

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220623003

考虑含水率影响的花岗岩残积土边坡地震响应分析*

刘洪波¹, 梁崇旭², 刘飞禹²

(1. 广州环投增城环保能源有限公司, 广东 广州 511301; 2. 上海大学力学与工程科学学院, 上海 200444)

摘要: 基于室内直剪试验, 得到不同含水率下花岗岩残积土的强度参数, 并采用有限差分软件研究了花岗岩残积土边坡在不同含水率(13%、17%、21%、25%)和地震加速度峰值(0.05g、0.1g、0.2g、0.4g)下的位移场、加速度场和锚杆轴力变化规律。结果表明: 在EL波作用下, 边坡水平位移主要集中在残积土层内。含水率越高、地震峰值加速度越大, 同一位置处坡体水平位移越大; PGA放大系数随着坡高的增加而增大, 且表现为趋表放大效应。含水率越高、地震峰值加速度越小, 同一位置处PGA放大系数越大; 预应力锚杆最大轴力位于锚头处, 且轴力沿自由段变化较小, 而在内锚段由始端向末端逐渐减小。含水率越高、地震峰值加速度越大, 同一位置处锚杆轴力越大。当地震加速度峰值较小时(PGA=0.05g), 坡脚处锚杆轴力最大, 当地震加速度峰值较大时(PGA=0.4g), 坡顶处锚杆轴力最大。

关键词: 残积土边坡; 框锚支护; 地震响应; 含水率

中图分类号: TU416.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)02-0342-09

Seismic Response Analysis of Granite Residual Soil Slops Considering the Effect of Water Content

LIU Hongbo¹, LIANG Chongxu², LIU Feiyu²

(1. GZEPI Zengcheng Environmental Protection Energy Co., Ltd., Guangzhou 511301, China;

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

Abstract: Based on the laboratory direct shear tests, the strength parameters of granite residual soil at different water contents were obtained, and the finite difference software was used to study the displacement field, acceleration field and axial force of anchor bolt of granite residual soil slope at different water contents (13%, 17%, 21%, 25%) and peak seismic acceleration (0.05g, 0.1g, 0.2g, 0.4g). The results show that the horizontal displacement of the slope is mainly concentrated in the residual soil layer under the action of EL wave. The higher the water content and the greater the seismic peak acceleration, the greater the horizontal displacement of the slope at the same location. The amplification coefficient of PGA increases with the increase of slope height and shows a superficial amplification effect. The higher the water content and the smaller the seismic peak acceleration, the larger the PGA

* 收稿日期: 2022-06-23; 修回日期: 2022-09-13

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

作者简介: 刘洪波(1969—), 男, 高级工程师。主要从事地基基础和岩土工程的工作。E-mail: 2524544397@qq.com

通讯作者: 刘飞禹(1976—), 男, 教授, 博导, 博士。主要从事地基处理和土动力学方面的研究。E-mail: lfyju@shu.edu.cn

amplification coefficient at the same position. The maximum axial force of the prestressed bolt is located at the anchor head, and the axial force changes little along the free section, while that of the inner anchor section decreases gradually from the beginning to the end. The higher the water content and the greater the seismic peak acceleration, the greater the axial force of bolt at the same position. When the peak seismic acceleration is small ($PGA=0.05g$), the bolt axial force is the largest at the foot of slope. When the peak seismic acceleration is large ($PGA=0.4g$), the bolt axial force is the largest at the top of slope.

Keywords: residual soil slope; frame-anchor support; seismic response; water content

0 引言

风化花岗岩边坡分布广泛,其上覆有较厚的残积土层,内部普遍存在风化层界面、软弱夹层和发育节理等不稳定因素,且多为顺倾向产状^[1],相较于水平层状边坡不稳定性更高。而上覆的残积土遇水会发生颗粒崩解和软化^[2],产生较大的湿化变形,易诱发位于残积土层中的浅层滑坡^[3]。在残积土集中分布的东南沿海地区处于断裂带边缘^[4],地震对风化花岗岩高边坡工程的影响不容忽视。

框架预应力锚杆可有效改善边坡表面岩土体应力状态,限制边坡表面变形^[5],被广泛应用于高边坡支护中。目前针对预应力锚杆加固边坡的地震响应研究主要集中在单级均质边坡或水平层状边坡,探究了地震动参数、边坡内部参数和锚杆参数等因素对其动力响应的影响。Y.L.Lin等^[6,7]采用FLAC^{3D}软件研究了不同地震峰值加速度、地震作用方向和支护方式下框架支护边坡的动力响应规律,分析了边坡的土压力、位移变形以及锚杆单元状态的变化。缪圆冰等^[8]采用FLAC^{3D}软件研究了含软弱夹层的框架支护边坡在不同地震波作用下的动力响应。李亚鹏等^[9]采用FLAC^{3D}软件研究了软弱夹层倾角、黏聚力、内摩擦角和软弱夹层厚度等参数对框架支护岩质边坡位移响应和锚固界面剪切作用的影响。言志信等^[10,11]采用FLAC^{3D}软件,研究了锚杆参数、地震作用方向对锚杆界面剪应力分布的影响。

