

文章编号: 1000-7598-(2006)增刊-0113-05

磷石膏高坝稳定性分析

张 超¹, 余克井², 杨春和¹, 陈剑文¹

(1. 中国科学院 岩土力学重点实验室, 武汉 430071; 2. 宁波华东核工业工程勘察院, 宁波 315800)

摘 要: 对于磷石膏的力学特性, 国内外的研究很少。通过室内高压三轴试验, 研究了磷石膏的强度与围压的关系。从高压三轴试验结果来看, 磷石膏的强度随着围压的升高而降低, 且磷石膏的高压折减效应比较明显。在稳定性分析中, 如果采用常规围压条件下的三轴试验得到的强度进行分析, 其稳定性分析结果是偏于不安全的。以一个高磷石膏坝为例, 对其稳定性进行数值模拟分析。结果表明, 考虑强度折减以后其安全系数明显降低。得出了磷石膏具有明显的高压强度折减特性, 在高磷石膏坝的稳定性分析中一定要考虑高压强度折减的结论。

关 键 词: 磷石膏; 高坝; 稳定性分析; 强度折减

中图分类号: TU 454

文献标识码: A

Stability analysis of high phosphogypsum dam

ZHANG Chao¹, YU Ke-jing², YANG Chun-he¹, CHEN Jian-wen¹

(1. Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;

2. Ningbo East-China Engineering Survey Institute of Nuclear Industry, Ningbo 315800, China)

Abstract: Concerning the rare study on mechanical properties of phosphogypsum, the relationship of strength with confining pressure is investigated by the triaxial compression experiments with high confining pressure. From the experiment results, it is found that the strength will increase with the increasingly confining pressure and the tendency is very obvious. It is dangerous to use the strength parameters obtained from the conventional triaxial compression experiments to analyze the stability of high phosphogypsum dam. Taking a high phosphogypsum dam for example, the stability of the dam is analyzed. And the results indicate that the safety factor would obviously decrease if the strength reduction of phosphogypsum in high confining pressure were taken into account. A conclusion is drawn that the strength reduction of phosphogypsum in high confining pressure is evident, and it is necessary to consider the strength reduction of phosphogypsum when analyzing the stability of high strength reduction of phosphogypsum dam.

Key words: phosphogypsum; high dam; stability analysis; strength reduction

1 引 言

据统计, 中国约有尾矿库2000余座, 其中冶金矿山尾矿库近400座, 这些尾矿库绝大多数采用上游法堆坝^[1]。据不完全统计, 国外高度在100 m以上的尾矿坝有17座, 最高的已达270 m^[2]。而我国有色冶金矿山尾矿坝中设计高度超过100 m的就有7座。矿业的快速发展将需要更多的空间来堆存尾矿, 故尾矿坝的规模将会越来越大, 数量也会越来越多。其中20世纪50年代建设起来的尾矿坝大多已达到或接近最初设计高度, 由于征地困难及建造新尾矿坝的高昂成本, 许多接近使用年限的尾矿坝不得不继续

加高使用, 尾矿坝的加高扩容已经成为了一种比较常用的、经济的解决尾矿堆置问题的途径, 预计在未来几年我国的高尾矿坝数量将会不断增加^[3]。

我国多数尾矿库的地理位置十分重要, 选址时很难避开生态敏感区或人口密集区。有的位于大江、大湖、重要水源地上游, 有的位于重要公交设施上游, 有的在密集的居民区上游, 这些特点都是我国尾矿库所独有的^[4]。而尾矿浆中含有一些对环境有害的物质, 对环境影响很大, 从这个意义上讲, 尾矿坝是一个巨大的污染源。尾矿坝一旦泄漏, 发生事故, 必将对下游地区人民的生命、财产造成巨大危害, 环境受到污染, 不但使矿山被迫停产, 也给

收稿日期: 2005-04-10

基金项目: 中国科学院武汉岩土力学研究所博士科研启动基金资助项目 (No. Q220604)。

作者简介: 张超, 男, 1978 年生, 博士, 助理研究员, 主要从事边坡与尾矿坝的稳定性及土动力学研究的工作。E-mail: czhang@whrsm.ac.cn

地方带来危害,经济损失和政治影响均很严重,所以尾矿坝的安全问题是矿山环境保护工作的重点。磷石膏坝从广义上讲也是尾矿坝的一种,所以,对于磷石膏坝的稳定性分析问题的研究就显得非常必要,高磷石膏坝的稳定性问题更是如此。

