

天水市吴砦古城高边坡治理方案探讨

张小喜, 王延寿, 张伟 (甘肃省有色金属地质勘查局天水矿产勘查院, 甘肃天水 741020)

摘要 为加强吴砦古城文物古迹的保护, 同时为了确保受古城高边坡威胁的居民的安全, 针对古城东、西、北三边的高边坡稳定性进行定量分析, 经计算确定3处高边坡均处于欠稳定状态。对该高边坡的治理工程设计时, 既要设计合理以确保古城高边坡的稳定性, 同时须考虑一座古城的外在形象, 为此进行充分的探讨论证, 根据各高边坡特征和变形特征, 再结合3处高边坡的已有治理工程特征, 同时考虑古城之形象, 采用“挡土墙+锚索格构+耳墙+截排水工程”治理方案。迄今为止, 该工程已竣工一年有余, 事实证明, 该治理方案合理得当, 达到预期效果, 对今后类似工程具参考借鉴意义。

关键词 高边坡; 边坡稳定性; 边坡治理方案; 工程治理; 设计

中图分类号 TU 457 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2019)05-0210-03

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2019.05.059



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Discussion on Treatment Scheme of the High Slope of Wuzhai Ancient City in Tianshui

ZHANG Xiao-xi, WANG Yan-shou, ZHANG Wei (Tianshui Institute of Geology and Mineral Resources, Gansu Bureau of Geology and Exploration of Non-Ferrous Metals, Tianshui, Gansu 741020)

Abstract The stability of high slope in the east, west and north of the ancient city was analyzed quantitatively in order to strengthen the protection of the Wuzhai ancient relics and historic sites, and also to ensure the safety of the residents threatened by the ancient city's high slopes. It was calculated that the three high slopes were unstable. When we discussed the countermeasures design for the high slope, we demanded not only a reasonable design in order to ensure the stability of high slope, but also an ancient city image. Therefore, the fully argument were explored according to the characteristics and deformation characteristics of the high slope, and combined with the every existing engineering feature of high slope, considering an ancient city image at the same time. At last, the countermeasures "retaining wall, anchor lattice, ear wall, and drainage works" were adopted. So far, the project has been completed for more than a year, and it has been proved that the countermeasures is reasonable and effective, and it can be used for reference for similar projects in the future.

Key words High slope; Slope stability; Slope countermeasures; Engineering governance; Design

实践证明, 容易发生变形破坏和滑坡的边坡多为高边坡, 因此高边坡是研究与防治的重点^[1]。一般将高度大于30 m的岩质边坡和大于20 m的土质边坡称为高边坡^[2]。高边坡稳定性问题涉及铁路工程、公路工程、矿山工程、地灾工程、水利工程、建筑工程等诸多工程领域。高边坡的变形失稳, 致使村镇、铁路、公路和文化遗产等被掩埋, 造成人民财产损失等事件频频发生, 其稳定性取决于当地坡体的地质条件和人为改造程度, 而这是由我国独特的地形地质条件和作为一个发展中国家所面临的大规模工程建设所决定的^[3]。吴砦古城高边坡是由其独特的地形地质条件决定的, 地处渭河IV级阶地, 三面临河, 可用“一座悬崖上的抗金古城”来形容; 同时亦是由于人类工程活动较强烈而形成的, 即古城北边“依山造居”(图1a), 西边“悬崖挂公路”(图1b、图1c), 东边“坡腰通小路”(图1d)。

随着全球经济建设的迅猛发展和科学技术日新月异的发展, 国内外学者和科研机构在边坡灾害防治技术领域取得了丰硕成果, 如早期的地表截排水、清方减载、填土反压、挡土墙、抗滑桩方法, 以及后来的锚杆(杆)索格构、注浆、植物固坡法^[4]。当边坡较高时, 其治理方案常常采用多种组合治理方案, 如桩锚支撑体系^[5]。

1 边坡成因

为确定合理的高边坡加固设计方案, 从形成条件和诱发因素2个方面分析高边坡成因^[6]。



注: a. 古城北边“依山造居”, b、c. 西边“悬崖挂公路”, d. 东边“坡腰通小路”

