

DOI: 10.11779/CJGE2024S20009

基于承载特性的挤扩支盘桩加固深厚软基作用机理研究

张坤标¹, 汪益敏¹, 陈页开¹, 丘 桑², 易 浩³, 曾昭宇²

(1. 华南理工大学土木与交通学院, 广东 广州 510641; 2. 广东省交通规划设计研究院集团股份有限公司, 广东 广州 510440;

3. 广东省交通运输建设工程质量检测中心, 广东 广州 510420)

摘 要: 针对深厚软土地基中挤扩支盘桩布置, 结合汕头软基区挤扩支盘桩应用工程的单桩静载试验建立三维数值模型, 探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: 未贯穿深厚软基的挤扩支盘桩桩端的荷载分担率远低于等截面直孔桩; 挤扩支盘桩群桩效应系数 η_g 与桩体数目 N 和桩间距 S_p 密切相关, 推荐桩间距 $S_p=8d$ 为深厚软基区支盘桩的最优间距; 支盘端部尤其下部支盘端部在极限沉降状态下分担大量荷载至盘周土体, 盘净距 S_b 通过改变支盘结构持土层性质而影响基桩承载能力。

关键词: 挤扩支盘桩; 承载特性; 数值模拟; 荷载传递; 软土地基处理

中图分类号: TU473 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2024)S2-0097-06

作者简介: 张坤标(1995—), 男, 博士研究生, 从事软基处理、路基边坡等研究。E-mail: ctzhangkunbiao@mail.scut.edu.cn。

Mechanism of reinforcement of squeezed branch piles for deep soft foundation based on load bearing capacities

ZHANG Kunbiao¹, WANG Yimin¹, CHEN Yekai¹, QIU Shen², YI Hao³, ZENG Zhaoyu²

(1. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China; 2. Guangdong

Communication Planning & Design Institute Group Company, Guangzhou 510440, China; 3. Guangdong Transportation Construction

Engineering Quality Inspection Center, Guangzhou 510420, China)

Abstract: To address the layout of squeezed branch (SB) piles in deep soft soil, a 3D numerical model is established based on the single pile static load tests on the SB pile application project in Shantou soft soil area. The load sharing characteristics and the branch-soil interaction mechanism are investigated during the settlement development. The results show that the load sharing ratio at the pile tip of the SB piles that do not penetrate through deep soft foundation is 19.6%, significantly lower than that of straight piles. The group efficiency η_g of the SB piles is correlated to the number of piles N and pile spacing S_p , with an optimal spacing of $8d$ recommended for the SB piles in deep soft soil regions. The tip of branch, particularly the lower branch, can transfer a considerable load to the surrounding soil under the ultimate settlement conditions. The inter-branch spacing S_b affects the load bearing of piles by altering the properties of soil stratum of branches.

Key words: squeezed branch pile; bearing characteristic; numerical simulation; load transfer; treatment of soft foundation

0 引 言

桩基础作为地基处理的重要手段, 在软土地基的加固中发挥着重要的作用。然而, 软土地基的不良特性要求地基加固桩打穿软土地层以满足承载和沉降要求, 容易造成桩长过大, 施工难度大等问题。挤扩支盘桩是通过挤扩设备在桩身不同的截面处扩大桩径、形成支盘结构的桩型, 作为一种纵向变截面异形桩开始应用于软土地基并取得良好的处置效果^[1-2]。

目前对支盘桩的竖向承载特性已有广泛研究, 包括现场测试^[2,4]、室内试验^[1,3]及数值模拟^[4-5], 这些研究证实了挤扩支盘桩在软土地区的应用潜力。但是, 关于支盘桩在沉降过程中支盘-土体相互作用规律, 以

及桩基内部各个部位的承载传递与分担机制的讨论并不充分, 支盘桩多桩协同承载的研究报道更是鲜见。此外, 当深厚软土地基中发育有砂层等硬质夹层时, 如何利用硬质夹层为支盘桩地基提供更大的承载能力, 实现安全经济的目标, 也具有研究的迫切性和必要性。

