

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2015.04.004

土工格栅加筋垫层工作特性分析

王亚涛, 何杰, 汤磊华, 王忍, 高建喜

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 通过模型试验结合三维数值模拟的方法, 探讨了在软土地基上碎石垫层和加筋碎石垫层的工作特性; 分析了不同垫层厚度、土工格栅、格栅层数等参数变化, 对碎石垫层和加筋碎石垫层变形模量、竖向应力场、沉降变形的影响。研究结果表明: 1) 土工格栅加筋垫层应力扩散效果明显强于纯碎石垫层, 从而降低了垫层的总体沉降; 2) 垫层内部应力由底端向顶部发展, 当荷载较小时, 垫层底部先出现应力集中现象, 随着荷载增大, 应力集中区域向顶部靠近; 3) 随着格栅层数的增加, 加筋垫层的应力集中区及沉降量的范围有所减小。

关键词: 数值模拟; 碎石垫层; 土工格栅; 软土地基; 承载力

中图分类号: TU447

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2015)04-0015-05

The Working Characteristic Analysis of Geogrid Reinforced Cushion

Wang Yatao, He Jie, Tang Leihua, Wang Ren, Gao Jianxi

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

Abstract: By means of model test and 3D numerical simulation, discusses the working behaviors of gravel cushion and reinforced gravel cushion in the soft soil foundation respectively, and analyzes effects of the parameters of cushion thickness, geogrids and geogrid layers on the deformation modulus, vertical stress field and settlement deformation of gravel cushion and reinforced gravel cushion. The research results indicate that: 1) The stress diffusion effect of the reinforced gravel cushion of geogrids is obviously stronger than that of pure gravel cushion; 2) The internal stress of the cushion develops from bottom to top. When applying a small load, the cushion bottom appears stress concentration phenomenon, with the increase of load, the stress concentration area moves closely to the top of cushion; 3) With the increase of geogrid layers, the stress-concentration range and the settlement of reinforced gravel cushion reduced.

Keywords: numerical simulation; gravel bed cushion; geogrids; soft soil foundation; bearing capacity

0 引言

土工合成材料加筋垫层是由分层铺设于褥垫层中的土工合成材料与地基土或碎石褥垫层共同构成的换填垫层, 土工合成物的位置、数量和类型直接影响着加筋垫层的刚度, 进而影响荷载扩散范围, 调节地基土的承载力^[1-3]。通常情况下, 普通垫层材料为

散体材料, 如砂、碎石等。将土工格栅置入砂、石垫层中, 可以提高地基土的抗拉和抗剪强度, 能更好发挥垫层的承载作用, 减少地基不均匀沉降, 克服散体材料垫层刚度小的缺点^[4]。

由于软土地基具有强度低、渗透性低、压缩性高的特点^[5-6], 应用加筋土理论技术^[7]对软土地基进

收稿日期: 2015-05-08

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, CX2015B571)

作者简介: 王亚涛(1990-), 男, 江苏丰县人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为桩-土共同作用理论与应用,

E-mail: wyt19901206@126.com

行处理是一种简单快速和经济有效的方法。特别是在路堤建成后，其沉降延续时间长，总沉降量和不均匀沉降大，需进行软基处理^[8]。为了研究在软土地基上土工格栅加筋碎石垫层的加筋作用，本文通过室内大比例模型试验和FLAC^{3D}数值模拟相结合的方法，研究在柔性基础下碎石垫层与加筋垫层的工作性状，分析不同因素对碎石垫层及加筋垫层应力场与位移场的影响，为土工格栅加筋碎石垫层的设计和施工提供理论参考。

1 物理模型试验

模型试验在长×宽×高为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黏土，填筑完后静置28 d，测试填土的土工参数，土体、碎石垫层、土工格栅的物理参数取值见表1~3。模型试验的加载系统如图1所示，荷载板采用20 mm厚的钢板，其边长为70.7 cm，荷载板的沉降观测采用百分表。

表1 土体物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical properties of soil

重度 γ / (kN·m ⁻³)	含水率 ω / %	塑限 ω_p / %	液限 ω_L / %	内黏聚力 c / kPa	内摩擦角 φ / (°)	压缩模量 E_s / MPa
17.4	18.9	29.6	47.4	52.1	19.7	1.86

表2 碎石物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical properties of gravel

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

表3 土工格栅物理力学参数

Table 3 Physical and mechanical properties of geogrids

单位面积质量 / (g·m ⁻²)	网格尺寸 / mm	抗拉强度 / (N·根 ⁻¹)		拉伸强度 / (kN·m ⁻¹)		伸长率 / %	
		纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向
463	21×21	1 745	1 832	68.4	78.2	2.7	2.8

