

江西武山铜矿尾矿坝软土地基分级 加载稳定性问题分析

马正文¹, 程小俊², 蔡鹤生¹

(1. 中国地质大学, 武汉 430074; 2. 深圳市岩土工程公司, 深圳 518028)

摘 要: 稳定性分析是堤防、土石坝等以稳定性为控制条件的工程设计的一项重要工作, 在软土地区尤其如此。由于软基堤坝稳定问题主要出现在施工期间, 特别对于进行地基处理过的软基, 本文结合工程实际, 通过对湖相沉积软土上分级加载的堆石坝进行稳定性分析, 指导了工程安全施工, 收到了一定的效果。

关键词: 软土地基; 分级加荷; 稳定性; 稳定系数

中图分类号: X947 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-1556(2004)04-0092-04

1 工程及地质概况

江西武山铜矿需新建三座尾矿坝, 以便与原有的一座老坝及部分山体合围成一圈, 堆积尾矿。其中新建的 1# 堆石坝位于湖边, 坐落在两小山丘之间, 东西走向, 长约 280m, 坝底宽近 50m, 堆石坝起始标高 12.3m, 坝顶标高 23.5m, 边坡坡度 1:2。根据工程地质勘察资料表明, 坝底土层为新近湖相沉积的淤泥~淤泥质土, 见表 1。软土层最厚达 12m, 均厚 10m, 设计与施工的难度较大。随着深度的增加, 淤泥由软塑~流塑状态过渡为可塑状态, 含水量、空隙比、压缩系数逐渐减小, 地基承载力渐高。由于淤泥层土体含水量高、压缩性大、渗透性差、抗剪强度低, 而堤坝填筑得较高, 稳定性问题显得尤为迫切和重要。

表 1 地基土主要物理力学指标

Table 1 The primary physical and mechanical index of foundation soil

| 物理力学指标 | 含水量 w /% | 孔隙比 e | 承载力 /kPa | 渗透系数 k 压缩系数 | | | |
|---------|---------------|------------|-------------|--|-------|-------|-------|
| | | | | $/10^{-7} \text{cm} \cdot \text{s}^{-1} / \text{MPa}^{-1}$ | | | |
| | | | | k_h | k_v | a_h | a_v |
| 淤泥质粘土层 | 80.3 | 2.23 | 50 | 1.28 | 1.14 | 2.26 | 1.96 |
| 含砾粉质粘土层 | 35.1 | 0.98 | - | 1.60 | | | 0.96 |

2 排水系统设计及地基处理概况

为提高预压效果, 一般在软土地基内设排水砂井或塑料排水板。该工程设计排水井井径为 $d_w = 60\text{mm}$, 井深 $H = 10\text{m}$, 排列方式为正三角形(梅花形), 等效圆直径与砂井间距 L 的关系为 $d_e = 1.05L$; 排水板间距 L 为 1.50m; 砂垫层设计因施工情况而异, 陆上施工, 砂垫层厚度一般取 0.3~0.5m, 水下施工时, 一般为 1m 左右。砂垫层的宽度大于堆载宽度或建筑物宽度, 并伸出排水井区外边线 2~4m。

本工程针对实际情况采用塑料排水板法加固地基, 由于堆石坝坝基承载力过低, 排水板插板机械无法正常工作, 采用围堰法施工, 截污堤作为外围堰。先用泥浆泵抽走湖底流态淤泥, 再填上一层粘性土以保证场地强度能满足施工要求, 粘性土上铺一层 30cm 厚中粗砂, 作为水平向排水通道, 然后进行塑料排水板的施工。塑料排水板长 8~12m, 平面布置为间距 1.5m 的正三角形(梅花形), 排水板露出地面 20cm, 折转埋入砂层。砂层上面覆盖一层 600g/m^2 的无纺土工布。截污堤地基采用抛石挤淤法加固, 未插排水板。

收稿日期: 2004-07-02

作者简介: 马正文(1975—), 男, 中国地质大学环境工程专业硕士研究生, 主要研究方向: 岩土体稳定性分析与评价。
武山铜矿新尾矿库 1# 尾矿坝地基处理设计, 南昌有色设计研究院, 2001。



