

DOI:10.11918/201810121

高温冻土固化前后结构性变化对融化压缩特性影响

孙杲辰^{1,2,3}, 张建明^{1,2}, 党迎生⁴, 张 虎^{1,2}, 丁 聪⁵, 陈 新³

(1. 冻土工程国家重点实验室(中国科学院西北生态环境资源研究院), 兰州 730000;
2. 中国科学院大学 工程科学学院, 北京 100049; 3. 中国市政工程西北设计研究院有限公司, 兰州 730000;
4. 石河子大学 水利与建筑工程学院, 新疆 石河子 832000; 5. 上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200434)

摘 要: 为解决高温冻土未冻水含量高、压缩性强对冻土路基造成的不良影响. 以采自青藏高原粉质黏土为研究对象, 从高温冻土的结构性出发, 在负温环境下配置 15% 掺量的普通硅酸盐水泥、高性能硫铝酸盐以及普通硅酸盐水泥 + 高性能硫铝酸盐水泥的固化冻土试样, 并通过烘干法、TDR 技术、X 射线衍射、扫描电镜与融化压缩试验, 分析高温冻土固化前后土体总含水量、未冻水含量变化以及固化剂加入高温冻土后土体的物相成分, 对比不同固化剂的固化效果, 同时利用 MATLAB 编程开发 CURVEEXTRACT 图像分析系统对 SEM 图像进行预处理, 将其导入 Image-ProPlus6. 0 (IPP) 软件中, 对比分析高温冻土固化前后微观结构孔隙分布、形态以及定向性等特征. 以土体孔隙定向性分维数与固化后压缩系数为桥梁, 建立高温冻土固化后宏、微观之间的关系. 结果表明, 固化后土体总含水量减小, 未冻水含量增多, 由于固化剂产物的胶结作用, 土颗粒整体呈现团聚状态, 固化效果越好大颗粒越多, 内部孔隙面积减小且孔隙由狭长状向等轴状转化, 土体孔隙更加均匀化, 土体孔隙定向性分维数 D_f 与融化压缩系数 a_v 之间存在良好的线性关系, 固化效果越好, 土体孔隙定向性分维数 D_f 越小, 对应的压缩系数 a_v 越小.

关键词: 高温冻土; 固化剂; 微观结构; 分形理论; 压缩性质

中图分类号: TU445 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2020)02-0017-09

Structural properties changes before and after solidification and their effects on melting and compression characteristics of high warm and frozen soil

SUN Gaochen^{1,2,3}, ZHANG Jianming^{1,2}, DANG Yingsheng⁴, ZHANG Hu^{1,2}, DING Cong⁵, CHEN Xin³

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering (Northwest Institute of Eco-environment and Resources, CAS), Lanzhou 730000, China; 2. School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China; 3. China State Construction Engineering Corporation Aecom Consultant Co., Ltd., Lanzhou 730000, China; 4. College of Water & Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, Xinjiang, China; 5. Shanghai Investigation, Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200434, China)

Abstract: This paper aims to solve the negative effects of the large unfrozen water content and high compression of high warm and frozen soil on the stability of roadbed. In this study, by taking the silty clay in the permafrost regions of Qinghai-Tibet Plateau as the research object, 15% ordinary Portland cement, high-performance Sulphoaluminate cement, and (ordinary Portland cement + high-performance Sulphoaluminate cement) were prepared as samples at negative temperature. The oven drying method, TDR (time domain reflectometry) technique, X-ray diffraction, scanning electron microscopy (SEM), and thawing compression test were adopted to analyze changes of the total water content, changes of unfrozen water content, and the phase composition of the soil with the addition of soil stabilizers, as well as to compare the solidification effects of different soil stabilizers. MATLAB was used to develop CURVEEXTRACT image analysis system to deal with SEM image, which was then imported to the Image-ProPlus6. 0 (IPP) software to analyze the characteristics of micro pore distribution, morphology, and directivity of high warm and frozen soil before and after solidification. The relationship between macroscopical and microcosmic before and after solidification was established based on the relationship between compression property and pore orientation fractal dimension. Results show that adding soil stabilizer could reduce the total water content and increase the unfrozen water content in the soil samples. After solidification, soil particles became closer, the pore area of the soil decreased, and the pore transformed from narrow to equiaxial. There was a good linear relationship between the pore directional fractal dimension (D_f) and the coefficient of thaw compression (a_v). The better the curing effect was, the smaller the D_f was, and the smaller the corresponding a_v was.

Keywords: high warm and frozen soil; soil stabilizer; microstructure; fractal theory; compression properties

收稿日期: 2018-10-23

基金项目: 国家自然科学基金(41471062, 41401087); 冻土工程国家重点实验室项目(SKLFSE-ZT-35)

作者简介: 孙杲辰(1988—), 男, 博士研究生, 工程师;
张建明(1963—), 男, 研究员, 博士生导师

通信作者: 张建明, zhangjm@lzb.ac.cn

土的结构性是指土中颗粒或集合体以及它们之间孔隙的性状和排列形式^[1]. 1925 年, 太沙基对土体结构性进行了研究, 他所倡导的土体微观结构概念与思想是土体微观结构研究的开端, 但是由于当

时观察设备落后,难以对土体复杂的结构性进行系统的定性描述;20 世纪 50 年代至 60 年代中期,随着科学技术的发展,众多学者开始注重土体结构要素的完整性,特别是土体结构单元体的定向排列和分布特征;20 世纪 60 年代后期至 90 年代中期,随着电子计算机技术的引入和新方法的出现,土体结构性由定性进入了定量阶段^[2]. 中国土体结构性研究起步于 1996 年,许多知名专家和学者都对土体结构性进行了大量的研究和探索,如沈珠江院士^[3]认为土的结构性是影响土体力学特性最为重要的要素,是“20 世纪土力学的核心问题”,谢定义等^[4]发展了土体结构性研究的土力学方法,开辟了土体结构性与量化参数研究的新途径. 然而,上述土体结构性研究方法仅限于常规土中,对于冻土特别是压缩性大、未冻水含量高、抗剪强度低的高温冻土结构性研究尚属空白.

