

文章编号: 1007-2993(2026)05-0747-08

饱和黏性土地引孔深度对管桩施工 参数及承载性状的影响分析

盛志强^{1,2,3,4,5} 朱肇京^{1,2,3,4} 任鑫健^{1,2,3,4} 孟佳晖^{1,2,3,4}
林 黎^{1,2,3,4,5} 秋仁东^{1,2,3,4} 朱春明^{1,2,3,4}

(1. 建筑安全与环境国家重点实验室, 北京 100013; 2. 国家建筑工程技术研究中心, 北京 100013; 3. 中国建筑科学研究院有限公司地基基础研究所, 北京 100013; 4. 建研地基基础工程有限责任公司, 北京 100013;
5. 建研院检测中心有限公司, 北京 100013)

【摘要】 以饱和黏性土地为背景, 通过对比不同引孔深度(3.0, 4.5, 6.0 m)下预制管桩(桩长为 9.0 m)的施工参数及单桩静载试验结果, 系统分析了引孔深度对沉桩工艺、土塞效应及承载性能的影响。研究表明: (1) 静压沉桩工艺中, 引孔深度小于 1/2 桩长时, 不同引孔深度的管桩终压力变化较小, 在引孔深度达桩长 2/3(6.0 m)时终压力显著降低; 锤击沉桩工艺中, 引孔深度范围内锤击数显著减少, 在引孔深度达桩长 2/3(6.0 m)时, 最后 80 cm 的锤击数明显减少; (2) 引孔深度增加导致静压沉桩土塞长度减小, 而锤击沉桩土塞长度整体增大, 引孔更易促使土体填充锤击工艺的管桩空芯; (3) 单桩承载力随引孔深度增加呈下降趋势; 引孔深度小于桩长 1/2 时, 主要削弱桩侧阻力; 引孔深度达桩长 2/3 时, 桩侧与桩端阻力均显著降低; (4) 试验所得单桩竖向抗压承载力特征值与终压力之比的平均值为 0.293, 接近于《静压预制混凝土桩基础技术规程》(DBJ/T 15—94—2013) 4.3.3 条给出的下限值(0.30), 表明在饱和黏性土引孔条件下, 仍可采用终压力估算承载力, 当无地区经验时, 可将安全系数在规范取值基础上提高 11%~26%; (5) 综合施工可行性与承载力损失控制, 建议饱和黏性土地管桩引孔深度宜控制在 0.4~0.5 倍桩长范围内, 此时既可削弱挤土效应, 又能降低承载力的损失。研究成果为饱和黏性土地中管桩引孔工艺的设计与施工提供了参考。

【关键词】 引孔深度; 锤击沉桩; 静压沉桩; 土塞效应; 承载力; 挤土效应

【中图分类号】 TU473

【文献标识码】 A

doi: 10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2025-0228

Influence of pilot hole depth on construction parameters and bearing behavior of pipe piles in saturated clay sites

SHENG Zhiqiang^{1,2,3,4,5} ZHU Zhaojing^{1,2,3,4} REN Xinjian^{1,2,3,4} MENG Jiahui^{1,2,3,4}
LIN Li^{1,2,3,4,5} QIU Rendong^{1,2,3,4} ZHU Chunming^{1,2,3,4}

(1. State Key Laboratory of Building Safety and Built Environment, Beijing 100013, China; 2. National Engineering Research Center of Building Technology, Beijing 100013, China; 3. Institute of Foundation Engineering, China Academy of Building Research, Beijing 100013, China; 4. CABR Foundation Engineering Co., Ltd., Beijing 100013, China; 5. CABR Testing Center Co., Ltd., Beijing 100013, China)

【Abstract】 Taking the saturated clay site as the background, the influence of pilot hole depth on pile installation, soil plugging effect, and bearing performance was systematically analyzed by comparing the construction parameters and single pile static load test results of prefabricated pipe piles (pile length of 9.0 m) with different pilot hole depths (3.0, 4.5, 6.0 m). Key findings include: (1) For jacked pile installation, the final pressure showed minimal variation when pilot hole depths were less than half the pile length (4.5 m), but significantly reduced at two-thirds pile length (6.0 m). In hammer-driven piles, the blow count decreased substantially with pilot hole depth, particularly for the final 80 cm penetration at 6.0 m depth. (2) Increasing pilot hole depth reduced soil plug length in jacked piles but increased it in hammer-driven piles, indicating greater soil intrusion into pile cavities during dynamic installation. (3) The ultimate bearing capacity of single piles decreased with pilot hole depth. Shaft resistance dominated capacity reduction at depths 4.5 m,

