

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2017.01.006

软土地基上循环荷载作用下加筋碎石垫层 工作特性分析

何 杰, 高建喜, 孟森松, 王 忍

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 通过模型试验研究了循环荷载作用下土工格栅、土工格室及纯碎石垫层在软土地基上的承载特性; 分析不同工况下沉降、桩身应变及桩土应力比随循环次数、峰值荷载的变化规律。研究表明: 在动荷载条件下, 加筋碎石垫层能有效地限制垫层的位移, 显著减小复合地基的累计沉降; 加筋后的碎石垫层强度和刚度均得到增强, 能有效调节桩-土应力分布, 改善碎石垫层的受力特性, 大幅度提高桩-土应力比, 有效减小桩身应变; 同等条件下, 土工格室碎石垫层对于减小桩顶沉降、提高桩-土应力比和降低桩身应变的性能略优于土工格栅碎石垫层, 并随着循环峰值荷载增加, 两者的作用效果更好。

关键词: 软土地基; 土工格栅; 土工格室; 桩-土应力比; 循环荷载

中图分类号: TU441

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2017)01-0035-06

Analysis of the Operation Performance of Reinforced Gravel Cushion Under Cyclic Loading on Soft Soil Foundations

HE Jie, GAO Jianxi, MENG Sensong, WANG Ren

(School of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: Based on a model testing, a research has been conducted on the load-bearing characteristics of geogrids, geocells and pure gravel cushion on the soft soil foundation under cyclic loading. An analysis has been made of the change regulation of the settlement, the strain of pile and the stress ratio of pile and soil along with cycle times and peak load under different working conditions. The research results show that under the condition of a dynamic loading, the reinforced gravel cushion can effectively limit the displacement of the cushion, and significantly reduce the cumulative settlement of the composite foundation. The strength and stiffness of the reinforced gravel cushion are enhanced, which helps to effectively regulate the distribution of pile-soil stress, improve the stress characteristics of the gravel cushion, and the stress ratio of pile and soil as well, and effectively reduce the strain of the pile. Under the same conditions, the performance of the geocell gravel cushion is slightly better than that of the geogrid gravel cushion in reducing the settlement of pile top, improving the stress ratio of pile and soil and reducing the strain of pile. Meanwhile, with the increase of the cyclic loading, both exhibits much better performance than before.

Keywords: soft soil foundation; geogrids; geocells; stress ratio of pile and soil; cyclic loading

收稿日期: 2016-10-11

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(16JJ5007), 湖南省研究生科研创新基金资助项目(CX2015B571)

作者简介: 何 杰(1976-), 男, 湖南汨罗人, 湖南工业大学教授, 博士, 主要从事地基处理技术的研究,

E-mail: hjhlhjy@yahoo.com.cn

1 研究背景

单一的砂、石垫层,沉降较大,不能满足工程发展需要。为克服散体垫层材料整体刚度低的缺点,工程中通常将土工布、土工格栅、土工格室等土工织物置入砂、石垫层中,形成加筋垫层,从而提高了垫层整体刚度。加筋垫层技术应用于工程中,能产生良好的经济效益,因此很多专家学者对该技术展开了研究。

