

DOI: 10.11779/CJGE2021S1028

# 不同颗粒排列对砂土力学特性的影响研究

刘奉银<sup>1</sup>, 钟丽佳<sup>1</sup>, 仲 玥<sup>2</sup>

(1. 西安理工大学土木建筑工程学院岩土工程研究所, 陕西 西安 710048; 2. 陕西铁路工程职业技术学院, 陕西 渭南 714099)

**摘 要:**土的结构性研究的根本任务是寻找一种能够全面反映土粒排列和胶结特征的定量化指标。通过对不同颗粒排列方式下结构性砂土展开三轴固结排水剪切试验,研究了不同的颗粒排列方式对砂土力学特性及其应力-应变特性的影响效应,初步探索了颗粒的排列对砂土强度的影响规律。试验结果表明:相对密实度大的试样的内摩擦角值均高于相对密实度小的;相对密实度相同时,混合试样的内摩擦角明显高于排列试样,从下到上颗粒由大到小排列样的强度最大,反之对应的强度最小;这对工程实践,尤其是公路、铁路等路基填方工程有较好的指导意义。

**关键词:**砂土;结构性;颗粒排列;三轴剪切;强度

中图分类号:TU43

文献标识码:A

文章编号:1000-4548(2021)S1-0155-06

**作者简介:**刘奉银(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事非饱和土力学与黄土力学方面的研究工作。E-mail: liufy@sina.com。

## Effects of different particle arrangements on mechanical properties of sand

LIU Feng-yin<sup>1</sup>, ZHONG Li-jia<sup>1</sup>, ZHONG Yue<sup>2</sup>

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Shaanxi Railway Institute, Weinan 714099, China)

**Abstract:** The purpose of the study on soil structure is to find a quantitative index which can comprehensively reflect the characteristics of particle arrangement and cementation of soil. By means of the laboratory triaxial consolidation drainage shear tests on the mechanical properties of sand under different particle arrangements, the influences of different particle arrangement on the mechanical properties of structural sand are studied, the stress-strain characteristics were summarized and analyzed, and the effects of the particle arrangement on the strength of sand are studied. The results show that the internal friction angle of the samples with high relative compaction is higher than that with low relative compaction. When the relative compaction is the same, the internal friction angle of the mixed samples is obviously higher than that of the other samples; the strength is the largest when the particles of the samples are arranged from large to small (from bottom to top), on the contrary, the strength is the minimum. This study is of good guiding significance for engineering practice, especially for foundation filling projects such as highways and railways.

**Key words:** sand; structure; particle arrangement; triaxial shear; strength

## 0 引 言

土的形成历史使得土体“天生”具有结构性<sup>[1]</sup>。土的结构性包含固相土粒的矿物成分、颗粒大小、颗粒排列、粒间胶结等。结构性的存在导致重塑土与原状土各力学特性均会有所差异。

谢定义等<sup>[2]</sup>指出土的结构性同土的密度、粒度和湿度一样,也应是表征土的物理性质的重要指标,但迄今仍缺乏一个明确、合理的结构性指标。谢定义等<sup>[2]</sup>、沈珠江等<sup>[3]</sup>均指出对土结构性的研究是必然趋势,根本任务是寻找一个能全面反映土粒排列、联结特征的定量化指标。这不仅对指导工程的勘察、设计等有现实的价值和意义,而且能推动工程真正走向安全、经济。

## 1 研究背景

国内外学者在结构性研究方面已经取得了许多有价值的成果。蒋明镜等<sup>[4]</sup>用人工制备的结构性黄土进行了黄土的湿陷性研究。刘恩龙等<sup>[5]</sup>也开展了人工结构性土的室内三轴剪切试验研究,探讨结构性土的破坏过程和变形机理;通过深入研究还发现孔压特性、颗粒之间的胶结作用对结构性土的力学特性影响很大<sup>[6]</sup>。李建红等<sup>[7]</sup>对具有不同胶结强度和干密度的人工制备结构性土以及相应的重塑土进行了常规三轴试验对比研究。陈昌禄等<sup>[8]</sup>在重塑黄土中添加CaO、