3 施工期地基稳定性分析

稳定分析的目的在于校核所拟定的加荷计划下的地基的稳定性, 如果验算的结果不符合要求(或地基不稳定或安全系数过大), 则应另行拟定加荷计划, 甚至改变地基处理方案。因堤坝淤泥类软土地基

强度太低, 在加载过程中必须严格控制加载速率, 由此一般采用分级加荷^[1]。

根据已知堆载计划利用高木俊介法^[2]确定各级荷载作用下的安全系数, 堆载计划及安全系数见表 2(表中 K_2 为考虑了加载过程中地基抗剪强度增长时的安全系数, 比较符合实际情况)。同时, 用滑弧法对各级荷载加载完毕时进行地基和堤坝的稳定性分析。

表 2 加荷计划及安全系数
Table 2 The load plan and assurance coefficient

| 荷级 | 日期 | 天数 | 堆高/m | 荷载/kPa | 堆高/m (考虑沉降) | 荷载/kPa (考虑沉降) | K_1 | K_2 |
|----|------------|-----|------|--------|----------------|------------------|-------|-------|
| | 2002-5-4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | |
| 一 | 5- 7 | 3 | 0.8 | 14.88 | 0.8 | 14.88 | | 3.42 |
| | 6- 28 | 55 | 0.8 | 14.88 | 0.8 | 14.88 | 1.64 | |
| 二 | 7- 1 | 58 | 1.7 | 32.88 | 1.9 | 36.88 | | 1.82 |
| | 7- 25 | 82 | 1.7 | 32.88 | 1.9 | 36.88 | 1.31 | |
| 三 | 7- 28 | 85 | 2.7 | 52.88 | 3 | 58.88 | | 1.43 |
| | 8- 26 | 114 | 2.7 | 52.88 | 3 | 58.88 | 1.25 | |
| 四 | 8- 29 | 117 | 3.7 | 72.88 | 4.1 | 80.88 | | 1.34 |
| | 9- 27 | 146 | 3.7 | 72.88 | 4.1 | 80.88 | 1.21 | |
| 五 | 9- 30 | 149 | 4.8 | 94.88 | 5.3 | 104.88 | | 1.29 |
| | 11- 5 | 185 | 4.8 | 94.88 | 5.3 | 104.88 | 1.24 | |
| 六 | 11- 8 | 188 | 5.9 | 116.88 | 6.5 | 128.88 | | 1.31 |
| | 12- 12 | 222 | 5.9 | 116.88 | 6.5 | 128.88 | 1.25 | |
| 七 | 12- 16 | 226 | 7.0 | 138.88 | 7.7 | 152.88 | | 1.31 |
| | 2003- 1- 9 | 250 | 7.0 | 138.88 | 7.7 | 152.88 | 1.24 | |
| 八 | 1- 13 | 254 | 8.1 | 160.88 | 8.9 | 176.88 | | 1.29 |
| | 2- 16 | 288 | 8.1 | 160.88 | 8.9 | 176.88 | 1.26 | |
| 九 | 2- 19 | 291 | 9.2 | 182.88 | 10.1 | 200.88 | | 1.30 |
| | 3- 21 | 321 | 9.2 | 182.88 | 10.1 | 200.88 | 1.27 | |
| 十 | 3- 24 | 324 | 10.3 | 204.88 | 11.3224 | 88 | | 1.30 |
| | 4- 24 | 354 | 10.3 | 204.88 | 11.3 | 224.88 | 1.28 | |
| 十一 | 4- 27 | 357 | 11.2 | 222.88 | 12.4 | 246.88 | | 1.31 |

3.1 地基强度随深度增加时的稳定性分析思路、方法(圆弧法)^[3]

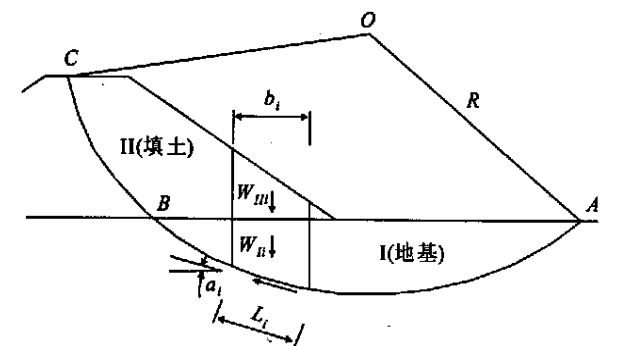


图 1 稳定性分析简图

Fig 1 Simple figure about stability analysis

图中, W_{Ii} 、 W_{IIi} —地基、坝体填筑分块重量;

