

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230104004

水-力作用下黏土孔隙结构演化规律研究进展*

牛庚^{1,2}, 郭晓霞³, 陈凡秀¹, 孔亮¹, 卢有谦⁴, 李凯¹

(1. 青岛理工大学理学院, 山东 青岛 266520; 2. 青岛理工大学海洋环境混凝土技术教育部工程研究中心, 山东 青岛 266520; 3. 大连理工大学运载工程与力学学部, 辽宁 大连 116024; 4. 广西交投集团有限公司, 广西南宁, 530007)

摘要:黏土的微结构直接决定宏观水-力学特性,然而现阶段绝大多数模型都是基于宏观参数所建立,由于缺乏微观机制的支撑,已经难以满足科研和工程需求。因此开展孔隙结构演化研究可以加深在非饱和土复杂水-力学特性的认识。在详细阐述黏土的孔径分布特征及双孔模型的基础上,全面回顾和总结了近年来水-力作用下黏土孔隙结构演化规律的研究成果与最新进展,并进行了相关讨论。结果表明:考虑颗粒集聚体的双孔模型(集聚体间孔隙与集聚体内孔隙)可以更好地解释黏土复杂的水-力学特性。水-力作用对黏土孔隙结构的影响机制不同,根据文献试验数据和理论分析初步总结出水-力作用下土孔隙结构的演化规律。外力荷载只显著影响集聚体间孔隙,对集聚体内孔隙基本不影响;含水率变化会改变土颗粒相对位置,继而影响这两类孔隙结构,但是土水相互作用复杂,导致含水率变化对土孔隙结构影响机制仍不清晰,并且没有统一认识。鉴于此,在研究土水相互作用对微观孔隙影响时应充分考虑物理-化学作用,并构建微观孔隙结构演化与宏观变形的定量关系,这也是今后需要深入研究的方向。

关键词:黏土; 孔隙结构; 演化规律; 水-力作用; 研究进展

中图分类号: TU451 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)04-0905-12

Research Progress on Evolution Law of Clay Pore Structure under Hydro-mechanical Effect

NIU Geng^{1,2}, GUO Xiaoxia³, CHEN Fanxiu¹, KONG Liang¹, LU Youqian⁴, LI Kai¹

(1. School of Science, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China; 2. Engineering Center of the Ministry of Education of Concrete Technology for Marine Environment, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China; 3. Faculty of Vehicle Engineering and Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116085, China; 4. Guangxi Transportation Science and Technology Group Co., Ltd., Nanning 530007, China)

Abstract: Macroscopic hydro-mechanical properties of clay are directly determined by the microstructure. However, at present, most of the models are established based on macro-parameters, which are difficult to meet the needs of scientific research and engineering due to the lack of micro-mechanisms support. The study of pore structure evolution can deepen the understanding of the complex hydro-mechanical properties of unsaturated soil. Based on the detailed description of pore size distribution characteristics and the dual pore model of clay, the research results and latest progress of pore structure

* 收稿日期:2023-01-04;修回日期:2023-03-24

基金项目:国家自然科学基金项目(12172187, 12072170)、岩土力学与工程国家重点实验室开放基金课题(SKLG-ME021019)资助

作者简介:牛庚(1991—),男,讲师,博士,硕导。主要从事非饱和土力学研究。E-mail:niugeng@qut.edu.cn

通讯作者:孔亮(1969—),男,教授,博士,博导。主要从事岩土工程方面的研究。E-mail:qdkongliang@163.com

evolution law of clay under hydro-mechanical action in recent years are comprehensively reviewed and summarized, and relevant discussions are carried out. The results show that the dual pore model (inter-aggregate pores and intra-aggregate pores) considering particle aggregates can better explain the complex hydro-mechanical properties of clay. Under the hydro-mechanical action, the evolution laws of the pore structure are different. Based on test data and theoretical analysis in literature, the evolution laws of pore structure under hydro-mechanical effect are preliminarily summarized. External loading only significantly affects inter-aggregate pore space, and basically has no effect on intra-aggregate pore space. Changes in water content will alter the relative position of soil particles, which then affects the two types of pore structure, but the complexity of soil-water interactions leads to unclear mechanisms and a lack of unified understanding of the impact of moisture content changes on soil pore structures. In view of the above, the physical-chemical interaction should be fully considered when studying the effect of soil-water interaction on micro-pores, and the quantitative relationship between the evolution of micro-pore structure and macro-deformation should be established, which is also the direction for further research in the future.

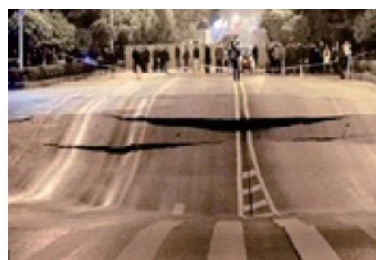
Keywords: clay; pore structure; evolution law; hydro-mechanical effect; research progress

0 引言

随着“交通强国”战略工程的深入实施,大规模的水利、高速公路、铁路、城市交通管网等基础设施工程的建设加速推进,很多工程都要涉及到双孔隙结构的非饱和土,如公路与铁路路基的填土、土填的填料以及宽级配的残积土等。这类土体粒径级配宽、内部大小孔隙并存,其孔隙结构为双峰孔径分布,导致水-力学性能复杂。这类土的岩土工程问题频发,如图1所示,降雨入渗、蒸发干燥和周围外部荷载的交互作用是触发双孔隙结构非饱和土变形失稳的主要因素。

土在不同饱和度下具有不同的孔隙结构和孔隙水的贮存状态,这会造成土的一些宏观水-力特性的差异,比如强度、持水特性和变形特性等,因此研究微观孔隙结构和土中水的贮存状态是研究非饱和土水-力特性的关键^[1]。研究土体的水-力学性质不应忽略微观结构的影响^[2-3],但是现阶段绝大多数模型都是基于宏观参数所建立,由于缺乏微观机制的支撑,已经难以满足科研和工程需求。实际上土的微观结构对土的水-力学特性起着决定性作用,土的力学性质都可以理解为微观结构的宏观表现,因此,进一步加深对土的水-力特性认识,有必要对土的微观结构进行更深一步的研究^[4]。

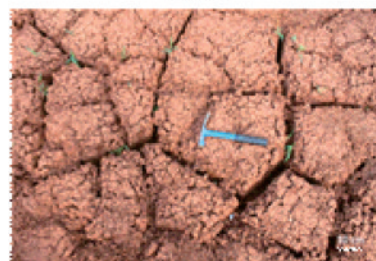
目前测试土中微观结构的试验方法很多,比如显微镜、电子扫描电镜等可以直接观测到土中的微