作者简介: 盛志强, 男, 1987 年生, 博士, 高级工程师, 主要从事地基基础工程技术方面的研究工作。E-mail: sheng123zq@163.com

通信作者: 朱肇京, 男, 1997 年生, 大学本科, 助理工程师, 主要从事地基基础方面的研究工作。E-mail: 1121839796@qq.com

while both shaft and tip resistances significantly diminished at 6.0 m depth. (4) The experimental ratio of the characteristic vertical compressive bearing capacity to the final jacking force averaged 0.293, approaching the lower bound of 0.30 stipulated in Clause 4.3.3 of the Technical Specification for Static Pressing Precast Concrete Pile Foundations (DBJ/T 15—94—2013). This indicates that the bearing capacity can still be estimated from the final pressure under pilot-hole conditions in saturated clay. In the absence of regional experience, the safety factor should be amplified by 11%~26% relative to the code value. (5) Considering both construction feasibility and bearing-capacity loss control, the pilot hole depth for pipe piles in saturated clay sites is recommended to be 0.4~0.5 times the pile length, which effectively mitigates extrusion effects while limiting capacity reduction. These findings provide a reliable reference for the design and construction of pilot hole techniques for pipe piles in saturated clay strata.

【Key words】 pilot hole depth; hammer-driven pile; static pressure pile; soil plugging effect; bearing capacity; extrusion effects

0 引言

预制管桩因施工便捷、经济高效而被广泛应用于软土地区高层建筑及桥梁基础等工程^[1-3]。然而,在饱和黏性土地,直接沉桩会产生显著挤土效应,诱发超静孔隙水压力积聚,导致邻桩上浮、地面隆起及邻近构筑物开裂^[4-6]。为缓解上述问题,引孔(预钻孔)工艺通过预先卸土、卸压降低沉桩阻力及挤土效应,已成为饱和黏性土地预制管桩施工的重要技术措施^[7-9]。

国内外学者围绕引孔深度对管桩施工与承载性状的影响开展了大量研究。White 等^[10]通过离心模型试验发现,当引孔深度超过 0.5 倍桩长时,桩侧摩阻力降低可达 20%。孟黎^[11]探讨了引孔静压桩的有效桩长、引孔设计方法和极限承载力的算法,并发现运用圆孔扩张理论对引孔静压桩的内孔径向压力与塑性区半径进行计算时, Mohr-Coulomb 材料模型与 Tresca 材料模型孔扩张引起的塑性区半径与孔内壁的压力都会随着初始孔径的增大而降低。魏丽敏等^[12]采用 CEL 法对静压管桩进行模拟,通过分析桩周土体位移发现预钻孔的深度越大,静压桩的挤土效应越小,且隔离桩可以大大减小挤土效应。雷华阳等^[13]通过采用孔压计与测斜计对管桩沉桩过程的数据进行收集并结合数值模拟发现,沉桩过程中土体水平与竖向位移随桩径的增大而增大,在满足承载力及稳定性的情况下直径 400 mm 的管桩可以有效减小挤土效应。然而,上述研究多集中于单一沉桩工艺,缺乏不同工艺条件下引孔深度—施工参数—承载力三者关系的系统对比;另外,既有成果对黏性土中“土塞—桩—土”相互作用机制及承载力预测方法仍未形成统一认识^[14-17]。此外,《静压预制混凝土桩基础技术规程》(DBJ/T 15—94—2013)^[18]虽给出终压力与承载力经验关系,但针对引孔工况的适用性尚待验证。

针对上述不足,本文以某工程案例为背景,选取典型饱和黏性土地,开展 3.0, 4.5, 6.0 m 三种引孔

深度下桩长为 9.0 m 的开口管桩的沉桩对比试验与单桩静载试验,综合分析了引孔深度对静压与锤击两种工艺施工参数、土塞效应及单桩承载性状的影响,并探讨了终压力推算承载力的可靠性。研究成果可为饱和黏性土地管桩基础优化设计、施工质量控制与承载力评价提供理论依据与技术支撑。

1 试验概况

试验管桩型号为 PST 400 60-9 薄壁管桩,外径 400 mm,壁厚 60 mm,桩长 9.0 m,桩端开口。采用锤击沉桩和静压沉桩两种工艺,引孔孔径为 300 mm,引孔深度分别设置为 3.0, 4.5, 6.0 m。桩身范围内地层自上而下依次为填土和粉质黏土,设计要求静载试验最大加载量不小于 480 kN。依据《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)^[19],计算得到单桩竖向抗压极限承载力为 665 kN。试验桩平面位置见图 1,试验场地地层信息及设计参数见图 2。最小桩间距为 1800 mm,试验桩位置相对集中,且试验场地地基土的水平成层较均匀,可不考虑地层分布的微小差异带来的影响。

