

DOI: 10.11779/CJGE202110018

脱水泥饼堆填体的压缩及渗透特性试验研究

王子昂¹, 詹良通^{*1}, 郭晓刚^{1,2}, 刘超洋³, 尧俊³

(1. 浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310058; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071;
3. 广东省深圳市特区建设发展集团有限公司, 广东 深圳 518048)

摘要: 脱水泥饼是工程泥浆经压滤脱水后形成的块状产物, 经装卸、转运等处理环节破碎成尺寸不一的碎散体, 其堆填体具有明显的双孔隙特征, 由块体间的大孔隙和块体内的小孔隙组成。为了指导泥饼堆填作业, 对泥饼堆填体的压缩性及渗透性开展研究。利用大尺寸固体废弃物压缩-渗透装置模拟了泥饼堆填过程中上覆荷载增加, 泥饼堆积单元体逐渐被压密的过程, 并利用CT扫描对压缩后泥饼块体间大孔隙的变化情况进行了分析; 同时测试了泥饼堆积单元体在压缩过程中的渗透性变化规律。试验结果表明: 泥饼堆积单元体试样随着上覆荷载增加逐渐被压密, 泥饼间孔隙与泥饼内孔隙的尺度差异逐渐减小, 双孔隙特征减弱。在上覆荷载为295 kPa时, 试样空气孔隙率为5%, 此时试样已成为均质块状泥饼, 对应压实度为0.87, 试样透水性已由初始阶段(0 kPa)的中等透水等级转变为弱透水等级。考虑可操作性和经济性, 建议将0.85作为泥饼堆填作业过程中的压实度控制指标。

关键词: 脱水泥饼; 压缩性; 渗透性; 空气孔隙率; 双孔隙介质; 压实度

中图分类号: TU441 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)10-1915-09

作者简介: 王子昂(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事环境岩土工程方面研究工作。E-mail: ziangwang1226@zju.edu.cn。

Experimental study on compressibility and permeability characteristics of dewatered slurry cake backfill

WANG Zi-ang¹, ZHAN Liang-tong¹, GUO Xiao-gang^{1, 2}, LIU Chao-yang³, YAO Jun³

(1. MOE Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 3. Shenzhen SEZ Construction and Development Group Co., Ltd., Shenzhen 518048, China)

Abstract: After the slurry is dewatered by pressure filtration, the dewatered slurry cake is formed. After loading and unloading, transportation and other processing links, the dewatered slurry cake is broken into pieces of different sizes. Dewatered slurry cake backfill has obvious dual-porosity characteristics, including macro-pores between cakes and micro-pores inside cakes. In order to guide the filling operation of the dewatered slurry cake, the compressibility and permeability of the dewatered slurry cake backfill are studied in this research. The compaction of the dewatered slurry cake as the load increases during the backfilling is simulated by using the large-scale solid waste compression-permeation experimental system. The change of pore structure in the sample during compression is analyzed based on the CT scan. And the change of permeability of dewatered slurry cake backfill in the process of compression is studied at the same time. The results show that the sample of the dewatered slurry cake is compacted gradually with the increase of external load. The scale difference between the macro-pores and the micro-pores decreases gradually, and the dual-porosity characteristics weakens with the process of compression. When the overlying load is 295 kPa, the volume ratio of air of the sample is 5%. At this time, the sample becomes a homogeneous lump slurry cake, and the corresponding compaction degree is 0.87. In addition, the permeability of the sample also changes from a medium permeability grade at the initial stage (0 kPa) to a weak permeability grade. Considering the operability and economy, it is suggested that the compaction degree should be set as 0.85 during the backfilling of the dewatered slurry cake.

Key words: dewatered slurry cake; compressibility; permeability; volume ratio of air; dual-porosity medium; degree of compaction

0 引言

近年来, 随着中国城市地下空间建设的迅速发展,

基金项目: 浙江省重点研发计划项目(2019C03107); 苏州市民生科技项目—科技示范工程项目(SS201804-01)

收稿日期: 2021-01-28

*通信作者(E-mail: zhanlt@zju.edu.cn)

渣土处置问题已经成为了影响城市安全发展的一大挑战^[1]。在较长一段时间内，国内处置渣土的主要方法便是就近弃土（近海抛弃）^[1-2]，但在中国华南部分地区，工程渣土砂粒含量较高，甚至超过 50%，直接进行近海抛弃不仅易引发海洋水体污染，还易造成资源浪费。渣土洗砂及泥浆脱水技术的发展，为高含砂量工程渣土的资源化利用、体积减量提供了重要手段，但该处理方式同时也带来了脱水泥饼安全处置问题。以深圳市为例，2019 年脱水泥饼产量已经超过 100 万方，并且随着《深圳市建筑废弃物管理办法》的实施，深圳市脱水泥饼产量将迅速增加。由于制砖等资源化利用方式处置量有限，大部分泥饼仍需要通过堆填进行处理。因此，为更好指导脱水泥饼的堆填作业，对其压缩性及渗透性开展研究十分必要。

脱水泥饼是工程泥浆经压滤脱水后形成的块状产物，含水率通常介于 35%~50%，且粗粒含量通常较少，细粒占比较多，多为黏性土；泥饼经装卸、转运等处理环节会破碎成块体尺寸不一的碎散体；在堆填过程中泥饼块体间的大孔隙与泥饼块体内部的小孔隙同时存在，且两者间尺度差异较大，导致堆填体具有明显的双孔隙特征。在 20 世纪 60 年代，Barenblatt 等^[3]较早地采用了双孔隙结构的概念来描述裂隙孔隙介质，之后这一概念被延续，以用于描述具有 2 类明显不同孔隙大小的孔隙结构介质。一些学者^[4-8]研究表明双孔隙结构土体的微观结构和宏观结构具有明显不同的力学特性，并建立了双尺度的本构模型。其中，Delage 等^[4]和 Juang 等^[5]通过固结试验发现在外荷载作用下，双孔隙结构土体的宏观孔隙比微观孔隙更易被压缩。然而，目前所研究对象的双孔隙尺度的跨度相对较小，针对脱水泥饼堆填体等较大跨度的双孔隙结构介质的压缩性研究仍缺乏相关试验数据支撑。