为了查明挤扩支盘桩加固深厚软基作用机理和加固效果, 本文以广东汕头某市政跨线桥支盘桩应用项目为工程背景, 结合现场试验和数值模拟, 研究了支

基金项目: 2021 年度交通运输行业重点科技项目 (2021-MS1-022)

收稿日期: 2024-06-21

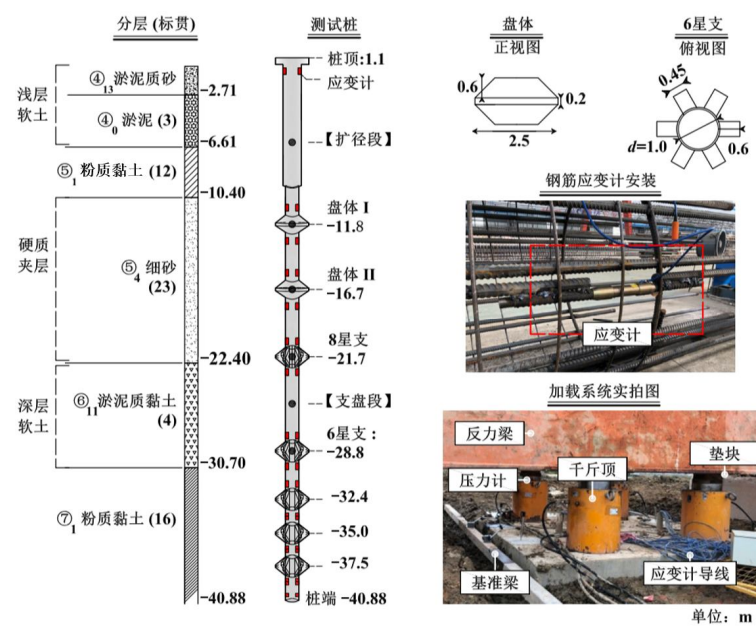


图 1 支盘桩单桩静载试验图

Fig. 1 Diagram of a single squeezed branch (SB) pile load tests

盘桩加固深厚软基的荷载分担和承载特性，为挤扩支盘桩应用于深厚软土地基加固工程提供参考。

1 工程地质概况

1.1 应用项目地质条件

汕头市某市政跨线桥^[2]场地位于韩江东线出海口。场地地基以流塑—可塑的黏性软弱土为主，由于软土双层结构的埋藏分布特征，深层软土层底高程达到-30.3 m。支盘桩用作桥梁桩基，通过在硬质砂层中设置支盘结构，达到设计的承载力要求。

1.2 支盘桩单桩静载试验

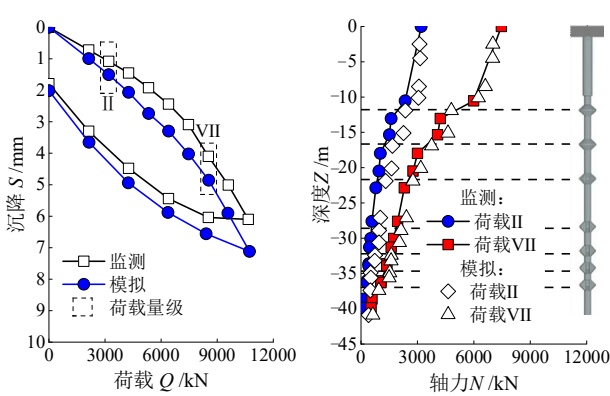
单桩静载试验采用慢速维持荷载法，桩顶施加 2 倍设计荷载 10662 kN。支盘桩桩长为 42.0 m，桩体分为扩径段和非扩径段，主桩桩径 d 依次为 1.4 m 和 1.0 m，沿桩体自上而下布置 2 组承力盘、5 组分支，支盘结构直径 D 为 2.5 m。试验在桩顶安装了 4 组位移计，在桩身布置了 36 组应变计，如图 1 所示。

