

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2015.03.15

水泥改良土微观结构定量研究

张齐齐,王家鼎,刘博榕,曾佑江

(西北大学地质学系,大陆动力学国家重点实验室,陕西 西安 710069)

摘要:本文对水泥改良土的微观结构进行了定量研究,分析了各结构参数随水泥掺量变化的规律。结果表明:水泥掺量越大,等效直径较大的结构单元体含量越多,小结构单元体数量相对减少,孔隙度减小,土颗粒的分形维数减小;试样结构单元体在 90° 方位内具有一定的定向性。试样物理力学性质的变化与其微观结构特征密切相关。

关键词:水泥改良土;微观结构;定量研究

中图分类号:411.3

文献标识码:A

文章编号:1000-3665(2015)03-0092-05

Quantitative research on microstructure of modified soil with cement

ZHANG Qiqi, WANG Jiading, LIU Borong, ZENG Youjiang

(Department of Geology, State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University,
Xi'an, Shaanxi 710069, China)

Abstract: The microstructure of modified soil with cement is quantitatively examined in the paper. The change in structure parameters with cement is analyzed. The results show that when the cement ratio t increases, the amount of larger structural unit body increases, the number of smaller structural unit body reduces, the porosity decreases, and the fractal dimension of the soil particle decreases. Structural unit body within 90° has a certain orientation. Physical and mechanical properties of samples are closely related to its microstructure features.

Keywords: modified soil with cement; microstructure; quantitative research

黄土孔隙发育,具有易渗透性、易湿陷性、易崩解性和水稳定性差等特性,易造成地裂缝、建筑物的不均匀沉降等问题,当其作为填料时,需对其进行改良。加水泥改良时,不同水泥掺量对黄土物理力学性质的影响不同。大量研究表明土的微观结构在很大程度上影响土的工程性质。高国瑞等^[1]对黄土的微结构进行了分类,探讨了黄土湿陷的微观机理,从微观和宏观两个角度研究了黄土的工程性质;胡瑞林等^[2]通过建立土体结构形态模型,进一步研究了软土的力学特性;蒋明镜等^[3]对剪切带及周围土体的微观结构进行了研究,为土体逐渐破损理论提供了依据;方祥位等^[4]通过 CT 图像技术研究了特殊土的受力、损伤过程中微结构的变化;王清等^[5]定量评价了不同养护龄期水泥

土的微观结构特征;施斌^[6]利用计算机图像处理的基本原理,探索了黏性土微观结构简易的分析方法。综合前人研究成果发现,对黄土微结构的研究一直是揭示黄土工程性质变化的一种方法,同时也发现前人对改良土微观结构的研究较少,故本文利用图像处理系统对不同水泥掺量的 SEM 扫描电镜照片定量处理后,提取试样的微观结构定量参数,通过定量参数的分析,为改良土物理力学性质产生变化的原因提供定量化依据。

1 试样的制备

试样取自延安市上更新统 Q_3^{el+dl} 黄土,土体孔隙

收稿日期:2014-09-28;修订日期:2014-10-29

基金项目:国家自然科学基金项目(41372269);高等学校博士学科重点基金(20116101130001);国家自然科学基金青年基金(41202187);“十二五”“211 工程”研究生自主创新资助项目(YZZ13007)

第一作者:张齐齐(1988-),女,硕士研究生,主要从事黄土湿陷、滑坡等灾害防治研究。E-mail:autumnzs@163.com

较发育,结构疏松,土质较均匀。压缩系数在 0.21 ~ 0.43 之间变化,属于中压缩性黄土,具有湿陷性,无侧限抗压强度低。其物理指标见表 1。试验所用的水泥为复合硅酸盐水泥 P·C 32.5。

表 1 试验黄土基本物理性质					
Table 1 Basic physical properties of loess					
比重 G_s	液限 $W_L/\%$	塑限 $W_p/\%$	塑性指数 I_p	最优含水率 $\omega_{opt}/\%$	最大干密度 $\rho_{dmax}/(g \cdot cm^{-3})$
2.679	37.10	15.17	21.93	13.14	1.84

