

软基底高排土场的基底承载力分析

周荣军

(辽宁省国土资源规划院, 沈阳 110031)

【摘要】 基底承载力不足是导致软基底高排土场整体失稳的内在因素。根据地基极限承载力理论, 提出了以基底承载力评价软基底高排土场稳定性的新方法。结合工程实践, 对平朔安太堡露天煤矿南排土场滑坡特征进行了分析, 通过对基底承载力的验算, 表明那次滑坡是因为基底土层承载力不足而造成的。

【关键词】 软基底; 排土场; 稳定性; 承载力

【中图分类号】 TU431

Analysis of the Bearing Capacity of Soft Foundation in High Earth-Disposing Site

【Abstract】 The insufficiency of foundation bearing capacity is the internal factor which results in losing stability to high earth-disposing site with soft-foundation. According to the theories of foundation ultimate bearing capacity, a new method of evaluating its stability by the foundation bearing capacity is put forward.

【Key words】 soft-foundation; earth-disposing site; stability; bearing capacity

0 引言

露天排土是露天采矿整个工艺过程的一个基本环节, 剥离和采矿均取决于该项工作的稳定性和节奏性。在实际工作中, 排土场在许多情况下都伴随有滑坡现象, 排土场稳定性问题日益引起关注, 目前许多科研单位从事排土场稳定性研究。以往的研究中, 研究人员和工程技术人员往往从边坡稳定角度对其进行分析和计算, 评价其稳定性; 但对决定排土场整体稳定的基底承载力研究较少, 而基底承载力恰恰是影响排土场整体稳定的内在因素。

作者通过对平朔安太堡露天煤矿南排土场滑坡的勘察和对平朔安家岭露天煤矿外排土场的边坡勘察及设计, 对软基底高排土场的整体稳定性进行了深入研究。本文根据地基极限承载力理论, 提出了软基底高排土场基底承载力的分析方法, 并对因基底承载力不足而引起的滑坡特

征进行分析, 指出软基底高排土场基底承载力是影响软基底高排土场整体稳定的决定因素。

1 软基底高排土场含义及其整体失稳特征

顾名思义, 软基底高排土场是指基底土层较弱的高大排土场, 基底土层一般由粘性土、粉土或松散的砂土构成, 排弃高度一般为 30~150 m。

基底土层在超高的排土体荷载作用下, 产生很大的压缩变形, 直至被侧向挤出, 形成波状隆起, 从而导致软基底高排土场的整体失稳。基底土层的厚度和结构, 对排土场的稳定性和边坡变形规模有重大影响。

软基底高排土场整体失稳的显著特征: 在变形的初期, 排土场下沉, 排土场前方存在纵向的强烈挤压区, 表现为土层隆起, 地面出现裂缝、小断层和微凸起; 当产生明显滑坡后, 在滑坡体后缘往往存在深度巨大的张拉裂隙, 主张拉裂隙出现宽度(最大张拉裂隙与坡肩的水

平距离)巨大。

一个典型的例子,为前苏联兹拉图乌斯特一别洛大斯克露天铜矿的矸石排土场,其排弃高度为35~40 m,基底为厚度超过30 m的软粘土。从1971年起开始变形,曾经发生了长1400 m的滑坡现象,在一年半时间内,排土场个别地段已下沉15 m。

2 基底承载力分析方法

在上覆排弃物料的荷载作用下,排土场地基应满足稳定条件,否则基底内部将出现破坏,引起基底土层整体剪切破坏并导致排土场整体失稳。排土场整体稳定应满足以下条件:

$$p_s \leq p_u / f_s \quad (1)$$

式中: p_s ——排土场上覆排弃物料主荷载, kPa;

p_u ——地基土层极限承载力, kPa;

f_s ——地基承载力储备系数(安全系数)。

其中 p_s 由下式确定:

$$p_s = \gamma h \quad (2)$$

式中: γ ——排弃物料重度, kN/m^3 ;

h ——排土场的排弃物排高, m。

当 $f_s = 1$ 时,排土场处于极限平衡状态;当 $f_s < 1$ 时,排土场将会整体失稳,最终导致产生大规模的滑坡。

目前,尚无适合于软基底高排土场整体稳定的承载力计算方法,在此,引用太沙基(Terzaghi)关于土体整体剪切破坏的极限承载力理论和萨卡洛夫斯基的松散介质静力学理论,进行极限承载力的分析计算。