图 2 为挤扩支盘桩单桩静载试验结果，由图 2(a) 可知，在达到 2 倍设计荷载时，桩顶沉降为 6.10 mm 且卸载回弹率达到 70.7%；图 2(b) 显示桩身轴力曲线在盘体 I 和盘体 II 位置产生骤降，表明顶部盘体分担了桩顶荷载，致使桩体轴力降低，下部分支结构上下端轴力变化较小，分支结构的承载能力并未充分利用。

2 数值模拟模型建立与验证

2.1 模型边界及网格划分

采用 PLAXIS3D 软件，构建了考虑支盘桩局部变桩径特性的三维数值模型，如图 3 所示。模型水平尺



(a) 荷载 Q -沉降 S 曲线 (b) 桩身轴力曲线

图 2 挤扩支盘桩单桩静载试验结果及模型验证

Fig. 2 Results and validations of single SB pile static load tests 寸取为桩径的 20 倍为消除边界效应， x 轴和 y 轴的范围为 $-20.0 \sim 20.0$ m；桩端下部土体取为 0.5 倍桩长， z 轴的范围为 $1.1 \sim -61.9$ m。数值模型四周界面限制水平位移，底部界面同时限制水平和竖直方向位移。

2.2 模型参数

模型地基中的两层软弱土层采用软土模型。土层刚度指标依据地质钻孔数据计算^[2, 6]，土体强度指标等依据汕头地区研究成果^[2, 7-8]确定，具体的有限元计算参数见表 1。桩体及加载桩帽采用线弹性模型，设定弹性模量 E 为 30 GPa 和泊松比 ν 为 0.2，设置接触界面实现桩-土相互作用。

2.3 模型校验

模拟结果与现场监测数据^[2]的对比展示于图 2。模拟的荷载-沉降曲线最终沉降为 7.12 mm，在加卸载过程中的整体趋势与监测结果一致。此外，在不同荷

表 1 有限元计算土体参数
Table 1 Soil parameters for finite element calculations

参数	耕填土	④ ₁ 淤泥质砂	④ ₀ 淤泥	⑤ ₁ 粉质黏土	⑤ ₄ 细砂	⑥ ₁₁ 淤泥质黏土	⑦ ₁ 粉质黏土	参考文献
本构模型	HS	SS	SS	HS	HS	SS	HS	[6]
$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	16.95	15.85	15.08	18	18.5	17.2	17.78	[2]
e_0	0.74	1.15	1.55	0.68	0.52	1.2	0.58	
$E_{s0}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	6.5			18.8	32		26.7	
$E_{\text{odf}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	6.5	$\lambda^*=0.036$	$\lambda^*=0.085$	18.8	32	$\lambda^*=0.045$	26.7	[2], [6]
$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	29.4	$\kappa^*=0.007$	$\kappa^*=0.017$	73.3	105	$\kappa^*=0.009$	112	
c'/kPa	10	3	4	14	2	6	13	
$\varphi'/(^{\circ})$	26	24	18	26	32	21	28	[2], [7]

注: HS 为硬化土模型; SS 为软土模型; γ 为重度; E_{s0}^{ref} 为参考切线模量; $E_{\text{odf}}^{\text{ref}}$ 为参考割线模量; $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 为参考卸载再加载模量; λ^* 和 κ^* 分别为修正压缩指数和修正回弹指数; c' 为有效黏聚力; φ' 为有效内摩擦角。

载水平下,模拟的桩身轴力分布与现场试验结果相符,证实了数值模型及所用土层参数设置的合理性。

表 2 设计工况及参数一览表

Table 2 Overview of simulated conditions and parameter values

工况	桩体数目 N	桩间距 S_p	直径比 ζ	盘净距 S_b
桩数系列	2, 4, 6, 9	$8d$	2.5	$8d, 14d$
桩间距系列	4, 9	$5d, 6.5d, 8d, 9.5d, 11d$	2.5	$11d$
直径比系列	4	$6.5d$	2.0, 3.0	$8d, 14d$