试验严格按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123-1999)进行。改良土中水泥掺量分别为 0%、2%、4%、6%,采用 CSK-V1 型多功能电动击实仪进行重型击实试验,制作含水率为最优含水率 ω_{opt} 、压实系数 $\eta=0.95$ 的土样,在标准条件下养护 14 d 后,对土样处理后进行固结、直剪及扫描电镜试验。其中,扫描电镜试验的试样取干燥土样中间扰动最小的部分,切成 1 mm×1 mm×2 mm 的长方体,从中间掰开,将新鲜面作为观察面,其表面镀金处理后通过扫描电镜得到 SEM 照片。

2 试样的微观结构分析

2.1 微观结构的定性分析

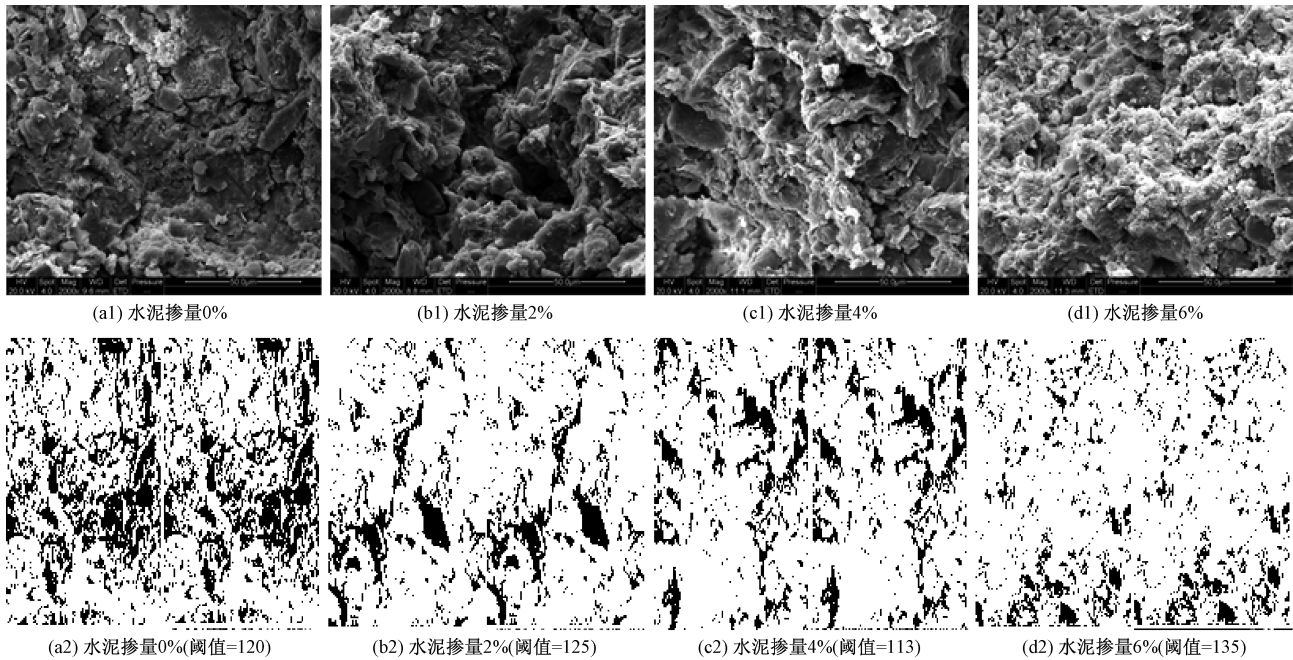


图 1 改良土 SEM 照片 (×2000)
Fig.1 SEM images of modified soil by zooming 2000 times

2.2 微观结构的定量分析

将试样放大 2 000 倍的扫描电镜照片进行二值化

本次试验使用的仪器为捷克 FEI 公司的 FEI Quanta 400 FEG 型环境扫描电子显微镜系统。

土的微观结构是指土颗粒的大小、形状、相互排列,尤其是相互连结的情况。从图 1(a1)可看出,水泥掺量 0% 黄土中黏土物质连续、无定向分布,呈集聚状,孔隙形状不规则,微孔隙发育,结构较致密,结构类型可归为基质状结构。水泥的掺入可以改变土颗粒连结方式。从水泥掺量 2% (图 1(b1))、水泥掺量 4% (图 1(c1)) 的扫描电镜照片上可看出,掺入水泥后,由于水泥水化反应的产物,使得土颗粒的胶结,团聚程度增大,大颗粒构成骨架,小颗粒不均匀的附在大颗粒表面,起连结作用,单元体接触以凝聚性为主,其结构类型归为骨架状结构。从水泥掺量 6% (图 1(d1)) 的扫描电镜照片可看出,水泥掺量增大到 6% 时,土粒间的连结状态发生了显著的变化,孔隙间明显出现了放射状及纤维状的水化硅酸钙,分布在颗粒表面或四周,连结了颗粒,形成较大的结构单元体,为团粒状结构。