针对双孔隙结构土体渗透性的研究，目前研究方法主要包括理论模型和试验手段。在理论模型方面，由于土体渗透性能与孔隙结构密切相关，泥饼堆填体内非均质的大孔隙结构往往会造成水、气传导的优势流。双孔隙模型将土体内部的孔隙划分为孔隙特征差异较大的大、小两个孔隙系统，考虑了多孔介质中由孔隙非均质性引发的水、气运移特征^[9]。近年来，一些学者利用双孔隙模型对多孔介质中的优势流现象进行了尝试性描述^[10-11]。例如，Gerke 等^[12]首先提出了基于双孔隙模型的土体水分运移的一般模式，分析了降雨过程中土体大、小孔隙系统的水分运移剖面。李光耀^[9]提出了考虑孔隙非均质特性的土体双孔隙水、气耦合运移模型，并分析了宏观尺度的孔隙非均质性对覆盖层水、气传导特性及服役性能的影响。在试验方面，对土体渗透性的研究主要包括渗气试验和渗水

试验^[13-16]。其中，渗气试验作为研究土结构孔隙分布特征的一项重要手段，具有试验周期短、对试样物性指标（含水率、抗剪强度等）影响小、可重复对同一试样进行试验等优点，且渗气系数相较于非饱和土的渗水系数更易测定。因此，目前众多学者越来越重视对土体渗气性的研究，研究表明：土体的渗气性随着土体饱和度升高、孔隙比降低、干密度增加而减小^[17-19]。然而，目前很少有文献研究外界荷载变化对脱水泥饼堆填体（双孔隙尺度跨度较大的介质）渗透性的影响以及多因素（饱和度、孔隙比等）相互耦合对其渗透性的影响。

因此，针对上述问题，本文参照脱水泥饼堆填工艺，利用大尺寸固体废弃物压缩-渗透装置模拟泥饼堆填过程中上覆荷载增加，泥饼堆积单元体逐渐被压实的过程，并利用 CT 扫描对压缩后块体间的大孔隙结构进行提取，分析试样内部孔隙结构在不同荷载下的变化规律；同时测试泥饼堆积单元体在上覆荷载增加后渗透性的变化情况，建立了直接考虑孔隙比、饱和度的脱水泥饼渗气系数计算公式，并对脱水泥饼安全堆填过程中压实度指标的确定提供了工程启示。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

本文试验所用材料取自深圳市某处脱水泥饼生产现场，由板框压滤机对工程渣土洗砂后产生的泥浆进行压滤脱水形成，见图 1。

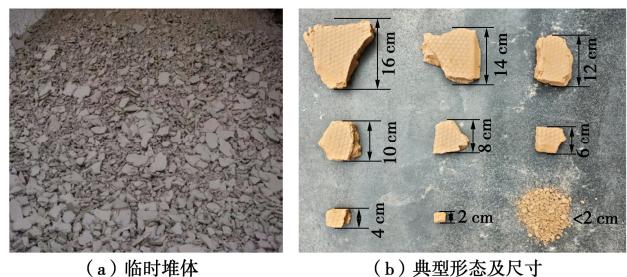


图 1 脱水泥饼实物图

Fig. 1 Physical picture of dewatered slurry cake

该脱水泥饼生产现场所用工程渣土主要为深圳地铁盾构渣土。本文通过对脱水泥饼进行相对质量密度、界限含水率、含水率、击实、颗粒分析等系列试验，得到试验用土的基本物理性质如表 1 所示。其中，由于泥饼为块状结构，直接进行击实所得的试验结果离散性较大。因此，本文参照《土工试验方法标准》^[20]首先将块状泥饼过 5 mm 筛碾碎，然后对过筛样品进行调配含水率，并对不同含水率下的样品在室内进行轻型击实试验，最后连结各点得到样品的击实曲线，进而确定其最大干密度。

表 1 试验所用泥饼的基本物理性质

Table 1 Basic physical properties of dewatered slurry cake

相对质量 密度 G_s	塑性 指数	含水率/%	初始干密度 $/(g \cdot cm^{-3})$	最大干密度 $/(g \cdot cm^{-3})$	最优 含水率/%	d>0.075	0.075≥d>0.005	粒径组成/% $d \leq 0.005$
2.66	13.52	45.16	1.19	1.38	29.84	0.95	68.5	30.55