图4展示了直孔桩和支盘桩两种4桩体系的荷载-沉降曲线对比。支盘桩桩身响应计入了支盘的承载,其通过桩顶和桩端做差求得,鉴于两种桩型的极限承载力 Q_u 存在差异,各级荷载 Q_i 通过 Q_u 归一化处理。

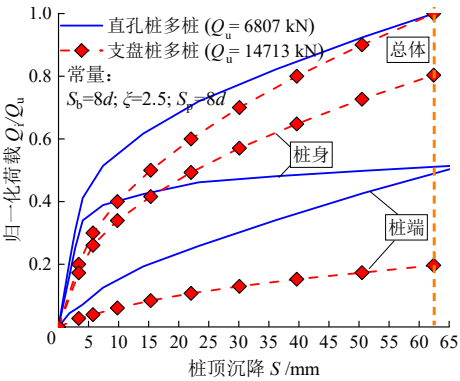


图 4 2×2 直孔桩与支盘桩的归一化荷载沉降曲线对比
Fig. 4 Comparison of normalized load settlement curves between 2×2 straight piles and SB piles

图 4 揭示了支盘桩多桩和直孔桩多桩在荷载传递的差异。支盘桩桩端响应显著低于直孔桩,而桩身响应则相对较高。当沉降达到 62.5 mm,支盘桩端 Q_u/Q_i 等于 19.6%,显著低于直孔桩的 51.2%,意味着同等沉降下直孔桩的桩端下卧层将承受更大的附加应力。

图 5 对比了极限状态下两种桩基在桩端的沉降云图。直孔桩仅在桩端位置产生了较大的沉降,而支盘桩则在盘体和桩端位置均引发了较大的沉降。支盘桩

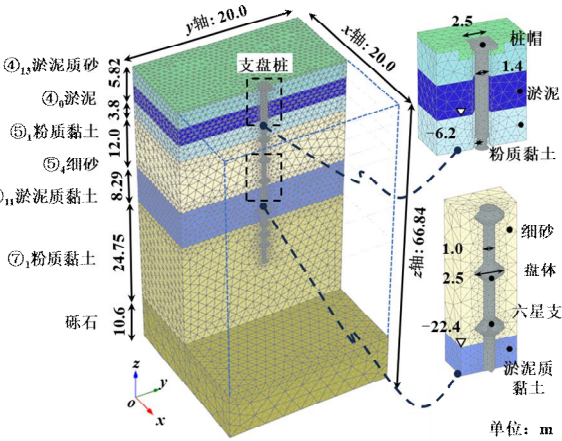


图 3 支盘桩荷载试验的几何及网格划分

Fig. 3 Geometry and mesh of load tests on SB piles

2.4 模拟工况

为了阐明深厚软土地基中未贯穿的支盘桩多桩承载特性,本文调整数值模型中的支盘桩尺寸:模型中支盘桩桩长由 40.8 m 减少至 16.3 m,主桩直径 d 设置为 0.5 m;单根支盘桩配备两组承力盘,下盘固定在 -12.3 m 高程,上盘的位置则根据盘净距 S_b 调整。桩帽设置于桩顶,其厚度和间隙取为 1.1 m 和 0.2 m。

表 2 展示了挤扩支盘桩多桩工况,桩体数目 N 和桩间距 S_p 是研究传统群桩承载特性的重要参数;直径比 ζ 和盘净距 S_b 则体现了支盘桩变截面的几何特性,参考应用经验和现行规范^[3-5]设计了各类工况的布桩形式。在支盘承载特性评估中,本文采用 5% D 沉降作为极限状态的判定标准,这一准则参考了螺旋桩群桩^[10]将 5% D 沉降对应的荷载视为极限值,并考虑构筑物桩基总体沉降不宜超过 100 mm 的安全要求^[9]。