(a) 地表沉降



(b) 滑坡



(c) 收缩开裂

图1 工程地质灾害

Fig.1 Engineering geological hazards

观结构(如颗粒的大小、排列顺序和孔隙等性质)^[5]。还有像CT等技术利用二次处理可以间接观测到断面的孔隙结构^[6];核磁共振技术可以通过测定土中



(a) 压汞仪



(b) 电镜扫描仪



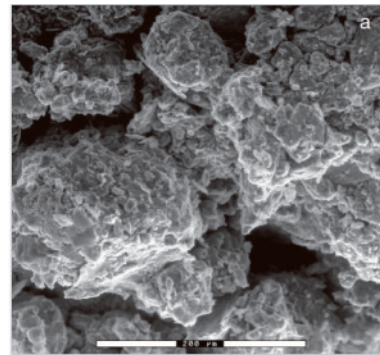
(c) 核磁共振仪

图2 常见微观结构观测仪器

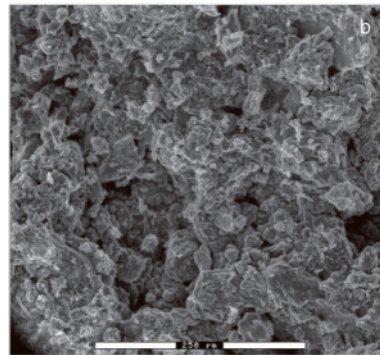
Fig.2 Common measurement instruments of microstructure

水(氢键)的含量间接量测土孔隙的分布^[7],该方法可以实现试样无损伤测试。压汞仪可以测定材料的孔径分布,因为测量孔径的范围比较广,而且试样处理比较简单,所以是测定土中孔隙分布最常用的方法^[8-9]。

土孔隙的孔径分布是联系土的宏观力学和微观力学最主要的物理量,土的持水、渗透、强度和变形等特性都与土中的孔径分布密切相关^[10-12]。目前,划分土中孔隙的方法有很多,如双孔模型^[13-14]、三孔模型^[15]和四孔模型^[16]等,但是广泛接受和常用的是双孔模型。可以肯定的是,利用双孔模型在一



(a) $\epsilon=0.82$



(b) $\epsilon=0.55$

图3 不同干密度下的SEM图像^[3]

Fig.3 SEM images at different dry densities^[3]

定程度内可以提高非饱和土本构模型的准确性,并能解释一些使用单孔模型不能解释的现象^[1,10-11]。虽然大量双孔模型被提出,但是每个学者对模型中两个孔隙结构的认识和定义不同,而且这两个孔隙结构受水-力作用的反应机理也是不一样的。目前,水(含水量变化)-力(荷载)对土中孔隙结构的作用机理还不是特别清晰,有必要对水-力作用下土孔隙的演化规律开展试验和理论研究,为解释和描述非饱和土的水-力特性奠定基础。

非饱和土的水-力作用会引起土中孔隙结构的变化,反之,土中孔隙结构的变化也会改变非饱和土的水-力特性。近几十年,关于非饱和土水-力特性和孔隙结构之间的耦合作用得到很多学者的关注,这也是建立非饱和土宏微观力学之间联系的基础。但是,目前水-力作用与孔隙结构的耦合作用还存在很多争议,仍然需要试验进一步证明和合理科学理论解释。在详细阐述黏土的孔径分布特征及双孔模型的基础上,全面回顾和总结了近年来水-力作用下黏土孔隙结构演化规律的研究成果与最新进展,并进行了相关讨论,为后续基于微观孔隙结构建立水-力学模型提供思路和建议。

1 土的孔径分布及双孔模型

土的微观结构是影响天然和压实土工材料力学行为的重要因素^[17]。事实上,土的微观研究进展与测试技术的提高息息相关。在土力学的萌芽期(1773~1923年),对于土中微观结构的认识还是人们对土颗粒排列的遐想与假设;随后光学显微镜和电子显微镜的出现并被应用到土力学,土的一些真实微观结构才被观测到;再到压汞仪和扫描电镜的出现,人们对土的微观结构的认识进一步加深;近年来CT扫描和核磁共振技术的出现,使无损测试土微观结构成为现实,相关土的微观结构观测仪器如图2所示。与此同时,计算机图像处理技术的不断提升,使测量土中微观孔隙结构的精度进一步提高^[5]。

土的微观结构是一种动态特性,它可以随着应力和水力条件的变化而变化^[18-23]。微观结构研究的进展有助于加深对土性的理解,探究土中不同结构层次之间的多尺度相互作用,并改进本构模型^[1,11,13,24-26]。微观结构演化可以通过直接或间接地测量。近几十年以来,压汞法、核磁共振法、CT法、扫描电镜法和氮吸附法等被用来直接观测土的微观结构。间接法是通过土中的力学特性或持水特性等来反映土中的孔隙结构。对于直接测量方法中,最流行的是压汞法和扫描电镜法。压汞法是利用非浸润液体汞在外力作用下进入土孔隙的量来反映土孔隙的分布情况。压汞法已被广泛用于测试各种多孔介质材料的微观结构,并可以定量提供材料内部的孔径分布^[27-29]。这些孔隙大小分布可以大大提高对土的宏微观力学特性和工程特性的认识。

土壤中的集聚体或通常被描述为部分土颗粒堆积起来的集合体,具有可压缩性,会对土的强度、变形和渗透等特性产生影响。在早期的研究中,以单个颗粒(微观上)作为对象研究土的力学行为占据主导思想。但是后来研究发现考虑颗粒聚集体的分析方法可以更好地解释土中一些力学行为。H.W.Olsen^[30]对比了试验得到的饱和土的渗透性与由达西定律计算的数值,验证了“毛细管簇”模型的可行性。同时也发现孔隙中的水优先从集聚体间孔隙流动。“毛细管簇”模型为模拟双孔隙结构土的渗透特性和溶质迁移提供了一个基础。K.Collins

等^[31]通过扫描电镜观察黏土发现,几乎没有单独颗粒存在于土体中,绝大部分土颗粒都是堆积在一起以集聚体的形式存在,Romero的试验也有类似的结论,如图3所示。S.Diamond^[32]在研究黏土的孔隙分布时提出了双孔结构的概念,即集聚体间孔隙(宏观大孔隙)和集聚体内孔隙(微观小孔隙)。R.Pusch^[33]研究了压实膨胀土的孔隙结构,并利用双孔结构概念解释了膨润土渗透性较低的原因。但是非饱和土作为多孔多相的集散材料,其力学行为是非常复杂的,因为它是由黏土颗粒间的体积变化(微观结构水平)和土骨架的重新排列(宏观结构水平)之间共同作用的结果^[34]。微观结构层面是黏土颗粒表面发生的物理-化学现象。一般认为微小孔的变化可以影响宏观大孔,但是宏观大孔重新排列不会影响微观小孔^[1,13]。

