

高填方加筋新旧路堤现场试验与数值模拟分析

王家全¹, 周 健^{2, 3}, 丛 林⁴, 邓益兵⁵

(1. 广西工学院 土木建筑工程系, 广西 柳州 545006; 2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 3. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 4. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 200092; 5. 上海海事大学 海洋环境与工程学院, 上海 200135)

摘要: 结合山区高速公路拓宽工程, 对土工格室处治高填方新旧路堤进行现场试验, 分析加宽高填方路堤侧向位移、沉降及土压力变化规律, 研究格室处治效果。在现场试验的基础上, 采用三维薄膜单元模拟土工格室的立体加筋性能, 建立三维弹塑性模型, 分析土工格室受力特点, 通过对相关参数的敏感性分析, 揭示高填方加宽路堤的变形规律。结果表明, 采用三维薄膜单元, 能较好地反映土工格室处治现场高填方新旧路堤的规律。与现场试验相比, 利用数值试验不仅能得到现场的加筋效果, 而且还能通过分析筋材与填料参数的变化和筋材铺设间距来研究格室处治高填方路堤的规律, 从而可进一步探讨格室加筋的机制。高填方路堤在加宽路基自重荷载作用下沉降主要集中在加宽路堤的中上部, 侧向位移从路基顶面到底部依次逐渐减少。土工格室所在层位起到扩散荷载、减少侧向变形和不均匀沉降的作用。填料与筋材模量愈高, 加筋间距愈小, 加筋效果愈好, 较为合理的铺设间距为 2~3 m。该研究成果对高填方路堤加筋处理和新旧路基结合部处理均有借鉴意义。

关键词: 数值分析; 加筋土; 高填方; 现场试验

中图分类号: O 241

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2010)增 1 - 2943 - 08

ANALYSIS BETWEEN NUMERICAL AND FIELD TESTS OF HIGH FILL REINFORCED WIDENING EMBANKMENT

WANG Jiaquan¹, ZHOU Jian^{2, 3}, CONG Lin⁴, DENG Yibing⁵

(1. Department of Civil Engineering, Guangxi University of Technology, Liuzhou, Guangxi 545006, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 4. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 5. College of Ocean Environment and Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 200135, China)

Abstract: Associating with mountain freeway widening project, the field test of high fill old and new embankments of geocell treatment was carried out to analyze the lateral displacement, settlement and soil pressure laws of high fill embankment, and the effect of geocell treatment is also studied. Based on field test, the three-dimensional thin membrane element is used to simulate geocell, and three-dimensional elastoplastic model is proposed. The geocell reinforced characteristics and the deformation law of high fill widening embankment by the sensitivity analysis of the relevant parameters are analyzed. The results show that the three-dimensional thin membrane element can better reflect treatment effect that geocell reinforces high fill embankment. Compared with the field test, the field reinforced effect by using numerical experiments is achieved, and the law of geocell

收稿日期: 2009 - 03 - 03; **修回日期:** 2009 - 06 - 02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50879059)

作者简介: 王家全(1981 -), 男, 博士, 2003 年毕业于广西大学土木建筑与工程学院土木工程专业, 现为讲师, 主要从事地基处理、道路与岩土测试、数值分析等方面的研究工作。E-mail: wjqian1999@163.com

treatment of high fill embankment through the analysis of parameter change of geocell, filling and the spacing of reinforcement materials is also achieved, and thus geocell reinforced mechanism is further discussed. Under itself gravity loads of widening embankment, the vertical displacement mainly is concentrated in the upper part of the widening embankment and lateral displacement gradually is reduced from the top surface to the bottom of embankment. Geocell layer plays the role in decentralizing the load transfer, reducing the lateral deformation and differential settlements. The higher moduli of filling and reinforcement material are, and the smaller reinforcement spacing is, and the reinforcement effect is better. The reasonable distance for the geocell spacing is 2 - 3 m. These conclusions may be useful to the design and analysis of reinforced-embankment on high fill and the interface between new and old embankments in widened embankment.

