

土体相对密度对土工格室加筋砂土地基性能的影响

杨 晖, 丁志辉, 蔡源介

(中国瑞林工程技术股份有限公司, 江西 南昌 330000)

摘 要: 为了研究地基相对密度对土工格室加筋性能的影响, 对五种不同相对密度(30%、40%、50%、60%和70%)的土工格室加筋砂土地基和未加筋砂土地基的模型进行载荷试验, 研究不同相对密度土体地基的承载力沉降曲线、承载力提高系数、路基变形与基底沉降以及加筋拉应变的分布规律, 并对土工格室加筋砂土地基的作用机理进行分析。试验结果表明, 在较大的相对密度范围内, 土工格室加筋可以有效地提高地基的刚度、承载力和分散荷载水平; 填土表面和砂土路基的变形规律表明, 所采用的模型箱和地基的相对尺寸可以克服边界效应, 从而达到更好的测试效果。

关键词: 加筋地基; 土工格室; 相对密度; 模型试验; 承载力

中图分类号: U41

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2022)03-0177-05

0 引 言

土工合成材料加固作为地基改良和基础加固的技术已超过40 a, 土工布和土工膜是其中的典型代表, 可用于稳定在贫瘠土壤上建造的结构。作为一种非天然材料, 土工合成材料由多孔防水材料组成, 这些材料包括针织的、机织的和非机织的, 还有聚合物网格和联锁装置。由于土工合成材料可以用作加固、过滤、分离、保护、密封、流体传输和土壤限制, 因此其应用广泛。土工格室是土壤加固领域最近发展起来的一种技术, 它具有三维蜂窝状聚合物结构, 由在接缝处相互连接的土工格室组成, 并填充土石从而抑制土的侧向流动, 有效提高地基承载力, 减少地基沉降。

Krishnaswamy 等人进行了一系列实验室模型试验, 研究在软粘土层上支撑的土工格室垫层上建造的土堤^[1]; Dash 等人通过土工格栅加筋砂床支承的条形基础的室内模型, 评价土工格室对性能改善, 并确定发挥最大承载力作用的土工格室层的铺设深度和尺寸^[2-3]; Dash 等人还报告了一个圆形基脚模型的载荷试验结果, 该模型支撑在覆盖有软粘土上的土工格室增强砂上^[4-5]。周和文将一层或两层土工合成

材料放置在砂垫层中, 以在软土地基上创建具有更高承载力的复合层, 从而较大幅度地减少软土地基的沉降^[6]。孙州等人通过对纯砂路堤边坡和土工格室加筋路堤进行多组模型试验, 研究了土工格室焊距、埋深、加筋层数以及压实度对路堤承载力特性和变形特性的影响^[7-10]。Han J 等人进行了足尺加速路面试验, 以评估一层土工格室加筋对软弱路基上再生沥青路面基层的影响^[11]。Sireesh 等人在一个圆形基础上进行了一系列实验室规模的模型试验, 该基础由土工格室加固的砂层支撑, 覆盖在具有连续圆形空隙的粘土层上。通过在粘土路基上提供足够大的土工格室复合垫层, 显著地改善了土工格室性能, 并且当土工格室复合垫层延伸超过空隙至少等于空隙直径的距离时, 可以获得较好的效果^[12]。Wesseloo 等人研究了用单个和多个土工格室加固的土壤的应力应变特性, 发现土工格室加固的三维结构阻止了填充土的横向扩展, 将基底压力重新分布在更宽的区域, 从而提高了土壤承载能力^[13]。刘金龙等人采用非线性有限元方法对土工织物加固软土路基的效果和机理进行探讨, 表明土工织物能有效地加固软土路基^[14-15]。目前, 土工格室复合垫层在许多情况下用于改善地基土的性能, 如人行道和铁路下的地基、土堤地基、储液罐基础和石油勘探平台基础等, 并取得了良好的效果, 但目前研究对其加筋机理并不十分深入, 对不同土体相对密度加筋研究相对较少。

本文主要模拟矩形基础在静力加载条件下直接作用于土工格室加筋砂土地基的情况, 通过对比不同

收稿日期: 2021-06-09

基金项目: 梅观高速公路(清湖立交至观澜主线收费站)市政化改造工程课题研究——深圳市非机动车道透水性混凝土路面技术规程项目。

作者简介: 杨晖(1981—), 男, 学士, 高级工程师, 从事路桥工程研究工作。

相对密度砂土地基工况下地基的承载力—沉降曲线、地基的路基模量、承载力提高系数、路基边形与基底沉降、筋材拉应变的分布规律、以及地基荷载分散角,对土工格室加筋砂土地基的作用机理进行系统研究,表明土工格室能有效地改善地基的承载能力。

