

doi: 10.3963/j.issn.1671-4431.2015.09.015

软弱基底诱发湖区排土场失稳机理研究

吴 军², 汪洪星^{1,2,3}, 谈云志², 左清军²

(1. 三峡大学水电工程施工与管理湖北省重点实验室, 宜昌 443002; 2. 三峡大学三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 宜昌 443002; 3. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

摘 要: 以江西城门山铜矿排土场二期扩建工程为研究对象, 建立数值分析模型, 通过等效塑性应变场和位移场演化规律, 揭示了湖区排土场失稳破坏的特征; 根据应力场分布特征, 揭示了软弱基底诱发湖区排土场失稳的机理。结果表明: 1) 湖区排土场滑动路径可以划分为 3 个区域——推移式潜在滑动区、滑动过渡区和牵引式潜在滑动区; 2) 软弱基底材料刚度和刚度较小, 引导推移式潜在滑动区沿着基底层向临空面发展, 导致牵引式潜在滑动区率先在基底处产生且向背离临空面的方向发展; 3) 湖区排土场的稳定性与软弱基底的黏聚力、内摩擦角、弹性模量、湖底地层倾角正相关, 与软弱基底厚度负相关。综合上述分析结果, 提出了分别针对推移式潜在滑动区和牵引式潜在滑动区的湖区排土场失稳防治措施。

关键词: 湖区排土场; 软弱基底; 滑动路径分区; 诱发失稳; 失稳影响因素

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

文章编号: 1671-4431(2015)09-0084-06

The Mechanism Research of Waste-dump in Lake Area Failure Caused by Soft Base

WU Jun², WANG Hong-xing^{1,2,3}, TAN Yun-zhi², ZUO Qing-jun²

(1. Hubei Key Laboratory of Construction Management in Hydropower Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area of Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 3. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Based on the Chengmenshan copper ore dumping site second phrase expansion project in Jiangxi Province, the numerical analysis model was established, the waste-dump in lake area failure character was revealed by the equivalent plastic strain field and displacement field evolution principle, the waste-dump in lake area failure mechanism caused by soft base was revealed by the stress field distribution character. The experimental results show that the sliding path of the waste-dump in lake area can be divided into 3 zones—thrust load potential sliding zone, transitional zone and retrogressive potential sliding zone. The stiffness and strength of the soft base material are small, thus guide the thrust load potential to develop from the base towards the free face in sliding zone, causing the retrogressive potential sliding zone to be produced in the base and developed in the opposite side of the free surface in the soft base. The stability of the waste-dump in lake area is positive correlation to the cohesion/inner friction angle/elastic model and stratum dip angle of the soft base, negative correlation to the thickness of the soft base. According to the above analysis results, the treatments for the waste-dump failure in lake area aiming at the thrust load potential sliding zone and retrogressive potential sliding zone respectively are proposed.

Key words: waste-dump in lake area; soft base; sliding path zoning; causing failure; instability influence factors

收稿日期: 2015-07-30.

基金项目: 湖北省自然科学基金(2014CFB664); 国家自然科学基金(41402259); 三峡大学博士科研启动基金(KJ201413036)和水电工程施工与管理湖北省重点实验室(三峡大学)开放课题(2014KSD14).

