DOI:10.11918/202006037

水泥改良冻土过程水分转化规律及对强度的影响

尹振华[1,2],张建明[1],张 虎[1],王宏磊[1,2]

(1.中国科学院 西北生态环境资源研究院 冻土工程国家重点实验室,兰州 730000;
2.中国科学院大学,北京 100049)

摘 要: 为保证多年冻土区地基的稳定性及解决多年冻土区土方材料短缺的问题,分别使用硫铝酸盐水泥(SAC)和普通硅酸盐水泥(OPC)对冻土进行改良。通过无侧限抗压强度试验得到两种水泥在不同掺量及不同养护龄期下的强度特征,同时,使用离心机法及冻干法对水泥改良冻土过程中的自由水、矿物水及结合水的变化进行测定,揭示水泥改良冻土过程中的水分转化规律,并建立矿物水、结合水量与水泥改良冻土强度的内在联系。结果表明:硫铝酸盐水泥改良冻土的强度明显高于普通硅酸盐水泥,并且具有显著的早强特性。硫铝酸盐水泥改良冻土在养护初期水分转化速率较普通硅酸盐水泥快,但矿物水及结合水的转化量少。硫铝酸盐水泥改良冻土中的矿物水和结合水对强度的贡献更为突出。硫铝酸盐水泥更适合用于冻土的改良。

关键词: 冻土;水泥;土壤改良;水分转化;抗压强度
中图分类号: TU411.92 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2021)11-0136-09

Water transformation law of cement improved frozen soil and its effect on strength

YIN Zhenhua[1,2], ZHANG Jianming[1], ZHANG Hu[1], WANG Honglei[1,2]

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, China Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Sulphoaluminate cement and ordinary Portland cement were used to improve the frozen soil in order to ensure the stability of foundation and solve the problem of shortage of earthwork materials in permafrost area. In this study, the strength characteristics of the two types of cement were obtained by unconfined compressive strength tests at different dosages and different curing ages. The variation of free water, bound water, and constitution water were measured with the methods of centrifuge and freeze dryer in the process of cement improving frozen soil. The law of water transformation in the process of improving frozen soil was explored, and the relationship between constitution water, bound water, and the strength of improved frozen soil were established. Results show that the strength of the improved frozen soil treated with sulphoaluminate cement was obviously higher than that treated with ordinary Portland cement. Sulphoaluminate cement presented remarkable early strength characteristics. The water transformation rate of sulphoaluminate cement was faster than that of ordinary Portland cement in the early stage of curing, but the transformation amount of constitution water and bound water was low. The contribution of constitution water and bound water to the strength was more significant in sulphoaluminate cement improved frozen soil than in ordinary Portland cement. Sulphoaluminate cement is more suitable to improve frozen soil.

Keywords: frozen soil; cement; soil improvement; water transformation; compressive strength

多年冻土区的浅层高含冰量冻土不仅不能直接用于建筑工程的土方取土,修筑在其上的建筑也存在着融沉灾害的安全隐患[1-3]。土壤改良是将冻土与水泥、石灰等无机胶凝材料拌和、养护来改变冻土的力学性质,将其改良为适合工程应用的优质土方[4-5]。Yu等[6]使用水泥、纳米二氧化硅、聚丙烯纤维以及混合稳定剂对冻土进行了改良,减小了冻土的融沉量。Chai等[7-8]尝试使用了水泥和添加剂、氢氧化钠、硅酸钠、木质素磺酸钠、高吸水性聚合物等改良冻土,其中水泥和添加剂同时使用有效提高了冻土的强度。Sun等[9-10]分别采用硫铝酸盐水泥和普通硅酸盐水泥对冻土进行改良,其中硫铝酸盐水泥成功将冻土的融化压缩量降低到1.0%。以上众多学者尝试使用了多种不同材料对冻土进行改良,但对冻土改良的机理缺少更深入的研究。

冻土改良的过程伴随着冻土中冰的融化、水与水泥水化反应的进行。土中的水分可以分为自由水、结合水和矿物水[11]。其中自由水以液态形式存在,结合水吸附在固体介质的表面,矿物水则是水化

收稿日期: 2020-06-07
基金项目: 国家自然科学基金(41471062,41971085)
作者简介: 尹振华(1991—),男,博士研究生;
张建明(1963—),男,研究员,博士生导师
通信作者: 张 虎,zhanghu@lzb.ac.cn

产物的组成部分，并参与到晶格结构中[12]。水泥改良冻土时，冻土中冰发生融化，融化后的自由水部分转化为水化产物中的结合水和矿物水，水化产物的胶结、填充等作用，促使改良土体内部微结构发育，最终导致工程特性的变化[13-14]。所以，通过对冻土改良过程中各组分水分的测定，可以反映水化反应的进程，进而建立起各组分水分与改良土强度之间的关系。

很多学者对水泥改良土中水分转化机制及其对物理力学性质的影响开展了大量研究，其中主要分为离心机法和核磁共振法。艾凯明[15]采用核磁共振法研究了矿山充填浆料的水分及孔隙演变规律，得到了浆料不同硬化阶段的水分质量分数变化；程福周等[16]基于核磁共振技术研究了改良淤泥过程中的孔隙水质量分数及分布的变化规律。Zhu 等[17]采用了离心机法研究了自由水、结合水及矿物水在淤泥改良过程中的转化规律，并建立起水分质量与力学性质的关系；Chiu 等[18]则利用离心机法从水分转化的角度分析了淤泥的改良机理。张春雷[19]采用离心机法从水分转化的角度解释了快硬水泥的早强机理。以上两种方法相比，离心机法对改良土中不同组分水分的测定具有一定的优势。

为了揭示冻土改良过程中的水分转化规律，从水分转化的角度探究水泥改良冻土的机理，进而建立起各组分水分与改良冻土强度之间的关系，以青藏高原多年冻土区浅层冻土为对象，使用不同水泥对冻土进行了改良，并测定了不同掺量及不同养护龄期下改良冻土中不同组分的水分质量分数，分析了水化过程中的水分转化规律，并揭示了水分转化过程对土体强度提升的影响。

