

文章编号: 1000-7598 (2013) 04-1121-10

结构性黄土一维湿陷特性的离散元数值模拟

蒋明镜^{1,2,3}, 胡海军^{1,2}, 彭建兵⁴

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 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;
3. 长安大学 公路学院, 西安 710064; 4. 长安大学 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 西安 710054)

摘 要: 针对结构性湿陷性黄土大孔隙和胶结特性, 应用离散元生成了不同含水率结构性黄土试样, 研究试样的一维湿陷特性。首先, 根据已有的结构性黄土试验资料和胶结颗粒材料离散元数值试验成果, 建立胶结强度和初始饱和度之间的关系。其次, 采用蒋明镜等提出的分层欠压法^[1]和胶结模型^[2]制得不同含水率结构性黄土离散元试样, 然后进行不同含水率双线法和同一含水率 4 个压力下单线法湿陷试验的离散元数值模拟。数值模拟结果表明, 提出的离散元分析方法能模拟天然结构性湿陷性黄土的主要力学性质, 随着含水率的减少, 结构屈服应力和最大湿陷压力增加, 湿陷系数随着压力先增加后减小, 湿陷起始压力为饱和试样的结构屈服应力, 单线法湿陷后压缩曲线与饱和试样的压缩曲线接近。此外, 模拟结果还表明, 不同含水率结构性黄土离散元试样的最大湿陷系数与天然结构性湿陷性黄土相差较远, 但在最大湿陷系数与孔隙比的比值上相接近; 结构屈服对应着胶结的逐步破坏, 湿陷伴随着大量的胶结破坏。提出了基于胶结数目的损伤变量, 研究了其在加载和湿陷过程中的变化规律。研究成果为认识黄土复杂力学特性和建立其本构理论提供了基础。

关 键 词: 黄土; 离散单元法; 双线法; 单线法; 湿陷系数

中图分类号: TU 444

文献标识码: A

Simulation of collapsible characteristics of structural loess under one-dimensional compression condition by discrete element method

JIANG Ming-jing^{1,2,3}, HU Hai-jun^{1,2}, PENG Jian-bing⁴

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai, 200092, China;

2. Key Laboratory of Geotechnical & Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;

3. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

4. Key Laboratory of Western Mineral Resources and Geological Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: Focusing on large voids and bonds of natural loess, structural loess samples with different water contents are prepared by discrete element method (DEM) and their collapsible characteristics under one-dimensional compression condition are investigated. First, based on laboratory test results on natural loess and DEM numerical results on bonded granular materials, the relation between bond strength and initial saturation is proposed. Then structural loess samples with different water contents are prepared by using the authors' multilayer under-compaction method and bonded contact model. Then double-oedometer tests on these samples with different water contents, single-oedometer tests on samples with same specific water content are simulated by DEM. The DEM results show that the structural yield stresses and the vertical pressures at maximum coefficient of collapsibility increase with decreasing of water content. The coefficient of collapsibility increases firstly and then decrease with pressure. The initial collapse pressure is equal to structural yield stress of saturated samples. The ratio of maximum coefficient of collapsibility to void ratio is near to that of natural collapsible loess. There is a nearly unique post-collapse compression line for DEM samples wetted at different vertical pressures. The yielding is related to bonds breakage and the collapse is accompanied with significant bonds breakage. Structural damage variable based on the bond number is proposed to reflect the damage degree of structure and its evolution during loading or wetting is studied. This study provides a foundation for learning the complex mechanical characteristics of loess and building constitutive law of loess.

Key words: loess; discrete element method; double-oedometer method; single-oedometer method; coefficient of collapsibility

收稿日期: 2012-01-05

基金项目: 国家杰出青年基金项目资助 (No. 51025932); 国家自然科学基金项目资助 (No. 10972158, No. 40534021); 国土资源大调查项目资助 (No. 1212010914013); 长江学者和创新团队发展计划资助 (No. IRT1029)。

第一作者简介: 蒋明镜, 男, 1965 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 国家杰出青年基金获得者, 主要从事天然结构性黏土、砂土、非饱和土、太空土和深海能源土宏观观测试验、本构模型和数值分析研究。E-mail: mingjing.jiang@tongji.edu.cn

1 引言

结构性和遇水湿陷是天然黄土两个重要的宏观力学特性,受到人们的广泛关注。关于结构性,已有学者^[3-4]针对原状黄土和重塑黄土的宏观力学特性差异,提出了结构性参数。关于湿陷性,已有学者^[5-6]对其湿陷特性和机制进行了研究。微观上,黄土颗粒之间存在的胶结和试样内的架空孔隙是其呈现结构性和湿陷性的主要原因^[4-5, 7-8]。另外,基于岩土破损力学理论的二元介质模型已经用于分析结构性黄土在荷载和水作用下的变形行为,由于目前室内试验手段的限制,通常需要假定结构损伤演化规律^[9-10]。在室内试验中,已有学者应用 CT 扫描试样断面来获得结构性黄土试样的孔隙、孔洞变化,裂隙开展等微观信息,并用 CT 数来建立加载或浸水过程的结构损伤变量^[11],但目前室内测试技术尚难以实时测试整个试样的颗粒和孔隙组构变化、胶结破坏的发展、胶结颗粒与无胶结颗粒各自分担的应力。离散元方法^[12]是一个能够准确实时获得数值试验过程中整个试样内的颗粒、孔隙、接触、应力、胶结^[1-2, 13-15]等微观信息的工具。鉴于此,本文尝试发展离散元法,以进行结构性湿陷性黄土一维湿陷特性的数值模拟,并基于胶结点数建立加载和浸水过程中的结构损伤变量。

进行离散元数值模拟时,生成的离散元试样要与结构性湿陷性黄土具有相近的结构,即要具有大孔隙比、接近颗粒直径的大孔隙和颗粒之间的胶结。本文应用二维离散元程序(NS2D)^[2],采用分层欠压法^[1]制得均匀含有大孔隙的松散样。黄土在饱和度小于 80%时为气连通,90%以上时为水封闭^[16],结构性黄土浸水湿陷过程一般要经历水气状态的改变,这将伴随颗粒间毛细水作用力较大的改变,并且,胶结物强度也随含水率变化而变化。目前已有试验测试得到分离两个接触的中间含有毛细水的粗糙玻璃球所需要的作用力^[17],但尚未发现有试验测试分离含毛细水黄土颗粒及含胶结物黄土颗粒所需要的作用力,并且尚未发现微观试验统计出结构性黄土试样中胶结点数和毛细水接触点数的比例。为简化问题,本研究忽略无胶结接触点处的毛细水作用,仅考虑非饱和黄土颗粒间胶结物胶结作用。另外,目前已有学者应用 PFC 胶结模型形成团粒^[14-15]研究团粒在加载作用下的破碎,也有应用离散元分析毛细水作用下的强度准则^[18]和其变化引起的土体湿陷行为^[19],但尚未有由于颗粒间胶结强度变化引起湿陷行为的离散元分析。