Key words: numerical analysis; reinforced soil; high fill; field test

1 引言

高填方拓宽路堤工程, 涉及到路堤本身的变形与稳定问题, 尤其对于新旧路基搭接段的处治, 有助于减少路堤不均匀变形, 而土工合成材料由于其在路堤工程中的优良表现, 越来越受到工程界的重视。晏长根等^[1]通过试验研究了土工格室有助于提高地基承载力; 王炳龙等^[2]进行了不同高度土工格室处治基床病害的现场试验研究; R. H. Chen 和 Y. M. Chiu^[3]通过土工格室加筋挡墙模型试验研究了土工格室加固破坏机制; 而 L. C. Kevin 和 F. Jonathan^[4]基于极限平衡分析地基极限承载力, 研究比较了 2 种土工格栅加固路基的设计方法; 张胜和赵华宏^[5]对土工格室在软土地基处理进行了研究。土工合成材料的试验研究较多, 现有研究成果主要集中在筋材规格与填料力学性能及加筋体的刚度、厚度、埋深等因素对其加固效果影响的研究^[6-7]。已有的试验研究及工程实践^[8]表明, 土工格室用于路堤与地基, 能均化地基土中的应力分布, 减少路堤不均匀沉降。而有限元法可以考虑各种复杂的工况与边界条件, 便于分析土工合成材料加筋效果^[9-11], 钱劲松等^[12]利用有限元的薄膜单元研究了土工格栅加筋路堤的机制。P. K. Basudhar 等^[13]使用有限元法中的接触条件模拟土工材料加筋砂层在条形荷载作用下的特性。纵观各国相关文献报道, 现有数值分析只局限于定性分析, 主要是通过建立二维数值模型, 考虑个别影响因素(如路堤高度、加筋体刚度等), 且大多数加筋路堤研究是针对软土路堤的软弱特性, 对于山区高填方新旧路堤进行土工格室加筋处治的研究还相对较少。

本文结合山区高速公路拓宽工程, 进行现场试验, 分析高填方路堤侧向位移与沉降规律, 研究格室处治效果。在现场试验的基础上, 采用三维薄膜

单元模拟土工格室, 建立三维弹塑性模型, 对土工格室处治新旧高填方路堤进行数值模拟, 分析新旧路堤搭接段格室受力特点, 比较不同填料模量、格室模量以及不同铺设间距对加筋效果的影响, 揭示高填方加宽路堤的变形规律, 可为相关工程设计提供参考。

2 工程概况

该山区高填方路段为高速公路旧路加宽路堤, 属于新旧路基搭接路段, 共分为 3 级平台放坡, 路堤总高度约为 28 m。该路段全线设计时速 80 km/h, 原路基顶宽 12 m, 加宽后路基宽度为 24.5 m。根据沿线的地质勘察和现场调研, 该高填方路段大部分是土石混填路基, 且地处贵州高原向广西丘陵过渡的斜坡地带, 属构造侵蚀剥蚀山间沟谷地貌。其中场区内地层主要由人工填土、第四系残坡积层亚黏土, 下伏基岩为石炭系下统旧司组黑色炭质页岩, 该地段无断层通过, 地层单一, 场地较稳定。表 1 为老路堤底部土性参数。

表 1 场地土质物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of site soils

土类	容重 ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	相对 密度	孔隙比	内摩擦角 ($^{\circ}$)	黏聚力 (kPa)	压缩模量 (MPa)
填筑土	17.8	2.72	0.93	11.98	27.68	7.2
亚黏土	16.7	2.71	0.85	10.79	12.00	6.1

为保证该高填方加宽路堤稳定, 在路堤底部每间隔 1 m 进行了 1 层格室处治, 连续进行 3 层格室处治, 增强地基的承载力与侧向约束能力。在加宽路堤其余部位间隔 3 m 设置一层土工格室, 并与老路堤搭接 2 m 以上, 对于新老路堤结合部, 加筋处治后还进行了重点碾压。

3 现场试验

3.1 现场路堤剖面试验概况

图 1 为现场试验高填方路堤断面, 在第一及第二级平台分别埋设了一根测斜管, 观测填土过程中以及工后的路堤边坡深层侧向位移; 同时在每级平台处埋设沉降桩, 观测填土过程中以及工后路堤填土的竖向沉降; 土压力分 2 层埋设, 一层设在填方边坡原地表标高处, 另一层设在路堤边坡中间位置, 均位于土工材料处治层下。另外, 在没有加筋处理段相同标高部位埋设一样的土压力盒, 以便对比分析格室处治效果。

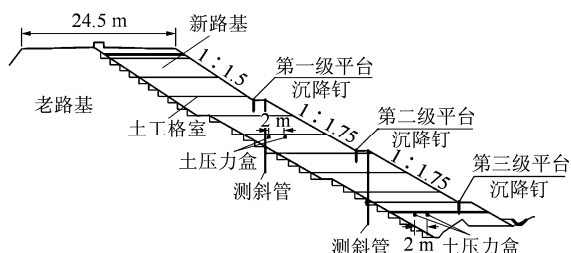
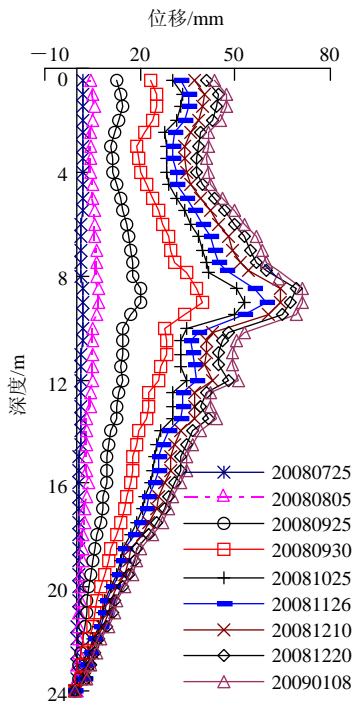


