

DOI: 10.11779/CJGE201906003

高岭-蒙脱混合黏土渗透各向异性的微观机理研究

周建^{1,2}, 徐杰^{1,2}, 余良贵^{1,2}, 罗凌晖^{1,2}

(1. 浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江省城市地下空间开发工程技术研究中心, 浙江 杭州 310058)

摘要: 为研究高岭-蒙脱混合黏土中膨润土掺入量及固结应力对渗透各向异性比的影响, 利用三轴渗透仪对高岭-蒙脱混合黏土展开一系列渗流试验, 并从微观结构的改变上进行机理解读, 研究发现: ①加入膨润土后, 渗透系数及渗透各向异性比明显减小, 但随着膨润土掺入量的增加, 渗透各向异性比趋于稳定, 原因是影响渗透各向异性比的有效孔隙权重比趋于不变, 导致渗透各向异性比不再发生明显改变; ②随着有效固结应力的增大, 混合黏土的渗透各向异性比不断增大。有效固结应力增大时, 有效孔隙面积比和有效孔隙权重比均在增加, 导致固结应力增大时渗透各向异性比增大; ③综合膨润土掺入量及固结应力对混合黏土渗透各向异性比的影响, 若从微观结构上定量分析, 建议采用有效孔隙权重比作为微观参数。

关键词: 混合黏土; 渗透各向异性; 固结应力; 微观结构; 有效孔隙面积比; 有效孔隙权重比

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)06-1005-09

作者简介: 周建(1970—), 女, 教授, 从事软黏土力学, 软土地基处理, 非饱和土本构模型等研究。E-mail: zjelim@zju.edu.cn。

Microscopic mechanism regarding permeability anisotropy of kaolin-montmorillonite mixed clays

ZHOU Jian^{1,2}, XU Jie^{1,2}, YU Liang-gui^{1,2}, LUO Ling-hui^{1,2}

(1. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Engineering Research Center of Urban Underground Development of Zhejiang Province, Hangzhou 310058, China)

Abstract: A series of experiments are conducted by using the triaxial permeameters to study the influences of the incorporation ratio of bentonite and the effective consolidation stress on permeability anisotropy, and the corresponding microscopic mechanisms are investigated. The results show that: (1) When the bentonite is added, the permeability coefficient and permeability anisotropy of the mixed soil decrease significantly, but with the increasing incorporation ratio of bentonite, the permeability anisotropy tends to be stable because the effective pore proportion ratio tends to remain constant. (2) With the increasing effective consolidation stress, the permeability anisotropy of the mixed soil increases. When the effective consolidation stress increases, both the effective pore area ratio and the effective pore proportion ratio increase, which indicates that the ratio of vertical to horizontal effective pore areas is increasing. (3) Considering the influences of the incorporation ratio of bentonite and the effective consolidation stress comprehensively, if intending to quantitatively analyze the impact of these two factors from the perspective of microscopic analysis, it is recommended to use the effective pore proportion ratio as the parameter of microstructure.

Key words: mixed clay; permeability anisotropy; consolidation stress; microstructure; effective pore area ratio; effective pore proportion ratio

0 引言

自然界中的黏土颗粒在地下浅层处是随机排列的, 随着埋深的增加, 黏土颗粒会发生颗粒的旋转, 颗粒走向更趋向于与固结应力加载方向垂直^[1], 而沉积过程中的颗粒走向决定了流体在垂直和水平方向上的渗径曲折程度是不同的^[2], 可以测定土体水平渗透系数 k_h 和垂直渗透系数 k_v , 将二者的比值定义为渗透

各向异性比 r_k , 用于表征软土渗透各向异性^[3-6]。Basak 等^[3]对重塑高岭土渗透系数及其各向异性的研究发现, 重塑高岭土 r_k 变化范围是 1~1.6; Tavens 等^[4]用

基金项目: 2016 国家重点研发计划项目 (2016YFC0800203); 国家自然科学基金重点项目 (51338009)

收稿日期: 2018-09-11

三轴渗透仪和固结仪分别测定原状软黏土的渗透各向异性比,测定结果前者为 1.03,后者为 1.10,各向异性并不明显;Leroueil 等^[5]研究 Louiseville 土的渗透各向异性比时发现,当土体应变小于 25%时,其渗透各向异性比为 1.35~1.55;Adams 等^[6]研究波士顿蓝黏土渗透各向异性比时发现,随着土体孔隙比逐渐减小, r_k 从 1.2 逐渐增大到 1.9。可见软黏土的渗透各向异性比普遍处于 1~1.9, r_k 波动范围较小,即使对于均质土, Kenney^[7]指出由于土颗粒多为扁平状颗粒,在阻碍水平向和竖直向水流运动时的作用也是不同的,也会表现出一定的渗透各向异性。

Witt 等^[8]指出导致黏土渗透各向异性的 3 个原因:宏观分层、微观分层、颗粒走向,对于宏观分层导致的各向异性很容易量化,但微观各向异性很难做到量化。Tabbaa 等^[9]对高岭土渗透各向异性的研究发现,渗透各向异性与液性指数存在非线性关系,且液性指数越小高岭土渗透各向异性越大。Adams 等^[6]研究波士顿蓝黏土渗透各向异性比时发现,随着土体孔隙比减小, r_k 逐渐增大,且渗透各向异性主要受土体孔隙率和颗粒定向排列影响。对于渗透各向异性发展规律的机理研究大多从微观结构上进行,例如 Adams 等^[6]在对波士顿蓝黏土渗透各向异性的研究中利用微观试验发现随着固结应力的增大,黏土微观颗粒走向逐渐趋向水平,以此来解释随着固结应力增大渗透各向异性增大的结论。Daigle 等^[10]通过定义黏土颗粒的“纵横比”,提出一个渗透各向异性模型,并提出固结应力越大黏土颗粒长轴方向越水平,导致渗透各向异性比越大。渗透各向异性的研究在油气输送管道设计、岩土勘察和隧道基坑沉降等工程中具有重要意义,随着对隧道等地下工程的渗漏沉降、孔压消散预测的准确性要求越来越高,只有考虑了刚度各向异性和渗透各向异性才能使得预测结果更为准确^[1,11-13]。故对软黏土渗透各向异性及其影响因素和机理展开系统研究有重大的工程意义。