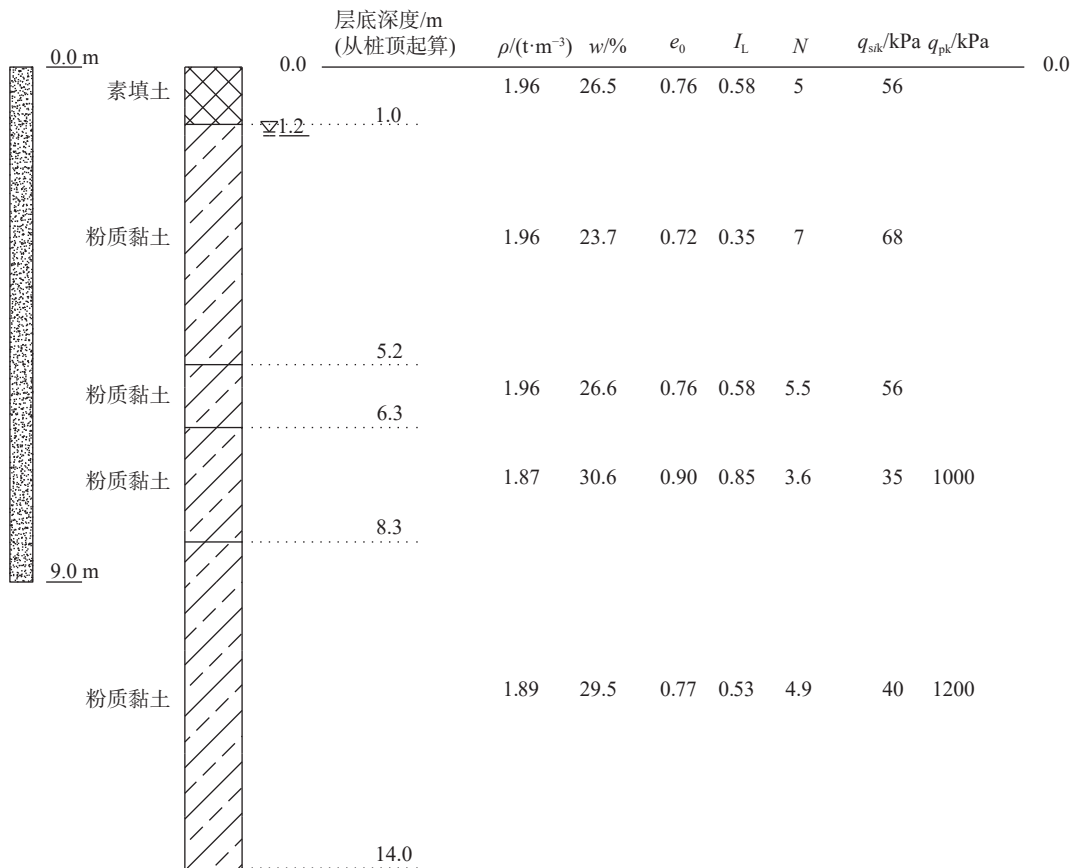
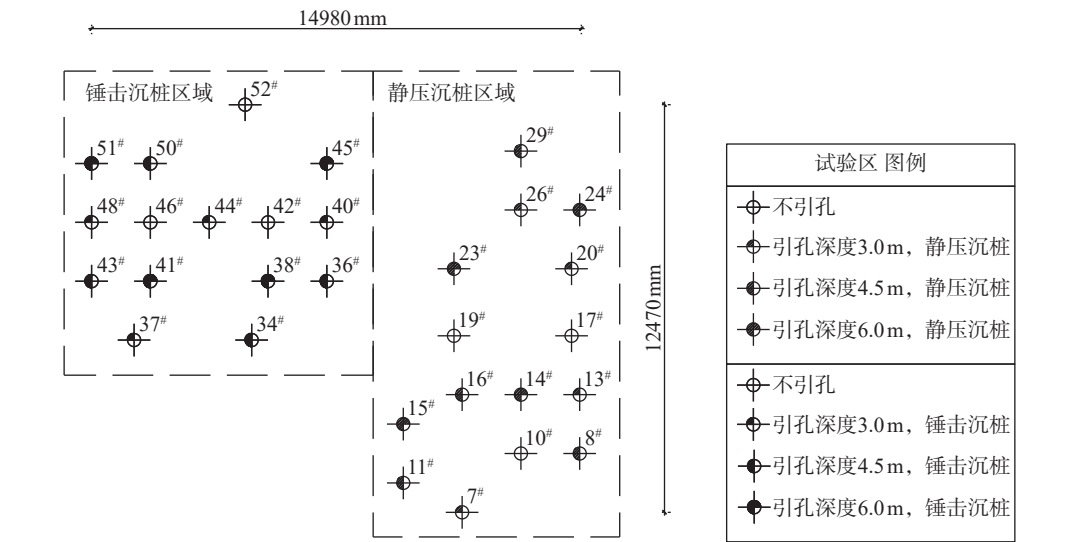
2 引孔深度对沉桩工艺参数的影响

