

DOI:10.11918/202005140

盐沼泽区冻融作用下桥梁桩基腐蚀损伤模拟试验

冯忠居¹, 郭穗柱¹, 孟莹莹¹, 胡海波¹, 王富春¹, 徐占慧², 姚贤华^{1,3}, 刘宁²

(1. 长安大学 公路学院, 西安 710064; 2. 青海省公路科研勘测设计院, 西宁 810008;

3. 华北水利水电大学 土木与交通学院, 郑州 450011)

摘要: 为探究高寒盐沼泽区冻融循环作用下桥梁桩基的腐蚀损伤, 采用室内模拟试验, 模拟在养护冻融循环条件下不同桩基混凝土配合比与不同复合盐溶液体积浓度对桩基混凝土抗侵蚀性能的影响, 通过对桩基混凝土外观、质量、抗压强度、动弹性模量以及微观 SEM 测定的方法, 分析桩基础的腐蚀损伤机理。结果表明: 不同桩基混凝土配合比对桩基础的抗侵蚀性能有严重影响, 当在桩基混凝土中加入粉煤灰、硅灰和膨胀剂(配比Ⅲ)时, 其相对动弹性模量减小不到 10%, 抗侵蚀系数稳定大于 0.9, 质量损失小于 5%, 桩基混凝土表面只有轻微脱落现象, 能够提升桩基础抗侵蚀性能; 在不同体积浓度的复合盐溶液中浸泡, 桩基混凝土在冻融循环的条件下表现出不同程度的腐蚀情况, 体积浓度越大, 复合盐离子相互抑制作用越明显, 桩基混凝土腐蚀情况减弱, 当体积浓度达到 15.4% 时, 质量损失出现负增长。由微观 SEM 测试结果, 钙矾石、硅灰石膏、Friedel 盐是导致桩基混凝土腐蚀损伤的主要产物; 建议选用桩基础的设计年限折减系数为 0.6, 可防止冻融循环对基准体积浓度溶液腐蚀下的桩基础设计年限的不利影响。

关键词: 桥梁桩基; 高寒盐沼泽区; 冻融循环; 腐蚀损伤; 室内模拟试验; 相对动弹性模量

中图分类号: U44

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2021)09-0069-10

Simulation test on corrosion damage of bridge pile foundation in freeze-thaw area of salt swamp

FENG Zhongju¹, GUO Suizhu¹, MENG Yingying¹, HU Haibo¹, WANG Fuchun¹, XU Zhanhui², YAO Xianhua^{1,3}, LIU Ning²

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Qinghai Province Highway Research Survey and Design Institute, Xining 810008, China; 3. School of Civil Engineering and Communication, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450011, China)

Abstract: In order to investigate the corrosion damage of bridge pile foundation under the action of freeze-thaw cycles in alpine salt swamp areas, laboratory model test was conducted to simulate the effect of pile foundation concrete mixture ratio and compound salt solution concentration on the corrosion resistance of pile foundation concrete under the conditions of curing freeze-thaw cycles. The corrosion damage mechanism of pile foundation was analyzed by measuring the appearance, quality, compressive strength, dynamic elastic modulus, and SEM of the concrete. Results show that concrete mixture ratio had significant impact on the corrosion resistance of pile foundation. When fly ash, silica fume, and expansive agent (proportion III) were added to concrete, the relative dynamic elastic modulus was reduced by less than 10%. The anti-erosion coefficient was more than 0.9, the mass loss was less than 5%, and there was only a slight shedding on the concrete surface, which could improve the anti-erosion performance of the pile foundation. The compound salt solutions with different concentrations were prepared. The pile foundation concrete showed different degrees of corrosion under the conditions of freeze-thaw cycles, the higher the concentration was, the more obvious the mutual inhibition of compound salt ions was, and the corrosion of concrete was weakened. When the concentration reached 15.4%, the mass loss showed a negative growth. According to the SEM test results, ettringite, wollastonite gypsum, and Friedel's salt were the main products leading to the corrosion damage of pile foundation concrete structure. It is suggested that the reduction factor of the design life of pile foundation is 0.6, which can prevent the adverse effect of freeze-thaw cycle on the design life of pile foundation under the corrosion of reference concentration solution.

Keywords: bridge pile foundation; alpine salt swamp area; freeze-thaw cycle; corrosion damage; laboratory model test; relative dynamic elastic modulus

收稿日期: 2020-05-28

基金项目: 国家自然科学基金(51708040, 41272285);

青海省交通科技攻关项目(2014-07)

作者简介: 冯忠居(1965—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 郭穗柱, 1207075299@qq.com

青海省高寒盐沼泽区昼夜温差大, 桥梁桩基受冻融循环以及侵蚀性氯离子的影响较为显著。在冻融循环及侵蚀性氯离子的作用下, 桩的有效断面及弹性模量减小, 进而导致桩的抗弯能力降低, 从而使