R. S. Sharma 等^[1]通过对土工格栅加固散体材料桩基础的载荷试验研究,发现土工格栅能有效提高散体材料桩的承载力,减小地基沉降。张旭群等^[2]通过现场单桩静载试验,分析了复合地基垫层的破坏模式,提出了垫层效应的概念,并指出了褥垫层合适厚度。赵川等^[3-4]通过大型三轴排水剪切试验,探讨了加筋碎石土的强度及变形特性,并分析了塑料土工格栅的加筋机理。H. A. Alawaji 等^[5]通过试验分析了土工格栅加筋砂中,土工格栅的蠕变特性及位移速率对土工格栅加筋砂土刚度和承载力的影响,结果表明土工格栅能有效地改善砂土的工作性状。刘毓氙等^[6]、黄仙枝等^[7]研究了加筋垫层的应力扩散特性,分析了加筋层数、筋材间距等对应力扩散角及扩散效应的影响。何杰等^[8]对有无加筋碎石垫层软土地基上的承载性能进行室内模型试验,结果表明加筋垫层在一定程度上能提高地基基床系数,并指出了合理的垫层厚度、加筋层数和筋体布置位置。A. F. Zidan^[9]用有限单元法,分析了格栅层数、第一层格栅深度、格栅间距等对土工格栅加筋砂承载特性的影响。张兴强等^[10-11]研究了在交通荷载反复作用下土工格栅的加筋效果和机理,指出在路基中铺设土工格栅,能提高路面的循环荷载承载能力。杨昆^[12]对加筋垫层的工作特性进行研究,指出在交通荷载作用下,垫层厚度可影响其工作特性,且当交通量达到饱和时,加筋垫层的应力应变最大。刘飞禹等^[13]对加筋软基在循环荷载作用下的效果进行分析,指出循环次数越大,加筋效果越好。

尽管对土工格栅加筋技术的研究已经比较充分,然而对加筋(包括土工格栅、土工格室)碎石垫层在循环荷载作用下的工作性状研究还不够深入,没有形成成熟系统的理论。为此,本文将采用室内模型试验,对加筋垫层在动载下的工作特性进行研究,分析在循环荷载作用下,桩顶沉降、桩身应变和桩土应力比随循环次数及循环应力比的变化规律及差异,总结不同加筋材料工作性状的差异,以期能为垫层的优化设计、工程应用提供参考。

2 试验概况

模型试验在长×宽×高为2.0 m×2.0 m×2.5 m的钢制模型箱中进行,模型箱内分层均匀填筑软黏土,填筑完成后静置28 d。本试验共设置12种工况,工况详情见表1。

表1 模型试验工况

Table 1 Model testing conditions

工况编号	模型桩编号	桩端直径/cm	桩长/cm	楔角/(°)	垫层厚度/cm	土工加筋材料
1#P	1#	7.5	120	0	20	无
1#GG	1#	7.5	120	0	20	格栅
1#GC	1#	7.5	120	0	20	格室
2#P	2#	5.0	120	0.5	20	无
2#GG	2#	5.0	120	0.5	20	格栅
2#GC	2#	5.0	120	0.5	20	格室
3#P	3#	5.0	120	1.2	20	无
3#GG	3#	5.0	120	1.2	20	格栅
3#GC	3#	5.0	120	1.2	20	格室
4#P	4#	5.0	120	1.5	20	无
4#GG	4#	5.0	120	1.5	20	格栅
4#GC	4#	5.0	120	1.5	20	格室

2.1 试验材料

试验用土采用水的质量分数为30%的天然软黏土,填筑完成后静置28 d,测试土体的土工参数,测试结果如表2所示。碎石粒径级配控制在10~20 mm范围内,其物理力学参数如表3所示。试验用土工格栅或土工格室参数见文献[8]。

表2 土的物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical properties of the soil

水的质量分数/%	重度/(kN·m ⁻³)	塑限/%	液限/%	内黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	压缩模量/MPa
18.9	17.4	29.6	47.4	52.1	19.7	1.86

表3 碎石的物理力学参数

Table 3 Physical and mechanical properties of the gravel

天然重度/(kN·m ⁻³)	相对密度	孔隙比	抗剪强度/MPa	内摩擦角/(°)
20.6	2.66	0.50	0.23	38°

2.2 试验方法

动载试验严格按JGJ79—2002《建筑地基处理技术规范》进行,试验布置如图1所示。

加载系统采用微机控制电液伺服多点协调加载试验系统。根据交通荷载的特点,本试验中循环荷载加载所使用的是正弦波,加载的频率选取2 Hz,分别在循环荷载的峰值为3, 4, 5, 6, 7 kN的情况下对模型施加5 000次循环荷载。利用计算机对桩底、桩顶、桩身、桩间土的应力进行采集,同时在固定循环次数时读取千分表数据。

