

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2014.05.004

# 软土地基上加筋碎石垫层工作性状试验研究

何杰, 孟森松, 饶迁根, 王亚涛, 汤磊华

(湖南工业大学 岩土工程研究所, 湖南 株洲 412007)

**摘要:** 通过模型试验研究了加筋和不加筋碎石垫层在软土地基上的承载特性, 分析了垫层厚度、加筋材料、加筋层数、筋体布置位置等因素对垫层承载特性的影响。结果表明: 垫层厚度对地基沉降影响明显, 合理的垫层厚度能有效地降低地基的沉降; 加筋后的碎石垫层对降低地基沉降的效果更明显, 同等条件下, 土工格室的加筋效果优于土工格栅; 加筋层数及筋体布置位置对加筋碎石垫层承载特性有一定影响, 层数越多加筋效果越好, 将筋体布置在垫层下部时效果最好; 加垫层能在一定程度上提高地基基床系数, 其中土工格室加筋碎石垫层对提高地基基床系数效果最好。

**关键词:** 加筋碎石垫层; 软土地基; 荷载沉降关系; 基床系数; 模型试验

中图分类号: TU441

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2014)05-0017-05

## Experimental Research on the Working Properties of Reinforced Gravel Cushion on Soft Soil Foundation

He Jie, Meng Sensong, Rao Qian'gen, Wang Yatao, Tang Leihua

(Institute of Geotechnical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** Studied the load-bearing characteristic of reinforced and non-reinforced gravel cushions on soft soil through model tests. Analyzed the effects of cushion thickness, reinforced materials, number of reinforcement layers and location of reinforced-materials on the bearing characteristic of the cushion. The results show that: The reasonable thickness of cushion can effectively reduce the settlement of the foundation and the effect of reinforced gravel cushion is more obvious, and under the same condition, the effect of geocells is better than that of geogrids. Number of reinforcement layers and location of reinforced materials have impact on the load-bearing characteristics of the reinforced gravel cushion. The reinforcement layer number is more and the reinforced effect is better. The effect is best as the reinforced materials is laid at the bottom of the cushion. Adding cushion can improve the coefficient of subgrade reaction and the effect of geocell reinforced gravel cushion is best to improve the coefficient.

**Keywords:** reinforced gravel cushion; soft soil foundation; load settlement relationship; coefficient of subgrade reaction; model test

### 1 研究背景

加筋碎石垫层是一种在碎石垫层中加入加筋材

料而形成的能抵抗一定弯矩作用的垫层。普通垫层材料为散体材料, 如砂、碎石等。随着地基处理技术的不断发展, 人们发现单一的砂、石垫层刚度较

收稿日期: 2014-06-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51108176), 湖南省研究生科研创新基金资助项目(CX2014B425)

作者简介: 何杰(1976-), 男, 湖南汨罗人, 湖南工业大学副教授, 博士, 主要研究方向为地基处理技术,

E-mail: hjhlhjy@yahoo.com.cn

小,不能很好地适应工程需要。为克服散体材料垫层的不足,工程中出现了将土工布、土工格栅、土工格室等土工织物置入砂、石垫层中,从而形成了加筋垫层。加筋垫层技术在工程中取得了良好的经济效益,引起了广大研究人员的高度重视。R. S. Sharma 等<sup>[1]</sup>对土工格栅加固散体材料桩基础的载荷试验研究表明,土工格栅在改善软土地基工作性状的同时,还能有效地提高散体材料桩的承载力,减小地基沉降,并且通过增加格栅数量和减小格栅的间距能更好地发挥其工程性状。A. F. Zidan<sup>[2]</sup>采用有限单元法,通过对静荷载、动荷载作用下土工格栅加筋砂工作特性的对比,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<sup>[3]</sup>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。刘毓氙等<sup>[4-5]</sup>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。王伟等<sup>[6]</sup>通过室内试验分析了土工格栅加筋土的力学特性,研究了加土工格栅和不加土工格栅地基土的侧向位移和竖向位移随深度的变化规律。苏谦等<sup>[7]</sup>进行了土工格栅及土工格室加筋砂垫层处理松软地基室内大模型试验,结果表明,加筋垫层能够有效分散荷载,显著提高地基基床系数。曹新文等<sup>[8]</sup>通过模型试验分析了土工格室和土工网加固路基基床的主要机理,结果表明,土工网垫层改善基床性能有限,而土工格室垫层较土工网垫层能够更有效地提高基床刚度和强度。

