



# 黄土湿陷机理研究现状及有关问题探讨

许 领, 戴福初

(中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

**摘 要:** 黄土湿陷性问题由来已久。20 世纪 60 – 80 年代, 采用扫描电镜 (SEM) 和物化分析技术, 黄土湿陷机理的结构理论获得了发展和完善, 当时, 由于不能提供定量的力学参数而很少应用于工程建设。随着土工试验技术的进步以及土力学理论的发展, 克服传统的黄土湿陷机理研究方法的不足成为可能。本文首先论述了黄土湿陷性研究的力学属性; 其次, 提出了黄土的广义湿陷概念; 最后, 从非饱和土力学角度对黄土湿陷机理研究的有关问题进行了讨论和分析。

**关键词:** 黄土湿陷机理; 微观结构; 广义湿陷性; 非饱和土力学

**中图分类号:** P534.63

**文献标识码:** A

## 1 黄土湿陷结构理论的发展与完善

### 1.1 湿陷性概念的提出

建国初期, 我国黄土湿陷机理的研究主要是吸收前苏联已有成果。20 世纪 50 年代末, 孙建中 (1957)<sup>[1]</sup>、孙广忠 (1957)<sup>[2]</sup>、郭见杨 (1958)<sup>[3]</sup>、林在贯 (1958)<sup>[4]</sup> 分别撰文并建议统一用“湿陷性”一词来描述黄土因浸水而产生沉陷的现象。“湿陷性”一词不仅反映了该现象的主要表现——沉陷, 又说明了这种沉陷与一般的沉陷不同, 是发生在水的浸湿之后。因此, 传统意义上的黄土湿陷性概念便统一了, 它具有特定的研究背景和内涵, 后来湿陷性研究都是依此概念的。

### 1.2 黄土湿陷结构理论的发展与完善

#### (1) 20 世纪 50 年代

孙广忠 (1957)<sup>[2]</sup> 较早讨论了黄土的湿陷机制, 认为水膜的加厚破坏了黄土的结构连接是造成湿陷的原因。孙建中 (1957)<sup>[1]</sup> 研究了湿陷系数与压力和湿度的关系, 认为湿陷的原因是黄土颗粒与水作用时形成水 – 胶连接, 加强了黄土的压缩性的结果。郭见杨 (1958)<sup>[3]</sup> 认为湿陷为内部连接的削弱和破坏, 大孔隙的破坏是内部连接破坏的结果。林在贯 (1957)<sup>[4]</sup> 认为黄土湿陷性与其物理、化学性质有着极为密切的关系。

此阶段湿陷机理研究利用黄土矿物成分物化分析技术, 从浸水后黄土胶结、结构强度降低的角度进行。受试验条件的限制, 黄土的结构特征还没有真正意义上从微观角度开展研

究。

## (2) 20 世纪 60–80 年代

随着试验仪器的发展，此阶段能够利用显微镜或者扫描电镜对黄土的微观结构进行直接的观察、研究。1962 年，林崇义<sup>[5]</sup>利用双目放大镜对黄土颗粒的连接特征和受力变形特征进行了研究。张宗祜（1964）<sup>[6]</sup>通过显微观察划分了我国黄土的微结构类型。

1972 年，高国瑞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<sup>[7]</sup>。其后，高国瑞（1980a，1980b，1984，1990）<sup>[8-11]</sup>，杨运来（1988）<sup>[12]</sup>，雷祥义（1989）<sup>[13]</sup>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：①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；②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；③由于黄土的显微结构类型具有区域性变化规律，中国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 新近黄土湿陷机理研究现状

20 世纪 90 年代以后，关于黄土湿陷特征和机理研究开展了一定的工作，下面就其中代表性成果进行评述。

### (1) 微结构角度

蒋希雁（2004）<sup>[14]</sup>，顾成权等（2003）<sup>[15]</sup>，樊怀仁等（2003）<sup>[16]</sup>，沙爱民等（2006）<sup>[17]</sup>利用扫描电镜、图像处理等技术，研究了黄土湿陷性与黄土微观结构的关系，认为孔隙是黄土湿陷的主要原因。