桩基础自身强度出现一定程度的减弱,桥梁桩基承载能力大大降低。因此,研究高寒盐沼泽区冻融循环作用下的桥梁桩基损伤至关重要。

目前国内外学者通过理论分析、现场试验和室内模拟试验等多种手段对冻融环境下桥梁桩基础的损伤进行探讨。文献[1]对特殊地质条件下桩基础损伤后的承载特性进行深入研究;文献[2]在高寒盐渍土环境下,通过室内损伤试验结合灰色系统理论,分析掺合料对比对桩基混凝土抗侵蚀性能的影响,得到粉煤灰与硅灰掺和具有使抗侵蚀性提高的作用;文献[3-4]通过现场试验对比室内试验结果,揭示其内部腐蚀作用机理,得出可以预测桩基础混凝土耐久性的回归公式;文献[5]利用渗透试验和承载力性能试验对盐渍土的性能进行研究,其 CBR 值高达 120%,非盐渍土试块的 CBR 值为 28.6%;文献[6]进一步通过化学成分分析和微观试验的方法,得出桩基础在寒区受侵蚀过程中,桩基混凝土中 C 元素质量分数从 0 到 9.61% 的增长,使钙矾石等晶体剧增,导致桩身混凝土开裂;文献[7]对发生冻拔破坏的桩基础进行分析,得出季节冻融循环作用下的各土层桩侧摩阻力计算公式;文献[8]通过理论计算探讨了冻融过程中引起的混凝土的压力、应力和应变变化,得到掺气混凝土和无掺气混凝土的最大张应力均为 2.2 MPa;文献[9]结合中国冻土地区的年均冻融循环次数,进一步提出现场冻融循环次数的实用公式,从而对桥梁桩基础进行抗冻性寿命预测;文献[10]通过冻融循环试验对桩侧摩阻力变化进行分析,提出考虑温度影响因子的冻融土体中桩侧摩阻力计算模型;文献[11]通过室内冻融循环试验研究盐渍土的盐胀与冻融特性,结果表明含盐量对路基土冻胀、融沉和盐胀等变形过程有显著影响;文献[12]通过室内试验研究桩墩混凝土强度随冻融循环次数的衰变规律,得出桩墩混凝土强度指标的损伤本构关系;文献[13]研究了冻融循环条件下混凝土结构的弹性模量和黏结性能变化,结果表明,冻融循环会对混凝土内部结构造成破坏,并通过理论计算和试验数据的对比,得出应充分考虑冻融循环次数对混凝土性能的影响;文献[14]通过现场试验研究冻融循环及浸盐条件下对掺粉煤灰混凝土耐久性的影响,结果表明,在所有盐溶液体积浓度下,掺加 10% 和 20% 的粉煤灰均可提高冻融耐久性;文献[15-16]利用模型试验模拟寒区实际环境下的桩基混凝土冻融过程,监测桩与桩周土的变形规律,得出桩基础在冻融过程中最大变形达到 8 mm,土体最大变形为 1.9 mm,同时当冻融次数不断增加时,其相对变形经历剧增、缓增、平稳 3 个阶段。

虽然现阶段国内外对于冻融条件下的桩基础损伤进行了大量的研究^[17-23],但是高寒盐沼泽区域冻融循环对桥梁桩基混凝土的损伤情况至今鲜有报道。因此,本文依托德香高速公路工程,在考虑青海地区季节性冻土土层的条件下,利用室内试验探究不同工况下的桩基础损伤状况,旨在为桩基础设计和施工提供优化措施。

1 工程概况

试验依托德香高速公路 K62+100—K67+500 段,其桥涵基础所处强盐沼泽区域,如图 1 所示,此区段昼夜温差为 12~30 ℃,极端最低气温达到了 -27.2 ℃,所在区域极易形成矿化度达 100~200 g/L 的盐卤水,桥梁桩基受冻融循环以及侵蚀性氯离子的影响较为显著,使桥梁桩基产生严重的腐蚀损伤。基于现场勘查,如图 2 所示,考虑冻结线以下至桩底部分为冻融循环区域。本试验模拟冻融循环条件下不同体积浓度的盐溶液侵蚀不同配合比的桩基混凝土。通过观察试验前后桩基混凝土的剥落情况,得出桩基混凝土的损伤程度;利用电子天平确定桩基混凝土质量变化规律;通过混凝土动弹性模量测定仪确定试验过程中桩基混凝土相对动弹性模量的变化规律;并利用万能试验机确定冻融循环前后桩基混凝土抗压强度的变化规律,从而确定其抗侵蚀系数;利用扫描电镜与能谱分析仪分析其微观腐蚀机理;最后,通过冻融循环试验过程中相对动弹性模量的变化规律,得到桩基混凝土相对动弹性模量与冻融时间的关系式,在此基础上,得出高寒盐沼泽区冻融循环作用下桩基础设计年限的折减系数,为桩基础设计提供参考。



(a) 桩基整体



(b) 桩基局部

图 1 桥梁跨越区段

Fig.1 Bridge spanning section

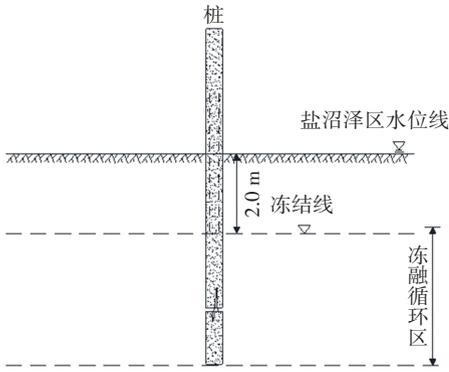


图2 冻融循环区域

Fig.2 Area of freeze-thaw cycles

2 试验方法

2.1 桥梁桩基混凝土材料及配合比设计

本试验所用水泥材料为普通硅酸盐水泥; II 级粉煤灰的需水量为 101%, 掺量(质量分数)为 20%; 艾肯 94 级硅灰, 比表面积为 20 000 m²/kg, 平均粒径为 0.2 μm, 密度为 2 230 kg/m³, 掺量为 5.0%; 其他掺合料有缓凝高效引气型减水剂、膨胀剂、自愈合防水材料。依托工程桥涵基础采用 C30 混凝土, 依据盐沼泽区特殊气候特点, 根据混凝土配制要求得到初步配合比, 经过室内强度试验验算后得出最终配合比, 本试验共配制了 5 种配合比的桩基础混凝土, 见表 1。表中分别为 1 m³ 混凝土所需的材料用量, 水灰比 W/B 均为 0.39。

表 1 1 m³ C30 混凝土的材料用量

Tab. 1 Material consumption of 1 m³ C30 concrete

编号	水泥	砂子	碎石	水	减水剂	粉煤灰	硅灰	矿渣	膨胀剂	水泥基
I	327	767	1 103	170	6.54	87.25	21.8	—	—	—
II	327	767	1 103	170	6.54	87.25	—	87.25	—	—
III	326.95	767	1 103	170	6.54	87.25	21.8	—	43.5	—
IV	348.75	767	1 103	170	6.54	87.25	21.8	—	—	6.55
V	436	767	1 103	170	5.23	—	—	—	—	—

2.2 复合盐体积浓度及试验工况设计

现场配制的水样中离子含量具体见表 2, 以表 2 中的易溶盐含量为参考, 选用体积浓度为 3.4% 的溶液作为基准侵蚀溶液, 基于此, 配制不同质量浓度的盐溶液组 A、B、C, 各组复合盐侵蚀溶液中的易溶盐用量及溶液体积浓度见表 3。

表 2 水中易溶氯离子含量

Tab.2 Content of soluble salt ions in water

水体	易溶盐离子质量浓度/(g · L ⁻¹)			pH
	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	
地下水	0.65	0.39	20.77	7.0
地表水	0.72	0.45	8.50	7.0

表 3 试验用复合盐侵蚀溶液中盐的用量及溶液体积浓度

Tab.3 Salt dosage and solution concentration in erosion solution of compound salt in test

