

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2019.02.012

黄土水敏性及其时空分布规律

孙萍萍^{1,2}, 张茂省^{2*}, 冯立², 王帅², 党心悦², 刘蒙蒙²

(1. 西北大学地质系/大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069; 2. 中国地质调查局西安地质调查中心/西北地质科技创新中心, 自然资源部黄土地质灾害重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要:黄土是一种具有水敏性的特殊土,天然状态下可以长期保持直立高陡的状态,遇水后呈现出崩解、湿陷、滑动、流变等变形行为。开展黄土的水敏性特性及其时空分布规律研究,对指导黄土高原工程建设和防灾减灾具有重要的现实意义。笔者在非饱和土力学的框架下,引入吸应力的概念,对黄土的水敏性及其力学机制进行解释,即水敏性的本质是,随着含水率的增大,土体内部吸应力逐渐减小,对应不同的外界边界条件时,产生崩解、湿陷、滑动、流变等不同的宏观变形行为。在黄土高原从西到东、从北向南不同空间位置的黄土剖面的不同的层位,系统采集黄土样品,基于TRIM 试验测试技术,开展样品的土-水特征曲线与吸应力特征曲线测试。试验结果表明,脱湿与吸湿条件下的各曲线呈现相同的变化规律,均存在3个明显的特征段。黄土对水的敏感程度随其沉积年代和在黄土高原分布位置的不同,呈现出规律性的变化。空间上,从西向东、由北向南,水敏性增强;时间上,沉积年代由老到新,水敏性增强。

关键词:黄土;水敏性;土水特征曲线;时空分布规律;黄土高原

中图分类号:P641

文献标志码:A

文章编号:1009-6248(2019)02-0117-08

Water Sensitivity of Loess and Its Spatial-Temporal Distribution on the Loess Plateau

SUN Pingping^{1,2}, ZHANG Maosheng^{2*}, FENG Li², WANG Shuai², DANG Xinyue², LIU Mengmeng²

(1. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory for Geo-hazards in Loess Area, MNR, Xi'an Center of China Geological Survey/ Northwest China Center for Geoscience Innovation, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: Loess is a kind of special soil with high water sensitivity, and the loess with natural water content can keep high and steep stable for a long time. However, when water comes, it shows strong water sensitivity of disintegration, dissolution, liquefaction, creep, and sliding. Research on the water sensitivity of loess and its special-temporal distribution has a practical significance to guide the engineering constructions in the unsaturated loess area. Based on the theory of unsaturated loess, the concept of suction stress is introduced to explain the water sensitivity of loess. The essence of water sensitivity is, the suction stress decreases with the increase of water

收稿日期:2019-02-04;**修回日期:**2019-05-05

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC1504700)、国家自然科学基金重点项目(41530640)、中国地质调查局项目(DD20160261、DD20189270)

作者简介:孙萍萍(1983-),女,高级工程师,博士研究生,主要从事黄土工程特性与黄土地质灾害研究。E-mail:sunpingping203@gmail.com

***通讯作者:**张茂省(1962-),男,研究员,博导,主要从事水工环地质调查工作。E-mail:xazms@126.com

content, and the different deformation behaviors will occur under different boundary conditions. Loess samples have been collected along sections from west to east and north to south of the Loess Plateau for obtaining their curves of SWCC and SSCC with TRIM technique. The results show that, these curves change similarly and show three distinct sections under both drying and wetting conditions. The water sensitivity of loess varies regularly with sedimentary dates and locations in the Loess Plateau. From west to east, north to south, the water sensitivity of loess is increasing; In terms of time, the water sensitivity of loess is increasing from old to new sedimentary age.

Keywords: loess; water sensitivity; SWCC; spatial and temporal distribution; Loess Plateau

0 引言

干旱与半干旱地区特殊的沉积和赋存环境使得黄土呈现典型的非饱和特性,天然状态下的黄土可以长期保持直立高陡的状态,然而在降雨、灌溉、蓄水等水力作用下,黄土呈现出崩解、湿陷、流变、液化、滑动等不同的变形行为(谢定义,1999),表现出极强的水敏性(张茂省等,2016)。这也使得黄土高原成为世界上水土流失最为严重的地区,塑造了塬、梁、峁等破碎地形和沟壑纵横的黄土地貌景观,成为中国地质灾害最为发育的地区之一(彭建兵等,2014;徐张建等,2007)。

不同区域、不同沉积年代的黄土,因其沉积环境、孔隙结构、物质成分、颗粒组成等的不同,黄土的工程特性也存在随空间和时间的渐变趋势(孙建中,2005)。对于已有黄土工程特性的时空分布规律研究,多集中于对黄土湿陷性分区的研究(高国瑞,1980;雷祥义,1987;许领等,2009;张珊珊等,2019)。