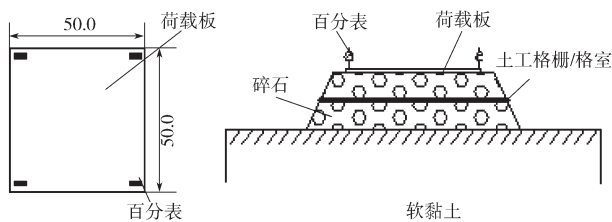


图 1 模型试验装置示意图

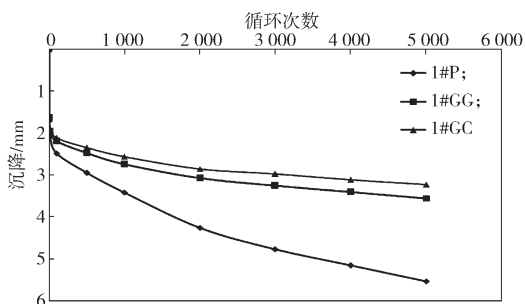
Fig. 1 Schematic diagram of model testing devices

3 试验结果分析

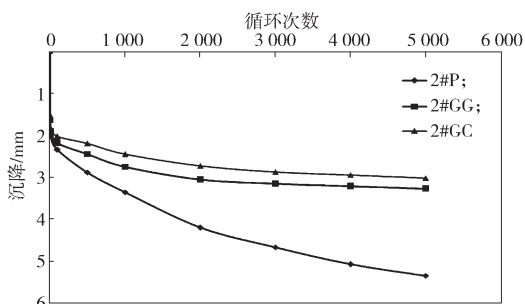
3.1 加筋碎石垫层对沉降的影响

在峰值荷载为 7 kN 的循环荷载作用下, 不同工况时 1~4 号桩累计沉降与循环次数的关系曲线如图 2 所示。由图可知: 1) 对于等截面桩和不同楔角的楔形桩, 地基的累计沉降随荷载循环次数的增加而增加, 但增加速率随循环次数的增加而逐渐减小, 前 1 000 次沉降增长速率较快, 后随循环次数的增加增长速率逐渐减小直至为 0; 2) 对于 1~4 号桩, 土工格室碎石垫层的累计沉降略小于土工格栅碎石垫层的累计沉降, 而土工格栅碎石垫层的累计沉降明显小于纯碎石垫层的累计沉降, 且随荷载循环次数的增加, 三者之间的差值逐渐加大。

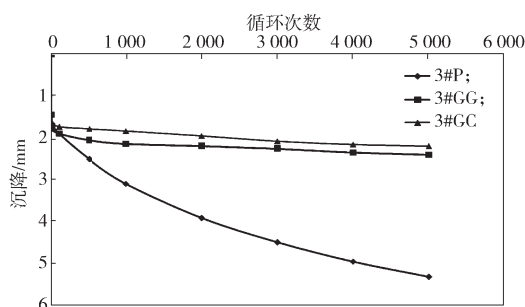
以上结果表明: 动载条件下, 对于等截面桩和楔形桩, 在碎石垫层中加土工格栅或土工格室, 能够有效减小复合地基的累计沉降, 提高地基的稳定性。同等条件下, 土工格室碎石垫层减小沉降的效果强于土工格栅碎石垫层, 但两者差别不明显。工程实际条件允许时, 为了节约资源降低造价, 可优先考虑用土工格栅碎石垫层处理地基。



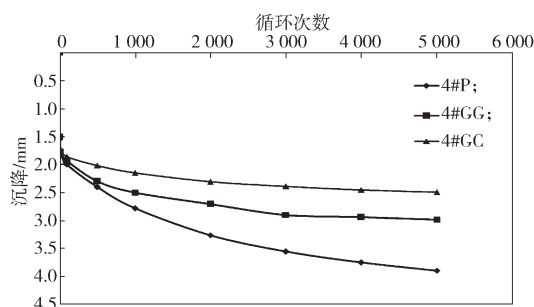
a) 1号桩



b) 2号桩



c) 3号桩



d) 4号桩

图 2 不同工况时沉降与循环次数的关系曲线

Fig. 2 Relation curves of the settlement and cycle times under different working conditions