众所周知,高温冻土又称近相变区冻土,国外许多学者也将其表述为“frozen soil at temperature close to 0 ℃”,通常用是指温度区间变化范围在 -1.5 ~ 0 ℃,相对温度较高的冻土. 高温冻土由土颗粒、未冻水、土中气体以及固态冰 4 种组分构成,由于特定的形成条件其结构性特征有着自身的特点,这种结构性对高温冻土的工程性质有重要的影响^[5-7]. 多年以来,许多专家都以主动降温^[8-10],被动保护^[11-13]的方式来保护冻土自身结构不因外界环境的变化而遭到破坏,但是在全球气候变暖的背景下,这些措施必然存在一定的局限性. 因此,本研究从高温冻土固化的角度出发,对比不同固化剂加入高温冻土后,固化前后土体物理性质及结构性的变化规律,并以孔隙定向分维数 D_f 与融化压缩系数 a_v 为桥梁,建立了冻土固化后微观孔隙结构特征与宏观力学性质之间的关系,为高温冻土结构性研究提供新的途径与方法.

1 试 验

1.1 试验材料及固化土的配比设计

本研究以采自青藏高原的粉质黏土为研究对

象,其中土体基本物理指标及颗粒分布如表 1,2 所示. 土体固化剂主要以无机类固化剂为主. 近年来,有部分学者^[14-16]通过普通硅酸盐水泥 (portland cement,以下简称 GC)对冻土进行了固化,但是受低温环境对其反应温度的限制,往往需要加入众多外加剂来促使其发生水化反应,单独使用时反应速率低且强度增长缓慢^[17-19]. 然而,众多研究发现,高性能硫铝酸盐水泥 (sulphate aluminum cement,以下简称 SC)具有反应温度低且低温水化反应速率快等特点^[20-21]. 因此,本研究通过在高温冻土中加入普通硅酸盐水泥 (GC)、高性能硫铝酸盐水泥 (SC) 以及 (普通硅酸盐水泥 + 硫铝酸盐水泥) (以下简称 SC + GC) 3 种固化剂对比其固化效果. 其中普通硅酸盐水泥采用甘肃祁连山水泥有限公司生产的 P · O42.5 型号普通硅酸盐水泥,硫铝酸盐水泥采用唐山北极熊水泥有限公司生产的 C52.5 硫铝酸盐水泥,两种水泥颗粒分布如表 3 所示. 根据中华人民共和国《水泥土配合比设计规程》(JGJ/T 233—2011)水泥土掺入基准可根据使用目的及当地经验,按工程要求的水泥土性能指标确定,并宜取 3% ~ 25%,根据前人经验^[22]以及高温冻土本身的性质,选取 GC、SC 以及 GC + SC 固化剂掺入质量分数为干土重的 15%,其中 3 类固化土样的固化剂具体掺量如表 4 所示.

表 1 青藏高原粉质黏土基本物理指标
Tab.1 Basic physical properties of soil samples

相对体积 质量 G_s	液限 $W_L/\%$	塑限 $W_P/\%$	最优含水率 $\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$	最大干密度 $\omega/\%$
2.7	36.7	18.6	13.0	1.9

表 2 土体的颗粒分布
Tab.2 Particle-size distribution of soil samples %

>0.1 mm	0.1 ~ 0.05 mm	0.05 ~ 0.005 mm	<0.005 mm
3.69	11.96	52.83	31.52

表 3 水泥颗粒分布
Tab.3 Particle-size distribution of the cement

水泥种类	颗粒分布/%						比表面积/($m^2 \cdot kg^{-1}$)
	<3 μm	3 ~ 10 μm	10 ~ 30 μm	30 ~ 45 μm	45 ~ 60 μm	>60 μm	
P · O 42.5 普通硅酸盐水泥	17.23	23.51	36.67	13.04	6.39	3.16	352.0
C52.5 硫铝酸盐水泥	20.53	22.37	37.68	11.48	4.32	3.62	358.0

表 4 固化剂具体掺量
Tab.4 Main components of soil stabilizer

固化剂种类	普通硅酸盐水泥 (GC)	硫铝酸盐水泥 (SC)	硫铝酸盐水泥 + 普通硅酸盐水泥 (SC + GC)
掺量/%	15.0	15.0	7.5 + 7.5

注:固化剂掺量均为干土质量的质量分数/%.

1.2 试样制备

由表 1 可知,土体液限 $W_p = 18.6\%$,塑限 $W_L = 36.7\%$,为了确保土样的均匀性,采用静压法制备土样,试样的密度为 1.46 g/cm^3 ,同时设置土样的初始含水率为 30% ,试样制备步骤如下:

1)将试验粉质黏土充分在阳光下暴晒风干,之后碾碎并过 2 mm 筛,将 100 g 风干粉质黏土放入环刀中,置于烘箱中烘干 24 h 测定其土样天然含水率为 3% ,并将过筛后土样放置于塑料密封袋中密封,置于 $-5\text{ }^\circ\text{C}$ 低温试验室中预冷 24 h 以待使用.

2)为了模拟青藏高原的真实环境,本次制样过程均在 $-5\text{ }^\circ\text{C}$ 低温实验室内进行,将固化剂按照表 4 中掺量与预冷后土样混合搅拌均匀,并与事先准备好的冰粉与蒸馏水(冰粉过 2 mm 筛,冰水比例为 $3:1$)再次混合搅拌均匀后装入涂有凡士林的铁质模具中($\phi 61.8\text{ mm} \times h 40.0\text{ mm}$).用油压千斤顶压实,脱膜后将其用保鲜薄膜包裹并置于 $-1\text{ }^\circ\text{C}$ 的恒温箱中养护 7 d 后进行相关试验.制样过程详见图 1.



图 1 固化土样制样过程
Fig. 1 Process for solidification soils

1.3 试验方法

烘干法测定固化土样总含水量;利用土壤水分测定仪(time domain reflectometry,简称 TDR)观测不同固化土样固化前后未冻水含量;通过扫描电镜试验(scanning electron microscope,简称 SEM)观测固化前后高温冻土的微观孔隙结构;利用 TD3500-X 射线衍射分析仪进行固化高温冻土物相分析;运用 GZQ-1 型全自动气压固结仪,测试固化前后土体不同荷载与不同温度下所对应的压缩系数.

1.3.1 高温冻土固化前后总含水量测定

为了研究 3 种固化剂 GC、SC 以及 SC + GC 加入高温冻土后,高温冻土内部总含水量的变化规律,

将养护 7 d 后的 3 种固化土样静置于 $105\text{ }^\circ\text{C}$ DGG-9140B 型烘箱中,烘干 24 h 测定固化前后土样总含水量变化.

1.3.2 固化前后土样未冻水含量确定

将养护 7 d 固化土样从 $-1\text{ }^\circ\text{C}$ 恒温箱中拿出,并迅速将土壤水分测定仪(TDR)插入用塑料瓶及保鲜薄膜装好的土样中心(图 2),置于预先预冷过的 $-1\text{ }^\circ\text{C}$ 智能低温恒温槽中,测定不同固化土样未冻水含量变化.

