

强化草地道面土工格室材料性能及应用效果分析

张馨方^{1,2}, 赵磊明³, 廖羽³, 马鲁宽^{1,2}

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海, 201804; 2. 民航飞行区设施耐久与运行安全重点实验室, 上海, 201804;
3. 中体飞行(北京)体育产业发展有限公司, 北京, 100020)

摘要 土工格室强化草地道面是一种新型的简易道面, 在面向通用航空、应急救援等场景下的跑道建设中具有显著的技术优势。选择了一种典型的土工格室强化材料, 通过室内试验研究了其力学性能(抗拉性能和抗压性能)和耐久性能(抗老化性能和抗侵蚀性能), 并基于现场承载能力试验分析了其应用效果。结果表明: 单个和2个拼装土工格室材料抗拉强度分别为6.62 MPa和1.09 MPa, 抗拉模量分别为100.52 MPa和21.27 MPa; 土工格室材料的抗压强度为101.09 MPa, 抗压模量为93.60 MPa; 高温、低温和紫外线影响下土工格室材料抗拉性能出现不同程度的下降, 但仍具有一定的抗老化能力; 土工格室材料不受水侵蚀的影响, 除冰剂和汽油侵蚀后其抗拉性能下降, 但不存在质量损失; 在85%的压实度下, 土工格室强化草地道面的回弹模量提升了28%, 表明土工格室材料对草地道面承载力有一定的强化效果。

关键词 草地道面; 土工格室; 力学性能; 耐久性能; 承载力

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2024.05.006

中图分类号 U416.216 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2024)05-0046-07

An Analysis of Material Performance and Application Effects for Geo-Cell Reinforcing Grassy Pavements

ZHANG Xinfang^{1,2}, ZHAO Leiming³, LIAO Yu³, MA Lukuan^{1,2}

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Key Laboratory of Infrastructure Durability and Operation Safety in Airfield of CAAC, Shanghai 201804, China; 3. China Sports Flight Sports Industry Development Co., Ltd., Beijing 100020, China)

Abstract The reinforced grassy pavement structure is a new type of simple pavement structure, and has significant technical advantages in the construction of runways for general aviation, emergency rescue and other scenarios. In this paper, a typical geo-cell reinforcement material is selected to study its mechanical properties (tensile and compressive properties) and durability properties (aging resistance and erosion resistance) through laboratory tests. And the application effects are analyzed based on the field bearing capacity test. The results show that the tensile strength and tensile modulus of single and two assembled geo-cells are 6.62 MPa and 1.09 MPa, respectively. The tensile modulus is 100.52 MPa and 21.27 MPa respectively. The compressive strength and compressive modulus of geo-cell materials are 101.09 MPa and

收稿日期: 2024-03-31

基金项目: 国家自然科学基金(52008310)

作者简介: 张馨方(2000—), 女, 辽宁沈阳人, 博士生, 研究方向为机场道面。E-mail: zxf0993@163.com

通信作者: 马鲁宽(1990—), 男, 山东聊城人, 副研究员, 博士, 研究方向为新型铺面结构设计、评价及智能化。E-mail: malukuan 5071@163.com

引用格式: 张馨方, 赵磊明, 廖羽, 等. 强化草地道面土工格室材料性能及应用效果分析[J]. 空军工程大学学报, 2024, 25(5): 46-52. ZHANG Xinfang, ZHAO Leiming, LIAO Yu, et al. An Analysis of Material Performance and Application Effects for Geo-Cell Reinforcing Grassy Pavements[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2024, 25(5): 46-52.

93.60 MPa respectively. The tensile properties of geo-cell materials affected by high temperature, low temperature and ultraviolet rays decrease to a great extent, but they still have a certain anti-aging ability. The geo-cell material is not affected by water erosion, and its tensile performance decreases after the erosion of deicing agent and gasoline, but there is no mass loss. Under the compaction degree of 85%, the resilience modulus of the geo-cell strengthened grassland pavement increase by 28%, and this indicates that the geo-cell material has a certain strengthening effect on the bearing capacity of the grassy pavement.

