

降雨和地震作用下碎石土边坡稳定性及支护方式研究

陶连金, 任志国, 边金, 许淇

北京工业大学建筑工程学院, 北京 100124

摘要 依托四川省汶川至九寨沟段高速公路第06标段(川主寺至九寨沟段)边坡工程,采用FLAC软件模拟,考虑降雨与地震作用,以水平位移、塑性区和滑移面为边坡失稳评价指标,研究了高海拔、高烈度地区碎石土边坡在降雨及降雨-地震共同作用这两种工况下支护前后的稳定性,提出了合理的支护方案。结果表明:强降雨导致的边坡浅层面溜滑主要发生在黏土与碎石土交界面处,滑动面为平面型,采用锚杆框架梁支护可保证边坡稳定;降雨-地震共同作用下边坡的破坏范围扩大,碎石土边坡沿土体内约12 m深处出现圆弧型滑动面,主要发生在黏土与碎石土交界面处,采用复合抗滑桩和锚杆框架梁组合支护方式可以保证边坡稳定。

关键词 碎石土边坡;降雨入渗;地震作用;稳定性;FLAC软件

边坡稳定性问题一直受到学术界的关注。影响边坡稳定的因素较多,地下水是其失稳的重要因素之一,地震是其失稳的偶然因素,破坏性较强,例如2008年5·12汶川地震诱发了大量的滑坡和堰塞湖等次生灾害,其中仅大型、特大型滑坡就达数百处,形成了严重的人员伤亡和财产损失。大多数滑坡发生在震后,如果地震发生时正值雨季,则滑坡的数量将大大增加。5·12汶川地震灾区降雨较为充沛,在地震的有效持续影响时间内,降雨入渗和地震的共同作用加剧了边坡的失稳。

目前,降雨对边坡影响的主要研究包括:唐朝晖等^[1]指出,随着降雨强度和时间的增加,滑坡位移量增大,变形由地表向深部、由前缘向后缘发展的趋势明显增加;贾官伟等^[2-3]指出,在地下水位一定时,边坡最大水平位移沿边坡高度方向呈增加趋势,宋波等指出,降雨时不同性质的土含水率均增大,含水率越大的碎石土,地震对其边坡稳定性的影响越严重^[4-5];梅涛等^[6]齐云龙等^[7]指出,当降雨与地震共同作用时,边坡的稳定性较降雨或地震单独作用时要低,边坡会产生较深的滑动面,而预应力锚索结构能够更有效地控制边坡病害的深层发展^[8],达到支护边坡的作用。

由于高海拔、高烈度地区碎石土边坡在降雨和地震共同作用下的破坏模式研究尚不充分,且在这种工况下边坡失稳后易发生损伤严重的特大滑坡或泥石流灾害,因此,本文采

用有限差分软件FLAC来探究碎石土边坡在降雨以及降雨-地震共同作用下高边坡的破坏机理,选择适用于高海拔、高烈度地区高边坡的支护方式,采用数值模拟验证其合理性。

1 工程背景

本工程由碎石土层和黏土层交互组成,在四川藏区此类边坡具有一定的代表性。所在地地质构造复杂,水系发达,位于高烈度地震区,公路的四川盆地海拔600多米,藏区段海拔4000多米,具有海拔快速攀升、坡度较陡的特点;该地区气候多变,降雨频繁,日温差较大,存在冬季冰雪。因此,工程所处环境敏感脆弱,地震、降雨对边坡的稳定性影响显著。

1.1 工程概况

四川省汶川至九寨沟段高速公路第06标段(川主寺至九寨沟段)边坡工程,位于四川盆地与青藏高原东南缘的过渡地带,多数路段一侧为高山,另一侧为深沟河流,地面海拔4000~4500 m。基本地形为两山夹一沟的格局,道路横坡较陡,空间狭窄。场地岩体破碎,山前及山谷的土石混合料堆体稳定性差,施工等扰动容易使边坡失去稳定性。边坡概貌如图1所示。

1.2 地层岩性

据地质调查及钻孔揭示,边坡由上至下地层岩性如下:
1) 软塑状粉质黏土(Q₄^{el}):黑褐色,软塑,土质较均一,含少量

收稿日期:2016-12-31;修回日期:2017-04-18

基金项目:国家自然科学基金项目(41572276)

作者简介:陶连金,教授,研究方向为岩土工程与地下工程,电子信箱:ljtiao@bjut.edu.cn

引用格式:陶连金,任志国,边金,等.降雨和地震作用下碎石土边坡稳定性及支护方式研究[J].科技导报,2017,35(15):77-83;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2017.15.011