本文首先进行了两胶结颗粒剪切过程中胶结强度变小的数值试验,以验证此方法能模拟结构性黄土由于浸水引起颗粒间胶结强度的降低并导致颗粒间的滑移。其次,根据一维压缩条件下已有结构性黄土试验资料^[20-22]和胶结颗粒材料离散元(DEM)数值试验成果^[2],基于结构屈服应力等效的原则,建立了胶结强度和初始饱和度之间的关系。然后,采用蒋明镜等提出的分层欠压法^[1]和胶结模型^[2]制得了不同含水率结构性黄土离散元试样。接着进行了不同含水率的双线法和同一含水率 4 个压力下的单线法离散元数值模拟,将宏观现象与已有的室内试验结果进行了比较,基于试验过程中的胶结点数目提出了反映黄土结构破坏程度的损伤变量,研究了其在加载和湿陷过程中的变化规律。

2 胶结接触模型简介和两胶结颗粒的拉伸、剪切数值试验

2.1 胶结接触模型的简介

图 1 为蒋明镜等提出的胶结接触模型^[2]。与 Cundall 等提出的经典接触模型相比^[12],法向和切向均增加了胶结元件,用以模拟胶结在法向的抗拉特性和切向的抗剪特性。

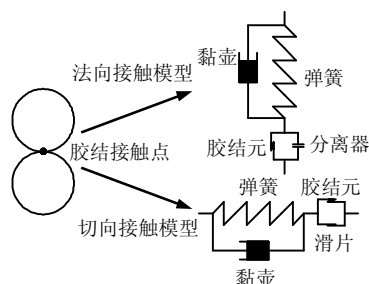


图 1 胶结接触模型^[2]

Fig.1 Contact model proposed for bonds^[2]

图 2 为该胶结接触模型的主要力学特性。实际胶结可以抵抗一定的扭矩作用^[23],本文暂不考虑该作用。胶结颗粒强度包线如图 3 所示。图中, F_n 为法向力,以压为正; R_{nb} 、 R_{tb} 分别为法向抗拉强度和切向抗剪强度。当 $F_n \leq -R_{nb}$ 时,胶结物将发生拉伸破坏,相应抗剪强度为 0。由于目前还未有黄土颗粒间胶结物 R_{nb} 与法向外荷载为 0 时的 R_{tb} 之间关系的试验资料,在本文分析中假定两者相等,并且当 $-R_{nb} < F_n \leq 0$ 时,抗剪强度峰值等于法向压力为 0 时抗剪强度峰值 R_{tb} ,胶结破坏后抗剪强度残余值为 0;当 $F_n > 0$ 时,胶结破坏前抗剪强度峰值为 R_{tb} 和法向荷载与摩擦系数乘积之和,胶结破坏后抗剪强度残余值为法向荷载与摩擦系数的乘积。下文中,

统一用胶结强度 R 代表 R_{tb} 和 R_{nb} 。

需要注意的是, 与非饱和土中可恢复的毛细水接触模型^[18]不同, 颗粒间胶结破坏后, 再次接触或无胶结颗粒产生接触时, 胶结模型不起作用, 即颗粒之间接触力和位移的关系为 Cundall 等提出的经典接触模型。

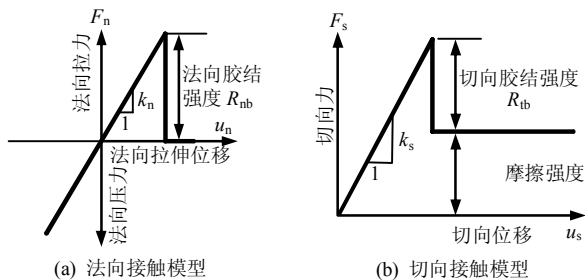


图2 胶结接触模型的力学特性^[2]
Fig.2 Mechanical performance of contact model proposed for bonds^[2]

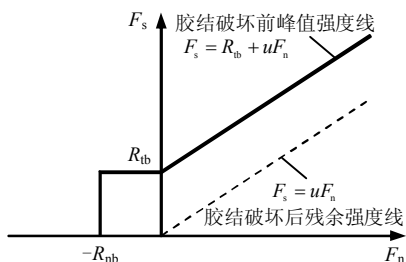


图3 胶结颗粒强度包线
Fig.3 Strength envelope of bonded granules

2.2 两胶结颗粒的拉伸、剪切数值试验

图4为两胶结颗粒的拉伸剪切数值试验示意图, 数值试验采用的参数见表1。共有6个试验, 第1个试验为拉伸试验, 测试模型的法向接触关系; 第2个试验为剪切试验1, 测试拉力作用下模型的切向接触关系; 第3个试验为剪切试验2, 测试无外荷载下模型的切向接触关系; 第4个试验为剪切试验3, 测试压力作用下模型的切向接触关系; 第5个试验为剪切试验4, 测试压力作用下剪切中胶结强度由 R_1 变为 R_2 时 ($R_2 < R_1$) 的切向接触关系, 其中变胶结强度时剪切力 F_s 小于 R_2 对应的抗剪强度峰值 $R_2 + uF_n$; 第6个试验为剪切试验5, 测试压力作用下剪切中胶结强度由 R_1 变为 R_2 时 ($R_2 < R_1$) 的切向接触关系, 其中变胶结强度时, $R_2 + uF_n < F_s < R_1 + uF_n$ 。

