

DOI: 10.11779/CJGE201503010

沉积磷石膏的物理力学特性试验研究

米占宽¹, 饶徐生², 储学群³, 曹培¹

(1. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024; 2. 云天化国际化工公司三环分公司, 云南 昆明 650113;

3. 中石化南京工程有限公司, 江苏 南京 210098)

摘要: 磷石膏是磷酸生产过程中的副产品, 目前的综合利用率尚不足 25%, 大部分需要堆存存放。受地形限制和经济效益考虑, 中国主要为湿法堆存的山谷型堆场。依托柳树箐磷石膏堆积坝, 针对沉积磷石膏首先开展了密度、含水率、渗透、土水特征和颗分等物理性质试验, 然后开展了三轴 CU、蠕变及动三轴等力学特性试验。试验结果表明: ①沉积磷石膏的干密度与埋深没有相关关系; ②沉积磷石膏不具有自然分级现象, 但具有明显的各向异性; ③沉积磷石膏具有较高的摩擦角和抗液化能力, 但其蠕变变形较大、渗透比降较小。上述工作为分析磷石膏堆积坝的坝体稳定性提供了基础, 对现行磷石膏库的运行管理以及新建工程的设计具有重要的借鉴意义。

关键词: 磷石膏; 堆积坝; 沉积规律; 抗剪强度; 蠕变; 液化

中图分类号: TU44; O319.56

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)03-0470-09

作者简介: 米占宽(1973-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事土工试验和数值计算方面的研究。E-mail: zkmi@nhri.cn。

Physico-mechanical properties of deposition phosphogypsum

MI Zhan-kuan¹, RAO Xu-sheng², CHU Xue-qun³, CAO Pei¹

(1. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 2. Yunnan Yuntianhua

International Chemical Co., Ltd., Kunming 650113, China; 3. Sinopec Nanjing Engineering & Construction Incorporation, Nanjing 210098, China)

Abstract: Phosphogypsum (PG) is an acidic by-product produced during the production of phosphoric acid from phosphate rock. In China, only 25% of PG is recycled at present, while 75% is stored by wet storage method in valley regions due to restriction of terrain and economic consideration. Based on the Liushuqing PG stacking dam, the physical properties of deposition PG including density, moisture content, infiltration, soil water characteristics and grade are tested. The mechanical properties of triaxial CU, creep and dynamic triaxial tests are performed. The results show that: (1) The dry density and depth are not related; (2) The deposition PG does not have a natural graded phenomenon, but it has significant anisotropy; (3) The deposition PG has a high friction angle and liquefaction resistance, but its creep deformation is great and seepage gradient is small. The above work provides the basis for the stability analysis of PG stacking dam, and it has an important meaning to the operation management of the existing project and the design of new projects.

Key words: phosphogypsum; stacking dam; deposition law; shear strength; creep; liquefaction

0 引言

磷石膏是湿法磷酸生产过程中的副产品, 2012 中国年产量达到 0.70 亿 t, 且呈逐年增长的态势^[1]。磷石膏的主要成分是 CaO 和 SO₃, 但含有一定量的氟化物和其它放射性物质^[2], 在中国通常按 II 类一般工业固体废物处理, 鉴于无害化处理成本较高, 目前综合利用率尚不足 25%, 故大部分磷石膏需要堆存存放。按堆存场地的不同, 可分为平地型、傍山型、山谷型和截河型堆场, 在中国基本上是山谷型堆场。相比较干法堆存, 湿法堆存经济优势明显, 因而如地质条件为非碳酸盐岩地区, 一般均采用湿排湿堆方式。随着中

国磷肥工业的快速发展, 本世纪初中国相继建设了几座湿法堆存的大型磷石膏库, 例如云天化国际化工三环分公司的柳树箐磷石膏库堆积坝和富瑞分公司的杨家箐磷石膏库堆积坝, 这两座坝设计坝高均超过 100 m、处于 8 度地震区, 其安全性备受关注。

据统计, 110 多年 (1901 年—2013 年) 来, 全世界有 118 座尾矿坝曾发生过破坏或溃坝事故, 原因主要有地震、洪水漫顶、渗透破坏和基础失稳^[3]。尾矿库失

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目 (Y312011, Y313012)

收稿日期: 2014-05-05

事后会造成巨大的生态灾难和人员伤亡,近几十年来,国内外对金属尾矿的沉积规律、物理力学特性及其稳定性开展了大量的研究,但对于与金属尾矿库相近的磷石膏库,一般仅限于在可研阶段采用人工制备样进行物理力学性质试验,并据此进行稳定性分析^[4-8],尚未有人针对已运行若干年的大型湿法堆存磷石膏堆积坝开展过磷石膏沉积规律及其物理力学特性的专项研究。

本文依托柳树箐磷石膏堆积坝,首先进行了钻探取样,采用原状样开展了密度、含水率、渗透、土水特征和颗粒等物理性质试验,在此基础上有针对性的选择原状样开展了三轴 CU、蠕变及动三轴等力学特性试验。通过上述试验研究,总结了磷石膏的沉积规律、渗透特性、渗透破坏特性以及静动力特性,上述研究工作对研究和评估磷石膏库堆积坝的稳定性提供了基础数据,对现行磷石膏库的运行管理以及新建工程的设计具有重要的借鉴意义。

1 依托工程概况

1.1 柳树箐磷石膏堆积坝堆存设计方案

由初期坝和堆积坝组成,设计总坝高约 130 m。

(1) 初期坝

初期坝坝高约 30 m,采用土料填筑。上游坡面、

坝底和下游坝脚设置堆石排水体,三者相连通构成整个堆积坝的主要排渗系统。

(2) 堆积坝及其辅助排渗措施

采用上游式筑坝法,共 20 级子坝,顶宽 6~9 m,高度 5 m,堆积高度约 100 m。采用排渗管网作为辅助排渗方案,目前已在 5 级、9 级子坝和 13 级子坝坝前 120 m 范围内设置了井字形排渗管网。