统计沉桩的工艺参数如表 1、图 3、图 4 所示。对于锤击沉桩,主要是锤击数和收锤标准;对于静压沉桩,因压桩过程中压桩力变化很小,基本等于终压力,仅列出终压力。

对于静压沉桩工艺,与不引孔工况相比,引孔深度 3.0, 4.5 m 工况下的终压力变化较小,在引孔深度 6.0 m 时则表现出相对明显的差异,终压力有一定程度的降低。对于锤击沉桩工艺,在引孔深度范围内锤击数明显降低;对比最后 80 cm 的锤击数,其数值离散性偏大,但在引孔深度 6.0 m 时,同样呈现出降低的趋势。

3 引孔深度对土塞高度的影响

表 2、图 5、图 6 统计了不同引孔深度试验桩的土塞高度,对比分析后发现:在不引孔的情况下,静压



沉桩和锤击沉桩工艺的试验桩的土塞长度基本相等;当采取引孔措施时,两种沉桩工艺的试验桩的土塞高度表现不同;随着引孔深度的增加,静压沉桩工艺试验桩的土塞长度在减小,而锤击沉桩工艺试验桩的土塞长度数值存在较大偏差,但整体上大于不引孔时的

土塞长度。对于锤击沉桩工艺,引孔使地基土在沉桩过程中更容易填充管桩空芯,而对于静压沉桩工艺,则相反。

4 引孔深度对单桩承载力的影响

单桩竖向抗压静载试验的最大加载量为 480 kN,

表 1 试验桩施工参数表
Tab. 1 Construction parameters of test piles

引孔深度/m	静压沉桩		锤击沉桩					
	桩号	终压力/kN	桩号	总锤击数	锤击数(0 ~ 3.0 m)	锤击数(0 ~ 4.5 m)	锤击数(0 ~ 6.0 m)	最后 80 cm 锤击数
不引孔	10	780	42	132	7	18	32	34
	17	680	46	118	5	15	28	28
	19	754	52	143	5	17	30	33
3.0	7	754	40	98	5			31
	13	680	37	101	4			28
	20	754	48	83	5			25
	26	680	44	124	2			27
4.5	8	680	36	108		4		35
	16	740	43	127		3		31
	11	680	50	89		5		26
	29	740	34	114		5		28
6.0	14	600	45	92			13	32
	15	628	51	105			3	24
	23	660	41	81			5	20
	24	650	38	70			10	16

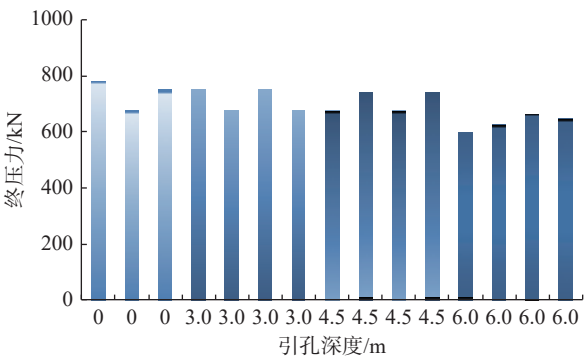


图 3 引孔深度与终压力
Fig. 3 Pilot hole depth & final pressure

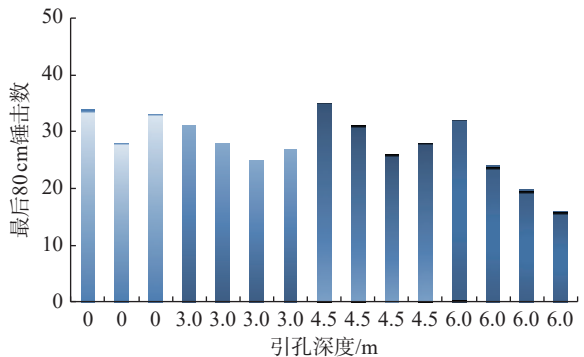


图 4 引孔深度与最后 80 cm 的锤击数
Fig. 4 Pilot hole depth & blow count in the final 80 cm

单级加载量为 48 kN, 第一次加载量为两级荷载^[20], 试验结果见图 7、图 8、表 3。对于相同引孔深度的

表 2 引孔深度与土塞高度
Tab. 2 Pilot hole depth & soil plug height

引孔深度/m	桩号	终压力/kN	土塞长度/m	桩号	总锤击数	土塞长度/m
不引孔	10	780	1.44	42	132	1.41
	17	680	1.55	46	118	1.44
	19	754	1.39	52	143	1.36
3.0	7	754	1.53	40	98	2.17
	13	680	1.55	37	101	2.12
	20	754	1.37	48	83	2.23
	26	680	1.46	44	124	2.01
4.5	8	680	1.23	36	108	1.75
	16	740	1.36	43	127	2.00
	11	680	1.21	50	89	1.41
	29	740	1.33	34	114	1.88
6.0	14	600	0.85	45	92	2.14
	15	628	0.81	51	105	2.51
	23	660	0.74	41	81	2.27
	24	650	0.92	38	70	1.77

管桩, 不同沉桩工艺对单桩竖向抗压承载力的影响较小; 随着引孔深度的增加, 单桩竖向抗压极限承载力呈减小趋势; 相同荷载作用下, 引孔深度为 3.0 m 的管桩的桩顶沉降最小。

