

DOI: 10.11779/CJGE2017S2021

# 桩承式变刚度加筋垫层复合地基数值模拟

曹文昭<sup>1</sup>, 郑俊杰<sup>1</sup>, 严 勇<sup>2</sup>

(1. 华中科技大学岩土与地下工程研究所, 湖北 武汉 430074; 2. 湖北省电力勘测设计院, 湖北 武汉 430040)

**摘要:** 提出采用高强土工格栅和土工格室对天然砂石与建筑固体废弃物再生混凝土骨料的混合料进行加筋, 通过添加适量水泥、石灰或粉煤灰等黏结材料, 构造变刚度加筋垫层, 替代桩筏复合地基中的混凝土板, 形成采用柔性筏板的桩筏复合地基。通过建立有限元数值模型进行了对比分析, 研究结果表明: 土工格室加筋垫层可以通过提兜效应和柔性筏板效应, 充分调动桩墙的承载能力, 有效减小桩间土荷载, 提高桩土应力比; 增大垫层弹性模量对土工格室加筋垫层工况工作性状的改善更为显著; 实际工程中加筋垫层厚度不宜过大。

**关键词:** 变刚度加筋垫层; 土工格室; 数值模拟; 沉降; 桩土应力比

中图分类号: U416.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)S2-0083-04

作者简介: 曹文昭(1990-), 男, 江西瑞昌人, 博士, 助理研究员, 主要从事地基处理与路基支挡结构方面的研究。

E-mail: cwz\_1990@hust.edu.cn。

## Numerical simulation of composite foundation using pile-supported and geosynthetics-reinforced cushion with variable stiffness

CAO Wen-zhao<sup>1</sup>, ZHENG Jun-jie<sup>1</sup>, YAN Yong<sup>2</sup>

(1. Institute of Geotechnical and Underground Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Powerchina Hubei Electric Engineering Corporation, Wuhan 430040, China)

**Abstract:** The geogrid and geocell with high tensile strength are meant to reinforce the mixture of natural gravel and recycled concrete aggregate made of the soild waste of construction. The reinforced cushion with variable stiffness is constructed by adding moderate cement, lime or fly ash to the reinforced mixture, which can be adopted as the flexible raft to replace the concrete raft of pile-raft composite foundation. The finite element numerical model is established for comparison investigation. The results indicate that through the tensioned membrane effect and flexible raft effect, the geocell-reinforced cushion plays an important role in mobilizing the bearing capacity of the pile wall, decreasing the settlement of the surrounding soil and improving the pile-soil stress ratio. The working performance of the geocell-reinforced case can be better improved by increasing the modulus of the cushion. The thickness of the reinforced cushion should not be too thick.

**Key words:** reinforced cushion with variable stiffness; geocell; numerical simulation; settlement; pile-soil stress ratio

## 0 引言

近年来, 中国高速公路和高速铁路的建设速度要求选用工期短、工后沉降小且收敛速度快的地基处理方法, 在这样的背景下, 桩承式加筋垫层技术得到了越来越广泛的应用<sup>[1]</sup>。桩承式加筋垫层技术是将竖向桩体与水平向加筋垫层联合对地基进行处理, 具有施工速度快、承载力高、沉降小和造价低等优点, 适合于路堤柔性荷载下的地基处理, 并在减小新、旧路基差异沉降和控制桥头跳车方面取得了显著效果。

国内外许多学者在对桩承式加筋垫层技术的研究中, 根据实际工程地质条件和变形控制标准, 对不同桩型的研究较多, 如 CFG 桩<sup>[1]</sup>、大直径现浇薄壁管桩<sup>[2]</sup>和高压喷射注浆桩等<sup>[3]</sup>, 也有学者对加筋垫层中筋材

的受力变形特征开展了模型试验和现场试验研究<sup>[4]</sup>。但总体而言, 对加筋垫层的研究还不够, 垫层形式及结构较为单一, 通常做法为在碎石垫层中水平铺设 1~2 层土工合成材料进行加筋, 并广泛应用于公路和铁路工程。该类加筋垫层的强度和刚度提升程度有限, 不足以控制路堤荷载作用下的地基沉降和不均匀沉降, 当桩体强度和刚度较高时, 不仅其承载和控沉作用无法得到充分发挥, 桩体还会向垫层中发生较大的刺入变形。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0800208); 国家自然科学基金项目(51478201); 中国博士后科学基金项目(2017M612459)

