

土工格栅在道路基层中优化设置探讨

Discussion on the Optimal Setting Position of Geogrid in Road Base

冯 伟

(上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司海南分公司, 海南 海口 570100)

摘要: 为有效提升土工格栅加固层的承载力, 考虑循环荷载作用, 针对两种基层厚度和三个不同半径的圆形加载区域, 变化土工格栅的埋置深度, 综合采用三维有限元分析方法和理论分析方法进行土工格栅在道路基层中的优化设置分析。结果表明: 无论基层厚度如何, 当土工格栅埋置深度为 $1/2$ 加载区域半径时, 基层抗变形能力最强; 当土工格栅埋置深度位于最大竖向应变位置时, 道路基层厚度可以适当减少; 当土工格栅置于骨料基层和路基之间的界面时, 土工格栅加固效果会大打折扣。

关键词: 土工格栅; 道路基层; 有限元; 循环荷载; 优化设置

中图分类号: U416 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249(2024)04-0142-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.04.026

FENG Wei

(Shanghai Municipal Engineering Design and Research Institute (Group) Co., Ltd. Hainan Branch, Haikou 570100, China)

Abstract: To effectively enhance the bearing capacity of geogrid reinforcement layers under cyclic loading, this study investigates the optimal placement of geogrids in road subgrades considering two subgrade thicknesses and circular loading areas of three different radii. A comprehensive analysis using three-dimensional finite element analysis and theoretical methods is conducted. The results indicate that, regardless of subgrade thickness, the strongest resistance to deformation in the subgrade occurs when the geogrid is buried at a depth equal to half the radius of the loading area; If the geogrid is placed at the position of maximum vertical strain, the thickness of the road subgrade can be appropriately reduced; Placing the geogrid at the interface between the aggregate base and the subgrade significantly diminishes its reinforcement effectiveness.

Keywords: geogrid; road base; finite element analysis; cyclic load; optimize settings

0 引言

土工格栅优良的物理和力学性能, 已被广泛用于路堑边坡的加固和道路加固。明确土工格栅的加

固机理, 对其更好的在工程中推广应用具有很重要的意义。国内外学者进行了相关的研究工作, 郭忠印^[1]采用现场实测方法明确了土工格栅对路堑边坡的加固机理; 张忠岐等^[2]在水泥混凝土面板和沥青混凝土面层间铺设土工合成材料组成复合式路面, 以防止反射裂缝产生; 方彦等^[3]以一个旧路拓宽高路堤工程为背景, 采用有限元方法分析了土工格栅在防止路基不均匀沉降方面的作用; Chen 等^[4]采用室内模型试验方法探究了循环荷载作用下土工格栅加固软土路基的性能, 研究表明在路基和基层界面