作者简介: 吴 军(1990-), 男, 硕士生, E-mail: 76258949@qq.com

通讯作者: 汪洪星(1983-), 男, 博士, 讲师, E-mail: wanghongxingli@126.com

排土场是由露天开采矿区剥离表层岩土体材料堆积而成的人工堆积体。国内外的学者对排土场及类似松散堆积体的滑稳定性进行了大量的研究。如 Springman 等^[1]、陈红旗等^[2]通过室内外试验、数值模拟分析对排土场的物理力学特性、应力场、位移场及失稳模式等进行了比较深入的分析。当矿区附近的堆载空间受到限制时,继续在原有排土场上方排弃废土,可能会造成排土场整体失稳^[3]。此时,为了保证排土场的安全,不得不选择在矿区附近的湖区进行排土场的堆载,例如江西城门山铜矿排土场二期扩建工程就是这种情况。当排土场堆载于湖区软弱基底上时,由于排土场堆载高度较大(例如此文研究的湖区排土场设计堆载高度达到了 120 m),容易形成推移式的滑坡失稳,如梁光模等^[4]、邬爱清等^[5]、杨光华等^[6]、雍睿等^[7]、夏浩等^[8]揭示了推移式山体滑坡产生的原因;由于软弱基底的强度和刚度都较低,容易形成牵引式的滑坡失稳,如蔡文等^[9]、张常亮等^[10]、姚海林等^[11]、宋东日等^[12]、周跃峰等^[13]揭示了牵引式滑坡发生的机理;因此,在湖区堆载排土场,将降低堆载体的稳定性,增大发生地质灾害的风险。为了保障湖区排土场堆载的安全,作者以江西城门山铜矿排土场二期扩建工程为研究对象,建立数值分析模型,通过等效塑性应变和位移场演化规律,揭示软弱基底排土场失稳破坏的特征,及其与硬质基底排土场失稳破坏的异同;提取软弱基底排土场的应力场,根据应力场分布特征,揭示软弱基底诱发湖区排土场失稳的机理;调整软弱基底的粘聚力、内摩擦角、弹性模量、厚度、地层倾角等物理力学参数的取值范围,揭示软弱基底物理力学参数对湖区排土场稳定性的影响规律;根据软弱基底诱发排土场失稳的特征,提出合理的湖区排土场失稳防治措施。

1 工程概况

江西城门山铜矿排土场二期扩建工程位于江西省九江县城门镇联盟村。根据设计规划,排土场由 4 个堆载平台组成,即 30 m、60 m、90 m 和 120 m 堆载平台,台阶边坡均为 1:1.5;排土场向湖心方向延伸 305 m,湖泥厚度 12 m,最终堆载高度 120 m,如图 1 所示。通过现场勘探和室内试验分析可知,排土场粗粒料具有分层明显、不均匀、级配较好、自然坡度大、渗透系数大、遇水软化等特点;湖区淤泥具有粉粒含量高、天然含水率高、天然密度低、液塑限高、渗透系数小、压缩性高、抗剪强度低等特点。

根据设计堆载断面,通过有限元分析软件 ABAQUS,建立基于强度折减法的湖区排土场稳定性有限元数值分析模型,如图 2 所示;分析模型中共有 5 个台阶,其中最下面一层为原始的淤泥堆积层,上面的 4 层分别为堆载的 30 m、60 m、90 m 和 120 m 粗粒料平台;地勘资料显示,淤泥底部为坚硬基岩,模型左侧为近乎垂直的山壁,模型右侧为已经填筑完成的拦污坝;因此,模型的底部只取到淤泥底面且约束其竖直方向的位移,模型左右两侧仅取到淤泥所在的界限且约束其水平方向的位移。粗粒料和湖泥的力学行为,通过摩尔-库伦本构模型进行模拟,其中粗粒料的抗剪强度指标通过大型直剪试验获取,湖泥的抗剪强度指标通过室内常规三轴试验获取,取值结果如表 1 所示。



图1 湖区排土场

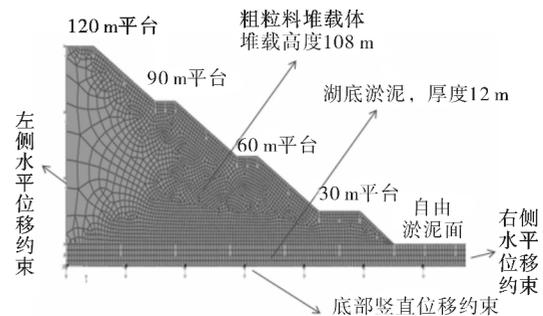


图2 湖区排土场数值分析模型

摩尔库伦本构模型屈服方程为

$$F = R_{mc} \cdot q - p \cdot \tan \varphi - c = 0 \tag{1}$$

式中, F 表示屈服方程; q 表示偏应力; p 表示静水压力; c 为材料的粘聚力; φ 为材料的内摩擦角,表示 $q-p$ 应力面上摩尔-库伦屈服面的倾斜角; R_{mc} 为表示 π 平面上的屈服面形状的一个度量。

表 1 排土场材料参数

参数	$\lambda / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	E / MPa	ν	c / kPa	$\varphi / (^\circ)$
Dumping	22	200	0.3	38	27.5
Silt	15	20	0.3	4.5	12.5