微观结构性是导致压实土和重塑土力学性质不同的根本原因。然而事实上,压实土和重塑土之间的界限从微观结构上并不是很明确。很多研究发现,当压样含水量在最优含水量的干侧会使土样呈现双峰孔隙结构。但是这也不是绝对的,孔隙结构不仅受压样含水量的影响,还受到土样密实度的影响^[3]。如果试样的干密度很大,即使压样含水量在最优含水量的干侧,也不一定会形成双峰孔隙结构。而且对双峰孔隙结构的土样再进行恒体积增湿,土的孔隙结构又会变成单峰孔隙结构或者有单峰孔隙结构的变化趋势,然而也有个别的试验结果显示增湿过后土样仍呈现双峰结构。

另一方面,如果压样含水量在最优含水量的湿侧,土样的孔隙则会相对比较均一,呈现单峰孔隙结构^[3]。相反地,也有试验结果显示压样含水量在最优含水量的湿侧也会出现双峰孔隙结构^[35],这应该也是受土样密度影响的结果。如果试样的密实度比较紧密,压样的含水量也在最优含水量的湿侧,基本上会呈现单峰孔隙结构,但是如果试样的密度比较松散,则土的孔隙结构可能不会出现单峰。这种相互矛盾的试验结果使构建孔隙结构演化模型的发展历程变得复杂和困难,因此有必要对微观孔隙作进一步试验和理论分析^[36]。

土中的孔隙结构可以用图4(a)所示的模型图来表示,集聚体间孔隙、集聚体内孔隙和晶层间孔隙,晶层间孔隙一般在水化作用明显的蒙脱石内作用明显。而在描述本构关系时,常将其简化为由宏观孔隙(集合体间孔隙)和微观孔隙(集

合体内孔隙)构成的双孔结构,如图4(b)和(c)所示。

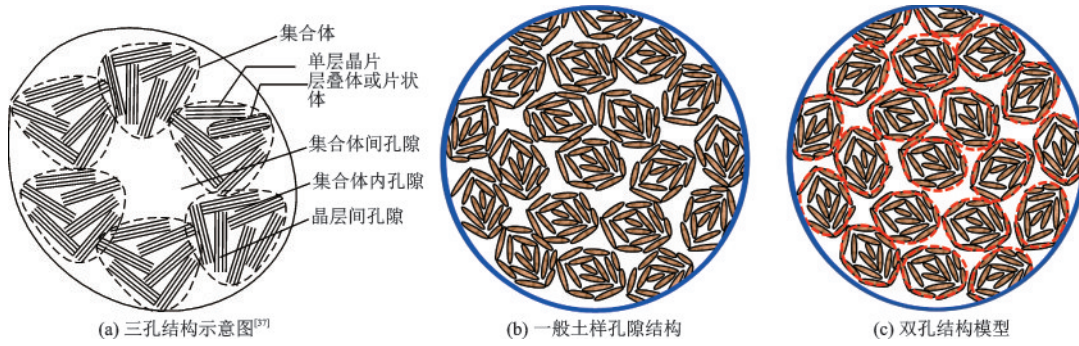


图4 土样孔隙结构模型概念图

Fig.4 Conceptual diagram of pore structure model for soils

2 外力荷载作用下黏土孔隙演化规律

I.Garcia-Bengochea等^[38]对压实粉质黏土进行压汞试验,观察到这些材料是双峰孔隙结构。他们也发现压实应力变化只影响土的大孔隙的体积,同时也指出土的渗透特性主要受土中大孔隙的影响。P.Delage等^[39]结合电镜扫描和压汞试验的结果描述了原状土和重塑土的孔隙结构。他们发现有两种孔隙结构,集聚体间孔隙和集聚体内孔隙,会存在于重塑土中。他们还指出,黏土的固结过程会导致

其集聚体间孔隙的坍塌,但是集聚体内的孔隙几乎完好无损。谈云志等^[40]利用压汞仪研究了红黏土在压实过程中孔径分布的演化规律,发现压实过程大孔隙会大量减少,小孔隙基本上不受影响。

目前,已经有大量学者研究了在常含水量或常吸力下,荷载对土孔隙结构的影响^[10,21-22,26,35,41-42]。图5表示文献中报道的四种不同的土在不同荷载(压实)下孔隙结构的演化规律。从图5中可以看出,它们都有一个相同的结论,即荷载(压实)只会影响土中的集聚体间孔隙(大孔),而对集聚体内孔隙(小孔)基本上不会影响。但是有时随着荷载的

