文章编号:1005-0523(2023)01-0019-06

土工格室加筋对挡墙填方路基承载性的影响

黄玉纯[1],吴廷楹[2],王 宁[3],林志航[3],耿大新[3]

(1. 南昌铁路勘测设计院有限责任公司, 江西 南昌 330002; 2. 江西省交通设计研究院有限责任公司, 江西 南昌 330022; 3. 华东交通大学江西省岩土工程基础设施安全与控制重点实验室,江西 南昌 330013)

摘要:土工格室对一般路基的性能影响显著,但在两侧挡墙高填方填土路基中增加土工格室对路基承载性的提高程度还不明确。通过模型试验,设置无筋和 3 种不同加筋间距等 4 种工况,研究土工格室在两侧挡墙路基中的应用效果、不同层间格室和挡土墙的力学特征。试验表明:加筋除了对承载力的影响显著,同时对路基初始模量有较大改善,在达到容许荷载时,其依旧能保持结构自身完整性;筋材所受拉应力与深度呈反比,首层格室所受拉应力和提升速率均远大于其余层;挡土墙受力呈三角形分布,于 0.22H 处突然增大。

关键词:土工格室;挡土墙;路基;承载力

中图分类号:TU443;U416 **文献标志码**:A

本文引用格式:黄玉纯,吴廷楹,王宁,等. 土工格室加筋对挡墙填方路基承载性的影响[J]. 华东交通大学学报,2023,40(1):19-24.

Influence of Geocell on Capacity of Subgrade with Retaining Walls

Huang Yuchun[1], Wu Tingying[2], Wang Ning[3], Lin Zhihang[3], Geng Daxin[3]

(1. Nanchang Railway Survey and Design Institute Co., Ltd., Nanchang 330002, China; 2. Jiangxi Communications Design and Research Institute Co., Ltd., Nanchang 330022, China; 3. Jiangxi Key Laboratory of Infrastructure Safety Control in Geotechnical Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: The effect of geocell on the performance of ordinary subgrade is significant, but the improvement of the bearing capacity of subgrade by adding geocell to the high fill subgrade with two side retaining walls is not clear. To explore the application of the geocell in this structure and mechanical characteristics of geocells between different layers and retaining walls, three different reinforcement spacings and one unreinforced operating condition are set to model test. The results show that:In addition to the significant influence of reinforcement on bearing capacity, it also greatly improves the initial modulus of subgrade. When the allowable load is reached, it can still maintain the integrity of the structure itself.The tensile stress of reinforcement is inversely proportional to the depth. The tensile stress and the lifting rate of the first layer are much greater than those of the other layers.The stress distribution of retaining wall is triangular and increases suddenly at 0.22H.

Key words: geocell; retaining wall; subgrade; bearing capacity

Citation format: HUANG Y C, WU T Y, WANG N, et al. Influence of geocell on capacity of subgrade with retaining walls[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2023, 40(1): 19-24.

收稿日期:2022-05-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(5186802,52168047);江西省自然科学基金资助项目(20202BABL204051)

国内外学者对土工格室的性能、应用等进行了大量的研究[1-5]。在边坡路基中，通过设置不同的加筋层数与铺设间距，所得到的加筋效果不同[6]。相比于常规路基，土工格室加筋垫层路基的破坏模式区别显著，其滑裂面未穿过堤身且发展更深[7]。改变土工格室自身强度或填料属性，以此来进一步影响加筋效果，已有学者对此进行研究并初步总结出其权重因素[8-12]。此外，将土工格室应用于挡土墙中形成加筋挡墙结构，对稳定性提升依然显著[13-14]。在循环荷载作用下，加筋显著降低路基在循环荷载下的永久变形、提高路堤承受循环荷载的能力[15]。在边坡降雨入渗情况下，土工格室的植入依然有效，其防护效果随降雨的持续愈发明显。

