

傍山软基高填方路堤边坡稳定性及加固效果分析

郭力群¹, 戴俊涛^{1,2}, 陈亚军¹, 彭兴黔¹

(1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 泉州 362021;

2. 厦门市市政工程设计院有限公司, 福建 厦门 361000)

摘要:以福建省某路基工程傍山软基高填方路堤边坡为例,采用有限元软件 GeoStudio,结合极限平衡法和有限元法,对该路堤边坡的稳定性进行动态分析,结果表明:该方法在评价傍山软基高填方路堤边坡稳定性上是有效的,尤其是当安全系数临近 1.0 时,可以结合有限元模拟的应变变形更准确地判断路堤边坡稳定性,为今后类似路堤边坡工程的稳定性评价提供有益参考。

关键词:傍山软基高填方;路堤边坡稳定性;有限元法;极限平衡法;数值模拟

中图分类号:TU413.62 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.03.021

Analysis of the high fill embankment stability and strengthening effects for mountain-side soft clay foundation

GUO Li-qun¹, DAI Jun-tao^{1,2}, CHEN Ya-jun¹, PENG Xing-qian¹

(1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China;

2. Xiamen Municipal Engineering Design Institute Co., Ltd., Xiamen 361000, China)

Abstract: With one section of a subgrade engineering project in Fujian, the mountain-side soft foundation of high fill embankment as example, by finite element software GeoStudio, which combined with the limit equilibrium and finite element modeling, a dynamic analysis was performed on the mountain-side soft foundation of high fill embankment. The results showed that the method was effective in the stability evaluation of the mountain-side soft foundation of high fill embankment slope, especially when the safety coefficient closes to 1.0, the finite element simulation of the strain deformation can be combined to determine more accurately embankment slope stability, which can provide a reference for the similar slope stability evaluation in future.

Key words: mountain-side soft clay foundation of high fill embankment; embankment slope stability; finite element method; limit equilibrium method; numerical simulation

0 引言

目前评价边坡稳定性主要有 2 种方法,即定量

法和定性法^[1],其中定量法是边坡稳定性评价的发展趋势.定量评价法包括以极限平衡理论为基础的安全系数法和以有限元理论为基础的应变变形法,

收稿日期:2013-03-24

基金项目:福建省区域重大专项(2011Y3005)

作者简介:郭力群(1970—),男,福建省泉州市人,华侨大学副教授,硕士,主要研究方向为岩土工程和矿山开采。

实际工程中往往只采取单一的方法对边坡稳定性进行评价^[2-6]. 对于结构简单的边坡, 单一的评价方法能满足要求, 但对于像傍山软基高填方路堤这样的复杂边坡, 单一的评价方法就不能准确地评价其稳定性了, 需要结合不同方法进行综合评价. 随着计算技术的提高, 国内外在对复杂边坡稳定性进行评价时, 已逐步采用有限元模拟、极限平衡法等方法, 以提高边坡稳定性评价的准确性^[7-10]. 本文拟综合极限平衡法和 GeoStudio 有限元软件模拟的应变变形 2 种方法, 对傍山软基高填方路堤边坡稳定性进行动态评价, 以期为类似复杂边坡工程稳定性评价提供有益参考.

1 工程概况

福建省某一填方高度达 17 m 的傍山软基路堤边坡, 其路基一侧位于承载力高的山坡上, 另一侧位于下伏较厚淤泥质土层的软基上. 承载力在路基横断面方向上存在明显差异, 且软基部分的淤泥质土层在横断面方向外倾坡度较大, 这对路堤边坡的稳定性和路基沉降控制非常不利. 原设计方案仅采用变间距水泥搅拌桩对软基进行处理, 桩间距为 0.9 m 和 1.1 m, 正方形布桩, 桩径 0.5 m, 桩长 8 m 左右, 以全风化岩为持力层. 路堤填筑接近 11 m 高

时, 监测数据显示靠近软基一侧路堤坡脚处深层水平位移速率超过预警值 5 mm/d, 且临近坡脚的水田地面隆起明显, 呈现滑坡前的征兆, 经研究需采取加固措施. 加固方案为反压护道加预应力锚索抗滑桩, 加固模型如图 1 所示.

2 地质条件

在勘察深度以内, 地基土自上而下分为 4 层: ①粉质黏土(半挖半填土层), 以灰黄、黄色等为主, 稍湿~湿, 密实, 工程性质较好, 承载力较高; ②淤泥质土, 青灰色, 饱和, 流塑, 具有高压缩性和高灵敏度, 厚度 3.5~7.5 m; ③全风化岩角砾晶屑凝灰岩, 灰色, 中密状; ④强风化角砾晶屑凝灰岩, 灰、灰褐、灰黄、土黄色.

