

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2020.01.03

碎石土路堑高边坡地震动力响应过程分析

王 飞^{1,2}, 吴红刚^{2,3,4}, 郭春香¹

(1. 兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730070; 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)

摘要:以功东高速大营盘碎石土深路堑高边坡为研究对象,对其用有限差分软件 FLAC^{3D} 模拟分析,在低频高幅的地震波作用下,深入考虑网格划分和输入波以保证模拟的准确性,以此来研究高烈度地区地震作用下高边坡开挖及时支护的工序下的自然和降雨工况不同的变形和动力响应规律。结果表明:(1)在静力开挖支护阶段,开挖主要影响范围为开挖面附近的土体,位移主要为回弹变形,随着开挖深度的增加,回弹位移增加变缓。向下坡方向的位移趋势从坡脚开始产生,在降雨工况下所有坡面测点均产生向下坡方向位移。(2)地震作用下,坡体会产生多条剪切带倾泄能量,而地震降雨工况下产生坡顶到坡脚的贯通剪切带,成整体失稳趋势。(3)输入地震波峰值及其在此峰值点的位移响应存在时间差,且此点位移也不是位移最大值,降雨对中上部坡体位移影响较大,会使位移较自然工况下几乎成倍增加。(4)在地震中下坡方向的水平位移越大,其加速度响应越有降低的趋势,且越往坡体内部,降雨对加速度响应影响越不明显。

关键词:地震;FLAC^{3D};动力响应;高边坡;开挖及时支护

中图分类号:U416

文献标识码:A

文章编号:1003-8035(2020)01-0018-07

Dynamic response of high cut based a numerical simulation slope to earthquake

WANG Fei^{1,2}, WU Honggang^{2,3,4}, GUO Chunxiang¹

(1. Lanzhou Jiaotong University School of Civil Engineering, Lanzhou, Gansu 730070, 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)

Abstract: Taking the deep cutting high gravel soil slope in Gongdong Expressway as the research object, the finite difference software FLAC^{3D} is used for simulation analysis, and the meshing and inputting waves are deeply considered to ensure the accuracy of the simulation, so as to study earthquake induced deformation and response characteristics of high cutting slope under natural and rainfall conditions. The results show that: (1) In the stage of static excavation and support, the main influence range of excavation was near the excavation face, and the displacement was mainly spring back deformation, the rebound displacement increases slowly with the increase of excavation depth. The displacement trend in the downward slope direction was generated from the slope foot. Under the rain condition, all the slope measurement points were displaced downwards. (2) Under earthquake, the slope body will produce multiple shear zone dumping energy, and under the

收稿日期: 2019-04-16; 修订日期: 2019-05-14

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFC1504903); 云南省交通运输厅(云交科教(2017)37号-1); 甘肃省自然科学基金(145RJZA068)

第一作者: 王 飞(1994-),男,硕士,工程师,主要从事岩土与地下工程研究。E-mail:1370876805@qq.com

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

earthquake and rainfall condition, a penetrating shear zone from the top to the foot of the slope was formed, which became the overall instability trend. (3) There was a time gap between the peak input seismic wave and its displacement response at this peak point, and the displacement at this point was not the maximum displacement. The rainfall has a greater influence on the displacement of the upper middle slope, which will almost multiplied the displacement under natural conditions. (4) The larger the horizontal displacement in the downhill direction during the earthquake, the more decreasing of the acceleration, from the slope surface to the inner slope, the influence of rainfall on the acceleration response is weakened.

Keywords: earthquake; FLAC^{3D}; dynamic response; high slope; excavation timely support

0 引言

地震诱发的边坡滑动是主要的地震地质灾害类型之一,在山区和丘陵地带,地震诱发的滑坡往往具有分布广、数量多、危害大的特点^[1]。不同的开挖、支挡顺序对边坡岩土体变形有很大的影响^[2-3],在施工中及时支护有利于开挖边坡的稳定性^[4],目前公共交通建设向施工难度更大的地区拓展,在高烈度地区高填深挖已成为常态,对高大边坡开挖一般都采用分级开挖及时支护的工序,因此有必要在考虑此施工顺序对其地震作用下的坡体变形及动力响应规律进行研究。