2 湖区排土场失稳破坏特征

2.1 湖区排土场滑动路径组成

由湖区排土场失稳时的等效塑性云图 3 可以看出,湖区排土场滑动路径可以分为 3 个部分: 1) 排土场左侧位置,上覆堆载高,在上覆压力的作用下,率先形成塑性区,引起应力转移,使得附近的土体承担更大的应力,进而产生进一步的失稳破坏;在发展一定距离以后,到达基底层;基底处材料的刚度较小,约束较小,且该位置基底层材料的抗剪强度较小,容易在先期塑性区的推动作用下发生塑性流动;先期塑性区到达基底层以后,进入基底层,并且有沿着基底层向临空面发展的趋势,其所处的位置如图 3 中的 A 区域所示; 2) 排土场坡脚处软弱基底层,由于基底材料强度很小,并且邻近临空面,受到的约束小,同样也会在上覆荷载的作用下率先形成塑性区;基底处材料刚度很小,该塑性区在堆载料的推动作用下极易发生流动,向坡脚处自由淤泥面挤出,形成位于坡脚处的滑动路径出露(如图 4 现场观测到的淤泥包隆起所示),并且有背离临空面发展的趋势,其所处的位置如图 3 中的 C 区域所示; 3) 位于排土场中部下方软弱基底层的 B 区域,由于受到上覆荷载的压力相对于 A 区域较小,受到的临空面的约束相对于 C 区域较大,将在 A 区域和 C 区域的共同作用下,最后产生塑性流动; 4) A 区域顺利地向临空面方向发展, C 区域顺利地背离临空面发展,并且最终在 B 区域汇合,形成最终的湖区排土场失稳破坏滑动路径。

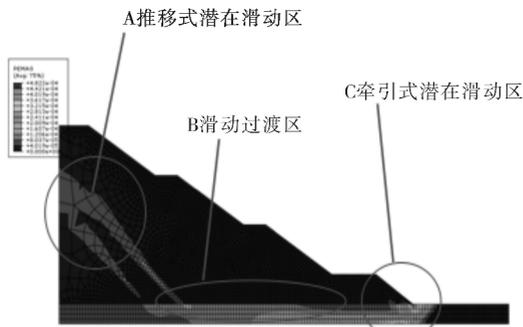


图3 等效塑性应变云图

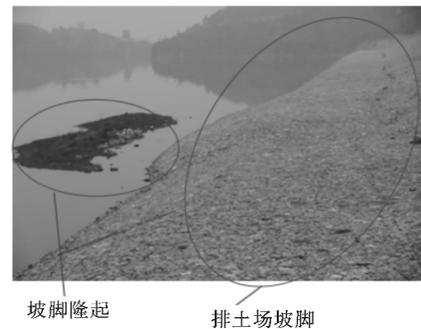


图4 排土场坡脚处淤泥隆起现场

现有研究成果表明,根据滑坡受力状态,滑坡破坏一般可以分为推移式破坏和牵引式破坏两种^[14]。而杨光华等^[6]通过现场调查和数值模拟分析,判定鹅公带滑坡为上部推移、下部牵引破坏的复合型滑坡。对于文中的排土场,上部堆载高度较大(达到了 120 m,在人工边坡中属于高边坡),易导致堆载料在高应力下率先达到塑性流动状态(图 3 中 A 区域);而坡脚处材料抗剪强度低(软弱基底),会导致基底层也率先产生塑性流动(图 3 中 C 区域);排土场中部区域的堆载料,应力不大、且距离临空面较远,在上下部的塑性破坏区扩展的带动下逐渐产生塑性流动(图 3 中 B 区域)。因此,根据杨光华对复合型滑坡的定义,湖区排土场失稳破坏模式也可以定义为具有上部推移、下部牵引特征的复合型滑坡。为了便于分析,文中将湖区排土场滑动路径划分为 3 个分区:推移式潜在滑动区(A 区)、滑动过渡区(B 区)和牵引式潜在滑动区(C 区),如图 3 所示;湖区排土场最终的失稳破坏由推移式潜在滑动区和牵引式潜在滑动区的共同作用形成,滑动过渡区起到连通二者的作用。

2.2 软弱基底排土场与硬质基底排土场失稳对比分析

为了揭示软弱基底对排土场稳定性的影响,用上覆粗粒料的材料参数替换淤泥的材料参数,建立硬质基底排土场的对比分析模型;硬质基底排土场与软弱基底排土场唯一的不同,是最底部的 12 m 厚度的土体的材料参数不一样,其他都是一样的。对比分析图 5 和图 6 中的硬质基底排土场和湖区排土场失稳时的水平位移云图和位移矢量图,可以发现:对于硬质基底排土场,从坡顶向坡脚发展的推移式潜在滑动区,在发展一段距离以后,抵达基底层,受到了抑制而无法继续沿着基底层发展,继而发生应力偏转,整体向上方移动,与第二个堆载平台坡脚处向坡顶处发展的牵引式潜在滑动区汇合,形成贯穿排土场的整体滑动路径;而对于软弱基底排土场,从坡顶向坡脚方向发展的推移式潜在滑动区抵达基底层后,顺着基底层继续发展,并且最终与坡脚处的牵引式潜在滑动面汇合,形成贯穿排土场的整体滑动路径。