1　试　验

1.1　试验材料

青藏高原多年冻土区浅层冻土主要为黏土，因此，试验土样选择多年冻土区青藏高原北麓河盆地的黏土，此处铁路、公路、输电工程聚集，土样极具代表性。将取回的土样自然风干后碾碎并过 2 mm 筛，土样的颗粒分布及物理化学性质如表 1 所示。根据文献[9]不同水泥改良冻土的效果，确定选取由中国唐山特种水泥有限公司生产的标号为 C52.5 的硫铝酸盐水泥和标号为 P. O 42.5 的普通硅酸盐水泥。其中，硫铝酸盐水泥为早强快硬水泥，由于其较好的低温水化性质，常用在寒区工程中[10]。普通硅酸盐水泥作为快硬水泥的参照。两种水泥的主要成分如表 2 所示。

表 1　土样颗粒分布和物理化学性质

Tab. 1　Particle-size distribution and physical and chemical properties of soil samples

种类	颗粒尺寸分布/%				塑限	液限	pH
	>0.1 mm	0.1 ~ 0.05 mm	0.05 ~ 0.005 mm	<0.005 mm			
黏土	3.69	11.96	52.83	31.52	18.6	36.7	8.59

表 2　不同水泥成分质量分数

Tab. 2　Major components of different cement

水泥种类	w/%					
	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Fe_2O_3
SAC	12.60	25.80	46.65	1.30	12.60	1.05
OPC	22.20	5.11	63.90	1.06	2.23	5.50

1.2　试样制备

将水泥与冻土进行拌和。首先将上述过筛土进行预冷，与由去离子水制成的粉碎冰（过 2 mm 筛）进行拌和，制成含冰量为 33.0% 的冻土，然后分别与两种水泥进行充分拌和。每种水泥的用量分别设置为 5.0%、10.0%、15.0%（质量分数）。为了促使水化反应的进行，需要冻土在养护过程中融化产生液态水，因此均加入 1.0% 的抗冻剂（$NaNO_2$）。为了促进 OPC 的水化反应程度，在 OPC 水泥土中再加入 0.5% 的早强剂（$NaSO_4$）。然后将拌和后的水泥土放入模具分层压密，制成直径为 61.8 mm、高为 126.0 mm 的圆柱形土样，干密度控制为 1.25 g/cm^3。制样过程全程在温度为 -10.0 ℃左右的冷库中进行，避免冻土在制样时发生融化，对各组分水分测定产生较大影响。最后将土样从模具中取出，使用保鲜膜密封后放入密封袋中，放入 -1.0 ℃的恒温箱进行养护。分别养护 3、7、14 和 28 d 取出进行无侧限抗压强度试验。为了尽可能地减少制样过程中的水分蒸发，每个土样的制样过程控制在 20 min 内。-1.0 ℃的选取是为了模拟多年冻土区浅层冻土的温度，为水泥改良冻土的养护温度。以上百分比均为冻土质量的百分比。

选取与上述配比相同的水泥土分别放入密封袋中，然后放入 -1.0 ℃恒温箱进行养护，养护到期后放入底部打有小孔的离心管中进行离心机试验。

1.3　试验方法

1.3.1　自由水分离理论

离心机法分离自由水的实质是自由水在土中具有一定的势能，通过给土体施加离心场，使得土中的自由水受到离心势的作用。当土中自由水在离心场的势能达到自由水在土中的势能时，自由水便可以脱离土颗粒的限制，从土体中分离出去。离心机法分离自由水的具体计算如下，将土柱的底面视为参

考平面,水势为 ψ_0,其同任意高度的土水势 ψ_1 的差值可由下式表示[20]:

$$\psi_0 - \psi_1 = \int_{r_1}^{r_2} r\omega^2 \mathrm{d}r = \frac{1}{2}\omega^2(r_1^2 - r_2^2) \quad (1)$$

$$\psi_0 - \psi_1 = \omega^2\left(r_1 - \frac{h}{2}\right)h \quad (2)$$

式中:r_1 为参照水平运转半径;r_2 为土样中心运转半径;$h = r_1 - r_2$,即土样中心距离试管底端的高度,单位均为 cm;ω 为角速度,rad/s。

将离心场的势能换算成重力场的毛管能,得

$$\rho g H = \rho\left(r_1 - \frac{h}{2}\right)h\omega^2 \quad (3)$$

$$H = \left(r_1 - \frac{h}{2}\right)\frac{h\omega^2}{g} \quad (4)$$

式中:ρ 为水的密度,g/cm^3;g 为重力系数;H 为水柱高度,cm。

随着离心机的离心作用,土样发生压缩,土样高度逐渐减小,土样高度可以表示为[21]

$$h = \frac{1}{2}[r_1 - (l + h')] \quad (5)$$

式中:l 为转子中心到试管顶面距离,h'为土样表面到试管顶面的高度,单位均为 cm。

将式(5)代入式(4)得

$$H = \frac{1}{2}[r_1 - (l + h')]\left[r_1 - \frac{r_1 - (l + h')}{4}\right] \times 1.118 \times 10^{-5} n^2 \quad (6)$$

式中 n 为转速,r/min。

将图 1 中各数值代入式(6)得

$$H = 1.397\,5 \times 10^{-6} n^2 (3.7 - h')(21.7 + h') \quad (7)$$

得到的 H 表示土对水的吸力,为负值。最后将土柱高度取对数,得到相对应的土水势的 pF 表示方法:

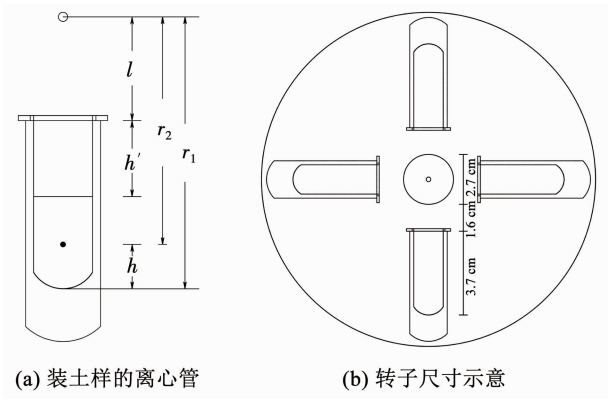
$$\mathrm{pF} = -\log H \quad (8)$$

pF 表示法是参照酸碱度的 pH 表示法来对土水势进行表示,根据 pF 的大小可以对自由水、结合水和矿物水进行区分。

通过在实验中设置离心机不同转速以及测量土样的高度来进行计算,当计算得到的土水势达到自由水在土中的势能时,此时分离的自由水质量即为土中自由水的质量。具体尺寸、试管土样及转子的示意如图 1 所示。

