【土木工程 / Architecture and Civil Engineering】

山区水下填方路堤边坡的稳定性分析

吕江¹, 赵晖¹, 杨杓², 赵家琛³, 孙宏磊²

1) 杭州交通投资建设管理集团有限公司, 浙江杭州 310024; 2) 浙江工业大学土木工程学院, 浙江杭州 310023;
3) 浙江大学建筑工程学院, 浙江杭州 310058

摘要: 山区水下填方路堤在修筑过程中, 由于无法对水位以下的原状山体进行清表和修坡处理, 填方路堤与原有山体之间会存在软弱层, 导致出现边坡稳定性问题. 以千黄高速浙江省大湾区路段工程为背景, 采用有限元软件 GeoStudio, 对水下填方路堤进行数值模拟, 分析路堤边坡稳定性受水下填方路堤与原状山体之间的软弱层及水位变化的影响. 研究表明, 软弱层的厚度、力学参数、相对位置和水位的变化对路堤边坡稳定性有一定影响, 路堤边坡的稳定性随着软弱层厚度的增加而减小; 随着软弱层位置的不断上移, 路堤边坡的稳定性系数先是下降较快, 随后变缓; 当路堤内部存在软弱层时, 渗流力对路堤边坡稳定性的影响较为明显. 因此, 存在软弱层时水位变化对路堤整体稳定性的影响与没有软弱层时有较大差异.

关键词: 岩土工程; 水下填方路堤; 路堤稳定性; 软弱层; 水位变化; 边坡

中图分类号: U416.14 **文献标志码:** A **doi:** 10.3724/SP.J.1249.2021.02151

Slope stability of underwater fill embankment in mountainous area

LÜ Jiang¹, ZHAO Hui¹, YANG Biao², ZHAO Jiachen³, and SUN Honglei²

1) Hangzhou Transportation Investment and Construction Management Group Co. Ltd., Hangzhou 310024, Zhejiang Province, P. R. China

2) College of Civil Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, Zhejiang Province, P. R. China

3) College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang Province, P. R. China

Abstract: During construction of underwater embankment in mountainous area, there will be a weak layer between the embankment and the original mountain, which leads to the slope stability problem, because it is impossible to clear the surface and repair the slope of the original mountain below the water level. Based on the section of the Qianhuang expressway in the bay area of Zhejiang province, we carry out the numerical simulation of underwater embankment by using the finite element software GeoStudio and analyze the influence of the weak layer between submerged embankment and mountain as well as the variation of water level on the embankment slope stability. The results show that the changes of the thickness, the mechanical parameters, the relative position of the weak layer and the variation of water level have a certain impact on the stability of the embankment slope. With increase of the thickness of weak layer, the stability of the embankment slope decreases. With the continuous upward movement of

Received: 2020-03-11; **Revised:** 2020-09-15; **Accepted:** 2020-10-15

Foundation: Science and Technology Project of Zhejiang Provincial Communication Department (2019035)

Corresponding author: Professor SUN Honglei. E-mail: sunhonglei@zju.edu.cn

Citation: LÜ Jiang, ZHAO Hui, YANG Biao, et al. Slope stability of underwater fill embankment in mountainous area [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2021, 38(2): 151-156. (in Chinese)

the position of the weak layer, the stability coefficient of the embankment slope firstly decreases rapidly and then slows down. When there is a weak layer inside the embankment, the seepage force has a more obvious influence on the stability of the embankment slope. And the effect of water level change on the overall stability in the presence of weak layer is significantly different from that in the absence of weak layer.

Key words: geotechnical engineering; underwater fill embankment; stability of embankment; weak layer; variation of water level; side slope

中国有大量高速公路沿着山区湖边而建,路堤在建设过程中要进行水下填筑.在填方过程中,难以对水下的山体进行修坡和清表,填土路堤与山体坚硬地层之间会存在一定厚度的软弱层.受降雨和季节等原因影响,湖泊水位会上升或下降,导致路堤内部的渗流场发生变化^[1].这些因素会破坏路堤边坡的稳定性,从而影响公路的正常运营.