根据表 1 可知, 试验用土的颗粒组成中以粉粒和黏粒为主, 细粒含量超过了 99%, 砂粒含量较少。按照液塑限分类^[21], 试样属于粉质黏土。

利用浙江大学的 Bruker D8 Advance 型号仪器对泥饼样品进行 XRD 试验, 并对泥饼所含矿物成分进行定量分析, 见表 2。

表 2 试验所用泥饼的矿物组分及含量

Table 2 Mineral composition and content of dewatered slurry cake

矿物成分	石英	云母	方解石	钙长石	高岭石
含量	33%	31%	10%	22%	4%

由表 2 可知, 土样中主要矿物成分由非亲水或亲水性较弱的石英、云母、方解石、钙长石、高岭石等组成, 符合深圳市典型风化岩土特征。

1.2 试验方法

(1) 试验设备

本文基于课题组研发的大尺寸固体废弃物压缩-渗透试验系统, 对脱水泥饼进行压缩-渗透试验。试验装置如图 2 所示。

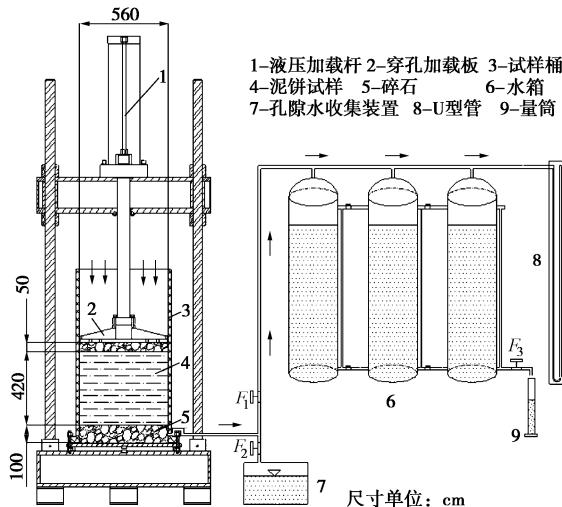


图 2 大尺寸固体废弃物压缩-渗透装置

Fig. 2 Large-scale solid waste compression-permeation experimental system

试样桶为有机玻璃材质, 内径 56 cm, 底部铺设 10 cm 厚的碎石导排层用于孔隙水的导排; 试样顶部的加载方式为液压加载, 加载范围为 0~1 MPa; 水箱容积约为 0.3 m³, 尺寸相对较大, 以保证 U 型管液面差读数的稳定, 同时采用刚性较大的不锈钢材质, 以防止其在外界气压力作用下发生体积变形。

(2) 试验方案

本文试验方案设计, 如图 3 所示。

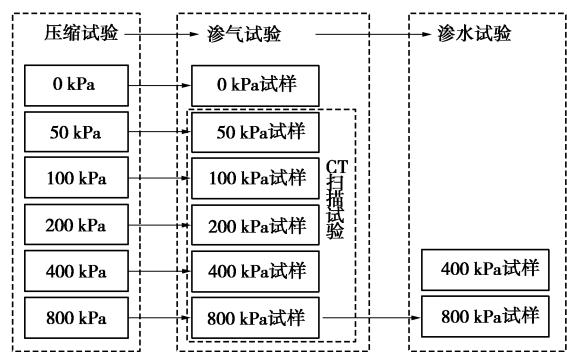


图 3 泥饼压缩-渗透系列试验方案

Fig. 3 Experimental scheme for compression-permeation of dewatered slurry cake

压缩试验共进行 2 组 (A 试样、B 试样), 主要用于探究压缩过程中泥饼试样空气孔隙率的变化规律和泥饼块体结构对压缩性的影响。A 试样为块状泥饼堆积单元体试样, 块状泥饼尺寸介于 2~8 cm, B 试样为散碎泥饼堆积单元体试样, 散碎泥饼最大尺寸小于 2 cm, 试样装填高度均设计为 42 cm, 并分 3 层进行装填; 装填过程中, 侧壁涂抹膨润土膏, 减少压缩过程中侧壁摩擦以及缓解气体的刚性壁绕流和边缘泄露现象; 在试样装填完成后, 使加压上盖与加压框架中心对准, 施加 2 kPa 初始预加压力, 保证仪器各部件接触良好, 并将百分表调整到零点; 进行泥饼压缩试验时, 用湿棉花围住加压盖板四周, 避免水分过度蒸发, 每组试样均按照 50, 100, 200, 400 和 800 kPa 的顺序依次加载并进行相应的竖向变形观测, 直至泥饼试样变形稳定止 (稳定标准^[20]: 每级压力下试样变形每小时变化不大于 0.01 mm), 然后进行试样含水率测试。

渗透试验则包括渗气试验和渗水试验, 主要用于探究压缩过程对泥饼试样渗透性的影响和气体渗透率与渗透系数的关系。本文对 A 试样在上覆荷载为 0, 50, 100, 200, 400 和 800 kPa 时 (压缩稳定后) 分别进行渗气试验, 并利用浙江大学建工学院 NIKON XTH 320 型号 CT 扫描仪进行试样无损扫描 (分辨率 25 μm); 待压缩试验、渗气试验全部结束后, 再利用变水头法对 A 试样 (经过 800 kPa 压缩并稳定的样品) 进行 1 组渗水试验, 测定试样的渗透系数; 参照 A 试样的制样方法, 再制备一组块状泥饼堆积单元体

试样，并测定其在 400 kPa 荷载下压缩稳定后的渗气系数和渗透系数。在对试样进行渗气试验时，首先，关闭阀门 F_2 ，打开阀门 F_1 和 F_3 ，使水从水箱内流出，从而在水箱上部、管道及试样底部形成负压；气体通过加载板从试样顶部进入水箱，当进入水箱上部的气体流速与从水箱下部流出水的流速达到动态平衡时（动态平衡：当 2 次试验测量的误差在 1 mL/min 范围内时，认为气体流速达到动态平衡），U 型管液面差保持恒定，即在试样两端形成恒定的气压差；然后，利用量筒接水并打开秒表计时，量测一定水量及其对应的时间 T ，以及相对应的试验温度 T_r （试验过程中控制试验温度基本恒定，避免对气体压强及体积变化造成影响）；最后，通过调节阀门 F_3 的开度（从小到大）控制放水量，继续完成上述步骤可得不同压力梯度下的渗气系数，并将其平均值作为试样在该级荷载下的最终渗气系数。

（3）试验数据处理

根据理想气体状态平衡方程，试验量测水的体积应经过下式进行校正^[18, 22-24]：

$$Q' = \frac{(P_0 - \Delta P)T_0}{P_0 T_r} Q \quad . \quad (1)$$

式中 Q' 为渗过试样的空气在标准气压 P_0 （本文统一定为 100 kPa）和标准温度 T_0 （20℃）下的体积（ m^3 ）； Q 为量测水体积（ m^3 ）； ΔP 为试样上下界面压力差（kPa）； T_r 为试验量测温度（℃）。利用 Q' 和 ΔP 计算空气的体积流速 v 及气压梯度 i ，即

$$v = \frac{Q'}{AT} \quad , \quad (2)$$

$$i = \frac{\Delta P}{\rho_w g h} = \frac{\Delta h}{h} \quad , \quad (3)$$

式中， A 为试样截面面积（ m^2 ）， T 为相应时间历时（s）， ρ_w 为水的密度（ kg/m^3 ）， g 为重力加速度，取 10 m/s^2 ， Δh 为 U 型管液面差（m）， h 为试样高度（m）。由于在气相流速较低且不计液相运动的影响时，渗气速度与气压梯度成正比，故仍可用达西定律来描述气相运动^[22, 24-26]，则

$$k_a = \frac{Q' \rho_w g h}{AT \Delta P} \quad , \quad (4)$$

$$K_a = \frac{Q' h \mu_a}{AT \Delta P} \quad , \quad (5)$$

式中， k_a 为渗气系数（ m/s ）， K_a 为气体渗透率（ m^2 ）， μ_a 为空气动黏滞系数，20℃下为 $1.80 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。