在雨季时,地震作用会造成边坡内孔隙水压力升高,易导致基岩—风化壳类边坡发生覆盖层沿基岩顶面的滑动破坏^[12]。目前已有有人基于室内模型试验研究了含水率或前期降雨对边坡地震响应的影响。L.C.Cao等^[13]研究了边坡在地震—降雨作用下的动力响应规律,发现强风化层的含水量会影响边坡的动力响应。J.C.Chen等^[14]研究发现地震前

短期降雨会引起黄土液化和强度损失,进而导致边坡失稳破坏。F.F.Ren等^[15]研究了土体在不同饱和程度下加筋土挡墙的动力响应规律,发现土体基质吸力对加筋土挡墙的抗震性能有增强作用。在数值模拟方面,Y.L.Chen等^[16]利用GeoStudio软件,研究了地震后连续降雨下边坡的破坏机理和稳定性。X.Zhang等^[17]利用FLAC^{3D}软件研究了地震前降雨、震后降雨和地震—降雨下加筋土边坡的动力响应、孔隙压力和应力分布。但考虑含水率影响的花岗岩残积土边坡地震响应分析较少,而且尹松等^[18]发现花岗岩残积土动弹性模量随着含水率的增加而降低。因此,含水率变化引起花岗岩残积土强度参数变化对边坡地震响应的影响不容忽视。

本文依托实际工程项目,采用有限差分软件建立了框架支护花岗岩残积土边坡模型。基于室内试验,获取了残积土的强度参数随含水率的变化规律,研究了坡体含水率和地震加速度峰值对边坡加速度场、位移场和锚杆轴力的影响。

1 工程概况

本研究依托广州市某在建项目,如图1所示,为框架预应力锚杆加固高边坡工程,边坡岩土层自上而下依次为残积土层、全风化花岗岩、强风化花岗岩、中风化花岗岩和微风化花岗岩,为风化严重的



图1 边坡支护

Fig. 1 Slope support diagram

顺倾向花岗岩高边坡。

各风化层厚度及分布如图2所示。边坡坡高为30 m,下部为第一级边坡,坡高为10 m,坡比为1:0.5;第二级边坡和第三级边坡的坡高分别为10 m和2 m,坡比均为1:1;第三级边坡上方为未支护的原始边坡,坡高约为8 m,平台宽度均为2 m。

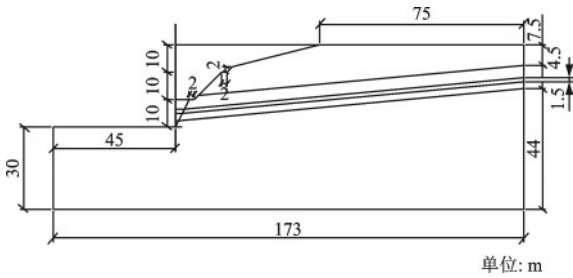


图2 边坡剖面尺寸示意图

Fig. 2 Schematic diagram of slope profile size

锚杆竖向和纵向间距均为2 m,倾角为15°,自下而上共设置11排。锚杆钢筋采用PSB1080预应力螺纹钢筋(抗拉强度设计值为900 N/mm²),第一级边坡锚杆采用Φ25预应力螺纹钢筋,第二级和第三级边坡锚杆采用Φ32预应力螺纹钢筋,锚杆注浆孔径均为150 mm,框架梁截面长度和宽度均为300 mm。

图3所示为边坡测点分布情况,S、J和MS分别代表水平位移监测点、沉降监测点和锚杆轴力监测点。其中S5、J5对应三级边坡坡顶处,S6、J6对应二级边坡坡顶处,S7、J7对应一级边坡坡顶处,MS5和MS7分别对应第10排、3排锚杆。

2 建模过程

2.1 模型建立

采用有限差分软件FLAC^{3D} 5.0进行建模分析,

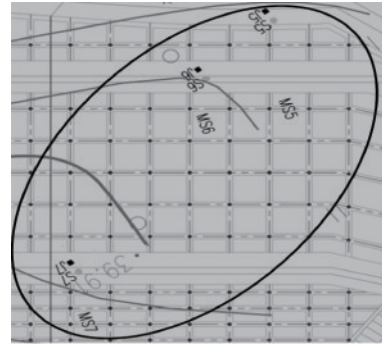


图3 工程监测点分布

Fig.3 Distribution map of engineering monitoring points

坡体假设为弹塑性材料,采用Mohr-Coulomb准则,锚杆和框架梁模拟分别采用Cable单元和Beam单元,网格划分后的边坡模型如图4所示。模型底部施加静态边界,四周施加自由场边界。阻尼采用局部阻尼,局部阻尼系数为0.157^[11]。

