

从非饱和土力学角度探讨黄土湿陷机制

许 领¹,戴福初¹,金艳丽²

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所,北京 100029; 2. 广西电力工业勘察设计研究院,南宁 530023)

摘要: 本文回顾了黄土湿陷概念的由来及其基于其微结构湿陷机制研究现状。对从非饱和土力学角度开展黄土湿陷机理研究的有关问题进行了讨论和分析,提出了广义湿陷性概念。黄土湿陷机制研究应根据具体湿陷路径针对性开展非饱和土应力路径试验研究,从而进一步建立黄土广义湿陷本构模型,为工程问题的定量分析和数值计算提供科学依据。非饱和黄土常剪应力增湿试验表明,黄土湿陷破坏之前发生了一定的微小变形,随后应变速率突然增加,偏应力也不再维持为常数。同时,观察到孔压突然上升 1~2kPa,表明黄土湿陷过程发生了不完全排水剪缩破坏。

关键词: 黄土湿陷机理; 广义湿陷性; 非饱和土力学; 常剪应力增湿试验

中图分类号: TU411.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2009)04-0062-04

随着西北黄土地区工程建设的蓬勃发展,黄土湿陷问题日益突出,应用传统的湿陷性研究方法难以解决黄土湿陷过程的力学机制问题。黄土是典型的非饱和土,用现代非饱和土力学的理论和方法对黄土的力学特性进行研究,是近年来才开始的一项工作。

黄土湿陷实际上是非饱和状态下土的力学行为,非饱和土力学无疑应成为黄土湿陷机制研究的重要手段。然而,早期黄土湿陷机制研究主要是黄土地质成因和微观角度进行研究的。因此,本文首先回顾早期湿陷机制研究成果,对从非饱和土力学角度开展黄土湿陷机理研究的有关问题进行了讨论和分析,针对一类典型的湿陷路径开展了非饱和黄土常剪应力增湿试验研究。

1 黄土湿陷性研究回顾

20世纪50年代末,孙建中^[1]、孙广忠^[2]、郭见杨^[3]、林在贯^[4]等分别撰文并建议统一用“湿陷性”一词来描述为了黄土因浸水而产生沉陷现象,并从黄土的胶结特征及孔隙性初步探讨黄土湿陷机制。传统意义上的黄土湿陷性概念源于对此类现象的描述,具有特定的研究对象。

高国瑞^[5]利用扫描电子显微镜研究了兰州黄土的显微结构特征,提出黄土的架空结构对湿陷具有控制

意义。其后,高国瑞^[6-9]、杨运来^[10]、雷祥义^[11]基于黄土微观结构特征对黄土湿陷机制进行了系统研究,此时,黄土湿陷机制的结构理论基本完善。湿陷结构理论认为:黄土骨架颗粒形态分为粒状、粒状-凝块和凝块3类;骨架颗粒连接形式可分为连接、接触-胶结和胶结3类;骨架颗粒的排列方式可分为架空、架空-镶嵌和镶嵌3类;有无架空排列是产生湿陷的最基本条件,为湿陷提供了空间;其次,粒间连接接触是重要条件,因为这种连接是在干燥状态下形成的,非水稳性占优势,再加上接触处连接面积小,应力较为集中,水浸情况下强度损失大,易于湿陷;由于黄土的显微结构类型具有区域性变化规律,黄土的湿陷性亦由西北向东南逐渐减弱。

黄土湿陷机制的微观结构理论是围绕黄土“浸水沉陷”这一传统湿陷概念开展研究的,其不考虑黄土湿陷的力学机制及变形特征。因此,这种研究将湿陷性与黄土特殊的地质成因和结构特征相联系,在于回答黄土为什么湿陷,而不关注怎样湿陷。

2 从非饱和土力学角度探讨湿陷机制有关问题讨论

2.1 湿陷的力学性及广义湿陷性

基于微观结构理论的湿陷机制研究不考虑湿陷黄土所处的应力状态及其湿陷过程的应力-应变特性,限制了湿陷机制研究成果在工程中的应用。陈正汉、刘祖典^[12]研究表明,湿陷与应力状态有关,变形与应力之间存在交叉效应。黄土湿陷是黄土的力学问题,必须在土力学理论框架内,通过力学试验加以研究,这样,才能获得具有实际意义的力学指标,服务于生产。

收稿日期: 2008-10-22; 修订日期: 2008-12-08

基金项目: 香港研究资助局(RGC-HKU7176/05E)

作者简介: 许领(1982-),博士研究生,主要从事黄土滑坡机理与防治研究。

E-mail: suyu820@163.com

然而,从土力学角度开展湿陷机理研究有别于传统的湿陷概念,主要有如下3个方面:

(1) 早期湿陷概念来自对表层黄土“浸水沉陷”现象的描述,并将黄土分为湿陷性黄土和非湿陷性黄土,是立足于黄土成因和特殊结构特征、通过不同结构类型黄土湿陷性差异的横观对比开展研究的,关注的是微观结构和胶结特征对黄土湿陷的影响程度,在于解释黄土“为什么会湿陷”;而从力学角度进行湿陷性研究关注的是湿陷过程中土体强度、变形特征,回答的是“怎样湿陷”的问题。

(2) 早期湿陷机制研究取得了的大量开创性成果,传统的湿陷性概念已具有特定的研究背景和人文内涵,并且这种概念已获得了普遍接受。因此,从土力学角度研究湿陷机制必须充分尊重早期湿陷性问题的提出背景和研究方法。

(3) 力学角度与微观结构角度研究具有重叠的部分,如微观特征的毛细现象、结合水膜与非饱和土力学中基质吸力具有联系,因此,如果不加区分两种湿陷机制研究角度的话,可能会造成湿陷机制上对立。

为区别于传统湿陷概念及其基于微观结构的湿陷机制研究,本文将这种基于土力学理论的湿陷性研究称之为广义湿陷性。广义湿陷性不强调黄土自身物质组成特性,而关注由其自身属性决定的力学性质。广义湿陷性就将湿陷机理研究回归到工程应用的本质上来,下文的有关讨论都是在广义湿陷性概念下展开的。

2.2 与传统湿陷机制的思辨

早期黄土湿陷机制研究中最著名的应以阿别列夫等为代表的毛管假说,这种假说基于太沙基的毛管理论(Terzighi, K., 1942, 转引自高国瑞^[6]),太沙基认为:“潮湿砂土之所以能粘结在一起,是因砂土内的不连续水分聚集在颗粒接触处的水、气界面上,由毛细管表面张力所产生的法向力使砂土颗粒粘结在一起”。高国瑞^[6]认为毛管说并不能解释为什么有的黄土湿陷,有的黄土不湿陷,虽然它们的含水量和颗粒成分基本相同,只是它们的孔隙比不同。可见,基于黄土微观结构特征的湿陷理论对毛管说的否定主要是基于传统湿陷概念的。

随着非饱和土力学理论在黄土力学研究中的应用,反映含水量特征的基质吸力与湿陷性关系进行了广泛讨论。袁中夏等^[13]研究认为,基质吸力降低是黄土湿陷的原因。由前面分析可知,袁中夏等的观点与早期传统湿陷机制研究对毛管说的否定构成了矛盾^[6]。高国瑞对毛管说的否定是基于传统的湿陷性研

究角度,在广义湿陷性概念下是不存在的。因此,在广义湿陷概念下,认为基质吸力降低是黄土湿陷的主要原因是正确的,广义湿陷性是从非饱和土力学角度探讨黄土湿陷性的概念基础。

2.3 黄土湿陷流变问题

鉴于黄土胶结特征的变化势必会对黄土的力学性质产生影响,如非抗水胶结甚至抗水胶结(如钙)在溶滤条件下对黄土湿陷性的影响。因此,基于广义湿陷性概念的黄土湿陷机制研究也必须在力学原理的框架内考虑这部分内容。

对于具体的湿陷性黄土,胶结特征的变化实际上是在一定的水及荷载作用下的时间效应。因此,在广义湿陷性概念框架内,上述问题可很好地归结为黄土湿陷的流变问题。如初始含水量对湿陷特性的影响在广义湿陷框架内即为黄土湿陷流变问题。

2.4 湿陷机制研究的核心问题

从非饱和土体力学角度研究黄土湿陷机制应包括如下两方面内容,一是针对具体湿陷路径开展非饱和土力学试验研究;二是在大量非饱和黄土应力路径试验的基础上建立黄土的广义湿陷本构模型。

应力路径决定着土体强度、变形特性,因此,根据非饱和土力学理论,只有针对具体湿陷路径开展非饱和土力学试验研究才能更好地分析湿陷过程的力学机制。本构关系是土力学的核心内容,是工程问题定量(数值)计算的最核心内容。由于受非饱和土力学试验条件的限制,加上非饱和试验非常耗时,目前建立在大量湿陷应力路径试验基础上的黄土湿陷本构模型还有很多工作要做。只有针对性的建立黄土湿陷本构模型,才能更好地解决工程建设中的黄土湿陷问题。