已有研究表明,影响软土渗透系数的影响因素很多,包括孔隙特性、液体性质和黏土矿物种类等。由于高岭土的标准化及相对高的渗透性,高岭土作为一种可替代海洋黏土或其它种类的人造黏土的试验材料已被广泛应用在近海岩土工程的研究中,室内试验中高岭土常常与砂、淤泥或其他化学物混合来模拟获得原位海洋土^[14-15]。膨润土作为一种高压缩性黏土,界限含水率远高于高岭土,界限含水率是影响渗透系数的关键因素,膨润土渗透系数受固结应力、液体性质的影响程度也高于高岭土^[16-17],因此将膨润土作为研究对象更有利于揭示渗透系数及各向异性的影响机制。为研究高岭土中掺入膨润土后渗透特性的变化规

律及高岭-蒙脱混合黏土渗透特性受固结应力的影响规律,针对高岭土中膨润土掺入量、固结应力对渗透各向异性的影响展开讨论。

本文试验材料选用矿物均匀的高岭土和膨润土组成的混合黏土为研究对象,探讨膨润土掺入量不同时,混合黏土渗透各向异性的变化,并对混合黏土在不同固结应力下各向异性比的发展作了对比分析。在宏观渗透试验的基础上利用 SEM 扫描电镜对各组重塑黏土的微观结构进行研究,并尝试用微观参数对渗透各向异性比的变化规律进行机理解读。

1 试验方案

1.1 试样制备

本试验采用以高岭石矿物为主的高岭土和蒙脱石矿物为主的膨润土混合重塑制备的人工软黏土为研究对象。其中高岭土选自马来西亚高岭土,膨润土选自内蒙古赤峰市膨润土,两者对应的高岭石、蒙脱石矿物含量均在 95%以上。

高岭土与膨润土按照质量配比要求混合,并与超纯水按照 1:2 的质量比在搅拌器下充分搅拌均匀后,将泥浆倒入 180 mm×650 mm (直径×高度) 有机玻璃桶中,静置 24 h 后在气压固结仪下分三级加载至 95 kPa,每级加载时间为 48 h。制备完成后,重塑混合黏土含水率为 58%~60%,均匀性符合试验要求。将制备好的重塑混合黏土在切样器下沿着水平方向和竖直方向各切割出一个 140 mm×70 mm (高度×直径) 的圆柱体试样,并分别安装在 GDS 三轴渗透仪上进行渗流试验,用于测量该配比混合黏土的 k_h 和 k_v 。

1.2 试验过程

将制备好的重塑黏土试样安装在 GDS 三轴渗透仪上,并分试样饱和、固结、渗流的试验步完成整个渗流试验,每个加载步如下:

(1) 饱和阶段:在 100 kPa 的反压下饱和,设置围压值大于反压值 5 kPa 进行饱和。饱和阶段包括线性加载时间一般为 8~12 h,具体阶段完成以饱和度大于 0.98 为标准。

(2) 固结阶段:在有效固结应力为 100 kPa 下固结,直至每 3600 s 反压排水体积小于 100 mm³ 认为固结完成。

(3) 渗流阶段:按规范^[18]要求,将基准压力设计为 $100 + \Delta u / 2$ (kPa),反压设计为 $100 - \Delta u / 2$ (kPa),其中 Δu 为设计水力梯度下土体底部和顶部的压力差。本试验中水力梯度 i 取 10,渗流时间持续 48 h (根据试验进程渗透系数稳定情况,酌情缩短或增长渗流时间)。

1.3 试验方案

由于海洋黏土及城市地下黏土中蒙脱石矿物成分

一般在 25% 以下^[19-20], 为了分析不同膨润土掺入量对渗透各向异性比的影响, 设计膨润土 (B) 掺入量分别为 5%, 10%, 20% 的混合黏土, 并命名为 B5K95、B10K90、B20K80, 字母之后的数字代表质量百分比, 同时选用纯高岭土 (K) 作为对比试验, 设计试验方案如表 1 所示。

表 1 试验方案
Table 1 Test schemes

编号		固结压力/kPa
B5K95V1	B5K95H1	100
B5K95V2	B5K95H2	200
B5K95V3	B5K95H3	300
B20K80V1	B20K80H1	100
B20K80V2	B20K80H2	200
B20K80V3	B20K80H3	300
KV1	KH1	100
B10K90V1	B10K90H1	100

注: V 代表竖向渗透试验, 得到的渗透系数为垂直渗透系数 k_v ; H 代表水平向渗透试验, 得到的渗透系数为水平渗透系数 k_h ; V 和 H 之后的数字代表固结应力, 1 为 100 kPa 固结应力, 依此类推。

2 试验结果分析

2.1 液塑限及压缩性分析

本试验采用联合测限仪, 测得不同膨润土掺入量下混合黏土的液塑限结果如表 2 所示。

表 2 重塑混合黏土液塑限
Table 2 Atterberg limits of mixed clays

编号	塑限/%	液限/%
K	30.98	62.15
B5K95	35.16	65.85
B10K90	38.26	69.04
B20K80	42.70	78.98

由表 2 可以明显看到, 随着膨润土掺入量的增加, 混合黏土的液塑限不断增加。吉利明等^[21]通过对蒙脱石黏土结构的研究发现蒙脱石矿物的比表面积明显高于高岭石矿物黏土, 具有丰富的自由气体容纳空间, 这就为膨润土界限含水率高于高岭土提供了充分的条件。Horpibulsuk 等对泰国膨润土和高岭土的研究也发现^[14], 膨润土的液塑限 (分别为 211%, 36%) 远高于高岭土的液塑限 (分别为 46%, 24%)。