图 1 中 (a2)、(b2)、(c2)、(d2) 分别为 (a1)、(b1)、(c1)、(d1) 在阈值为 120、125、113、135 下的黑白照片,其中黑色部分代表孔隙,白色部分代表颗粒。

处理,转换成黑白照片,最佳阈值以最能够反应照片中的孔隙、颗粒形态为标准。经过二值化处理后的照片,

可以提取到很多反应改良土孔隙及颗粒大小、排列特征、定向性、圆度等结构参数。本文根据研究目的,选用 2 个孔隙结构参数 - 平面孔隙率、定向频率和两个颗粒结构参数 - 等效直径、分形维数作为微结构研究的量化参数。

2.2.1 结构单元体大小及形态特征量化评价

- (1)等效直径 d 为与土颗粒面积相等的等效圆的直径, $d=(4a/\pi)^{1/2}$,其中 a 为实际土颗粒面积。
- (2)平面孔隙率为孔隙面积/(颗粒面积 + 孔隙面积),平面孔隙率 = $b/(b+a)$, b 为孔隙面积。

表 2 为结构单元体粒度分析成果,表 3 为试样平面孔隙率成果。从表 2 中可以看出,素土单元体的等效直径 d 主要集中在 $<2\ \mu\text{m}$ 的区间,加入水泥后单元体的等效直径变大,主要集中在 $2\sim5\ \mu\text{m}$ 、 $5\sim10\ \mu\text{m}$ 这 2 个区间,其次分布在 $>10\ \mu\text{m}$ 的粒径区间。随着水泥掺量的增加,减少的是 $<2\ \mu\text{m}$ 、 $2\sim5\ \mu\text{m}$ 粒径区间的结构单元体,随之增大的是 $5\sim10\ \mu\text{m}$ 、 $>10\ \mu\text{m}$ 粒径区间的结构单元体,说明颗粒等效直径有逐渐变大的趋势。平面孔隙率反映的是试样的紧密状态。从表 3 中可看出,随着水泥掺量的增加,颗粒面积增大,孔隙所占的面积逐渐减少,结构单元体趋于紧密。

表 2 试样微观结构粒度分析成果

Table 2 Results of microstructure granularmetric analysis of samples

水泥掺量/%	等效直径 $d/\mu\text{m}$			
	<2	$2\sim5$	$5\sim10$	>10
0	65	10	15	10
2	35.29	41.18	17.65	11.76
4	7.69	38.46	38.46	15.38
6	7.14	28.57	42.86	21.43

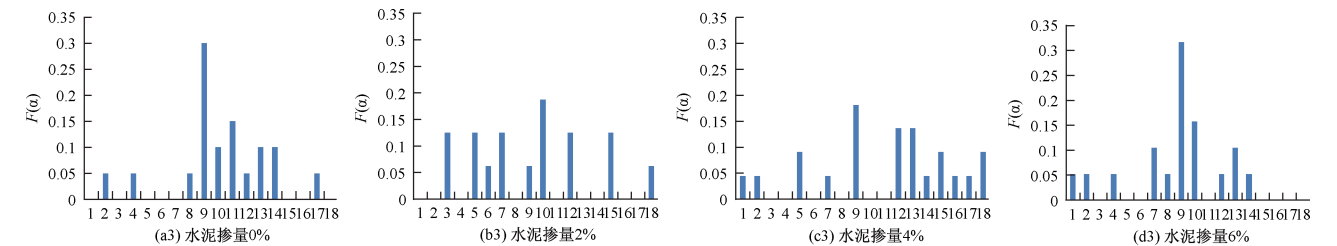


图 2 试样的定向频率直方图

Fig. 2 Histogram of orientation frequency of samples

2.2.3 颗粒形态的分形维数

颗粒形态的分维数计算采用面积 - 周长法^[11],其基本原理为:

$$\ln(P_E) = (D/2) \times \ln(A) + C \tag{2}$$

式中: P_E ——图像中任意一个代表土体颗粒的多边形

表 3 试样平面孔隙率成果

Table 3 Data and results of plane porosity of samples

水泥掺量/(%)	阈值	颗粒面积/ μm^2	孔隙面积/ μm^2	总面积/ μm^2	平面孔隙率/(%)
0	120	5078.07	9414.72	14492.79	65
2	125	4779.04	7556.17	12335.21	61
4	113	6145.45	8184.35	14329.80	57
6	135	6475.53	6475.53	12951.06	50

这些变化产生的原因是土与水泥反应的生成物在颗粒间起到了胶结作用,并且生成的新生物物质不断地填充到大孔隙中,结构单元体的团聚性不断增强,大颗粒增多,孔隙面积减小。这与直接从扫描电镜照片上观察到的一致。

2.2.2 孔隙定向性评价

孔隙的定向性评价采用定向频率 $F(\alpha)$,根据测量对象的定向角(长轴与水平方向的夹角),将 180° 等分成 n 个区,由此求出第 i 个区区内孔隙的定向频率。一般 $n=10$,则

$$F(\alpha) = k_i/k \times 100\% \tag{1}$$

式中: k_i ——定向角落入第 i 区内的测量对象个数;
 k ——总测量对象个数。

图 2 为不同水泥掺量试样孔隙的定向频率分布直方图。从图 2 中可看出,各试样孔隙的定向频率在大部分角度内都有分布,但 90° 左右的区区内分布概率更大,说明试样在这一区间内有明显的定向性。这主要是因为试样采用重型击实法制成,土颗粒及土孔隙在垂向冲击力的作用下进行重新排列,导致结构单元体长轴与 X 轴的夹角在 90° 区间内较集中^[9~10]。

的等效周长;
 A ——与之对应的多边形等效面积;
 C ——常数;
 D ——与之对应的土体孔隙形态分维数^[12]。
通过计算得到每一个土颗粒的等效面积和周长,

将这些数据绘制在双对数坐标系中,再将这些数据点拟合成一条直线,则通过拟合直线的斜率 K 即可获得颗粒形态的分维数:

$$D = K \times 2$$

(3)

图 3 为不同水泥掺量试样土颗粒等效周长与等效面积双对数关系,表 4 为试样放大 2000 倍 $\ln(P_E) \sim \ln(A)$ 线性关系及分维数。从表 4 中可看出,相关系数均大于 0.962,说明线性关系式与数据拟合度高,可用来研究颗粒形态的分形特征。土颗粒的分维数在 1~2 之间,随着水泥掺量的增加,颗粒的分维数减小。其原因是水泥与土中水水化作用后,析出的 Ca^{2+} 与土颗粒表面的 K^+ 、 Na^+ 发生离子交换、吸附作用等一系列反应,土颗粒的水膜变薄,使得大量的土颗粒聚集成团,同时析出大量的 Ca^{2+} 与土中的 SiO_2 和 Al_2O_3 进行化学反应,生成不溶于水的稳定纤维状结晶矿物;水泥水化后生成的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 不仅具有强烈的吸附性,这使得土团粒结合更紧密,形成水泥与土颗粒的链条状结构,土颗粒间的孔隙被填充,而且 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 不断地与空气中的 CO_2 和水中的 H_2CO_3 水解形成的 CO_2 反应生成 CaCO_3 ,其使土颗粒胶结形成粗粒化作用。这些反应使得土颗粒的团聚性增大,许多细小颗粒胶接在一起,土颗粒边缘趋于规整、圆润,故颗粒形态分维数变小。

