

DOI: 10.11779/CJGE202204019

黏土在不同应力条件下的渗透过程分析

宋林辉¹, 王兴亚¹, 吴昊宇¹, 周克发², 梅国雄³

(1. 南京工业大学数理科学学院, 江苏 南京 211800; 2. 南京水利科学研究院大坝安全与管理研究所, 江苏 南京 210029;

3. 广西大学土木建筑工程学院, 广西 南宁 530004)

摘要: 渗透性是黏土的重要工程性质之一, 通过渗透系数进行表征, 其机理在于水在黏土中的渗透过程。采用研制的刚性壁固结渗透装置, 开展 9 种应力条件下的黏土渗流试验, 并运用荧光示踪技术定量分析试样不同位置处的过水率和流道率, 以刻画黏土的渗透过程。试验结果表明, 试样同一横截面上的过水率变化范围很大, 分布很不均匀, 水在渗流过程中容易出现优势流道, 且优势流道的分布呈随机无规律性; 受水力渗透固结的影响, 不同横截面上的过水率和流道率也存在差异, 靠近水体的土层的参数值最大, 沿渗流方向呈递减趋势; 黏土的过水率和流道率均随水力梯度的增加而增加、随固结压力的增加而减小, 但就影响程度而言, 水力梯度较固结压力更显著。

关键词: 黏土; 渗透过程; 荧光示踪; 过水率; 流道率

中图分类号: TU433

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2022)04-0755-07

作者简介: 宋林辉(1980—), 男, 博士, 副教授, 主要从事岩土力学方面的研究工作。E-mail: h27991@163.com。

Permeation process of clay under different stresses

SONG Lin-hui¹, WANG Xing-ya¹, WU Hao-yu¹, ZHOU Ke-fa², MEI Guo-xiong³

(1. School of Physical and Mathematical Sciences, Nanjing TECH University, Nanjing 211800, China; 2. Dam Safety Management

Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 3. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: Permeability is one of the important engineering properties of clay. It is characterized by the permeability coefficient, and its mechanism lies in the permeability process of water in clay. In order to describe the permeation process of clay, the developed rigid wall consolidation infiltration device is used to carry out clay seepage tests under 9 stress conditions. The water transfer rate and flow rate at different positions of the clay are quantitatively analyzed by the fluorescence tracing technique. The results show that the water transfer rate on the same cross section of the sample varies widely, and the distribution is very uneven. The dominant channel is easy to appear in the seepage process, and the distribution of the dominant channel is random and irregular. Under the influences of hydraulic seepage consolidation, there are also differences in permeable rate and flow rate on different cross sections. The parametric value of the soil layer near the water body is the largest and shows a decreasing trend along the seepage direction. The permeable rate and flow rate of clay both increase with the increase of hydraulic gradient and decreases with the increase of consolidation pressure, but the hydraulic gradient is more significant than consolidation pressure in terms of influence degree.

Key words: clay; permeation process; fluorescence tracer; permeable rate; flow rate

0 引言

土体渗透性是岩土工程的研究热点, 国内外学者对渗透系数的计算方法进行了大量研究。Mesri^[1]、Nagaraj 等^[2]均通过系列试验提出了渗透系数与孔隙比的关系式, 目前此类关系式已成为经典并被不断完善^[3]; 还有探讨渗透系数与固结应力^[4]、水力梯度^[5]、颗粒粒径和吸附水膜^[6]之间关系的研究。除了上述基于土体物理指标和外部应力条件从不同角度计算渗透系数的研究外, 水在介质中的渗透过程也被关注, 并

通过数值模拟、基于温度和电导率等参数的试验测试、以及示踪技术等手段进行研究^[7]。其中, 周健等^[8]基于散体介质理论, 利用 PFC 模拟不同水压下渗流引起砂土特性变化的全过程; 孙强等^[9]通过砂岩地层渗透过程中不同部位的地电场响应特点试验, 判定砂层中水的渗流方向、渗流速度和渗漏点位置; 程竹华等^[10]和刘目兴等^[11]利用剖面染色与图像分析相结合的方

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51578164); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目 (KYCX20-1061)

收稿日期: 2021-06-15

法对土壤大孔隙及优先流开展的试验研究,分析优先流路径对剖面水分入渗过程的影响;Bai 等^[12]利用示踪剂研究了不同粒径悬浮颗粒在饱和多孔介质中的迁移特性;张文杰等^[13]设计了一种垃圾染色剖面的试验方法,研究了垃圾中优先流特征。可见,示踪技术主要用于分析优势渗流模式并定量评估优势流发育程度,研究对象包括地表土壤、填埋垃圾和岩石等,较少涉及不同应力下的黏土渗流通道。

