

水下填筑路堤的稳定性分析

吕江¹, 赵晖¹, 赵家琛², 杨杓³, 孙宏磊^{3*}

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

摘要: 为研究路堤在复杂水下填筑条件下的稳定性, 以千黄高速千岛湖库区路段工程为背景, 采用有限元软件 GeoStudio 分析了不同水下填筑坡度和不同厚度薄弱层对路堤稳定性的影响。经确定性分析和概率分析方法对比得出以下结果: 水下填筑的坡度越缓, 薄弱层厚度越小, 路堤安全系数越高, 薄弱层对路堤稳定性的影响大于坡度; 考虑土层抗剪强度参数的不确定性, 得出存在薄弱层时, 路堤失效概率在水下填筑坡度 1 : 1.3 的情况下最低。
关键词: 路堤稳定性; 水下填筑坡度; 薄弱层; GeoStudio

中图分类号: TU91 文献标识码: A 文章编号: 2096-7195(2020)05-0372-04

Analysis on stability of underwater embankment

LÜ Jiang¹, ZHAO Hui¹, ZHAO Jia-chen², YANG Biao³, SUN Hong-lei^{3*}

(1. Hangzhou Transportation Investment and Construction Management Group Co., Ltd., Hangzhou 310024, China;
2. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;
3. College of Civil Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: In order to study the stability of the embankment under complex underwater filling conditions, the finite element software GeoStudio was used for the analysis. Based on the Qiandao Lake Reservoir section of the Qianhuang Expressway, the influence of underwater embankment slope and the weak layer was considered. After comparing the deterministic analysis with the probabilistic analysis method, the following results are obtained. The slower the slope of underwater filling, the smaller the thickness of the weak layer, and the higher the safety factor of the embankment. The weak layer has more influence on the stability of the embankment than the slope. Considering the uncertainty of the shear strength parameters of the soil layer, it is concluded that in the presence of weak layers, the embankment failure probability is the lowest when the slope of underwater filling is 1 : 1.3.

Key words: stability of embankment; slope of underwater fill; weak layer; GeoStudio

0 引言

我国较多高速公路选线为沿山或沿湖, 路堤的稳定性问题是公路建设及后续运营过程中所面临的一个重大问题。一些临水路堤需进行水下填筑, 填土路堤与原状山体之间可能存在一定厚度的薄弱层, 而填筑条件较为复杂, 一般很难对水下的土体进行修坡和清表, 不同水下填筑路堤的坡度和薄弱层的存在都会对路堤稳定性造成影响, 影响公路的正常运营。

一些学者已从路堤土力学性质和路堤坡度的角度, 对路堤稳定性进行了研究。刘俊^[1] 考虑到地基软弱层这一因素, 量化分析了软弱层的厚度和地基坡度对高填方路堤的稳定性影响。黄明星等^[2] 和蒋鑫等^[3] 还分析了薄弱层厚度的不均匀性对填土路堤稳定性的影响, 结果表明当下坡脚薄弱层厚度超过上坡脚时, 会加剧路堤的失稳。

而目前的研究均通过安全系数来评判路堤稳定性, 实际上一个确定的安全系数与路堤失效概率之间并没有直接的联系, 安全系数较高的边坡也可

收稿日期: 2020-09-14

基金项目: 浙江省交通运输厅科技项目 (2019035)。

作者简介: 吕江 (1978—), 男, 浙江绍兴人, 高级工程师, 主要从事高速公路建造管理研究。E-mail: 107604815@qq.com。

*通讯作者: 孙宏磊 (1981—), 男, 博士, 副教授, 主要从事土动力学方面的研究工作。E-mail: sunhonglei@zju.edu.cn。

能会比安全系数较低的更不稳定^[4]。因此本文以千黄高速千岛湖库区路段工程为背景,对比确定性方法和概率分析方法,综合评判水下填筑路堤的稳定性。

1 工程概况及计算参数

结合项目勘察报告,选定一处水下填筑高度约16 m的典型库区路基进行分析,由水文资料确定水位高程为102 m,在水位以下的路堤采用抛石填筑的方式,在103 m高程处设置平台,平台以上采用分层填筑分层压实。

