

文章编号:1671-8879(2017)03-0039-08

高速公路改扩建工程路堑高边坡 支护机理与效果

王大伟^{1,2}, 沈 鹏³

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064; 2. 广西桂海高速公路有限公司, 广西 南宁 530021; 3. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710075)

摘 要:为对公路改扩建工程中路堑高边坡支护机理进行分析并对支护方案进行优选,以柳南(柳州—南宁)高速公路改扩建工程 K1415+200 左侧高边坡为例进行分析。首先采用 FLAC3D 数值分析方法研究改扩建边坡开挖对边坡稳定性的影响,然后设计正交试验分析采用锚杆支护时锚杆倾角、长度和间距变化对边坡安全系数的影响规律;研究了原坡面施工抗滑桩及桩前土体挖除 2 个工况下边坡安全系数的变化情况,并沿边坡高度方向设置监测点分析抗滑桩中锚索施工前后边坡土体水平和竖向位移变化规律,且通过应变增量云图研究边坡土体内部受力情况,最后从支护效果、施工难度及经济性等方面对 2 种支护方案进行了比选。研究表明:按既定改扩建方案开挖后,边坡安全系数小于规范限值,需采取适当措施进行支护;采用锚杆支护时,适当设置锚杆倾角和在有效锚固深度范围内增加锚杆长度均能提高边坡安全系数,而增大锚杆间距则使边坡安全系数降低,且当其间距大于 4 m 后对锚杆间距的敏感性增强;边坡安全系数对锚杆长度的敏感性显著大于锚杆倾角和锚杆间距;采用抗滑桩支护能较好地对比边坡土体提供侧向支撑作用,此时边坡安全系数得到有效提高,而加入锚索能进一步减小边坡土体位移,且对边坡土体内部受力影响较小;本工程选用锚杆支护时在支护效果、施工难度和经济性上更为合理。

关键词:道路工程;支护方案;FLAC3D;高边坡;优选

中图分类号:U416.1 **文献标志码:**A

Support mechanism and effect of cutting high slope in expressway reconstruction and expansion projects

WANG Da-wei^{1,2}, SHEN Peng³

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Guangxi Guihai Expressway Group Co., Ltd., Nanning 530021, Guangxi, China; 3. CCCO First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an 710075, Shaanxi, China)

Abstract: In order to analyze the support mechanism of cutting high slope in road reconstruction and expansion projects and to optimize support scheme, high slope of K1415 + 200 on the left side of Liunan (Liuzhou to Nanning) Expressway was taken as an example. Firstly, the influence of slope excavation on slope stability was studied by FLAC3D numerical method, then orthogonal

收稿日期:2016-12-25

基金项目:国家自然科学基金项目(51608053)

作者简介:王大伟(1982-),辽宁丹东人,广西桂海高速公路有限公司高级工程师,长安大学工学博士研究生,E-mail:30788195@qq.com。

experiment was designed to analyze the influence rules of anchor angle, anchor length and anchor space on slope safety factor when using anchor support. Changes of slope safety factor were studied under the working conditions of original slope construction anti-slide pile and excavation of two anterior soil of piles. Monitoring points along height of the slope were set to analyze horizontal and vertical displacement of soil slope in anti-slide pile before and after the construction of anchor cable, and stress of the slope soil was studied by strain increment nephogram. Finally, two support schemes were compared in the aspects of supporting effect, construction difficulty and economy. The results show that the safety factor is less than the code limit value by using the existing reconstruction and expansion project to excavate, so appropriate support measures should be taken. Both setting appropriate anchor angle and increasing anchor length within the effective anchorage depth can improve safety factor of the slope. However, increasing anchor spacing will reduce the safety factor of the slope, and when the spacing is more than 4 m, the sensitivity will be enhanced. Sensitivity of the slope safety factor to the length of anchor is obviously greater than that of angle and spacing of anchor. Slope soil can get better lateral support when using anti-slide pile retaining. At this time, slope safety factor can be improved, and the slope displacement can be reduced further when adding anchor cable, which has less influence on internal force of slope soil. In this project, the support effect, the construction difficulty and the cost are more reasonable when using anchor to reinforce slope. 3 tabs, 7 figs, 25 refs.