对于拉伸试验 (见图4(a)), 首先让两个颗粒先在胶结作用下平衡, 然后固定左边颗粒 (使其 x 、 y 方向速度为0, 转角速度为0), 设定右边颗粒的水平速度 v , 试验中记录接触法向位移以及接触法向力。对于剪切试验1~3 (见图4(b)~4(d)), 颗粒先在胶结作用和外荷载下 ($F_1, 0, F_2$) 平衡, 然后固定左边颗粒, 限制右边颗粒的转角为0, 设定竖向速度 v , 试验中记录接触切向位移以及接触切向力。对于剪切数值试验4 (见图4(e)), 颗粒先在胶结强度 R_1 胶结作用和力 F_2 下平衡, 然后固定左边颗粒, 限制右边颗粒的转角为0, 设定竖向速度 v , 循环600 000步 (此时剪切力为12 N, 图5中 e_i 点) 时, 将胶结强度设置为 R_2 , 继续在竖向速度 v 下进行剪切试验。剪切数值试验5 (见图4(f)) 步骤同剪切试验4, 只是在循环600 000步 (此时剪切力为12 N, 图5中 f_i 点) 时改变胶结强度。

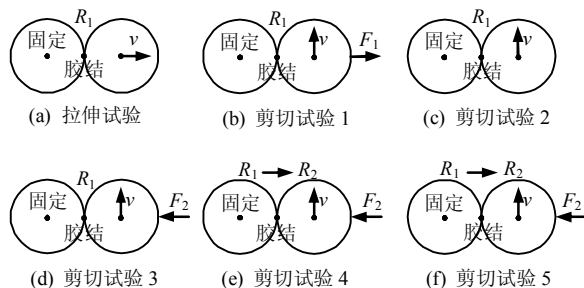


图4 两胶结颗粒的数值试验
Fig.4 Numerical test of two bonded granules

图5为数值试验结果和理论解的对比, 点 a 、 b 、 c 、 d 、 e 、 f 依次代表图4中的6个试验的强度结果, 其中下标 p 代表峰值 (peak) 强度, 下标 r 代表残余 (residual) 强度。对于拉伸试验和剪切试验1~3, 数值试验结果与理论值完全吻合; 对于剪切试验4, 当颗粒间剪切力小于改变胶结后对应的抗剪强度值时, 剪切力会增长至其峰值强度值 e_p , 其值与胶结强度对应的峰值剪切强度14 N相等, 然后降低至残余值 e_r (d_r , e_r , f_r 重合); 对于剪切试验5, 当颗粒间剪切力大于改变胶结强度后的抗剪峰值强度 (16 N > 14 N) 时, 胶结破坏到残余值 f_r 。由试验5、6可得, 用改变胶结强度的方法能够模拟结构性黄土单线法湿陷试验中由于浸水引起颗粒间胶结强度的减小以及由此导致的胶结破坏。

表1 两胶结颗粒数值试验中的参数

Table 1 Parameters used in numerical test of two bonded particles

颗粒直径 d / mm	颗粒间摩擦系数 μ	颗粒刚度 / 10^{10} (N/m)		胶结强度 / N		移动速度 v / 10^{-10} (m/s)	拉力 F_1 / N	压力 F_2 / N	时步 / 10^{-5} s
		法向 k_n	切向 k_s	R_1	R_2				
0.01	0.5	1.5	1.0	10	4	1	5	20	4

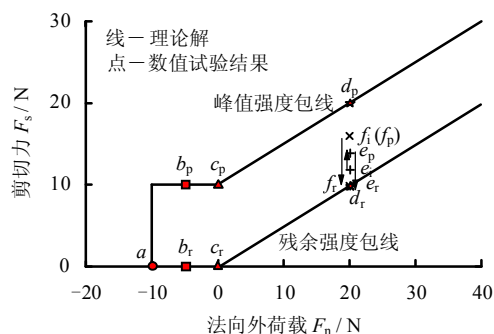


图5 数值试验中抗剪强度峰值及残余值与理论值的对比
Fig.5 Comparison on peak and residual shear forces between numerical solution and theoretical solution

3 胶结强度与初始饱和度之间关系

根据胶结颗粒材料离散元数值试验结果^[2], 胶结强度和结构屈服应力在 $R - \lg \sigma_y$ 坐标系下基本呈双折线。在低结构屈服应力和高结构屈服应力段可以用式 (1) 表示。

$$\frac{R}{Ip_a} = \begin{cases} a_0 \lg \left(\frac{\sigma_y}{p_a} \right) + b_0, & (\sigma_y \leq \sigma_{yt}) \\ a'_0 \lg \left(\frac{\sigma_y}{p_a} \right) + b'_0, & (\sigma_y > \sigma_{yt}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: R 为胶结强度 (N); I 为 1 m^2 ; p_a 为大气压 ($p_a = 101.3 \text{ kPa}$); σ_y 为结构屈服应力 (Pa); σ_{yt} 为低结构屈服应力和高结构屈服应力分界点; a_0 、 b_0 、 a'_0 、 b'_0 分别为参数。

对已有试验资料^[20-22]中结构屈服应力 σ_y 和初始饱和度 S_r 之间的关系采用指数函数, 乘幂函数和构造函数进行拟合:

$$\sigma_y / p_a = a_1 e^{-b_1 S_r} + c_1 \quad (2)$$

$$\sigma_y / p_a = a_2 S_r^{-b_2} + c_2 \quad (3)$$

$$\sigma_y / p_a = a_3 \times 10^{\frac{b_3}{1-S_r}} + c_3 \quad (4)$$

式中: a_1 、 b_1 、 c_1 、 a_2 、 b_2 、 c_2 、 a_3 、 b_3 、 c_3 分别为拟合参数。

采用式 (4) 拟合时, 如有饱和黄土的结构屈服应力时, $c_3 p_a$ 直接采用饱和黄土的结构屈服应力。

图 6 和表 2 为拟合结果和拟合效果。图 6 中, 由于文献[21]中 1[#]试样和 2[#]试样试验点较少, 3 个函数拟合效果均较好, 故只给出了构造函数的拟合曲线。从各拟合函数拟合效果可见, 构造函数优于指数函数, 指数函数优于乘幂函数。对于文献[20]的试验资料, 如果不固定式 (4) 的 $c_3 p_a$ 值, 则其拟合出的相关系数达到 0.998, 也是相关性最高的。因此, 本文应用式 (4) 作为结构屈服应力和初始饱和

度的关系来推得胶结强度和初始饱和度之间的关系。

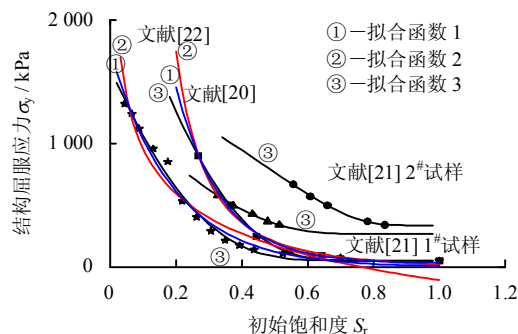


图6 结构屈服应力与初始饱和度之间的拟合关系
Fig.6 Relations between structural yield stress and initial saturation

