

引文格式:谢宏丽,王苗苗,田叶青,等. 挤扩支盘桩承载特性数值分析与沉降特性研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2025, 42(4): 197-206.  
XIE Hongli, WANG Miaomiao, TIAN Yeqing, et al. Numerical analysis of bearing behavior and settlement characteristics of squeezed branch piles[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2025, 42(4): 197-206.

DOI:10.19815/j.jace.2023.12031

# 挤扩支盘桩承载特性数值分析与沉降特性研究

谢宏丽, 王苗苗, 田叶青, 任玉波, 周志军

(长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

**摘要:** 为了研究挤扩支盘桩桩身轴力传递规律、侧摩阻力分布特性、端阻力演变机制与沉降变形特征, 依托实际工程, 采用 ABAQUS 有限元软件对多支盘挤扩支盘桩开展数值模拟分析; 考虑到实际土层挤密效应与边界效应对模型精度的影响, 将实际工程挤扩支盘桩沉降变形曲线与有限元结果进行对比, 验证模型的适用性; 在此基础上, 对传统灌注桩与挤扩支盘桩的荷载传递特性、沉降特性进行对比分析。结果表明: 挤扩支盘桩表现出高承载力、沉降小的特性, 相同设计承载力时, 单盘、双盘、三盘挤扩支盘桩桩长仅为传统灌注桩桩长的 71.4%、64.3%、53.6%, 具有显著的桩长优化特性; 对于单盘挤扩支盘桩, 不同盘位置的沉降变形曲线相差不大, 设置多个支盘时, 当支盘位置设置在中下层时, 产生的沉降变形较小; 侧摩阻力自上而下进行传递, 在不同竖向荷载作用下占总荷载的比例为 60%~42%, 且侧摩阻力与端阻力呈反比关系; 支盘承担荷载比例超过 50%, 是承担荷载最主要部分; 支盘对桩身轴力具有减小作用, 支盘埋置越深, 对轴力减小作用越显著。

**关键词:** 挤扩支盘桩; 荷载传递特性; 沉降; 侧摩阻力; 轴力; 端阻力

中图分类号: TU473.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2025)04-0197-10

## Numerical analysis of bearing behavior and settlement characteristics of squeezed branch piles

XIE Hongli, WANG Miaomiao, TIAN Yeqing, REN Yubo, ZHOU Zhijun

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** In order to study the axial force transfer law, side friction distribution characteristics, end resistance evolution mechanism and settlement deformation characteristics of squeezed branch pile, based on the actual engineering, ABAQUS finite element software was used to carry out numerical simulation analysis on multi-branch squeezed branch pile. Considering the influence of actual soil compaction effect and boundary effect on the accuracy of model, the settlement deformation curve of squeezed branch pile in actual engineering was compared with finite element results to verify the applicability of the model. On this basis, a comparative analysis was conducted on the load transfer characteristics and settlement characteristics of traditional cast-in-place piles and squeezed branch piles. The results show that the squeezed branch pile has the characteristics of high bearing capacity and small settlement. Under the same design bearing

收稿日期: 2023-12-09

投稿网址: <http://jace.chd.edu.cn>

基金项目: 陕西省交通科技项目(23-72K)

作者简介: 谢宏丽(1999-), 女, 工学博士研究生, E-mail: 1415405794@qq.com。

通信作者: 王苗苗(1986-), 女, 工学博士, 讲师, E-mail: wmmcugb@163.com。

capacity, the pile lengths of single-plate, double-plate, and triple-plate squeezed branch pile are only 71.4%, 64.3% and 53.6% of the traditional cast-in-place pile length, which has significant pile length optimization characteristics. For the single-plate squeezed branch pile, the settlement deformation curves of different-plate positions are not much different. When multiple plates are set up, the settlement deformation is small when the plate position is set in the middle and lower layers. The side friction resistance is transferred from top to bottom, and the proportion of total load under different vertical loads is 60%-42%, and the side friction resistance is inversely proportional to the end resistance. The support plate bears more than 50% of the load, which is the most important part of the load. The support plate has a reducing effect on the axial force of pile. The deeper the support plate is buried, the more significant the axial force is reduced.

**Key words:** squeezed branch pile; load transfer characteristic; settlement; side friction resistance; axial force; end resistance

**Author resumes:** XIE Hongli(1999-), female, doctoral student, E-mail: 1415405794@qq.com; WANG Miaomiao(1986-), female, PhD, assistant professor, E-mail: wmmcugb@163.com.

## 0 引言

挤扩支盘桩是在传统灌注桩基础上采用仿生原理而发展的,是传统灌注桩与侧向液压挤扩设备相结合构成的增设盘或支而成的新型桩基技术<sup>[1-2]</sup>。挤扩支盘桩桩身荷载可通过支盘传递到周围土体,从而改善桩周土体的应力状态,同时减小桩身沉降<sup>[3]</sup>。挤扩支盘桩已在多个省市的大量工程中使用,在提高桩基承载力、减少沉降<sup>[4]</sup>、增加桩基安全性、降低工程造价和缩短工期方面都取得了显著的效果。

目前,国内外对挤扩支盘桩承载力性状的研究成果丰富。马宏伟等<sup>[5]</sup>研究了盘径对承载特性的影响规律,结果表明盘阻在挤扩支盘桩抗拔承载力中的占比随着盘径的增大而增大,加载后期的盘阻贡献率相对于加载初期可以提升 6%~8%。陈飞等<sup>[6]</sup>通过原位测试试验对挤扩支盘桩的承载力性状进行研究,结果表明挤扩支盘桩的支盘阻力主要体现端承力性质<sup>[7-8]</sup>。Su 等<sup>[9]</sup>通过模型试验、现场试验、理论和数值模拟分析表明支盘是挤扩支盘桩的主要承载部位,在失效时其承受荷载高达桩承受荷载的 50% 左右<sup>[10-11]</sup>。Li 等<sup>[12]</sup>研究了不同盘位置、数量、尺寸以及间距对挤扩支盘桩承载性能的影响,结果表明在同等条件下,挤扩支盘桩的单桩抗压承载力为直孔桩的 2.3 倍。张坤标等<sup>[13-19]</sup>研究了支盘桩在沉降过程中的荷载分担特点和盘-土相互作用机制,结果表明支盘端部尤其下部支盘端部在极限沉降状态下将大量荷载传递至盘周土体。杨建平<sup>[20-22]</sup>研究了挤扩支盘桩桩身轴力和桩侧摩阻力的