Key words: road engineering; supporting scheme; FLAC3D; high slope; optimization

0 引言

随着社会经济的快速发展,很多高速公路已不能满足日益繁重的交通量需求,因此对现有高速公路进行改扩建将逐步开展。在改扩建施工中,高边坡路段是较大的潜在危险源,其施工难度大,施工质量不易控制,若处置不当不仅会造成严重的经济损失,还可能引发行车安全问题。因此,中国未来高速公路改扩建施工中高边坡支护方案的选择尤为关键^[1]。

工程实践中锚杆和抗滑桩在边坡支护中较为常用。林杭等研究了锚杆倾角和长度对边坡安全系数的影响,认为使用锚杆支护时随边坡特性不同存在最佳锚杆倾角和长度^[2-4];廖峻等研究发现采用锚杆支护时,当锚固长度小于界限长度时,锚固倾角对边坡安全系数有较大影响,反之则影响较小^[5];何忠明等研究了边坡支护中锚杆间距与边坡安全系数的关系,发现其间距增大时安全系数减小,且二者呈显著的非线性特征^[6-9];徐爱民等研究了抗滑桩布置位置对边坡支护效果的影响,认为抗滑桩位于边坡中部且穿过最危险滑动面或位于坡体最大位移处时支护效果较好^[10-12];Ashour等研究了采用抗滑桩加固边坡时桩径和桩距对边坡安全系数的影响,发现桩径增大时边坡稳定性提高,但超过一定值后其效果不

再明显,而桩距增大时土拱效应减弱,边坡安全系数降低^[13-16];Galli等提出了考虑桩土作用的抗滑桩位移预测方法,其应用于边坡土体位移的长期预测效果较好^[17];陶连金等研究了锚索对抗滑桩受力的改善作用,发现添加锚索后能有效减小桩身弯矩和剪力^[18-21];文松霖等研究了采用抗滑桩加固边坡时加入锚索对边坡水平位移的影响,发现锚索能有效提高抗滑桩对边坡土体水平位移的控制效果^[22-24]。

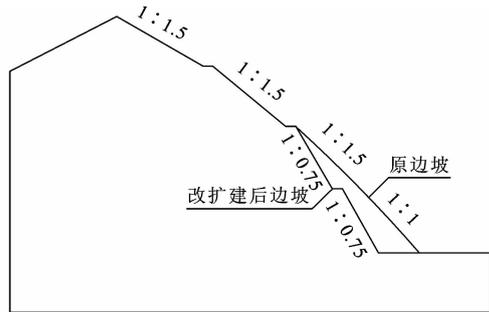
综上,现有关于锚杆及抗滑桩支护效果的研究中,边坡高度基本在30 m以下,且应用于存在土体重新挖除这一特殊施工条件的改扩建工程较少,对支护方案的优选也较少涉及。鉴于此,本文以柳南(柳州—南宁)高速公路改扩建工程中K1415+200左侧高36.26 m的边坡为例,利用FLAC3D分析锚杆支护参数对边坡安全系数的影响机理,研究原坡面施工抗滑桩及桩前土体挖除2个工况对边坡安全系数的影响,并考虑锚索对边坡土体位移和受力影响,最后从技术、经济等方面对上述2种方案进行比选,确定改扩建工程路堑高边坡施工中适宜的加固方案。

1 工程概况

1.1 工程简介

本文以柳南高速为依托,根据通行能力和相关

规范具体规定,拟采用双向8车道标准对本项目进行扩建。其中K1415+200断面左侧边坡为本路段最高边坡,原边坡分为4级,前3级高度均为10 m,第4级高度为6.26 m,改扩建前后边坡坡率变化情况及改扩建后边坡实体工程如图1所示。



(a) 改扩建前后边坡坡率示意



(b) 改扩建后边坡实体工程

图1 改扩建后的边坡坡率及边坡实体工程

Fig.1 Side slope rate and physical engineering after reconstruction and expansion

1.2 地质概况

1.2.1 地形地貌及地质构造

边坡所在区域为丘陵,高差50~100 m。地层岩性主要为泥盆系砂岩、泥质砂岩、白云质灰岩、灰岩和寒武系泥质砂岩、粉砂岩等。岩层坡向为135°,与岩层倾向形成切向坡,对地形条件和结构面进行组合分析可知该开挖边坡的整体稳定性较差。

1.2.2 气象水文条件

本项目所处地区年平均气温处于20℃~23℃之间,极端高温和低温分别39℃和-1℃。一年中春夏两季降雨频繁,秋冬两季气候温和干燥,利于工程施工。年降雨量1 000~2 800 mm,年日照时数为1 000~2 000 h,年平均蒸发量约为1 700 mL。

1.2.3 地震及区域稳定性

查阅相关抗震设计规范可知,本项目所处地区设计地震分组为第1组,设计地震烈度为6度,基本地震加速度值为0.05g,属于地震活动较弱地区,地壳基本稳定,地震动反映谱特征周期为0.35 s。

