

水-力作用下膨胀性黏土岩结构性退化研究进展

王 琼^{1,2}, 徐一禾¹, 苏 薇¹, 谢 江¹, 叶为民^{1,2}, 陈永贵^{1,2}

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 膨胀性黏土岩的结构退化特性引起的工程问题已经引起了国内外广泛关注。综述了国内外针对不同水-力作用下膨胀性黏土岩的结构性退化的宏观表征、退化机理和模型等方面现阶段取得的重要成果; 分类梳理了室内试验结果, 将其汇总为宏观指标(物理、力学指标)与微观指标(定性分析、定量指标); 厘清退化机理, 将其总结为水致退化与力致退化; 归纳退化模型构建方法, 将其提炼为经验修正法、弹塑性损伤法与结构简化法。针对尚未攻克的难题, 在膨胀性黏土岩结构性退化的评价指标完善、机理深化和模型建立等方面给出了具体的建议及未来研究方向, 以期为含黏土岩的工程实际应用、研究提供参考与借鉴。

关键词: 黏土岩; 结构性; 宏观指标; 微观结构; 退化模型

中图分类号: TU41

文献标志码: A

Advances in Structural Degradation of Expansive Claystone Under Coupled Hydro-Mechanical Condition

WANG Qiong^{1,2}, XU Yihe¹, SU Wei¹, XIE Jiang¹, YE Weimin^{1,2}, CHEN Yonggui^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The structural degradation characteristics of expansive claystone have led to engineering problems that have attracted widespread attention both domestically and internationally. This paper reviews the significant achievements currently obtained in the macroscopic and microscopic characterization, degradation mechanisms, and modeling of the structural degradation of expansive claystone under different hydro-mechanical conditions. The experimental results are classified and summarized into macroscopic indicators (physical and mechanical properties) and microscopic indicators (qualitative

analysis and quantitative indicators). The degradation mechanisms are clarified and summarized as hydro-induced degradation and force-induced degradation. The methods for degradation models are summarized and refined into empirical correction methods, elastoplastic damage methods, and structural simplification methods. To address unsolved problems, this paper provides specific suggestions and future research directions from the perspective of improving the evaluation indicators, deepening the mechanisms, and establishing models for the structural degradation of expansive claystone, in order to provide references and insights for practical engineering applications and research of claystone-containing projects.

Keywords: claystone; structural; macrostructural indicators; microstructure; degradation model

膨胀性黏土岩是主要由粒径小于 0.003 9 mm 的碎屑颗粒组成的沉积岩^[1], 含有大量膨胀性黏土矿物, 是包括黏土质页岩、泥灰岩等更新世之前形成的超固结岩土体的总称^[2]。黏土岩是自然界中分布最广的沉积岩, 占全球沉积岩体积的 50%~60%^[3], 露头面积占地表的 1/3^[4]。随着工程规模的扩大与建设深度的加大, 越来越多的土木工程, 如水坝、隧道、基坑、浅基础、路堤、核废料处置库天然屏障等^[5-6], 涉及到此类岩土体。

研究表明, 膨胀性黏土岩的岩性介于土和岩石之间, 在施工运营阶段, 赋存环境湿度和应力的显著变化会引起膨胀性黏土岩发生结构性退化^[7], 极易引发工程问题, 如: 隧道变形(瑞士北部富含泥灰岩与泥页岩的 Boetzberg 铁路隧道变形、西北部 Belchen 公路隧道仰拱破坏^[8-9]、西班牙富含微膨胀岩的 Lilla 隧道底板剧烈隆起^[10]、意大利东北部富含泥

收稿日期: 2023-08-15

基金项目: 国家自然科学基金(42002289); 国家重点研发计划(2019YFC1509900)

第一作者: 王 琼, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为环境工程地质、非饱和土力学。

E-mail: qiong.wang@tongji.edu.cn

通信作者: 苏 薇, 博士后, 主要研究方向为环境工程地质、非饱和土力学。E-mail: 90suweiown@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

质岩的 San Donato 高速公路隧道在施工过程中仰拱失效、隧道周围急剧变形^[11]、地面沉降(加拿大黏土质页岩大坝开挖后风化破坏导致地面膨胀^[12]、北京西客站地铁站建设时上第三系泥质沉积物引起局部地面大幅度沉降^[13])、滑坡灾害(南水北调中线工程中裂隙化泥质沉积物在开挖运营期间强度衰减造成滑坡危害^[14])等。这类由结构退化引发的膨胀性黏土岩工程性质劣化已经引起了国内外工程地质和岩土工程界的广泛关注。然而,目前膨胀性黏土岩从属的学科分类模糊,对其进行研究应当采用土力学方法还是遵循岩石力学规范仍存在很大争议。近年来许多学者提出将土和岩石视为连续变化的地质材料,而膨胀性黏土岩是位于这一变化过程中某一阶段的产物,因此在性状和结构上存在联系,难以“一刀切”地将其分类为土或岩。张永双等^[15]总结国内外岩土分类的指标,将此类岩土介质定义为单轴(无侧限)抗压强度在 0.3 至 1.5 MPa 之间的强固结或微成岩的黏土质地体,大致相当于国际岩石力学学会岩石和固结材料分类中的极硬土至极软岩的范畴^[16]。

膨胀性黏土岩的特殊性质与它的地质历史时期形成的结构性密切相关。研究表明,岩土体在广义上都具有结构性^[17]。在微观层面上,结构性是指结构、颗粒排列形式及颗粒之间的相互作用(结构连接)^[18]。如图 1 所示,膨胀性黏土岩的微观结构组成可以简化为黏土颗粒、孔隙水(自由水和吸附水)、颗粒间胶结物质以及其他矿物^[19]。膨胀性黏土岩结构性发生退化的重要物质基础是颗粒间胶结物质,也称为胶结结构,即为狭义上的黏土岩结构性,并且是

区别于重塑样的最主要不同之处。这种胶结结构存在非稳定性,在卸载松弛、吸水与失水过程中,黏土矿物的物理化学活性得到充分发挥,导致成岩胶结作用受到破坏,从而引起膨胀性黏土岩发生胀缩、开裂、软化、崩解等现象。国内外学者采用活化作用^[14]、恶化作用^[20]、结构退化^[21]等不同术语来描述此类现象。然而,由于富含膨胀性黏土矿物,膨胀性黏土岩在水—力作用下发生不同程度的胀缩变形,使其结构退化机理更为复杂。相关现象难以用现有的土力学和岩石力学理论解释。因此,准确认识和描述膨胀性黏土岩及其在水—力作用下发生的结构退化现象、分析退化机理并建立退化模型具有十分重要的科学意义和工程实用价值。

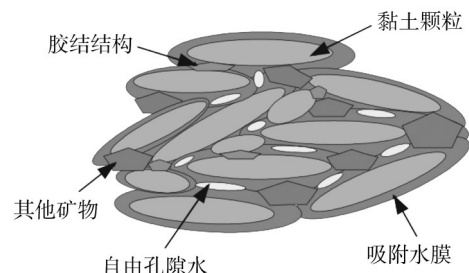


图 1 膨胀性黏土岩结构简化模型^[19]

Fig. 1 Conceptual model for expansive claystone^[19]

目前各国学者常采用室内试验得到的指标来评价膨胀性黏土岩的结构性退化程度^[22]。为了对现有评价体系进行系统化的总结与梳理,将研究中常采用的指标分类汇总为宏观和微观层面的退化指标(表 1)。宏观指标包括物理指标、力学指标。微观指标常采用定性分析与定量指标评价,如化学成分组成、孔径分布和宏微观孔隙比等。

表 1 文献中膨胀性黏土岩退化指标

Tab. 1 Degradation index of expansive claystone in the literature

参考文献	研究对象	力学指标	物理指标
Pineda 等 ^[22]	里拉黏土岩	抗拉强度、刚度	膨胀性、裂缝
Youn 等 ^[23]	含黏土岩石	抗剪强度、弹性模量	崩解耐久性
Espitia 等 ^[24]	泥质岩	泊松比	
Pineda 等 ^[25]	里拉黏土岩	抗剪强度	膨胀性
Nahazanan 等 ^[26]	马来西亚泥岩和黏土岩	抗压强度、抗剪强度	
Erguler 等 ^[27]	含黏土岩石		崩解耐久性
Wild 等 ^[28]	Opalinus 硬黏土	抗拉强度	膨胀性、裂缝、含水率
Gautam 等 ^[29]	黏土岩、泥岩、粉砂岩、页岩		崩解耐久性
Doostmohammadi 等 ^[30]	伊朗泥岩		膨胀性、裂缝、含水率
He 等 ^[31]	Téguline 硬黏土		饱和度、含水率、膨胀性、裂缝
Zeng 等 ^[32]	延吉泥岩		膨胀性