1) 基底土层极限承载力计算方法

太沙基(Terzaghi)关于土体整体剪切破坏的极限承载力计算方法如下:

$$p_u = cN_c + qN_q + 0.5\gamma B N_\gamma \quad (3)$$

式中: p_u ——基底土层的极限承载力, kPa;

c ——土层的粘聚力, kPa;

q ——基础埋深产生的荷载, kPa;

B ——基础宽度, m;

γ ——土层的重度, kN/m^3 ;

φ ——土层的内摩擦角, ($^\circ$);

N_c 、 N_q 、 N_γ ——与地基土内摩擦角有关的量纲为1的系数。其计算式为:

$$N_c = e^{\pi \tan \varphi} \tan^2(\pi/4 + \varphi/2)$$

$$N_q = (N_c - 1) \cot \varphi$$

$N_\gamma = 1.8(N_q - 1) \tan \varphi$ 太沙基承载力课题计算简图见图1。

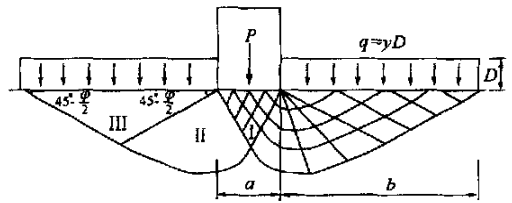


图1 太沙基极限承载力计算简图

我国基础工程规范中规定,应用太沙基计算式时,基础宽度 $B > 6$ m时,只能取 $B = 6$ m; $B < 3$ m时应取 $B = 3$ m。相对于高大排土场的上覆荷载而言,式(3)中第3项数值很小。另外 φ 趋近于0时, N_γ 也趋近于0,因此为简化计算,舍弃第3项。

得出软基底高排土场整体稳定的承载力计算公式:

$$p_u = cN_c + q_1 N_q \quad (4)$$

式中: p_u ——基底土层的极限承载力, kPa;

c ——土层的粘聚力, kPa;

q_1 ——排土场压底荷载,通常取压底平盘的段高产生的垂直荷载, kPa;

N_c 、 N_q ——与地基土内摩擦角有关的量纲为1的系数,其计算式同上。

2) 萨卡洛夫斯基的松散介质静力学理论

萨卡洛夫斯基的松散介质静力学理论是关于松散介质的极限平衡理论,更接近于排土场的条件。当基底为水平、外部作用荷载垂直于地面时,地基极限平衡模式如图2所示,最大压力与地基土处于极限平衡状态时的函数关系为:

$$p + H' = (c + H') \tan^2(\pi/4 + \varphi/2) e^{0.5\pi \tan \varphi} \quad (5)$$

式中: p ——极限承载力(最大压力), kPa;
 H' ——载荷系数, $H' = q \tan \varphi$, kPa;
 c ——土层的粘聚力, kPa;
 φ ——土层的内摩擦角, ($^\circ$);
 q ——压底荷载, kPa。