3.2 不同加筋碎石垫层下桩身应变对比分析

在峰值荷载分别为 3, 4, 5, 6, 7 kN, 5 000 次循环荷载作用下, 3 号桩桩身应变随深度变化规律曲线如图 3 所示。由图可知:

1) 在不同的峰值荷载下, 桩身应变均先随深度的增加而迅速增加, 并在桩深 0.2~0.4 m 范围内达到最大值, 后随深度的增加而逐渐减小, 桩端处应变最小。

2) 同种工况 (3#P、3#GG、3#GC) 条件下, 峰值荷载越大, 桩身应变越大。

3) 不同的循环荷载作用下, 相同埋深处, 工况 3#GC 的桩身应变均小于工况 3#GG 的桩身应变, 而工况 3#GG 的桩身应变又均小于工况 3#P 的桩身应变, 且随峰值荷载的增加, 3 种工况下桩身应变差值逐渐减小。当峰值荷载为 7 kN 时, 其部分曲线接近重合。

以上结果表明: 纯碎石垫层、土工格栅加筋垫层、土工格室加筋垫层的强度和刚度依次增大, 垫层的应力扩散作用逐渐增强。因此, 加筋碎石垫层能够有效减小桩身应变, 减小桩顶应力集中。在较小峰值荷载作用下, 土工格栅、土工格室的作用得不到充分发挥, 对减小桩顶应力的影响不明显, 但在较大的荷载作用下, 土工格栅、土工格室的减负作用能得到有效发挥。

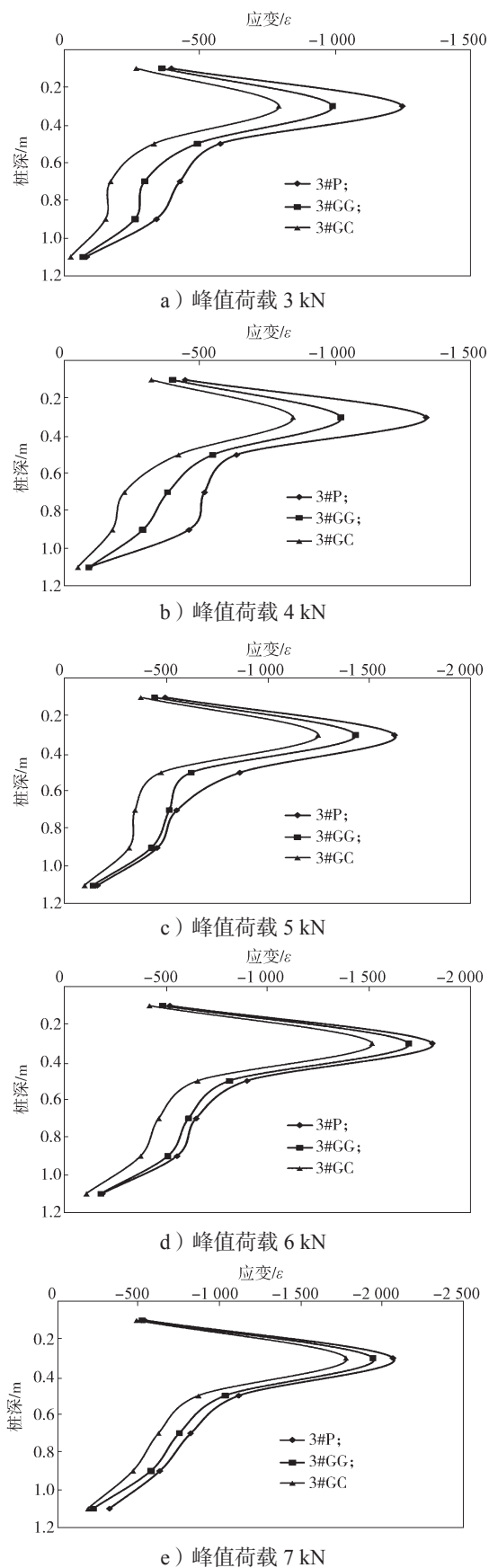


图3 不同峰值荷载下桩身应变与深度的关系曲线
Fig. 3 Relation curves of the strain and depth of pile under different peak loads