1.2 沉积磷石膏的钻探取样

钻孔平面位置见图 1。2008 年 6 月,堆积至 5 级子坝时,布设了 9 个取样钻孔,钻孔编号 K1~K9,取原状样 76 件;2013 年 5 月,堆积至 13 级子坝时,又布设了 11 个取样钻孔,钻孔编号 K10~K20,取原状样 112 件,为比较子坝加高和磷石膏堆积过程中磷石膏物理力学性质的变化,在 2,4 级子坝 K2 孔和 K6 孔附近各布设了一个钻孔,钻孔编号分别为 K17 和 K18。

1.3 运行概况

柳树箐磷石膏尾矿库 2005 年开工建设,2006 年 1 月投入运行,截至 2013 年 5 月已堆至 13 级子坝,尚有 7 级子坝即堆存至设计高程。鉴于磷石膏库地形、地质条件较好,具备扩容改造的条件,以提高堆存库容,减少堆存占地,节约土地资源。



图 1 水位和变形观测仪器测点布置及钻孔平面位置

Fig. 1 Arrangement of observation instruments of water level and deformation and drillings

本文主要对沉积磷石膏的物理力学特性进行了全面总结,限于篇幅,有关现状磷石膏库堆积坝的安全性评价及其加高可行性的研究将另文发表。

2 沉积磷石膏的物理力学特性

2.1 物理特性

(1) 干密度分布

图2给出了14个钻孔的取样深度和试验所得干密度的关系,图中UWL表示水位线上,(系钻孔期间的初见水位线,下同),DWL表示水位线下。图3给出了水位线上下的饱和度分布图。由于磷石膏中的主要成分为 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$,不同温度和烘烤时间对测定结果有一定影响,不能照搬现行的土工试验规范。根据文献[9]的研究成果,本文磷石膏的含水率测定方法为55℃温度下烘培24 h^[9]。

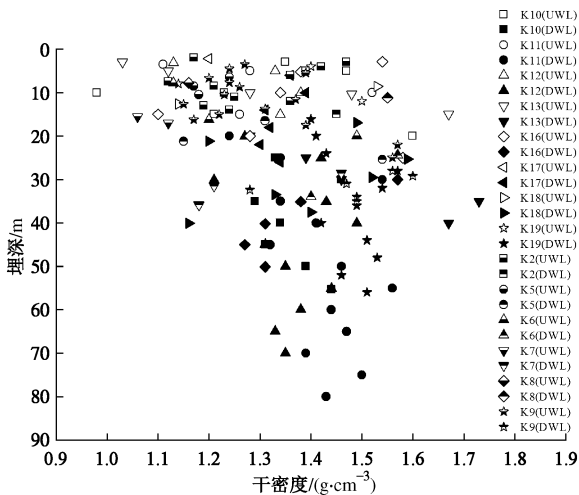


图2 沉积磷石膏干密度与埋深的关系

Fig. 2 Variation of dry density with depth of deposition PG

由图3,水位线上的磷石膏饱和度平均值为50.4%,处于非饱和状态,水位线以下的磷石膏饱和度平均值为85.0%,基本处于饱和状态,由于水位下降后磷石膏来不及排水固结,故而水位线上局部试样的饱和度较高。

由图2,水位线以上的干密度在0.98~1.67 g/cm³之间,均值为1.30 g/cm³;水位线以下的干密度在1.15~1.73 g/cm³之间,均值为1.4 g/cm³。可见磷石膏与一般的尾矿有所不同,磷石膏的干密度并不随埋深的增大而明显增大,但水位线以下的磷石膏干密度从统计意义上来看仍大于水位线以上的磷石膏干密度,这主要是由于水位线随库水位的变化反复升降而使得磷石膏排水固结所致。

室内击实得到的磷石膏最大干密度一般在1.36~1.46 g/cm³之间^[4],从图2可以看出,自然沉积的磷石膏最大干密度可达到1.73 g/cm³,原因如下:与经典

的土骨架不可压缩的理论不同,石膏本身可压缩,同时由于颗粒结构不稳定,击实试验过程中磷石膏结构被破坏,受夯击处下陷,四周鼓起,出现了类似于橡皮土的现象。而在现场条件下,石膏骨架被破坏后,会导致颗粒中的结合水渗出至孔隙内,变成孔隙水,排水固结后会使得磷石膏的孔隙比减小,干密度增大。

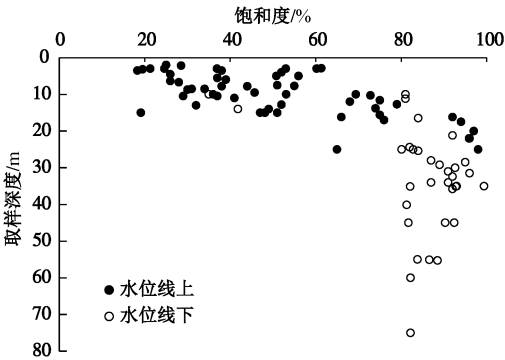


图3 水位线上下饱和度的分布图

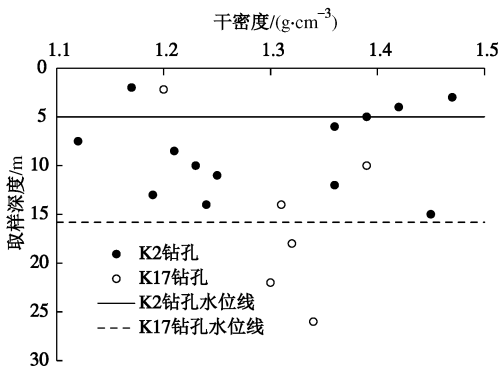
Fig. 3 Relationship between saturation and water level

图4给出了相邻钻孔K2和K17(位于2级子坝河床部位)以及相邻钻孔K6和K18(位于4级子坝河床部位)干密度的对比图。K2钻孔的干密度在1.12~1.47 g/cm³之间,均值为1.30 g/cm³,K17钻孔的干密度在1.2~1.39 g/cm³之间,均值为1.32 g/cm³;K6钻孔的干密度在1.13~1.57 g/cm³之间,均值为1.36 g/cm³,K18钻孔的干密度在1.14~1.59 g/cm³之间,均值为1.37 g/cm³。可见,即使从统计意义上来看,磷石膏的干密度也并未随后续磷石膏的堆积而有较为明显的增大。