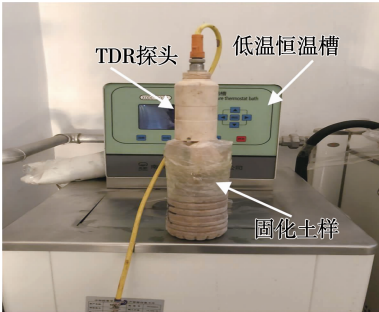


图 2 固化前后土体未冻水含量测定
Fig. 2 Test method for unfrozen water content

1.3.3 SEM 试验土样制备

对于制备固化前后高温冻土微结构试样而言,难点在于如何置换与去除试样中的孔隙水与冰,保证试样不变形从而获取平整新鲜的扫描电镜观测面.已有的阴干法、风干法以及烘干法在试样干燥过程会产生明显的体积收缩,从而导致观测到的试样微结构与其真实结构之间存在较大误差^[23-24].因此,从冷冻干燥技术入手,利用上海豫明仪器制造厂生产的“FA-1A-50 冷冻干燥机”(图 3)对试样进行干燥后再将土样转移至扫描电镜下观测其微结构.

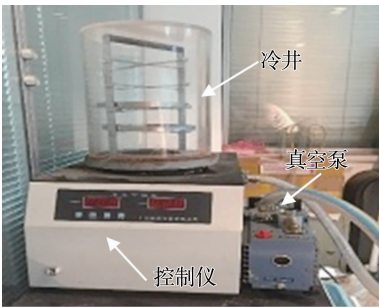


图 3 冷冻干燥机 (FA-1A-50)
Fig. 3 Vacuum freeze dryer (FA-1A-50)

1.3.4 融化压缩试验

融化压缩试验在 GZQ-1 型全自动气压固结仪上进行(图 4),将在 $-1\text{ }^\circ\text{C}$ 下养护 7 d 的 No cement、GC、SC 以及(SC + GC) 4 种土样分别置于 4 个压缩盒中,设定恒温箱的温度为 $-1\text{ }^\circ\text{C}$ 静置 24 h ,待其完成后,在同一温度下陆续加载 $0.1, 0.2$ 和 0.3 MPa 3 级荷载.加载完成后,调整恒温箱温度至 -0.5 和

0℃(每次调节温度时间应当控制试样变形少于0.025 mm/h),重复以上加载过程。

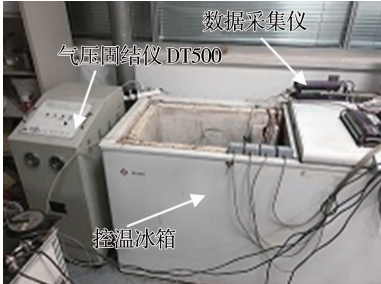


图 4 高温冻土固化前后融化压缩试验

Fig. 4 Melting and compression test for high warm and frozen soil before and after stabilization

2 试验结果分析

2.1 高温冻土固化前后含水量变化规律

2.1.1 总含水量变化

高温冻土固化前后土样总含水量变化如图 5 所示。可以看出, No cement 土样含水量为 30.06%, 随着固化剂的加入逐渐与高温冻土中的自由水发生水化反应, GC 土样养护 7 d 后的含水量由 30.06% 降至 26.14%, 总含水量降低了 3.92%; 与 GC 土样相比, 由于硫铝酸盐水泥优越的低温反应性能, SC 土样总含水量由 30.06% 降低至 24.27%, 总含水量降低了 5.79%; SC + GC 固化土样总含水量由 30.06% 降至 22.33%, 总含水量降低了 7.73%, 普通硅酸盐水泥与硫铝酸盐水泥相混合后, 两者水化反应的过程中达到了动力上的协调, 硫铝酸盐水泥进一步刺激了硅酸盐水泥的反应, 使得水化反应更加剧烈, 土体总含水量大幅度降低。

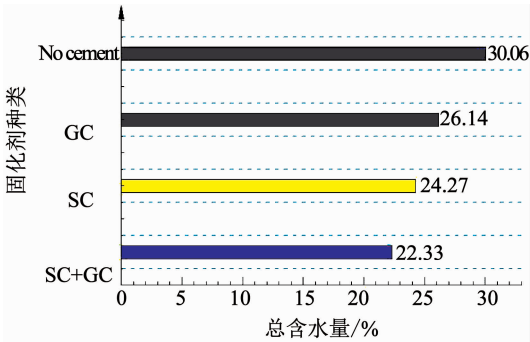


图 5 高温冻土固化前后总含水量柱状分布

Fig. 5 Total water content of samples after curing for 7 days

2.1.2 未冻水含量变化

固化剂的加入虽然降低了高温冻土中的总含水量, 但是由于其与土体中的自由水发生水化反应放出的热量融化了土颗粒周围的结晶冰, 增加了土体内部未冻水含量。高温冻土固化前后未冻水含量分布如图 6 所示, 与总含水量相比, 固化土体内部未冻

水含量变化与总含水量变化趋势正好相反, 固化效果越好, 土体内部未冻水含量越多, 但是随着温度的降低土体内部未冻水含量基本稳定在 10.0% 左右。

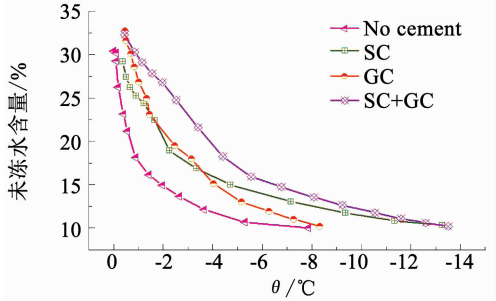


图 6 高温冻土固化前后未冻水含量变化

Fig. 6 Change characteristics of unfrozen water with temperature

2.2 固化后土体结构单元体粒度定量分析

图 7 为高温冻土固化后结构单元体粒度定量分析结果。可以看出, 固化后结构单元体的直径主要分布在 2~5 μm 与 5~10 μm 内, 其他区间内分布较小。随着固化剂加入后固化效果不同, 结构单元体粒度分布不同, 其中在 5~10 μm 和 10~20 μm 反映了土体固化后水化反应胶结作用土体颗粒团聚的主要结果, SC + GC 土样等效直径分布几率最大为 52.85%, 其次为 SC 土样分布几率为 50.82%, 而 GC 土样分布最小为 46.68%。充分说明 SC + GC 固化剂加入土体后, 土颗粒团聚效果最好, 大颗粒增多。