Note: a. Constructing house adjoining the hill side in northern ancient city; b, c. Roads of cliff in western ancient city; d. Lane of mid-slope in eastern ancient city

图1 吴砦古城高边坡

Fig. 1 The high slope of Wuzhai ancient city

1.1 形成条件

1.1.1 地形地貌。研究区原始微地貌为渭河IV级高阶地, 由渭河侵蚀堆积作用形成, 三面临河, 北边和西边有渭河流过, 东边有秦岭沟道经过, 地势总体向河谷方向倾斜。河床至坡顶的高差达35m, 古城北边坡原始坡度 $15^{\circ} \sim 40^{\circ}$, 西南端坡度较陡, 逐渐向东北端渐变而变缓; 西边坡原始坡度约 50° ; 东边坡原始坡度达 40° , 沟床至坡顶的高差达30 m。

作者简介 张小喜(1979—), 女, 甘肃通渭人, 工程师, 从事测绘工程方向研究。

收稿日期 2018-11-09; **修回日期** 2018-11-15

1.1.2 地层岩性。3处高边坡地层岩性均为第四系上更新统冲洪积物,为粉土、卵石双层结构土体,上部为含碎石粉土,厚度为1~3 m,浅黄色,中密,稍湿,干强度低,韧性低;中下部岩性为卵石,夹少量块石、漂石,青灰色,中密,呈次棱角-棱角状,粒径一般为2~20 cm,其中2~10 cm的占35%~50%,10~20 cm的占20%~30%,大于20 cm的占5%~10%,其余为砂土充填,分选性较好。

1.2 诱发因素

1.2.1 河流侵蚀作用。从边坡形成条件可知,3处边坡坡脚均有河流或沟道流水经过,坡脚长期受水的侵蚀作用,坡脚卵石层逐渐被河水或沟道流水冲走,上部坡体因坡脚部分被掏空而失去下部支撑力,经常发生崩塌、溜滑、掉土等现象,尤其在暴发暴雨时,河水涨高,流量增大,侵蚀作用加剧,坡脚冲刷更加严重,周而复始,逐渐形成了高陡斜坡,被形象地称为“一座悬崖上的抗金古城”。

1.2.2 人类工程活动。除了河流侵蚀作用外,人类工程活动亦是形成古城高边坡的重要因素。北边坡坡脚被当地村民“夷为平地”后开荒种地和修建房屋,从而使边坡变得更加高陡;西边坡本是一高边坡,但修建的310国道从坡腰穿过,使得西边坡变成了二级边坡,一级边坡坡脚受渭河河水侵蚀,二级边坡坡脚因修建公路而被开挖,两级边坡变得更加陡峭,可用“悬崖挂公路”来形容西边坡之高陡;东边坡亦是坡腰处修建乡村道路,从而使边坡变得更陡,近乎直立。

2 边坡特征及稳定性分析

2.1 边坡特征 吴砦古城高边坡由北、西、东三处边坡构成,其特征如下:

北边坡宽116 m,坡高5~28 m,两头低中间高,东北端高度约5 m,中间达28 m,西南端高度为21 m,坡度 50° ~ 60° ,局部可达 70° 。边坡上部坡体为含碎石粉土,植被覆盖较好;中下部为卵石层,分选性差、胶结较差,坡体局部有悬空现象。沿临空面分布有许多凸出的漂石、块石,直径多为0.3~0.7 m,最大可达1.0 m。近年来,掉落岩块的体积、规模及频率均有逐渐增大、增多的迹象,当地居民已采用浆砌石支护对部分凸出的漂石、块石进行支护;对边坡东北端亦进行浆砌石挡墙支护,已治理边坡宽度为24.6 m;另外,对整个坡顶亦进行浆砌石挡墙加固,且砌筑了耳墙。在未对下部坡体进行有效加固支护时,对上部坡体的加固无疑是对坡顶进行加载,从而坡顶局部出现了裂缝现象。