**基金项目:**国家自然科学基金项目(12072260,51679198);西北旱区生态水利国家重点试验室项目(QNZX-2019-07)

**收稿日期:**2020-12-15

高岭土等制备人工结构性土,对其进行了真三轴试验研究。蒋明镜等<sup>[9]</sup>不仅用 X 衍射仪、电子显微镜对结构性土进行细观观察,还用扫描电镜能谱仪,对土样化学元素进行研究<sup>[10]</sup>。施斌等<sup>[11]</sup>对土的微观结构分析手段的发展阶段做了详细的总结。微观层面的研究与科技进步和高科技设备的合理应用息息相关,为更好地认识土的结构性创造了有利条件。

沈珠江先后提出结构性黏土的弹塑性损伤模型、非线性损伤力学模型<sup>[12-13]</sup>、广义吸力模型<sup>[14]</sup>、堆砌体模型及模型参数的测定方法<sup>[15]</sup>。谢定义等<sup>[16]</sup>用综合

结构势将土结构性量化参数定义为  $m_p = \frac{s_s/s_0}{s_0/s_r} = \frac{s_r \cdot s_s}{s_0^2}$ , 并将其引入土的本构关系和强度本构关

系,得到了以结构性参数为基础的本构关系。蒋明镜等<sup>[17-18]</sup>结合微观机制,建立了几种反映不同土结构性力学特性规律的本构模型。胡海军等<sup>[19]</sup>将离散元数值试验引入到结构性黄土本构模型进行验证。李建红等<sup>[20]</sup>针对凸多面体相互接触的性质,推导了三维状态下的微观接触力和宏观应力的关系。施斌等<sup>[21]</sup>从土的微观结构的角度,建立了各向异性黏性土蠕变的微观力学模型。刘维正等<sup>[22]</sup>提出了描述结构性土压缩损伤现象的一维扰动状态概念(DSC)压缩模型。邵生俊等<sup>[23-24]</sup>在黄土结构性研究方面做了大量的工作,近期还建立了综合考虑中主应力、土结构性和残余强度的黄土填料地震被动土压力公式<sup>[25]</sup>。

然而,学者们针对其所研究的土类而提出的本构模型并不具有通用性;试验研究成果局限于各自所采用土样的结构性研究,尚不能全面真实反映土的结构实质。因此,迄今还未能找到一个代表土结构性的综合参数来全面反映土粒排列和颗粒间联结特征的量化指标。

谢定义等<sup>[2]</sup>强调土结构性是土的联结和颗粒排列两方面的综合反映。对于土颗粒之间的胶结作用,已有不少学者通过人工制备结构性土进行试验研究,并取得了诸多成果。但对于颗粒排列的影响,国内外少有研究。土颗粒的排列方式多种多样,不同的排列方式会对土的强度产生不同程度的影响。国内外学者已在微观观察、本构模型、土力学试验等方面取得了一些有价值的成果,但有些成果只局限于其研究所用的土类,还不能全面反映土结构性本质特性。

本文采用砂土颗粒不同排列方式的土样开展三轴固结排水剪切试验,对不同颗粒排列下结构性砂土的应力-应变特性进行分析研究,进而初步探索砂土颗粒的排列方式对其应力-应变曲线及强度的影响规律。

## 2 试验介绍

### 2.1 试样制备

试验用砂是取自西安某工地的天然砂,经清洗、烘干、筛分后将砂料分组:0.1~0.25 mm(#1 粒组)、0.25~0.5 mm(#2 粒组)、0.5~0.75 mm(#3 粒组)、0.75~1 mm(#4 粒组)、1~2 mm(#5 粒组);再分别测定#1—#5 粒组砂样的最大干密度  $\rho_{dmax}$ 、最小干密度  $\rho_{dmin}$ ,并计算其相应的最小孔隙比  $e_{min}$ 、最大孔隙比  $e_{max}$ 。

设定初始含水率为 13%,相对密实度设定为  $D_r = 0.6$ 、 $D_r = 0.7$ 、 $D_r = 0.8$ 。根据设定的某一相对密实度和初始含水率条件,制备不同粒组排列的砂土试样。本次试验颗粒从下到上共采用 5 种排列方式:①下大上小(#5,#4,#3,#2,#1);②下小上大(#1,#2,#3,#4,#5);③中间小(#4,#2,#1,#3,#5);④中间大(#1,#3,#5,#4,#2);⑤混合样,将#1,#2,#3,#4,#5 按与排列样相等的质量均匀混合。砂土试样的粒组不同排列方式示意图如图 1 所示。