综合分析软弱基底与硬质基底排土场失稳模式的异同,可以发现: 1) 软弱基底的存在,将导致湖区排土

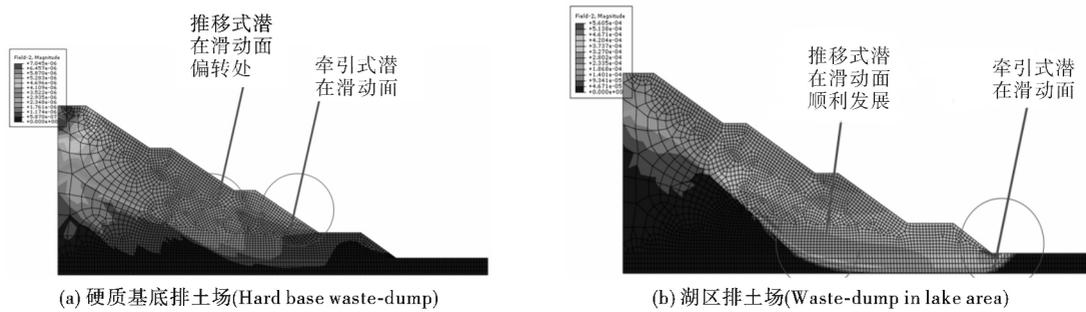


图5 水平位移云图对比分析

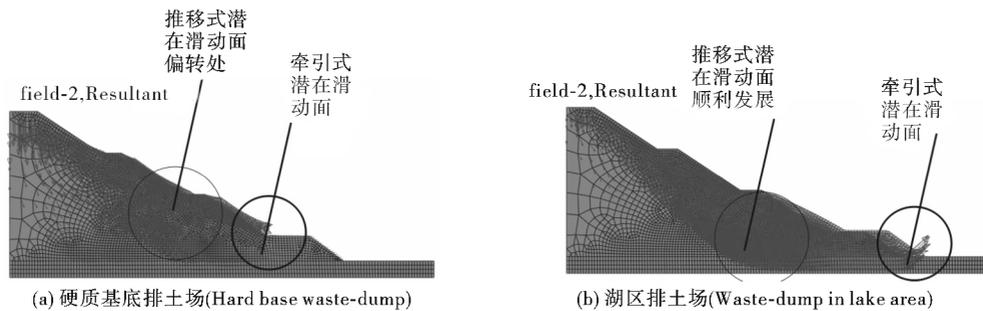


图6 位移矢量图对比分析

场稳定性的降低; 2) 湖区排土场最终滑动路径的位置, 全部处于硬质基底排土场最终滑动路径的下方, 说明一旦失稳, 湖区排土场滑动的方量更大, 滑动的规模更大; 3) 湖区排土场最终滑动路径的坡度相对于硬质基底排土场最终滑动路径的坡度更大, 一旦滑动, 产生的势能更大, 对附近区域造成的危害更大。

3 软弱基底诱发湖区排土场失稳机理

3.1 湖区排土场应力分布特征

根据湖区排土场数值分析结果, 提取失稳时排土场的应力场进行分析。由于临空面的存在, 排土场各个位置的大小主应力方向是不同的: 推移式潜在滑动区, 大主应力的方向接近于竖直, 如图 7 中 A 区所示; 牵引式潜在滑动区, 大主应力平行于临空面, 其方向偏向于模型左上方, 如图 7 中 C 区所示; 而处于中间部分滑动过渡区 B, 主应力的方向则处于 A 区和 C 区之间, 如图 7 中 B 区所示。