其中, 淤泥质土层具有含水量高、孔隙率大、低密度、高压缩性、低透水性等特性, 而且在横断面方向有明显的外倾坡度, 是控制路基稳定和路基变形的主要土层. 各土层主要参数如表 1 所示.

3 搅拌桩处理后的路堤边坡稳定性分析

GeoStudio 软件是一款专业的工程软件, 其中 SLOPE 模块和 SIGMA 模块可以进行边坡工程稳定性

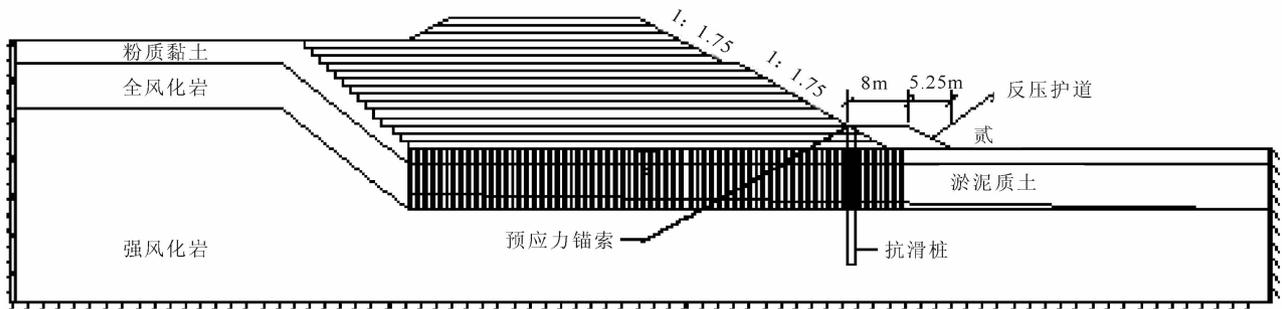


图 1 路堤边坡加固模型

表 1 各土层主要物理参数

序号	土层名称	含水率 $\omega/\%$	密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	孔隙比 e_0	压缩模量 E_{s1-2}/MPa	粘聚力 C/kPa	内摩擦角 $\Phi/^\circ$	渗透系数 $K/(10^{-6} \text{cm} \cdot \text{s})$
①	粉质黏土	23.5	2.05	0.652	9.76	[27.1] (20.6)	[30.0] (21.1)	100~120
②	淤泥质土	62.8	1.59	1.770	1.62	[32.3] {11.4} (17.8)	[24.4] {0.7} (4.0)	1.3~3.7
③	全风化岩	20.0	2.00	0.606		{60.3}	{12.3}	350

注:[]表示三轴固结排水剪指标,{ }表示三轴固结不排水剪指标,()表示直剪快剪指标.

分析,但两者的原理不同^[10-11]. SLOPE 模块专门用于边坡稳定性分析,其理论基础为极限平衡理论; SIGMA 模块用于分析岩土应力应变,其理论基础为有限元理论. 因此,可结合两者的计算结果,综合评价边坡的稳定性.

3.1 路堤边坡稳定性的 SLOPE 分析

在分析路堤边坡稳定性前,首先确定天然边坡的稳定状态,经 SLOPE 计算得其安全系数为1.730,处于稳定状态. 在路堤填筑过程中,天然边坡的稳定性是在不断增强的,因此只需要考虑新形成的路堤边坡的稳定性. 图2是经搅拌桩处理的路堤边坡 SLOPE 示意图,模型左右两侧范围大小为其填土高度的3倍,路基土层厚度取1倍填土高度,土体采用摩尔-库伦模型,其安全系数随填土高度的变化情况如图3所示.

从图3可以看出,4种方法的计算结果存在差异,这是因为4种不同方法满足要求的条件和所做的假设条件不同. 其中只有 Morgenstern-Price 法是严格意义上的条分法^[12],因为该方法既满足力平衡又满足力矩平衡,且滑动面是任意形状.

