

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2015.05.004

# 土工格室+阶梯型变截面及等截面桩复合地基 承载性状对比研究

王 宁, 刘 杰, 王 威, 仵永杰, 王勤富

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

**摘 要:** 利用FLAC<sup>3D</sup>数值仿真软件, 建立土工格室-桩-桩周土相互作用数值仿真模型, 对比分析土工格室+阶梯型变截面桩复合地基与土工格室+等截面桩复合地基的承载性状。研究表明: 土工格室+阶梯型变截面桩复合地基的桩体平均沉降、土体平均沉降及桩土平均沉降均小于土工格室+等截面桩复合地基。

**关键词:** 土工格室; 阶梯型变截面桩; 等截面桩; 数值模拟

**中图分类号:** TU473

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2015)05-0015-04

## Comparative Study on Bearing Behaviors of Composite Foundations with Geocell + Step Variable Section Pile and Geocell + Constant Section Pile

Wang Ning, Liu Jie, Wang Wei, Wu Yongjie, Wang Qinfu

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

**Abstract:** Establishes the numerical simulation model for interaction of geocell, piles and soil around piles by simulation software FLAC<sup>3D</sup>, contrasts and analyzes the bearing capacities of the composite foundation with geocell + step variable section piles and the composite foundation with geocell + constant section piles. The results indicate that the composite foundation of geocell + step variable section piles is superior to that of geocell + constant section piles in average pile settlement, soil settlement and pile-soil settlement.

**Keywords:** geocell; step variable section pile; constant section pile; numerical simulation

## 0 引言

随着经济的高速发展和科学技术的日新月异, 社会对于高速公路、高速铁路、高层建筑的需求越来越大。与此同时, 江、河、湖、海的防洪堤、防波堤及港口码头、机场、车站等基础设施大量兴建。在工程建设中, 对不良地基的加固要求越来越高, 对地基沉降变形的控制要求也越来越严格。土工格室+桩这

种双向增强复合地基, 一般由水平向增强体、竖向桩体和桩间土体3部分组成。各组成部分共同作用形成一个完整的承载系统, 兼有水平向增强体复合地基和竖向增强体复合地基的优势。因而可大幅度提高地基承载力、减小地基沉降、增强地基稳定性。马宾辉<sup>[1]</sup>研究了土工格室+碎石桩双向增强复合地基承载特性及沉降计算。蒋鹏飞等<sup>[2-6]</sup>将土工格室+碎石桩应用于高速公路软基处理中, 针对高速公路

收稿日期: 2015-08-12

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(2015JJ5017)

作者简介: 王 宁(1987-), 男, 河南洛阳人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为复合地基技术,

E-mail: 804252868@qq.com

的特点,进行了一系列室内外试验和相关理论研究,并取得了理论和应用方面的一些成果。张忠苗等<sup>[7-11]</sup>研究了变截面桩的荷载传递性质及变形特性,并指出变截面桩具有受力合理、沉降量小的优点。

关于土工格室+桩复合地基的研究,都是建立在等截面桩的基础上,而对于采用阶梯型变截面桩的研究还鲜有报道。阶梯型变截面桩是一种桩身截面随桩身长度呈阶梯形变化的桩。阶梯型变截面桩桩身轴力分布更符合轴力随深度向下呈上大下小的特点。为此,本文对土工格室+阶梯型变截面桩复合地基与土工格室+等截面桩复合地基的荷载-沉降曲线进行数值模拟,以探讨土工格室+阶梯型变截面桩复合地基的承载特性。

## 1 数值建模

本次数值模拟采用美国 Itasca Consulting Group Inc. 研发的连续介质力学分析软件 FLAC<sup>3D</sup>,土体、碎石垫层及土工格室相关参数参照文献[12-13]中取值(详见表1~3),并将土体考虑为匀质连续体。

表1 土的物理力学参数

Table 1 Physical-mechanical parameters of soil

含水率 w/%	重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	塑性指数 $I_p$	液性指数 $I_L$
30.8	18.04	21.70	0.42
内聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	承载力特征值 $f_{ak}/\text{kPa}$	压缩模量 $E_s/\text{MPa}$
9.4	8.2	56	3.4

表2 碎石的物理力学参数

Table 2 Physical-mechanical parameters of macadam

天然重度 w/( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	相对密度 $d_s$	孔隙比 e	抗剪强度 $\tau/\text{MPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$
20.6	2.66	0.50	0.23	38