大小主应力的作用下, 土体破裂面与大主应力作用面的夹角 D 为 $D = 45^\circ + 0.5 \times \varphi$, 其中 φ 为土体的内摩擦角; 对于特定的材料, 夹角 D 为一个定值。因此, 根据排土场各个区域的大小主应力方向, 可以确定各个位置的破裂方向, 如图 8 所示。对于 A 区土体, 大主应力接近于竖直, 其作用面接近水平面, 因此该区土体的破裂方向与水平面的夹角接近于 D ; 对于 C 区土体, 土体的破裂方向相对于 A 区域土体的破裂方向沿逆时针旋转一定的角度(接近于 45°); 而对于 B 区域土体, 土体的破裂方向处于由 A 区域向 C 区域过渡的状态。

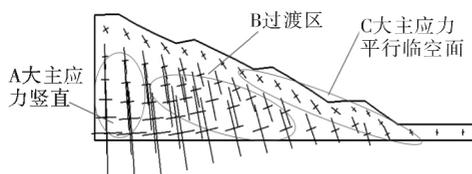


图7 排土场主应力方向

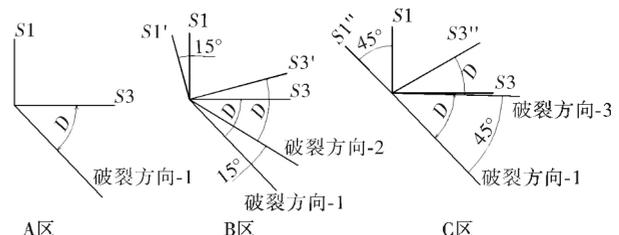


图8 不同区域破裂方向

3.2 软弱基底诱发湖区排土场失稳机理

贯穿整个排土场的滑动路径, 将是一条从 A 区域, 经过 B 区域, 逐渐延伸到 C 区域的带状区域; 由上述各个区域土体破裂面方向可知, 模型中各点的破裂面方向与水平方向的夹角, 从 A 到 B、从 B 到 C 逐渐变小, 因此最终由 A、B、C 区域各点形成的连续滑动路径曲线, 将是一条从坡顶位置向坡脚位置逐渐下沉, 且滑

动方向越来越平缓的滑动路径曲线,如图9所示。

为了确定最终的滑动路径,需要首先确定推移式潜在滑动区和牵引式潜在滑动区的位置。对于推移式潜在滑动区的位置,可能会在如图10所示1、2、3、5等4个位置形成;对于牵引式潜在滑动区的位置,可能会在如图10所示的4、6两个位置形成。

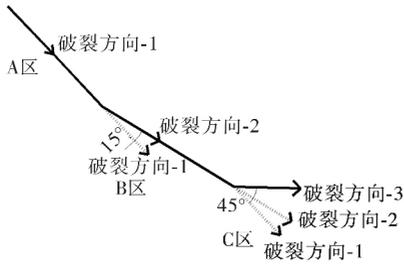


图9 滑动路径发展趋势

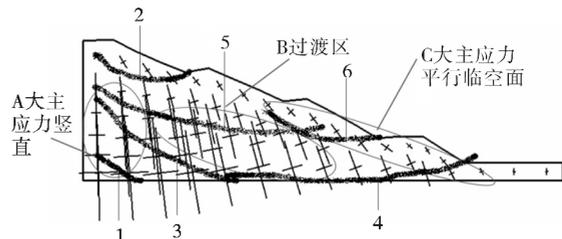


图10 排土场滑坡路径分析

对于上述推移式潜在滑动区和牵引式潜在滑动区,不会都参与形成最终的排土场滑动路径。下面对各个潜在滑动区参与形成最终滑动路径的可能性进行分析,进而确定出最终的排土场滑动路径。

1) 对于排土场底部的推移式潜在滑动区1:该区域会很快就发展至排土场底部坚硬地层;可以假设底部坚硬地层为刚性材料,那么该滑动区将无法向底部继续发展;该滑动区距离临空面太远,受到的约束太大,所以也无法向临空面方向继续发展;因此该推移式潜在滑动区无法参与形成最终的滑动路径。

2) 对于排土场模型顶部的推移式潜在滑动区2:如果该区域形成了塑性流动,将会很快地发展成为一条贯穿临空面的滑动路径;但是由于该区域上覆荷载比较小,无法率先形成塑性区,因此该区域也无法参与形成实际的滑动路径。

