finite difference software, and the dynamic variation of landslide with different parameters was compared. The results show that: (1) The acceleration amplification factor in landslide tends to increase along the slope, and the relative displacement increases with the increase of relative altitude, while the amplification

收稿日期: 2018-01-12; 修订日期: 2018-04-11

基金项目: 甘肃省自然科学基金项目: 地震滑坡稳定性评价方法及新型防治结构研究(145RJZA068); 云南省交通运输厅: 高烈度地震区高边坡综合文档关键技术研究(云交科教(2017)37号-(1)); 中铁科研院(科研)字 2015-KJ037-G006-03; 中国中铁股份有限公司(2015-重点-32)

第一作者: 牌立芳(1992-), 男, 岩土工程专业, 硕士研究生, 主要从事岩土与地下工程研究。E-mail: 13465099791@163.com

通讯作者: 吴红刚(1983-), 男, 岩土工程专业, 博士, 高级工程师, 硕士生导师, 主要从事岩土和边坡工程研究。E-mail: 271462550@qq.com

factor of velocity and displacement decreases with the increase of relative altitude. (2) According to the acceleration, velocity and displacement amplification factor, it can be seen that the application of anti-slide pile has the effect of reducing the internal amplification factor and the relative horizontal displacement of slope body significantly. (3) The stratified interface of rock and soil will lead to a significant inflection point of the correlation coefficient, even the abrupt change of the coefficient, while the anti-slide pile can restrain this mutation and make the numerical change more stable. (4) For the model analyzed in this paper, the anti-slide piles support measures reduce the coefficient values of sandstone and mudstone within a certain range of pile body under the action of seismic load, and weaken the influence of the lower soil body along the slope.

Keywords: earthquake; response spectrum; FLAC^{3D}; landslide; SIMQKE_GR; anti-slide pile

地震滑坡因其巨大的致灾力而广泛引起人们的关注,仅20世纪,地震滑坡已经造成了数万人丧生和几十亿美元的损失。强烈地震时,地震诱发的滑坡崩塌灾害,特别在山区,其危害比地震直接造成损失的还要大^[1]。

近年来岩土滑坡地震崩滑问题引起了国内外专家和学者的高度重视,抗滑桩作为一种常用的滑坡支挡结构被广泛应用于治理工程中,但现有的计算分析却远远落后于实际工程,对于地震荷载作用下抗滑桩加固后边坡的动力响应及稳定性研究相对较少^[2]。曾惜^[2]通过一个概化主质边坡模型探讨抗滑桩固化参数对边坡动力响应及稳定性的影响,运用FLAC^{3D}对加固前后的边坡在多种地震工况下响应进行了数值模拟研究;BRAIN M J等^[3]通过岩土实验室测试来模拟山坡的地震加载,并评估不同的地面震动顺序如何影响在地震“主震”之前、之中和之后的山坡稳定性;徐光兴^[4]利用多组大型振动台模型对比试验,较为全面、系统研究了地震作用下滑坡的动力特性变化和动力响应规律;ZAEI M E等^[5]基于Rock P软件和Morgestron-Price稳定性方法,通过现场调查和实验结果评估了强震对滑坡失稳的影响;刘洋^[6]采用FLAC^{3D}节理化本构模型,通过分析不同弱面方向与桩间距交叉组合下桩间岩体监测点的位移值,研究了抗滑桩加固不同类型层状软岩边坡的抗震机理。

由于抗滑桩加固滑坡的地震响应研究尚未完善,目前动力研究主要集中在模型试验、振动台试验及数值模拟抗滑桩加固滑坡的地震动力响应分析。由于地震动力特性的复杂性和岩土边坡非线性特征,试验研究和数值分析中的许多假定与实际情况有一定的出入,其成果应用到实践中仍有一定的差距^[7-8]。而人工填筑的高填方边坡因高陡,故地震作用下边坡的变形和破坏直接关系到其稳定性,早期许多学者进行高边坡稳定性分析时都将地震作用简化为拟静力荷载,

具体是将力沿着滑面分解为水平方向和垂直方向,最后得到边坡的稳定系数^[9-11]。国内外对于高边坡稳定性分析并不统一,但归根结底还是源于传统的边坡稳定性分析方法^[12],而目前对于高填方滑坡治理工程下的地震动力响应问题研究大多基于实际工程为依托,结合有限元数值计算分析的方法。张沫^[13]在对汶川地震反倾斜坡研究资料进行仔细研读的基础上,分析影响反倾边坡地震动力响应的因素,利用FLAC^{3D}软件建立反倾斜坡的概化模型,用接触面单元模拟岩层,分别分析研究了反倾斜坡的高度、坡角、岩层倾角、下伏软岩、地震波频率、振幅对斜坡的地震动力响应特征的影响;张骞等^[14]以成兰铁路大型顺层边坡控制工程为依托,采用ABAQUS有限元分析软件建立数值计算模型,分析地震荷载下顺层岩质边坡响应特征和抗滑桩控制效果。本文以晋城沁水中木亭K2+892~K3+115段高填方滑坡治理工程为依托,以SIMQKE_GR软件来拟合地震设计反应谱,利用FLAC^{3D}进行设计分析计算,模拟高填方滑坡在抗滑桩治理工程下地震作用发生时坡体的动力响应问题。

