

文章编号:1673-9469(2020)04-0052-05

DOI: 10.3969/j.issn.1673-9469.2020.04.009

自密实水泥土拼宽路堤沉降与稳定性研究

叶至韬^{1,2},高玉峰^{1,2},王昕远³,周云东^{1,2*}

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室,江苏 南京 210098;2. 河海大学 岩土工程科学研究所,江苏 南京 210098;3. 江苏纬信工程咨询有限公司,江苏 南京 210014)

摘要: 以某路堤拼宽工程为例,探讨自密实水泥土作为新路堤填料的可行性,基于以开挖弃土为原料土的室内试验实测数据,采用Plaxis2D软件进行新老路堤沉降、差异沉降的数值模拟,并分析路堤边坡稳定性。分析考虑了新路堤坡率、是否铺设土工格栅对其的影响。结果表明:自密实水泥土填料能够有效控制路堤沉降和不均匀沉降,铺设土工格栅能够减小新老路堤的不均匀沉降并显著提高路堤稳定性,自密实水泥土在路堤拼宽工程中有良好的适用性。

关键词: 自密实水泥土;路堤拼宽;坡率;土工格栅;Plaxis2D

中图分类号: TU44

文献标识码: A

Settlement and Stability Analysis of Embankment Widening Using Self-compacting Cement Soil

YE Zhitao^{1,2}, GAO Yufeng^{1,2}, WANG Xinyuan³, ZHOU Yundong^{1,2*}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;

2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;

3. Jiangsu Weixin Engineering Consultants Ltd, Nanjing, Jiangsu 210014, China)

Abstract: Taking an embankment widening project as an example, the feasibility of self-compacting cement soil as the filling material of a new embankment was discussed in this paper. Based on the lab test data of excavated soil, numerical investigations on the settlement and differential settlement of the new and old embankments were carried out using the software Plaxis2D, and the stability of embankment slope was also analyzed. The influence of the new embankment slope ratio and geogrid laying was considered in the analysis. The results indicate that as the filling material of a new embankment, the self-compacting cement soil can effectively control the settlement and differential settlement, and laying geogrid can reduce differential settlement of the new and old embankments and significantly improve the stability of the embankment, the self-compacting cement soil is applicable in the embankment widening project.

Key words: self-compacting cement soil; embankment widening; slope ratio; Geogrid; Plaxis2D

近年来,随着国民经济的高速发展,现有大量已建成公路难以满足交通量增长和社会发展的需求,所以老、旧道路拓宽扩建工程在公路建设中已成为重中之重^[1]。同时,地下空间开发利用的热度持续上升,大量工程弃土的处置缺乏规划和实施计划^[2],不仅造成土地资源的浪费,影响城市形象,还会造成运输和存储成本的浪费。水泥土作

为一种土、水泥、固化剂和水拌和后形成的工程材料,具有良好的力学性能,广泛应用于公路工程及其它工程的地基处理^[3-5],现有水泥土搅拌加固技术基本成熟,但在填筑工程中,由于施工条件复杂,施工限制因素多,回填质量不易控制,所以鲜有应用^[6]。自密实水泥土是通过改良配合比和控制坍落度,利用工程弃土作为原料土,通过特殊机

收稿日期:2020-07-22

基金项目:国家自然科学基金面上项目(50879023)

作者简介:叶至韬(1996-),男,福建福州人,硕士研究生,从事基础工程方面的研究。

* 通讯作者:周云东(1975-),男,江苏姜堰人,博士,教授,从事道路堤坝工程、软土地基处理等方面的研究。

械进行充分搅拌形成的具有一定流动性的回填材料,拌和初期呈流动状态,填筑施工时无需碾压,施工速度快,受现场条件及施工人员因素影响较小,因此,应用自密实水泥土作为路堤拼宽工程中新路堤填料,在城市弃土资源化利用中具有突出的效益优势。