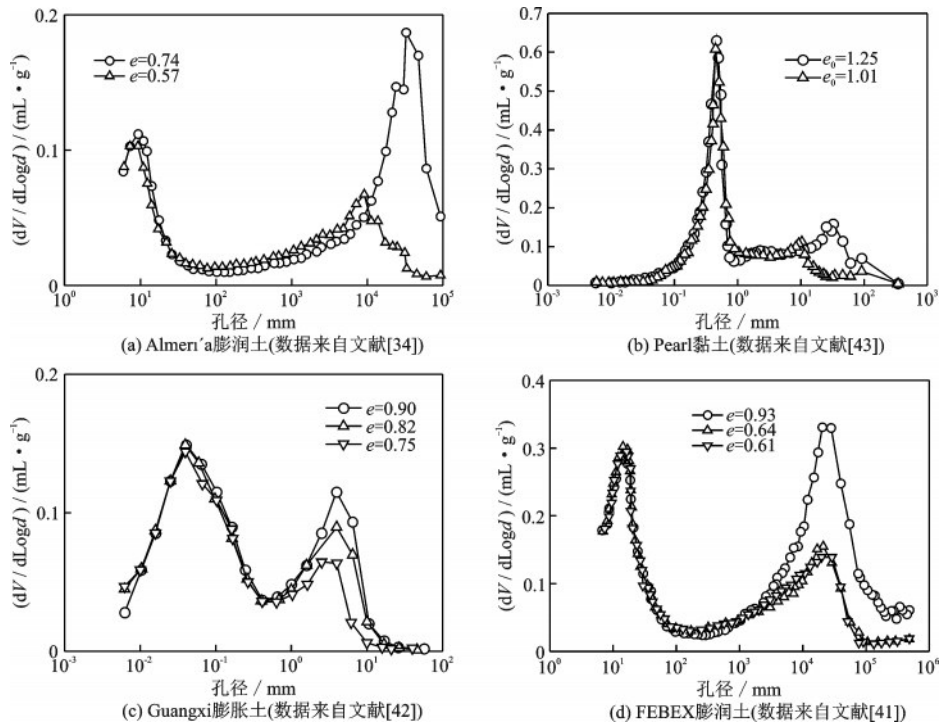


图5 外力荷载作用下土样孔径分布

Fig.5 Pore size distributions of soils under external loads

作用,土中的小孔也会有轻微的增加,一个可能的解释是土中的大孔被压缩成较小的孔,而造成小孔数量有轻微的增加。

根据这些试验研究以及一些学者的理论,提出土样在荷载作用下孔隙结构的演化规律的概念图,如图6所示。一般地,在最优含水量的干侧进行压样,会呈现双峰孔隙结构,如图6(a)所示;再在一定的荷载下对试样进行压缩,稳定后试样的孔隙结构会如图6(b)所示,试样的小孔基本上不受影响,只

是试样的大孔或者集聚体间孔隙被压缩;如果再对试样施加更大的荷载,集聚体间孔隙会进一步被压缩,但是集聚体内部或者颗粒之间的孔隙还是基本上不变化,如图6(c)。综上所述,可以得到应力作用下的孔隙结构演化规律,即单纯应力(荷载)作用下,完全可以认为只会对土中集聚体间孔隙造成影响,而土中集聚体内孔隙不会受到影响,这一结论与很多学者的结论是一致的,而且这一结论也被广泛地接受和应用。

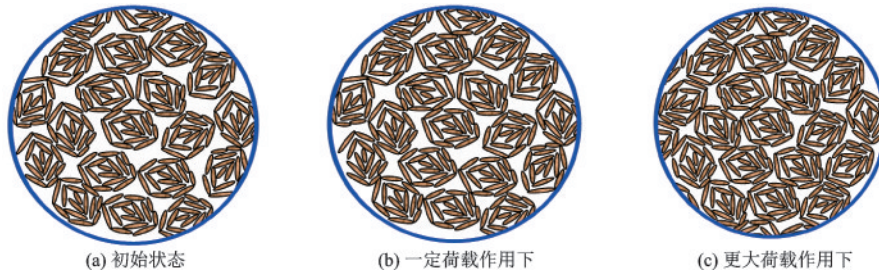


图6 土样在荷载作用下的孔隙结构演化概念图

Fig.6 Concept diagram of pore structure evolution of soil sample under loads

然而D.Mašin^[1]指出,这个结果并不意味着集聚体在荷载作用下是不变形的。相反,这意味着集聚体变形是可逆的,因为不同应力下压实样的孔隙分布是在从测试仪器上移除以后测量的,也就是说测量的孔隙分布是对应卸载试样的。但是这种解释显然也是不合理的,绝大多数试样都是在制样后进行卸载,然后再进行相关的试验,如果是那样的话,那么此时的试验结果岂不是不能代表我们当时压样的状态(高应力和高密度除外)? 土中的小孔一般都是颗粒间的孔隙,如果荷载会影响这部分孔隙,那么荷载肯定会使颗粒发生滑动或者重新排列,但是根据现有一些理论可以得知,颗粒发生滑动或者重新排列引起的变形是不可恢复的。显然这一结论还是缺乏有力的证据。目前,绝大多数学者比较广泛接受的观点是荷载作用只会影响土中的大孔隙(集聚体间孔隙),基本上不影响土中的小孔,这个结论后续被很多学者进一步用试验证明。

3 水力作用下黏土孔隙演化规律

含水量的变化也会引起土中孔隙结构的改变。水力作用下土中孔隙结构的演化规律也引起了大量学者的关注,利用压汞试验研究了不同的水力作用(含水量变化)下土孔隙的孔径分布。本文选用

文献[44]中桂林红黏土、一种膨胀土、EPK高岭土^[9]和Boom clay^[10]四种土在不同水力作用下的孔隙结构,如图7所示,并对这些数据进行分析 and 统计,试图建立水力作用下土孔隙结构的演化规律模型。

蔡国庆等^[44]分别对桂林红黏土和一种膨胀土进行了压汞试验,发现吸力的变化会影响土中相对较大的孔,但是对相对较小的孔隙作用不明显。谈云志等^[45]研究了不同干密度下干缩过程中的孔隙演化规律,并描述了土在干缩过程中孔隙的演化规律和水的储存状态。S.Sasanian等^[9]利用压汞试验研究了两种土增湿过程中孔隙结构的演化规律,发现增湿过程中只影响土中的大孔,基本上不影响土中的小孔。E.Romero等^[10]利用压汞试验和电镜扫描试验研究了土在制样、饱和和脱湿过程中的孔隙结构演化规律,也发现在这些过程中土中的小孔基本上不变化,或者变化可以忽略,主要影响的只是大孔。O.Cuisinier等^[21]研究了压实砂壤土在脱湿过程中孔隙的演化规律,发现随着吸力的增大,土孔隙结构又重新恢复双峰孔隙结构,而且此后继续干化土样的大孔隙会减少,但是小孔隙基本不变(实际上小孔有略微增加,考虑到是大孔隙被压缩造成的)。E.Romero等^[10]也发现饱和和样干化以后会重新呈现双峰孔隙结构,而且进一步干化只会影响土中大孔隙。这些试验基本上都可以得出,如果压样含