1 工程概况

1.1 地形地貌及地层岩性

沁水县城位于梅河和杏河两河谷交汇地带的河漫滩及I、II级阶地上,平均海拔高度为880 m左右。全县地貌划分为中山区、低山丘陵区、河谷平川区三种类型。总体特征是山多川少,地形为北高南低、河谷发育、地形破碎,以中低山为主。最高点为西南部历山舜王坪,海拔2 321 m;最低点为东南部尉迟沁河口,海拔仅520 m,相对高差1 801 m。沁水县出露地层较齐全,由老到新为元古界震旦系,古生界寒武系(ε)、奥陶系(O)、石炭系(C)、二叠系(P)、中生界三叠系(T)及新生界第四系地层(Q),沁水县城附近地表出露二叠系上石盒子组砂岩,县城以西杏峪以西至中村一带

出露有奥陶系、寒武系石灰岩、白云岩等可溶岩(图 1、图 2)。



图 1 勘察区原地貌形态

Fig. 1 Original landscape morphology in the survey area

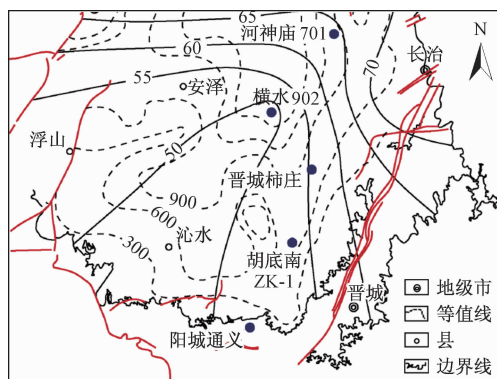


图 2 沁水地貌地形图

Fig. 2 Topographic map in Qinshui

1.2 地质构造与地震地质

1.2.1 地质构造

沁水县区域构造位于吕梁—太行断块(Ⅲ级)之次级单元沁水块坳的西南部,以及豫皖断块(Ⅲ级)之次级单元中条山块隆北段,以沁水块坳为主体,西南角为中条山块隆的一部分。总体呈北北东展布,长350 km,宽100~120 km,面积约3 500 km²。地质构造以近南北向、北北东向向背、向斜为主,构成沁水复式向斜盆地,地层总体向南西沁河一带倾伏,东南部有一条近EW向压扭性断裂,其南侧伴生一组规则的向斜构造,其余地点地层平稳,岩层倾角仅3°~5°。本区岩层的褶皱、断裂、节理较发育,为地下水的补给、储存创造了先决条件。

1.2.2 地震地质

新生代以来,盆地地区及周边地层沉积间断明显。上新世末,地壳呈上升阶段,上新统地层呈不连续沉积,下更新统地层缺失;中更新世时,地壳开始下降,中更新统地层在盆地及其周边地区均有沉积分布;中更新世后期至上更新世时,地壳又缓慢上升,表现为上更新统地层在盆地和周边丘陵区不连续沉积;全新世

以来,盆地地区又缓慢下降,在地形低凹地带沉积有全新统地层,并伴随着河道变迁。据历史记载,20世纪70年代之前,晋城地区地质条件比较复杂,地壳活动较为强烈,具有明显的时空效应。据统计,该地区共发生过5级以上地震1次,5级以下的有感地震44次,最大地震是1303年9月发生在高平的5.5级地震。

1.3 治理工程措施

本次治理工作分为应急治理,快速实施,同时应急治理工程是后续永久治理工程的重要组成部分,将长期发挥作用。具体工程治理断面如图3所示。

1.3.1 支档工程

支档工程采用2排抗滑桩和预应力锚索框架联合支档,既控制深层滑动,又防止桩顶以上高填方的局部剪出。

1.3.2 截排水工程

(1) 支撑渗沟

根据现场调查得知该地区富含地下水,因此在该段树枝状设置支撑渗沟,渗沟设计断面为矩形,与坡体前部排水沟相接,有效输排滑坡体内丰富的地下水,为其营造稳定流经渠道,提高坡体稳定性。

(2) 截排水沟

在阳翼高速公路路基内侧坡体上分别设置A型截排水沟,下边坡平台处设置B型截排水沟,并与坡面现有排水沟相接将水引出;在坡体前部设置D型排水沟,排水沟一头通过金属波纹管涵与坡体上的支撑渗沟和坡体上游截排水沟相接,另一头与河岸挡墙相接,将水排入河中。

2 人工合成地震波

2.1 确定设计反应谱及其参数

根据《中国地震动参数区划图》GB 18306—2015,该工程地区地震动峰值加速度和地震动反应谱周期分别为0.1g和0.45 s,根据国家地震局《中国地震综合等震线图》(1:400万),本区地震基本烈度为Ⅶ度,且依据该地历史上大地震的出现频率,确立设防水标准为二级设防,以《建筑抗震设计规范》GB 50011—2010为标准确定场地特征周期、反应谱最大值等,加速反应谱及其参数如表1所示。