### (2) 数理分析方法

胡瑞林等（1999）<sup>[18]</sup>研究了黄土结构的分维特征，认为在压力及水的驱动下土体结构由高分维土向低分维转化并导致位势降低，是湿陷变形的微观变化机制所在。高凌霞等（2004）<sup>[19]</sup>，王延涛（2007）<sup>[20]</sup>利用多元统计方法研究了湿陷系数与物性指标间的统计关系。

### (3) 土力学角度

汤连生（2003）<sup>[21]</sup>认为黄土微结构的不平衡吸力是造成黄土湿陷性的原因，非饱和土湿陷是微结构与广义吸力综合效应的产物。袁中夏等（2007）<sup>[22]</sup>认为基质吸力降低是黄土湿陷的主要原因。

可见，现阶段基于微结构特征开展的湿陷机理研究仍是在传统结构理论框架内展开的，并未有明显的发展；而基于数理分析的湿陷研究，尤其在湿陷力学过程不明确的情况下，并不能深刻解释湿陷机理。尽管从土力学角度开展了一定量的研究，但当今的湿陷概念已与传统意义上的湿陷不同，有关问题还有待进一步分析。

### 3 湿陷的力学性及广义湿陷性

微观结构机理的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。陈正汉等(1986)<sup>[23]</sup>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,即增湿作用下应力应变过程,因此,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和成果,服务于工程建设。

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宏观对比开展研究的,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理研究,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。广义湿陷性是描述在各种湿隔应力路径下,黄土强度降低的力学性质。它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。广义湿陷性将传统意义上的湿陷归结为黄土强度降低的结果。因此广义湿陷性是传统湿陷性概念的延伸,它将湿陷机理研究回归到工程应用的本质上来,下面的有关讨论都是在广义湿陷性概念下展开的。

### 4 从非饱和土力学角度探讨黄土湿陷机理

随着对特殊土的深入研究,发现应用传统的饱和土力学的强度理论来研究特殊土的强度问题产生了较大困难。实质上,黄土是一种非饱和土,黄土湿陷机制的研究应在非饱和土力学框架内展开(这里将饱和土视为非饱和土的一个特例)。近年来,现代非饱和土力学的理论和方法开始用来研究黄土的力学特性,非饱和土力学理论为黄土湿陷机制研究提供了新的途径。下面将对从非饱和土力学研究黄土湿陷机理有关问题进行讨论。

#### 4.1 非饱和土基质吸力概念

非饱和土孔隙中不但充填水,而且还有空气。水气界面(收缩膜)具有表面张力,表面张力的产生是由于收缩膜内的水分子有一指向水体内部的不平衡力的作用,为保持平衡,收缩膜内部产生张力。收缩膜承受张力的特性,称为表面张力  $T_s$ ,如图1所示。

在非饱和土力学中,孔隙气压力大于孔隙水压力,收缩膜承受大于水压力的空气压力。压力差成为基质吸力,压力差使得收缩膜弯曲。由于收缩膜表面张力的作用,才使得非饱和

土中存在基质吸力，基质吸力是表面张力的宏观表现。岩土边坡工程中，通常将大气压力作为压力零点，对于非饱和土体，孔隙水压力小于 0，基质吸力小于 0；对于饱和土体，孔隙水压力大于等于 0，基质吸力为零。非饱和土体不同于饱和土体的物理力学特性就是由于基质吸力的存在引起的。

4.2 与传统湿陷机制研究的思辨

早期黄土湿陷机制研究中最著名的应以阿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，1980a）<sup>[8]</sup>，太沙基认为：“潮湿砂土之所以能黏结在一起，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黏结在一起”。高国瑞（1980a）<sup>[8]</sup>认为毛管说并不能解释为什么有的黄土的湿陷，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，当初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，对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（2007）<sup>[22]</sup>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（高国瑞，1980a）<sup>[8]</sup>。高国瑞对毛管说的否定是基于传统的湿陷性研究角度，在广义湿陷概念下是不存在的。因为在广义湿陷概念下，认为基质吸力降低是黄土湿陷的主要原因是正确的。