最大外部荷载作用力宽度 a 与压底荷载 q 的宽度 b 之间的关系如下:

$$b = a \tan(\pi/4 + \varphi/2) e^{0.5\pi \tan \varphi} \quad (6)$$

萨卡洛夫斯基的松散介质极限平衡模式见图 2。

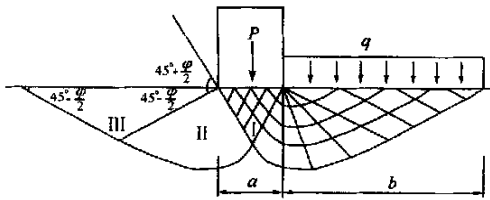


图 2 萨卡洛夫斯基松散介质极限平衡模式

以上介绍的计算方法所依据的理论基础是相同的,用式(4)计算地基极限承载力,而利用式(6)来检验主荷载和压底荷载的平衡关系。

3 工程实例

3.1 平朔安太堡露天煤矿南排土场及基底土层概况

平朔安太堡露天煤矿南排土场排弃高度达到 135 m(标高 +1 315.00 ~ +1 450.00 m),边坡角度为 $19^\circ \sim 21^\circ$ 。采用 154 t 重型卡车运输和重型推土机排土。排弃物料为岩石和表层黄土的混合物,含有少量煤矸石。平朔安太堡露天煤矿为特大型企业,其开采强度很大,所以排土场的水平推进和高度增长速度也是很大的。据统计,排土场年平均抬高速度达 21 m,但是此排土场由 1 430.00 m 平盘抬高到 1 450.00 m 平盘仅仅用了 3 个月时间。

排土场基底为马兰黄土,厚度约 3.00 ~ 30.00 m,其下为粉质粘土与红色粘土互层,厚度约 8.00 ~ 25.00 m,再下为二叠系砂岩、砂页岩和泥岩等组成。

3.2 平朔安太堡露天煤矿南排土场滑坡概况

平朔安太堡露天煤矿南排土场位于该矿工业广场南侧。1991 年 10 月 29 日,排土场靠工业广场一侧发生大规模滑坡。滑坡体覆盖范围走向长 1 050 ~ 1 095 m,宽度 420 m,高差 135 m(标高 1 315.00 ~ 1 450.00 m),滑坡体体积约 1 132 万 m^3 ,滑舌长达 200 m,滑坡体前的地基土层被挤压而隆起。而且其滑坡速度很快,剧烈滑动时间仅为 20 ~ 30 s。滑坡体冲向排土场坡角处的工业广场,破坏了平鲁公路约 730 m,埋没了矿大门守卫室、洗车间、排水沟 440 m,摧毁了灯桥及矿大门至办公楼段公路等工业设施。

3.3 平朔安太堡露天煤矿南排土场滑坡特点

经过现场勘察和分析,认为这是一次典型的软基底高排土场基底承载力不足造成的滑坡。其特点和滑坡体空间形态除了与一般滑坡有共同点外,还有其特殊之处。这些特殊点是其区别于一般滑坡的重要标志和提供计算理论的客观基础。滑坡体平面形状见图 3。

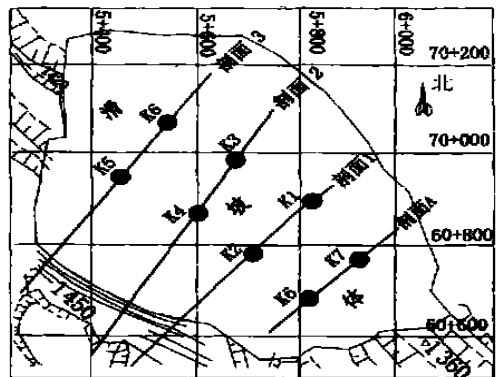
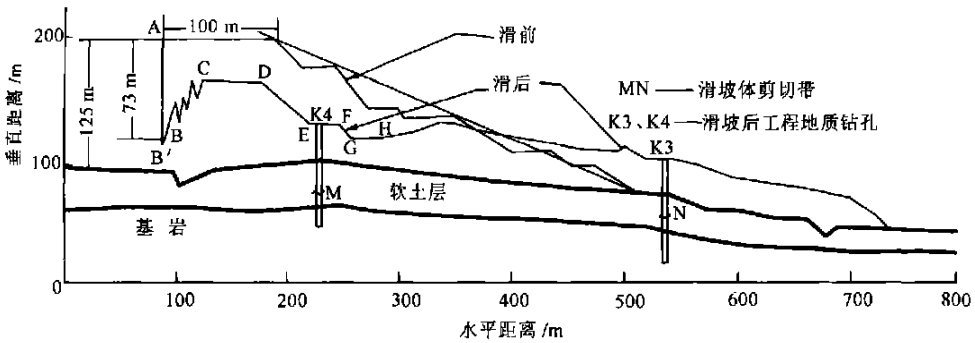