表 1 设计反应谱参数表

Table 1 Design response spectrum parameter table

名称	设防 烈度	设计基本地 震加速度/g	地面地震最 大加速度/g	特征 周期/s	阻尼比
参数值	Ⅶ	0.1	0.23	0.45	0.05

基于设计反应谱参数,依据单自由度弹性系统对于某个实际地震加速度的最大反应(加速度、速度和位移)和体系的自振特征(自振周期或频率和阻尼比)之间的函数关系,把地震反应按周期次序排列形成如图 4 所示的标准反应谱。

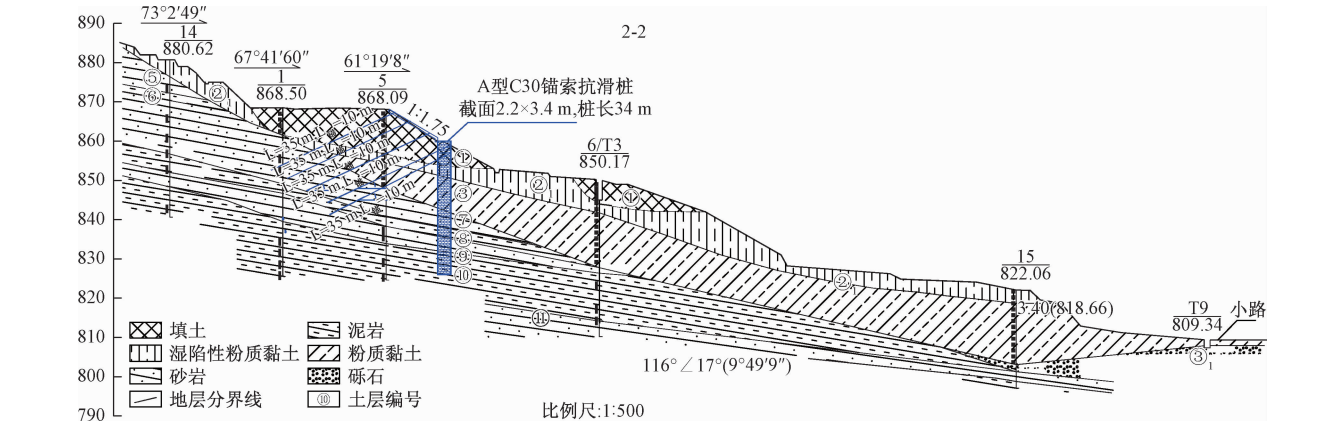


图 3 沁水中木亭互通连接线 K2 + 892 ~ K3 + 115 段滑坡治理工程 2 - 2'断面设计图

Fig. 3 Section design of landslide control project No. 2 - 2' at K2 + 892 ~ K3 + 115 section of the Qinchui Zhongmu Pavilion interconnection

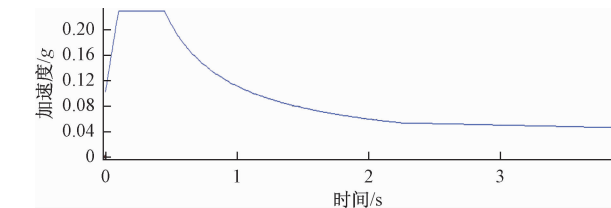


图 4 标准设计反应谱

Fig. 4 Standard design response spectrum

2.2 反应谱拟合

本次计算使用 SIMQKE_GR 软件来对地震设计反应谱进行拟合。SIMQKE_GR 程序根据输入的谱数据通过迭代法求解功率谱密度函数,继而由功率谱求解傅立叶幅值谱,后经傅里叶逆变换 (FFT^{-1}) 技术,得到平稳地震加速度时程曲线。该曲线乘以时间包络函数则可得到所需要的非平稳的加速度时程曲线^[15]。

合成人工地震动常用的方法是把底面加速度时程看成非平稳随机过程,其对应的时程关系:

$$a(t) = f(t) a_s(t)$$

式中: $f(t)$ ——考虑平稳性的外包线函数;

$a_s(t)$ ——具有零均值和功率密度函数的高斯平稳随机过程。

拟合过程中:输出时程总持续时间为 20 s。为使得初始反应谱和目标反应谱间有较小误差且计算过程得到的反应谱曲线较为光滑,拟合的迭代次数为 5 次,峰值加速度为 0.1 g,反应谱阻尼比按照抗震设计规范取为 0.05,共拟合 10 条地震波,取其中拟合程度较好

的生成的地震波时程曲线如 5 所示。

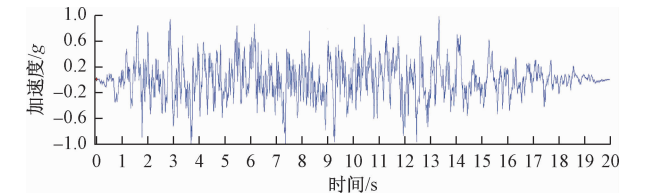


图 5 人工地震波时程曲线(滤前)

Fig. 5 Artificial seismic wave course curve (before filter)