图 1 现场试验高填方路堤断面

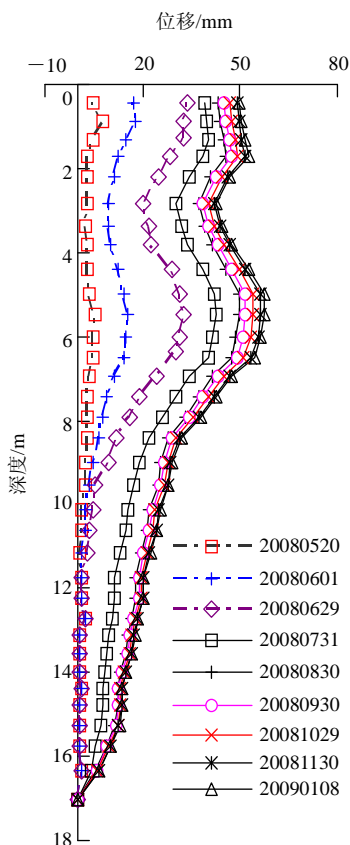
Fig.1 Field test of high fill embankment sections

3.2 深层侧向位移分析

图 2 为第一、二级平台处深层侧向位移变化曲线, 从图中可以看出: 随着填方路堤填筑高度的增加, 开始阶段侧向位移均发展较快, 施工期结束后,



(a) 第一级平台位置



(b) 第二级平台位置

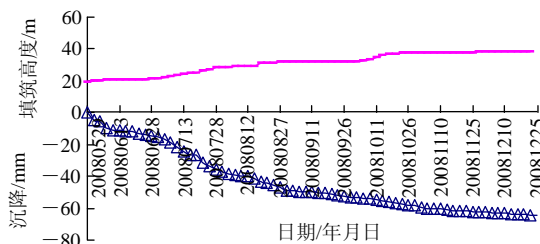
图 2 平台处深层侧向位移变化曲线

Fig.2 Field test of high fill embankment sections

侧向位移趋于收敛阶段; 第一级平台处累计最大位移为 76 mm, 而第二平台处测斜管最大位移为 58 mm, 2 处的侧向位移速率均远小于 1.0 mm/d, 满足深层位移控制要求, 路堤稳定。

3.3 沉降分析

图 3 为各级平台处沉降和填筑高度变化曲线, 从图中可以看出, 在填筑开始阶段, 各级平台沉降发展较快, 主要原因是路堤自身重力随着填筑高度的增加而增加, 从而使得路堤自身土层产生较为明显的压缩变形。从各级平台沉降图可以看到, 路堤填筑结束后, 路堤的沉降变形趋于缓和, 特别是从 2008 年 12 月以后的观测结果表明, 沉降变形趋于缓和, 已进入收敛阶段。



(a) 第三级平台

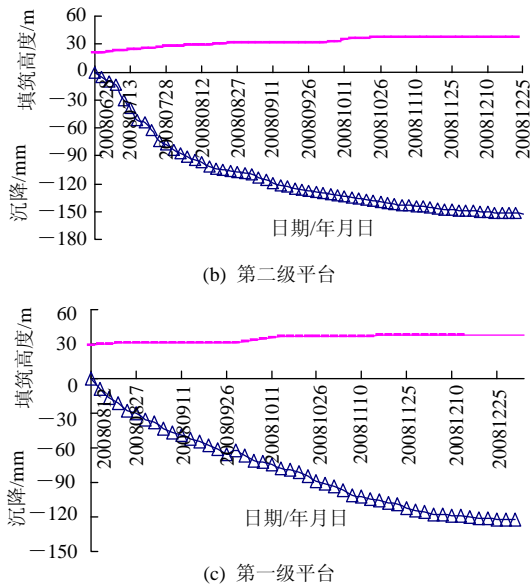


图3 沉降和填筑高度变化曲线

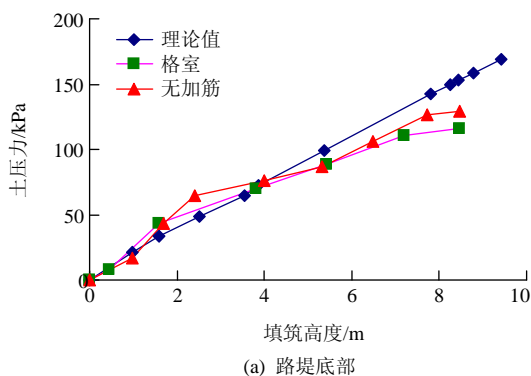
Fig.3 Settlement variation curves of settlements and filling heights

从图3中还可以看出，第一、二和三级平台总沉降量分别为122，162和85mm，第一、二级的沉降量远大于第三级的沉降量，说明路堤自身的压缩变形相当明显，路堤上部沉降大于下部沉降。