余信贵大道是连接贵溪—信江新区—余江三地的都市区主干道，其中象山大桥附近采用了9.0~14.0 m的超高挡土墙，其底部荷载可达250 kPa以上。本文以现场为原型进行模型试验。通过对试验数据的分析，研究土工格室的加入对超高挡土墙填土路基受力性能上的影响，探索土工格室+柔性挡土墙的超高填土路基优化方案。

1 试验方案

1.1 相似准则及试验模型

根据模型箱尺寸选取1:20的相似比，模型试验所用主要材料为实际工程材料，其泊松比μ、重度γ、弹性模量E等参数固定。试验所涉及物理量由量纲分析法确定。

应力σ，位移S表达式分别为

$$\sigma=f(F,E,\mu,l) \tag{1}$$

$$S=f(F,E,\mu,l) \tag{2}$$

式中：l为几何尺寸；F为集中力。

采用指数分析法，得到以下量纲关系

$$[\sigma]=f(F^a,E^b,\mu^c,l^d) \tag{3}$$

经量纲分析

$$[\sigma]=\left[Fl^{-2}\cdot\left(\frac{El^2}{F}\right)^b\cdot\mu^c\right] \tag{4}$$

即

$$\left[\frac{\sigma l^{-2}}{F}\right]=\left[\left(\frac{El^{-2}}{F}\right)\cdot\mu^c\right] \tag{5}$$

得到判断方程

$$\frac{\sigma l^2}{F}=\varphi\left(\frac{El^2}{F}\cdot\mu^c\right) \tag{6}$$

最后，得出相似依据

$$\pi_1=\frac{El^2}{F},\pi_2=\mu,\pi_3=\frac{\sigma l^2}{F} \tag{7}$$

综上推导得到试验所涉相似关系如表1所示。所采用的模型箱尺寸为1000 mm×500 mm×1000 mm（长×宽×高），模型箱壁采用10 mm厚透明有机玻璃面板，以便观察模型的变形情况。

表1 试验相关物理量相似关系

Tab.1 Similarity of test related physical quantities

Physical quantity	Similar constant
Size l	C_l=1/20
Density γ	C_γ=1
Elasticity modulus E	C_E=1
Poisson´s ratio μ	C_μ=1
Stress σ	C_σ=1
Concentrated forces F	C_F=1/400
Displacement S	C_S=1/20

通过粘贴在挡土墙和土工格室上的应变片，采集试验过程中挡土墙和土工格室的应变特征，进一步分析挡土墙和不同层间土工格室的力学变化特征。应变片的布设如图1所示。

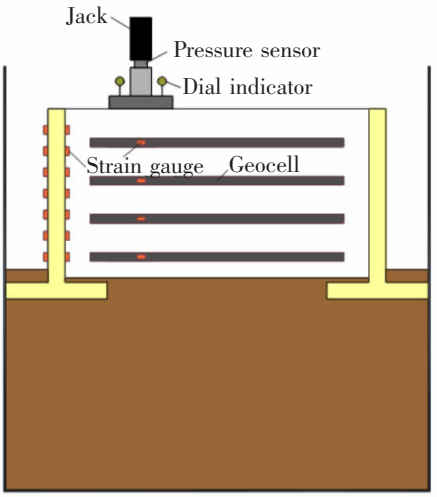


图1 试验装置及传感器布设剖面图

Fig.1 Layout profile of test device and sensor

1.2 试验材料

模型挡土墙采用40 mm厚木板，高度450 mm，木板弹性模量。所用土工格室为HDPE土工格室，其高度和焊距分别为h=20 mm和l=120 mm，经室内拉伸试验所得其伸长率不大于35%，拉伸模量约为442。填土采用南昌赣江地区河砂，其物理力学参

数见表 2。

表 2　颗粒土物理特性参数

Tab.2　Physical characteristic parameters of soil

ρ/(g/cm^3)	ω/%	e	φ/(°)
1.35	2.1	0.55	28.4



图 2　模型土工格室

Fig.2　Model geocell

1.3　试验装置

加载装置采用量程为 20 t 的千斤顶，将其安装于反力架下端，并通过压力传感器作用在 150 mm×200 mm 的承压板上。在承压板两侧安装百分表，以观测路面沉降。