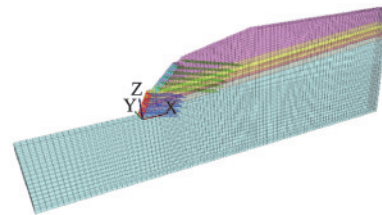


图4 边坡模型示意

Fig. 4 Schematic diagram of slope model

2.2 参数设定

表1所示为各层岩土体相关参数,表2和表3所示分别为框架梁和预应力锚杆相关参数。为得到不同含水率花岗岩残积土的强度参数,利用大型直剪仪在四种含水率下(13%、17%、21%和25%)对花岗岩残积土进行了一系列直剪试验,试验仪器详见文献[18]。

通过线性拟合,得出不同含水率残积土的抗剪

表1 各土层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of each soil layer

土层	重度 γ /(kN·m ⁻³)	弹性模量 E / GPa	泊松比 μ	体积模量 K / GPa	剪切模量 G /GPa	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 φ /(°)
残积土	16.2	0.015	0.35	0.0167	0.00556	/	/
全风化花岗岩	18.2	0.26	0.32	0.241	0.098	35.0	32.0
强风化花岗岩	22.8	5.9	0.30	4.917	2.269	200.0	35.0
中风化花岗岩	25.5	7.2	0.26	5.0	2.857	300.0	40.0
微风化花岗岩	25.8	27	0.21	15.517	11.16	1 000.0	51.76

表2 框架梁基本参数

Table 2 Basic parameters of frame beam

弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	横截面积 A/m^2	极惯性矩 J/m^4	X(Y)轴惯性矩 I/m^4
30	0.20	0.09	0.00 135	0.000 675

表3 锚杆基本参数

Table 3 Basic parameters of bolt

	第一级边坡锚杆		第二级和第三级边坡锚杆	
	自由段	锚固段	自由段	锚固段
长度/m	6	9	12	15
弹性模量 E/GPa	200	100	200	100
横截面积 A/m^2	0.00 049	0.018	0.00 080	0.018
水泥浆黏结力 $c_g/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	/	1.6e6	/	2.0e6
水泥浆摩擦角 $\varphi_g/(\text{°})$	/	35.0	/	35.0
水泥浆刚度 k_g/Pa	/	3.0e9	/	3.5e9
水泥浆外圈周长 P_g/m	/	0.471	/	0.471
抗拉强度 F_t/kN		442		724
预应力 F_p/kN		100		100

强度参数,见表4。土体黏聚力随含水率的升高先增大后减小,在 $w=17\%$ 时最大;随着含水率的升高,内摩擦角逐渐减小。

表4 不同含水率下残积土强度参数

Table 4 Strength parameters of residual soil at different water contents

含水率/%	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$
13	18.68	31.83
17	22.32	26.93
21	21.59	24.83
25	17.41	22.44

2.3 测点布置与锚杆编号

在进行边坡地震响应分析时,设置加速度场和位移场监测点,如图5所示。测点包括边坡内部测点 A1~A10 和边坡表面测点 B1~B10,测点的纵向坐标 y 均为 3 m。模型中共设置三列锚杆,将第二列

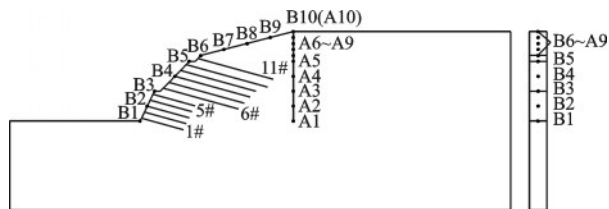


图5 边坡加速度场、位移场监测点布置示意

Fig. 5 Schematic diagram of slope acceleration field and displacement field monitoring points layout

锚杆自下而上依次编号为1#~11#。

2.4 地震工况与地震波

为分析残积土层含水率变化对坡体地震响应的影响,设置了四种含水率 w (13%、17%、21% 和 25%) 和四种地震峰值加速度 (0.05g、0.1g、0.2g 和 0.4g)。地震波选取 EL Centro 波,如图6所示。首先对输入的地震波进行滤波和基线校正处理,然后在边坡底部沿水平方向 (x 轴方向) 施加地震波。

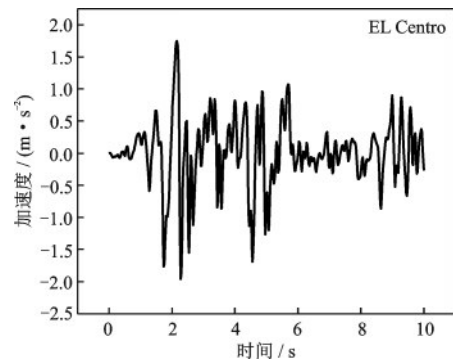


图6 输入的地震波

Fig. 6 Input seismic wave

3 模型验证

在进行边坡地震响应分析之前,将静力作用下预应力锚杆支护后的位移、锚杆轴力的数值模拟计

算值与工程实测值进行对比,以验证模型设置和参数标定的准确性。

图 7(a)所示为工程中预应力锚杆加固后边坡各测点水平位移随时间的变化曲线,图 7(b)为模拟中预应力锚杆施加后各测点水平位移在自平衡过程中随时步的变化曲线。可见,测点水平位移均随着时间(时步)的增加先增大后趋于稳定。选取第 300 d 的实测稳定数据与计算稳定值进行对比,表 5 所示为各测点水平位移、沉降和锚杆轴力的实测值和计算值。可见,各测点的位移、锚杆轴力实测值与计算值之间相差较小,验证了数值模型及参数选