对于尾矿材料的高压特性,王凤江研究^[2]指出:当尾矿堆积高度超过100 m后,则必须补充高压试验参数。已有的少数几个尾矿料高压试验资料表明,高压下尾矿砂的应力-应变曲线不再符合双曲线变化规律,出现应变软化趋势,相应的内摩擦角比低压下减少7~15°。因此,将低压试验求得的结果用于高尾矿坝稳定性分析设计是偏于危险的。张建隆^[5]研究认为:饱和尾砂的固结不排水剪切试验总应力强度包线随着围压的增加而较明显地向下弯曲,饱和尾砂的固结排水剪切试验结果也有此现象,亦即它们的内摩擦角随着围压的提高而降低。通过对张建隆的试验数据进行整理,发现随着围压从400 kPa增加到2.7 MPa,作为其试验材料的尾矿抗剪强度内摩擦角从36.6°减小到27.4°,减小了9.2°,高围压条件下强度折减明显。而磷石膏的研究资料很少,其高压特性研究的资料也没有查到。本文以某磷石膏坝的筑坝材料磷石膏为研究对象,进行高压三轴试验,在试验的基础上对该磷石膏坝的稳定性进行分析。

2 磷石膏的强度特性

本节以磷石膏的强度特性为研究对象,以高围压条件下磷石膏的强度特征为研究重点。从某磷石膏坝取得磷石膏材料的原状样和扰动样,进行基本物理力学特性试验和原状样的常规低压三轴试验(围压小于500 kPa的三轴试验为常规低围压三轴试验^[2]),试验得到的重度和常规低围压条件下的强度结果的平均值见表1所示。表中的强度参数可用于不考虑强度折减情况下磷石膏坝的稳定性计算。

表1 磷石膏物理力学特性参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of phosphogypsum

土类名称	重度 γ /kN·m ⁻³	饱和重度 γ_{sat} /kN·m ⁻³	有效应力强度指标 c'/kPa $\phi'/(^\circ)$	
粗磷石膏	16.0	1.67	6	32
细磷石膏	16.8	1.75	8	30

将扰动的磷石膏按干密度控制制备成多个制备样进行高压三轴试验,制备样的控制干密度为1.20 g/cm³。高压三轴压缩试验的设备采用的是英国 WYKEHAM FARRANCE公司生产的三轴仪,该三

轴仪的最大围压可以加到10 MPa。本次试验施加的围压分别为100 kPa, 200 kPa, 400 kPa, 1 MPa, 1.5 MPa, 2 MPa和2.6 MPa,三轴试验的结果经过整理得到的摩尔圆和包络线如图1所示。

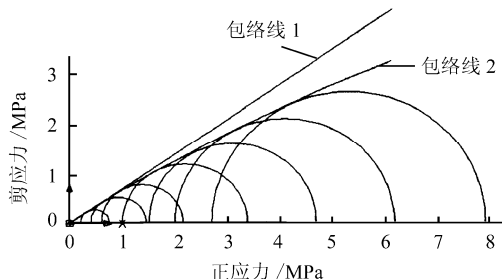


图1 高压三轴试验的摩尔-库伦包络线图

Fig.1 Mohr-coulomb strength envelopes

图中的包络线1为低围压时得到的强度包络线,认为抗剪强度参数不随围压的增高而降低,即不考虑强度折减,此时包络线1为直线。包络线2为围压从100 kPa增加到2.6 MPa时的实际包络线,为切线斜率缓慢降低的一条曲线。由于磷石膏的凝聚力较低,如果忽略磷石膏材料的凝聚力,则可以认为材料的内摩擦角随着围压的增高而降低。在忽略磷石膏的凝聚力的前提下,包络线1给出的低围压下磷石膏的内摩擦角为32°。当围压为2.6 MPa时,得到摩尔圆过圆点的切线斜率为0.425,即忽略凝聚力的磷石膏材料在2.6 MPa围压下的内摩擦角为 $\arctan 0.404 = 23^\circ$ 。由此可见,围压对磷石膏的抗剪强度的影响是非常明显的。下节的稳定性分析中将考虑这种强度降低对磷石膏坝的稳定性影响。

3 磷石膏坝的稳定性分析

3.1 计算条件

根据中国地震烈度区划图(1990年),黄麦岭磷石膏矿矿区为地震基本烈度小于VI度。而据《水工建筑物抗震设计规范》DL5073-2000总则中规定,设计烈度为VI度时,可不进行抗震计算分析,故该磷石膏坝的稳定性分析中暂不考虑地震力的作用。