Key words grassy pavement; geo-cell; mechanical properties; durability; bearing capacity

草地路面具有建设快、绿色生态、体验舒适等优点,在通用航空机场中应用广泛^[1]。但相较于硬化路面,草地路面强度较低,适用机型有限,且易受环境、动物等影响^[2]。针对上述问题,土工格室强化草地路面应运而生。

土工格室强化草地路面由草地路面演化而来,包括土基、草皮层和土工格室^[3],是一种新型的简易路面结构。在这种新型结构中,土工格室被嵌入在路面表面,从而有效缓解了现有草地路面耐久性不足的问题^[4],同时产生的“网兜效应”,能显著提高路面的承载能力^[5-6]。针对土工格室强化草地路面, Mariusz Wesołowski 分析了土工格室材料性能及其强化草地路面的效果,结果表明土工格室材料可提升路面结构承载力约 20%^[7]。应用方面,欧美地区现有铺设的强化草地跑道面积超过 1 500 000 m²;2018 年,我国第一条土工格室强化草地跑道在中国衡水航空飞行营地投入使用,其铺装规模达 36 000 m²,包括一条 800 m × 30 m 的跑道和一条 800 m × 15 m 的滑行道;随后,我国山东、山西、甘肃等省也陆续修筑了面向消防、观光旅游等应用的土工格室强化草地跑道。国内外研究和应用表明,在面向通用航空、应急救援等场景下的跑道建设中,土工格室强化草地路面具有显著的技术优势^[8-9]。但是,目前土工格室强化草地路面在我国的应用尚处于起步阶段,相关的研究也较少。因此,为推动土工格室强化草地路面的国产化、体系化和标准化,仍需对强化材料性能与应用效果、结构设计和评价方法、施工工艺与装备等技术问题开展研究。

综上,本文围绕强化草地路面土工格室的材料性能及应用效果开展研究,选择一种典型的土工格室强化材料,通过室内力学性能和耐久性试验,探究土工格室的材料性能;基于强化草地跑道的现场承载能力试验,分析土工格室强化材料的应用效果。成果可为土工格室强化材料的国产化研发及强化草地路面的推广应用奠定基础。

1 土工格室材料及强化草地路面结构

1.1 土工格室材料

土工格室属于土工合成材料,由聚乙烯或聚丙烯制成^[10-11]。将土工格室置于土体中,可以起到排水、隔离、加筋、防渗、防护等作用^[12],有效地防止水土流失,增加土体的稳定性^[13],从而加强结构的承载能力^[14]。

通过市场调研,本文选择了一种典型的土工格室材料(德国罗福士材料)作为后续研究的对象。单个土工格室典型结构长和宽均为 302 mm,基本单元格室长和宽均为 50 mm,深度为 37 mm,壁厚 2 mm,如图 1 和图 2 所示。单个土工格室可通过嵌锁结构连接拼装使用,有效提高了施工便捷性和效率。

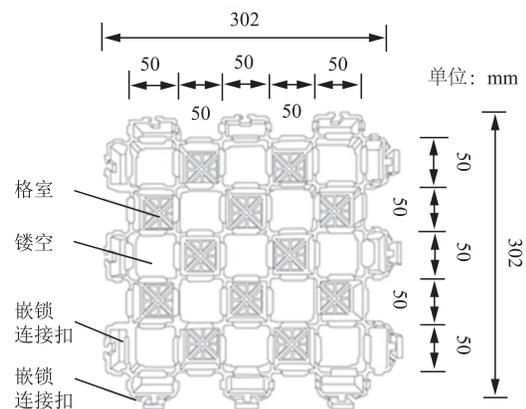


图 1 选择的土工格室材料示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the selected geocell material



图 2 选择的土工格室材料实物图

Fig. 2 Physical diagram of the selected geocell material

1.2 土工格室强化草地路面结构

基于选择的土工格室材料,通过拼装,将土工格

室嵌入草地道面表层,形成典型的土工格室强化草地道面结构,如图 3 所示。



图 3 典型的土工格室强化草地道面结构

Fig. 3 Typical reinforced grassy pavement structure

上述结构通常有 2 种施工方式:一种是在现有草地的基础上进行强化成型,通过平整草地、修剪草坪,之后铺放拼装成型的土工格室材料,而后由压路机压实嵌入,再进行草坪的生长和维护工作^[15];另一种是在原状土上成型,通过地基整平、压实(根据需求控制压实度),之后翻松一定深度的土基,播撒草籽,之后铺放拼装成型的土工格室材料,而后由压路机压实嵌入,再进行草坪的生长和维护工作。

