

在软土地基上有反压护道路堤及堤坝的稳定计算

张玉成¹, 杨光华^{1,2}, 胡海英^{1,3}, 张有详¹

(1.武汉大学 土木建筑工程学院, 武汉 430072; 2.广东省水利水电科学研究院, 广州 510610; 3.郑州大学 土建学院, 郑州 450002)

摘要: 用反压护道对软土路基进行处理, 是保证路堤及堤坝稳定常用的工程措施之一。而目前较常使用的极限平衡法在对有反压护道的路堤及堤坝稳定性进行分析计算时, 其结果及搜索到的滑动面位置和形状与实际差别较大。通过强度折减分析了不同工况下有反压护道的路堤的稳定性, 并与极限平衡法进行了对比, 结果表明, 强度折减法的分析结果更接近工程实际情况。利用早期得出的复杂荷载作用下路堤的填土极限高度计算公式, 实现用填土极限高度控制路堤的稳定性。最后, 以工程实例验证了强度折减和填土极限高度判断有反压护道路堤稳定性是切实可行的。

关键词: 软土地基; 反压护道; 路堤; 稳定性

中图分类号: TU 470

文献标识码: A

Stability study of embankment or dam with back berm on soft soil foundation

ZHANG Yu-cheng¹, YANG Guang-Hua^{1,2}, HU Hai-ying^{1,3}, ZHANG You-xiang¹

(1.School of Civil and Architectural Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2.Guangdong Research Institute of Resources and Hydropower, Guangzhou 510610, China; 3. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Putting back berm on the soft soil foundation is a method of ensuring the stability of the embankment or dam. The limit equilibrium method is commonly used to analyze the stability of embankment or dam with back berm, but there exists a difference between the results and the critical slope surface exist a difference according to the limit equilibrium method and its real value. In this paper, the stability of embankment with back berm under different working conditions is analyzed with nonlinear FEM strength reduction method. The calculation results show that its results are consistent with the real condition accorded well to the traditional limit equilibrium method. The stability of embankment under complicated loads may be judged by maximum height of the embankment. Actual engineering example shows that the strength reduction FEM and maximum height of the embankment were feasible to assess slop stability.

Key words: soft soil foundation; back berm; embankment; stabilization

1 引言

我国地域辽阔, 软土广泛分布于我国东南沿海和内陆地区, 例如: 广州、珠海、天津、上海、杭州、武汉等地区。软土的主要特点是含水率高、抗剪强度低、压缩性大、灵敏度高; 在荷载的作用下, 地基承载力低, 容易发生稳定事故, 地基沉降变形大, 不均匀沉降也大, 而且沉降稳定历时较长^[1,2]。而在软土上修筑公路或堤坝又是在工程实践中经常遇到的工程问题。在软土路基上修筑公路或堤坝, 稳定和沉降是技术上的两大难题, 其中稳定性问题又是最基本的问题, 关系着工程的安全、施工进度、

工程质量、造价等至关重要的问题。因而, 软土路堤及堤坝的稳定性分析是路堤和堤坝设计中最主要的工作之一^[3]。

通用的软土路堤及堤坝稳定性分析方法是极限平衡法, 当软土比较均匀、厚度较大时, 该方法计算的结果和实际勘测结果比较接近, 并且滑动面是一个近似圆柱面^[3], 如图 1 所示。有反压护道的路堤及堤坝见图 2。其搜索的滑动面位置和形状与实际情况有出入。另外, 利用常规地基强度计算的路堤填土极限高度只能针对矩形荷载的情况^[4], 如图 3 所示。而对于图 4 所示复杂荷载作用下路堤或堤坝填土极限高度计算公式较少见到。本文利用强度

折减计算了不同工况条件下有反压护道路堤及堤坝的稳定性，并与瑞典圆弧法、Bishop 法和 Janbu 法的计算结果进行了比较分析；同时，利用文献[5]给出的复杂荷载作用下路堤或堤坝填土极限高度计算公式计算了反压护道路堤的填土极限高度，并将其与强度折减计算结果进行了对比分析。最后通过一个具体的工程实例对上述方法进行了验证。