图1 碎石土边坡滑坡全貌

Fig. 1 Landslide panorama of gravel soil slope

植物根系;2) 稍密状碎石土(Q_4^{sd}):黄褐色,稍密,稍湿,碎石约占60%,粒径为2~7 cm,石质为砂岩,板岩,其余为砾砂及黏土充填;3) 硬塑状粉质黏土(Q_4^{sh}):褐黄色、青灰色,硬塑,土质较均一;4) 中密状碎石土(Q_4^{md}):黄褐色,中密,潮湿,碎石约占55%,粒径为2~8 cm,石质为石英,板岩,其余为砾砂及黏土充填;5) 硬塑状粉质黏土(Q_4^{sh}):褐黄色、青灰色,硬塑,土质较均一;6) 三叠系石英砂岩、板岩(T_3^d)。典型路堑边坡的地质横剖面图,如图2所示。

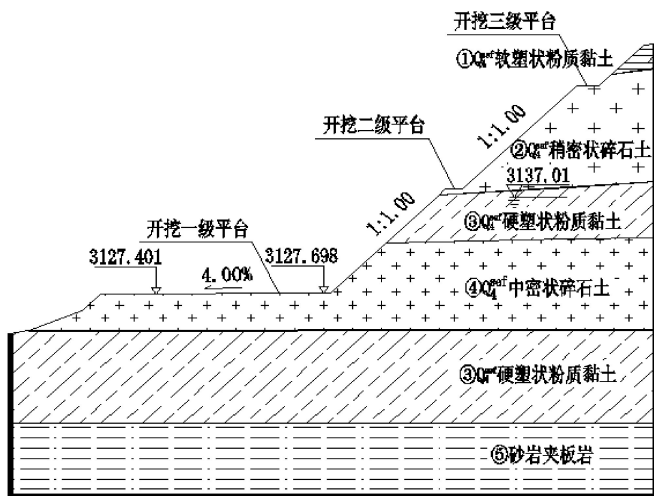


图2 地质横剖面

Fig. 2 Geological cross section

1.3 地震效应

该边坡处于汶川地震的强震区或特强震区,根据《GB 50011—2010 建筑抗震设计规范》,场地的抗震设防烈度为8°,设计地震分组为第二组,设计基本地震动峰值加速度为0.20g;场地类别划分为II类;设计特征周期为0.40 s。

1.4 水位地质条件

根据2010年统计数据,该地区降水主要集中在5—10月,约占全年的86%,全年有1~2天的最大日降雨量达到

100 mm以上,年平均降雨量为552.9 mm。山区内河谷切割深,地形陡峭,各水系分布受构造控制明显,次级支流发育,大多为树枝状展布。研究区地下水类型主要有松散堆积层孔隙水、基岩裂隙水及碳酸盐岩裂隙岩溶水。

2 碎石土的力学特性

碎石土是指粒径大于2 mm的干土颗粒超过全重50%的土,是由颗粒比较小的细粒土和颗粒比较大的碎石组成的非均质土。碎石土是一种较为特殊的土体,其力学性质与其碎石成分与细粒土成分的质量比例、胶结形式、粒径大小、密实程度及含水量等因素密切相关,因此其剪切强度参数变化及影响因素相较一般土体和岩石更为复杂。

一般材料受到破坏时,当外荷载引起的剪应力超过其抗剪强度极限值时,材料随即破坏,伴随破坏过程的发生,材料也失去了抵抗外荷载的能力,即抗剪强度降低到较低的水平甚至为0,但碎石土的抗剪强度规律与此有所不同。