桩长较短, 桩端土为黏性土, 非硬层, 试验所得

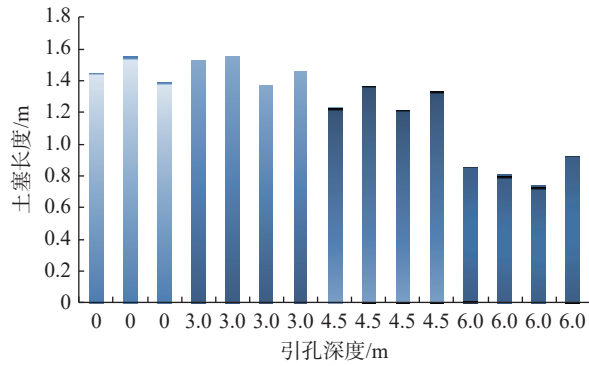


图5 引孔深度与土塞高度(静压沉桩工艺)
Fig. 5 Pilot hole depth & soil plug height (jacked pile installation)

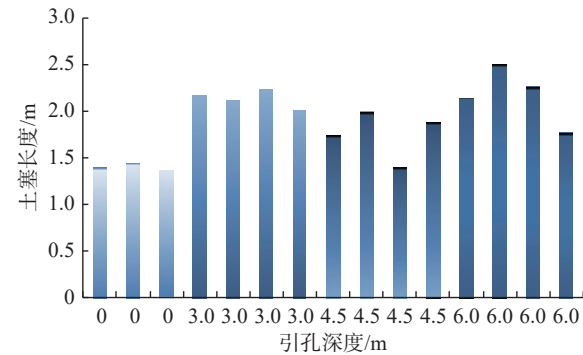


图6 引孔深度与土塞高度(锤击沉桩工艺)
Fig. 6 Pilot hole depth & soil plug height (hammer-driven pile installation)

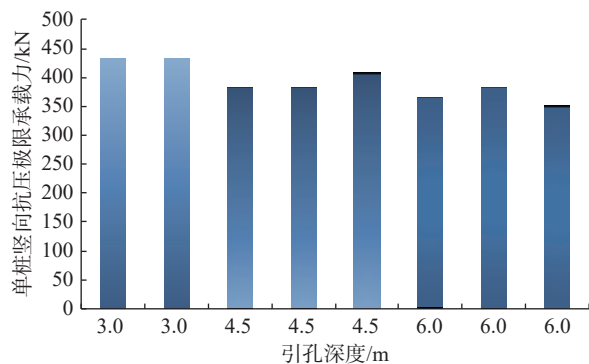


图7 引孔深度与单桩竖向抗压极限承载力
Fig. 7 Pilot hole depth & ultimate vertical compressive bearing capacity of single pile

$Q-s$ 曲线表现出中小桩的受力特征,即当荷载超过桩侧摩阻力极限时,桩顶沉降陡然增加, $Q-s$ 曲线几乎垂直向下延伸。试验中陡降时桩顶荷载仅比陡降前一级荷载增加 10 kN 左右,在桩顶沉降超过 40 mm 后结束试验。可认为,陡降前一级荷载已达到极限荷载,桩侧阻力和桩端阻力已发挥到极限。

如图 9 所示,以 $s-\log Q$ 曲线表示静载试验结果,并将 $s-\log Q$ 曲线尾段首个折线段的起始点^[21] 记作 $\log Q_u^*, s_u^*$,再找出后续相邻的次级荷载,记作 $\log Q_m, s_m$,以上两点的割线斜率做直线与 $s-\log Q$ 横坐标

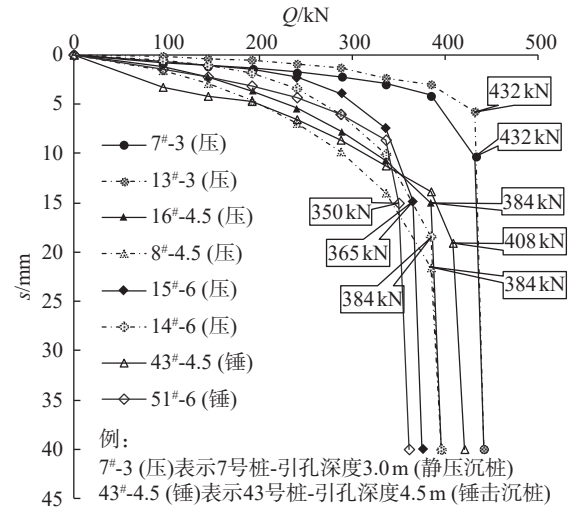


图8 $Q-s$ 曲线
Fig. 8 $Q-s$ curve

表3 单桩竖向抗压极限承载力与对应桩顶沉降
Tab. 3 Ultimate vertical compressive bearing capacity of single pile and corresponding pile head settlement