本文运用荧光示踪表征技术,针对不同应力状态下黏土的渗流通道开展试验研究。以深基础下的黏土地基为研究对象,在施加有效应力完成土体固结的基础上,注入含荧光剂的水、并施加一定的水压在土体中形成稳定渗流,然后分析土体中不同位置处的荧光剂含量,进而判断出该处是否有水渗流通过,并计算出渗水量,进一步对数据进行整理和分析,刻画出水在黏土中的渗透过程。

1 试验方案

1.1 试验工况

选取 100, 200, 300 kPa 3 种固结压力作用下的土体开展试验,并按照固结压力与渗透水压之比为 1 : 0.5, 1 : 1.0, 1 : 1.5 施加渗透水压,共进行 9 组试验(T1~T9),试验加载方案如表 1 所示。

表 1 试验加载方案

Table 1 Loading schemes of tests			
试验编号	固结压力 p_c/kPa	渗透水压 p_w/kPa	压力比
T1	100	50	1 : 0.5
T2	100	100	1 : 1.0
T3	100	150	1 : 1.5
T4	200	100	1 : 0.5
T5	200	200	1 : 1.0
T6	200	300	1 : 1.5
T7	300	150	1 : 0.5
T8	300	300	1 : 1.0
T9	300	450	1 : 1.5

1.2 试验土体

试验用土取自南京市江北新区的一个基坑场地,勘察报告显示为可塑状的灰色黏土,将其运至实验室,做晾干、粉碎处理后,进行常规土工试验,具体指标如表 2 所示,粒径含量如表 3 所示。

表 2 土体物理参数

Table 2 Physical parameters of soil			
土颗粒相对质量密度	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_P/\%$	塑性指数 I_P
2.68	38.3	19.3	19.0

表 3 黏土粒径的百分含量

Table 3 Percentages of particle size of clay						
粒径范围/mm	> 1.0	1.0~0.5	0.5~0.25	0.25~0.075	0.075~0.005	< 0.005
含量/%	0.0	0.5	1.9	3.4	67.3	26.9

由上述参数可判断试验土体为低液限黏土。

1.3 试验设备

依据试验要求研制了一套刚性壁固结渗透装置,包括渗透测试筒、施加固结压力的杠杆和施加水压的气泵,其中的渗透测试筒是关键部件,如图 1 所示。

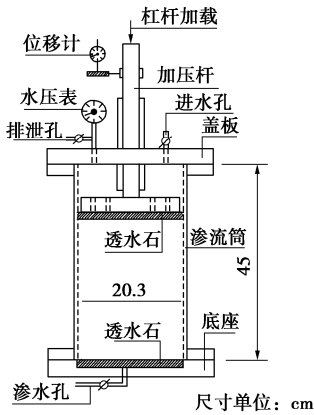


图 1 渗透测试筒

Fig. 1 Container of penetration tests

由图 1 可见,渗透测试筒由底座、渗流筒和盖板组成,三者可装配形成密闭腔体。底座底部留有渗水孔;筒体总高 45 cm、内径 20.3 cm;盖板中间设有加压杆套,加压杆(上有镶嵌密封橡胶圈的环状凹槽)通过杆套穿过盖板传递杠杆施加固结压力,加压杆上加装了位移测试板,用于放置位移计;盖板上设有两个孔道,一个是带水压表的排泄孔,用来排气排水,另一个是进水孔,用于试验过程中的注水和加压。3 个孔均设有阀门,可按需开启和关闭。

水压是由气泵经密闭罐施加的,密闭罐内部由气囊分成气室和水室,其中气室的进气口接气泵,水室储存有含荧光剂的水,其出水口接渗流筒盖板上的进水孔,气泵加压后,气室的压力传递到水室实现加压,且可避免气体混入水中。

示踪剂采用的是荧光素钠,易溶于水,为水溶性荧光剂,最大吸收波长为 493.5 nm。光度计是上海菁华科技仪器有限公司生产的紫外可见分光光度计,波长范围为 190~1100 nm。

1.4 试验步骤

依据试验工况,每组试验可细分为 9 个步骤。

(1)准备工作:组装试验装置并进行密封性检测,确保试验过程中不漏水;同时将粉碎后的黏土放入饱和桶中抽气饱和,不少于 24 h;配置好荧光剂溶液(溶液质量分数为 1.67 mL·L⁻¹),并注入密闭罐。

(2)土体填筑:先在渗流筒内壁涂抹一层凡士林,以避免筒壁与土体界面间的渗漏,并将滤纸放置在底部透水石上。将饱和好的黏土浆分层填入渗流筒内,打开底座的渗水孔,静置 24 h 以上,以使土体在自重

下沉淀析水。

(3) 加压固结：饱和黏土浆经自重沉淀后，将析出的水抽掉，放入滤纸和透水石，通过杠杆逐级施加荷载（每级荷载时间不少于 24 h）直至达到表 1 中所要求的固结压力（该固结压力在试验过程中一直保持），要求加水压前该固结压力下土体沉降达到稳定状态，即变形小于 0.01 mm/h。