2 试验结果分析

2.1 压缩性分析

（1）试样空气孔隙率与应力的关系

图 4 为压缩过程中泥饼试样压缩量、孔隙比及饱和度的变化曲线。

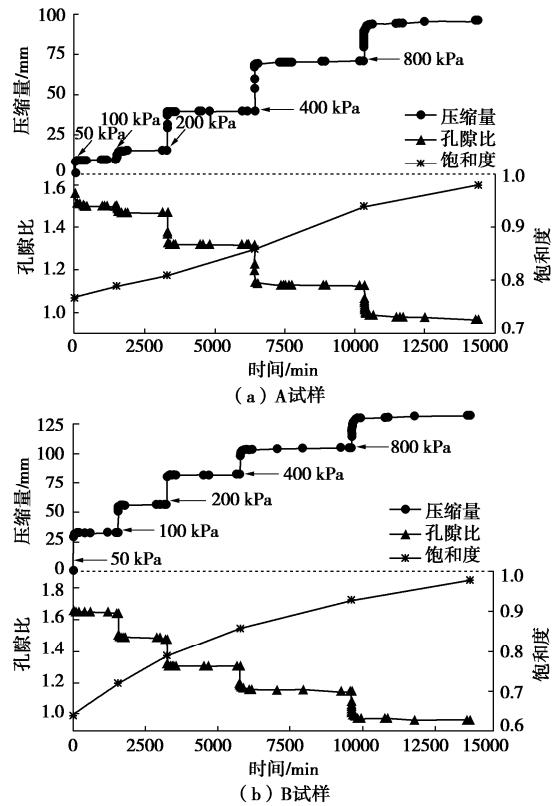


图 4 试样分级加载时压缩量、孔隙比及饱和度变化曲线

Fig. 4 Change of deformation, void ratio and saturation of samples during loading

由图 4 可知，随着上覆荷载增加，试样孔隙比逐渐减小，饱和度逐渐升高。这主要是由于随着上覆荷载增加，泥饼之间的大孔隙逐渐减少（见图 5），并且试样内部孔隙气被逐渐排出所致。

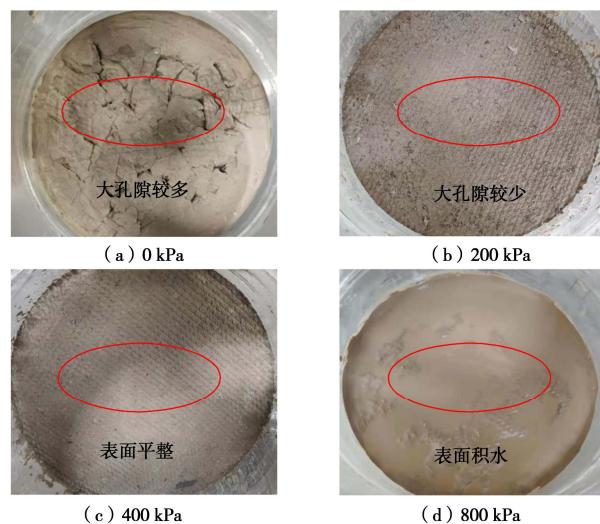


图 5 A 试样

Fig. 5 Sample A

本文以 A 试样为例，利用 VG-Studio 软件对各级

荷载下泥饼试样的 CT 图像进行处理, 见图 6。

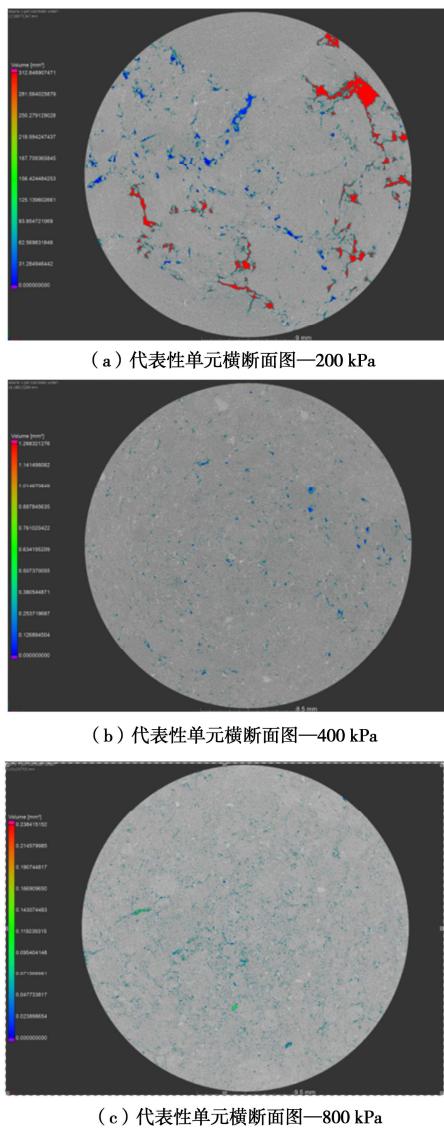


图 6 A 试样在不同荷载条件下孔隙分布示意图

Fig. 6 Pore distribution of Sample A under different loading conditions

结合图 5, 6 可知, 随着荷载增加, 试样逐渐被压密, 泥饼间孔隙与泥饼内孔隙的尺度差异逐渐减小, 在 400 kPa 时试样不均质性已明显减弱, 孔隙结构连通性明显降低。