在路堤拼宽工程中,新老路堤在填筑时间以及受荷情况等方面的差异,导致它们沉降变形的差异,这种差异沉降将诱发道路病害的发生^[7-10],铺设土工格栅是一种减小不均匀沉降的行之有效的措施^[11-12]。本文结合某路堤拼宽工程实例,选取现场弃土为原料进行自密式水泥土室内试验,并采用 Plaxis2D 软件对自密实水泥土拼宽路堤沉降和稳定性进行数值模拟分析,分析了新路堤坡率、是否铺设土工格栅对其的影响,为设计和施工提供科学的参考依据。

1 工程概况

本项目为某地的干线公路老路单侧拓宽扩建工程,项目老路路面宽 9 m,填土边坡坡率为 1 : 1.5,填高 3~3.5 m,常水位距离堤顶约 5 m。新路全线采用双向两车道二级公路标准,设计速度 60 km/h,路线全长 20.702 km,路面全宽 14.0 m,主要控制减少占用拓宽侧农田。按照 1 : 1.5 坡率开挖台阶,台阶自下而上逐层开挖,台阶宽度不小于 100 cm。本文计算模型选取路堤标准横断面进

行分析,如图 1 所示。

全线勘探 40 m 深度范围内,据钻探编录鉴别和标准贯入试验及室内土工试验资料分析,地基土可分为 5 个工程地质层。各工程地质层埋藏分布条件及主要物理力学指标描述如表 1。

2 室内试验内容与结果

2.1 试验内容

根据岩土工程勘察报告,本工程的代表性开挖弃土主要以素填土为主,并就近选用地下工程弃土作为补充,室内配比试验选用这两种土混合作为原料土,原料土的天然含水率在 31.6% 左右,孔隙比 1.29,重度 18.9 kN/m³。配比试验使用 42.5 级普通硅酸盐水泥。

室内试验时先根据原料土的用量称量一定量的水泥调成水泥浆液,再将水泥浆液和原料土用搅拌器充分搅拌均匀。水泥掺入量按 8%、10% 控制,养护龄期按 7、14、28 d 控制,测试不同配比水泥土的强度、抗变形能力等力学性能指标,以及自密水泥土的流动性和渗透性,最后得出供现场施工使用的合适配比。

2.2 试验结果

2.2.1 自密实水泥土的流动性

自密实水泥土应用的时间较短,目前没有衡量其流动性的专用指标,目前实践中均采用混凝

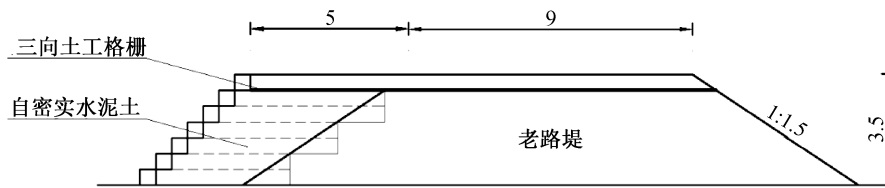


图 1 路堤拼宽工程二维结构图(单位:m)

Fig. 1 Structure of embankment widening

表 1 主要土层物理力学指标表

Tab. 1 Table of physical and mechanical indexes of main soil layers

土层编号	土层名称	平均层厚/m	重度/(kN·m ⁻³)	饱和重度/(kN·m ⁻³)	粘聚力/kPa	内摩擦角/(°)	压缩模量/MPa
1-1	杂填土	1.26	17.9	19.9	3.0	24.4	6.51
1-2	素填土	5.03	18.3	19.5	11.0	9.5	4.60
2	淤泥质粉质黏土	3.15	17.4	17.5	16.0	10.6	3.10
3-1	含砂姜土	14.30	19.0	19.7	43.1	15.3	7.90
3-2	含砂姜黏土	10.18	19.1	19.8	75.1	16.8	10.30
4	黏土	—	19.1	19.9	83.0	16.9	11.50

土的坍落度指标来评价其流动性。选用 80、120、150、200 mm 四种坍落度,经过室内多次试验,最终得出的配比见表 2。

表 2 自密实水泥土坍落度配比表
Tab. 2 Table of slump and ratio of self-compacting cement soil

坍落度/mm	8%水泥掺量		10%水泥掺量	
	每千克土用水/mL	实测坍落度/mm	每千克土用水/mL	实测坍落度/mm
80	100	72	210	77
120	130	123	230	112
150	150	142	260	154
200	160	195	275	203