何俊等^[22]利用辽宁产的膨润土对武汉市垃圾场黏土进行改良时发现, 混合土的液塑限与膨润土的掺入量表现出正相关的关系, 现将其结果与本试验结果放在同一张图中进行对比, 如图 1 所示。可见本文试

样的液塑限与膨润土掺入量之间也是良好的线性相关关系, 一致说明了黏土矿物种类对液塑限的影响是线性的。

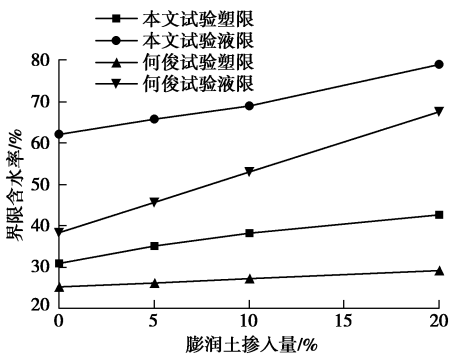


图 1 重塑混合黏土液塑限

Fig. 1 Atterberg limits of mixed clays

在固结阶段发现随着膨润土掺入量的增加, 固结阶段的排水体积不断增大, 以 KV, B5K95V, B10K90V, B20K80V 为例, 随着膨润土掺入量的增加, 100 kPa 下固结阶段排水体积从 $2 \times 10^4 \text{ mm}^3$ 增大到 $5.5 \times 10^4 \text{ mm}^3$, 如图 2 所示。这是因为膨润土在吸水过程中, 颗粒间距离会增大很多, 然后在固结应力作用下膨润土内的自由水流失, 颗粒间距离减小。所以随着膨润土掺入量的增加, 混合黏土固结阶段排水体积增大, 压缩性也会增强。

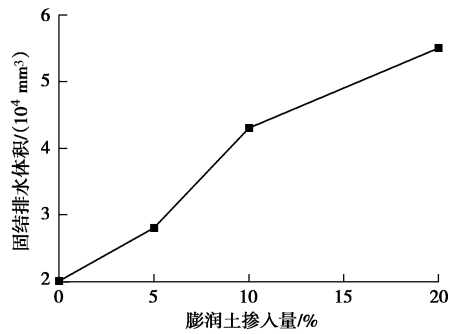


图 2 混合黏土固结排水体积 (100 kPa)

Fig. 2 Drainage volumes of mixed clays (100 kPa)

2.2 膨润土掺入量的影响

本文首先研究了膨润土掺入量对高岭-蒙脱混合黏土渗透各向异性的影响, 表 3 为不同重塑混合黏土竖向和水平向渗透系数试验结果。

图 3 为有效固结应力为 100 kPa 时, 不同膨润土掺入量下渗透系数及渗透各向异性比的变化图。可以发现, 随着膨润土掺入量的增加, 竖向和水平向渗透系数均呈现减小的趋势, 特别地, 与纯高岭土相比, 加入膨润土后的混合黏土渗透系数下降了 50%。Horpibulsuk 对泰国高岭土和膨润土的研究发现在

表 3 试验数据
Table 3 Test data

土样编号	固结压力/kPa	$k_h/(10^{-7}\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	$k_v/(10^{-7}\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	$r_k = k_h / k_v$
B5K95	100	10.39	8.35	1.244
	200	8.01	5.81	1.379
	300	6.19	4.41	1.400
B20K80	100	6.46	5.19	1.245
	200	4.17	3.04	1.372
	300	2.41	1.73	1.393
K	100	21.19	15.28	1.387
B10K90	100	8.97	7.15	1.255

相同的孔隙比条件下，膨润土的渗透系数比高岭土小 1-2 个数量级^[14]。陈永贵等^[23]研究内蒙古膨润土掺入量对湖南红黏土（以高岭石矿物为主）渗透系数的影响时也有类似的结论得出，当膨润土掺入量为 5% 时，混合土试样渗透系数降低了约 50%，并指出混合土的渗透系数随膨润土掺入量的增加而呈指数下降的趋势。其实对于常见的黏土矿物：高岭石、伊利石、蒙脱石微观结构和孔隙而言^[21]，相对于高岭土（高岭石黏土），膨润土（蒙脱石黏土）具有丰富的小于 50 纳米的微孔，而高岭土孔隙相对较大些，所以膨润土渗透系数小于高岭土。

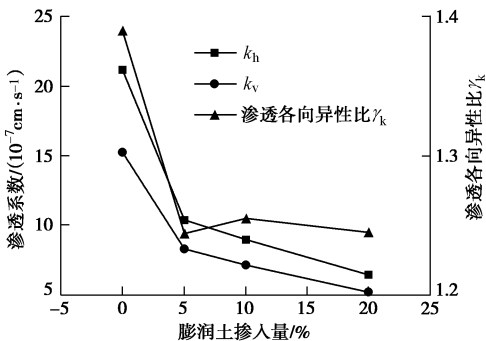


图 3 不同膨润土掺入量下 r_k 变化 (100 kPa)

Fig. 3 Variation of r_k of mixed clays with different bentonite incorporations

而渗透各向异性比随膨润土掺入量增加的变化趋势却与渗透系数的变化趋势有所不同。从图 3 中可以看出，掺入 5% 膨润土的混合黏土渗透各向异性比相对于纯高岭土明显变小，但随着膨润土的继续增加，混合黏土渗透各向异性比只发生轻微的波动，趋向于水平，但蒙脱石矿物孔隙小于高岭土并不能解释混合黏土渗透各向异性比随膨润土掺入量的增加存在先减小后不变的变化趋势，这部分的分析则应从微观结构角度进行解释，详见下文。