1.3.2 水泥改良冻土各组分水分测定

水泥及添加剂加入到冻土中后,冰发生融化转化为自由水和土中的结合水。假定水泥在与冻土中的水分参与反应时,土颗粒本身含有的矿物水和结合水量不发生变化,则参与水化反应的水分仅为冰融化后的自由水。自由水部分转化为水化产物中的矿物水,部分转化为水化产物中的结合水。其水分转化过程如图 2。



(a) 装土样的离心管 (b) 转子尺寸示意

图 1 试管及转子示意

Fig. 1 Diagram of test tube and rotor

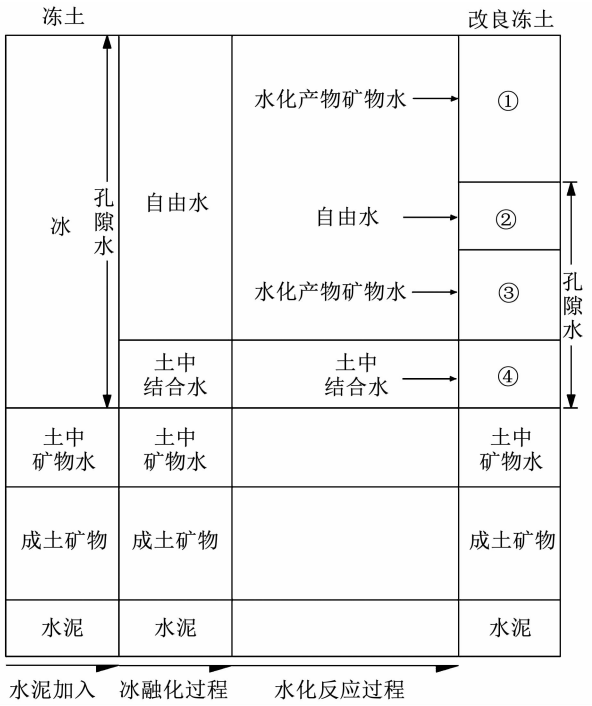


图 2 水分转化示意[19]

Fig. 2 Diagram of water transformation[19]

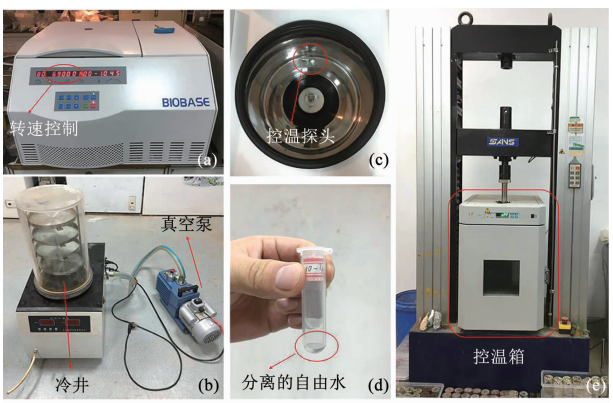
由于水化产物中矿物水和结合水很难直接测定,根据图 2 的水分转化原理,可以通过间接的方法得到水化产物中的各组分水分质量,具体如下:

1)改良冻土自由水量的确定。根据 Lebedev[22] 提出的水分分界势能理论,自由水的势能 pF < 3.8。设定离心机转速进行离心机试验,将离心前后的试管土样进行称质量,离心前后的质量差值即为分离出的自由水的质量 $m_②$。图 3(a)为 TGL-16M 高速冷冻离心机,最高转速可达 16 000 r/min,同时离心腔中有控温装置,如图 3(c)所示,可以对离心腔内进行控温。试验温度取与养护温度相同的 -1.0 ℃。试验结束后分离得到的自由水如图 3(d)所示。

2）水化产物中矿物水量的确定。利用冻干机将改良后的冻土冻干，此时损失的水分为自由水 $m_②$、水化产物中结合水 $m_③$ 和土中结合水 $m_④$，只有水化产物中矿物水 $m_①$ 留在了改良土中，因此，冻干前后的质量差值即为水化产物中矿物水质量 $m_①$。冻干试验使用 FA-1A-50 冻干机，如图 3（b）所示。冻干法和 105 ℃烘干法均可以脱去土中的自由水和结合水，但冻干法更适用于水泥改良土的脱水。因为冻干机腔内为真空环境，可以提供 -50.0 ℃的腔内温度，保证土样在脱水过程中水泥水化反应几乎停止，确保得到的水分质量数据精确。

3）水化产物中结合水量的确定。由水分转化示意图可知，确定了初始自由水质量 m_0，水化产物中结合水质量可以通过初始自由水质量减去养护到期后的自由水质量和水化产物中矿物水质量得到，即 $m_③ = m_0 - m_② - m_①$。

4）初始自由水量确定。初始自由水质量即冻土融化后的自由水质量。将土样过 2 mm 筛，装入底部带孔的离心管中。在管底提前预铺滤纸，装入土样后压紧，然后将装有土样的离心管底端置在水中，水面没过土样上表面，经过 12 h 饱和后称质量，土样的饱和度为 85%。将饱和后的土样置于离心机中，设置离心机转速，分别在不同转速下离心工作 3.5 h，然后称质量记录每一级转速下水分损失质量。离心试验结束后，将土样烘干，测试其干质量。最后得到土样的土水势曲线，如图 4 所示。可以看出，离心机法测得的土水势曲线与文献结果吻合较好[21]。由图 4 可以得出分离了自由水后的试验土样，其结合水质量分数为 14.58%。使用初始冻土水分质量分数减去结合水质量分数即可得到初始自由水质量分数。



(a) 离心机；(b) 冻干机；(c) 离心腔；(d) 离心管；(e) 万能试验机

图 3　试验设备

Fig. 3　Test equipment

1.3.3　水泥改良冻土无侧限抗压强度试验

将养护到期的试样进行无侧限抗压强度试验。使用冻土工程国家重点实验室的 CMT5105 万能试验机进行，如图 3（e）所示。试验过程中对试样进行控温，试验温度为 -1 ℃，应变速率为 0.01 /min，加载至试样破坏，获取水泥改良土的峰值应力。