作者简介: 冯 伟 (1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 城市道路设计及研究。

收稿日期: 2023-07-14

加入土工格栅可显著提高软土路基的性能。为了明确土工格栅提高道路性能的机理, Al-Qadi 等^[5]通过现场实测手段探究了土工格栅在提高道路性能方面的作用, 研究表明土工格栅主要是通过减少纵向剪切变形和横向剪切变形来实现道路性能的提高; Sun 等^[6]采用试验方法评估了土工格栅对骨料基层和路基弹性变形和径向应力的影响, 试验结果表明土工格栅加入减少了基层和路基的永久变形, 并改变了基层和地基内的径向应力分布; Fannin 等^[7]采用现场试验方法比较了三种土工织物和一种土工格栅在加固软土路基方面的性能; Cote 等^[8]采用现场试验方法比较了两种土工布和两种土工格栅在加固软土路基方面的性能; Tang 等^[9]采用原位试验方法对比了土工格栅和土工布在加固软土路基上的效果, 结果表明土工合成材料加固效果主要体现在减少路面结构永久变形方面, 路基的回弹性能基本不受土工合成材料的影响。为了明确三角孔土工格栅加筋基层在动态荷载作用下的性能以及基层厚度对三角孔土工格栅加固效果的影响, Qian 等^[10]采用室内模型箱试验进行了相关的测试, 试验结果表明与原始无加固基层相比, 三角形土工格栅减少了界面处的永久变形和最大垂直应力, 改善了不同厚度骨料基层的性能。综合已有的加固机理研究成果可以看出, 土工格栅可以很好地起到应力扩散和减小永久变形的作用。彭官成^[11]以一个旧路拓宽工程为背景, 采用有限元分析方法分析了土工格栅的层间距、土工格栅的抗拉强度对被加固路基的稳定性影响; 汪益敏等^[12]采用研制的模型试验系统探究了土工格栅加铺层数对软土拼接路堤力学性能的影响, 结果表明增加层数对控制沉降和减小竖向应力有极大作用; Abu-Farsakh 等^[13]采用三轴试验方法研究了土工格栅的几何结构、弹性模量等对加固效果的影响, 研究表明土工格栅的几何形状和拉伸模量对加固效果具有显著影响, 三角形形状、高弹性模量的土工格栅更优。Palmeira 等^[14]采用循环荷载试验对比了有土工格栅加固和无土工格栅加固路基的力学性能, 结果表明土工格栅的抗拉刚度对加固效果有至关重要的影响; Leng 等^[15]采用有限元计算方法研究将土工格栅安置于骨料基层和土基之间土工格栅对路基加固的效果, 结果表明, 减小骨料基层厚度、

减小骨料基层与土基模量比可以有效提升土工格栅的加固效果; Hufenus 等^[16]采用全尺寸现场试验研究土工合成材料对软土路基的加固效果, 研究表明土工合成材料只有设置在薄骨料层下时才能具有较强的加固效果, 而且加固效果主要取决于土工合成材料的刚度; Saad 等^[17]采用有限元数值计算方法研究土工格栅的三个安置位置对加固效果的影响, 研究表明在基底-沥青混凝土界面处安置土工格栅可最大限度地降低疲劳应变, 在薄层基底中安置土工格栅加固效果最优, 当土工格栅安置在离底部 1/3 基底厚度的高度时, 路面永久变形降幅最大。

土工格栅设置于道路基层时, 土工格栅设置在何处能最大限度的发挥其力学性能, 从而对道路基层起到更好的加固作用, 国内外对该问题较少进行深入系统的研究。为了更好地指导工程实践, 采用有限元计算方法开展土工格栅在道路基层中的优化设置研究, 以明确土工格栅在道路基层中的最佳位置, 更好地指导后续相关工作。

1 土体本构模型

由于土体小应变硬化本构模型能够考虑土壤刚度对应变水平的非线性依赖, 可以考虑围压增加而导致的土体刚度硬化效应, 因此主要采用该本构模型。在土体小应变硬化本构模型中, 轴向偏差应力 q 和轴向应变 ε_1 之间的关系^[18]为

$$-\varepsilon_1 = \frac{1}{E_i} \frac{q}{1 - q/q_a} \quad q < q_f \quad (1)$$

$$\text{其中, } q_a = \frac{q_f}{R_f}, E_i = \frac{2E_{50}}{2 - R_f}$$

式中: q_f 为极限剪应力; q_a 为剪切强度的渐近值; E_i 为初始切线弹性模量; R_f 为破坏强度比; E_{50} 为依赖于应力的刚度模量, 具体为

$$E_{50} = E_{50}^{\text{ref}} \left(\frac{c \cos \varphi - \sigma'_3 \sin \varphi}{c \cos \varphi + p^{\text{ref}} \sin \varphi} \right)^m \quad (2)$$

式中: p^{ref} 为参考围压, 可以取值为 100 kPa; E_{50}^{ref} 为与参考围压 p^{ref} 相对应的参考刚度模量; m 为应力依赖性强弱的模型参数; c 和 φ 分别为土体的黏聚力和内摩擦角; σ'_3 为有效小主应力。