溶液组别	盐类型及用量/(g · L ⁻¹)			溶液体积浓度/%	备注
	Na ₂ SO ₄	NaCl	NaHCO ₃		
A	3.55	31.01	0.54	3.4	基准体积浓度
B	10.65	93.03	1.62	9.7	3 倍于 A 组中盐的用量
C	17.75	155.05	2.70	15.4	5 倍于 A 组中盐的用量

为模拟桥涵下部结构的现场实际环境, 选取在养护冻融条件下 A、B、C 三组复合盐体积浓度与 I、II、III、IV、V 五组不同桩基混凝土配合比所对应的

组合工况进行分析。

2.3 桥梁桩基混凝土试件的制作与试验制度

2.3.1 桩基础混凝土试件制作

试件共采用两种规格, 一种为 100 mm × 100 mm × 100 mm 的立方体试件, 另一种为 100 mm × 100 mm × 400 mm 棱柱体试件。立方体试件用于微观扫描电镜试验和桩基混凝土抗压强度的测定, 而棱柱体试件则用于测定桩基混凝土的质量损失和动弹性模量变化。试件通过自然养护 24 h 成型后拆模, 将成型试件移入 20 °C、相对湿度大于 95% 的养护室内进行养护, 养护 28 d 后进行后续试验, 如图 3 所示。



(a) 试件成型

(b) 拆模后试件

图 3 桩基混凝土试件成型

Fig.3 Pile foundation concrete specimen forming

2.3.2 试验制度

室内养护冻融循环的试验制度具体如下: 将两种尺寸的桩基混凝土试件在标准养护的环境下养护 24 d 后, 再利用全浸泡方法, 使试件表面低于液面

2 cm, 浸入 4 d 后, 在冻融试验机中进行冻融循环试验(一次冻融循环为冰冻 2 h, 融化 2 h, 且温度分别控制在 $-15\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, $6\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$), 如图 4、5 所示。每 25 次冻融循环结束后, 先测定桩基混凝土试件的质量损失和动弹性模量变化, 得出循环前后的桩基混凝土质量损失率与相对动弹性模量变化。取出一组桩基混凝土试块进行抗压强度试验, 并选取桩基混凝土质量损失较大的试件做扫描电镜试验。



图 4 快速冻融试验机

Fig.4 Rapid freeze-thaw testing machine



图 5 浸泡在侵蚀溶液中的桩基混凝土试件

Fig.5 Concrete specimens of pile foundation immersed in erosion solution

2.4 试验检测指标

根据《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082—2009^[24] 的规定, 以桩基混凝土的质量变化作为其物理性能的检测指标, 以动弹性模量的变化作为桩基混凝土宏观力学性能的检测指标。结合抗侵蚀系数变化和微观机理准确地评价桩基混凝土的性能变化。

2.4.1 桩基混凝土质量的测定

用精度为 0.1 g 的电子天平称得桩基混凝土的质量, 当桩基混凝土试件的质量损失率 ΔW_n 达到 5% 时终止试验。严格控制每组试验完成后桩基混凝土质量测定的时间, 避免测定间隔时间不同对试验结果的影响。

$$\Delta W_n = \frac{G_n - G_0}{G_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: G_0 为试件的初始质量, kg; G_n 为试验结束后的试件质量, kg。

2.4.2 桩基混凝土抗压强度的测定

如图 6 所示, 利用电液伺服万能试验机记录试

件的抗压强度值, 试块的抗侵蚀性能用桩基混凝土抗压侵蚀系数表示。



图 6 电液伺服万能试验机

Fig.6 Electro-hydraulic servo universal testing machine

抗侵蚀系数计算公式为

$$K_c = R_c / R_s \quad (2)$$

式中: K_c 为试块的抗侵蚀系数; R_c 为试块浸泡在侵蚀溶液中一定周期时的抗压强度, MPa; R_s 为试块在相同周期内未经侵蚀溶液浸泡的抗压强度, MPa。

2.4.3 桩基混凝土动弹性模量的测定

如图 7 所示, 用桩基混凝土动弹性模量测定仪检测桩基混凝土的动弹性模量变化可以衡量桩基混凝土力学性能的变化情况。



图 7 混凝土动弹模测定仪

Fig.7 Concrete dynamic elastic modulus tester

E_r 为冻融循环后试件的相对动弹性模量, 其相对动弹性模量下降为初始时的 40% 时, 认为试件已破坏, 终止试验。相对动弹性模量计算公式为

$$E_r = \frac{E_n}{E_0} = \left(\frac{f_n}{f_0} \right)^2 \quad (3)$$

式中: E_r 为相对动弹性模量; E_0 、 f_0 分别为桩基混凝土的初始动弹性模量和频率; E_n 、 f_n 分别为 n 次冻融循环后的桩基混凝土动弹性模量和频率。

2.4.4 微观 SEM 测试

选取典型试件采用微观扫描电镜 SEM 进行测试, 了解桩基混凝土受侵蚀后内部结构的变化, 并用能谱分析仪 EDS 分析其化学元素组成。

3 试验结果与分析

3.1 外观变化特征分析

如图 8 所示, 在 A 组溶液中养护冻融循环 150 次

后的桩基混凝土表面出现了不同程度的损伤。配比Ⅱ的桩基混凝土试块损伤情况最为严重,从其外观变化来看,出现大面积掉块,致使桩基混凝土内部石子外露;其次是配比Ⅳ的桩基混凝土试块,其表面发生大面积的混凝土脱落现象;而未加任何添加剂的基准混凝土的情况比前两者要好,试块表面只发生小面积的脱落现象,整体较完整;配比Ⅲ的桩基混凝土试块表面损伤情况最轻,说明在混凝土中添加适量膨胀剂会有明显的抗侵蚀作用。



图8 桩基混凝土试块在A组溶液中养护冻融循环150次后的损伤情况

Fig.8 Damages of pile foundation concrete specimens after 150 cycles of freeze-thaw curing in solution group A

浸泡溶液的体积浓度也对试块的损伤程度有明显的影响,体积浓度越大,试块表面的损伤程度越轻,如图9所示,与B、C溶液相比,在A组溶液养护条件下的桩基混凝土试块边角部位有少量混凝土脱落,其他部分保持原状,基本完整。说明溶液体积浓度的增加会适当提高桩基混凝土试块的抗侵蚀强度。