传递特性,并提出在设计挤扩支盘桩时应注意提高桩身强度和周围土层性质的建议。尽管上述学者在挤扩支盘桩承载力特性方面的研究很有参考意义,但关于挤扩支盘桩荷载传递规律的研究较为单一,且缺乏挤扩支盘桩桩长优化方面的研究,导致在实际运用中仍存在许多的不确定性<sup>[23-24]</sup>。

本文利用有限元软件,以潮汕京灶大桥挤扩支盘桩的实际应用情况为背景,将依托工程荷载-沉降曲线结果与模拟结果进行对比,验证建模的可靠性<sup>[25]</sup>。在此基础上建立不同工况模型,在相同设计承载力作用下研究挤扩支盘桩桩长优化机制;分析在不同竖向荷载作用下挤扩支盘桩荷载传递特性以及受力机理,为完善挤扩支盘桩理论和指导实际工程应用提供参考。

## 1 现场试验与数值模拟对比分析

### 1.1 现场数据

根据潮汕京灶大桥挤扩支盘桩的实际应用情况,取金灶枢纽互通主线桥变径桩 12#-1 的试验数据,桩长  $L=56.5$  m,桩径  $d$  为 1.8、1.4 m,支盘高度设置为 1.3 m,支盘直径  $D=2.6$  m,共设置 5 个支盘,位于粉砂、细砂、粉质黏土、中砂、粉质黏土中,距桩顶距离分别为 19、26、33、39、49 m。现场土层物理参数见表 1。潮汕环线大盘设计实体挖桩如图 1 所示。

### 1.2 试验概况

金灶枢纽互通主线桥 12#-1 工程桩采用锚桩法开展竖向抗压静载试验,设置了 2 根反力锚桩,其中锚桩直径为 1.4 m,锚桩中心距为 10.8 m,如图 2 所

表 1 现场土层及其物理参数  
Table 1 On-site soil layer and its physical parameters

| 土层    | 深度 $h/\text{m}$ | 密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-1})$ | 弹性模量 $E_s/\text{MPa}$ | 黏聚力 $c/\text{kPa}$ | 内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$ | 摩阻力标准值 $q_{ik}/\text{kPa}$ | 承载力特征值 $f_{ak}/\text{kPa}$ |
|-------|-----------------|---|-----------------------|--------------------|--------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 淤泥    | 12.51           | 1 498                                     | 0.80                  | 7.20               | 5.8                            | 10                         | 45                         |
| 粉质黏土① | 8.00            | 1 658                                     | 28.50                 | 9.65               | 26.6                           | 55                         | 210                        |
| 粉砂    | 4.80            | 1 579                                     | 30.10                 | 16.12              | 28.5                           | 48                         | 270                        |
| 粉质黏土② | 8.70            | 1 960                                     | 10.96                 | 29.22              | 20.3                           | 60                         | 300                        |
| 中砂    | 7.20            | 1 708                                     | 45.20                 | 25.54              | 35.9                           | 75                         | 370                        |
| 粉质黏土③ | 7.00            | 2 089                                     | 17.59                 | 40.76              | 25.8                           | 80                         | 250                        |
| 粗砂    | 8.29            | 1 812                                     | 78.23                 | 19.24              | 41.5                           | 90                         | 430                        |

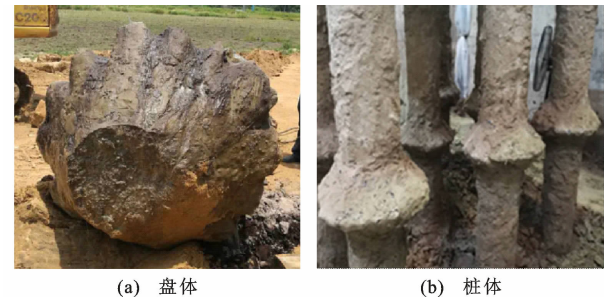


图 1 潮汕环线大盘实体挖桩设计

Fig. 1 Design of solid excavation piles for  
Chaoshan ring road

示。静载试验中 12<sup>#</sup>-1 桩最大加载至 13 400 kN,总沉降 8.16 mm;锚桩 1 和锚桩 2 最大加载至 6 700 kN,总沉降分别为 11.56、12.03 m。具体荷载试验结果见表 2。

表 2 荷载试验结果  
Table 2 Load test results

| 桩号                 | 桩径/m    | 桩长/m  | 单桩承载力特征值/kN | 单级荷载/kN       | 最大试验荷载/kN | 最终沉降/mm |
|--------------------|---------|-------|-------------|---------------|-----------|---------|
| 12 <sup>#</sup> -1 | 1.8/1.4 | 56.50 | 6 700       | 1 340(10 级荷载) | 13 400    | 8.16    |
| 锚桩 1               | 1.4     | 64.00 | 3 350       | 670(10 级荷载)   | 6 700     | 11.56   |
| 锚桩 2               | 1.4     | 64.08 | 3 350       | 670(10 级荷载)   | 6 700     | 12.03   |

1.3 模型建立

采用 ABAQUS 有限元软件进行数值模拟<sup>[26]</sup>,与金灶枢纽互通主线桥变径桩 12<sup>#</sup>-1 的实际沉降变形曲线进行对比分析。为了更准确地捕捉桩和土体之间的相互作用,尽可能避免边界效应对模拟结果的影响,土体边长设置为桩径的 20 倍,即横向设置为 36 m;为了提供足够的土体长度,使运动边界条件在模拟中起到合理的作用,设置土体高度为桩长的 2 倍,即纵向设置为 113 m。

建模中桩体仅设置弹性参数,采用均质连续线弹性本构模型,不考虑非线性性质,每层土体均采用 Mohr-Coulomb 本构关系,假设各土层为均质连续各向同性的理想弹塑性材料。挤扩支盘桩桩身模型采用 C40 混凝土,桩体模型所需物理参数如表 3

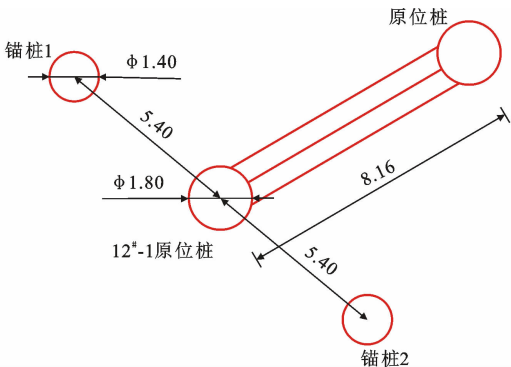


图 2 金灶枢纽互通主线桥 12<sup>#</sup>-1 工程桩平面示意图(单位:m)