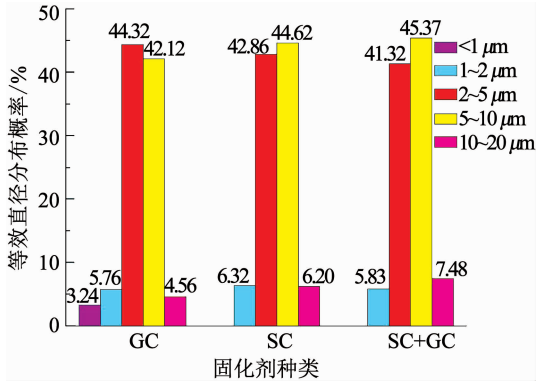


图 7 高温冻土固化后固化土样结构单元体粒度分布

Fig. 7 Element size distribution histogram of stabilized soil structure

2.3 高温冻土固化前后孔隙面积变化规律

高温冻土固化前后孔隙面积在各孔径范围内面积分布的改变是其微观孔隙结构改变最直接的表象。由表 5 与图 8 可以看出, 加入固化剂后高温冻土各孔径范围内孔隙面积均呈现减小规律, 但是固化剂的种类不同, 受低温条件与反应速率的限制, 其孔隙面积改变规律有所不同, 整体表现为: SC + GC 土样, 孔隙面积减小最多; SC 固化土样孔隙面积次之; GC 固化土样孔隙面积减少最小。

表 5 固化前后各孔径对应孔隙面积分布 $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$

Tab.5 Pore area distribution before and after curing

固化剂类型	$d/\mu\text{m}$				
	<10	10~100	100~2 500	2 500~10 000	>10 000
No cement	12.86	14.73	0.63	0.02	0.02
GC	10.95	10.79	0.78	0.02	0.01
SC	10.34	10.69	0.74	0.02	0.004
SC + GC	9.06	8.55	0.69	0.28	0.002

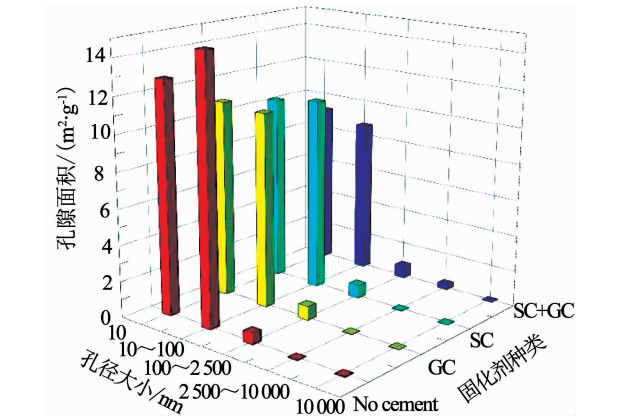


图 8 固化前后孔隙面积分布

Fig. 8 Pore area distribution bar before and after curing

2.4 固化前后土体孔隙丰度评价

固化前后土体孔隙的丰度值 C 为孔隙短轴 B 与长轴 A 的比值, $C = B/A$, 该值代表了分析区域内孔隙的圆度, 即土体孔隙展示的二维平面几何形状, 反映了土体的均匀程度. 丰度值 C 的取值范围在 $(0,1)$, C 值越小, 表明孔隙平面形状趋向于长条形, 越不均匀; C 值越大, 则说明孔隙平面形状趋向于圆形, 土体越均匀^[25]. 本次研究将丰度值划分为 8 个统计区间, 各区间内丰度值分布如图 9 所示. 结果表明, No cement 固化土样的丰度值主要集中在 $0.2 \sim 0.3$, 土颗粒孔隙主要以狭长状为主; GC 固化土样丰度值集中在 $0.3 \sim 0.4$, 说明普通硅酸盐水泥加入高温冻土后, 随着水化产物对土体孔隙的填充, 土体孔隙由狭长状向半椭圆状转化; 而 SC 与 SC + GC 固化土样的丰度值主要集中在 $0.8 \sim 0.9$, 说明硫铝酸盐水泥加入后, 土体孔隙由椭圆状向圆形转换, 土体整体趋于均匀化.

2.5 固化高温冻土 XRD 试验结果分析

为了观察固化后, 土样内部水化产物生成总量, 将养护 7 d 后的固化高温冻土样品冷冻干燥后, 经器具研磨过 0.08 mm 方孔筛, 然后通过电子天平称取 5 g 试样, 利用 TD3500-X 射线衍射分析仪进行固化高温冻土物相分析. 扫描分析采用连续扫描测量法, 扫描起始角为 10° , 终止角为 70° , 并利用 JADE6.0 软件对衍射结果进行统计. 从图 10 分析结

果可以看出, GC 固化土样中钙矾石 (AFt) 与水化硅酸钙凝胶 (C-S-H) 仅有微小峰值, 而 SC 和 SC + GC 固化土样的钙矾石 (AFt) 峰值较大, 特别是硫铝酸盐水泥与普通硅酸盐水泥混合加入土体后, 不仅提高了钙矾石 (AFt) 的峰值, 而且促进了水化硅酸钙凝胶 (C-S-H) 的生成, 充分证明硫铝酸盐水泥具有低温水化反应速率快的特点.