3 承载特性计算分析

3.1 荷载-沉降响应

沉降最值出现在盘体位置，其桩端位置处的沉降值低于直孔桩。此外，支盘桩激发的土体沉降场范围更广，印证了支盘桩多桩的轴向承载行为与直孔桩存在显著的差异。因此，在深厚软土地基中，采用“短桩长”的支盘桩多桩承载体系，能更有效地利用硬质土层的承载能力，减轻桩端应力积聚，有助于控制沉降。

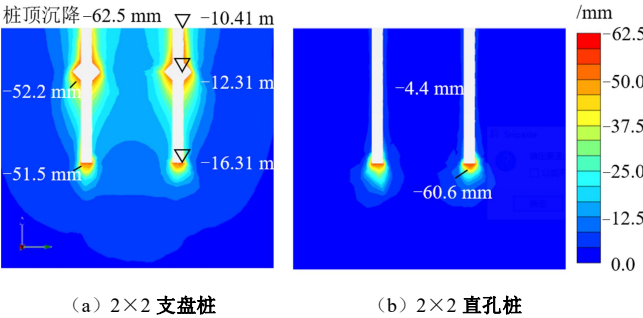


图 5 62.5 mm 沉降对应的桩端附近土体沉降云图
Fig. 5 Settlement contours of soil element near pile tip
corresponding to settlement 62.5 mm

3.2 群桩效应的参数分析

群桩效应系数 η_g 反映了桩基相互作用导致的单桩承载力降低的现象。图 6 呈现了 η_g 与 N 的变化趋势，随着支盘桩数目的增加， η_g 逐渐减小且降低速率也放缓。同时，研究引入了表 3 中的群桩效应系数 η_g 经验公式，并比较经验计算与数值结果。经验公式求得的基本趋势与数值模拟相同，验证了数值方法的合理性。同时，经验公式计算的 η_g 范围在 0.98~0.89，低于数值模拟值，这一差异是由于经验式未能考虑支盘结构对于群桩效应的具体影响。

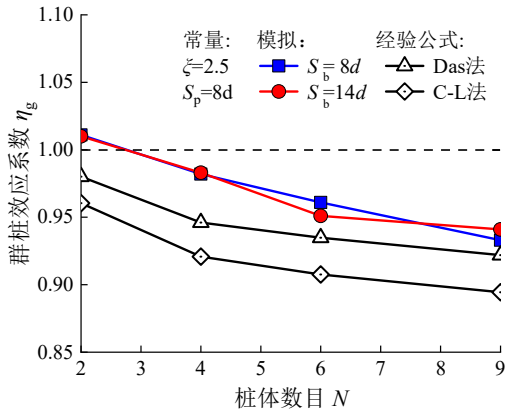


图 6 群桩效率系数 η_g 随桩体数目 N 变化
Fig. 6 Variation of η_g with number of piles N

图 7 显示了支盘桩桩间距 S_p 与群桩效应系数 η_g 的关系。从图 7 中数据可见， η_g 随 S_p 增加而逐渐提升，但增长逐渐放缓，并在 $S_p=8d$ 时趋于稳定。因此，在深厚软土地基，推荐将 $S_p=8d$ 作为支盘桩多桩布置的最优桩间距，以平衡承载效率和工程经济性。