2.3 固结应力的影响

为研究固结应力对高岭-蒙脱混合黏土渗透各向异性比的影响，以 B5K95，B20K80 为例，混合黏土

渗透各向异性比随着固结应力的变化如图 4 所示。

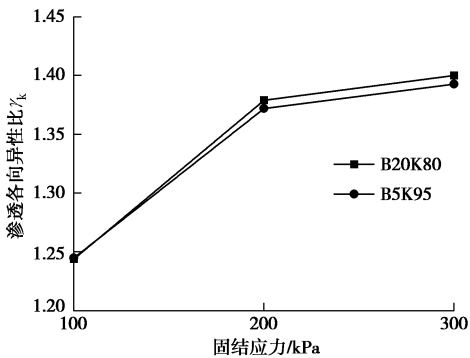


图 4 不同固结应力下渗透各向异性比 r_k 变化

Fig. 4 Variation of r_k of mixed clays with different pressures

从图 4 中可以看到随着固结应力的增大，渗透各向异性比不断增加。Yang 等^[24]指出泥岩的渗透各向异性比随着孔隙比减小（压缩）而增大。Lapierre 等^[25]对海洋原状黏土进行研究时发现随着有效应力增大，渗透各向异性比增加，原因是随着有效应力增大，颗粒长轴方向趋向于与加载方向垂直（旋转效应）。Adams 等^[6]研究了重塑波士顿蓝黏土的渗透各向异性比，发现各向异性比随孔隙比减小（有效应力增大）而增大，原因与 Lapierre 分析类似，特别地，Adams 指出应力增大时较大颗粒长轴方向的旋转效应更明显。Clennell 等^[26]对重塑高岭土和膨润土的渗透各向异性比进行了比较，发现两种重塑土的渗透各向异性比也都随固结应力增大而增大。

从图 4 中还可以发现，当固结应力超过 200 kPa 后，渗透各向异性比增幅减小。Adams 等^[6]在对波士顿蓝黏土渗透各向异性比的研究中发现随着有效固结应力增大，孔隙比从 0.97 减小到 0.58 后，渗透各向异性比达到最大值而不再继续增加。可见当固结应力增大到一定值时渗透各向异性比达到最大值，之后渗透各向异性比曲线会逐渐变得平缓。

3 微观结果分析

将渗流完成后的试样分别沿着水平向 H 剖面（即

k_v 渗流剖面)和竖向 V 剖面(即 k_h 渗流剖面)切削成 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ (高度 \times 长度 \times 宽度)的样品,并在浙江大学医学院 FEI Nova NanoSEM 450 超高分辨率扫描电子显微镜上进行微观电镜扫描,按照曹洋^[27]微观试验法,在电镜下放大 16000 倍进行微观扫描并拍摄质量高的扫描图像,并采用南京大学颗粒及裂隙定量分析系统(PCAS),对 SEM 扫描电镜图像进行定量分析。B20K80V 和 B20K80H 的微观结构照片如图 5 所示。图 5 (a)、(b) 分别为电镜扫描微观结果图,图 5 (c)、(d) 分别为经过二值化处理后的微观结构图,白色区域代表孔隙,黑色区域代表黏土颗粒。

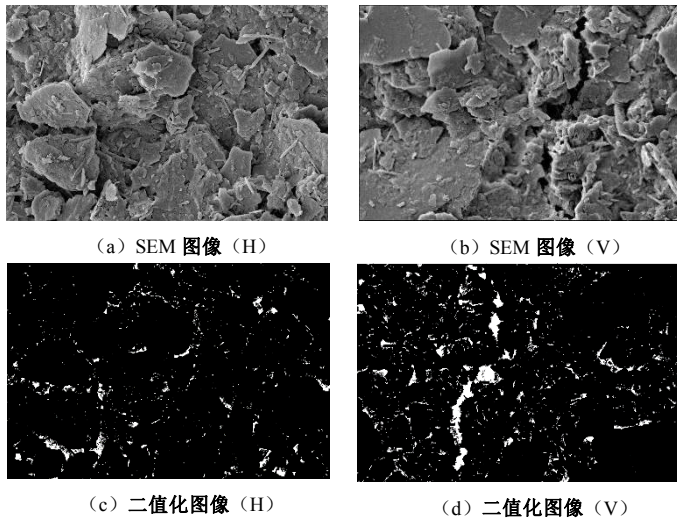


图 5 B20K80V 和 B20K80H 微观结构图

Fig. 5 Microstructures of B20K80V and B20K80H

3.1 微观参数定义

为了从微观角度分析渗透各向异性比变化的原因,下文主要从孔隙参数进行分析。

Adams 等^[6]和 Daigle 等^[10]研究渗透各向异性时定义颗粒长轴方向和颗粒结构纵横比,并研究了随着固结应力变化颗粒长轴方向的旋转特性,随着固结应力的增大,颗粒长轴方向更趋向于水平。但是由于高岭石和蒙脱石矿物均为扁平状结构,由图 5 (b) 发现混合黏土的微观颗粒并没有明显的长轴方向,且微观颗粒长轴方向的变化规律不明显,不能很好的反应渗透各向异性的变化。但从微观结构图 5 (a)、(b) 的对比可以明显看到两个渗流剖面上的孔隙面积存在差异,实际上,由 PCAS 系统所得到的两个相同面积的剖面上,孔隙面积分别为 42924, 53581 像素,可见 V 向剖面的孔隙明显多于 H 向剖面的孔隙。故本文从孔隙参数着手研究渗透各向异性变化的微观机理。

党发宁等^[28]将土颗粒外的弱结合水所占据的孔隙定义为无效孔隙,并采纳崔德山等^[29]指出的黏性土弱结合水膜厚度为 $0.12\text{ }\mu\text{m}$,计算出有效孔隙比,对饱和软黏土渗透系数经验公式进行修正。王秀艳等^[30]

从黏性土结合水类型出发研究了深层及浅层黏性土的渗透释水规律,发现浅层土渗透释水以非结合水(毛细水和重力水)为主,压力增大后深层黏性土渗透释水以弱结合水为主,而强结合水不会渗透释出,冯晓腊^[31]也曾指出随着应力增大土体中弱结合水会参与到渗流过程中,但强结合水呈类似固体状态不会参与流动,其中 $0.2\text{ }\mu\text{m}$ 是划分强弱结合水的孔径尺寸。

