

DOI: 10.11779/CJGE2019S2053

# 筋箍长度及刚度对加筋碎石桩复合地基承载力影响分析

夏博洋<sup>1, 2</sup>, 郑刚<sup>\*1, 2</sup>, 周海祚<sup>\*1, 2</sup>, 杨新煜<sup>1, 2</sup>, 于晓旋<sup>1, 2</sup>, 赵佳鹏<sup>1, 2</sup>

(1. 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072; 2. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072)

**摘 要:** 针对加筋碎石桩复合地基中桩体性能, 通过有限元数值模拟与模型试验对比分析, 验证了数值模型的可靠性, 进而变换加筋长度, 研究分析了复合基础下端承加筋单桩与群桩的极限承载能力和破坏模式。研究表明: 筋材强度较低时, 加筋长度不会对桩体破坏模式产生影响, 对极限承载能力提高有限; 随着筋材强度不断提高, 碎石桩在加筋体以下区域发生剪切破坏, 并且随着加筋长度的增加向更深土层发展, 基础的极限承载能力线性增长。加筋长度对群桩复合地基不同位置处桩体的破坏模式影响不同。相较于边桩, 中心桩在桩身较深位置处发生剪切破坏, 筋材需达到较深的长度才发挥约束效果。

**关键词:** 复合地基; 极限承载能力; 破坏模式; 加筋

中图分类号: TU431

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)S2-0209-04

**作者简介:** 夏博洋(1993—), 男, 博士研究生, 主要从事地下结构, 地基处理科研工作。E-mail: 13752021818@163.com。

## Influences of length and strength of geosynthetics on bearing capacity of composite foundation with stone columns

XIA Bo-yang<sup>1, 2</sup>, ZHENG Gang<sup>1, 2</sup>, ZHOU Hai-zuo<sup>1, 2</sup>, YANG Xin-yu<sup>1, 2</sup>, YU Xiao-xuan<sup>1, 2</sup>, ZHAO Jia-peng<sup>1, 2</sup>

(1. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety (Tianjin University), Ministry of Education, Tianjin 300072, China; 2. School of Civil

Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** The performance of geosynthetic-encased stone columns in composite foundation is investigated through the finite element numerical simulation that is verified by the published experimental results from model tests, and then the effects of length of geosynthetics on the failure modes and the ultimate bearing capacities of single column and group columns are analyzed. The research results show when the stiffness of the geosynthetics is low, the length of the geosynthetics will not affect the shear failure modes, and the improvement of the ultimate bearing capacity is limited. With the increase of the stiffness of the geosynthetics, the shear failure of the stone column occurs in the area below the geosynthetics-encased body, and the ultimate bearing capacity of the foundation increases linearly with the increase of the length of the geosynthetics to the deeper soil layer. The effects of the length of the geosynthetics on the failure modes of stone column at different positions of composite foundation with pile groups are different. Compared with the side columns, the center columns have shear failure at the deeper position of the stone body, and the geosynthetics needs to reach a deeper length to exert the restraint effects.

**Key words:** composite foundation; ultimate bearing capacity; failure mode; stability; geosynthetics

## 0 引言

碎石桩复合地基是目前被广泛使用的一种地基处理手段<sup>[1]</sup>。为了使碎石桩这种地基处理手段的适用范围不再受到土质条件的制约, 在 1989 年, Impel<sup>[2]</sup>首次提出土工合成料加筋碎石桩, Rajagopal 等<sup>[3]</sup>进行了室内小型的三轴压缩试验, 对比分析碎石桩桩径以及加筋体的刚度对砂土抗剪强度的影响。Rajagopal 等<sup>[4]</sup>采用了有限单元理论, 建立了加筋碎石桩单桩的数值模型, 定量的分析了各参数对加筋碎石桩承载能力的影响; 在此基础上, 进行了单桩的模型试验, 采用位移控制法, 对比分析了不同筋材强度的加筋碎石桩与

普通碎石桩, 其试验结果表明, 经加筋后的碎石桩其承载能力发生了明显的提高。Ghazavi 等<sup>[5]</sup>进行了室内模型试验, 分别分析不同桩径下, 筋材长度对单桩以及群桩基础承载能力的影响。

以上研究中对加筋碎石桩的承载能力研究主要针对对加筋体本身性能改变对整体承载能力的影响规律, 并没有系统分析加筋碎石桩的破坏模式变化规律。最

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0805407); 国家自然科学基金项目(41630641, 51708405); 天津市科技计划项目(16YDLSF00040)