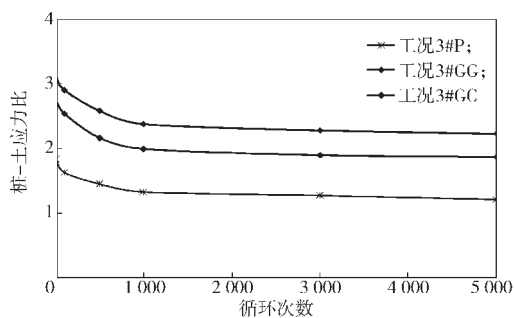
3.3 循环荷载下桩-土应力比分析

在不同的峰值荷载作用下, 3号桩桩-土应力比与循环次数的关系曲线如图4所示。由图可知:

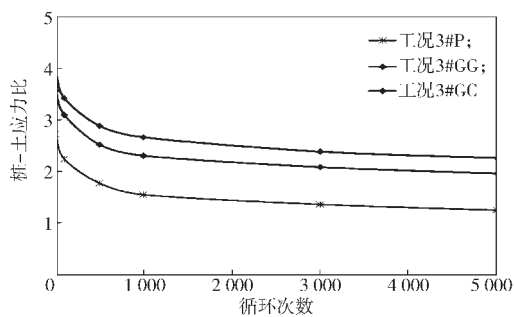
1) 桩-土应力比随循环次数的增加而降低, 并且在1000次前降低速度较快, 在循环1000次后, 降低幅度减小, 桩-土应力比逐渐趋于稳定。

2) 相同峰值荷载作用下, 工况3#GC的桩-土应力比始终大于工况3#GG的桩-土应力比; 而工况3#GG的桩-土应力比又远高于工况3#P的桩-土应力比。随峰值荷载的增加, 3种工况下桩-土应力比均增大, 但3种条件下桩-土应力比差值却逐渐缩小。

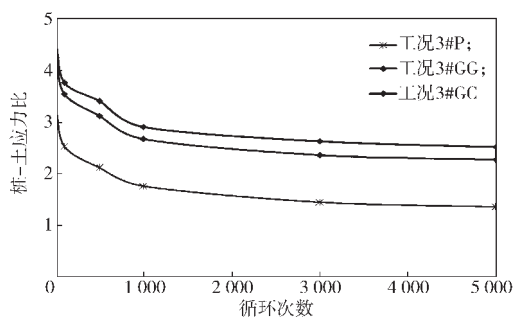
以上结果表明: 循环荷载下, 在碎石垫层中加入加筋材料(包括土工格栅、土工格室), 能够有效提高桩-土应力比, 减轻桩顶应力集中。在桩体刺入垫层后能提高桩体分担荷载的大小, 充分发挥桩的承载能力。土工格室碎石垫层提高桩-土应力比的性能略优于土工格栅碎石垫层。



a) 峰值荷载 3 kN



b) 峰值荷载 4 kN



c) 峰值荷载 5 kN

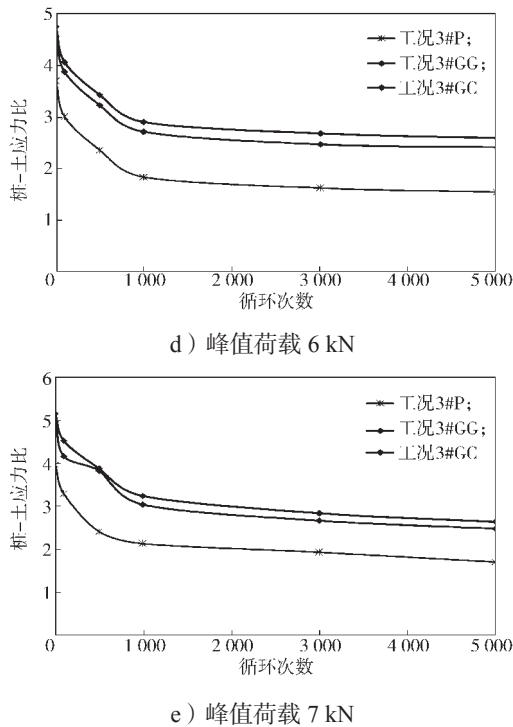


图4 各工况桩-土应力比与循环次数的关系曲线
Fig. 4 Relation curves of the pile-soil stress ratio and cycle times under different working conditions