黄土的水敏性是其非饱和特性的一种反映,从非饱和土力学角度,探讨其随黄土沉积年代与空间分布的变化规律,对于防灾减灾和解决各类工程面临的问题具有现实意义(HOUSTON et al., 1994)。基于此,对黄土“水敏性”进行定义,明确黄土遇水后发生的崩解、湿陷、滑动、流变、液化等现象,均属于黄土水敏性的表象或力学行为。选取横跨黄土高原东西、南北2条剖面上的黄土(陕北洛川剖面、关中白鹿原剖面、榆林绥德剖面、陕西泾阳南塬剖面、陇西黑方台地区, S1-S14 和 L1-L15 的不同土层样品),利用瞬态脱湿与吸湿试验装置(Transient Water Release and Imbibition Method, 简称 TRIM),测定了不同区域和不同沉积年代黄土

的土水特征曲线、渗透特征曲线及吸应力特征曲线。结合已有的在黄土第四纪地质与气候环境、黄土工程特性方面的研究成果(刘东生,1985;张宗祜,1989;王永炎等,1990),基于吸应力的非饱和土力学理论,分析了黄土水敏性随空间分布与沉积年代的变化规律,以期为黄土高原地区的工程实践和防灾减灾提供理论依据。

1 黄土的水敏性

1.1 黄土水敏性的定义

黄土遇水后,其内部微观力学表现为吸力的变化,宏观行为表现为相应的形变。黄土遇水后的水理-力学特性通常用土-水特征曲线(Soil Water Characteristic Curve, 简称 SWCC)来描述。然而,现有的 SWCC 概念、测试方法和应用等多来源于土壤学,由于土壤学和非饱和土力学研究侧重点的差异,直接将土壤学中的相关研究成果应用到非饱和土力学中并不完全合适。为了更好的将 SWCC 与土壤学尚未涉及到的变形、强度等问题建立联系,NING LU 在 TERZAGHI 的饱和土有效应力原理和 BISHOP、FREDLUND 和 MORGENSTERN 等基质吸力概念的基础上,提出了吸应力的概念(LU et al., 2006),认为吸应力属于“应力”范畴,是非饱和土有效应力的一部分,较好的与岩土工程涉及的变形与强度等问题建立起了联系。

本次对黄土水敏性的定义,在非饱和土力学的框架下引入吸应力的概念,明确将黄土遇水后发生的崩解、湿陷、滑动、流变、液化等各类宏观变形行为与其内部微观吸力变化相统一。其本质是含水量变化后吸应力的变化及应变响应,即随着含水率的增大,黄土的吸应力和有效应力相应地减弱,而渗透性

增强,从而导致各种宏观变形的发生。之所以出现崩解、湿陷、滑动、流变、液化等不同的宏观变形行为,是因为黄土所处的自由边界、四周侧限边界、存在临空面等边界条件的不同。

图 1 是标准的吸湿与脱湿过程的吸应力特征曲线。含水率从 A 降低到 B,从 C 增加到 D,其含水率变化量为 $\Delta\theta$,吸应力变化为 $\Delta\sigma^s$,而吸应力的如何变化受到了参数进气值 α 、孔径分布参数 n 、残余体积含水率 θ_r 等的影响。