由表 2 可以看出,水泥土的流动性和水泥土的初始含水率正相关,含水率高则流动性强。在实际泵送试验过程中,过高的含水率会对其强度造成影响,过低的含水率又会影响水泥土的流动性,导致填筑时达不到自密实的效果,因此在满足施工要求及填筑自密性的前提下应尽可能采用低的流动性以提高固化后的强度及抗变形能力。

根据试验结果,本项目现场填筑时拟采用 10%水泥掺量、120 mm 坍落度的水泥土进行,以保证水泥土固化后的高强度及良好的自密性。

2.2.2 自密实水泥土的无侧限抗压强度

无侧限抗压强度试验采用 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm 的立方体试块进行,根据前述配比制样装入试验模中用保鲜膜覆盖,24 h 后拆模放于温度(20±0.5)℃,相对湿度大于 50%的养护箱中进行标准养护。养护至 7、14、28 d 龄期,进行无侧限抗压强度试验,检测结果见表 3,变形模量结果见表 4。

表 3 自密实水泥土无侧限抗压强度表
Tab. 3 Table of unconfined compressive strength of self-compacting cement soil

水泥掺量	坍落度/mm	7 d 强度/MPa	14 d 强度/MPa	28 d 强度/MPa
8%	80	0.24	0.38	0.48
	120	0.21	0.35	0.46
	150	0.20	0.32	0.43
	200	0.18	0.31	0.39
10%	80	0.27	0.42	0.52
	120	0.25	0.39	0.49
	150	0.24	0.34	0.45
	200	0.21	0.33	0.43

表 4 自密实水泥土变形模量表

Tab. 4 Table of deformation modulus of self-compacting cement soil

水泥掺量	坍落度/mm	28 d 模量/MPa
8%	80	79.1
	120	76.8
	150	71.3
	200	70.7
10%	80	86.6
	120	87.8
	150	76.5
	200	72.4

拟采用的 10%水泥掺量、120 mm 坍落度,在施工完成后,水泥土无侧限抗压强度在 0.48 MPa 左右,变形模量大概为 80 MPa。

2.2.3 自密实水泥土的渗透性

自密实水泥土的渗透性较低,可有效抵抗地下水对自密实水泥土自身的侵蚀,起到增强地下结构防渗效果的作用。在 7 d 龄期和 28 d 龄期时,对水泥掺量 10%水泥掺量、120 mm 坍落度的水泥土进行了渗透性测试,测试结果表明,7 d 龄期试样渗透系数为 6.71×10^{-7} cm/s,28 d 龄期试样渗透系数为 4.90×10^{-7} cm/s,自密实水泥土渗透性系数在 10^{-7} cm/s 量级,渗透性极低。

3 有限元计算与结果分析

3.1 计算模型的建立

根据项目概况和工程初始勘察报告等相关资料,如图 1 建立二维简化有限元模型。路堤高度取 3.5 m,原有路堤边坡坡率为 1:1.5,老路反开挖 0.5 m,拼接处按原有坡率开挖台阶,台阶宽度 1.5 m。拓宽侧坡率取 1:1.5、1:1、1:0.8、1:0.5 计算进行对比,在拓宽侧设置截面尺寸 0.5 m×0.5 m 的砌块限制水泥土流动并提供支护,参照《公路路基设计规范》JTG D30—2015^[13] 在反开挖面铺设土工格栅,对比不铺设情况,水泥土按照每层 0.5 m 厚度分层填筑。计算模型地基深度取 60 m,计算宽度取 100 m。

3.2 参数选取与基本假设

地基及路堤各土层的计算参数取自工程勘察报告,如表 1 所示。根据拟选用的自密实水泥土试验结果,变形模量取 80 MPa,参照《建筑基坑支护技术规程》JGJ 120—2012^[14],水泥土的粘聚力取 0.2~0.3 倍无侧限抗压强度,内摩擦角为 20°~30°,因此计算中粘聚力取值为 100 kPa,内摩擦角