从本次的室内土工试验结果来看,该坝体的磷石膏材料的物理力学特性差异不是很大,为了简化计算和突出考虑高围压对坝体的稳定性的影响,本文将磷石膏坝视为一个两种磷石膏材料组成的坝体,即粗磷石膏料和细粒磷石膏料,该坝的计算剖面图如图2所示,坝底高程为79 m,初期坝坝顶高程为90 m,堆积坝坝顶高程为155 m,堆积坝的坡比为1:4,设计坝体最终堆高为203 m,坝体目前磷石膏堆积厚度为76 m,最终堆积高度为124 m。正

常运行情况下的浸润线见图 2。

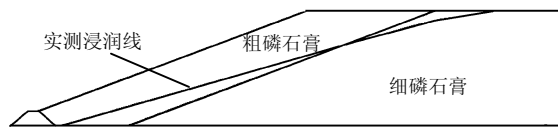


图 2 计算剖面图

Fig.2 Cross-section of phosphogypsum dam

在该磷石膏坝的稳定性分析中, 考虑了两种运行情况: (1) 尾矿库处于正常工作状态, 采用实测的浸润线位置; (2) 在洪水运行条件下, 采用计算的浸润线位置(浸润线的计算采用的商用程序 Seep/w), 其中实际坝高浸润线的计算结果见图 3, 其他坝高情况洪水运行条件下的浸润线的计算结果不再重复给出。

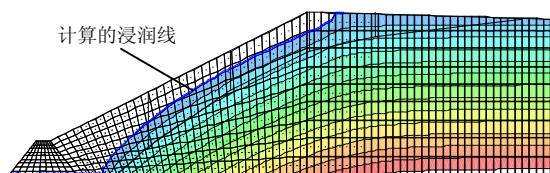


图 3 洪水运行条件下浸润线

Fig.3 Saturation curve of phosphogypsum dam

本文关于磷石膏的高压特性进行的试验数量不多, 且针对的是制备样, 所以本文主要对磷石膏坝从定性的方面进行分析, 要定量分析则需要进行大量原状样的高压三轴试验。

从图 1 可以看出, 将低压试验所得的结果用于高尾矿坝稳定性分析设计, 是偏于危险的。所以, 在高坝的计算中要降低抗剪强度的取值。根据文献 [2] 和高压三轴的试验结果, 认为围压超过 500 kPa 时要考虑高围压的强度折减。本文的研究对象坝顶高程为 133 m, 其堆积体厚度为 62 m, 根据其重度采用 FLAC 计算其应力场的分布。结果显示, 当前坝体在底部水平应力为 380 kPa, 当堆积坝体的厚度为 84 m, 即坝顶高度达到 155 m 的时候, 其最大围压可以达到 500 kPa, 此时应该开始考虑强度折减问题。

3.2 分析方法

磷石膏坝的稳定性分析采用简化 Bishop 有效应力法。该法考虑了土条间法向作用力, 其计算示意图如图 4 所示。

简化 Bishop 法的计算公式如下:

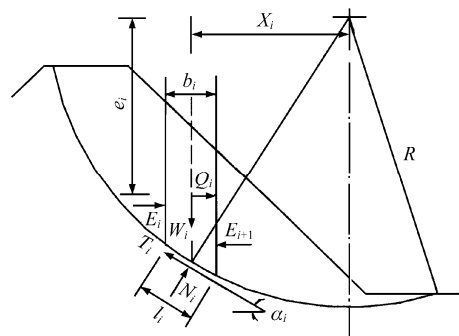


图 4 Bishop 法示意图

Fig.4 Sketch of Bishop method

$$F_s = \frac{\sum \frac{1}{m_{ai}} [c'_i b_i + (W_i - u_i b_i) \tan \phi'_i]}{\sum W_i \sin \alpha_i + \sum Q_i \frac{e_i}{R}} \quad (1)$$

$$m_{ai} = \cos \alpha_i + \frac{\tan \phi'_i \sin \alpha_i}{F_s} \quad (2)$$

式中 α_i 为土条底部的坡角; h_i 为土条高度; b_i 为土条宽度; W_i 为土条自重; Q_i 为水平作用力; u_i 为土条底部的孔隙水压力; R 为滑弧的半径; e_i 为土条水平作用力对滑弧圆心的力臂; c'_i 为土条底部的土体的有效凝聚力; ϕ'_i 为土条底部的土体的有效内摩擦角; F_s 为滑面的安全系数。