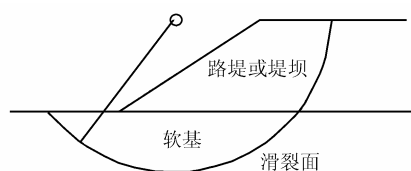


图1 均质路堤或堤坝圆弧型滑面

Fig.1 Circular failure face of homogeneous embankment or dam

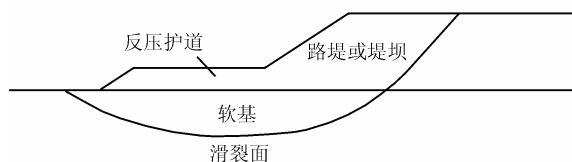


图2 有反压护道路堤或堤坝非圆弧型滑面

Fig.2 Circular failure face of homogeneous embankment with back berm

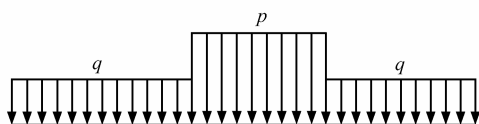


图3 矩形荷载作用下软土地基

Fig.3 Soft soil foundation under rectangular uniform load



图4 复杂荷载作用软土地基

Fig.4 Soft soil foundation under complicated load

2 强度折减法的优越性

软土地基上路堤及堤坝稳定性分析方法，大多数采用极限平衡法原理，在过去的几十年中，曾发展过十几种方法，其主要不同在于推求安全系数方程所用的方法不同以及问题静定化所用的假定不同。对于均质边坡的稳定性计算，基本能满足工程需要，但是对于软土厚度较浅或有软弱夹层或有反压平台的边坡及路堤，求得安全系数和搜索得滑动面位置不能很好地反映工程实际情况，并且极限平衡法求得的安全系数，没有考虑土体本身的应力-

应变关系，只是假定滑裂面上的平均安全系数，因此，无法分析稳定破坏的发生和发展过程，更无法考虑局部变形的因素。目前常用的数值计算方法——强度折减不仅可以解决极限平衡法存在的问题，并与极限平衡法相比，强度折减法还具有如下优点：可以对各种复杂的边坡进行计算分析；可以了解边坡随强度的劣化而呈现出的渐进失稳过程；可以考虑不同的施工工序对边坡最终安全度的影响；可以考虑影响边坡稳定的某些更复杂的因素；可以得到极限状态下的失效形式；而且不仅可以分析计算整体稳定，也可以同时进行局部稳定的计算等^[6-11]。

3 强度折减与极限平衡法结果比较

本文用美国 Itasca 公司基于拉格朗日显式差分法原理开发的 FLAC 软件模拟分析了不同工况下软土路基路堤的稳定性，软件中的 Slope 模块可以实现强度折减法的算法。

计算模型形状及尺寸见图 5，计算工况参数及计算结果见表 1，路堤填土重度 $\gamma = 19.0 \text{ kN/m}^3$ ，变形模量 $E = 20 \text{ MPa}$ ，泊松比 $\mu = 0.3$ ；地基软土重度 $\gamma = 17.0 \text{ kN/m}^3$ ，浮重度取 7.0 kN/m^3 ，变形模量 $E = 3 \sim 6 \text{ MPa}$ ，泊松比 $\mu = 0.3 \sim 0.4$ 。

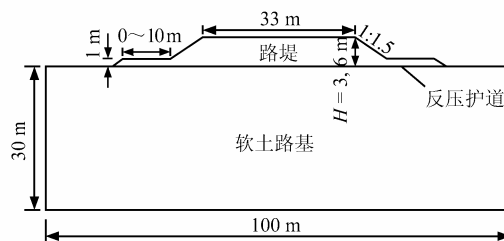


图5 计算模型形状及尺寸

Fig.5 The shape and size of calculation model

3.1 土体参数对安全系数 K 的影响

从表 1 的计算结果可以发现：软土地基的抗剪强度参数变化对安全系数影响非常明显， c ， φ 同时增加 2 kPa 和 2° 时，安全系数可以在原来的基础上增加 $0.3 \sim 0.5$ 。在实际的取样和试验过程中，一般难免会对试样产生扰动，使测出的参数有所不同。实践经验也表明，土工参数的确定过程中存在一定的变异系数，并且变异系数大体上属于“中等”到“高”类型^[12]，因此，在评价边坡稳定问题时，应采取可靠的试验方法确定土体的抗剪强度。