地基土：处理过后的河砂加水振动放入模型箱内，再静置 48 h。

挡土墙：为了尽可能模拟路基平面应变的状态，挡土墙宽度与模型箱宽度相近。

填筑方式：路基按照 50 mm 每层进行分层填筑，再用振实机进行夯实。为了将各个工况的密实度控制在 95%左右，通过填筑体积和填料密度计算出需要填筑的砂土质量为 184 kg 左右。

1.4　试验步骤

试验工况：本试验共设置 4 种工况。工况变量为土工格室在竖直方向上的间距，用 b 表示。根据工程现场采用的土工格室的尺寸和填筑的间距，设定 b=2h，3h，4.5h 和无筋 4 种工况（h 为土工格室高度）。

加载方式：各种工况在填筑完成，以 40 kPa 的初始值和 40 kPa 的加载增量模拟单车道加载，每级加载记录 t=0，10，20，30，45，60 min 时的沉降，之后半个小时记录一次数据，当连续两个小时内，每小时的沉降量小于 0.05 mm 时即可进行下一级加载。

破坏准则：参考《公路路基设计规范》，当沉降大于 15 mm 时，即视为破坏。若沉降还未达到 15 mm时加载出现峰值，则认为路基已达到最大容许承载力。

2　试验结果及分析

2.1　荷载–沉降位移曲线

图 3 所示为本次试验 4 种工况的荷载–沉降位移曲线。可知，加筋层数增加对挡土墙路基承载力的提高依然显著。相比于无筋路基，4.5h、3h、2h 间距加筋路基在沉降达到 15 mm 时所受荷载分别提高了 32.5%、60%、100%。土工格室发挥其三维“网兜”效应，一方面通过约束土体的横向变形，提高竖向承载力，另一方面邻近单元格室相互平衡，加之土工格室壁上的粗糙纹理，使得土–筋界面的摩阻力有效抑制室内土体移动，从而有效地控制了竖向变形。在初始的 40 kPa 作用下，只有无筋路基和 4.5h 间距加筋路基产生沉降，分别为 0.653 mm 和 0.454 mm。荷载达 200 kPa 以后，b=2h 和 b=3h 工况路基沉降方才达到 1 mm 以上，说明高密度加筋路基显著提高路基的初始模量。

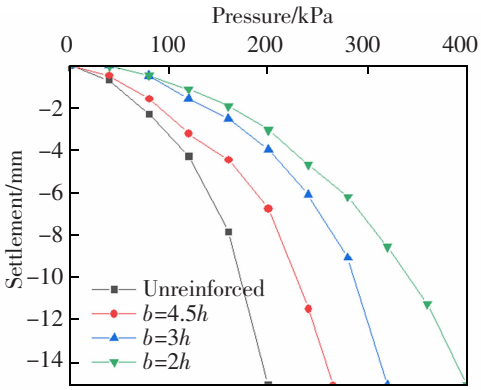


图 3　荷载–沉降位移曲线

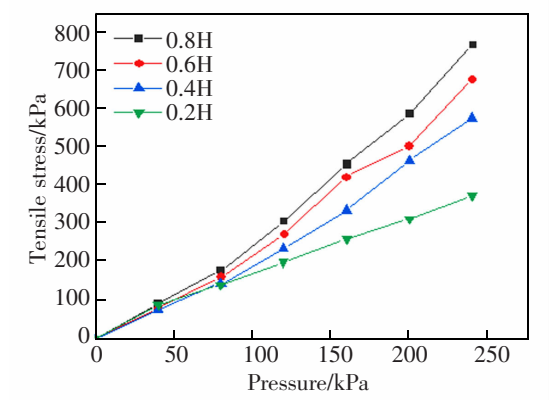
Fig.3　Pressure–settlement curves

荷载的施加位置为单侧车道加载，4 种工况在加载到规范中的容许承载力时，均为路面发生沉降，挡土墙未出现明显的整体破坏。仅在无筋工况下，挡土墙发生转动，转动角度约为 0.012 2 rad。说明土工格室起到了束缚土体横向移动的作用，以此减小墙背土压力。