4.3 黄土湿陷蠕变问题

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，在广义湿陷概念框架内，上述问题可很好的归结为黄土湿陷的流变问题。将黄土微观结构变化引起的湿陷附加变形作为广义湿陷框架内的黄土流变问题，为从非饱和土力学角度开展湿陷机制研究提供了条件。

4.4 非饱和土力学角度探讨黄土湿陷机理

4.4.1 非饱和土应力路径试验

邢义川等（2004）<sup>[24]</sup>以渭北张桥非饱和原状黄土为对象，利用改装的常规三轴试验系统，进行了人工浸水增湿湿陷试验，探讨了非饱和原状黄土增湿有效应力的变化规律。然而，对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。

常剪应力是湿陷过程中最为普遍的一类应力状态，比如，表层黄土浸水湿陷过程，其应力状态即可看作常剪应力，反映非饱和黄土含水量不断增加（基质吸力不断降低）的过程，应力路径如图 2 所示。本文基于 GDS 非饱和试验系统，以典型的 Q<sub>2</sub> 原状离石黄土为研究对象，进行了常剪应力非饱和增湿试验研究，获得了一些新认识。现仅从 3 个样的测试结果进行讨论，其结果如图 3 所示。

由图 3 可见，土体破坏之前允许发生一定的变形，在吸力减小的整个过程中土体表现剪缩特性，在吸力减小到一定值，轴应变大约达到 1% 时，土体开始发生破坏，即体变速率明显增加，同时观察到孔压突然上升 1~2 kPa，表明土体发生了不完全排水剪缩破坏。该试验

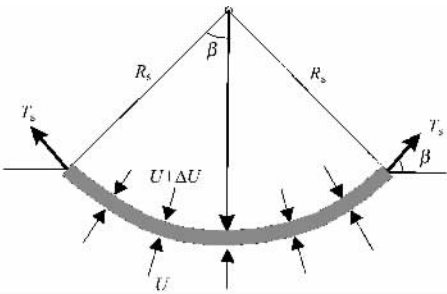


图 1 水气界面的表面张力  
Fig.1 Sketch showing the surface tension

说明只有针对具体湿陷路径开展试验研究才能更好地把握湿陷力学机制。

4.4.2 黄土湿陷本构模型

本构关系是土力学研究的核心内容，只有针对性地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。尽管在广义湿陷框架内，针对黄土本构关系开展了一定的研究工作（胡再强等，2005<sup>[25]</sup>；张茂花，2006<sup>[26]</sup>），但是由于试验条件的限制，还不完善。针对性地开展湿陷应力路径试验，并在试验基础上建立黄土的湿陷本构模型，应成为今后黄土湿陷机制的重要内容。