西边坡因国道310的建设而分成上下两级边坡,这里主要针对公路以上的二级边坡展开讨论。该边坡宽240 m,坡高6~20 m,南低北高,坡度 40° ~ 60° 。边坡上部坡面为含碎石粉土,坡面有大量的椿树;中下部为卵石层,分选性差、胶结较差,坡体较陡,坡脚处近乎直立。沿临空面分布有少量凸出的漂石、块石,直径多为0.3~0.9 m,最大可达1.2 m。坡面溜土、掉块现象严重,经常堵塞坡脚处的排水渠;局部有滑塌,面积达 100 m^2 ,滑体平均厚度约2 m。当地村民已对该边坡的南段进行浆砌石挡墙支护,宽度为30 m。

东边坡被乡村道路分割成上下两级边坡,一级边坡宽

102 m,坡高2~10 m,南高北低,坡度介于 30° ~ 45° ;二级边坡宽88 m,坡高12~19 m,南低北高,坡度均大于 75° ,近乎直立。一级边坡相对平缓,且坡面植被覆盖较好;二级边坡高陡,坡体上部为含碎石粉土,土质松散,坡面掉块现象严重,中下部为卵石层,分选性差、胶结较差,局部掉块后上部土体呈悬空状。沿临空面分布有许多凸出的漂石、块石,直径多为0.3~1.0 m,最大可达1.5 m。近年来凸出的漂石、块石逐渐增多,掉落岩块的体积、规模及频率均有逐渐增大、增多的迹象。

2.2 稳定性分析 由于边坡失稳而引起的事故,在工程界屡见不鲜。由此可见,分析边坡稳定性对边坡的治理方案探讨起着重要作用。边坡失稳在力学上主要是一个强度问题,常用的方法有极限平衡法^[7]、滑移线场法^[1,8]、极限分析法^[8]、有限元法^[9]、边界元法^[10]、离散元法^[11]、差分法^[12]、图解法、模糊数学分析法^[13]等。

极限平衡条分法是边坡稳定性最常用的分析方法,如瑞典法、简化 Bishop 法、不平衡推力法(传递系数法)、Spencer 法和 Morgenstern-Price 法等。瑞典法和简化 Bishop 法假定滑裂面是个圆柱面(剖面图上是圆弧),前者在求条底反力时忽略了条间力的作用,且在求稳定性系数时仅考虑对同一点的力矩平衡;后者还假定条间力的方向为水平方向,可通过垂直方向力的平衡求条底反力,通过对同一点的力矩平衡求解稳定性系数;传递系数法适用于任意形状的滑裂面,而假定条间力与上一条块底面平行,根据力的平衡条件,逐个条块向下推求,直到最后一个条块的推力为零。根据吴砦古城高边坡特征,可采用圆弧滑面的简化 Bishop 法,另外,该方法计算的结果误差很小^[1]。

古城北、西、东边坡平面如图2a、b、c所示,选取最危险地段实测得剖面如图3a、b、c所示,建立模型,并计算分析边坡稳定性。

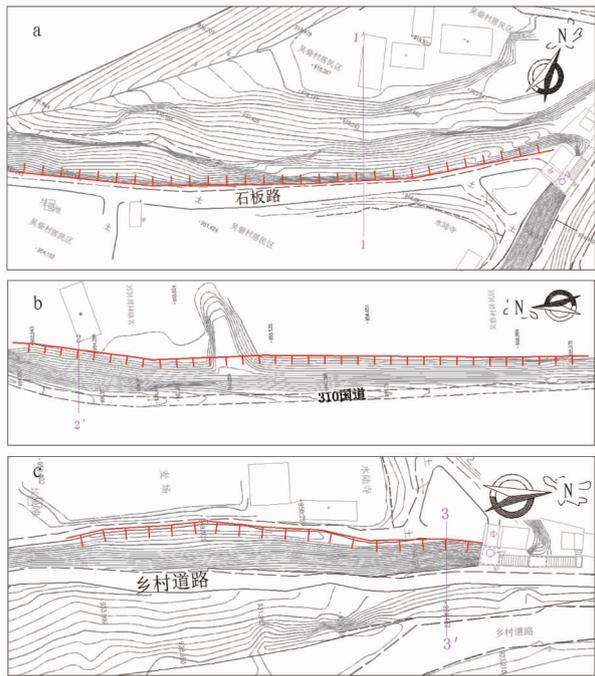
古城高边坡地层表层覆盖一层薄含碎石粉土,下部均为卵石,黏聚力 $c = 13.0\text{ kPa}$, $\varphi = 45^{\circ}$,天然容重 $r = 20\text{ kN/m}^3$,饱和容重 $r_s = 22\text{ kN/m}^3$ 。经计算得古城北、西、东边坡的稳定性系数分别为1.091、1.053、1.040,在地震、强降雨等作用下易发生变形破坏。