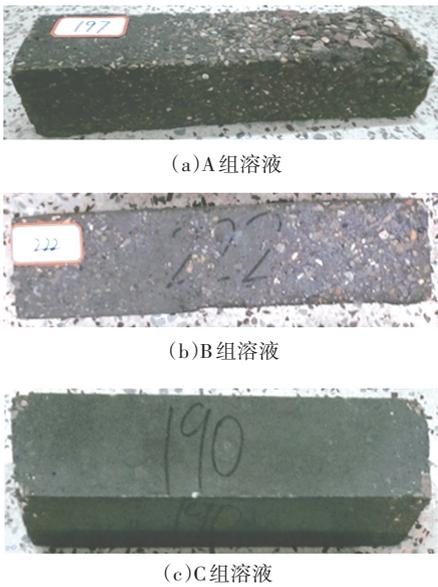


图9 配比Ⅱ的桩基混凝土试件在不同体积浓度溶液中养护冻融循环150次后的损伤情况

Fig.9 Damages of pile foundation concrete specimens with proportion II after 150 cycles of freeze-thaw curing in solutions at different concentrations

3.2 质量变化分析

如图10所示,桩基混凝土试块的质量损失率与侵蚀-冻融循环的次数呈正比例关系,桩基混凝土的质量损失与混凝土的配比和侵蚀溶液的体积浓度也有明显关系。当溶液体积浓度为基准溶液体积浓度时,不同配比的桩基混凝土质量损失表现不同,配比Ⅱ和配比Ⅳ的桩基混凝土质量损失较大,其质量损失率达到5%,远大于基准混凝土的质量损失,而其他配比的混凝土质量损失率均小于5%。不同配比混凝土的质量变化规律与外观变化规律相同,由此得出,桩基混凝土中掺入粉煤灰和矿渣不能提高抗侵蚀性,反而加速桩基混凝土的侵蚀。

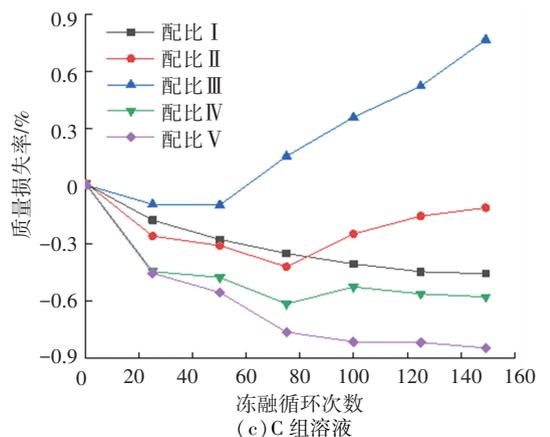
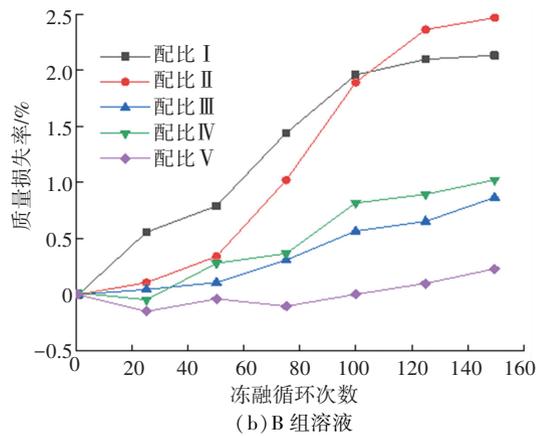
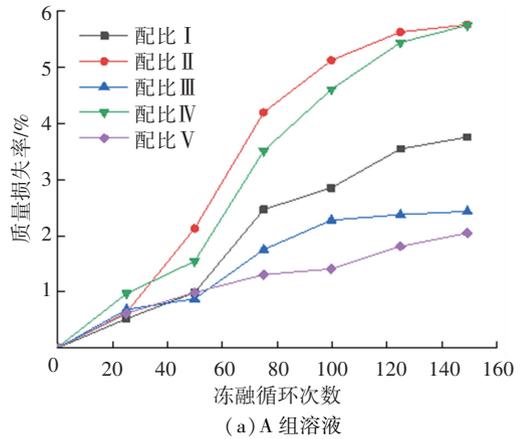


图10 冻融循环过程中桩基混凝土质量损失率的变化规律
Fig.10 Variation of mass loss rate of pile foundation concrete during freeze-thaw cycles

桩基混凝土的质量损失率随侵蚀溶液体积浓度的增大而逐渐减小,甚至出现负增长的变化规律(C组侵蚀溶液)。这是由于溶液体积浓度的增加使 SO_4^{2-} 离子大量侵入桩基混凝土内部,在其结晶膨胀后堵塞桩基混凝土材料内部的通道,使得对桩基混凝土有侵蚀作用的 Cl^- 等离子难以侵入,从而减轻桩基混凝土的腐蚀损伤;此外,盐溶液体积浓度的增加可以降低水的冰点从而减弱桩基混凝土的损伤。

3.3 相对动弹性模量变化分析

如图 11 所示,桩基混凝土的相对动弹性模量与侵蚀-冻融循环次数呈反比例关系。当基准溶液体积浓度作为侵蚀溶液的体积浓度进行养护时,配比 II 的混凝土和配比 IV 的桩基混凝土相对动弹性模量下降速率较大,且都超过了配比 V 桩基混凝土的下降速率,并且这一规律与桩基混凝土质量损失率变化规律保持一致。配比 III 的桩基混凝土相对动弹性模量随冻融循环次数的增加先小规模增大,之后逐渐减小至 90% 左右,其桩基混凝土相对动弹性模量的下降速率小于其他配比的桩基混凝土相对动弹性模量下降速率,这是由于配比 III 的桩基混凝土中掺入适量膨胀剂可以填充桩基混凝土内部空隙,提高了其密实性,因此桩基混凝土的强度增大,抗侵蚀性提高。这说明在桩基混凝土中加入适合的掺合料可以明显提高桩基混凝土的抗侵蚀性能。