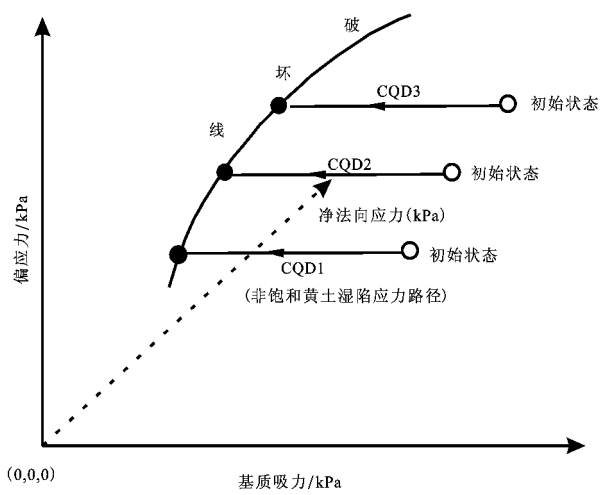


图 2 常剪应力湿陷的应力路径

Fig.2 Wetting stress-path under constant shear stress

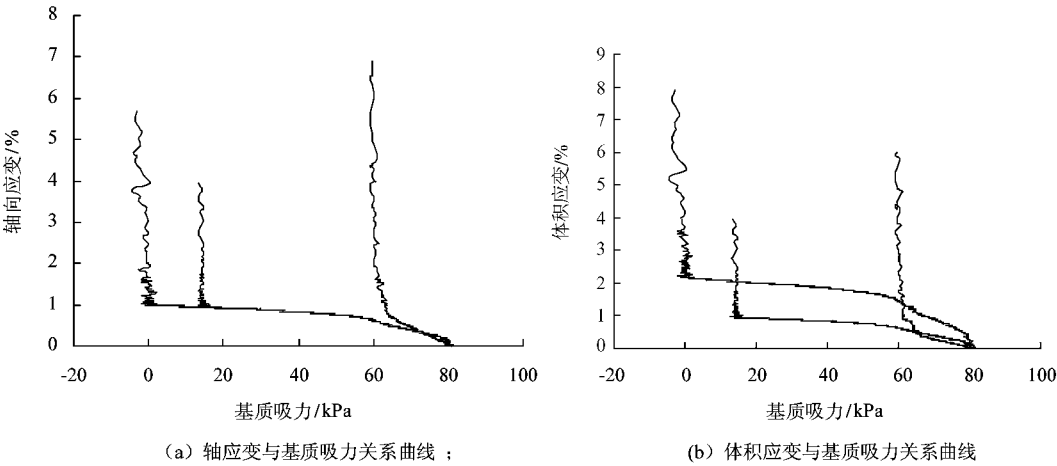


图 3 非饱和黄土增湿试验结果

Fig.3 Results of wetting stress path test

5 结语

本文回顾了 20 世纪 60 – 80 年代以来黄土湿陷机制研究成果，对现阶段黄土湿陷性研究进行了述评。对从非饱和土力学角度探讨黄土湿陷机制的有关问题进行了讨论，主要结论如下：

早期黄土湿陷机制研究是基于黄土微观结构特征开展的，关注的是“黄土为何湿陷”，其理论体系较为完整。然而，传统的湿陷机制研究，缺乏定量标准，难以提供力学参数，限制了其在工程中的应用。

黄土湿陷与应力状态有关，黄土湿陷是个力学过程，应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和成果,服务于工程建设。

传统湿陷性概念来自对表层黄土“浸水沉陷”现象的描述,具有特定历史研究背景和含义,基于力学过程的湿陷机制研究的广义湿陷概念区别于传统的湿陷概念及其机制研究。黄土的广义湿陷机制研究不强调黄土自身特性,而关注由其决定的力学性质,这就将湿陷机理研究回归到工程应用的本质上来。

在广义湿陷机制研究框架内,可将黄土胶结特征的变化对黄土的力学性质产生的影响,归结为黄土湿陷蠕变问题来加以研究。

基于非饱和土力学理论,黄土湿陷机制研究建议包含如下方面的内容:①根据实际湿陷路径针对性地开展非饱和黄土的应力路径试验,研究湿陷过程力学机制;②建立以湿陷试验为基础的黄土湿陷本构模型,为工程问题的定量分析和数值计算提供更科学的依据。