(2) 级配分布

颗粒分析试验采用密度计法,制备悬液时不煮沸,不加六偏磷酸钠^[9]。图5给出了试验得到的级配包线、平均粒径 d_{50} 、不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 的分布图。

从图5(a)可见,磷石膏的粒径主要分布在0.005~0.075 mm之间,总体上属于粉土,但可能由于矿石来源或生产工艺有所不同,局部属于粉砂~中砂。粒径分布范围比Blight^[10]和张超等^[11]的试验结果要宽一些。



(a) K2和K17钻孔

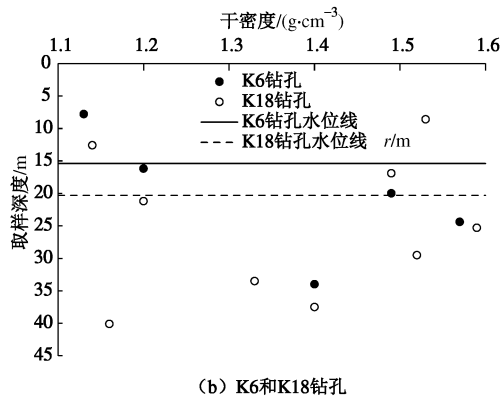
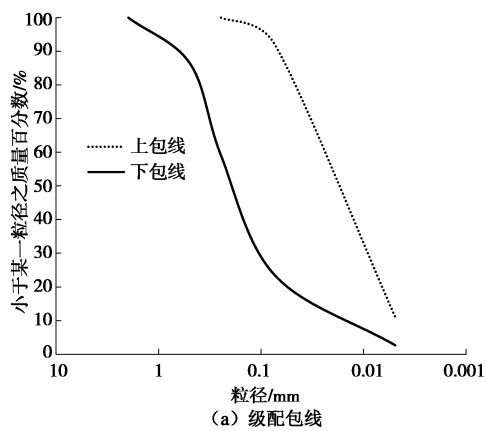


图4 子坝加高后沉积磷石膏的干密度变化

Fig. 4 Variation of dry density with sub-dam heightening of deposition PG



(a) 级配包线

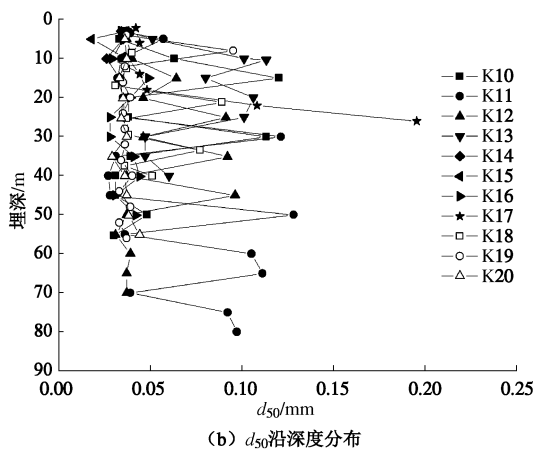
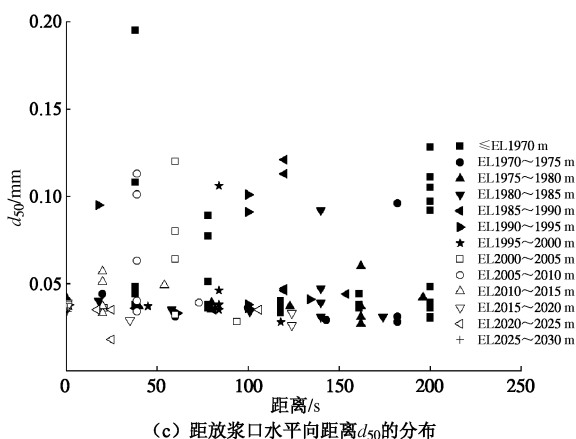
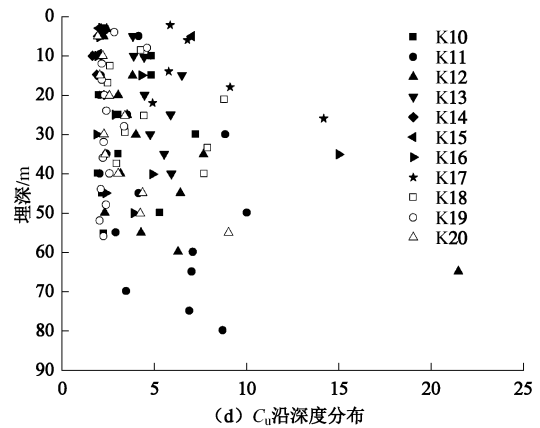
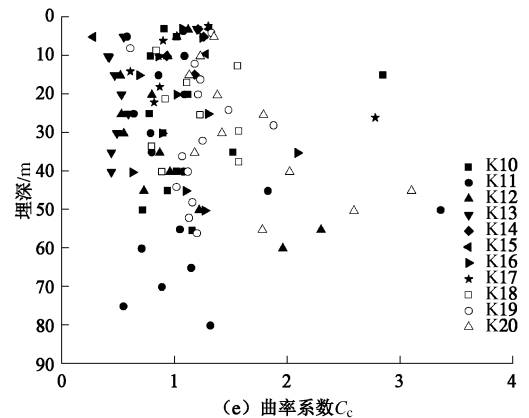
(b) d_{50} 沿深度分布(c) 距放浆口水平距离 d_{50} 的分布(d) C_u 沿深度分布(e) 曲率系数 C_c