3.2 计算方法和反压护道对计算结果的影响

从表 1 中可以看出，不同计算方法所得到的安全系数 K 有偏差，但对于没有反压护道的均质软基路堤（工况 1~3、工况 10~11），极限平衡法和数

值方法求的安全系数 K 非常接近, FLAC 法和简化 Bishop 法得出的结果相差更小, 并且 Bishop 法搜索的最不利圆弧滑动面的位置在 FLAC 强度折减法求得贯通塑性区(滑带)内, 如图 6(b)所示, 这也进一步说明用极限平衡法计算单一截面形状的边坡求得的安全系数和滑裂面位置比较复合实际^[13]。对于有反压护道的路堤, 虽然两种方法求得的安全系数 K 偏差不是很大, 但是极限平衡法搜索到的最不利滑裂面与 FLAC 得到的滑带位置不一致, 如图 6(a)、图 6(c)所示, 这主要因为极限平衡法(瑞典条分法、简化 Bishop、Janbu 法)搜索到的是假设滑裂面, 不是通过应力场和变形场得到的真实滑裂面, 并且实际工程也发现有反压护道的路堤破坏的滑裂面不是圆弧型的, 所以用极限平衡法来分析有反压护道路堤的稳定性还需做深入研究来证实其可靠性, 而 FLAC 求出的滑带是通过土体应力场和变形场得到的, 更符合实际, 并且强度折减法分析边坡的稳定性已得到一些学者、科研及部分设计单位的

认可^[8-11], 因此, 用强度折减法分析复杂情况下(包括有反压护道的路堤及堤坝)的边坡稳定更具有优越性。

4 路堤或堤坝填土极限高度计算^[5]

一般软土路基上路堤的失稳主要是因为地基承载力不足, 所以也可以通过控制路堤填土极限高度来控制其稳定性, 文献[5]根据极限平衡理论^[14]详细推导了复杂荷载作用下的地基承载力公式:

$$P_u = N_q'' \gamma_0 B + CN_c + qN_q + \bar{q}N_q \quad (1)$$

式中: N_q 和 N_c 均为承载力系数, 是内摩擦角 φ 的函数: $N_q = \tan^2(45^\circ + \frac{\varphi}{2})e^{\pi \tan \varphi}$; $N_c = (N_q - 1)\cot \varphi$;

承载力系数 N_q'' 可以从文献[5]表 1 中查得; γ_0 为路基土重度; c 为土凝聚力; B 为基础宽度; q 为软基上作用的矩形荷载, 并其范围超过图 7 中 AF 的长度, 如图 3 所示; $\bar{q}$ 为复杂荷载的等效附加荷载, 文献[5]中有具体的计算公式。