土体小应变硬化本构模型所采用的剪应力 τ 与剪

应变 γ 之间关系^[18]为

$$\tau = G_s \gamma = \frac{G_0}{1 + 0.385 \left| \frac{\gamma}{\gamma_{0.7}} \right|} \quad (3)$$

$$G_0 = G_0^{\text{ref}} \left(\frac{c \cos \varphi - \sigma'_3 \sin \varphi}{c \cos \varphi + p^{\text{ref}} \sin \varphi} \right)^m \quad (4)$$

式中： G_s 为剪切模量； $\gamma_{0.7}$ 为初始剪切模量降低到初始值 70% 所对应的剪应变； G_0 为初始剪切模量依赖于应力水平； G_0^{ref} 为与参考围压 p^{ref} 相对应的参考剪切模量。

2 材料参数

2.1 骨料基层和路基参数

为了便于验证有限元计算结果的有效性，采用现场原位测试模型的材料进行数值模拟。原位模型中将厚度 203 mm 的 IV 级骨料基层置于土工格栅上，以稳定软土路基；原路基为两层土基。骨料基层和土基的材料参数见表 1。具体计算中骨料基层厚度分 203 mm 和 305 mm 两种情况。

表 1 骨料基层和土基的材料参数

Table 1 Material parameters of aggregate base and soil base			
参数	骨料基层	上层土基	下层土基
厚度/mm	203 或 305	610	3760
$\gamma_{\text{moist}} / (\text{kN}/\text{m}^3)$	23	20	19
$E_{50}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	200	75	48
$E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	180	75	24
$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	400	150	150
m	0.64	0.50	1.00
v_{ur}	0.20	0.20	0.20
$E_0^{\text{ref}}/\text{MPa}$	800	360	550
$\gamma_{0.7}/\%$	0.05	0.001	0.003
φ'	43	25	26
c'/s_u	0	13.8	193
R_f	0.90	0.90	0.90

2.2 土工格栅参数

土工格栅视为线弹性材料，当应变取值为 5% 时轴向弹性刚度 5% 取值为 240 kN/m。土工格栅和骨料基层或路基之间定义界面层，界面层的强度折减因子取值为 1.0。

3 循环荷载

采用的循环荷载形状如图 1 所示，加载区域为半

径 147 mm 的圆形区域，对应的路面上的轮胎压力为 590 kPa，轴载为 80 kN。经过试算 100 个加载周期后路面变形基本达到一个恒定值。因此，为了使计算效率更高，模拟计算中均采用 100 周期计算。

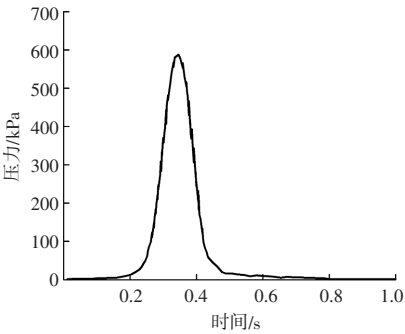


图 1 循环荷载形状
Fig. 1 Cyclic load shape

4 模型几何尺寸

如图 2 所示，考虑到消除边界效应和防止反射波对荷载影响区域造成叠加影响^[18]，模型在 X 和 Y 方向均为 3050 mm，在 Z 方向为 4570 mm。为了防止反射波对荷载影响区域造成叠加影响，在 X_{max} 、 Y_{max} 和 Z_{min} 对应的平面上设置黏弹性边界，以吸收应力波，避免其反射波对荷载影响区域造成叠加影响。具体的边界条件设置见表 2。

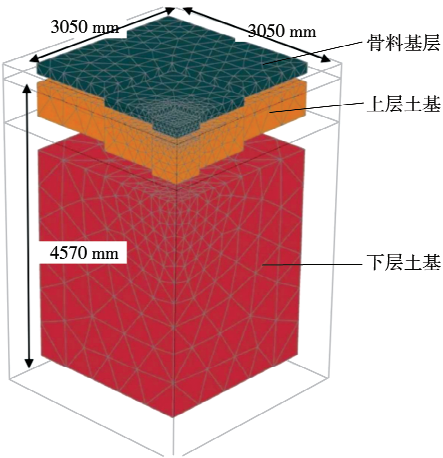


图 2 数值计算几何模型
Fig. 2 Numerical computational geometry model

为了消除有限元计算中的网格大小对计算结果的影响，即降低网格敏感性^[19]，将计算模型分成骨料基层、上层土基和下层土基三层，通过试算表明当采用 16832 个单元时可以大大降低网格敏感性，因此计算采用 16832 个单元。