本文在上述指标分类的基础上,归纳国内外学者评价膨胀性黏土岩结构性退化的宏微观指标,厘清水—力作用下膨胀性黏土岩结构性变化机理,总

结与土体结构性相关的退化模型,以期为膨胀性黏土岩结构性退化评价指标完善、机理深化和模型优化等方面的研究提供参考与借鉴。

1 宏观指标

膨胀性黏土岩在复杂工程环境中发生的宏观层面的变化可以总结为物理性质的变化和力学性质的变化。选取最具有代表性的典型指标进行归纳。

1.1 物理指标

膨胀性黏土岩富含膨胀性黏土矿物,具有显著的胀缩变形能力,膨胀性的变化能够综合反映水-力作用对膨胀性黏土岩体变特性等物理性质的影响,因此,物理指标选取与膨胀性相关的膨胀应变和膨胀力作为代表性指标。通常采用一维膨胀变形试验(ASTM·D2435-04)恒体积膨胀力试验(ASTM·D4546-21)等试验方法获取^[33-34]。研究发现,重塑和原状膨胀性黏土岩的膨胀应变和膨胀力随干湿循环次数的演化呈现不同的规律。对于重塑黏土岩,其膨胀性发展规律与膨胀土相似,表现为:随干湿循环次数增加,累积膨胀量增大,达到极限膨胀量所需的时长减小^[35];与第1次循环相比,逐次吸湿过程产生的膨胀应变和膨胀力逐渐减小^[32];膨胀应变分为可逆(弹性)和不可逆(塑形)应变^[36],干湿循环达到平衡状态后不产生塑性变形^[37],累积膨胀与收缩应变不产生变化^[38]。

对于原状黏土岩,Pejon等^[39]发现,即使在经历多次干湿循环后土样仍表现出非常高的膨胀性。Doostmohammadi等^[30]开展干湿循环试验,得到伊朗南部黏土岩的膨胀应变和膨胀力随干湿循环次数变化的关系(图2),原状黏土岩的累计膨胀变形和膨胀力均随次数增加而增加,说明每次土样的干燥收缩应变总是低于吸湿膨胀应变,导致渐进和累积膨胀。此外,在干湿循环过程中,干湿变化幅度也会影响膨胀性黏土岩膨胀性的演化。Pineda等^[7]对里拉硬黏土开展了不同干湿幅度和上覆应力条件下的干湿循环试验,结果表明(图2),竖向应力(σ_v)大、湿度变化幅度(ΔR_H)大的原状试样膨胀应变明显大于 σ_v 小、 ΔR_H 小的试样,这一现象表明,在干湿循环过程中,在一定应力范围内,增大干湿变化幅度可激发原状土的膨胀性。

上述研究表明,膨胀性黏土岩的膨胀力与膨胀应变随干湿循环次数(N)增加而增大,竖向应力、干湿循环幅度的变化会影响膨胀性的增大速率,逐渐趋向于重塑样的膨胀性指标。然而,原状样在经历一定次数的干湿循环达到平衡状态时的膨胀力与膨胀应变均小于重塑样,其膨胀性的影响因素也与重塑样不同,有必要对原状膨胀性黏土岩与重塑样进

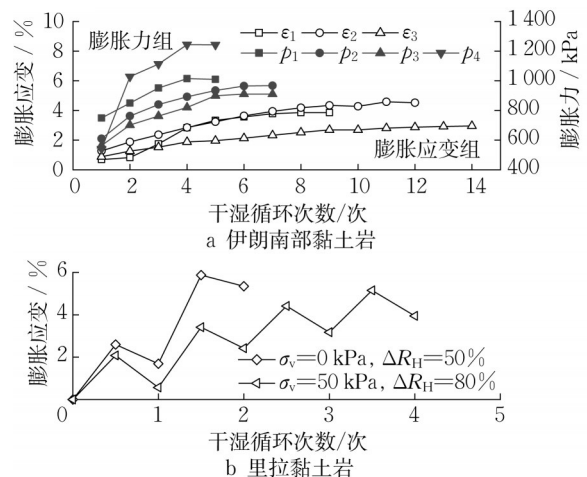


图2 膨胀特性与干湿循环次数关系^[7,30]

Fig. 2 Relationship between swelling property and wet-dry cycles of claystone specimens^[7,30]

一步对比分析,深挖其膨胀性的变化机理。

1.2 力学指标

干湿循环作用破坏膨胀性黏土岩结构性,进而对其力学性能影响显著,主要体现在对抗拉、抗压、抗剪强度的影响。

实验室内常通过直接拉伸法(单轴、三轴拉伸试验)、间接拉伸法(土梁弯曲试验、轴向压裂试验、径向压裂试验、气压劈裂试验)获得试样的抗拉强度^[40]。Pineda等^[7]开展劈裂试验,获得了经历不同干湿循环次数原状膨胀性黏土岩试样的抗拉强度(图3)。结果表明,试样的峰值抗拉强度随着干湿循环次数的增加而显著下降^[7]。经分析发现,原状土颗粒结构排列紧密,干湿循环作用引起颗粒间的胶结物质流失,胶结作用减弱,土体微观孔隙结构发生改变^[41],裂缝发育,土颗粒形状趋向圆滑。由此可见,干湿循环过程显著影响土的抗拉强度^[42-43]。

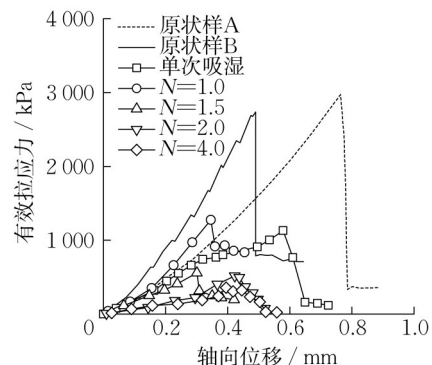


图3 抗拉强度的退化^[7]

Fig. 3 Degradation of tensile strength with cycles^[7]

抗剪强度通常采用黏聚力和内摩擦角来表征,主要通过直剪、环剪、三轴剪切等试验来进行研究。干湿循环过程显著影响应力—应变关系,使其表现出应变软化特征,这与干湿循环过程中出现的局部微小裂隙通道在剪切中发展成滑裂面有关^[26]。随干湿循环次数增加,原状膨胀性黏土岩的抗剪强度降低,黏聚力增大、内摩擦角减小,并且干湿循环对内摩擦角的影响程度较小,对黏聚力影响较大,而强度包线则逐渐接近于重塑试样(图4)^[44]。Pineda等^[7]总结出2种抗剪性能退化机制,分别为干湿循环产生的风化和位移累积引起残余滑动剪切导致的颗粒重新排列,2种机制的分界值为临界摩擦角。

压缩性指标可以通过单轴压缩和三轴试验得到。针对膨胀性黏土岩,现有的研究多集中于对比原状样、扰动样和重塑样的压缩性指标来评价结构退化对压缩性能的影响。Leroueil等^[45]开展原状与完全重塑样的一维压缩试验,得到2条完全不同形态且相交的孔隙比—有效竖向应力关系曲线(图5a),两曲线间封闭区域表征结构性。Cafaro等^[46]针

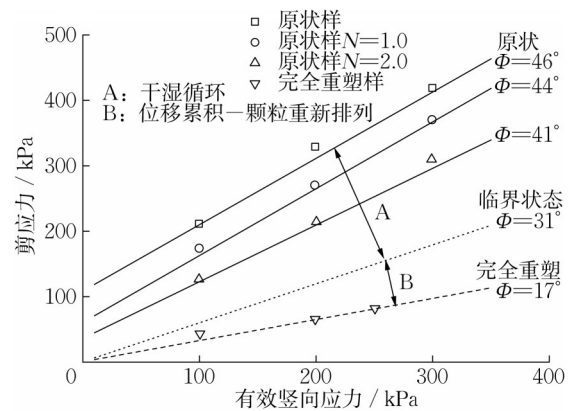
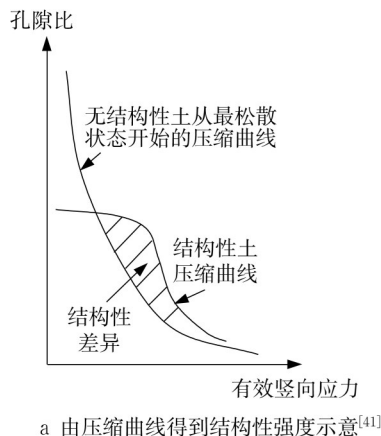