目前,开挖对边坡的影响主要集中在静力状态下开挖。夏熙伦等^[5]根据试验观测资料,结合适当的有限元计算分析,研究探讨了三峡船闸高边坡岩体因开挖卸荷及应力调整而产生的松动区及其性状,进而为研究边坡的稳定性及加固方案提供了重要依据。姚裕春^[4]用坡体开挖松弛区来描述坡体影响范围,认为在坡体开挖影响范围内,不同的稳定系数对应不同的松弛区,开挖后及时支护,能有效控制边坡的变形和限制下级边坡开挖后的应力松弛程度,对边坡的稳定性有利。赵尚毅等^[6]利用 FLAC^{3D}研究了支护顺序对边坡变形及锚索受力的影响,表明及时支护(开挖一级支护一级),能减小边坡的变形,但对锚索受力不利。肖春龙^[7]用数值模拟得出结论,及时支护能有效保证边坡稳定,避免经济损失。王章琼等^[8]分析某工地地质条件及开挖卸荷扰动的基础上,结合 UDEC,总结了该边坡的变形破坏模式,并与实际监测进行对比进行了稳定性预测。曾芮等^[9]以鄂西地区典型赵家岩崩塌为研究对象,通过现场调研和数值模拟分析等手段,对其变形破坏机理进行研究,认为开挖造成的应力重分布加速了坡体破坏。

在地震高度烈度地区,高边坡开挖及时支护施工完毕后,可能会受到强烈地震作用,如云南功东高速大营盘深路堑高边坡施工完毕后(2018年4月)即遇到

通海 5.0 级地震(8月13日)、墨江 5.9 级地震(9月5日),但地震作用下考虑开挖及时支护工序的边坡变形规律和动力响应还无人研究。故本文以功东高速大营盘深路堑高边坡为原型,在静力开挖及时支护工序的基础上,对自然和降雨工况下的地震动力响应进行对比分析,以期得到高边坡工程的变形规律及动力响应特征。

1 工程概况

1.1 研究区坡体形态

功东高速大营盘路堑区该坡体地势西南高东北低,地貌类型属中低山侵蚀剥蚀堆积地貌,地形起伏较大,山体坡向 63°,自然坡度为 20°~45°。坡型主要受构造侵蚀、风化堆积作用控制,图 1 为边坡地质横断面图。

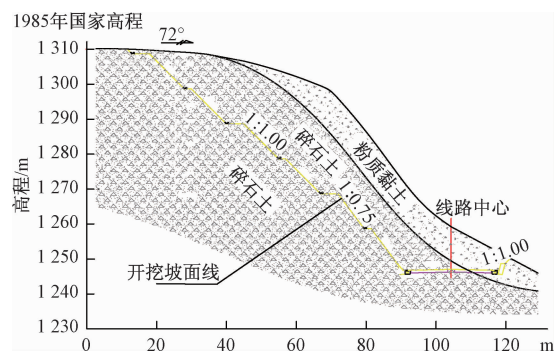


图1 边坡地质横断面图

Fig. 1 Geological cross-section of slope

1.2 地层岩性特征

根据钻探揭露,路堑区揭露地层为第四系人工成因种植土、第四系中更新统冲洪积粉质黏土和碎石土。各个岩层特征自上而下描述如下:

(1)种植土:结构松散,潮湿,主要以黏性土为主,局部有少量碎石,含量约 10%。分布在坡体表层,厚度为 0.7~1.3 m。

(2)粉质黏土:该层土体呈硬塑状态,土质不均,

切面粗糙,局部含砾石,粒径在 10 ~ 20 mm,含量约占 20%。层厚在 3.0 m 以内。

(3) 碎石土:土体密实,呈稍湿状态,粒径大于 20 mm 颗粒质量约占总质量的 75%,最大粒径约 100 mm,颗粒磨圆度较差,呈棱角状-次棱角状,级配较好,母岩成份以砂岩和灰岩为主,隙间由泥砂质充填,局部含块石,层顶埋深 0.7 ~ 24.2 m,厚度巨大,勘察未揭穿。

