

3种因素影响下固化废弃淤泥的微观特性研究

杨 浩, 朱剑锋, 陶燕丽

Research on the Micro-characteristics of Solidified Waste Sludge under the Effect of Three Factors

YANG Hao, ZHU Jianfeng, and TAO Yanli

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202108041>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

冻融循环作用下花岗岩损伤的宏微观尺度研究

A study of granite damage in the macro and microscopic scales under freezing-thawing cycles

戚利荣, 王家鼎, 张登飞, 张永双, 李贞孝, 孙嘉兴, 马剑飞 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 65-73

基于IPP图像处理的膨胀土微观结构定量研究

A quantitative study of microstructure of expansive soil based on IPP image processing

侯超群, 席瑶, 孙志彬, 高可可 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 156-156

上新世红土微观结构参数与渗透系数的变化关系研究

A study of the relationship between the coefficient of permeability and microstructure of the Pliocene laterite

杨玉茹, 李文平, 王启庆 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 153-160

干湿循环作用下污泥固化土三维力学特性研究

Research on 3D mechanical properties of sludge solidified soil under the action of drying and wetting cycles

徐健, 赵绪, 马锐敏, 杨爱武, 杨少坤 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 110-118

动态荷载下大理岩断口形貌特征试验研究

An experimental study of the fracture morphology of marble under dynamic loading

王伟祥, 王志亮, 贾帅龙, 卢志堂 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 118-124

冻融作用下污泥固化轻质土动力特性及结构演化

Dynamic and structural characteristics of sludge solidified light soil under freezing-thawing action

杨爱武, 王斌彬, 钟晓凯 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 57-65



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202108041

杨浩, 朱剑锋, 陶燕丽. 3种因素影响下固化废弃淤泥的微观特性研究[J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(4): 91-99.
YANG Hao, ZHU Jianfeng, TAO Yanli. Research on the micro-characteristics of solidified waste sludge under the effect of three factors[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(4): 91-99.

3种因素影响下固化废弃淤泥的微观特性研究

杨浩¹, 朱剑锋¹, 陶燕丽^{1,2,3}

(1. 浙江科技学院土木与建筑工程学院, 浙江 杭州 310023; 2. 南京工业大学, 江苏 南京 211816;
3. 浙江五洲工程项目管理有限公司, 浙江 杭州 310023)

摘要: 为揭示初始含水率、固化剂掺量和龄期3种因素对固化废弃淤泥力学性质影响的本质, 以硫氧镁水泥固化废弃淤泥为研究对象, 开展了不同含水率(w)、固化剂掺量(W_g)和龄期(T)条件下固化淤泥的电镜扫描试验, 利用图像处理软件研究了固化淤泥的微观接触面积率(R_{CA})、平均丰度(C_m)和分形维数(D)受含水率、固化剂掺量和龄期的影响规律。结果发现: 含水率的增加会抑制硫氧镁水泥的水化, 增加固化淤泥结构的分散性, 进而减小固化淤泥的接触面积率、平均丰度, 提高其分形维数。而固化剂掺量和龄期有利于固化反应的发展, 促进扁圆状固化产物的生成, 提高固化淤泥结构的紧密性, 从而增加固化淤泥的接触面积率、平均丰度, 降低其分形维数。3种因素中, 龄期对固化淤泥的接触面积率和分形维数影响最为显著。
关键词: 固化淤泥; 微观结构; 接触面积率; 平均丰度; 分形维数

中图分类号: TU411.92

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)04-0091-09

Research on the micro-characteristics of solidified waste sludge under the effect of three factors

YANG Hao¹, ZHU Jianfeng¹, TAO Yanli^{1,2,3}

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China; 2. Nanjing Tech University, Nanjing, Jiangsu 211816, China;
3. Zhejiang Wuzhou Engineering Project Management Co. Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310023, China)

Abstract: To essentially investigate the effect-mechanism of water contents (w), curing agent dosages (W_g) and ages (T) on the mechanical behavior of stabilized waste sludge, a series of Scanning Electron Microscope (SEM) tests under different w , W_g and T are conducted by taking the waste sludge solidified by magnesium oxysulfate cement as the research object. The effects of w , W_g and T on the micro-parameters of the stabilized sludge such as contact area ratio (R_{CA}), average abundance (C_m) and fractal dimension (D) are addressed by using the Image Pro Plus. The results show that the increase in w will prevent the hydration of magnesium oxysulfate cement and enhance the dispersibility of the microstructure of the stabilized sludge, further decrease the values of R_{CA} and C_m and improve the value of D . Among the aforementioned three factors, T has a significant influence on the development of R_{CA} and D , and W_g plays an important role in the evolution of C_m .

Keywords: solidified sludge; microstructure; contact area ratio; average abundance; fractal dimension

收稿日期: 2021-08-19; 修订日期: 2021-11-12

投稿网址: www.swdgcgz.com

基金项目: 浙江省公益项目(LGG22E090002); 国家自然科学基金资助项目(51879133); 浙江省自然科学基金项目(LY17E080006)

第一作者: 杨浩(1997-), 男, 硕士研究生, 主要从事软土固化研究工作。E-mail: 212002814020@zust.edu.cn

通讯作者: 朱剑锋(1982-), 男, 博士, 教授, 主要从事软土加固机制及固化土微观结构研究工作。E-mail: zhujianfeng0811@163.com

我国东南沿海地区城市地铁、地下快速路等基础设施建设过程中出现了大量的废弃淤泥,以宁波地区为例,每年产生工程废弃渣土、淤泥高达 2 200 多万吨^[1]。这些废弃淤泥具有典型的高含水量、高孔隙比、高压缩性及低强度的特性,无法直接作为工程材料。近年来淤泥固化技术得到了迅速发展,除传统石灰、水泥固化剂得到实际应用之外^[2-6],粉煤灰复合固化剂^[7]、电石渣与生物灰复合固化剂^[8]、镁质水泥复合固化剂^[9-17]以其节能、环保等特点引起了学者们的浓厚兴趣。