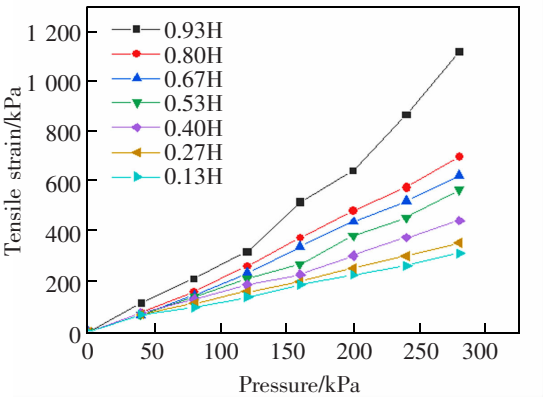
2.2　土工格室上的应力

图 4 为 3 种不同工况下，不同层间土工格室拉应力随加载值演化的规律曲线，其中，H 表示挡土墙高度。

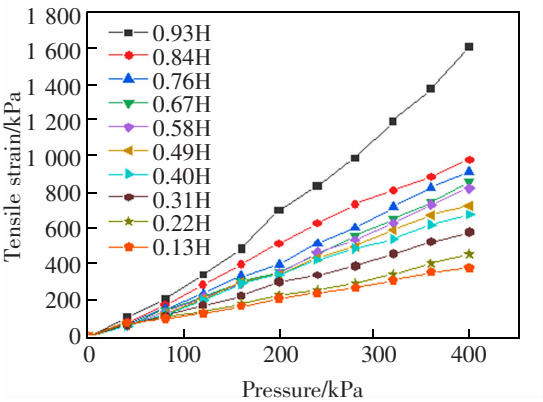
从图 4 可以看出，在荷载作用下应力的分布随深度成反比递减，所以由浅层到深层格室所受拉应



(a) b=4.5h



(b) b=3h



(c) b=2h

图 4 不同工况下格室拉应力规律

Fig.4 Geocell tensile stress pattern under different working conditions

力越来越小。观察发现随加载等级提高,首层格室拉应力在增加速率上明显大于其余层,这是由于首层直接接受上部荷载所传递的应力,而其余层均有上层格室为其弱化这一应力,可见对于首层格室的强度把控具有极大的工程意义。在加载后期浅层格室拉应力提升速率要大于前期,分析原因,在加载初期,仅浅层路基有明显变形,而在变形较低处,上部荷载仅对格室起到填料的致密化作用,此时格室壁上存在的应变极少。而随着荷载的增大,水平压力分布导致格室中拉应力的移动。

图 5 为两种不同工况在前 6 级荷载下 0.4H 和 0.8H 处筋材受力对比。其中,随着加筋密度的提高,单个筋材所受力均有减少。具体表现为在 240 kPa 作用下,b=3h 相比于 b=4.5h 在 s=0.8H 和 s=0.4H 处所受拉应力分别减小了 24.7%和 34.6%。可见土工格室所受拉应力可以限制垂直分量进一步往下移动,从而各层格室所受拉应力均有衰减,衰减效果与加筋密度呈正相关。

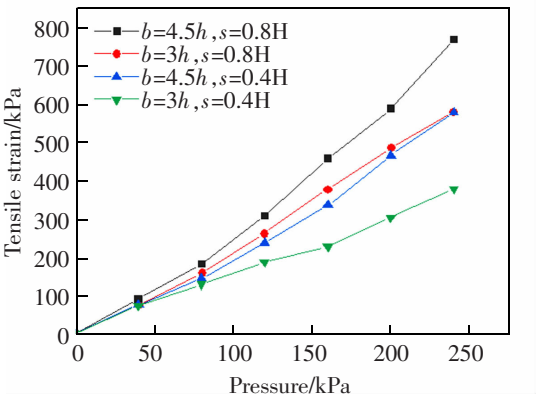


图 5 不同工况相同高度格室拉应力对比

Fig.5 Comparison of geocell tensile stress at the same height under different working conditions