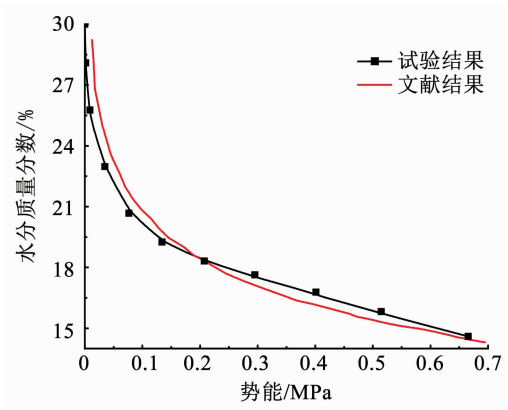


图 4　试验土样的土水势曲线

Fig. 4　Soil water potential curve of soil sample

2　试验结果分析

2.1　水泥改良冻土总含水量变化

水泥改良冻土在不同水泥掺量及不同养护龄期下的总含水量如图 5 所示。水泥改良冻土的水分质量减少主要分为两大部分；一是水泥加入直接导致冰的比例减少；二是水泥在冻土中水化消耗水分而造成的水分质量减少。由图 5 可以看出，由于水泥加入而造成的水分质量减少占主要部分。同时，含水量随着水泥掺量的增加和养护龄期的增加而降低。SAC 和 OPC 降低冻土中含水量的程度大致相同，其中最大程度含水量降低发生在 OPC 掺量 15.0%、养护 28 d 后，水分质量分数从冻土初始的 33.00% 降至 23.73%。而 SAC 在掺量为 15%、养护 28 d 时，水分质量分数从最初的 33.00% 降至 24.54%。

2.2　各组分水分随养护龄期的变化

分别使用 SAC 和 OPC 在不同水泥掺量下（5.0%、10.0%、15.0%）对冻土进行改良，养护 3、7、14 和 28 d 后对水泥改良冻土中的各组分水分进行测定，得到改良冻土中各组分水分随龄期的变化规律。

2.2.1　自由水随养护龄期的变化

水泥改良冻土中的自由水随着养护龄期的变化规律如图 6 所示。由图 6（a）可以看出，随着养护龄期的增加，SAC 改良冻土中的自由水在前 3 d 内发生了大幅度的减少，其中，当水泥掺量为 15.0% 时，自由水质量分数从最初的 15.07% 减少到 5.33%，之后的变化较为缓慢，到养护后期 28 d 时，变化趋于稳定。通过对比不同水泥掺量下自由水的变化趋

势也可以看出,随着水泥掺量的等量增加,自由水也基本等差减少。

由图 6(b)可以看出,随着养护龄期的增加,OPC 改良冻土的自由水同样在养护初期减小的幅度较大,但与 SAC 改良冻土中自由水初期减少相比,减小的幅度要小一些。自由水减少曲线、结合水和矿物水增加曲线的斜率,可以分别表示各组分水分转化的速率。在水泥掺量为 15.0% 时,自由水质量分数从初始的 15.09% 减少到 7.48%。这说明了水泥在水化反应初期反应速率较高,但由于 SAC 快硬早强的特点,即使在 -1 ℃的养护条件下水分转化速率仍较快。随着养护龄期的增加,OPC 改良冻土中的自由水一直以较为缓慢的速率减少,这说明水化反应一直在进行。随着水泥掺量的等量增加,自由水减少的量同样也很接近。这说明水泥掺量的增加对于冻土中自由水减少的作用十分明显。同时,两种水泥改良冻土养护龄期为 28 d 时仍然有自由水的存在,这说明自由水还没有被水化反应完全消耗。根据自由水势能较低的原因首先参与水化反应的假设可知,冻土中的结合水没有参与到水化反应中。

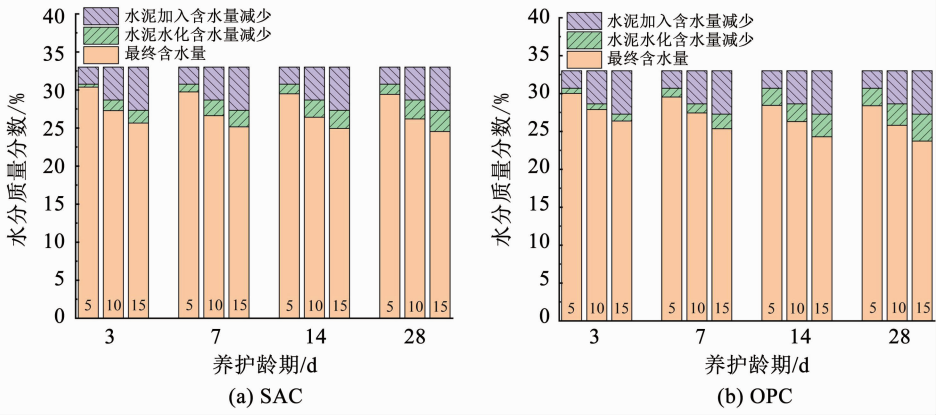


图 5 不同水泥改良冻土的含水量

Fig. 5 Water content of different cement improved frozen soil

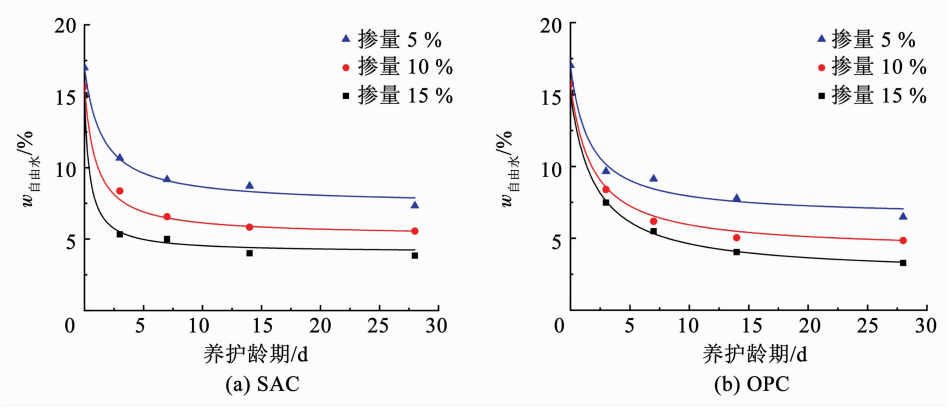


图 6 水泥土中自由水随龄期的变化规律

Fig. 6 Variation of free water in cement soil with curing age

2.2.2 矿物水随养护龄期的变化

水泥改良冻土中的矿物水随着养护龄期的变化规律如图 7 所示。由图 7(a)可以看出,随着养护龄期的增加,SAC 改良冻土中的矿物水在养护初期的 7 d 内大幅度增加,随着养护龄期的增加,矿物水的增长速率减缓,矿物水质量分数最高为 2.16%。对比不同水泥掺量下矿物水的变化可以看出,当水泥掺量从 5% 增加到 10% 时,养护 28 d 的水泥土矿物水增量十分明显,从 1.08% 增加到 1.91%;水泥掺量从 10% 增加到 15% 时,矿物水的增量较少,仅从 1.91% 增加到了 2.16%。这说明通过增加水泥掺量来增加水化产物量的效果已经不是很明显。