3) 对于排土场中部的推移式潜在滑动区3:该区域较早地进入了模型底部位置,对于硬质基底排土场,基底材料的刚度较大,受到的约束较大,且该位置的粗粒料的抗剪强度高,区域3在该位置的继续发展受到了抑制;从而会在区域3的上方继续发生主应力偏转,形成一个坡度更加平缓的推移式潜在滑动区5,与第二个堆载平台坡脚处的牵引式滑动区6在滑动过渡区的某一点汇合,形成最终的如图10所示的滑动路径5-6;而对于软弱基底排土场,基底材料的刚度小,区域3受到的约束较小,且该位置的软弱基层材料抗剪强度低,容易在区域3的推动作用下发生塑性流动,因此区域3可以顺利地继续向临空面方向发展,且最终与软弱基层的牵引式滑动区4汇合,形成最终的如图10所示的滑动路径3-4。

综上所述,软弱基底诱发湖区排土场失稳的机理表现为:1)湖底淤泥的刚度比较小,无法抑制排土场上部推移式潜在滑动区的发展,减小了推移式潜在滑动区发展的阻力;2)坡脚处湖底淤泥的强度较小,易于形成牵引式潜在滑动区;3)处于过渡区的排土场中部湖底淤泥强度和刚度较小,易于连通推移式潜在滑动区和牵引式潜在滑动区,形成贯通排土场的滑动路径。

4 软弱基底物理力学性质对湖区排土场稳定性的影响

湖区排土场的滑动路径更容易形成,稳定性更差,比如文中硬质基底排土场的安全系数为1.35,而湖区排土场安全系数减小到0.89。同时,软弱基底的物理力学参数,如抗剪强度指标、弹性模量、淤泥厚度、湖底地层倾角(与排土场边坡反向取正值,反之取负值)等,也影响着湖区排土场的稳定性,如图11~图15所示。

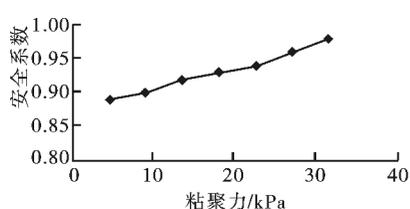


图11 稳定性与黏聚力关系

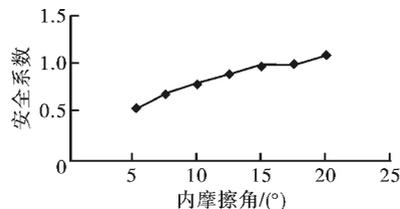


图12 稳定性与内摩擦角关系

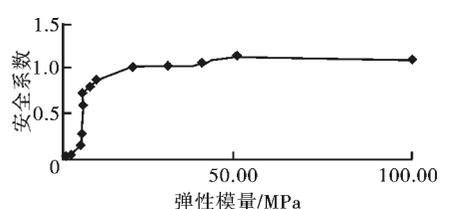


图13 稳定性与弹性模量关系

从图11~图15中可以看出,湖区排土场的稳定性,与软弱基底的黏聚力、内摩擦角、弹性模量、湖底地层倾角正相关,随着上述参数值的减小而减小;与软弱基底厚度负相关,随着软弱基底厚度的增大而减小。其中软弱基底弹性模量对湖区排土场稳定性的影响尤其具有意义;从图13中可以看出,当弹性模量从1 MPa

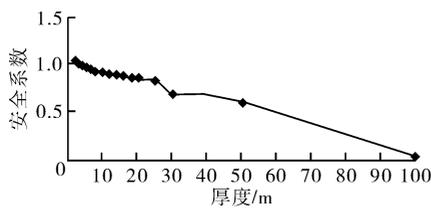


图14 稳定性与厚度关系

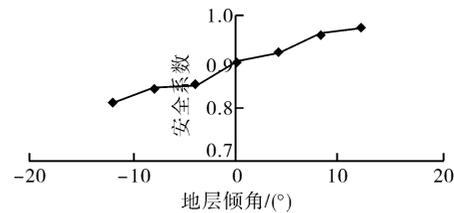


图15 稳定性与地层倾角关系

增大到 50 MPa 时,排土场的安全系数从 0.02 增大到 1.12,体现了软弱基底对湖区排土场稳定性的影响;工程中淤泥弹性模量的取值又处于这个范围内,因此可以认为软弱基底弹性模量对湖区排土场的稳定性影响是显著的;而一般的边坡稳定性分析方法,如瑞典条分法、余推力法等,由于计算过程中假定滑动条块为刚体,不考虑土体的变形,因此无法正确反映软弱基底对湖区排土场稳定性的影响。