取值为 20° ,泊松比取值为 0.3。土体均采用 Mohr-Coulomb 理想弹塑性本构模型,以 Mohr-Coulomb 强度准则作为屈服准则。砌块采用线弹性模型,重度取 24.0 kN/m^3 ,变形模量取 21.6 MPa ,泊松比取 0.2。土工格栅轴采用弹塑性模型,轴向刚度取值为 500 kN/m ,极限抗拉强度取值为 100 kN/m 。

假定模型左右边界无水平变形,只允许出现模型内部与上表面出现位移,模型底部边界无变形。

3.3 计算结果分析

沉降主要由自重和上部荷载所导致,老路堤完工已久,自身变形已经基本完成,而新路堤工后填筑时间尚短,沉降量较大,导致新老路堤之间产生不均匀沉降,若不均匀沉降无法得到有效控制,则容易在拼接处产生纵向裂缝,导致路面病害。基于建立的数值计算模型,研究分析了拓宽侧坡率和铺设土工格栅对沉降以及稳定性的影响。

3.3.1 沉降对比

图 2(a)云图展现了工后总沉降,由图可见沉降主要发生在新老路堤拼接位置,向路堤中部辐射,延伸至路堤中部,路堤边坡部位沉降小。图 2(b)是工后差异沉降云图,通过图片可以发现差异沉降在新老路堤拼接处、新路堤坡脚处最明显,在

新路堤拼接的作用下,老路堤的沉降稳定状态被破坏,产生附加沉降,但工后自身变形已经趋于稳定,荷载产生的沉降量较小,其整体差异不大,新路堤由自密实水泥土填筑而成,工后需要一定时间才能趋于稳定状态,较老路堤而言沉降大,所以不均匀沉降也最为明显。

图 3(a)反映了坡率、铺设土工格栅对完工后最大沉降的影响,不铺设土工格栅时沉降达到 $2.68 \sim 4.57 \text{ cm}$,铺设土工格栅后沉降量控制在 $2.55 \sim 3.87 \text{ cm}$ 范围,随着坡率变陡,沉降量随之增大,铺设土工格栅能够减小路堤沉降,坡率越陡效果越明显。图 3(b)反映了坡率、铺设土工格栅对完工后差异沉降的影响,不铺设土工格栅时差异沉降在 $0.36 \sim 0.60 \text{ cm}$ 之间,铺设土工格栅后差异沉降在 $0.29 \sim 0.59 \text{ cm}$ 范围,差异沉降量与坡率并无明显关联,但铺设土工格栅对减小差异沉降发挥了作用,坡率越陡效果越明显。可以发现,采用自密实水泥土拼宽路堤能够控制沉降、不均匀沉降在很小的范围内,有良好的适用性。