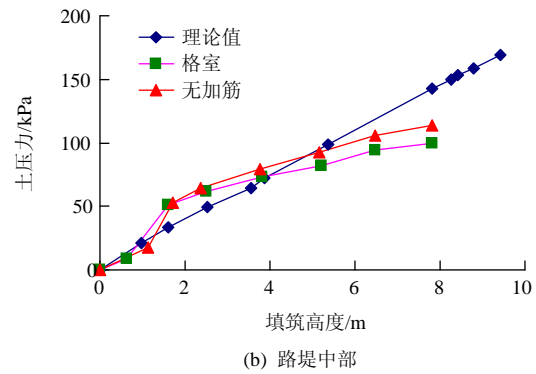
3.4 土压力分析

为了分析和比较，在对应的同一张图上，绘制了按土的重度为 18.2 kN/m^3 计算的理论竖向土压力和填土高度关系图。在格室断面与未加筋断面的相同标高位置，选取对应的土压盒进行比较分析。

从图4中可以看出，土压力数值随填土高度增大而增大，在开始阶段，土压力增长随填土高度线性变化，随着加宽路堤的收坡填筑，土压力数值也由线性变化过渡为缓慢增加的曲线形式。从图4可以发现，格室对路堤土压力的扩散效果。在填筑达到一定高度后，格室层位下测得的土压力值均小于相同位置无加筋层位下的压力值，表明格室层应力扩散效果明显。主要原因是格室属于立体加筋材料，具有较强的侧向约束能力，从而使得格室层的整体刚性大幅度提高，起到较强的扩散荷载作用。



(a) 路堤底部



(b) 路堤中部

图4 土压力与填土高度变化曲线

Fig.4 Soil pressures with different heights of filling

4 三维数值模型

对于加筋路堤结构层的计算，有多种模拟方法，较为普遍的方法是将土工合成材料视为拉力膜，首先建立描述土工合成材料与土体相互作用模型，采用连续介质力学的有限元方法进行分析。最后通过现场试验对数值分析所得结果进行可靠性评价。

4.1 格室薄膜单元

土工格室是立体加筋结构，只能受拉，不能受压，是一种类似薄膜的材料。本文利用ANSYS程序提供的SHELL单元来模拟土工格室的结构性状。如图5所示，SHELL是一个三维构件，平面内具有膜强度但平面外没有弯曲强度，设定几何尺寸后，由多个SHELL单元空间组合即可得到需要的格室形状，该图中的三角形代表该SHELL单元支持简化为三角形形式，以满足不同网格划分需要(图中： x_{IJ} 为没有定义单元坐标时的 x 轴， x 为定义了单元坐标时的 x 轴)。构件在每个节点有3个自由度：沿节点 x, y, z 轴向的移动。构件定义为4个节点，4个厚度，材料方向角和正交各向异性材料性质，正交各项异性材料方向对应单元坐标系。在本文中，格室单元4个厚度均一致，默认为均质材料。大量

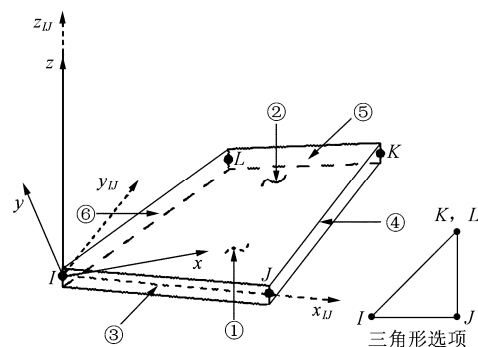


图5 薄膜单元结构图

Fig.5 Schemes of membrane cell structure

计算表明, 土工合成材料在土中受到的拉力较其抗拉强度要小得多, 故将格室的本构关系取为线弹性^[14]。

4.2 土体本构关系

考虑到岩石、土体等属于颗粒状材料, 其受压屈服强度远大于受拉屈服强度, 不仅静水压力可以引起岩土塑性体积变化, 而且偏应力也可能引起塑性体积变化(剪胀), 故采用能准确描述这类材料的 DP 模型。因而土体采用八节点三维等参单元, 用 Drucker-Prager 屈服准则模拟路基和地基土的弹塑性特性。

Drucker-Prager 屈服条件又称广义的 Mises 屈服准则, 它在 Mises 屈服准则的基础上考虑了静水压力的影响, 增加了一个静水压力的影响项:

$$F = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k = 0 \quad (1)$$

式中: I_1 为应力张量第一不变量, $I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$; J_2 为应力偏张量第二不变量, $J_2 = 1/6[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]$; α, k 为与材料性质有关的参数。

事实上, Drucker-Prager 屈服条件是修正的 Coulomb 屈服条件, 如果使 Drucker-Prager 屈服条件的圆锥面与 Coulomb 屈服条件的六面锥体母线重合, 则可导出如下公式^[15]:

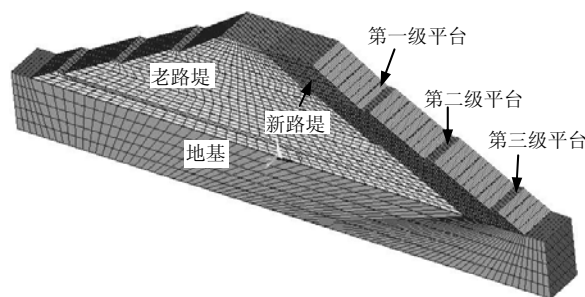
$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \frac{\sin \varphi}{\sqrt{3(3 + \sin^2 \varphi)}} \\ k &= \frac{\sqrt{3}c \cos \varphi}{\sqrt{3 + \sin^2 \varphi}} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: c, φ 分别为土的黏聚力和内摩擦角。

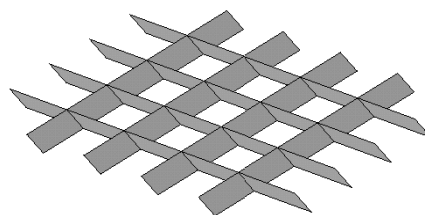
4.3 计算模型参数

根据现场实际情况, 土工格室尺寸为 25 cm×25 cm×10 cm(长×宽×高)。格室与老路堤搭接 2 m, 一直铺设到新路堤边缘, 间隔 3 m 设置一层土工格室。路堤分三级平台放坡, 第一级平台坡率为 1:1.50, 其他平台坡率为 1:1.75, 每级平台高差 8 m, 路堤高 28 m, 地基计算深度为 15 m, 据此建立三维数值模型有限元网格划分图(见图 6)。在计算中考虑到老路堤使用多年, 固结沉降已经完成, 故只考虑新路堤填筑对整个路堤模型的影响。

考虑三维特性, 在路线方向取 10 m 计算, 边界沿路线方向水平约束。模型底面垂直约束, 左右边界水平约束。计算所用材料主要物理的参数见表 2。



(a) 三维路堤模型



(b) 土工格室

图 6 有限元网格划分图

Fig.6 Finite element meshes

表 2 材料主要物理力学参数

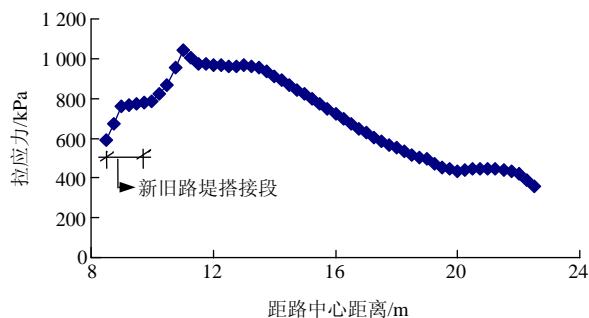
Table 2 Main physico-mechanical parameters of materials

介质	厚度 /m	弹性模量 /MPa	容重 /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松比	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /($^\circ$)
加宽路基	-	40.5	18	0.30	30	16
旧路路基	-	65.0	18	0.30	40	20
地基	15.000	20.0	17	0.35	15	10
土工格室	0.003	1 000.0		0.20		

5 有限元结果分析

5.1 土工格室受力分析

高填方新旧路堤搭接, 受到新路堤荷载作用, 加宽路基与地基会产生侧向挤出, 使搭接在新旧路堤过渡段的格室承受拉力, 产生水平位移。图 7(a) 为路堤横断面方向的土工格室拉应力分布曲线, 拉应力从坡脚向路堤中心逐渐增大, 说明土工格室从路堤边缘向路堤中心逐渐发挥加筋作用, 其中在新



(a) 路堤横断面方向

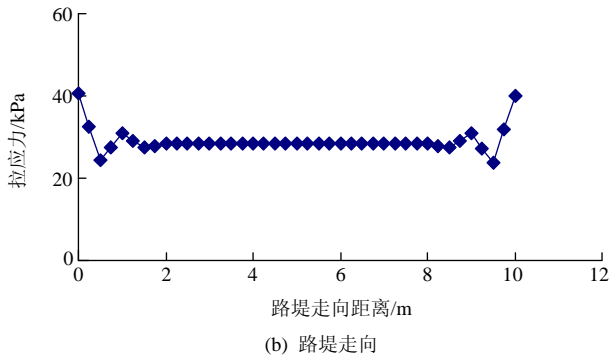


图7 土工格室拉应力分布曲线
Fig.7 Stress distribution curves of geocell

旧路堤搭接段，格室拉力达到最大值，接着拉应力在老路堤部分逐渐减小。这从一侧面反映了新路路堤搭接部位是一个薄弱地带，需要加强处治。图7(b)为路堤走向的土工格室拉应力分布曲线，从图中可以看出，路堤走向方向的拉应力数值较小，受力较为均衡，符合路堤实际受力情况。