表 2 几何边界

Table 2 Geometric boundary

边界面	约束类型
X_{min}	法向约束
X_{max}	法向约束
Y_{min}	法向约束
Y_{max}	法向约束
Z_{min} (底面)	完全约束
Z_{max} (顶面)	自由

5 计算结果及分析

当骨料基层厚度为 203 mm 和 305 mm 时，通过改变土工格栅的位置研究土工格栅在骨料基层中的最佳加固位置，土工格栅的加固位置见表 3，对每种骨料基层厚度对应三种加载半径，每种加载半径对应 5 种加固位置深度，相应的土工格栅的加固位置所处的深度与骨料基层厚度的比值也有 5 种情况。在具体计算中考虑了圆形加载区域的变化，分别取 76、152 和 305 mm，每种工况计算完成后提取地表变形。

表 3 加固深度表

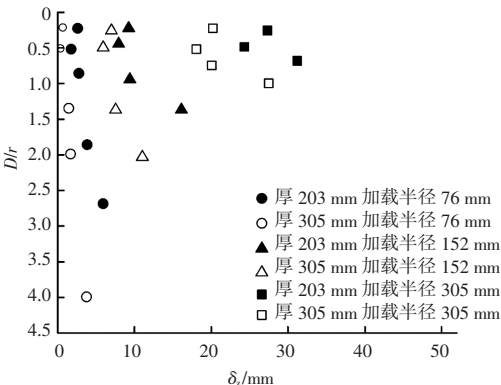
Table 3 Reinforcement depth table

厚度 /mm	加载半 径/mm	深度与厚度的比值				
		A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
203	76	1.00	0.69	0.31	0.08	0.19
	152	1.00	0.69	0.31	0.13	—
	305	1.00	0.69	0.31	—	—
305	76	1.00	0.50	0.33	0.13	0.05
	152	1.00	0.67	0.25	0.13	—
	305	1.00	0.75	0.50	0.25	—

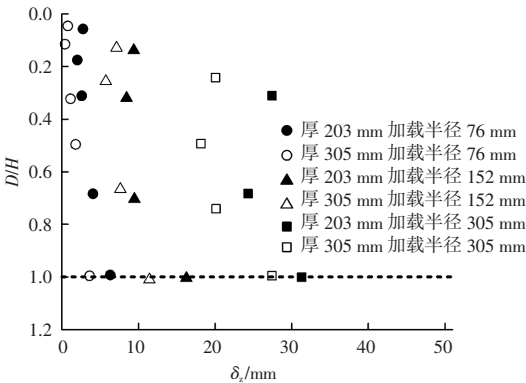
5.1 土工格栅位置影响分析

如图 3 所示，当加固深度 D 与加载半径 r 之比 D/r 约为 0.5 时，不论对 203 mm 骨料基层和 305 mm 的骨料基层，路面永久变形均为最小。土工格栅加固效果最优位置主要取决于加载半径，与骨料基层厚度关系不大。与土工格栅置于骨料基层和上层土基之间的相比，将其置于 $1/2$ 加载半径深度处，可以显著降低路面永久变形。

当不采用土工格栅加固，骨料基层厚度为 203 mm 时，在不同的加载半径下，骨料基层竖向应变随深度的变化如图 4 所示。从图中可以明显看出，最大竖向应变发生在大约 $1/2$ 加载半径深度处，因此可以考虑将土工格栅放置在与最大垂直应变相对应的深度处，即放置于 $1/2$ 加载半径的深度处，以提高土工格栅的加固效果。



(a) 加固深度与加载半径之比



(b) 加固深度与骨料基层厚度之比

图 3 路面永久变形随加固情况的变化

Fig. 3 Changes in Permanent Deformation of Road Surface with Reinforcement Conditions