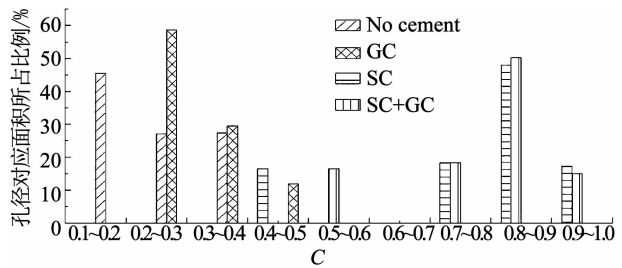


图 9 固化前后孔隙丰度值

Fig. 9 Pore abundance value before and after curing

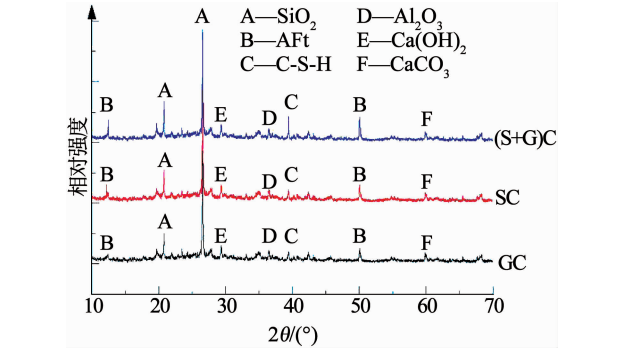


图 10 固化高温冻土 7 d X 射线衍射图

Fig. 10 X-ray diffraction of solidified high warm and frozen soil samples at 7 d

2.6 固化前后微观结构变化固化机理分析

图 11 为 -1°C 下养护 7 d 的 $5\,000\times$ 倍扫描电镜照片, 可以看出, SC + GC 固化土样 (图 11(d)) 经过 7 d 的养护生成了大量的钙矾石 (AFt) 与水化硅酸钙 (CSH) 凝胶, AFt 与 CSH 相互交错黏结在一起, 不仅填充了孔隙空间, 而且相互搭接形成了牢固的空间结构; SC 固化土样 (图 11(c)) 与 SC + GC 固化土样相比, 钙矾石 (AFt) 与水化硅酸钙 (CSH) 凝胶生成较少; GC 固化土样 (图 11(b)) 基本无钙矾石 (AFt) 的生成. 充分证明, 与硫铝酸盐水泥相比, 普通硅酸盐水泥负温下反应速率缓慢, 单独加入硫铝酸盐水泥时, 虽能生成一定的钙矾石 (AFt), 但是水化产物量较少. 当普通硅酸盐水泥与硫铝酸盐水泥混和时, 不仅加快了钙矾石 (AFt) 的生成速率, 减少了钙矾石 (AFt) 对凝胶类水化产物的破坏作用, 而且修复了凝胶类水化物被破坏胶结结构, 协调了两者的动力学关系, 改变了土体内部的孔隙结构, 使得土体内部孔隙更加致密.

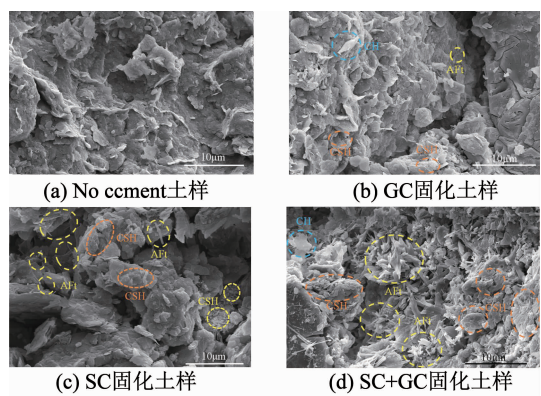


图 11 不同固化土扫描电镜图片(5 000 ×)

Fig. 11 SEM image for different stabilizer soils(5 000 ×)

2.7 固化前后孔隙定向性分布特征

为了研究高温冻土固化前后土体孔隙分布状况,将通过 CURVEEXTRACT 预处理过的图片导入 Image-ProPlus6. 0 (IPP) 软件中统计固化土样的孔隙角度以及每个角度区间内的概率分布,从而计算土体孔隙的定向性. 土体孔隙的定向性定义为孔隙长轴与水平 x 轴的夹角 θ . 因为孔隙方向在 $0^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 和 $180^{\circ} \sim 360^{\circ}$ 具有对称性, 以 $0^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 的玫瑰风向

图,表示土体孔隙长轴方向的角度频率分布,其中共划分了 14 个孔隙数目统计区间.

孔隙分布概率计算如式(1)所示:

$$F(\theta) = \frac{n_i}{n} \times 100\% . \tag{1}$$

式中: n_i, n 分别为夹角 θ 落入 (θ_{i-1}, θ_i) 的土体孔隙数量和孔隙总数^[26].

通过冻土物理学可知,黏土颗粒在不同应力作用下会促使其呈一定方向的排列. 从图 12 固化前后高温冻土玫瑰风向图可以看出,对于固化前后高温冻土,孔隙定向性分布具有一定的相似性,孔隙长轴与水平 x 轴之间的夹角主要分布在 90° 以及 180° 左右 2 个区间内,表明土体在该区间内均表现出较大的定向性. 其中不同固化土体 90° 以及 180° 区间内分布概率见表 6. 可以看出,SC + GC 固化土样与 SC 土样在 90° 左右分布概率为 23. 25% 和 25. 25%, 而 90° 区间内长轴方向与自重应力方向相同,其在该区间内孔隙概率分布越小,从微观尺度上就能更好地反映其颗粒接触越充分,从而表现出压缩系数越小,变形越小的宏观工程性质.

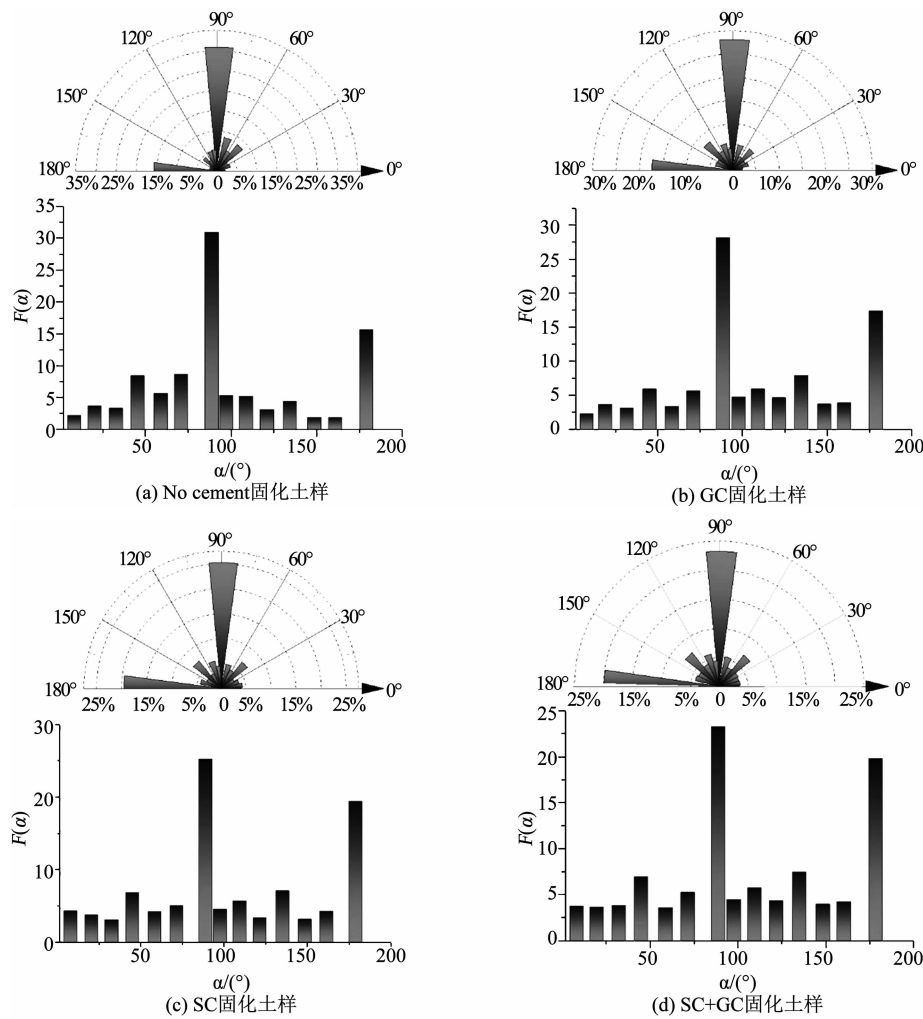


图 12 不同固化土孔隙长轴方向玫瑰风向图

Fig. 12 Rose diagram of solidified high warm and frozen soil before and after curing