收稿日期: 2019-04-30

近, Muzammil 等<sup>[6]</sup>采用了三维有限元软件, 分析了不同筋材强度下, 筋材长度对群桩复合地基的提高效果。但只考虑边桩加筋对承载力提高的效果, 而忽略中间桩加筋的效果。随着荷载逐渐增大时, 边缘塑性破坏区逐渐扩大, 所增加的荷载必须依靠基底中部力的增大来进行平衡, 所以中心桩对基础极限承载能力的贡献不能忽略, 中心桩加筋对整体承载性能的提高也需要进行系统性的研究。

本文基于 Plaxis<sup>2D</sup> 数值分析软件, 首先分别建立端承单桩与群桩的数值模型。其次, 对不同箍筋长度的单桩, 以及群桩复合地基极限承载能力和桩体破坏位置进行研究。在此研究基础上, 分析采用非等长设计方法进行加筋在实际工程中的优势。

## 1 计算模型

### 1.1 计算模型及参数

本章采用基于二维有限元计算软件 (Plaxis<sup>2D</sup>), 应用轴对称模型分别对端承单桩及端承群桩加筋碎石桩复合地基进行数值模拟。单桩截面图如图 1 所示, 计算时, 分别取基础宽度与桩径相同以及等于桩径的两倍。

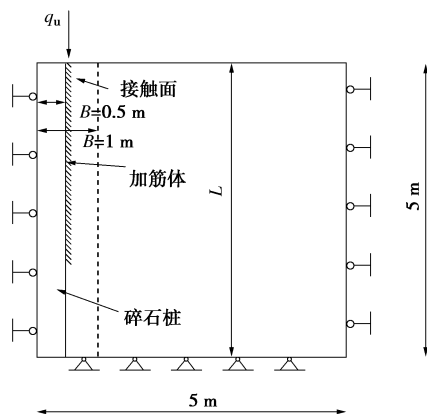


图 1 单桩数值模型剖面图

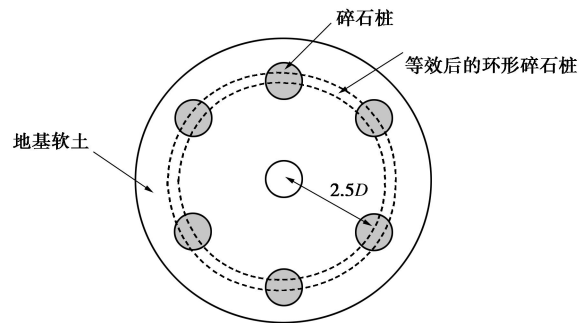
Fig. 1 Cross section of numerical model for single column

为采用轴对称模型对加筋碎石桩群桩复合地基进行分析, Mitchell 等<sup>[7]</sup>将边桩等效为圆柱环, 如图 2 所示。环形厚度采用 Mitchell 等<sup>[7]</sup>研究中提出的公式进行计算, 假定基础总面积为  $S$ , 置换率为  $\eta$ , 中心桩面积为  $S_1$ , 桩径为  $D$ , 中心桩到第一同心圆的距离为  $R$ , 得到的等效圆环的厚度  $t$  为

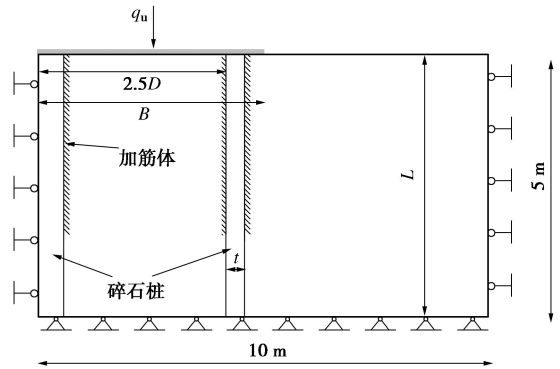
$$t = \frac{\eta S - S_1}{2\pi R} \quad (1)$$

研究中, 将碎石桩和土体视为理想弹塑性体, 并服从莫尔-库仑屈服准则, 碎石桩外侧加筋部分采用柔性弹性单元, 用来模拟格栅或土工织物, 该部分只能承受拉力, 不能承受压力<sup>[5-6]</sup>。视材料性质均匀, 模型的左侧边界为轴对称边界, 右侧边界限制其水平方向