由图 1 可以看出,存在 2 个特征点,即土体进气

值 α 和对应的残余含水率 θ_r ,以此为分界点,可将吸应力特征曲线分为 3 个典型区段,各个区段分别与非饱和土中不同的水气状态相对应。

边界效应段:土体接近饱和,含水量变化下,接近饱和土力学特性。

过渡段:土体内部形成连续的水气通道,水分变化迅速,自由水开始大量排出。

非饱和残余段:水气完全连通,土体内部主要为结合水和结晶水,对应较高的吸应力值,随着吸应力的增大含水量基本趋于稳定。

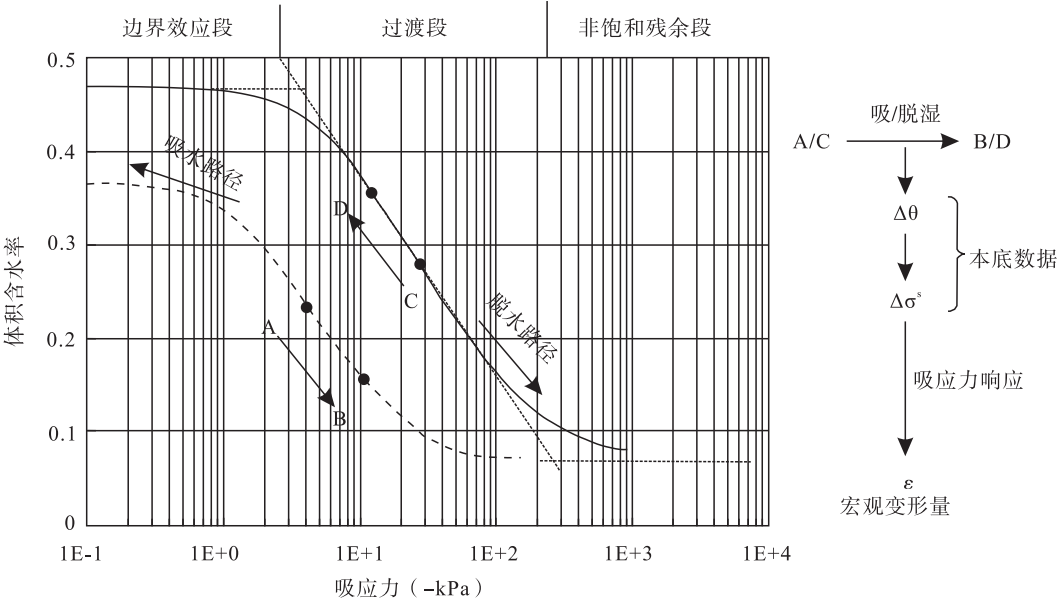


图 1 黄土的吸应力特征曲线及水敏性定义框架图

Fig. 1 Suction stress curve and concept of water sensitivity of loess

1.2 基质吸力与吸应力

吸应力与传统的基质吸力是定义在不同空间尺度具有不同内涵的 2 个名词。其中,基质吸力是储存在单位体积土水中的机械能,而吸应力是存储在单位代表性单元体中的机械能,二者定义的空间尺度不同。单位体积土水的规模可能几十纳米或者更小,而孔隙气压和孔隙水压的概念是建立在孔隙尺度的代表性单元体中。因此,在大于数十纳米,但小于弯液面和孔隙气泡的尺度内定义吸力才更有实际意义。吸应力正是定义在可量化孔隙气压、孔隙水压、物理-化学作用力以及弯液面的尺寸和几何形状的代表性单元体中,与基质吸力定义的“单位体积土水”相比较,更具有代表性。

此外,根据传统的非饱和土力学,认为基质吸力

是由负孔隙水压力和表面张力综合作用在非饱和粒状颗粒骨架内产生的粒间作用力,宏观表现为拉力作用,可使作用范围内的土颗粒相互靠近,收缩水膜受到土颗粒表面向外的拉力,土颗粒则受到水膜向内的切向拉力,因此,任意 2 个土颗粒受表面张力作用都有相互靠近的趋势。吸应力是包含了基质吸力、范德华力、渗透力等在内的多参数的综合表征。从孔隙和颗粒接触尺度,包含了 5 个易于理解的力,即由负的孔隙水压引起的粒间张性吸引力,作用在气-液交界面处的表面张性吸力或毛细作用力,双电层力,范德华吸引力和 Born 原子排斥力。因此,吸应力与基质吸力或饱和度存在一一对应的关系(LU et al., 2004)。

$$\sigma^s = -S_e(u_a - u_w)$$

$$\begin{aligned}&= -\frac{S-S_r}{1-S_r}(u_a-u_w) \\&= -\frac{\theta-\theta_r}{\theta_s-\theta_r}(u_a-u_w)\end{aligned}$$

式中： σ^s 为吸应力(kPa)； S 为饱和度(%)，为代表性单元体中液体体积与孔隙体积之比； θ 为体积含水率(%)，为单元体内液体体积与总体积之比； S_r 为残余饱和度(%)； θ_r 为残余体积含水率(%)； θ_s 为饱和体积含水率(%)； S_e 为有效饱和度(%)； u_a 为孔隙气压(kPa)； u_w 为孔隙水压(kPa)； u_a-u_w 即为基质吸力(kPa)。