由图 7(b)可以看出,随着养护龄期的增加,OPC 改良冻土中的矿物水一直在增加,表现为养护初期增长迅速,后期增长缓慢,但整个过程中矿物水增长较 SAC 改良冻土平缓的多。当水泥掺量从 5% 增加到 10% 时,矿物水质量分数从 1.88% 增长到 2.41%;当水泥掺量从 10% 增加到 15% 时,矿物水质量分数从 2.41% 增长到 2.79%。水泥掺量的增大引起矿物水的较大幅度增加说明 15% 掺量时所发生的水化反应仍然较为充分。

2.2.3 水化产物中结合水随养护龄期的变化

水化产物中结合水随养护龄期的变化规律如图 8所示。由图 8(a)可以看出,随着养护龄期的增

加，SAC 改良土中的结合水总体随着养护龄期的增长而增大，具体表现为养护初期结合水质量分数增长迅速，7 d 以后增长十分平缓。通过对比不同水泥掺量的结合水变化可以看出，当水泥掺量从 5% 增加到 10% 时，结合水的增加量较少，水泥掺量从 10% 增加到 15% 时，结合水增加量很大。

由图 8(b)可以看出，OPC 改良冻土中的结合水总体随着养护龄期的增长而增大，具体表现为养护初期结合水质量分数增长迅速，7 d 后增长十分平缓，并且前 3 d 的增长曲线几乎重合。通过对比不同水泥掺量的结合水变化可以看出，随着水泥掺量的等量增加，结合水增加的量同样也很接近。

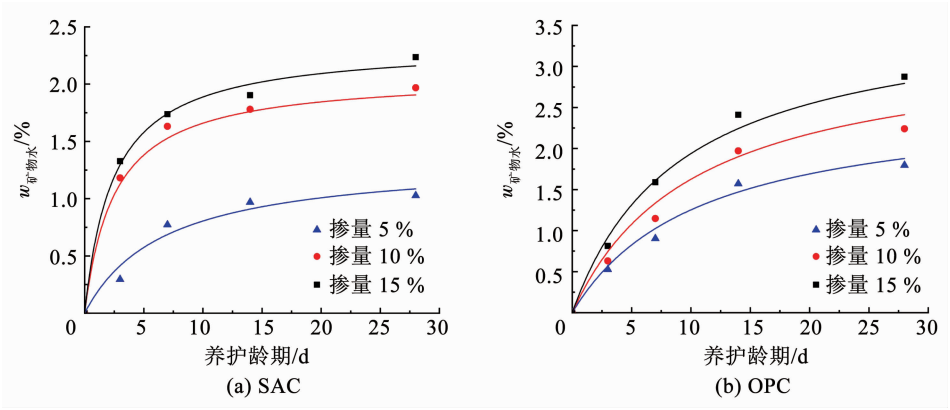


图 7　水泥土中矿物水随龄期的变化规律

Fig. 7　Variation of constitution water in cement soil with curing age

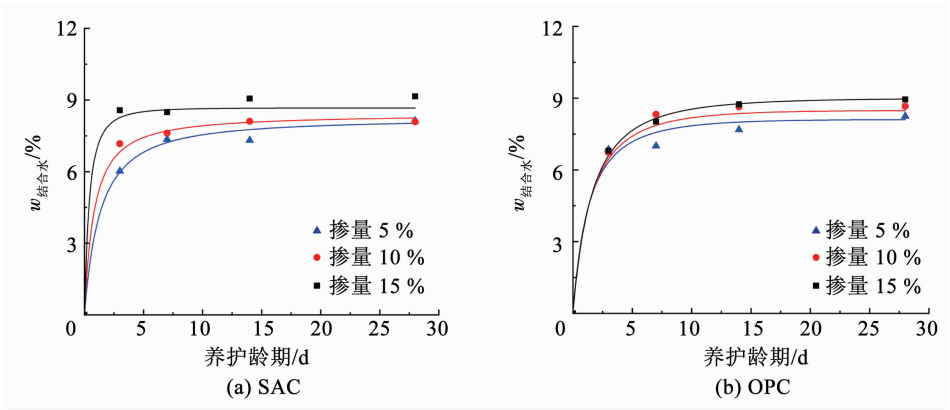


图 8　水泥土中结合水随龄期的变化规律

Fig. 8　Variation of bound water in cement soil with curing age

2.3　水泥改良冻土的强度

两种水泥改良土的无侧限抗压强度如图 9 所示。可以看出，两种水泥改良冻土均随着水泥掺量及养护龄期的增加而增加。SAC 改良冻土的强度明显要高于 OPC 改良冻土，SAC 改良冻土养护 3 d 的强度与 OPC 改良冻土养护 28 d 的强度大致相同。这足以显示出快硬水泥早强的优势。根据工程施工要求，一般在无侧限抗压强度达到 50 kPa 以后才能回填碾压[23]。SAC 在掺量 10.0%、养护 3 d 强度即能达到 124 kPa，而 OPC 在同等掺量的情况下则需要 28 d。结果说明了 SAC 在改良冻土中的效果比 OPC 要好得多，同时 SAC 早强的特性在工程施工中具有很大的优势。