1.3 开挖支护方式

此路堑边坡开挖后左侧形成边坡最大高度 78.9 m,边坡坡向约 51°,属于高边坡,在施工时采用六级放坡,及时支护的施工顺序,即在开挖后立即对所开坡面进行支护,按照设计方案,坡体中部锚索较长,坡顶和坡脚锚杆较短:第一级坡和第六级坡锚杆分别为 20 m 和 12 m;第二、五级坡锚索全长 25 m,其中锚固段长 10 m;第三、四级坡单根锚索全长 30 m,锚固段长 10 m。图 2 为此深路堑高边坡的支护方案示意图,坡体基本特征、锚索(杆)位置和长度示意图如图 2 所示。

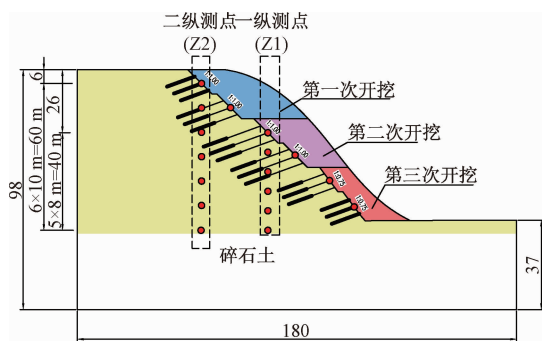


图 2 研究断面简化图(单位:m)

Fig. 2 The studied cross-section

1.4 研究区地震动参数

根据《中国地震动参数区划图》GB 18306—2015,项目起点功山至东川段地震动峰值加速度 $\geq 0.40g$ (对应的地震基本烈度为 9 度),地震动反应谱特征周期为 0.40 s,设计地震分组为第二组。

2 建立计算模型

2.1 地质模型简化

按照 FLAC^{3D} 建立模型和计算的需要,保留边坡的真实尺寸分布,对其他附属结构如排水沟、表层土等不影响结构计算的部分忽略,化简后的边坡断面如图 2 所示。

根据实际的地形和结构物的布置位置,为了防止

边界效应对研究区产生影响,对模型计算范围进行放大,以坡体为中心,将坡顶和坡脚各延伸一倍的坡高,取模型的长为 180 m,高为 98 m,宽 7.2 m,遵循实际的尺寸为原型,进行相应的简化,得到三维地质模型。

锚索和框架梁采用结构单元 cable 和 beam 模拟。横纵梁的 beamsel 之间的 link 定义为固接(6 个自由度全部设置为 rigid),同样的 cablesel 与 beamsel 之间也为固接。开挖后设置支护结构的数值计算模型示意图如图 3 所示。

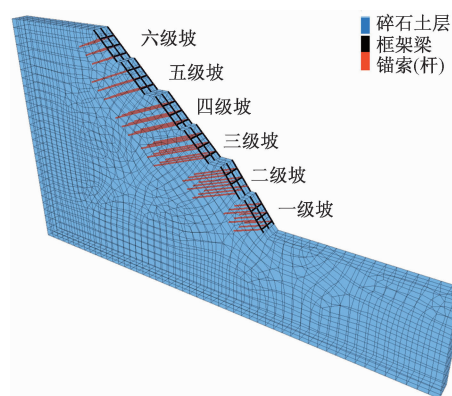


图 3 开挖完成后支护结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of support structure after excavation

2.2 网格精度要求

根据 Lysmer 和 Kuhlemeyer(1969)的研究,动力计算中要想精确的展示模型中波的传播,建模时网格尺寸必须小于输入波最高频率对应的波长的 1/8 到 1/10^[10]。

本次滤波后最大频率为 10 Hz,由根据钻探及波速测试成果中钻孔波速测试结果可知,场地等效剪切波速为 269.0 m/s,则最小网格尺寸应小于 2.69 m;再根据《公路工程抗震设计规范》,硬土的剪切波速为 250 ~ 500 m/s,故网格尺寸最小应当小于 2.5 m。

本模型网格最小尺寸为 2.5 m,满足要求。

2.3 参数取值

通过原位直剪试验设备,对大营盘碎石土进行水平推剪实验根据实验所测的推剪应力和剪切位移,计算得到大营盘强度参数(C 、 φ)如表 1 所示,斜杠后为饱和度 70% 降雨后的强度参数。