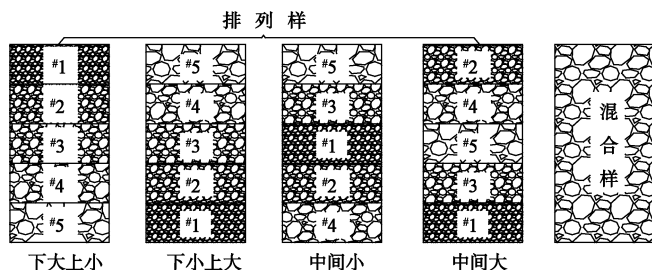


图 1 三轴试样粒组不同排列方式示意图

Fig. 1 Samples with different particle arrangements

根据设定的相对密实度,由下式计算对应的干密度:

$$\rho_d = \frac{\rho_{dmax}\rho_{dmin}}{\rho_{dmax} - D_r(\rho_{dmax} - \rho_{dmin})} \quad (1)$$

根据试样的总体积计算所需各粒组砂料的质量,分层制备所需的排列方式的砂样。

由于砂土不具黏聚性,所以自试样从制样器中取出到开始试验期间不能用手直接接触试样。在试样从制样器中推出时直接用铁板将试样缓慢移走,使试样能够顺利取出,如图 2 所示。



图 2 压样器中取出的具有一定颗粒排列的试样

Fig. 2 Sample with a certain particle arrangement taken from sampler

### 2.2 试验方法

制样完成后,将砂样放入三瓣膜饱和器中进行抽气饱和,再将饱和完成后的试样连同三瓣膜一起冷冻,

砂样冷冻到设定的时间后取出并快速装样、试验。试验操作遵守 GB/T50123—2019 土工试验方法标准<sup>[26]</sup>。剪切过程中的试样如图 3 所示。



图 3 剪切过程中压力室内的三轴试样

Fig. 3 Triaxial samples in pressure chamber during shearing

3 试验结果与分析

3.1 砂样应力-应变关系曲线

试验中,在各自相同条件(同一相对密度  $D_r$ 、围压  $\sigma_3$ )下,分别对不同排列方式的试样,进行固结排水三轴试验。并对试验数据、结果进行整理分析,得到各组试样( $D_r$  相同、试样排列方式不同)的应力 - 应变关系曲线,如图 4 ~ 6 所示。

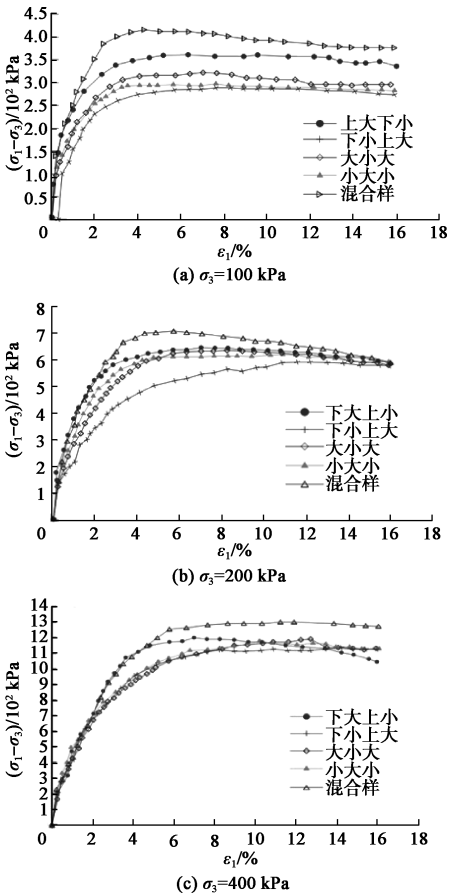


图 4  $D_r = 0.6$  时,各个围压下不同粒组排列方式的砂样的应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of samples with different particle arrangements under various confining pressures ( $D_r = 0.6$ )