Fig. 2 Plan schematic diagram of pile foundation for  
Jinzao hub nterchange main bridge 12<sup>#</sup>-1  
project (unit: m)

表 3 桩体模型物理参数

Table 3 Physical parameters of pile model

| 密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-1})$ | 弹性模量 $E_s/\text{MPa}$ | 泊松比 $\mu$ | 摩擦因数 | 天然重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$ | 饱和重度 $\gamma_{\text{sat}}/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$ |
|---|-----------------------|-----------|------|---|--|
| 2 500                                     | 41.50                 | 27.76     | 0.68 | 24.5  | 24.5   |

所示。

进行网格划分时,在应力集中处、大变形处、接触面等一些关键部位应先进行分割操作,将其分割成简单区域后再生成局部细化的网格,在应力很小和远离关键部位的区域划分比较粗的网格<sup>[27]</sup>。挤扩支盘桩和桩周土均采用结构化划分技术,生成单元类型为 C3D8R 的六面体网格。土体和桩身尺寸及有限元网格划分示意图见图 3、4。

桩土接触采用分析步为 Contact 中的 Surface-

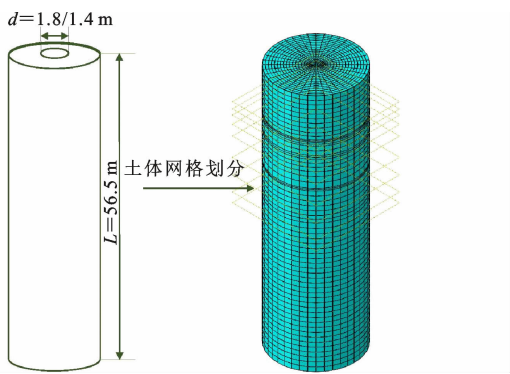


图 3 土体尺寸  
Fig. 3 Soil size

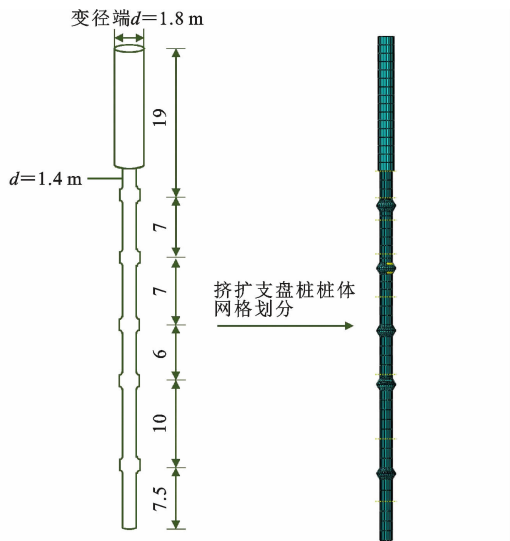


图 4 挤扩支盘桩桩身尺寸(单位:m)

Fig. 4 Size of squeezed branch pile body (unit: m)

to-Surface 的离散化方法,桩-土间接触分析选择小滑移模式。由于摩擦力等于摩擦因数与支持力的积,因此在定义接触属性中,所有摩擦接触设置切向行为时必须加上法向行为,摩擦特性中切向行为取带罚刚度的库仑摩擦特性,法向行为为硬接触。

1.4 模型验证

考虑到实际情况下土体受到自身重力的作用会产生沉降,因此在桩顶施加荷载前,需先进行桩-土地应力平衡。采用有限元软件在桩顶中心施加荷载 13 400 kN,单级加载 1 340 kN,分 10 级加载完成。由于挤扩支盘桩成型过程中存在挤密效应,盘体周围受到挤压作用,将支盘周围土体的弹性模量提高约 2 倍时,现场试验沉降变形曲线与模型的沉降变形曲线较吻合。有限元模拟的荷载-沉降(Q-s)曲线与现场试验结果比对见图 5,可知两者吻合较好,故模型设置及其所取参数较为合理,可以认为该模型能够反映挤扩支盘桩的真实应力状态。

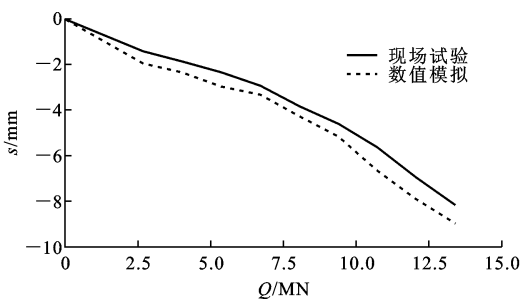


图 5 现场试验及有限元模拟的 Q-s 曲线对比  
Fig. 5 Comparison of Q-s curves between on-site testing and finite element simulation

2 数值分析建模

根据《公路桥涵地基与基础设计规范》计算 56 m 传统灌注桩单桩轴向受压承载力特征值,并求得在相同设计承载力特征值作用下,单盘、双盘、三盘挤扩支盘桩的桩长,分析挤扩支盘桩相对传统灌注桩的优点。采用 ABAQUS 有限元软件分析挤扩支盘桩盘位置变化对于承载力的影响,得到桩侧摩阻力和轴向应力的传递规律。

2.1 工况设置

(1)按照规范计算桩长为 56 m 的传统灌注桩的设计承载力,求挤扩支盘桩单盘、双盘、三盘在相同设计承载力作用下的桩长;分析在相同荷载作用下挤扩支盘桩与传统灌注桩的 Q-s 曲线对比。