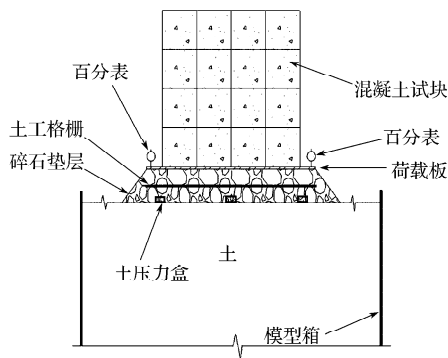


图1 模型试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of test device

为探讨柔性基础下不同工况土工格栅加筋垫层的工作性状，共设置4种工况的模型静载试验，如表4所示。试验前先将混凝土试块称重，将其与荷载板质量相加，换算成施加在荷载板下面的应力，试验荷载分级为：1, 2, 4, 6, 8, 10, 16, 20 kPa，共8级。试验加载与卸载均严格按JGJ79—2012《建筑地基处理技术规范》中快速维持荷载法的相关要求进行。当出现下列情况时即可终止试验：1) 土体沉降急骤增大，荷载-平均沉降曲线(P-S)出现陡坡段；2) 承压板周围的软土有明显的侧向挤出、隆起或裂纹；3) 荷载板的累计沉降量超过其直径的2%。

表4 模型试验工况

Table 4 Model test condition

序号	工况编号	垫层厚度 / cm	格栅层数	格栅位置
1	TRDJ	0	0	
2	20CMN	20	0	
3	20CMG1	20	1	距垫层顶面 10 cm
4	20CMG2	20	2	第一层距垫层顶面 5 cm 第二层距垫层顶面 15 cm

2 试验结果与分析

图2为天然地基、20 cm厚碎石垫层、1层土工格栅加筋碎石垫层和2层土工格栅加筋碎石垫层4种工况下的荷载-平均沉降(P-S)关系。

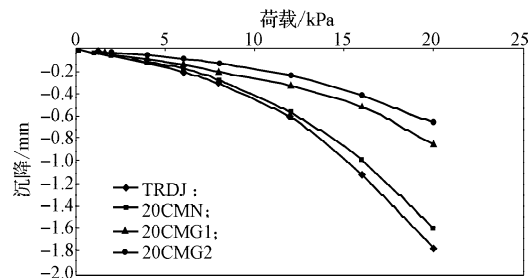


图2 4种工况下垫层的荷载-平均沉降曲线

Fig. 2 Load-average settlement curve of cushion layer under 4 working condition

由图2可以看出：1) 天然地基下所对应的荷载-沉降曲线位于最下方。2) 在相同条件下，当荷载较小(小于8 kPa)时，4种不同工况的荷载-平均沉降量相差较小，近似呈线性增加。3) 随着荷载的增大，其沉降差值也增大，且沉降增加的速率有增大的趋势。4) 20CMG1和20CMG2的沉降速率明显小于另外2种工况的沉降速率；当荷载大于6 kPa时，未加格栅碎石垫层的沉降急剧增大，而加了土工格栅的垫层沉降增加较缓慢。5) 增加土工格栅的层数，可有效增大加筋垫层的变形模量。

以上情况可以说明：1) 在荷载小于8 kPa时，碎

石垫层的压缩量较小,此时的沉降主要由地基的压缩量控制。2)素垫层厚度存在一个最优范围,在对应范围内,素垫层对减小基础沉降具有明显的效果。3)垫层加筋后能提高垫层的刚度,减小垫层的压缩变形。4)土工格栅的层数越多,其增强效果越好,垫层减小地基沉降的作用越大。5)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;土工格栅两侧的摩擦作用增强,剪应力增加,约束了土体的侧向变形,提高了地基承载力,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;随着荷载的增加,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,从而降低了垫层的总体沉降。

3 三维数值模拟

为了更加深入研究褥垫层的工作性状,本文采用FLAC^{3D}数值差分软件对加筋碎石垫层进行三维数值模拟试验。通过计算结果分析各种工况下碎石垫层和地基土的应力场和位移场。

3.1 基本假定

- 1) 各种材料均为均匀、各向同性体。
- 2) 不考虑加载过程中因排水固结引起土体强度的变化。

3) 荷载板采用刚性材料,不考虑因荷载板变形对复合地基工作性状的影响。

3.2 基本模型与计算参数

碎石垫层、土体采用Mohr-Coulomb弹塑性模型,荷载板采用Elastic弹性各向同性模型。格栅结构单元采用FLAC^{3D}内置的Geogrid模拟土工格栅。