在泥饼堆填作业过程中, 为保证填筑效果, 需要对其进行压实处理, 但压实度应该控制在多少, 在现有的规范中并没有涉及。通常而言, 对于细粒含量较多的黏性土, 日本、英国相关规范一般需要控制其空气孔隙率小于 5%^[27-28]。空气孔隙率与物性指标的关系为^[24, 27]

$$\theta_a = \frac{V_a}{V} = n(1 - S_r) \quad , \quad (6)$$

式中, V_a 为试样中空气所占体积, V 为试样总体积, n 为孔隙率, S_r 为试样饱和度。以式 (6) 为基础, 并

结合 $K = \rho_d / \rho_{d\max}$ (K 为压实度, ρ_d 为试样干密度, $\rho_{d\max}$ 为试样最大干密度), 绘制压缩过程中空气孔隙率、压实度与荷载的关系曲线, 如图 7 所示。

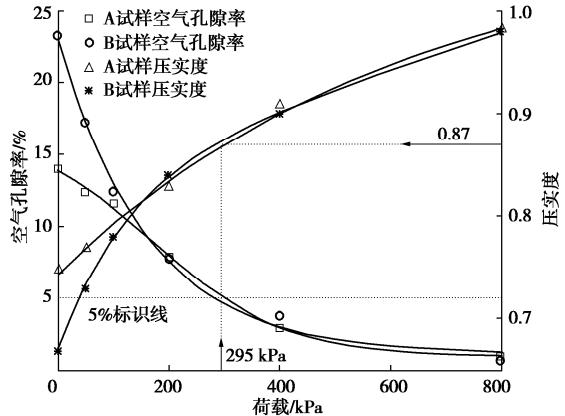


图 7 试样空气孔隙率和压实度与荷载的关系

Fig. 7 Change of volume ratio of air and degree of compaction of samples against external loads

根据图 7 可知, 随着上覆荷载增加试样压实度逐渐增大, 空气孔隙率逐渐减小; 当上覆荷载超过 295 kPa (或压实度超过 0.87) 后, 试样的空气孔隙率将小于 5%。

(2) 泥饼块体结构对压缩性的影响

压缩系数和固结系数作为土力学中两个重要参数, 常用于评估土体压缩性和变形速率^[29]。根据压缩系数定义, 压缩曲线上某点斜率的绝对值即为该点的压缩系数。图 8 显示了 2 组压缩试验得到的试样孔隙比、压实度与荷载的关系曲线。

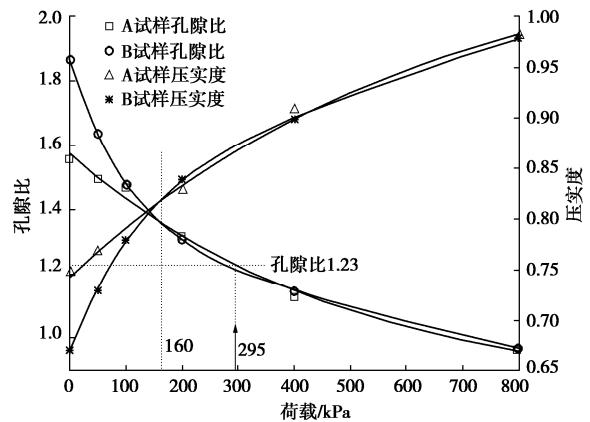


图 8 试样孔隙比和压实度与荷载的关系

Fig. 8 Curves of void ratio and degree of compaction of samples against external loads

由图 8 可知, 随着上覆荷载增加, A、B 试样压缩系数均逐渐减小, 压实度均逐渐增加; 并且在上覆荷载超过 295 kPa 后, 对应试样孔隙比将减小为 1.23

(略小于块状脱水泥饼的初始孔隙比 1.24), 说明此时泥饼间的孔隙已基本被压密, 试样成为单一块状泥饼。但 A、B 试样的孔隙比和压实度与荷载的关系曲线也

存在一定差异，且主要体现在荷载低于 160 kPa 阶段。该阶段 A 试样的孔隙比变化量和压实度变化量显著小于 B 试样，这是由于 A 试样为块状泥饼试样，试样初始干密度较大，泥块之间相互支撑形成骨架孔隙结构，强度较高，在相同荷载下压缩量更小，试样孔隙比变化量和压实度变化量更小。随着压力增加，当上覆荷载高于 160 kPa 后，块状泥饼被压溃破碎现象加剧，骨架孔隙结构被破坏，泥饼块体转变为碎散体散落填充到周边孔隙中，A、B 试样的压缩状态逐渐趋于一致，且压缩系数不再有明显差异。即在试样上覆荷载高于 160 kPa 后，泥块基本都被压溃破碎，泥饼的块状结构形态（初始孔隙结构差异）对试样压缩变形特性的影响基本消失。

综上所述，泥饼堆填体中泥饼间的孔隙与泥饼内的孔隙同时存在，且两者间的尺度差异较大。由于宏观孔隙更易被压缩^[4-5]，因此不同于普通均质黏土的压缩试验，泥饼堆填体在压缩过程中首先被压密的是块体间的虚堆空隙，这导致泥饼堆填体的压缩性在低应力水平（如小于 200 kPa）往往较大（根据图 8 中 A 试样压缩曲线可知其压缩系数 $a_{100 \sim 200} = 1.5 \text{ MPa}^{-1}$ ，属高压缩性试样）。

为评估压缩过程中土体变形速率的变化规律，本文借鉴饱和土力学中固结系数的计算公式，将压缩过程中试样的“固结系数”记为 c_v^* ，建立压缩试样固结系数随上覆荷载的变化关系，如表 3 所示。

表 3 分级加载过程中试样的固结系数

Table 3 Consolidation coefficient of samples during graded loading

荷载/kPa	固结系数 $c_v^*/(\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	
	A 试样	B 试样
50	609.31	806.78
100	140.85	497.62
200	108.36	115.81
400	38.60	32.80
800	2.33	2.02