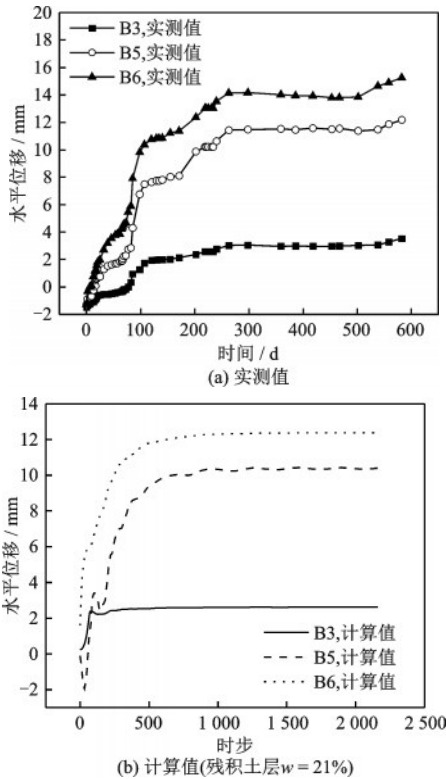


Fig.7 The measured and calculated horizontal displacement of the measuring point

表 5 各测点位移和锚杆轴力实测值与计算值

Table 5 Measured and calculated values of displacement and bolt axial force at each measuring point

测点	水平位移/mm		沉降位移/mm		锚杆轴力/kN	
	实测值	计算值	实测值	计算值	实测值	计算值
B3	3.05	2.61	3.29	2.11	/	/
B5	11.48	10.40	14.07	12.87	/	/
B6	14.18	12.41	11.06	10.12	/	/
MS5	/	/	/	/	60.4	56.23
MS7	/	/	/	/	102.2	98.76

定的合理性。然后对其进行位移清零,进一步分析地震作用对边坡位移场的影响规律。

4 结果分析

4.1 边坡水平位移场分析

图 8 所示为边坡在地震作用下的水平位移云图,其中 $w=25\%$,地震峰值加速度为 $0.2g$ 。可见,边坡坡顶区域(残积土层)产生较明显的水平位移,且第二级边坡的顶部处水平位移较大,残积土层以下坡体水平位移较小,表明框锚支护体系可有效抵抗地震作用。

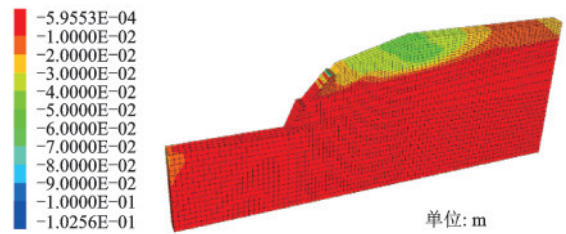


图 8 地震作用下边坡水平位移云图

Fig.8 Cloud map of slope horizontal displacement under earthquake action

图 9 所示为不同含水率的边坡在地震作用后水平位移沿坡高的分布曲线,其中地震峰值加速度为 $0.2g$ 。在边坡内部,各测点水平位移随着坡高的增加而增大,最大位移出现在坡顶处,呈现出明显的鞭梢效应;在边坡表面,各测点水平位移随着坡高的增加整体呈现上升趋势,但在第二级边坡的顶部(测点 B5)处发生突增,这可能是因为 B5 测点位于两个临空面的交汇处,入射的地震波在该处发生多次反射和叠加,导致其位移响应较大^[19]。同时,当坡高低于 15 m 时,含水率变化对其位移响应的影响很小,但在残积土层中含水率所引起的强度参数变化对边坡位移的影响不容忽视。

图 10 所示为边坡在不同峰值加速度(PGA)作用下水平位移沿坡高的分布情况。峰值加速度越大,同一位置处边坡水平位移越大、且水平位移随边坡高程的放大效应越明显。

图 11 所示为不同含水率、峰值加速度下坡顶处(A10)的水平位移,当 PGA 小于 $0.2g$ 时,坡顶水平位移随 PGA 的变化幅度较小,但当 PGA 增大到 $0.4g$ 时,坡顶水平位移发生突增。同时含水率越高,峰值加速度变化对坡顶水平位移的影响越大,如当