1 原材料与试验方法

1.1 原材料

本试验所采用的钢框架模型箱的尺寸为1200 mm×332 mm×700 mm(长×宽×高)。模型箱的中心放置330 mm×100 mm×25 mm(长×宽×高)的钢制底座,其底座的长度等于模型箱的宽度。试验采用的土体物理指标见表1^[16-17],不同土体相对密度的性能见表2。

表 1 原材料物理指标

有效粒径 D_{10}/mm	平均粒径 D_{50}/mm	最小空隙率 $le_{\min}$	最大空隙率 $le_{\max}$
0.22	0.46	0.474	0.795

表 2 不同土体相对密度的性能

土体相对密度 $I\%$	峰值摩擦角 $I(^{\circ})$	膨胀角 $I(^{\circ})$
30	39.2	0
50	41	6
70	42.2	20

土工格室加筋采用定向聚合物制成的双向土工格栅,开孔尺寸为35 mm×35 mm,极限抗拉强度为20 kN/m,5%应变割线模量为160 kN/m^[18]。如图1(b)所示,土工格栅垫层是通过将土工格栅从满卷切开到所需的长度和高度,在横向和对角方向放置,在连接处进行接缝来制备的^[19-20]。目前测试的土工格栅是由低密度聚丙烯制成的6 mm宽、3 mm厚的塑料条。其土工格室接头的拉伸强度为4.75 kN/m。试验中仪器布置见图1。

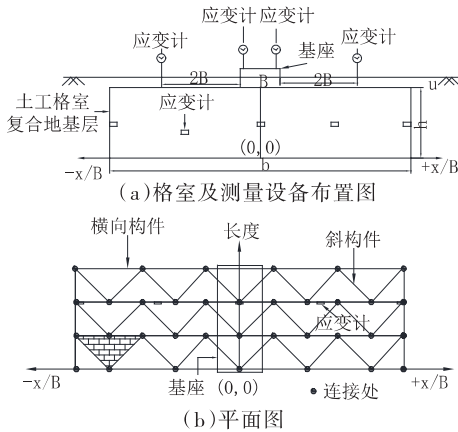


图 1 土工格室加筋地基系统和仪器的几何细节

本次试验的地基土层深度为7B,宽度为13B。在条形荷载作用下,致密砂层中的破坏楔体沿底座中心线两侧延伸约3B,距底座约1.1B。因此,由于本次试验中使用的模型箱较大,不会干扰土体和土工格室的变形区,从而不会干扰试验结果。

1.2 实验方法

模型试验通过使用校准的砂雨装置进行滴注^[21]得到30%、40%、50%、60%和70%的不同相对密度砂土地基。在规定的深度,砂雨暂时停止,并在砂面上放置土工格室加筋,之后砂雨继续。在降雨期间,通过将已知体积的小铝罐放置在试验箱的不同位置,检查砂子放置的准确性和放置密度的一致性,在测试模型箱的不同位置测量的密度的差异小于1%。

在50 mm的垂直间距水平铺一薄层白色砂土,观察土工格室下路基土体的变形规律。每次测试完成后,通过测试箱的透明有机玻璃壁记录白色线条的变形形状。通过观测到的砂土路基破裂面、白砂层的不连续面圈定,计算出荷载分散角(α)。

通过改变土体的相对密度,从松散到致密,即 $ID=30\%$ 、 40% 、 50% 、 60% 和 70% ,进行了两组不同的模型试验。第一组试验是在未加筋的土基上进行的。第二组试验进行土工格室加筋土基试验。为了解在第二组所有试验中土体相对密度对整体性能的影响,土工格室层的几何形状(高度 $h/B=1.6$,宽度 $b/B=8$,放置深度 $u/B=0.1$)保持不变。在所有试验中,土工格室开口的等效圆形直径的大小(d)都保持为1.2B,这是提供最大性能改善的最佳几何形状^[3]。