上述参数对于评价一个地区的湖区排土场稳定性具有非常重要的意义;针对一个特定的湖区排土场采取防治措施时,除了湖底地层倾角无法改变,其他的参数都可以通过工程措施进行改良,进而提高湖区排土场的稳定性。

5 湖区排土场失稳防治措施

由上述分析可知,湖区排土场失稳属于复合型破坏模式,其潜在滑动路径由上部推移式潜在滑动区和下部牵引式潜在滑动区组成。为了对湖区排土场进行有效的防治,需要分别对上部推移式潜在滑动区和下部牵引式潜在滑动区进行处理。湖区排土场的推移式潜在滑动区和牵引式潜在滑动具有以下的特点:1)原排土场堆载料渗透系数大(达到 2.26×10^{-4} m/s),遇水弱化(浸水饱和后黏聚力减低 25%,内摩擦角降低 20%);2)推移式潜在滑动区将产生在堆载体的高度较大、约束较小、降雨入渗弱化的部位;3)坡脚处牵引式潜在滑动区的形成,主要由坡脚材料遇水软化和下卧湖底淤泥刚度、强度太小引起。

因此,建议在排土场施工的过程中,采取以下的措施抑制湖区排土场推移式潜在滑动区的发展:1)根据计算得到的推移式潜在滑动区位置,对堆载料进行相应的处理,如分层压实、强夯加固等,以加强该位置堆载料的密度、压实度、抗剪强度等物理力学指标;2)在堆载料与山体的接触部位容易产生拉裂缝,形成降雨入渗通道,促进最终滑动路径的形成,因此在排土场施工的过程中对堆载料附近山壁进行相应的处理,如清除山壁杂草、杂土,靠近山壁堆载料压实加固等;3)在排土场坡顶附近设置排水沟、进行地表植被等,减少降雨入渗对堆载料的软化。

采取以下的措施抑制湖区排土场牵引式潜在滑动区的发展:1)在排土场坡脚附近安全平台上设置排水沟,将降雨坡面径流通过排水沟引到排土场以外的范围;2)排土场坡面进行植被绿化,一方面可以保护环境,另外一方面可以防止降雨入渗,减小排土场坡脚附近堆载料遇水软化;3)在排土场附近水域设置泄洪闸,控制水域水位,减少水位升降对排土场稳定性的影响;4)进行初期堆载平台施工时,尽量选择粒径较大的块石进行堆载,并且通过强夯施工,使块石尽量下沉,减小下卧软弱基底的厚度,提高软弱基层的黏聚力、内摩擦角和弹性模量,在抑制牵引式潜在滑动区发展的同时,可以增大对推移式潜在滑动区的约束作用。

6 结 论

a.湖区排土场失稳破坏特征:湖区排土场滑动路径可以分为推移式潜在滑动区、滑动过渡区和牵引式潜在滑动区;软弱基底的存在,将导致湖区排土场稳定性的降低;湖区排土场最终滑动路径的位置,全部处于硬质基底排土场最终滑动路径的下方;湖区排土场最终滑动路径的坡度相对于硬质基底排土场更大。

b.软弱基底诱发湖区排土场失稳机理:湖底淤泥的刚度比较小,无法抑制排土场上部推移式潜在滑动区的发展,减小了推移式潜在滑动区发展的阻力;坡脚处湖底淤泥的强度较小,易于形成牵引式潜在滑动区;处于过渡区的排土场中部湖底淤泥强度和刚度较小,易于连通推移式潜在滑动区和牵引式潜在滑动区,形成贯通排土场的滑动路径。

c.软弱基底物理力学性质对湖区排土场稳定性的影响:湖区排土场的稳定性,与软弱基底的黏聚力、内摩擦角、弹性模量、湖底地层倾角正相关,与软弱基底厚度负相关。

(下转第 99 页)