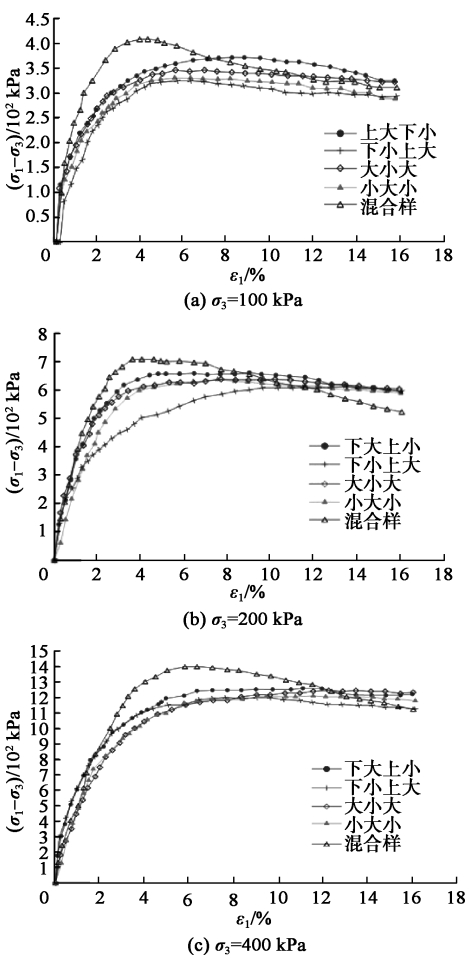


图 5  $D_r = 0.7$  时,各个围压下不同粒组排列方式的砂样的应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of Samples with different particle arrangements under various confining pressures ( $D_r = 0.7$ )

(1) 当砂样的相对密度和围压均相同时,不同排列方式试样的应力 - 应变关系曲线规律性较好。

(2) 相对密度相等、围压相同的情况下,随着应变的增大,在试样破坏之前,各个试样中,排列样的曲线均在混合样之下,排列样中下大上小排列样的偏应力值最大,下小上大排列样的偏应力值最小。

(3) 当围压较低(100,200 kPa),相同应变时不同排列方式试样的偏应力值差异较大。当围压较高时(400 kPa),随着应变的增加,各试样的偏应力的值差异较小。分析认为:在围压较高时,各个试样中孔隙的体积均被压缩,试样变密实,故排列方式不同的试样的应力 - 应变曲线相差不明显。

3.2 砂样强度特性

为了进一步分析不同排列方式下各个砂样的强度,将试验结果进一步整理并绘制  $p$ - $q$  曲线。图 7 是相对干密度为 0.6 时、不同排列方式下砂样的  $p$ - $q$  曲线,根据试验结果计算试样的内摩擦角  $\varphi$ (砂土试样的黏聚力  $c = 0$ )。

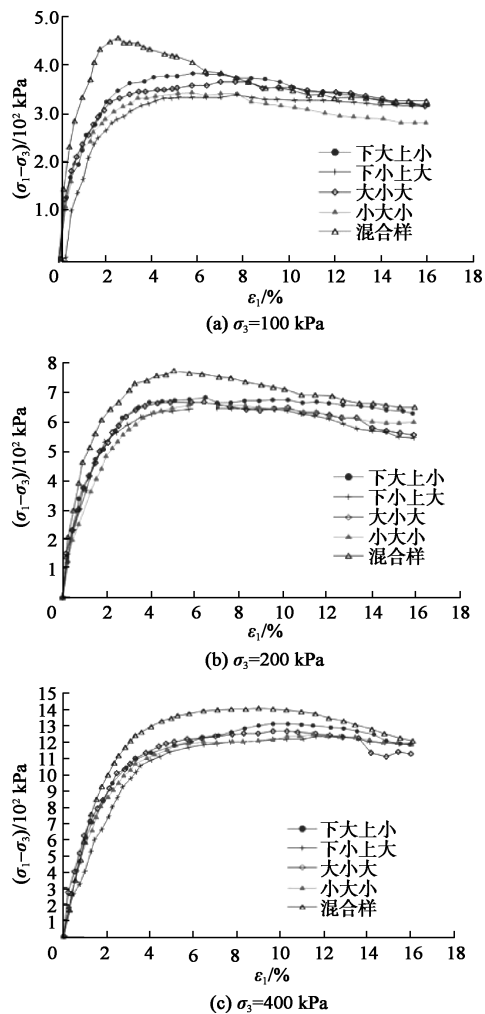


图6  $D_r = 0.8$  时,各个围压下不同粒组排列方式的砂样的应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves of samples with different particle arrangements under various confining pressures ( $D_r = 0.8$ )