表 1 计算工况参数及其计算结果
Table 1 The calculation parameters and results

工况序号	路堤填土厚 / m	路堤土		软基地基		反压护道宽度 / m	坡比	计算的安全系数 K			
		c / kPa	φ / (°)	c / kPa	φ / (°)			FLAC	瑞典条分法	简化 Bishop 法	Janbu 法
1	3	20	24	6	4	0	1: 1.5	1.15	1.17	1.12	1.28
2	3	20	24	8	6	0	1: 1.5	1.56	1.51	1.50	1.68
3	3	20	24	10	8	0	1: 1.5	1.91	1.82	1.86	2.01
4	3	20	24	6	4	5	1: 1.5	1.40	1.29	1.35	1.44
5	3	20	24	8	6	5	1: 1.5	1.91	1.70	1.82	1.90
6	3	20	24	10	8	5	1: 1.5	2.37	2.09	2.24	2.32
7	3	20	24	6	4	10	1: 1.5	1.63	1.67	1.91	2.47
8	3	20	24	8	6	10	1: 1.5	2.23	2.29	2.88	3.09
9	3	20	24	10	8	10	1: 1.5	2.79	2.95	3.57	3.65
10	6	20	24	6	4	0	1: 1.5	0.77	0.75	0.74	0.89
11	6	20	24	8	6	0	1: 1.5	1.04	0.97	1.00	1.14
12	6	20	24	10	8	0	1: 1.5	1.26	1.16	1.234	1.359
13	6	20	24	6	4	5	1: 1.5	0.86	0.80	0.83	0.96
14	6	20	24	8	6	5	1: 1.5	1.17	1.04	1.12	1.24
15	6	20	24	10	8	5	1: 1.5	1.43	1.26	1.38	1.49
16	6	20	24	6	4	10	1: 1.5	0.94	0.85	0.92	1.05
17	6	20	24	8	6	10	1: 1.5	1.26	1.13	1.25	1.36
18	6	20	24	10	8	10	1: 1.5	1.57	1.39	1.55	1.65

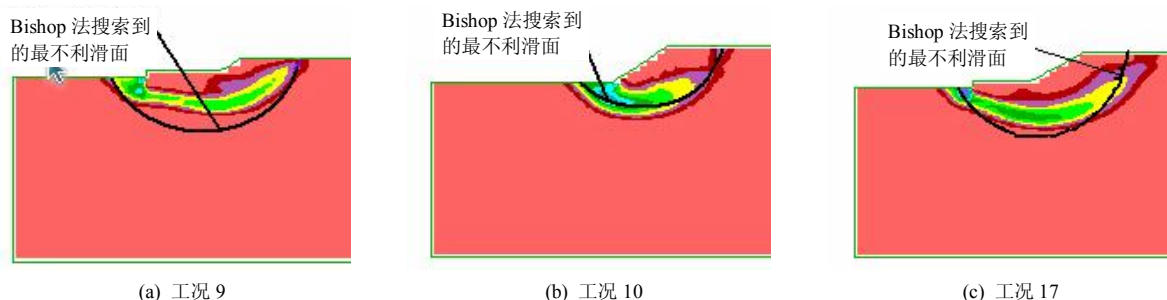


图 6 FLAC 求得贯通塑性区(滑带)和 Bishop 法求得最不利圆弧滑动面的位置

Fig.6 Plastic deformation zone calculated by FLAC and most disadvantageous slide surface of slope with Bishop method

对于路堤或堤坝来说, $P_u = \gamma H_u$, γ 为路堤或堤坝填土重度, H_u 为填土极限高度, 若令 $\alpha = \bar{q}/P_u$, 则由式 (1) 可得 H_u 为

$$H_u = \frac{N_\gamma'' \gamma_0 B + q N_q + C N_c}{\gamma(1 - \alpha N_q)} \quad (2)$$

为了便于工程应用, 文献[5]用理论公式计算了路堤工程采用不同边坡比(1:k)时, 如图 7 所示, 对应 α 值, 见表 2。图 7 中 AG 和 GF 根据对数螺旋曲线及其几何关系可知:

$$\overline{AG} = \overline{GF} = \frac{B}{2} \tan(45^\circ + \frac{\varphi}{2}) e^{\frac{\pi}{2} \tan \varphi} = \frac{B}{2} \sqrt{N_q} \quad (3)$$

表 2 不同坡比对应 α 的计算结果^[5]
Table 2 The α value of different gradient slope^[5]

坡角位置编号	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
kH/AF	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
α 值	1/∞	1/150	1/38	1/17	1/9.4	1/6.0	1/4.5	1/3.7	1/3.2	1/2.8	1/2.4

5 工程实例分析^[5]

珠海南屏大桥北岸软土路基路堤^[15]如图 8 所示。试验得到土体参数为: 软土厚 8 m, 含水率 $\omega = 80\%$, $c = 4.0$ kPa, $\varphi = 3^\circ$, 软土浮重度 $\gamma_0 = 7.0$ kN/m³; 路堤填土: $c = 20.0$ kPa, $\varphi = 24^\circ$, 重度 $\gamma = 20.0$ kN/m³。当填土达到 6.5 m 时发生塌滑。现用填土极限高度、Prandtl 地基承载力公式、强度折减法 and 极限平衡法来分析其稳定性。