图2为吸应力特征曲线与土-水特征曲线关系图，图中阴影区域面积为对应的吸应力值。从图2中可以看出，基质吸力与吸应力具有一一对应得关系，且二者变化趋势一致。

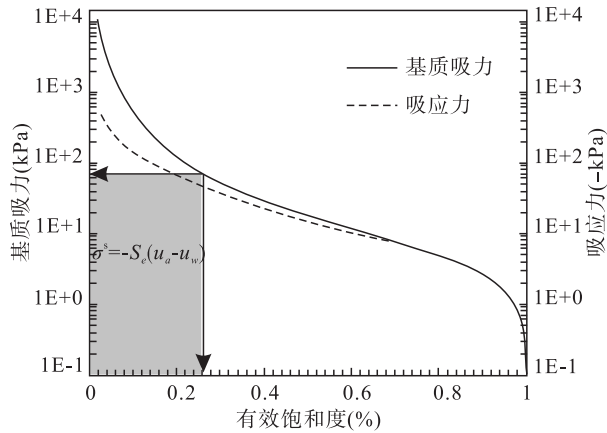


图2 黄土基质吸力与吸应力的关系曲线图

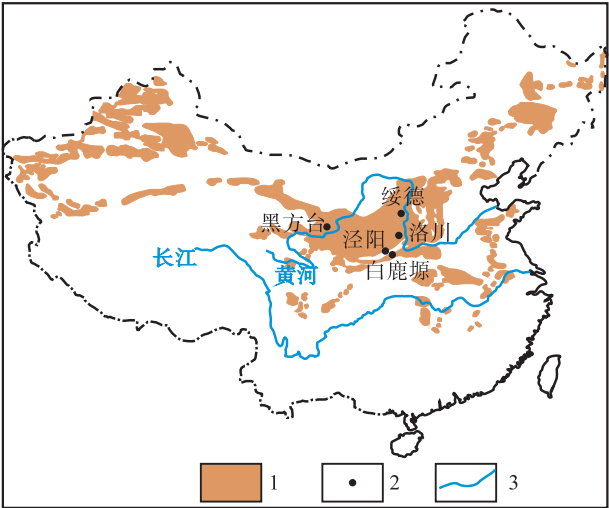
Fig. 2 Relationship between the matrix suction and the suction stress curve of loess

2 黄土水敏性时空分布规律

2.1 样品采集

依据黄土高原黄土沉积的区域特征，结合已有的典型黄土剖面研究成果，沿黄土高原东西、南北2个方向开展典型剖面的样品采集。东西方向选择了甘肃黑方台黄土、陕北洛川黄土剖面。南北方向选择了陕北绥德黄土剖面、陕北洛川黄土剖面、陕西泾阳黄土剖面和白鹿塬黄土剖面(图3)。采用钻探和挖探相结合的方式在每个剖面的不同层位开展原状样品采集。按照第四纪地层划分方案，以L代表黄土层，S代表古土壤层，MS代表现代耕作层。其

中， L_0 、 S_0 分别代表全新世(Q_4)黄土和黑垆土， L_1 、 L_2 、 L_3 ……分别代表第一层、第二层、第三层……黄土， S_1 、 S_2 、 S_3 ……分别代表第一层、第二层、第三层……古土壤。



1. 黄土分布区;2. 采样点;3. 水系

图3 采样位置示意图

Fig. 3 Sketch map of sampling sites

陕北洛川剖面采样点：位于陕西延安洛川黑木沟。地层自上而下包含30个地层单元，除黑垆土外，对每一土层进行了样品采集，共计95个，涵盖L1-L15和S1-S14共计29层土。

关中蓝田白鹿塬剖面采样点：位于白鹿塬北坡的段家坡，黄土剖面地层发育完整，出露清晰，黄土层厚约132 m(岳乐平，1989)，代表了黄河中游黄土区、东南部塬区的黄土特征。样品采集与洛川剖面类似，除黑垆土外，对每一土层进行了样品采集，涵盖L1-L15和S1-S14共计29层土。

陕北绥德剖面采样点：样品采集剖面位于绥德县城，除黑垆土外，样品涵盖L1-L15和S1-S14共计29层土，每层土均开展了平行样品采集。

陕西泾阳南塬剖面采样点：位于陕西泾阳南塬舒唐王村。采样位置处风积黄土厚约70 m，根据黄土出露情况，对每一层土进行样品采集，样品涵盖S1-S9和L1-L9共计18层土体。

甘肃黑方台黄土台塬采样点：位于甘肃永靖黑方台黄土台塬，为黄河四级阶地，仅有晚更新世黄土，厚15~30 m不等。本次仅针对晚更新世黄土采集了样品。

2.2 试验测试

应用 TRIM 装置测试(冯立等,2016),针对同一样品可同时获得脱湿与增湿两个条件下的土-水特征曲线(SWCC)、渗透系数函数(HCF)及吸应力特征曲线(SSCC)。

(1)土-水特征曲线(SWCC)。理想的土水特征曲线有 2 个特征点,即土的进气值 α 和残余含水率 θ_r 。以进气值和残余含水率这 2 个土水特征曲线的特征点为分界点,可将土水特征曲线分为 3 个典型区段,即边界效应段、过渡段和非饱和残余段(图 4),各个区段分别与非饱和土中不同的水气状态相对应。