沉桩工艺	引孔深度/m	桩号	陡降前一级荷载(极限承载力)/kN	对应沉降/mm
静压	3.0	7	432	10.30
	3.0	13	432	5.71
	4.5	16	384	15.00
	4.5	8	384	21.52
	6.0	15	365	14.79
	6.0	14	384	18.44
锤击	4.5	43	408	19.04
	6.0	51	350	15.07

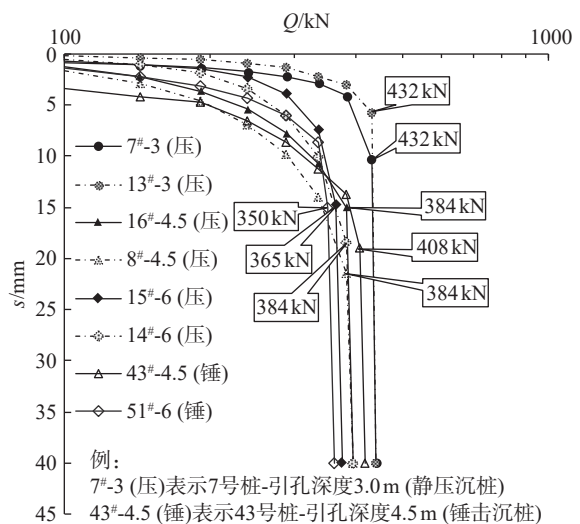


图9 $\log Q-s$ 曲线
Fig. 9 $\log Q-s$ curve

相交确定桩侧阻力和桩端阻力。经比较,试验桩 7#, 13#, 15#, 43#, 51#符合上述曲线特征要求(见表 4 带有

下划线的数值),得到相应的桩侧阻力和桩端阻力,见表5。随着引孔深度的增加,侧阻与端阻的极限值在整体上有一定程度的降低;对比引孔深度为3.0 m和4.5 m的试验数据,两者的极限端阻差别较小,后者的极限侧阻小于前者;在引孔深度为6.0 m时,侧阻和端阻的极限值均有所下降。可以得出,在引孔深

度小于桩长的1/2时,引孔措施主要削弱桩侧阻力;在引孔深度达到桩长的2/3时,引孔措施对桩侧阻力和桩端阻力均有削弱。综合施工可行性与承载力损失控制,建议饱和黏性土地管桩引孔深度宜控制在0.4~0.5倍桩长范围内,此时既可削弱挤土效应,又能降低承载力的损失。

表4 Δs/Δlog Q比值
Tab. 4 Δs/Δlog Q ratio

7 [#] -3.0(压)			13 [#] -3.0(压)		16 [#] -4.5(压)		8 [#] -4.5(压)		15 [#] -6.0(压)		14 [#] -6.0(压)		43 [#] -4.5(锤)		51 [#] -6.0(锤)	
Q/kN	s/mm	Δ/Δ	s/mm	Δ/Δ	s/mm	Δ/Δ	s/mm	Δ/Δ	s/mm	Δ/Δ	s/mm	Δ/Δ	s/mm	Δ/Δ	s/mm	Δ/Δ
96	0.81		0.13		1.22		1.64		0.63		0.54		3.32		1.39	
144	1.08	1.53	0.35	1.25	2.22	5.68	2.92	7.27	1.08	2.56	1.02	2.73	4.16	4.77	2.23	4.77
192	1.38	2.40	0.58	1.84	3.65	11.45	4.63	13.69	1.46	3.04	1.83	6.48	4.73	4.56	3.13	7.20
240	1.73	3.61	0.97	4.02	5.41	18.16	7.00	24.46	2.28	8.46	3.43	16.51	6.55	18.78	4.38	12.90
288	2.21	6.06	1.33	4.55	7.76	29.68	9.86	36.12	3.89	20.33	6.00	32.46	8.67	26.77	6.05	21.09
336	2.89	10.16	2.31	14.64	10.70	43.92	14.02	62.14	7.46	<u>53.33</u>	10.10	61.24	11.24	38.39	8.63	<u>38.54</u>
350															15.07	<u>363.25</u>
365									14.79	<u>203.87</u>						
384	4.11	<u>21.04</u>	2.99	<u>11.73</u>	15.00	74.15	21.52	129.33			18.44	143.81	13.81	<u>44.32</u>		
408													19.04	<u>198.64</u>		
432	10.30	<u>121.01</u>	5.71	<u>53.17</u>												

注: Δ/Δ列表示Δs/Δlog Q; 7[#]-3.0(压)表示7号桩-引孔深度3.0 m(静压沉桩), 43[#]-4.5(锤)表示43号桩-引孔深度4.5 m(锤击沉桩), 余同。

表5 桩侧阻与端阻极限值
Tab. 5 Ultimate values of shaft resistance and tip resistance

引孔深度/m	桩号	成桩工艺	极限侧阻/kN	极限端阻/kN
3.0	7 [#]	静压	355	77
	13 [#]	静压	339	93
4.5	43 [#]	锤击	326	82
6.0	15 [#]	静压	309	56
	51 [#]	锤击	319	31