5.2 土工格室处治效果

图8为路堤顶面下设置第一层格室底部路堤土压力变化曲线，从图中可以看出，在新旧路堤搭接段和整个加宽路堤范围内(见图中0~12 m处)，由于筋材的加筋作用，加筋路堤的格室层底土压力明显小于无加筋路堤时的土压力，说明土工合成材料所在层位起到了扩散荷载的作用，从而有助于减少自身压缩沉降。这与现场试验土压力分析(见图4)得出的规律相同，验证了数值分析的合理性。

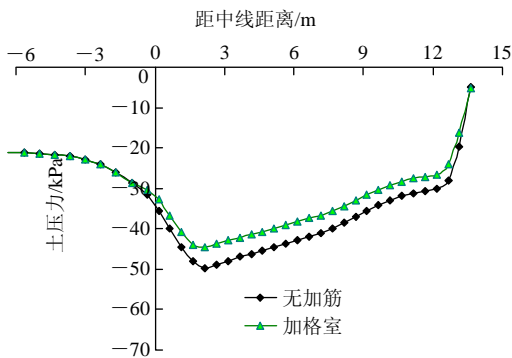


图8 格室底部路堤土压力变化
Fig.8 Soil pressures at the bottom of geocell

从图9可以发现，在路堤底部坡脚以下，侧向位移呈向右凸出的拱形，加筋之后，凸出的拱形大为减少，侧向位移得到有效控制，说明格室的存在，对侧向位移有较明显的约束作用。

图10为路堤顶面沉降变化曲线，从图中可以发现，格室的存在，只是稍微降低了总沉降，改善总

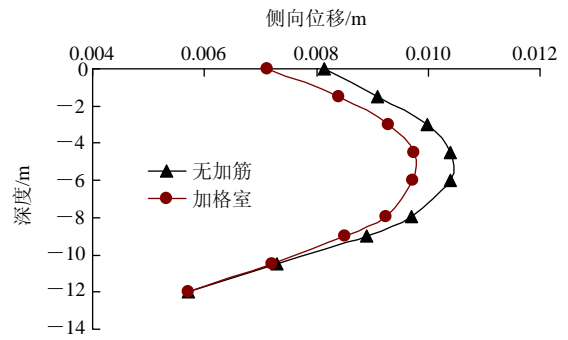


图9 加宽路堤底部侧向位移变化
Fig.9 Lateral displacement change of embankment bottom

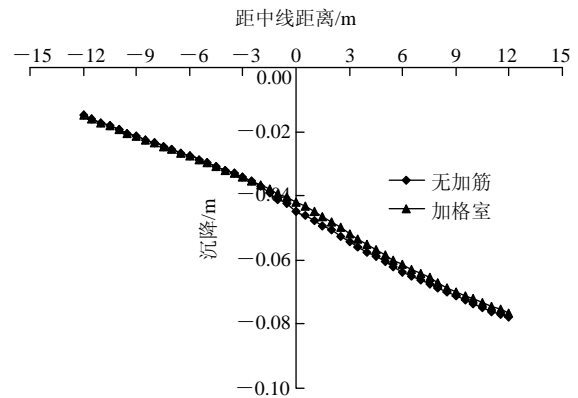
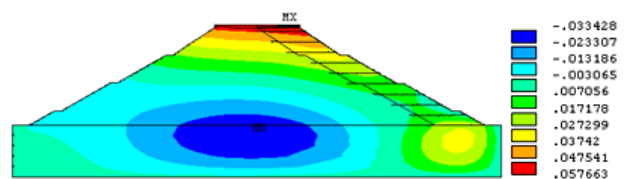


图10 路基顶面沉降变化
Fig.10 Settlement change of embankment top

沉降效果不大明显；但在改善不均匀沉降方面，效果较为明显，可以看到在新旧路堤搭接部位(见图中距中线距离0~2 m处)加入土工格室后，与无加筋路堤相比，缓和过渡了新旧路堤搭接段的不均匀沉降。

5.3 加宽路堤变形规律

图11为高填方新旧路堤位移分布。从图11(a)可以看到：路堤水平位移分布情况为路堤顶部的路肩处水平位移最大，往路基底部依次减少。其中在加宽路堤底部出现一个较为明显的圆形区域，该区域的水平位移比周边区域的位移大，表明该圆形区域受到高填方路堤上部填土的俯冲自重荷载作用，因此实际施工中要加强该区域土体的压实度，加强施工监控。



(a) 水平向位移

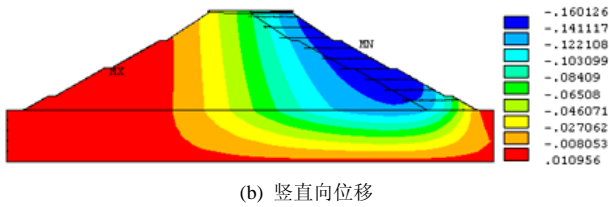


图 11 新旧路堤搭接位移分布(单位: m)
Fig.11 Displacement change of embankment top(unit: m)