表 1 岩土体强度参数取值

Table 1 Strength parameters of rock and soil mass

材料名称	E/MPa	泊松比 μ	C/kPa	$\varphi/(\circ)$	密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
碎石土	250/200	0.28	10/8	40/35	1 950

本次采用新型玄武岩纤维复合(BFRP)筋是以玄

武岩纤维为增强材料,以合成树脂为基体材料,并掺入适量辅助剂,经特殊的工艺处理形成的一种新型非金属复合材料,其轻质高强、耐腐蚀、抗疲劳、环保等优良的工程特性使之在支护工程中崭露头角,可行性和优越性已经被很多学者所证明^[11-12]。锚固只考虑锚索的轴向作用,在锚索的锚头部位设置大的黏结参数以模拟锚头的作用,锚索材料参数选择 BFRP 厂家提供的数据,框架梁的截面为 0.4 m×0.4 m 的正方形,具体取值见表 2。

表 2 锚索和混凝土框架梁参数取值
Table 2 Parameters of the anchor cable and concrete frame beam

锚索	框架梁		
弹性模量/GPa	55	弹性模量/GPa	200
水泥浆粘结力/N	1.0×10^6	横截面积/m ²	1.6×10^{-1}
水泥浆刚度/(N·m ⁻²)	2.0×10^7	Y 轴惯性矩/m ⁴	2.1×10^{-3}
抗拉强度/MPa	1 200	Z 轴惯性矩/m ⁴	2.1×10^{-3}
锚索横截面积/m ²	8.0×10^{-4}	极惯性矩/m ⁴	4.2×10^{-3}
注浆孔周长/m	3.77×10^{-3}	泊松比	0.3

2.4 监测点及工况设置

在开挖时,每次开挖两级坡,每开挖一次,就将开挖的两极坡面进行锚索框架梁支护。

为研究开挖及时支护对边坡变形的影响,本次模拟分两个阶段进行,第一阶段为静力阶段:分级开挖及时支护具体工况设置如表 3 所示。第二阶段为地震作用下的动力计算:将静力计算的最终结果(工序 3 和 4),分别作为动力计算的自然和降雨工况的初始状态,详细的计算工况如表 4 所示。

在每级坡面中点设置坡面监测点,在内部设置一纵、二纵测点(测点为红色圆圈)(图 2)。

表 3 施工顺序(静力工况)
Table 3 Construction sequence (static condition)

工序 (静力工况)	1	2	3	4
	第一次开挖 支护	第二次开挖 支护	第三次开挖 支护	降雨

表 4 地震工况设置
Table 4 Setting of seismic conditions

工况序号	施工顺序	边坡状态	输入波	加速度峰值
5	及时支护	天然	鲁甸波	0.4 g
6		降雨		

2.5 地震波输入

动力计算时取地震波为实测鲁甸加速度波,该波持续时间为 50 s,加速度峰值为 1.2 m/s²。截取其中能量最强的 12 s 作为输入波,且只研究破坏力强的剪

切波。高频部分振幅很小,故滤去 10 Hz 以上的地震波,以减小网格尺寸。处理后的输入波时程曲线如图 4 所示。

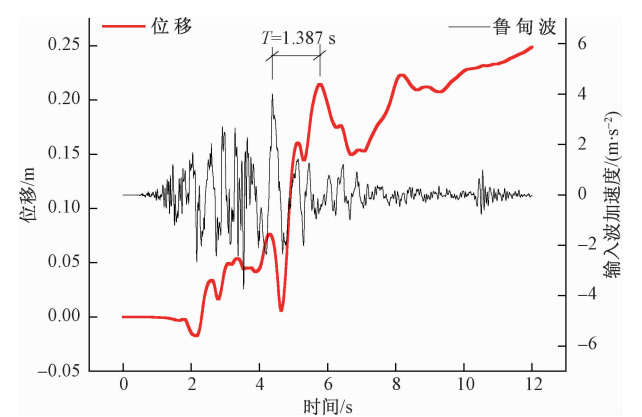


图 4 位移和输入波时程曲线

Fig. 4 Time-history curve of displacement and input wave

2.6 动力条件设置

在动力计算时,模型边界条件和阻尼的选取对计算结果影响很大。FLAC^{3D}中提供了安静边界和自由场边界来减少模型边界上波的反射^[13]。此次模拟四周采用自由场边界(图 5),底面设置安静边界使边坡基础部分置于一个半空间无限的自然地质体内,以更接近实际土体状态。