对于软弱层路堤来说,由于软弱层的土层性质和厚度不均匀,容易造成填方路堤滑动.刘俊^[2]分析了软弱层对填方路堤的稳定性影响,结果表明软弱层的位置主要影响路堤的稳定性,软弱层的厚度主要影响路堤的位移变化.软弱层厚度不均对填土路堤的稳定性也影响显著,当下坡脚软弱层厚度超过上坡脚时,将会加剧路堤的失稳^[3-4].李荣华^[5]通过对软土地基路堤的稳定性进行数值分析,得到了路堤稳定系数与软弱层厚度、软弱层黏聚力、内摩擦角等因素的回归关系式,并在实际工程中验证了其可靠性.此外,山区水下填筑堤边坡的稳定性与水位的变化有很大的关系.LANE等^[6-7]认为运用传统的 Morgenstern 图解法对水位变化条件下边坡的稳定性进行计算时存在一些限制,以有限元法为基础研究了水位下降比对边坡稳定性的影响.徐翔等^[8]采用数值模拟的方法,得到了库水位骤降时的边坡渗流特性和稳定性变化规律.边坡的稳定性系

数随着水位下降速率的增大而减小,并且土体的渗透系数越小,安全系数的下降就越明显^[9-10].临水路堤通常处于非饱和状态,土体中的非饱和吸力对边坡稳定性有不可忽略的影响^[11-12].目前的研究多集中在路基软弱层的性状和水位变化等单一因素对路堤边坡稳定性的影响,将两者综合考虑进行路堤稳定性分析的文献不多.本研究以千黄高速浙江省大湾区路段工程为例,分析了软弱层的厚度、力学参数、相对位置以及水位变化等对路堤整体稳定性的影响.

1 模型建立

1.1 工程概况与材料参数

结合千黄高速公路浙江省淳安段的地质勘察报告,选取一处水下填筑高度约为 16 m 的典型路基进行分析.千岛湖水库年平均最高水位高程 102 m,最低水位高程 93 m.在水位以下的路堤采用抛石填筑的方式,在 105 m 高程处设置平台,平台以上采用分层填筑分层压实,路堤边坡剖面图如图 1.其中, L 为软弱层顶部与水下填筑平台之间斜坡的长度.通过改变 L 的大小即可以达到改变模型中软弱层相对位置的目的.模拟采用的岩土体力学参数如表 1.

图 1 路堤边坡剖面图

Fig. 1 Section diagram of embankment slope

表 1 岩土体力学参数
Table 1 Mechanical parameters of soil

岩土体	重度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	饱和水体积分数/%	饱和渗透系数/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	黏聚力/ kPa	内摩擦角/($^{\circ}$)
填土路堤	19.6	25	5.5×10^{-6}	25	32.5
水下填筑路堤	21.9	25	5.2×10^{-4}	3	38.0
粉砂岩	22.3	30	2.0×10^{-7}	110	41.0
软弱层 I	16.5	35	5.0×10^{-9}	25	18.0
软弱层 II	18.0	35	2.5×10^{-8}	20	15.0
软弱层 III	18.5	35	1.0×10^{-8}	15	30.0

1.2 模型参数

本研究采用有限元软件 GeoStudio 对临水路堤边坡进行渗流和稳定性分析. 先用 Seep 对路堤进行稳态渗流分析, 得到路堤内部的初始地下水位线和孔隙水压力, 将此结果作为初始条件进行瞬态渗流分析, 得到各时间点的水头分布情况, 输入到 Slope 中.

渗流计算模型如图 2. 由图 2 可见, 模型右侧的边界条件分为两种, 位于水位线之下的部分为定水头边界, 位于水位线之上的部分假定没有水的渗入和渗出, 故边界条件定义为总流量 $Q = 0$, 其他边界均为不透水边界. 模型中的有限元网格模式采用非结构化的四边形和三角形网格.

图 2 渗流计算模型
Fig. 2 Calculation model of seepage

路堤的稳定性计算采用 Morgenstern-Price 法. 假设土条间的正应力和剪应力存在函数关系, 该算例选取半正弦函数. 先建立稳定性分析模型, 然后利用 Seep 传递来的所有节点水头信息, 计算出每个土条底面中心处的水头 $h^{[14]}$,

$$h = N \cdot H$$

其中, N 为插值函数向量; H 为节点处的水头向量.