3 实例分析:典型湿陷路径增湿试验研究

对处于一定应力状态的黄土,降雨、农业灌溉、生活污水入渗,或者地下水位上升等都可造成黄土湿陷,其应力路径可近似看作大小主应力保持不变(常剪应力状态),非饱和黄土含水量不断增加(基质吸力不断降低)的过程。常剪应力是湿陷过程中最为普遍的一类应力状态,然而,目前常剪应力条件下的连续增湿路径的湿陷试验还没有开展相应的研究工作。本文基于GDS非饱和试验系统,以典型的 Q_2 原状离石黄土(取自西北黄土塬,埋深约20m)为研究对象,开展了常剪应力非饱和黄土增湿试验研究,由于该试验周期太长,仅做了3个样,其应力路径如图1所示。

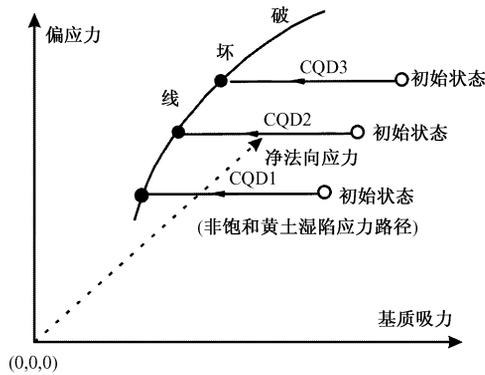
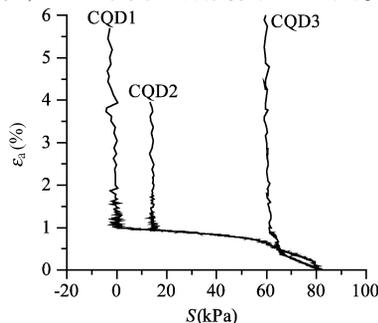


图1 常剪应力湿陷应力路径

Fig.1 Collapsibility stress path under constant shear stress

3.1 非饱和增湿试验

表1为常剪应力增湿试验方案。开始试验之前,首先对陶瓷板进行饱和,其次进行吸力平衡。试样中的初始吸力一般不等于压缩和剪切试验所需的吸力,轴平移技术测得试样的初始吸力后,需要改变试样当前的吸力值。对于CQD1、CQD2和CQD3量测的初始吸力分别为110.8、118.5、65.04kPa,试样控制吸力均为80kPa。平衡过程中周期性的关闭反压阀门以检测试样是否达到所需的孔隙水压力,根据流通试样的水流量来确定平衡结束。对于50mm试样,一旦水流的速率减小到 $0.1\text{cm}^3/\text{d}$,吸力平衡就结束^[14]。这里亦采用此标准判定平衡结束,吸力平衡一般需要4~7天。



(a) 轴应变与吸力关系曲线

平衡过程中,试样的总体积变化非常小,可由霍儿效应传感器和气压与反压控制器测量得到。

表1 增湿试验方案

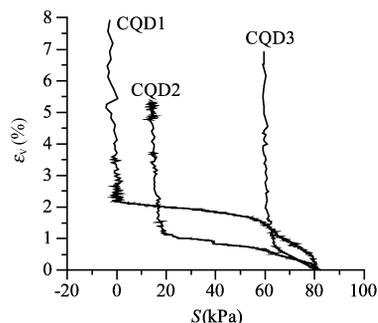
Table 1 Moistening test plan

试样编号	初始孔隙比 e	初始含水量 w	初始吸力	控制吸力 $\mu_a - \mu_w$ (kPa)	净平均应力 (kPa)		排水条件
					1 - μ_a	3 - μ_a	
CQD1	0.945	8.80	110.8	80	200	50	气相 - 排水
CQD2	1.041	7.49	118.5	80	400	200	水相 - 排水
CQD3	0.702	19.70	65.04	80	800	400	水相 - 排水

当试样吸力平衡以后,接着进行常吸力各向异性固结到所需的净平均应力后,保持试样所受偏应力不变,不断减小吸力使试样增湿直到破坏。

3.2 结果分析

3个非饱和土样的CQD试验结果如图2所示。由图2可见,试样湿陷之前有一定的变形(轴应变大约为1%),所有试样都表现为剪缩破坏特征。随着吸力的继续减小,应变速率突然加大直到试样破坏,此时偏应力也不再维持为常数,同时,观察到孔压突然上升1~2kPa,表明土体湿陷过程发生了不完全排水剪缩破坏。另外,试样大都在吸力达到零之前破坏(除了CQD1),破坏时的吸力随着净平均应力的增大而增大,对于CQD2和CQD3破坏时的吸力分别为13.3kPa和59.97kPa,都没有达到吸力为零的饱和状态。