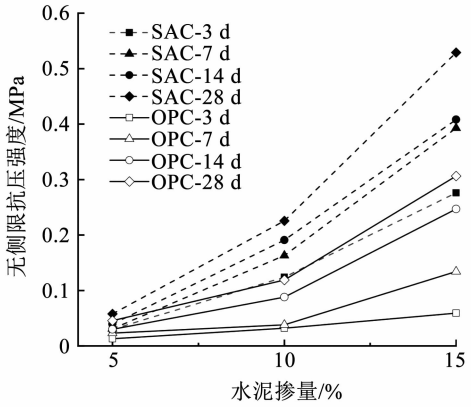


图 9　不同掺量、养护龄期的水泥改良冻土的无侧限抗压强度

Fig. 9　Unconfined compressive strength of cement soil with different dosages and curing ages

3 讨 论

3.1 水分转化过程

通过对各组分水分结果进行拟合分析，可以得到水泥在改良冻土过程中的水分转化规律。根据拟合结果，矿物水的增加过程可以用以下函数来表示：

$$w_{矿物水} = k_1 \times \frac{t}{k_2 + t} \tag{9}$$

根据拟合结果发现，$w_{矿物水}$ 表示矿物水质量分数；k_1 为水化产物中矿物水的最大转化量，即当 $t \to \infty$ 时，水化产物中矿物水的转化量；k_2 则为控制矿物水增长速率的参数，通过对矿物水求导可以得到，在 $t = 0$ 时，$w'_{矿物水} = k_1/k_2$，k_1/k_2 表示矿物水转化之初的切线斜率，即矿物水的初始增长速率。

通过对自由水的结果进行拟合分析，得到水泥改良冻土过程中自由水减少过程的函数表示：

$$w_{自由水} = k_3 - \frac{k_4 \times t}{k_5 - t} \tag{10}$$

根据拟合结果发现，$w_{自由水}$ 表示自由水质量分数；k_3 值为冻土中初始的自由水质量分数，即当 $t = 0$ 时，水化反应还未发生时的自由水质量分数；k_4、k_5 为控制自由水减少的参数，通过对自由水求导可以得到，在 $t = 0$ 时，$w'_{自由水} = -k_4/k_5$，$-k_4/k_5$ 则表示自由水减少之处的切线斜率，即自由水的初始减少速率。

水化产物中结合水不能直接测得，可以通过初始的自由水质量分数减去养护到期后的自由水质量分数再减去水化产物中矿物水质量分数得到，水化产物中结合水增长的函数可以表示为

$$w_{结合水} = k_3 - w_{自由水} - w_{矿物水} = \frac{(k_4 + k_1) + \dfrac{k_2 k_4 - k_1 k_5}{t}}{\dfrac{k_2 k_5}{t^2} + \dfrac{k_5 - k_2}{t} - 1} \tag{11}$$

式中 $w_{结合水}$ 表示结合水质量分数，当 $t \to \infty$ 时，结合水的最大转化量为 $-k_1 - k_4$。

不同水泥改良冻土过程中的水分变化均遵循以上的水分转化规律，只是在具体的水分转化参数上有一定的区别，分别将两种水泥改良冻土的水分转化过程进行表示，如图 10 所示。图中 A 代表水化产物中的结合水随养护龄期的生成量；B 代表水化过程中自由水随养护龄期的变化；C 代表水化产物中矿物水随养护龄期的生成量。由图 10 可以直观地看出，当水化反应开始后，自由水大量减少，分别转化为矿物水和结合水。其中，自由水转化成矿物水的量较少，大部分的自由水转化成为了结合水。而到养护龄期 28 d 后，仍然有部分自由水存在，这说明在 -1.0 ℃ 养护环境下，以上掺量及养护龄期下没有将自由水完全消耗。这也说明结合水没有参与到水化反应过程中。

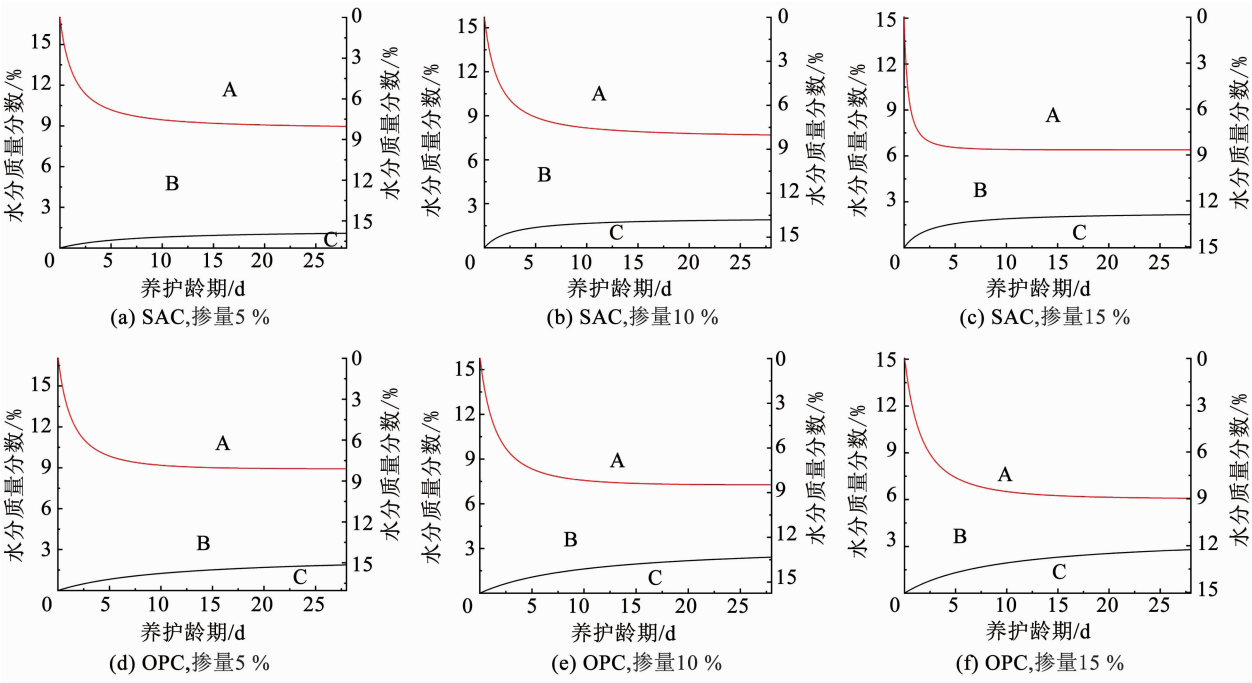


图 10 水泥改良冻土过程各组分水分随龄期的变化规律

Fig. 10 Variation of different water contents with curing age

通过对比两种水泥改良冻土的水分转化过程发现，其水分转化规律是相似的，但具体的转化过程略有不同。SAC 改良冻土中，养护 28 d 情况下，矿物水生成量要小于 OPC 改良冻土。且由图 10 可以看出，SAC 改良冻土中的矿物水在早期生成迅速，随着龄期的增长，逐渐趋于平缓，结合水也是相似的规律；然而 OPC 改良冻土中的矿物水随着养护龄期的增长一直在增长，只是养护初期的增长速率略大于养护后期的增长速率，且结合水只是在养护初期大量发生转化，养护后期几乎不变，因此，养护后期自由水的减少主要是转化到了矿物水中。