2.3 挡土墙上的应力

图 6 为此结构作用在局部荷载情况下,挡土墙弯矩沿墙高分布规律。可以发现,挡墙受力整体呈三角形规律分布,而在 2/9H 处,弯矩发生突变。这是因为土中的应力扩散作用将顶部的荷载所产生的土体应力主要辐射在 2/9H 周边,其余部位所受顶部荷载的影响较小。这一现象与一种计算顶部作用荷载时的墙背土压力的近似方法结论相吻合(图 7),该近似方法认为当路面作用均布荷载 q 时,该荷载只对一定范围内的墙背土压力分布产生影响。该范围两端点与局部荷载两端点连线的角度为 $\varphi/2+45°$,通过计算得出其角度为 57°,与理论值相近,与 Chen[20]所得出结论类似,即加筋土与未加筋土主要存在粘聚力的差异,加筋前后的内摩擦角不会引起较大变化。

图 8 为 200 kPa 作用下不同工况间挡墙弯矩。对比发现,4 种工况在相同荷载作用下,土体对挡土墙的作用所产生的弯矩值不同。以最大处 2/9H 为

例，2h、3h、4.5h 间距加筋下作用 200 kPa 荷载时，其所产生弯矩相比于无筋路基分别减小 8.28%、16.43%、29.97%。可知筋材的铺设提高了土体抗剪强度。

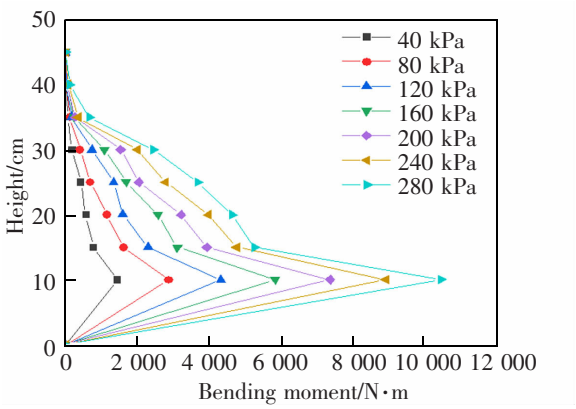


图 6　挡土墙弯矩分布规律

Fig.6　Bending moment distribution pattern of retaining wall

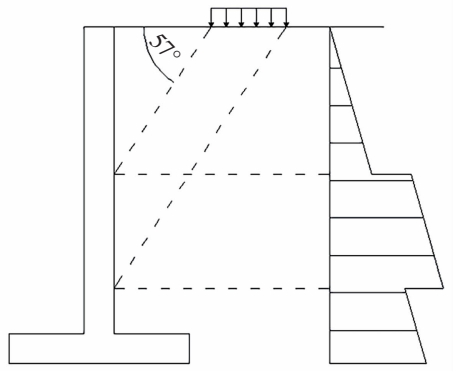


图 7　局部作用荷载时土压力计算示意图

Fig.7　Schematic diagram of earth pressure calculation under local load

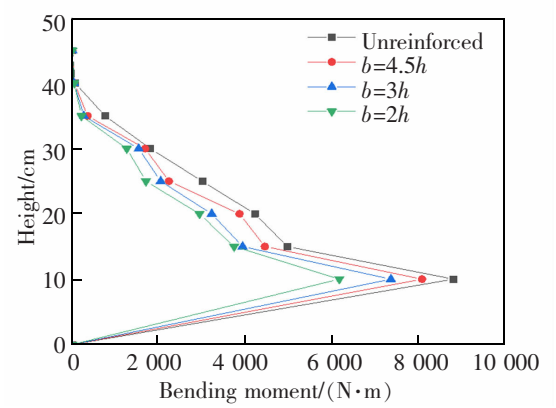


图 8　200 kPa 荷载下不同工况间挡墙弯矩对比

Fig.8　Comparison of retaining wall bending moment under different working conditions under 200 kPa load