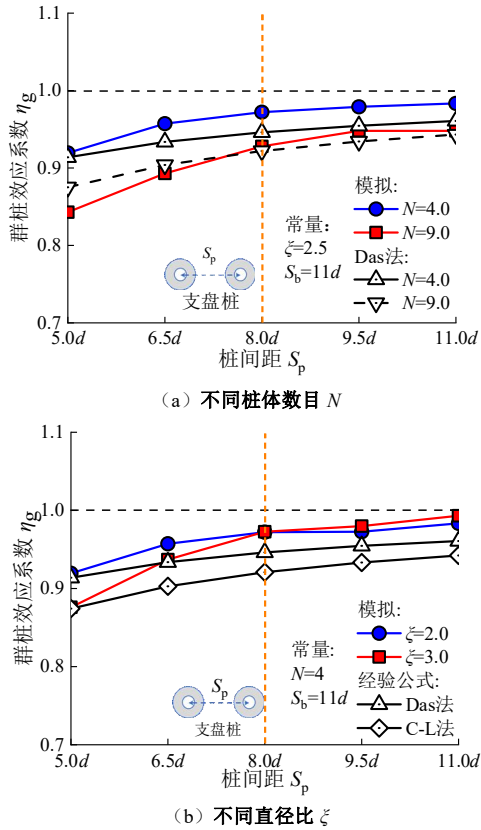


图 7 群桩效率系数 η_g 随桩间距 S_p 变化
Fig. 7 Variation of η_g with pile spacing S_p

综合图 6 和图 7 可知，Das 法较 C-L 法更准确地估算群桩效率系数 η_g ，但当直径比 ξ 越大、桩体数目 N 越多时，支盘结构相互作用将更显著，因而这导致 Das 法估算 η_g 的准确性下降，研究认为仍有必要建立起计入支盘结构的支盘桩群桩效应系数的经验公式，如表 1。

表 3 估算群桩效率系数的经验公式

Table 3 Empirical formulae for estimating group efficiency η_g	
公式	参考
$\eta_g = 1 - \frac{\arctan(d / S_p)}{90^\circ} \times \left[\frac{(n-1)m + (m-1)n}{mn} \right]$	C-L 法 ^[10]
$\eta_g = 1 - \frac{d}{\pi S_p mn} \times [m(n-1) + n(m-1) + \sqrt{2(m-1)(n-1)}]$	Das 法 ^[10]

注： m 和 n 为多桩的行数和列数。

3.3 支盘结构力学响应

沉降发展过程中桩体的抗力形成与桩体周边土体中局部剪切变化过程紧密相连。图 8 对比了不同直径比 ξ 和盘净距 S_b 的支盘桩承力盘的土体单元剪应力 τ_s 的发展情况。当相对沉降达到 $0.1S_{\max}$ ，不同位置的特征点的 τ_s 表现出变化趋势的差异：位于盘顶的特征点 (A, E) 出现了的软化现象，位于盘端的特征点 (C,