从式 (2) 可以看出, m_{ai} 中也含有 F_s , 因此, 需要试算, 先假设稳定性安全系数 F_s , 按照式 (1) 和式 (2) 两式算出新的 F_s 值, 通过反复迭代, 直至前后两次计算得到的 F_s 值的差值在允许的范围内为止。

对于每一个假设的滑动面均可以算出相应的安全系数。为寻找最危险滑动面位置, 需搜索很多滑动面, 逐一进行计算, 而后求得最小的安全系数, 据此判定磷石膏坝是否稳定。

3.3 强度折减对坝体稳定性影响的敏感性分析

为了了解磷石膏材料的强度折减对坝体稳定性的影响, 在以上提到的计算条件和分析方法的基础上对磷石膏坝的稳定性进行一系列的强度折减的计算, 然后分析其对坝体稳定性安全系数的影响。相关研究^[6]表明: 筑坝材料的重度、凝聚力和摩擦角的变异性对坝体的稳定性有较大影响, 尤其是内摩擦角对坝体稳定性的影响大。本节以 165 m 坝顶高程的均质磷石膏坝为例, 计算参数为表 1 中的细磷石膏的参数, 分析磷石膏内摩擦角的变化对坝体稳定性的影响, 磷石膏的内摩擦角的取值范围为 $18^\circ \sim 33^\circ$, 敏感性分析结果如图 5 所示。

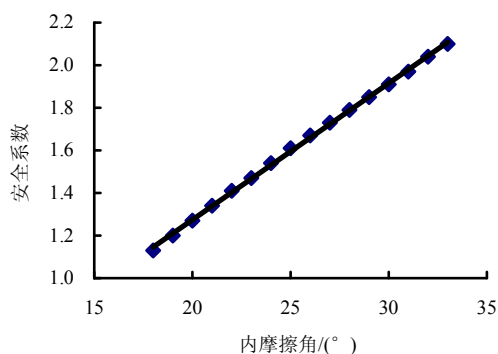


图5 安全系数对磷石膏内摩擦角的敏感性分析
Fig.5 Sensitivity analysis of friction angle with safety factor

由图5可知,当磷石膏材料摩擦角从33°降低到18°时,正常运行情况下的均质磷石膏坝的安全系数相应地从2.11降低到了1.12,摩擦角的变化对坝体的安全系数的影响很明显。如果不考虑高压效应,随着坝高的增大,计算结果将会越来越偏离实际结果,故对摩擦角进行折减是合理的。

在不考虑和考虑高压强度折减的两种条件下,对该磷石膏坝在各个设计高程时的各种运行工况进行稳定性分析。由于本文的高压试验数量有限,且本文主要研究的是高压折减对坝体稳定性的影响,为了便于计算,在考虑坝体的高压强度折减时,只降低磷石膏的内摩擦角,而不考虑凝聚力的折减。根据坝体的高度计算得到围压的分布范围,再由围压确定内摩擦角的折减度数。根据计算得到的围压分布,当坝顶高程达到155m时,开始考虑折减。本节取内摩擦角的折减度数为1°,当坝顶高程为203m时,坝底的围压为1.25MPa,根据图1的试验结果,插值取内摩擦角折减度数为5°。对于坝顶高度分别为165,175,185m和195m时,分别取内摩擦角折减1°,2°,3°和4°。刚好从155m开始考虑折减,165m的内摩擦角折减取1°。对坝体进行强度折减分析时计算得到的安全系数如表2所示。

表2 安全系数计算结果
Table2 Calculated results of safety factors

坝顶高程 /m	正常运行		洪水运行	
	不折减	折减	不折减	折减
133	2.22	/	1.86	/
145	2.10	/	1.79	/
155	1.97	/	1.71	/
165	1.87	1.80	1.63	1.57
175	1.75	1.61	1.52	1.38
185	1.63	1.41	1.40	1.24
195	1.49	1.23	1.29	1.11
203	1.38	1.08	1.18	0.96

参考规范^[7]中的尾矿库等别表(见表3),根据该库的堆积坝坝高和库容可将该库定为III级库。当坝顶高程超过171.0m高程时,该库的等级将提升到II级。根据规范^[7]规定,坝坡抗滑稳定性的最小安全系数不应小于表4规定的数值。

表3 尾矿库的等别
Table 3 Classification of tailings reservoir

等别	全库容 $V/10^4 \text{ m}^3$	坝高 H/m
1	二等库具备提高等别条件者	
2	$\geq 10\,000$	≥ 100
2	(1 000, <10 000)	(60, <100)
4	(100, <1 000)	(30, <60)
5	<100	<30