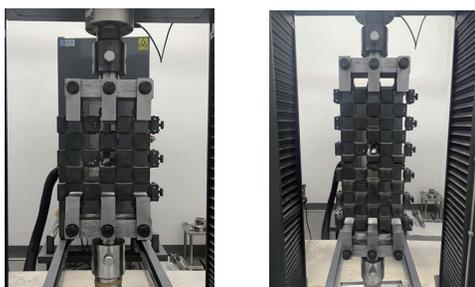
2 土工格室材料性能试验分析

2.1 试验方法

针对选择的土工格室材料,考虑材料的结构和需求,通过室内试验探究其抗拉性能、抗压性能、耐久性能^[16]。

2.1.1 抗拉性能试验方法

抗拉性能试验主要用于分析土工格室材料的抗拉强度、抗拉模量和损坏模式。考虑到土工格室拼装使用的特点,针对单个土工格室材料和 2 个拼装土工格室材料,分别开展 3 个平行试验。试验在万能试验机上进行,加载速度为 10 mm/s,当试件开始迅速变形直至试件破坏时^[17],停止加载,如图 4 所示。



(a) 单个土工格室材料

(b) 2 个拼装土工格室材料

图 4 土工格室材料抗拉性能试验

Fig. 4 Tensile test of geocell materials

基于测试的拉力与位移,可通过式(1)~式(3)计算材料抗拉模量^[18]:

$$\sigma_t = \frac{F_t}{A_t} \quad (1)$$

$$\epsilon_t = \frac{\Delta l_t}{l_t} \quad (2)$$

$$E_t = \frac{\sigma_t}{\epsilon_t} \quad (3)$$

式中: σ_t 为抗拉强度(MPa); F_t 为极限抗拉荷载(N); A_t 为土工格室材料的横截面面积(mm^2),取值为 892 mm^2 ; ϵ_t 为拉应变; Δl_t 为伸长长度(m), l_t 为试件原长(m); E_t 为抗拉模量(MPa)。

2.1.2 抗压性能试验

抗压性能试验主要用于分析土工格室材料的抗压强度、抗压模量和破坏模式。针对单个土工格室材料,开展 3 个平行试验。试验在自动式伺服压力试验机上进行,试件放置在 $35 \text{ cm} \times 35 \text{ cm}$ 的钢垫板上,加载速度为 2 kN/s ,当试件开始迅速变形直至试件破坏时,停止加载,如图 5 所示。



图 5 单个土工格室材料抗压性能试验

Fig. 5 Compressive test of a single geocell material

基于测试的压力与位移,可通过式(4)~式(6)计算材料的抗压模量^[18]:

$$\sigma_c = \frac{F_c}{A_c} \quad (4)$$

$$\epsilon_c = \frac{\Delta l_c}{l_c} \quad (5)$$

$$E_c = \frac{\sigma_c}{\epsilon_c} \quad (6)$$

式中: σ_c 为抗压强度(MPa); F_c 为极限抗压荷载(N); A_c 为土工格室材料最小的抗压截面面积(mm^2),取值为 8400 mm^2 ; ϵ_c 为压应变; Δl_c 为受压长度(m); l_c 为试件原长(m),取值为 0.037 m 。

2.1.3 耐久性能试验

土工格室材料的耐久性能包括抗老化性能和抗侵蚀性能。其中,抗老化性能主要考虑高温、低温和紫外线的影响,抗侵蚀性能主要考虑汽油、除冰剂和水的影。在试验中,高温和紫外线影响的试验条件参考《JTG E50—2006 公路工程土工合成材料试验规程》中《T1161—2006》和《T1163—2006》的方法^[16],低温影响的试验条件按照道面极限工作环境设置,而抗侵蚀性能试验参考现有研究^[19]。具体试