表2 结构屈服压力和初始饱和度之间的关系
Table 2 Relations between structure yield stress and initial saturation

试验资料	拟合表达式	相关系数 R^2
文献[20]	$\sigma_y / p_a = 59.28 e^{-7.196 S_r} + 0.30$	0.995
	$\sigma_y / p_a = 0.52 S_r^{-2.186} - 0.34$	0.988
	$\sigma_y / p_a = 553.59 \times 10^{\frac{1.333 S_r}{1-S_r}} + 0.48$	0.992
文献[21] 1 [#] 黄土	$\sigma_y / p_a = 16.61 e^{-4.055 S_r} + 1.29$	0.997
	$\sigma_y / p_a = 4.11 S_r^{-0.684} - 3.12$	0.997
	$\sigma_y / p_a = 126.22 \times 10^{\frac{1.086 S_r}{1-S_r}} + 2.64$	0.997
文献[21] 2 [#] 黄土	$\sigma_y / p_a = 54.40 e^{-4.437 S_r} + 1.99$	0.999
	$\sigma_y / p_a = 1.90 S_r^{-1.958} + 0.62$	0.999
	$\sigma_y / p_a = 34.42 \times 10^{\frac{0.455 S_r}{1-S_r}} + 3.33$	0.999
文献[22]	$\sigma_y / p_a = 17.33 e^{-5.260 S_r} - 0.007$	0.983
	$\sigma_y / p_a = 22.35 S_r^{-0.167} - 23.39$	0.948
	$\sigma_y / p_a = 752.79 \times 10^{\frac{1.689 S_r}{1-S_r}} + 0.51$	0.990

将式 (4) 代入式 (1) 可得胶结强度和初始饱和度之间的关系:

$$\frac{R}{Ip_a} = \begin{cases} a_4 \lg \left(b_4 10^{\frac{-c_4}{1-S_r}} + c_4 \right) + d_4, & (\sigma_y \leq \sigma_{yt}) \\ a'_4 \lg \left(b_4 10^{\frac{-c_4}{1-S_r}} + c_4 \right) + d'_4, & (\sigma_y > \sigma_{yt}) \end{cases} \quad (5)$$

4 结构性黄土一维湿陷特性的离散元数值模拟

4.1 试样制备

天然黄土主要由粉粒组成, 粒径范围主要为

0.005~0.050 mm, 黏粒通常作为胶结物或团粒存在, 从黄土的电镜扫描照片得到最大团粒或颗粒的直径与最小团粒或颗粒的直径之比通常在5~10之间。另外, 考虑到离散元中级配范围大时一个代表样所需的颗粒数目会增加, 从而引起计算效率的下降。本文离散元试样颗粒级配如图7所示, 最小粒径为0.011 mm, 最大粒径为0.050 mm, 中值粒径0.020 mm, 通常黄土0.016~0.049 mm之间。表3为离散元数值模拟中的材料参数, 另外含水率的选取详见章节5.1。

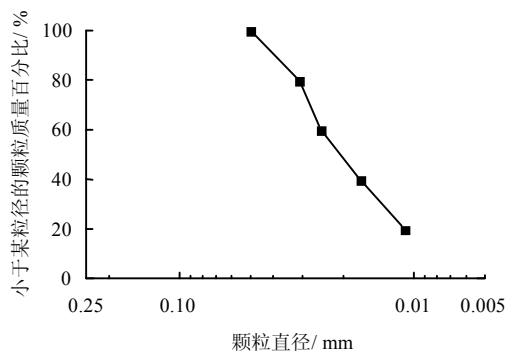


图7 黄土离散元试样颗粒级配曲线

Fig. 7 Granular size distribution of loess sample in DEM analysis

表3 结构性黄土湿陷特性离散元分析中的参数
Table 3 Parameters used in simulation of collapse of structural loess by DEM analysis

颗粒或墙 法向刚度 k_n /(N/m)	颗粒或墙 切向刚度 k_s /(N/m)	质量阻尼 系数 α	刚度阻尼 系数 β	局部阻尼 系数
1.5×10^{10}	1.0×10^{10}	4π	0	0

试样颗粒总数为4 960个。为了与将来双轴湿陷试验对比, 试样宽0.90 mm, 高宽比接近2, 这与通常室内试验进行一维湿陷试验所用的环刀尺寸不同。室内所选环刀尺寸高度和直径之比较小, 原因在于环刀边界存在一定的摩擦作用; 浸水时要求内部各部位达到饱和的时间差别不大, 使浸水为单元试验。数值试验时墙的摩擦系数可以设置为0, 另外胶结强度在同一时间更改为另一胶结强度, 因而高宽比将不受限制。

按以下2个步骤生成均匀松散胶结试样:

①首先颗粒间摩擦系数设置为1.0, 采用分层欠压法^[1]制备出初始平面孔隙比 $e_0 = 0.26$, 宽0.900 mm, 高1.834 mm的试样。然后, 将粒间摩擦系数设置为0.5。

②上下墙施加12.5 kPa的压力对试样进行一维初始压缩, 在颗粒接触处形成胶结, 直到形成稳定

的胶结试样。

黄土离散元试样的平面孔隙比0.26是孔隙和颗粒的平面面积之比, 平面孔隙比与三维孔隙比的换算可用下式^[24]确定:

$$e = \frac{2b\bar{h}\bar{r} - \sum_{i=1}^N \left(\frac{4}{3} \pi r_i^3 \right)}{\sum_{i=1}^N \frac{4}{3} (\pi r_i^3)} \quad (6)$$

式中: b 为试样的宽度; h 为试样的高度; N 为颗粒单元总数; $\bar{r}$ 为平均粒径。

根据式(6)所得三维孔隙比为0.905与实际黄土的孔隙比接近, 另外可以用湿陷系数与孔隙比的比值来消除这一影响。图8为胶结强度为1 N成样结束后试样内部的颗粒、孔隙图。从图中可以看出, 试样内有与颗粒直径相近的大孔隙存在, 与结构性湿陷性黄土类似, 这些大孔隙为浸水时颗粒滑移提供了空间。