(2)分析挤扩支盘桩在不同竖向荷载作用下单盘位置的变化对桩身轴力的影响。

(3)在相同荷载作用下,研究挤扩支盘桩桩侧摩阻力传递规律;分析挤扩支盘桩支盘不同位置时承担荷载的比例。

2.2 试验参数

以潮汕京灶大桥实际运用情况为依托,建立挤扩支盘桩和传统灌注桩计算模型。设置传统灌注桩桩长  $L=56\text{ m}$ ,桩径  $d=1.8\text{ m}$ 。土层物理参数参考表 1。根据《公路桥涵地基与基础设计规范》,传统灌注桩单桩轴向受压承载力特征值计算公式如式(1)、(2)所示。根据《广东公路桥梁挤扩支盘桩技术规程》,挤扩支盘桩单桩轴向受压承载力特征值计算公式如式(3)、(4)所示。

$$R_a = \frac{1}{2}u \sum_{i=1}^n q_{ik} l_i + A_p q_r \tag{1}$$

$$q_r = m_0 \lambda [f_{a0} + k_2 \gamma_2 (h - 3)] \tag{2}$$

$$R_a = \frac{1}{2}(u \sum_{i=1}^n q_{ik} l_i + \eta \sum q_{ik} S_{iz}) +$$

$$\sum_{j=1}^m A_{pj}q_{rj} + A_pq_r \tag{3}$$

$$q_{rj} = m_0\lambda[f_{aj} + k_2\gamma_2(h_j - 3)] \tag{4}$$

式中: $R_a$  为单桩轴向受压承载力容许值; $u$  为桩身周长; $A_p$ 、 $A_{pj}$  分别为桩端截面面积和第  $j$  个支或盘的面积; $n$ 、 $m$  分别为土的层数以及支、盘的总数; $l_i$  为承台底面或局部冲刷线以下第  $i$  土层的厚度; $f_{a0}$ 、 $f_{aj}$  分别为桩端土和支盘处土的承载力特征值; $h$  为桩端埋置深度; $h_j$  为支盘端的埋置深度; $k_2$  为深度修正系数; $\gamma_2$  为各土层的加权平均重度; $\lambda$  和  $m_0$  分别为修正系数和清底系数; $q_{ik}$  为与  $l_i$  对应的桩侧摩阻力标准值; $q_r$  为修正后的桩端处承载力容许值; $q_{rj}$  为第  $j$  个支或盘端土的承载力容许值; $S_{iz}$  为支侧表面积; $\eta$  为支侧摩阻折减系数,一般取 0.6~0.7。

根据传统灌注桩承载力特征值计算公式,求得 56 m 的传统灌注桩承载力特征值为 6 000 kN。设置挤扩支盘桩桩径  $d=1.8$  m,支盘高度为 1.3 m,支盘直径  $D=2.6$  m,土层具体物理参数与传统灌注桩一致。在相同设计承载力特征值作用下,算得

单盘、双盘、三盘挤扩支盘桩的桩长分别为 40、36、30 m,具体参数及支盘设置如表 4 所示。

根据上述结果,设置土体边长为桩径的 20 倍,土体高度为桩长的 2 倍。故土体边长均设置为 36 m,单盘挤扩支盘桩土体高度设置为 80 m,双盘挤扩支盘桩土体高度设置为 72 m,三盘挤扩支盘桩土体高度设置为 60 m。挤扩支盘桩桩身模型采用 C40 混凝土,其他参数与上文相同。

挤扩支盘桩盘距离桩顶的位置设置为 10、15、20、25 m 四个位置,具体布置见图 6。单盘单桩设置了 4 组,分别用  $L_1(10)$ 、 $L_1(15)$ 、 $L_1(20)$ 、 $L_1(25)$  表示;双盘单桩设置了 3 组,分别用  $L_2(10-15)$ 、 $L_2(15-20)$ 、 $L_2(20-25)$  表示;三盘单桩设置了 2 组,分别用  $L_3(10-15-20)$ 、 $L_3(15-20-25)$  表示。

3 模拟结果分析

3.1 沉降对比

为了研究不同支盘位置挤扩支盘桩沉降曲线的变化,模拟在相同承载力情况下不同单盘、双盘、三

表 4 传统灌注桩与挤扩支盘桩设置对比

Table 4 Comparison between traditional cast-in-place piles and squeezed branch piles setting

| 桩型    |    | 桩径/m | 盘径/m | 支盘位置/m            | 承载力特征值/kN | 桩长/m | 盘高/m |
|-------|----|------|------|-------------------|-----------|------|------|
| 传统灌注桩 |    | 1.8  |      |                   | 6 000     | 56   |      |
| 挤扩支盘桩 | 单盘 | 1.8  | 2.6  | 10、15、20、25       | 6 000     | 40   | 1.3  |
|       | 双盘 | 1.8  | 2.6  | 10-15、15-20、20-25 | 6 000     | 36   | 1.3  |
|       | 三盘 | 1.8  | 2.6  | 10-15-20、15-20-25 | 6 000     | 30   | 1.3  |