同样计算出  $D_r$  为 0.7,0.8 时各试样  $\varphi$  值,汇总于表 1。

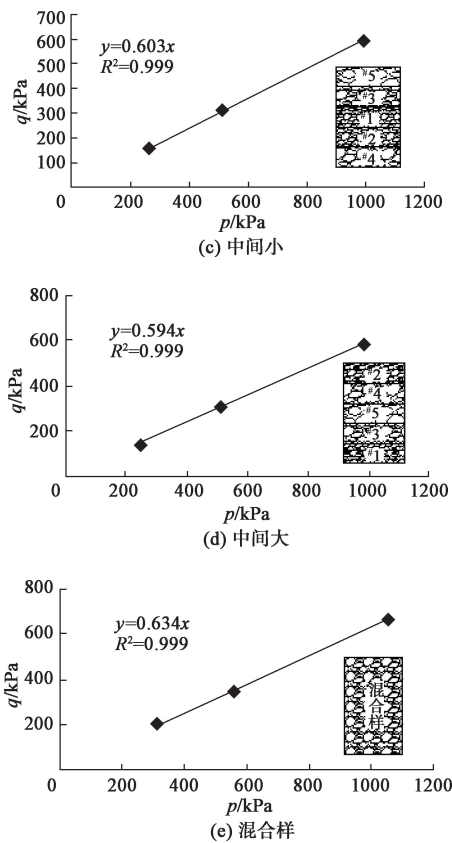
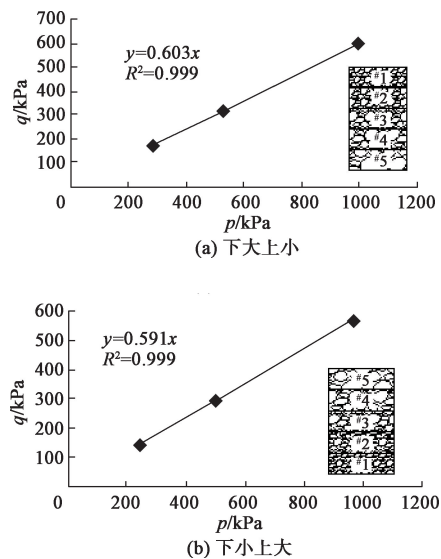


图7  $D_r = 0.6$ ,不同排列方式试样的  $p$ - $q$  曲线

Fig. 7  $p$ - $q$  curve of samples with different particle arrangements ( $D_r = 0.6$ )

表 1 不同排列方式试样的内摩擦角

Table 1 Internal friction angles under different particle arrangements

相对密实度 $D_r$	试样排列方式 (自下向上)	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$
0.6	下大上小	37.29
	下小上大	35.97
	大大大	36.99
	小小小	36.62
	混合	38.83
0.7	下大上小	38.02
	下小上大	36.84
	大大大	37.47
	小小小	37.33
	混合	39.53
0.8	下大上小	38.85
	下小上大	37.50
	大大大	38.21
	小小小	37.80
	混合	40.23

对比分析各相同密实度下不同颗粒排列方式对砂土试样的内摩擦角的影响,可以看出:

(1) 相对密实度相同时,混合试样的内摩擦角明



显高于其他排列试样。分析认为混合试样中粒径较大的颗粒之间孔隙被较小的颗粒填充,增大了摩擦阻力,因此强度高于排列样。

(2) 各相对密实度下,排列样中,试样自下到上颗粒由大到小的排列方式所对应的内摩擦角最大,其次是中间小、中间大排列,内摩擦角最小的是下小上大的排列样。

(3) 从表中的数据可以看出,相对密实度大的试样的内摩擦角均高于相对密实度小的。

## 4 结 论

本文主要研究了影响土结构性的一个主要因素——颗粒排列方式,通过改变颗粒排列方式,对结构性砂土力学特性开展三轴固结排水剪切试验研究,初步探索了颗粒的排列特性对砂土内摩擦角的影响规律,得出 3 点结论。