路堤稳定性计算的模型尺寸与图 2 相似, 土体的本构模型采用 Mohr-Coulomb 屈服准则的理想弹塑性模型. 通过指定剪入口和剪出口, 搜索最危险

滑动面, 剪入口位置为路堤顶面左端 ($x=0$) 至路堤顶面右端 ($x=25 \text{ m}$), 剪出口位置为一级边坡的坡脚 ($x=37 \text{ m}$) 至整个路堤边坡的坡脚 ($x=116 \text{ m}$).

2 计算分析

2.1 软弱层厚度对路堤稳定性的影响分析

为了研究软弱层厚度对整体路堤稳定性的影响, 选取表 1 中的软弱层, 厚度分别为 0、1、2 和 3 m. 对 10 种不同工况下路堤的整体稳定性进行计

算,结果如图 3. 从图 3 可见,软弱层厚度对路堤的稳定性有明显影响. 无论软弱层是什么土质,路堤安全系数皆随着软弱层厚度的增加而降低. 路堤安全系数的下降率 $\alpha_{i \sim k} = (\text{软弱层厚度为 } k \text{ 时的安全系数} - \text{软弱层厚度为 } i \text{ 时的安全系数}) / \text{软弱层厚度为 } i \text{ 时的安全系数}$,见表 2. 其中, $\alpha_{0 \sim 1}$ 、 $\alpha_{1 \sim 2}$ 、 $\alpha_{2 \sim 3}$ 和 $\alpha_{0 \sim 3}$ 分别表示软弱层厚度从 0 增至 1 m、从 1 m 增至 2 m、从 2 m 增至 3 m 和从 0 增至 3 m 时路堤安全系数的下降率. 软弱层厚度从 0 增至 1 m 时,安全系数的减小量最大. 对于力学性质较差的软弱层 II,厚度为 3 m 时安全系数下降 31.2%. 因此,在路堤填方前对原状山体进行清理和修坡是有必要的. 对于水下难以进行清表的情况,应当考虑无法清表对安全系数的影响,并采取适当的措施提高路堤的整体稳定性.

图 3 路堤安全系数与软弱层厚度的关系

Fig. 3 Relationship between embankment safety factor and the thickness of weak layer

表 2 路堤安全系数下降率

Table 2 Decline rate of embankment safety factor %

土质	$\alpha_{0 \sim 1}$	$\alpha_{1 \sim 2}$	$\alpha_{2 \sim 3}$	$\alpha_{0 \sim 3}$
软弱层 I	12.1	6.6	6.1	22.9
软弱层 II	16.3	9.2	9.4	31.2
软弱层 III	5.1	4.4	2.9	11.9

2.2 软弱层相对位置对路堤稳定性的影响分析

在土层参数不变、软弱层厚度为 2 m 时,通过改变图 1 中的 L 来改变软弱层相对位置. L 的取值分别为 0、13、26、39 和 52 m 时,分别代表水下填筑路堤完全位于软弱层之上、3/4 位于软弱层之上、1/2 位于软弱层之上、1/4 位于软弱层之上和不存在软弱层 5 种情况. 以此对路堤的稳定性变化情况

进行分析,稳定性变化曲线如图 4.

从图 4 可见,随着软弱层顶部与水下填筑平台间距离的增加,路堤的稳定性逐渐上升. 当软弱层顶部与水下填筑平台间的距离为 39 ~ 52 m 时,路堤的安全系数达最大值,与不存在软弱层时路堤的安全系数相同. 这意味着如果水下填筑路堤位于软弱层之上的部分小于 1/4,就可以不用考虑软弱层对路堤稳定性的影响. 在相同条件下,软弱层的力学性质越差,路堤安全系数的变化就越明显.

图 4 路堤安全系数与软弱层位置的关系

Fig. 4 Relationship between embankment safety factor and the location of weak layer

2.3 水位变化对路堤稳定性的影响分析

假定软弱层的厚度为 2 m, $L = 0$, 即水下填筑路堤完全位于软弱层上方,水位在 30 d 内从 102 m 下降到 93 m,平均下降速度为 0.3 m/d. 水位保持 30 d 不变后,再按照相同速度使水位恢复到 102 m. 按照这种方式循环 2 次(图 5),以此分析水位的变化对路堤整体稳定性的影响.