文中采用 GeoStudio 对填土路堤的渗流和稳定性进行模拟分析。由勘察报告确定路堤剖面,采用非结构化的四边形和三角形网格,计算模型示意图如图1所示,模型左侧和底部为固定边界,右侧水位以下部分为定水头边界。岩土体本构模型采用遵循 Mohr-Coulomb 的理想弹塑性模型,力学参数如表1所示。

在计算过程中,先用 SEEP/W 程序进行填土路堤的瞬态渗流分析,再将渗流场中的水头值输入到边坡稳定性计算程序 SLOPE/W 中进行分析。在路堤稳定性的确定性分析中运用 Morgenstern-Price 法进行安全系数的计算,条间力函数采用半正弦函数。

土层参数具有不确定性,通常服从正态分布或对数正态分布^[5],本文假设参数服从正态分布,为了最大限度地考虑参数不确定性,将变异系数取为相关资料^[6-8]中的最大值,内摩擦角与黏聚力的变异系数分别取0.2和0.4。在概率分析时,针对路堤稳定性问题,采用 Monte Carlo 抽样方法,对水下填筑路堤和软弱层的抗剪强度参数进行随机抽样。

对于路堤稳定性的评价,一般可由抽样结果计

算失效概率,但计算结果与抽样次数密切相关,要得到准确结果相对应的样本量较大,计算效率较低。因此本文通过可靠性指标 β 和失效概率 p_f 来描述稳定性,抽样次数可相应减少,文中取1 000次^[9]。定义如下:

$$\beta = \frac{\mu - 1}{\sigma} \quad (1)$$

$$p_f = 1 - \Phi(\beta) \quad (2)$$

式中: μ 为样本对应安全系数的均值; σ 为方差; Φ 为标准正态分布函数。

2 水下填筑坡度及薄弱层对路堤稳定性的影响分析

2.1 安全系数分析

为了研究水下填筑路堤的不同坡度对路堤整体稳定性的影响,模型共分为4种工况,对应的路堤坡度分别为1:0.75、1:1、1:1.3和1:1.7。同时考虑到水下填筑路堤和原状山体之间可能形成薄弱层,因此在每种工况下又包括薄弱层厚度分别为0 m、1 m、2 m、3 m这4种情况。对16种不同工况下路堤的整体稳定性进行了比较,其中一种临界滑移面如图2所示。

安全系数计算结果如图3所示,结果表明,在薄弱层厚度一定时,路堤安全系数随着坡度的变缓而逐渐增加,薄弱层厚度为3 m时,填筑坡度的改变对路堤安全系数的影响已十分微小。在坡度一定的情况下,路堤安全系数皆随着薄弱层厚度的增加而降低,薄弱层的存在对路堤安全系数的影响十分显著。与不存在薄弱层的情况对比,薄弱层厚度1 m的路堤安全系数下降了约20%。因此可得出水下填筑路堤的稳定性由水下填筑坡度和薄弱层共同控制,其中薄弱层对安全系数的影响更大。

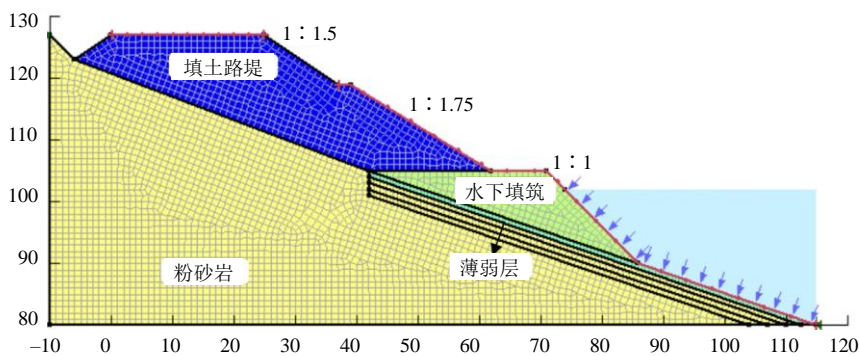


图1 计算模型示意图(单位:m)

Fig. 1 Schematic diagram of calculation model (Unit: m)