3.2　水分与无侧限抗压强度的关系

将水化产物中的矿物水和结合水增量与水泥改良冻土的无侧限抗压强度之间关系进行分析，如图 11所示。可以看出，在同样的矿物水及结合水增量的情况下，SAC 改良冻土的强度要大于 OPC 改良冻土。这说明 SAC 中所生成的结晶矿物及胶凝产物对改良冻土的强度贡献更突出，其结晶矿物的强度及胶凝产物所产生的胶结作用也更强。这可能是二者宏观力学性质存在较大差异的主要原因。两种水泥改良土的矿物水、结合水与强度的关系在增量较小时离散性较大，当其增量达到一定数值后相关性则较好。这主要是因为当水化产物较少时，水泥土材料受自身不均匀性的影响较大，当水化产物成为其强度主要来源时，性质则相对稳定。矿物水增量与强度的拟合关系较差，而结合水增量与强度的拟合关系更好，这说明强度与胶凝产物的相关性更高。

分别对水泥掺量为 5%、养护龄期为 28 d 的 SAC、OPC 改良冻土进行扫描电镜试验，得到了改良后冻土水化产物的微观形貌特征。如图 12 所示，在 2 000 倍放大倍数下，SAC 和 OPC 改良冻土的微观特征差别比较显著。由文献知，SAC 和 OPC 水化反应的结晶状产物主要为钙矾石[24]。通过对比扫描电镜图像可以看出，图中的细条状晶体即为钙矾石晶体。在 SAC 改良冻土中的钙矾石主要呈现形态较为粗大的棒状结构，而 OPC 改良冻土中，钙矾石晶体则多为细小的针状结构。结合两种水泥的主要成分可知，两种水泥的成分大致相同，只是在具体的配比上略有不同。SAC 相对于 OPC 具有更高比例的氧化铝和氧化硫，作为生成钙矾石的主要成分，充足的含量使得钙矾石发育较好，形态也较为粗大，强度较高。这为 SAC 改良冻土强度较高提供了有力的证据。

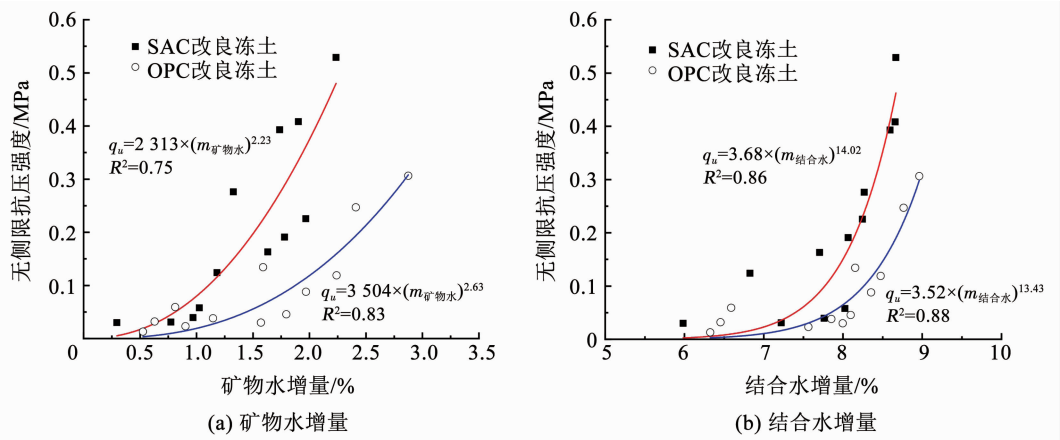
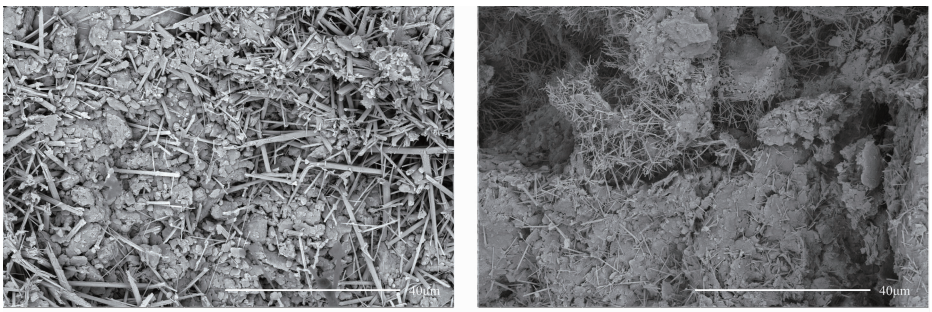


图 11　水化产物中矿物水、结合水增量与抗压强度的关系

Fig. 11　Relation between constitution water, bound water, and unconfined compressive strength of cement soil



(a) SAC　　(b) OPC

图 12　水泥改良冻土的 SEM 图像

Fig. 12　SEM image of cement improved frozen soil

结合上述水分转化规律和强度特征可知,SAC 改良冻土在养护早期自由水迅速减少,转化为矿物水和结合水,即快速生成了结晶矿物和胶凝产物,从而实现其早强快硬的特征。而 OPC 改良冻土强度发展比较平缓,只是在养护初期强度发展稍快一些,因而在水分转化角度则表现出养护初期矿物水和结合水的转化速率要低于 SAC。由此可以得出,在负温条件下,SAC 仍然具有良好的水化性能,更适合作为改良冻土的材料。