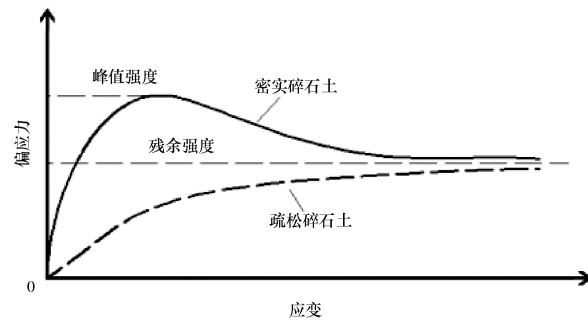


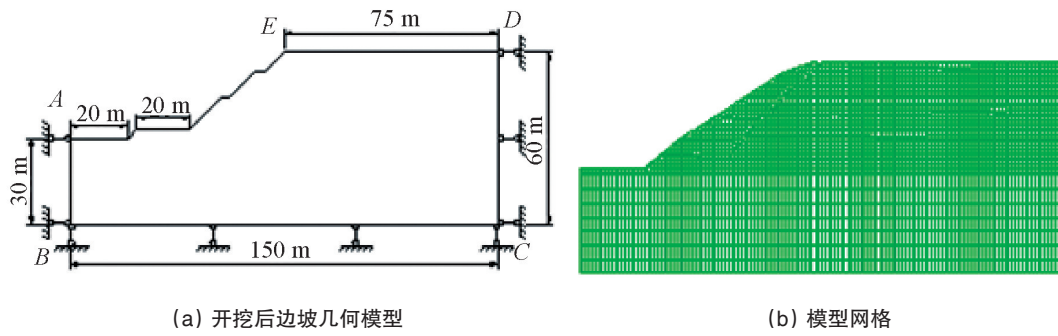
图3 碎石土应力-应变曲线

Fig. 3 Gravel soil stress-strain curve

由图3可知,密实的碎石土应力-应变曲线存在峰值强度,达到峰值强度后随着应变的增加,应力逐渐减小并趋于稳定,此时的强度称为残余强度。疏松的碎石土应力-应变曲线不存在峰值强度,应力随着应变的增加而增加,最后趋于稳定,且仍然具有相对较高的残余强度。所以无论碎石土密实度如何,在发生剪切破坏后仍然具备一定的抵抗外荷载能力,且两种情况下的残余强度趋于同一应力水平,稍密和中密碎石土的抗剪强度相差不大。

3 边坡数值建模

本文选取碎石土边坡的典型路堑断面为研究对象,坡长约40 m,设计高度60 m,坡度45°,模型整体宽150 m。土层以碎石土层与黏土层相间分布。水位随季节变化而变化,一般在10 m以上。为减小边界上反射波的影响,通常取边坡深度的4~10倍模型范围作为计算区域,本文计算模型取边坡高度的5倍。模型底部假定为固定边界,左右边界假定为滑移边界。模型开挖后几何模型及模型网格如图4所示,各土层物理力学参数见表1。



(a) 开挖后边坡几何模型

(b) 模型网格

图4 边坡计算模型

Fig. 4 Slope calculation model

表1 土层物理力学参数

Table1 Physical and mechanical parameters of soil

土层性质	土层厚度/m	天然密度/(g·cm ⁻³)	黏聚力/kPa	摩擦角/(°)	体积模量/MPa	剪切模量/MPa
软塑性黏土	2	1.90	20.0	12	12.0	3.7
稍密碎石土	12	2.05	3.0	30	2.5	1.2
硬塑性黏土	7	2.00	50.0	18	38.5	11.0
中密碎石土	10	2.15	5.5	40	41.5	19.0
硬塑性黏土	19	2.00	70.0	20	57.5	16.0

4 降雨和地震作用下碎石土边坡的破坏模式

工程项目所处地区地下水较发育,降雨入渗及地下水位的抬升对边坡破坏有较大的影响。以地质勘测资料确定的稳定水位 12.5 m 为依据,设置地下水范围为第二层稍密状碎石土中。

4.1 降雨入渗坡面范围

4.1.1 边界条件

1) 位移边界。模型两侧边界施加水平方向约束,底部采用刚性边界,上部采用自由边界。

2) 渗流边界。模型底边界设为不透水边界,将上部边界设置为可渗透边界。

4.1.2 降雨入渗影响范围

土体力学参数不变,初始饱和度设为 0.3,入渗速率 1.157×10^{-6} m/s。采用最大日降雨量 104 mm、降雨持续 2 d 以确定入渗时间。通过模拟降雨入渗过程,根据饱和度云图,找出湿润锋位置,确定降雨影响范围。由图 5 得知,降雨入渗影响范围约为 3 m。

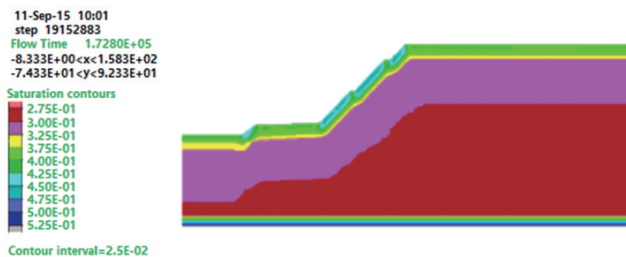


图5 降雨入渗饱和度云图

Fig. 5 Cloud of rainfall infiltration and saturation

4.2 降雨作用下碎石土边坡的破坏模式

此地区夏季降雨频繁,强降雨容易诱发滑坡、泥石流等灾害。本章依据具体工程实例,采用本地区最大降雨工况进行数值模拟,分析降雨影响下边坡的位移场、塑性区及剪应变增量的变化规律,从而判断碎石土边坡在降雨条件下的破坏机理。