2 FLAC3D数值模型及计算参数

2.1 FLAC3D数值模型

FLAC3D提供了多种形式的基本网格,通过连接不同形状的基本网格即可构成一些较为复杂的三维结构网^[25],但由于FLAC3D在应用中会同时生成网格和几何模型,这对复杂形状网格单元的连接和修改十分不利,导致其在复杂网络模型的分析中存在较大的局限性。为此,本文采用其他软件生成三维网格,再将网格数据导入FLAC3D进行相关分析。

由于K1415+200断面左侧边坡为本工程中的最高边坡,因而具备较强的代表性,故本文选取此边坡所在断面建模进行边坡支护效果分析,在竖向向取单位单元,模型长度为100 m,共划分成344个单元和2 214个节点。在两侧和底部分别设置水平约束和刚性约束,以固定所有节点水平和竖直方向的变形。本构模型选用摩尔-库伦模型,边坡失稳判据为计算得出的最大不平衡力与典型内力的比值小于 10^{-5} 。

2.2 计算参数

FLAC3D计算中的变形参数为体积模量 K 和剪切模量 G ,其可根据变形模量 E_0 和泊松比 ν 计算得出。由地质勘察报告可知,本文研究断面左侧边坡主要由强风化泥质粉砂岩和中风化泥质粉砂岩构成,见图2。计算中所需物理力学参数见表1。

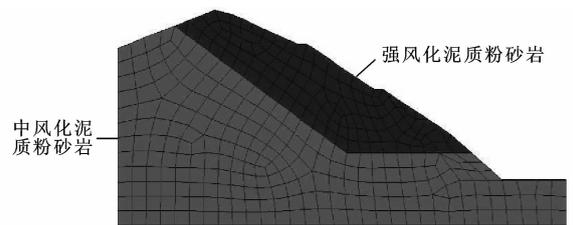


图2 边坡岩性构成

Fig.2 Lithologic composition of side slope

表1 岩土体物理力学参数

Tab.1 Physical and mechanical parameters of rock and soil mass

参数	E_0 /MPa	ν	K /MPa	G /MPa
强风化泥质粉砂岩	199.91	0.24	128.15	80.61
中风化泥质粉砂岩	375.66	0.24	240.81	151.48

3 高边坡不同支护方案对比

使用FLAC3D分别计算原边坡扩建开挖前后的边坡安全系数,原边坡安全系数为1.31,满足《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)(下文简称规

范)对高速公路正常工况下边坡安全系数不小于 1.20 的要求,但开挖后由于边坡土体失去部分支撑,边坡安全系数下降到 1.15,故有必要采取相关技术措施对其进行支护。

3.1 锚杆支护参数对边坡安全系数影响

为揭示使用锚杆进行边坡支护时锚杆倾角、长度和间距对其使用效果的影响,以确定合理的锚杆支护组合方式。按 3 因素 3 水平设计正交试验,并用 FLAC3D 对试验进行数值分析以求其边坡安全系数,结果如表 2 所示。

表 2 试验方案及结果

Tab. 2 Test schemes and results

试验编号	因素			边坡安全系数
	锚杆倾角/(°)	锚杆长度/m	锚杆间距/m	
1	10	6	2	1.46
2	10	9	3	1.54
3	10	12	4	1.55
4	15	6	3	1.38
5	15	9	4	1.52
6	15	12	2	1.95
7	20	6	4	1.39
8	20	9	2	1.93
9	20	12	3	2.13

3.1.1 不同因素对边坡支护效果影响程度

对表 2 中试验结果进行方差分析,以评价 3 个因素对边坡安全系数的影响程度,结果见表 3。

表 3 方差分析结果

Tab. 3 Results of variance analysis

因素	离差平方和	自由度	F 值
锚杆倾角	0.141	2	10.846
锚杆长度	0.329	2	25.308
锚杆间距	0.130	2	10.000
误差	0.013	2	

注:给定显著水平 α 为 0.05,查表得临界值 $F_{0.05}(2,2)$ 为 19.00。

由表 3 可知,锚杆长度方差检验 F 值约为其他 2 个因素的 2.5 倍,表明边坡安全系数对其敏感性较强。同时,锚杆长度方差检验 F 值大于临界值,表明其对边坡安全系数有显著影响,而锚杆倾角和锚杆间距的方差检验 F 值均小于临界值,且两者相差不大,显著性处于同一水平,均对边坡安全系数无显著影响。

3.1.2 锚杆支护方案选择

由上述正交试验结果可知,表 2 中所列 9 种方案的边坡安全系数均高于 1.38,符合规范中对高速公路正常工况下边坡安全系数不小于 1.20 的要求。7 号方案所用锚杆长度最小的同时锚杆间距最大,