褥垫层的工作性状对复合地基的诸多工作特性均有较大影响,加筋垫层更是如此,如加筋垫层的厚度、土工合成材料的力学性能、加筋层数、布置位置等都会影响复合地基的承载力及沉降。本文采用模型试验的方法,研究软土地基上碎石垫层与加筋碎石垫层的工作性状,探讨不同垫层厚度、土工格栅层数、土工格栅布置位置等因素对垫层及加筋垫层的刚度和承载力的影响,为垫层的优化设计提供参考依据。

## 2 试验

模型试验在 2.0 m × 2.0 m × 1.5 m 的钢制模型箱中进行,模型箱内分层均匀填筑软粘土,静置 28 d 后测试土体的土工参数,结果如表 1 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 2 所示。土工格栅和土工格室参数分别见表 3 和表 4。

本试验共设置 13 种工况,工况布置见表 5。静载

试验严格按 JGJ 79—2012《建筑地基处理技术规范》进行,试验布置如图 1 所示。

表 1 土的物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical properties of soil

含水率 / %	重度 / (kN · m <sup>-3</sup> )	塑限 / %	液限 / %	内聚力 / 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 2 碎石的物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical properties of gravel

天然重度 / (kN · m <sup>-3</sup> )	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

表 3 土工格栅的物理力学参数

Table 3 Physical and mechanical properties of geogrid

单位面积质量 / (g · m <sup>-2</sup> )	网格尺寸 / mm	抗拉强度 / (N · 根 <sup>-1</sup> )		拉伸强度 / (kN · m <sup>-1</sup> )		伸长率 / %	
		纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向
463	21 × 21	1745	1832	68.4	78.2	2.7	2.8

表 4 土工格室的物理力学参数

Table 4 Physical and mechanical properties of geocell

焊接间距 / mm	高度 / mm	格室片的拉伸屈服强度 / MPa	焊接处抗拉强度 / (N · cm <sup>-1</sup> )	格室组间连接处抗拉强度 / (kN · cm <sup>-1</sup> )	
				格室片边缘	格室片中间
200	50	≥ 23.0	≥ 100	≥ 200	≥ 120

表 5 模型试验工况

Table 5 Model test condition

序号	工况编号	垫层厚度 / cm	土工加筋材料	层数	格栅、格室的位置
1	ONS-1	0	无	0	
2	10PCL-1	10	无	0	
3	20PCL-1	20	无	0	
4	10GCL1-1	10	格栅	1	距垫层顶部 5 cm
5	20GCL1-1	20	格栅	1	距垫层顶部 15 cm
6	20GCL1-2	20	格栅	1	距垫层顶部 10 cm
7	20GCL1-3	20	格栅	1	距垫层顶部 5 cm
8	20GCL2-1	20	格栅	2	第一层距垫层顶部 15 cm 第二层距垫层顶部 10 cm
9	20GCL2-2	20	格栅	2	第一层距垫层顶部 15 cm 第二层距垫层顶部 5 cm
10	20GCL2-3	20	格栅	2	第一层距垫层顶部 10 cm 第二层距垫层顶部 5 cm
11	20CCL1-1	20	格室	1	垫层顶部
12	20CCL1-2	20	格室	1	垫层中间面
13	20CCL1-3	20	格室	1	垫层底面

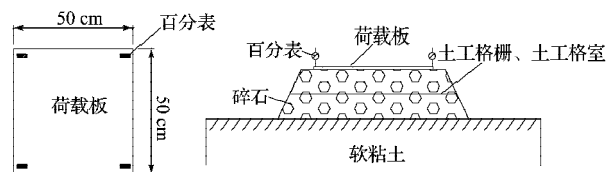


图 1 模型试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of test device

### 3 试验结果及分析

#### 3.1 荷载-沉降曲线

##### 3.1.1 垫层厚度对地基承载能力的影响

图2为天然地基、加10 cm厚碎石垫层及加20 cm厚碎石垫层的荷载-累积沉降曲线。从图中可看出：1) 不设置垫层所对应的地基荷载-累积沉降曲线位于最下方；2) 20 cm碎石垫层的地基沉降比10 cm碎石垫层的地基沉降大。