计算边坡为黏土与碎石土互层。由于黏土层透水性差,假设为不透水层;碎石土自身具有良好的透水性,假设为透水层。其渗流场如图 6 所示,在降雨工况下边坡的 x 方向位移如图 7 所示。

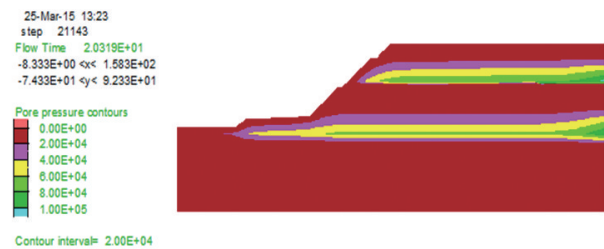


图6 边坡渗流场

Fig. 6 Slope seepage field

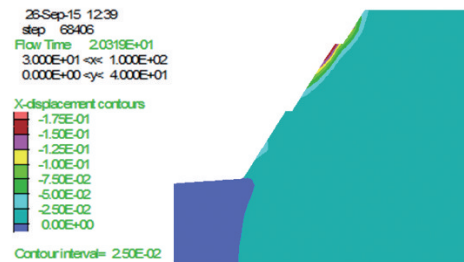


图7 降雨作用下边坡 x 向位移图

Fig. 7 x direction displacement contours of slope under rainfall

由图6可知,地下水主要在稍密和中密碎石土层中,渗透范围约10 m。由图7可知,降雨入渗和地下水位抬升工况下,引起坡面的水平向最大位移为17.5 cm。位移最大值集中在碎石土二级边坡顶部,且碎石土坡体的位移在整体上由此向上、向下逐渐减小,滑动范围从二级平台至边坡坡顶处,滑体大约3 m深,滑动面位于软塑性黏土层和稍密碎石土层接触面。

在持续降雨期,边坡饱和度高,降雨能直接补给地下水,使得地下水位抬升,土体内含水量增加,导致黏聚力、内摩擦角降低,从而降低了土体的抗剪强度,且在不同土层交互界面最容易发生破坏。

因此,按往年最大降雨量工况计算,边坡整体将发生小范围的滑坡。由于边坡上层黏土透水性差,降雨入渗作用缓慢,当雨季来临时,在强降雨的冲刷下,土体的含水率逐渐增大,软塑性黏土很快进入可塑状态,黏聚力降低,抗剪强度减小,导致在边坡的黏土层和碎石土层交界面处发生小范围的溜滑。

4.3 降雨和地震共同作用下碎石土边坡的破坏模式

工程项目所在地区属于强地震区,抗震设防烈度为Ⅷ,模型底部输入横向和纵向地震波,峰值加速度 $0.07g$ 。计算后,监测到的地面峰值加速度为 $0.20g$,坡顶峰值加速度 $0.40g$,所以边坡加速度峰值被放大,如图8所示;在降雨和地震共同作用下边坡的 x 方向位移如图9所示。