作为影响固化土力学性能的重要因素,初始含水率、固化剂掺量、龄期对固化土力学性状影响规律的研究得到广泛关注。Lorenz 等^[2]建立了固化土剪切模量与含水率之间的指数函数关系。Lee 等^[3]提出了水泥固化土的无侧限抗压强度与水灰比呈负幂函数关系。董邑宁等^[6]认为固化剂强度与龄期、掺入比关系密切。王宏伟等^[9]发现淤泥固化土压缩性随着 MgO 掺量和龄期增加呈逐渐减小趋势。杨爱武等^[16]试验研究表明:城市污泥固化土无侧限抗压强度随龄期的增加而增大,含水率越高,无侧限抗压强度越低,超过 50% 之后强度低于 100 kPa。Vichan 等^[8]、朱剑锋等^[12-13]认为固化土无侧限抗压强度与水灰比和龄期分别呈负幂函数关系和对数函数关系。综上,固化剂掺量和龄期的增加或含水率的减少均会引起固化土孔隙率的减小,改善固化土的结构性,进而提高其强度和刚度。然而,上述研究结论均是基于唯象的试验结果提出的,含水率、固化剂掺量、龄期并非诱发固化土力学性状变化的根本诱因。

与天然土体类似,固化土的宏观力学性质主要受其微观结构特征(如颗粒形状、大小、微观孔隙等)控制。张亭亭等^[14]扫描电镜试验结果表明固化剂掺量的增加会减少孔径大于 1 μm 的孔隙体积,进而提高固化土的强度并降低渗透特性。刘松玉等^[15]研究发现含水率会引起固化土的微观孔隙率和孔隙分布。熊路等^[18]核磁共振试验和三维显微镜观测发现水泥掺量越高,孔径范围越小,试样整体的平整度和密实性越好,强度越高。因此,开展固化土微观结构变化规律的研究可以从本质上揭示 3 种因素(含水率、固化剂掺量、龄期)影响下固化土宏观力学性能演化规律。

鉴于扫描电镜(Scanning Electron Microscope, SEM)和图像处理技术(Image Pro Plus, IPP)在探究材料的微观结构特性中优势明显^[19-22],本文以硫氧镁水泥复合固化剂^[10-13]固化淤泥的微观特性为研究对象,通过

开展含水率(w)、固化剂掺量(W_g)和龄期(T)的 SEM 试验获取固化淤泥微观图像,分析含水率、固化剂掺量和龄期对固化淤泥微观结构参数(平均面积接触率 R_{CA} 、丰度 C 及平均丰度 C_m 、分形维数 D)的影响规律。

1 固化淤泥 SEM 试验

1.1 试验材料

选用宁波地铁某标段的废弃淤泥为试验用土,相应的天然含水率为 43.6%;孔隙比为 1.16;液、塑限分别为 39.2% 和 21.6%,煅烧测得的有机质质量分数为 0.2%,所用固化剂为镁质水泥复合固化剂(硫酸镁水泥:水玻璃:熟料:硅灰=3.5:1.2:1:1.1)^[10]。

1.2 试样制备

按照设计好的配比称取过筛后的干土、水、硫氧镁水泥复合固化剂,将其充分混合搅拌均匀,分 3 层装入三瓣模(39.1 mm×80 mm)中,每层振捣 2~3 min 排出气泡。移至标准养护环境(温度 20±5 °C)、恒湿(相对湿度 70%±5%)^[23]下继续养护至设计龄期。

采用低温液氮干燥法获取 SEM 试验用干燥样品,用橡胶榔头把试样敲碎,选择截面为 1 cm×1 cm 的自然断裂面为观察面,将样品固定在金属托盘并用导电胶相连,把金属托盘放置到真空喷射仪中进行抽真空喷金处理完成后,先用低倍数寻找合适的观察截面,获取具有代表性的微观结构图像,然后逐渐从低倍到高倍拍摄试样样品的微观表面。

1.3 试样方案

如表 1 所示,以含水率 $w=50\%$ 、固化剂掺量 $W_g=15\%$ 和龄期 $T=7$ d 为基准(编号 S0),开展相应的 SEM 试验并与废弃淤泥(编号 SS0)的 SEM 结果进行对比,获取固化淤泥的加固特点,然后分别开展固化淤泥在不同 w (编号 S1—S4)、 W_g (编号 S5—S8)和 T (编号 S9—S13)时的 SEM 试验。

表 1 SEM 试验方案
Table 1 Test plan of the SEM

试验编号	$W_g/\%$	$w/\%$	T/d
SS0	0	50	7
S0	15	50	7
S1—S4	15	40, 45, 55, 60	7
S5—S8	5, 10, 20, 25	50	7
S9—S13	15	50	3, 5, 9, 11, 14

1.4 固化淤泥微观参数

IPP 可同时选择颗粒和孔隙,测量多种材料微观参数。本文选取固化淤泥颗粒进行研究,并采用平均

接触面积率^[20-21]、丰度^[24]、分形维数^[25-27]等3个微观参数来描述其微观特征,进而揭示其固化机理,其中平均接触面积率反应孔隙体积大小,丰度评价颗粒形状的整体特征,分形维数用于衡量固化淤泥颗粒分形特征的表现形式,主要分析颗粒单元体的粗糙程度。

2 试验结果和分析

2.1 废弃淤泥和基准配比下固化淤泥 SEM 图

图1为废弃淤泥(SS0)和标准配比(S0)下固化淤泥的SEM图(5 000倍)。由图1(a)可知,淤泥颗粒主要矿物为石英和伊利石,呈扁片状,且孔隙密布,而固化淤泥(图1b)的SEM图像表明:扁圆状白色物质显著增加,且覆盖在淤泥颗粒表面。另外还有硅灰和熟料(呈椭球状)填充淤泥颗粒之间,提高了固化淤泥的密实度。

2.2 不同含水率下固化淤泥的 SEM 图

图2是不同含水率下固化淤泥的SEM图(1 000倍),从图中可明显看出:随着含水率的增加,白色固化产物减少,其主要原因在于改性硫氧镁水泥属于气硬性胶凝材料,含水率的增加降低了固化剂的浓度,进而减小了固化产物产量。因此,含水率的升高对固