表6 不同固化土体90°及180°孔隙分布概率
Tab. 6 90° and 180° pore area probability before and after curing

固化土类型	分布概率 $F(\theta)/\%$	
	90°	180°
No cement	30.90	15.66
GC 固化土样	28.15	17.50
SC 固化土样	25.25	19.45
(SC + GC) 固化土样	23.25	19.82

2.8 固化前后孔隙定向性分维分析

众所周知,土体是具有一定自相似性的分形结构体. 根据分形理论来定量描述高温冻土固化前后的微观结构特征,不仅表现方法直观化,而且可以定量描述固化前后土体力学性质^[27]. 本研究使用Mandelbort 提出的容量分维方法,计算固化前后土体孔隙的平面定向分维,计算方法如下:

$$N(r) = cr^{-D_f} \tag{2}$$

式中: r 代表格子的边长, $N(r)$ 表示所占的格子数. 绘制高温冻土固化前后 $\ln N(r)$ - $\ln r$ 散点图,如图13所示, $\ln N(r)$ - $\ln r$ 曲线均具有较好的线性关系. 定向分维(D_f)反映土体孔隙的定向程度, D_f 值越小,土的定向性越好, D_f 值越大,土的定向程度越差,混乱度越大.

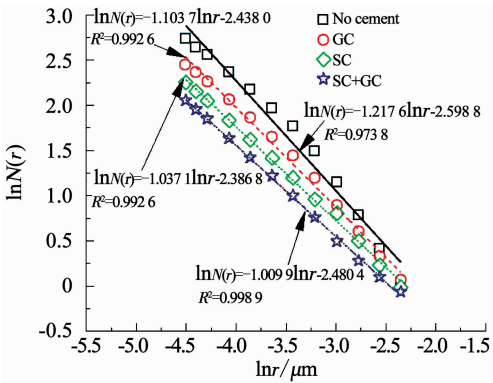


图13 固化前后孔隙定向性分维关系曲线
Fig. 13 Pore direction fractal dimension relationship curves of solidified high warm and frozen soil before and after curing

通过表7可以看出,固化土样的分维值在1.009 9~1.103 7变化,固化后土样的定向分维呈现减小的趋势,且SC + GC 固化土样的定向分维值最小,SC 固化土样定向分维值次之,GC 固化土样定向分维值较大. 充分说明该区间内定向分维值 D_f 越小,孔隙分布概率 $F(\theta)$ 越小,这与前面所描述的孔隙定向频率相吻合.

3 讨论

3.1 高温冻土固化前后融化压缩试验研究

土体压缩系数 a_v 是反映高温冻土宏观力学性

质的一个重要指标. 根据土工试验规(GB/T50123—1999),压缩系数是指外部荷载0.1~0.2 MPa 作用下变形量与荷载变化的比值,即

$$a_v = \Delta h / (H \times \Delta P). \tag{3}$$

式中: a_v 为融化压缩系数(MPa^{-1}), Δh 为土样在0.1~0.2 MPa 时总变形量(mm), H 为试样初始高度(mm), ΔP 为荷载差值.

表7 孔隙定向性分维统计
Tab. 7 Pore direction fractal dimension statistics

固化剂种类	孔隙面积所占比例	R^2	D_f
No cement	52.129	0.973 8	1.217 6
GC	52.246	0.992 6	1.103 7
SC	47.695	0.997 0	1.037 1
SC + GC	43.064	0.998 9	1.009 9

图14为固化前后土体压缩系数变化. 可以看出,No cement 土样压缩系数受温度变化影响,且其变化范围较大. 负温下压缩系数变化范围较小,主要因为土体中存在冰晶,对土体骨架起到了支撑作用,当温度升至0℃时,由于土中冰晶的融化,土体压缩系数显著增大. 而对于3种固化土来说,压缩系数受温度变化影响较小,但是由于固化效果不同,不同固化土压缩系数相差较大,其中SC + GC 固化土样压缩系数最小,即使温度升至0℃变形量也较小,充分证明硫酸铝盐水泥 + 普通硅酸盐水泥固化剂的加入,改变了土体内部的孔隙结构,水化产物替代了土体内部的冰晶成为冻土的主要支撑结构.

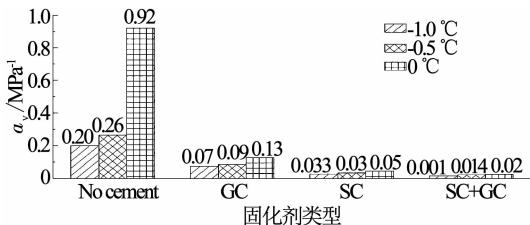


图14 固化前后土体压缩系数变化
Fig. 14 Compressibility coefficient of samples

3.2 高温冻土融化压缩系数与孔隙定向分维关系

通过以上分析可知,固化剂的加入彻底改变了土体的孔隙结构. 固化剂与冻土中自由水反应产生的水化产物取代了冰晶,成为土体结构的主要支撑. 为了更加真实地反应固化前后孔隙定向分维 D_f 与压缩系数 a_v 之间的关系,选取0℃时土体压缩系数 a_v 与固化后土体孔隙定向分维数 D_f 进行拟合,结果见图15. 可以看出,孔隙定向分维数随着压缩系数的增大而增大,两者之间存在着良好的线性关系,孔隙定向分维数越大,土体力学性质越好.