## 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.  
SUN Jian-zhong. Collapsibility of loess soil and the relationship with humidity [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 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.  
SUN Guang-zhong. Preliminary study on properties of loess in northwestern China [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 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): 8~11.  
GUO Jian-yang. Study on collapse mechanism [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1958, (4): 8~11.
- [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.  
LIN Zai-guan, SHU Tian-kai. Hydrogeology and Engineering Geology, 1958, (4): 1~7.
- [5] 林崇义. 黄土的结构特性 [M]. 北京, 科学出版社, 1962.  
LIN Chong-yi. Structural properties of loess soil [M]. Beijing: Science Press, 1962.
- [6] 张宗祜. 我国黄土类土显微结构的研究 [J]. 地质学报, 1964, 44 (3): 357~370.  
ZHANG Zong-you. Study on the microstructure of loess soil in China [J]. Acta Geological Sinica, 1964, 44 (3): 357~370.
- [7] 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 (自然科学版), 1972, (2): 123~134.  
GAO Guo-rui. Research on the microstructure and collapsible mechanism of loess soil in Lanzhou Province [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 1972, (2): 123~134.
- [8] 高国瑞. 中国黄土的微结构 [J]. 科学通报, 1980, (20): 945~948.  
GAO Guo-rui. Microstructure of loess soil in China [J]. Chinese Science Bulletin, 1980, (20): 945~948.
- [9] 高国瑞. 黄土的显微结构分类与湿陷性 [J]. 中国科学, 1980, (12): 1203~1208.  
GAO Guo-rui. Microtexture type and collapsibility of loess soil [J]. Science in China, 1980, (12): 1203~1208.
- [10] 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, 58 (3): 265~272.  
GAO Guo-rui. Microstructure of loess soil in China relative to geographic and geologic environment [J]. Acta Geological Sinica, 1984, 58 (3): 265~272.
- [11] 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.  
GAO Guo-rui. A structure theory for collapsing deformation of loess soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 12 (4): 1~10.
- [12] 杨运来. 黄土湿陷机理的研究 [J]. 中国科学 (B辑), 1988, (7): 756~766.  
YANG Yun-lai. Study on the collapsible mechanism of loess [J]. Science in China (Series B), 1988, (7): 756~766.
- [13] 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, 63 (2): 182~191.  
LEI Xiang-yi. Relationship between type of loess microstructure and physical mechanic property index [J]. Acta Geological Sinica,

- 1989, 63 (2): 182~191.
- [14] 蒋希雁, 陆培毅. 黄土湿陷机理和影响因素分析 [J]. 河北建筑工程学院学报, 2004, 22 (1): 25~27.  
JIANG Xi-yan, LU Pei-yi. Analysis of the collapsible mechanism and effect factors of loess [J]. Journal of Hebei Institute of Architectural Engineering, 2004, 22 (1): 25~27.
- [15] 顾成权, 方云. 黄土湿陷性的微观结构研究 [J]. 西部探矿工程, 2003, (89): 1~3.  
GU Cheng-quan, FANG Yun. Microstructure of loess collapsibility [J]. West-china Exploration Engineering, 2003, (10): 1~3.
- [16] 樊怀仁, 郭睿. 关中地区黄土湿陷性影响因素分析 [J]. 西安科技学院学报, 2003, 23 (2): 160~163.  
FAN Huai-ren, GUO Rui. Influencing factors of water-collapsible loess of Guanzhong area [J]. Xi'an University of Science & Technology Journal, 2003, 23 (2): 160~163.
- [17] 沙爱民, 陈开圣. 压实黄土的湿陷性与微观结构的关系 [J]. 长安大学学报 (自然科学版), 2006, 26 (4): 1~4.  
SHA Ai-min, CHEN Kai-sheng. Relationship between collapsibility and microstructure of compacted loess [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2006, 26 (4): 1~4.
- [18] 胡瑞林, 官国琳, 李向全, 张礼中. 黄土湿陷性的微结构效应 [J]. 工程地质学报, 1999, 7 (2): 161~167.  
HU Rui-lin, GUAN Guo-lin, LI Xiang-quan, et al. Microstructure effect on the subsidence of loess [J]. Journal of Engineering Geology, 1999, 7 (2): 161~167.
- [19] 高凌霞, 赵天雁. 黄土湿陷系数与物性指标间的定量关系 [J]. 大连民族学院学报, 2004, 6 (5): 63~65.  
GAO Ling-xia, ZHAO Tian-yan. The quantitative relation between loess collapsibility and its physical index [J]. Journal of Dalian Nationalities University, 2004, 6 (5): 63~65.
- [20] 王延涛. 常规物理力学性质指标在湿陷机理上的体现 [J]. 铁道工程学报, 2007 (3): 1~5.  
WANG Yan-tao. Mechanisms of collapse shown on physical mechanics index of the routine soil test [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2007, (3): 1~5.
- [21] 汤连生. 黄土湿陷性的微结构不平衡吸力成因论 [J]. 工程地质学报, 2003, 11 (1): 30~35.  
TANG Lian-sheng. Synthetic effect of microstructure and uneven suction on loess subsidence [J]. Journal of Engineering Geology, 2003, 11 (1): 30~35.
- [22] 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.  
YUAN Zhong-xia, WANG Lan-min, WANG Jun. Discussion water collapsibility of loess considering unsaturated soil and structure characteristics of loess [J]. Northwestern Seismological Journal, 2007, 29 (1): 12~17.
- [23] 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.  
CHEN Zheng-han, LIU Zu-dian. Mechanism of collapsible deformation of loess [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1986, 8 (2): 1~12.
- [24] 邢义川, 谢定义, 李永红. 非饱和黄土湿陷过程中有效应力变化规律 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23 (7): 1100~1103.  
XING Yi-chuan, XIE Ding-yi, LI Yong-hong. Effective stress and collapse process of unsaturated loess [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23 (7): 1100~1103.
- [25] 胡再强, 沈珠江, 谢定义. 结构性黄土的本构模型 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24 (4): 565~569.  
HU Zai-qiang, SHEN Zhu-jiang, XIE Ding-yi. Constitutive model of structural loess [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24 (4): 565~569.
- [26] 张茂花, 谢永利, 刘保健. 基于割线模量法的黄土增湿变形本构关系研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25 (3): 609~617.  
ZHANG Mao-hua, XIE Yong-li, LIU Bao-jian. Study on constitutive relation of loess moistening deformation based on secant-modulus method [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25 (3): 609~617.