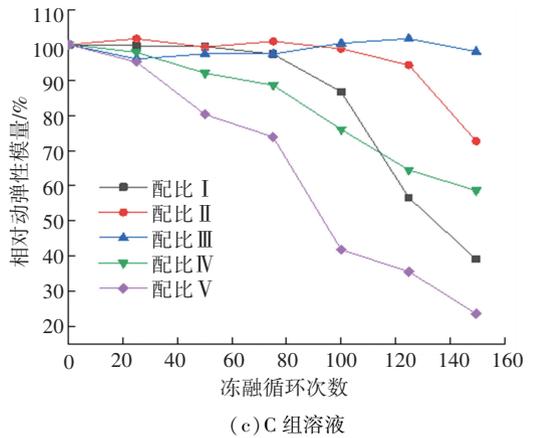
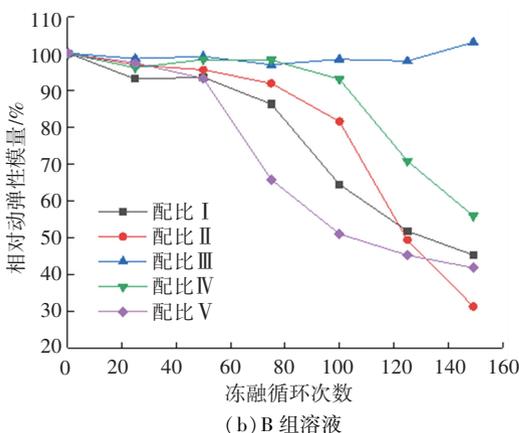
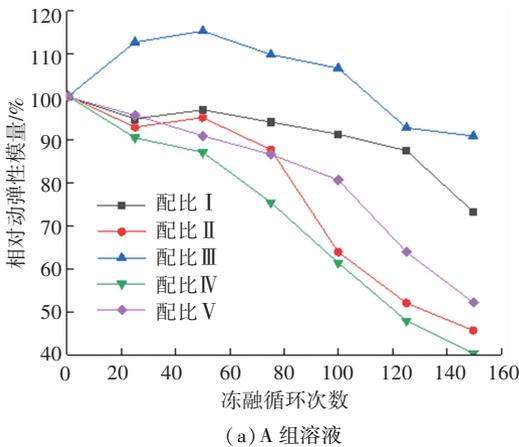


图 11 冻融循环作用时桩基混凝土相对动弹性模量变化规律

Fig.11 Variation of relative dynamic elastic modulus of pile concrete during freeze-thaw cycles

3.4 抗侵蚀系数变化分析

如图 12 所示,在桩基混凝土经养护冻融循环试验后,其抗侵蚀系数随循环次数的增加呈现先增加后减小的变化规律。当侵蚀溶液为基准溶液时,不同配合比的桩基混凝土其抗侵蚀系数的变化规律也不同,配比 II 和配比 V 的桩基混凝土(基准混凝土)抗侵蚀系数下降较快,桩基混凝土抗侵蚀系数由最初的 1.0 下降到 0.4,下降幅度达到了 60%。配比 III 的桩基混凝土仍然表现出很好的抗侵蚀能力,桩基混凝土抗侵蚀系数到试验终止时仍然在 0.85 以上,这说明侵蚀溶液体积浓度的增大可以增强桩基混凝土的抗侵蚀性能。如图 12 所示,随着侵蚀溶液体积浓度的增大,桩基混凝土抗侵蚀系数具有明显增加的变化趋势,特别是配比 II 的桩基混凝土, A 组侵蚀溶液养护条件下其桩基混凝土抗侵蚀系数为 0.4,而 C 组溶液养护条件下其抗侵蚀系数增加到 0.71,再次说明侵蚀溶液的体积浓度增加可以提高桩基混凝土的抗侵蚀性能。

从桩基混凝土抗侵蚀系数来看,各配比桩基混凝土抗侵蚀能力由大到小顺序为配比 III、配比 I、配比 IV、配比 II、配比 V(基准混凝土)。

3.5 微观机理分析

为研究桩基混凝土在侵蚀溶液环境下腐蚀损伤的微观机理,选取配比 II、配比 III 和配比 V 的桩基混凝土在 A 组溶液中养护冻融 150 次,并通过电镜扫描测试,对比分析不同配比的桩基混凝土的微观结构和化学成分,如图 13~15 所示。

3.5.1 配比 II 的桩基混凝土微观结构

电镜扫描结果如图 16(a) 所示,桩基混凝土内部呈现针状与棒状相互交织的松散结构,并不是桩基混凝土标准的晶体状结构。对图 16(a) 中的方框

区域进行化学成分分析,结果如图 13 所示,桩基混凝土中出现大量的 C、S 等元素,由此可知桩基混凝土受到了盐溶液的侵蚀作用。化学成分分析显示 Ca、O 和 C 元素质量分数较大,并且方框区域中有块状物质,块状物质是桩基混凝土水化产物之一 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和侵蚀溶液中 HCO_3^- 离子反应产生的方解石 CaCO_3 , CaCO_3 可以填充混凝土中的空隙,从而在一定程度上能提高桩基混凝土的强度。但是当膨胀性产物(钙矾石)膨胀后混凝土空隙不能提供更大的空间时,就会导致裂缝的产生,并且随着膨胀性产物(钙矾石)的增多,裂缝将不断增加,甚至出现桩基混凝土溃散。

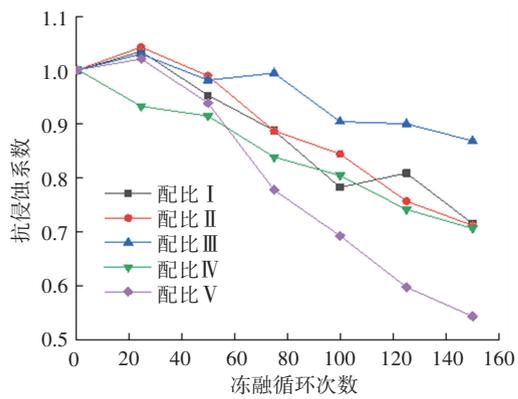
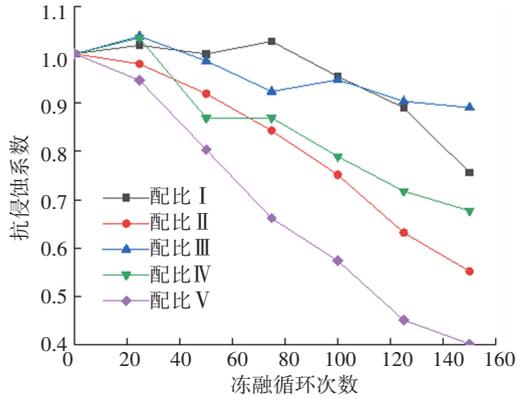
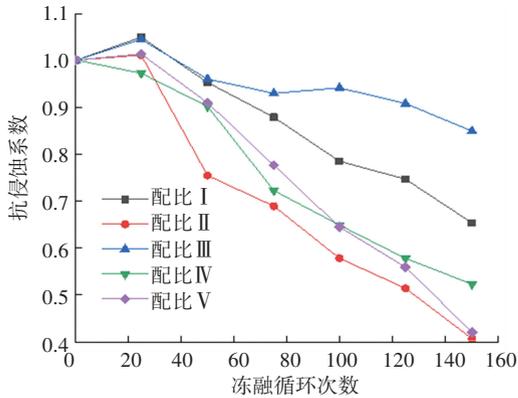