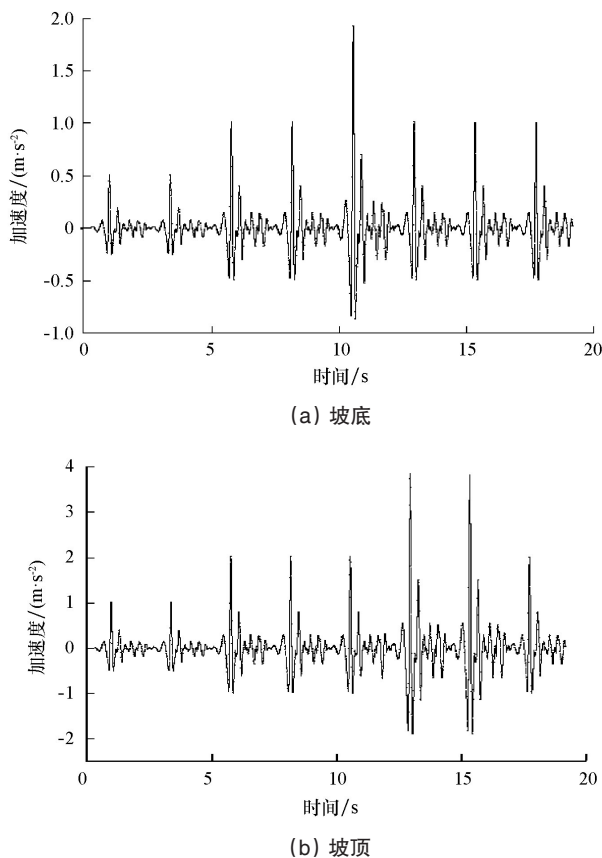


图8 加速度时程曲线

Fig. 8 Acceleration time history curve

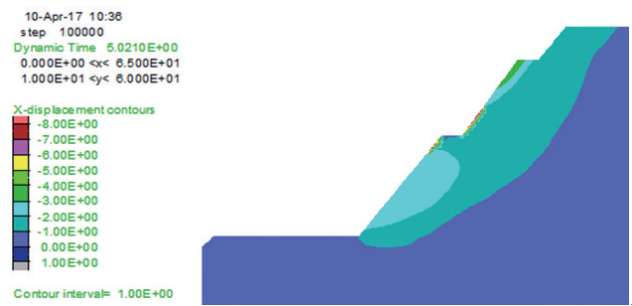


图9 降雨和地震共同作用下x向的位移

Fig. 9 x direction displacement contours of slope under rainfall and seismic interaction

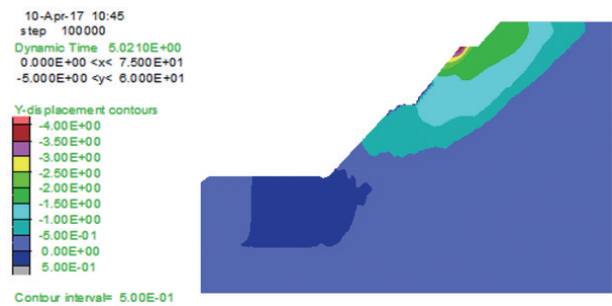


图10 降雨-地震共同作用下y向的位移

Fig. 10 y-disp contours of slope under rainfall and seismic interaction

由图9和图10可知,在降雨和地震共同作用下,碎石土边坡沿土体内部出现较深的圆弧型滑动面,土层滑动深度为12~15 m,水平和竖直方向的位移很大,边坡完全破坏,滑动面主要处于稍密碎石土和硬塑性黏土交界面处。

由图8~10可知,在降雨基础上,地震作用由坡底到坡顶被放大2倍,对松散碎石土边坡的影响更加明显,地震水平加速度越大,碎石土边坡稳定性越低,地震作用改变了碎石土的密实度,导致边坡的纵向位移也加大,易发生次级滑坡。

降雨和地震共同作用下边坡的滑动深度比降雨单独作用下大很多,但共同规律是碎石土边坡破坏主要发生在不同土层交界面处,所以在边坡支护时,此处为重点加固部位。

5 边坡支护方式

本文选取锚杆框架梁和复合抗滑桩支护方式,基于莫尔-库仑(Mohr-Coulomb)屈服准则,利用FLAC对边坡稳定性进行数值模拟分析,依分析结果判定初步方案是否可行。

5.1 边坡加固几何模型

根据工程支护方案,对滑后边坡建模,降雨工况下采用锚杆框架梁支护,降雨和地震共同作用下采用复合抗滑桩和锚杆框架梁支护。边坡支护几何模型图见图11。

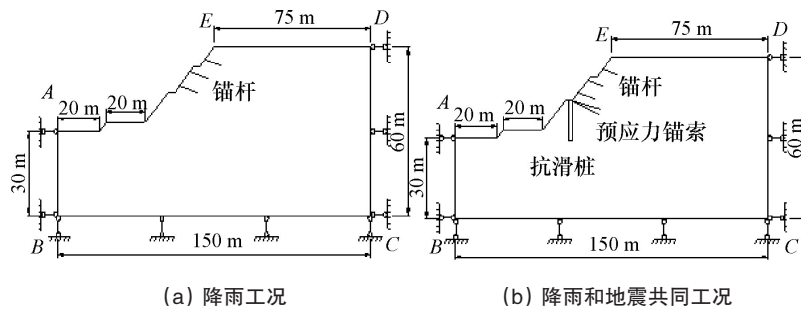


图 11 边坡支护几何模型

Fig. 11 Slope Supporting geometry

5.2 计算参数的选取

依据工程地质资料,抗滑桩-土体物理力学参数见表2,预应力锚索力学参数见表3,锚杆力学参数见表4。

表 2 抗滑桩-土体物理力学参数
Table 2 Anti-slide pile-soil physical and mechanical parameters

截面/ (m×m)	天然密度/ (g·cm ⁻³)	黏聚力/kPa	摩擦角/ (°)	弹性模量/ MPa
2×3	2.35	1×10 ⁴	40	2.8×10 ⁴
泊松比	间距/m	长度/m	承载力/ (kN·m)	
2	5	14	23724	