的位移, 底部边界同时限制竖直以及水平方向的位移, 将桩体以及加筋体单元处的局部网格进行加密以提高计算精度。



(a) 三维刚性基础上群桩复合地基的简化方法



(b) 群桩数值模型的剖面图

图 2 群桩数值模型

Fig. 2 Numerical model for column groups

### 1.2 计算参数的选择

数值计算中取碎石桩的内摩擦角  $\varphi=45^\circ$ , 对应的剪胀角  $\psi=8^\circ$ , 泊松比  $\nu=0.3$  弹性模量  $E=60 \text{ MPa}$ ; 饱和软黏土的不排水抗剪强度指标  $c_u=10 \text{ kPa}$ , 泊松比  $\nu=0.49$ 。地基土弹性模量  $E=400c_u$ <sup>[9]</sup>。单桩模型中取桩径  $D=1 \text{ m}$ , 桩长  $L=5 \text{ m}$ , 加固区宽度  $B=1, 2 \text{ m}$ ; 在群桩分析中, 考虑七根桩条件下的碎石桩复合承载能力的数值模型, 桩径  $D=1 \text{ m}$ , 置换率  $\eta=0.2$ , 对应数值模型中加固区宽度  $B=3.5 \text{ m}$ ,  $R=2.5D$ ,  $t=0.3 \text{ m}$ 。桩长  $L=5 \text{ m}$ 。在本节研究中, 认为碎石桩与土体界面上一般不发生相对滑动, 接触面处满足变形协调。通过 Plaxis 界面单元用以模拟加筋体与周围土层和碎石桩之间的相互作用<sup>[5-6]</sup>。在计算时, 筋材两侧的接触界面通过定义截面强度的折减因子  $R_{\text{interface}}$  进行模拟。本文中  $R_{\text{interface}}$  取值为 0.68。计算时通过控制刚性基础的竖向位移的来控制施加荷载, 本文竖向位移取 10% 桩径<sup>[5-6]</sup>。输出  $P-S$  曲线陡降段明显时, 取相应的陡降段起点的荷载值为极限承载力; 若陡降段不明显, 则取基础沉降量为 10% 桩径时对应的荷载为极限承载力。

### 1.3 模型验证

为验证本章所采用的计算方法及计算模型的适用性, 本节将采用 Plaxis<sup>2D</sup> 数值模型计算得到的结果

与 Ghazavi 等<sup>[5]</sup>进行的室内加筋碎石桩单桩模型试验的实测值进行对比。计算对比得到的  $P-S$  曲线结果如图 3 所示, 本节采用 Plaxis 方法得到的计算结果与前人进行的模型试验实测所得到的结果吻合的较好。沉降到达 20 mm 之后的计算结果与试验结果稍有偏差, 但曲线的总体趋势始终保持一致。

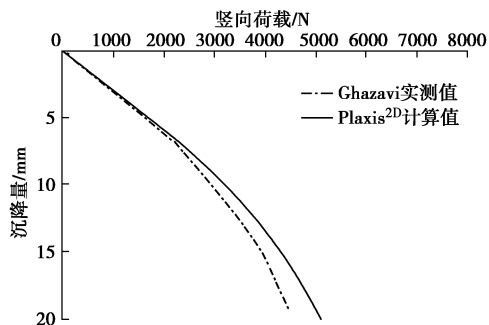


图 3 数值计算与试验对比

Fig. 3 Comparison between numerical and test values

## 2 单桩加筋桩体破坏模式及极限承载力研究

在进行单桩分析时, 分别取基础宽度  $B=1, 2$  m, 研究不同基础宽度下端承桩单桩以及单桩复合地基达到极限状态时的承载力以及桩体破坏模式, 结果如图 4, 5 所示。

当筋材强度较低时 ( $J=250$  kN/m), 基础的极限承载力在筋材长度超过 3 倍桩径时出现拐点, 拐点的出现说明此时极限承载力不会再随着筋材长度的增加而增大。随着筋材强度逐渐提高, 拐点出现的位置逐渐向右移动, 当筋材强度达到 1000 kN/m 时, 此时不会出现拐点, 意味着基础极限承载力会一直随着筋材长度的增加而增大。