3　结论

1）在挡土墙路基中铺设土工格室除了对路基承载力有明显提升以外，其对于路基的初始模量的提升也十分明显。

2）基于正常使用极限状态下，路面沉降达到了容许值，无筋路基仅墙体发生转动，而加筋路基仍能保持结构的整体性，证实植入土工格室的优越性。

3）格室所受拉应力由浅层到深层越来越小，首层格室从拉应力和提升速率上均远大于其余层。随着加筋层数越密集，相同荷载下单层筋材受到的应变就越低。

4）试验所得挡土墙受力呈三角形分布，在 0.22H 处有突变。所得结果与顶部作用荷载时的土压力计算结论类似，说明加筋并不会显著改变砂土路基的内摩擦角，但对于填土抗剪强度提高明显。

参考文献：

[1] 戴治恒，张孟喜，侯娟，等. 高强格室和格栅格室加筋地基的试验对比[J]. 上海大学学报(自然科学版)，2019，25(5)：796-806.
DAI Z H，ZHANG M X，HOU J，et al. Experimental comparative study of new lock enhanced integral geocell and geogrid mesh elements reinforced foundation[J]. Journal of Shanghai University(Natural Science Edition)，2019，25(5)：796-806.

[2] 郑超毅，张孟喜，姜圣卫，等. 高强土工格室加筋砂地基模型试验变形分析[J]. 上海大学学报(自然科学版)，2015，21(5)：606-616.
ZHENG C Y，ZHANG M X，JIANG S W，et al. Deformation analysis of model test of sand foundation reinforced with high-strength geocell[J]. Journal of Shanghai University (Natural Science Edition)，2015，21(5)：606-616.

[3] KARGAR M，HOSSEINI S M. Influence of reinforcement stiffness and strength on load-settlement response of geocell-reinforced sand bases[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering，2018，22(5)：596-613.

[4] 侯娟，张孟喜，韩晓，等. 单个高强土工格室作用机理的有限元分析[J]. 岩土工程学报，2015，37(S1)：26-30.
HOU J，ZHANG M X，HAN X，et al. Mechanism of a high-strength geocell using FEM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2015，37(S1)：26-30.

[5] 杨广庆，左政，刘英，等. 土工格室条带拉伸力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报，2021，43(4)：760-767.
YANG G Q，ZUO Z，LIU Y，et al. Experimental investiga-

tions on tensile mechanical properties of geocell strips[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2021,43(4):760–767.

[6] 王选仓,丁龙亭,付林杰,等. 基于离心模型试验的土工格室对路基稳定性影响研究[J]. 公路工程,2019,44(5):210–215.
WANG X C,DING L T,FU L J,et al. Influence of geocell on subgrade stability based on centrifugal model test[J]. Highway Engineering,2019,44(5):210–215.

[7] 金家庆,徐超,梁程,等. 土工格室加筋垫层路堤破坏模式和稳定性评价[J]. 水文地质工程地质,2019,46(1):86–94.
JIN J Q,XU C,LIANG C,et al. Failure mode and stability evaluation of geocell–reinforced cushion embankment[J]. Hydrogeology and Engineering Geology,2019,46(1):86–94.

[8] 邓鹏,郭林,蔡袁强,等. 考虑填料–土工格室相互作用的加筋路堤力学响应研究[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(3):621–630.
DENG P,GUO L,CAI Y,et al. Mechanical behavior of reinforced embankment considering interaction between grav el and geocell[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2015,34(3):621–630.

[9] 晏长根,顾良军,杨晓华,等. 土工格室加筋黄土的三轴剪切性能[J]. 中国公路学报,2017,30(10):17–24.
YAN C G,GU L J,YANG X H,et al. Triaxial shear behavior of geocell reinforced loess[J]. China Journal of Highway and Transport,2017,30(10):17–24.