验方法如表 1 所示。

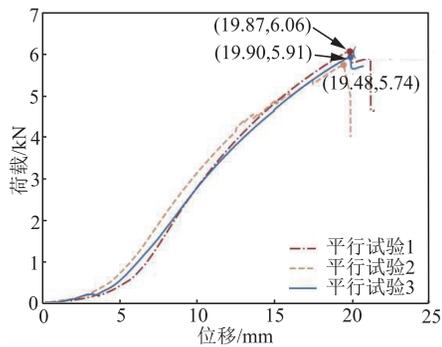
表 1 土工格室材料耐久性能试验方法

内容	处理方式	处理条件及设备	试验方法
抗老化性能	高温老化	110 °C 处理 14 d ^[16] , 烘箱	测试老化前后土工格室材料的抗拉性能(参照抗拉性能试验方法)
	低温老化	-30 °C 处理 14 d, 低温箱	
	湿度老化	湿度 50%、黑板温度(参照抗拉性能试验方法)	
	紫外线老化	80 °C、辐照强度 1 000 W/m ² 处理 14 d, 氙灯老化试验机 ^[16]	
抗侵蚀性能	汽油侵蚀	室温浸泡 14 d ^[19]	测试侵蚀前后土工格室材料的抗拉性能(参照抗拉性能试验方法)、测试侵蚀前后的质量并计算质量损失率 ^[19]
	除冰剂侵蚀	室温浸泡 14 d ^[19]	
	水侵蚀	室温浸泡 14 d ^[19]	

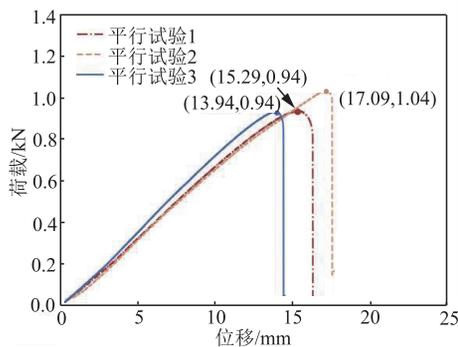
2.2 结果与分析

2.2.1 抗拉性能结果与分析

单个土工格室材料和 2 个拼装土工格室材料的抗拉性能的荷载-位移曲线,分别如图 6(a)和图 6(b)所示。土工格室受拉破坏结果,如图 7 所示。



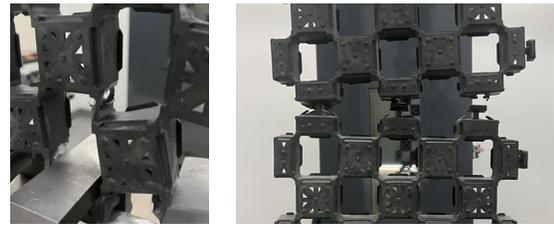
(a) 单个土工格室材料



(b) 2 个拼装土工格室材料

图 6 土工格室材料抗拉性能试验的荷载-位移曲线

Fig. 6 Load-displacement curves for tensile tests of geocell materials



(a) 单个土工格室材料

(b) 2 个拼装土工格室材料

图 7 土工格室材料受拉破坏

Fig. 7 Tensile failure of geocell materials

由图 6、图 7 和式(1)~式(3)计算可得单个土工格室材料的抗拉强度的平均值为 6.62 MPa, 变异系数为 2.7%, 计算所得平均抗拉模量为 100.52 MPa, 受拉破坏的位置位于单个土工格室内相邻格室的连接处; 2 个拼装土工格室材料的抗拉强度的平均值为 1.09 MPa, 变异系数为 4.9%, 计算所得的平均抗拉模量为 21.27 MPa, 受拉破坏的位置位于 2 个土工格室嵌锁连接部位, 在受拉状态下发生脱离破坏。因此, 相比较而言, 在实际应用中, 嵌锁连接部位是土工格室结构的薄弱构造, 直接影响了土工格室的抗拉性能。