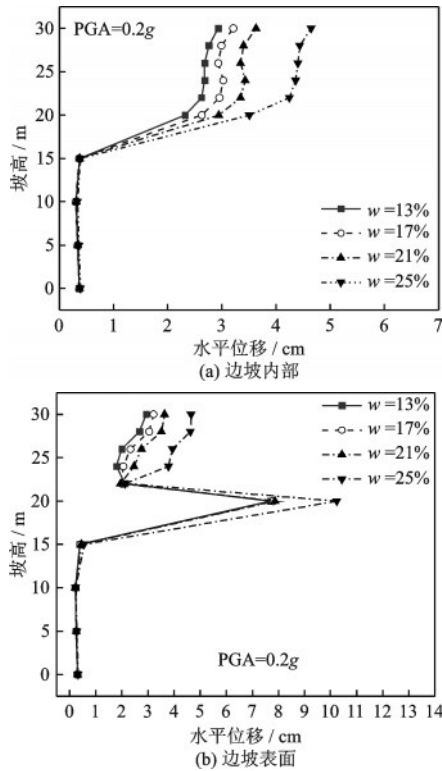


图9 不同含水率下边坡水平位移沿坡高的分布曲线
Fig.9 Distribution curves of slope horizontal displacement along slope height at different water contents

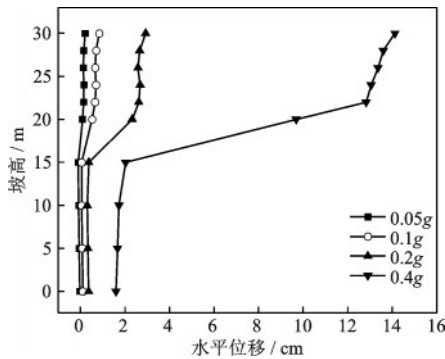


图10 不同峰值加速度下边坡内部水平位移沿坡高的分布曲线 ($w=13\%$)
Fig.10 Distribution curve of internal horizontal displacement along slope height at different peak accelerations ($w=13\%$)

PGA从0.05g增大到0.4g时,由低到高四种含水率下坡顶水平位移依次增加了13.9、15.0、18.6、20.5 cm。

4.2 边坡水平加速度场分析

定义PGA放大系数为边坡各点的地震加速度峰值与输入地震波加速度峰值的比值。图12所示为坡面B1、B5和B10三点处PGA放大系数与含水

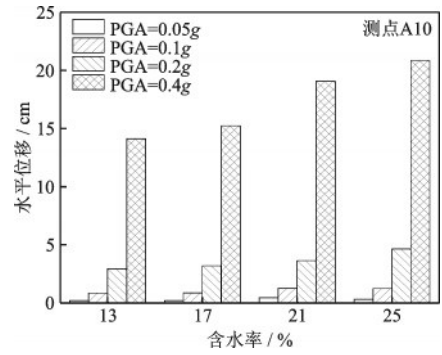


图11 不同含水率下坡顶处水平位移与峰值加速度的关系
Fig.11 Relationship between horizontal displacement and peak acceleration at the top of slope at different water contents

率的关系曲线,其中峰值加速度为0.2g。可见,PGA放大系数随着含水率的升高逐渐增大,且高度越高,PGA放大系数越大。

图13所示为不同峰值加速度作用下B5测点的水平加速度时程曲线,其中含水率 $w=13\%$ 。地震加速度峰值越大,边坡加速度响应越大。图14所示

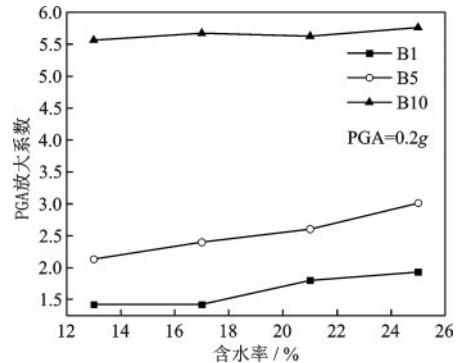


图12 PGA放大系数随含水率的变化曲线
Fig.12 Variation curve of PGA amplification coefficient at water contents

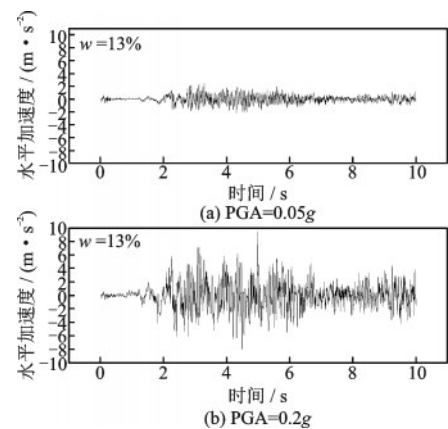


图13 不同峰值加速度下B5测点处水平加速度时程曲线
Fig.13 Time history curves of horizontal acceleration at measuring point B5 at different peak accelerations