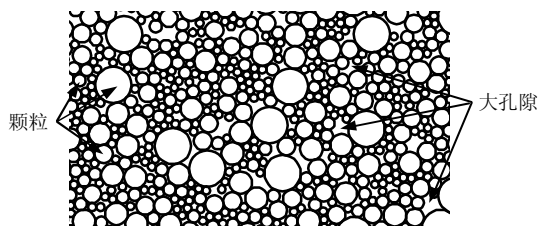


图8 离散元试样内部的颗粒和孔隙

Fig.8 Particles and voids in the DEM sample

4.2 数值模拟方案

表4为数值模拟方案。试验1模拟不同含水率下的一维压缩试验, 试验2模拟单线法和双线法试验。

表4 离散元数值模拟方案

Table 4 Numerical simulation scheme by DEM analysis

方案	室内试验和数值试验对比	
	试验资料	离散元数值试验
试验1	不同含水率下一维压缩试验 ^[20-22]	不同胶结强度下一维压缩试验
试验2	单线法和双线法试验 ^[25-29]	一维压缩过程中某一竖向压力下更改胶结强度及同上试验

5 数值模拟结果

5.1 不同含水率试样的一维压缩试验数值模拟结果

5.1.1 胶结强度与含水率之间关系参数的确定

图9为胶结强度和结构屈服应力的关系。从图可见, 胶结强度和结构屈服应力的关系符合式(1), 用该式拟合得到两者的关系为

$$\frac{R}{Ip_a} = \begin{cases} 2.93 \times 10^{-4} \lg \frac{\sigma_y}{p_a} - 3.62 \times 10^{-5}, & (\sigma_y \leq 1395 \text{ kPa}) \\ 1.42 \times 10^{-3} \lg \frac{\sigma_y}{p_a} - 1.34 \times 10^{-3}, & (\sigma_y > 1395 \text{ kPa}) \end{cases} \quad (7)$$

将式(4)代入式(7)便得到胶结强度与初始饱和度的关系。由于不同区域土结构屈服应力与初始饱和度的关系不尽相同,对于式(4)中的 a_3 、 b_3 结合3个文献的拟合值, $a_3 p_a$ 取为20 MPa, b_3 取为1。对于 $c_3 p_a$ 值取为饱和结构性黄土的结构屈服应力,本分析采用胶结强度1 N试样(饱和结构性黄土试样)的结构屈服应力。另外,黄土的结构屈服应力一般小于1.5 MPa,因此,只用式(7)中第1式,最终采用的胶结强度与初始饱和度的关系为

$$\frac{R}{Ip_a} = 2.93 \times 10^{-4} \lg(20\,000 \times 10^{\frac{1}{1-S_r}} + 145.81) - 6.24 \times 10^{-4} \quad (8)$$

依照数值模拟中黄土三维等效孔隙比为0.905, G_s 为2.65,胶结强度与含水率之间的关系为

$$\frac{R}{Ip_a} = 2.93 \times 10^{-4} \lg(20\,000 \times 10^{\frac{1}{1-2.93w}} + 145.81) - 6.24 \times 10^{-4} \quad (9)$$

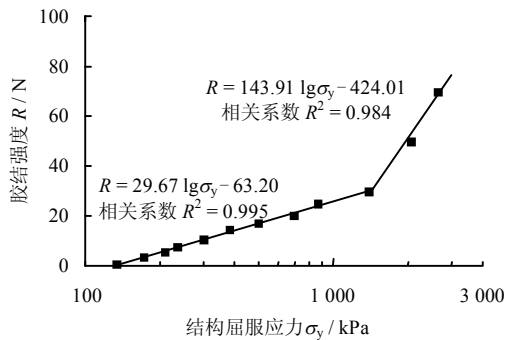
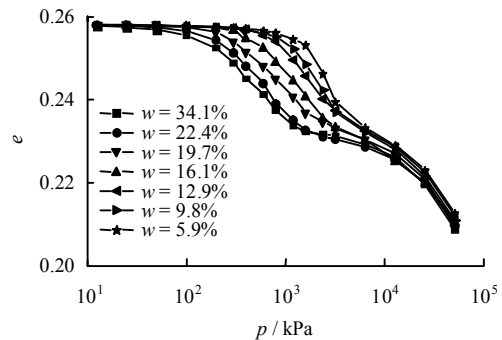


图9 胶结强度与结构屈服应力之间的拟合关系
Fig.9 Relation between bond strength and structure yield stress

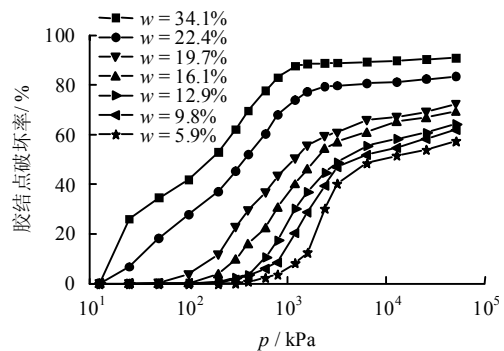
5.1.2 不同含水率下的一维压缩试验结果

图10(a)为不同含水率试样的一维压缩曲线,其中孔隙比采用的是平面孔隙比,图10(b)为胶结点破坏率随竖向应力的变化,其中胶结点破坏率定义为已破坏的胶结个数占初始胶结总个数的比率。从压缩曲线上可以看出,随着含水率的减小,压缩曲线向右移动,说明随着颗粒间胶结强度的增加,试样抵抗粒间拉伸和剪切力增加,使得其结构屈服应力增加;宏观规律与试验资料规律^[20-22]相

符。在进一步压缩过程中会出现平缓阶段,而试验中没有此现象,这是因为数值模拟中没考虑颗粒破碎的影响^[14-15],当试样压缩到一定密度后,颗粒间几乎没有进一步压缩的空间;应力大于10 MPa后,试样会出现进一步压缩,这是因为在计算试样孔隙比时颗粒面积忽略了颗粒间重叠部分的影响,根据线性接触准则,应力越大,重叠部分的面积增长越快,故表现为进一步压缩特性^[2]。另外,孔隙比随压缩应力变化幅度方面,采用换算的三维孔隙比,则孔隙比由初始的0.905变化到第2个平缓阶段处的0.845,因此,即使采用三维孔隙比,孔隙比变化范围与原状黄土压缩试验过程中孔隙比变化范围仍相差较远,这是由于二维情况下颗粒运动方式和滑移入孔隙需满足的孔隙几何条件与三维情况下有很大不同以及分析中未考虑颗粒破碎的影响。