3 边坡综合治理及稳定性分析

3.1 边坡综合治理

3.1.1 坡率设计。根据古城北、西、东边坡工程地质条件和各自的边坡特征,结合已有治理工程特点,考虑坡顶已建城墙,对三处边坡分别按1:0.5、1:0.5、1:0.3自上而下削坡。

3.1.2 边坡加固类型选择。一般来讲,边坡因其不同的工程地质条件有着不同的变形破坏模式,其稳定性亦不尽相同,从而根据计算结果确定的边坡加固工程类型各有不同,针对不同的边坡变形破坏模式,分别采用不同的加固工程措施。然而,吴砦古城高边坡的加固,不仅是加固高边坡本身的稳定性,同时亦是对历史古城遗迹的加固与保护,从而加固类型的选择要有统一性,另外,也要彰显一座历史古城的外在形象。



注:a、b、c 分别为古城北、西、东边坡平面
 Note: a, b, c were north, west, east slope plane, respectively

图2 吴砦古城高边坡平面

Fig. 2 The high slope plane of Wuzhai ancient city

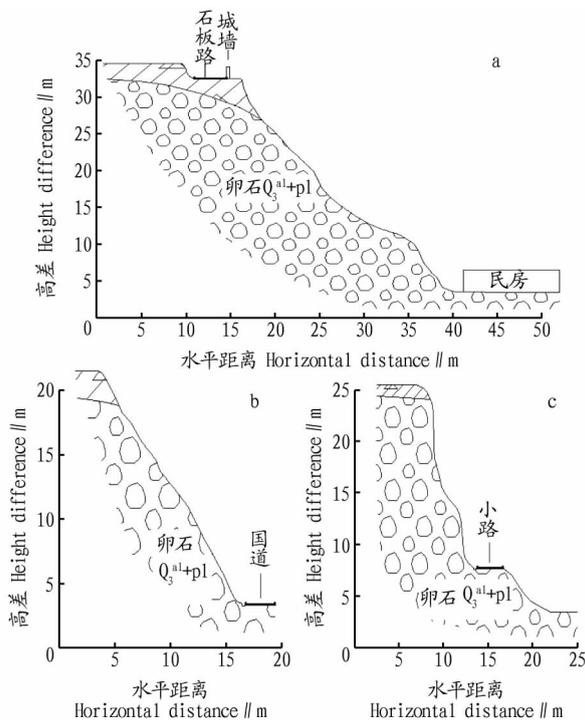


图3 吴砦古城高边坡剖面

Fig. 3 The high slope section of Wuzhai ancient city

3.1.2.1 针对坡脚应力集中的加固。有效消除坡脚应力集中,确保边坡稳定,是该工点成败的关键^[14]。该工程中三处边坡地层岩性均为卵石,而又无地下水,可采用传统的挡土墙进行加固,既能防止坡脚挤压破坏,又能起到避免受强降雨或地表径流等雨水作用的冲刷。挡土墙采用重力式挡土墙,胸坡比为 1:0.3,背坡比为 1:0.1,墙顶宽 0.6 m,墙高

3.0 m,基础埋深 1.5 m,用 C20 混凝土现浇。

3.1.2.2 针对边坡失稳的加固。三处边坡临空面分布许多凸出的漂石、块石,且常常有大体积岩块掉落现象,为对坡体进行有效加固支护,均选用预应力锚索格构支护,格构内填充浆砌片石,在北边坡坡顶砌筑青砖耳墙,既能防止坡体在自重或外力作用下的失稳变形,又能防止坡面被雨水冲刷,同时也体现着一座历史古城的形象。格构横梁与竖肋间距均为 3.0 m,截面尺寸均为 0.3 m×0.4 m,采用 C30 混凝土现浇。预应力锚索采用三根一束 $\phi 15.2$ 钢绞线,锚固段长为 9.0 m,自由段长为 9.0 m,倾角 20°。