在图 11(b)中, 新旧路竖向位移主要集中在新路堤的中上部, 并且新路堤的竖向位移要明显大于旧路堤, 其原因是旧路堤经过多年运营, 路基的固结沉降基本完成, 加宽的新路堤自身沉降较为明显, 其施加的荷载只能使老路堤发生较小的竖向位移。

在现场试验中(见图 3), 路堤中上部沉降大于路堤下部沉降, 这与数值模拟所得沉降结果较为吻合。

5.4 格室处治效果的敏感性分析

从图 12 可以看出, 不同弹性模量填料对格室处治效果的影响。填料模量越高, 即加宽路堤碾压越密实, 路堤的侧向位移越小, 格室处治效果越好。

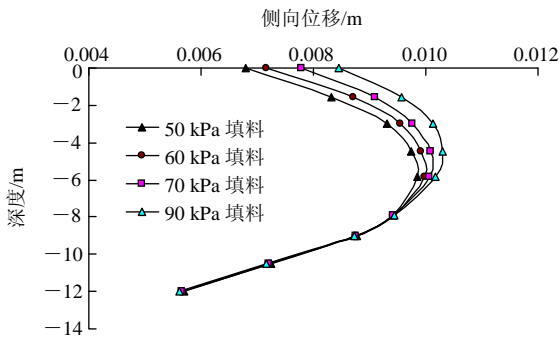


图 12 不同弹性模量填料的加宽路堤底部侧向位移
Fig.12 Lateral displacement at the bottom of widening embankment with different moduli of filling

图 13 为不同弹性模量格室处治的路堤土压力变化影响, 从图中可以发现, 格室模量仅为 0.5 GPa 时, 层底土压力扩散效果与无加筋相比, 并不明显, 随着格室模量的提高, 格室层的加筋作用越来越明显, 但加筋作用的增加趋势变缓。从图 13 可以看到, 模量为 5.0 与 10.0 GPa 格室的加筋作用区别不大。

图 14 为铺设不同加筋间距的路堤平台底部位移。从图中可以发现, 随着间距的减小, 路堤土的侧向位移跟着变小, 但过小的间距会造成材料的浪费, 较为合理的铺设间距为 2~3 m。

从图 14 中还可以发现, 路堤上部侧向位移均大于下部侧向位移; 现场试验中(见图 2), 侧向位移亦是上部大于下部, 数值试验与现场实测规律

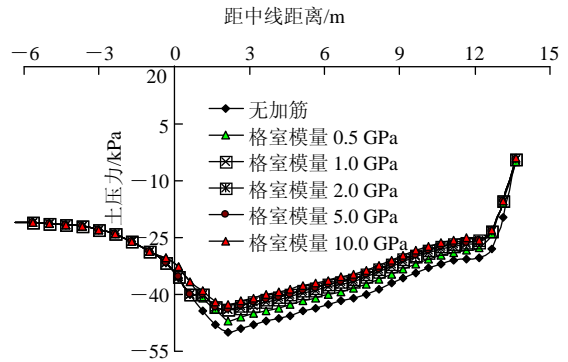


图 13 不同格室模量处治的路堤土压力变化
Fig.13 Soil pressure of embankment with different moduli of geocell

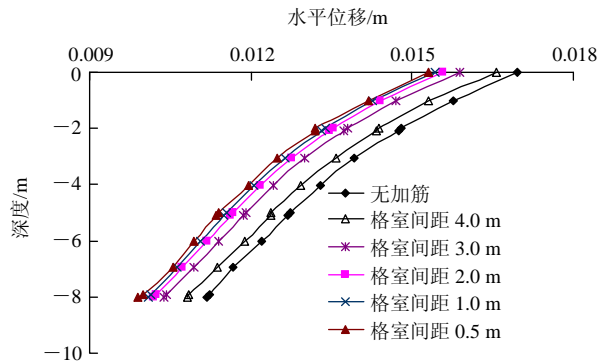


图 14 不同加筋间距的路堤平台底部位移
Fig.14 Lateral displacement at the bottom of embankment platform with different geocell spacings

相符。

6 结 论

(1) 在加宽路堤自重荷载作用下, 高填方自身压缩变形明显, 最大沉降出现在路堤中上部, 底部沉降最小, 最大水平向位移出现在路堤的顶部外侧, 水平位移从路基顶面到底部依次减少。与现场试验相比, 数值模拟的路堤变形规律与现场分析结果较为吻合, 说明了数值模拟的正确。

(2) 采用三维薄膜单元, 由多个薄膜单元空间组合即可得到需要的格室形状, 可以有效的模拟土工格室的立体加筋作用, 能较好的反映土工格室处治现场高填方新旧路堤的规律。

(3) 土工格室拉应力从路堤边沿向路堤中心逐渐增大, 在新旧路堤搭接位置达到最大值, 土工格室从路堤边缘向路堤中心逐渐发挥加筋作用。加强新旧路堤搭接段加筋压实锚固有利于发挥格室的加筋作用。