2.2.2 抗压性能结果与分析

单个土工格室材料的抗压性能试验的荷载-位移曲线如图 8 所示。

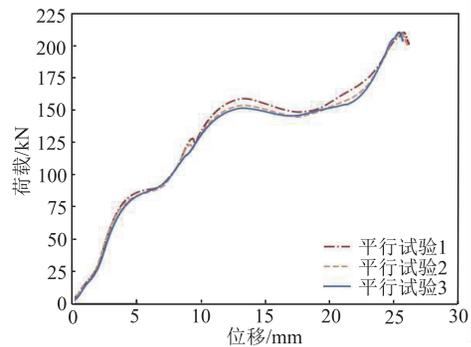


图 8 土工格室材料抗压性能试验的荷载-位移曲线

Fig. 8 Load-displacement curves for compressive tests of geocell materials

由图 8 可知, 在受压时, 土工格室材料有 2 个屈服阶段, 对应荷载平均值分别为 85 kN 和 150 kN, 屈服阶段的变形会迅速增大。此外, 抗压性能试验发现, 土工格室材料在进入第一个屈服阶段后会产生塑性变形, 因此通过式(4)计算得出土工格室材料的抗压强度为 101.19 MPa, 此时计算的平均抗压模量为 93.60 MPa。

2.2.3 耐久性能试验结果与分析

2.2.3.1 抗老化性能

老化前后单个土工格室材料的抗拉强度和抗拉

模量的结果,如图 9 所示。由图 9 可知,老化处理材料的抗拉强度均减小,高温老化后的材料抗拉强度降低了 12.7%,低温老化后降低了 8.9%,紫外线老化后降低了 13.4%。此外,由图 8 还可以发现,经过老化处理的材料抗拉模量均减小,高温老化后的材料抗拉模量降低了 25.5%,低温老化降低了 23.2%,紫外线老化后降低了 20.8%。

由此可知,高温、低温和紫外线老化后,土工格室材料的抗老化性能有不同程度的减小,但总体而言,高温、低温和紫外线影响下土工格室材料具有一定的抗老化能力。

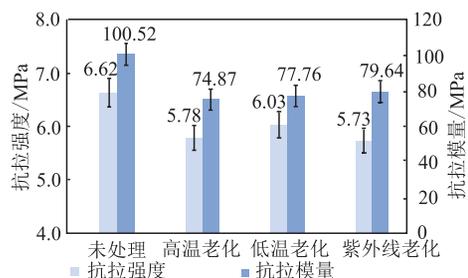


图 9 老化前后单个土工格室材料的抗拉强度与抗拉模量

Fig. 9 Tensile strength and tensile modulus of a single geocell material before and after aging

2.2.3.2 抗侵蚀性能

侵蚀前后单个土工格室材料的抗拉强度和抗拉模量的结果,如图 10 所示。

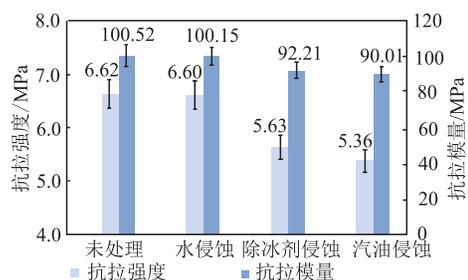


图 10 侵蚀前后单个土工格室材料的抗拉强度和抗拉模量

Fig. 10 Tensile strength and tensile modulus of a single geocell material before and after erosion

由图 10 可知,水侵蚀后的材料抗拉强度降低了 0.3%,抗拉模量降低了 0.4%;除冰剂侵蚀后的材料抗拉强度降低了 15.0%,抗拉模量降低了 8.3%;汽油侵蚀后的材料抗拉强度降低了 19.0%,抗拉模量降低了 10.5%。由此可知,汽油侵蚀对土工格室材料的抗拉性能影响最大,其次是除冰剂,水的影响可以忽略不计。

此外,对土工格室材料进行侵蚀后的质量进行测量和计算,结果如表 2 所示。

表 2 土工格室材料侵蚀前后质量变化

Tab. 2 Change in mass of geocell material before and after erosion

试验工况	试验序号	试验前质量/g	试验后质量/g	质量损失/%	质量损失/平均值/%	变异系数/%
水侵蚀	1	53.80	53.80	0		
	2	54.17	54.17	0	0	
	3	53.96	53.96	0		
除冰剂侵蚀	1	53.89	53.88	0.018 6		
	2	53.94	53.93	0.018 5	0.018 5	0.08
	3	53.85	53.84	0.018 6		
汽油侵蚀	1	53.98	53.93	0.092 6		
	2	53.83	53.78	0.092 9	0.092 7	0.14
	3	53.94	53.89	0.092 7		