3.2 边坡加固后的稳定性分析 预应力锚索距挡土墙顶 1.5 m 处为第一排,自第一排以上每隔 3.0 m 布置锚索一排,东边坡预应力锚索布置如图 4 所示。对坡脚挡墙加固和坡体预应力锚索加固后的边坡进行稳定性分析,经计算得古城北、西、东边坡的稳定性系数分别为 1.563、1.552、1.548,从加固前后的边坡稳定性系数可以发现,加固支护后使边坡安全性有很大提高。

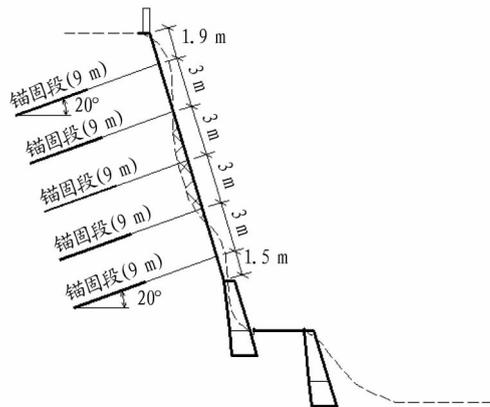


图4 东边坡预应力锚索布置图

Fig. 4 The collocation of prestressed anchor cables

4 工程效果

该工程 2017 年 6 月施工完成,治理效果如图 5 所示,经过多次雨季和地震考验。边坡变形监测资料显示,治理前尚呈溜土、掉块和局部滑塌的边坡,治理后目前未发现变形。



图5 古城高边坡治理效果

Fig. 5 Management effect of the old city high slope

5 结论

(1) 在分析边坡稳定性时,计算方法的选择对计算结果的准确性影响较大,地层为卵石的边坡,其滑裂面多为圆弧,宜采用简化 Bishop 法进行计算,其计算结果误差很小,吴砦古城高边坡未加固支护前,边坡稳定性较差,在地震、强降雨等作用易发生变形破坏。

(2) 边坡的治理设计时,有效消除坡脚应力集中,是确保

作用,波能到达D点时,波能大大减弱,有效波高仅0.39 m。港内有效波高0.5 m等值线以内的区域可有效避风,面积约15.5万m²,占港域面积的24.2%。

3 结论

(1)该研究利用Mike21 SW(spectral waves)模型计算的台风浪参数与实测数据拟合较好,可以依据台风风场资料应用Mike21 SW模型推算波浪参数。

(2)“纳沙”过境期间,由于台风眼经过乌石渔港,该渔港附近波高经历了升高、降低、再升高、再降低4个阶段,在渔港近岸海域形成了最大有效波高超过5.5 m的巨浪,持续时间长达12 h。

(3)“纳沙”过境期间,乌石渔港处两级防波堤对渔港起到了一定掩蔽效果,最大有效波高从外到里逐渐降低,波浪经过离岸防波堤时,有效波高由5.50 m降为0.57 m;在二级防波堤的掩护下,在乌石渔港最内部的有效波高等值线0.5 m区域内可有效避风,港口24.2%的区域可有效避风。

参考文献

[1] 牛海燕,刘敏,陆敏,等.中国沿海地区台风灾害损失评估研究[J].灾害学,2011,26(3):61-64.

