

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2014.02.007

# 土工格栅复合夯实水泥土桩-土界面接触特性分析

曹祚省, 何杰, 杨彦忠, 饶迁根, 孟森松

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

**摘要:** 针对桩-土接触面的摩擦特性, 在夯实水泥土桩-土界面中设置土工格栅, 以增强夯实水泥土桩-土的相互作用。采用三维数值软件模拟直接剪切试验和静载试验, 对土工格栅复合夯实水泥土桩-土界面接触特性进行分析, 研究土工格栅复合夯实水泥土桩-土接触面的应力、变形和强度的变化规律。结果表明: 土工格栅复合夯实水泥土桩-土接触界面的摩阻力峰值有所增加, 达到峰值后, 摩阻力曲线下降速率缓慢; 静载试验中, 在夯实水泥土桩表面复合土工格栅后, 对应的基础沉降比普通夯实水泥土桩复合地基的沉降小, 且夯实水泥土桩的轴向压缩变形也小。

**关键词:** 接触面; 土工格栅; 水泥土; 摩阻力; FLAC3D

中图分类号: TU447

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2014)02-0033-05

## Study on the Contact Characteristics of Geogrid Composite Cement Soil Pile-Soil Interface

Cao Zuoxing, He Jie, Yang Yanzhong, Rao Qiangen, Meng Sensong

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

**Abstract:** Aiming at the interface friction traits of pile-soil, arranges the geogrid in the compacted soil cement pile-soil interface to enhance the interaction between rammed cement-soil pile and soil. Applies 3D numerical software to simulate direct shear test and static load test, analyzes the contact surface stress, deformation and intensity variation for the geogrid composite cement-soil pile and soil. The results show that the interface peak frictional resistance will increase, and the frictional resistance curve declines slowly when reaching the peak value; In the static load test, with geogrid around the pile, the corresponding subgrade settlement is smaller than that without geogrid, and the pile axial deformation is much smaller.

**Keywords:** interface; geogrid; cement-soil; frictional resistance; FLAC3D

### 1 研究背景

夯实水泥土桩复合地基由于加固效果明显、成本低而广泛运用于软弱土地基处理。其中, 桩与土的摩阻特性和桩对土的挤密作用共同构成了影响复合地基承载特性的主要因素<sup>[1]</sup>, 而桩-土界面的摩阻

特性研究与不同结构物之间的界面摩擦特性研究密切相关。近年来, 许多学者针对不同结构物之间的界面摩擦特性展开了研究。

J. G. Potyondy<sup>[2]</sup>通过土与混凝土的接触面直剪试验, 得出了影响界面摩擦强度的四大主要因素: 土

收稿日期: 2014-01-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51108176)

作者简介: 曹祚省(1987-), 男, 湖南郴州人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为地基处理技术,

E-mail: 281297761@qq.com

的性质、土的含水量、接触面的粗糙度和作用在接触面上的法向应力。徐超等人<sup>[3]</sup>进行了土与土工合成材料的接触面直剪试验,指出摩阻力有明显的峰值和残余值。杨广庆等人<sup>[4]</sup>对土工格栅与填料的界面摩擦进行了研究,指出有多种因素影响土工格栅界面摩擦强度,其中包括格栅的参数与填料的性质。王仕传等人<sup>[5]</sup>应用有限单元法,分析了筋土界面的力学行为,研究了筋土界面摩阻力,得出了筋材拉伸变形的分布特点。王伟等人<sup>[6]</sup>利用直剪试验研究了土与其它结构接触面的力学特性,提出了应力-位移的复合指数模型。刘文白等人<sup>[7]</sup>也进行了加筋物与土的界面摩擦试验,包括直剪试验和拉拔摩擦试验,得出了界面摩擦角和界面凝聚力的概念。张明义等人<sup>[8]</sup>改进了直剪试验仪器,提出桩-土接触面的摩阻力具有时效性,而摩阻力与时间的关系是呈双曲线状增长,并且在沉桩的模拟计算中,可以用外摩擦角或者摩擦因数作为计算参数。杨丽君等人<sup>[9]</sup>通过调整土的含水量,研究了土与桩的单剪试验,指出随着土的含水量增大,接触面的抗剪强度和摩擦角会减小,而接触面的黏聚力则先增大后减小。周凯等人<sup>[10]</sup>通过研究不同接触界面的摩擦试验,得出不同法向应力下的应力-应变曲线关系。