(a) 压缩曲线



(b) 胶结点破坏率

图10 不同含水率试样一维压缩数值模拟结果

Fig.10 Numerical results from one-dimensional compression tests on samples with different water contents

对比图10(a)和图10(b)可见,胶结破坏随着竖向压力的增加逐渐增加,随着含水率的减小,需要在较大的竖向压力下才有胶结破坏,这同样说明了随着颗粒间胶结强度的增加,试样抵抗粒间拉伸力和剪切力增加。胶结破坏的开始阶段先于孔隙比变小阶段,说明试样内首先破坏的颗粒间胶结,与大

孔隙空间并不濒临, 未造成较大的孔隙体积改变。从统计的胶结点破坏类型上, 初始压力作用下胶结点拉伸破坏数目大于剪切破坏数目, 随着压力的增加拉伸破坏数目小于剪切破坏数目。总体上, 结构屈服在微观上伴随着胶结点破坏率的增加; 含水率越高, 同一压力作用下胶结点破坏率越大; 低含水率下试样最终的胶结破坏率低于高含水率的。

5.2 单线法和双线法试验数值模拟结果

图 11 为 $w = 12.9\%$ 试样单线法和双线法试验的压缩曲线和胶结点破坏信息。

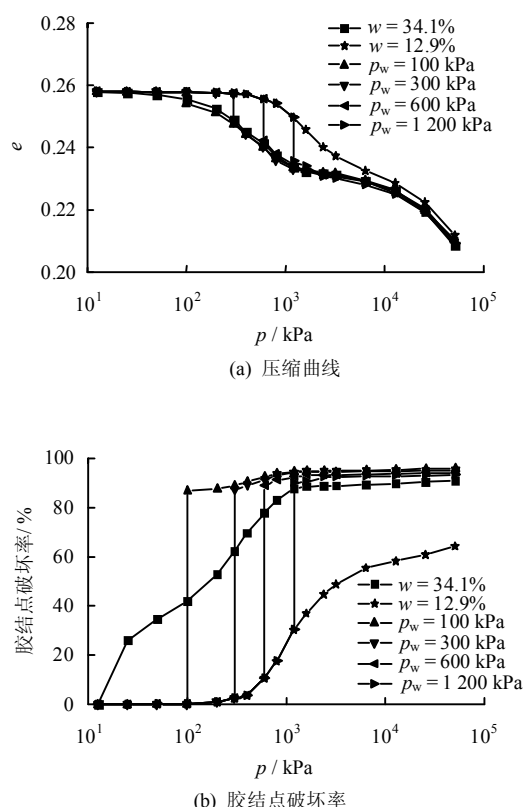


图 11 单线法和双线法湿陷试验模拟结果

Fig.11 Numerical results from single-oedometer tests and double-oedometer tests

单线法试验时, 对 $w = 12.9\%$ 试样施加竖向应力到 100、300、600、1 200 kPa 后, 将颗粒间胶结强度改为饱和时对应的胶结强度, 稳定后进一步增加竖向应力。依据双线法结果, 从图 11(a)可以看出, 在竖向应力小于饱和试样结构屈服应力时, 湿陷变形很小, 该应力相应于基于室内试验成果的结构破损应力 (structural damage stress, SDS) [25, 30], 也相当于前人称作的残余结构强度 [31] 和规范 [32] 定义的湿陷起始压力。当竖向应力大于饱和试样结构屈服应力时, 湿陷变形迅速增加, 并在 $w = 12.9\%$ 试样的结构屈服应力附近达到最大值, 该应力相应于基

于室内试验成果的广义结构破损应力 (generalized structural damage stress GSDS) [25, 30], 也相当于该试样的最大湿陷压力。单线法结果表明, 试样湿陷后压缩曲线基本与饱和试样的压缩曲线重合, 说明单线法具有接近统一的湿陷后曲线, 这与有关室内试验结果一致 [22, 25, 28–29]。对比图 11(a)和图 11(b)可知, 湿陷现象伴随着胶结的大量破坏, 单线法湿陷引起的胶结破坏率较双线法大。

图 12 为双线法和单线法得到的湿陷系数。由于饱和试样时屈服后的 $e - \lg p$ 曲线在压力小于 1 200 kPa, 基本呈直线, 大于 1 200 kPa 时偏离室内试验结果, 在湿陷系数分析时, 只给压力小于 1 200 kPa 的结果。从双线法结果可以看出, 在小于 1 200 kPa 范围内, 高含水率试样湿陷系数随压力增加先增加后减小, 低含水率试样湿陷系数随压力增加一直增加, 最大湿陷压力随含水率的减小而增加, 最大湿陷系数随含水率的减小而增加, 与试验资料规律 [22, 26–27, 33] 相符。从 $w = 12.9\%$ 试样结果可以看出, 双线法和单线法得到接近一致的湿陷系数, 湿陷系数随着压力先增大后减少, 在结构屈服应力附近达到最大。双线法能够较精确的确定最大湿陷系数发生时的应力。在湿陷系数上, 离散元试样明显小于天然黄土, 采用三维等效孔隙比也会得到同样的系数, 这是由于二维情况下颗粒运动方式和滑移入孔隙需满足的孔隙几何条件与三维情况下有很大不同, 如果采用湿陷系数与平面孔隙比的比值进行规则化, 其最大值为 0.4%~6.4%, 与天然湿陷性黄土接近。

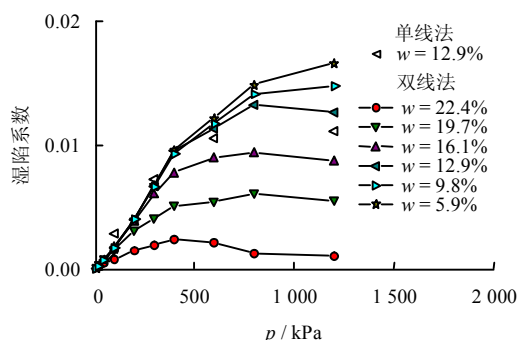


图 12 一维湿陷试验得到的湿陷系数

Fig.12 Coefficient of collapsibility under one-dimensional condition

图 13 为不同压力下湿陷系数与含水率之间的关系。曲线类型可分为 3 类: 第 1 类压力小于饱和黄土结构屈服应力; 第 2 类压力介于饱和黄土结构屈服应力和 $w = 22.4\%$ 试样结构屈服应力之间; 第 3