3.3.2 稳定性分析

在新路堤填筑施工中,当底层施工完成至反开挖面后,铺设一层土工格栅,数值计算采用强度折减法计算自密实水泥土路堤安全系数。图 4 展

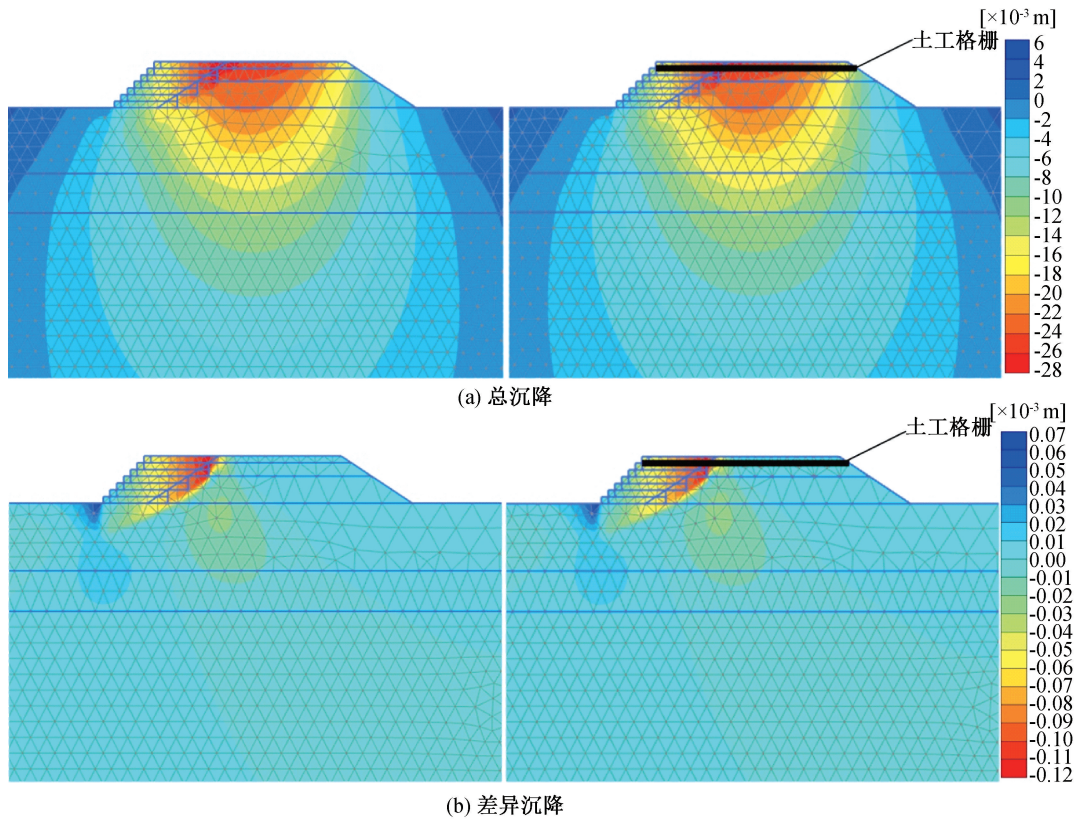


图 2 路堤沉降云图

Fig. 2 Nephogram of settlement of embankment

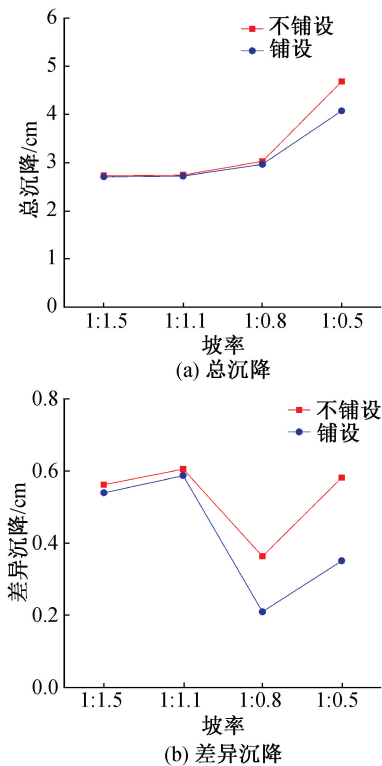


图3 不同坡率时路堤的沉降

Fig. 3 Settlement of embankment under different slope ratio

示的是路堤破坏模式,从图上可以看出,破坏模式为基底破坏,无论铺设土工格栅与否,最危险滑动面均沿着新老路堤拼接处开展。

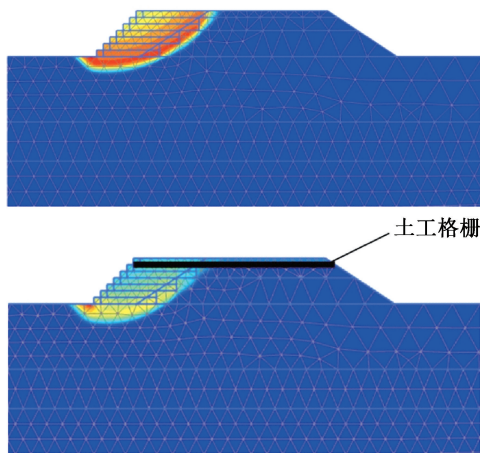


图4 路堤破坏模式

Fig. 4 Failure mode of embankment

图5反映了路堤边坡安全系数随着坡率的变化,坡率越陡,安全系数越小,在1:1~1:0.5坡率范围内,不铺设土工格栅时安全系数在1.00~1.25之间,坡率陡于1:1时未达到规范《公路路基设计规范》JTG D30—2015^[13]要求的1.15,铺设土工格栅后安全系数显著提升至1.19~1.55,提升