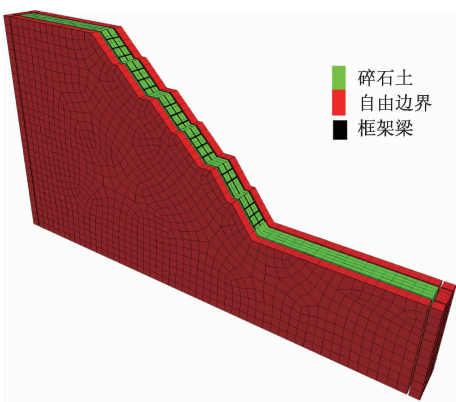


图 5 设置自由边界的模型

Fig. 5 Model with free boundaries

FLAC^{3D}动力计算中提供了三种阻尼形式,瑞利阻尼、局部阻尼和滞后阻尼^[14]。本文采取在模拟中较符合实际的瑞利阻尼进行计算。确定瑞利阻尼需要两个参数:最小临界阻尼比和最小中心频率,对于岩土材料来说,临界阻尼比一般为 0.02~0.05^[13]。最小中心频率取地震波的卓越频率 3.3 Hz,两个参数分别为 0.05、3.3。

3 结果分析

3.1 静力结果分析

通过对各个工况的结果(位移、塑性区和剪切应变增量云图(篇幅原因不在列出))分析可得,开挖主要是对开挖面一定范围内有影响,且主要是由于回弹变形所引起的位移,对稳定性影响不大。

图6为坡面测点按施工顺序的水平向位移时步曲线,可以看出,每次开挖后,基本上都有向着坡内弹性回弹的负位移产生,随着开挖深度增加,坡体负位移增加量逐渐降低,尤其是下部(第一、二和三级坡)坡面负位移增加量降低幅度较大,在第二次开挖时,增加量约有坡体上部(第四、五和六级坡)的1/2,第三次开挖时,回弹的负位移增加更少,甚至在坡脚有向下坡方向位移的趋势。在降雨时,坡面各测点均开始向下坡方向位移,且越向坡脚此趋势越明显。

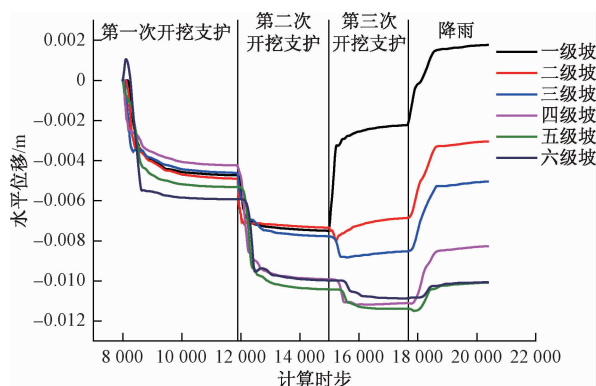


图6 各测点水平向位移的时步曲线

Fig.6 Time step curve of horizontal displacement

表5为每个工况下相对于上个工况的水平负位移增加率,则负值表示向下坡方向的正位移增加量。可以看出每次开挖坡体中部第三、四级坡为负位移增加率即弹性回弹最大的部位。在开挖支护完成(第三次开挖支护)后,下滑的趋势从坡脚最先开始,在降雨后陡增并逐渐向上部迁移,增加率逐渐降低。

表5 负位移增加率

Table 5 Negative displacement increase rate

	第二次开挖支护	第三次开挖支护	降雨
一级坡	58.6%	-70.3%	-179.4%
二级坡	50.0%	-6.7%	-55.5%
三级坡	68.8%	9.5%	-40.8%
四级坡	134.0%	12.0%	-25.6%
五级坡	95.9%	9.3%	-11.4%
六级坡	68.6%	8.9%	-7.4%