以上结果表明：1) 褥垫层对荷载具有良好的调节能力，对减小基础沉降具有明显的效果；2) 垫层厚度对地基沉降影响较大，合理的垫层厚度能有效降低地基的沉降，但垫层厚度过大时，对地基沉降的降低作用减小。

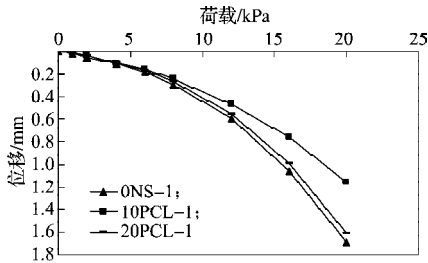


图2 碎石垫层厚度不同时地基的P-S曲线

Fig. 2 The P-S curves of foundation with different gravel cushion thickness

##### 3.1.2 加筋及不同筋材对地基承载能力的影响

图3为碎石垫层中有无加筋、筋材不同时地基的荷载-累积沉降曲线。从图中可以看出：加筋后地基的沉降要远小于不加筋时的沉降。对10 cm厚垫层，加土工格栅后地基沉降能降低35.6%；对20 cm厚垫层，加土工格栅后地基沉降能降低46.9%，而加格室后地基沉降能降低75.9%。

以上结果表明：1) 垫层加筋后能显著降低地基的沉降；2) 在垫层中铺设土工格室比铺设格栅效果更好。

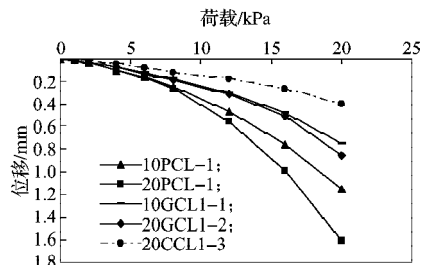


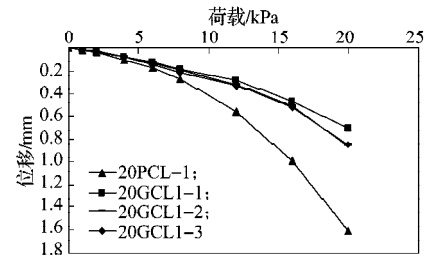
图3 碎石垫层中有无加筋及不同筋材时地基的P-S曲线

Fig. 3 P-S curves of foundation with gravel cushions of non-reinforced material and different reinforced materials

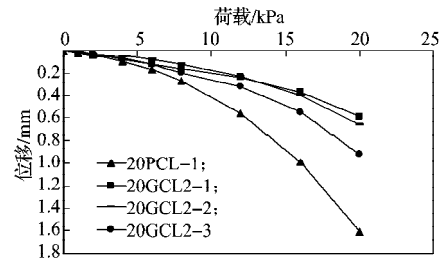
##### 3.1.3 碎石垫层中筋体布置位置对地基沉降的影响

图4为碎石垫层筋材不同布置位置时，地基的荷

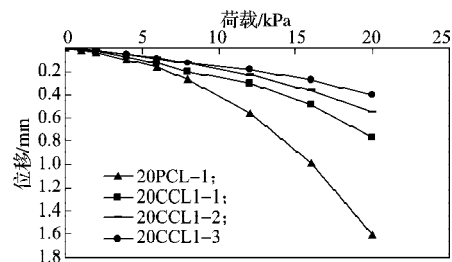
载-累积沉降曲线，其中图a为在20 cm碎石垫层中加1层格栅且格栅布置位置不同时各工况的荷载-累积沉降曲线；图b为在20 cm碎石垫层中加2层格栅，且格栅放置位置不同时各工况的荷载-累积沉降曲线；图c为在20 cm碎石垫层中加格室且格室放置位置不同时各工况的荷载-累积沉降曲线。



a) 设置1层格栅



b) 设置2层格栅



c) 设置土工格室

图4 碎石垫层中筋材不同布置位置时地基的P-S曲线

Fig. 4 P-S curves of foundation with gravel cushion of different reinforced material locations