图 3 南排土场滑坡平面图

滑坡体在 1 450.00 平盘上的长度近 500 m,张裂隙边缘呈圆弧形,直径为 480 m,滑坡后的几天内在 1 450.00 平盘上还留有 3 条连续的张裂隙带。在三个勘察剖面中,2#剖面居滑坡体中心部位,并垂直于张裂隙,是一个最具代表性的剖面,见图 4。

图4 滑坡体2[#]剖面图

排土场滑坡后,对出现的张裂隙深度测量,结果为73 m,由于测量点B为可及点,裂隙底部的B'为测量时的不可及点,所以实际的张裂隙深度要大于73 m。三个剖面上张裂隙出现的距离分别为52, 100, 54 m。第二剖面的100 m范围最具有代表性,是外力最集中的部位。

3.4 由排土场岩土条件和滑坡特征形成的几个基本概念

1) 高达125 m的排弃高度和接近饱和的黄土与红粘土的基底构成了软基底高排土场。

2) 对边坡高度为125 m、总体边坡角仅为 $19^{\circ} \sim 21^{\circ}$ 的滑坡体而言,其具有的深达73 m(可测部分)的垂直张裂隙和达100 m的张裂隙出现宽度,都是一般滑坡所不可能出现的。

3) 从钻孔揭示看,滑坡发生在基底土层内。基底软弱层为互层饱和的粉质粘土、粘土。

本滑坡体的特征,与地基土层承载力不足造成土体整体失稳的理论和实践是一致的。

3.5 基底土层承载力验算

以2[#]剖面为例,采取自然状态、饱和状态和一个过渡状态下的土层物理力学指标 c 、 φ 值进行验算。2[#]剖面处的排弃高度 $h=125$ m,压底平盘的段高为 $h_1=20$ m,排弃物料的重度 γ 为 19.0 kN/m³,计算压底荷载为380 kPa,主荷载为 $q=2\ 375$ kPa。土层物理力学指标 c 、 φ 值分别根据原勘察报告和滑坡后勘察所得的土层残余强度指标选取。计算参数及计算结果见表1。

表1 计算参数及计算结果表

土层状态	粘聚力 c /kPa	内摩擦角 φ /($^{\circ}$)	重度 γ /(kN \cdot m ⁻³)	压底荷载 q /kPa	承载力系数1 N_c	承载力系数2 N_q	极限承载力 p_u /kPa	安全系数 f_s
自然状态	26	20.8	19.0	380	15.51	6.88	3 018	1.27
中间状态	28	18.2	19.0	380	13.22	5.34	2 375	1.00
饱和状态	31	8.7	19.0	380	7.??	2.19	1 072	0.45

地基土抗剪强度指标中内摩擦角 φ 对其承载力影响最大,直接关系排土场的整体稳定。对内摩擦角 φ 进行敏感性分析,地基承载力储备系数 f_s 与内摩擦角 φ 的函数关系见图5。

这个排土场为永久性的,因此设计时边坡

稳定安全系数不应低于1.25,验算结果简述如下:

1) 持力层在自然状态下,对高度为125 m的排土场可以有1.27的安全储备系数,边坡是稳定的。

2) 持力层受水浸润后,内摩擦角降低到
(下转第109页)