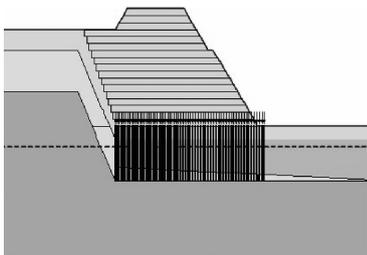


图2 搅拌桩处理的路堤边坡 SLOPE 模型

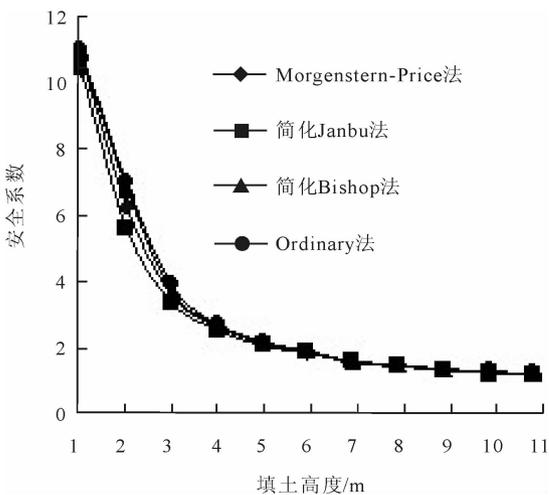


图3 安全系数与填土高度关系曲线

因此,本文以 Morgenstern-Price 法计算结果为准,将其他3种方法作为参考. 由图3可知,填土高度为10 m时,路堤边坡的安全系数为0.987,考虑时间固结因素,可认为处于临界状态;填高至11 m时,路堤边坡的安全系数为0.922,由安全状态变为非稳定状态.

3.2 路堤边坡稳定性的 SIGMA 分析

为了进一步分析路堤边坡稳定性,可以通过有限元 SIGMA 模块对其应变变形进行分析, SIGMA 模型如图4所示. 淤泥质土采用修正剑桥模型,其余土层采用弹塑性模型,模型左右两侧只固定水平位移,模型底部为完全固定边界.

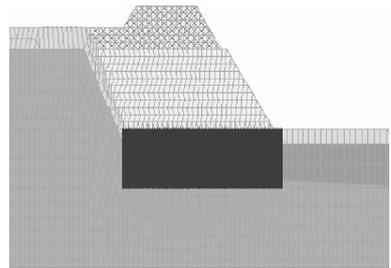


图4 搅拌桩处理的路堤边坡 SIGMA 模型

为分析路堤边坡在填筑过程中应变变形与稳定性的关系,在路基的底面选取相应的监测点:2个沉降点,分别为路中和路肩;路堤边坡处的深层水平位移监测点. 图5为路中和路肩沉降随填筑高度变化的关系曲线,图6为路肩深层水平位移随填筑高度的变化曲线.