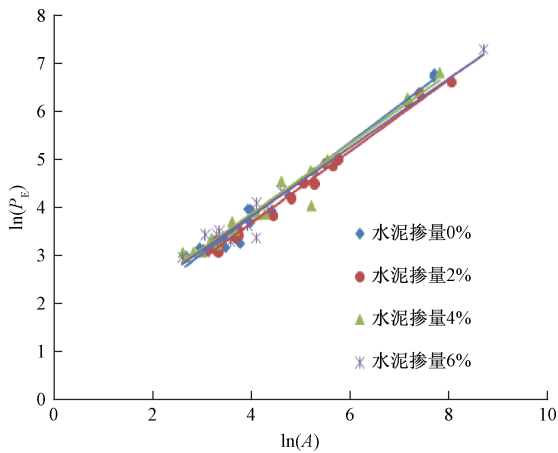


图 3 试样土颗粒等效周长与等效面积的双对数关系
Fig. 3 $\ln(P_E) - \ln(A)$ graph of samples

3 黄土改良效果分析

表 5 为改良土物理力学试验测试结果。从表 5 中可知,水泥的加入影响了黄土的最优含水量和最大干密度。水泥掺量增大,最优含水量增大,而最大干密度减小。最优含水量增大的原因是水泥水化反应后,大

孔隙减少、小孔隙的增多致使毛细作用增强,持水能力增大。水泥掺量越大,被水泥吸收的水分就越多,毛细作用也越强,击实时土体中的水分不易排出,所以最优含水量随着水泥掺量的增加而增大。土体与水泥发生化学反应,新生物质不断地填充到大孔隙中,土颗粒聚集形成团粒,土粒间更多的呈现出面一面、面一边接触,而且小颗粒的增多使颗粒移动时的摩擦阻力增大,阻碍了土颗粒在击实过程中相互靠近,也使得击实时用于克服摩擦阻力的功增多,有效击实功减小,所以最大干密度随着水泥掺量的增加而减小。

表 4 试样放大 2000 倍 $\ln(P_E) - \ln(A)$ 线性关系及分维数
Table 4 Linear relationship and fractal dimension of $\ln(P_E) - \ln(A)$

水泥掺量/(%)	线性关系式	R^2 相关系数	斜率 K	分维数 D
0	$\ln(P_E) = 0.777 \ln(A) + 0.707$	0.977	0.777	1.554
2	$\ln(P_E) = 0.747 \ln(A) + 0.705$	0.991	0.747	1.494
4	$\ln(P_E) = 0.727 \ln(A) + 0.970$	0.962	0.727	1.454
6	$\ln(P_E) = 0.713 \ln(A) + 0.991$	0.964	0.713	1.426

表 5 改良土物理力学试验测试结果
Table 5 Physical and mechanical test results of the modified soil

水泥掺量/%	最优含水量 $\omega_{opt}/\%$	最大干密度 $\rho_{dmax}/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	c/kPa	$\varphi/(\circ)$
0	12.81	1.84	93.80	29.77
2	13.14	1.73	234.60	38.41
4	13.89	1.71	249.10	40.56
6	14.76	1.68	269.30	41.92

水泥的加入增大了黄土的黏聚力、内摩擦角。黏聚力主要由颗粒间的范德华力、库仑力、胶结作用力等各种物理化学作用决定。水泥加入黄土后,不断地生成结晶物质,在颗粒间产生胶结作用力,并且水泥颗粒细,颗粒间的范德华力与库仑力大,使得颗粒进一步黏结,黏聚力增大。内摩擦力是由颗粒之间的咬合摩擦力和滑动摩擦力决定的。咬合摩擦力受土的密实度、圆度及颗粒本身的强度等的影响。滑动摩擦力与矿物组成、颗粒形状、级配等有关。加入水泥后,由于水泥的水化反应,孔隙度降低,改良了黄土级配,颗粒变得更加密实,故内摩擦角增大。

4 结论

(1)改良土中水泥掺量影响试样的微观结构。素土的结构类型为基质状结构,水泥掺量 2%、水泥掺量 4% 改良土的结构类型为骨架状结构,水泥掺量 6% 改良土的结构类型为团聚状结构。水泥掺入后,土粒间

的连结状态发生显著变化,孔隙减少,土体排列变得紧密,且在孔隙中出现了很多纤维状晶体,水泥含量越多,这些变化越明显。

(2)微观结构单元体的定量分析表明,水泥掺量越大,等效直径较大的土颗粒增多,而等效直径较小的土颗粒相对减小;孔隙面积减小,颗粒面积增大,平面孔隙率减小;颗粒形态的分形维数减小;因为试样采用重型击实法制成,使得定向角在 90° 区间内较集中。