能节约施工成本,故将其定为优选方案。

3.2 抗滑桩加固边坡效果分析

抗滑桩依靠其埋入地下的部分对土体提供支撑,以保持边坡稳定,同时在实际工程中为更好地控制边坡土体变形,常需要在桩身上部设置锚索。为对抗滑桩和锚索的实际应用效果进行分析,本文使用 FLAC3D 对在原坡面施工抗滑桩(工况 1)、桩前土体挖除(工况 2)及锚索施工(工况 3)3 个不同工况下的边坡状态进行数值模拟。其中抗滑桩直径和长度分别为 1 和 15 m,桩身混凝土弹性模量为 200 GPa,泊松比为 0.25,桩身上部设有 2 排倾角为 15°的锚索,其竖向间隔和长度分别为 3 和 20 m,并在其上布置 10 个位移监测点,测点编号 1#~10#,见图 3。

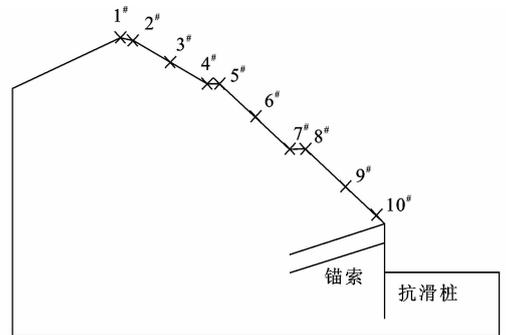


图 3 抗滑桩、锚索及监测点布置

Fig. 3 Arrangement of anti-slide pile, anchor cable and layout scheme

3.2.1 抗滑桩支护效果分析

采用抗滑桩加固后边坡安全系数的变化情况如图 4 所示。

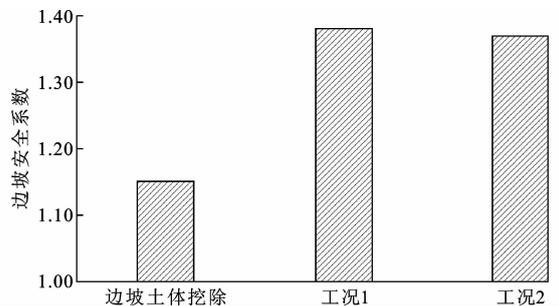


图 4 施工抗滑桩对边坡安全系数影响

Fig. 4 Influence of anti-slide pile construction on side slope safety factor

由图 4 可知:抗滑桩能较好地边坡土体提供侧向支撑作用,2 种工况下的边坡安全系数仅相差 0.7%,表明抗滑桩的埋深对土体提供了主要侧向支撑,而桩前土体的挖除对其承载能力基本无影响;抗滑桩能有效提高边坡土体的安全系数。抗滑桩施工

完成并按改扩建方案进行土体挖除后,边坡安全系数较直接开挖时提高 19.1%,且其符合规范中对高速公路正常工况下边坡安全系数不小于 1.20 的要求。

3.2.2 锚索对边坡土体位移影响

采用 FLAC3D 对抗滑桩及锚索施工前后的位移情况进行分析,并求取图 3 中的 10 个监测点位移(其中 9[#]和 10[#]这 2 个点的位置随开挖位置的不同分别布置于断面上原第 3 级边坡坡中和坡脚处),以分析锚索对边坡土体位移的控制作用。