3.2 地震作用下结果分析

3.2.1 剪应变分析

在坡体中剪应变增量较大的部位,是土体受剪切破坏最严重的部位,在不利条件下可能沿着这一剪切带发生失稳破坏。

图7为地震作用下的剪应变增量云图,可以看出在天然工况下,剪应变增量最大值为 1.9158×10^{-2} ,剪切带在顶部没有贯通,形成坡中和坡脚两个剪出口,而在降雨工况下,剪应变增量最大值增大一倍,剪切带贯通,从一级坡平台剪出。可以认为在自然工况下,坡体整体强度较高,在地震作用下会在坡中部产生局部剪出口,倾泄地震动能,有利于坡体保持整体稳定性。而在降雨工况下,土中剪应变在剪切带迅速增加,继而形成贯通滑带,产生类似于滑溃型的地震失稳模式^[15]。

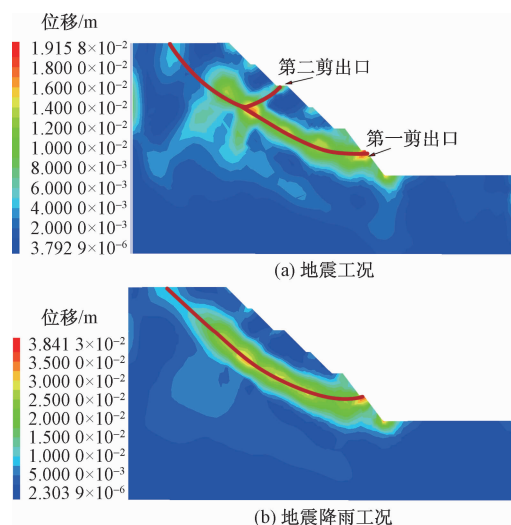


图7 地震作用下剪应变增量云图

Fig.7 Incremental shear strain nephogram under earthquake

3.2.2 位移响应

在地震作用下,主要分析可以表征坡体稳定的水平XX向位移,图8为两种工况下的水平向位移云图,在两种工况下,位移变化规律相似:在坡顶位移量较小且方向平行于坡面,到坡体中下部坡体位移逐渐增加至最大且呈抛出状,到坡脚时又开始收敛,方向逐渐平行于坡面。主要不同体现在降雨工况下的位移迅速增加,最大值为自然工况下的2倍,达到42 cm。

图4为一级坡降雨工况下的位移和输入波时程曲线,其他点在地震作用下变化规律相似,只是大小有所差异,故取次点加以说明。可以看出,位移是由加速度幅值较大的地震波引起的,且最大位移波动滞后最大

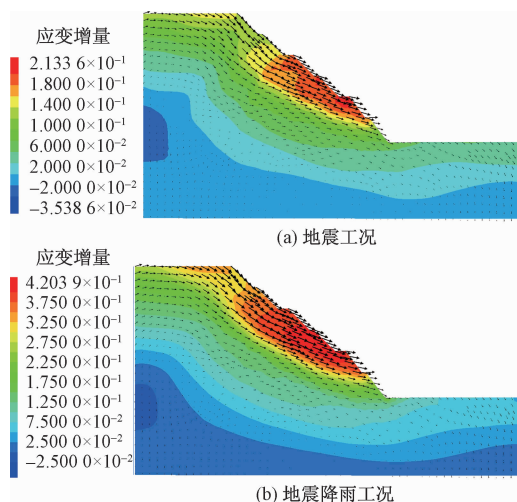


图 8 地震作用下水平向位移云图

Fig. 8 Horizontal displacement cloud map under earthquake

加速度幅值 $T = 1.387$ s, 在此之后, 在较小振幅下引起了比最大振幅所引起的更大的位移。

图 9 为各测点在动力计算过程中的最大值, 图中百分比为各坡面测点水平位移峰值在降雨工况下较自然工况下的增加率, 可以看出在两种工况下, 均为中部坡体位移最大, 在降雨工况下, 越往坡体上部, 位移增加率越大: 从一级坡的 102.6% 到六级坡的 154.8%, 最大位移也从自然工况的二级坡最大到降雨工况上移至三级坡。