在FLAC^{3D}模拟中,碎石垫层、土体、土工格栅、荷载板强度等效体的物理力学计算参数,均按照模型试验参数进行计算取值。岩土体变形参数采用体积模量 K 与剪切模量 G ,并按如下公式进行转化:

$$E_0 = \left(1 - \frac{2\nu^2}{1-\nu}\right) E_s, \quad (1)$$

$$G = \frac{E_0}{2(1+\nu)}, \quad (2)$$

$$K = \frac{E_0}{3(1-2\nu)}. \quad (3)$$

式(1)~(3)中: E_0 为土的变形模量; ν 为土的泊松比; E_s 为土的压缩模量。

各计算参数见表5~6。

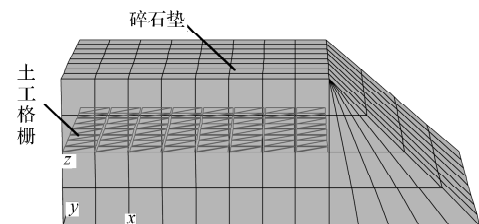
表5 模拟计算参数

材料	体积模量 / MPa	剪切模量 / MPa	泊松比	内摩擦角 / (°)
碎石	25.8	20.28	0.20	38.0
土体	2.1	0.86	0.35	19.7

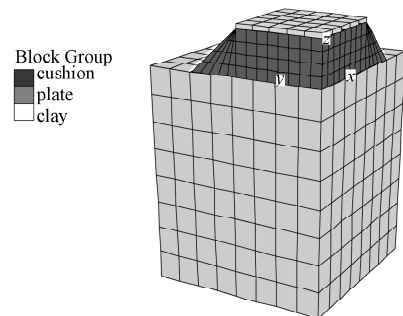
表6 土工格栅参数

弹性模量 / GPa	格栅厚度 / mm	泊松比
30	2	0.33
耦合弹簧 单位面积刚度 / MPa	耦合弹簧 内聚力 / MPa	耦合弹簧 摩擦角 / (°)
3.2	0.35	29.5

为了简便计算,按照对称原理取实际模型试验的1/4模型进行三维数值模拟,碎石垫层自然休止角近似采用45°,荷载值分别为:1, 2, 4, 6, 8, 10, 16, 20 kPa,由于真实模型试验采用的是快速加载法,所以采用STEP命令来控制时步,每级荷载计算时步均取5000步。模型网格如图3所示。



a) 垫层加筋网格图



b) 1/4模型网格图

图3 复合地基网格图

Fig. 3 The composite foundation mesh

3.3 垫层竖向应力场分析

图4为工况TRDJ、20CMG1下实测荷载-沉降关系曲线与数值模拟计算曲线对比图,模拟曲线与实测曲线非常接近,从而验证了本模拟模型的准确性。

图5~7为3种工况下垫层竖向(z 方向)应力云图。对比图5~7可以看出:1)垫层内应力是从垫层下方向上部发展的,且随着荷载增大,垫层下部的应力持续增大,应力集中区域向顶部发展趋势明显。2)铺设纯碎石垫层(工况20CMN)的土体加载区域

应力集中程度，比设置加筋垫层的要明显，且相同位置处该范围内应力值大于设置土工格栅加筋垫层的应力值；设置2层土工格栅的比设置1层土工格栅的应力集中现象要小。3) 随着格栅数量的增加，双层格栅加筋垫层应力向垫层上部发展的速度越小。

以上现象表明：1) 相同荷载下，土工格栅加筋垫层的应力增量及其影响范围比纯碎石垫层大，且随着荷载的增大，这一现象愈加明显。2) 土工格栅能有效地改善垫层的工作特性，且格栅层数对碎石垫层应力场有较大影响。