(1) 水平位移

抗滑桩锚索施工前后边坡土体水平位移云图及监测点水平位移变化情况如图 5 所示。

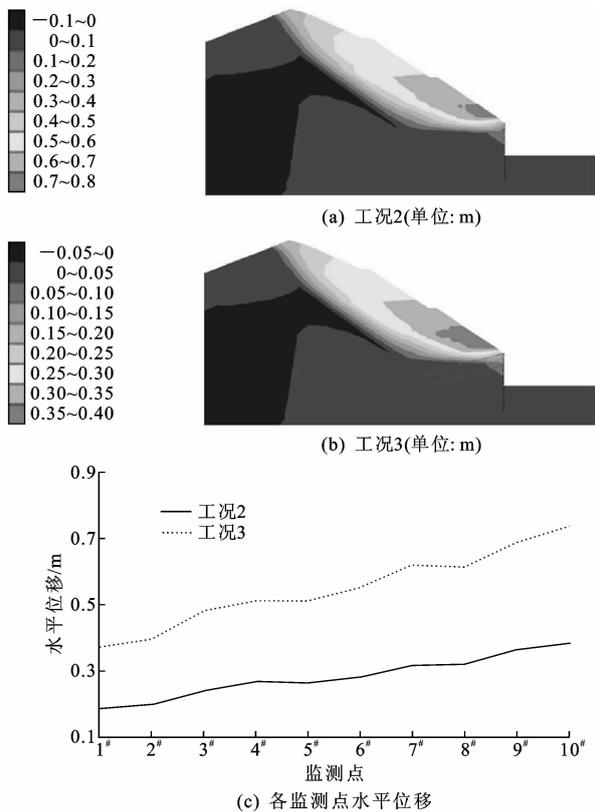


图 5 边坡土体水平位移变化

Fig. 5 Changes of horizontal displacement of side slope

由图 5 可知:2 种工况下边坡土体的水平位移均指向坡体内侧,这是由于土体受到抗滑桩的反力作用所致;边坡土体的水平位移均随监测点距坡脚高度的增加而减小,这是由于监测点高度较高时,土体受抗滑桩反力作用逐渐减小所致;锚索能有效减小边坡土体的水平位移。加入锚索后,边坡土体的最大水平位移由 74.0 cm 下降到 38.0 cm,最小水平位移由 36.5 cm 下降到 19.1 cm,这是由锚索对土体的约束作用造成的,表明在抗滑桩上部设置锚

索能提高边坡的稳定性。

(2) 竖向位移

抗滑桩锚索施工前后边坡土体竖向位移云图及监测点竖向位移变化情况如图 6 所示。

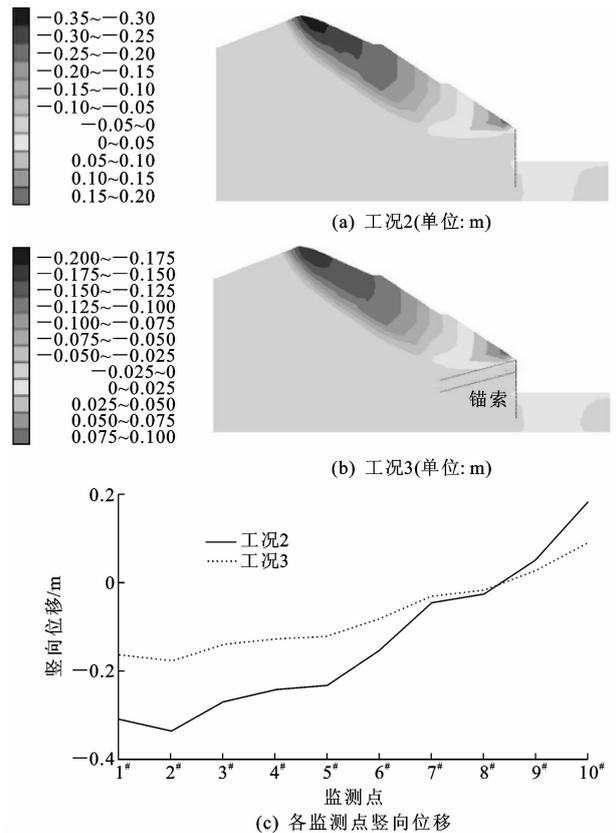


图 6 边坡土体竖向位移变化

Fig. 6 Changes of vertical displacement of side slope

由图 6 可知:2 种工况下边坡土体的竖向位移随监测点距坡脚高度的减小逐渐从负值(向下移动)向正值(向上移动)变化,其原因是高度较高时,土体在自重作用下发生下沉,而高度较低时则是因为抗滑桩的作用使边坡土体发生回弹所致;锚索能有效降低边坡土体的竖向位移及其变化速率。加入锚索后,监测点 2[#]的竖向位移由 33.5 cm 降低到 17.6 cm,监测点 10[#]则由 18.0 cm 降低到 9.3 cm。

(3) 锚索对边坡内部受力影响

分别用 FLAC3D 对工况 2、工况 3 的应变增量进行分析,结果如下页图 7 所示。

由图 7 可知:2 种工况下边坡土体剪应变增量的最大值均出现在同一区域,但加入锚索后其值降低为原来的 1/2,滑动趋势也有所缓解;锚索对抗滑桩加固边坡土体的应力基本无影响。2 种工况下边坡土体内部均为压应力,仅在边坡表层出现拉应力,其中拉压应力最大值均出现在同一位置,且相差不