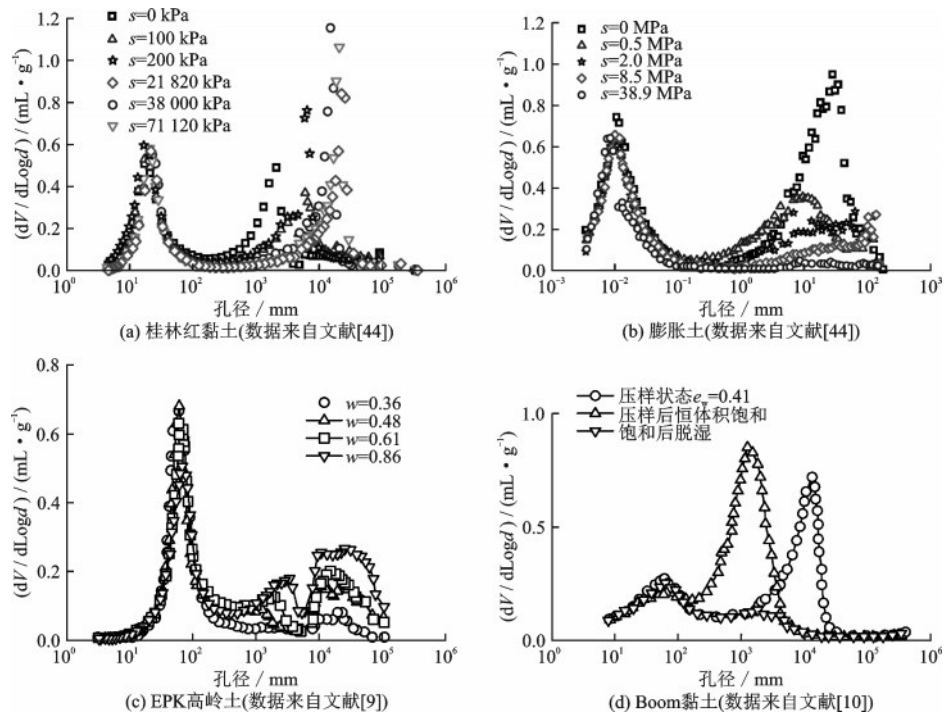


图7 试样在不同吸力(含水量)下的孔径分布

Fig.7 Pore size distributions of soils at different suctions (water content)

水量在最优含水量的干侧会出现双峰孔隙结构;如果在恒体积下进行饱和,土样则会呈现单峰孔隙结构;如果再对饱和试样进行脱湿,土样又会出现双峰孔隙结构;随着含水量的继续减少,土中大孔隙会大量的减少,但是小孔却基本上不变化。但是在增湿试验中,土的孔隙结构演化规律又有所不同。R.Monroy等^[14]利用压汞仪测试了吸湿过程中土孔隙的演化规律,随着含水量的增大,土中小孔会增多,意味着集聚体发生膨胀,也就是说水的侵入对土中大孔隙的影响较小,A.Lloret等^[41]也得到相同的结论。可以看出,含水量变化引起土孔隙结构的演化规律比较复杂,需要进一步试验研究并引入更先进的理论来描述其演化规律。

图7显示四种土在不同吸力(含水量)下孔径分布曲线,试验结果表明,水力作用(含水量的变化或者吸力的变化),只影响集聚体间的孔隙(大孔),而对集聚体内部的孔隙基本上不影响。而且,对双峰孔隙结构的土样进行恒体积饱和时,土中集聚体间的孔隙会向小孔方向移动,使试样的孔隙趋于均一,呈现单峰孔隙结构或者有形成单峰孔隙结构的趋势,也就是说在压实样双峰的中间形成一个“中等”孔隙。实际上,水的侵入会有拆散集聚体的作用,但是只会拆散集聚体表层的土颗粒。但对饱和试样进行脱湿,脱湿会使饱和形成的“中等”孔隙的比

例减少,随着含水量的继续降低,“中等”孔隙的数量继续减少,同时相对较大的孔隙(集聚体间孔隙)会重新形成,当含水量降低到一定程度时,明显的双孔结构重新恢复,如图8所示^[51],其他研究也有相似结论^[51-53]。

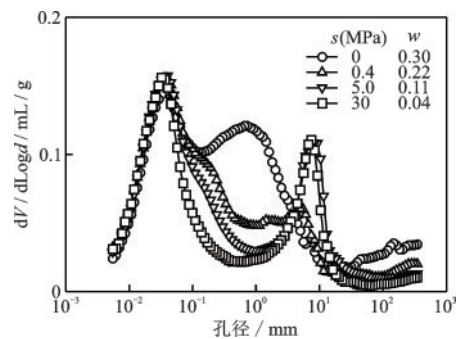


图8 饱和过程孔径分布^[51]

Fig.8 Pore size distributions of soils in wetting process^[51]

根据文献中的试验数据,再结合土的一些力学性质,提出了一种水力作用下(含水量变化或者吸力变化)土中孔隙演化规律的概念图,如图9所示。一般情况下,当压样含水量在最优含水量的干侧,而且压样密度不是特别大时,试样会呈现双峰孔隙结构。此时一部分土颗粒会集合在一起组成集聚体,土体的孔隙可以分为集聚体间孔隙和集聚体内

孔隙,如图9(a)所示。当对双峰孔隙结构的土样进行恒体积饱和后,试样会呈现单峰孔隙结构或者有向单峰孔隙结构变化地趋势,说明土中的孔隙会变得相对均一,换句话说,土中含水量的增加会使集聚体崩解或者使集聚在一起的土颗粒分开,如图9(b)所示。值得注意的是,水的侵入只会拆散集聚体表层的土颗粒,使这部分土颗粒发生位移填充集聚体间孔隙;但是集聚体中心部位的土颗粒基本上不受影响,其相对位置不发生改变。当对饱和后的试样再进行脱湿时,土颗粒相对位置又会发生变

化,而且土颗粒像是有“记忆”一样,随着土中含水量的减少,之前发生位置变化的土颗粒又会聚拢在一起重新形成集聚体,与此同时,伴随着含水量的降低,集聚体间的孔隙会发生收缩,但是对集聚体中心部位的土颗粒基本上不会造成影响,如图9(c)所示。通过上述几个水力路径下的孔隙结构演化模型可以看出,含水量的变化会使集聚体表层的土颗粒发生位移和重新排列,而且这些颗粒存在“记忆”,相反的过程会使土颗粒重新回到原来位置,但是失水收缩只会发生在集聚体间孔隙中。