由表 3 可知，随着上覆荷载增加，A、B 试样的固结系数均呈现减小趋势。将 A、B 试样的固结系数进行纵向对比可知，两者均是第 1 级荷载（50 kPa）下的固结系数最大（变形速率最快），这是由于初始阶段在外界压力作用下，孔隙气首先被迅速排出，大孔隙被压缩，试样变形速率相对较大。随着压力增加，大孔隙逐渐被压密，试样变形速率逐渐放缓。将 A、B 试样的固结系数进行横向对比可知，在较低荷载下 A 试样固结系数明显小于 B 试样，这是由于该阶段 A 试样的孔隙比相对于 B 试样较小（见图 8），试样状态更致密，相同荷载下试样变形速率更小。

2.2 渗透性分析

(1) 试样饱和度及孔隙比对渗透性的影响

图 9 为 A 试样渗气系数与荷载的关系曲线。

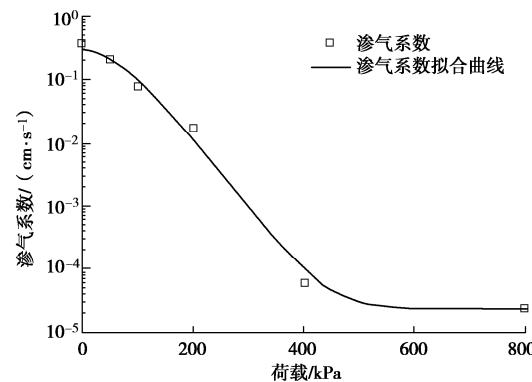


图 9 渗气系数与荷载的关系

Fig. 9 Curve of gas permeability coefficient against external loads

由图 9 可知，试样渗气系数随上覆荷载增加呈现减小趋势，这是由于试样渗透性受到了饱和度和孔隙比变化的耦合影响。随着压缩的进行，试样饱和度逐渐升高，原有气相通道逐渐被孔隙水阻隔；试样孔隙比降低，通道的有效直径减小，孔隙连通性降低^[17, 30]。但当上覆荷载增加到一定程度（如上覆荷载大于 480 kPa）后，试样渗气系数对荷载变化的敏感性将显著降低，这是由于随着饱和度升高、孔隙比降低，部分连通的气相通道逐渐被孔隙水隔断形成了孤立的气泡（当上覆荷载为 480 kPa 时，试样中空气孔隙率仅为 2.0%），此后气体运移速度急剧降低^[31]，试样渗气系数将基本不再变化。

由于试样饱和度及孔隙比均会对试样的渗透性能产生影响，因此本文借鉴彭尔兴等^[17]引入 $e_a = e(1 - S_r)$ 的方法对试样渗透性进行预测。绘制 A 试样的 $k_a - e_a$ 关系曲线，如图 10 所示。

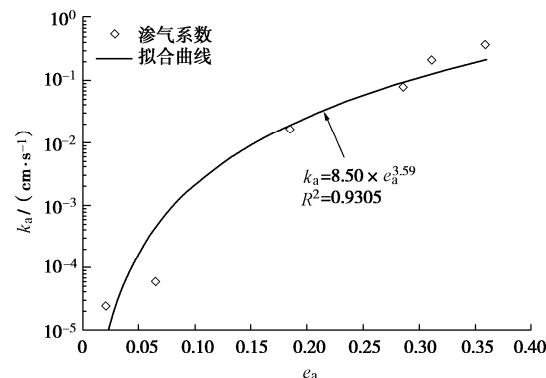


图 10 渗气系数与 e_a 的关系

Fig. 10 Curve of gas permeability coefficient against e_a

由图 10 可知， k_a 与 e_a 具有较好的幂函数关系，可用拟合公式表示为

$$k_a = \alpha e_a^\beta \quad , \quad (7)$$

式中, α , β 均为试验参数, 与土体类型有关, 本文取值为 $\alpha = 8.50$, $\beta = 3.59$ 。根据数据拟合的相关系数可知, 上述公式能够较好地表征土体的渗气性能。本文结论与彭尔兴等^[17]研究结论相同。

(2) 气体渗透率与渗透系数的关系

土的渗气性反映了气体通过多孔介质孔隙的性质, 而土的渗水性则表征了水通过相同多孔介质孔隙的性质, 故土的渗气性一定程度上可以反映土的渗水性^[16, 32]。刘锦阳等^[16]和 Loll 等^[33]对不同地区不同类型的土进行了试验研究, 指出土的气体渗透率与渗透系数存在如下函数关系:

$$\lg k_w = \lambda \lg k_a + \eta, \quad (8)$$

式中, k_w 为渗透系数 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), λ , η 为试验参数。本文根据试样在 400, 800 kPa 荷载下渗气系数和渗透系数的试验结果, 联立得试验用土的参数 $\lambda = 1.05$, $\eta = 12.64$, 并利用式 (8) 计算得 A 试样在不同荷载下的渗透系数, 见图 11。

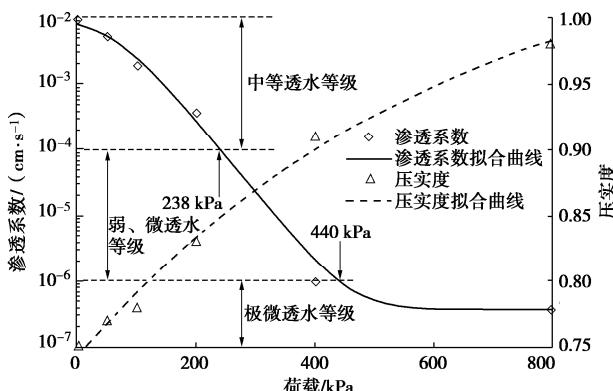


图 11 渗透系数和压实度与荷载的关系

Fig. 11 Curves of permeability coefficient and degree of compaction of the sample against external loads