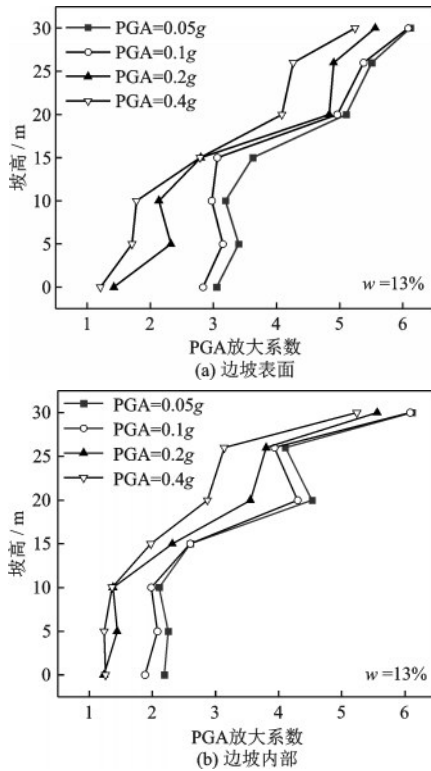


图 14 不同峰值加速度下 PGA 放大系数沿坡高的分布曲线
Fig. 14 Distribution curves of PGA amplification coefficients along slope height at different peak accelerations

为不同峰值加速度作用下 PGA 放大系数沿边坡高程的分布曲线,其中 $w=13\%$ 。可见无论是坡表还是边坡内部,随着高程的增加,PGA 放大系数整体上均呈现非线性增大,但在高度为 20 m 处出现了局部突增的现象,这一现象与坡表水平位移的变化趋势一致。同时,坡表加速度响应大于边坡内部,表现为临空面放大效应。

4.3 边坡锚杆轴力分析

图 15 所示为地震作用后锚杆轴力沿锚杆长度的变化曲线,其中地震峰值加速度为 $0.05g$,含水率 $w=13\%$ 。在自重作用下,锚杆均存在不同程度的预应力损失。每根锚杆轴力最大值均位于锚头处,且在自由段变化范围很小,这是因为没有考虑自由段锚杆与土体之间的粘结作用和摩擦作用^[7]。在锚杆内锚段,轴向拉力由始端向末端延伸,且除了第十排锚杆外,其余锚杆轴力均主要集中在距内锚段始端 3 m 范围内,随着与坡表距离的增加,轴力快速下降。以下重点分析自由段锚头轴力的变化规律。

图 16 所示为第八排锚杆(8#锚杆)在不同含水率下锚头轴力的时程曲线,其中地震加速度峰值为

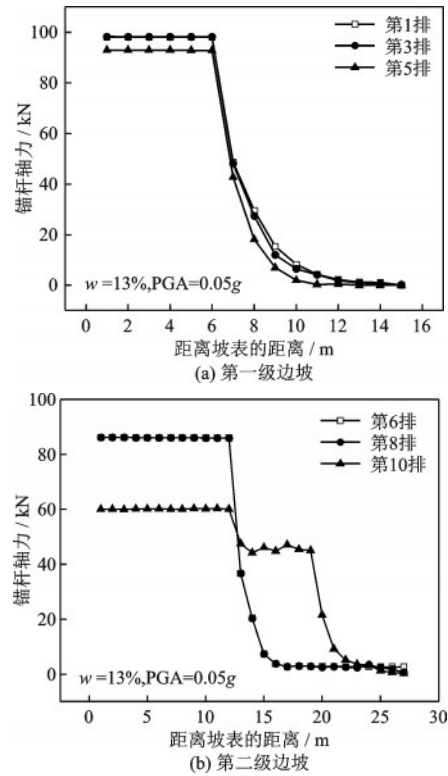


图 15 锚杆轴力沿全长的分布曲线
Fig. 15 Distribution curve of bolt axial force along the whole length

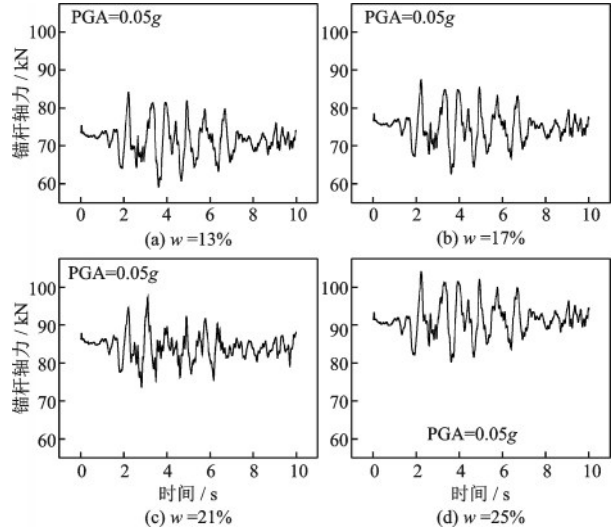


图 16 不同含水率下锚杆锚头处轴力时程曲线
Fig. 16 Time-history curve of axial force at anchor head of bolt at different water contents