率在120%~125%之间,可见铺设土工格栅能够显著提高路堤稳定性。

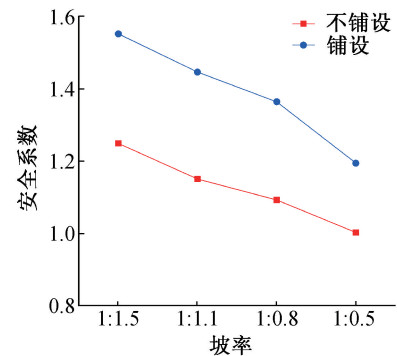


图5 不同坡率时路堤的安全系数

Fig. 5 Safety factor of embankment under different slope ratio

4 结论

1)自密实水泥土具有可靠、稳定的物理力学性质指标,拥有较高的强度及抗变形能力,低渗透性等特点,路堤拼宽工程项目拟采用的10%水泥掺量、120 mm 坍落度的自密实水泥土无侧限抗压强度在0.48 MPa左右,变形模量可达80 MPa。特别是在空间受限,坡率较陡时有良好的适用性,值得推广。

2)采用自密实水泥土作为新路堤填料能够有效控制路堤沉降、不均匀沉降。坡率较缓时,铺设土工格栅对沉降的影响不大,坡率较陡时,铺设土工格栅对减小沉降与不均匀沉降效果明显。

3)自密实水泥土路堤有较高的安全系数,能够满足道路工程设计标准,无论铺设土工格栅与否,最危险滑动面均沿着新老路基拼接处向路堤基底开展,铺设土工格栅能够显著提高路堤的安全系数。在不铺设土工格栅情况下,建议设计坡率缓于1:1,铺设土工格栅情况下,建议设计坡率缓于1:0.5。

参考文献:

- [1]章定文,刘松玉. 软土地基高速公路扩建中新老路堤相互作用数值分析[J]. 中国公路学报,2006(06):7-12.
- [2]李建明,王志刚,王一峰,等. 基于固体废弃物资源化利用的“无废城市”建设初探[J]. 中国水土保持,2019(07):25-29.
- [3]汤新怡,刘汉龙,朱伟. 水泥土固化工程特性研究[J]. 岩土工程学报,2000(5):549-554.
- [4]刘晓明,付海雄,郭鸣琴. 水泥土的力学性能综述[J]. 中湖南工程学院学报,2006(01):84-88.

(下转第93页)

性能受结霜的影响也最小。

3)与亲水和常规换热器相比,超疏水换热器的化霜时间分别缩短了41.7%和43.2%,化霜耗热量分别减少了47.2%和61.9%。超疏水换热器可缩短化霜时间,节约化霜能耗,减少化霜水的滞留。

4)超疏水翅片表面的纳米结构,使凝结液滴在表面呈Cassie状,对削弱翅片与液滴间的传热,延缓后续霜晶的生长具有关键作用。并且,要使得霜层在化霜初期从翅片表面脱离,关键在于纳米结构与霜层形成的封闭空间内空气受热膨胀。

参考文献:

- [1] SONG M J, DENG S M, DANG C B, et al. Review on Improvement for Air Source Heat Pump Units During Frosting and Defrosting[J]. *Applied Energy*, 2018, 211: 1150-1170.
- [2] 张又升, 赵敬德, 王金龙. 空气源热泵室外换热器翅片管的融霜过程分析[J]. *流体机械*, 2016, 44(6): 66-71.
- [3] 曲明璐, 李封, 余倩, 等. 空气源热泵不同蓄能除霜模式对室内热舒适度的影响[J]. *流体机械*, 2016, 44(1): 60-65.
- [4] LIU J D, SUN Y Y, WANG W, et al. Performance Evaluation of Air Source Heat Pump under Unnecessary Defrosting Phenomena for Nine Typical Cities in China[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2017, 74: 383-396.
- [5] WANG F, LIANG C H, ZHANG X S. Research of Anti-frosting Technology in Refrigeration and air Conditioning Fields: A Review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 81: 707-722.
- [6] ZHANG P, LV F Y. A Review of the Recent Advances in Superhydrophobic Surfaces and the Emerging Energy-related Applications[J]. *Energy*, 2015, 82: 1068-1087.
- [7] 汪德龙, 武卫东, 陈小娇. 金属基体超疏水表面抗凝露抗结霜特性的研究进展[J]. *制冷技术*, 2015, 35(1): 41-47.
- [8] ZHANG Y F, GE D T, YANG S. Spray-coating of Superhydrophobic Aluminum Alloys with Enhanced Mechanical Robustness[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2014, 423: 101-107.
- [9] KIM H, KIM D, JANG H, et al. Microscopic Observation of Frost Behaviors at the Early Stage of Frost Formation on Hydrophobic Surfaces[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 97: 861-867.
- [10] 徐文骥, 宋金龙, 孙晶, 等. 铝基体超疏水表面结冰结霜特性研究[J]. *制冷学报*, 2011, 32(4): 9-13.
- [11] 周艳艳, 于志家. 铝基超疏水表面抗结霜特性研究[J]. *高校化学工程学报*, 2012, 26(6): 929-933.
- [12] JING T, KIM Y, LEE S, et al. Frosting and Defrosting on Rigid Superhydrophobic Surface[J]. *Applied Surface Science*, 2013, 276: 37-42.
- [13] WANG F, LIANG C H, ZHANG X S. Visualization Study of the Effect of Surface Contact Angle on Frost Melting Process under Different Frosting Conditions[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2016, 64: 143-151.
- [14] BORETKO J B, SRIJANTO B R, NGUYEN T D, et al. Dynamic defrosting on nanostructured superhydrophobic surfaces[J]. *Langmuir*, 2013, 29(30): 9516-9524.
- [15] 汪峰, 梁彩华, 张小松. 超疏水翅片表面的抑霜机理和化霜特性[J]. *工程热物理学报*, 2016, 37(5): 1066-1070.
- [16] ALEXANDROV D V, GALENKO P K. Selection Criterion for the Growing Dendritic Tip at the Inner Core Boundary[J]. *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, 2013, 46(19): 195101.
- (责任编辑 周雪梅)
-
- (上接第56页)
- [5] 梁仁旺, 张明, 白晓红. 水泥土的力学性能试验研究[J]. *岩土力学*, 2001, 22(2): 211-213.
- [6] 刘旭东. 预拌流态固化土技术在地下综合管廊基槽回填工程中的应用[J]. *建筑技术开发*, 2018, 45(04): 61-62.
- [7] 谢永利, 刘保健. 公路软基沉降计算新理论及其仿真计算方法[J]. *交通运输工程学报*, 2001, 1(3): 32-36.
- [8] TAVENAS F A. The Behavior of Embankment on Clay Foundations[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1980, 17(2): 236-259.
- [9] ZHANG Liming. Settlement Patterns of Soft Soil Foundations Under Embankments[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1999, 36(4): 774-781.
- [10] 陈建峰, 石振明, 沈明荣. 宽路堤软土路基沉降的有限元模拟[J]. *公路交通科技*, 2003, 20(4): 23-25.
- [11] HAN J, GABR M A. Numerical Analysis of Geosynthetic-reinforced and Pile-supported Earth Platforms over Soft Soil[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2002, 128(1): 44-53.
- [12] 司晓炜. 公路路基加宽施工中的土工格栅加筋优化技术应用[J]. *公路工程*, 2017(3): 184-186.
- [13] JTG D30—2015, 公路路基设计规范[S].
- [14] JGJ 120—2012, 建筑基坑支护技术规程[S].
- (责任编辑 王利君)