- [2] 于杰,陈国宝,陈作志,等.台风“启德”对粤西渔场渔业的影响分析[J].海洋环境科学,2015,34(3):411-419.
- [3] 黄卓,廖雪萍.2016年台风“莎莉嘉”对广西的影响评估[J].气象研究与应用,2017,38(1):40-42.
- [4] 杨静思,张庆河,张金凤,等.“韦帕”台风过程中南海海域流场研究[J].水道港口,2013,34(3):225-231.
- [5] 邱桔斐,马越,徐新华.长江口外海域波浪场数值模拟[J].水运工程,2011(10):11-14.
- [6] 中国气象局.热带气旋年鉴[M].北京:气象出版社,2007.
- [7] 丁一汇.中国气象灾害大典:综合卷[M].北京:气象出版社,2008.
- [8] 陈述彭.台风防灾减灾信息系统[J].地球信息科学学报,2006,8(4):1-3.
- [9] 姬翔,王新.风云卫星高时空分辨率资料在热带气旋监测预报中的应用[J].气象科技,2014,42(4):647-651.
- [10] 孔令双,戚定满,万远扬,等.长江口海域波浪场模拟研究[J].水运工程,2010(2):46-49.
- [11] 谭凤,张庆河,庞启秀,等.基于WRF-SWAN模式的韦帕台风波浪场模拟[J].水道港口,2012,33(1):14-18.
- [12] SIRISHA P, REMVA P G, NAIR T M B, et al. Numerical simulation and observations of very severe cyclone generated surface wave fields in the north Indian Ocean[J]. Journal of earth system science, 2015, 124(8): 1639-1651.
- [13] HALL P. Modelling a storm surge event in Liverpool Bay with FVCOM[M]. Vienna, Austria: EGU General Assembly Conference, 2012:4736.
- [14] 刘秋兴,李明杰,吴玮,等.温州洞头中心渔港精细化浪潮耦合数值预报系统研究[J].海洋预报,2015,32(6):10-18.
- [15] 邱大洪.工程水文学[M].4版.北京:人民交通出版社,2011.

(上接第212页)

边坡稳定的关键,对于地层为卵石的高陡边坡,坡脚宜用挡墙加固支护,既能防止坡脚挤压破坏,又能起到避免受强降雨或地表径流等雨水作用的冲刷,坡体宜用预应力锚索格构加固,并在格构内填充片石,既能防止坡体在自重或外力作用下的失稳变形,又能防止坡面被雨水冲刷,另外,预应力锚索之锚固段在卵石地层中的锚固效果较好。

(3)经实践证明,对于地层为卵石的高陡边坡,采用坡脚挡墙支护、坡体预应力锚索格构加固和坡面浆砌片石护面的治理方案合理可行,治理效果良好。

参考文献

- [1] 郑颖人,陈祖煜,王恭先,等.边坡与滑坡工程治理[M].北京:人民交通出版社,2010:5-7.
- [2] 王恭先.高边坡设计与加固问题的讨论[J].甘肃科学学报,2003,15(S1):5-9.
- [3] 马惠民,吴红刚.山区高速公路高边坡病害防治实践[J].铁道工程学报,2011(7):34-41.
- [4] 杨永兵,施斌,杨卫东,等.边坡治理中的植物固坡法[J].水文地质工程地质,2002(1):64-67.
- [5] 胡华敏,胡杰刚,俞敏,等.桩锚支挡体系在广西寨一任二级公路高边坡

- 治理工程中的应用[J].中国地质灾害与防治学报,2006,17(3):150-153.
- [6] 张泽鹏,朱凤贤,黄放军,等.复杂地质条件下高边坡加固设计与综合治理研究:以梅河高速公路某高边坡治理为例[J].中山大学学报(自然科学版),2006,45(4):44-48.
- [7] 卢坤林,朱大勇,甘文宇,等.一种边坡稳定性分析的三维极限平衡法及应用[J].岩土工程学报,2013,35(12):2276-2282.
- [8] 郑颖人.岩土数值极限分析方法的发展与应用[J].岩石力学与工程学报,2012,31(7):1297-1316.
- [9] ZHENG Y R, DENG C J, ZHAO S Y, et al. Development of finite element limiting analysis method and its applications to geotechnical engineering[J]. Engineering sciences, 2007, 5(3): 10-36.
- [10] 邓琴,郭明伟,李春光,等.基于边界元法的边坡矢量和稳定分析[J].岩土力学,2010,31(6):1971-1976.
- [11] JING L. A review of techniques advances and outstanding issues in numerical modeling for rock mechanics and rock engineering[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences, 2003, 40(3): 283-353.
- [12] 王贵荣,韩飞.基于有限差分强度折减法的略阳电厂边坡稳定性分析[J].工程地质学报,2007,15(3):346-349.
- [13] WANG J D. The analysis of loess slope instability based on fuzzy method[J]. BUSEFAL, 1993, 53: 83-92.
- [14] 赵尚毅,郑颖人,时卫民,等.用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数[J].岩土工程学报,2002,24(3):343-346.