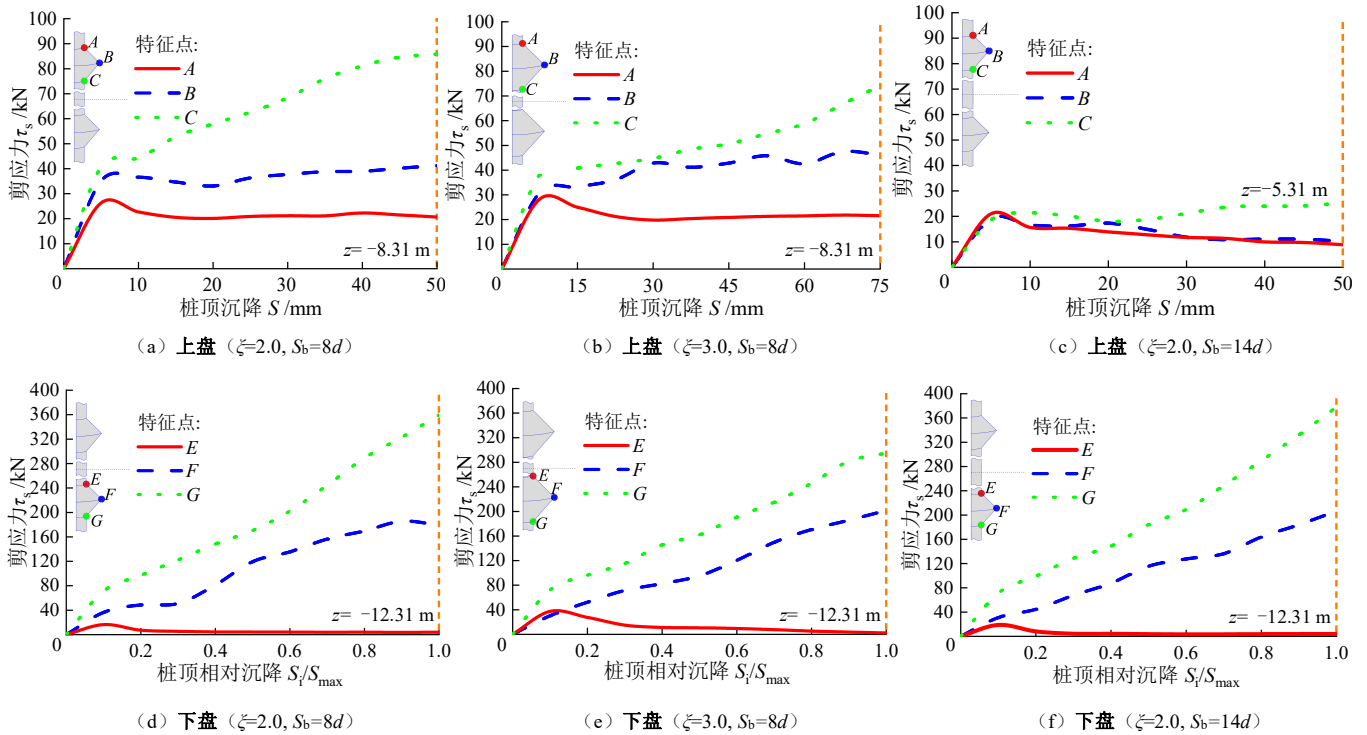
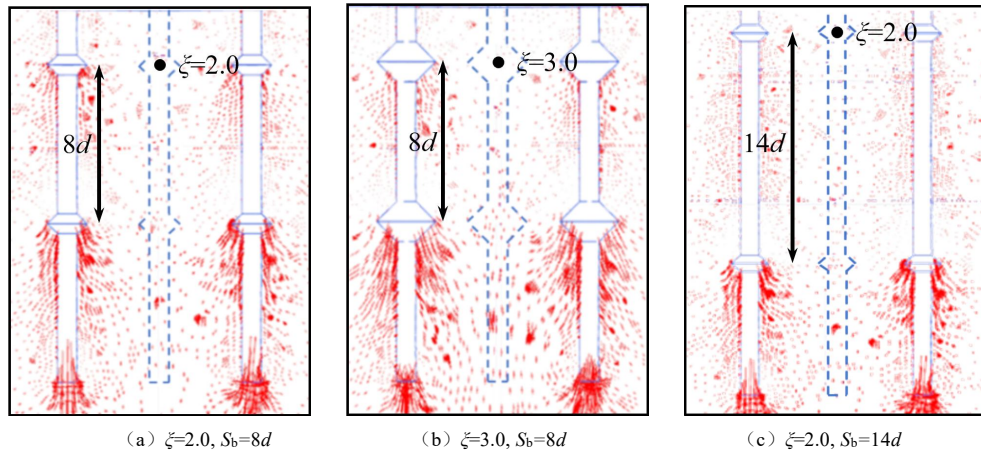
图 8 支盘结构周边剪应力 τ_s 变化Fig. 8 Variation of shear stress τ_s along branch structures

图 9 支盘范围的有效主应力矢量图

Fig. 9 Diagram of effective principal stress within branches

G) 则表现为加强现象。上下盘的剪应力发展规律存在差异, 上盘特征点 B 的剪应力发展与盘顶特征点 A 一致, 而下盘特征点 F 与盘端特征点 G 一致, 反映了支盘结构相对位置对于其承载特性的影响。

增大直径比 ξ 并未改变盘端作为承载支点的功能, 对比图 8 可知, 盘端特征点 C 和 G 仍产生了最大的剪应力 τ_s 。同时, 大盘净距 $S_b=14d$ 情况下, 顶盘特征点 C 的剪应力值降低至 28.9 kPa, 其原因可归结为盘体持力土层的刚度差异。因此, 在深厚软土地基中采用支盘桩加固时, 地质勘察的重要性不容忽视, 应确保承力盘盘端的土层条件良好。