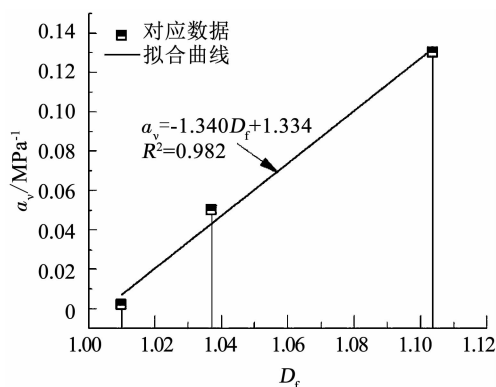


图 15 孔隙定向分维 D_f 与压缩系数 a_v 之间关系

Fig. 15 Correlation between pore directional fractal dimension D_f and compressibility coefficient a_v of samples

3.3 高温冻土固化反应微观模型

黄新、宁建国等^[28]通过普通硅酸盐水泥对常规粉质黏土进行固化,提出了水泥固化土微观机制模型,指出土体固化实质是水泥发生水化反应后,产生的水化产物对土颗粒进行包裹、胶结并填充的过程.根据上述高温冻土固化前后微观孔隙结构变化规律以及融化压缩性质结果,参照刘松玉等^[29]碳化固化粉土模型,提出高性能水泥固化高温冻土微观结构反应模型.掺入硫铝酸盐水泥+普通硅酸盐水泥混合固化剂时,硫铝酸盐水泥以其具有反应温度低、与水化反应速率快的特点,快速与高温冻土中的大量自由水发生反应形成水化硅酸钙凝胶(CSH)包裹在(土-冰)团粒表面(见图 16(a)).随着水化反应进程的加剧,水泥水化放出的热量逐渐开始融化团粒之间的冰,冰融化后产生的自由水进一步与剩余水

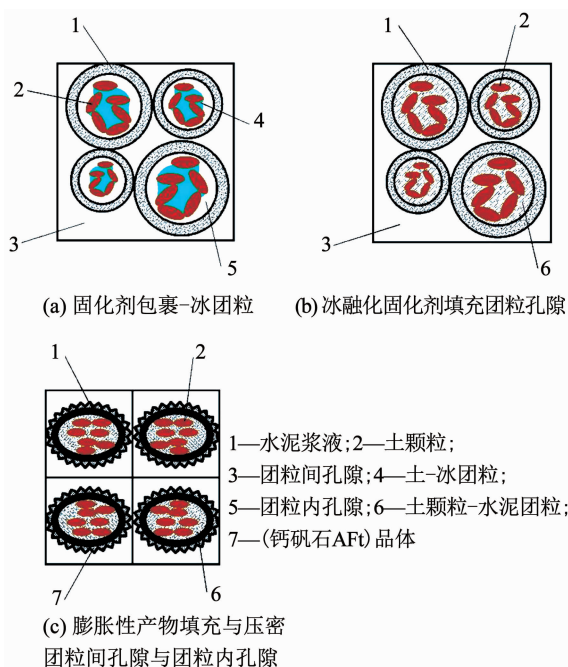


图 16 高温冻土固化反应微观模型

Fig. 16 Stabilizer reaction model of high warm and frozen soil

泥反应生成 CSH, 将土颗粒胶结在一起(见图 16(b)).同时,六棱柱状的钙矾石 AFt 迅速在 CSH 包裹土团粒表面生长,AFt 晶体与纤维状的 CSH 凝胶纵横交替搭接成复杂的网状结构,通过填充与压实作用来减小土团粒之间的孔隙(见图 16(c)).硫铝酸盐水泥与普通硅酸盐水泥混合后,加快了钙矾石的生成速率,增强了凝胶类水化产物对破坏胶结结构的修复作用,形成了水化过程中的动力学关系.

4 结 论

1) 固化剂加入高温冻土后,与土体内部的自由水发生反应,降低土体总含水量的同时,生成的水化产物将不同粒径的颗粒胶结在一起产生土体团聚作用,使得在 $5 \sim 10 \mu\text{m}$ 和 $10 \sim 20 \mu\text{m}$ 土颗粒等效直径分布几率增大,其中 SC + GC 固化剂固化效果最好,SC 次之,GC 最差.

2) 高温冻土固化后冻土孔隙面积主要分布于 $r < 2500 \text{ nm}$ 区间,孔隙长轴与水平 x 轴之间的夹角主要集中于 90° 及 180° 左右.固化后土体孔隙面积大幅减小,在 90° , 180° 左右表现出较大的定向性.其中 SC + GC 固化效果明显,孔隙面积减小最多,且 90° , 180° 左右定向性表现突出.充分证明硫铝酸盐水泥与普通硅酸盐水泥混合后,加快了钙矾石的生成速率,增强了凝胶类水化产物对破坏胶结结构的修复作用. 90° , 180° 左右定向性孔隙概率分布越小,从微观尺度上能更好地反映其颗粒接触越充分,压缩系数较小,变形较小的宏观工程性质.固化剂与高温冻土中未冻土发生水化反应替代冻土中冰晶成为冻土中主要的支撑结构.

3) 固化后土体孔隙定向分维 D_f 与压缩系数系数 a_v 之间存在较好的线性关系,且孔隙定向分维 D_f 越大,压缩系数 a_v 越大,土体分布越不均匀, D_f 越小压缩系数 a_v 越小,土体越趋于均匀化.

参考文献

- [1] 刘恩龙, 沈珠江, 范文. 结构性粘土研究进展[J]. 岩土力学, 2005, 26(增刊 1): 1
LIU Enlong, SHEN Zhujiang, FAN Wen. Advance in researches on structured clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(S1): 1
- [2] 施斌. 粘性土微观结构研究回顾与展望[J]. 工程地质学报, 1996, 4(1): 39
SHI Bin. Review and prospect on the microstructure of clayey soil[J]. Journal of Engineering Geology, 1996, 4(1): 39
- [3] 沈珠江. 土体结构性的数学模型——21 世纪土力学核心问题[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(1): 95
SHEN Zhujiang. Mathematical modeling of soil structure-the key problem of soil mechanics in 21st century[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(1): 95
- [4] 谢定义, 齐吉林. 土结构性及其定量参数研究新途径[J]. 岩