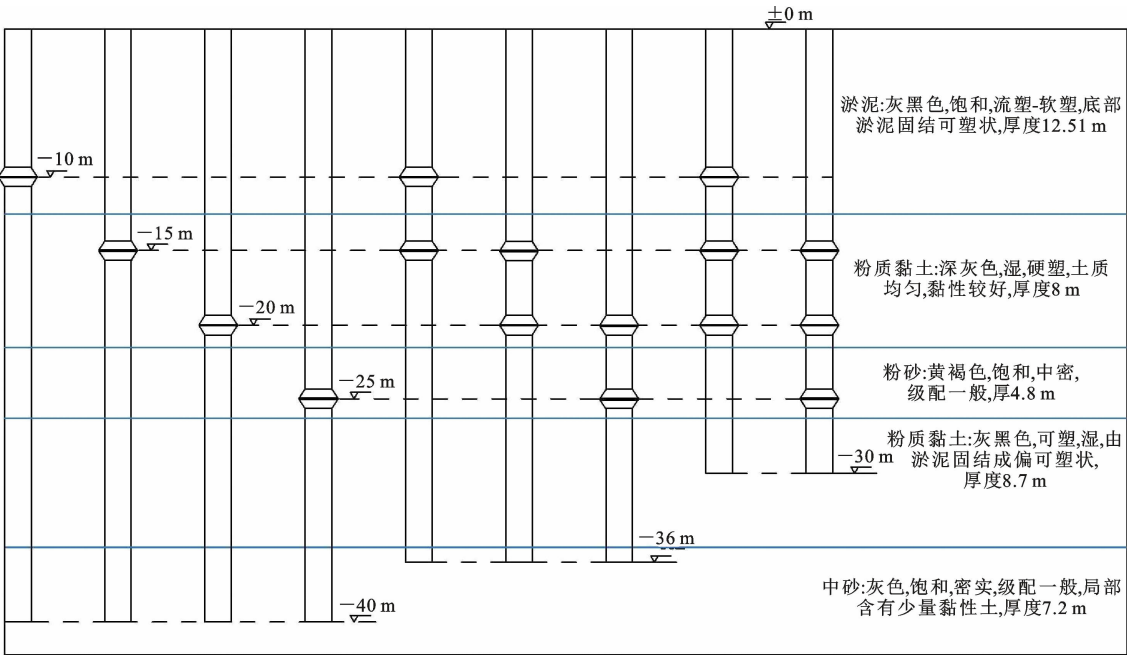


图 6 支盘布置位置

Fig. 6 Layout position of support plate

盘位置下挤扩支盘桩的  $Q$ - $s$  曲线关系。当设计承载力为 6 000 kN 时,通过轴向受压承载力特征值计算公式求得传统灌注桩桩长为 56 m,单盘挤扩支盘桩桩长为 40 m,双盘挤扩支盘桩桩长为 36 m,三盘挤扩支盘桩桩长为 30 m。在相同设计承载力作用下,挤扩支盘桩的桩长明显短于传统灌注桩;在相同荷载作用下,挤扩支盘桩的沉降变形明显小于传统灌注桩,可见挤扩支盘桩在优化桩长、减小沉降、节省原料、降低造价、缩短工期方面有突出的优点,能产生良好的经济效益和社会效益。

3.1.1 传统灌注桩与单盘挤扩支盘桩沉降对比

以单盘挤扩支盘桩为例,取设计荷载 6 000 kN 的 2 倍,每级增加 1 200 kN,最大桩顶荷载增加到 12 000 kN,选取  $L_1(10)$ 、 $L_1(15)$ 、 $L_1(20)$ 、 $L_1(25)$  四个模型与传统灌注桩进行  $Q$ - $s$  曲线对比,如图 7 所示。在相同荷载作用下,传统灌注桩的沉降变形量超过 28 mm,不同盘位时单盘挤扩支盘桩产生的沉降变形量在 21~25 mm 之间,体现出承载力高、变形小的特性。由图 7 可知:桩基加荷初期(荷载在 2 400~9 600 kN 之间), $L_1(10)$  沉降变形量明显小于  $L_1(15)$ 、 $L_1(20)$ 、 $L_1(25)$ ,其主要原因是 10 m 处的盘承担了上部荷载;加荷后期(荷载在 9 600~12 000 kN 之间),由于 15、20、25 m 位置处的盘开始发挥作用,导致  $L_1(10)$  产生的沉降变形量远超过  $L_1(15)$ 、 $L_1(20)$ 、 $L_1(25)$ ,表明上盘先开始发挥作用,盘是自上而下起作用的。总的来说,不同盘位的单盘挤扩支盘桩沉降变形量相差不大,桩身和盘共同承受上部荷载,盘的位置变化对其沉降变形影响不大。

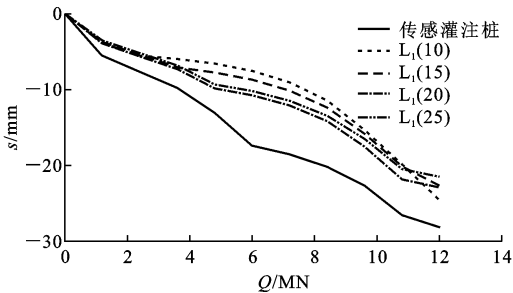


图 7 传统灌注桩和挤扩支盘桩不同单盘位置  $Q$ - $s$  曲线  
Fig. 7  $Q$ - $s$  curves for traditional cast-in-place piles and squeezed branch piles with different single-plate positions

3.1.2 多盘挤扩支盘桩沉降对比

以双盘挤扩支盘桩为例,施加 12 000 kN 荷载,每级增加 1 200 kN,选取  $L_2(10-15)$ 、 $L_2(15-20)$ 、 $L_2(20-25)$  进行  $Q$ - $s$  曲线对比,如图 8 所示。再以三盘挤扩支盘桩为例,选取  $L_3(10-15-20)$ 、 $L_3(15-20-25)$

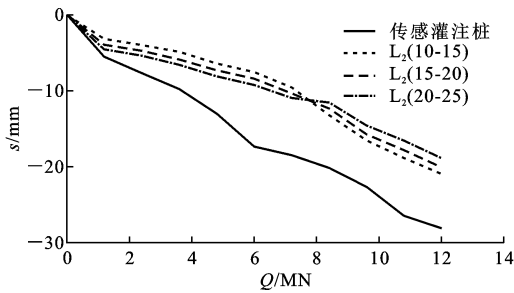


图 8 双盘挤扩支盘桩不同位置  $Q$ - $s$  曲线  
Fig. 8  $Q$ - $s$  curves for double-plate squeezed branch piles of different positions

25) 进行  $Q$ - $s$  曲线对比,如图 9 所示。从图 8、9 的曲线特征可知:挤扩支盘桩的荷载-沉降变形曲线呈缓变型,双盘、三盘挤扩支盘桩沉降变形荷载临界值约为 7 500 kN,当荷载小于 7 500 kN 时,支盘平均位置越浅,相同荷载作用下沉降量越小;当荷载大于 7 500 kN 时,支盘平均位置越深,沉降量反而越小。相同荷载作用下,取单盘挤扩支盘桩最终沉降变形量最小的盘位  $L_1(25)$  与双盘、三盘挤扩支盘桩最终沉降变形量最小的盘位  $L_2(20-25)$ 、 $L_3(15-20-25)$  进行对比,见图 10。三盘挤扩支盘桩最终沉降变形量为单盘挤扩支盘桩最终沉降变形量的 81.6%、双盘挤扩支盘桩最终沉降变形量的 92.8%,表明在相同荷载作用下,三盘挤扩支盘桩沉降变形最小,且与双盘挤扩支盘桩沉降变形相差不大。故建议支盘最佳设置数量为 2 个,且支盘位置应尽量设置在深处,以达到更高的承载力。

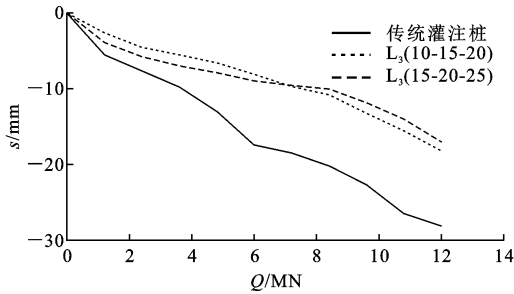


图 9 三盘挤扩支盘桩不同位置  $Q$ - $s$  曲线  
Fig. 9  $Q$ - $s$  curves for triple-plate squeezed branch piles of different positions