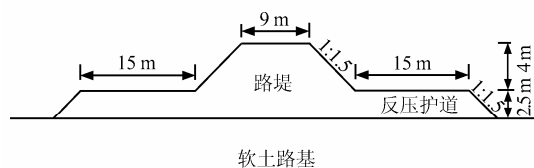


图 8 软土路基路堤断面图
Fig.8 The cuts of Soft Soil Foundation

5.1 极限填土高度分析结果

路堤的极限填土高度计算, $\overline{AF} = 2\overline{AG} = B\sqrt{N_q} = 9.0\sqrt{1.31} = 10.3$ m, 反压护道为 15.0 m, 超出 $\overline{AF}$ 的长度, 将其作为矩形荷载来计算, $q = 2.5 \times 20 = 50.0$ kN/m², $kH = 1.5 \times 4.0 = 6.0$, $kH/\overline{AF} = 6/10.3 = 0.58$, 由表 2 可得 $\alpha = 1/4.8 = 0.208$, N_γ'' 由文献[5]查得为 0.115, 代入式 (2) 可得

利用式 (2) 求得的填土极限高度可作为路堤稳定性控制的一种手段, 可对软土路基上的路堤进行稳定性计算分析, 得出指导填筑路基而不失稳的路堤极限高度。

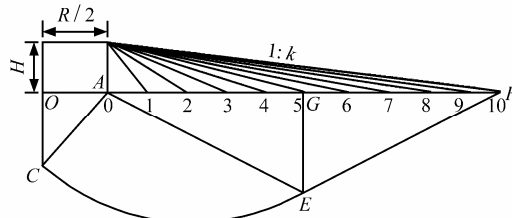


图 7 极限平衡法求不同坡比对应 α 的示意图
Fig.7 Different α value calculated with limit equilibrium method

$$H_u = \frac{N_\gamma'' \gamma_0 B + q N_q + C N_c}{\gamma(1 - \alpha N_q)} = 6.6 \text{ m}$$

求得的填土极限高度 (6.6 m) 与路堤发生塌滑的实际填土高度 (6.5 m) 非常接近。

5.2 强度折减法分析结果

按照土体的实际参数, 用强度折减法进行了模拟分析, 图 9 是计算结果, 计算得到的安全系数为 1.00, 说明路堤恰好处于临界状态, 并且滑动面位置和现场勘察的比较接近; 从塑性区的位置和应力图可以看出, 滑带不是圆弧型的, 此时软基水平方向的位移使得反压护道端部区域的剪切变形增大, 并且在路堤下有未发生剪切变形的核部, 形成所谓的“鱼脊梁”, 这现象也被离心模型试验所证实。

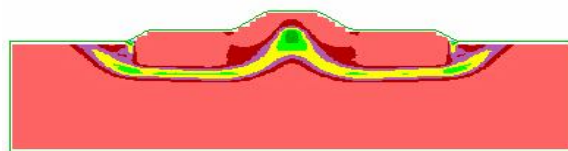


图 9 FLAC 计算得到的安全系数和滑带位置
Fig.9 Factor of safety and position of slip surface calculated with FLAC

5.3 极限平衡法分析结果

图 10 是简化 Bishop 计算的结果, 滑面 A 和对应的安全系数是全局域搜索求得的, 该滑动面与现

场勘察的相差甚远, 这样即使得到的安全系数接近 1 有很强的偶然性; 滑面 B 是用 FLAC 计算得到的滑动面位置作为 Bishop 法计算的假定滑动面, 求得安全系数等于 1.15, 与 FLAC 的结果较接近, 进一步说明 FLAC 分析结果的可靠性。Bishop 法产生这样的结果主要是因为反压护道的边坡滑动面形状已不是圆弧型, 并且应力场和变形场与常规边坡的不一样。前面的分析和本实例也说明, 对于反压护道比较宽和厚(与路堤高度相比, 厚度接近路堤高度 0.3~0.6 倍)的路堤, 极限平衡法计算结果不太可靠, 需谨慎应用, 尤其不能确定滑动面的情况下。