基于以上分析,本文采用崔德山关于黏性土弱结合水膜厚度为 $0.12\text{ }\mu\text{m}$ 的结论,并假设弱结合水呈半固体状态不参与渗流。如图 6 所示,只有当孔隙孔径大于 2 倍弱结合水膜厚度时,水才会在渗透力的作用下流经孔隙。此时的孔径才能称为有效孔隙孔径,即有效孔隙孔径取为 $0.24\text{ }\mu\text{m}$,将孔隙视为圆形时有效孔隙所对应的孔隙面积为 $0.045\text{ }\mu\text{m}^2$,以此为依据展开研究。

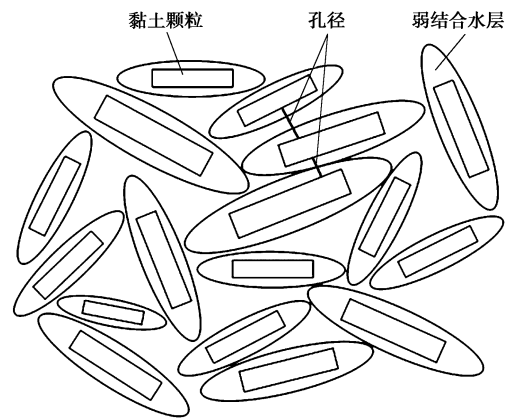


图 6 黏土颗粒表面弱结合水

Fig. 6 Adsorbed water layers of clay particles

类似于有效孔隙比的定义,本文将面积大于 $0.045\text{ }\mu\text{m}^2$ 的孔隙面积与总孔隙面积的比值定义为有效孔隙面积权重,用 η 表示,

$$\eta = S_0 / S \quad (1)$$

式中, η 为有效孔隙面积权重, S_0 指孔隙面积大于 $0.045\text{ }\mu\text{m}^2$ 的孔隙面积, S 为孔隙总面积。

Clenell^[26]指出孔隙大小是影响渗透系数及其各向异性发展的原因。本文为研究竖向和水平向两个渗流面上孔隙特性对渗透各向异性比的影响,将竖向剖面上有效孔隙面积与水平向剖面上有效孔隙面积之比定义为有效孔隙面积比,将竖向剖面上有效孔隙面积权重与水平向剖面上有效孔隙面积权重之比定义为有效孔隙权重比。计算公式如下:

$$\gamma_s = S_{0h} / S_{0v} \quad (2)$$

式中, γ_s 为有效孔隙面积比, S_{0h} 为竖向剖面上有效孔隙面积, S_{0v} 为水平向剖面上有效孔隙面积。

$$\gamma_\eta = \eta_h / \eta_v \quad (3)$$

式中, γ_η 为有效孔隙权重比, η_h 为竖向剖面上有效孔

表 4 微观试验数据（分辨率：59.3pixel/μm）
Table 4 Data of microscopic tests（Resolution: 59.3 pixel/μm）

土样编号	膨润土掺入量/%	有效孔隙面积 S_0 /pixel	孔隙总面积 S /pixel	有效孔隙面积权重 η	有效孔隙面积比 γ_s	有效孔隙面积权重比 γ_η	渗透各向异性比 γ_k
KV1	0	69904	93624	0.7466	1.43	1.120	1.390
KH1		99650	119341	0.835			
B5K95V1	5	41184	58371	0.7056	1.25	1.039	1.244
B5K95H1		51663	70506	0.7327			
B10K90V1	10	37877	52975	0.715	1.27	1.041	1.244
B10K90H1		48110	64636	0.7443			
B20K80V1	20	31860	42924	0.7422	1.3	1.043	1.245
B20K80H1		41492	53581	0.7744			
B5K95V3	5	23040	37287	0.6179	1.53	1.220	1.400
B5K95H3		35253	46736	0.7543			

隙面积权重， η_v 为水平向剖面上有效孔隙面积权重。
本文微观图片大小均为 1536 像素×1103 像素，通过电镜标尺转化后的实际尺寸为 25.9 μm×18.6 μm，其分辨率为 59.3 像素/μm。为方便处理，下文计算有效孔隙面积及总孔隙面积均以像素为孔隙尺寸单位，0.045 μm² 对应的像素尺寸为 159 像素。根据以上定义以及微观处理系统的统计数据可以得到不同配比的重塑黏土微观定量分析结果，如表 4 所示。

3.2 膨润土掺入量分析

由表 4 可知，以 K，B5K95，B10K90，B20K80 为例，高岭土的有效孔隙面积明显高于掺入膨润土的混合黏土，这是导致掺入膨润土的混合黏土渗透系数远远小于纯高岭土的重要原因。随着膨润土的少量加入，有效孔隙面积及孔隙总面积均明显下降，这也解释了前文所述加入膨润土后，混合黏土的渗透系数会明显下降，与吉利明等^[21]的分析一致。

将渗透各向异性比、有效孔隙面积比、有效孔隙权重比随膨润土掺入量的变化绘于图 7，可见有效孔隙面积比、有效孔隙权重比与渗透各向异性比之间的变化趋势很相似，而且有效孔隙权重比更能解释随着膨润土掺入量的增加，渗透各向异性比不再发生明显变化的曲线走势。

如图 7 所示，在 100 kPa 的固结应力下，纯高岭土的渗透各向异性比达到了 1.39，明显高于混合黏土的渗透各向异性比。纯高岭土的有效孔隙面积比及有效孔隙权重比在 4 种土样中最大，明显高于掺入膨润土的混合黏土，这就解释了纯高岭土渗透各向异性比最大的原因。随着膨润土的加入，竖向剖面与水平向剖面上有效孔隙面积的比值减小，同时两个方向的剖面上有效孔隙面积所占比例的比值也在减小，导致在相同固结压力下，含膨润土的混合黏土渗透各向异性