类是压力大于 $w=22.4\%$ 试样结构屈服应力。第 1 类曲线, 湿陷系数基本不随含水率变化; 第 2 类曲线, 湿陷系数随着含水率减小而增大; 第 3 类曲线与第 2 类曲线出现相交情况, 表明随着压力增加, 湿陷系数首先在高含水率出现降低现象, 数值试验规律与已有试验资料相符^[26-27, 33]。

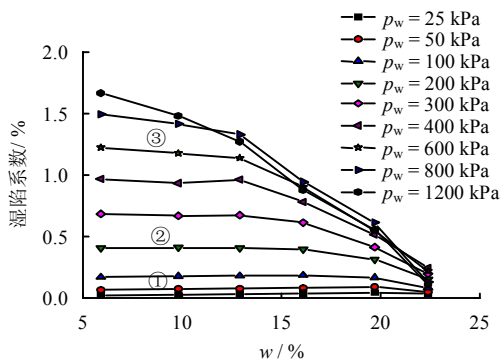


图 13 不同压力下湿陷系数和含水率的关系
Fig.13 Relations between coefficient of collapsibility and water content under different vertical pressures

6 结构损伤演化规律

通常认为, 结构性土的逐渐破损是从原状土向扰动土的变化过程, 根据这个思路, 基于数值模拟测得的胶结节点数目, 用下式定义的结构损伤变量来描述试样的损伤程度:

$$D = \frac{N_i - N_f}{N_i - N_f} \quad (9)$$

式中: N_i 为试样初始的胶结节点数; N_f 为试样完全破损时的胶结节点数, 本分析选用 $e=0.233$ 处的胶结节点数目, 主要考虑其后试样的压缩主要由于颗粒重叠引起; N 为试样某一压力下的胶结节点数目。 $D=1$, 表示试样的完全破损状态; $D=0$, 表示试样的最初状态, 即无损伤。

图 14 为不同含水率下结构损伤变量随体变的变化规律。

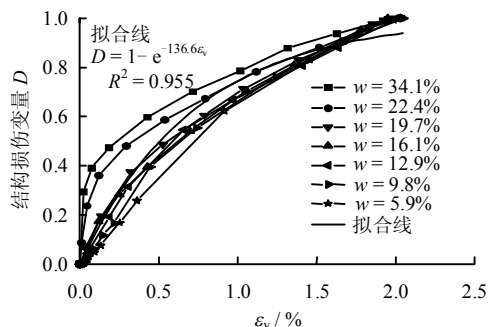


图 14 结构损伤变量随体变的变化
Fig.14 Structural damage variable versus volumetric strain

由图 14 可见, 各含水率下变化规律类似, 为提出普遍的规律方程, 用指数函数拟合所有含水率下结构损伤变量和体变的关系为

$$D = 1 - e^{-136.6\varepsilon_v} \quad (10)$$

这一函数形式与文献[8-9]的结构损伤函数类似。

图 15 为结构损伤变量随竖向应力的变化。从图可以看出, 加载和湿陷均引起结构的损伤增大。

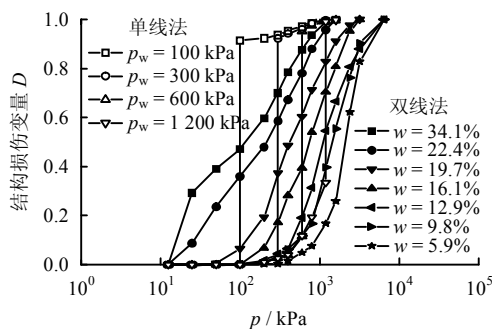


图 15 结构损伤变量随竖向应力的变化
Fig.15 Structural damage variable versus vertical pressure

7 结 论

(1) 建立的结构性黄土离散元试样中颗粒间胶结强度与天然结构性黄土含水率之间的关系, 能很好地将由含水率变化引起的天然结构性黄土结构屈服应力改变与由胶结强度变化引起的结构性黄土离散元试样结构屈服应力改变对等起来。

(2) 结构性黄土离散元试样具有湿陷起始压力, 其对应着饱和试样的结构屈服应力。湿陷系数随着压力先增大后减小, 本文中不同含水率结构性黄土离散元试样最大湿陷系数与孔隙比的比值在 0.004~0.064 之间, 与天然湿陷性黄土接近。

(3) 结构性黄土离散元试样单线法湿陷后压缩曲线与饱和试样的压缩曲线接近, 说明双线法和单线法试验接近等效, 但在胶结节点破坏率上, 单线法大于双线法。

(4) 微观上, 结构性黄土离散元试样结构屈服对应着胶结的逐步破坏, 湿陷伴随着胶结的大量破坏。本文提出了基于胶结节点数目的结构损伤变量, 结构损伤变量与体变的关系可近似用指数函数形式表示。

由于目前尚未实测得到结构性黄土胶结颗粒之间的微观力学特性, 引入离散元分析中的胶结模型有待进一步完善。虽然进行了三维孔隙比的等效,

但二维情况下颗粒运动方式和滑移入孔隙需满足的孔隙几何条件与三维情况下有很大不同。另外, 实际颗粒之间的胶结物强度并非均一值, 除胶结物接触点外还有毛细水接触点, 在高应力下除胶结破坏外还有颗粒破碎现象, 考虑这些因素的分析值得进一步的研究。