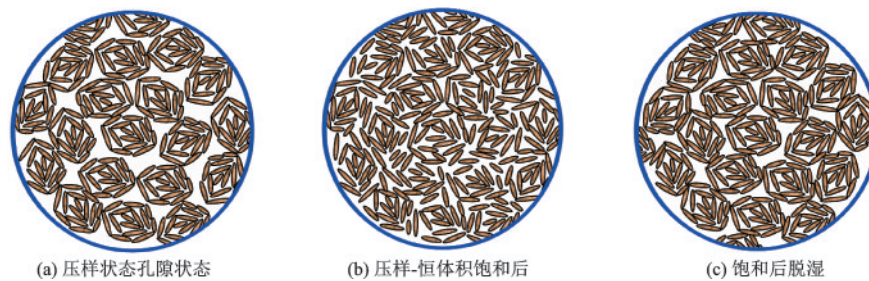


图9 土样在含水量变化下的孔隙结构概念图

Fig.9 Conceptual diagram of pore structure of soils under water content changing

双孔模型的思想和方法已经被大量应用到土的剪切强度^[46]、抗拉强度^[47]、渗透特性^[3]、持水特性^[10,48]和变形特性^[11]等计算中。自 A.Gens 等^[24]首创概念模型以来,双孔结构在非饱和膨胀土本构模型中的作用已被意识到。目前,微观结构的演化规律也已被广泛应用于非饱和土的本构模型构建中^[1,11,13,49-50]。E. E. Alonso 等^[13]在巴萨罗那模型(BBM)的基础上,利用双孔模型的理论提出了一套非饱和膨胀土本构模型,后续也得到了广泛地接受和应用。在假设集聚体饱和的前提下,他们认为集聚体的体变是可逆的,同时受平均有效应力的控制;宏观孔隙结构的变形受现有低塑性非饱和土模型控制。这两个结构层次之间的耦合作用取决于大孔隙(集聚体间孔隙)的大小。但是一些试验结果显示BBM的假设并不准确,但是可以肯定的是,在建立非饱和土本构关系时,考虑水-力作用下集聚体间孔隙和集聚体内孔隙的不同演化规律可以更好地描述非饱和土的水-力学特性。

4 讨论

大多数学者通过把土样压制不同孔隙比的方式研究荷载对土孔隙的演化规律。绝大多数结

果表明:荷载只会压缩集聚体间孔隙,对集聚体内孔隙的影响基本可以忽略。实际上,这种测试的方式并不一定是孔隙结构演化的真实情况,因为微观试验的试样是加载结束又卸载后的处理样,至于加载过程孔隙结构的真实状态很难实时展现。关于试样在压缩过程中孔隙结构的实时不间断测试鲜有报道。因此,荷载作用只会影响土中大孔隙的结论仍需要实时监测结果进一步验证。相对于加载,卸载对土样孔隙结构的作用研究相对较少,加载和卸载对孔隙结构的影响机制也没有得到统一认识。由于加载-卸载循环会导致塑性应变,塑性应变在土中大、小孔如何体现仍不清晰。但是大量试验结果显示,经过一定次数的加载-卸载循环,集合体间孔隙的变形将几乎可逆,试样接近完全弹性状态。

对于含水率变化引起土孔隙结构的演化规律比较复杂。土-水相互作用是指土颗粒与水分子间的物理化学作用导致土骨架和孔隙水物理性质的改变。土-水相互作用包括多种物理化学作用,主要可分为毛细作用和吸附作用,毛细作用是由气-水交界面的表面作用引起的;吸附作用是由范德华力、双电层、颗粒表面性质和阳离子水合等共同作用下的电磁场引起的。随着含水率的变化,土-水相互作

用机制也会发生变化,不同土-水相互作用对土中大、小孔的影响规律也不同,如图10所示。对于活性较大的黏土在低含水率范围持续干燥仍然会发生较大收缩变形,因此低含水率范围黏土的收缩变形不能被忽略。根据土水相互作用理论,低含水率范围吸附作用占据主导,说明吸附作用低含水率范围发生收缩的主要原因。然而目前大多数研究通常忽略吸附作用对收缩变形的影响,这也导致传统模型不能准确描述低含水率阶段的收缩特性。实际上,在失水收缩过程,随着含水率的不断降低,土水相互作用机制会发生变化,含水率较高时,毛细作用占据主导;含水率进一步降低,吸附作用逐渐

加强,直到吸附作用占据主导作用;在颗粒表面负电荷产生的电场作用下,黏土会表现出一定的半透膜特性,产生渗透吸力,影响土水相互作用。目前,已有学者开展物理化学作用对收缩变形的影响研究,但基本上都是针对宏观特性,考虑理化作用的孔隙结构演化规律的研究较少,之间的定量表达更是鲜有报道。研究表明,考虑吸附作用的收缩模型提高了预测精度,也可以解释黏土在低含水率阶段持续收缩的现象,然而土水相互作用对收缩变形的作用机理尚不清晰,宽广含水量范围(尤其低含水率阶段)膨胀土收缩理论的微观机理和适用性需要进一步研究。

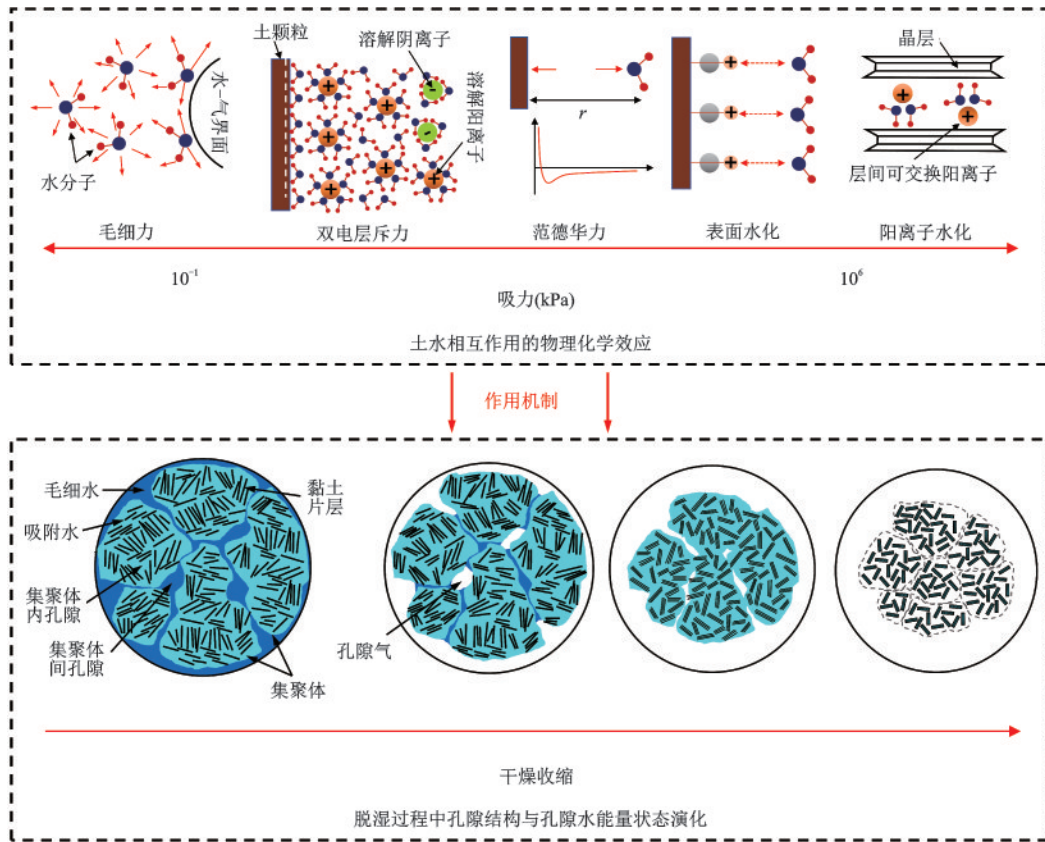


图10 土水相互作用与孔隙结构演化的关系

Fig.10 Relationship between soil water interaction and pore structure evolution

5 结论及建议

非饱和土的水-力作用会引起土中孔隙结构的变化,反之,土中孔隙结构的变化也会改变非饱和土的水-力特性。本文针对水-力作用下黏土孔隙结构演化规律的研究成果,开展了扼要地论述和讨