比小于纯高岭土试样。

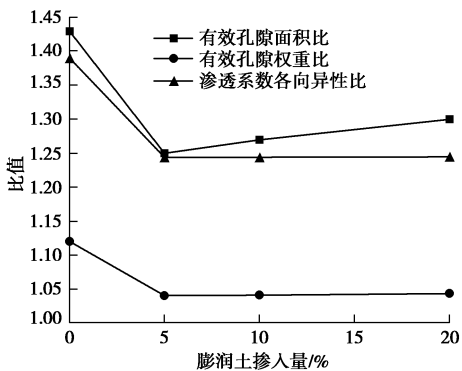


图 7 不同膨润土掺入量下 γ_s ， γ_η 与 γ_k 关系图

Fig. 7 Relationship among γ_s , γ_η and γ_k under different bentonite incorporations

由表 4 和图 7 可知，有效孔隙面积比在膨润土含量从 5% 提高到 20% 时出现了明显的增大，而渗透各向异性比曲线具有趋向水平的变化趋势。基于微观观测面的选取对试验结果有一定的影响，只考虑有效孔隙面积比，可能会出现同一剖面上不同观测面的孔隙数量会有一定的差异性。而分析更有代表性的有效孔隙权重比对渗透各向异性比的影响发现，有效孔隙权重比与渗透各向异性比有非常相近的变化趋势，随着膨润土掺入量的继续增加，有效孔隙权重比曲线趋于水平，与渗透各向异性比的变化规律一样。可见有效孔隙权重比的变化是高岭-蒙脱混合黏土渗透各向异性改变的根本原因。

综合以上分析，笔者认为在从微观角度定量分析渗透各向异性比时，应尽量采用有效孔隙权重比作为变量进行研究。

3.3 固结应力分析

为更加准确地研究 B5K95 在 100，300 kPa 有效固结应力下的孔隙变化，有必要研究孔隙面积随固结

应力的变化及渗透各向异性比与微观参数的关系, 分别见图 8, 9。

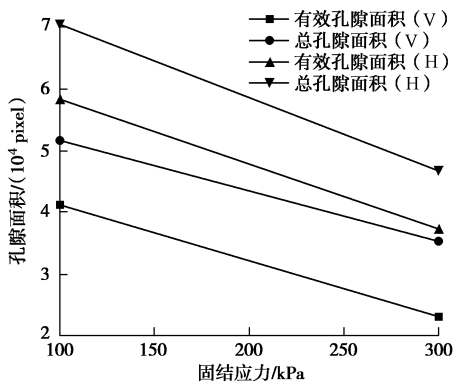


图 8 100, 300 kPa 下孔隙面积 (B5K95)

Fig. 8 Pore areas in 100 and 300 kPa

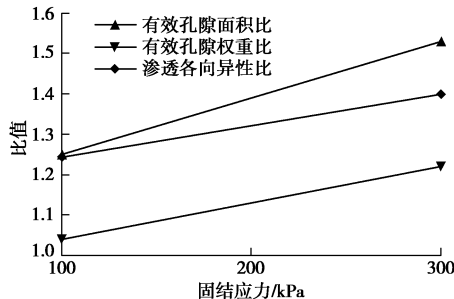


图 9 不同固结应力下 γ_s , γ_n 与 γ_k 关系图 (B5K95)

Fig. 9 Relationship among γ_s , γ_n and γ_k under different pressures

Tanaka 等^[32]对日本大阪和京都黏土的研究发现, 随着有效应力增大土体内孔隙体积变小, 同时大孔隙被破碎成小孔隙, 因此渗透系数会变小。曹洋^[27]在对杭州原状软黏土的微观研究中也发现, 随着固结应力的施加, 大孔隙含量明显减小。由图 8 可知, 随着固结应力的增加, 总孔隙面积和有效孔隙面积均有明显下降, 可见固结应力对渗透系数的影响是通过影响孔隙来实现的, 孔隙是决定渗透系数大小的关键因素, 孔隙面积的变化会引起渗透系数的明显变化。

从图 9 中可以看出, 有效孔隙面积比和有效孔隙权重比均能直观地反应渗透各向异性比随固结应力增大的趋势, 但有效孔隙权重比直线的斜率与渗透各向异性比直线的斜率更接近。这也与前文分析膨润土掺入量对渗透各向异性影响时得出的结论一致, 即有效孔隙权重比更能准确反应渗透各向异性比的变化规律。

结合表 4 可知, 随着固结应力的增大, 水平向剖面有效孔隙面积从 41184 降低到了 23040, 降幅接近一半达到了 44%, 而竖向剖面有效孔隙面积从 51663 降低到了 35253, 降幅为 32%, 可见水平向剖面孔隙受压力的影响程度较竖向剖面更大, 因此渗透各向异

性比随着固结应力的增大而增大。

4 结论及展望

本文在研究不同膨润土掺入量及固结应力对混合黏土渗透各向异性影响的基础上, 定义了有效孔隙面积比、有效孔隙权重比, 对渗透各向异性的影响机制进行了微观分析, 得到了如下结论:

(1) 掺入膨润土后, 渗透系数及渗透各向异性比明显减小, 随着膨润土掺入量的增加, 渗透各向异性比趋于稳定, 原因是控制渗透各向异性比的有效孔隙面积比和有效孔隙权重比在刚加入膨润土时有明显减小, 但随膨润土掺入量的继续增加, 有效孔隙权重比趋于不变。

(2) 随着有效固结应力增加, 混合黏土的渗透各向异性比不断增大。有效固结应力增大时, 有效孔隙面积比和有效孔隙权重比均在增加, 而且有效孔隙权重比直线的斜率与渗透各向异性比直线的斜率更接近。

(3) 综合考虑膨润土掺入量及有效固结应力对重塑混合黏土渗透各向异性比的影响, 若从微观结构上对其定量分析, 就有效孔隙面积比和有效孔隙权重比两个参数而言, 建议采用有效孔隙权重比作为微观结构参数。