图5 沉积磷石膏的平均粒径和级配分布

Fig. 5 Average particle size and size distribution of deposition PG

由图 5 (b) 和 5 (c), 无论是水平向还是垂直向, 磷石膏与金属矿山尾矿的“前粗后细, 上粗下细”的自然分级现象不同, 也即粗颗粒并不是沿埋深逐步减小或距离放浆口越远颗粒越细, 其原因如下: ①磷石膏颗粒粒径组成较为集中、均匀, 主要以粉粒组 ($0.005 \text{ mm} < d \leq 0.074 \text{ mm}$) 为主, 级配较差; ②相比较金属尾矿, 磷石膏的比重较小, 磷石膏的比重一般为 $2.3 \sim 2.4$ ^[4], 远小于金属尾矿的比重, 例如铁尾矿的比重可达 2.9; ③放浆口随子坝高度不断增加而不断变动并向库尾延伸, 造成沉积磷石膏的粒径变化不明显。

从图 5 (d) 可见, 不均匀系数 C_u 范围值 $1.61 \sim 21.5$, 平均值为 4.18, 曲率系数 C_c 范围值 $0.28 \sim 9.78$, 平均值为 1.21, 在统计的 100 多个试样中, 属于级配不良土的占 93%。这种级配特性决定了磷石膏具有较高的压缩性、渗透破坏型式表现为流土破坏。

2.2 渗透特性

(1) 渗透系数

影响渗透系数的主要因素是粒径大小、级配和孔隙比, 因而磷石膏的渗透系数与粉土较为接近。由于孔隙比 e 减小, 使得过水通道面积减小, 渗透系数 k 也将减小, k 与 e 呈正相关关系。对砂土, 一般认为

渗透系数 k 与 $e^3/(1+e)$ 的线性关系较好^[12]，图 6 给出了二者间的关系曲线，由于沉积磷石膏的不均匀系数变化较大，使得沉积磷石膏的渗透系数变化范围较大（平均值为 10^{-4} cm/s 数量级），二者间的线性关系较差。

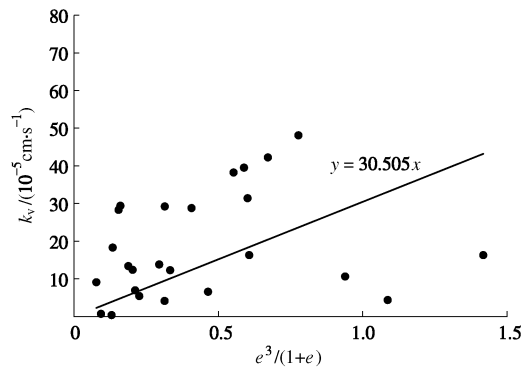


图 6 沉积磷石膏渗透系数与孔隙比的关系

Fig. 6 Relationship between hydraulic conductivity and void ratio of deposition PG

图 7 给出了水平与垂直向渗透系数比值的分布。沉积磷石膏的水平向渗透系数 k_h 一般大于垂直向的渗透系数 k_v ， k_h/k_v 平均值约为 2.86，这一点与成层分布的金属尾矿规律一致。造成沉积磷石膏水平向渗透系数大于垂直向渗透系数的原因是由于磷石膏具有明显的晶体结构，电镜扫描显示多为菱形和棱柱状形式^[2]（见图 8），在沉积过程中，由于扁平状磷石膏颗粒多呈水平排列，使得水平方向的透水性大于垂直方向的透水性，从而使磷石膏呈现明显的各向异性。

另根据中国有色金属工业昆明勘察设计研究院在杨家箐磷石膏堆积坝开展的现场渗透试验， k_h/k_v 的平均值约为 1.9^[13]。但张超等^[11]的室内试验显示， k_h/k_v 的平均值约为 0.46，也即垂直向渗透系数大于水平向渗透系数，与本文和现场试验结果恰恰相反。从磷石膏的微观结构来看，本文试验结果更为合理。

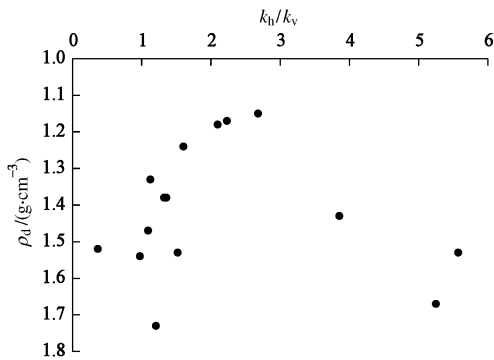


图 7 沉积磷石膏干密度与水平和垂直渗透系数比值的关系

Fig. 7 Relationship between dry density and k_h/k_v of deposition PG

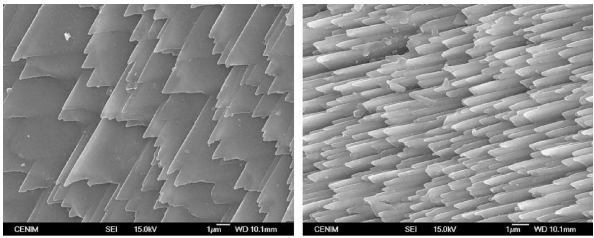


图 8 不同放大倍数下的磷石膏 SEM 图像^[2]

Fig. 8 SEM images of PG at different magnifications^[2]

(2) 渗透变形

图 9 为磷石膏干密度为 1.40 g/cm^3 的水力梯度 J 与流速 v 的关系曲线，试验在水平管涌仪中采用水平方向的渗流形式进行。试验得到的临界坡降 $J_c=0.355$ ，破坏坡降 $J_p=0.375$ 。一般来说，对 1, 2 级工程，渗透安全系数取为 2.5^[14]，则允许出逸坡降为 $0.355/2.5=0.142$ ，对 3 级以下工程，渗透安全系数取 2.0^[14]，则允许出逸坡降为 $0.355/2.0=0.178$ 。其允许比降与粉土—粉砂大致相同。但上述渗透变形试验是采用自来水进行的，自来水对磷石膏具有一定的溶蚀作用，而实际上磷石膏中残余磷、硫和氟酸，库水的 pH 值一般小于 3（称之为酸性水），在酸性水作用下，磷石膏不会发生破坏，上述试验结果是偏于保守的，但对非酸性水条件（例如特大暴雨）下的渗透稳定判断有一定的借鉴意义。