由表 2 可知,水侵蚀后土工格室的质量没有变化,而除冰剂侵蚀后土工格室质量损失为 0.018 5%,汽油侵蚀后材料的质量损失为 0.092 7%。综合来看,侵蚀后土工格室材料的质量损失均较小,可以忽略不计。

3 土工格室强化效果分析

3.1 现场试验方法

为了研究选择的土工格室材料对草地道面的强化效果,开展现场承载板试验,测试强化前后草地道面的回弹模量,分析强化前后草地道面结构的承载能力^[20]。

试验场地位于山西省某通用机场,其包括 1 条长 1 100 m 和宽 30 m 的跑道、1 个约 500 m² 的停机坪,如图 11 所示。其中,跑道为土工格室强化草地道面,土基压实度为 90%;停机坪一部分为未强化草地道面,一部分为土工格式强化草地道面,土基压实度均为 85%。



图 11 山西某通用机场土工格室强化草地跑道

Fig. 11 Reinforced grassy runway in shanxi province

在现场,分别在跑道、未强化停机坪和强化停机坪,各随机选择 3 个测点,开展承载板试验,测试道面的回弹模量,如图 12 所示。



(a)荷载装置布设 (b)贝克曼梁及百分表布设

图12 现场测试回弹模量的承载板试验

Fig. 12 Bearing plate test of resilience modulus in the field

3.2 现场试验结果与分析

现场测试所得的道面回弹模量,结果如表3所示。

表3 现场测试所得的不同位置回弹模量试验结果

Tab. 3 Test results of resilience modulus at different positions obtained from field tests

试验位置	土基 压实度/%	强化程度	回弹模量 /MPa	变异系数 /%
停机坪	85	已强化	18.73	5.1
		未强化	14.62	4.2
跑道	90	已强化	25.86	7.6

在停机坪上,对比强化前后的道面回弹模量可以看出,未经强化的道面回弹模量为 14.62 MPa,强化后的道面回弹模量为 18.73 MPa,增大了约 28%。结果表明,选择的土工格室材料可以提升草地路面的承载能力。此外,对强化草地路面而言,压实度从 85%提升到 90%,回弹模量增大了 38.1%,表明在施工能力范围内,增大压实度可有效提升强化草地路面结构的承载能力。

4 结论

1)单个和2个拼装土工格室材料抗拉强度分别为 6.62 MPa 和 1.09 MPa,抗拉模量分别为 100.52 MPa 和 21.27 MPa,拼装土工格室材料的抗拉破坏出现在嵌锁连接部位,因此抗拉性能与嵌锁连接结构密切相关;土工格室材料的抗压强度为 101.09 MPa,抗压模量为 93.60 MPa,超过抗压强度后,土工格室材料会产生塑性变形。

2)高温、低温和紫外线老化后,土工格室材料的抗拉强度分别减小 12.7%、8.9%和 13.4%,抗拉模量分别减小 25.5%、23.2%和 20.8%;总体而言,高温、低温和紫外线影响下土工格室材料具有一定的抗老化能力。

3)水侵蚀后,土工格室的抗拉性能基本保持不变,而除冰剂和汽油侵蚀后,土工格室材料的抗拉强度分别减小 15.0%和 19.0%,抗拉模量分别减少 8.3%和 10.5%;在水、除冰剂和汽油侵蚀后,土工