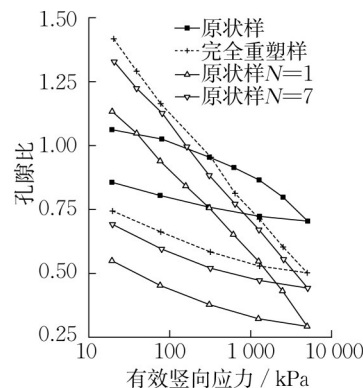
图4 抗剪强度的退化^[7]

Fig. 4 Degradation of shear strength with cycles^[7]

对原状样、扰动样和重塑样进行一维压缩试验,结果表明(图5b),随结构退化程度增强,扰动样的压缩曲线逐渐接近于完全重塑样。由于干湿循环和应力加卸载循环都对结构中的连接产生较大破坏,均可引起原状膨胀性黏土岩发生结构退化,因此在实际工程中,膨胀性黏土岩压缩性能的演化机理更为复杂。



a 由压缩曲线得到结构性强度示意^[41]



b 不同退化程度原状样压缩曲线^[42]

图5 原状和重塑样压缩性对比

Fig. 5 Comparison of structured and destructured compression in oedometer test

总体而言,干湿循环条件下膨胀性黏土岩抗拉强度的退化直接反映水—力作用导致的土体内部胶结物质流失情况和胶结作用削弱程度,但由于获取难度较大,在实测中常采用其他指标对力学性能退化程度进行间接表征。抗剪、抗压强度受尺寸效应和干湿循环吸力路径的影响,影响程度与作用机理仍尚不清晰。此外,现有研究集中于膨胀性黏土岩单一力学性质的变化,有必要对力学指标之间的相互作用进行研究,从而建立水—力作用下的力学性能评价体系。

2 微观指标

膨胀性黏土岩的工程特性与其微观结构变化密切相关,而微观结构的变化正是土体结构性变化的直接反映。膨胀性黏土岩由黏土基质和胶结物质组成,水—力作用对微观层面造成的结构退化体现为:吸水、脱水使黏土基质膨胀、收缩,从而导致胶结物质破坏,并在黏土基质中产生大孔;力学加卸载导致黏土基质结构和胶结结构的双重损伤。然而,其微观孔隙结构在压实、饱和与干燥过程中的形成过程和变化机理目前尚不清晰。因此,定量研究膨胀性

黏土岩微孔隙结构的形成和演化规律是未来研究的重点与难点。

2.1 定性分析

在微观观测中,常采用扫描电子显微镜法、X射线衍射法和计算机断层扫描法等方法获取水化层数、水膜厚度、化学成分、孔隙结构等特性的变化规律来定性分析。环境电镜扫描结果表明,增湿、脱湿过程中COx(Calovo—Oxfordian)黏土岩微裂缝的产生原因与矿物成分占比密切相关^[47],可分为颗粒间裂缝与颗粒内裂缝^[25]:颗粒间裂缝产生于大粒径矿物与黏土基质的界面处,与较硬、尺寸较大的矿物(主要是非活性矿物)和较软的黏土基质之间的非均匀变形有关;颗粒内裂缝产生于大粒径矿物内部(如石英、方解石),与黏土基质膨胀收缩产生的颗粒间拉应力循环加卸载有关^[48]。此外,干湿循环后非活

性矿物与黏土基质的边界模糊,颗粒间胶结变弱,这种内部胶结物的溶蚀和矿物的水解作用是引起宏观力学指标进一步降低的主要原因^[49]。

2.2 定量指标

常采用压汞试验获取孔径分布情况和宏微观孔隙比等参数,对试样的微观结构进行定量分析。原状样的压汞结果表明,原状样孔径分布为单峰结构(图6a)^[50],经历干湿循环作用后孔径分布曲线峰值对应的孔径向右偏移(图6b)^[51],与微孔隙膨胀有关;另一方面,强烈干燥过程中土中微裂缝张开,孔径分布曲线上产生明显第二峰^[25],即产生了新型孔隙(图6c)。而压实重塑样的孔径分布曲线则为双峰结构^[31,52](图6d),在水化达到饱和后,重塑土的孔径分布曲线由双峰结构演变为单峰结构;脱湿过程中即可逐渐恢复双峰结构(图6e)。

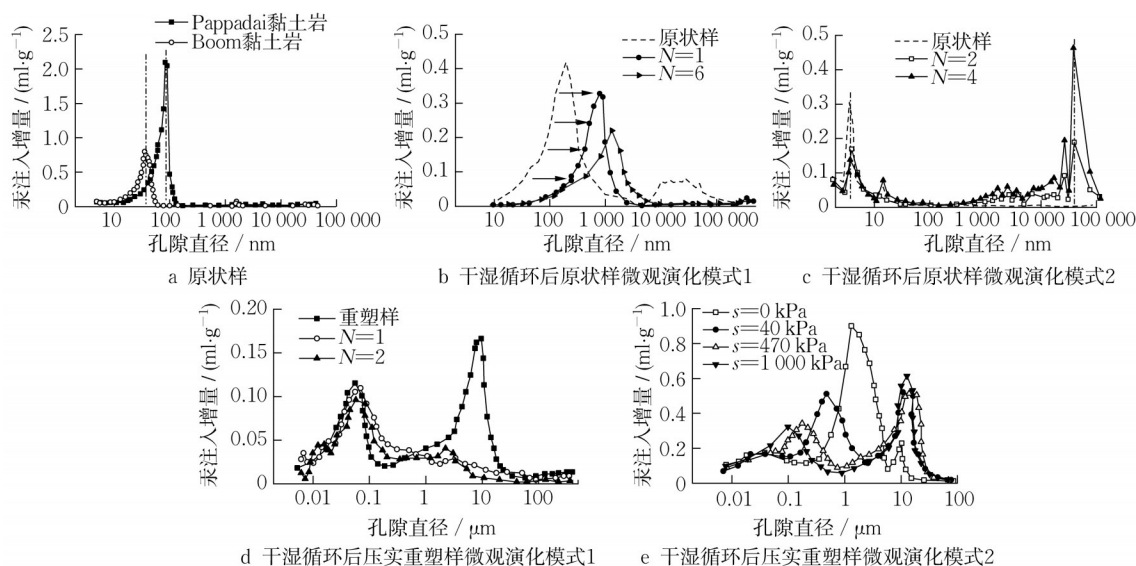


图6 干湿循环过程原状与重塑黏土岩孔径分布曲线演化规律

Fig. 6 Evolution of pore size density function of claystone with cycles

3 退化机理

膨胀性黏土岩的组成成分是实现结构退化的物质基础,在吸湿—脱湿、加载—卸载的过程中,不同矿物之间发生不均匀应变,导致裂缝的产生、发展与愈合,增加膨胀性黏土岩的非连续性,进而改变其工程性质^[53]。由此可见,膨胀性黏土岩的结构退化机理与裂缝的演化过程密切相关。大量研究表明,荷载、吸力及两者之间的耦合作用是引起土结构发生变化的主要因素^[54],然而这一耦合作用较为复杂,现有研究大多从单一作用入手分析其对结构性的影响机制,可分为水致退化和力致退化2个方面。

3.1 水致退化

膨胀性黏土岩在吸湿和脱湿过程中都会产生裂缝,总体而言,土体中多尺度非均质性引起的内部应力场是产生裂缝的主要原因,土体内局部应力的产生来自于胀缩应变不协调,包括^[55]:①黏土基质吸水、失水产生较大胀缩变形,胶结物质体积几乎不发生变化;②不同种类黏土矿物的膨胀性差异较大,蒙脱石膨胀能力显著,伊利石膨胀性能较差;③黏土颗粒的定向排列导致了自由膨胀的不均匀性。

在吸湿过程中,裂缝主要产生于黏土基质中和基质—胶结物质的分界面。当黏土矿物吸水膨胀时,黏土基质、胶结物质组成的非均质性引起的局部

应力是产生吸湿裂缝的主要原因,这种局部张拉应力在分界面达到峰值,导致微裂缝沿界面发展。同时,水分在吸力梯度的作用下入渗土体,由于土颗粒形状不均匀、内外层变形不协调^[10],由吸力梯度产生的膨胀应变差异引起的张拉应力一旦超过黏土体的张拉强度,黏土基质内则会产生张拉水化裂缝^[56]。此外,当晶层间膨胀达到临界值(即水化作用下结合了4层水分子)时,层间作用力可能会从吸力转变为斥力,使黏土颗粒发生破碎分解,使黏土基质内产生分解水化裂缝^[57]。