表 1 岩土体力学参数表

Tab. 1 Mechanical parameters of rock and soil mass

| 土层 | 重度/(kN/m ³) | 饱和体积含水率/% | 饱和渗透系数/(m/s) | 黏聚力 c/kPa | 内摩擦角 $\varphi/^\circ$ |
|--------|-------------------------|-----------|----------------------|-----------|-----------------------|
| 填土路堤 | 19.6 | 25 | 5.5×10^{-6} | 25 | 32.5 |
| 水下填筑路堤 | 21.9 | 25 | 1.7×10^{-5} | 2 | 37 |
| 薄弱层 | 17.0 | 30 | 1×10^{-9} | 20 | 15 |
| 粉砂岩 | 22.3 | 30 | 2×10^{-7} | 110 | 36 |

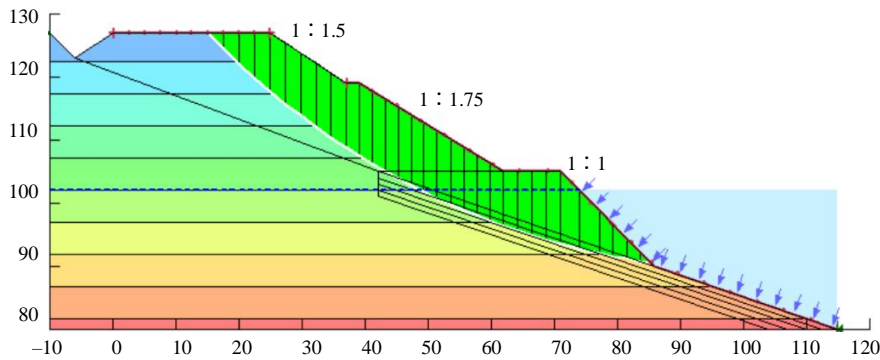


图 2 临界滑移面示意图 (单位: m)

Fig. 2 Schematic diagram of critical slip surface (Unit: m)

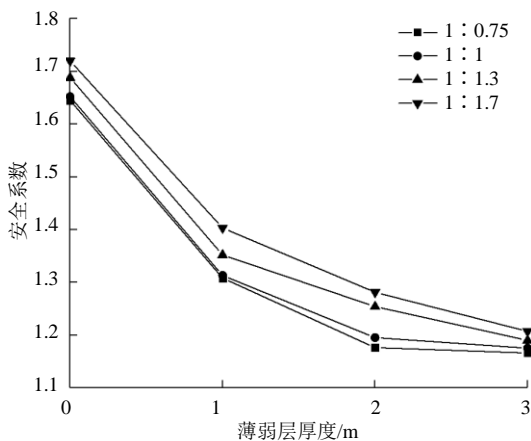


图 3 路堤安全系数变化曲线

Fig. 3 Curves of safety factor of embankment

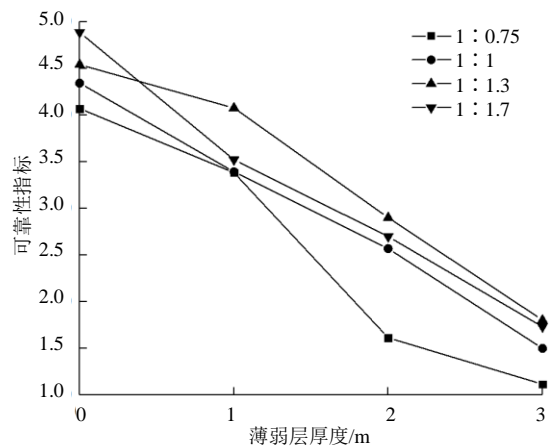


图 4 路堤稳定可靠性指标变化曲线

Fig. 4 Curves of reliability of embankment stability

2.2 失效概率分析

在前文分析模型的基础上,用概率分析方法进行路堤稳定性的可靠性指标和失效概率分析,计算结果如图 4 和图 5 所示。可靠性指标与失效概率一一对应,可靠性指标越高,失效概率越低,路堤稳定性越高。

当水下填筑坡度一定时,路堤的可靠性指标变化趋势与安全系数相同,随着薄弱层厚度增加,路堤失效概率增大。而存在薄弱层时,随着水下填筑坡度减缓,可靠性指标先增大后减小,当水下填筑路堤的坡度达到 1:1.3 时,路堤失效概率最小,与确定性分析方法所得结果不一致。由此可知,在薄弱层主导路堤稳定性的情况下,土体抗剪强度参数