表 3 预应力锚索力学参数
Table 3 Mechanical parameters of prestressed anchor

横截面面积/ (m×m)	周长/ m	天然密度/ (g·cm ⁻³)	摩擦角/ (°)
1.4×10 ⁻⁴	0.14	7.85	40
弹性模量/ MPa	强度设计值/ kN	预应力/ kN	间距/ m
1.8×10 ⁵	775	400	5

表 4 锚杆力学参数
Table 4 Mechanical parameters of anchor

半径/m	周长/ m	天然密度/ (g·cm ⁻³)	摩擦角/ (°)
0.016	0.14	7.85	40
弹性模量/ MPa	强度设计值/ kN	间距/ m	
2.1×10 ⁵	775	4	

5.3 设计原则与技术要求

1) 设计方案以确保边坡稳定为基础,根据滑坡场地现状地形图范围而制定,体现技术先进、经济合理、生态防护的理念。

2) 边坡至上而下分三级开挖,边开挖边支护。为了避免路基开挖对斜坡的扰动,设计在挖方坡脚设锚拉抗滑桩,桩间挂挡土板。抗滑桩顶采用1:0.75放坡,其边坡采用锚杆框架梁加固。

3) 预应力锚索设置方案:(1) 10 m≤悬臂段<15 m,在桩顶设2根6Φ15.2锚索;(2) 15 m≤悬臂段≤18 m,除在桩顶设2根6Φ15.2锚索外,另在桩腰设1根6Φ15.2锚索;(3) 虽然悬臂段<10 m,但是嵌固段岩性松散且襟边宽度薄弱的,也可适当的在桩顶设置2根6Φ15.2锚索,每根锚索的设计拉力775 kN,实际张拉至设计拉力的50%~70%,按400 kN锁定;(4) 抗滑桩采用人工挖孔,现浇C25钢筋混凝土,桩长<28 m的,桩身截面采用2.0 m×3.0 m;桩长≥28 m的,桩身截面采用2.5 m×3.5 m。

4) 锚杆设置原则:(1) 挂网喷射砼防护适用于易风化碎落的粉砂质泥岩、页岩,砂岩等强风化岩体坡面防护;(2) 铁丝网采用锚杆固定,锚杆分卡(5 m)短(2 m)两种规格交替间隔布置;(3) 铁丝网采用2.5 mm普通镀锌铁丝编织在6.5 mm的圆钢框条架上,框条尺寸2 m×2 m。

5.4 边坡支护后稳定性分析

结合上述设计方案,对支护后的边坡进行数值模拟并分析其稳定性。降雨工况下支护后边坡x向位移见图12。

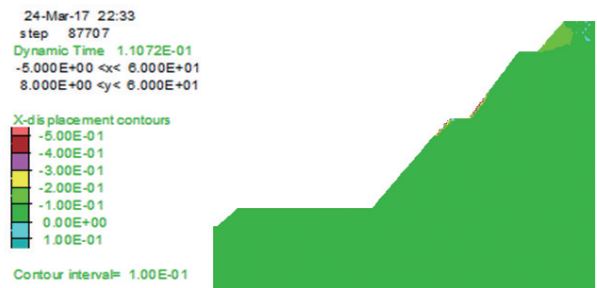


图 12 降雨工况下支护后 x 向的位移图

Fig. 12 x-disp after support under rainfall

由图12可知,经锚杆支护后坡面浅层滑动面消失,在坡顶未支护区有小范围溜滑,水平位移约为10 cm,证明设置的锚杆发挥作用,阻止了边坡的滑动,整体处于稳定状态。因此,降雨作用下碎石土边坡表面发生小范围的溜滑,锚杆框