在脱水过程中,收缩裂缝优先产生于远离胶结物质的黏土基质中,产生原因为内部或外部约束引起的张拉应力,其中自约束效应起到关键作用。当自由收缩时,黏土基质内部存在吸力梯度,失水较快的部分收缩产生张拉应力,产生垂直于干燥面的裂缝,而失水较慢的部分受到失水较快部分的影响,使裂缝沿张拉应力最大干燥面向内扩展,此为自约束效应^[55]。由于膨胀性黏土岩结构的复杂性,干燥过程中黏土基质与胶结物质接触面附近产生压应力,抵消了部分自约束效应引起的整体拉应力,因此不易产生收缩裂缝^[55]。

经历若干次干湿循环后的膨胀性黏土岩在再次吸湿过程中会出现干燥活化效应,即环境湿度变化引起的硬黏土内部结构破坏,使其表现出更高的膨胀势^[13]。究其原因,主要归结为以下两方面:①在干湿循环过程中产生的裂缝为渗流提供优势通道,当含水率降低时,空气进入裂隙,在吸湿过程中,在膨胀性黏土岩的吸水势能驱动下,强大的毛细水的楔裂作用使水进入干燥岩石内部,压缩内部空气,内部气压导致膨胀和崩解^[58];②胶结物质与黏土基质交界面的裂缝使胶结作用减弱,黏土矿物得以不受约束、更加充分膨胀,显著增加膨胀性。

3.2 力致退化

膨胀性黏土岩在地质历史时期经历了沉积加载和风化卸载作用。加载使土体压缩固结,发生体积收缩;卸载发生回弹,土体膨胀,但两者都会使土体产生开裂^[55],进而导致膨胀性黏土岩结构退化。

在力学加载阶段,退化机理可以总结为两方面:当黏土基质和胶结物质界面处局部剪切应力超过二者连接强度时,裂缝沿界面处产生和发展^[59];当外力达到一定水平时,一些粗颗粒(胶结物质)发生劈裂。无论产生位置在何处,微裂缝的产生往往伴随着塑性应变的增大,即结构退化与塑性应变有关^[60]。在随后的卸载阶段,由于较高的应力诱发了膨胀性黏

土岩中的大孔发生坍塌,产生的裂缝在卸载时发生局部膨胀,导致在极高的竖向应力下卸载产生较大的弹性回弹斜率 κ ,加载时产生的裂缝反而增加了卸载时的膨胀势能,表明裂缝对回弹性能的影响^[61-62]。随着胶结物质的破坏,原本被胶结作用锁定的应变能在卸载过程中被释放^[63],从而岩土体发生相应的回弹。卸载过程中应变能被释放的程度取决于加载过程中岩土体胶结物质被破坏的程度。对于弱胶结的膨胀性黏土岩,卸载回弹瞬间即可释放大量的能量;仅有一小部分在长期回弹期间逐步释放,产生微小膨胀。而对于强胶结的膨胀性黏土岩,卸载瞬间只有小部分应变能释放,大部分应变能则在风化营力作用过程中被释放。

4 退化模型

国内外研究基于试验获取的硬黏土结构性退化前后的宏微观指标建立了多种描述水-力作用下结构性膨胀性黏土岩退化过程的力学本构模型。在构建模型的过程中,学者们普遍采用的方法可总结为以下3种:

(1)经验修正法:根据试验结果与经验,在已有的针对非结构性、无胶结性的普适性土体本构模型基础上进行合理优化和修正。

(2)弹塑性损伤法:结合损伤力学和弹塑性力学方法建立弹塑性损伤模型。

(3)结构简化法:将微观结构组成简化为黏土基质和胶结物质的结合体,分别建立宏观模型。

4.1 经验修正法

经典土力学模型的建立通常基于重塑样的试验结果,为了表征天然原状样的结构性及其退化过程,在普适性的重塑样模型基础上,结合试验中的结论与经验,通过增加辅助屈服面或边界面量化胶结结构的影响^[64],进行模型的合理修正与优化。

4.1.1 考虑胶结作用的修正剑桥概念模型

Gens等^[65]基于剑桥模型建立了考虑胶结作用的边界面模型。采用硬化模量 H_s 表示塑性硬化(或软化)过程导致的屈服面扩张(或收缩);采用引入胶结量 b 的退化模量 H_d 表示退化过程导致的屈服面收缩。理论上,二者存在如式(1)的关系:

$$H = H_s - H_d \quad (1)$$

H_s 是应力状态的函数,应力空间中存在 $H_s = 0$ 的屈服面。应力点在屈服面内部时, $H_s < 0$ 。当试样处于相对较高的应力状态时,随着偏应力的增加,试样

将到达屈服面B点。当 $H_s > H_d$ 时,屈服面扩张, H 减小直至到零时破坏;当 $H_s < H_d$ 时,屈服面收缩,如图7所示。

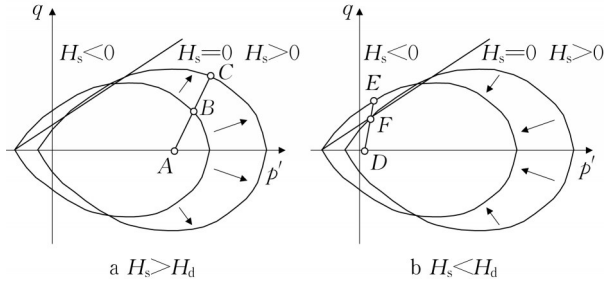


图7 考虑胶结作用的屈服面模型示意^[65]

Fig. 7 Schematic plots of yield surface enlarged by bond effect^[65]

由于塑性应变引起结构退化,边界面会因胶结作用的破坏向内边界面收敛。该模型概念清晰、简明直接地表征了胶结作用对屈服面的影响,能够反映随胶结物质的流失、胶结作用的退化以及硬化准则和屈服面的变化情况,奠定了基于剑桥模型进行胶结作用修正的概念基础。

4.1.2 考虑初始状态影响的结构退化模型

Lagioia等^[66]通过三轴压缩试验发现,膨胀性黏土岩的退化过程与初始结构性退化程度密切相关,其结构退化过程分为三个阶段:初始弹性完全可逆阶段(类岩石)、恒定应力下的破坏阶段(从类岩石向类土的转变)、硬化或软化阶段(类土)。在Gens-Nova边界面模型^[63]基础上提出了一个考虑初始状态的修正本构模型,如图8所示,表达式为

$$f = 3\beta(\gamma - 3) \ln \frac{p^*}{p_s + p_t + p_m} - \gamma J_{3\eta}^* + \frac{9}{4}(\gamma - 1)J_{2\eta}^* = 0 \quad (2)$$

其中

$$\begin{cases} p^* = p' + p_t \\ \eta_{ij}^* \equiv s_{ij}/p^* \\ J_{2\eta}^* \equiv \eta_{ij}^* \eta_{ij}^* \\ J_{3\eta}^* \equiv \eta_{ij}^* \eta_{jk}^* \eta_{ki}^* \end{cases} \quad (3)$$

式中: β, γ 分别为与屈服函数形状和最终状态包络线斜率有关的本构参数; p_s, p_t, p_m 分别为由初始弹性区 p_{s0}, p_{t0}, p_{m0} 开始变化的隐变量,其演化分别与塑性应变、抗拉强度、体积应变有关; p' 为有效应力; s_{ij} 为偏应力; η_{ij}^* 为应力比。

该模型将不同种类膨胀性黏土岩所处的初始状

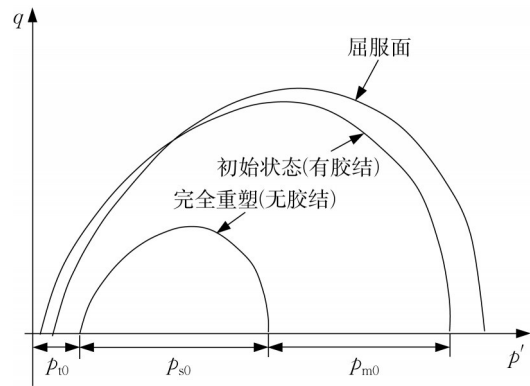


图8 考虑初始状态的修正模型屈服面示意^[66]

Fig. 8 Schematic plot of yield surface considering initial state^[66]