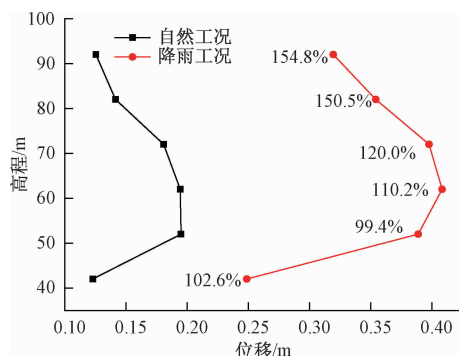


图 9 地震作用下坡面最大位移

Fig. 9 Maximum displacement at slope surface under earthquake

3.2.3 加速度响应

图 10 为坡面 (P)、一纵 (Z1) 和二纵 (Z2) 测点在两种工况下沿高程的加速度峰值曲线。P 测点在两个工况下, 除了坡顶均沿高程整体呈减小趋势。Z1 测点在高程为 55 m 的中部开始降低, 总体呈“V”字型。在 Z2 测点, 沿高程增加方向虽有小幅波动, 但整体呈沿高程增加的趋势, 且两种工况的不同在坡内不明显, 到

坡顶逐渐变得清晰。分析可得在地震中, 离开挖面越近, 两种工况在加速度相应中差别越大, 即受降雨影响越大。与位移图 8 对比, 发现位移较大部分的加速度相应会降低, 越往位移小的坡体内部 (Z2) 沿高程放大越明显, 降雨的影响越小。其原因可能是土体内部裂缝增加, 土体刚度降低, 阻尼增加, 从而导致其加速度响应降低。

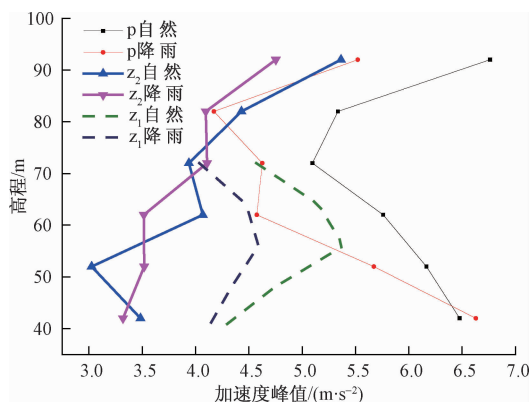


图 10 各个断面加速度响应

Fig. 10 Acceleration response on each cross-section

4 结论

通过本次对碎石土深路堑高边坡的静力合理的开挖支护和地震动力的数值模拟, 主要对比自然工况和降雨工况下的剪应变、位移和加速度响应的不同, 得出如下结论。

(1) 在静力开挖支护阶段, 开挖主要影响范围为开挖面附近的土体, 位移主要为回弹变形, 随着开挖深度的增加, 回弹位移增加变缓。向下坡方向的位移趋势从坡脚开始产生, 在降雨工况下所有点均产生向下坡方向位移。

(2) 地震作用下, 自然工况下坡体会产生多条剪切带倾斜能量, 而降雨工况下产生坡顶到坡脚的贯通剪切带, 成整体失稳趋势。

(3) 输入地震波峰值及其在此点的位移响应存在时间差, 且位移也不是位移最大值。降雨会使位移较自然工况下几乎成倍增加, 对上部坡体位移影响较大。

(4) 在地震中下坡方向的水平位移越大, 其加速度响应越有降低的趋势, 降雨对开挖面较近的测点 (P、Z1) 影响显著, 而对坡体内部 (Z2) 的加速度相应影响不明显。

参考文献:

- [1] 郑颖人, 叶海林, 黄润秋. 地震边坡破坏机制及其破

- 裂面的分析探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(08): 1714 - 1723. [ZHENG Y R, YE H L, HUANG R Q. Analysis of the failure mechanism of earthquake slope and its fracture surface[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(8): 1714 - 1723. (in Chinese)]
- [2] ZHU W, LI S. Optimizing the construction sequence of a series of underground openings using dynamic construction mechanics and a rock mass fracture damage model [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37(3): 517 - 523.
- [3] 朱维申, 何满潮. 复杂条件下围岩稳定性与岩体动态施工力学[M]. 北京: 科学出版社, 1995. [ZHU W S, HE M C. Stability of surrounding rock and dynamic construction mechanics of rock mass under complex conditions [M]. Beijing: Science Press, 1995. (in Chinese)]
- [4] 姚裕春. 边坡开挖工程活动对环境影响研究[D]. 西南交通大学, 2005. [YAO Y C. Study on environmental impact of slope excavation engineering activities [D]. Southwest Jiaotong University, 2005. (in Chinese)]
- [5] 夏熙伦, 周火明, 盛谦, 等. 三峡工程船闸高边坡岩体松动区及其性状[J]. 长江科学院院报, 1999, 16(4): 2 - 6. [XIA X L, ZHOU H M, SHENG Q, et al. Rock mass loose zone and its traits in the high slope of the ship lock of the Three Gorges Project[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1999, 16(4): 2 - 6. (in Chinese)]
- [6] 赵尚毅, 郑颖人, 唐树名. 路堑边坡施工顺序对边坡稳定性影响数值模拟分析[J]. 地下空间, 2003, 23(4): 370 - 374. [ZHAO S Y, ZHENG Y R, TANG S M. Numerical simulation analysis of influence of construction sequence of cut slope on slope stability [J]. Underground Space, 2003, 23(4): 370 - 374. (in Chinese)]
- [7] 肖春龙. 超高边坡开挖支护的 FLAC ~ (3D) 分析[J]. 路基工程, 2007(1): 72 - 73. [XIAO C L. FLAC ~ (3D) analysis of excavation support of super high slope[J]. Subgrade Engineering, 2007(1): 72 - 73. (in Chinese)]
- [8] 王章琼, 江志红. 开挖条件下含陡倾结构面顺层岩质边坡破坏模式与稳定性预测[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(1): 40 - 45. [WANG Z Q, JIANG Z H. Failure mode and stability prediction of bedding rock slope with steep structural plane under excavation condition [J]. Chinese Journal of geological disasters and prevention, 2018, 29(1): 40 - 45. (in Chinese)]
- [9] 曾芮, 姜明顺, 孙琳旭, 等. 强降雨条件下岩质边坡倾倒塌破坏机理——以鄂西赵家岩崩塌为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(3): 12 - 17. [ZENG R, JIANG M S, SUN L K, et al. Collapse mechanism of rock slope under heavy rainfall—Taking Zhaojia rock collapse in Western Hubei as an example [J]. Chinese Journal of Geological Disasters and Prevention, 2018, 29(3): 12 - 17. (in Chinese)]
- [10] KUHLEMEYER R L, LYSMER J. Finite element method accuracy for wave propagation problems[J]. Journal of Soil Mechanics & Foundations Division, 1973, 99(5): 421 - 427.
- [11] 赵党锋, 刘华武, 樊晓辉. 玄武岩纤维的性能及其制品在土木工程领域的应用[J]. 产业用纺织品, 2010, 28(8): 39 - 44. [ZHAO D F, LIU H W, FAN X H. Performance of basalt fiber and its application in civil engineering [J]. Industrial Textiles, 2010, 28(8): 39 - 44. (in Chinese)]
- [12] 李国维, 刘朝权, 黄志怀. 应用玻璃纤维锚杆加固公路边坡现场试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊2): 4056 - 4062. [LI G W, LIU C Q, HUANG Z H. Field test of roadside slope reinforced with glass fiber anchors [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S2): 4056 - 4062. (in Chinese)]
- [13] 陈育明, 徐鼎平. FLAC/FLAC3D 基础与工程实例[M]. 第2版. 北京: 中国水利水电出版社, 2013. [CHEN Y M, XU D P. FLAC/FLAC3D Foundation and Engineering Examples [M]. 2nd Edition. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2013. (in Chinese)]
- [14] Itasca Consulting Group Inc. FLAC 3D (fast Lagrangian analysis of continua in 3D) users manual version 3.0. [M]. Minneapolis: Itasca Consulting Group Inc, 2005.
- [15] 黄润秋. 汶川 8.0 级地震触发崩滑灾害机制及其地质力学模式[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6): 1239 - 1249. [HUANG R Q. Mechanism of earthquake-induced collapse and its geomechanical model induced by Wenchuan M8.0 earthquake[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(6): 1239 - 1249. (in Chinese)]