格室材料的质量损失均可忽略不计。

4)在 85%的压实度下,土工格室强化的草地路面的回弹模量提升了 28%,且增大压实度可有效提升强化草地路面结构的承载能力。

5)建议后续进一步围绕强化效果优化土工格室材料的结构形式,并开展结构设计方法研究,为土工格室强化草地路面的推广应用奠定基础。

参考文献

- [1] 翁兴中,蔡良才. 机场道面设计[M]. 北京:人民交通出版社,2007.
WENG X Z, CAI L C. Airport Pavement Design[M]. Beijing: People's Communications Press, 2007. (in Chinese)
- [2] WESOŁOWSKI M, KOWALEWSKA A. The Impact of a Geogrid System on Load-Bearing Capacity of Natural Airfield Pavements[J]. Archives of Civil Engineering, 2020: 45-61.
- [3] ZHANG D Y, CAI L C, ZHOU S H. An Airfield Soil Pavement Design Method Based on Rut Depth and Cumulative Fatigue[J]. Journal of Advanced Transportation, 2019: 6032305.
- [4] KUMAR S, SINGH S K. Subgrade Soil Stabilization Using Geosynthetics: a Critical Review[J]. Materials Today: Proceedings, 2023.
- [5] 刘猛. “土工格室+碎石桩”复合地基承载特性及变形计算研究[D]. 长沙:湖南大学,2016.
LIU M. Research on Bearing Characteristics and Deformation Calculation of “Geocell + Gravel Pile” Composite Foundation[D]. Changsha: Hunan University, 2016. (in Chinese)
- [6] GUO J. Experimental Studies on Geocells and Mat Systems for Stabilization of Unpaved Shoulders and Temporary Roads[D]. Kansas: University of Kansas, 2014.
- [7] WESOŁOWSKI M, KOWALSKA D, KOWALEWSKA A. Geocell Reinforcement in Natural Airfield Pavement Structure in the Aspect of the Safety of Conducted Flight Operations [C]//Proceedings of the 29th European Safety and Reliability Conference (ES-REL). Singapore: Research Publishing Services, 2019: 22-26.
- [8] ALIMOHAMMADI H, ZHENG J X, SCHAEFER V, et al. Evaluation of Geogrid Reinforcement of Flexible Pavement Performance: a Review of Large-Scale Laboratory Studies[J]. Transportation Geotechnics, 2021: 27.
- [9] GROENLER J, MONLUX, S, VACHOWSKI B. Geosynthetics for Trails in Wet Areas[R]. Washington D C: United States Department of Agriculture, 2008.
- [10] AL-MAJALI Y T, ALAMIRI E S, WISNER B, et al. Mechanical Performance Assessment of Sustainable

- Coal Plastic Composite Building Materials[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 80: 108089.
- [11] ZHAO M, ZHANG L, ZOU X, et al. Research Progress in Two-Direction Composite Foundation Formed by Geocell Reinforced Mattress and Gravel Piles[J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22: 1-10.
- [12] SUKU L, PRABHU S S, RAMESH P, et al. Behavior of Geocell-Reinforced Granular Base under Repeated Loading [J]. Transportation Geotechnics, 2016, 9: 17-30.
- [13] KIEF O, SCHARY Y, POKHAREL S K. High-Modulus Geocells for Sustainable Highway Infrastructure [J]. Indian Geotechnical Journal, 2015, 45 (4): 389-400.
- [14] 魏武, 顾强康, 郑汝海. 土工合成材料在简易机场中的应用初探[C]//第四届国际道路和机场路面技术大会论文集. 北京: 人民交通出版社, 2002: 593-596.
WEI W, GU Q K, ZHENG R H. A Preliminary Study on the Application of Geosynthetics in Airstrips[C]// Proceedings of the 4th International Conference on Road and Airport Pavement Technology. Beijing: China Communication Press, 2002: 593-596. (in Chinese)
- [15] WESOŁOWSKI M, PIETRUSZEWSKI P, KOWALEWSKA A. Cellular Geosynthetics in the Aspect of Application in Airfield Construction[J]. Journal of KONBiN, 2019, 49 (4): 341-362.
- [16] 公路工程土工合成材料试验规程: JTG E50—2006[S]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
Test Procedures for Geosynthetics in Highway Engineering: JTG E50—2006[S]. Beijing: China Communication Press, 2009. (in Chinese)
- [17] FRIDMAN M. Understanding Compression Testing and Flexural Modulus, a Crucial Aspect of Material Strength Evaluation[J]. Quality, 2023, 62(11): 30.
- [18] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2002[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
Code for the Design of Concrete Structures: GB50010—2010[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2004. (in Chinese)
- [19] MARIUSZ W, PIOTR W, PAWEŁ I, et al. Analysis and Assessment of the Usefulness of Recycled Plastic Materials for the Production of Airfield Geocell[J]. Materials (Basel, Switzerland), 2021, 14(13): 3557.
- [20] 公路路基路面现场测试规程: JTG 3450—2019[S]. 北京: 人民交通出版社, 2019.
Highway Subgrade Pavement Field Test Procedures: JTG 4350—2019 [S]. Beijing: China Communication Press, 2019. (in Chinese)

(编辑: 韩茜)