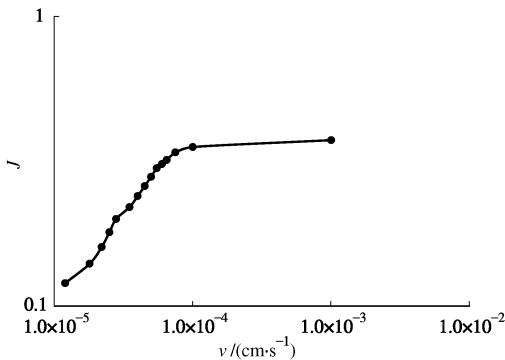


图 9 水力梯度 J - 流速 v 试验过程线（ $\rho_d=1.40 \text{ g/cm}^3$ ）

Fig. 9 Hydraulic gradient - velocity test curve of deposition PG ($\rho_d=1.40 \text{ g/cm}^3$)

(3) 土水特征试验

试验在 5 Bar 的压力板仪中进行，环刀尺寸 6.18 cm。干密度分 1.1, 1.2 和 1.29 g/cm^3 共 3 组，吸力范围 0~500 kPa。表 1 列出了含水率特征值，试验曲线见图 10 所示。

试验结果表明：①干密度对进气值没有明显的影响，不同干密度的试样的进气值大致在 10 kPa 左右；②土样残余含水率随干密度的增加而减少，残余含水率约为饱和含水率的 10%。上述特性与粉土—粉砂基本一致。

表 1 磷石膏含水率特征值				
Table 1 Water content of PG				
干密度 $\rho_d/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	重量含水率 $w/\%$		体积含水率 $\theta_w/\%$	
	饱和 w_s	残余 w_r	饱和 θ_s	残余 θ_r
1.10	49.08	4.18	0.518	0.0441
1.20	41.49	—	0.485	—
1.29	36.77	3.72	0.466	0.0471

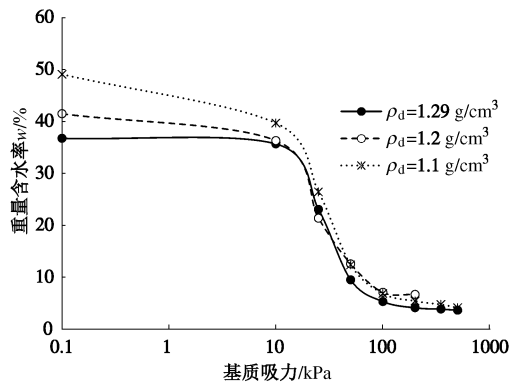


图 10 磷石膏的土水特征试验曲线

Fig. 10 Soil-water characteristic curves of PG

2.3 静力力学特性

(1) 三轴 CU 试验

由于沉积磷石膏的密度变化较大, 而进行三轴试验需要若干原状样, 为使试验结果具有较好的一致性, 有针对性的选择平均干密度分别为 1.2 (1.2~1.21 g/cm³), 1.28 (1.27~1.28 g/cm³), 1.4 (1.39~1.41 g/cm³), 1.5 (1.49~1.51 g/cm³) 和 1.58 g/cm³ (1.57~1.6 g/cm³) 的若干试样, 进行了 5 组三轴 CU 试验。图 11 是为干密度为 1.2 和 1.58 g/cm³ 的三轴 CU 试验曲线。

从图 11 可以看出, 磷石膏的应力应变关系曲线在低围压下表现为软化型, 在高围压下表现为硬化型, 与一般土类相似。但与一般粉土—粉砂不同的是, 即使在较为疏松的状态下, 磷石膏仍表现了较为强烈的剪胀, 随密实度增大, 剪胀作用愈发明显。

表 2 给出了不同干密度下的内摩擦角, 图 12 给出了内摩擦角与干密度的关系曲线。随干密度的增大, 内摩擦角也随之增大, 且可采用幂函数较好地拟合。磷石膏的干密度由 1.20 g/cm³ 增加为 1.58 g/cm³, 增加了 32%, 总应力摩擦角由 34.1° 增加为 37.3° (根据拟合曲线求得), 增幅为 9.4%, 有效应力摩擦角由 37.6° 增加为 38.8°, 增幅为 3.2%, 由于随围压的增大, 孔压也明显增大, 故有效摩擦角增幅较之总应力摩擦角要小。另外较之于干密度增幅, 摩擦角的增幅并不显著, 表明即使较为疏松的磷石膏仍具有较高的强度指标, 这也表明磷石膏堆积坝的稳定性较高。

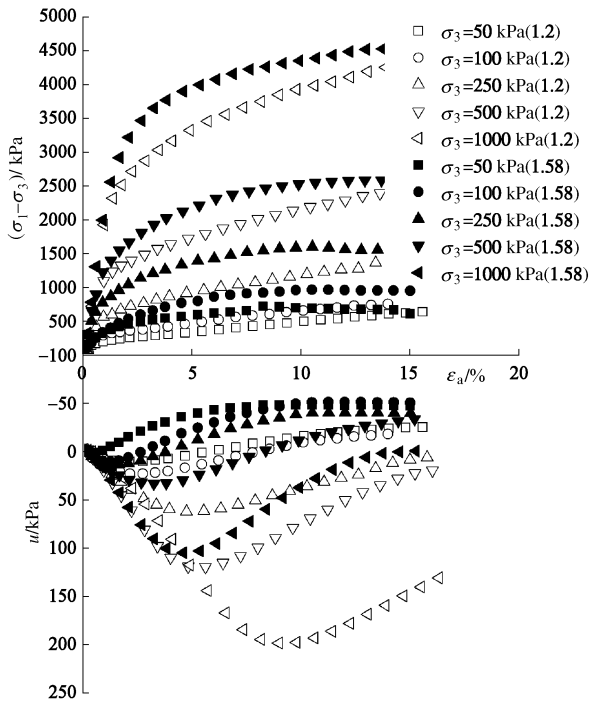


图 11 沉积磷石膏三轴 CU 试验曲线 ($\rho_d=1.2, 1.58 \text{ g/cm}^3$)