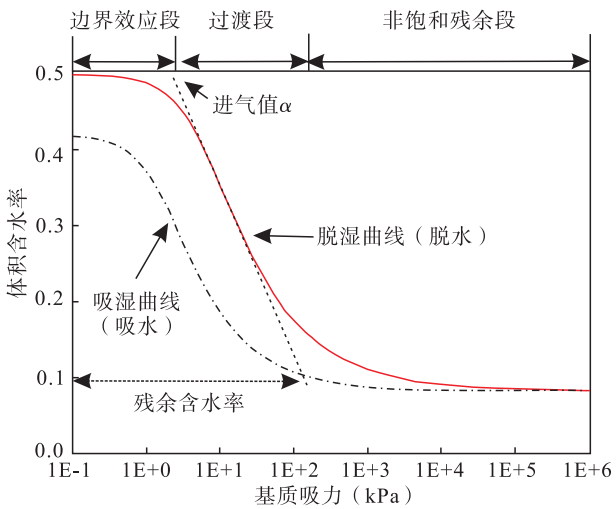


图 4 脱湿与吸湿条件下土水特征曲线图
Fig. 4 SWCC under drying and wetting conditions

(2)渗透系数函数(HCF)。基于瞬态脱湿与吸湿实验目标函数,通过参数反演获取土样在脱湿与吸湿条件下的渗透系数函数(图 5),其可表示为体积含水率的函数,函数关系式可用指数函数表达。脱湿与吸湿路径下获得的渗透系数函数存在滞后现象,且脱湿条件下的饱和渗透系数大于吸湿路径下的饱和渗透系数。

(3)吸应力特征函数(SSCC)。与土-水特征曲线类似,吸应力特征曲线同样存在 2 个特征点,即进气值 α 和残余含水率 θ_r 。以进气值和残余含水率作为分界点,同样可将吸应力特征曲线分为边界效应段、过渡段和非饱和残余段 3 个区段(图 1)。

2.3 水敏性的时空分布规律

根据测试结果探讨黄土水敏性在空间和时间尺

度上的变化规律(图 6)。由于甘肃黑方台仅沉积晚更新世黄土,而陕西泾阳黄土剖面缺失早更新世黄土,因此时空尺度上仅限于对当前测试数据进行对比分析。

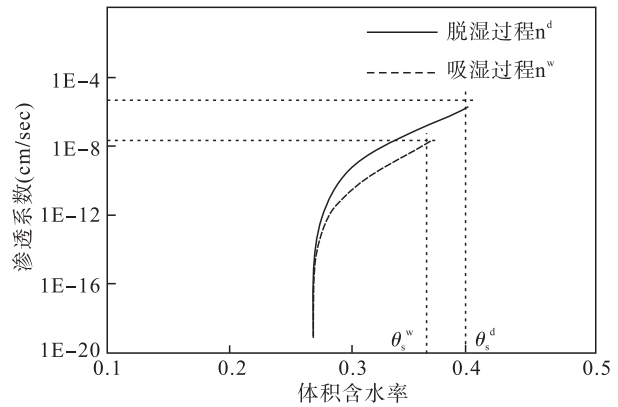


图 5 渗透系数与体积含水率关系图
Fig. 5 Changes of permeability with volumetric water content under both drying and wetting conditions

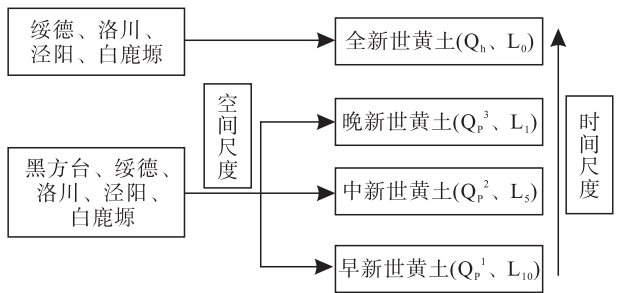


图 6 黄土水敏性时空分布规律对比研究框架图
Fig. 6 Sketch map of research on the spatial and temporal distribution of loess

(1)水敏性的空间分布规律。以晚更新世黄土($Q_{p3}-L_1$)为例,就其脱湿、吸湿条件下的测试曲线进行对比分析(图 7)。结果表明,从西到东、从北向南不同地区的黄土,其土-水特征曲线、渗透系数函数和吸应力特征曲线形态上存在差异,脱湿与吸湿条件下的各曲线呈现相同的变化规律,均存在 3 个明显的特征段,且在非饱和残余段和边界效应段差异明显。