图 12 冻融循环作用时桩基混凝土抗侵蚀系数变化规律

Fig.12 Variation of anti-erosion coefficient of pile foundation concrete under freeze-thaw cycles

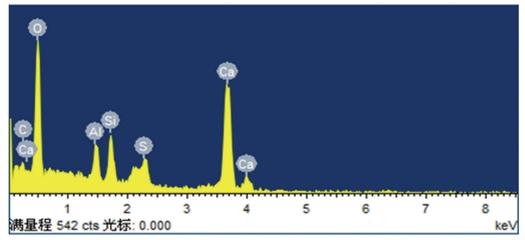


图 13 配比 II 的复合盐混凝土矩形区域的能谱图与化学成分分析

Fig.13 Energy spectrum and chemical composition analysis of compound salt concrete rectangular region with proportion II

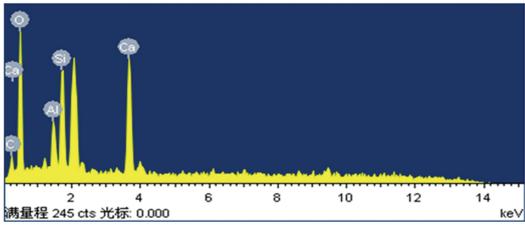


图 14 配比 III 的复合盐混凝土矩形区域的能谱图与化学成分分析

Fig.14 Energy spectrum and chemical composition analysis of compound salt concrete rectangular region with proportion III

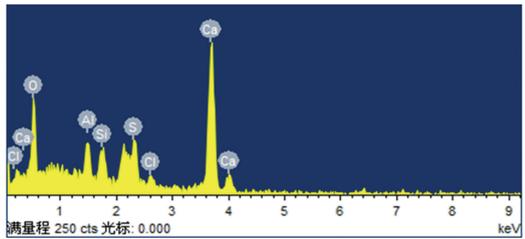


图 15 配比 V 的复合盐混凝土矩形区域的能谱图与化学成分分析

Fig.15 Energy spectrum and chemical composition analysis of compound salt concrete rectangular region with proportion V

3.5.2 配比 II 的桩基混凝土微观结构

如图 14 所示,配比 III 的桩基混凝土在复合盐 A 组溶液浸泡冻融循环 150 次后,C、O、Al、Si、Ca 等元素存在,Ca(21.5%)、O(57.18%)、Si(10.76%)和 C(6.29%)元素质量分数占比较大,形成 CaCO_3 和 C-S-H,桩基础混凝土内部空隙通道被以上腐蚀产物填充,其内部更加密实。说明配比 III 的桩基混凝土内部更为密实,外部侵蚀性离子相对其他桩基础混凝土配比出现较少,从而提高了混凝土的抗侵蚀性能。

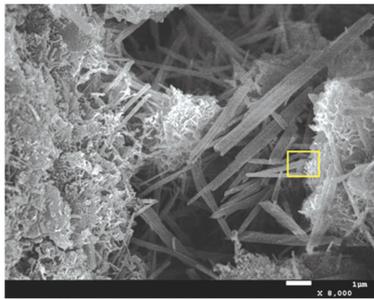
3.5.3 配比 V(基准混凝土)的桩基混凝土微观结构

电镜扫描结果如图 16(b)所示,与配比 II 的桩基混凝土相比,配比 V 内部出现大量絮状产物,内部

空隙更大,结构更加松散,受侵蚀情况更加严重。对图中方框区域进行能与化学成分分析,如图 15 所示,桩基混凝土中出现有 SO_4^{2-} 离子,还有 Cl^- 离子侵蚀。可以判断,针状和棒状物产物是桩基混凝土受侵蚀后的产物,即钙矾石或 Friedel 盐,其化学分子式为 $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl \cdot 10H_2O$ 。



(a) 配比 II



(b) 配比 V

图 16 养护冻融循环 150 次后混凝土 SEM 图

Fig.16 SEM images of concrete after 150 cycles of freeze-thaw curing in solution group A

3.6 讨论

通过对高寒盐沼泽冻融循环区域条件下的桩基混凝土试块进行宏观特征和微观机理的分析,可以得出位于高寒盐沼泽区的桥梁桩基在冻融循环的外部侵蚀环境作用下的主要破坏特征,进而提出相应的优化解决措施如下:

1) 由试块外观特征和质量变化分析,可以得出不同桩基混凝土配比对其腐蚀现象有明显影响,建议在现场桩基础施工时,桩基混凝土中掺入适量粉煤灰、硅灰以及膨胀剂,可有效地防止桩基础表层混凝土脱落;建议位于高寒盐沼泽区的桥梁桩基选用配比 III 的桩基混凝土进行相关设计与施工。

2) 文献[9]表明,青海省年均冻融循环次数为 110 次,在青海省冻融环境的前提下,等效室内年均冻融循环次数为 10 次。本试验在基准溶液中进行 150 次养护冻融循环,因此,试验模拟并得到了冻融循环 15 a 内的桩基混凝土弹性模量的变化情况。选用配比 III 的桩基混凝土对位于冻融循环区的桩基础进行设计年限分析,如图 17 所示。由图 18 可知,在冻融循环的作用下,桩基混凝土的相对动弹性模