- 土工程学报, 1999, 21(6): 651
- XIE Dingyi, QI Jilin. Soil structure characteristic sand new approach in research on its quantitative parameter [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(6): 651
- [5] 刘世伟, 张建明. 高温冻土物理力学特性研究现状[J]. 冰川冻土, 2012, 34(1): 120
- LIU Shiwei, ZHANG Jianming. Review on physic mechanical properties of warm frozen soil [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(1): 120
- [6] 苏凯, 张建明, 刘世伟, 等. 高温-高含冰量冻土压缩变形特性研究[J]. 冰川冻土, 2013, 35(2): 369
- SU Kai, ZHANG Jianming, LIU Shiwei, et al. Compressibility of warm and ice-rich frozen soil [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(2): 369. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2013.0044
- [7] 童伯良, 李树德. 青藏高原多年冻土的某些特征及其影响因素 [C]//青藏冻土研究论文集. 北京: 科学出版社, 1983: 1
- TONG Boliang, LI Shude. Some characteristics of permafrost on Qinghai Xizang Plateau and a few factors affecting them [C]// Professional Papers on Permafrost Studies of Qinghai Xizang Plateau. Beijing: Science Press, 1983: 1
- [8] 李宁, 康佳梅, 全晓娟. 高温冻土区一中新型路基护坡冷却机理研究[J]. 岩土力学, 2007, 29(3): 425
- LI Ning, KANG Jiamei, QUAN Xiaojuan. Study on cooling mechanism of a new type ripped-stone embankment in high temperature area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(3): 425
- [9] 全晓娟, 李宁, 李国玉. 青藏铁路碎石路基最佳粒径的数值试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(11): 1947
- QUAN Xiaojuan, LI Ning, LI Guoyu. Numerical study on optimum grain-diameter for the crushed rock embankment of Qinghai-Tibet Railway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(11): 1947
- [10] 冯文杰, 马巍, 张鲁新, 等. 遮阳棚在寒区道路中的应用研究 [J]. 岩土工程学报, 2003, 25(5): 567
- FENG Wenjie, MA Wei, ZHANG Luxin, et al. Application of awning to roadway engineering in permafrost regions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(5): 567
- [11] SU Bo, LI Ning, QUAN Xiaojuan. The numerical study on the ventilated embankment in permafrost regions in Qinghai-Tibet Railway[J]. Cold Regions Science and Technology, 2004, 38(2/3): 229. DOI: 10.1016/j.coldregions.2003.11.003
- [12] 喻文兵, 赖远明, 张学富, 等. 块石层与碎石层降温效果室内试验研究[J]. 冰川冻土, 2003(6): 638
- YU Wenbing, LAI Yuanming, ZHANG Xuefu, et al. Experimental study on the cooling effect of block stone and crushed stone[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003(6): 638
- [13] 马巍, 程国栋, 吴青柏. 多年冻土地区主动冷却地基方法研究 [J]. 冰川冻土, 2002, 24(5): 579
- MA Wei, CHENG Guodong, WU Qingbai. Preliminary in permafrost areas[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(5): 579
- [14] LATIFI N, VAHEDIFARD F, GHAZANFARI E, et al. Sustainable improvement of clays using low-carbon nontraditional additive[J]. International Journal of Geomechanics, 2017, 18(3): 04017162. DOI: 10.1016/(ASCE)GM.1943-5622.001086
- [15] LATIFI N, EISAZADEH A, MARTO A, et al. Tropical residual soil stabilization: A powder form material for increasing soil strength [J]. Construction and Building Materials, 2017, 147, 827. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.115
- [16] LATIFI N, MEEHAN C L, MAJID M Z A, et al. Strengthening montmorillonitic and kaolinitic clays using a calcium-based non-traditional additive: A micro-level study[J]. Applied Clay Science, 2016, 132: 182. DOI: 10.1016/j.clay.2016.06.005
- [17] GLASSER F P, ZHANG L. High-performance cement matrices based on calcium sulfoaluminate-belite compositions[J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31(12): 1881
- [18] 王海龙, 申向东, 王萧萧. 寒区水泥砂浆固化土力学特性试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2012, 31(6): 1539
- WANG Hailong, SHEN Xiangdong, WANG Xiaoxiao. Engineering characteristics of cement solidified soil in cold regions[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2012, 31(6): 1539
- [19] 周海龙, 申向东, 薛慧君, 樊浩伦. 寒区水泥固化土力学性能影响因素分析[J]. 冰川冻土, 2016, 38(1): 192
- ZHOU Hailong, SHEN Xiangdong, XUE Huijun, et al. Analysis of the factors affecting the mechanical properties of cement concrete-stabilized soil in cold regions [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(1): 192. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2016.0022)
- [20] MEHTA P K. Effect of lime on hydration of pastes containing gypsum and calcium aluminates or calcium sulfoaluminate [J]. American Ceramic Society, 1973, 56(6): 315
- [21] MIDGLEY H G, PETTIFER K. The micro structure of hydrated super sulphated cement[J]. Cement and Concrete Research, 1971, 1: 101
- [22] CHAI M T, ZHANG H, ZHANG J M, et al. Effect of cement on unconfined compressive strength of warm and ice-rich frozen soil[J]. Construction and Building Materials, 2017, 149: 861. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.202
- [23] LIU Z B, SHI B, INYANG H I, et al. Magnification effects on the interpretation of SEM images of expansive soils [J]. Engineering Geology, 2005, 78(1): 89. DOI: 10.1016/j.enggeo.2004.10.008
- [24] 白冰, 周健. 扫描电子显微镜测试技术在岩土工程中的应用与进展[J]. 电子显微镜学报, 2001, 20(2): 154
- BAI Bing, ZHOU Jian. The application and advances of SEM in geotechnical engineering [J]. Journal of Chinese Microscopy Society, 2001, 20(2): 154
- [25] 王清, 陈慧娥, 蔡可易. 水泥土微观结构特征的定量评价[J]. 岩土力学, 2003, 24(增刊1): 12
- WANG Qing, CHEN Huie, CAI Keyi. Quantitative evaluation of microstructure features of soil contained some cement[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(S1): 12
- [26] 曹亮, 李晓昭, 赵晓豹, 等. 苏州软弱敏感层的土体微观结构定量分析[J]. 工程地质学报, 2012, 20(3): 419
- CAO Liang, LI Xiaozhao, ZHAO Xiaobao, et al. Experimental and digital image study on micro-structure of soft soil in strength-sensitive strata in Suzhou city[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(3): 419
- [27] 刘晓明, 赵明华, 苏永华. 沉积岩土粒度分布分形模型改进及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 12(3): 263
- LIU Xiaoming, ZHAO Minghua, SU Yonghua. Improvement and application of fractal model to size distribution of sedimentary rock and soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 12(3): 263
- [28] 黄新, 宁建国, 许晟, 等. 固化土结构的形成模型[J]. 工业建筑, 2006, 36(7): 1
- HUANG Xin, NING Jianguo, XU Sheng, et al. Structure formation model of stabilizer soil[J]. Industrial Construction, 2006, 36(7): 1. DOI: 10.13204/j.gyjz2006.07.001
- [29] 刘松玉, 曹菁菁, 蔡光华. 活性氧化镁固化粉质黏土微观机制 [J]. 岩土力学, 2018, 39(5): 1543
- 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. DOI: 10.16285/jrsm.2016.1308