将初始人工波与设计反应谱作对比(图 6),可以看出初始反应谱和设计反应谱有相对较好的拟合程度。

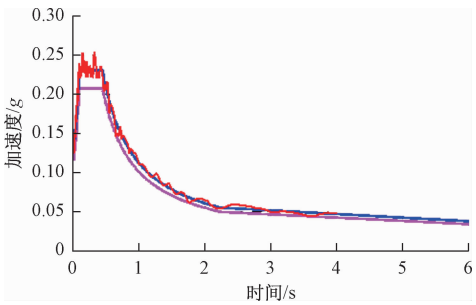


图 6 初始人工波反应谱与设计反应谱

Fig. 6 Initial artificial wave response spectrum and design response spectrum

2.3 初始波的修正

因反应谱与功率之间存在近似转换关系,使得初始人工波与设计反应谱之间仍存在一定的误差,因此还需要对其进行修正。本次计算采用 SeismoSignal 软件对地震波进行基线校正和滤波。

其中基线校正线性方程为: $y = a_0 + a_1 \cdot x$, 滤波采用巴特沃斯滤波方式, 可以滤掉部分高频波得到较为平滑、幅频平坦的人造波, 最后得到的地震波即作为时程分析所用的人工地震波(图7)。

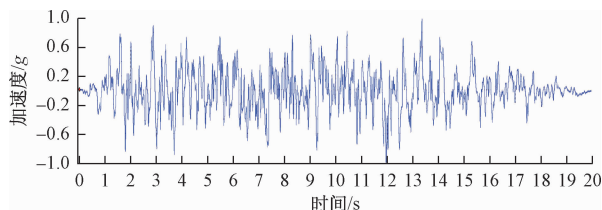


图7 人工地震波时程曲线(滤后)

Fig. 7 Artificial seismic wave course curve (after filtration)

3 数值分析

3.1 计算模型

以晋城沁水中木亭 K2 + 892 ~ K3 + 115 段高填方滑坡治理工程 2-2' 断面为原型, 建立数值模型, 进行地震动力响应分析。计算模型依照工程实例创建, 包含该地区的主要地质构造, 如断块影响区、坡体走向、向斜断裂带以及抗滑桩工程治理。为满足计算需要, 设计了有抗滑桩和无抗滑桩两种模型, 采用固定边界条件, 模型四周设为自由场边界(图8、图9)。

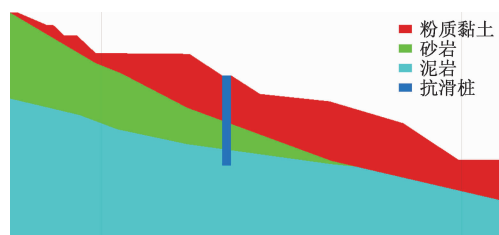


图8 计算模型简图(加桩)

Fig. 8 Calculation model diagram (plus pile)

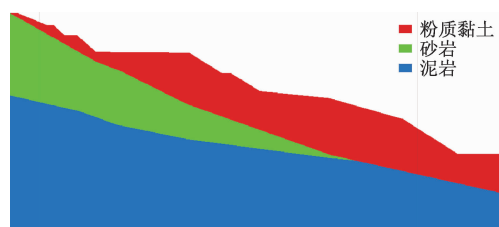


图9 计算模型简图(无桩)

Fig. 9 Calculation model diagram (no pile)

3.2 计算参数及工况设计

3.2.1 计算参数

为更合理的确定滑坡的地震动破坏模式及开展稳定性计算, 采用综合手段确定各土层的抗剪强度指标。

具体方法为:(1)根据地质勘察报告对土层的描述及现场调查情况,参考中国石油西气东输管道公司山西管理处提供的《设计委托书》山西函[2011]206号初步判定抗剪强度指标的取值范围;(2)参考相关规范及《工程地质手册》验证其参数是否合理,最终综合确定最终的土层的天然重度、岩土弹性模量;(3)对于C30锚索抗滑桩则选用C30混凝土的弹性模量及泊松比。具体土层参数如表2所示。

表2 计算材料参数

Table 2 Calculates the material parameters

材料	重度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/MPa	泊松比
粉质黏土	20	20	0.32
砂岩	24	3 399.5	0.25
泥岩	24.18	411	0.232
承台、抗滑桩	24.2	30 000	0.2

3.2.2 工况设计

为对比加桩前后不同参数条件下滑坡体内加速度、速度、位移放大系数以及残留位移的变化规律,在坡脚及桩身处分别截取剖面,分析坡面和坡体内竖直面内各放大系数随高度的变化规律,以及坡面上各放大系数随水平距离的变化规律。分别在有抗滑桩和无抗滑桩模型下同一位置截取剖面得到相应的四个参数分布情况。

共设四个剖面,其中,H-1剖面以第一段斜坡与水平面左侧交界处为起始点,向坡内部竖直延伸剖面;H-2剖面为桩顶水平剖面;H-3剖面为桩身内部竖直剖面;H-4剖面为挡土墙右侧剖面,同时也是加速度放大系数竖直方向变化最密集的剖面,具体位置如图10所示。

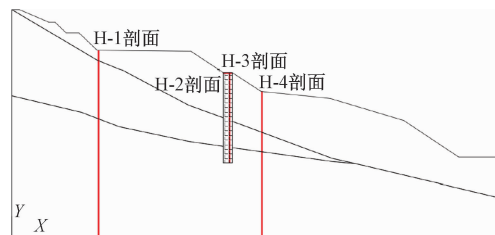


图10 剖面选取示意图

Fig. 10 Profile selection sketch diagram

3.3 计算结果分析

本节分析比较了抗滑桩设立与否条件下滑坡的地震动响应特性,图11~图14给出了各剖面地震持时条件下坡体内加速度、速度及位移放大系数等值线、X方向相对位移等值线,坐标单位均为m。