从图6可以看出,填筑高度达到11 m时,最大深层水平位移速率达到5.98 mm/d,超过规范允许值5 mm/d,具有边坡破坏的明显征兆,与之前采用

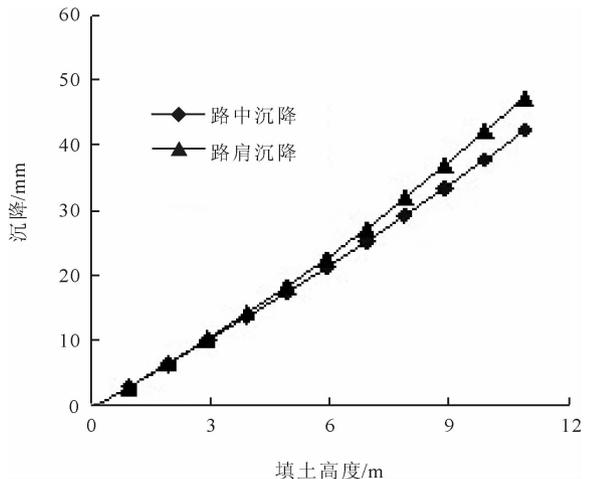


图5 路基沉降与填土高度关系曲线

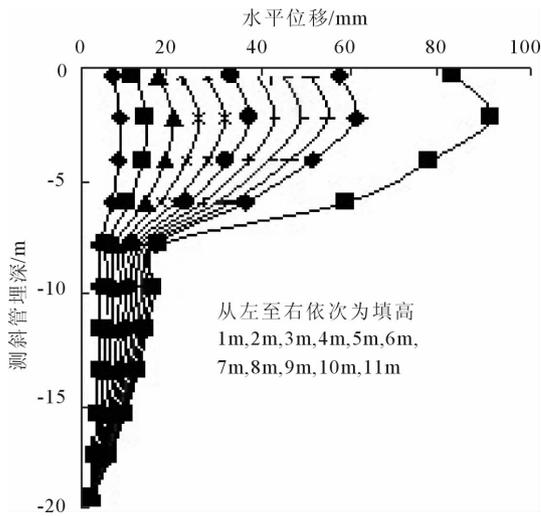


图6 深层水平位移与填土高度关系曲线

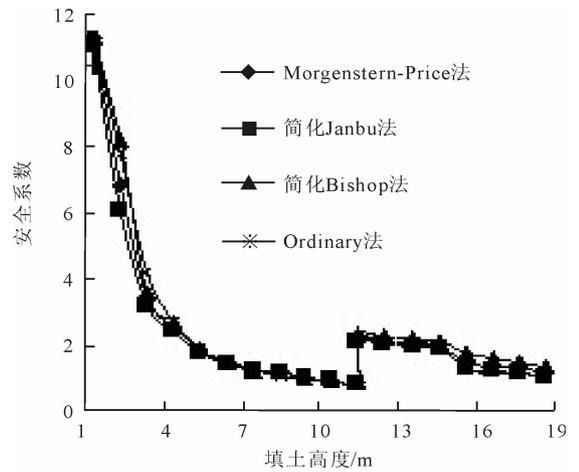


图8 加固后路堤边坡安全系数与填土高度关系曲线

安全系数分析的结果一致。

4 路堤边坡加固效果分析

4.1 路堤边坡加固效果的 SLOPE 分析

路基经搅拌桩处理后,其稳定性仍不能满足要求,必须对已经填筑的路堤边坡进行加固,以满足工程安全性要求.从工期、成本效益等方面进行比较分析后,确定加固方案为反压护道加预应力锚索抗滑桩.其中抗滑桩采用 C35 混凝土,直径 1.8 m,桩间中心距 3.6 m,抗滑桩抗剪承载力为 3 000 kN.预应力锚索采用高强度低松弛钢绞线,每束锚索设计抗拔力为 800 kN,单根锚索总长度为 30 m,锚固段长度为 12 m.考虑运营期间的车辆荷载对路堤边坡稳定性的影响,取 1 m 填土高度作为车辆荷载.加固后路堤边坡 SLOPE 模型如图 7 所示,路堤边坡安全系数随填土高度变化情况如图 8 所示.

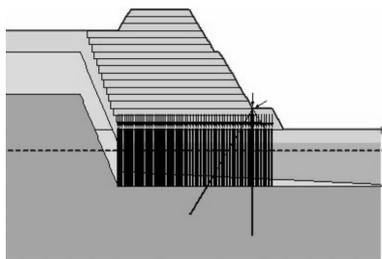


图7 路堤边坡加固后的 SLOPE 模型

从图 8 可以看出,路堤边坡经加固后,其稳定性大幅度增强:当填高至 11 m 时,其安全系数为 2.207;当填高至 17 m 时,其安全系数为 1.333;考虑车辆荷载后,安全系数为 1.242,仍能满足规范要求.

4.2 路堤边坡加固效果的 SIGMA 分析

从应变变形来分析路堤边坡的加固效果.图 9 为路堤边坡在 SIGMA 模块中的计算模型,图 10 为加固后路基沉降曲线图,图 11 为加固后路肩处深层水平位移曲线图.