3.2 荷载传递特性

桩顶荷载首先由桩侧摩阻力承担。当荷载逐渐增大,桩身轴力随之向下传递,支盘端承担的荷载就是支盘上下的轴力之差,支盘是承担荷载最主要的部分。由于支盘对轴力具有减小作用<sup>[28]</sup>,当荷载传递到桩端时,轴力变得很小,使桩端荷载明显降低,这也是挤扩支盘桩高承载力的原因。施加最大桩顶



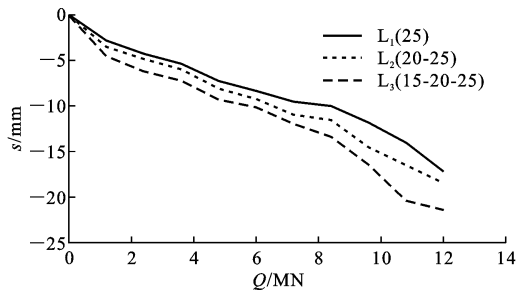


图 10 单盘、双盘、三盘挤扩支盘桩最优沉降变形量对比  
Fig. 10 Comparison of optimal settlement deformations for single-plate, double-plate, and triple-plate squeezed branch piles

荷载 12 000 kN,每级增加 2 000 kN,得到挤扩支盘桩各部分占总承载力的比例,以及桩侧摩阻力、桩身轴力沿挤扩支盘桩桩身长度的分布。

### 3.2.1 荷载承担情况

根据挤扩支盘桩承载力特征值公式可知,支盘桩的承载力由桩侧摩阻力、支盘端阻力以及桩端阻力三部分构成,以单盘挤扩支盘桩为例,研究在不同支盘位置桩侧摩阻力、支盘端阻力以及桩端阻力占总荷载的比例,分别用  $R_s$ 、 $R_p$ 、 $R_q$  表示,结果如图 11~13 所示。

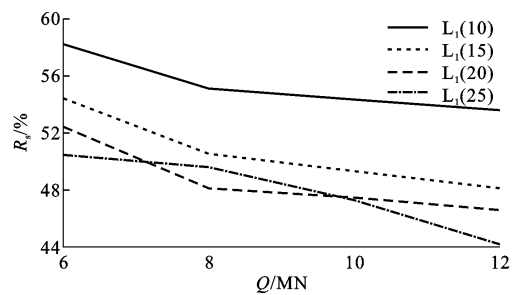


图 11 桩侧摩阻力对比

Fig. 11 Comparison of pile side friction resistance

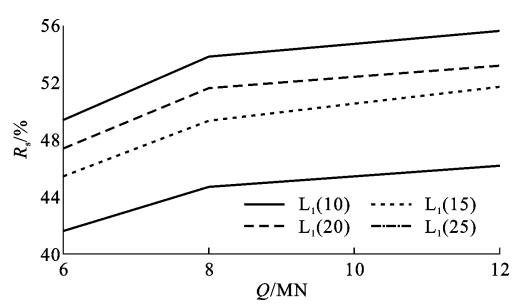


图 12 支盘端阻力对比

Fig. 12 Comparison of support plate end resistance

由图 11~13 可知,支盘端阻力和桩端阻力对承载力的贡献率远远小于桩侧摩阻力对承载力的贡献率。桩侧摩阻力占总荷载的比例随着荷载的增加而减小,大致范围为 60%~42%,桩侧摩阻力是自上

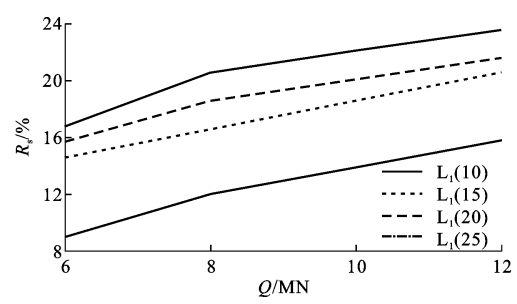


图 13 桩端阻力对比

Fig. 13 Comparison of pile end resistance

而下发挥作用的。支盘端阻力和桩端阻力占总荷载的比例则随着荷载的增加而增大,支盘端阻力占总荷载比例范围为 40%~56%,桩端阻力占总荷载比例范围为 8%~24%。总的来说,支盘的位置越深,桩侧摩阻力占总荷载比例越小,支盘端阻力和桩端阻力占总荷载比例越大。这一规律表明,支盘的埋深越深,支盘端阻力发挥承载的潜能就越大,且当支盘端阻力过小时,桩端阻力会提供更多的承载力。

挤扩支盘桩能够充分发挥承载特性的根本原因在于挤扩设备对支盘附近土体的挤密作用。挤扩支盘桩支盘处于不同土质情况下,盘所承受的荷载大小不同。相对于淤泥、粉质黏土,粉砂压缩性低、抗剪强度性能最好。从图 12 可知,在不同竖向荷载作用下,粉砂层中  $L_1(25)$  支盘端阻力占总荷载的比例最大,平均为 53.38%。因此,为了增大支盘承载力效果,将大部分荷载传递给桩周土体和增大桩基的承载能力,应将支盘设立在压缩性低、抗剪性好的土层中。

### 3.2.2 桩侧摩阻力分析

双盘、三盘挤扩支盘桩桩侧摩阻力沿桩身长度的分布曲线见图 14、15。在无盘位置处桩侧摩阻力承担了主要荷载,且支盘埋深位置越深,桩侧摩阻力越小,可见桩侧摩阻力是自上往下发挥作用的,从单盘挤扩支盘桩桩侧摩阻力占总荷载的比例也可看出这一规律。

桩侧摩阻力优先于支盘端阻力发挥作用。可以看出,盘所在的位置桩侧摩阻力发生明显突变,说明支盘承担荷载作用显著。上下盘的承载力具有时序性,当上盘承载力快达到极限状态时,下盘才开始发挥作用,因此每个盘并不是都能充分发挥其承载能力,故在计算承载力时,不能简单将各个支盘的最大承载力相加,这与卢成原等<sup>[29]</sup>得出的结论一致。