(4) 施加水压：连接密闭罐与进水孔，打开排泄孔，将土体顶部的空间注满荧光剂溶液，然后关闭排泄孔，在底部渗水孔处接带荷重传感器的水桶；之后按表 1 方案施加水压形成渗流，通过渗水量和渗出水中荧光剂的浓度来判断试验是否达到稳定状态，即渗水量随时间呈线性变化，且渗出水中的荧光剂浓度不变。

(5) 切样与试验：渗流试验结束后，将渗流筒中的黏土样取出，进行称重、测高、并将土样顶面刮平，然后沿高度将土样切成 3 层，每层厚度约为 60 mm，如图 2 所示，然后按图 3 所示平面尺寸切成 17 小块，并将每块上下表面约 10 mm 厚削除（尽量避免分层切土的影响），使得每小块土样厚约 30 mm。除#1 小块外，其余 16 块均称重后放入 3 倍重的水中浸散；#1 小块用环刀取样，获得其密度后，再和其余 16 块一样，连同环刀一起放入 3 倍重的水中浸散。从 17 小块土样切削下来的土体中挑一部分用作含水率试验。

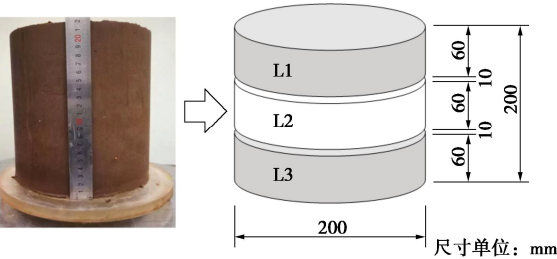


图 2 试样照片及纵向切割方式

Fig. 2 Photo of sample and longitudinal cutting method

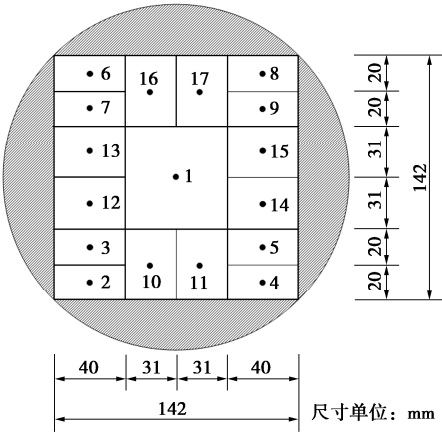


图 3 土样横截面切割方式和编号

Fig. 3 Cutting method and numbering of cross section of soil sample

(6) 提取荧光剂溶液：待上述土块在水中浸散后（需 12 h 以上），用玻璃棒对其进行多次搅拌，每次搅拌的方向均相反且持续的时间为 5 min 以上，相邻两次搅拌的时间间隔为 3 min，直至将黏土与水搅拌成泥浆状为止，使得赋存于小土块孔隙中的荧光剂扩散到水中，再静置 12 h 以上，等待土颗粒下沉，然后用针管将上层的荧光剂溶液吸出，并注入比色管中待检，试验照片如图 4 所示。

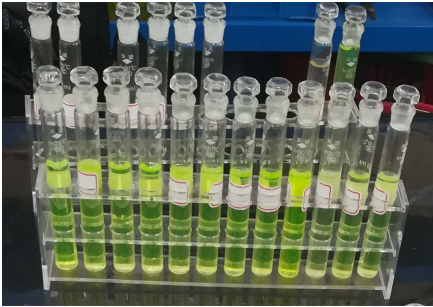


图 4 提取荧光剂溶液的照片

Fig. 4 Photos of extracting fluorescent solution

(7) 溶液浓度测量：启动紫外可见分光光度计，进行调波长和校零等操作后，将比色管中待检溶液逐一倒入比色皿中进行吸光度测量，测量结束后，利用标准曲线，基于朗伯比尔定律将吸光度换算成溶液浓度。

(8) 计算孔隙透水量：根据已测得的溶液浓度可计算出各小块土体中的荧光剂含量，再基于试验前所配置的荧光剂溶液浓度大小，可算得穿透孔隙的水量。

(9) 数据处理与分析：得到各土块的透水量后，对数据做进一步分析，以描述水在黏土中的渗透情况。

2 数据处理方法

依据试验步骤（1）～（5），可制作完成 9 种应力工况下的土体试样，并通过常规土工试验获得其物理参数，如表 4 所示；再依据试验步骤（6），可提取到不同试样的荧光剂溶液。