由图 5 可知,当水位发生周期性变化时,路堤的整体稳定性也呈周期性变化. 路堤安全系数与时间的关系见图 6. 由图 6 可见,当水下填筑路堤与原状山体之间不存在软弱层时,路堤的安全系数随着水位的下降而逐渐增大. 这是由于路堤的渗透系数较大,在水位下降的过程中,路堤内外部水头几乎同步变化,与文献[13]中水位缓降的情况类似,可以忽略渗流对路堤稳定性的影响. 随着水位下降,土体的有效应力增加,因此路堤的整体稳定性上升. 同理,在水位上升的过程中,土体的有效应力逐渐减小,路堤的稳定性随之下降. 当水下填筑路堤与原状山体之间存在软弱层时,由于软弱层的渗透系数较小,路堤内部水头的变化滞后于外部水

图5 水位随时间变化曲线

Fig. 5 Variation of water level over time

图6 路堤安全系数与时间的关系

Fig. 6 Relationship between embankment safety factor and time

头^[14],路堤内外水头差较大,随着水位的下降,水头差会逐渐增大。此时渗流对路堤稳定性的影响处于主导地位,因此路堤的安全系数随着水位的下降而减小。在水位下降到93 m并保持稳定时,安全系数还会有小幅度上升。这是由于外部水位虽然保持稳定,但路堤内部水位相对滞后,还会有部分水向外渗流,而此时渗流的作用已经不再明显,路堤土的有效应力会逐渐增加。同理,在水位上升的过程中,渗流的影响仍处于主导地位,且路堤内部的水头小于外部水头,所以路堤的安全系数随着水位的上升而增大。在水位上升到102 m并保持稳定后,少量水继续向土体内部渗透,路堤内外水头差逐渐减小,渗流可以忽略不计,土体的有效应力逐渐降低,因此安全系数还会有所下降。

3 结 论

通过数值模拟,分析了软弱层厚度、相对位置和水位变化对路堤稳定性的影响,研究了不同软弱层性状和水位时路堤内部渗流场的变化情况,计算了路堤的安全系数,可知:

1) 填筑路堤和原状山体之间软弱层的存在,会对路堤的整体稳定性产生不利影响,软弱层越厚,路堤的稳定性越差。

2) 在软弱层厚度一定的情况下,当水下填筑路堤位于软弱层之上的部分大于1/4时才会对路堤的整体稳定性产生影响,因此当路堤内存在软弱层时,应综合考虑其厚度和相对位置对路堤稳定性的不利影响。

3) 水位的周期性变化也会引起路堤安全系数的周期性变化。当路堤与原状山体之间存在软弱层时,渗流对路堤安全系数的影响处于主导地位,因此安全系数随着水位的下降而减小,随着水位的上升而增加。在水位保持稳定的阶段内,路堤安全系数的变化主要取决于路堤土有效应力的变化情况。当路堤与原状山体之间不存在软弱层时,路堤安全系数的变化情况则与前者相反,随水位的下降而上升,随水位的上升而下降。

基金项目:浙江省交通运输厅科技资助项目(2019035)

作者简介:吕江(1978—),杭州交通投资建设管理集团有限公司高级工程师。研究方向:高速公路建造管理研究。
E-mail: 107604815@qq.com

引文:吕江,赵晖,杨杓,等.山区水下填方路堤边坡的稳定性分析[J].深圳大学学报理工版,2021,38(2):151-156.