$0.05g$ 。锚杆轴力在地震作用下发生波动变化,残积土层含水率越高,锚杆轴力越大。在地震作用中,四种含水率下锚头轴力的最大值分别为 84.2、87.5、97.3、104.0 kN,地震结束时的轴力分别为 73.6、77.1、87.6、94.0 kN。

图 17 所示为地震结束后不同含水率下锚头处轴力与锚杆位置的关系曲线,可见在第一级边坡内(锚杆编号为 1#~5#),含水率对锚杆轴力的影响很小,这主要是因为忽略了残积土层以下岩土体含水率的变化。随着锚杆位置的升高(锚杆编号逐渐增大),含水率对锚杆轴力的影响开始显现。当含水率分别为 13% 和 17% 时,随着坡高的增加,锚杆轴力整体上减小;但当含水率分别为 21% 和 25% 时,土层强度参数随含水率升高的降幅较大,导致锚杆轴力在第二级边坡中出现了局部先增大后减小的现象。以上锚杆轴力随边坡高度的变化趋势符合“强腰固脚”的设计理念,而含水率变化对锚杆轴力的影响较大。

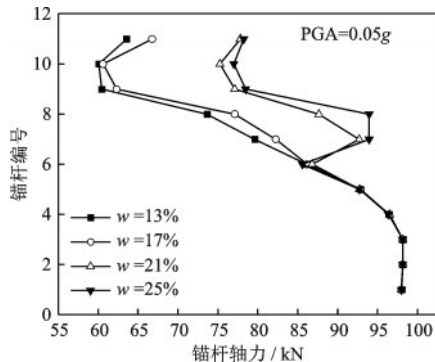


图 17 不同含水率下锚头轴力沿坡高的分布曲线
Fig. 17 Distribution curve of anchor head axial force along the slope height at different water contents

图 18 所示为不同地震峰值加速度作用后锚头轴力与锚杆位置的关系曲线。地震峰值加速度越大,相同位置处锚杆轴力越大。当地震加速度峰值分别为 0.05g 和 0.1g 时,随着坡高的增加,锚杆轴力逐渐减小,且加速度峰值的变化对锚杆轴力的影响

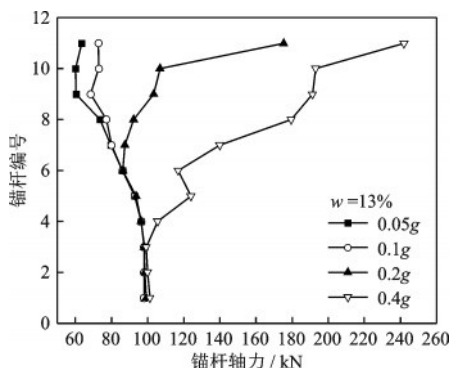


图 18 不同峰值加速度作用后锚头轴力沿坡高的分布曲线
Fig. 18 Distribution curve of axial force of anchor head along slope height after different peak accelerations

较小,主要对第二级、第三级边坡内的锚杆(编号为 6#~11#)造成影响。但随着地震加速度峰值的增大,锚杆轴力随着坡高的增加逐渐增大。这表明在强震作用下,主要由中上层锚杆承受动荷载作用,这与前人的结论一致^[20]。

5 结 论

(1) 在 EL 波作用下,边坡水平位移主要集中在残积土层内;且含水率越高、地震峰值加速度越大,同一位置处坡体水平位移越大。

(2) PGA 放大系数随坡高的增加而增大,且表现为趋表放大效应;含水率越高、地震峰值加速度越小,同一位置处 PGA 放大系数越大。

(3) 锚杆最大轴力位于锚头处,轴力沿自由段变化较小,而在内锚段由始端向末端逐渐减小;含水率越高、地震峰值加速度越大,锚杆轴力越大。

参 考 文 献:

- [1] 詹良通,李鹤,陈云敏,等.东南沿海残积土地区降雨诱发型滑坡预报雨强-历时曲线的影响因素分析[J].岩土力学,2012,33(3):872-880,886.
Zhan L T, Li H, Chen Y M, et al. Parametric analyses of intensity-duration curve for predicting rainfall-induced landslides in residual soil slop [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(3): 872-880,886. (in Chinese)
- [2] 安然,孔令伟,黎澄生,等.炎热多雨气候下花岗岩残积土的强度衰减与微结构损伤规律[J].岩石力学与工程学报,2020,39(9):1902-1911.
An R, Kong L W, Li C S, et al. Strength attenuation and microstructure damage of granite residual soils under hot and rainy weather [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(9): 1902-1911. (in Chinese)
- [3] Kim K S, Kim M I, Lee M S, et al. Regression equations for estimating landslide-triggering factors using soil characteristics [J]. Applied Sciences, 2020, 10(10): 3560.
- [4] 李江,邓斌.花岗岩残积土在周期荷载下力学特性的实验研究[J].岩土力学,1989,10(4):31-43.
Li J, Deng B. Experimental study on mechanical properties of granite residual soil under periodic load [J]. Rock and Soil Mechanics, 1989, 10(4): 31-43. (in Chinese)
- [5] 李剑,陈善雄,余飞,等.预应力锚索加固高陡边坡机制探讨[J].岩土力学,2020,41(2):707-713.