表 4 固结后土体的物理参数						
Table 4 Physical parameters of soil after consolidation						
试验 编号	密度 $\rho /(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$			含水率 $w/\%$		
	L1	L2	L3	L1	L2	L3
T1	1.97	1.98	1.98	32.3	30.4	29.8
T2	1.98	1.99	1.99	30.5	30.1	29.5
T3	1.98	1.99	2.00	28.9	27.3	26.9
T4	2.00	2.01	2.01	26.2	25.9	25.4
T5	2.00	2.01	2.02	26.1	25.6	25.3
T6	2.01	2.01	2.02	26.0	25.4	25.1
T7	2.01	2.02	2.03	25.5	24.2	23.7
T8	2.02	2.02	2.03	25.3	23.5	23.3
T9	2.04	2.05	2.05	24.1	23.1	23.1

依据试验步骤(7),通过分光光度计可确定所提取溶液的荧光剂浓度,但试验前需先绘制荧光剂标准曲线,即溶液浓度与吸光度之间的换算关系。在朗伯-比耳定律有效吸光度区间范围内,用移液管、比色管以自来水为溶剂从低至高配 30 个不同浓度的荧光剂溶液,然后将紫外可见分光光度计波长设置为 493.5 nm,调好 100%T/0A,将配好的已知浓度的荧光剂溶液放入光度计中进行逐一测量,对应记录下它们的吸光度值 A ,并拟合试验值得到溶液浓度 C 与吸光度 A 间的换算关系式:

$$C = 0.07052 \times A \quad (1)$$

依据小块湿土样浸泡前含有的水量 V_w 和浸散土样时加入的水量 V_a ,采用下式可计算出该小块土样中的荧光剂含量 V_f :

$$V_f = C \times (V_w + V_a) \quad (2)$$

V_w 可根据试验测得的土样质量 m 、密度 ρ 和含水率 w 计算得到

$$V_w = \frac{mw}{\rho(1+w)} \quad (3)$$

基于试验前所配置的荧光剂溶液质量分数为 $1.67 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$,依据下式可计算出渗流至该小块土样中含荧光剂的水量,将其定义为透水量 V_p :

$$V_p = V_f / 1.67 \quad (4)$$

为进一步分析土样横截面上不同位置处的透水量情况,将每个小块土样的透水量除以该小块土样的体积可得到单位体积的透水量,将其定义为过水率 R_p ,具体计算式为

$$R_p = \frac{V_p}{V} = \frac{\rho V_p}{m} \times 100\% \quad (5)$$

从黏土的细观角度看,并不是所有孔隙都是连通成水流通道的,为探讨形成水流通道的孔隙比例,定义流道率 η ,其为已形成流道的孔隙体积与总孔隙体积之比,考虑到饱和黏土中的孔隙均被水填充,总孔隙体积 V_v 即为所含水的体积 V_w ,前述透水量 V_p 即为已形成流道的孔隙体积,则流道率 η 可通过下式计算得到

$$\eta = \frac{V_p}{V_w} \times 100\% \quad (6)$$

因 $V_p = V \cdot R_p$, $V_w = V \cdot n$ (n 为孔隙率),代入式(6)可得

$$\eta = \frac{R_p}{n} \times 100\% \quad (7)$$

以下将基于试验测试得到的吸光度 A 、各小块土样质量 m 、密度 ρ 、含水率 w 、稀释水量 V_a 及推算的孔隙率 n 等数据,利用上述公式计算过水率 R_p 和流道率 η 两个参数,以分析黏土的渗透过程。