非饱和残余段:白鹿塬地区的黄土,其残余含水率最大,其次为泾阳黄土、洛川黄土、绥德黄土和黑方台黄土。残余段指示了黄土样品在高压作用下

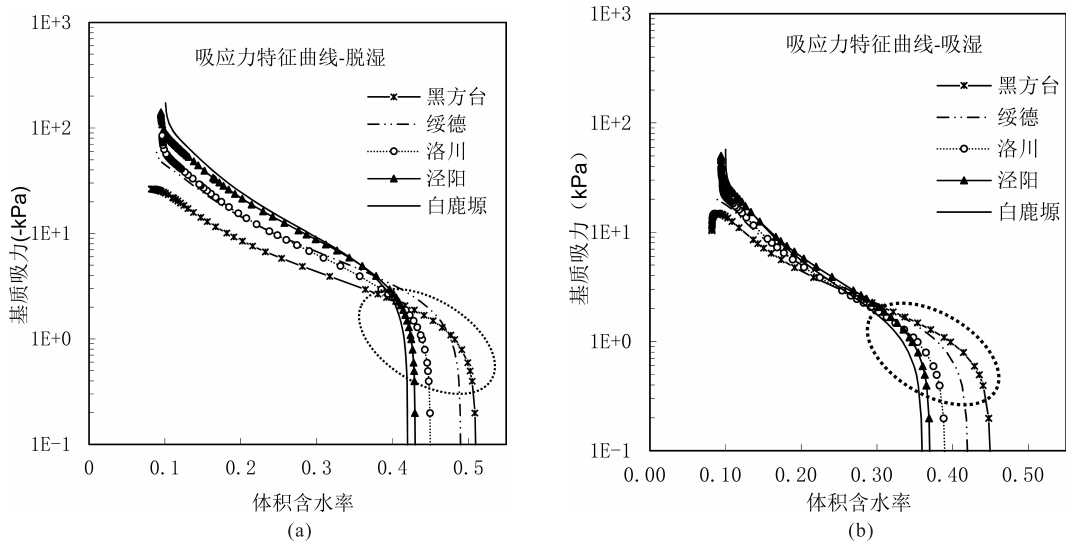


图 7 不同区域晚更新世黄土(Q₃-L₁)土-水特征曲线对比图

Fig. 7 Comparison for the tested results of the late Pleistocene loess (Q₃-L₁) at different locations

段的残余含水率越大,土体的水敏性越弱。

边界效应段:黑方台黄土在脱湿和吸湿路径下的饱和含水率最大,其次为绥德黄土、洛川黄土、泾阳黄土、白鹿塬黄土。相同体积的黄土,饱和含水率越大,表明其孔隙度越大,土体的水敏性越强。

表 1 为不同区域晚更新世黄土在的脱湿与吸湿条件下的反演参数,将各参数的变化趋势绘制在图 8 中,可以看出,从东到西、从北向南进气值 α 、孔径分布参数 n 、饱和含水率 θ_s 脱湿与吸湿条件下都表现为相同的变化规律,逐渐变小,而白鹿塬地区黄土与泾阳黄土在饱和含水率、进气值和饱和渗透系数差不多,变化幅度很小。原因是由于泾阳南塬和白鹿塬距离较近,具有类似的沉积环境。

(2)水敏性的时间分布规律。根据绥德剖面黄土、洛川剖面黄土、泾阳剖面黄土及白鹿塬(蓝田)剖面黄土的沉积规律,其全新世黄土、晚更新世黄土、中更新世黄土、早更新世黄土(无泾阳)的水土特征曲线(脱湿路径)如图 9 所示。从图 9 中可以看出,不同时代的黄土水土特征曲线明显区分。

土水特征曲线:在非饱和残余段,土体埋深越大,沉积时间越长,其残余含水率越大。残余含水率的大小又与土体的持水性能相关,持水性能大小与土体的孔隙大小及连通性相关,同时也与粘土矿物含量有一定的联系。在边界效应段,埋深较浅的黄土土体固结程度较差,土体具有较大的孔隙度,存在较大的变形空间。因此,全新世黄土的饱和含水率

表 1 不同区域晚更新世黄土的脱湿与吸湿条件下反演参数表

Tab. 1 Inversed parameters for late Pleistocene loess under both drying and wetting conditions

地层	地区	取样深度(m)	反 演 参 数					
			脱湿			吸湿		
			进气值 $\alpha^d(\text{cm}^{-1})$	n^d	θ_{sd}	进气值 $\alpha^w(\text{cm}^{-1})$	n^w	θ_{sw}
全新世黄土(Q _h)	黑方台	5	0.038	1.98	0.51	0.06	2.03	0.45
	绥德	5	0.025	1.91	0.49	0.054	1.98	0.42
	洛川	4	0.024	1.87	0.45	0.055	1.93	0.39
	泾阳	4	0.016	1.84	0.43	0.048	1.9	0.37
	白鹿塬	5	0.015	1.81	0.42	0.046	1.87	0.36