架梁支护即可保证边坡的稳定性。

降雨和地震共同作用下边坡支护后 x 向位移见图 13。

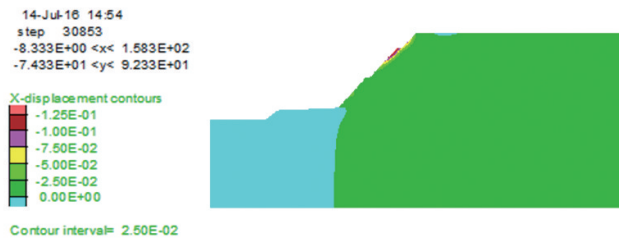


图 13 降雨地震工况下支护后 x 向位移图

Fig. 13 x -disp after support under rainfall and seismic interaction

由图 13 可知,边坡原有的深层滑动面消失,说明复合抗滑桩支护有效,阻止了边坡整体滑动。边坡表层有浅层滑动面出现,主要集中在第二台阶处,水平最大位移 7.5 cm;可通过破面防护措施,采用天然或人工植被,以保证景观效果,保证边坡排水畅通,达到边坡整体稳定的效果。所以复合抗滑桩和锚杆框架梁组合支护方式能有效的阻止边坡在降雨和地震共同作用下的整体滑动。

框架梁弯矩最大值出现在第三根锚杆周围,最大值为 268 kN·m,锚杆轴力最大值为 247 kN,预应力锚索最大拉力值为 774 kN,抗滑桩最大弯矩值为 20500 kN·m 小于计算所得的最大承载弯矩 23724 kN·m,符合设计值要求。在降雨和地震共同作用下,边坡支护后,框架梁的弯矩、锚杆轴力、预应力锚索拉力,抗滑桩弯矩如图 14~图 16 所示。

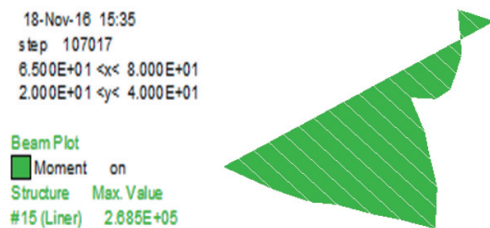


图 14 框架梁弯矩图

Fig. 14 Lattice Beam moment

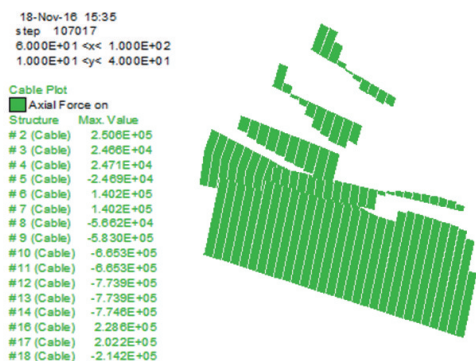


图 15 锚杆、锚索轴力图

Fig. 15 Cable and Prestressed anchor axle

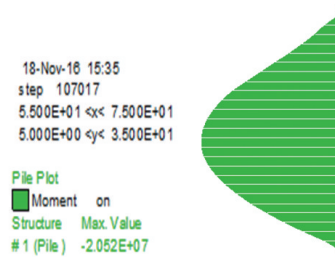


图 16 抗滑桩弯矩图

Fig. 16 Anti-slide Pile Moment

由图 14~图 16 可知,第三根锚杆处的格构梁弯矩远大于第一、二根,同样第三根锚杆承受的拉力大于第一、二根,验证了在降雨和地震共同作用下第二级边坡易发生破坏。预应力锚索承受的拉力较大,有效地限制了抗滑桩的倾斜,抗滑桩承载力也发挥得较充分。

通过数值模拟验证,本工程在降雨条件下,锚杆框架梁支护方式有效的限制了碎石土边坡的浅层滑动;在降雨和地震共同作用下,复合抗滑桩和锚杆框架梁组合支护方式能保证边坡稳定,证明提出的组合支护方式有效。

6 结论

以四川省汶川至九寨沟段高速公路第 06 标段(川主寺至九寨沟段)边坡为工程背景,运用 FLAC 对其进行数值模拟分析,得到如下主要结论。

- 1) 本工程的碎石土边坡为碎石土和黏土相间分布,不同条件下的破坏主要发在碎石土和黏土交互层处。
- 2) 降雨对边坡的整体稳定性影响不大,但随着降雨的增加,坡体碎石土的胶结物被雨水带走,表层土体的黏聚力和内摩擦角都会减小,坡体上会发生小范围的溜滑,破坏主要发生在第二级边坡。
- 3) 在降雨和地震共同作用下,碎石土层受到地震作用,密度改变,水平位移和竖向位移都增加较大,边坡的滑塌范围继续扩大,边坡出现较深的滑动面,边坡完全被破坏,可见降雨和地震共同作用对边坡的破坏程度远大于单独降雨。
- 4) 在降雨作用下,锚杆框架梁支护对该地区边坡的稳定性控制效果明显;破坏区下方锚杆受力较大,为重点加固部位。在降雨和地震共同作用下,提出了高海拔、高烈度地区复合抗滑桩和锚杆框架梁组合支护方式对边坡稳定性有较好的作用,破面防护尽量采用天然或人工植被,以保证景观效果且保证边坡排水通畅。