(4) 土工格室处治新旧路堤, 土工格室所在层位起到了扩散荷载、减少侧向变形和不均匀沉降的作用。填料与筋材模量愈高, 加筋间距愈小, 加筋效果愈好, 但加筋作用的增加趋势变缓, 较为合理的铺设间距为 2~3 m。

参考文献(References):

- [1] 晏长根, 杨晓华, 石玉玲, 等. 土工格室在黄土边坡公路中的试验研究及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增 1): 3 235 - 3 238. (YAN Changgen, YANG Xiaohua, SHI Yuling, et al. Testing and application of geocell in loess slopes of highway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Supp.1): 3 235 - 3 238.(in Chinese))
- [2] 王炳龙, 周顺华, 宫全美, 等. 不同高度土工格室整治基床下沉病害的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(2): 163 - 166.(WANG Binglong, ZHOU Shunhua, GONG Quanmei, et al. Experimental study of treatment of subgrade subsidence by geocell of different heights[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(2): 163 - 166.(in Chinese))
- [3] CHEN R H, CHIU Y M. Model tests of geocell retaining structures[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2008, 26(1): 56 - 70.
- [4] KEVIN L C, JONATHAN F. A comparison of two design methods for unpaved roads reinforced with geogrids[J]. Canada Geotechnical Journal, 2006, 43(12): 1 389 - 1 394.
- [5] 张 胜, 赵华宏. 土工格室在软土地基处理中的应用与研究[J]. 公路交通科技, 2004, 21(4): 37 - 39.(ZHANG Sheng, ZHAO Huahong. Study of application of cellular geogrid system in soft ground treatment[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21(4): 37 - 39.(in Chinese))
- [6] 杨晓华. 土工格室工程性状及应用技术研究[博士学位论文][D]. 西安: 长安大学, 2005.(YANG Xiaohua. Study of engineering character and applied technique of geocell[Ph. D. Thesis] [D]. Xi'an: Chang'an University, 2005.(in Chinese))
- [7] 赵明华, 张 玲, 邹新军, 等. 土工格室-碎石桩双向增强复合地基研究进展[J]. 中国公路学报, 2009, 22(1): 1 - 10.(ZHAO Minghua, ZHANG Ling, ZOU Xinjun, et al. Research progress in two-direction reinforced composite foundation formed by geocell reinforced mattress and gravel piles[J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(1): 1 - 10.(in Chinese))
- [8] 谢永利, 俞永华, 杨晓华. 土工格室在处治路基不均匀沉降中的应用研究[J]. 中国公路学报, 2004, 17(4): 7 - 10.(XIE Yongli, YU Yonghua, YANG Xiaohua. Application study of treating differential settlement of subgrade with geocell[J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(4): 7 - 10.(in Chinese))
- [9] MADHAVI G L, RAJAGOPAL K. Parametric finite element analyses of geocell-supported embankments[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2007, 44(1): 917 - 927.
- [10] 俞永华, 谢永利, 杨晓华, 等. 土工格室柔性搭板处治的路桥过渡段差异沉降三维数值分析[J]. 中国公路学报, 2007, 20(4): 12 - 18.(YU Yonghua, XIE Yongli, YANG Xiaohua, et al. Three-dimensional numerical analysis of geocell flexible approach slab for treating differential settlement at bridge-subgrade transition section[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(4): 12 - 18.(in Chinese))
- [11] 陈仁朋, 贾 宁, 陈云敏. 桩承式加筋路堤受力机理及沉降分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(23): 4 358 - 4 367.(CHEN Renpeng, JIA Ning, CHEN Yunmin. Mechanism and settlement analysis of pile-supported and geogrid-reinforced embankments[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(23): 4 358 - 4 367.(in Chinese))
- [12] 钱劲松, 凌建明, 黄琴龙. 土工格栅加筋路堤的三维有限元分析[J]. 同济大学学报, 2003, 31(12): 1 421 - 1 425.(QIAN Jinsong, LING Jianming, HUANG Qinlong. 3D finite element analysis of embankment reinforced by geogrid[J]. Journal of Tongji University, 2003, 31(12): 1 421 - 1 425.(in Chinese))
- [13] BASUDHAR P K, DIXIT P M, GHARPUREA A. Deb, K. Finite element analysis of geotextile-reinforced sand-bed subjected to strip loading[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2008, 26(1): 91 - 99.
- [14] 朱 湘. 软土地基格栅加筋路堤结构性能研究[博士学位论文][D]. 南京: 东南大学, 2000.(ZHU Xiang. Structure properties of soft soil reinforced geogrid embankment[Ph. D. Thesis][D]. Nanjing: Southeast University, 2000.(in Chinese))
- [15] 郑颖人, 龚晓南. 岩土塑性力学基础[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1989.(ZHENG Yinren, GONG Xiaonan. Geotechnical plastic mechanics foundation[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1989.(in Chinese))