Fig. 11 Triaxial CU test curves of deposition PG ($\rho_d=1.2, 1.58 \text{ g/cm}^3$)

表 2 不同干密度下的内摩擦角

Table 2 Internal friction angle under different dry densities		
干密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	总应力 $\varphi_{cu}/(^{\circ})$	有效应力 $\varphi'/(^{\circ})$
1.20	—	37.6
1.28	31.7	38.0
1.40	34.7	38.2
1.50	36.7	38.5
1.58	36.5	38.8

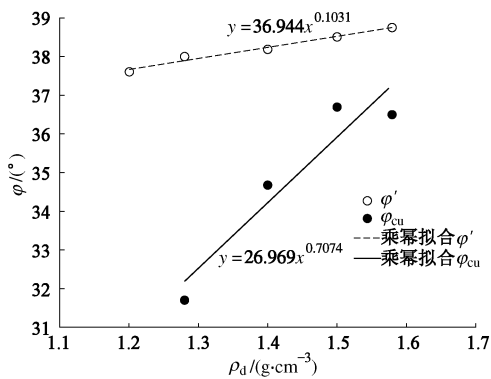


图 12 沉积磷石膏摩擦角与干密度的关系

Fig. 12 Relationship between friction angle and dry density of deposition PG

(2) 蠕变(次固结)变形试验

磷石膏的蠕变变形试验在侧限压缩仪中进行, 试验状态相当于 K_0 固结。试样直径 61.8 mm, 高度 20 mm, 试样干密度为 1.30 g/cm³, 对试样饱和后分别开展了上覆压力 p 为 100, 200, 400, 800 kPa 的试验,

试验从 2012 年 8 月 27 日开始, 试验已进行了 1 年多, 试验结果见图 13 所示。

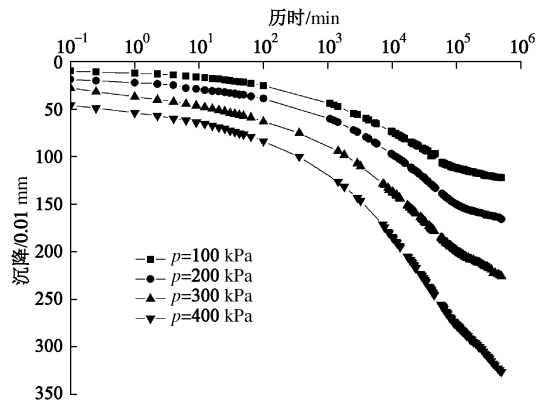


图 13 沉积磷石膏蠕变变形试验曲线
Fig. 13 Creep test curves of deposition PG

从图 13 中可以看出: 上覆荷载越大, 磷石膏的蠕变变形也越大, 荷载施加 1 年后, 磷石膏的蠕变变形仍非常显著, 尚未达到稳定状态, 这也是磷石膏堆积坝后期变形较大的原因, 原型观测资料表明, 在 5 级子坝河床部位的表面沉降量已经达到 3.1 m, 且尚未完全稳定。

按时间对数法, 可求得各级荷载下的主次固结变形量如表 3 所示。试验结果表明, 在 100~400 kPa 上覆荷载作用下, 在试验时间范围内蠕变(次固结)变形是主固结变形的 1.8~3.1 倍, 当然由于蠕变变形尚未完成, 实际的蠕变变形应更大。对土体而言, 发生蠕变的原因是由于土体在主固结完成之后, 土体中仍有微小的超静孔隙压力存在, 驱使水在颗粒间流动, 一般来讲土体的次固结远小于主固结变形; 对磷石膏而言, 其渗透系数在 10^{-4} cm/s 数量级, 远大于黏性土, 但其却发生了极为显著的次固结变形, 其原因在于磷石膏晶体结构发生了压缩、破坏, 接触点晶格发生歪曲和变形, 而破坏后晶格之间的重新排列、调整到最后趋于相对静止需要相当长的时间才能完成。

表 3 各级荷载下的主次固结变形量

Table 3 Primary and secondary consolidation deformation under various overlying loads			
上覆压力 /kPa	主固结 /0.01mm	次固结 /0.01mm	次固结/主固结
100	29.8	92.7	3.1
200	42.9	122.9	2.9
300	63.5	162.3	2.6
400	115.1	211.1	1.8

2.4 动力力学特性

试验设备采用英国 GDS 公司进口的电机控制动三轴试验系统, 试样直径 39.1 mm, 高度 80 mm。

(1) 动模量和阻尼比

同样由于自然沉积的磷石膏密度变化较大, 为此

根据物理性质试验结果, 选择两种平均干密度 1.34 g/cm^3 (变化范围 $1.33\sim1.35\text{ g/cm}^3$) 和 1.45 g/cm^3 (变化范围 $1.44\sim1.46\text{ g/cm}^3$) 进行试验。

Hardin-Drnevich 建议的动剪切模量 G 、阻尼比与剪应变幅值 γ_d 的关系式^[15]如下:

$$\left. \begin{aligned} \frac{G}{G_{\max}} &= \frac{1}{1+k_1\bar{\gamma}_d} \\ \lambda &= \lambda_{\max} \frac{k_1\bar{\gamma}_d}{1+k_1\bar{\gamma}_d} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 k_1 为参数, 表示动剪切模量的衰减或阻尼比的增长速率; λ_{\max} 为最大阻尼比; G_{\max} , $\bar{\gamma}_d$ 分别为最大动剪切模量和归一化的动剪应变, 表示为

$$\left. \begin{aligned} G_{\max} &= k_2 p_a \left(\frac{\sigma_m}{p_a} \right)^n \\ \bar{\gamma}_d &= (1+\nu_d) \bar{\epsilon}_d \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 k_2 , n 为参数; σ_m 为球应力; p_a 为标准大气压; ν_d 为动泊松比; $\bar{\epsilon}_d$ 为归一化的动应变, 表达为