收稿日期: 2017-08-02

## 1 再生骨料加筋垫层

桩筏复合地基基于 2005 年首次应用于京津城际铁路松软土地基的处理，并迅速发展成为中国高速铁路工程中控制路基工后沉降的一种重要地基处理方法。张继文等<sup>[5]</sup>结合京沪高铁凤阳试验段现场测试结果，认为从经济角度考虑，可适当减小桩筏复合地基中混凝土板的厚度和配筋率；曾俊铖<sup>[6]</sup>则建议该试验段中桩筏复合地基的筏板厚度由原来的 0.5 m 减小为 0.3 m。表明现有的桩筏复合地基设计偏于保守，存在较大的优化空间。

中国公路和铁路工程对砂石材料的需求量不断增加，开山采石不止，植被破坏严重。与此同时，中国建筑固体废弃物已占城市垃圾总量的 1/3 以上，大量建筑固体废弃物被运往郊外露天堆放或填埋，仅少部分用作道路、基础垫层和场地回填，运输费用高且大量占用土地资源，并造成严重的生态环境破坏。鉴于此，中国《中长期铁路网规划》(2016)明确提出大力推广采用环保新技术，促进固体废弃物的循环使用和综合利用。将建筑固体废弃物制成再生混凝土骨料 (recycled concrete aggregate，简称 RCA) 用于垫层，可大量吸纳建筑固体废弃物，减少天然砂石的消耗，实现可持续发展。但是与天然砂石相比，RCA 具有孔隙率高、吸水性大和强度低等特征，无法直接用作垫层材料，需采取相应措施对 RCA 进行处理，使之满足工程应用的要求。

土工格室加筋垫层由三维土工格室与内部填料共同组成具有一定抗弯、抗剪和抗压能力的柔性筏板结构。将天然砂石与 RCA 混合后采用高强土工格栅和土工格室进行加筋，通过添加适量水泥、石灰或粉煤灰等黏结材料，形成变刚度加筋垫层，以克服传统加筋垫层的强度和刚度偏小且不易调节的不足。同时，变刚度加筋垫层还可以替代桩筏复合地基中的混凝土板，施工简便，造价经济，并可根据实际工程地质条件、桩型和布桩形式设置不同类型、厚度和刚度的复合加筋垫层，以满足路堤荷载下的地基变形控制要求。

## 2 计算模型建立

### 2.1 工程概况与数值建模

十（堰）漫（山关）高速某试验段地基土层分布自上而下主要包括冲填土、软黏土、粉质黏土和风化片岩四层，采用桩承式加筋垫层技术进行处理，桩体连续布置形成桩墙，桩端进入风化片岩层，桩墙长  $L = 12$  m，净间距  $s = 3$  m，宽  $B = 0.5$  m，加筋垫层厚 0.5 m，路堤填土高度  $H = 6.0$  m，具体工程概况见文献[7]。采

用有限元软件 PLAXIS 建立二维平面应变模型，如图 1 所示，不考虑地下水的影响。对于土工格栅加筋垫层 (GR) 工况，垫层材料为天然砂石，土工格栅铺设在垫层中间，而土工格室加筋垫层 (CR) 工况中，垫层材料为 RCA 与天然砂石的混合料，土工格室加筋层厚 0.2 m，距垫层底部 0.1 m，路堤分 6 层填筑，每层高 1 m。