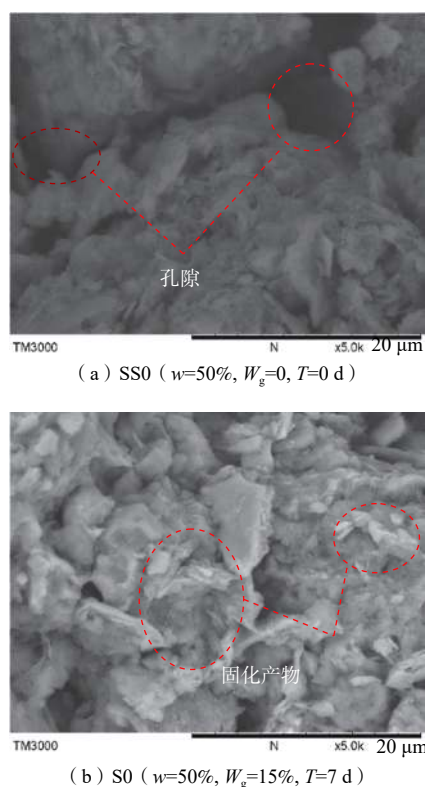


图1 废弃淤泥和固化淤泥的 SEM 图

Fig. 1 SEM graph of the waste sludge and solidified sludge

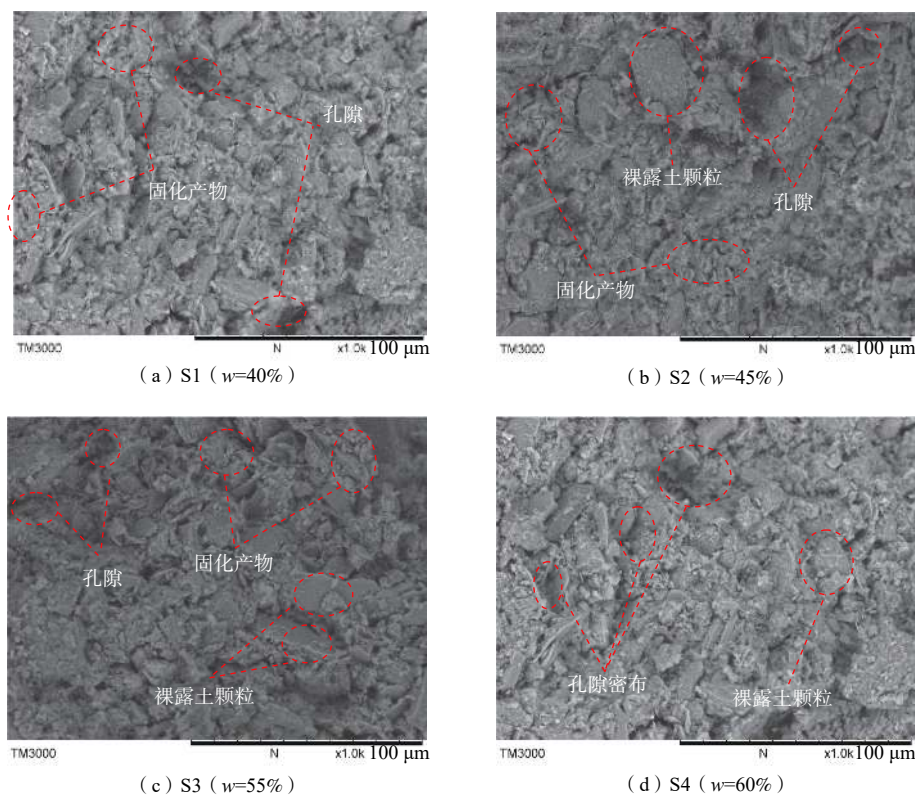


图2 不同含水率下固化淤泥的 SEM 图

Fig. 2 SEM of the solidified sludge under different moisture content

化淤泥的固化起抑制作用。

2.3 不同固化剂掺量下固化淤泥的 SEM 图

由图 3 可知: 当固化剂掺量较小时, 淤泥中土颗粒主要呈碎散状态, 颗粒联结较弱, 孔隙较大且白色固化产物较少。随着固化剂掺量的增加, 白色固化产物逐渐增多, 并包裹土颗粒, 进而形成纵横交织的网络, 使其排列越来越紧密。

2.4 不同龄期下固化淤泥的 SEM 图

图 4 是不同龄期下固化淤泥的 SEM 图像 (1 000 倍)。随着龄期的增长, 白色固化产物增多, 淤泥颗粒间排列更加紧凑, 颗粒之间孔隙被水化产物填充而更加密实。从图 4(e) 中可以看出, 14 d 的固化淤泥颗粒排列比较密实, 形成了明显的土骨架。

综上, 硫氧镁水泥固化淤泥的微观结构受含水率、固化剂掺量和龄期影响显著, 且与普通硅酸盐水泥固化土变化规律一致^[6,16]。随着固化剂掺量和龄期的增加, 固化产物增多, 固化淤泥微观结构性增强。然而含水率的增加抑制废弃淤泥的固化作用, 从而减弱了其结构性。

3 固化淤泥微观结构参数变化规律

为定量研究固化淤泥微观结构参数受含水率、固化剂掺量和龄期的影响规律, 现利用 IPP6.0 软件对图 2—图 4 所示固化淤泥的 SEM 图像进行处理, 获得不同含水率、固化剂掺量和龄期下固化淤泥的微观接触面积率 (R_{CA})、丰度 (C 、平均丰度 C_m) 和分形维数 (D) 等微观参数。

3.1 不同含水率下固化淤泥的微观特性

3.1.1 对固化淤泥微观接触面积率的影响

表 2 为与图 2 对应的不同含水率下固化淤泥的微观接触面积率统计表。其中 Z 为阈值, 其他参数同前。由表 2 可知: 固化淤泥的 R_{CA} 随着 w 的增大逐渐减小, 且当 w 由 40% 增至 60%, R_{CA} 从 14.5% 降低至 8.2%, 降低幅度高达 43.4%。其主要原因在于: 一方面 w 越大, 固化淤泥的初始孔隙比越大, 接触面积率越小; 另一方面, w 的增加抑制了废弃淤泥的固化, 固化产物减少, 固化淤泥结构疏松, 接触面积率显著减小。