表4 坝坡抗滑稳定最小安全系数
Table 4 Minimum safety factors of tailings dam

运行情况	坝级别			
	I	II	III	IV, V
正常运行	1.30	1.25	1.20	1.15
洪水运行	1.20	1.15	1.10	1.05
特许情况	1.10	1.05	1.05	1.00

从表2可以,看出折减后的安全系数随着坝体高度的增加而有明显的降低。当坝顶高程达到185m时,其洪水运行时的安全系数只比要求的最小安全系数大0.09,可以说已经几乎没有安全储备。而当坝顶高程达到195m以后,其计算结果表明该坝的抗滑稳定性已经不能满足要求。如果不考虑折减,则在195m的坝顶高程情况下可以得出该坝是稳定的结论,显然这个结论是错误的。在不考虑坝体特殊运行的情况下,该坝的坝顶高程建议不要超过185m,如果同时考虑磷石膏坝排渗系统失效坝体全饱的情况和筑坝材料的高压抗剪强度折减,则坝体的安全堆高会进一步下降,此处不再详细列出全饱和的计算。根据计算结果及综合考虑坝体的安全储备,最终推荐的坝体安全堆高为165m。这与该坝的初步设计坝顶高程203m有很大的出入,根据该项目的研究成果,建议修改其初步设计,将坝顶高度降到165m,或是加固坝体提高其安全系数。

坝体在不同深度的围压是不同的,其强度折减程度也应该不一样。但本文对高磷石膏坝的稳定性进行的是定性研究,故没有对坝体按围压不同进行分层折减。且本文的试验数量有限,要想精确地定量地研究高磷石膏坝的稳定性,大量的高压三轴试验是必不可少的,只是分层折减也不能精确地、定量地了解高坝的稳定性,在这种情况下分层折减意义不大。

4 结论与展望

通过室内高压三轴试验研究了磷石膏的高围压条件下的强度特性。试验结果表明: 磷石膏材料具有明显的高压强度折减效应, 其内摩擦角将会随着坝体的升高而降低。故在磷石膏高坝的稳定性分析计算中一定要考虑到磷石膏的强度折减问题, 否则计算结果会产生比较大的误差, 甚至是完全的错误。

从内摩擦角对磷石膏坝的稳定性的敏感性分析结果来看, 磷石膏的内摩擦角的变化将会显著的影响磷石膏坝的稳定性, 建议在磷石膏坝体厚度超过 80 m 时考虑对坝体材料的抗剪强度进行相应的折减。

本文对于高磷石膏坝的稳定性研究是一个初步探讨, 属于定性研究, 对于磷石膏的高压力学特性还需要进行深入研究, 才能更加精确地预测坝体的稳定性随高度的增加而变化。对于高尾矿坝(包括磷石膏坝和灰渣坝), 建议对筑坝材料进行一定数量的高压三轴试验, 得出不同围压下的抗剪强度指标, 然后对坝体按深度进行分层, 各层取不同的强度折减进行稳定性分析, 这样得出的结果会更加符合实际情况。

参 考 文 献

- [1] 中国有色金属尾矿库概论编辑委员会. 中国有色金属尾矿库概论[M]. 北京: 中国有色金属工业总公司, 1992.
- [2] 王凤江. 上游法高尾矿坝的抗震问题[J]. 冶金矿山设计与建设, 2001, (5): 10—13.
WANG Feng-jiang. Anti-seismic problem of tall tailings dam constructed with upstream method[J]. **Metal Mine Design and Construction**, 2001, (5): 10—13.
- [3] 张超. 尾矿动力特性及坝体稳定性分析[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2005.
- [4] 徐宏达. 我国尾矿库病害事故统计分析[J]. 工业建筑, 2001, 31(1): 69—71.
XU Hong-da. Statistical analyses of tailing reservoir disease accidents in China[J]. **Industrial Construction**, 2001, 31(1): 69—71.
- [5] 张建隆. 尾矿砂力学特性的实验研究[J]. 武汉水利电力大学学报, 1995, 28(6): 685—689.
ZHANG Jian-long. Experimental study on mechanical properties of tailings sands[J]. **Journal of Wuhan University of Hydraulic & Electrical Engineering**, 1995, 28(6): 685—689.
- [6] 张超, 杨春和, 徐卫亚. 尾矿坝稳定性的可靠度分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(11): 1 706—1 711.
ZHANG Chao, YANG Chun-he, XU Wei-ya. Reliability analysis of tailings dam stability[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, (11): 1 706—1 711.
- [7] ZBJ1—90, 选矿厂尾矿设施设计规范[S].