致谢: 感谢同济大学博士生杨期君和硕士生陈贺为本文进行了文字校核。

参考文献

- [1] JIANG M J, KONRAD J M, LEROUEIL S. An efficient technique for generating homogeneous specimens for DEM studies[J]. **Computers and Geotechnics**, 2003, 30(7): 579—597.
- [2] JIANG M J, YU H S, LEROUEIL S. A simple and efficient approach to capturing bonding effect in naturally microstructured sands by discrete element method[J]. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, 2007, 69(6): 1158—1193.
- [3] 谢定义, 齐吉琳. 土结构性及其量化参数研究的新途径[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 651—656.
XIE Ding-yi, QI Ji-lin. Soil structure characteristics and new approach in research on its quantitative parameter[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1999, 21(6): 651—656.
- [4] 邵生俊, 周飞飞, 龙吉勇. 原状黄土结构性及其量化参数研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(4): 531—536.
SHAO Sheng-jun, ZHOU Fei-fei, LONG Ji-yong. Structural properties of loess and its quantitative parameter[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(4): 531—536.
- [5] 杨运来. 黄土湿陷机理的研究[J]. 中国科学(B 辑), 1988, 39(7): 756—766.
- [6] 陈正汉, 刘祖典. 黄土的湿陷变形机制[J]. 岩土工程学报, 1986, 37(2): 1—12.
CHEN Zheng-han, LIU Zu-dian. Mechanism of collapsible deformation of loess[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1986, 37(2): 1—12.
- [7] 高国瑞. 黄土显微结构分类与湿陷性[J]. 中国科学(A 辑), 1980, 31(12): 1203—1208.
- [8] 雷祥义. 中国黄土的孔隙类型与湿陷性[J]. 中国科学(B 辑), 1987, 36(12): 1309—1315.
- [9] 沈珠江. 岩土破损力学与双重介质模型[J]. 水利水运工程学报, 2002, 24(4): 1—6.
SHEN Zhu-jiang. Breakage mechanics and double medium model for geological materials[J]. **Hydro-science and Engineering**, 2002, 24(4): 1—6.
- [10] 沈珠江, 胡再强. 黄土的二元介质模型[J]. 水利学报, 2003, 48(7): 1—6.
SHEN Zhu-jiang. Binary medium model for loess[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2003, 48(7): 1—6.
- [11] 朱元青, 陈正汉. 原状 Q_3 黄土在加载和湿陷过程中细观结构动态演化的 CT-三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(8): 1219—1228.
ZHU Yuan-qing, CHEN Zheng-han. Experimental study on dynamic evolution of meso-structure of intact Q_3 loess during loading and collapse using CT and triaxial apparatus[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(8): 1219—1228.
- [12] CUNDALL P A, STRACK O D L. The distinct element method as a tool for research in granular media[R]. Minnesota: University of Minnesota, 1978: 1—97.
- [13] 李凡. 岩土材料破损特性的颗粒流研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40(9): 78—81.
LI Fan. A study on the breakage properties of geological materials using particle flow simulation[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2007, 40(9): 78—81.
- [14] CHENG Y P, BOLTON M D, NAKATA Y. Crushing and plastic deformation of soils simulated using DEM[J]. **Geotechnique**, 2004, 54(2): 131—141.
- [15] BOLTON M D, NAKATA Y, CHENG Y P. Micro-and macro-mechanical behaviour of DEM crushable materials[J]. **Geotechnique**, 2008, 58(6): 471—480.
- [16] 赵敏, 何晖. 非饱和黄土水-气渗透性试验研究[J]. 西安科技大学学报, 2005, 25(3): 803—808.
ZHAO Min, HE Hui. Experiment on water-air permeability of unsaturated loess[J]. **Journal of Xi'an University of Science and Technology**, 2005, 25(3): 803—808.
- [17] LU N, LECHMAN J, MILLER K T. Experimental

- verification of capillary force and water retention between uneven-sized spheres[J]. **Journal of Engineering Mechanics**, 2008, 134(5): 385—395.
- [18] JIANG M J, LEROUEIL S, KONRAD J M. Insight into shear strength functions of unsaturated granulates by DEM analyses[J]. **Computers and Geotechnics**, 2004, 31(6): 473—489.
- [19] LIU S H, SUN D A, WANG Y S. Numerical study of soil collapse behavior by discrete element modelling[J]. **Computers and Geotechnics**, 2003, 30(5): 399—408.
- [20] 胡再强, 沈珠江, 谢定义. 非饱和黄土的结构性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(6): 775—779.
- HU Zai-qiang, SHEN Zhu-jiang, XIE Ding-yi. Research on structural behavior of unsaturated loess[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2000, 19(6): 775—779.
- [21] 陈立, 李靖, 王俊卿, 等. 黄土的结构强度及其与结构屈服压力的关系[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(6): 895—899.
- CHEN Li, LI Jing, WANG Jun-qing, et al. Relationship between structural strength and structural yield pressure of loess[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(6): 895—899.
- [22] 夏旺民. 黄土弹塑性损伤本构模型及工程应用研究[博士学位论文 D]. 西安: 西安理工大学, 2005.
- [23] JIANG M J, YU H S, HARRIS D. Bond rolling resistance and its effect on yielding of bonded granulates by DEM analyses[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 2006, 30(7): 723—761.
- [24] 周健, 贾敏才. 土工细观模型试验与数值模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [25] 蒋明镜, 沈珠江, 赵魁芝, 等. 结构性黄土湿陷性指标室内测定方法的探讨[J]. 水利水运科学研究, 1999, 21(1): 65—71.
- JIANG Ming-jing, SHEN Zhu-jiang, ZHAO Kui-zhi, et al. Laboratory determination of collapsibility index of structural loess[J]. **Hydro-Science and Engineering**, 1999, 21(1): 65—71.
- [26] 张茂花, 谢永利, 刘保健. 增(减)湿时黄土的湿陷系数曲线特征[J]. 岩土力学, 2005, 26(9): 1363—1368.
- ZHANG Mao-hua, XIE Yong-li, LIU Bao-jian. Characteristics of collapsibility coefficient curves of loess during moistening and demoiestening process[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(9): 1363—1368.
- [27] 张玉守. Q₂ 黄土的湿陷特征[硕士学位论文 D]. 西安: 长安大学, 2006.
- [28] ASSALLAY A M, ROGERS C D F, Smalley I J. Engineering properties of loess in Libya[J]. **Journal of Arid Environments**, 1996, 32(4): 373—386.
- [29] NOUAOURIA M S, GUENFOUD M, LAFIFI B. Engineering properties of loess in Algeria[J]. **Engineering Geology**, 2008, 99(1—2): 85—90.
- [30] 蒋明镜, 沈珠江. Microanalysis on artificially- prepared structured collapsible loess[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(4): 486—491.
- JIANG Ming-jing, SHEN Zhu-jiang. Microanalysis on artificially-prepared structured collapsible loess[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1999, 21(4): 486—491.
- [31] 林在贯. 黄土的特殊工程性质及岩土工程问题[J]. 西北勘察技术, 1991, (4): 1—17.
- [32] 南京水利科学研究所. GB/T50123—1999 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
- [33] 骆亚生, 谢定义, 邢义川. 原状黄土的地区湿陷特性及其潜在湿陷率[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2002, 30(5): 90—95.
- LUO Ya-sheng, XIE Ding-yi, XING Yi-chuan. Regional collapse characteristics of intact loess and its rate of potential collapse[J]. **Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry(Natural Science Edition)**, 2002, 30(5): 90—95.