其中曲线图例“1-Y”符号意义如下:

‘H-1’表示横向1剖面,相应‘H-2’表示横向2剖面,以此类推;

‘Y’表示设立抗滑桩,‘N’表示不设立抗滑桩即为天然滑坡。

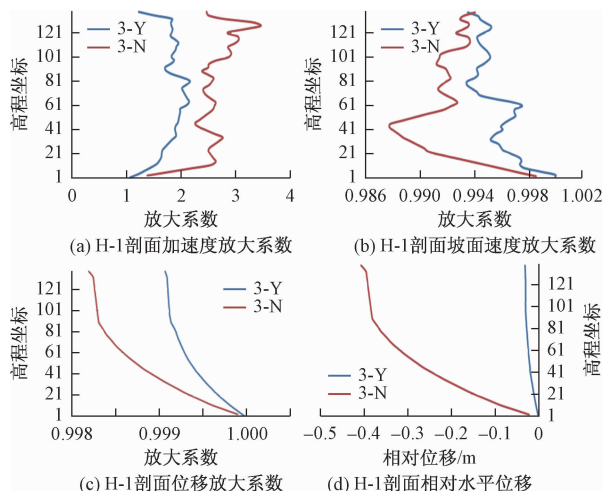


图 11 H-1 剖面参数散点图

Fig. 11 H-1 Profile parameters scatter plot

从 H-1 剖面等值曲线分析得出:

(1) 滑坡体内加速度放大系数沿竖向剖面面向上整体呈上升趋势,但沿着数值方向存在一定的震荡变化,在添加了抗滑桩的情况下,其放大系数更小且震荡幅度变小,加速度放大系数变化更稳定。其中加抗滑桩时最大值出现在大约 $Z = 81.0$ m 处,其位置大概位于泥岩与砂岩交界处下部附近,值为 2.15,同一位置对应未加抗滑桩的值为 2.56;不加抗滑桩时最大值大约出现在 $Z = 123.7$ m 处,其位置大致位于黏土层与砂岩交界处附近,值为 3.15,对应同一位置加抗滑桩的值为 1.84。

(2) 速度放大系数随着高度的增加逐渐减小,且在最底层的泥岩层出现较大的波动,同时极值也出现在该范围内,往上至砂岩及黏土层时其值慢慢趋于稳定。

(3) 位移放大系数随着高度增加逐渐减少,在上部减小收敛,趋于平稳,不加桩的位移放大系数在 0.998 ~ 1.0 范围内变化,而加桩的值只在 0.999 ~ 1.0 内变化,可见该剖面的位移在垂直方向上基本保持一致。

(4) 相对位移随着高度的增加逐渐增大,变化较为平缓,但抗滑桩的有无对其水平残余位移的影响是巨大的,两种情况的最大水平相对位移均出现在坡面处,无桩时其值为 0.406 m,有桩时其值为 0.031 m,仅为无桩极值的 7.6%。

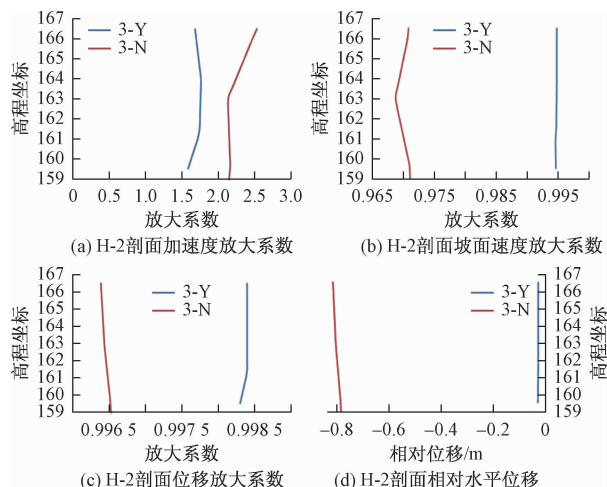


图 12 H-2 剖面参数散点图

Fig. 12 H-2 Profile parameters scatter plot

为便于同时考虑桩顶与周围土层的数值分布情况,除了桩顶范围 161 ~ 167 外还有一部分周围土体数据,可见各个放大系数与相对水平位移在该剖面上变化不大,无桩情况下在距角点 3 m 处附近存在一个转折点,各点加速度放大系数由平稳变为增加,而添加抗滑桩后四个参数均没有太大变化,但添加抗滑桩后,该剖面处的相对水平位移由 0.8 m 减少至 0.028 m,进一步说明添加抗滑桩对地震作用下抑制相对水平位移效果显著。