2 实验数据分析

未加筋地基的承载力与沉降关系曲线见图2。

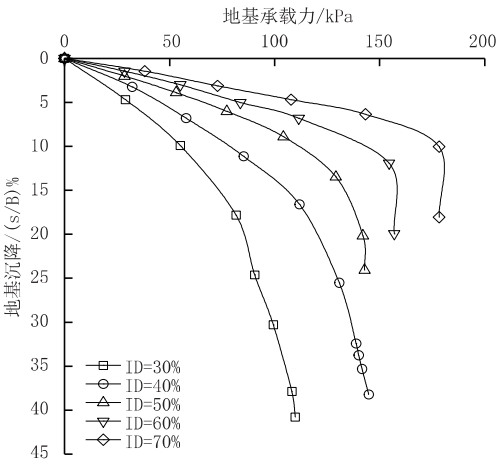


图 2 未加筋地基承载力与地基沉降的关系

从图中可以看出,当 $ID=30\%$ 和 40% 时,未加筋的地基发生了局部剪切破坏;而对于较高密度($ID=$

60 %和 70 %)时,未加筋的地基随着应力的增加有一个明显的断裂点,为土体的整体剪切破坏。土工格室加筋地基在沉降小于基础宽度的 50%均没有发生剪切破坏。

土工格室加筋地基的承载力与沉降关系见图 3,其割线模量表示土工格室加筋地基刚度的路基模量(k_r)。土工格室加筋地基的路基模量(k_r)随土体相对密度的变化(s/B)见图 4。

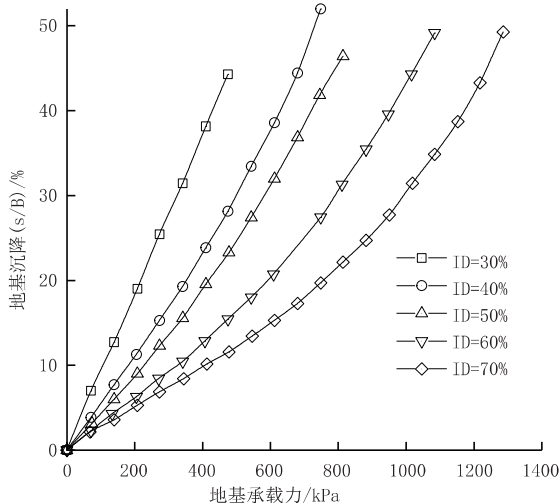


图 3 地基承载力与地基沉降的关系

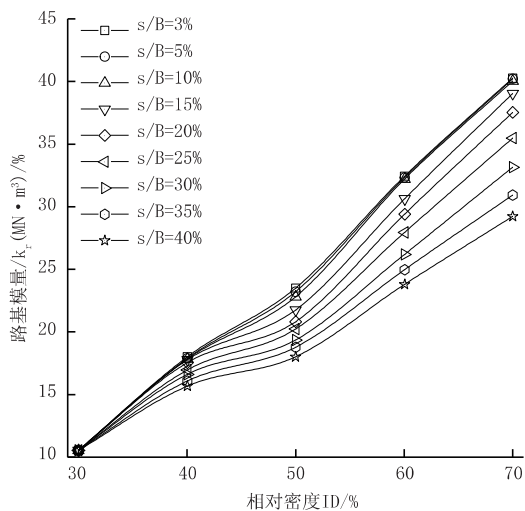


图 4 路基模量与土体相对密度的关系

由图 4 可知,土工格室加筋地基的路基模量(k_r)随土体相对密度的增加而增大。3%沉降时的路基模量(k_{r3})值从 $ID=30\%$ 的约 10 MN/m^3 增加到 $ID=70\%$ 的约 40 MN/m^3 ,表明土工格室加筋地基的刚度随着土体相对密度从 30%增加到 70%增加了 3 倍。当土壤相对密度大于 50%时, k_r 与 ID 曲线相对陡峭,表明致密土壤的 k_r 增加速率较大。

土工格室加筋对承载力的改善用一个无量纲改善系数(I_f)来表示,该系数定义为土工格室在给定沉降时的地基压力(q)与未加筋土在相同沉降下的压

力(q_0)之比。如果基础在某一沉降处已达到其极限承载力,则假定对于较高的沉降量,承压 q_0 保持在其终值不变。在不同的基础沉降水平下(s/B),承载力改善系数随土的相对密度(ID)的变化情况(I_f)见图 5。