从图 11 可以看出,经加固后的路堤边坡,其深层水平位移得到有效的控制,这是因为在抗滑桩和

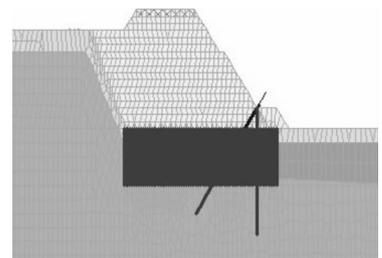


图9 加固后的路堤边坡 SIGMA 模型

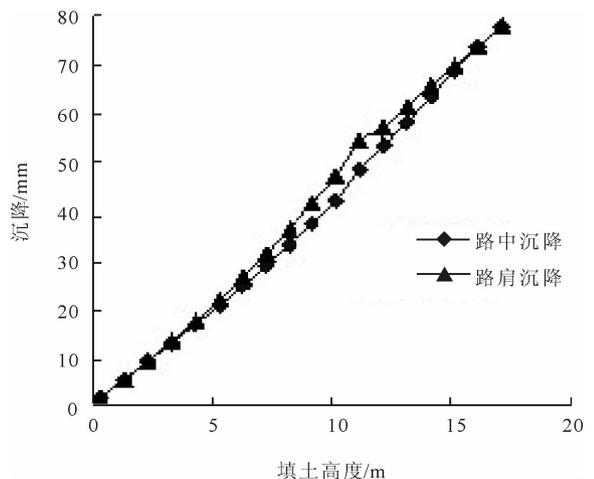


图10 路基沉降与填土高度关系曲线

预应力锚索的共同作用下,坡脚处深层水平位移被有效约束,最大水平位移明显减小,其随填土高度变化情况如图 12 所示。

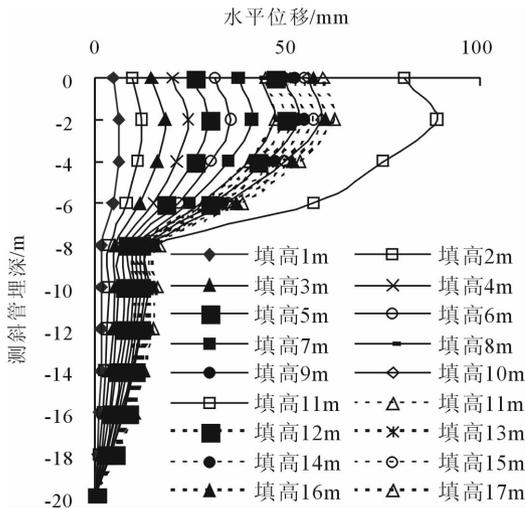


图 11 深层水平位移与填土高度关系曲线
注:实线为未加固的数据,虚线为加固后的数据

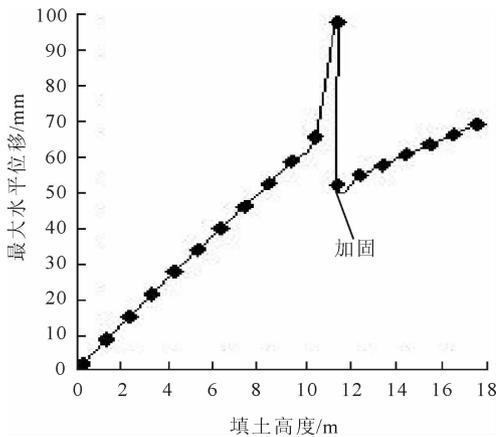


图 12 最大深层水平位移与填土高度关系曲线

从图 10—图 12 可以看出,路堤经加固后,沉降和深层水平位移的变化都在规范允许范围内。

5 结论

傍山软基高填方路堤边坡在填筑过程中,其稳定性是在不断变化的,是动态问题. 本文采用有限元软件 GeoStudio, 结合极限平衡法和有限元法, 对该路堤边坡的稳定性进行动态分析, 得出如下结论:

1) 傍山软基高填方路堤由于自身的特点, 在评价其边坡稳定性时, 应避免采用单一的评价方法, 宜结合极限平衡法的安全系数和有限元模拟的应变变形综合考虑. 尤其是当安全系数临近 1.0 时, 可以结合有限元法模拟的应变变形, 从而更准确地判断路堤边坡稳定性。

2) 对路基沉降、深层水平位移的模拟分析, 可用于同施工过程中获得的实测结果进行对比, 实时控制路堤边坡稳定性, 以实现信息化设计和施工。

参考文献:

- [1] 钱家欢,殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京:中国水利水电出版社,2003.
- [2] Giffitns D V, Lane P A. Slope stability analysis by finite element[J]. Geotechnique, 1999, 49(3):387.
- [3] 周林,何晓明. 襄十高速公路边坡稳定性分析与加固[J]. 武汉工业学院学报, 2006, 25(3):76.
- [4] 陈涛,郭院成,谢春庆. 平坦地地上山区高填方路堤变形及稳定性分析[J]. 郑州大学学报:工学版, 2009, 30(3):39.
- [5] 蔡庆娥,马建勋. 某公路边坡稳定性的二维有限元分析[J]. 岩土工程界, 2003, 7(3):62.
- [6] 余蓓,郑玉元,戚德印. 岩质高边坡稳定性的有限元分析[J]. 郑州轻工业学院学报:自然科学版, 2011, 26(2):94.
- [7] Duncan J M. State of the art: limit equilibrium and finite element analysis of slope[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1996, 122(7):577.
- [8] 赵群,蔡红涛. 有限元与极限平衡法在土坡稳定性分析中的综合应用[J]. 天津城市建设学院学报, 2005, 11(4):267.
- [9] 曾亚武,田伟明. 边坡稳定性分析的有限元法与极限平法的结合[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(S2):5355.
- [10] 孙增奎,童海涛. 岩质边坡稳定性分析中极限平衡法与有限元法的比较[J]. 岩土工程技术, 2005, 19(2):98.
- [11] 曾繁文. 基于 GEO-Studio 软件对排土场边坡稳定性的分析[J]. 科技信息, 2013(2):182.
- [12] Morgenstern N R, Price V E. The analysis of the stability of general slip surfaces[J]. Journal of Terramechanics, 1966, 3(1):74.