3.1.2 对固化淤泥丰度的影响

图 5 对应的是不同 w 下固化淤泥丰度柱状图和平均丰度曲线。由图 5(a) 可知, 固化淤泥的 C 值主要介于 0.4 ~ 0.8 范围内, 因此, 固化淤泥微观颗粒接近扁圆形。由图 5(b) 所示, 随着 w 的增加, C_m 逐渐减小, 其主要原因在于 w 的增加抑制了固化淤泥的水化反应,

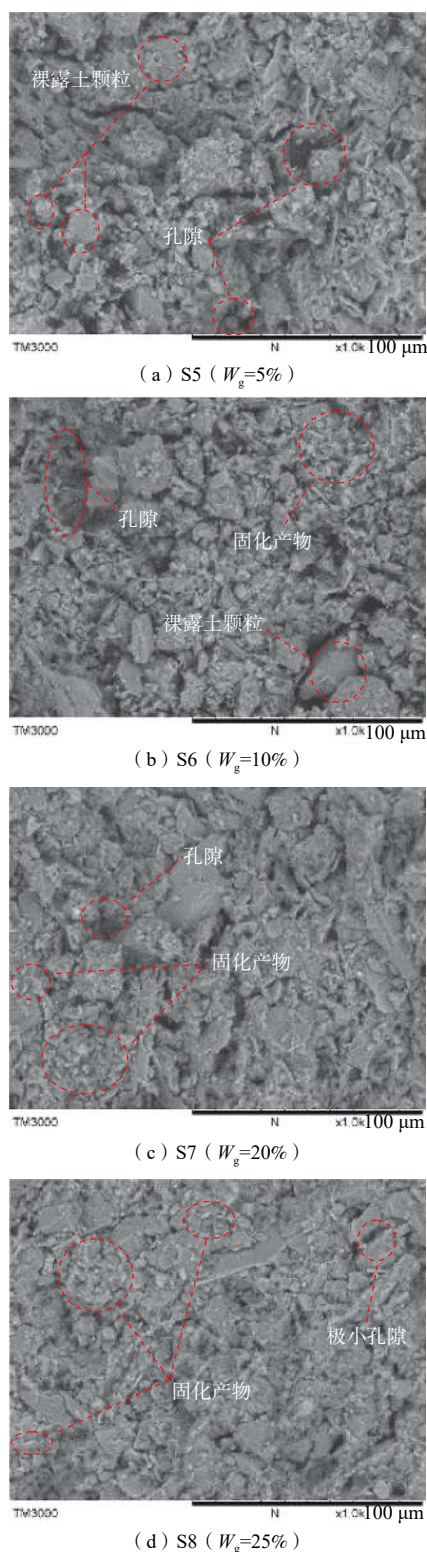


图 3 不同固化剂掺量下固化淤泥的 SEM 图

Fig. 3 SEM of the solidified sludge with different content of the curing agent

降低了扁圆状固化产物数量, 进而减小固化淤泥的 C_m , 但 w 的变化对 C_m 的影响并不显著, w 由 40% 增至 60%, C_m 仅降低了 3.5%。

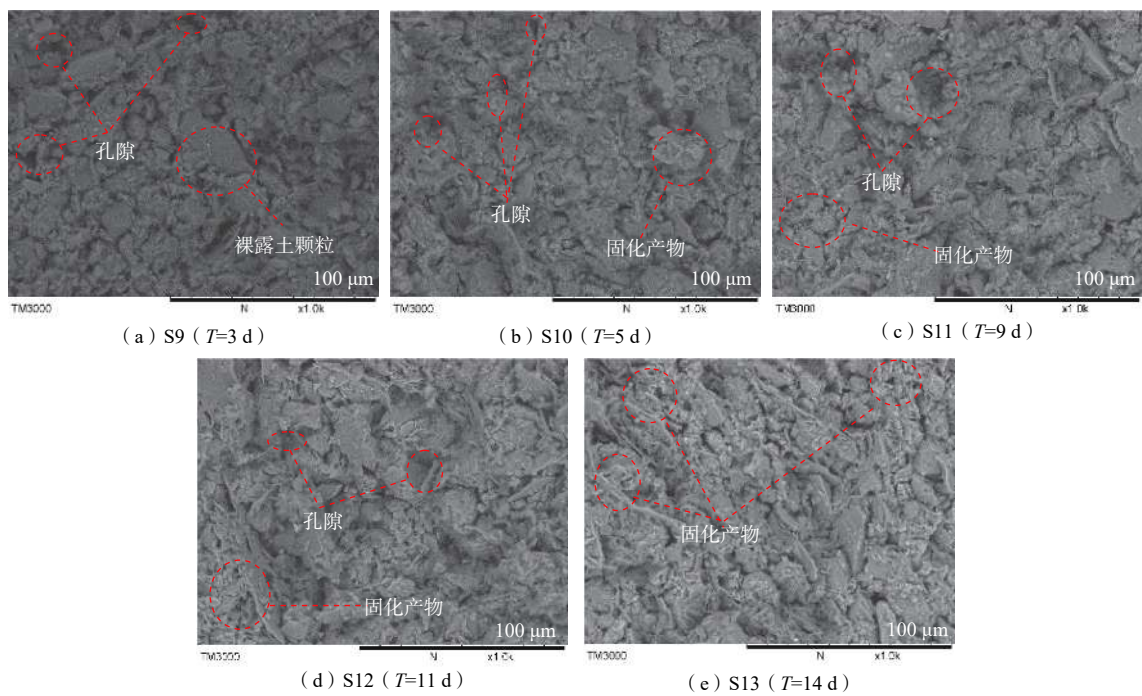


图 4 不同龄期下固化淤泥的 SEM 图

Fig. 4 SEM of the solidified sludge at different ages

表 2 不同含水率下固化淤泥的接触面积比

Table 2 Contact area ratio of the solidified sludge under different moisture content

试验编号	w/%	S_T	n	n_{3D}	Z	S_{CA}	$R_{CA}/\%$
S1	40	1 173 991	0.448	0.431	123	170 246	14.5
S2	45	1 173 991	0.481	0.472	103	156 439	13.3
S0	50	1 173 991	0.487	0.479	168	112 026	9.5
S3	55	1 173 991	0.512	0.513	109	101 842	8.7
S4	60	1 173 991	0.521	0.525	119	96 127	8.2