(1) 相对密实度相等、围压相同时,不同颗粒排列方式试样的应力-应变曲线大小规律性较好,混合试样的曲线均在排列样之上,但随着围压增大,差异性减小。

(2) 相对密实度越大,各种排列方式试样的强度值均越大。

(3) 相对密实度相同而颗粒排列方式不同,试样的强度值均不等,其中,混合试样的强度值均最大,排列样中颗粒下大上小排列样的强度值最大,下小上大排列样的最小。

因此,选取合适的排列方式和相对密实度,将会对砂土的整体强度提高有一定意义。

## 参考文献:

- [1] 蒋明镜, 沈珠江. 结构性黏土试样人工制备方法研究[J]. 水利学报, 1997, **28**(1): 57 - 62. (JIANG Ming-jing, SHEN Zhu-jiang. Study on the way of artificial preparation for structural clay samples [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997, **28**(1): 57 - 62 (in Chinese))
- [2] 谢定义, 齐吉林. 土结构性及其定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. (in Chinese))
- [3] 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, **18**(1): 95 - 97. (SHEN Zhu-jiang. Mathematical model of soil structure—a core problem of soil mechanics in the 21 Century [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, **18**(1): 95 - 97. (in Chinese))
- [4] 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(1): 65 - 71. (JIANG Ming-jing, SHEN Zhu-jiang, ZHAO Kui-zhi, et al. Laboratory determination of collapsibility index of structural loess [J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 1999(1): 65 - 71 (in Chinese))
- [5] 刘恩龙, 沈珠江. 人工制备结构性土力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2007, **28**(4): 679 - 683. (LIU En-long, SHEN Zhu-jiang. Experimental study on mechanical properties of artificially structured soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(4): 679 - 683. (in Chinese))
- [6] 刘恩龙, 沈珠江. 不同应力路径下结构性土的力学特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(10): 2058 - 2064. (LIU En-long, SHEN Zhu-jiang. Mechanical behavior of structured soils under different stress paths [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(10): 2058 - 2064. (in Chinese))
- [7] 李建红, 张其光, 孙 逊, 等. 胶结和孔隙比对结构性土力学特性的影响[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2008, **48**(9): 1431 - 1435. (LI Jian-hong, ZHANG Qi-guang, SUN Xun, et al. Effect of bonding and void ratio on the mechanical behavior of structured soil [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2008, **48**(9): 1431 - 1435. (in Chinese))
- [8] 陈昌禄, 邵生俊, 张 喆. 人工制备结构性黄土的真三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(8): 2231 - 2237. (CHEN Chang-lu, SHAO Sheng-jun, ZHANG Zhe. Study of artificial structural loess under true triaxial tests [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(8): 2231 - 2237. (in Chinese))
- [9] JIANG Ming-jing, SHEN Zhu-jiang. Microscopic analysis of shear band in structured clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, **20**(2): 102 - 108. (in Chinese)
- [10] JIANG Mingjing, SHEN Zhujiang. Preparation of Artificial structured Collapsible Loess and Its Behaviour in Oedometer Test [C] // 2nd International Conference on Unsaturated Soils, Beijing, 1998.
- [11] 施 斌, 姜洪涛. 黏性土的微观结构分析技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, **20**(6): 864 - 870. (SHI Bin, JIANG Hong-tao. Research on the analysis techniques for clayey soil microstructure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, **20**(6): 864 - 870. (in Chinese))
- [12] 沈珠江. 结构性黏土的弹塑性损伤模型[J]. 岩土工程学报, 1993, **15**(3): 21 - 28. (SHEN Zhu-jiang. An elastoplastic damage model for cemented clays [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1993, **15**(3): 21 - 28. (in Chinese))
- [13] 沈珠江. 结构性黏土的非线性损伤力学模型[J]. 水利水运科学研究, 1993(3): 247 - 255. (SHEN Zhu-jiang. A nonlinear damage model for structured clay [J]. Hydro-