参考文献 / References:

- [1] 张立舟,武娜,李宏,等.库水位升降对边坡内渗流场的影响[J].济南大学学报自然科学版,2020,34(2):113-117.
ZHANG Lizhou, WU Na, LI Hong, et al. Effect of rise and fall of reservoir water level on seepage field in slope [J]. Journal of University of Jinan Science and Technology, 2020, 34(2): 113-117. (in Chinese)
- [2] 刘俊.山区高速公路高填方路堤边坡失稳机理及灾害防治[D].福州:福州大学,2017.
LIU Jun. Instability mechanism and disaster prevention of highway high-filled embankment slope on the mountainous area [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2017. (in Chinese)

- [3] 黄明星, 蒋 鑫, 邱延峻. 基于剪切强度折减法的斜坡软弱地基路堤稳定性分析[J]. 铁道标准设计, 2010, 51(10): 40-43.
HUANG Mingxing, JIANG Xin, QIU Yanjun. Stability analysis of embankment on weak foundation by shear strength reduction method [J]. Railway Standard Design, 2010, 51(10): 40-43. (in Chinese)
- [4] 蒋 鑫, 邱延峻, 魏永幸. 软弱夹层性状对斜坡软弱地基填方工程稳定性的影响分析 [C]//第八次全国岩石力学与工程学术大会论文集. 北京: 科学出版社, 2004: 648-651.
JIANG Xin, QIU Yanjun, WEI Yongxing. Influence of weak layer's behavior on subgrade embankment stability on sloped weak ground [C]// Chinese Society for Rock Mechanics & Engineering. Proceedings of the Eighth National Congress of Rock Mechanics and Engineering. Beijing: Science Press, 2004: 648-651. (in Chinese)
- [5] 李荣华. 山区斜坡湿软地基公路路基稳定性研究[D]. 西安: 长安大学, 2010.
LI Ronghua. Study on stability of the subgrade in the slope soft foundation [D]. Xi'an: Chang'an University, 2010. (in Chinese)
- [6] LANE P A, GRIFFITHS D V. Assessment of stability of slopes under drawdown conditions [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, 126(5): 443-450.
- [7] MORGENSTERN N. Stability charts for earth slopes during rapid drawdown [J]. Geotechnique, 1963, 13: 121-131.
- [8] 徐 翔, 王义兴, 方 正. 降雨和库水联合作用下边坡稳定性变化规律[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(2): 51-58.
XU Xiang, WANG Yixing, FANG Zheng. Analysis on stability of a slope under rainfall and reservoir water level variation [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(2): 51-58. (in Chinese)
- [9] 年廷凯, 万少石, 蒋景彩, 等. 库水位下降过程中土坡稳定强度折减有限元分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(7): 2264-2269, 2302.
NIAN Tingkai, WAN Shaoshi, JIANG Jingcai, et al. Finite element analysis of slope stability under drawdown conditions by strength reduction technique [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(7): 2264-2269, 2302. (in Chinese)
- [10] 仇文岗, 王 尉, 高学成. 库区水位下降对库岸边坡稳定性的影响[J]. 武汉大学学报工学版, 2019, 52(1): 21-26.
ZHANG Wengang, WANG Wei, GAO Xuecheng. Influence of reservoirs water level drawdown on slope stability [J]. Journal of Wuhan University Engineering, 2019, 52(1): 21-26. (in Chinese)
- [11] 吴为东, 方江平, 毛理华, 等. 库区水位下降作用下非饱和土坡稳定性分析[J]. 河南科学, 2019, 37(6): 975-980.
WU Weidong, FANG Jiangping, MAO Lihua, et al. Stability analysis of unsaturated soil banks during the fall of water level [J]. Henan Science, 2019, 37(6): 975-980. (in Chinese)
- [12] MURRAY F, LU Haihua, FENG Tiejun. Combined seepage and slope stability analysis of rapid drawdown scenarios for levee design [J]. Geotechnical Special Publication, 2011(21): 1595-1604.
- [13] 万少石. 涉水边坡稳定性的三维强度折减有限元分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
WAN Shaoshi. Three-dimensional slope stability analysis by shear strength reduction finite element method under drawdown condition [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [14] 陈风光, 史卫国. 水位下降对沿河路堤边坡稳定性的影响分析[J]. 路堤工程, 2016, 32(6): 36-39, 44.
CHEN Fengguang, SHI Weiguo. Effect analysis of water level drop on stability of subgrade slope along river [J]. Subgrade Engineering, 2016, 32(6): 36-39, 44. (in Chinese)

【中文责编: 坪 梓; 英文责编: 之 隼】