### 3.2.3 桩身轴力分布特性

以  $L_3(10-15-20)$  为例,得到挤扩支盘桩在不同

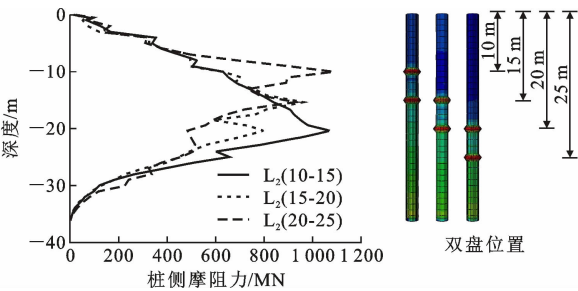


图 14 双盘挤扩支盘桩沿桩身各段桩侧摩阻力对比  
Fig. 14 Comparison of side frictional resistance of double-plate squeezed branch piles along various sections of pile body

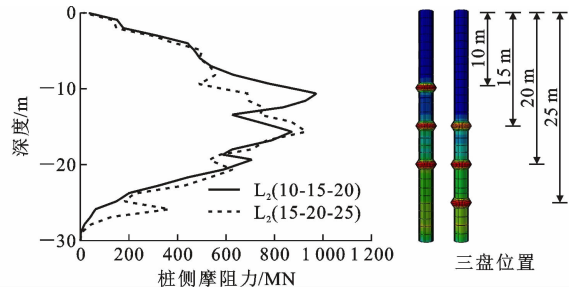


图 15 三盘挤扩支盘桩沿桩身各段桩侧摩阻力对比  
Fig. 15 Comparison of side frictional resistance of triple-plate squeezed branch piles along various sections of pile body

竖向荷载  $N_v$  作用下桩身轴力随深度变化曲线, 见图 16。轴力随着深度的增加而减少, 逐渐转移到桩端阻力上, 从而使桩端阻力明显降低。

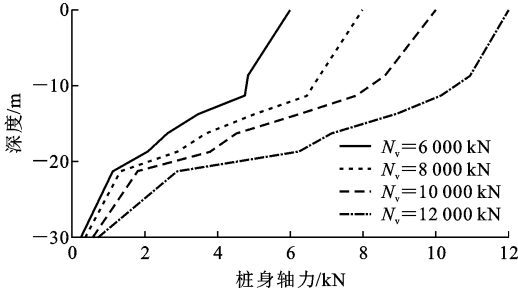


图 16 不同荷载作用下桩身轴力曲线  
Fig. 16 Axial force curve of pile body under different loads

支盘对轴力具有减小作用, 挤扩支盘桩第一个盘位置处轴力发生明显下降, 轴力在中盘和下盘处急剧降低, 盘埋置位置越深, 对轴力的减小作用越显著。在最大荷载 12 000 kN 作用下, 盘承担荷载的总和为 6 852 kN, 占总荷载比例为 57.1%, 在其他荷载(6 000~10 000 kN)作用时, 盘承担荷载的比例均在 50%左右, 说明支盘是承担荷载最主要的部分, 且上盘承担的荷载明显小于下盘承担的荷载。

因此, 应合理设置支盘位置, 最大限度发挥支盘的承载能力。

#### 4 结 语

(1) 与同类型传统灌注桩相比, 在相同设计承载力下, 挤扩支盘桩在缩短桩长方面具有明显优势, 且产生的沉降量小于传统灌注桩, 呈现出承载力高、变形小的特性。

(2) 加荷初期桩侧摩阻力承担大部分荷载, 加荷后期支盘端阻力和桩端阻力占主导作用, 体现出挤扩支盘桩的端承性质。挤扩支盘桩能够充分发挥承载性能在于支盘周围土体的挤密作用。因此, 为了发挥支盘承载的潜能, 应尽量在压缩性低、抗剪性好的土层中设置支盘。

(3) 通过挤扩支盘桩荷载传递特性分析可知, 上盘桩侧摩阻力发挥作用比下盘早, 每个盘不一定都能充分发挥承载潜能, 因此在计算承载力时, 不能只是将各个支盘的最大承载力相加。

(4) 支盘是承担荷载的最主要部分, 支盘埋置深度越深, 对轴力的减小作用越显著, 应合理设置支盘位置, 保证支盘承载性能的充分发挥。

(5) 本文研究分析了挤扩支盘桩荷载传递规律、沉降变形特性, 但在进行数值模拟时仅考虑了淤泥、粉质黏土、粉砂对支盘承载力的影响。在后续的研究中将详细考虑多种土质情况对支盘布置的影响。

#### 参考文献:

#### References:

[1] 张金保, 韩玉花, 王海静, 等. 挤扩支盘灌注桩承载力影响因素的数值模拟研究[J]. 公路, 2021, 66(7): 81-87.  
ZHANG Jinbao, HAN Yuhua, WANG Haijing, et al. Numerical simulation and research on the factors that affect the bearing capacity of squeezed branch pouring piles[J]. Highway, 2021, 66(7): 81-87.

[2] 王建华, 刘泓悦, 于泽泉. 挤扩支盘桩承载性能理论与试验研究[J]. 广东土木与建筑, 2025, 32(3): 32-36.  
WANG Jianhua, LIU Hongyue, YU Zequan. Theoretical and experimental study on the bearing performance of squeezed expansion branch pile [J]. Guangdong Architecture Civil Engineering, 2025, 32(3): 32-36.

[3] 何青睿. 挤扩支盘桩抗拔承载特性模型试验研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2022.  
HE Qingrui. Experimental study on uplift bearing