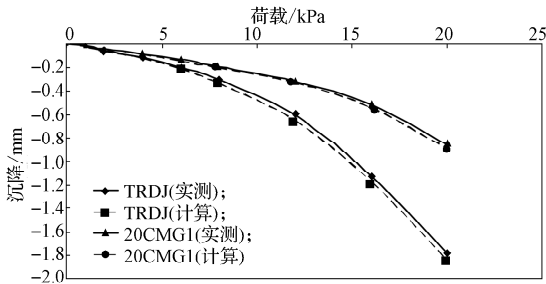
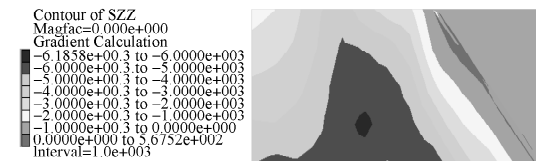
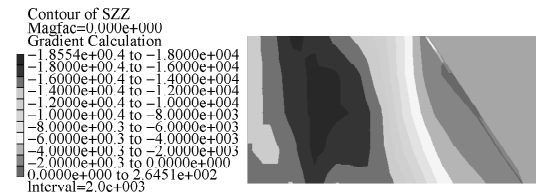


图4 实测曲线和模拟计算曲线对比图
Fig. 4 The contrast of the measured curve and the calculated curve



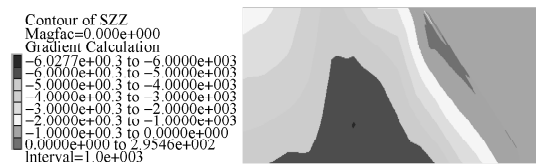
a) 荷载为 6 kPa



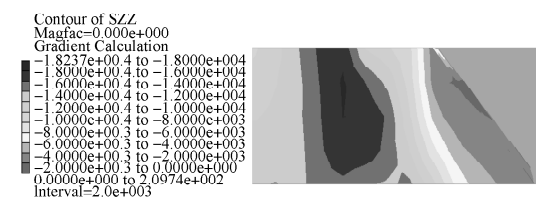
b) 荷载为 20 kPa

图5 工况 20CMN 垫层z方向应力云图

Fig. 5 Vertical stress cloud for the case of 20CMN cushion



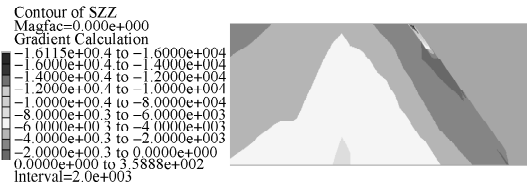
a) 荷载为 6 kPa



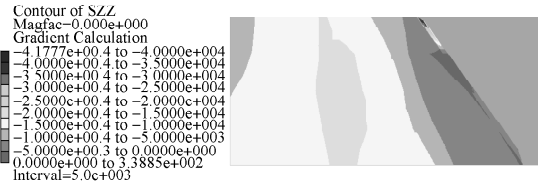
b) 荷载为 20 kPa

图6 工况 20CMG1 垫层z方向应力云图

Fig. 6 Vertical stress cloud for the case of 20CMG1 cushion



a) 荷载为 6 kPa



b) 荷载为 20 kPa

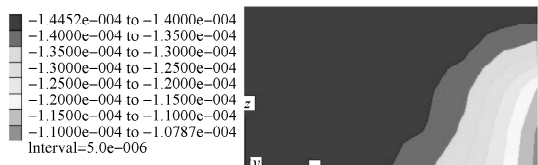
图7 工况 20CMG2 垫层z方向应力云图

Fig. 7 Vertical stress cloud for the case of 20CMG2 cushion

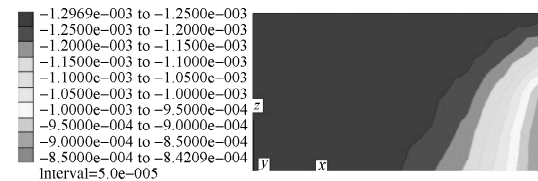
3.4 垫层竖向位移场分析

图8~10为3种工况下垫层竖向(z方向)位移云图。由图8~10可以看出：1) 垫层底部的竖向位移都小于上部的竖向位移；垫层外部的竖向位移小于内部的竖向位移。2) 在下部土体内，竖向位移量与到加载区域中心的距离呈反比。3) 随着土工格栅铺设数量的增加，垫层的竖向沉降范围与沉降量随之减小。4) 设置土工格栅能有效增加垫层的刚度。