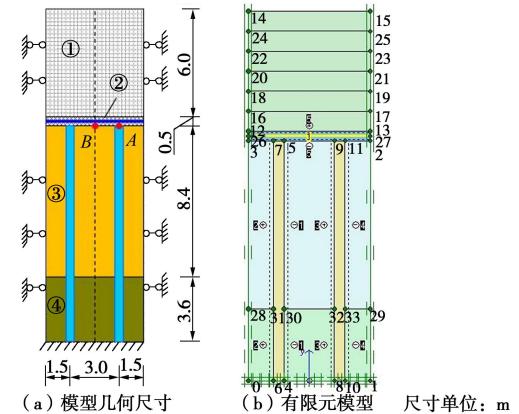


图 1 数值计算模型

Fig. 1 Numerical model

数值模型中，实体单元采用 15 节点三角形高精度单元，土工格栅采用 5 节点内置格栅单元，筋土界面和桩土界面采用 5 对节点界面接触单元，接触单元的刚度矩阵由 Newton-Cotes 积分得到。路堤填土、垫层和桩间土采用莫尔-库仑 (M-C) 破坏准则，桩墙和筋材采用线弹性模型，界面采用理想弹塑性模型，其中界面黏聚力和摩擦角由相邻土体的抗剪强度参数折减得到，折减因子取为 0.8。

### 2.2 计算参数的确定

数值模拟中，土工格室加筋层一般被视为黏聚力比约束土体大但内摩擦角与约束土体相同的等效土层，其中土体似黏聚力  $c_r$  的大小与土工格室提供的约束力  $\Delta\sigma_3$  相关，并由以下方程确定

$$c_r = \frac{\Delta\sigma_3}{2} \sqrt{K_p} \quad , \quad (1)$$

式中， $K_p$  为被动土压力系数， $\Delta\sigma_3$  可由薄膜理论进行计算。把土工格室约束土体视为承受内部压力的短圆柱体，并假定受力过程中体积保持不变，则有

$$\Delta\sigma_3 = \frac{2M}{D_0} \left( \frac{1 - \sqrt{1 - \varepsilon_a}}{1 - \varepsilon_a} \right) \quad . \quad (2)$$

式中  $\varepsilon_a$  为土工格室的拉伸应变，一般取为 2%； $D_0$  为土工格室单孔的等效初始直径 (m)； $M$  为土工格室在应变为  $\varepsilon_a$  时的割线模量 (MPa)。

根据 RCA 与天然砂石混合料的三轴试验结果，黏聚力  $c = 2.2$  kPa，内摩擦角  $\varphi = 26.5^\circ$ 。参考文献[8]，土工格室在  $\varepsilon_a = 2\%$  时割线模量  $M = 410$  kN/m，单孔等

效初始直径  $D_0 = 0.258$  m, 根据式(1)和式(2)计算得到  $c_r = 28.5$  kPa, 则土工格室加筋层黏聚力  $c_c = 30.7$  kPa, 内摩擦角  $\varphi_c = 26.5^\circ$ , 根据文献[9]算得土工格室加筋层弹性模量  $E_g = 37.7$  MPa。对于土工格室加筋层两侧的混合料垫层, 由于其弹性模量与天然砂石相差不大且对地基表面沉降和应力分布影响较小, 为方便对比分析, 取值与天然砂石垫层相同, 即 26 MPa, 其余参数见表 1。

表 1 数值建模参数

Table 1 Parameters of numerical model

材料	天然重度 ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	弹性模量 (MPa)	泊松比	黏聚力 (kPa)	内摩擦角 ( $^\circ$ )
①路堤填料	20.4	30.2	0.30	32.0	28.5
②砂石垫层	21.3	26.0	0.30	1.5	30.5
③软黏土	19.2	4.3	0.35	12.0	13.6
④粉质黏土	19.1	6.4	0.33	15.0	12.2
桩墙	22.0	1000	0.2	—	—
土工格栅	抗拉刚度 $E_A = 86$ MN/m				

### 3 数值模拟结果分析

图 2 为路堤填筑完成时的地基表面沉降。两种工况的最大和最小沉降分别发生在路基中心桩间土和桩墙处, CR 工况的最大沉降为 23.8 mm, 明显小于 GR 工况的 29.1 mm, 而桩墙压缩量均较小, 相差不大。表明土工格室加筋垫层可以明显减小桩间土沉降和桩-土差异沉降。分析原因: 一方面, 土工格室加筋垫层的提兜效应和柔性筏板效应可以对路堤填土产生显著的托举力, 降低作用在桩间土上的附加应力; 另一方面, 土工格室加筋垫层具有较高的刚度和强度, 可以有效约束桩墙向垫层内的刺入变形, 从而减小桩间土沉降。