由图 11 可知, 试样渗透系数随着上覆荷载增加而逐渐减小。根据《水利水电工程地质勘察规范》^[34] 中对岩土体渗透性等级的划分可知, 在初始阶段 (0 kPa) 泥饼试样渗透性处于中等透水等级, 这说明初始堆填体中泥饼块体间孔隙较大, 连通性较强; 在上覆荷载介于 238~440 kPa 时, 试样处于弱、微透水等级, 这是由于随着荷载增加, 试样逐渐被压密, 孔隙连通性相较初期已明显降低; 在上覆荷载 800 kPa 时, 试样处于极微透水等级。

结合图 7 和图 11 可知, 上覆荷载 238 kPa 对应试样空气孔隙率为 6.5%, 压实度为 0.85; 上覆荷载 440 kPa 对应试样空气孔隙率为 2.5%, 压实度为 0.91。考虑可操作性和经济性, 本文建议将 0.85 作为压实度控制指标, 此时相应试样透水性处于弱透水等级, 已能够达到施工期防止雨水入渗的目的, 较为合理。

3 结 论

(1) 工程渣土经过洗砂并经压滤脱水形成泥饼后, 细粒 ($\leq 0.075 \text{ mm}$) 含量占比较多 ($>99\%$), 属于黏性土。由于泥饼堆填体中存在虚堆空隙, 导致泥饼堆填体的压缩性在低应力水平 (如小于 200 kPa) 时较大 (属高压缩性试样)。结合 $e-P$ 曲线及 CT 图像可知, 随着上覆荷载增加, 试样逐渐被压密, 泥饼间孔隙与泥饼内孔隙的尺度差异逐渐减小, 试样的双孔隙特征及不均质性逐渐减弱。

(2) 脱水泥饼试样的渗透性受饱和度及孔隙比共同影响, 随着压缩的进行, 试样渗气系数呈现减小趋势。本文建立的渗气系数预测公式, 考虑了力水耦合作用的影响, 可较好地表征土体的渗透性能, 但在后续工作中有必要进一步揭示经验系数的物理意义和取值范围。基于气体渗透率计算得出了试样的渗透系数, 研究表明在初始阶段 (0 kPa), 试样处于中等透水等级; 在上覆荷载介于 238~440 kPa 时, 试样处于弱、微透水等级; 在上覆荷载达到 800 kPa 时, 试样已处于极微透水等级。

(3) 综合大尺寸压缩-渗透试验结果可知, 在试样上覆荷载为 295 kPa 时, 试样空气孔隙率为 5%, 试样压实度为 0.87, 试样渗透性处于弱透水等级。考虑可操作性和经济性, 建议将 0.85 作为脱水泥饼堆填作业过程中的压实度控制指标, 在该指标下可通过较低经济成本较好实现减小泥饼堆填体变形以及施工期防止雨水入渗的目的。

参考文献:

- [1] 郭卫社, 王百泉, 李沿宗, 等. 盾构渣土无害化处理、资源化利用现状与展望[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(8): 1101~1112. (GUO Wei-she, WANG Bai-quan, LI Yan-zong, et al. Status quo and prospect of harmless disposal and reclamation of shield muck in China[J]. Tunnel Construction, 2020, 40(8): 1101~1112. (in Chinese))
- [2] 丁建文, 洪振舜, 刘松玉. 疏浚淤泥流动固化处理与流动性试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 1): 280~284. (DING Jian-wen, HONG Zhen-shun, LIU Song-yu. Study of flow-solidification method and fluidity test of dredged clays[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S1): 280~284. (in Chinese))
- [3] BARENBLATT G I, ZHELTOV I P, KOCHINA I N. Basic concepts in the theory of seepage of homogeneous liquids in fissured rocks[J]. Journal of Applied Mathematics, 1960, 24: 1286~1303.