4 结 论

1)SAC 具有良好的早强性能,能够在负温的养护环境下实现对冻土的改良。与 OPC 相比,SAC 只需更短的时间就能达到可以碾压的强度,更适合用于改良冻土。

2)在负温养护条件下,SAC 改良冻土中自由水转化成矿物水和结合水的速率较快,宏观上表现为强度增长较快,但矿物水、结合水增量要小于 OPC。

3)水泥改良冻土中的矿物水和结合水在增量较小时,与强度的相关性较差,超过一定量值后,则相关性较好。与 OPC 相比,SAC 改良冻土中的结晶矿物及胶凝产物对改良冻土的强度贡献更突出。

参考文献

[1] MA Wei, FENG Guangli, WU Qinbai, et al. Analyses of temperature fields under the embankment with crushed-rock structures along the Qinghai-Tibet Railway[J]. Cold Regions Science and Technology, 2008, 53(3): 259. DOI: 10.1016/j.coldregions.2007.08.001

[2] HARRIS C, DAVIES M C R, BERND E. The assessment of potential geotechnical hazards associated with mountain permafrost in a warming global climate[J]. Permafrost Periglacial Process, 2001, 12: 145. DOI: 10.1002/ppp-376

[3] WU Qinbai, NIU Fujun. Permafrost changes and engineering stability in Qinghai-Xizang Plateau[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(10): 1079. DOI: 10.1007/s11434-012-5587-z

[4] ZHANG Zhilong, ZHANG Jianming, ZHANG Hu. Effects and mechanisms of ionic soil stabilizers on warm frozen soil[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2018, 43(10): 5657. DOI: 10.1007/s13369-018-3250-y

[5] ZHANG Zhilong, ZHANG Hu, ZHANG Jianming, et al. Effectiveness of ionic polymer soil stabilizers on warm frozen soil [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019, 23(7): 2867. DOI: 10.1007/s12205-019-0561-9

[6] YU Haolin, NA Xinlei, YANG Zhaohui. Characterization of frozen soil-cement mixture for berm construction in cold regions [J]. Sciences in Cold and Arid Regions, 2015, 7(4): 300. DOI: 10.3724/SP.J.1226.2015.00300

[7] CHAI Mingtang, ZHANG Jianming. Improvement of compressibility and thaw-settlement properties of warm and ice-rich frozen soil with cement and additives[J]. Materials, 2019, 12(7): 1068. DOI: 10.3390/ma12071068

[8] CHAI Mingtang, ZHANG Hu, ZHANG Jianming, et al. Effect of cement additives 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

[9] 孙杲辰, 张建明, 党迎生, 等. 高温冻土固化前后结构性变化对融化压缩特性影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(2): 17
SUN Gaochen, ZHANG Jianming, DANG Yingsheng, et al. Structural properties changes before and after solidification and their effects on melting and compression characteristics of high warm and frozen soil[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(2): 17. DOI: 10.11918/201810121

[10] SUN Gaochen, ZHANG Jianming, DANG Yingsheng, et al. Microstructure and strength features of warm and ice-rich frozen soil treated with high-performance cements [J]. Journal of Mountain Science, 2019, 16(6): 1470. DOI: 10.1007/s11629-018-5197-6

[11] 唐大雄. 工程岩土学[M]. 北京: 地质出版社, 1987
TANG Daxiong. Rock and soil engineering [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987

[12] 张克恭, 刘松玉. 土力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001
ZHANG Kegong, LIU Songyu. Soil mechanics[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2001

[13] CHEW S H, KAMRUZZAMAN A H M, LEE F H. Physicochemical and engineering behavior of cement treated clays [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(7): 696. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:7(696)

[14] GRUBB D G, CHRYSOCHOOU M, SMITH C J, et al. Stabilized dredged material. I: parametric study[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(8): 1011. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000254

[15] 艾凯明. 基于核磁共振的矿上充填料浆水分和孔隙演变研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014
AI Kaiming. NMR studies of water and pore evolution in mine backfill slurry[D]. Changsha: Central South University, 2014

[16] 程福周, 雷学文, 孟庆山. 基于核磁共振技术的疏浚淤泥固化土孔隙水含量及分布研究[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(10): 116
CHENG Fuzhou, LEI Xuewen, MENG Qingshan. Study on pore water content and distribution of based on NMR technology[J]. Journal of the Yangtze Academy of Science, 2016, 33(10): 116. DOI: 10.11988/ckyyb.20150689

[17] ZHU Wei, ZHANG Chunlei, CHIU A C F. Soil-water transfer mechanism for solidified dredged materials [J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(5): 588. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:5(588)

[18] CHIU C F, ZHU Wei, ZHANG Chunlei. Yielding and shear behavior of cement-treated dredged materials [J]. Engineering Geology, 2009, 103(1/2): 1. DOI: 10.1016/j.enggeo.2008.07.007

[19] 张春雷. 基于水分转化模型的淤泥固化机理研究[D]. 南京: 河海大学, 2007
ZHANG Chunlei. Study of dredged sediments solidification mechanism based on water transfer model[D]. Nanjing: Hohai University, 2007

[20] 李玉山. 测定土壤水势的离心机法[J]. 土壤, 1981(4): 25
LI Yushan. Centrifuge method for determining soil water potential [J]. Soil, 1981(4): 25

[21] 尚嫚廷, 冯杰, 刘佩贵, 等. SWCC 测定时吸力计算公式与最佳离心时间的探讨[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2009(1): 16
SHANG Manyan, FENG Jie, LIU Peigui, et al. On formulas for soil suction and optimum centrifugal time by use of SWCC[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2009(1): 16

[22] LEBEDEV A F. Soil and groundwaters [M]. [S. l.]: The Academy of Science of the USSR, 1936

[23] 甘雅雄, 朱伟, 吕一彦, 等. 从水分转化研究早强型材料固化淤泥的早强机理[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(4): 755
GAN Yaxiong, ZHU Wei, LÜ Yiyan, et al. Early-strength mechanism of cementitious additives from perspective of water conversion [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(4): 755. DOI: 10.11779/CJGE201604022

[24] PINTO C A, SANSALONE J J, CARTLEGDE F K, et al. Cement stabilization of runoff residuals: a study of stabilization/solidification of urban rainfall-runoff residuals in type 1 Portland cement by XRD and Si-29 NMR analysis[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2008, 188(1/2/3/4): 261. DOI: 10.1007/s11270-007-9542-6

(编辑 刘 彤)