[10] 孙州,张孟喜,姜圣卫. 条形荷载下土工格室加筋砂土路堤模型试验研究[J]. 岩土工程学报,2015,37(S2):170–175.
SUN Z,ZHANG M X,JIANG S W. Model tests on sand embankment reinforced with geocell subjected to strip loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2015,37(S2):170–175.

[11] 彭艾鑫,张孟喜,朱华超. 高强土工格室加筋砂土性状的三轴试验[J]. 上海大学学报(自然科学版),2017,23(4):590–599.
PENG A X,ZHANG M X,ZHU H C. Triaxial test of high strength geocell reinforced soil[J]. Journal of Shanghai University(Natural Science Edition),2017,23(4):590–599.

[12] 彭贤清,夏帅帅. 土工格室选型对挡土墙边坡稳定性的影响研究[J]. 公路,2020,65(10):11–17.
PENG X Q,XIA S S. Study on the influence of geocell type selection on slope stability of retaining wall[J]. Highway,2020,65(10):11–17.

[13] 王启龙,杨晓华,晏长根. 路肩式土工格室柔性挡墙受力及变形分析[J]. 铁道科学与工程学报,2017,14(5):980–987.
WANG Q L,YANG X H,YAN C G. Analysis of the stress and deformation characteristics of geocell flexible retaining wall for subgrade shoulders[J]. Journal of Railway Science and Engineering,2017,14(5):980–987.

[14] SUKU L,PRABHU S S,RAMESH P,et al. Behavior of geocell–reinforced granular base under repeated loading[J]. Transportation Geotechnics,2016,9(12):17–30.

[15] 高昂,张孟喜,刘芳等. 分级循环荷载下土工格室加筋路堤模型试验研究[J]. 岩土力学,2016,37(8):2213–2221.
GAO A,ZHANG M X,LIU F,et al. Model experimental study of embankment reinforced with geocells under stepped cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics,2016,37(8):2213–2221.

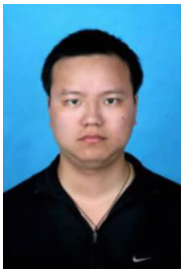
[16] DASH S K,SAIKIA R,NIMBALKAR S. Contact pressure distribution on subgrade soil underlying geocell reinforced foundation beds[J]. Frontiers in Built Environment,2019(5):137.

[17] ARIAS J L,INTI S,TANDON V. Influence of geocell reinforcement on bearing capacity of low–volume roads[J]. Transportation in Developing Economies: A Journal of the Transportation Research Group of India (TRG),2020,6(420):1–10.

[18] 曾龙辉,江辉,黄海清,等. 人工降雨条件下土工格室抗侵蚀性能试验研究[J]. 人民长江,2017,48(10):9–12.
ZENG L H,JIANG H,HUANG H Q,et al. Experimental study on erosion resistance of geocell under artificial rainfall[J]. Yangtze River,2017,48(10):9–12.

[19] 徐鑫洋,金超奇,祝俊华,等. 高铁悬臂式挡墙路基对既有路基变形控制研究[J]. 华东交通大学学报,2022,39(1): 19–28.
XU X Y,JIN C Q,ZHU J H,et al. Study on deformation control of existing roadbed with cantilever retaining wall of high–speed railway[J]. Journal of East China Jiaotong University,2022,39(1):19–28.

[20] CHEN R H,HUANG Y W,HUANG F C. Confinement effect of geocells on sand samples under triaxial compression [J]. Geotextiles and Geomembranes,2013,37:35–44.



第一作者:黄玉纯(1983—),男,高级工程师,硕士,注册土木工程师(岩土、道路),研究方向为市政道路、公路路基支挡及边坡稳定性。E-mail:35647532@qq.com。

(责任编辑:吴海燕 姜红贵)