在传统桩基设计方法中,天然地基的原有承载力忽略不计。随着基础工程技术的发展,人们认识到传统桩基设计方法中,不考虑桩间土的承载作用会导致工程资源的浪费,于是才衍生出了过渡型基础-复合桩基。本文基于复合桩基的理论,在桩与土的接触面中设置土工格栅,以增强桩与土的相互作用,并充分调动桩间土承载,提高基础承载力。

虽然针对不同结构物之间接触面摩擦特性的研究比较全面,但是也仅限于研究两种结构物的界面摩擦特性,而由土、土工格栅、水泥土三者组成的接触面摩擦性能研究还鲜见报道。本文借鉴他们的研究成果,采用有限差分软件FLAC3D模拟适用于剪切位移较小的土-土工格栅-水泥土界面直剪试验和复合土工格栅的群桩静载试验,对界面接触特性、桩侧摩阻力、桩的轴向变形和地基沉降进行研究。

## 2 土工格栅、水泥土、土接触界面分析

### 2.1 基本假定

为了计算简便,本文在数值模拟过程中对有关因素进行适当简化和假定:

- 1) 因排水固结引起的土体强度变化忽略不计;
- 2) 剪切位移达到7 mm后试验终止;

- 3) 上下盒分界面假定为剪切面;
- 4) 竖向荷载分50, 100, 200, 300 kPa四级施加;
- 5) 剪切过程中,下盒用速度边界代替应力边界,由此产生对结果数据的影响忽略不计。

复合格栅与不复合格栅的直剪试验模型分别为1#模型和2#模型,直剪试验示意图如图1所示。

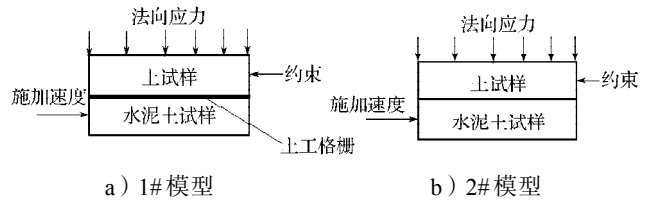


图1 直剪试验示意图

Fig. 1 The diagram of direct shear test

### 2.2 模型建立

试样是半径为30.9 mm、高为20 mm的圆柱体(模型尺寸与室内模型试验一致),其中上盒为土体,下盒为水泥土试样,中间接触面处设置土工格栅。模型网格如图2所示。

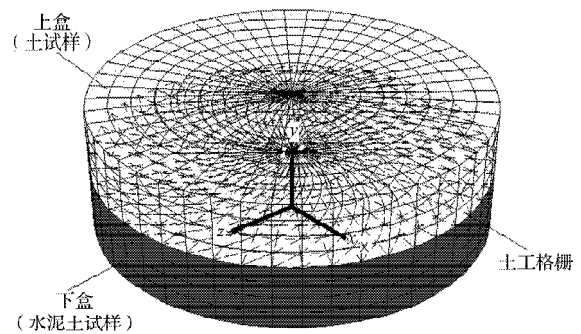


图2 模型图(1#模型)

Fig. 2 The model figure of direct shear test (1# model)

模拟前,先对模型边界条件进行简化,法向加载用应力边界代替,剪切装置用位移边界代替。相应的应力边界为:在土体顶部分别施加法向应力50, 100, 200, 300 kPa。位移边界条件为:首先在 $x, y, z$ 三个方向固定上盒;然后固定下盒 $x, y$ 方向;最后在下盒 $z$ 方向施加水平速度,用Step时步控制总位移为7 mm。