以上情况说明，在碎石垫层中加入土工格栅加筋后，能进一步减小地基的沉降，且随着土工格栅的增加，褥垫层对减小地基沉降的作用越大。



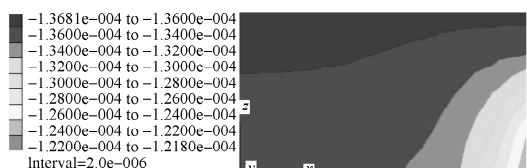
a) 荷载为 6 kPa



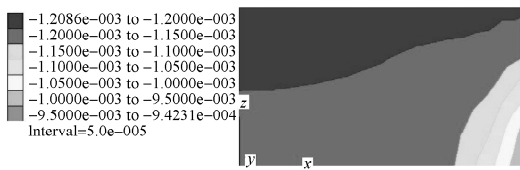
b) 荷载为 20 kPa

图8 工况 20CMN 垫层z方向位移云图

Fig. 8 Vertical displacement cloud for the case of 20CMN cushion

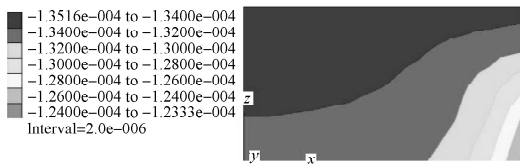


a) 荷载为 6 kPa

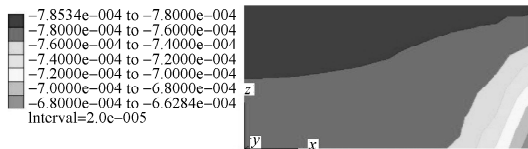


b) 荷载为 20 kPa

图9 工况 20CMG1 垫层 z 方向位移云图
Fig. 9 Vertical displacement cloud for the case of 20CMG1 cushion



a) 荷载为 6 kPa



b) 荷载为 20 kPa

图10 工况 20CMG2 垫层 z 方向位移云图
Fig. 10 Vertical displacement cloud for the case of 20CMG2 cushion

4 结论

本文通过大比例模型试验和FLAC^{3D}数值模拟相结合的方法,较系统地研究了纯碎石垫层和土工格栅加筋碎石垫层的工作性状,分析了碎石垫层厚度、土工格栅、格栅层数等参数变化对碎石垫层和加筋碎石垫层竖向应力场、竖向位移场的影响,得到以下结论:

1) 土工格栅能有效地提高碎石垫层的整体刚度,减小垫层的压缩变形。在相同荷载作用下,加筋垫层的抗沉降性能明显优于无筋垫层;筋体的性能在加荷初期就可以得到体现,其增强作用也随荷载的增大而逐步发挥。

2) 垫层内部应力由底端向顶部发展,当荷载较小时,垫层底部先出现应力集中现象,随着荷载增大,应力集中区域向顶部靠近。

3) 在垫层厚度允许的范围内,改变土工格栅加筋层数对加筋碎石垫层承载特性有较大影响。随着格栅层数的增加,加筋垫层的应力集中区及沉降量的范围有所减小。

参考文献:

[1] 王 兵,杨为民,李占强,等.褥垫层对复合地基承载

特性影响的试验研究[J].岩土力学,2008,29(2):403-408.

Wang Bing, Yang Weimin, Li Zhanqiang, et al. Test Study on Influence of Cushion on Loading Behavior of Composite Foundations[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(2): 403-408.

[2] 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.

[3] 李 冰,刘 杰,何 杰,等.有无土工格栅-夯实水泥土楔形桩工作性状试验研究[J].湖南工业大学学报,2012,26(2):24-28.

Li Bing, Liu Jie, He Jie, et al. Experimental Research on Bearing Behavior of Rammed Soil-Cement Tapered Pile with or Without Geogrid Cushion[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2012, 26(2): 24-28.

[4] 马时冬.土工格栅加筋垫层的效果检验[J].岩石力学与工程学报,2005,24(3):490-495.

Ma Shidong. Verification of Reinforced Effect on Geogrid Cushion for Foundation Strengthening[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(3): 490-495.

[5] 刘 春,赵洪波,白世伟.土工格栅在治理软土路基沉降问题中的研究[J].岩土力学,2003,24(6):1070-1074.

Liu Chun, Zhao Hongbo, Bai Shiwei. Research on Using Geogrids to Control Settlements of Subgrades[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(6): 1070-1074.

[6] 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.

[7] 李广信.关于土工合成材料加筋设计的若干问题[J].岩土工程学报,2013,35(4):605-610.

Li Guangxin. Some Problems in Design of Geosynthetic-Reinforced Soil Structures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(4): 605-610.

[8] 李志清,胡瑞林,付 伟,等.土工格栅在加固高速公路路堤中的应用研究[J].岩土力学,2008,29(3):795-799.

Li Zhiqing, Hu Ruilin, Fu Wei, et al. Study on Using Geogrids to Reinforce Embankment of Expressway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(3): 795-799.

(责任编辑:邓光辉)