5 终压力与单桩承载力的关系

对比分析了终压力与单桩承载力的关系,见表6。依据《静压预制混凝土桩基础技术规程》(DBJ/T 15—94—2013)4.3.3条第5款,当桩长在6.0~9.0 m时, $R_a=(0.30\sim0.40)P_{ze}$ 。本次试验所得单桩竖向抗压承载力特征值与终压力之比的平均值为0.293,接近规程下限值0.30,表明在饱和黏性土引孔条件下,仍可采用终压力估算承载力。基于t分布对试验数据按95%保证率进行推定,得到置信区间为0.269~0.317,与上述规程给出的区间值(0.30~0.40)进行比较,当无地区经验时,对于单桩承载力的估算,

可将安全系数在规范取值基础上提高11%~26%。

表6 终压力与单桩竖向抗压承载力特征值的关系
Tab. 6 Relationship between final pressure and characteristic value of single pile vertical compressive bearing capacity

桩号	P_{ze} /kN	Q_u /kN	R_u /kN	R_u/P_{ze}
7	754	432	216	0.286
13	680	432	216	0.318
8	680	384	192	0.282
16	740	384	192	0.259
14	600	384	192	0.320
15	628	365	182.5	0.291

注: Q_u 为单桩竖向抗压承载力极限值; R_u 为单桩竖向抗压承载力特征值; P_{ze} 为终压力。

6 结论

通过对比不同引孔深度(3.0, 4.5, 6.0 m)下预制管桩(桩长为9.0 m)的施工参数及单桩静载试验结果,揭示了在饱和黏性土地中引孔深度对预制管桩施工参数与承载性能的影响,主要结论如下:

(1)对于静压沉桩工艺,在引孔深度小于桩长的1/2时,不同引孔深度的终压力(压桩力)差别较小,在

引孔深度达到桩长的 $2/3$ 时, 终压力(压桩力)有一定程度的降低。对于锤击沉桩工艺, 引孔深度范围内的锤击数明显降低; 对比最后 80 cm 的锤击数, 数值离散性偏大, 但在引孔深度达到桩长的 $2/3$ (6.0 m) 时, 同样呈现出降低的趋势。

(2) 随着引孔深度的增加, 静压沉桩工艺的桩端土塞长度在减小, 锤击沉桩工艺的桩端土塞长度数值存在较大偏差, 但整体上大于不引孔时的土塞长度。对于锤击沉桩工艺, 使地基土在沉桩过程中更容易填充管桩空芯; 而对于静压沉桩工艺, 则相反。

(3) 随着引孔深度的增加, 单桩竖向抗压极限承载力呈减小趋势。在引孔深度小于桩长的 $1/2$ 时, 引孔措施主要削弱桩侧阻力; 在引孔深度达到桩长的 $2/3$ 时, 引孔措施对桩侧阻力和桩端阻力均有削弱。

(4) 本次试验所得单桩竖向抗压承载力特征值与终压力之比的平均值为 0.293, 接近于《静压预制混凝土桩基础技术规程》(DBJ/T 15—94—2013) 4.3.3 条第 5 款给出的下限值 0.30, 表明在饱和黏性土引孔条件下, 仍可采用终压力估算承载力, 当无地区经验时, 可将安全系数在规范取值基础上提高 11% ~ 26%。

(5) 综合施工可行性与承载力损失控制, 建议饱和黏性土地管桩引孔深度宜控制在 $0.4 \sim 0.5$ 倍桩长范围内, 此时既可削弱挤土效应, 又能减少承载力的损失。