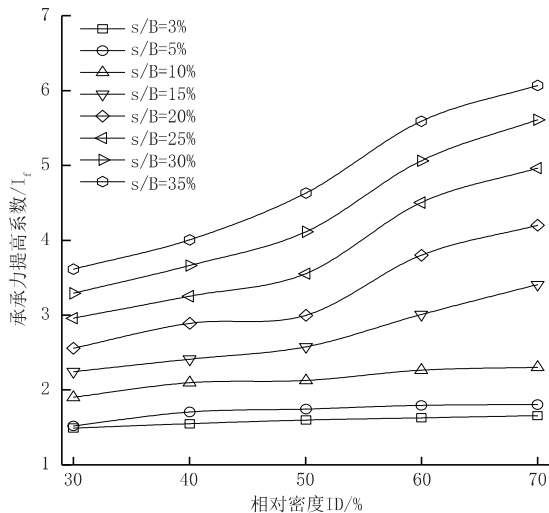


图 5 承载力提高系数与土壤相对密度

由图 5 可知承载力改善系数的值随相对密度的增加而增大。松散土体在变形作用下收缩,需要较大的应变才能将应力传递给土工格室,而相对密度较高的土体由于结构致密,在基础贯入作用下容易膨胀,从而增加土工格室加筋的强度,提高土工格室的性能。此外,致密土在膨胀时会在土工格室土界面处产生较高的摩擦力,从而增加砂土的抗向下贯入阻力,使承载能力得到较大的提高。在相对较低的沉降范围内($s/B \leq 10\%$), I_f 值随土的相对密度变化不大,说明土工格室加筋对不同密度填土的承载力提高百分率几乎相同。而在较高沉降范围内($s/B > 10\%$),与松散土相比,密实土($ID > 50\%$)的承载力系数(I_f)随相对密度增大的增长速率要大得多。这表明在相对较高的地基沉降下,与未加筋的土相比,土工格室加筋对密实土体的承载力改善效果较好。

路基变形与基底沉降关系见图 6。左侧和右侧百分表的平均值读数通过符号(-)表示隆起、符号(+)表示沉降来描述填筑表面的变形模式,未加筋土层的曲线关系用虚线表示,土工格室加筋土的曲线关系用实线表示。

由图 6 可知,未加筋的砂床经历了超过 5% 的基础宽度的隆起,而有土工格室加筋的砂床的隆起不到 2%。说明采用土工格室加筋后,填充面发生沉降,表明土工格室垫层在基础贯入作用下已经下沉,因此被拉离试验箱壁,说明试验箱壁不会影响其性能。

此外,土体密度越高,地表沉降越小,这可能是

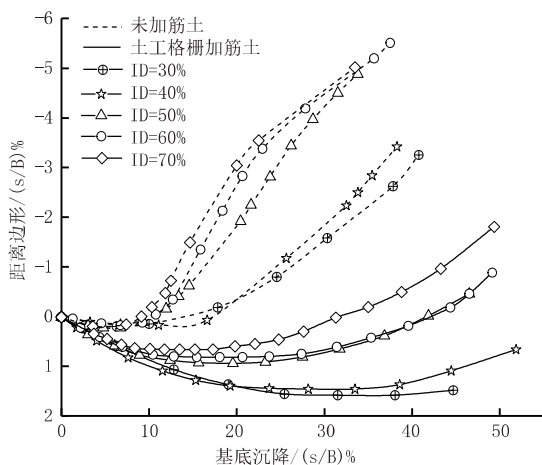


图6 路基变形与基底沉降

由于土工格室的地基强度和端部锚固力的增加,抵抗土工格室垫层向下的挠度,从而改善性能。在松散填土试验中,土工格室垫层的两个自由端在大基础沉降的土层表面可见。因此可以得出,在松散土壤的情况下,土工格室层两端没有充分的锚固。