量随时间增加呈现逐渐减小的趋势,经线性拟合,得到弹性模量与冻融时间的关系为

$$y = (-1.1x + 112.3)/100 \quad (4)$$

式中: x 为冻融时间, a ; y 为桩基混凝土的相对动弹性模量。

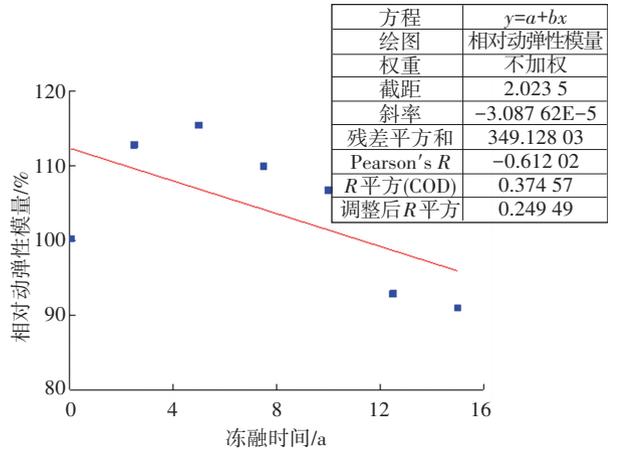


图 17 不同冻融时间下弹性模量变化线性拟合

Fig.17 Linear fitting of elastic modulus under different freeze-thaw periods

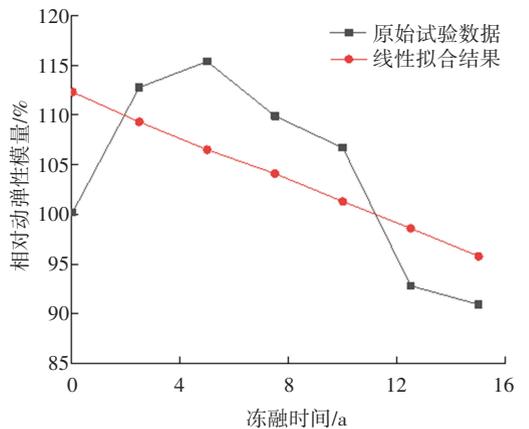


图 18 线性拟合与试验数据对比

Fig.18 Comparison between linear fitting and test data

由图 19 可知,冻融循环开始后,该线性拟合误差在 10% 以内,拟合效果较好,可以用拟合结果进行以下分析。位于冻融条件下桩基混凝土结构的设计年限为 50 a^[25],由式(4)可求得在冻融循环条件下 50 a 时的桩基混凝土相对动弹性模量为 57.3%。因此,在桩基设计时应充分考虑冻融循环对桩基础混凝土结构设计年限的不利影响,建议选用桩基础设计年限的折减系数为 0.6 进行设计与施工。

3) 试块的抗侵蚀系数并不是随着复合盐溶液体积浓度的增加而减小,低体积浓度(3.4%)时反而对试块的侵蚀现象更加严重。因此,位于盐沼泽区的桥梁桩基础,要充分考虑低体积浓度复合盐对桩基础的侵蚀破坏,必要时采取换填基础土体,并采用设置隔离层的方式对桩基础进行隔离防腐。

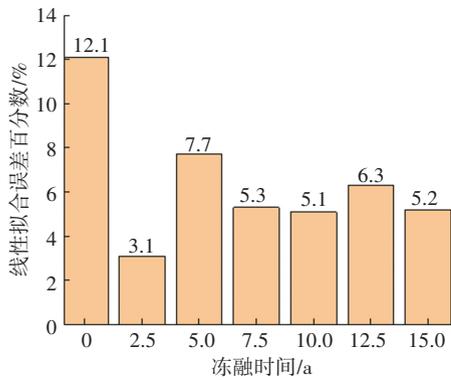


图19 线性拟合误差百分数

Fig.19 Percentage of linear fitting error

4 结论

1)不同掺合料配合比对桩基混凝土耐久性影响差异较大。桩基混凝土中加入粉煤灰、硅灰和膨胀剂(配比Ⅲ)时,在养护冻融循环条件下,其相对动弹性模量减小值小于10%,抗侵蚀系数稳定大于0.9,桩基混凝土表面只有轻微脱落现象。配比Ⅲ的桩基混凝土具有强抗侵蚀性。

2)侵蚀溶液的体积浓度对桩基混凝土的腐蚀程度有显著影响。桩基混凝土质量损失率和相对动弹性模量与溶液体积浓度呈现负相关关系,抗侵蚀系数与溶液体积浓度呈正相关关系,甚至当溶液体积浓度达到15.4%时,桩基混凝土质量损失率出现负值。说明随着溶液体积浓度的增大,由于各种离子相互作用,减轻了对桩基混凝土的侵蚀。

3)由微观结构分析可知,养护冻融循环作用下,桩基混凝土在受侵蚀后含有Cl、S等元素,表明腐蚀产物中存在钙矾石、硅灰石膏、Friedel盐,这些产物共存并互相作用使桩基混凝土发生腐蚀破坏。

4)由基准溶液养护的桩基混凝土试块在冻融循环条件下的试验检测指标,可以反映出位于青海省冻融循环区桥梁桩基础的力学性能损伤规律。由桩基混凝土弹性模量随冻融时间的变化关系,建议在青海省冻融循环区的桩基础设计年限的折减系数为0.6。

参考文献

[1] 冯忠居. 特殊地区基础工程[M]. 北京:人民交通出版社, 2008
FENG Zhongju. Infrastructure projects in special areas [M]. Beijing: People's Communications Publishing House, 2008

[2] 冯忠居, 陈思晓, 徐浩, 等. 基于灰色系统理论的高寒盐沼泽区混凝土耐久性评估[J]. 交通运输工程学报, 2018, 18(6): 18
FENG Zhongju, CHEN Sixiao, XU Hao, et al. Durability assessment of concrete in alpine salt marshes based on grey system theory [J]. Journal of Transportation Engineering, 2018, 18(6): 18

[3] 姚贤华, 冯忠居, 王富春, 等. 盐沼泽环境下公路桥梁桩基材料

耐腐蚀试验[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2018, 38(1): 49

YAO Xianhua, FENG Zhongju, WANG Fuchun, et al. Corrosion resistance test of highway bridge pile foundation materials in salt marsh environment [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2018, 38(1): 49

[4] 姚贤华, 冯忠居, 王富春, 等. 复合盐浸下多元外掺剂-混凝土抗干湿-冻融循环性能[J]. 复合材料学报, 2018, 35(3): 690
YAO Xianhua, FENG Zhongju, WANG Fuchun, et al. Property of multiple admixture-concrete in multi-salt soaking under wetting-drying and freezing-thawing cycles [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(3): 690