fluvial sediments. Grain-size distribution was determined with a Malvern Mastersizer 2000 particle analyzer with a precision less than 1%. The analysis on grain-size indicates that the Xiashu loess and vermiculated red soil (VRS) in Jiujiang section consist of uniform fine particles. The particles display a bimodal distribution, with grain-size fraction of  $5 \sim 50 \mu\text{m}$  dominantly, and  $> 63 \mu\text{m}$  in a small part. The distribution is essentially similar to that in the Xifeng loess samples, but differ from the multimodal patterns of the lacustrine and fluvial deposits. The Xiashu loess and VRS are also similar to the Xifeng loess samples in grain-size parameter. The mean grain-sizes of the Xiashu loess and VRS are about  $6.4 \sim 6.8\phi$  ( $9.0 \sim 11.8 \mu\text{m}$ ) and  $7.1 \sim 7.2\phi$  ( $6.8 \sim 7.3 \mu\text{m}$ ) respectively, somewhat finer than those of the Xifeng loess samples. The Xiashu loess, VRS and Xifeng loess have a smaller mean square deviation value than the fluvial samples, indicating a much better sorting and relatively stable depositional dynamics. The Xiashu loess, VRS and Xifeng loess samples show a positive skewness, but the fluvial samples a negative one. The lacustrine samples also show a positive, but obviously larger skewness. In kurtosis value, the Xiashu loess and VRS samples are close to the Xifeng loess, and the fluvial sediments are obviously smaller than the lacustrine samples. All these indicate that the Red Earth Formation in Jiujiang area have the same origin as the Quaternary loess in northern China.

**Key words:** Jiujiang city of Jiangxi Province; vermiculated red soil; grain-size; origin

(上接第 94 页)

## DISCUSSION ON THE FURTHER RESEARCH IN LOESS HYDROCOMPACTION

XU Ling, DAI Fu-chu

(*Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*)

**Abstract:** Loess hydrocompaction has been discussed for a long time. During the 1960s ~ 1980s, with the application of SEM and mineral analysis, the micro-structure theory of loess hydrocompaction was developed and improved, but it has rarely been used in engineering numerical analysis because it failed to supply related force/stress parameters. Progress in soil engineering and soil mechanics makes it possible to find a new way to study the loess hydrocompaction. This paper discusses mechanical attribute of loess hydrocompaction and proposes a concept of generalized loess hydrocompaction. An analysis is made on some issues about study on hydrocompaction from the viewpoint of unsaturated soil mechanics, and finally a case study is given.

**Key words:** loess hydrocompaction mechanisms; micro-structure; broad-hydrocompaction; unsaturated soil mechanics