表3 土工格室的物理力学参数

Table 3 Physical-mechanical parameters of geocell

焊接间距/mm	高度/mm	格室片拉伸屈服强度/MPa
200	50	$\geq 23.0$
焊接处抗拉强度/ ( $\text{N} \cdot \text{cm}^{-1}$ )	格室组间连接处抗拉强度/( $\text{N} \cdot \text{cm}^{-1}$ )	格室片边缘 格室片中间
$\geq 100$	$\geq 200$	$\geq 120$

### 1.1 几何模型建立与网格划分

本次数值模拟采用9桩模型,矩形布桩。根据他人研究经验、方法及本模型的桩长、桩间距等相关参数,确定数值模拟模型的计算深度为30 m,长、宽各为12 m;阶梯形变截面桩采用在桩身中部位置变化截面。桩体等相关计算参数见表4,荷载板尺寸长、宽各为2.7 m,根据对称性选取其1/4建立模型。用实体单元对土体、桩体、碎石垫层、土工格室及荷载

板进行模拟,通过对模型中厚度与土工格室相同的一部分实体单元赋予一定的力学参数来等效代替土工格室,在桩体与土体之间建立接触面。

表4 桩体尺寸参数

Table 4 Dimension parameters of piles

桩型	桩身直径/mm		桩长/m	桩距/mm
	上部截面	下部截面		
阶梯形变截面桩	800	400	20	1 800
等截面桩	600	600	20	1 800

本模型底部施加z方向约束,上表面为自由面,模型侧面采用水平约束。土体、碎石垫层采用 Mohr-Coulomb 弹塑性模型,荷载板及桩体采用 Elastic 弹性各向同性模型,土工格室的强度等效体也采用 Mohr-Coulomb 弹塑性模型。

### 1.2 模型参数选取

根据相关土体物理力学参数,计算选取的模拟参数见表5。

表5 土体模型计算参数

Table 5 Calculation parameters of model soil

材料	体积模量 K/MPa	剪切模量 G/MPa	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	内聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$
软黏土	2.354	0.785	1 900	9.4	8.2

桩体采用 PC 桩,密度为  $2\,500\text{ kg/m}^3$ ,弹性模量为  $2.8 \times 10^{10}\text{ Pa}$ ,泊松比为 0.20。荷载板按钢材参数取值,弹性模量为  $2.1 \times 10^{11}\text{ Pa}$ ,泊松比为 0.25。

加载过程:根据真实模型试验的加载经验,本次数值模拟加载采用快速加载法。采用 STEP 命令控制时步的计算方法,每级荷载计算时步数均相同,荷载共分为 10 级。

## 2 计算结果分析

### 2.1 桩顶荷载-平均沉降分析

对土工格室+阶梯型变截面桩复合地基与土工格室+等截面桩复合地基中,群桩在各级荷载作用下桩顶沉降量取平均值,绘制荷载-沉降曲线,见图1。

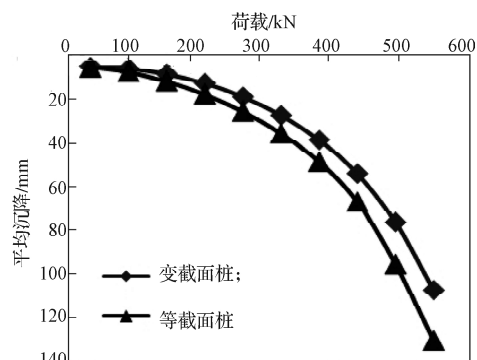


图1 桩的荷载-平均沉降曲线

Fig. 1 Load-average settlement curves of piles

由图1可知:1)土工格室+阶梯型变截面桩复合地基桩与土工格室+等截面桩复合地基桩的荷载-平均沉降曲线均为缓变形曲线;2)在相同荷载作用下,土工格室+阶梯型变截面桩复合地基桩的平均沉降小于土工格室+等截面桩复合地基桩的平均沉降;3)随着荷载的增大,2种复合地基中,桩之间的平均沉降量差值逐渐增大。