密实土($ID=70\%$)和松散土($ID=30\%$)的土工格室壁应变变化规律见图7。

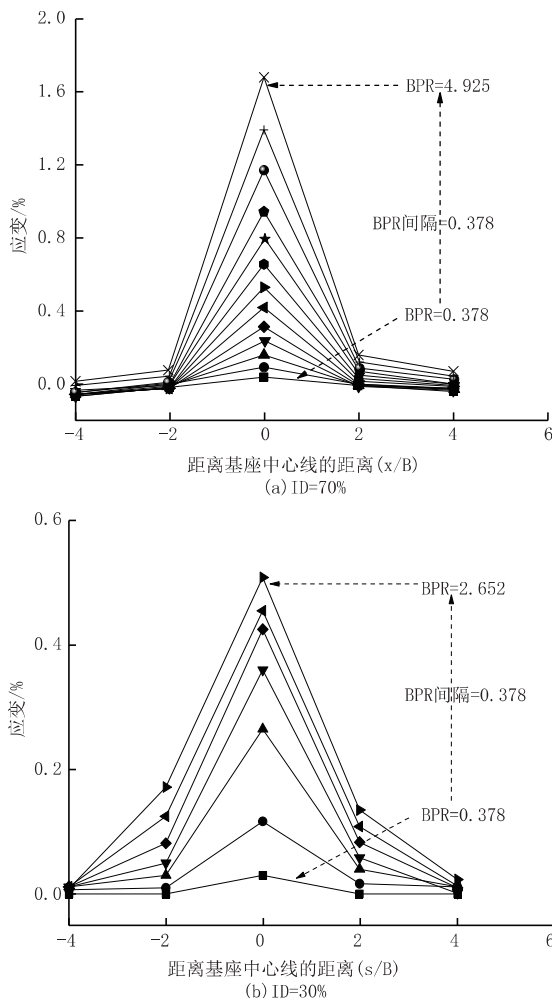
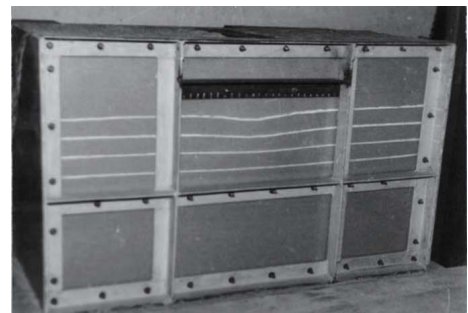


图7 相对密度为70%和30%的土工格室的应变

从图7可以得到,密实土土工格室垫层的两个自由端都会产生压缩应变。由于受荷区土体的膨胀,通过土工格栅壁的开孔,导致砂土的体积膨胀。由于在垂直方向上土体没有束缚,因此土体的这种膨胀主要在横向上,且这种局部化的横向扩张受到邻近稳定区砂土的抑制,土体产生压缩,从而引起土工格室壁中的压缩。由图6(b)可知,在松散土壤的情况下,垫层中的任何地方都没有产生压缩应变,这是因为在松散的土壤中没有引起体积膨胀。这一试验结果再次证明了前文中关于填充土膨胀可引起土工格室垫层性能变化的结论。

观测到的土工格室垫层下路基土体在基础荷载作用下的变形规律见图8。

图8 土工格室垫层下土体的变形模式($ID=70\%$)

从图8可以看出,试验箱底座上部区域土壤变形(通过箱壁白色线条中的变形显示)衰减可以忽略不计,因此可确定试验箱边界对基础的性能没有影响。所以,本研究使用的试验箱的几何形状可以克服土体边界效应。土工格室垫层作为一块宽板,将地基压力传递到下垫层,并在较宽的宽度($B+\Delta B$)上重新分布。 ΔB 是由于宽板效应导致的土工格室垫层在 $u+h$ 深基础宽度的增加。

$$\Delta B = 2(u+h)\tan\alpha \quad (1)$$

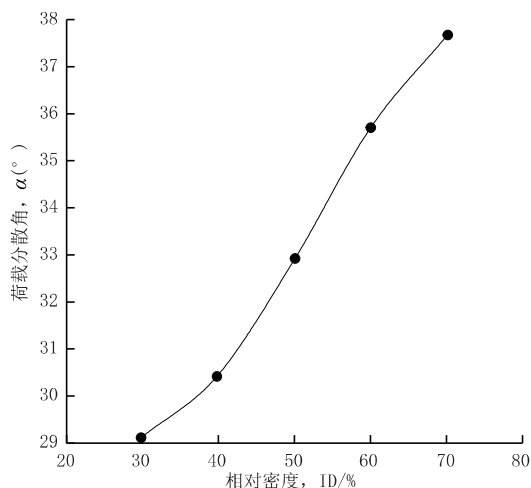
式中: α 为土工格室床垫内的荷载扩散角; ΔB 为观测到的砂基破裂面测量得到的。