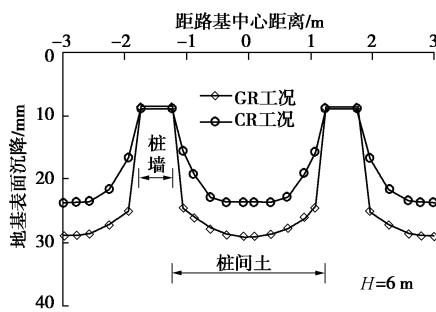


图 2 地基表面沉降

Fig. 2 Settlements of ground surface

图 3 为地基表面桩、土沉降和应力变化规律, P 和 S 分别代表桩墙中心 (点 A) 和路基中心桩间土 (点 B), 如图 1 所示。随路堤填土高度增加, GR 工况桩间土的沉降速率明显大于 CR 工况, 桩-土差异沉降逐渐增大, 路堤填筑完成时, GR 工况和 CR 工况的桩-

土差异沉降分别为 20.7 mm 和 15.3 mm。随路堤填土高度增加, 桩土应力比  $n$  均逐渐增大, 且 CR 工况始终大于 GR 工况, 路堤填筑完成时,  $n$  分别为 12.6 和 7.6。表明采用土工格室加筋垫层可将更多路堤荷载传递至桩墙, 充分发挥桩墙的承载能力, 减小桩间土荷载, 进而减小桩间土沉降和地基表面桩-土差异沉降。

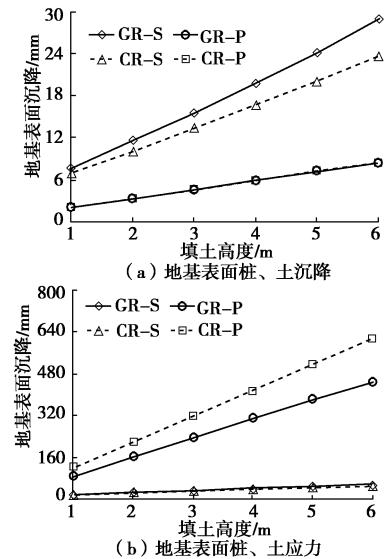


图 3 地基表面桩、土沉降和应力变化规律

Fig. 3 Settlement and stress of the pile wall and surrounding soil of the ground surface

### 4 参数分析

#### 4.1 垫层弹性模量

图 4 为垫层弹性模量  $E_c$  的影响。随  $E_c$  增大, 桩间土沉降均逐渐减小, 桩墙沉降增大, 但桩-土差异沉降逐渐减小。 $E_c$  从 10 MPa 增大至 50 MPa, GR 工况的桩-土差异沉降降幅为 35.7%, 而 CR 工况的降幅为 37.4%。随  $E_c$  增大, 桩墙应力均逐渐增大, CR 工况的增加速率大于 GR 工况, 而桩间土应力均逐渐减小, 但差异不明显。 $E_c$  从 10 MPa 增大至 50 MPa, CR 工况的  $n$  从 9.3 增大至 17.5, 但 GR 工况的  $n$  仅从 5.6 增大至 8.6。

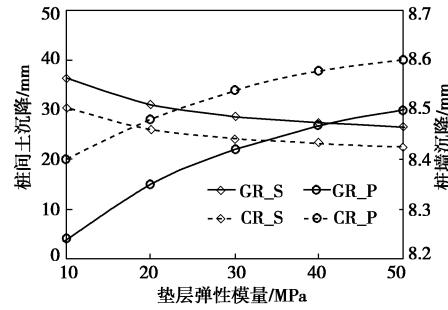


图 4 垫层弹性模量的影响

Fig. 4 Effect of modulus of cushion

#### 4.2 垫层厚度

土工格栅始终位于垫层中间, 而土工格室层距垫层底 0.1 m, 图 5 为垫层厚度  $h_c$  的影响。随  $h_c$  增大, 桩间土沉降均逐渐增大, 但增幅很小, 此时桩墙沉降均小幅减小。 $h_c$  从 0.3 m 增大至 0.7 m, GR 工况的桩-土差异沉降增大 3.5 mm, 而 CR 工况则增大 2.7 mm。随  $h_c$  增大,  $n$  均逐渐增大, GR 工况的桩墙应力逐渐减小, 但 CR 工况略有增大。 $h_c$  从 0.3 m 增大至 0.7 m, GR 工况的  $n$  减小 2.7, 而 CR 工况仅减小 1.5。总体而言, 增大垫层厚度对 CR 工况的影响小于 GR 工况。