以上现象表明:在相同地质条件下,土工格室+阶梯型变截面桩复合地基与土工格室+等截面桩复合地基相比,前者能更好地减小地基沉降,提高复合地基承载力。

## 2.2 土体荷载-平均沉降分析

对土工格室+阶梯型变截面桩复合地基与土工格室+等截面桩复合地基土体在各级荷载作用下的沉降量取平均值,绘制荷载-平均沉降曲线,如图2所示。

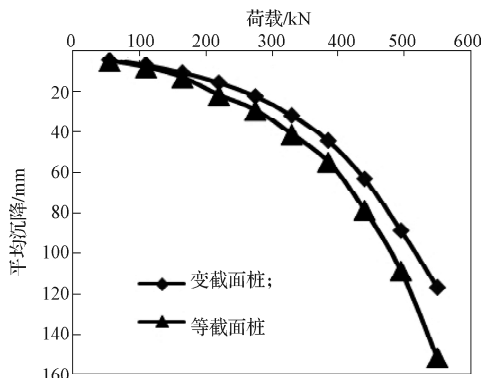


图2 复合地基土体的荷载-平均沉降曲线

Fig. 2 Load-average settlement curves of soil in composite foundation

由图2可知:1)土工格室+阶梯型变截面桩复合地基与土工格室+等截面桩复合地基土体的荷载-平均沉降曲线均为缓变形曲线;2)在相同荷载作用下,土工格室+阶梯型变截面桩复合地基土体的平均沉降均小于土工格室+等截面桩复合地基土体的平均沉降;3)当荷载较小时(小于165 kN),土工格室+阶梯型变截面桩复合地基土体的平均沉降与土工格室+等截面桩复合地基土体的平均沉降基本相同;4)随着荷载的进一步增加,土工格室+阶梯型变截面桩复合地基土体的平均沉降增长速率变缓,其增长速率小于土工格室+等截面桩复合地基土体的平均沉降的增长速率。

## 2.3 桩土荷载-平均沉降分析

对土工格室+阶梯型变截面桩复合地基与土工格室+等截面桩复合地基桩土沉降量,在各级荷载作用下取平均值,绘制荷载-平均沉降曲线,如图3所示。

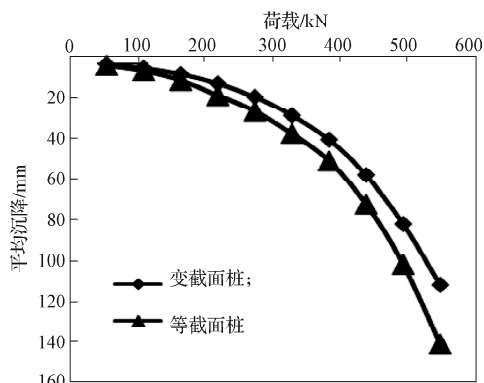


图3 复合地基桩土荷载-平均沉降曲线

Fig. 3 Load-average settlement curve of pile-soil in composite foundation

由图3可知:1)土工格室+阶梯型变截面桩复合地基与土工格室+等截面桩复合地基桩土荷载-平均沉降曲线均为缓变形曲线;2)相同荷载作用下,土工格室+阶梯型变截面桩复合地基的平均沉降均小于土工格室+等截面桩复合地基的平均沉降;3)在较大荷载作用下,土工格室+阶梯型变截面桩复合地基的平均沉降比土工格室+等截面桩复合地基的平均沉降小;4)随着荷载的进一步增加,土工格室+阶梯型变截面桩复合地基桩土的平均沉降增长速率均小于土工格室+等截面桩复合地基桩土的平均沉降的增长速率。

以上现象表明:在相同地质条件下,土工格室+阶梯型变截面桩复合地基与土工格室+等截面桩复合地基相比,前者能更有效地减小地基沉降,提高复合地基承载力,且荷载越大其优势越明显。

## 3 结论

1)土工格室+阶梯型变截面桩复合地基及土工格室+等截面桩复合地基的荷载-平均沉降曲线均为缓变形曲线;在平均直径相同的条件下,土工格室+阶梯型变截面桩复合地基的桩体平均沉降、土体平均沉降及桩土平均沉降均比土工格室+等截面桩复合地基的小。

2)随着荷载的增加,土工格室+阶梯型变截面桩复合地基的平均沉降增长速率小于土工格室+等截面桩复合地基的平均沉降增长速率,前者比后者减小沉降的优势更加明显。

本次数值模拟的阶梯形变截面桩采用的变径比为0.5。不同变径比的阶梯形变截面桩对土工格室+阶梯型变截面桩复合地基的影响,以及能够最大限度提高土工格室+阶梯型变截面桩复合地基的整体承载能力的最佳变径比的确定还有待进一步研究。