(3)水泥的加入影响了黄土的物理力学性质。水泥掺量增大,最优含水量增大而最大干密度减小,同时水泥的掺入增大了黄土的黏聚力、内摩擦角。通过对试样微观结构特征的分析,可以作为改良土物理力学性质改变的原因。

参考文献:

- [1] 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, 1979(2):123-134. [GAO G R. Study of the microstructure and the collapse mechanism in loess soil from Lanzhou [J]. Journal of Lanzhou University, 1979 (2): 123 - 134. (in Chinese)]
- [2] 李向全, 胡瑞林, 张莉. 软土固结过程中的微结构变化特征[J]. 地学前缘, 2000(1):147-152. [LI X Q, HU R L, ZHANG L. The variation of microstructure during soft soil solidification Earth Science Frontiers, 2000 (1): 147 - 152. (in Chinese)]
- [3] Mingjing JIANG, Zhujiang SHEN. Microscopic analysis of shear band in structured clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998(2):102-108.
- [4] 方祥位, 陈正汉, 申春妮, 等. 原状 Q_2 黄土结构损伤演化的细观试验研究[J]. 水利学报, 2008(8): 940-946. [FANG X W, CHEN Z H, SHEN C N, et al. Micro-testing research on structure damage evolution of natural Q_2 loess[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008(8):940-946. (in Chinese)]
- [5] 王清, 董宏志, 陈慧娥, 等. 水泥固化软土的微观结构特性[C]//工程地质力学创新与发展暨工程地质研究室成立 50 周年学术研讨会. 北京:2008. [WANG Q, DONG H Z, CEHN H E, et al. The microstructure of solidifying soft soil by cement soil [C]//The 50th anniversary that the founding of the engineering geological research academic seminar about engineering geological mechanics of innovation and development. Beijing:2008. (in Chinese)]
- [6] 施斌. 粘性土微观结构简易定量分析法[J]. 水文地质工程地质, 1997,24(1):7-10. [SHI B. Simple methods of quantitative analysis on microstructure of clayey soils[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1997,24(1):7-10. (in Chinese)]
- [7] 刘莹. 吹填土固化后结构强度的形成及影响因素 [D]. 长春:吉林大学, 2001. [LIU Y. Quantitative study of microstructure characteristics of dredger fills after sediment [D]. Changchun: Jilin University, 2001. (in Chinese)]
- [8] 刘莹, 王清. 吹填土沉积后微观结构特征定量化研究[J]. 水文地质工程地质, 2006,33(3):124-128. [LIU Y, WANG Q. Quantitative study of microstructure characteristics of dredger fills after sediment[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2006,33(3):124-128. (in Chinese)]
- [9] 陈慧娥, 王清, 许晓慧. 不同有机质含量水泥加固土微观结构分析[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2009(6):945-948. [CHEN H E, WANG Q, XU X H. Analysis on microstructure of cement stabilized soil with different organic content [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2009(6):945-948. (in Chinese)]
- [10] 房后国, 刘娉慧, 袁志刚. 海积软土固结过程中微观结构变化特征分析[J]. 水文地质工程地质, 2007,34(2):49-52. [FANG H G, LIU P H, YUAN Z G. Analysis on characteristics of microstructure change during marine soft soil consolidation [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2007,34(2):49-52. (in Chinese)]
- [11] 孙霞, 吴自勤, 黄昀. 分形原理及其应用[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社, 2003. [SUN X, WU Z Q, HUANG Y. The fractal principle and application [M]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 2003. (in Chinese)]
- [12] 王宝军, 施斌, 刘志彬, 等. 基于 GIS 的黏性土微观结构的分形研究[J]. 岩土工程学报, 2004,26(2):244-247. [WANG B J, SHI B, LIU Z B, et al. Fractal study on microstructure of clayey soil by GIS [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(2): 244-247. (in Chinese)]
- [13] 羊群芳. 基于湿陷、震陷、液化灾害的黄土微观结构研究[D]. 兰州:兰州大学, 2011. [YANG Q F. Microstructure of loess in collapsibility, seismic subsidence and liquefaction [D]. Lanzhou :Lanzhou University, 2011. (in Chinese)]

责任编辑:张明霞