陡峭。旋喷施工前先充填土洞、溶洞, 旋喷时按隔一孔进行旋喷。旋喷参数: 压力 $p=25 \sim 30$ MPa, 提升速度 $10 \sim 20$ cm/min, 旋转速度 15 r/min, 水灰质量比 $0.6 \sim 0.8$ 。在岩溶、土洞发育地段, 有少数桩旋喷时出现串浆、不返浆和喷杆沉不到孔底等现象。串浆最大距离 8.5 m, 通常为相邻孔串浆。喷杆沉不到孔底时移开桩机, 沿原孔进行清孔。在同一孔内, 造孔与清孔时岩面差最大达 5 m (造孔、清孔时均入完整岩 1 m)。根据旋喷桩施工记录, 对出现异常现象的旋喷桩进行抽芯检查, 发现

部分桩局部胶结差, 桩身存在缩颈和断桩现象, 在出现较大面积地面塌陷时甚至无桩。根据出现异常现象种类的不同, 采取相应的处理措施, 进行补喷。因措施得当, 补喷后旋喷桩质量良好。

参 考 文 献

- 1 常士骝等. 工程地质手册(第三版). 北京: 中国建筑工业出版社, 1992 548~549
- 2 韩金田. 复合注浆法在地基基础加固中的应用研究. 岩土工程界, 2001(9): 42

收稿日期: 2001-12-10

(上接第 82 页)

18.2° 时, 排土场处于极限平衡状态。当土层内摩擦角降低到 18.2° 以下时, 基底承载力不足, 将引起排土场的整体失稳。当安全储备系数为 $0.80 \sim 0.90$ 时, 必然会发生滑坡, 经过验算, 此时土层的内摩擦角值应为 $15^\circ \sim 16^\circ$ 。

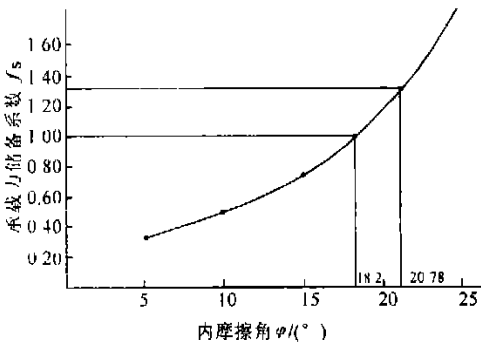


图 5 地基承载力储备系数与内摩擦角的函数关系

由计算结果还可看出, 当地基土内摩擦角降低到 8.7° (滑动中土层的残余抗剪强度指标), 安全储备系数仅为 0.45 , 这说明南排土场滑坡速度必然是惊人的, 实践印证了这一点。

3.6 排土场压底荷载验算

根据现场滑坡特征得出, 造成滑坡的主荷载宽度为 $a=100$ m; 压底荷载宽度根据滑坡前的原始边坡形状, 确定为 235 m (压底荷载宽度 b) 为边坡坡肩至边坡线上垂直荷载等于 2375 kPa 的点之间水平距离)。

下面验算边坡失稳时的土层内摩擦角值。边坡失稳时, 主荷载与压底荷载应处于极限平衡状态。根据式(6)计算出 $\varphi=18.2^\circ$, 与地基极限承载力的验算结果吻合。验算表明: 当排土场处于滑动的临界状态时, 基底土层的平均内摩擦角应为 18.2° 。当土层的平均内摩擦角低于 18.2° 时, 压底荷载宽度已经不能平衡所承受的压力而导致边坡失稳。

4 结 语

1) 本文论述了进行基底承载力评价的重要性和必要性, 提出了以基底承载力评价软基底高排土场稳定性的新方法。此方法不但具有严谨的理论根据, 而且通过大量工程实践表明, 此方法对评价软基底高排土场稳定性具有很强的实用性, 对揭示软基底高排土场整体失稳的实质有着重要的意义。

2) 软基底高排土场基底承载力分析方法, 不但能够对已存在的软基底高排土场边坡进行稳定性评价和预测, 并且对露天矿软基底高排土场边坡的设计工作具有重要的指导作用。

参 考 文 献

- 1 郑大同. 地基极限承载力的计算. 北京: 中国建筑工业出版社, 1979
- 2 杨英华. 土力学. 北京: 地质出版社, 1987

收稿日期: 2001-10-26