由于基础宽度的增加, 碎石桩会在距离桩顶较深位置处发生剪切破坏。加筋长度小于等于一倍桩径时, 筋材没有达到剪切破坏面的位置, 径向约束作用不会发挥, 所以基础极限承载力不会发生改变。当筋材超过 1 m, 此时筋材的径向约束作用得到发挥, 基础极限承载力增加。

为了探究筋材对桩体破坏模式的影响, 图 5 采用无量纲分析方法,  $D/D_{\max}$  表示桩身沿深度方向的径向位移与桩体最大径向位移的比值, 由此可以确定不同加筋情况下桩体发生剪切破坏的位置。通过图 5 可知, 筋材强度较低时 ( $J=250$  kN/m), 碎石桩桩体发生剪切破坏的位置不会发生改变, 依然发生在桩顶。当  $J=400$  kN/m 时, 开始时, 随着筋材长度的增加, 桩体在加筋体下方的无加筋区域发生剪切破坏, 承载力线性增长; 当加筋长度超过 3 倍桩径时, 此时破坏位置重新回到桩顶位置, 对应图 4 极限承载力出现

拐点。当筋材强度提高到  $J=1000$  kN/m 时, 桩体不会在加筋位置处产生剪切破坏, 其破坏位置发生在筋材底部 (未加筋处), 剪切破坏区域会随着筋材的增加而向更深土层发展。对应图 4 极限承载力线性增长。

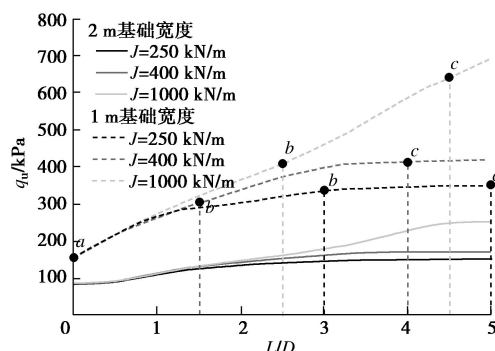


图 4 不同筋材强度与基础宽度下筋材长度对承载能力的影响

Fig. 4 Influences of length of geosynthetics on bearing capacity under different strength of geosynthetics and foundation widths

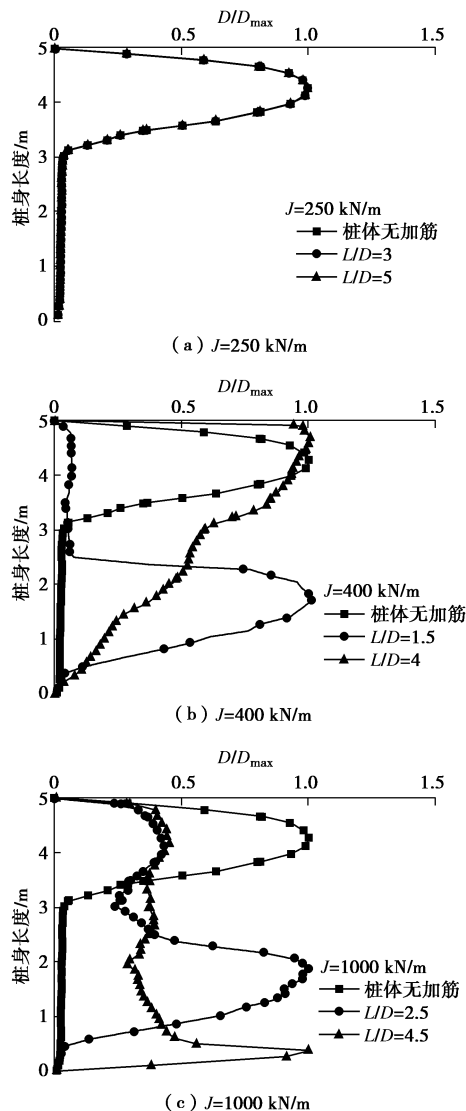


图 5 不同筋材强度下桩体破坏位置随筋材长度的变化规律

Fig. 5 Variation of failure location of stone column with length of geosynthetics under different strengths of geosynthetics