由于本文所用土体均为扁平片状黏土颗粒, 没有明显的颗粒长轴方向, 且宏观上只考虑了孔隙比和液限孔隙比这两个参数对渗透各向异性的影响, 还不够全面。故今后开展渗透各向异性研究时可以考虑从以下两个方面进行改进:

a) 今后的研究可以选用针状的高岭石、蒙脱石矿物黏土, 或者选用颗粒较粗且呈块状的石英等原生矿物为主的黏土、黄土等进行渗透各向异性的试验, 在此基础上可以研究颗粒长轴方向随固结应力的变化情况, 完善渗透各向异性微观理论。

b) 在今后从宏观角度研究渗透各向异性的影响因素时, 可以考虑将土的结构性、沉积中的分选性、击实中含水量等因素作为研究对象。

参考文献:

- [1] MAIR R J. Tunnelling and geotechnics: new horizons[J]. Géotechnique, 2008, 58(9): 695 - 736.
- [2] AL-SHARRAD M A, GALLIPOLI D, WHEELER S J, et al. Experimental investigation of evolving anisotropy in unsaturated soils[J]. Géotechnique, 2017, 67(12): 1033 - 1049.
- [3] BASAK P. Soil structure and its effects on hydraulic

- conductivity[J]. *Soil Science*, 1972, **114**(6): 417 – 422.
- [4] TAVENAS F, JEAN P, LEBLOND P, et al. The permeability of natural soft clays, Part II: Permeability character[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1983, **20**(4): 645 – 660.
- [5] LEROUEIL S, BOUCLIN G, TAVENAS F, et al. Permeability anisotropy of natural clays as a function of strain[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1990, **27**(5): 568 – 579.
- [6] ADAMS A L, NORDQUIST M T J, GERMAINE J T, et al. Permeability anisotropy and resistivity anisotropy of mechanically compressed mudrocks[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2016, **53**(9): 1474 – 1482.
- [7] KENNEY T C. Permeability ratio of repeatedly layered soils [J]. *Géotechnique*, 1963, **13**(4): 325 – 333.
- [8] K-J-Witt J Brauns. Permeability-anisotropy due to particle shape[J]. *Geotech Engrg*, 1983, **109**: 1181 – 1187.
- [9] AL-TABBAA, WOOD D M. Some measurements of the permeability of kaolin[J]. *Géotechnique*, 1987, **37**: 499 – 503.
- [10] DAIGLE H, DUGAN B. Permeability anisotropy and fabric development: A mechanistic explanation[J]. *Water Resour Res*, 2011, **47**: W12517.
- [11] 柯瀚, 吴小雯, 张俊, 等. 基于优势流及各向异性随土覆压力变化的填埋体饱和渗流模型[J]. *岩土工程学报*, 2016, **38**(11): 1957 – 1964. (KE Han, WU Xiao-wen, ZHANG Jun, et al. Modeling saturated permeability of municipal solid waste based on compression change of its preferential flow and anisotropy[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, **38**(11): 1957 – 1964. (in Chinese))
- [12] ZHANG D M, MA L X, ZHANG J, et al. Ground and tunnel responses induced by partial leakage in saturated clay with anisotropic permeability[J]. *Engineering Geology*, 2015, **189**: 104 – 115.
- [13] WONGSAROJ J, SOGA K, MAIR R J. Modelling of long-term ground response to tunnelling under St James' Park, London[J]. *Géotechnique*, 2007, **57**(1): 75 – 90.
- [14] 王宝峰. 孔隙溶液环境对黏土力学特性影响的试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017. (WANG Bao-feng. Experimental study on influence of pore solution environment on mechanical properties of clay[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017. (in Chinese))
- [15] ZAKERI A, CLUKEY E C, KEBADZE E B, et al. Fatigue analysis of offshore well conductors, Part I: Study overview and evaluation of Series 1 centrifuge tests in normally consolidated to lightly over-consolidated kaolin clay[J]. *Applied Ocean Research*, 2016, **57**: 78–95.
- [16] MESRI and Olson. Mechanisms controlling the permeability of clays[J]. *Clays and Clay Minerals*, 1971, **19**: 151 – 158.
- [17] HORPIBULSUK S, YANGSUKKASEAM N, CHINKULKIJNIWAT A, et al. Compressibility and permeability of Bangkok clay compared with kaolinite and bentonite[J]. *Applied Clay Science*, 2011, **52**(1/2): 150 – 159.
- [18] ASTM D 5084—03 Standard test methods for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter[S]. 2003.
- [19] 赵铁军, 姜福香. 海底隧道工程耐久性技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2010. (ZHAO Tie-jun, JIANG Fu-xiang. Submarine tunnel engineering durability technology[M]. Beijing: China Communications Press, 2010. (in Chinese))
- [20] 李国刚. 中国近海表层沉积物中黏土矿物的组成、分布及其地质意义[J]. *海洋学报(中文版)*, 1990(4): 470 – 479. (LI Guo-gang. Composition, distribution and geological significance of clay minerals in surface sediments from china offshore[J]. *Journal of Oceanography*, 1990(4): 470 – 479. (in Chinese))
- [21] 吉利明, 邱军利, 夏燕青, 等. 常见黏土矿物电镜扫描微孔隙特征与甲烷吸附性[J]. *石油学报*, 2012, **33**(2): 249 – 256. (JI Li-ming, QIU Jun-li, XIA Yan-qing, et al. Micro-pore characteristics and methane absorption properties of common clay minerals by electron microscope scanning[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, **33**(2): 249 – 256. (in Chinese))
- [22] 何俊, 王宇, 万娟. 溶液作用下黏土的界限含水率及渗透试验[J]. *地下空间与工程学报*, 2013, **9**(6): 1277 – 1282. (HE Jun, WANG Yu, WAN Juan. Consistency limits and hydraulic conductivity of clay under the effect of solution[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2013, **9**(6): 1277 – 1282. (in Chinese))
- [23] 陈永贵, 雷宏楠, 贺勇, 等. 膨润土-红黏土混合土对NaCl溶液的渗透试验研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2018, **49**(4): 910 – 915. (CHEN Yong-gui, LEI Hong-nan, HE Yong, et al. Experimental study of permeability of bentonite-laterite mixtures for salt solutions[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2018, **49**(4): 910 – 915. (in Chinese))
- [24] YANG Y, APLIN A. Permeability and petrophysical properties of 30 natural mudstones[J]. *J Geophys Res*, 2007, **112**: B03206.
- [25] CLEMENITA LAPIERRE. Mercury intrusion and permeability of Louiseville clay[J]. *Can Geotech J*, 1990, **27**: 761 – 773.
- [26] CLENNELL M B, DEWHURST D N, BROWN K M, et al. Permeability anisotropy of consolidated clays[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1999(158): 79 – 96.
- [27] 曹洋. 波浪作用下原状软黏土动力特性与微观结构关