$$\bar{\epsilon}_d = \epsilon_d / (\sigma_m / p_a)^{1-n} \quad (3)$$

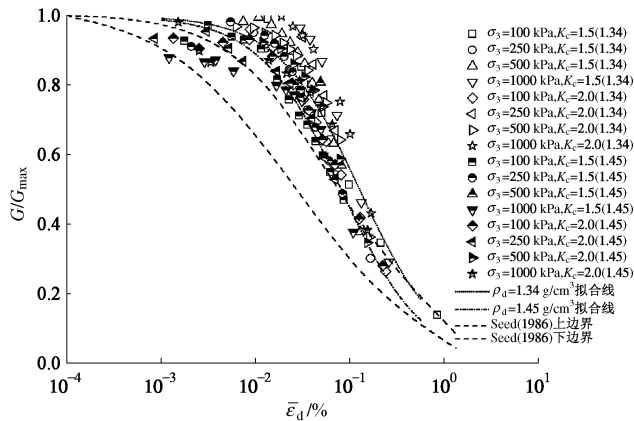
图 14 给出了动剪切模量、阻尼比与归一化动应变的关系曲线, 另外图中还给出了式 (1) 的拟合曲线以及 Seed 等^[16]给出的砂样的上下边界线, 图例中, σ_3 表示围压, K_c 表示固结应力比。

从图中可以看出: ①式 (1) 可较好地描述磷石膏的动应力-动应变试验曲线, 表明采用等价黏弹性模型^[15]进行循环荷载作用下的分析是可行的; ②图 14 (a) 中干密度为 1.45 g/cm^3 的拟合线位于干密度为 1.34 g/cm^3 的拟合线上方, 图 14 (b) 中则位于下方, 表明密度越大, 动弹模越大、阻尼比越小; ③图 14 (a) 中, 两种干密度的拟合线基本位于 Seed 等给出的边界线上方, 而图 14 (b) 中则基本处于边界线中间, 表明相比较砂样, 磷石膏动弹模较大, 会导致磷石膏堆积坝的动力反应较大, 但由于阻尼比也较大, 这样又会削弱坝体的动力反应, 二者的相互影响下, 磷石膏堆积坝坝体的动力反应将不会过于强烈, 这对磷石膏堆积坝的抗震稳定性是有利的。

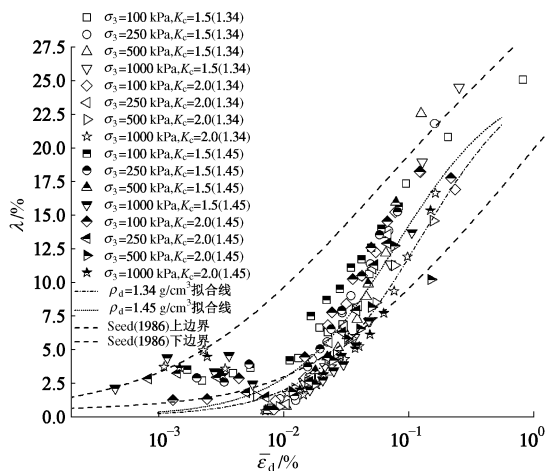
(2) 动强度

选择两种平均干密度为 1.12 (变化范围 $1.1\sim1.14\text{ g/cm}^3$) 和 1.306 g/cm^3 (变化范围 $1.29\sim1.31\text{ g/cm}^3$) 进行试验, 破坏标准为总应变达到 10%。

图 15 给出了动剪应力比 τ_d / σ'_0 与破坏振次 N_f 的关系曲线图, 其中 σ'_0 为振前试样 45° 面上的有效法向应力, 表达为: $\sigma'_0 = (K_c + 1) \sigma'_3 / 2$, K_c 为固结比。从试验结果可以看出, 沉积磷石膏的动强度与其它土体相似, 表现为围压和固结应力比与动剪应力比呈负相关关系。



(a) 动剪切模量与归一化动应变



(b) 阻尼比与归一化动应变

图 14 动剪切模量、阻尼比与归一化动应变的关系曲线

Fig. 14 Non-dimensional shear modulus and damping ratio against normalized dynamic strain of deposition PG

为判别沉积磷石膏的抗液化能力, 假定抗震设计烈度为 8 度, 即等效振次 N 可取为 30。首先由式 (4) 所示的幂函数关系式得到振次为 30 时各个围压和固结比下的动剪应力比:

$$\tau_d / \sigma'_0 = a N_f^{-b} \quad (4)$$

然后可拟合求得动剪应力比与围压和固结应力比的关系式: $\rho_d = 1.12 \text{ g/cm}^3$: $\tau_d / \sigma'_0 = 0.5395 - 0.01 \sigma_3 / p_a - 0.037 K_c$; $\rho_d = 1.306 \text{ g/cm}^3$: $\tau_d / \sigma'_0 = 0.589 - 0.008 \sigma_3 / p_a - 0.039 K_c$ 。

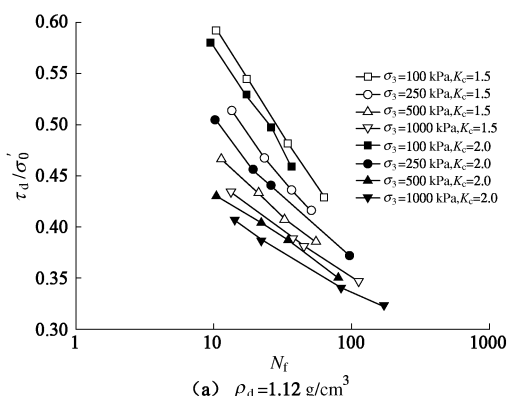
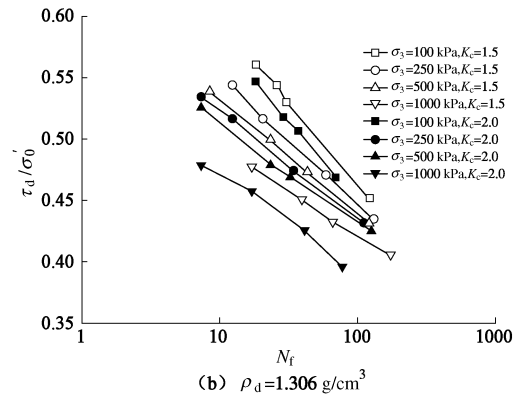
(a) $\rho_d = 1.12 \text{ g/cm}^3$ (b) $\rho_d = 1.306 \text{ g/cm}^3$