4 结论

通过模型试验研究了循环荷载下土工格栅及土工格室加筋垫层处理地基的加筋效果, 可得以下结论:

1) 在动载条件下, 无论对于等截面桩还是楔形桩, 碎石垫层中加入加筋材料后, 都能有效地限制垫层的位移, 显著减小复合地基的累计沉降, 提高地基的稳定性, 使复合地基的承载力较未加筋时显著提高。

2) 循环荷载下, 用加筋材料(包括土工格栅、土工格室)碎石垫层处理地基后, 加筋垫层的强度和刚度均得到增强。加筋材料能有效地调节桩-土应力分布, 减轻桩顶应力集中, 改善碎石垫层的受力特性, 从而能够大幅度提高桩-土应力比, 有效减小桩身应变, 使复合地基的承载能力得到充分发挥。

3) 在较小峰值荷载作用下, 加筋材料的作用不能够很好发挥, 而在较大的循环荷载作用下, 加筋材料作用效果明显。在同等条件下, 土工格室碎石垫层的减小桩顶沉降、提高桩-土应力比和降低桩身应变的性能略优于土工格栅碎石垫层, 但当循环峰值荷载较大时两者差别不明显。因此, 工程实际条件允许时, 为了节约资源降低造价, 可以优先考虑使用土工格栅碎石垫层处理地基。

参考文献:

- [1] SHARMA R S, PHANI KUMAR B R, NAGENDRA G. Compressive Load Response of Granular Piles Reinforced with Geogrids[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2004, 41(1): 187-192.
- [2] 张旭群, 杨光华, 陈锐, 等. CM桩复合地基桩土应力比及垫层效应现场试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊1): 357-361.
ZHANG Xuqun, YANG Guanghua, CHEN Rui, et al. Field Test Study of Pile-Soil Stress Ratio and Cushion Effect of CM-Piles Composite Foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(S1): 357-361.
- [3] 赵川, 周亦唐. 土工格栅加筋碎石土大型三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2001, 22(4): 419-422.
ZHAO Chuan, ZHOU Yitang. Experimental Study on Polymer Geogrid Reinforced Crushed Gravel by Large-Scale Triaxial Test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, 22(4): 419-422.
- [4] 赵川, 周亦唐, 余永强, 等. 土工格栅加筋碎石土本构模型试验研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2002, 35(1): 33-38.
ZHAO Chuan, ZHOU Yitang, YU Yongqiang, et al. Experimental Study on Constitutive Model of Polymer Geogrid Reinforced Crushed Gravel[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2002, 35(1): 33-38.
- [5] ALAWAJI H A. Creep and Rate of Loading Effects on Geogrid-Reinforced Sand[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2005, 23(5), 583-600.
- [6] 刘毓氟, 左广洲, 陈福全. 加筋垫层应力扩散特性试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(5): 903-908.
LIU Yuchuan, ZUO Guangzhou, CHEN Fuquan. Numerical Research on Stress Distribution of Geosynthetic Reinforcement Layer[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(5): 903-908.
- [7] 黄仙枝, 岂连生, 白晓红. 软土地基土工带加筋碎石垫层的应力扩散研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(17): 2992-2997.
HUANG Xianzhi, QI Liansheng, BAI Xiaohong. Study of Stress Distribution in Belt Geosynthetic-Reinforced Gravel on Soft Soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(17): 2992-2997.
- [8] 何杰, 孟森松, 饶迁根, 等. 软土地基上加筋碎石垫层工作性状试验研究[J]. 湖南工业大学学报, 2014, 28(5): 17-21.
HE Jie, MENG Sensong, RAO Qiangen, et al. Experimental Research on the Working Properties of Reinforced Gravel Cushion on Soft Soil Foundation[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2014, 28(5): 17-21.
- [9] ZIDAN A F. Numerical Study of Behavior of Circular Footing on Geogrid-Reinforced Sand Under Static and