该破裂面通过白色砂层的不连续部分来划定。利用式(2)和 ΔB 的实测值,计算出土工格室床垫内的荷载扩展角

$$\alpha = \tan^{-1} \left[\frac{\Delta B}{2(u+h)} \right] \quad (2)$$

图9描述了土工格室面层的计算值 α 与相对密度(ID)之间的关系。

由图9可知,土工格室床面的荷载分布角随地基土密度的增加而增大。当 $ID>40\%$ 时,随着土壤相对密度的增加, α 迅速增大。这表明土工格室加筋可以提高基础下半刚性垫层的刚度,当地基土质致密

图9 地基荷载分散角 α 与相对密度的关系

时效果更好。

当沉降接近破坏时土体发生剥离时加筋强度基本保持不变。这表明,土工格室体系是一种全方位的围护体系,它抑制了土体的流动,从而使被包裹的土体不会被剪断。随着密度的增大,地基沉降越大,产生的膨胀越能提高土体的密实度。

填土经过土工格室加固后表面发生沉降,表明土工格室垫层已经发生下沉,因此被拉离试验模型箱壁,试验箱底座上部区域土壤变形衰减可以忽略不计,所以试验箱边界对基础的性能没有影响。因此,本研究中使用的试验箱基几何形状足以克服边界效应。

3 规模效应

土工格室加筋地基系统中的重要参数可假定为 B 、 u 、 d 、 h 、 b 、 s 、 S_r 、 G 、 γ 、 ϕ 、 q 和 q_0 ,其中 S_r 为加筋的强度/刚度, G 为土体的剪切模量, γ 为土体的容重,加筋地基系统的函数可以写成

$$f(B, u, d, h, b, s, S_r, G, \gamma, \phi, q, q_0) = 0 \quad (3)$$

利用Langhaar提出的模型律和 Buckingham 的量纲分析,发现上述几何参数呈线性变化,而强度和刚度参数呈二阶变化。原型加筋土地基中加筋的强度/刚度应为模型试验中加筋强度/刚度的 N^2 倍,其中 N 为模型比例尺^[9]。

在本模型试验中,土工格室强度/刚度为4.75 kN/m,远低于土工格室墙体材料(即土工格栅)的强度/刚度。因此,为了将本研究的结果应用于实践,原型土工格室的最低强度/刚度应为 $4.75 N^2$ kN/m。

4 结论

(1)土工格室加筋在较大的相对密度范围内($ID=$

30%~70%)有较好地提高地基的刚度、承载力和荷载分散角的效果,当地基土体致密时效果更好。

(2)3%沉降时的路基模量值(k_{v3})从 $ID=30\%$ 的约10 MN/m³增加到 $ID=70\%$ 的约40 MN/m³,表明土工格室加筋地基的刚度随着土体相对密度增加而增加。通过填土表面和砂土路基的变形规律,可以看出本文采用的模型箱和地基的相对尺寸足以克服边界效应。

(3)在基础相对较低沉降时($s/B10\%$), I_f 值随土的相对密度变化不大,而在较高沉降范围内,随 ID 的增加,密实土($ID>50\%$)的承载力系数(I_f)相较于松散土的增长速度较快。

(4)土工格室加筋提供的三维约束能有效的抑制地基土的膨胀,且抑制效果随着地基土压实密度的提高而增强。在室外,为实现土工格室内的密实填土,建议采用轻压实约150 mm填土,再通过反复碾压和充填获得致密的土工格室结构。

参考文献:

- [1] Chaney R C, Demars K R, Krishnaswamy N R, et al. Model Studies on Geocell Supported Embankments Constructed Over a Soft Clay Foundation[J]. Geotechnical Testing Journal, 2000, 23(1): 45-54.
- [2] Dash S K, Bora M C. Influence of geosynthetic encasement on the performance of stone columns floating in soft clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013, 50(7): 754-765.
- [3] Dash S K, Sireesh S, Sitharam T G. Behaviour of geocell-reinforced sand beds under circular footing [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers Ground Improvement, 2015, 7(3): 111-115.
- [4] Dash S K, Bora M C. Improved performance of soft clay foundations using stone columns and geocell-sand mattress[J]. Geotextiles & Geomembranes, 2013, 41(nov): 26-35.
- [5] Sireesh S, Sitharam T G, Dash S K. Bearing capacity of circular footing on geocell - sand mattress overlying clay bed with void[J]. Geotextiles & Geomembranes, 2009, 27(2): 89-98.
- [6] Zhou H, Wen X. Model studies on geogrid- or geocell-reinforced sand cushion on soft soil[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2008, 26(3): 231-238.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 韩晓, 张孟喜, 李嘉洋, 等. 高强土工格室加筋砂土地基模型试验研究[J]. 长江科学院院报, 2014, 31(3): 27-33.
- [10] 刘蓓蓓, 张孟喜, 王东. 基于强度折减法的土工格室加筋路堤稳定性分析[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2018, 24(2): 287-295.
- [11] Han J, Pokharel S K, Yang X, et al. Performance of Geocell-Rein-