### 3 群桩加筋桩体破坏模式及极限承载能力分析

本节中以置换率为20%的圆形刚性基础下端承群桩复合地基为例进行分析,如图2所示。

图6为群桩中心桩与边桩单独加筋情况下极限承载能力随加筋长度变化的规律。边桩加筋对承载能力的提高效果要好于中心桩。根据图6可以发现,只有当加筋长度超过3.5倍桩径时,极限承载能力才会提高。由此可知,中心桩发生剪切破坏位置在距桩顶3.5倍桩径范围内。对边桩进行加筋时,当加筋长度超过0.5倍桩径,复合地基的极限承载能力会明显提高。不同于中心桩,边桩发生剪切破坏的位置出现在桩顶附近。

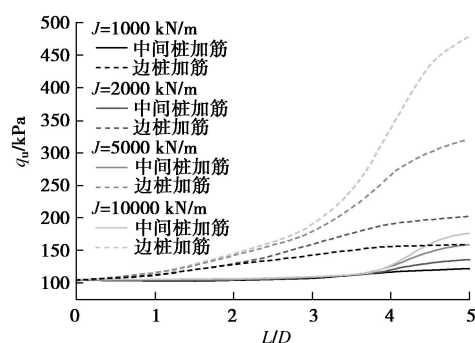


图6 单独加筋情况下碎石桩复合地基极限承载能力变化规律

Fig. 6 Influences on ultimate bearing capacity of composite foundation with stone columns under single reinforcement

### 4 结 语

本文在已有研究基础上,基于二维有限元软件Plaxis<sup>2D</sup>,分别建立单桩,群桩加筋碎石桩的数值模型,研究筋材的强度,长度以及基础宽度对加筋碎石桩复合地基极限承载能力以及破坏模式的影响。

当加筋体强度较低时,加筋体发生剪切破坏的位置与未加筋发生剪切破坏位置相同,全部发生在桩顶。当筋材强度较高时,桩体不会在加筋位置产生剪切破坏,而会在筋材的底部(无加筋范围)产生剪切变形。对于群桩复合地基来说,边桩加筋对复合地基承载能力的提高效果要好于中心桩加筋。群桩复合地基桩体的剪切破坏位置由桩体所处位置决定,中心桩在较深位置出现剪切破坏,边桩在桩顶附近发生剪切破坏。筋材对中心桩约束作用的发挥需要更大的筋箍长度。

### 参考文献:

- [1] 郑刚, 龚晓南, 谢永利, 等. 地基处理技术发展综述[J]. 土木工程学报, 2012, 45(2): 127 - 146. (ZHENG Gang, GONG Xiao-nan, XIE Yong-li, et al. State-of-the-art techniques for ground improvement in China[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(2): 127 - 146. (in Chinese))
- [2] IMPE V W F. Soil improvement techniques and their exolution[J]. Animal Science Papers & Reports, 1989, 20(1): 169 - 178.
- [3] RAJAGOPAL K, KRISHNASWAMY N R, LATHA G M. Behaviour of sand confined with single and multiple geocells[J]. Geotextiles & Geomembranes, 1999, 17(3): 171 - 184.
- [4] RAJAGOPAL K, MURUGESAN S. Geosynthetic-encased stone columns: numerical evaluation[J]. Geotextiles & Geomembranes, 2006, 24(6): 349 - 358.
- [5] GHAZAVI M, AFSHAR J N. Bearing capacity of geosynthetic encased stone columns[J]. Geotextiles & Geomembranes, 2013, 38: 26 - 36.
- [6] MUZAMMIL S P, VARGHESE R M, JOSEPH J. Numerical simulation of the response of geosynthetic encased stone columns under oil storage tank[J]. International Journal of Geosynthetics & Ground Engineering, 2018, 4(1): 4.
- [7] MITCHELL J K, HUBER T R. Performance of a stone column foundation[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(2): 205 - 223.
- [8] 郑刚, 周海祚, 刁钰, 等. 饱和黏性土中散体桩复合地基极限承载力系数研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(3): 385 - 399. (ZHENG Gang, ZHOU Hai-zuo, DIAO Yu, et al. Study on the ultimate bearing capacity coefficient of the composite foundation in the saturated viscous soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(3): 385 - 399. (in Chinese))
- [9] 吕福庆, 吴文. 桩的垂直静载试验极限承载力判定方法综述[J]. 岩土力学, 1995, 16(4): 85 - 93. (LÜ Fu-qing, WU Wen. A general introduction on determining the limit bearing capacity in static-load experiment for piles length of pile-top descent[J]. Rock and Soil Mechanics, 1995, 16(4): 85 - 93. (in Chinese))

(责编: 黄贤沙)