通过 3 种方法在具体工程的对比分析发现, 强度折减法法和填土极限高度分析反压护道软土路堤稳定性与实际较吻合, 结果是合理、可靠的, 而极限平衡法的分析结果与实际有差别。

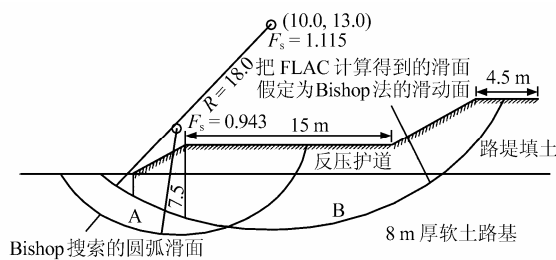


图 10 简化 Bishop 计算得到的安全系数和滑带位置

Fig.10 Factor of safety and position of slip surface calculated with simple Bishop

6 结 论

用极限平衡法分析软土路基有反压护道路堤及堤坝的稳定性时与工程实际有所差别, 本文用强度折减法分析了不同工况条件下有反压护道路堤的稳定性及其规律, 并和极限平衡法进行了对比, 结果表明, 强度折减法具有一定的优越性, 分析结果和工程实际情况较符合, 而极限平衡法搜索到的滑裂面不符合实际。同时利用文献[5]中复杂荷载作用下的地基强度公式计算了路堤的填土极限高度, 通过工程实例的应用, 说明了其结果和实际情况非常吻合, 可供类似工程进行参考。

参 考 文 献

- [1] 《地基处理手册》编写组. 地基处理手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993.
- [2] 朱梅生. 软土地基[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1989.
- [3] 王晓谋, 袁怀宇. 高等级公路软土地基路堤设计与施工技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.

- [4] 陈希哲. 土力学地基基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [5] 杨光华. 路堤及堤坝等复杂荷载作用下软土地基的强度计算[A]. 第三届地基处理学术研讨会论文集[C]. 杭州: 浙江大学出版社, 1992.
- [6] 赵尚毅, 郑颖人, 时卫民, 等. 用有限元强度折减求边坡稳定安全系数[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(3): 343—346.
ZHAO Shang-yi, ZHENG Ying-ren, SHI Wei-mi, et al. Analysis of safety factor of slope by strength reduction FEM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(3): 343—346.
- [7] 连锁营, 韩国城, 孔宪京. 强度折价有限元研究开挖边坡的稳定性[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 406—411.
LIAN Zhen-ying, HAN Guo-cheng, KONG Xian-jing. Stability analysis of excavation by strength reduction FEM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(4): 406—411.
- [8] 郑宏, 李春光, 李焯芬, 等. 求解安全系数的有限元[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(5): 323—328.
ZHENG Hong, LI Chun-guang, Lee C F, et al. Finite element method of solving the factor of safety[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(5): 323—328.
- [9] Griffiths D V, Lane P A. Slope stability analysis by finite elements[J]. Geotechnique, 1999, 49(3): 387—403.
- [10] Daweon E M, Roth W H, Drescher A. Slope stability analysis by strength reduction[J]. Geotechnique, 1999, 49(6): 835—840.
- [11] 宋二祥, 高翔, 邱玥. 基坑土钉支护安全系数的强度参数折减有限元法[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(3): 258—263.
SONG Er-xiang, GAO Xiang, QIU Yue. Finite element calculation for safety factor of soil nailing through reduction of strength parameters[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(3): 258—263.
- [12] 张在明. 对我国现行岩土工程规范的几点看法[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
- [13] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析—原理·方法·程序[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [14] 陈仲颐, 周景星, 王洪瑾. 土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994.
- [15] 汪孝炎. 南屏大桥引道路堤塌滑原因分析与处理措施[J]. 广东公路交通, 1988, (1): 20—24.
WANG Xiao-yan. The causal analysis and measures of embankment slide-collapse on Nanping bridge approach[J]. Highway Traffic in Guangdong, 1988, (1): 20—24.