- characteristics of squeezed branch disc pile[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2022.
- [4] CHEN J W, HUI Y X. Optimized design of a squeezed-branch pile group based on an improved particle swarm algorithm [J]. *Sustainability*, 2023, 15(3): 2060.
- [5] 马宏伟,杨玉琪,何青睿,等. 挤扩支盘桩抗拔承载特性的模型试验研究[J]. 河南城建学院学报, 2023, 32(3): 1-7.
- MA Hongwei, YANG Yuqi, HE Qingrui, et al. Model test study on uplift bearing characteristic of squeezed branch pile[J]. *Journal of Henan University of Urban Construction*, 2023, 32(3): 1-7.
- [6] 陈飞,吴开兴,何书. 挤扩支盘桩承载力性状的现场试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增2): 990-993.
- CHEN Fei, WU Kaixing, HE Shu. Field tests on load transfer performances of squeezed branch piles [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(S2): 990-993.
- [7] LIU L, MA H W, YANG X L, et al. A calculation method of bearing capacity of single squeezed branch pile based on load transfer method[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022, 2022(1): 9597047.
- [8] 丘 燊,张国梁,曾昭宇,等. 基于正交试验法的挤扩支盘桩加固公路软基参数敏感性[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(29): 12675-12683.
- QIU Shen, ZHANG Guoliang, ZENG Zhaoyu, et al. Sensitivity for factors of squeezed branch piles in soft foundation reinforcement of highway based on orthogonal test method[J]. *Science Technology and Engineering*, 2024, 24(29): 12675-12683.
- [9] SU Q Q, XIA H B, WU K M, et al. The effects of branch spacing and number on the uplift bearing capacity of a new squeezed multiple-branch pile: a numerical simulation analysis[J]. *Modelling and Simulation in Engineering*, 2023, 2023(1): 3758253.
- [10] XIONG L, LI G W, ZHOU Y, et al. Experimental and analytical investigation of the bearing capacity of bulbs for squeezed branch piles [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2023, 23(5): 04023045.
- [11] 张敏霞,崔文杰,徐平,等. 竖向荷载作用下挤扩支盘桩桩周土体位移场变化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(增1): 3569-3577.
- ZHANG Minxia, CUI Wenjie, XU Ping, et al. Research on soil displacement field around the squeezed branch pile under vertical load[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36 (S1): 3569-3577.
- [12] LI T, XU P, YANG G Q. Investigation into bearing performance of concrete expanded-plates piles: field test and numerical modelling[J]. *Engineering Structures*, 2022, 271: 114954.
- [13] 张坤标,汪益敏,陈页开,等. 基于承载特性的挤扩支盘桩加固深厚软基作用机理研究[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(增2): 97-102.
- ZHANG Kunbiao, WANG Yimin, CHEN Yekai, et al. Mechanism of reinforcement of squeezed branch piles for deep soft foundation based on load bearing capacities[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2024, 46(S2): 97-102.
- [14] ZHOU J J, WANG K H, GONG X N, et al. Bearing capacity and load transfer mechanism of a static drill rooted nodular pile in soft soil areas[J]. *Journal of Zhejiang University-Science A (Applied Physics & Engineering)*, 2013, 14(10): 705-719.
- [15] 席亚彬. 湿陷性黄土地区挤扩支盘桩的承载特性及数值模拟分析[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2019.
- XI Yabin. Bearing behavior and numerical simulation analysis of squeezed branch pile in collapsible loess area[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2019.
- [16] 张敏霞,崔文杰,徐平,等. 挤扩支盘桩与钻孔灌注桩现场对比试验研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2017, 36(2): 122-127.
- ZHANG Minxia, CUI Wenjie, XU Ping, et al. Comparative test research on squeezed branch piles and bored piles field[J]. *Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science)*, 2017, 36 (2): 122-127.
- [17] MOSHFEGHI S, ESLAMI A. Study on pile ultimate capacity criteria and CPT-based direct methods[J]. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 12(1): 28-39.
- [18] 汪益敏,张坤标,丘 燊,等. 基于现行规范的挤扩支盘桩设计参数及承载特性对比研究[J]. 建筑结构, 2023, 53(增1): 2648-2653.
- WANG Yimin, ZHANG Kunbiao, QIU Shen, et al. Comparative study on the design parameters and compressive bearing capacity of squeezed branch piles based on current specifications[J]. *Building Structure*, 2023, 53(S1): 2648-2653.
- [19] 李 枫,宋焕豹,周云东. 挤扩支盘桩的承载特性[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2010, 38(2): 202-205.

- LI Feng, SONG Huanbao, ZHOU Yundong. Bearing behaviors of squeezed branch piles[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2010, 38(2): 202-205.
- [20] 杨建平, 朴春德. 挤扩支盘桩分布式检测及承载机理研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增 2): 1232-1235.
- YANG Jianping, PIAO Chunde. Distributed detection and bearing mechanism of squeezed branch piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S2): 1232-1235.
- [21] 易浩, 张坤标, 陈页开, 等. 软土地区挤扩支盘桩竖向承载特性研究[J]. 世界桥梁, 2021, 49(5): 79-86.
- YI Hao, ZHANG Kunbiao, CHEN Yekai, et al. Study of vertical bearing capacity of squeezed branch pile in soft soil area[J]. World Bridges, 2021, 49(5): 79-86.
- [22] 吴怡颖. 基于荷载传递法的挤扩桩承特性研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2020.
- WU Yiyang. A calculation theory of bearing capacity of single squeezed branch pile based on load transfer method[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2020.
- [23] 张贯鑫. 错盘布置下挤扩支盘桩竖向承载性状有限元研究[D]. 开封: 河南大学, 2018.
- ZHANG Guanxin. Finite element analysis on vertical bearing capacity of squeezed branch pile with staggered arrangement plates[D]. Kaifeng: Henan University, 2018.
- [24] MA H M, PENG C. Analysis and application of ultimate bearing capacity of squeezed branch pile[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2023, 41(6): 3823-3828.
- [25] 李连祥, 李先军. 不同扩径体数量、位置对支盘桩承载力的影响[J]. 山东大学学报(工学版), 2016, 46(5): 88-94.
- LI Lianxiang, LI Xianjun. Influence of squeezed branch pile bearing capacity on different numbers and positions of enlarged parts[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2016, 46(5): 88-94.
- [26] ZHANG J, ZHANG Z, ZHANG S R, et al. Numerical simulation of the influence of pile geometry on the heat transfer process of foundation soil in permafrost regions[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2022, 38: 102324.
- [27] 费康, 彭劼. ABAQUS 岩土工程实例详解[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2017.
- FEI Kang, PENG Jie. Detailed explanation of ABAQUS geotechnical engineering examples[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2017.
- [28] 王伊丽, 徐良英, 李碧青, 等. 挤扩支盘桩竖向承载力特性和影响因素的数值研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(增 2): 158-162.
- WANG Yili, XU Liangying, LI Biqing, et al. Finite element numerical study on the axial bearing behaviors and factors of squeezed branch pile[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(S2): 158-162.
- [29] 卢成原, 孟凡丽, 吴坚, 等. 不同土层对支盘桩荷载传递影响的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(20): 3547-3551.
- LU Chengyuan, MENG Fanli, WU Jian, et al. Testing study on effect of different soil layers on load transfer of model piles with branch plates[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(20): 3547-3551.