- [4] DELAGE P, LEFEBVRE G. Study of the structure of a sensitive champlain clay and of its evolution during consolidation[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1984, **21**(1): 21 – 35.
- [5] JUANG C H, HOLTZ R D. Fabric, pore size distribution, and permeability of sandy soils[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1986, **112**(9): 855 – 868.
- [6] ROMERO E, DELLA VECCHIA G, JOMMI C. An insight into the water retention properties of compacted clayey soils[J]. Géotechnique, 2011, **61**(4): 313 – 328.
- [7] ALONSO E E, VAUNAT J, GENS A. Modelling the mechanical behaviour of expansive clays[J]. Engineering Geology, 1999, **54**: 173 – 183.
- [8] GENS A, ALONSO E E. A framework for the behaviour of unsaturated expansive clays[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1992, **29**(6): 1013 – 1032.
- [9] 李光耀. 毛细阻滞型覆盖层微观-宏观水气传导特性及服役性能[D]. 杭州: 浙江大学, 2020. (LI Guang-yao. Micro-Macro-Scale Water and Gas Transport Properties and Practical Performance of Capillary Barrier Covers[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020. (in Chinese))
- [10] ROSQVIST H, DESTOUNI G. Solute transport through preferential pathways in municipal solid waste[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2000, **46**(1/2): 39 – 60.
- [11] MCCREANOR P T, REINHART D R. Mathematical modeling of leachate routing in a leachate recirculating landfill [J]. Water Research, 2000, **34**(4): 1285 – 1295.
- [12] GERKE H H, GENUCHTEN M T. A dual-porosity model for simulating the preferential movement of water and solutes in structured porous media[J]. Water Resources Research, 1993, **29**(2): 305 – 319.
- [13] 杨益彪, 詹良通, 王顺玉, 等. 封顶覆盖黄土气体渗透特性测试及填埋气一维迁移分析[J]. 岩土力学, 2015, **36**(7): 1973 – 1980. (YANG Yi-biao, ZHAN Liang-tong, WANG Shun-yu, et al. Measurement of gas permeability of cover loess and one-dimensional analysis of landfill gas emission[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(7): 1973 – 1980. (in Chinese))
- [14] TULI A, HOPMANS J W, ROLSTON D E, et al. Comparison of air and water permeability between disturbed and undisturbed soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2005, **69**(5): 1361 – 1371.
- [15] 王卫华, 王全九, 樊军. 原状土与扰动土导气率、导水率与含水率的关系[J]. 农业工程学报, 2008, **24**(8): 25 – 29. (WANG Wei-hua, WANG Quan-jiu, FAN Jun. Relationship between air permeability, water conductivity and water content for undisturbed and disturbed soils[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, **24**(8): 25 – 29. (in Chinese))
- [16] 刘锦阳, 李喜安, 简涛, 等. 马兰黄土渗气率与饱和渗透系数的关系研究[J]. 水文地质工程地质, 2017, **44**(6): 154 – 162. (LIU Jin-yang, LI Xi-an, JIAN Tao, et al. A study of the relationship between gas permeability and saturated coefficient of permeability of the Malan loess[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2017, **44**(6): 154 – 162. (in Chinese))
- [17] 彭尔兴, 孙文博, 章定文, 等. 非饱和含砂细粒土的气体渗透特性研究[J]. 岩土力学, 2016, **37**(5): 1301 – 1306, 1316. (PENG Er-xing, SUN Wen-bo, ZHANG Ding-wen, et al. Air permeability of unsaturated fine sandy soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(5): 1301 – 1306, 1316. (in Chinese))
- [18] 苗强强, 陈正汉, 张磊, 等. 非饱和黏土质砂的渗气规律试验研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(12): 3746 – 3750, 3757. (MIAO Qiang-qiang, CHEN Zheng-han, ZHANG Lei, et al. Experimental study of gas permeability of unsaturated clayey sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(12): 3746 – 3750, 3757. (in Chinese))
- [19] 刘锦阳, 李喜安, 张凯旋, 等. 马兰黄土渗气性试验研究[J]. 水土保持学报, 2018, **32**(1): 141 – 146. (LIU Jin-yang, LI Xi-an, ZHANG Kai-xuan, et al. Experiment study on air permeability of malan loess[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, **32**(1): 141 – 146. (in Chinese))
- [20] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 2019. (Standard for Geotechnical Testing Method: GB/T 50123—2019[S]. 2019. (in Chinese))
- [21] 土的工程分类标准: GB/T 50145—2007[S]. 2007. (Standard for Engineering Classification of Soil: GB/T50145-2007[S]. 2007. (in Chinese))
- [22] 陈存礼, 张登飞, 张洁, 等. 等向应力条件下原状 Q_3 黄土的渗气特性研究[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(2): 287 – 294. (CHEN Cun-li, ZHANG Deng-fei, ZHANG Jie, et al. Gas permeability of intact Q_3 loess under isotropic stresses[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(2): 287 – 294. (in Chinese))
- [23] 陈正汉, 谢定义, 王永胜. 非饱和土的水气运动规律及其工程性质研究[J]. 岩土工程学报, 1993, **15**(3): 9 – 20. (CHEN Zheng-han, XIE Ding-yi, WANG Yong-sheng.

- Experimental studies of laws of fluid motion, suction and pore pressures in unsaturated soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1993, **15**(3): 9 - 20. (in Chinese))
- [24] 姚志华, 陈正汉, 黄雪峰, 等. 非饱和 Q₃ 黄土渗气特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(6): 1264 - 1273. (YAO Zhi-hua, CHEN Zheng-han, HUANG Xue-feng, et al. Experimental research on gas permeability of unsaturated Q₃ loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(6): 1264 - 1273. (in Chinese))
- [25] 谢定义. 非饱和土土力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2015. (XIE Ding-yi. Soil Mechanics for Unsaturated Soils [M]. Beijing: Higher Education Press, 2015. (in Chinese))
- [26] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil Mechanics for Unsaturated Soils[M]. New York: John Wiley & Sons, 1993.
- [27] 万 智. 细粒土的压实特性与潮湿地区公路路基填筑控制技术研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010. (WAN Zhi. Research on Compaction Characteristics of Fine-Grained Soil and Compaction Control Technology in Wet Area[D]. Changsha: Central South University, 2010. (in Chinese))
- [28] Great Britain, Department of Transport, GBW Office. Specification for Road and Bridge Works[M]. 5th ed. London: HMSO, 1976.
- [29] 林 鹏, 许镇鸿, 徐 鹏, 等. 软土压缩过程中固结系数的研究[J]. 岩土力学, 2003, **24**(1): 106 - 108, 112. (LIN Peng, XU Zhen-hong, XU Peng, et al. Research on coefficient of consolidation of soft clay under compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, **24**(1): 106 - 108, 112. (in Chinese))
- [30] 朱前林, 李小春, 魏 宁, 等. 多孔介质中气泡尺寸对流动阻力的影响[J]. 岩土力学, 2012, **33**(3): 913 - 918. (ZHU Qian-lin, LI Xiao-chun, WEI Ning, et al. Influence of bubble size on fluid resistance in porous media[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(3): 913 - 918. (in Chinese))
- [31] FREDLUND D G, RAHARDJO H, FREDLUND M D. Air Flow through Unsaturated Soils[M]. New York: John Wiley & Sons, Ltd, 2012.
- [32] BLACKWELL P S, RINGROSE-VOASE A J, JAYAWARDANE N S, et al. The use of air-filled porosity and intrinsic permeability to air to characterize structure of macropore space and saturated hydraulic conductivity of clay soils[J]. Journal of Soil Science, 1990, **41**(2): 215 - 228.
- [33] LOLL P, MOLDRUP P, SCHJONNING P, et al. Predicting saturated hydraulic conductivity from air permeability: application in stochastic water infiltration modeling[J]. Water Resources Research, 1999, **35**(8): 2387 - 2400.
- [34] 水利水电工程地质勘察规范: GB 50487—2008[S]. 2008. (Code for Engineering Geological Investigation of Water Resources and Hydropower: GB 50487—2008[S]. 2008. (in Chinese))