态定量化,分析了膨胀性黏土岩结构退化各阶段的强度、变形变化特征。对于高围压情况,模型计算结果与试验数据能够较好地吻合,然而对于低围压情况模型计算效果不理想,这与低围压情况下断裂带(或剪切带)的产生有关。由于该模型组成参数多而复杂,且参数的获取对试样的连续性和均匀性具有较高依赖性,因此该模型并不能完全反映天然膨胀性黏土岩的力学响应。

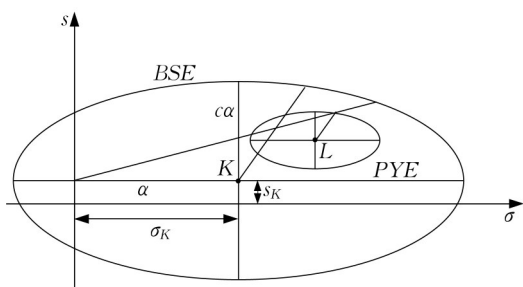
4.1.3 临界状态增量塑性模型

Kavvasas等^[67]发现Lagioia-Nova模型中的初始类岩石阶段产生的不可逆应变反映了微观结构的扰动。基于增量塑性理论和临界状态概念,构建了临界状态增量塑性模型。定义了2个屈服面:内部塑性屈服面(PYE)和外部胶结强度面(BSE)。PYE面限定了弹性区的范围,累积塑性变形超出PYE面,即产生结构退化。PYE面在形状上为中心在 $\sigma_L = s_L + \sigma_L I$ (I 为各向同性单位张量)的椭圆,完全包含于BSE平面内部。BSE面决定了屈服强度,累积塑性变形超出BSE面,土体刚度显著下降,产生明显破坏。图9描述了2个屈服面在张量空间中的变化情况。图中, K 和 L 分别为BSE和PYE的椭圆心; σ 为主应力, s 为偏应力张量, α 为BSE面的长轴, c 为偏心率。

BSE面在形状上为中心在 $\sigma_K = s_K + \sigma_K I$ 的椭圆,表达式为

$$\begin{cases} \text{PYE面: } f(\sigma, \sigma_L, \alpha) \equiv \frac{1}{c^2}(s - s_L):(s - s_L) + (\sigma - \sigma_L)^2 - (\xi\alpha)^2 = 0 \\ \text{BSE面: } f(\sigma, \sigma_K, \alpha) \equiv \frac{1}{c^2}(s - s_K):(s - s_K) + (\sigma - \sigma_K)^2 - \alpha^2 = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: ξ 为尺寸因子($\xi \ll 1$)。该模型通过引入内部塑

图 9 临界状态增量塑性模型屈服面示意^[67]Fig. 9 Schematic plot of critical state incremental plasticity model yield surface^[67]

性屈服面和外部胶结强度面,能够较好地模拟体积应变和偏应变引起的结构退化,并将不同受力条件下结构退化程度用外部屈服面的动态变化来描述,更为合理地反映不同胶结程度膨胀性黏土岩的结构退化现象。但该模型更注重结构退化—塑性应变的相互作用,就硬化方式而言,该模型仅考虑了各向同性硬化与运动硬化,不能反映各向异性硬化、旋转硬化的情况,因此,其适用范围受到一定限制。

4.1.4 基于扰动状态概念硬化参数的边界面模型

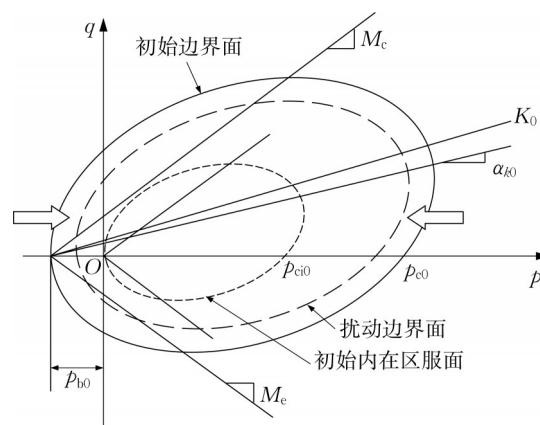
杨杰等^[68]提出了胶结吸力的概念,在临界状态理论和单面边界面模型的基础上,构建了基于扰动状态概念硬化参数的结构性边界面模型。模型从 4 个方面引入结构性退化的影响:弹性变形、结构屈服面大小、结构胶结吸力和屈服面各向异性。其屈服面 F 表达式为

$$F = \frac{3}{2} \frac{[s_{ij} - (p' + p_b)\alpha_{ij}]:[s_{ij} - (p' + p_b)\alpha_{ij}]}{[M(\theta)^2 - 3/2\alpha_{ij}:\alpha_{ij}]} + (p' + p_b)(p' - p_c) \quad (5)$$

式中: s_{ij} 为偏应力张量; p' 为有效平均应力; p_b 为胶结吸力; p_c 为边界面大小; α_{ij} 为屈服面旋转硬化参数; M 为临界状态应力比; θ 为洛德角。

根据模型概念(图 10),结构性原状土的初始边界面在受到扰动作用后逐渐向内退化为扰动屈服面,最内部屈服面 p_{ci0} 表示完全扰动屈服面,对应为完全重塑土的屈服面。

该模型同时考虑了结构性退化对弹性变形、结构性屈服面、胶结吸力和屈服面各向异性的影响,能够模拟一维压缩和三轴不排水剪切试验中天然结构性土应力应变行为的刚度、强度、体变特性和应变软化现象。然而,该模型只考虑了应力对结构性退化的作用。在实际工程中,膨胀性黏土岩往往会经历复杂的水—力耦合作用,吸力和应力路径改变都会引起结构性退化。因此,进一步考虑水—力耦合

图 10 边界面模型示意^[68]Fig. 10 Schematic plot of boundary surface model^[68]

作用对膨胀性黏土岩结构性的影响,有助于提升该模型工程实用性。

4.2 弹塑性损伤法

在经典土力学中,岩土材料的非线性应力应变关系归因于多孔介质骨架颗粒的滑动,因此多采用弹塑性模型进行模拟。然而膨胀性黏土岩在结构退化过程中不可避免地会产生裂纹、裂缝,引起岩土介质的力学不连续性,产生的不可逆变形与介质的塑性变形累积损伤密切相关。因此,研究人员提出采用损伤力学与弹塑性力学方法相结合建立膨胀性黏土岩的结构退化模型。

4.2.1 损伤—塑性流动弹塑性损伤模型

Chiarelli 等^[69]在 Hayakawa 等^[70]提出的 4 阶各向异性张量 D 的基础上提出损伤与塑性流动相互作用的弹塑性损伤模型。对于无损阶段的塑性行为,采用修正的 Drucker-Prager 屈服准则,对于损伤准则,根据拉应变与损伤演化的相关性,定义广义拉应变,为

$$\left\{ \begin{aligned} q &= \sqrt{\frac{3}{2} s_{ij} M_{ijkl}(D) s_{kl}} \\ M_{ijkl}(D) &= \frac{1}{2} (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) + \\ &\quad \frac{1}{2} c_{pm} (\delta_{ik} D_{jl} + D_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} D_{jk} + D_{il} \delta_{jk}) \\ f_d(\epsilon^+, D) &= \sqrt{\epsilon^+ : \epsilon^+} - (r_0 + r_1 \text{tr} D) = 0 \\ \epsilon^+ &= \sum_{k=1}^3 \epsilon_k H(\epsilon_k) \mathbf{V}^k \otimes \mathbf{V}^k \end{aligned} \right. \quad (6)$$

式中: c_{pm} 为损伤对塑性流动的影响参数; $H(\epsilon_k)$ 为主应变的单位阶跃函数; \mathbf{V}^k 为对应的主向量; ϵ^+ 为应变的拉伸分量;参数 r_0 、 r_1 分别定义为初始损伤阈值和损伤演化率。

该模型融合了弹塑性力学模型与损伤力学模型,能够较好地描述膨胀性黏土岩在剪胀、非相关关联塑性流动等变化过程中结构损伤引起的弹性性能退化、各向异性。然而,部分参数无法通过试验直接获取,如损伤对塑性应变的影响难以量化,需要通过试验数据拟合得到,其实际物理意义无法准确定义。

4.2.2 非饱和多孔介质弹塑性损伤模型

为了更好地描述膨胀性黏土岩的胀缩特性,Alizadeh等^[71]结合巴塞罗纳模型(BBM模型)与连续介质损伤力学(CDM)框架构建了非饱和多孔介质弹塑性损伤模型。模型采用净应力和吸力作为相互独立的应力状态变量,通过定义有效损伤吸力和有效损伤净应力将应力状态变量转化为损伤状态,进而表征塑性屈服面的损伤与渗透性的演化。对于损伤准则,在Chiarelli模型^[69]的基础上,假设损伤演化与广义拉应力有关,将损伤后的面积等效为有效面积 Ω ,则屈服函数是有效面积的函数,为

$$F_d(\epsilon^+, \Omega) = \sqrt{\frac{1}{2} g \epsilon^+ : g \epsilon^+} - C_0 - C_1(I_d; \Omega) \quad (7)$$