(下转第200页)

异性。中支点附近箱型部分梁高较高时,箱型腹板承担 59.5%~62.2%截面总剪力值,槽型部分腹板承担 20.4%~30.6%;中跨跨中截面箱型部分梁高较低时,箱型部分腹板承担 34.5%~35.7%,槽型部分腹板承担 60.8%~61.1%。

(3)同一断面处,槽型部分边腹板分担剪力值要大于其中腹板;箱型部分边腹板与中腹板剪应力相差较小。实际工程设计中需根据上述剪力分布适当细化边、中腹板箍筋设置。

(4)边墩支点处槽型部分截面设置 3 个支座,左:中:右支座反力比例约为 1:1.42:1。

(5)通过对槽型底板(箱型顶板)边腹板与底板衔接处、悬臂根部及跨中弯矩及剪力计算,按钢筋混凝土构件配置桥面板钢筋。边腹板与底板衔接段需加强配筋,悬臂根部处及跨中部位配筋可取包络设置。通过合理配筋保证桥面板在运营阶段承载力、裂

缝均满足规范要求。

参考文献:

- [1] 张吉,陆元春,吴定俊等.槽形梁结构在轨道交通中的应用与发展[J].铁道标准设计,2013(10):78-82.
- [2] 贺恩怀.槽形梁在城市轨道交通工程中的应用[J].铁道工程学报,2003(2):13-16.
- [3] 袁胜强,顾民杰.宁波市北环快速路工程总体设计[J].工程建设与设计,2015(S1):102-105.
- [4] 聂建国,胡红松.简支槽形梁考虑空间受力的理论解[J].工程力学,2012,29(12):64-71.
- [5] 黄侨,陈卓异,杨明等.槽型梁桥力学性能的研究现状与展望[J].中外公路,2013,33(6):131-135.
- [6] 胥为捷,薛伟辰.预应力混凝土槽型梁的研究与应用[J].建筑结构,2006,36(S1):100-105.
- [7] 田杨,邓运清,黄胜前等.双线铁路曲线简支槽形梁的空间分析[J].铁道工程学报,2012(3):24-28.
- [8] 陈波,赵晓波.轨道交通预应力混凝土槽型梁有限元分析[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2011,30(S2):1241-1245.

(上接第 181 页)

- forced RAP Bases over Weak Subgrade under Full-Scale Moving Wheel Loads [J].Journal of Materials in Civil Engineering,2011,23(11):1525-1534.
- [12] Sireesh S,Sitharam T G,Dash S K.Bearing capacity of circular footing on geocell - sand mattress overlying clay bed with void[J].Geotextiles & Geomembranes,2009,27(2):89-98.
 - [13] he stress-strain behaviour of multiple geocell packs[Z].
 - [14] 刘金龙,栾茂田,王吉利,等.土工织物加固软土路基的机理分析[J].岩土力学,2007(5):1009-1014.
 - [15] 徐婧.山区高速公路拓宽路基不均匀沉降处治技术研究[D].陕西西安:长安大学,2013
 - [16] Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight

- of Soils Using a Vibratory Table[J].Astm.
- [17] Standard test methods for minimum index density and unit weight of soils and calculation of relative density[J].Astm.
 - [18] Standard test method for determining tensile properties of geogrids by single or multi-rib tensile method. ASTM[J].Astm.
 - [19] Simac M R.Connections for geogrid systems [J].Geotextiles & Geomembranes,1990,9(4-6):537-546.
 - [20] Bush D I,Jenner C G,Bassett R H.The design and construction of geocell foundation mattresses supporting embankments over soft grounds[J].Geotextiles and Geomembranes,1990,9(1):83-98.
 - [21] 方浩.离心试验制模幕式砂雨法装置研制与性能评价[Z].黑龙江哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2019.