- [4] Hassanshahian M ,Ahmadinejad M ,Tebyanian H et al.Isolation and Characterization of Alkane Degrading Bacteria from Petroleum Reservoir Waste Water in Iran (Kerman and Tehran Provenances) [J].Marine Pollution Bulletin 2013 ,73(1) : 300-305.
- [5] Baquiran J P ,Thater B ,Songco K et al.Characterization of Culturable PAH and BTEX Degrading Bacteria from Heavy Oil of the Rancho La Brea Tarpits [J].Polycyclic Aromatic Compound 2012 ,32(5) : 600-614.
- [6] 任南琪,李建政.环境污染防治中的生物技术[M].北京:化学工业出版社,2004.
- [7] 丁克强,孙铁珩,李培军.石油污染土壤的生物修复技术[J].生态学杂志,2003,19(2):50-55.
- [8] 孙寓娇,郝旭光,王红旗.不同温度下石油污染土壤中石油降解菌群的实验研究[J].石油学报,2010,26(1):87-92.
- [9] Ayotamuno M J ,Kogbara R B ,Ogaji S O T et al.Bioremediation of a Crude-oil Polluted Agricultural-soil at Port Harcourt ,Nigeria[J].Applied Energy 2006 ,83(11) : 1249-1257.
- [10] Mukherji S ,Jagadevan S ,Mohapatra G et al.Biodegradation of Diesel Oil by an Arabian Sea Sediment Culture Isolated from the Vicinity of an Oil Field [J].Bioresource Technology 2004 ,95(3) : 281-286.
- [11] 冯俊生,刘杨丹.石油降解菌的分离鉴定及降解能力初步研究[J].科学技术与工程,2013,13(9):2616-2618.
- [12] Ding K Q ,Luo Y M ,Sun T H et al.Bioremediation of Soil Contaminated with Petroleum Using Forced-aeration Composting [J].Pedosphere 2002 ,12(2) : 145-150.
- [13] Bento F M ,Okeke B C ,Frankenberger W T.Diversity of Biosurfactant Producing Microorganisms Isolated from Soils Contaminated with Diesel Oil [J].Microbiological Research 2005 ,160(3) : 249-255.
- [14] Meng Q L ,Han X K ,Zhang L W et al.Degradation Kinetics and Mechanism of Petroleum Contaminations with One Pseudomonas [J].Environmental Pollution and Control 2014 ,36(12) : 64-68.
- [15] 杨丽萍,蒋继辉.微生物对石油烃类的降解机理[J].油气田环境保护,2011,21(2):24-26.
- [16] 周德庆.微生物学教程[M].北京:高等教育出版社,1993.

(上接第 89 页)

参考文献

- [1] Springman S M ,Jomm C ,Teyssie P.Instabilities on Moraine Slopes Induced by Loss of Suction: A Case History [J].Geotechnique 2003 ,53(1) : 3-10.
- [2] 陈红旗,黄润秋,林峰.大型堆积体边坡的空间工程效应研究[J].岩土工程学报,2005,27(3):323-328.
- [3] 段喜明,王治国,宋震勇,等.安太堡露天煤矿南排土场滑坡体稳定性及治理[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1999,5(1):86-91.
- [4] 梁光模,王成华,张小刚,等.川藏公路中坝段溜砂坡形成与防治对策[J].中国地质灾害与防治学报,2003,14(4):34-39.
- [5] 邬爱清,丁秀丽,李会中,等.非连续变形分析方法模拟干将坪滑坡启动与滑坡全过程[J].岩石力学与工程学报,2006,25(7):1297-1303.
- [6] 杨光华,钟志辉,张玉成,等.根据应力场和位移场判断滑坡的破坏类型及最优加固位置确定[J].岩石力学与工程学报,2012,31(9):1879-1887.
- [7] 雍睿,胡新丽,唐辉明,等.推移式滑坡演化过程模型试验与数值模拟研究[J].岩土力学,2013,34(10):3018-3027.
- [8] 夏浩,雍睿,马俊伟,等.推移式滑坡模型试验推力加载方法的研究[J].长江科学院院报,2015,32(1):112-116.
- [9] 蔡文,曹洪,罗彦,等.强度折减有限元法模拟边坡牵引式破坏过程[J].岩石力学与工程学报,2011,30(S2):3529-3533.
- [10] 张常亮,王阿丹,邢鲜丽,等.侵蚀作用诱发黄土滑坡的机制研究[J].岩土力学,2012,33(5):1585-1592.
- [11] 姚海林,游慧杰,范永丰,等.柳家凹黄土滑坡滑动机制研究[J].岩土力学,2013,34(1):182-188.
- [12] 宋东日,任伟中,沈波,等.牵引式滑坡的破坏机制及其加固措施探讨——以某高速公路牵引式滑坡为例[J].岩土力学,2013,34(12):3587-3593.
- [13] 周跃峰,龚壁卫,胡波,等.牵引式滑坡演化模式研究[J].岩土工程学报,2014,36(10):1855-1862.
- [14] 郑颖人,陈祖煜,王恭先,等.边坡与滑坡工程治理[M].2版.北京:人民交通出版社,2007.