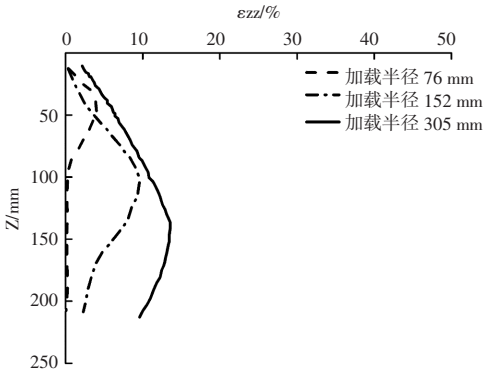


图 4 未加固情况下骨料基层竖向应变随深度的变化

Fig. 4 The variation of vertical strain of aggregate base layer with depth without reinforcement ss

5.2 土工格栅拉力分析

在每种工况下进行循环荷载后，土工格栅受到拉力。为了在计算土工格栅拉力时考虑竖向位移的影响，可以先按照下式计算土工格栅受拉伸后的长度：

$$L_2 = \sqrt{[L_1 + (U_{x2} - U_{x1})]^2 + (U_{z2} - U_{z1})^2} \quad (5)$$

式中： L_1 为受拉前的长度； U_{x1} 和 U_{x2} 分别为土工格栅受拉前后的轴向位移； U_{z1} 和 U_{z2} 分别为土工格栅受

道桥技术

拉前后的竖向位移。相应的，土工格栅轴向应变 ε 和轴向拉力 F 为：

$$\varepsilon = \frac{L_2 - L_1}{L_1} \tag{6}$$

$$F = EA\varepsilon \tag{7}$$

经历 100 次荷载循环后，土工格栅计算所得最大拉力如图 5 所示。从图中可以明显看出，当在发生最大垂直应变的深度采用土工格栅进行加固时，即将土工格栅置于 1/2 加载半径对应的深度位置时，会产生更大的拉力，此时对应的路面永久变形应是最小的。

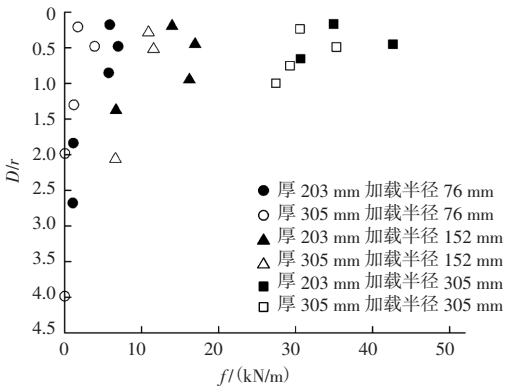


图 5 最大拉力随加固深度与加载半径之比的变化
Fig. 5 The variation of maximum tensile force with the ratio of reinforcement depth to load radius

5.3 加固效果评估

为了定量化评估土工格栅加固效果，定义如下的加固效率系数

$$\eta = \frac{\delta_u - \delta_r}{\delta_u} \times 100\% \tag{8}$$

式中： δ_u 和 δ_r 分别为无土工格栅加固和有土工格栅加固分别对应的路面永久变形。当加载半径、加固深度、骨料基层厚度变化时，加固效率计算结果如图 6 所示。从图中可以看出，骨料基层厚度越薄，土工格栅加固效果越明显；如果不在适当的位置进行土工格栅的安置，土工格栅的加固效果可能会大打折扣。当加固深度与加载半径之比为 0.5 时对应最佳的加固位置，此时土工格栅的加固效率可以从小于 5% 显著提高到大于 70%。