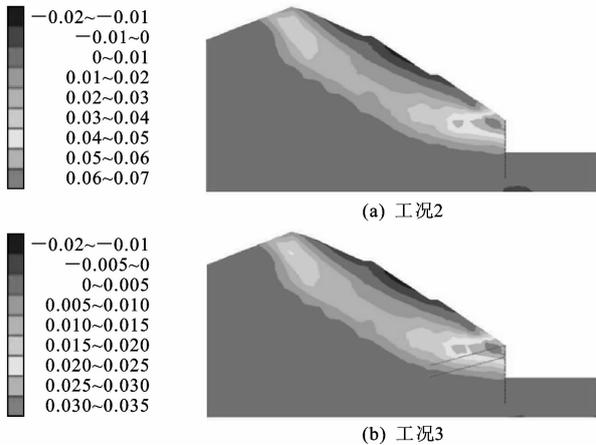


图7 边坡内部剪应变增量变化情况

Fig. 7 Changes of shear strain increment of side slop

大,两者的区别仅在于锚索附近的土体受力略有不同。

4 方案优选

(1) 支护效果分析

使用锚杆和抗滑桩进行支护后的边坡安全系数分别提高到 1.39 和 1.37, 均能较好地保证其稳定性。从边坡支护效果来看, 两者差别不大。

(2) 施工难度分析

采用锚杆加固时施工机械设备所需工作空间较小, 能较好地适应施工区地形条件的变化, 同时锚杆的钻孔位置、倾角、间距在施工中均可参照具体情况进行调整, 且施工工艺较为简单, 有较为成熟的施工经验可以参考。采用抗滑桩加固边坡时施工工艺也较为简单, 但坡脚开挖及桩身浇筑均有严格要求, 否则容易造成质量问题, 如桩身浇筑时混夹泥土容易造成桩身断裂, 混凝土配合比控制不严时则容易造成离析现象, 这些均会对其支护效果甚至是安全性能造成影响。因此, 就施工难度而言, 锚杆加固支护方案更具优势。

(3) 经济性分析

采用锚杆加固时主要支出为土方开挖与运输、基本材料购置、机械使用、锚杆钻孔、注浆、浇筑混凝土骨架、坡面绿化及人工费等; 经过粗略计算, 本实施方案在 200 m 长的边坡加固工程中的花费约为 16 万元。采用抗滑桩加固时, 主要支出则来源于土方的开挖与运输、基本材料购置、机械使用、钢筋笼制作安装、壁面辅助支护及边坡绿化等费用, 综合计算后其处治同样长度边坡的施工费用约为 55 万元。显然采用锚杆加固方案更为经济合理。

5 结 语

(1) 采用 FLAC3D 对本改扩建工程高 36.26 m 的边坡进行分析, 发现适当设置锚杆倾角和在有效锚固深度范围内增加锚杆长度均能提高边坡安全系数, 而增大锚杆间距则使边坡安全系数降低, 且当其间距大于 4 m 后敏感性增强; 边坡安全系数对锚杆长度的敏感性明显大于锚杆倾角和锚杆间距, 约为后两者的 2.5 倍; 选用锚杆倾角为 20° , 长度为 6 m, 间距为 4 m 进行组合对本项目边坡进行支护时能取得较好效果。

(2) 采用抗滑桩进行支护时其埋深对土体提供主要侧向支撑, 能有效提高边坡安全系数, 但位移相对较大, 此外在改扩建工程中挖除桩前土体对边坡安全系数影响较小; 在抗滑桩中加入锚索能有效减少边坡土体的竖向和水平位移, 且对土体受力基本无影响。

(3) 在本工程中采用锚杆和“抗滑桩+锚索”方案进行支护时效果相当, 但采用锚杆时施工工作面较小, 施工质量容易控制, 且初期投资较小, 故采用锚杆对本工程进行支护的综合效果更好。

(4) 本文研究成果建立于理论分析基础之上, 且对于 2 种支护方式的研究仅限于初始状态, 未来应对边坡土体特征及自然环境变化时的边坡稳定性进行分析, 并在工程实践中对理论分析成果进行深化。

参考文献:

References:

- [1] 邓 勇. 边坡岩体力学参数反分析遗传-神经网络算法[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(4): 751-757.
DENG Yong. A genetic-artificial neural network algorithm for mechanical parameters of rock slope[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(4): 751-757.
- [2] 林 杭, 曹 平. 锚杆长度对边坡稳定性影响的数值分析[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(3): 470-474.
LIN Hang, CAO Ping. Numerical analysis for effect of bolt length on stability of slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(3): 470-474.
- [3] 林 杭, 曹 平, 周正义. FLAC3D 模拟全长注浆锚杆的作用效果[J]. 岩土力学, 2005, 26(增): 167-170.
LIN Hang, CAO Ping, ZHOU Zheng-yi. Simulating effects of wholly grouted anchor rods with FLAC3D [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(S): 167-170.
- [4] 林 杭, 钟文文, 熊 威, 等. 锚杆长度与边坡坡率对