[5] 乌延玲, 冯忠居, 王廷武, 等. 极度干旱区板块状盐渍土路用性能试验[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2011, 31(1): 31
WU Yanling, FENG Zhongju, WANG Tingwu, et al. Road performance test of plate-like saline soil in extremely arid area [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2011, 31: 31

[6] 冯忠居, 胡海波, 王富春, 等. 高海拔强盐沼泽区桥梁桩基损伤现场模拟试验[J]. 交通运输工程学报, 2019, 19(3): 46
FENG Zhongju, HU Haibo, WANG Fuchun, et al. Field simulation test of bridge pile foundation damage in high altitude high-salt marshes area [J]. Journal of Transportation Engineering, 2019, 19(3): 46

[7] 王若林, 朱道佩, 刘小燕, 等. 寒区冻土层退化条件下桩基稳定性劣化评价方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(9): 3148
WANG Ruolin, ZHU Daopei, LIU Xiaoyan, et al. Evaluation method of pile foundation stability deterioration under the condition of permafrost degradation in cold region [J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2016, 47(9): 3148

[8] VESA P, FAHIM A N. Stress and strain state of concrete during freezing and thawing cycles [J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32: 1407

[9] 武海荣, 金伟良, 延永东, 等. 混凝土冻融环境区划与抗冻性寿命预测[J]. 浙江大学学报(工学版), 2012, 46(4): 650
WU Hairong, JIN Weiliang, YAN Yongdong, et al. Freeze-thaw environmental zoning and frost resistance life prediction of concrete [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Edition), 2012, 46(4): 650

[10] 张向东, 柴源, 刘佳琦, 等. 冻融条件下桩基侧摩阻力模型试验研究[J]. 公路交通科技, 2015, 32(4): 45
ZHANG Xiangdong, CHAI Yuan, LIU Jiaqi, et al. Model experimental study on pile foundation lateral friction under freeze-thaw condition [J]. Highway Traffic Science and Technology, 2015, 32(4): 45

[11] 李国玉, 喻文兵, 马巍, 等. 甘肃省公路沿线典型地段含盐量对冻胀盐胀特性影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(8): 2276
LI Guoyu, YU Wenbing, MA Wei, et al. Experimental study of characteristics of frost and salt heaves of saline highway foundation soils in seasonally frozen regions in Gansu Province [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(8): 2276

[12] 贾超, 纪圣振, 张峰. 冻融作用对混凝土跨海大桥桥墩稳定性影响研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2010, 42(3): 7
JIA Chao, JI Shengzhen, ZHANG Feng. Study on the stability of concrete bay bridge pier under freeze-thaw action [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2010, 42(3): 7

- [13] PETERSEN L, LOHAUS L, POLAK M A. Influence of freezing-and-thawing damage on behavior of reinforced concrete elements[J]. *ACI Materials Journal*, 2007, 104(4):369
- [14] ANDERSON I, DEWOOLKAR M M. Laboratory freezing-and-thawing durability of fly ash pervious concrete in a simulated field environment[J]. *ACI Materials Journal*, 2015, 112(5):603
- [15] 史向阳, 张泽, 李东庆, 等. 锥柱式桩基础明挖基坑回填土回冻过程模型试验研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2018, 45(7): 125
SHI Xiangyang, ZHANG Ze, LI Dongqing, et al. Model test study on refreezing process of backfill in cone-cylindrical pile foundation pit[J]. *Journal of Hunan University (Natural Science Edition)*, 2018, 45(7): 125
- [16] 史向阳, 张泽, 李东庆, 等. 冻融循环作用下锥柱式桩基础水热及变形动态变化规律研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(增刊1): 3092
SHI Xiangyang, ZHANG Ze, LI Dongqing, et al. Research on dynamic variation of moisture, temperature and deformation of cone-cylindrical pile under freeze-thaw cycles[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(S1): 3092
- [17] 杨进财, 巩丽丽, 王旭, 等. 多次冻融循环人工盐渍土路基模型试验研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2020, 40(6): 1001
YANG Jincai, GONG Lili, WANG Xu, et al. Experimental study on multiple freeze-thaw cycles of artificial saline soil subgrade[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2020, 40(6): 1001
- [18] 王富春, 姚贤华, 冯忠居, 等. 盐沼泽腐蚀对公路桥梁桩基础竖向极限承载力影响的数值模拟研究[J]. *公路*, 2017, 62(1): 60
WANG Fuchun, YAO Xianhua, FENG Zhongju, et al. Numerical simulation study on the influence of salt marsh corrosion on the vertical ultimate bearing capacity of highway bridge pile foundation[J]. *Highway*, 2017, 62(1): 60
- [19] 李丽, 张坤, 张青龙, 等. 干湿和冻融循环作用下黄土强度劣化特性试验研究[J]. *冰川冻土*, 2016, 38(4): 1142
LI Li, ZHANG Kun, ZHANG Qinglong, et al. Experimental study on strength deterioration characteristics of loess under dry-wet and freeze-thaw cycles[J]. *Glacial Permafrost*, 2016, 38(4): 1142
- [20] 吴亚平, 王海新, 王宁, 等. 冻土桩基极限承载力试验方法[J]. *中国公路学报*, 2018, 31(1): 38
WU Yaping, WANG Haixin, WANG Ning, et al. Test method for ultimate bearing capacity of permafrost pile foundation[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2018, 31(1): 38
- [21] 王海新, 吴亚平, 孙安元, 等. 循环荷载下冻土桩基力学特性研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2017, 14(10): 2111
WANG Haixin, WU Yaping, SUN Anyuan, et al. Research on mechanical properties of permafrost pile foundation under cyclic load[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2017, 14(10): 2111
- [22] CROWTHER G S. Frozen soil strength criteria for lateral pile analysis[J]. *Journal of Cold Regions Engineering*, 2013, 27(3):155
- [23] YANG Z H, LI Q, HORAZDOVSKY J, et al. Performance and design of laterally loaded piles in frozen ground[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2016, 143(5): 06016031
- [24] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准: GB/T 50082—2009[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009
Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Standard for test methods of long-term performance and durability of ordinary concrete: GB/T 50082—2009[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009
- [25] 李金玉. 冻融环境下混凝土结构的耐久性设计与施工[C]//混凝土结构耐久性设计与施工论文集.北京:中国土木工程学会, 2004
LI Jinyu. Durability design and construction of concrete structure in freeze-thaw environment[C]//Proceedings on Durability Design and Construction of Concrete Structures. Beijing: Chinese Civil Engineering Society, 2004

(编辑 魏希柱)