注: S_T 为总像素; n 为实测孔隙率; n_{3D} 为三维孔隙率; S_{CA} 为接触像素。

3.1.3 对固化淤泥分形维数的影响

图 6 为与图 2 对应的不同含水率下固化淤泥的分形维数。由图 6 可知, 固化淤泥的 D 随着 w 的增加而非线性增大, 尤其是当 $w>50\%$ 后, 固化淤泥 D 值增加幅度显著提高。其主要原因在于: w 越大则固化淤泥的初始孔隙比越大, 排列越疏松, 结构性越弱。与此同时, w 的增加对固化淤泥的水化起抑制作用, 尤其是当 $w>50\%$ 时, 过多的自由水降低了固化剂的浓度, 恶化了硫氧镁水泥的硬化环境, 降低了固化产物产量, 从而减弱了固化淤泥的结构性。二者耦合作用使得固化淤泥的 D 值随 w 的增加而增大, 固化淤泥的结构愈发松散, 与前述 w 对 C_m 影响幅度类似, w 对 D 影响也较小, 当 w 由 40% 增至 60%, D 仅增长了 2.5%。

3.2 不同固化剂掺量下固化淤泥的微观特性

3.2.1 对固化淤泥微观接触面积率的影响

表 3 为不同 W_g 下固化淤泥的 R_{CA} 统计表。由表

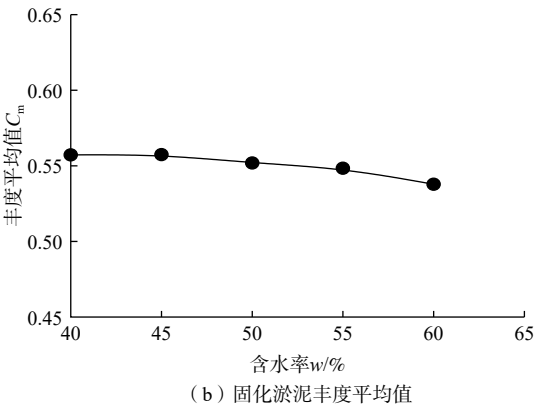
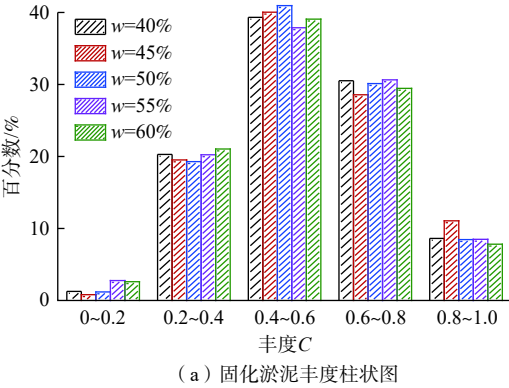


图 5 不同含水率下固化淤泥丰度

Fig. 5 Abundance of the solidified sludge under different moisture content

3 可知: 随着 W_g 的增加, R_{CA} 逐渐增大且增长幅度显著。当 W_g 由 5% 增长至 25% 时, R_{CA} 由 7.6% 增至 14.0%,

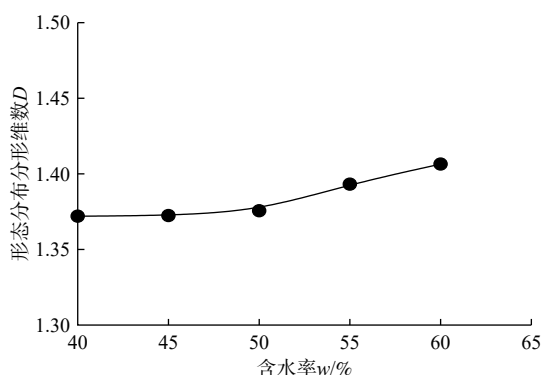


图6 不同含水率下固化淤泥的形态分布分形维数

Fig. 6 Fractal dimension of morphology distribution of the solidified sludge under different moisture content

增长幅度高达84.2%。这是由于 W_g 增加促进了固化产物的生成,减小了土体的孔隙比,增加了颗粒间的接触面积。另外,复合固化剂中硅灰和熟料也对孔隙起到了填充作用。上述2种因素共同影响下,固化淤泥 R_{CA} 随 W_g 的增加而增长。

表3 不同固化剂掺量下固化土的接触面积率

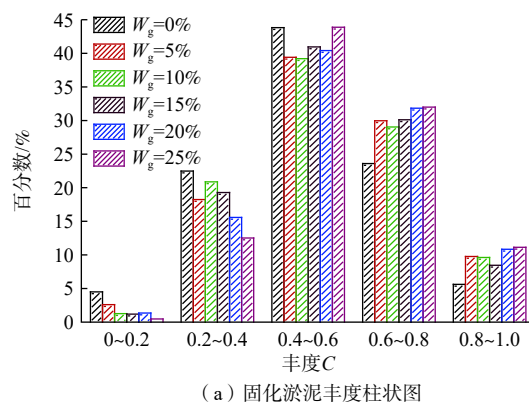
Table 3 Contact area ratio of the solidified soil under different dosage of the curing agent

试验编号	$W_g/\%$	S_T	n	n_{3D}	Z	S_{CA}	$R_{CA}/\%$
S5	5	1 173 991	0.548	0.539	169	88 840	7.6
S6	10	1 173 991	0.505	0.511	162	100 879	8.6
S0	15	1 173 991	0.487	0.479	167	112 026	9.5
S7	20	1 173 991	0.481	0.482	157	141 446	12.0
S8	25	1 173 991	0.459	0.461	161	164 565	14.0