## 参考文献:

- [1] 马宾辉. 土工格室+碎石桩双向增强复合地基承载特性及沉降计算研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2011.  
Ma Binhui. The Research on Bearing Characteristic and Settlement of Composite Foundation Bidirectionally Reinforced by Stone Columns and Geocell[D]. Changsha: Hunan University, 2011.
- [2] 蒋鹏飞, 陈昌富, 赵明华, 等. 土工格室垫层+碎石桩复合地基在高速公路软基处理中的应用与研究[J]. 公路, 2006(4): 135-139.  
Jiang Pengfei, Chen Changfu, Zhao Minghua, et al. Application and Research on Geocell and Gravel Pile Composite Foundation in Soft Ground Treatment in Expressway[J]. Highway, 2006(4): 135-139.
- [3] 赵明华, 陈艳平, 陈昌富, 等. 土工格室+碎石垫层结构体的稳定性分析[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2003, 30(2): 68-72.  
Zhao Minghua, Chen Yanping, Chen Changfu, et al. Stability Analysis of Geocell+Gravel Cushion Structure[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2003, 30(2): 68-72.
- [4] 赵明. 碎石桩复合地基理论分析与试验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2002.  
Zhao Ming. Theoretical Analysis and Test Research on Rushed Stone Pile Composite Foundation[D]. Changsha: Hunan University, 2002.
- [5] 方卫民, 王炳龙, 周顺华. 不同高度土工格室整治路基病害的试验研究[J]. 大坝观测与土工测试, 2000, 24(6): 47-48, 51.  
Fang Weimin, Wang Binglong, Zhou Shunhua. Experimental Study on Ill-Roadbed Treatment by Geocell of Different Heights[J]. Dam Observation and Geotechnical Tests, 2000, 24(6): 47-48, 51.
- [6] 郭燕平. 土工格室柔性筏基加固浅层软弱地基试验研究[J]. 山西交通科技, 2001(3): 3-5, 8.  
Guo Yanping. Test Research of Earthwork Flexibility Raft Foundation Strengthening Shallow Soft Subgrade[J]. Shanxi Science & Technology of Communications, 2001(3): 3-5, 8.
- [7] 张忠苗, 喻君, 张广兴, 等. PHC管桩和预制方桩受力性状试验对比分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(11): 3059-3065.  
Zhang Zhongmiao, Yu Jun, Zhang Guangxing, et al. Contrastive Experimental Analysis of Bearing Behaviors of PHC Pile and Precast Square Piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(11): 3059-3065.
- [8] 刘汉龙, 谭慧明, 彭劫, 等. 大型桩基模型试验系统的开发[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(3): 452-457.  
Liu Hanlong, Tan Huiming, Pengjie, et al. Development of Large Scale Pile Foundation Model Test System[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(3): 452-457.
- [9] 胡培进, 汪中卫, 李强. 变截面桩的力学性能及工程意义[J]. 上海地质, 2007(3): 27-31, 58.  
Hu Peijin, Wang Zhongwei, Li Qiang. Mechanical Property and Engineering Significance for Variable Cross-Section Pile[J]. Shanghai Geology, 2007(3): 27-31, 58.
- [10] 黄礼胜, 崔斌, 何爱波, 等. 变截面与等截面管桩复合地基承载特性对比研究[J]. 湖南工业大学学报, 2015, 29(1): 24-28.  
Huang Lisheng, Cui Bin, He Aibo, et al. Comparative Research of Bearing Characteristics of the Composite Foundation with Variable Section and Uniform Section Pipe-Piles[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2015, 29(1): 24-28.
- [11] 王俊伟, 杨庆光, 刘杰, 等. 静压闭口变截面管桩承载性状模型试验研究[J]. 湖南工业大学学报, 2013, 27(6): 18-21.  
Wang Junwei, Yang Qingguang, Liu Jie, et al. Model Test Study on Bearing Behavior of Hydrostatic Closed Variable Cross-Section Pipe-Pile[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2013, 27(6): 18-21.
- [12] 何杰. 路堤荷载下土工格栅-夯实水泥土楔形桩复合地基承载机理研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.  
He Jie. Study on Bearing Behaviour of Composite Foundation with Geogrids and Rammed Soil-Cement Tapered Columns[D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [13] 曹祚省. 夯实水泥土楔形桩复合地基承载特性研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2014.  
Cao Zuoxing. Research on Bearing Behaviour of Composite Foundation with Rammed Tapered Cement-Soil Column[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2014.

(责任编辑: 邓光辉)