- 系试验研究[D].杭州:浙江大学,2013.(CAO Yang. Experimental study on relationship between dynamic characteristics and microstructure of undisturbed soft clay under wave action[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese))
- [28] 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))
- [29] 崔德山, 项伟, 曹李靖, 等. ISS 减小红色黏土结合水膜的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(6): 944 - 949. (CUI De-shan, XIANG Wei, CAO Li-jing, et al. Experimental study on reducing thickness of adsorbed water layer for red clay particles treated by ionic soil stabilizer[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(6): 944 - 949. (in Chinese))
- [30] 王秀艳, 刘长礼. 深层黏性土渗透释水规律的探讨[J]. 岩土工程学报, 2003, **25**(3): 308 - 312. (WANG Xiu-yan, LIU Chang-li. Discussion on permeability of deep clayey soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, **25**(3): 308 - 312. (in Chinese))
- [31] 冯晓腊, 沈孝宇. 饱和黏性土的渗透固结特性及其微观机制的研究[J]. 水文地质工程地质, 1991(1): 6 - 12. (FENG Xiao-la, SHEN Xiao-yu. Study on the infiltration and consolidation characteristics of saturated clay and its microscopic mechanism[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1991(1): 6 - 12. (in Chinese))
- [32] TANAKA. Poer size distribution of clayey soils measured by mercury intrusion porosimetry and its relation to hydraulic conductivity[J]. Soils and Foundations, **43**(6): 63 - 73.

中国土木工程学会第十三届全国土力学及岩土工程学术大会

(第二号通知)

2019年7月18日-21日, 中国 天津

主办单位: 中国土木工程学会土力学及岩土工程分会。

承办单位: 天津大学; 天津市土木工程学会; 天津市建筑学会岩土力学与地下工程专业委员会。

会议主题: 几十年来的工程建设给我国岩土工程的发展带来了巨大的机遇, 也使岩土工作者积累了丰富的经验。然而, 人类已经认识到, 可持续发展是当前面临的重大问题, 因此提升岩土工程品质与实现可持续发展成为广大岩土工作者的使命, 也是我国由岩土工程大国发展为岩土工程强国的必由之路。在此岩土工程发展的历史机遇期, 我国岩土工作者将于2019年7月齐聚天津, 共同研讨我国岩土工程成就和问题, 共同展望中国岩土工程的发展与未来, 形成2019天津共识。

四年一度的中国土木工程学会全国土力学及岩土工程学术大会是我国岩土工程领域历史最为悠久、影响最为深远的学术会议。因此, 第十三届全国土力学及岩土工程学术大会将以“岩土工程品质提升与可持续发展”为主题, 对我国近年来土力学与岩土工程领域最新研究进展进行广泛的学术交流, 具体包括以下12个方面内容: ①岩土的基本性质与本构关系; ②岩土工程勘察、测试与评价技术; ③基础工程与地基处理; ④地下工程及深基坑工程; ⑤岩土工程数值仿真与信息化技术; ⑥土动力学与岩土地震工程; ⑦特殊土与边坡工程; ⑧环境岩土工程与土工加筋; ⑨岩土工程中的新技术与新材料; ⑩地质灾害预警与防治; ⑪重大岩土工程实录; ⑫岩土工程机械设备与施工技术。

会议日程与地点: 7月18日会议注册及部分专业委员会会议; 7月19日开幕式、大会报告及理事会议; 7月20日专题论坛、分会场报告及部分专业委员会会议; 7月21日专题论坛大会报告、分会场报告、闭幕式。地点: 天津市西青区知景道198号, 距天津南站1.2 km, 天津社会山国际会议中心。

会议展览: 会议期间举办岩土工程仪器设备、机械与施工技术展览, 主要包括岩土工程仪器、设备、机械、新材料、软件等, 并设立专场技术研讨会。热忱欢迎从事岩土工程领域新材料、新技术、新设备的研发、生产和应用单位踊跃参加技术展览。

会议注册: (1) 网上注册地址: www.cnscsmge2019.cn; 2019年4月30日前: 正式代表1500元/人; 学生代表1000元/人, 陪同人员1000元/人; 2019年6月15日前: 正式代表1700元/人, 学生代表1200元/人, 陪同人员1000元/人; (2) 现场注册1800元/人; (3) 退款说明: 2019年5月15日之前取消退全款, 5月31日之前取消50%退款, 6月1日及之后取消不予退款; (4) 减免注册费: ①顾问委员会委员、院士、国际论坛外籍专家免注册费; ②国际土力学及岩土工程学会个人会员优惠100元/人。

联系方式: 雷华阳13512418728; 刘畅13821202109; 程雪松13821807355; 张雪莲13011392385; 地址: 天津市津南区海河教育园雅观路135号天津大学北洋园校区; 第43教学楼建工学院土木工程系(300350); E-mail: cismge2019@163.com; 电话: 022-27400843; 会议网址: www.cnscsmge2019.cn。

(中国土木工程学会土力学及岩土工程分会秘书处 供稿)