图 9 输出了 2×2 支盘桩多桩中两组直径比工况中

支盘范围的盘间土体有效应力矢量图。由图 9 可知, 上盘周边土体的有效主应力簇是显著疏于下盘的, 且主应力簇主要集中于盘端位置, 这是与剪应力 τ_s 变化规律相一致的。此外, 增大直径比有效主应力矢量将更大范围地向下盘结构积聚, 而增大盘净距顶盘周边土体的有效应力簇并未向盘体积聚, 其盘间桩身的有效主应力分布状态与直孔桩的分布规律相似。

4 结 论

(1) 未贯穿深厚软土地基的支盘桩多桩承载时, 设置支盘结构的桩身承担了主要负荷, 极限状态下桩端荷载分担比低于直孔桩。因此, 挤扩支盘桩是合适

作为短桩加固深厚软土地基,其承载特性有效降低了桩端荷载集中导致的破坏风险。

(2) 在 $(5\sim 11)d$ 的桩间距 S_p 范围内,未贯穿深厚软土层的支盘桩群桩效应系数 η_g 介于 $1.02\sim 0.83$ 之间。该系数随着桩体数目 N 的增大而降低,随着桩间距 S_p 增大而升高,推荐桩间距 $8d$ 以优化支盘桩承载性能。

(3) 盘体的承载能力与位置、持力土层的性质相关,深厚软土地基中下部盘体相较于上部盘体能更好地发挥承载作用。增大支盘结构的直径比 ξ 并未改变荷载传递规律,而盘净距 S_b 通过改变盘端土体的性质影响桩基的承载性能,软弱地层的承力盘其周边土体力学响应与直孔桩桩身相近,应优先确保下盘端地层条件的良好。

参考文献:

- [1] 李国维,赵星宇,张黎明,等.支盘桩加固既有填砂路基深层软土的模型试验研究[J].岩土工程学报,2024,46(8): 1768-1775. (LI Guowei, ZHAO Xingyu, ZHANG Liming, et al. Model experiment on deep soft ground improvement of existing sand-filled subgrade with squeezed branch piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(8): 1768-1775. (in Chinese))
- [2] 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): 78-86. (in Chinese))
- [3] XIONG L, LI G W, ZHOU Y, et al. Experimental and analytical investigation of the bearing capacity of bulbs for squeezed branch pile[J]. International Journal of Geomechanics, 2023, 23(5): 04023045.
- [4] LI T, PENG X, YANG G Q. Investigation into bearing performance of concrete expanded-plates piles: field test and numerical modelling[J]. Engineering Structures, 2022, 271: 114954.
- [5] ZHANG M X, XU P, CUI W J, et al. Bearing behavior and failure mechanism of squeezed branch piles[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2018, 10(5): 935-946.
- [6] BRINKGREVE R, ENGIN E, SWOLFS W. PLAXIS 3D user manual[S]. Delft, The Netherlands: PLAXIS Bv, 2020.
- [7] 李国维,余彦杰,熊力,等.陀螺桩垫层加强袋装砂井排水地基现场试验[J].岩土工程学报,2021,43(3): 425-431. (LI Guowei, YU Yanjie, XIONG Li, et al. Field tests on top-shaped concrete block cushion-reinforced soft soil foundation drained with sand bag well[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(3): 425-431. (in Chinese))
- [8] ALWALAN M, ALNUIAM A. Axial loading effect on the behavior of large helical pile groups in sandy soil[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2022, 47: 5017-5031.
- [9] CRISP M P, JAKSA M B, KUO Y L. Toward a generalized guideline to inform optimal site investigations for pile foundation[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2020, 57(8): 1119-1129.
- [10] ATEŞ B, ŞADOĞLU E. Experimental investigation for group efficiency of driven piles embedded in cohesionless soil[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2023, 27(12): 5123-5134.

(编校:明经平)