### 2.3 模拟步骤

- 1) 用Cylinder单元模拟土和水泥土试样;
- 2) 用Shell单元模拟上盒与下盒;
- 3) 土和水泥土试样之间设置土工格栅单元,并设置格栅的参数;
- 4) 在土、水泥土和剪切盒之间设置接触面;
- 5) 设定计算模型、材料参数、接触面参数等;
- 6) 设置边界条件,上盒施加 $x$ 和 $z$ 两个方向的位移约束,下盒施加 $x$ 方向的位移约束;
- 7) 在上盒顶面施加各级法向压力;

8) 在下盒施加z方向速度, 用 Step 命令控制终止位移为 7 mm。

### 2.4 模拟结果分析

在各法向应力作用下, 土-土工格栅-夯实水泥土接触界面的摩阻力与位移的关系如图 3 所示。

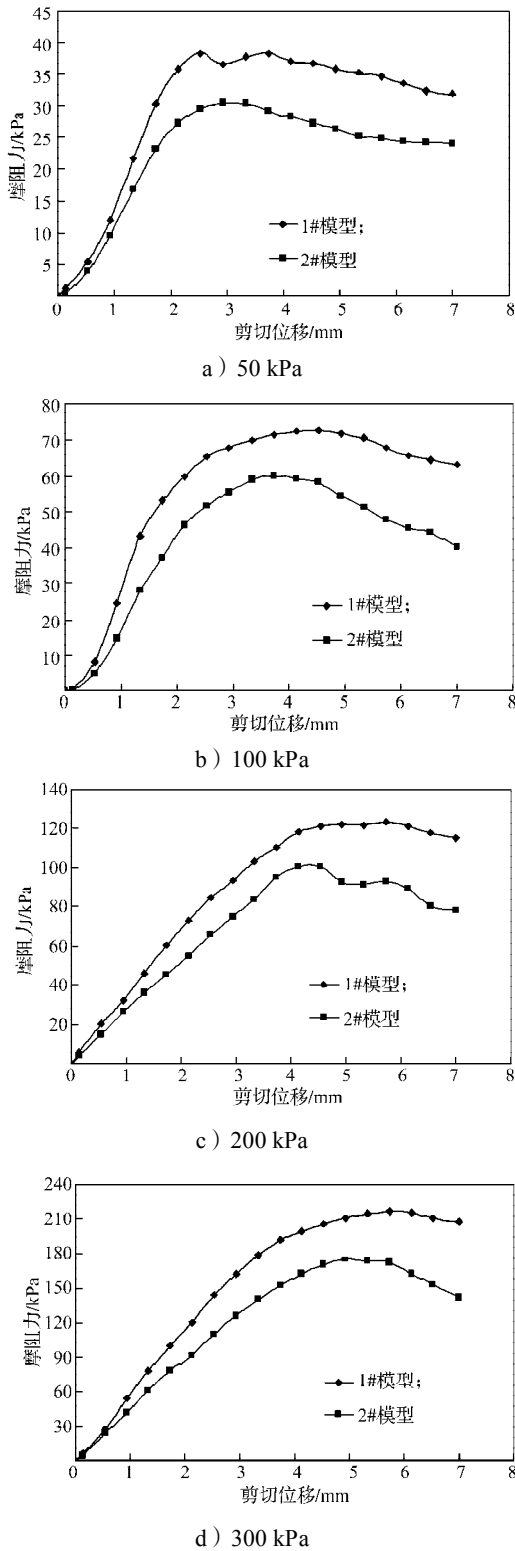


图3 不同法向应力时的摩阻力曲线

Fig. 3 Frictional resistance curve under different normal stress

由图 3 可以看出:

1) 在剪切位移相同的条件下, 1# 模型接触界面所对应的摩阻力大于 2# 模型所对应的摩阻力。

2) 随着法向应力的增加, 1# 模型和 2# 模型的摩阻力均有一定幅度的提高。1# 模型在 4 种法向应力作用下, 其接触界面摩阻力的峰值分别为 38.32, 72.78, 122.72, 217.02 kPa; 2# 模型接触界面摩阻力的峰值分别为 30.59, 60.13, 100.26, 175.39 kPa。1# 模型摩阻力发挥到峰值时的剪切位移值大于 2# 模型摩阻力发挥到峰值时的剪切位移值。