式中: C_0 和 C_1 为材料参数,与式(11)中的 r_0 、 r_1 类似。

对于弹塑性准则,将BBM模型推广到非等温公式,假设前期固结应力与损伤吸力、累积热塑性应变和温度有关,则

$$\begin{cases} F_p = \hat{q}^2 - M^2(\hat{p} + \hat{p}_s)(\hat{p}_0 - \hat{p}) = 0 \\ \hat{p}_s = \hat{p}_s(\hat{s}, T, \Omega) \\ \hat{p}_0 = \hat{p}_0(\hat{s}, \epsilon_s^e, T, \Omega) \end{cases} \quad (8)$$

式中: \hat{q} 为有效损伤偏应力; M 为临界状态线斜率; \hat{p} 为有效损伤净应力; \hat{p}_s 为黏聚力随吸力或损伤的变化; \hat{p}_0 为非饱和状态的表现前期固结应力; \hat{s} 为有效损伤吸力; T 为温度。

该模型还提出了将弹性刚度退化作为损伤程度的测定方法,通过合理简化损伤后受力面积、损伤区面积,较为准确地量化损伤。不仅考虑了应力,还考虑了温度和渗透对结构退化的影响,能够高效地模拟热—水—力耦合条件下膨胀性黏土岩热传导性、渗透性、应力应变特性等,然而使用弹性刚度退化描述损伤程度不够全面,使得模型计算值小于实际损伤程度。

4.2.3 干湿循环条件下的结构损伤退化模型

Pineda等^[22]发现黏土岩的累积损伤应变与干湿循环次数呈正相关,因而提出了干湿循环条件下的

结构损伤退化模型。该模型定义损伤应变 $\epsilon_v^{\text{damage}}$ 为不可逆应变,在达到较高损伤水平时,力学性质(杨氏模量、剪切模量)达到残余状态,如图11所示。

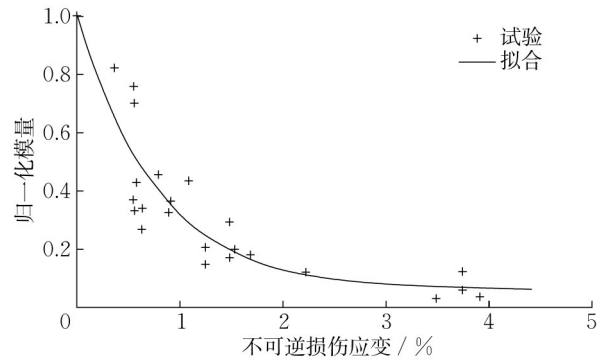


图11 杨氏模量和剪切模量的退化曲线^[22]

Fig. 11 Degradation curve of Young's modulus and shear modulus^[22]

因此得到弹性模量 E 、剪切模量 G 和抗拉强度 σ_t 的退化公式为

$$\begin{cases} E = E_0 \{ [(1 - D_0) - r] e^{-\chi |\epsilon_v^{\text{damage}}|} + r \} \\ G = G_0 \{ [(1 - D_0) - r] e^{-\chi |\epsilon_v^{\text{damage}}|} + r \} \\ \sigma_t = \sigma_{t0} \{ [(1 - D_0) - r] e^{-\chi |\epsilon_v^{\text{damage}}|} + r \} \end{cases} \quad (9)$$

式中: D_0 为损伤参数; χ 为与退化速率有关的参数; r 为残余值。

显然,这种方法采用了较为简单直接的曲线拟合,虽然能在一定程度上反映干湿循环作用对应力应变特性的影响,却无法反映其对结构退化的影响机制。在实际工程中,膨胀性黏土岩往往会经历复杂的水—力作用下的干湿循环,因此,该模型存在一定的局限性。

4.3 结构简化法

对微观结构和矿物成分研究发现,膨胀性黏土岩的主要组分为黏土基质和胶结物质。这一发现是结构简化法构建膨胀性黏土岩本构模型的基础。将膨胀性黏土岩概化为由黏土基质和非膨胀性胶结物质构成的复合材料(图12),2种组成具有单独的变形特性与本构模型,通过应变协调等原则进行耦合,建立结构退化模型。

该方法最早由Vaunat等^[72]提出,Pinyol等^[2]在其基础上进行了修正,形成了较为完善的结构退化模型。针对胶结结构和土体基质分别采用单独的破坏准则,两者独立、不相互影响。黏土基质结构用微观—宏观双重孔隙结构描述。其中,微观孔隙为土颗粒集合体内部孔隙,宏观孔隙为集合体间孔隙。

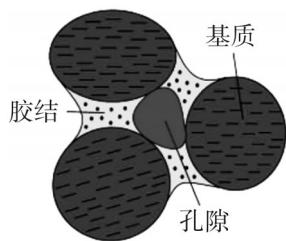


图 12 结构简化后的土体结构概念

Fig. 12 Schematic arrangement of soil structure after structural simplification

胶结物质主要分布于宏观孔隙中。外力由基质和胶结物质共同承担,则外部体积应变 ϵ_v^{ext} 表现为宏观孔隙应变 ϵ_v^V 、胶结物质应变 ϵ_b^b 与微观孔隙应变 ϵ_v^m 之和。基质部分采用 BExM 模型^[73],刚度较大、脆性显著的胶结物质采用准脆性材料理论和弹性损伤定律,则结构退化模型最终形式为

$$p^{\text{ext}} \Delta \epsilon_v^{\text{ext}} + q^{\text{ext}} \Delta \epsilon_q^{\text{ext}} = p_M \Delta \epsilon_v^{\text{ext}} + q_M \Delta \epsilon_v^{\text{ext}} + \frac{\chi C_b}{1 + \chi C_b} (p_b \Delta \epsilon_v^{\text{ext}} + q_b \Delta \epsilon_v^{\text{ext}}) \quad (10)$$

式中: p^{ext} 、 q^{ext} 分别为总净应力、总偏应力; $\Delta \epsilon_v^{\text{ext}}$ 、 $\Delta \epsilon_q^{\text{ext}}$ 分别为总体积应变、总偏应变的变化值; p_M 、 q_M 分别为黏土基质净应力、黏土基质偏应力。

该模型有效结合了黏土基质的 BExM 模型 (Barcelona Expansive Model) 与胶结物质的损伤模型,利用虚功原理、应变相容性实现了 2 种物质组成的应力、应变分配,在对吸力变化产生的膨胀性黏土岩结构退化,尤其是在干湿循环作用下的模拟中能够达到较好的效果。能够模拟当吸力、应力变化使黏土基质产生不可逆的塑性应变时,胶结结构发生损伤破坏,促进进一步的应变,使得膨胀性黏土岩总体强度、刚度、脆性降低而延性增加。但膨胀性黏土岩的矿物组成中还包含非膨胀性、非胶结性的物质,另外,不同质地的胶结物质(如铁质、钙质、泥质和次生矿物)的赋存形式有所差异,有些胶结物质不仅独立存在于宏观孔隙中,也部分存在于微观孔隙、黏土片层中,或者以包裹黏土颗粒的形式存在,模型假设并不能很好地反映膨胀性黏土岩的物质结构组成。

5 结论与展望

膨胀性黏土岩是一种介于土和岩石之间的过渡性岩土体。复杂的工程环境(干湿循环、加卸载等)会引起膨胀性黏土岩结构退化,进而劣化其工程性

质,对实际工程造成不可估量的影响。近几十年来,国内外研究人员围绕膨胀性黏土岩结构退化这一主题,从结构性退化的宏微观表征、退化机理和模型等方面开展了相关的试验和理论研究工作,取得了一些重要认识:

(1)在宏观层面,采用物理指标(膨胀性)、水—力指标(持水性)、力学指标(抗拉、抗压、抗剪强度)作为宏观指标。

(2)在微观层面,采用定性分析(扫描电子显微镜法等)和定量评价(孔径分布情况、宏微观孔隙比)方法获取微观指标。

(3)膨胀性黏土岩的结构退化机理与裂缝的演化过程密切相关,主要包含水致退化和力致退化 2 个方面。

(4)膨胀性黏土岩结构退化模型的构建方法可总结为经验修正法、弹塑性损伤法、结构简化法。

尽管目前国内外关于该课题的研究已取得多方面的进展,但仍有部分难题尚未攻破。为此,笔者认为今后的研究突破点有以下几个方面:

(1)评判依据方面:由于矿物成分、胶结程度和退化程度的不同,不同地区膨胀性黏土岩的性质存在较大的离散性,体现出的各种宏微观性质的退化性差异较大,缺少统一的评判依据。

(2)试验研究方面:现有试验很难量化微观的胶结作用对宏观指标的影响程度,有必要结合多种微观手段,动态监测宏微观性质演化规律,深入研究结构性退化的机理。

(3)退化模型方面:经验修正法得到的退化模型更关注应力作用造成的宏观指标的变化,对于复杂水—力耦合作用下的退化响应难以描述,也不能反映微观层面的变化;在弹塑性损伤法得到的退化模型中,损伤参数的获取、损伤程度的测量、损伤对其他参数的影响难以量化;在结构简化法得到的退化模型中,对于结构组成的假设在一定程度上过度简化,需结合胶结物质多种分布情况和赋存形式进行修正完善。

作者贡献声明:

王 琼:论文框架提出,论文核对。

徐一禾:论文框架设计,论文撰写与修改。

苏 薇:论文构思、修改与核对。

谢 江:论文核对,图片修改。

叶为民:全文审阅。

陈永贵:全文审阅。

参考文献:

- [1] 地质矿产部地质辞典办公室. 地质大辞典(二)矿物、岩石、地球化学分册[M]. 北京:地质出版社, 2005.
Geological Dictionary Office, Ministry of Geology and Minerals. Geological dictionary (II) minerals, rocks, geochemistry division [M]. Beijing: Geological Publishing Co. Press, 2005.
- [2] PINYOL N, VAUNAT J, ALONSO E E. A constitutive model for soft clayey rocks that includes weathering effects[J]. *Géotechnique*, 2007, 57 (2): 137.
- [3] PETTIJOHN F J. Sedimentary rocks[M]. New York: Harper and Brothers, 1957.
- [4] GENS A. Soil - environment interactions in geotechnical engineering[J]. *Géotechnique*, 2010, 60 (1): 3.
- [5] THURY M, BOSSART P. The Mont Terri rock laboratory, a new international research project in a Mesozoic shale formation[J]. *Engineering Geology*, 1999, 52 (3/4): 347.
- [6] KANJI M A. Critical issues in soft rocks[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2014, 6 (3): 186.
- [7] PINEDA J A, SHENG D C. Environmental degradation of clayey rocks [J]. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, 2019, 7 (2): 8.
- [8] GROB H. Swelling and heave in Swiss tunnels[J]. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 1976, 14 (1): 55.
- [9] EINSTEIN H H. Tunneling in swelling rock[J]. *Underground Space*, 1979, 4 (1): 51.
- [10] ALONSO E E, PINEDA J A, CARDOSO R. Degradation of marls; two case studies from the Iberian Peninsula [J]. *Geological Society London Engineering Geology Special Publications*, 2010, 23 (1): 47.
- [11] GIOVANNI B, GIULIO P, UGO R, *et al.* The San Donato Tunnel (Florence) [C]// *Large Underground Openings*. Florence:[S.n.], 1986: 61-69.
- [12] PETERSON R, JASPAR J L, RIVARD P J, *et al.* Limitations of laboratory shear strength in evaluating stability of highly plastic clays [C]// *Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils*. Colorado: [S.n.], 1960: 765-791.
- [13] 张永双. 中国东部上第三系硬黏土的工程地质特性及边坡开挖工程环境效应研究[D]. 北京:中国科学院地质与地球物理研究所, 2000.
ZHANG Yongshuang. Engineering geological characteristics and environmental effects of slope excavation on Upper Tertiary hard clay in eastern China [D]. Beijing: Institute of Geology and Geographics, Chinese Academy of Sciences, 2000.
- [14] 张永双, 曲永新, 周瑞光. 南水北调中线工程上第三系膨胀性硬黏土的工程地质特性研究[J]. *工程地质学报*, 2002, 10 (4): 367.
ZHANG Yongshuang, QU Yongxin, ZHOU Ruiguang. Engineering geological properties of neogene hard clay along the middle line of the north-south diversion water project in China[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2002, 10 (4): 367.
- [15] 张永双, 曲永新. 硬土/软岩(岩土间新类型)的确认及其判别分类的探讨[J]. *工程地质学报*, 2000, 8: 309.
ZHANG Yongshuang, QU Yongxin. Exploration of the identification of hard soil/soft rock (a new type of geotechnical interface) and its discriminatory classification [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2000, 8: 309.
- [16] HATHEWAY A W. The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974—2006[J]. *Environmental & Engineering Geoscience*, 2009, 15 (1): 47.
- [17] 沈珠江. 土体结构性的数学模型——21世纪土力学的核心问题[J]. *岩土工程学报*, 1996, 1: 95.
SHEN Zhujiang. Mathematical modelling of soil structural properties — a central problem of soil mechanics in the 21st century [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1996, 1: 95.
- [18] 龚晓南, 熊传祥, 项可祥, 等. 黏土结构性对其力学性质的影响及形成原因分析[J]. *水利学报*, 2000, 31 (10): 43.
GONG Xiaonan, XIONG Chuanxiang, XIANG Kexiang, *et al.* The formation of clay structure and its influence on mechanical characteristics of clay [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2000, 31(10): 43.
- [19] ZHANG C L, WIECZOREK K, XIE M L. Swelling experiments on mudstones[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2010, 2 (1): 44.
- [20] PICARELLI L, MAIO C D. Deterioration processes of hard clays and clay shales [J]. *Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications*, 2010, 23 (1): 15.
- [21] ALONSO E, ALCOVERRO J. Swelling and degradation of argillaceous rocks [C]// *Proceedings of the 3rd International Conference on Unsaturated Soils*. Recife: Balkema, 2002: 37-70.
- [22] PINEDA J A, ALONSO E E, ROMERO E. Environmental degradation of claystones[J]. *Géotechnique*, 2014, 64 (1): 64.
- [23] YOUN H, TONON F. Effect of air-drying duration on the engineering properties of four clay-bearing rocks in Texas[J]. *Engineering Geology*, 2010, 115 (1): 58.
- [24] ESPITIA J M, CAICEDO B, VALLEJO L. Effect of suction and stress on Poisson's ratio of argillaceous rocks [J]. *Géotechnique Letters*, 2017, 7 (1): 53.
- [25] PINEDA J A, ROMERO E, GRACIA M D, *et al.* Shear strength degradation in claystones due to environmental effects [J]. *Géotechnique*, 2014, 64 (6): 493.
- [26] NAHAZANAN H, ROSLEY I S, YUSOFF Z M. Shear behavior of crushed mudstone and claystone under macrostructural and microstructural approaches [J]. *Journal of Testing and Evaluation*, 2021, 49 (3): 2017.
- [27] ERGULER Z A, ULUSAY R. Water-induced variations in mechanical properties of clay-bearing rocks [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2009, 46 (2): 355.