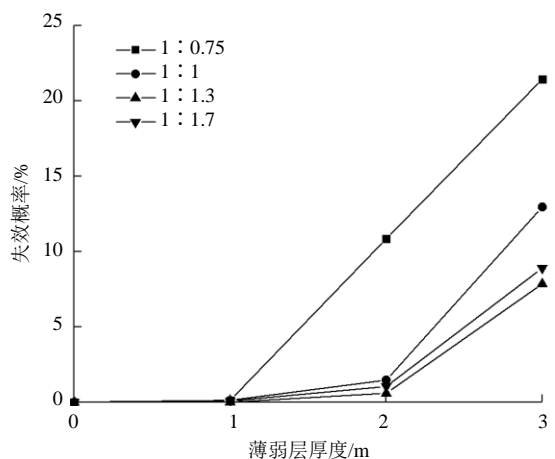


图 5 路堤失效概率变化曲线

Fig. 5 Curves of failure probability of embankment

的不确定性对路堤稳定性分析结果有一定影响。推断在坡度 1:1.3 时,填筑路堤的下部支撑力达到临界状态,在坡度进一步减缓时,填筑路堤与薄弱层的接触范围增大,路堤失效概率反而会呈现出上升的趋势。因此结合概率分析方法进行路堤稳定性的评价,具有更高的可信度。

3 结 论

以千黄高速千岛湖库区路段工程为背景,分别采用确定性方法和概率分析方法,研究水下填筑坡度及薄弱层对路堤稳定性的影响,得到的主要结论如下:

(1) 水下填筑路堤的稳定性由水下填筑坡度和薄弱层共同控制,水下填筑坡度越陡,薄弱层越厚,路堤安全系数越低,其中薄弱层对安全系数的影响更显著。

(2) 当水下填筑坡度一定时,路堤的可靠性指标变化趋势与安全系数相同。而存在薄弱层时,随着水下填筑坡度减缓,可靠性指标先增大后减小,当水下填筑路堤的坡度达到 1:1.3 时,路堤失效概率最小。

(3) 土体抗剪强度参数的不确定性对路堤稳定性分析结果有一定影响,结合概率分析方法进行路堤稳定性的评价,具有更高的可信度。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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(10): 40-43.
HUANG Ming-xing, JIANG Xin, QIU Yan-jun. Stability of embankment on sloped weak ground based on shear strength reduction method[J]. Railway Standard Design, 2010(10): 40-43.
- [3] 蒋鑫, 邱延峻, 魏永幸. 薄弱夹层性状对斜坡薄弱地基填方工程稳定性的影响分析[C]//中国岩石力学与工程学会. 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 Yan-jun, WEI Yong-xing. Analysis of the Impact of weak interlayer characteristic on fill project on sloped weak ground[C]//Chinese Society of Rock Mechanics and Engineering. Proceedings of the 8th National Conference on Rock Mechanics and Engineering. Beijing: Science Press, 2004: 648-651.
- [4] 李萍, 王秉纲, 李同录, 等. 陕西地区黄土路堑高边坡可靠度研究[J]. 中国公路学报, 2009, 22(6):18-25.
LI Ping, WANG Bing-gang, LI Tong-lu, et al. Study of reliability for loess cutting high slopes in Shanxi province[J]. Chinese Journal of Highway and Transport, 2009, 22(6): 18-25.
- [5] 陈祖煜, 汪小刚, 杨健, 等. 岩质边坡稳定性分析[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [6] PHOON K K, KULLHAWY F H. Characterization of geotechnical variability[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36: 612-624.
- [7] PHOON K K, KULLHAWY F H. Evaluation of geotechnical property variability[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36(4): 625-639.
- [8] LUMB P. Soil mechanics-new horizons. chapter 3: application of statistics in soil mechanics[M]. London: Publication of Butterworth & Company Limited, 1974.
- [9] 周世良, 刘小强, 尚明芳, 等. 基于水-岩相互作用的泥岩库岸时变稳定性分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(7): 1933-1939.
ZHOU Shi-liang, LIU Xiao-qiang, SHANG Ming-fang, et al. Time-varying stability analysis of mudstone reservoir bank based on water-rock interaction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(7): 1933-1939.