论,结论如下:

(1)土的微观结构对土的各方面的性质起着决定作用,土的水-力学性质都可以理解为微观结构的宏观表现,因此研究非饱和土复杂的水-力特性不应忽略微观结构的影响。目前非饱和土水-力学模型大部分基于宏观参数所建立,由于缺乏微观机制的支撑,已经难以满足科研和工程需求,因此建立宏

微观力学定量关系是亟需解决的一个科学问题。

(2)土颗粒基本不会单独存在于黏土中,绝大部分会堆积在一起以集聚体的形式存在,因此黏土孔隙可以简化为集合体间孔隙(宏观孔隙)和集合体内孔隙(微观孔隙)构成的双孔结构。含水量变化和荷载作用对土中孔隙结构的作用机制不同。通过统计和分析文献中数据,得到初步结论:荷载只对集聚体间孔隙起作用,对集聚体内孔隙基本不影响;含水率变化会改变土颗粒相对位置,继而影响这两类孔隙结构,但是土水相互作用复杂,导致含水率变化对土孔隙结构影响机制仍不清晰。

(3)目前关于孔隙结构演化试验和理论研究主要集中在应力场(外部荷载)、渗流场(含水率变化)等单场作用,缺乏多场耦合作用下孔隙结构演化的研究。

(4)由于缺乏微观孔隙结构与宏观水-力学特性的定量表达,由微观结构参数建立的黏土水-力学模型比较困难。

综上所述,在描述和解释黏土宏观水-力学特性时,微观机理越来越被重视。目前关于水-力作用下黏土孔隙结构演化规律研究较为广泛,也取得一定成果,但是仍然没有统一的认识。水-力循环作用下孔隙结构演化规律、建立科学合理的微观孔隙结构与宏观水-力特性的定量关系,是今后值得深入研究的方向。

参考文献:

- [1] Mašin D. Double structure hydromechanical coupling formalism and a model for unsaturated expansive clays [J]. *Engineering Geology*, 2013, 165:73-88.
- [2] 蔡国庆,王亚南,周安楠,等.考虑微观孔隙结构的非饱和土水-力耦合本构模型[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(4):618-624.
Cai G Q, Wang Y N, Zhou A N, et al. A microstructure-dependent hydro-mechanical coupled constitutive model for unsaturated soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(4): 618-624. (in Chinese)
- [3] Romero E. A microstructural insight into compacted clayey soils and their hydraulic properties[J]. *Engineering Geology*, 2013, 165: 3-19.
- [4] 陈正汉,郭楠.非饱和土与特殊土力学及工程应用研究的新进展[J]. *岩土力学*, 2019, 40(1):1-54.
- [5] Chen Z H, Guo N. New developments of mechanics and application for unsaturated soils and special soils [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(1): 1-54. (in Chinese)
- [6] 蒋明镜.现代土力学研究的新视野—宏微观土力学[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(2):195-254.
Jiang M J. New paradigm for modern soil mechanics: Geomechanics from micro to macro[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(2): 195-254. (in Chinese)
- [7] Li T C, Shao M A, Jia Y H. Application of X-ray tomography to quantify macropore characteristics of loess soil under two perennial plants[J]. *European Journal of Soil Science*, 2016, 67(3): 266-275.
- [8] Ma T T, Wei C F, Yao C M, et al. Microstructural evolution of expansive clay during drying-wetting cycle [J]. *Acta Geotechnica*, 2020, 15:2355-2366.
- [9] Zhang F, Cui Y J, Zeng L L, et al. Effect of degree of saturation on the unconfined compressive strength of natural stiff clays with consideration of air entry value [J]. *Engineering Geology*, 2018, 237: 140-148.
- [10] Sasanian S, Newson T A. Use of mercury intrusion porosimetry for microstructural investigation of reconstituted clays at high water contents[J]. *Engineering Geology*, 2013, 158:15-22.
- [11] 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.
- [12] Alonso E E, Pereira J M, Vaunat J, et al. A microstructurally based effective stress for unsaturated soils [J]. *Géotechnique*, 2010, 60(12):913-925.
- [13] Sun H, Mašin D, Najser J, et al. Bentonite microstructure and saturation evolution in wetting-drying cycles evaluated using ESEM, MIP and WRC measurements [J]. *Géotechnique*, 2019, 69(8): 713-726.
- [14] Alonso E E, Vaunat J, Gens A. Modelling the mechanical behaviour of expansive clays[J]. *Engineering geology*, 1999, 54(1-2): 173-183.
- [15] Monroy R, Zdravkovic L, Ridley A. Evolution of microstructure in compacted London Clay during wetting and loading[J]. *Géotechnique*, 2010, 60(2): 105-119.
- [16] Zhang Z, Ye W M, Liu Z R, et al. Mechanical behavior of GMZ bentonite pellet mixtures over a wide suction range [J]. *Engineering Geology*, 2020, 264: 105383.
- [17] Collins K, McGown A. The form and function of micro-