- 最优锚固角的影响[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(增2):7-11.
- LIN Hang, ZHONG Wen-wen, XIONG Wei, et al. Effect of bolt length and slope rate on optimum anchorage angle[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(S2):7-11.
- [5] 廖峻, 李江腾, 郝瑞卿, 等. 顺层岩质边坡稳定性及预应力锚杆加固研究[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2014, 45(1):231-236.
- LIAO Jun, LI Jiang-teng, HAO Rui-qing, et al. Stability of consequent rock slopes and analysis of prestressed anchors reinforcement[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2014, 45(1):231-236.
- [6] 何忠明, 林杭. 节理岩体边坡稳定性的锚杆支护影响分析[J]. 公路交通科技, 2010, 27(11):8-12, 19.
- HE Zhong-ming, LIN Hang. Influence of bolt reinforcement on stability of rock jointed slope[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(11):8-12, 19.
- [7] 林恒星, 卢军燕, 朱珍德. 锚杆参数对边坡稳定性影响的数值分析及锚杆受力研究[J]. 水电能源科学, 2015, 33(4):135-138.
- LIN Heng-xing, LU Jun-yan, ZHU Zhen-de. Numerical analysis of impact of bolt parameter on slope stability and research on stress of bolt[J]. Water Resources and Power, 2015, 33(4):135-138.
- [8] 晏鄂川, 吕美君, 李红刚. 岩质边坡锚固参数正交优化分析及应用[J]. 山地学报, 2007, 25(3):364-369.
- YAN E-chuan, LU Mei-jun, LI Hong-gang. Orthogonal analysis and application on anchorage parameters of rock slope[J]. Journal of Mountain Science, 2007, 25(3):364-369.
- [9] 刘佳龙, 贺雷, 冯自霞, 等. 岩质高挖方边坡锚杆参数优化设计研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(增2):375-380, 396.
- LIU Jia-long, HE Lei, FENG Zi-xia, et al. Parameter optimization design of anchors in high cutting rock slope[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(S2):375-380, 396.
- [10] 徐爱民, 柳群义, 朱自强, 等. 层状岩体边坡抗滑桩加固效应的数值分析[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2011, 42(8):2453-2458.
- XU Ai-min, LIU Qun-yi, ZHU Zi-qiang, et al. Numerical analysis for reinforcement response of pile in stratified rock slope[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2011, 42(8):2453-2458.
- [11] 杨光华, 张有祥, 张玉成, 等. 基于边坡变形场的抗滑桩最优加固位置探讨[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(增1):1-6.
- YANG Guang-hua, ZHANG You-xiang, ZHANG Yu-cheng, et al. Optimal site of anti-landslide piles based on deformation field of slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(S1):1-6.
- [12] 王聪聪, 李江腾, 廖峻, 等. 抗滑桩加固边坡稳定性分析及其优化[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2015, 46(1):231-237.
- WANG Cong-cong, LI Jiang-teng, LIAO Jun, et al. Stability analysis of slope reinforced with piles and optimization[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2015, 46(1):231-237.
- [13] ASHOUR M, ARDALAN H. Analysis of pile stabilized slopes based on soil-pile interaction[J]. Computers and Geotechnics, 2012, 39:85-97.
- [14] 高长胜, 陈生水, 杨守华, 等. 基于强度折减有限单元法的抗滑桩加固边坡特性分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2010, 8(4):119-122.
- GAO Chang-sheng, CHEN Sheng-shui, YANG Shou-hua, et al. Analysis for slope stability reinforced with anti-slide piles based on strength reduction method with 3D FEM[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2010, 8(4):119-122.
- [15] 秦晓睿. 预应力锚索抗滑桩加固边坡优化设计研究[D]. 北京:中国地质大学, 2015.
- QIN Xiao-rui. Research on optimization of slope reinforced by anti-slide pile with pre-stressed anchor cable[D]. Beijing:China University of Geosciences, 2015.
- [16] 褚铅波. 基于FLAC^{3d}的土质边坡稳定性及其抗滑桩加固研究[D]. 杭州:浙江大学, 2013.
- CHU Qian-bo. Research on stability of soil slope and anti-slide pile reinforcement based on FLAC^{3d}[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [17] GALLI A, DI PRISCO C. Displacement-based design procedure for slope-stabilizing piles[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013, 50(1):41-53.
- [18] 陶连金, 沈小辉, 王开源, 等. 某大型高速公路滑坡稳定性分析及锚桩加固的模拟研究[J]. 工程地质学报, 2012, 20(2):259-265.
- TAO Lian-jin, SHEN Xiao-hui, WANG Kai-yuan, et al. Stability analysis and supporting effect modeling of a large scale landslide on highway[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(2):259-265.
- [19] 雷焕珍. 锚索抗滑桩体系受力影响因素的研究[D]. 大连:大连大学, 2014.
- LEI Huan-zhen. The study of factors affecting the