3) 摩阻力达到峰值后, 1# 模型摩阻力的下降速率小于 2# 模型的下降速率。

以上现象表明: 在夯实水泥土桩表面复合土工格栅能有效增强桩-土的相互作用, 改善桩土之间的摩擦性能, 充分调动桩周土体的工作性能。

## 3 群桩静载试验

### 3.1 基本假定

- 1) 不考虑因排水固结引起土体强度的变化;
- 2) 不考虑加载时因荷载分布不均对复合地基承载产生的影响;
- 3) 桩体共 9 根, 采用正方形布桩 (如图 4 所示), 复合地基面积置换率为 0.16;
- 4) 荷载等级为 10 级, 从 20 kPa 到 200 kPa, 荷载梯度为 20 kPa;
- 5) 载荷板采用刚性材料, 即不考虑因载荷板变形对复合地基工作性状的影响。

试验中, 复合格栅的静载试验模型设为 3# 模型, 不复合格栅的静载试验模型设为 4# 模型。

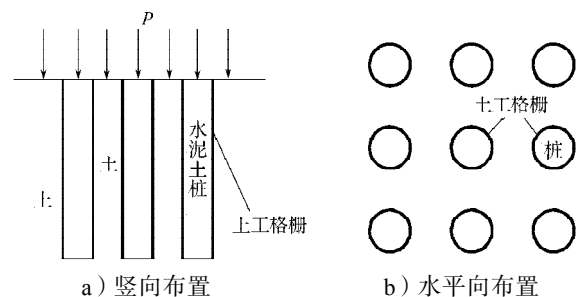


图 4 静载试验布置 (3# 模型)

Fig. 4 Static load test arrangement (3# model)

### 3.2 模型建立

试验模型箱尺寸为: 长 2.0 m, 宽 2.0 m, 高 1.5 m。由于模型为轴对称, 为便于分析计算, 以中桩为对称中心, 取 1/4 模型为计算分析对象, 即计算模型的尺寸为: 长 1.0 m, 宽 1.0 m, 高 1.5 m (如图 5 所示), 桩径 0.075 m, 桩长 0.9 m, 相应的加载面积为: 长 ×

宽=0.5 m × 0.5 m。用应力边界条件代替上部静载，应力边界为：在土体顶部按顺序施加竖向应力 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200 kPa, 加载可以通过 Fish 语言来控制。

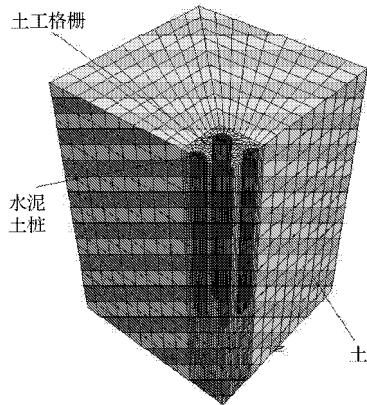


图5 计算分析模型 (3#)

Fig. 5 Model for computational analysis (3#)

### 3.3 模拟步骤

- 1) 用 Radcylinder 单元模拟土和水泥土桩;
- 2) 建立土工格栅复合夯实水泥土桩模型 (3# 模型, 如图 6 所示) 和普通夯实水泥土桩模型 (4# 模型);
- 3) 设置桩 - 土接触界面;
- 4) 用 Brick 模拟上部荷载板;
- 5) 设定计算模型、材料的参数、接触面参数等。
- 6) 设置边界条件;
- 7) 利用 Fish 语言在桩顶法向施加各级荷载。

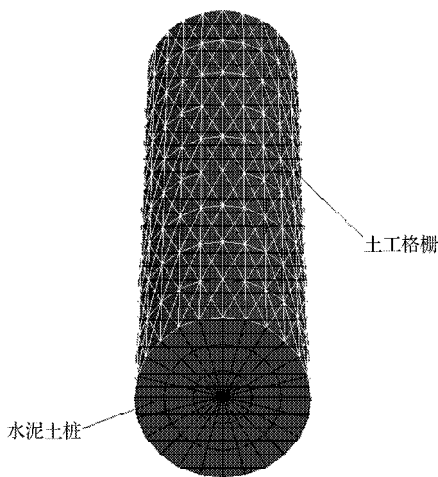


图6 土工格栅复合桩模型 (3#)