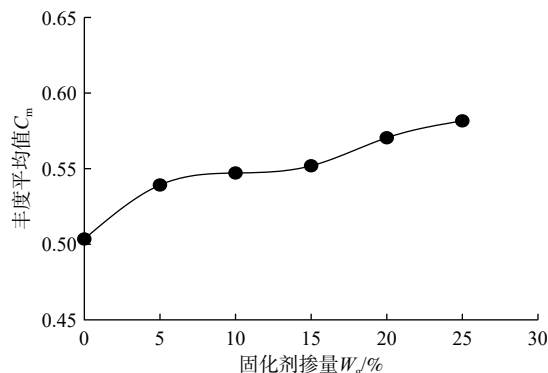
3.2.2 对固化淤泥丰度的影响

图7为不同 W_g 下固化淤泥的 C 值柱状图和 C_m 变化规律。由图7(a)可知,固化前淤泥颗粒的 C 值主要集中在 $[0.2, 0.4]$ 、 $[0.4, 0.6]$ 以及 $[0.6, 0.8]$ 3个区间,而在 $C < 0.2$ 和 $C > 0.8$ 范围的颗粒含量较少(二者合计约占10%)。其中在 $C \in [0.4, 0.6]$ 范围内含量最多(约占45%),而在 $C \in [0.2, 0.4]$ 与 $[0.6, 0.8]$ 区间,固化淤泥颗粒的含量分别达到了约23%和25%。随着 W_g 增加,固化淤泥颗粒在小丰度范围($C < 0.4$)的含量逐渐减小,而大丰度区域($C > 0.6$)的含量逐渐增加。这是由于 W_g 的增加一方面促进扁圆状固化产物的生成,另一方面复合固化剂中起填充作用的硅灰和熟料呈椭圆状,二者的共同影响下固化淤泥圆形颗粒数量显著增加,从而提高了大丰度区域的颗粒含量。从图7(b)可得,固化前淤泥($W_g = 0$)颗粒 C_m 约为0.5, C_m 随 W_g 的增加非线性增长,当 $W_g < 5\%$ 时 C_m 随 W_g 的增加大幅度增加,而后随着 W_g 的增加 C_m 增长幅度

明显减小,当 $W_g > 15\%$ 时, C_m 增长幅度再次增大。当 W_g 增至25%时, C_m 约为0.58,增长幅度达15%。因此, W_g 的增加促进了扁圆状颗粒的发展,使得固化淤泥的 C_m 显著提高。



(a) 固化淤泥丰度柱状图



(b) 固化淤泥丰度平均值

图7 不同固化剂掺量下固化淤泥的丰度

Fig. 7 Abundance of the solidified sludge under different dosage of the curing agent

3.2.3 对固化淤泥分形维数的影响

图8为不同 W_g 下固化淤泥的 D 值变化规律。由图8可知:随着 W_g 的增加, D 值逐渐减小,这是因为 W_g 的

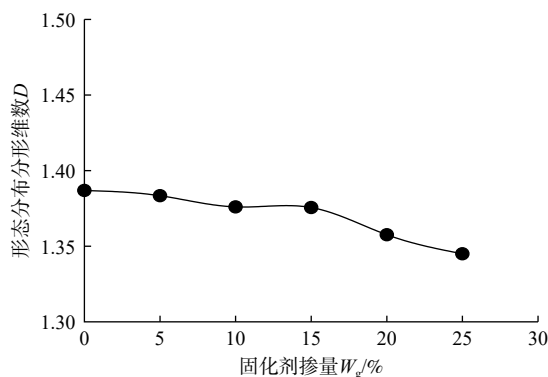


图8 不同固化剂掺量下固化淤泥的分形维数

Fig. 8 Fractal dimension of the solidified sludge under different content of the curing agent

增加提高了固化产物产量,推动了对孔隙的填充作用,形成了更为密实的结构,从而降低了固化淤泥的 D 值。但 W_g 对 D 值影响有限,当 W_g 由 0 增至 25% 时, D 值仅降低了 3%,且当 W_g 在 10%~15% 范围内时, D 值几乎无波动。

3.3 不同龄期下固化淤泥的微观特性

3.3.1 对固化淤泥微观接触面积率的影响

表 4 是不同 T 下固化淤泥的 R_{CA} 统计表。由表 4 可知,固化淤泥的 R_{CA} 随着 T 的增长而增大,且当 T 由 3 d 增长至 14 d 时, R_{CA} 约增长了 111%,固化淤泥的孔隙率显著降低。这是由于 T 的增长使得硫氧镁水泥水化反应更充分,新生成的固化产物填充于固化淤泥颗粒间的孔隙,增大了粒间接触面积。

表 4 不同龄期下固化淤泥的接触面积率
Table 4 Contact area ratio of the solidified sludge at different ages

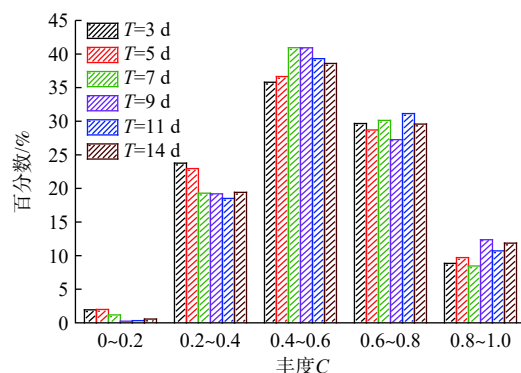
试验编号	T/d	S_T	n	n_{3D}	Z	S_{CA}	$R_{CA}/\%$
S9	3	1 173 991	0.548	0.538	167	85 645	7.3
S10	5	1 173 991	0.524	0.512	156	91 412	7.8
S0	7	1 173 991	0.487	0.479	167	112 026	9.5
S11	9	1 173 991	0.438	0.431	136	117 039	9.9
S12	11	1 173 991	0.468	0.452	122	132 245	12.5
S13	14	1 173 991	0.435	0.433	103	135 532	15.4