- Li J, Chen S X, Yu F, et al. Discussion on mechanism of reinforcing high and steep slope with prestressed anchor cable[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(2): 707-713. (in Chinese)
- [6] Lin Y L, Lu L, Yang G L. Seismic behavior of a single-form lattice anchoring structure and a combined retaining structure supporting soil slope: a comparison [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2020, 79(3):78.
- [7] Lin Y L, Li Y X, Zhao L H, et al. Investigation on seismic response of a three-stage soil slope supported by anchor frame structure[J]. *Journal of Central South University*, 2020, 27(4): 1290-1305.
- [8] 缪圆冰, 吴尚杰, 邓涛, 等. 含软弱夹层锚框支护边坡地震动态响应的数值模拟研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2020, 28(4): 852-864.
- Miao Y B, Wu S J, Deng T, et al. Seismic responses of weak interlayered slope with anchor-frame reinforcement based on numerical simulations[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2020, 28(4): 852-864. (in Chinese)
- [9] 李亚鹏, 言志信. 地震作用下软弱夹层参数对岩质边坡锚固界面剪切作用影响[J]. *振动与冲击*, 2019, 38(8): 48-53,79.
- Li Y P, Yan Z X. Influence of weak interlayer parameters for anchored interface shear action of rock slope under earthquake [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(8): 48-53,79. (in Chinese)
- [10] 言志信, 李亚鹏, 龙哲, 等. 双向耦合地震作用下含软弱层岩质边坡锚固界面剪切作用[J]. *振动与冲击*, 2020, 39(11): 158-164.
- Yan Z X, Li Y P, Long Z, et al. Shearing action of anchorage interface of rock slope with soft layer under bidirectional coupled earthquake [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, 39(11): 158-164. (in Chinese)
- [11] 言志信, 龙哲, 屈文瑞, 等. 地震作用下含软弱层岩体边坡锚固界面剪切作用分析[J]. *岩土力学*, 2019, 40(7): 2882-2890.
- Yan Z X, Long Z, Qu W R, et al. The effect of shear on the anchorage interface of rock slope with weak layers under earthquake [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(7): 2882-2890. (in Chinese)
- [12] 祁生文, 伍法权, 刘春玲, 等. 地震边坡稳定性的工程地质分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(16): 2792-2797.
- Qi S W, Wu F Q, Liu C L, et al. Engineering geology analysis on stability of slope under earthquake[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(16): 2792-2797. (in Chinese)
- [13] Cao L C, Zhang J J, Wang Z J, et al. Dynamic response and dynamic failure mode of the slope subjected to earthquake and rainfall[J]. *Landslides*, 2019, 16(8): 1467-1482.
- [14] Chen J C, Wang L M, Pu X W, et al. Experimental study on the dynamic characteristics of low-angle loess slope under the influence of long-and short-term effects of rainfall before earthquake[J]. *Engineering Geology*, 2020, 273: 105684.
- [15] Ren F F, Huang Q Q, Wang G. Shaking table tests on reinforced soil retaining walls subjected to the combined effects of rainfall and earthquakes[J]. *Engineering Geology*, 2020, 267: 105475.
- [16] Chen Y L, Liu G Y, Li N, et al. Stability evaluation of slope subjected to seismic effect combined with consequent rainfall[J]. *Engineering Geology*, 2020, 266.
- [17] Zhang X, Huang L, Hou Y, et al. Study on the stability of the geogrids-reinforced earth slope under the coupling effect of rainfall and earthquake[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, 2020: 1-11.
- [18] 尹松, 孔令伟, 杨爱武, 等. 循环振动作用下残积土动力变形特性试验研究[J]. *振动与冲击*, 2017, 36(11): 224-231.
- Yin S, Kong L W, Yang A W, et al. Experimental study on dynamic deformation characteristics of residual soil under cyclic vibration[J]. *Journal of Vibration and Impact*, 2017, 36(11): 224-231. (in Chinese)
- [19] Liu F Y, Ying M J, Yuan G H, et al. Particle shape effects on the cyclic shear behaviour of the soil-geogrid interface [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2021, 49(4): 991-1003.
- [20] 汪班桥, 郝建斌, 黄毓挺, 等. 滑坡防治格构梁锚杆地震动力响应分析[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2016, 48(3): 48-54.
- Wang B Q, Hao J B, Huang Y T, et al. Dynamic response for framed anchors in landslide prevention under earthquake[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2016, 48(3): 48-54. (in Chinese)

(本文编辑:周小潭)