6 结论

为了明确土工格栅在道路基层中的优化设置问

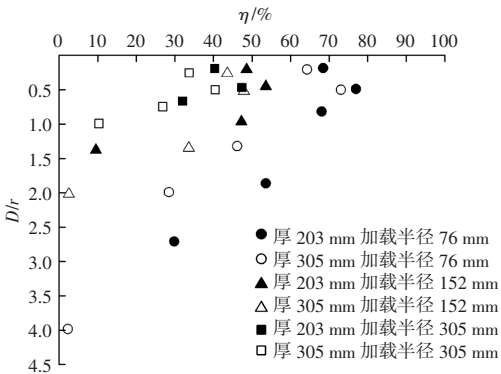


图 6 加固效率系数随加固深度与加载半径之比的变化
Fig. 6 The variation of reinforcement efficiency coefficient with the ratio of reinforcement depth to loading radius

题，采用有限元分析方法，结合理论分析方法进行了土工格栅在道路基层中的优化设置位置分析，明确了土工格栅埋置深度对基层抗变形能力和加固效率的影响。得到以下结论：

- (1) 无论骨料基层如何变化，当土工格栅埋置深度为 1/2 加载区域半径时，路面永久变形最小。
- (2) 将土工格栅安置于最大竖向应变对应的深度时，土工格栅会产生更大的拉力，相应的路面永久变形更小，实际工程实践中习惯将土工格栅置于骨料基层和土基之间，这是不合理的。
- (3) 骨料基层厚度越薄，土工格栅加固效果越明显；当加固深度与加载半径之比为 0.5 时对应最佳的加固位置，此时土工格栅的加固效率大于 70%。

参 考 文 献

[1] 郭忠印. 土工格栅加筋土路堑边坡现场工程特性的测定 [J]. 国外公路, 1995 (1): 52-55.
[2] 张忠岐, 吴江龙, 狄谨. 土工合成材料在武黄高速公路路面改造中的应用 [J]. 公路, 2009 (8): 135-137.
[3] 方彦, 孙宝志, 王福和, 等. 土工格栅处治旧路拓宽路堤不均匀沉降的有限元模拟 [J]. 公路交通科技 (应用技术版), 2008, 44 (8): 11-13, 16.
[4] CHEN Q, ABU-FARSAKH M, TAO M. Laboratory evaluation of geogrid base reinforcement and corresponding instrumentation program [J]. Geotechnical Testing Journal, 2009, 32 (6): 516-525.
[5] AL-QADI I L, DESSOUKY S H, KWON J, et al. Geogrid-reinforced low-volume flexible pavements: pavement response and geogrid optimal location [J]. Journal of Transportation Engineering, 2012, 138 (9): 1083-1090.
[6] SUN X, HAN J, KWON J, et al. Radial stresses and resilient deformations of geogrid-stabilized unpaved (下转第 163 页)

基沉降变形的预测。经实验证明, 所提方法的预测结果有效可靠, 能够客观地反映出地基沉降变形的发展态势, 能够满足较高的预测准确度, 对工程施工的安全性具有参考意义。