3.3.2 对丰度的影响

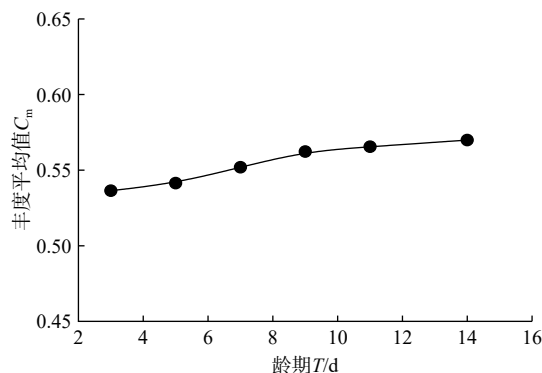
图 9 为固化淤泥的 C 柱状图和 C_m 随 T 的变化规律。图 9(a) 表明:随着 T 的增加,固化淤泥的 C 值在 $[0, 0.2]$ 区间内是逐渐减小,而在 $[0.8, 1.0]$ 区间是增加的,其主要原因在于 T 越长,固化反应越充分,扁圆状固化产物显著增加,从而使得高丰度区间 ($[0.8, 1.0]$) 固化淤泥颗粒比重增加,而低丰度区间 ($[0, 0.2]$) 的固化淤泥颗粒比重降低。由图 9(b) 可知,当 T 由 3 d 增长至 14 d 时,固化土的 C_m 从 0.536 4 提高至 0.569 9,增长幅度约为 6.2%。这是由于 T 的增长有利于扁圆状固化产物的生成,从而使得固化淤泥的 C_m 随着 T 的增长而提高,且 C_m 随 T 的先增加,在 $T=9$ d 后增加幅度趋于平缓,主要原因在于改性硫氧镁水泥在 $T=9$ 时完成了主要的水化反应。

3.3.3 对固化淤泥分形维数的影响

图 10 为固化淤泥的 D 值随 T 的变化规律。由图 10 可知,固化淤泥的 D 随着 T 的增长而减小,与 3 d 龄期的固化淤泥 D 值 (约 1.408 3) 相比,当 T 增长至 14 d 时, D 值减小至 1.3,降低幅度约为 5.7%。这是由于 T 的增加,促进了固化反应的发展,提高了颗粒的团粒



(a) 固化淤泥丰度柱状图



(b) 固化淤泥丰度平均值

图 9 不同龄期下固化淤泥的丰度

Fig. 9 Abundance of the solidified sludge at different ages

化程度,形成更为严密的结构体系,从而使得 D 不断减小^[26-27]。

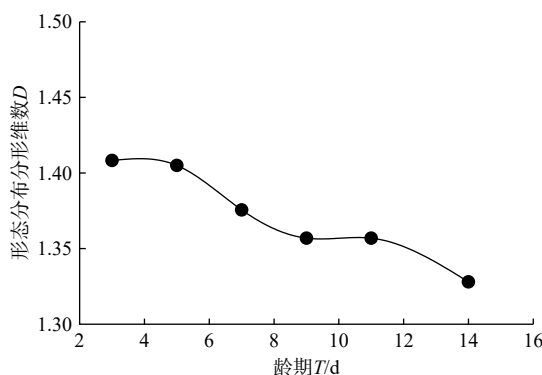


图 10 不同龄期下固化淤泥的分形维数

Fig. 10 Fractal dimension of the solidified sludge at different ages

4 结论

(1) 含水率的增加抑制了固化淤泥的水化反应,增加了固化淤泥的初始孔隙比,减小了固化淤泥颗粒的微观接触面积率,降低了扁圆状固化产物数量,进而减小固化淤泥的平均丰度值,减弱了固化淤泥的结

构性,提高了固化淤泥的分形维数。

(2)固化剂掺量增加有利于固化产物的生成,减小了土体的孔隙比,提高了固化淤泥的微观接触面积率,促进了扁圆状颗粒的发展,使得固化淤泥的平均丰度值增大,增强了其结构性,从而降低了分形维数。

(3)龄期的增长使得水泥水化反应更充分,扁圆状固化产物显著增加,结构性显著提高,从而使得固化淤泥的微观结构参数微观接触面积率,平均丰度值增加而分形维数减小。

(4)含水率、固化剂掺量、龄期 3 种因素对固化淤泥的微观接触面积率影响最为显著,对平均丰度值影响次之,而对分形维数影响最小,其中固化淤泥的微观接触面积率和分形维数对龄期最为敏感(最大变化率分别为 111% 和 6.2%),而平均丰度值易受固化剂掺量的影响(最大变化率约 15%)。

参考文献 (References):

- [1] 浙江宁波创造淤泥新墙材资源化利用新模式[Z]. 北方建筑, 2017, 2(1): 75. [A new model of resource utilization of sludge wall materials set up by Ningbo city, Zhejiang Province[Z]. Northern Architecture, 2017, 2(1): 75. (in Chinese)]
- [2] LORENZO G A, BERGADO D T. Fundamental parameters of cement-admixed clay—new approach[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2004, 130(10): 1042 – 1050.
- [3] LEE F H, LEE Y, CHEW S H, et al. Strength and modulus of marine clay-cement mixes[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2005, 131(2): 178 – 186.
- [4] 李朝辉, 程谦恭, 王艳涛, 等. 干湿循环下石灰改良膨胀土离心模型试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(4): 111 – 117. [LI Zhaohui, CHENG Qiangong, WANG Yantao, et al. A centrifugal model test study of lime-improved expansive soil under drying and wetting circles[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2017, 44(4): 111 – 117. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 黄震, 陈铖. 改良膨胀土胀缩裂隙及与抗剪强度的关系研究[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(3): 87 – 93. [HUANG Zhen, CHEN Cheng. A study of the swelling shrinkage cracks of the modified expansive soil and its relationship with the shear strength[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2016, 43(3): 87 – 93. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 董邑宁, 张青娥, 徐日庆, 等. 固化剂对软土强度影响的试验研究[J]. *岩土力学*, 2008, 29(2): 475 – 478. [DONG Yining, ZHANG Qinge, XU Riqing, et al. The experimental research of strength with solidifying agent on clay[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(2): 475 – 478. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 徐日庆, 王旭, 文嘉毅, 等. 浅层淤泥质土固化剂[J]. 上海交通大学学报, 2019, 53(7): 805 – 811. [XU Riqing, WANG Xu, WEN Jiayi, et al. Curing agent for shallow mucky soil[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2019, 53(7): 805 – 811. (in Chinese with English abstract)]
- [8] VICHAN S, RACHAN R. Chemical stabilization of soft Bangkok clay using the blend of calcium carbide residue and biomass ash[J]. *Soils and Foundations*, 2013, 53(2): 272 – 281.
- [9] 王宏伟, 王东星, 贺扬. MgO改性淤泥固化土压缩特性试验[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2017, 48(8): 2133 – 2141. [WANG Hongwei, WANG Dongxing, HE Yang. Experimental study on compressibility behavior of solidified dredged sludge with reactive MgO[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2017, 48(8): 2133 – 2141. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 朱剑锋, 饶春义, 庾秋水, 等. 硫氧镁水泥复合固化剂加固淤泥质土的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(增刊1): 3206 – 3214. [ZHU Jianfeng, RAO Chunyi, TUO Qiushui, et al. Experimental study on the properties of the organic soil solidified by the composite magnesium oxysulfate cement-curing agent[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(Sup 1): 3206 – 3214. (in Chinese with English abstract)]
- [11] ZHU J F, XU R Q, ZHAO H Y, et al. Fundamental mechanical behavior of CMMOSC-S-C composite stabilized marine soft clay[J]. *Applied Clay Science*, 2020, 192: 105635.
- [12] 朱剑锋, 庾秋水, 邓温妮, 等. 镁质水泥复合固化剂固化有机质土的抗压强度模型[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2019, 53(11): 2168 – 2174. [ZHU Jianfeng, TUO Qiushui, DENG Wenni, et al. Model of compressive strength of cured organic soil solidified by magnesium cement complex curing agent[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2019, 53(11): 2168 – 2174. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 饶春义, 朱剑锋, 庾秋水, 等. 镁质水泥固化淤泥一维压缩特性研究[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(4): 94 – 99. [RAO Chunyi, ZHU Jianfeng, TUO Qiushui, et