从图4中可以看出：1) 当荷载小于4 kPa时，不同布置位置的加筋碎石垫层在相同条件下，沉降量几乎一致，随着荷载的增大，不同工况的荷载-累积沉降曲线出现分化，且荷载越大，其差值越大；2) 相同加荷条件下，筋材置于底层的沉降较小。

以上结果表明：1) 当荷载较小时，格栅的布置位置对其作用效果影响不大；当荷载足够大时，格栅的布置位置对其作用效果的影响才会体现，且荷载越大，其影响也越大。2) 处于散粒状态的碎石垫层在加筋后形成的加筋体具有一定的抗弯能力，筋材的布置位置对加筋垫层性能有较大影响，当筋材置于底层时，加筋体的抗弯能力得以充分发挥，因此具有较好的抵抗沉降的能力。

### 3.1.4 碎石垫层中格栅层数对地基沉降的影响

图5为在20 cm厚垫层中设置不同层数土工格栅时,地基的荷载-累积沉降曲线。

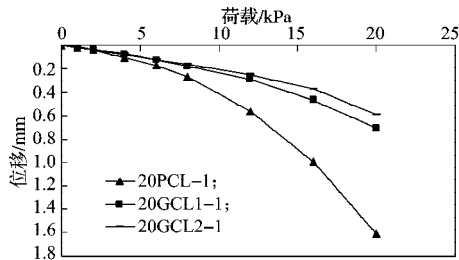


图5 碎石垫层中格栅层数不同时地基的P-S曲线

Fig. 5 P-S curves of foundation with gravel cushion of different geogrid layers numbers

从图5中可以看出:1)在加荷初期,加土工格栅碎石垫层的沉降就比未加格栅碎石垫层的小,但相差较小;2)随着荷载的增大,未加格栅碎石垫层的沉降急剧增大,而加了土工格栅垫层的沉降增加较缓慢,与加1层土工格栅时相比,加2层土工格栅的沉降量更小。

以上结果表明:土工格栅与处于散粒状态的碎石垫层共同作用形成整体,从而具备了一定的抗弯能力,在应力扩散作用下能增大地基土的受力面积,从而减小地基的沉降。因此,在加荷初期格栅就开始发挥作用,但当荷载较小时,土工格栅强度和刚度未能得到充分发挥,其增强效果不明显,对垫层沉降影响不大;随着荷载不断增大,与素垫层相比,加筋垫层与其下土层的性质差异增大,应力扩散明显增强,从而大大降低了垫层的总体沉降,且垫层层数越多,其增强效果越好。

### 3.2 基床系数

基床系数是地基土在外力作用下产生单位变形所需的应力,也称弹性抗力系数或地基反力系数,用公式表示为

$$K = \frac{P}{S}, \quad (1)$$

式中:  $K$  为基床系数,  $\text{MPa/m}$ ;

$P$  为地基土所受的应力,  $\text{kPa}$ ;

$S$  为地基的变形,  $\text{mm}$ 。

GB 50307—2012《城市轨道交通岩土工程勘察规范》<sup>[9]</sup>建议用K30方法,采用0.305 m宽标准荷载板试验值作为标准基床系数  $K_1$  值。本试验采用的荷载板尺寸为  $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$ ,应按文献<sup>[10]</sup>提出的公式根据荷载板宽度  $B$  进行换算。

对于砂土,采用的公式为

$$K_1 = \frac{4B^2}{(B+0.305)^2} \times K; \quad (2)$$

对于粘性土,采用的公式为

$$K_1 = \frac{B}{0.305} \times K. \quad (3)$$

根据上述公式及相关试验数据,计算各工况基床系数值,所得结果见表6。

表6 各工况  $K$  值

Table 6 The value  $K$  of each working condition

工况编号	基床系数 $K/$ ( $\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1}$ )	工况编号	基床系数 $K/$ ( $\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1}$ )
0NS-1	39.3	20GCL2-1	51.2
10PCL-1	46.6	20GCL2-2	57.5
20PCL-1	42.4	20GCL2-3	61.6
10GCL1-1	54.3	20CCL1-1	60.3
20GCL1-1	45.2	20CCL1-2	64.2
20GCL1-2	49.6	20CCL1-3	69.1
20GCL1-3	52.3		