参 考 文 献

- [1] 曹锦楼. 饱和黏土中静压沉桩特性与数值模拟 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2020. (CAO J L. Characteristics and numerical simulation of jacked pile driving in saturated clay[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2020. (in Chinese))
- [2] 张晓衡. 软土地区静压桩设置及挤土效应分析 [D]. 汕头: 汕头大学, 2009. (ZHANG X H. Analysis for the setting and compacting effect of jacked pile in soft clay[D]. Shantou: Shantou University, 2009. (in Chinese))
- [3] 张鸿辉. 温州深厚软土地层预制管桩施工的挤土效应研究 [D]. 温州: 温州大学, 2023. (ZHANG H H. Research on compression effect of prefabricated pipe pile construction in deep soft soil layer of Wenzhou[D]. Wenzhou: Wenzhou University, 2023. (in Chinese))
- [4] SAGASETA C, WHITTLE A J, SANTAGATA M. Deformation analysis of shallow penetration in clay[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1997, 21(10): 687-719.
- [5] MATSUMOTO T, TAKEI M. Effects of soil plug on behaviour of driven pipe piles[J]. *Soils and Foundations*, 1991, 31(2): 14-34.
- [6] 邵 帅. 预应力混凝土管桩在软土地基中应用研究 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2012. (SHAO S. Study of prestressed concrete pipe pile in the soft soil foundation[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2012. (in Chinese))
- [7] 陈园卿. 减少沉桩挤土的工程措施研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2005. (CHEN Y Q. The study on engineering measures for reducing unfavorable soil squeezing effect due to pile-sinking[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005. (in Chinese))
- [8] 罗嗣海, 侯龙清, 胡中雄, 等. 预钻孔孔径对部分挤土桩挤土效应的影响研究 [J]. *岩土力学*, 2002, 23(2): 222-224. (LUO S H, HOU L Q, HU Z X, et al. Study on the influence of the diameter of pre-driven borehole on soil-displacement effect of partly soil-displaced piles[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2002, 23(2): 222-224. (in Chinese))
- [9] YU H S, CARTER J P. Rigorous similarity solutions for cavity expansion in cohesive-frictional soils[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2002, 2(2): 233-258.
- [10] WHITE D J, TAKE W A, BOLTON M D. Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry[J]. *Géotechnique*, 2003, 53(7): 619-631.
- [11] 孟 黎. 引孔静压桩承载力特性研究 [D]. 保定: 河北大学, 2014. (MENG L. A research on bearing behavior of guiding-hole static pressure pile[D]. Baoding: Hebei University, 2014. (in Chinese))
- [12] 魏丽敏, 李双龙, 杜 猛, 等. 基于 CEL 法的静压管桩挤土效应数值分析 [J]. *华南理工大学学报 (自然科学版)*, 2021, 49(4): 28-38. (WEI L M, LI S L, DU M, et al. Numerical analysis on squeezing effect of jacked pipe pile based on CEL method[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2021, 49(4): 28-38. (in Chinese))
- [13] 雷华阳, 李 肖, 陆培毅, 等. 管桩挤土效应的现场试验和数值模拟 [J]. *岩土力学*, 2012, 33(4): 1006-1012. (LEI H Y, LI X, LU P Y, et al. Field test and numerical simulation of squeezing effect of pipe pile[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(4): 1006-1012. (in Chinese))
- [14] 李立辰, 刘 卓, 刘 浩, 等. 考虑土塞效应的开口管桩沉桩与承载全过程离散元分析 [J]. *岩土工程学报*, 2024, 46(7): 1471-1480. (LI L C, LIU Z, LIU H, et al. DEM analysis of installation and bearing process of open-ended piles considering plugging effects[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2024, 46(7): 1471-

1480. (in Chinese))
- [15] 任志成. 超长超大直径管桩土塞效应及设计参数优化研究 [D]. 济南: 山东建筑大学, 2024. (REN Z C. Study on soil plug effect and design parameter optimization of super-long and super-large diameter pipe pile[D]. Ji'nan: Shandong Jianzhu University, 2024. (in Chinese))
- [16] 陈志波, 陈 峰, 翁 洋, 等. 考虑土塞效应的大直径钢管桩竖向承载力计算方法 [J]. *岩土力学*, 2025, 46(7): 2224-2236. (CHEN Z B, CHEN F, WENG Y, et al. Calculation method for vertical bearing capacity of large-diameter steel pipe piles considering the soil plugging effect[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2025, 46(7): 2224-2236. (in Chinese))
- [17] 陈 乔, 陈志波, 曾旭明, 等. 考虑土塞效应的大直径PHC管桩竖向承载特性 [J]. *水利与建筑工程学报*, 2022, 20(5): 131-136. (CHEN Q, CHEN Z B, ZENG X M, et al. Vertical bearing characteristics of large diameter PHC pipe pile considering plugging effects[J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2022, 20(5): 131-136. (in Chinese))
- [18] 广东省住房和城乡建设厅. 静压预制混凝土桩基础技术规范: DBJ/T 15—94—2013[S]. 北京: 中国城市出版社, 2013. (Guangdong Provincial Department of Housing and Urban Rural Development. Specification for static pressing precasted concrete pile foundation: DBJ/T 15—94—2013[S]. Beijing: China City Press, 2013. (in Chinese))
- [19] 中华人民共和国建设部. 建筑桩基技术规范: JGJ 94—2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008. (Ministry of Construction of the People's Republic of China. Technical code for building pile foundations: JGJ 94—2008[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008. (in Chinese))
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑基桩检测技术规范: JGJ 106—2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for testing of building foundation piles: JGJ 106—2014[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese))
- [21] 周爱其, 张 弭, 叶剑华. 改进 $s\text{-log } Q$ 法在基桩静载荷试验分析中的应用 [J]. *城市勘测*, 2006(2): 64-66. (ZHOU A Q, ZHANG M, YE J H. Application of Improved $s\text{-log } Q$ method in the analyze of static load test for piles[J]. *Urban Geotechnical Investigation & Surveying*, 2006(2): 64-66. (in Chinese))

收稿日期: 2025-05-27