- force of anchor anti-slide pile system [D]. Dalian: Dalian University, 2014.
- [20] 吴新星. 边坡抗滑桩受力分析与结构优化[D]. 宜昌: 三峡大学, 2010.
WU Xin-xing. Mechanism of anti-slide pile and its structural optimization [D]. Yichang: China Three Gorges University, 2010.
- [21] 石玉玲, 李 貅, 李凯玲. 锚索抗滑桩工程的优化设计研究[J]. 工程地质学报, 2007, 15(3): 412-415, 327.
SHI Yu-ling, LI Xiu, LI Kai-ling. Design optimizing of anti-sliding pile with prestressed cable anchors[J]. Journal of Engineering Geology, 2007, 15(3): 412-415, 327.
- [22] 文松霖, 龚 泉, 李仲秋. 锚索抗滑桩加固路堤工程实例分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增2): 4538-4544.
WEN Song-lin, GONG Quan, LI Zhong-qiu. Engineering case analysis of embankment reinforced by anchor cable anti-sliding pile[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(S2): 4538-4544.
- [23] 王玉堂. 预应力锚索抗滑桩的桩-索-土相互作用研究[D]. 西安: 长安大学, 2006.
WANG Yu-tang. Research on pile-anchor-soil interaction of the anti-slide pile with pre-stressed anchor cables[D]. Xi'an: Chang'an University, 2006.
- [24] 杨 彪. 预应力锚索抗滑桩作用机理的数值模拟研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2008.
YANG Biao. Study on the mechanism of pre-stress anti-slide pile with numerical simulation[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2008.
- [25] 巫德斌, 徐卫亚. 基于 Hoek-Brown 准则的边坡开挖岩体力学参数研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2005, 33(1): 89-93.
WU De-bin, XU Wei-ya. Hoek-Brown criterion-based study on mechanical parameters of excavated slope rock masses[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2005, 33(1): 89-93.

(上接第 38 页)

- MA Qin-yong, WU Jin-rong, QIN Kai. Tests and analyses of the influence of chlorine salt on freezing-thawing splitting tensile strength of asphalt concrete[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(5): 1202-1208.
- [15] 吴金荣, 马芹永, 王文娟. 温度-盐分-冻融耦合作用下沥青混凝土疲劳寿命研究[J]. 公路交通科技, 2014, 31(8): 30-34.
WU Jin-rong, MA Qin-yong, WANG Wen-juan. Research on fatigue life of asphalt concrete under coupling action of temperature, salt and freeze-thaw[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31(8): 30-34.
- [16] 丛培良, 陈拴发, 陈华鑫. 除冰盐对沥青混凝土性能的影响[J]. 公路, 2011(6): 180-184.
CONG Pei-liang, CHEN Shuan-fa, CHEN Hua-xin. Effects of deicers on properties of asphalt concrete [J]. Highway, 2011(6): 180-184.
- [17] 韩吉伟, 崔亚楠, 王 乐, 等. 盐冻循环条件下 SBS 改性沥青砂浆的力学性能分析[J]. 功能材料, 2015, 46(12): 12141-12145.
HAN Ji-wei, CUI Ya-nan, WANG Le, et al. The mechanical properties analysis of SBS modified asphalt mortar under salt freezing cycle[J]. Journal of Functional Materials, 2015, 46(12): 12141-12145.
- [18] LIU Zhuang-zhuang, CHEN Shuan-fa, HE Rui, et al. Investigation on the properties of asphalt mixtures containing antifreeze fillers[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2014, 27(6): 04014180.
- [19] SERCOMBE J, GWINNER B, TIFFREAU C, et al. Modeling of bituminized radioactive waste leaching. Part I: Constitutive equations[J]. Journal of Nuclear Materials, 2006, 349(1/2): 96-106.
- [20] GWINNER B, SERCOMBE J, SIMONDI-TEISSEIRE B, et al. Experimental and theoretical study of the pore structure and diffusion properties of an evolving heterogeneous material: Application to radioactive bituminized waste [J]. Chemical Engineering Communications, 2007, 194(2): 234-247.
- [21] 王晓鹏. 酸雨对沥青及沥青混合料的侵蚀破坏机理研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2014.
WANG Xiao-peng. The research on the erosion damage mechanism of the acid rain on the asphalt and asphalt mixture[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2014.