- science and Engineering, 1993(3): 247–255. (in Chinese))
- [14] 沈珠江. 广义吸力和非饱和土的统一变形理论[J]. 岩土工程学报, 1996, **18**(2): 1–9. (SHEN Zhu-jiang. Generalized suction and unified deformation theory for unsaturated soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, **18**(2): 1–9. (in Chinese))
- [15] 沈珠江. 结构性黏土的堆砌体模型[J]. 岩土力学, 2000, **21**(1): 1–4. (SHEN Zhu-jiang. A masonry model for structured clays [J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, **21**(1): 1–4. (in Chinese))
- [16] 谢定义, 齐吉琳, 张振中. 考虑土结构性的本构关系[J]. 土木工程学报, 2000, **33**(4): 35–41. (XIE Ding-yi, QI Ji-lin, ZHANG Zhen-zhong. A constitutive laws considering soil structural properties [J]. China Civil Engineering Journal, 2000, **33**(4): 35–41. (in Chinese))
- [17] 蒋明镜, 周卫, 刘静德, 等. 基于微观力学机制的各向异性结构性砂土的本构模型研究[J]. 岩土力学, 2016, **37**(12): 3347–3355. (JIANG Ming-jing, ZHOU Wei, LIU Jing-de, et al. A constitutive model for anisotropic structured sandy soil based on micromechanical mechanism [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(12): 3347–3355. (in Chinese))
- [18] 蒋明镜, 付昌, 刘静德, 等. 不同沉积方向各向异性结构性砂土离散元力学特性分析[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(1): 138–146. (JIANG Ming-jing, FU Chang, LIU Jing-de, et al. DEM simulations of anisotropic structured sand with different deposit directions [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(1): 138–146. (in Chinese))
- [19] 胡海军, 蒋明镜. 引入离散元所得破损规律的结构性黄土本构模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, **35**(增刊1): 3241–3248. (HU Hai-jun, JIANG Ming-jing. Constitutive model of structured loess incorporating the breakage law obtained by discrete element method [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, **35**(S1): 3241–3248. (in Chinese))
- [20] 李建红, 沈珠江. 结构性土的微观破损机理研究[J]. 岩土力学, 2007, **28**(8): 1525–1532, 1550. (LI Jian-hong, SHEN Zhu-jiang. Study on mechanism of micro-failure of structured soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(8): 1525–1532, 1550. (in Chinese))
- [21] 施斌, 王宝军, 宁文务. 各向异性黏性土蠕变的微观力学模型[J]. 岩土工程学报, 1997, **19**(3): 7–13. (SHI Bin, WANG Bao-jun, NING Wen-wu. Micromechanical Model on Creep of Anisotropic Clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, **19**(3): 7–13. (in Chinese))
- [22] 刘维正, 石名磊, 缪林昌. 基于扰动状态概念的结构土压缩特性分析[J]. 岩土力学, 2010, **31**(11): 3475–3480. (LIU Wei-zheng, SHI Ming-lei, MIAO Lin-chang. Analysis of compressibility of structural soils based on disturbed state concept [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(11): 3475–3480. (in Chinese))
- [23] 邵生俊, 罗爱忠, 于清高, 等. 加荷增湿作用下 Q<sub>3</sub> 黏黄土的结构损伤特性[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(12): 2077–2081. (SHAO Sheng-jun, LUO Ai-zhong, YU Qing-gao, et al. Structural damage properties of Q<sub>3</sub> loess under tri-axial loading and moistening [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(12): 2077–2081. (in Chinese))
- [24] 邵生俊, 王丽琴, 陶虎, 等. 黄土的构度及其与粒度、密度、湿度之间的关系[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(8): 1387–1393. (SHAO Sheng-jun, WANG Li-qin, TAO Hu, et al. Structural index of loess and its relation with granularity, density and humidity [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(8): 1387–1393. (in Chinese))
- [25] 邵生俊, 陈菲, 邓国华. 基于平面应变统一强度公式的结构性黄土填料挡墙地震被动土压力研究[J]. 岩土力学, 2019, **40**(4): 1255–1262, 1290. (SHAO Sheng-jun, CHEN Fei, DENG Guo-hua. Seismic passive earth pressure against the retaining wall of structural loess based on plane strain unified strength formula [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(4): 1255–1262, 1290. (in Chinese))
- [26] 土工试验方法标准 GB/T 50123—2019[S]. 2019. (Standard for geotechnical testing method. GB/T 50123—2019 [S]. 2019. (in Chinese))

(编校: 胡海霞)