- fabric features in a variety of natural soils[J]. *Géotechnique*, 1974, 24(2): 223-254.
- [17] Burton G J, Sheng D C, Airey D. Experimental study on the effect of degree of saturation on volumetric behaviour of Maryland Clay [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2014, 51(12): 1449-1455.
- [18] 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.
- [19] Al-Mukhtar M, Belanteur N, Tessier D, et al. The fabric of a clay soil under controlled mechanical and hydraulic stress states[J]. *Applied Clay Science*, 1996, 11(2-4): 99-115.
- [20] Simms P H, Yanful E K. A pore-network model for hydromechanical coupling in unsaturated compacted clayey soils [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2005, 42(2): 499-514.
- [21] Cuisinier O, Laloui L. Fabric evolution during hydro-mechanical loading of a compacted silt[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2004, 28(6): 483-499.
- [22] Romero E, Simms P H. Microstructure investigation in unsaturated soils: a review with special attention to contribution of mercury intrusion porosimetry and environmental scanning electron microscopy [J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2008, 26(6): 705-727.
- [23] Casini F, Vaunat J, Romero E, et al. Consequences on water retention properties of double-porosity features in a compacted silt [J]. *Acta Geotechnica*, 2012, 7(2): 139-150.
- [24] Gens A, Alonso E E. A framework for the behaviour of unsaturated expansive clays [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1992, 29(6): 1013-1032.
- [25] Sánchez M, Gens A, do Nascimento Guimarães L, et al. A double structure generalized plasticity model for expansive materials [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2005, 29(8): 751-787.
- [26] Thomas H R, Cleall P J. Inclusion of expansive clay behaviour in coupled thermo hydraulic mechanical models [J]. *Engineering Geology*, 1999, 54(1-2): 93-108.
- [27] Delage P, Audiguier M, Cui Y J, et al. Microstructure of a compacted silt [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1996, 33(1): 150-158.
- [28] Sun W J, Cui Y J. Investigating the microstructure changes for silty soil during drying [J]. *Géotechnique*, 2018, 68(4): 370-373.
- [29] Wang Q, Cui Y J, Tang A M, et al. Hydraulic conductivity and microstructure changes of compacted bentonite/sand mixture during hydration [J]. *Engineering Geology*, 2013, 164: 67-76.
- [30] Olsen H W. Darcy's law in saturated kaolinite [J]. *Water Resources Research*, 1966, 2(2): 287-295.
- [31] Collins K, McGown A. The form and function of micro-fabric features in a variety of natural soils [J]. *Géotechnique*, 1974, 24(2): 223-254.
- [32] Diamond S. Pore size distributions in clays [J]. *Clays and Clay Minerals*, 1970, 18(1): 7-23.
- [33] Pusch R. Mineral-water interactions and their influence on the physical behavior of highly compacted Na bentonite [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1982, 19(3): 381-387.
- [34] Lloret A, Villar M V, Sanchez M, et al. Mechanical behaviour of heavily compacted bentonite under high suction changes [J]. *Géotechnique*, 2003, 53(1): 27-40.
- [35] Simms P H, Yanful E K. Measurement and estimation of pore shrinkage and pore distribution in a clayey till during soil-water characteristic curve tests [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2001, 38(4): 741-754.
- [36] Burton G J, Pineda J A, Sheng D, et al. Microstructural changes of an undisturbed, reconstituted and compacted high plasticity clay subjected to wetting and drying [J]. *Engineering Geology*, 2015, 193: 363-373.
- [37] 万敏. 温控条件下高压实膨润土土水特征与渗透特性研究 [D]. 上海: 同济大学, 2010.
- Wan M. Study on soil-water characteristics and permeability of highly compacted GMZ bentonite with temperature control [D]. Shanghai: Tongji University, 2010. (in Chinese)
- [38] Garcia-Bengochea I, Altschaeffl A G, Lovell C W. Pore distribution and permeability of silty clays [J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 1979, 105(7): 839-856.
- [39] 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.
- [40] 谈云志, 喻波, 刘晓玲, 等. 压实红黏土失水收缩过程的孔隙演化规律 [J]. *岩土力学*, 2015, 36(2): 369-375.
- Tan Y Z, Yu B, Liu X L, et al. Pore size evolution of

- compacted laterite under desiccation shrinkage process effects [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(2): 369-375. (in Chinese)
- [41] Lloret A, Villar M V. Advances on the knowledge of the thermo-hydro-mechanical behaviour of heavily compacted "FEBEX" bentonite [J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2007, 32(8-14): 701-715.
- [42] Miao L, Houston S L, Cui Y, et al. Relationship between soil structure and mechanical behavior for an expansive unsaturated clay [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2007, 44(2): 126-137.
- [43] Gao Y, Sun D A, Zhu Z C, et al. Hydromechanical behavior of unsaturated soil with different initial densities over a wide suction range [J]. *Acta Geotechnica*, 2019, 14(2): 417-428.
- [44] 蔡国庆, 吴天驰, 王亚南, 等. 双孔结构非饱和压实土微观结构演化模型 [J]. *岩土力学*, 2020, 41(11): 3583-3590.
Cai G Q, Wu T C, Wang Y N, et al. Model of the microstructure evolution of unsaturated compacted soils with double-pore structure [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(11): 3583-3590. (in Chinese)
- [45] 谈云志, 孔令伟, 郭爱国, 等. 压实过程对红黏土的孔隙分布影响研究 [J]. *岩土力学*, 2010, 31(5): 1427-1430.
Tan Y Z, Kong L W, Guo A G, et al. Research on effect of compaction on pore size distribution of laterite soil [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(5): 1427-1430. (in Chinese)
- [46] 张俊然, 孙德安, 姜彤, 等. 宽广吸力范围内弱膨胀土的抗剪强度及其预测 [J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(6): 1064-1070.
Zhang J R, Sun D A, Jiang T, et al. Shear strength of weakly expansive soils and its prediction in a wide range of suction [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(6): 1064-1070. (in Chinese)
- [47] Merchán V. Small strain stiffness and residual strength of unsaturated Boom clay: a microstructural insight [D]. Spain: Universitat Politècnica de Catalunya, 2011.
- [48] 牛庚, 邵龙潭, 孙德安, 等. 土水特征曲线测量过程中孔隙分布的演化规律探讨 [J]. *岩土力学*, 2020, 41(4): 1195-1202.
Niu G, Shao L T, Sun D A, et al. Discussion on the evolution law of pore distribution during the measurement of soil water characteristic curve [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(4): 1195-1202. (in Chinese)
- [49] Koliji A, Laloui L, Vulliet L. Constitutive modeling of unsaturated aggregated soils [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2010, 34(17): 1846-1876.
- [50] Vecchia G D, Romero E. A fully coupled elastic - plastic hydromechanical model for compacted soils accounting for clay activity [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2013, 37(5): 503-535.
- [51] 牛庚. 基于双孔模型的非饱和土水-力特性研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
Niu G. Study on hydro-mechanical behavior of unsaturated soil based on double pore structure model [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021.
- [52] Ye W M, Wang Y, Wang Q, et al. Stress-dependent temperature effect on the swelling behavior of compacted GMZ bentonite [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2020, 79(7): 3897-3907.
- [53] Tomioka S, Kozaki T, Takamatsu H, et al. Analysis of microstructural images of dry and water-saturated compacted bentonite samples observed with X-ray micro CT [J]. *Applied Clay Science*, 2010, 47(1-2): 65-71.

(本文编辑: 苏泽云)