参 考 文 献

- [1] 赵文娇. 无人机摄影测量技术在地形图测绘中的应用 [J]. 数字通信世界, 2022 (9): 115–117.
- [2] 曾瑞. 基于自适应参数 GM (1, 1) 模型的地基沉降预测 [J]. 技术与市场, 2021, 28 (7): 72–73.
- [3] 卢西魁, 聂久添, 姜放. 基于数字化测绘技术的湿软地基沉降变形量预测方法 [J]. 自动化技术与应用, 2021, 40 (9): 130–133, 151.
- [4] 郭凯, 汪旭波, 杨荣欣. 无人机倾斜摄影测量技术在大比例尺地形图测绘中的应用 [J]. 测绘与空间地理信息, 2022, 45 (增刊1): 256–258, 261.
- [5] 李连涛. 基于无人机低空遥感技术的矿山地形图测绘研究 [J]. 世界有色金属, 2022 (12): 31–33.
- [6] 弓文军. 无人机测绘技术用于工程测量的实践研究 [J]. 大陆桥视野, 2022 (8): 133–135.
- [7] 李琦. 无人机技术在矿山测绘中的应用研究 [J]. 工程设计与设计, 2022 (11): 158–160.
- [8] 张光军, 苗琦超. 无人机遥感技术在测绘测量工程中的运用 [J]. 电子测试, 2022, 36 (11): 123–125.
- [9] 张雪. 多旋翼无人机测绘技术在矿山测量中的应用 [J]. 世界有色金属, 2022 (11): 19–21.
- [10] 郑其立. 无人机航测技术在铁路带状地形测绘中的应用研究 [J]. 工程与建设, 2022, 36 (2): 318–319.
- [11] 陈庆伟, 杨臻, 谢丹, 等. 软土地基变电站沉降监测与预测分析 [J]. 广东电力, 2022, 35 (3): 124–131.
- [12] 王俊瑜, 张绪涛, 崔伟, 等. 最优组合沉降预测模型的构建及工程应用 [J]. 建筑结构, 2021, 51 (增刊2): 1624–1628.
- [13] 杜凯, 邓建华, 咎彩平. 地基沉降变形预测方法的研究 [J]. 中国水运 (下半月), 2021, 21 (12): 123–125.
- [14] 吴云恩. 无人机技术在测绘工作中的应用研究 [J]. 产业创新研究, 2022 (14): 145–147.
- [15] 张甲振. 基于 Asaoka 法的非饱和土地基沉降预测分析 [J]. 公路, 2021, 66 (8): 316–318.
- [16] roads under cyclic plate loading tests [J]. Geotextiles & Geomembranes, 2015, 43 (5): 440–449.
- [7] FANNIN R J, SIGURDSSON O. Field observations on stabilization of unpaved roads with geosynthetics [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 122 (7): 544–553.
- [8] COTE B, ROBINSON B, PYO S, et al. Laboratory performance comparison of stabilized undercut subgrade under cyclic loading [J]. Geotechnical Testing Journal, 2010, 33 (6): 102935.
- [9] TANG X, ABU-FARSAKH M, HANANDEH S, et al. Performance of reinforced – stabilized unpaved test sections built over native soft soil under full – scale moving wheel loads [J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2015: 81–89.
- [10] QIAN Y, HAN J, POKHAREL S K, et al. Performance of triangular aperture geogrid – reinforced base courses over weak subgrade under cyclic loading [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2013, 25 (8): 1013–1021.
- [11] 彭官成. 旧路拓宽中土工格栅合理布置研究 [J]. 公路交通科技 (应用技术版), 2008, 44 (8): 19–21.
- [12] 汪益敏, 闫岑, 于恒, 等. 静载作用下土工格栅加筋拓宽路堤土中应力特征试验研究 [J]. 岩土力学, 2018, 39 (增刊1): 311–317.
- [13] ABU-FARSAKH M, SOUCI G, VOYIADJIS G Z, et al. Evaluation of factors affecting the performance of geogrid – reinforced granular base material using repeated load triaxial tests [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2012, 24 (1): 72–83.
- [14] PALMEIRA E M, GÓNGORA, IVONNE A G. Assessing the influence of some soil – reinforcement interaction parameters on the performance of a low fill on compressible subgrade. Part I: Fill performance and relevance of interaction parameters [J]. International Journal of Geosynthetics & Ground Engineering, 2016, 2 (1): 1.
- [15] LENG J, GABR M A. Numerical analysis of stress – deformation response in reinforced unpaved road sections [J]. Geosynthetics International, 2005, 12 (2): 111–119.
- [16] HUFENUS R, RUEEGGER R, BANJAC R, et al. Full – scale field tests on geosynthetic reinforced unpaved roads on soft subgrade [J]. Geotextiles & Geomembranes, 2006, 24 (1): 21–37.
- [17] SAAD B, MITRI H, POOROOSHASB H. 3D FE analysis of flexible pavement with geosynthetic reinforcement [J]. Journal of Transportation Engineering, 2006, 132 (5): 402–415.
- [18] HOWARD I L, WARREN K A. Finite – element modeling of instrumented flexible pavements under stationary transient loading [J]. Journal of Transportation Engineering, 2009, 135 (2): 53–61.
- [19] 寇卫锋. 含隧道结构复杂回填曲面高陡边坡的地震响应 [J]. 黑龙江科技大学学报, 2022, 32 (1): 58–65.

(上接第 146 页)