- Dynamic Loading[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2012, 30(2): 499-510.
- [10] 张兴强, 梁艳平, 梁英慧. 交通荷载作用下软土地基的土工格栅加筋效应分析[J]. *中国公路学报*, 2009, 22(2): 1-5.
ZHANG Xingqiang, LIANG Yanping, LIANG Yinghui. Analysis of Geogrid Reinforced Effect of Soft Ground Under Traffic Loading[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2009, 22(2): 1-5.
- [11] 张兴强, 闫澍旺, 邓卫东. 交通荷载作用下土工格栅加筋路基的弹塑性分析[J]. *振动工程学报*, 2001, 14(3): 278-283.
ZHANG Xingqiang, YAN Shuwang, DENG Weidong. Elasto-Plastic Analysis of Reinforced Subgrade Under Automobile Loadings[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2001, 14(3): 278-283.
- [12] 杨 昆. 桩承式加筋路堤中加筋垫层的工作特性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
YANG Kun. Study on Behaviors of Geogrid Reinforced Cushion in GRPS Embankment[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [13] 刘飞禹, 蔡袁强, 徐长节, 等. 交通荷载作用下软基加筋道路加筋效果分析[J]. *岩土工程学报*, 2007, 29(11): 1659-1664.
LIU Feiyu, CAI Yuanqiang, XU Changjie, et al. Parametric Study of Reinforced Pavements on Soft Clay Under Traffic Loading[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(11): 1659-1664.

(责任编辑: 邓光辉)



(上接第 34 页)

- and Effect of Axial-Compression Ratio on Joints in Earthquake-Resistant Reinforced Concrete Frames[J]. *Journal of Building Structures*, 2006, 27(3): 67-77.
- [3] 张军伟, 高丹盈, 朱海堂. 轴压比对钢纤维高强混凝土框架节点抗震性能的影响[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2010, 40(增刊2): 66-71.
ZHANG Junwei, GAO Danying, ZHU Haitang. Influence of Axial Compressive Ratio on Seismic Behavior of Steel Fiber Reinforced High-Strength Concrete Frame Exterior Joints[J]. *Journal of Southeast University(Natural Science Edition)*, 2010, 40(S2): 66-71.
- [4] KITAYAMA K, OTANI S, AOYAMA H. Development of Design Criteria for RC Interior Beam-Column Joints[R]. Michigan: American Concrete Institute, 1991: 97-123.
- [5] PAULAY T, PARK R, PRIESTLEY M J N. Reinforced Concrete Beam-Column Joints Under Seismic Actions[J]. *ACI Journal*, 1978, 25(11): 585-593.
- [6] 王新敏, 李义强, 许宏伟. ANSYS 结构分析单元与应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007: 187-244.
WANG Xinmin, LI Yiqiang, XU Hongwei. ANSYS Structural Analysis Unit and Its Application[M]. Beijing: People's Traffic Press, 2007: 187-244.
- [7] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007: 479-487.
WANG Xinmin. ANSYS Engineering Structure Numerical Analysis[M]. Beijing: People's Communication Press, 2007: 479-487.
- [8] 樊 玲. 粘钢加固梁柱中节点抗震性能试验研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2003.
FAN Ling. Seismic-Experimental Study of Bonding Steel Reinforced Beam-Column Joints[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2003.
- [9] 唐九如. 钢筋混凝土框架节点抗震[M]. 南京: 东南大学出版社, 1989: 49-65.
TANG Jiuru. Seismic Resistance of Reinforced Concrete Frame Joints[M]. Nanjing: Southeast University Press, 1989: 49-65.
- [10] 赵国藩. 高等钢筋混凝土结构学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 380-413.
ZHAO Guofan. High Reinforced Concrete Structure[M]. Beijing: China Machine Press, 2005: 380-413.

(责任编辑: 邓光辉)