T_{Ii} 、 T_{IIi} —地基、坝体分块抗滑力; b_i —分块长度; α_i —分块滑动面倾角; l_i —分块滑动面弧长。

软土地基在附加荷载作用下, 随时间与深度变化的地基预测强度可用下式计算:

$$\tau = \eta(\tau_0 + \lambda Z + \sigma U_t \tan \varphi_u) \quad (1)$$

式中, η —强度折减系数; τ_0 —强度随深度增长线在地面的截距(kPa); λ —强度沿深度的增长率; Z —地面以下深度(m); σ —地基中某点深度的竖向附加应力(kPa); U_t — t 时刻的地基平均固结度; φ_u —固结不排水剪求得的内摩擦角。

滑动力矩 $M_{滑}$ 根据堤坝断面分块或分条计算:

$$M_{滑} = \sum_{i=1}^n W_i d_i \quad (2)$$

式中, W_i —分块(条)的重量; d_i —分块(条)的重心至滑弧圆心的距离; n —块(条)数。

地基部分的滑动力矩由于圆心垂线两侧对称, 其土重作用线通过圆心, 不必计算。

抗滑力矩是由滑弧面上的剪阻力产生的, 它包括地基部分 AB 段剪阻力的抗滑力矩和堤坝部分 BC 段的抗滑力矩, 分别如 3、4 式:

$$\begin{aligned} [M_{\text{抗}}]_{AB} &= 2 \int_0^{\frac{\theta}{2}} \tau R^2 d\theta \\ &= 2 \int_0^{\frac{\theta}{2}} [\tau_0 + \lambda(R \cos \theta - h)R^2] d\theta \\ &= R^2 [(\tau_0 - \lambda h)\theta + \lambda AB] \quad (3) \end{aligned}$$

式中, θ —圆心角, 以弧度计; h —圆心距地面高度, 即 $h = R \cos \frac{\theta}{2}$; R —滑弧半径; AB —弧长 AB 的弦长, 即 $AB = 2R \sin \frac{\theta}{2}$ 。

$$[M_{\text{抗}}]_{BC} = \eta_n R \int_B^C [C_n l_i + \eta_w i \cos \alpha \tan \varphi_i] \quad (4)$$

式中, η_n —坝体抗滑力矩折减系数, 可采用 0.6 ~ 0.8; η_w —强度指标折减系数, 可采用 0.5; C 、 φ —坝体填料抗剪强度指标。

将式(2)、(3)、(4)代入式 $F = \frac{M_{\text{抗}}}{M_{\text{滑}}}$, 得最终抗滑安全系数的计算式为:

$$\begin{aligned} F &= \frac{\eta_n R \int_B^C [C_n l_i + \eta_w i \cos \alpha \tan \varphi_i]}{\int_i W_i d_i} \\ &+ \frac{R^2 [(\tau_0 - \lambda h)\theta + \lambda AB]}{\int_i W_i d_i} \quad (5) \end{aligned}$$

3.2 各级荷载加载完毕时地基和堤坝的稳定性分析

运用 Fortran 语言编写的程序对以上各级加荷情况(有代表性的选取第 1、2、4、6、7、9、11 级荷载)对地基进行整体稳定性分析。程序先采用寻优法寻找安全系数最小的滑弧的位置, 将滑弧圆心 $C(X, Y)$ 和滑弧出露位置 X 坐标作为三个变量, 进行滑弧的三维优选, 运用简化 Bishop 法, 迭代计算优选出滑弧的稳定系数, 计算如下, 结果见图 2。

计算时截污堤土和坝体堆石体指标分别为:

截污堤: $\gamma = 19.5 \text{ kN/m}^3$, $c = 40 \text{ kPa}$, $\varphi = 25^\circ$;

堆石体: $\gamma = 20.0 \text{ kN/m}^3$, $c = 0 \text{ kPa}$, $\varphi = 34^\circ$ 。

考虑坝底、坝外基础抗剪强度随深度变化, 求得各级荷载下稳定性系数及相关信息为:

$F_{s1} = 2.164$, 圆心 $C_1(18.94, 16.15)$, 半径 $R_1 = 3.75 \text{ m}$; (此时坝体为砂和填土垫层, 搜索到的滑动

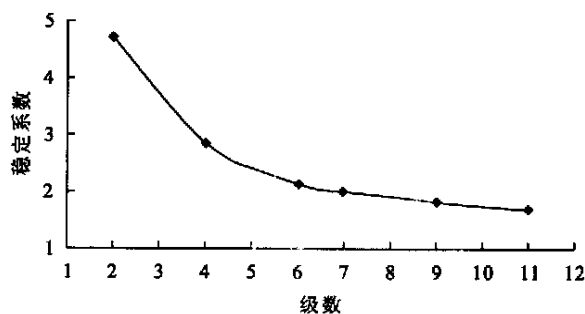


图 2 稳定系数变化曲线

Fig 2 Variation curve of stability coefficient

面只经过截污堤, 不经过坝体) $F_{s2} = 4.721$, 圆心 $C_2(17.08, 51.14)$, 半径 $R_2 = 39.80 \text{ m}$; $F_{s4} = 2.846$, 圆心 $C_4(24.85, 32.02)$, 半径 $R_4 = 21.28 \text{ m}$; $F_{s6} = 2.140$, 圆心 $C_6(26.65, 31.64)$, 半径 $R_6 = 21.42 \text{ m}$; $F_{s7} = 1.998$, 圆心 $C_7(28.06, 29.72)$, 半径 $R_7 = 20.36 \text{ m}$; $F_{s9} = 1.813$, 圆心 $C_9(30.07, 32.67)$, 半径 $R_9 = 24.15 \text{ m}$; $F_{s11} = 1.687$, 圆心 $C_{11}(29.91, 36.44)$, 半径 $R_{11} = 26.90 \text{ m}$ 。

鉴于篇幅所限, 只列出第 11 级荷载下稳定性分析图(图 3)。

图 3 第 11 级荷载稳定分析图

Fig 3 Stability analysis of the eleventh load

4 结 语

(1) 分级加载过程中, 软土层的固结系数逐渐变小, 过长的加荷施工期会导致地基固结速率变小, 从而引起预压期的延长; 稳定性分析计算表明, 实际加载计划偏于保守, 稳定性系数比较大, 尤其是前期, 但随荷载级数增加而减小的趋势也比较明显, 最后略有偏大。因此, 在实际施工过程中, 在保证一定安全度前提下, 可在加载前期(6 级以前) 每级适当增大加载, 以缩短工期。

(2) 软土地基上堤坝稳定性分析方法很多, 比如 Spencer、Janbu 等等, 如果能将几种方法同时用来

分析比较, 得出的结论更可靠合理。

参考文献:

[1] 杨顺安, 冯晓腊. 软土理论与工程. 北京: 地质出版社, 2000. 108- 109.

[2] 高木俊介. 为排水砂井工程制备的图表及其使用实例, 南京水利科学研究所译自“土工基础”. 北京: 中国水利电力出版社, 1975. 95- 96.

[3] 林孔镏. 预压地基的强度增长与稳定计算问题. 岩土工程学报, 1998, 20(4): 60- 62.

The Stability Analyse of Soft Soil Foundation of Copper Ore at Wushan in Jiangxi Province under Multi-stage Preloading

MA Zheng-wen¹, CHEN G Xiao-jun², CHA I He-sheng

(1. China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Shenzhen Geotechnic Association, Shenzhen 518028, China)

Abstract: The stability analysis is a key job of earth banks and dykes, of which stability is regarded as the control condition of engineering design, particularly in the soft land area. The stability problems of dams appear primarily in the period of construction, especially the foundation that have been treated. This paper discusses the engineering construct which achieves some effect through combining engineering practical situation with the study on stability analysis of the dam that is under multi-stage preloading in some sedimentation areas of lake facies.

Key words: soft soil foundation; multi-stage preloading; stability; stabilization coefficient

化石林

曾爱娟

(广东普宁华侨中学)

风光无限侏罗纪, 百种花开抚树琴。
群鸟欢歌群兽舞, 悠然自在自难寻。
山崩地裂熔岩覆, 禽树皆焚化石林。
亿年沧桑难诉尽, 株株静伫黯沉吟。