Fig. 6 Model of composite pile with geogrids (3#)

### 3.4 结果分析

#### 3.4.1 荷载 - 沉降关系

图 7 为普通夯实水泥土桩复合地基、土工格栅复合夯实水泥土桩复合地基荷载板的荷载 - 沉降对比曲线。

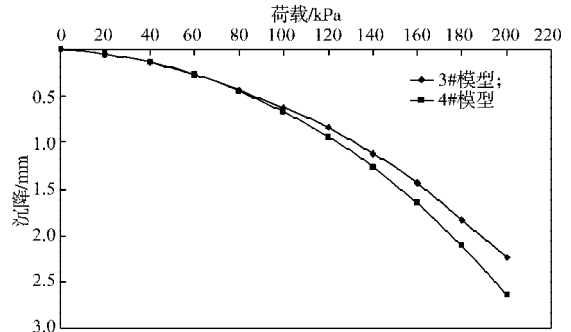


图7 荷载 - 沉降曲线

Fig. 7 The curve for load and settlement

由图 7 可以看出:

1) 两组复合地基的荷载 - 沉降曲线都属于缓变型曲线。

2) 在较小荷载 (0~80 kPa) 作用下, 2 条曲线没有明显差别; 随着荷载的增大 (大于 80 kPa), 土工格栅复合夯实水泥土桩复合地基 (3# 模型) 沉降速率开始小于普通夯实水泥土桩复合地基 (4# 模型), 且随着荷载的进一步增加, 两者之间的沉降差值越来越大。

3) 根据 JGJ 79—2012 《建筑地基处理技术规范》规定, 当荷载 - 沉降曲线为平缓的光滑曲线时, 对于以黏性土为主的夯实水泥桩复合地基的承载力特征值可取  $s/b$  或  $s/d$  等于 0.01 所对应的压力值。由此可得, 3# 模型和 4# 模型的承载力特征值分别为: 108.7 kPa 和 103.2 kPa。

以上现象表明: 在夯实水泥土桩上复合土工格栅能有效提高复合地基的承载力, 从而减小复合地基沉降。

#### 3.4.2 桩身轴向变形

图 8 为中心桩、角桩、边桩在不同深度的轴向平均压缩量随荷载发展的变化规律。

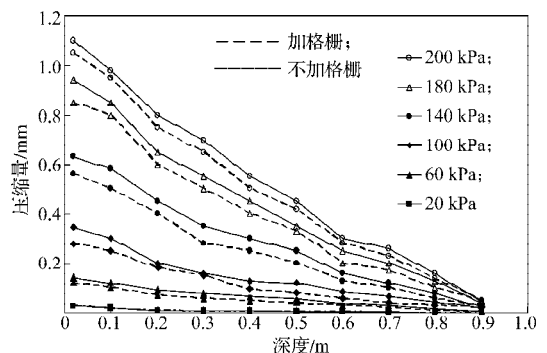


图8 桩身平均压缩量变化规律

Fig. 8 The variation for average axial compression of pile

由图 8 可以看出:

1) 桩身压缩量随深度的增加而递减。

2) 随着荷载的增加, 桩身压缩量增加, 桩身压

缩的增量也增加。

3) 在相同荷载作用下, 3# 模型中桩身的压缩量小于4# 模型中的桩身压缩量, 且沿深度方向, 3# 模型中桩身压缩变形递减速率小于4# 模型中桩身压缩变形的递减速率。

4) 在较大荷载作用下, 3# 模型浅层桩身的压缩增量小于4# 模型浅层桩身的压缩增量。

以上现象表明: 在夯实水泥土桩周复合土工格栅能有效限制桩体变形, 起到提高桩体刚度的作用, 可以防止桩体过早破坏, 从而达到提高桩体承载能力的效果, 且荷载越大, 效果越明显。

## 4 结论

本文通过直剪试验和群桩静载试验的数值分析, 对比研究了土工格栅复合夯实水泥土桩-土、普通夯实水泥土桩-土接触面的应力、变形和强度的变化规律, 可得如下结论:

1) 土工格栅复合夯实水泥土桩-土接触面的摩擦阻力峰值比普通夯实水泥土桩-土接触面的摩擦阻力峰值大, 增大约25%。

2) 随着接触面法向应力的增大, 土工格栅复合夯实水泥土桩-土接触面与普通夯实水泥土桩-土接触面的摩阻力均会提高, 但土工格栅复合夯实水泥土桩-土接触面的摩阻力发挥到峰值时的剪切位移值大于普通夯实水泥土桩-土接触面的摩阻力发挥到峰值时的剪切位移值。

3) 摩阻力达到强度峰值后, 土工格栅复合夯实水泥土桩-土接触面的摩阻力的下降速率小于普通夯实水泥土桩-土接触面摩阻力的下降速率, 且作用在接触面的法向应力越大时, 其摩阻力下降的速率越小于普通夯实水泥土桩-土的下降速率。

4) 荷载相对较小时, 在夯实水泥土桩上复合土工格栅的方法对减小基础沉降的作用不明显; 但随着荷载的增大, 这种作用才会逐步体现, 且随着荷载的进一步增大, 这种作用愈明显。

5) 在夯实水泥土桩上复合土工格栅能限制桩体变形, 提高桩体刚度, 减小桩体压缩量, 防止桩体过早破坏。

### 参考文献:

[1] 龚晓南. 复合地基设计和施工指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003: 13-29.

Gong Xiaonan. Composite Foundation Design and

Construction Guide[M]. Beijing: China Communications Press, 2003: 13-29.

[2] Potyondy J G. Skin Friction Between Various Soils and Construction Materials[J]. Geotechnique, 1961, 11(4): 339-353.

[3] 徐超, 廖星樾, 叶观宝, 等. 土工合成材料界面摩擦特性的室内剪切试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(5): 1285-1289.

Xu Cao, Liao Xingyue, Ye Guanbao, et al. Research on Interface Frictional Characteristics of Geosynthetics by Laboratory Shear Tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(5): 1285-1289.

[4] 杨广庆, 李广信, 张保健. 土工格栅界面摩擦特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(8): 948-952.

Yang Guangqing, Li Guangxin, Zhang Baojian. Experimental Studies on Interface Friction Characteristics of Geogrids[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(8): 948-952.

[5] 王仕传, 凌建明. 土工合成材料与土界面剪切特性数值模拟[J]. 路基工程, 2010(4): 64-66.

Wang Shichuan, Ling Jianming. Numerical Simulation of Shear Property of Geosynthetics and Soil Interface[J]. Subgrade Engineering, 2010(4): 64-66.

[6] 王伟, 张芳, 孙斌祥. 土-结构接触面剪切试验与应力-位移模型[J]. 煤炭学报, 2011, 36(9): 1469-1473. Wang Wei, Zhang Fang, Sun Binxiang. Tested and Modeled Shear Stress-Displacement Behavior of Soil-Structure Interface[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(9): 1469-1473.

[7] 刘文白, 周健. 土工格栅与土界面作用特性试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(4): 965-970.

Liu Wenbai, Zhou Jian. Experimental Research on Interface Friction of Geogrids and Soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(4): 965-970.

[8] 张明义, 邓安福. 桩-土滑动摩擦的试验研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(2): 246-249.

Zhang Mingyi, Deng Anfu. Experimental Study on Sliding Friction Between Pile and Soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(2): 246-249.

[9] 杨丽君, 王伟, 卢廷浩. 桩-土接触面剪切性质室内单剪试验研究[J]. 公路, 2008(8): 209-212.

Yang Lijun, Wang wei, Lu Tinghao. A Study on Laboratory Simple Shearing Test of Pile-Soil Interface[J]. Highway, 2008(8): 209-212.

[10] 周凯, 程寅, 黄新. 不同桩-土界面直剪试验研究[J]. 路基工程, 2011(5): 93-99.

Zhou Kai, Cheng Yin, Huang Xin. Experimental Study on Direct Shear of Different Pile-Soil Interface[J]. Subgrade Engineering, 2011(5): 93-99.

(责任编辑: 邓光辉)