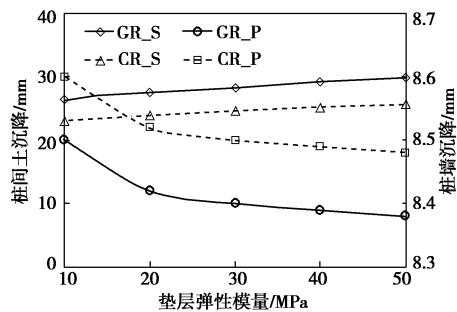


图 5 垫层厚度的影响

Fig. 5 Effect of thickness of cushion

## 5 结 论

(1) 采用高强土工格栅和土工格室对 RCA 和天然砂石混合料进行加筋, 同时添加适量水泥、石灰或粉煤灰等黏结材料, 可以克服传统加筋垫层的强度和刚度偏小且不易调节的不足。

(2) 路堤荷载作用下, 土工格室加筋垫层可以通过提兜效应和柔性筏板效应, 充分调动桩墙的承载能力, 有效减小桩间土荷载, 提高桩土应力比, 进而减小桩间土沉降和桩-土差异沉降。

(3) 增大垫层弹性模量对土工格室加筋垫层工况工作性状的改善更为显著, 可充分发挥桩墙的承载和减沉能力; 实际工程中加筋垫层厚度不宜过大。

## 参考文献:

[1] CAO W Z, ZHENG J J, ZHANG J, et al. Field test of a

geogrid-reinforced and floating pile-supported embankment[J].

Geosynthetics International, 2016, 23(5): 348 - 361.

[2] LIU H L, CHU J, DENG A. Use of large-diameter, cast-in situ concrete pipe piles for embankment over soft clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2009, 46(8): 915 - 927.

[3] BORGES J L, MARQUES D O. Geosynthetic-reinforced and jet grout column-supported embankments on soft soils: numerical analysis and parametric study[J]. Computers and Geotechnics, 2011, 38(7): 883 - 896.

[4] 杨果林, 王亮亮. 桩网复合地基加筋垫层土工格栅变形机理研究[J]. 中国铁道科学, 2011, 32(5): 8 - 12. (YANG Guo-lin, WANG Liang-liang. Research on the deformation mechanism of the geogrid reinforced cushion for pile-net composite foundation[J]. China Railway Science, 2011, 32(5): 8 - 12. (in Chinese))

[5] 张继文, 曾俊铖, 涂永明, 等. 京沪高速铁路 CFG 桩复合地基现场试验研究[J]. 铁道学报, 2011, 33(1): 83 - 88. (ZHANG Ji-wen, ZENG Jun-cheng, TU Yong-ming, et al. Experimental study on CFG pile-raft composite foundation of Beijing-Shanghai high-speed railway[J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(1): 83 - 88. (in Chinese))

[6] 曾俊铖. 高速铁路 CFG 桩复合地基试验研究及理论分析[D]. 南京: 东南大学, 2010. (ZENG Jun-cheng. Experiment study and theoretical analysis of CFG pile composite foundation in high-speed railway[D]. Nanjing: Southeast University, 2010. (in Chinese))

[7] ZHENG J J, CHEN B G, LU Y E, et al. The performance of an embankment on soft ground reinforced with geosynthetics and pile walls[J]. Geosynthetics International, 2009, 16(3): 173 - 182.

[8] HEGDE A, SITHARAM T G. 3-Dimensional numerical modeling of geocell reinforced sand beds[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2015, 43(2): 171 - 181.

[9] LATHA G M. Investigations on the behaviour of geocell supported embankments[D]. Chennai: Indian Institute of Technology Madras, 2000.

(本文责编 黄贤沙)