参考文献 (References)

- [1] 唐朝晖, 孔涛, 柴波. 降雨作用碎石土堆积层滑坡变形规律[J]. 地质科技情报, 2012, 31(6): 168-173.
Tang Zhaohui, Kong Tao, Chai Bo. Effect of rainfall on deformation regularity of debris landslide[J]. Geological Science and Technology Information, 2012, 31(6): 168-173.
- [2] 贾官伟, 詹良通, 陈云敏. 水位骤降对边坡稳定性影响的模型试验研

- 究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(9): 1798-1803.
Jia Guanwei, Zhan Liangtong, Chen Yunmin. Model test study of slope instability induced by rapid drawdown of water level[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(9): 1798-1803.
- [3] 赵炼恒, 罗强, 李亮, 等. 地下水位变化对边坡稳定性影响的上限分析[J]. 公路交通科技, 2010, 2(7): 1-4.
Zhao Lianheng, Luo Qiang, Li Liang, et al. Analysis of upper bound of slope stability considering ground water level fluctuations[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 2(7): 1-4.
- [4] 宋波, 黄帅, 蔡德钧, 等. 地震和地下水耦合作用下砂土边坡稳定性研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊2): 862-868.
Song Bo, Huang Shuai, Cai Degou, et al. Stability of sandy soil slope under the coupling of earthquake and groundwater[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(Suppl 2): 862-868.
- [5] 李晓莲, 余云燕, 陈志敏. 降雨与地震共同作用下碎石土边坡的稳定性分析[J]. 施工技术, 2015, 44(13): 64-71, 101.
Li Xiaolian, Yu Yunyan, Chen Zhimin. Analysis on gravel slope stability during rainfall and earthquake[J]. Construction Technology, 2015, 44(13): 64-71, 101.
- [6] 梅涛, 肖盛燮. 降雨-地震耦合作用下边坡的稳定性分析[J]. 交通科技与经济, 2012, 4(14): 1-3.
Mei Tao, Xiao Shengxie. Slope stability analysis under rainfall-earthquake[J]. Technology & Economy in Areas of Communications, 2012, 4(14): 1-3.
- [7] 齐云龙, 周勇, 黄栋. 地震和降雨作用下的边坡稳定性分析[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(26): 6569-6572.
Qi Yunlong, Zhou Yong, Huang Dong. Stability analysis on rainfall and seismic of slope[J]. Science Technology and Engineering, 2010, 10(26): 6569-6572.
- [8] 马杰. 边坡工程中预应力锚索格构梁综合应用研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.
Ma Jie. Reach on the application of pre-stressed anchorage cable with lattice beam in the slope project[D]. Xi'an: Chang'an University, 2009.

On gravel soil slope stability and support modes against rainfall and earthquake

TAO Lianjin, REN Zhiguo, BIAN Jin, XU Qi

School of Civil Engineering and Architecture, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract The project is rested on the Sichuan highway slope on No.6 tenders from Wenchuan to Jiuzhaigou (the Chuanzhusi to Jiuzhaigou section). Through computer simulation with FLAC software and using horizontal displacement, plastic zone and slip as the evaluation indexes of slope instability, the stability for gravel soil slope of high altitude and high intensity is studied under rains effect and rains and earthquakes combined effect, respectively. Then a reasonable support mode is put forward accordingly. The research shows that the slippery surface of the slope caused by heavy rainfall mainly occurs at the interface between clay and crushed stone, and sliding surface is flat; so anchor frame beam support can ensure the slope stability. Moreover, the damage range of the slope will expand under the combined action of rainfall and earthquake, and an arc sliding surface about 12 meters deep will appear inside the slope and in the interface of clay and gravel soil. Composite anti-slide pile and anchor frame beam combination support can ensure the slope stability.

Keywords gravel soil slope; rainfall infiltration; earthquake; stability; FLAC

(编辑 韩丹岫)