从表6中可以看出:1)纯碎石垫层  $K$  值较无垫层时  $K$  值有所提高,其中10 cm厚纯碎石垫层  $K$  值比无垫层时约高18.6%,20 cm厚纯碎石垫层  $K$  值较无垫层时约高7.9%,但比10 cm厚纯碎石垫层时低9%;2)1层土工格栅加筋垫层  $K$  值比无垫层时约高15%~38.2%,1层土工格栅加筋垫层厚度为20 cm时  $K$  值比10 cm厚时低3.7%~16.8%;3)2层土工格栅加筋垫层  $K$  值比无垫层时约高30.3%~56.7%;4)土工格栅加筋垫层  $K$  值比无垫层时约高53.4%~75.8%;5)同样加筋材料和加筋层数条件下,将加筋材料置于垫层底部时  $K$  值最大,置于中间时次之,置于顶部时最小。

以上结果表明:1)纯碎石垫层对提高地基的强度与刚度的作用不明显,土工格栅加筋垫层对提高地基的强度与刚度有一定的作用;2)在碎石垫层中加入土工格栅后,由于格栅限制了土体的侧向变形,在提高地基的强度与刚度方面有显著的效果;3)垫层厚度对地基的强度与刚度有一定影响,合理的垫层厚度能提高地基基床系数,但厚度过大时,对提高地基基床系数的效果明显减小;4)加筋材料布置位置对地基的强度与刚度有一定影响,将加筋材料置于垫层底部时地基基床系数最大,对提高地基的强度与刚度效果最好。

## 4 结论

1)垫层对荷载具有良好的调节能力,对减小基础沉降具有明显的效果,垫层厚度对地基沉降影响较大,合理的垫层厚度能有效降低地基的沉降。

2)垫层加筋后能显著降低地基的沉降,在垫层中铺设土工格栅室比铺设格栅效果更好。

3)加筋层数及筋材布置位置对碎石垫层承载特

性影响较大,层数越多加筋效果越好,将筋体布置在垫层下部时效果最好。

4) 加碎石垫层后地基基床系数较无垫层时相差不大,不加筋碎石垫层对提高地基的强度与刚度方面的作用不明显;土工格栅加筋垫层对提高地基的强度与刚度有一定作用,但是效果不很明显,而土工格室由于格室限制了土体的侧向变形,对提高地基的强度与刚度具有显著效果。

#### 参考文献:

- [1] Sharma R S, Kumar B R P, Nagendra G. Compressive Load Response of Granular Piles Reinforced with Geogrids [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2004, 41 (1): 187-192.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 刘毓胤,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.
- [5] 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.
- [6] 王伟,王俭,薛剑豪,等.土工格栅加筋垫层加固软土地基模型试验分析[J].岩土力学,2005,26(12): 1885-1891.  
Wang Wei, Wang Jian, Xue Jianhao, et al. Analysis of Model Tests on Soft Soil Subgrade Reinforced by Geogrid [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(12): 1885-1891.
- [7] 苏谦,蔡英.土工格栅、格室加筋砂垫层大模型试验及抗变形能力分析[J].西南交通大学学报,2001,36 (2): 176-180.  
Su Qian, Cai Ying. Geogrid- and Geocell-Reinforced Sand Blanket: Model Test and the Ability to Reduce Deformation [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2001, 36 (2): 176-180.
- [8] 曹新文,罗强,薛双纲.土工格室和土工网加固基床效果静态模型试验[J].西南交通大学学报,2001,36(3): 322-326.  
Cao Xinwen, Luo Qiang, Xue Shuanggang. Model Test of the Effects of Geocells and Geonets on Subgrade Strengthening Under Static Loads[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2001, 36(3): 322-326.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50307—2012城市轨道交通岩土工程勘察规范[S].北京:中国计划出版社,2012: 88.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB 50307—2012 Code for Geotechnical Engineering Investigations of Urban Rail Transportation[S]. Beijing: China Plans Press, 2012: 88.
- [10] Terzaghi K. Evaluation of Coefficients of Subgrade Reaction [J]. Geotechnique, 1955, 5(4): 297-326.

(责任编辑:邓光辉)