(b) 体积应变与吸力关系曲线

图2 非饱和黄土增湿试验结果

Fig.2 Results of moistening test of unsaturated loess

因此,非饱和常剪应力增湿试验通过模拟湿陷应力路径,从而获取湿陷发生、破坏过程的力学性质,为黄土湿陷机制的进一步研究提供了思路。

4 结论

(1) 黄土是一种典型的非饱和土,其湿陷机制与自身含水量及应力状态有关。因此,非饱和土力学理论

的发展以及试验条件的改善,为黄土湿陷机制研究提供了新的途径。

(2) 早期黄土湿陷性概念来自对表层黄土“浸水沉陷”现象,具有特定历史研究背景和含义,为区别于传统的湿陷概念及其湿陷机制研究,基于非饱和土力学过程的湿陷机制研究应在广义湿陷概念框架内加以探讨。

(3) 基于非饱和土力学理论,黄土湿陷机制研究首先应根据具体湿陷路径针对性地开展非饱和土应力路径试验研究;其次,以湿陷路径试验为基础建立黄土广义湿陷本构模型,为工程问题的定量分析和数值计算提供科学依据。同时,可将黄土胶结特征的变化对黄土的力学性质产生影响,归结为黄土湿陷流变问题加以研究。

(4) 非饱和黄土常剪应力增湿试验表明:随着含水量的增加及基质吸力的降低,土体发生微小变形(轴应变约为1%),随后开始发生湿陷破坏,应变速率突然增加,偏应力也不再维持为常数;同时,观察到孔压突然上升1~2kPa,表明土体湿陷过程发生了不完全排水剪缩破坏。

参考文献:

- [1] 孙建中. 黄土的湿陷性及其与湿度的关系[J]. 水文地质工程地质, 1957(11): 18 - 21.
- [2] 孙广忠. 中国西北几个地区黄土性质的初步研究[J]. 水文地质工程地质, 1957(5): 1 - 8.
- [3] 郭见杨. 关于湿陷原因的研究[J]. 水文地质工程地质, 1958(4): 7 - 11.
- [4] 林在贯, 舒天开. 西北黄土之湿陷性之初步探讨[J]. 水文地质工程地质, 1958(4): 1 - 7.
- [5] 高国瑞. 兰州黄土显微结构和湿陷机理的探讨[J]. 兰州大学学报, 1972(2): 123 - 134.
- [6] 高国瑞. 中国黄土的微结构[J]. 科学通报, 1980a, (20): 945 - 948.
- [7] 高国瑞. 黄土的显微结构分类与湿陷性[J]. 中国科学, 1980b(12): 1203 - 1208.
- [8] 高国瑞. 中国黄土的微结构与地理、地质环境的关系[J]. 地质学报, 1984(3): 265 - 272.
- [9] 高国瑞. 黄土湿陷变形的结构理论[J]. 岩土工程学报, 1990, 12(4): 1 - 10.
- [10] 杨运来. 黄土湿陷机理的研究[J]. 中国科学(B辑), 1988(7): 756 - 766.
- [11] 雷祥义. 黄土显微结构类型与物理力学性质指标之间的关系[J]. 地质学报, 1989(2): 182 - 191.
- [12] 陈正汉, 刘祖典. 黄土的湿陷变形机理[J]. 岩土工程学报, 1986, 8(2): 1 - 12.
- [13] 袁中夏, 王兰民, 王峻. 考虑非饱和土与结构特征的黄土湿陷性讨论[J]. 西北地震学报, 2007, 29(1): 12 - 17.
- [14] Sivakumar V. A critical state framework for unsaturated soils[D]. PhD Thesis, University of Sheffield, 1993.

Discussion on the mechanism of loess collapsibility from the perspective of unsaturated soil mechanics theory

XU Ling¹, DAI Fu-chu¹, JIN Yan-li²

(1. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2. Guangxi Electric Power Industry Investigation Design and Research Institute, Nanning 530023, China)

Abstract: The paper reviews the concept origin of loess collapsibility and the research status of collapsibility mechanism based on its microstructure, and discusses on the collapsibility mechanism from the perspective of unsaturated soil mechanics, then puts forward the concept of generalized collapsibility. It is suggested that research of loess collapsibility includes the laboratory investigations based on field collapsibility stress-path and then building of constitutive model, as a base for engineering quantitative analysis and numerical simulation. One series (3 samples) loess moistening test under dead load shows that collapse occurs so suddenly at less than 1% of axial strain that deviatoric stress can not retain. Meanwhile, about 1~2kPa pore pressure raise is observed, indicating incompleteness drained shear failure occurring in the collapse process.

Key words: loess collapsibility mechanism; generalized collapsibility; unsaturated soil mechanics; moistening test under constant shear stress

责任编辑:张明霞