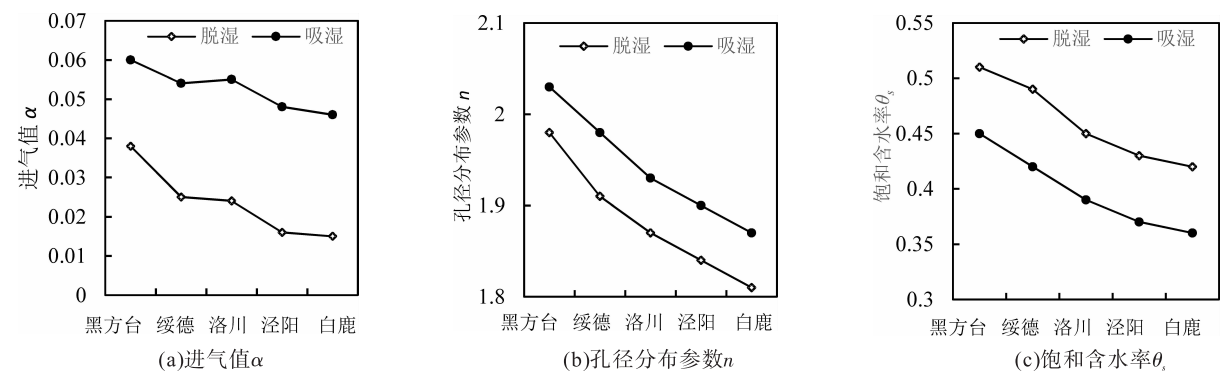


图 8 吸湿与脱湿条件下的反演参数变化曲线图

Fig. 8 Changes of inversed parameters under drying and wetting conditions

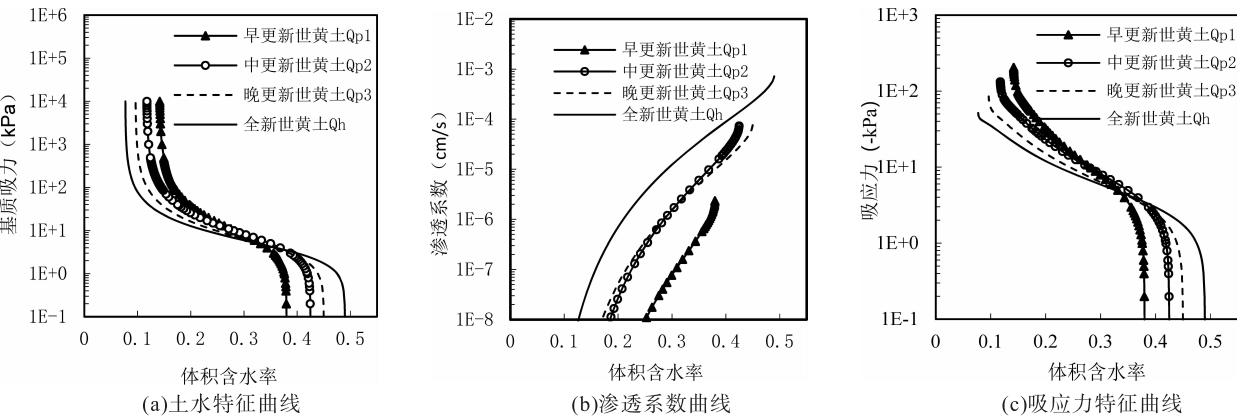


图 9 洛川剖面黄土时间序列水土特征曲线图(脱湿条件)

Fig. 9 The tested results of loess deposit at different time at the Luochuan section (drying condition)

最大,其进气值最小;随着埋深的加大,土体越来越密实,孔隙度降低,饱和含水率逐渐减小,进气值也逐渐增大。

渗透系数函数曲线:可以明显看出早更新世黄土的渗透系数函数曲线在最下方,往上依次为中更新世黄土、晚更新世黄土及全新世黄土。原因在于埋深造成的不同时代黄土的结构差异。主要由于土中孔隙的尺寸大小和分布不均匀,在土的增减湿过程中,连通性好的大孔隙比较容易进水或排水,而小孔隙进水和排水能力则相对较小。

吸应力特征曲线:全新世及晚更新世黄土具有更强的水敏性,而中更新世黄土和早更新世黄土水敏性较弱。体现在曲线上就是饱和含水率和残余含水率的差异,本质在于其孔隙结构的差异。孔隙结构影响土水作用面积和收缩膜的形状,而后者决定吸力的大小。土体埋深越深,土体的孔隙尺寸越小,进气值高,持水性强,对水的敏感性就较弱。孔隙结构通常和粒

径、级配以及土骨架结构相关,一般说来粒径较小、级配良好的土体,其孔径较小,水敏性较差。

表 2 为洛川地区不同沉积年代黄土的脱湿与吸湿条件下反演参数,可以看出,随着沉积时间(埋深)越长,土体越密实,孔隙及孔隙度越小,残余含水率越大,而饱和含水率越小,脱湿进气值逐渐变大;水敏性随着沉积时间(深度)的增长也逐渐变弱。

沉积年代	反演参数			
	脱湿		吸湿	
	进气值 α^d (cm ⁻¹)	n^d	进气值 α^w (cm ⁻¹)	n^w
全新世黄土	0.027	1.94	0.063	2.00
晚更新世黄土	0.024	1.87	0.055	1.93
中更新世黄土	0.018	1.83	0.050	1.89
早更新世黄土	0.016	1.72	0.040	1.78