- [28] WILD K M, WALTER P, AMANN F. The response of Opalinus Clay when exposed to cyclic relative humidity variations[J]. *Solid Earth*, 2017, 8 (2): 351.
- [29] GAUTAM T P, SHAKOOR A. Comparing the slaking of clay-bearing rocks under laboratory conditions to slaking under natural climatic conditions [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49: 19.
- [30] DOOSTMOHAMMADI R, MOOSAVI M, MUTSCHLER T, *et al.* Influence of cyclic wetting and drying on swelling behavior of mudstone in south west of Iran[J]. *Environmental Geology*, 2009, 58 (5): 999.
- [31] HE Y, CUI Y J, YE W M, *et al.* Effects of wetting-drying cycles on the air permeability of compacted Téguline clay [J]. *Engineering Geology*, 2017, 228 (1): 173.
- [32] ZENG Z X, KONG L W. Effect of wetting - drying - freezing - thawing cycles on the swelling behaviour of the Yanji mudstone [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2019, 78 (15): 1.
- [33] American Society for Testing and Materials. Standard test methods for one-dimensional consolidation properties of soils using incremental loading: D2435-04 [S]. Conshohocken: ASTM International, 2004.
- [34] American Society for Testing and Materials. Standard test methods for one-dimensional swell or settlement potential of cohesive soils: D4546-21 [S]. Conshohocken: ASTM International, 2021.
- [35] WANG G, WEI X. Modeling swelling - shrinkage behavior of compacted expansive soils during wetting - drying cycles [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2015, 52 (6): 783.
- [36] TRIPATHY S, RAO K S S. Cyclic swell - shrink behaviour of a compacted expansive soil [J]. *Geotechnical & Geological Engineering*, 2009, 27 (1): 89.
- [37] ALONSO E E, ROMERO E, HOFFMANN C, *et al.* Expansive bentonite - sand mixtures in cyclic controlled-suction drying and wetting [J]. *Engineering Geology*, 2005, 81 (3): 213.
- [38] AL-HOMOUD A S, BASMA A A, MALKAWI A I H, *et al.* Cyclic swelling behavior of clays [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1995, 121 (7): 562.
- [39] PEJON O J, ZUQUETTE L V. Analysis of cyclic swelling of mudrocks [J]. *Engineering Geology*, 2002, 67 (1/2): 97.
- [40] 朱崇辉, 刘俊民, 严宝文, 等. 非饱和黏性土的抗拉强度与抗剪强度关系试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2008(S2): 3453.
ZHU Chonghui, LIU Junmin, YAN Baowen, *et al.* Experimental study on relationship between tensile and shear strength of unsaturation clay earth material [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008(S2): 3453.
- [41] 于洪丹, 陈卫忠, 谭贤君, 等. 饱和过程中黏土岩变形和水化膨胀特性研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41 (S2): 3534.
YU Hongdan, CHEN Weizhong, TAN Xianjun, *et al.* Deformation and hydration swelling characteristics of clay rock during saturation [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41 (S2): 3534.
- [42] 冯延云, 张晓明, 丁树文, 等. 干湿循环作用下崩岗土体抗拉强度的衰减性分析 [J]. *水土保持学报*, 2020, 34 (3): 168.
FENG Yanyun, ZHANG Xiaoming, DING Shuwen, *et al.* Analysis of attenuation of tensile strength of collapsing soil under the action of dry and wet cycles [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34 (3): 168.
- [43] 赵天宇, 王锦芳. 考虑密度与干湿循环影响的黄土土水特征曲线 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2012, 43 (6): 2445.
ZHAO Tianyu, WANG Jinfang. Soil-water characteristic curve for unsaturated loess soil considering density and wetting-drying cycle effects [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2012, 43(6): 2445.
- [44] 樊金平. 胶东白垩系泥岩干湿循环抗剪强度试验研究 [J]. *铁路工程技术与经济*, 2020, 35 (6): 23.
FAN Jinping. Study on shear strength of cretaceous mudstone under dry-wet cycles in eastern Shandong [J]. *Railway Engineering Technology and Economy*, 2020, 35(6): 23.
- [45] LEROUEIL S, VAUGHAN P R. The general and congruent effects of structure in natural soils and weak rocks [J]. *Géotechnique*, 1990, 40 (3): 467.
- [46] CAFARO F, COTECCHIA F. Structure degradation and changes in the mechanical behaviour of a stiff clay due to weathering [J]. *Géotechnique*, 2001, 51 (5): 441.
- [47] MONTES H G, DUPLAY J, MARTINEZ L, *et al.* Structural modifications of Callovo-Oxfordian argillite under hydration/dehydration conditions [J]. *Applied Clay Science*, 2004, 25 (3/4): 187.
- [48] WU Q, LIU Y X, TANG H M, *et al.* Experimental study of the influence of wetting and drying cycles on the strength of intact rock samples from a red stratum in the Three Gorges Reservoir area [J]. *Engineering Geology*, 2023, 314: 107013.
- [49] GASC-BARBIER M, TESSIER D. Structural modifications of a hard deep clayey rock due to hygro-mechanical solicitations [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2007, 7 (3): 227.
- [50] GUGLIELMI S, COTECCHIA F, CAFARO F. Microstructural changes underlying the macro-response of a stiff clay [C]// *Micro to MACRO Mathematical Modelling in Soil Mechanics: Trends in Mathematics*. Reggio Calabria: Birkhäuser, Cham, 2018: 89-97.
- [51] PINEDA J A, ROMERO E, GÓMEZ S, *et al.* Degradation effects at microstructural scale and their consequences on macroscopic behaviour of a slightly weathered siltstone [C]// *International Symposium on Geomechanics & Geotechnics: from Micro to Macro*. Shanghai: International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2010: 73-78.
- [52] MONROY R, ZDRAVKOVIC L, RIDLEY A. Evolution of microstructure in compacted London Clay during wetting and loading [J]. *Géotechnique*, 2010, 60 (2): 105.
- [53] HICHER P Y, SHAO J F. Constitutive modeling of soils and

- rocks[M]. London: John Wiley & Sons., 2013.
- [54] 巩学鹏,唐朝生,施斌,等.黏性土干/湿过程中土结构演化特征研究进展[J].工程地质学报,2019,27(4):775.
GONG Xuepeng, TANG Chaosheng, SHI Bin, *et al.* Evolution of soil microstructure during drying and wetting[J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(4): 775.
- [55] WANG L L, BORNERT M, HÉRIPRÉ E, *et al.* Irreversible deformation and damage in argillaceous rocks induced by wetting/drying[J]. Journal of Applied Geophysics, 2014, 107(1): 108.
- [56] WANG Q, MENG Y H, SU W, *et al.* Cracking and sealing behavior of the compacted bentonite upon technological voids filling[J]. Engineering Geology, 2021, 292(1): 106244.
- [57] LAIRD D A. Influence of layer charge on swelling of smectites [J]. Applied clay science, 2006, 34(1-4): 74.
- [58] SEEDSMAN R W. Characterizing clay shales [M]. Sydney: Pergamon, 1993.
- [59] WANG L L. Micromechanical experimental investigation and modelling of strain and damage of argillaceous rocks under combined hydric and mechanical loads [D]. Paris: Ecole Polytechnique X, 2012.
- [60] WANG H, CUI Y J, VU M N, *et al.* Investigation into the hydration-and compression-induced damage of Callovo-Oxfordian claystone[J]. Acta Geotechnica, 2024, 19: 231.
- [61] AVERSA S, EVANGELISTA ALDO, LEROUEIL S, *et al.* Some aspects of the mechanical behaviour of "structured" soils and soft rocks [C] // Proc. International Symposium on Geotechnical Engineering of Hard Soils-Soft Rocks Tenutosi. Athens: A A Balkema, 1993: 1-10.
- [62] MOHAJERANI M, DELAGE P, MONFARED M, *et al.* Oedometric compression and swelling behaviour of the Callovo-Oxfordian argillite[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, 48(4): 606.
- [63] BJERRUM L. Engineering geology of normally consolidated marine clays as related to settlements of buildings [J]. Géotechnique, 1967, 17(2): 83.
- [64] ROUAINIA M, MUIR D W. A kinematic hardening constitutive model for natural clays with loss of structure [J]. Géotechnique, 2000, 50(2): 153.
- [65] GENS A, NOVA R. Conceptual bases for a constitutive model for bonded soils and weak rocks [J]. Geotechnical Engineering of Hard Soils-Soft Rocks, 1993, 1(1): 485.
- [66] LAGIOIA R, NOVA R. An experimental and theoretical study of the behaviour of a calcarenite in triaxial compression [J]. Géotechnique, 1995, 45(4): 633.
- [67] KAVVADAS M, AMOROSI A. A constitutive model for structured soils[J]. Géotechnique, 2000, 50(3): 263.
- [68] 杨杰,尹振宇,黄宏伟,等.基于扰动状态概念硬化参量的结构性黏土界面模型[J].岩土工程学报,2017,39(3):554.
YANG Jie, YIN Zhenyu, HUANG Hongwei, *et al.* Bounding surface plasticity model for structured clays using disturbed state concept-based hardening variables [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(3): 554.
- [69] CHIARELLI A S, SHAO J F, HOTEIT N. Modeling of elastoplastic damage behavior of a claystone [J]. International Journal of Plasticity, 2003, 19(1): 23.
- [70] HAYAKAWA K, MURAKAMI S. Thermodynamical modeling of elastic-plastic damage and experimental validation of damage potential [J]. International Journal of Damage Mechanics, 1997, 6(4): 333.
- [71] ALIZADEH A, GATMIRI B. An elasto-plastic damage model for argillaceous geomaterials [J]. Applied Clay Science, 2017, 135: 82.
- [72] VAUNAT J, GENS A. Bond degradation and irreversible strains in soft argillaceous rock [C] // Proceedings of the 12th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2003: 479-484.
- [73] GENS A, ALONSO E E. A framework for the behaviour of unsaturated expansive clays [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1992, 29(6): 1013.