图 15 动剪应力与破坏振次的关系曲线

Fig. 15 Dynamic shear stress against failure vibration numbers of deposition PG

从上述拟合关系式可见, 密实度提高后, 动剪应力比提高, 表明抗液化能力也提高。但即使是在低密度下, 其动剪应力比较之同类的粉土或粉砂^[17]也大出许多, 表明磷石膏具有较高的抗液化能力。

3 结 论

依托柳树箐磷石膏堆积坝, 在钻探取样工作的基础上, 首先开展了物理性质试验, 然后开展了静动力力学特性试验。通过上述试验研究, 得出如下结论:

(1) 沉积磷石膏总体上属于级配不良的粉土, 局部属于粉砂—中砂, 无自然分级现象。其干密度和粒径变化随埋深或距放浆口距离的变化不明显。

(2) 沉积磷石膏水平方向的渗透系数大于垂直方向的渗透系数, 呈现明显的各向异性。

(3) 与土体颗粒不可压缩不同, 磷石膏的晶体结构会发生压缩破坏, 具有较大的压缩性, 其次固结变形量远大于主固结变形量。

(4) 沉积磷石膏的静动强度较之同等密实度下的粉土、粉砂要高。

参考文献:

- [1] 叶学东. 磷石膏综合利用现状及分析[J]. 磷肥与复肥, 2013, 28(6): 5 - 8. (YE Xue-dong. Status and analysis of comprehensive utilization of phosphogypsum[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2013, 28(6): 5 - 8. (in Chinese))
- [2] HANAN T, MOHAMED C, L ò pez F é lix A, et al. Environmental impact and management of phosphogypsum[J]. Journal of Environmental Management, 2009, 90(8): 2377 - 2386.
- [3] GABRIEL V, RAUL E, JUAN P, et al. Failures of sand tailings dams in a highly seismic country[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2014, 51(4): 449 - 464.

- [4] 沈 婷, 王 芳, 李国英. 磷石膏的物理力学特性[J]. 磷肥与复肥, 2008, **23**(3): 21 - 23. (SHEN Ting, WANG Fang, LI Guo-ying. The physical-mechanical properties of phosphogypsum[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2008, **23**(3): 21 - 23. (in Chinese))
- [5] 徐雪源, 徐玉中, 陈桂松, 等. 工业废料磷石膏的工程特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(12): 2096 - 2099. (XU Xue-yuan, XU Yu-zhong, CHEN Gui-song, et al. Testing study on engineering characteristics of phosphogypsum[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(12): 2096 - 2099. (in Chinese))
- [6] WANG T, ZHOU Y, LÜ Q, et al. A safety assessment of the new Xiangyun phosphogypsum tailings pond[J]. Minerals Engineering, 2011, **24**(10): 1084 - 1090.
- [7] 徐 晗, 许 凯, 文松霖, 等. 磷石膏渣坝的稳定分析研究[J]. 长江科学院院报, 2008, **25**(2): 42 - 45. (XU Han, XU Kai, WEN Song-lin, et al. Calculation of slope stability in phosphate gypsum dam[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2008, **25**(2): 42 - 45. (in Chinese))
- [8] 何秉顺, 付永祥. 磷化工固体废弃物安全环保堆存技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012. (HE Bing-shun, FU Yong-xiang. Safety and environmental protection storage technology of phosphorus chemical solid waste[M]. Beijing: Chemical Industrial Press, 2012. (in Chinese))
- [9] 盛树馨, 顾春媛, 严丽雪, 等. 磷石膏物理力学性质试验研究[R]. 南京: 南京水利科学研究所, 2000. (SHENG Shu-xin, GU Chun-yuan, YAN Li-xue, et al. Experimental study on physico-mechanical properties of phosphogypsum [R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2010. (in Chinese))
- [10] BLIGHT G E. The master profile for hydraulic fill tailings beaches[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering, 1994, **107**(1): 27 - 40.
- [11] 张 超, 杨春和, 余克井, 等. 磷石膏物理力学特性初探[J]. 岩土力学, 2007, **28**(3): 461 - 466. (ZHANG Chao, YANG Chun-he, YU Ke-jin, et al. Study on physico-mechanical characteristics of phosphogypsum[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(3): 461 - 466. (in Chinese))
- [12] 陈仲颐, 周景星, 王洪瑾. 土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994. (CHEN Zhong-yi, ZHOU Jing-xing, WANG Hong-jin. Soil mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1994. (in Chinese))
- [13] 杨家箐磷石膏堆场现状勘察[R]. 昆明: 中国有色金属工业昆明勘察设计院, 2014. (Investigation of Yangjiaqing phosphogypsum yard[R]. Kunming: Kunming Prospecting Design Institute of China Nonferrous Metals Industry, 2014. (in Chinese))
- [14] GB 50863—2013 尾矿设施设计规范[S]. 2013. (GB 50863 — 2013 Design of the tailings facilities[S]. 2013. (in Chinese))
- [15] 朱百里, 沈珠江. 计算土力学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1990. (ZHU Bai-li, SHEN Zhu-jiang. Computational soil mechanics[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1990. (in Chinese))
- [16] SEED H B, WONG R T, IDRIS I M, et al. Moduli and damping factors for dynamic analysis of cohesionless soils[J]. Journal Geotechnical Engineering, 1986, **112**(11): 1016 - 1032.
- [17] MAYORAL J M, ROMO M P. Geo-seismic environmental aspects affecting tailings dams failures[J]. American Journal of Environmental Sciences, 2008, **4**(3): 212 - 222.