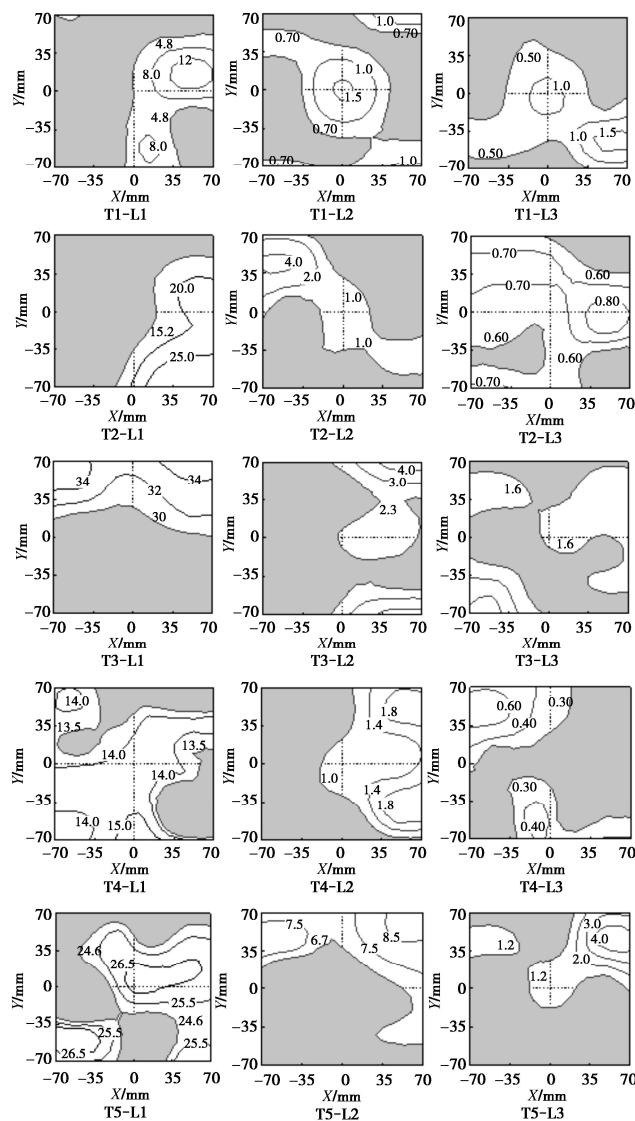
3 试验结果分析

基于 9 组试验的测试数据和前述计算公式,可得到各试样不同位置处的过水率和流道率大小,并以此刻画其渗透过程,在此基础上开展对比分析,可得到黏土渗透过程的影响因素和影响程度。

3.1 过水率分析

通过对各试样每层的 17 个小块土样测试和计算,可得到试样不同位置处的过水率。为便于观察,以各小块土样中心点为 XY 向坐标位置,以过水率值为 Z 向绘制等高线图,同时以过水率均值为界线,将小于均值的部分填充灰色阴影,以直观显示优势流道区的分布,如图 5 所示。

由图 5 可见,同一横截面上的过水率变化范围很大、分布不均匀;另外,27 张分布图中,除 T2-L3 和 T4-L1 中大于均值的白色区域分布比较分散外,其余都呈集中成片分布特点,表明水在渗流过程中容易出现优势流道,且大部分水流从优势流道中穿过。



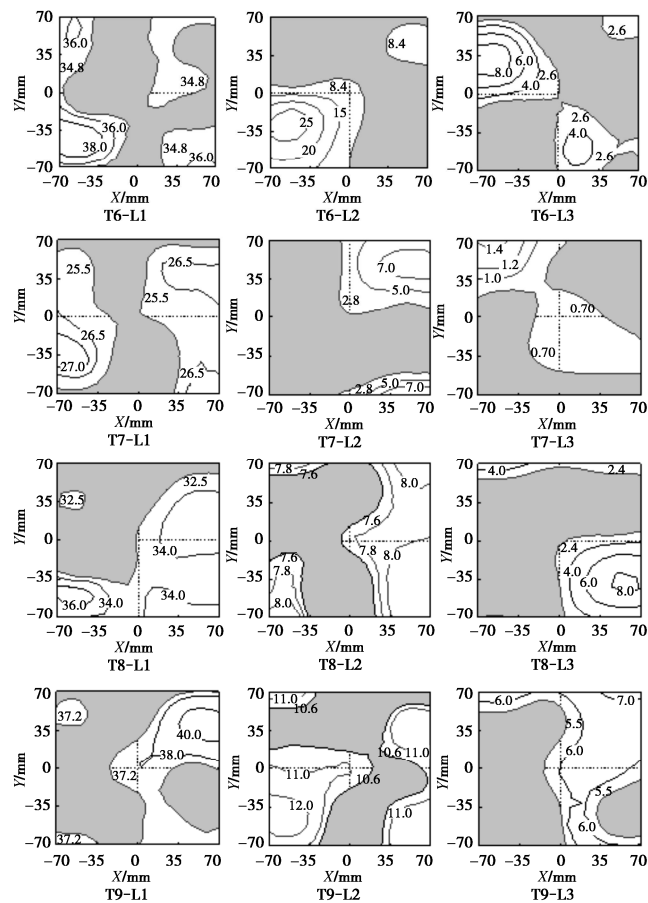


图5 各层土样的过水率分布

Fig. 5 Distribution of permeable rate of each soil layer

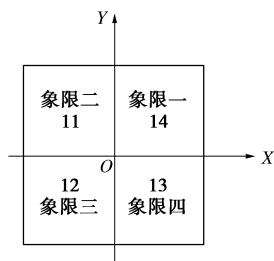


图6 优势流道区的分布统计

Fig. 6 Distribution statistics of dominant channel area

为统计优势流道在土样横截面上的分布规律,基于 X 、 Y 轴将截面分成4个象限,对照图5,以优势流道区面积超过所统计象限面积一半以上计数,可统计出优势流道区在4个象限出现的次数依次为14, 11, 12, 13,如图6所示。基于现有的样本数,从统计学而言,其分布是比较均匀的,符合随机分布的规律。上述分析表明渗透过程中,土层横截面上的优势流道是无规律随机分布的。