3 结论

(1)黄土水敏性是其非饱和特性的一种反应,其本质是含水量变化后吸应力的变化及应变响应,即随着含水率的增大,黄土的吸应力和有效应力相应地减弱,而渗透性增强,从而导致各种宏观变形的发生。之所以出现崩解、湿陷、滑动、流变、液化等不同的宏观变形行为,是因为黄土所处的自由边界、四周侧限边界、存在临空面等边界条件的不同。

(2)脱湿与吸湿条件下,不同空间分布的黄土土-水特征曲线、渗透系数函数和吸应力特征曲线呈相同的变化规律,均存在3个明显的特征段,且在非饱和和残余段和边界效应段差异明显。

(3)黄土对水的敏感程度随其沉积年代和在黄土高原分布位置的不同,呈现出规律性的变化。在空间上,从西向东、由北向南,黄土的水敏性增强;时间上,沉积年代由老到新,黄土的水敏性增强。

参考文献(References):

彭建兵,林鸿州,王启耀,等. 黄土地质灾害研究中的关键问题与创新思路[J]. 工程地质学报,2014,22(4):684-691.

PENG Jiangbing, LIN Hongzhou, WANG Qiaoyao, et al. The critical issues and creative concepts in mitigation research of loess geological hazards [J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(4):684-691(in Chinese).

徐张建,林再贯,张茂省. 中国黄土与黄土滑坡[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(7):1297-1312.

XU Zhangjian, LIN Zaiguan, ZHANG Maosheng. Loess in China and loess landslides [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(7):1297-1312 (in Chinese).

张茂省,胡炜,孙萍萍,等. 黄土水敏性与水致黄土滑坡研究现状与展望[J]. 地球环境学报,2016,7(4):323-334.

ZHANG Maosheng, HU Wei, SUN Pingping, et al. Advances and prospects of water sensitivity of loess and the induced loess landslides [J]. Journal of Earth Environment, 2016, 7(4):323-334 (in Chinese).

谢定义. 试论中国黄土力学研究中的若干新趋向 [J]. 岩土工程学报,1999,19(4):273-284.

XIE Dingyi. The past, present and future of the research on mechanical characteristics and application of loess [J]. Underground Space, 1999, 19(4):273-284 (in Chinese).

张珊珊,张茂省,孙萍萍,等. 面向黄土地质灾害的优势流研究[J]. 兰州大学学报:自然科学版,2019,55(2):274-280.

ZHANG Shanshan, ZHANG Maosheng, SUN Ping ping, et al. advances and outlooks of preferential flow study in unsaturated soils [J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 2019,55(2):274-280.

冯立,张茂省,孙萍萍,等. 非饱和土脱湿与吸湿水力特性对比研究[J]. 水文地质工程地质,2016,43(2):134-139.

FENG Li, ZHANG Maosheng, SUN Pingping, et al. A study of the hydro-mechanical properties of unsaturated loess under the drying and wetting path [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(2):134-139 (in Chinese).

孙建中. 黄土学(上篇)[M]. 香港:香港考古学会出版,2005.

SUN Jianzhong. Loessology (Vol. 1) [M]. Hongkong: Hongkong archaeological society, 2005 (in Chinese).

雷祥义. 中国黄土的孔隙类型与湿陷性[J]. 中国科学(B辑),1987,(12):1309-1316.

LEI Xiangyi. Types of micro pores and collapsibility of loess in China [J]. Science in China, Ser. B, 1987, (12):1309-1316 (in Chinese).

高国瑞. 黄土显微结构分类与湿陷性[J]. 中国科学,1980,(12):1203-1208.

GAO Guorui. Classification of micro pores and collapsibility [J]. Science in China, Ser. A, 1980, (12):1203-1208 (in Chinese).

许领,戴福初,金艳丽. 从非饱和土力学角度探讨黄土湿陷机制[J]. 水文地质工程地质,2009,(4):62-65.

XU Ling, DAI Fuchu, JIN Yanli. Discussion on the mechanism of loess collapsibility from the perspective of unsaturated soil mechanics theory [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2009, (4):62-65 (in Chinese).

刘东生,黄土与环境[M]. 北京:科学出版社,1985.

LIU Dong sheng. Loess and environment [M]. Beijing: China Science Publishing & Media Ltd, 1985 (in Chinese).

张宗祜. 中国黄土[M]. 北京:地质出版社,1989.

ZHANG Zonghu. Loess in China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1989 (in Chinese).

王永炎,林在贯. 中国黄土的结构特征及物理力学性质[M]. 北京:科学出版社,1990.

WANG Yongyan, LIN Zaiguan. Structure characteristics, physical and mechanical properties for loess in China [M]. Beijing: China Science Publishing & Media Ltd, 1990 (in Chinese).

HOUSTON, S. L., HOUSTON, W. N. and Wagner, A. Laboratory filter paper suction measurements [J]. Geotechnical Testing Journal, 1994, 17(2):185-194.

LU N., LIKOS W. J. Suction stress characteristic curve for unsaturated soil [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 48(9):131-142.