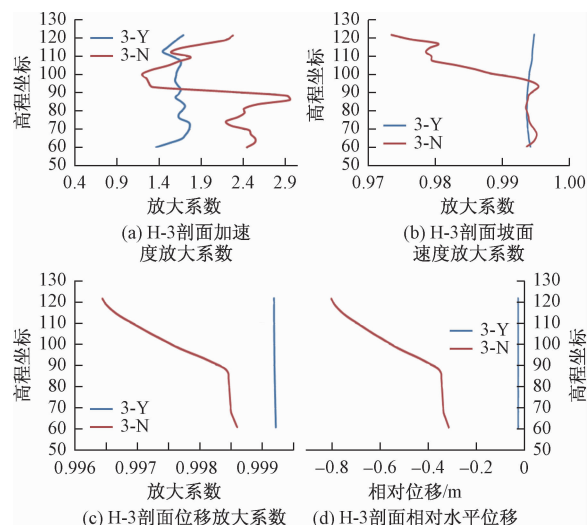


图 13 H-3 剖面参数散点图

Fig. 13 H-3 Profile parameters scatter plot

桩身截面处的加速度、速度、位移放大系数及相对水平位移均较为稳定,其中加速度放大系数基本在 1.6 ~ 1.7 波动,速度放大系数在 0.993 ~ 0.995 范围内变化,位移放大系数保持在 0.999 2 左右,相对水平

位移为 0.026 ~ 0.027 m,而无桩时在 90 m 处黏土与砂岩交界处放大系数与相对水平位移出现突然快速的生长,可见土石分界处是潜在的软弱滑面,此处各参数显著变化,是一处危险滑动面。

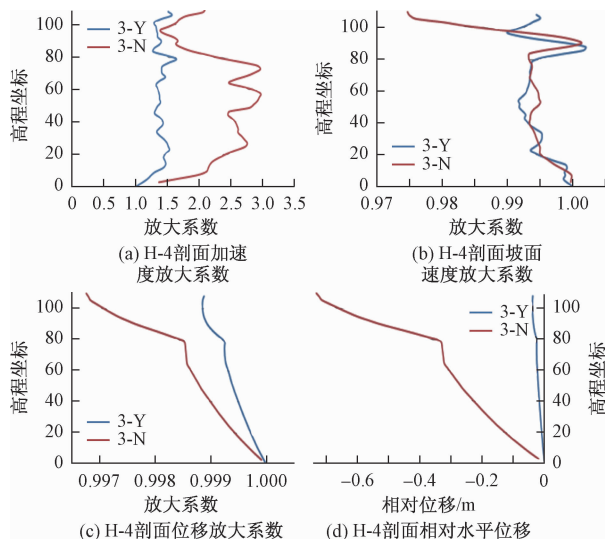


图 14 H-4 剖面参数散点图

Fig. 14 H-4 Profile parameters scatter plot

(1) 加速度放大系数在无桩情况下先减小后增大,最小值为 1.39 最大值为 1.76,在由砂岩层进入黏土层后,放大系数急剧减小至 1.39,减小幅度达 26.6%,而加桩之后加速度放大系数则变化较为稳定,始终在 1.0 ~ 1.6 范围内波动,最大值为 1.575,位于坡面附近,放大系数在该面均值仅为不加桩的 56.7%。

(2) 速度放大系数在有桩和无桩情况下均变化不大,两者的变化趋势也较为接近,均在 0.975 ~ 1.0 范围内波动。

(3) 位移放大系数则随着竖向高度的增加而增加,同时在砂岩和黏土层的分界处 ($Z = 80$ m),曲线的斜率出现了较大的增长,但有桩时斜率变化平缓,系数变化更稳定,其系数值也更接近于 1。

(4) 相对位移与位移放大系数类似,其值随着竖向高度的增加而增加,在砂岩和黏土层的分界处,曲线的斜率出现了较大的增长,但有桩时相对位移的变化范围远小于无桩时的情况,且两种情况下最大值均出现在坡面处,有桩时相对水平位移为 0.038 m,无桩时为 0.733 m,仅为无桩时的 5.2%。

4 加速度速度放大系数与相对水平位移

图 15 ~ 图 20 表明了地震作用下抗滑桩设立与否

的工况计算结果,从总体图来看,未加桩时加速度放大系数最大值为 8.788 4,位于坡体顶部砂岩与填土交界面以下,等值线云图分布较为均匀,砂岩及泥岩处加速度相对而言要大于粉质黏土处;加桩后加速度放大系数明显变小,最大值为 2.783 8,特别是桩身顺坡向一定范围内砂岩及泥岩的系数值有了显著的降低。同样的,对于速度放大系数而言,抗滑桩的存在对于减弱地震作用对抗滑桩顺坡向下部土体的影响有着显著的作用,同时速度放大系数的分布也更加的均匀。另外最大相对水平位移也从无抗滑桩的 0.869 m 减小至有抗滑桩的 0.053 98 m,两者最大值均出现在坡中下半段粉质黏土层。

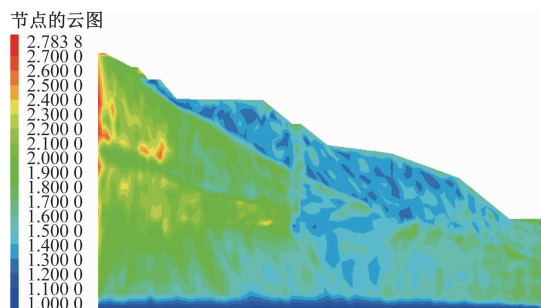


图 15 加速度放大系数分布图 (有桩)