为便于进一步对比,将图5中27层土样的过水率平均值按土层中心所处位置绘制成图7。可见,各试样不同横截面上的过水率相差也很大,总体而言,靠近水压施加面的L1层土体的过水率最大,L2层土体

次之,L3层土体最小。

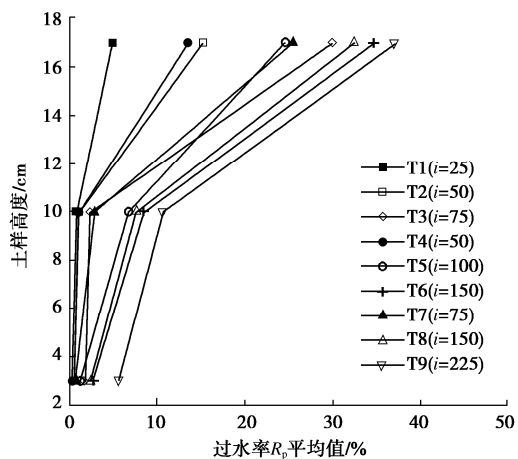


图7 过水率均值随高度的变化

Fig. 7 Variation of average permeable rate with height

另外,变化趋势方面,上段直线的斜率较小、下段直线的斜率较大,明显对比出L1层到L2层的过水率存在剧减,而L2层到L3层的过水率变化相对小得多,说明靠近水体的土层最先被水透过。对于相同固结压力、不同渗透压力的试样(如T1~T3、T4~T6、T7~T9),随着水力梯度的增加,各层的过水率也在增加,尤其是L1层增量最大;就9组试样而言,虽然固结压力也在增大,但过水率随水力梯度的增加依然呈明显增长趋势,水力梯度的影响更大。对于相同水力梯度、不同固结压力的试样(如T2与T4、T3与T7、T6与T8),可见固结压力大的试样的过水率稍小,因为土体相对较密实,但数值相差不大。

3.2 流道率分析

依据试样的土工试验数据,可计算得到各试样每层的孔隙率,基于式(7)可进一步计算得到各试样每层的流道率平均值,同样将其按土层中心所处位置绘制成图8。

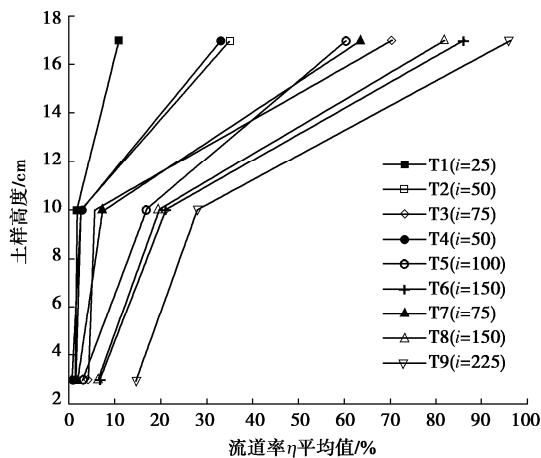


图8 流道率均值随高度的变化

Fig. 8 Variation of average flow rate with height

由图8可见,流道率的大小分布规律总体上与过

水率相同, 靠近水压施加面的 L1 层土体的最大, 且远大于 L2 和 L3 层土体的流道率; 变化趋势上也是上段直线的斜率较小、下段直线的斜率较大, 说明靠近水体的土层孔隙更易形成渗流通道。