- al. A study of the 1D compression characteristics of magnesia cement silt[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2018, 45(4): 94 – 99. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 张亭亭, 李江山, 王平, 等. 磷酸镁水泥固化铅污染土的力学特性试验研究及微观机制[J]. *岩土力学*, 2016, 37(增刊2): 279 – 286. [ZHANG Tingting, LI Jiangshan, WANG Ping, et al. Experimental study of mechanical and microstructure properties of magnesium phosphate cement treated lead contaminated soils[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(Sup 2): 279 – 286. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 刘松玉, 曹菁菁, 蔡光华. 活性氧化镁碳化固化粉质黏土微观机制[J]. *岩土力学*, 2018, 39(5): 1543 – 1552. [LIU Songyu, CAO Jingjing, CAI Guanghua. Microstructural mechanism of reactive magnesia carbonated and stabilized silty clays[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(5): 1543 – 1552. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 杨爱武, 胡垚, 杨少坤. 城市污泥新型固化技术及其力学特性[J]. *岩土力学*, 2019, 40(11): 4439 – 4449. [YANG Aiwu, HU Yao, YANG Shaokun. New solidification technology and mechanical properties of municipal sludge[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(11): 4439 – 4449. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 朱利君, 裴向军, 张晓超, 等. 双聚材料改良黄土持水性及生态效应研究[J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(4): 158 – 166. [ZHU Lijun, PEI Xiangjun, ZHANG Xiaochao, et al. A study of water retention and ecological effects of loess improved by double polymers[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(4): 158 – 166. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 熊路, 申向东, 薛慧君, 等. 水泥固化六价铬污染土力学性能及微观结构研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2018, 34(10): 946 – 954. [XIONG Lu, SHEN Xiangdong, XUE Huijun, et al. Experimental research of mechanical properties and microstructure of cement solidified hexavalent chromium-contaminated soils[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2018, 34(10): 946 – 954. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 徐日庆, 邓玮文, 徐波, 等. 基于SEM图像的软土三维孔隙率计算及影响因素分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(7): 1497 – 1502. [XU Riqing, DENG Yiwen, XU Bo, et al. Calculation of three-dimensional porosity of soft soil based on sem image[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(7): 1497 – 1502. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 徐日庆, 邓玮文, 徐波, 等. 基于SEM图像的软土接触面积定量研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2016, 24(2): 295 – 303. [XU Riqing, DENG Yiwen, XU Bo, et al. Soft clay contact area quantitative research based on SEM images[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2016, 24(2): 295 – 303. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 徐日庆, 徐丽阳, 段景川, 等. 软黏土微观结构形貌与定量分析影响因子优化[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2016, 47(8): 2723 – 2729. [XU Riqing, XU Liyang, DUAN Jingchuan, et al. Microstructure morphology and optimization of influencing factors in quantitative analysis of soft clay[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2016, 47(8): 2723 – 2729. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 张先伟, 王常明, 马栋和. 软土微观结构表面起伏的三维可视化及分形维数的计算[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2012, 20(1): 103 – 112. [ZHANG Xianwei, WANG Changming, MA Donghe. 3D visualization and fractal dimension of soft clay's microstructure surface undulation[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2012, 20(1): 103 – 112. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 中华人民共和国水利部. 土工试验规程: SL 237—1999[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999. [Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Specification of soil test: SL 237—1999[S]. Beijing: China Water Power Press, 1999. (in Chinese)]
- [24] 胡瑞林, 李向全, 官国琳. 粘性土微结构定量模型及其工程地质特征研究[M]. 北京: 地质出版社, 1995. [HU Ruilin, LI Xiangquan, GUAN Guolin. Quantitative microstructure models of clayey soils and their engineering behaviors[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1995. (in Chinese)]
- [25] BURN R P. The fractal geometry of nature[J]. *The Mathematical Gazette*, 1984, 68(443): 71 – 72.
- [26] 徐晓鹏, 彭瑞东, 谢和平, 等. 基于SEM图像分维估算的脆性材料微观结构演化方法研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(21): 3600 – 3603. [XU Xiaopeng, PENG Ruidong, XIE Heping, et al. Analysis on meso-structure evolution of brittle materials based on estimation of fractal demensions of sem images[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(21): 3600 – 3603. (in Chinese with English abstract)]
- [27] MOORE C A, DONALDSON C F. Quantifying soil microstructure using fractals[J]. *Géotechnique*, 1995, 45(1): 105 – 116.