Fig. 15 Acceleration amplification factor distribution (with pile)

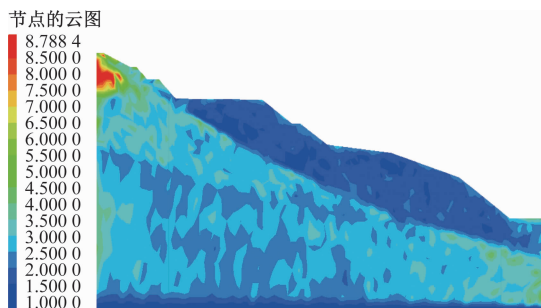


图 16 加速度放大系数分布图 (无桩)

Fig. 16 Acceleration amplification factor distribution (no pile)

由等值线云图可以表明,当前设计的抗滑桩支护措施在地震荷载作用下明显缩小了加速度和速度的放大系数,降低了桩身一定范围内砂岩及泥岩的系数值,减弱抗滑桩顺坡向下部土体的影响,减小了相对水平位移。同时在地震工况下,不同土体的动力特性以及地震动的复杂性和随机性使得边坡在地震荷载作用下的稳定性分析更为复杂^[16],通过抗滑桩加固后边坡与未加固边坡的加速度、速度、位移动力响应对比可以看出,抗滑桩对边坡的加速度、速度、位移的动力响应均

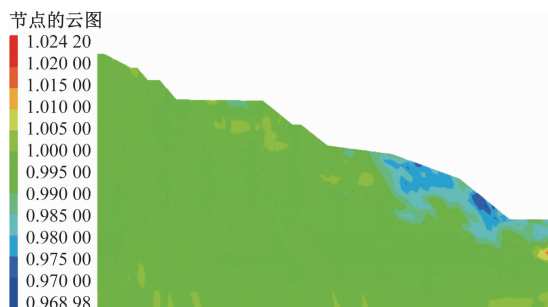


图 17 速度放大系数分布图(有桩)

Fig. 17 Speed amplification factor distribution (with pile)

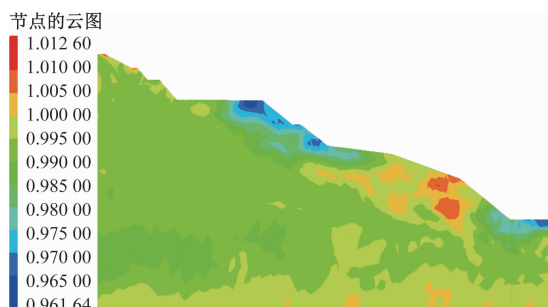


图 18 速度放大系数分布图(无桩)

Fig. 18 Speed amplification coefficient distribution (no pile)

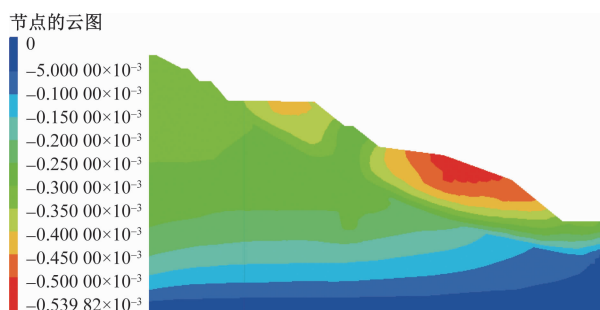


图 19 相对水平位移分布图(有桩)

Fig. 19 Relative horizontal displacement distribution (with pile)

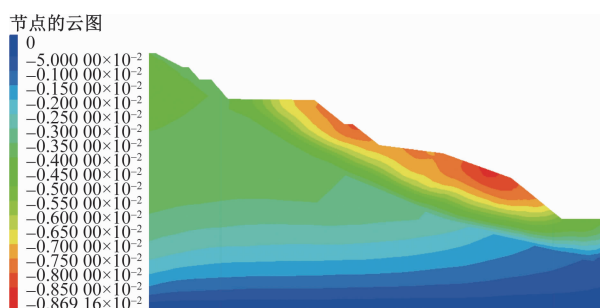


图 20 相对水平位移分布图(无桩)

Fig. 20 Relative horizontal displacement distribution (no pile)

有一定的衰减作用,但随着剖面距离抗滑桩远近不同其动力响应衰减程度也不一,其各自之间的动力响应差异较大,距离抗滑桩近的加固区域较远的地方动力

响应衰减更加明显。

5 结论

本文通过运用 FLAC^{3D} 有限差分软件建立高填方滑坡数值计算分析模型,对比地震作用抗滑桩设立与否不同参数条件下滑坡体加速度、速度、位移放大系数以及残留位移的变化规律,得出如下结论。

(1) 滑坡体内加速度放大系数整体沿坡内向上呈上升趋势,相对位移随着高度的增加也逐渐增大,而速度、位移放大系数随着高度的增加逐渐减小。

(2) 通过加速度、速度、位移放大系数可以看出,有支挡结构较无支挡结构,抗滑桩的施加对减小坡面和坡体内部放大系数及抵抗坡体相对水平位移的效果显著。

(3) 岩土分层界面会导致相关系数出现明显的拐点,甚至系数急剧变化,而抗滑桩能抑制这种突变,使得数值变化更加平稳。

(4) 对本文分析模型来说,抗滑桩支护措施在地震荷载作用下降低了桩身一定范围内砂岩及泥岩的系数值,减弱顺坡下部土体的影响。

参考文献:

- [1] 李忠生. 国内外地震滑坡灾害研究综述[J]. 灾害学, 2003(4): 65-71.
LI Zhongsheng. Researches on earthquake and landslide disasters at home and abroad [J]. Disaster Science, 2003 (4): 65-71.
- [2] 曾惜. 地震荷载作用下抗滑桩加固边坡动力稳定性分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
ZENG Xi. Seismic load under anti-slide piles reinforcement slope dynamic stability analysis [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [3] BRAIN M J, ROSSER N J, TUNSTALL N. The control of earthquake sequences on hillslope stability [J]. Geophysical Research Letters, 2017, 44(2).
- [4] 徐光兴. 地震作用下边坡工程动力响应与永久位移分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
XU Guangxing. Analysis of dynamic response and permanent displacement of slope engineering under earthquake [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.
- [5] ZAEI M E, RAO K S. Evaluating the effect of strong earthquake on slope instability [J]. Procedia Engineering, 2017, 173: 1771-1778.
- [6] 刘洋. 抗滑桩支护层状软岩边坡地震动力响应分析

- [C]//2016 年全国工程勘察学术大会论文集(上册).全国建筑工程勘察科技情报网、全国建筑工程勘察科技情报网华北情报站、中国建筑学会工程勘察分会:中国建筑学会工程勘察分会,2016:10.
- LIU Yang. Seismic dynamic response of stratified soft rock slope supported by anti-slide piles [C] // Proceedings of the academic investigation conference on symposium (Volume I). National Construction Engineering Investigation Science and Technology Information Network, the National Construction Engineering Investigation Science and Technology Information Network North China Information Station, China Architecture Engineering Society Reconstruction Branch; Chinese Architecture Engineering Society, 2016: 10.
- [7] 文畅平. 多级支挡结构与边坡系统地震动力特性及抗震研究[D]. 南京:中南大学,2013.
- WEN Changping. Seismic dynamic characteristics and seismic research of multi-stage retaining structure and slope system [D]. Nanjing: Central South University, 2013.
- [8] 刘爱娟,郑路,刘铁新,等. 考虑地震动地形效应的边坡破坏概率——以金沙江下游新市镇附近边坡为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2017,28(1): 4-12.
- LIU Aijuan, ZHENG Lu, LIU Fieixin, et al. Slope failure probability considering ground motion topography—Taking the slope near the new town in the lower reaches of Jinsha River as an example [J]. Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2017,28(1):4-12.
- [9] HACK R, ALKEMA D, KRUSE GAM, et al. Influence of earthquakes on the stability of slopes[J]. Engineering Geology, 2007,91(1):4-15.
- [10] 李海波,肖克强,刘亚群. 地震荷载作用下顺层岩质边坡稳定性系数分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007,26(12):2385-2394.
- LI Haibo, XIAO Keqiang, LIU Yaquin. Analysis of safety factor of bedding rock slope under earthquake loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007,26(12):2385-2394.
- [11] 李忠生. 地震动作用下滑坡稳定性分析[J]. 水文地质工程地质, 2004(2):4-8.
- LI Zhongsheng. Stability analysis of landslides due to ground motion [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2004(2):4-8.
- [12] 陈小松,高荣刚. 低山丘陵区高速公路路堑高边坡稳定性分析[J]. 黑龙江交通科技, 2018,41(1):6-7+10.
- CHEN Xiaosong, GAO Ronggang. Study on the stability of expressway cutting slopes in low mountains and hilly areas [J]. Heilongjiang Communications Science and Technology, 2018,41(1):6-7+10.
- [13] 张沫. 基于 FLAC^{3D} 数值分析方法的反倾层状斜坡地震动力响应特征研究[D]. 长春:吉林大学,2016.
- ZHANG Mo. Study of seismic response characteristics of anti-dip strata slope based on FLAC^{3D} numerical analysis method [D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [14] 张骞,张海霞,赵维刚,等. 地震荷载下顺层岩体边坡响应特性和抗滑桩控制效果数值模拟研究[J]. 特种结构, 2017,34(4):80-85.
- ZHANG Qian, ZHANG Haixia, ZHAO Weigang, et al. Numerical simulation of rock mass slope response and control effect of anti-slide piles under earthquake load[J]. Techniques for Specialties, 2017,34(4):80-85.
- [15] 梁意,肖承波,吴体,等. 基于建筑规范反应谱的人工地震波合成及其应用[J]. 四川理工学院学报(自然科学版), 2016,29(5):83-87.
- LIANG Yi, XIAO ChengBo, WU Ti, et al. Synthesis of synthetic seismic wave based on building code response spectrum and Its application[J]. Journal of Sichuan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2016,29(5):83-87.
- [16] 孙萌. 多点地震作用下岩质边坡的非线性动力反应分析[D]. 西安:西安理工大学,2009.
- SUN Meng. Non-linear dynamic response analysis of rock slope under multi-point earthquakes[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2009.