为分析水力梯度和固结压力对流道率的影响程度, 将流道率平均值按土层编号绘成图 9, 10。

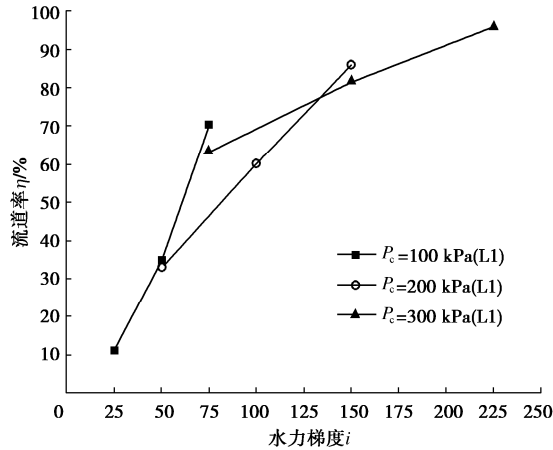


图 9 L1 土层流道率随水力梯度的变化

Fig. 9 Variation of channel rate of soil layer L1 with hydraulic gradient

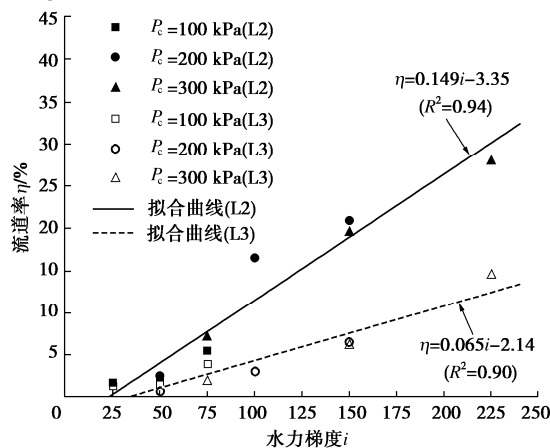


图 10 L2 和 L3 土层流道率随水力梯度的变化

Fig. 10 Variation of channel rate of soil layers L2 and L3 with hydraulic gradient

由图 9 可见, 3 种固结压力下的 L1 层土的流道率均随水力梯度呈线性增长, 表明水力梯度起增加流道率的作用; 不过, 随着固结压力的增大, 土体孔隙比减小, 使得流道率随水力梯度的增速变缓。至于两者的影响程度可通过两组数据来对比体现, 如 T3 和 T7, 水力梯度相同, 固结压力分别为 100 kPa 和 300 kPa (比值为 3), L1 层的流道率降低 6.9%; 而 T4 和 T6 中, 固结压力相同, 水力梯度分别为 50 和 150 (比值也是 3), 但 L1 层的流道率增长 52.9%, 可见, 水力梯度对流道率的影响远大于固结压力的影响。

由图 10 可见, 3 种固结压力下的 L2 和 L3 层土的流道率随水力梯度整体呈线性增长, 但 L3 层土的增

速较 L2 层土要小。

3.3 渗流过程影响因素分析

本试验中影响渗流过程的因素主要包括固结压力和水力梯度。综上可知, 当黏土所受的固结压力不变时, 增大水力梯度会使黏土的透水率和流道率增加, 该现象与 Bai 等^[14]在研究渗流速度对多孔介质中悬浮颗粒影响的结论一致, 即增大水力梯度会使流道内的孔隙水流动速率加快, 使流道四周的土颗粒发生迁移, 进而增大现有流道或打通新流道; 当在黏土上作用的水力梯度相同时, 所受固结压力越大、透水率和流道率越小, 主要是固结压力越大土体越密实、孔隙越少, 则渗流通道自然减少; 在对透水率和流道率的影响程度上, 水力梯度的影响较固结压力要大。

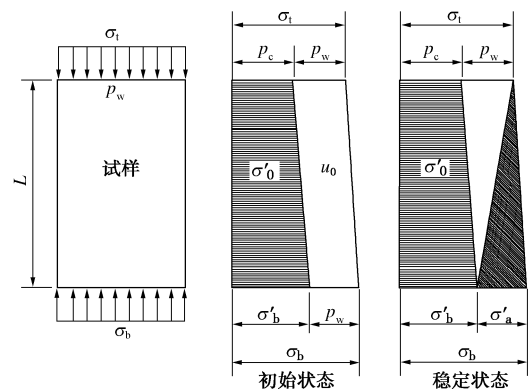


图 11 试样渗透受力图

Fig. 11 Force diagram of sample seepage in soil

基于图 7 中过水率和图 8 中流道率随高度的变化规律、以及图 9, 10 中不同土层的流道率变化规律可知, 自上而下的 L1~L3 土层的透水率和流道率呈递减趋势, 这种现象主要是由施加水压形成的渗透力所致。试验中, 水压施加后在试样中产生自上而下的渗流, 同时水力渗透会诱发固结, 具体如图 11 所示, 试样在水压施加瞬间的初始状态, 顶部的总应力 σ_t 由固结压力 p_c (即初始有效应力) 和施加的水压 p_w 组成, 底部的总应力 σ_b 由初始有效应力 σ'_0 与超静孔隙水压力 p_w 组成, 则横线阴影区为初始有效应力 σ'_0 部分, 空白区为超静孔隙水压力 u_0 部分。随着固结进行直至稳定渗流状态, 试样顶部的受力状态保持不变, 底部的超静孔隙水压力消散为零, 有效应力增加了 σ'_a , 数值上等于水压 p_w , 试样应力图上的斜线阴影区即为增加的有效应力三角形。由此可见, 试样中的有效应力自上而下有个三角形增量, 使得试样被压密, 这一点可通过水压施加过程中量测到的土样沉降所证实; 由于底部的有效应力增量, 即试样下部比上部承受的固结压力大, 故透水率和流道率呈现出上大下小的特征, 这一点与固结压力的影响特点相符。

4 结 论

在开展9种应力条件下的黏土渗流试验基础上,运用荧光示踪表征技术定量分析黏土试样中不同位置处的过水率和流道率,以此刻画黏土的渗流过程,并通过对比得出如下结论:

(1) 各试样同一横截面上的过水率变化范围很大、分布很不均匀,水在渗流过程中容易出现优势流道,且优势流道的分布呈随机无规律性。

(2) 受水力渗透固结的影响,土层不同横截面上的过水率和流道率也存在差异,靠近水体的土层的参数值最大,然后沿渗流方向呈递减趋势。

(3) 土层的过水率和流道率大小均受水力梯度和固结压力的共同影响,其中水力梯度使两者数值增加,固结压力则使两者数值减小,影响效应相反,但水力梯度的增长作用更显著。

参考文献:

- [1] MESRI G. Mechanisms controlling the permeability of clays[J]. *Clays and Clay Minerals*, 1971, **19**(3): 151 - 158.
- [2] NAGARAJ T S, PANDIAN N S, NARASHIMHA R P S R. Stress state-permeability relationships for fine-grained soils[J]. *Géotechnique*, 1993, **43**(2): 333 - 336.
- [3] 曾玲玲,洪振舜,陈福全. 压缩过程中重塑黏土渗透系数的变化规律[J]. *岩土力学*, 2012, **33**(5): 1286 - 1292. (ZENG Ling-ling, HONG Zhen-shun, CHEN Fu-quan. A law of change in permeability coefficient during compression of remolded clays[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, **33**(5): 1286 - 1292. (in Chinese))
- [4] 梁健伟,房莹光. 极细颗粒黏土渗流特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, **29**(6): 1222 - 1230. (LIANG Jian-wei, FANG Ying-guang. Experimental study of seepage characteristics of tiny-particle clay[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, **29**(6): 1222 - 1230. (in Chinese))
- [5] 宋林辉,黄强,闫迪,等. 水力梯度对黏土渗透性影响的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2018, **40**(9): 1635 - 1641. (SONG Lin-hui, HUANG Qiang, YAN Di, et al. Experimental study on effect of hydraulic gradient on permeability of clay[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, **40**(9): 1635 - 1641. (in Chinese))
- [6] 党发宁,刘海伟,王学武,等. 基于有效孔隙比的黏性土渗透系数经验公式研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, **34**(9): 1909 - 1917. (DANG Fa-ning, LIU Hai-wei, WANG Xue-wu, et al. Empirical formulas of permeability of clay based on effective pore ratio[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, **34**(9): 1909 - 1917. (in Chinese))
- [7] RENSHAW C E, DADAKIS J S, BROWN S R. Measuring fracture apertures: a comparison of methods[J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, **27**(2): 289 - 292.
- [8] 周健,姚志雄,张刚. 砂土渗流过程的细观数值模拟[J]. *岩土工程学报*, 2007, **29**(7): 977 - 981. (ZHOU Jian, YAO Zhi-xiong, ZHANG Gang. Mesomechanical simulation of seepage flow in sandy soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, **29**(7): 977 - 981. (in Chinese))
- [9] 孙强,刘盛东,姜春露,等. 砂岩地层渗流过程非饱和和厚度变化的地电测试[J]. *岩土工程学报*, 2013, **35**(7): 1350 - 1354. (SUN Qiang, LIU Sheng-dong, JIANG Chun-lu, et al. Electric response tests on unsaturated layer thickness in course of seepage of sandstone[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, **35**(7): 1350 - 1354. (in Chinese))
- [10] 程竹华,张佳宝,徐绍辉. 黄淮海平原三种土壤中优势流现象的试验研究[J]. *土壤学报*, 1999, **36**(2): 154 - 161. (CHENG Zhu-hua, ZHANG Jia-bao, XU Shao-hui. Experimental studies on preferential flow in three soils in hunag-Huai-Hai plain[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1999, **36**(2): 154 - 161. (in Chinese))
- [11] 刘目兴,杜文正. 山地土壤优先流路径的染色示踪研究[J]. *土壤学报*, 2013, **50**(5): 871 - 880. (LIU Mu-xing, DU Wen-zheng. To investigate soil preferential flow paths in mountain area using dye tracer[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, **50**(5): 871 - 880. (in Chinese))
- [12] BAI B, XU T, GUO Z G. An experimental and theoretical study of the seepage migration of suspended particles with different sizes[J]. *Hydrogeology Journal*, 2016, **24**(8): 2063 - 2078.
- [13] 张文杰,严宏罡,孙钺. 城市生活垃圾中优先流规律的穿透试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2018, **40**(7): 1316 - 1321. (ZHANG Wen-jie, YAN Hong-gang, SUN Cheng. Breakthrough tests on preferential flow in municipal solid waste[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, **40**(7): 1316 - 1321. (in Chinese))
- [14] BAI B, XU T, LI H W. The semi-analytical solution of particle transport in porous media induced by seepage[J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2017, **26**(10): 6286 - 6294.