

滚压成型灌注螺纹桩承载性能研究

徐学燕, 于琳琳, 刘复孝

(哈尔滨工业大学 土木工程学院, 哈尔滨 150090)

摘要:采用静载荷试验及数值计算相结合的方法进行了螺纹桩承载性能的研究。分析了螺齿宽度、螺距等桩型参数对螺纹桩承载性能的影响, 对外径相同的直径桩与螺纹桩的承载性能进行了静载荷对比试验研究。螺纹桩单桩极限承载力较相同桩外径的直型桩极限承载力稍高, 螺齿宽度对螺纹桩的极限承载力影响非常明显, 随螺齿宽度的增加螺纹桩的极限承载力增大; 螺距对极限承载力影响也较为明显, 随螺距的减小, 螺纹桩的极限承载力增大。螺纹桩在低荷载水平下, 桩侧阻力沿桩身均匀发挥, 桩端阻力较小, 随荷载水平的增大, 桩端阻力大幅提高, 并提出螺纹桩承载力的计算公式。

关键词:滚压成型灌注螺纹桩; 静载荷试验; 承载力; 桩型参数

中图分类号: TU473.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2011)03-0019-06

Bearing Capacity Behavior of Roll Forming Filling Screw Pile

XU Xue-yan, YU Lin-lin, LIU Fu-xiao

(School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, P. R. China)

Abstract: Bearing capacity behavior of roll forming filling screw pile (screw pile for short) is investigated through numerical calculation and static load test. The influence of pile-type parameters, such as width of thread tooth and thread pitch, on the ultimate bearing capacity of crew pile is studied; furthermore, the bearing capacity behavior of screw pile and that of pile with the same diameter are compared and analyzed through static load test. The results show that the ultimate bearing capacity of screw pile is a bit higher than that of pile with the same outside diameter; width of thread tooth has a distinct effect on ultimate bearing capacity which increases with the increment of width of thread tooth. When the screw pile is tested under light load, the resistance on pile side is distributed along screw pile, and tip resistance is small, but the resistance rises considerably with load increasing. Besides, the design formula of bearing capacity of screw pile is proposed.

Key words: roll forming filling screw pile; static load test; bearing capacity; pile-type parameters

滚压成型灌注螺纹桩(简称螺纹桩)是一种特殊的异型桩,以其单桩承载力高、节省工程材料、施工时无需护壁等优点,是一种值得在工程中推广的新型桩基础形式^[1-3]。螺纹桩综合了长螺旋灌注桩和钢纤维混凝土全螺纹预制桩的优点^[4-5],因螺纹钻杆螺牙间的泥土取代了部分混凝土,同桩径同桩长螺纹桩混凝土用量只有传统光面圆柱桩的60%~70%^[6-9]。尽管螺纹桩已经应用于工程中,但是对该桩的研究还很不成熟^[10-11]。当土体达到破坏极限时,显然2个螺齿之间的土体也接近破坏,此时桩侧阻力不再以侧摩阻力为主,螺齿之间的土体被挤压

剪切破坏^[12-14],因此针对这一问题本文主要进行如下方面的研究:利用ABAQUS对螺纹桩承载力性能进行模拟,对不同桩型设计参数结果进行比较,以得出合理的桩型设计参数,并与静载荷试验进行比较,根据螺纹桩现场静载荷试验数据、有限元模拟分析提出螺纹桩桩竖向承载力的计算公式和计算参数。

1 竖向荷载下螺纹桩承载性能分析

1.1 模型的建立

螺纹桩的模型尺寸与试验桩相同,模型如图1

收稿日期:2010-11-18

基金项目:国家自然科学基金项目(40571032);铁道部科技开发计划项目(2006G001-B-3)

作者简介:徐学燕(1946-),女,教授,博士生导师,主要从事岩土工程、冻土工程方面的研究,(Email)lubote_2008@163.com。

所示。模型中桩体混凝土材料的弹性模量高于土体几个数量级,桩体的应变相对于土体是非常微小的,因此在研究过程中将桩身钢筋混凝土材料视为弹性材料。由于工程采用的是 C35 混凝土,故桩体材料也采用此种混凝土,其参数参见《混凝土结构设计规范》(GB 50010-2002)。桩周土体的材料特性采用 Mohr-Coulomb 本构模型,根据工程地质资料,有限元模拟的参数选取如下,桩周土体材料参数:考虑土体的初始地应力并结合工程勘察资料,取土体密度为:1.9 g/cm³。土体材料塑性特征:土体的内摩擦角 $\varphi=14^\circ$,膨胀角取为 0° 。土体材料的硬化特征:土的粘聚力 $C=22$ kPa,塑性应变值取 0。径向计算域:取土体的径向尺寸为螺纹桩径向尺寸的 10 倍;轴向计算域:在竖向荷载作用下,桩底土体受影响的深度与桩径、土的性质有关,根据工程经验影响范围在 15~20 d 以内,该文取 15 d^[15]。

1.2 桩身轴力分析

桩身应力应变如图 2 所示,可知:桩身的应力随着深度的增加而不断减少,减少的部分正是桩侧阻力以及桩周螺纹齿挤压土体而提供的反力,桩顶应力最大,桩身的应力正是桩身轴力的体现。桩周螺纹齿挤压其下面的土体时,螺纹齿由外边缘向内应力不断增加。从图 2 可见桩端部应变最大的地方发生在桩的最下端螺齿与桩身的连接点处。

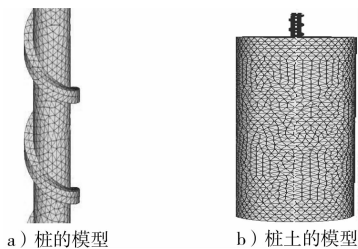


图 1 模型图

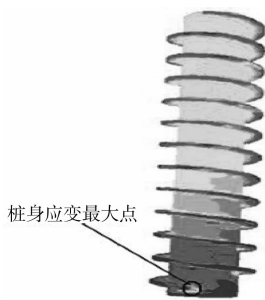


图 2 桩身应力应变图

沿桩身轴力的分析:在荷载为 1 004.8 kN 的低荷载水平时,桩身轴力沿桩深分布曲线如图 3 所示。

由低荷载水平的曲线可以看出,螺纹桩在外荷载作用下桩顶轴力最大,随着深度的增大,桩身的轴力不断减小。桩底端轴力约为 100 kN,占桩顶荷载总量的 1/10,桩端的应力为 0.7~0.9 MPa 之间,此

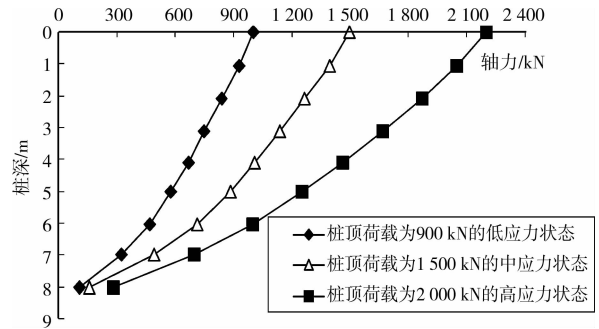


图 3 桩身轴力沿桩深分布曲线

处的应力由桩端土体反力提供。如图 3 所示,随着荷载水平的不断提高,当桩顶施加 1 500 kN 时,螺纹桩的桩侧阻力及桩端阻力同时在增大,在桩身为 5~8 m 处螺纹桩承载力接近整桩承载力的 50%,桩端阻力较低荷载水平下也有所增加,桩端阻力约为 160 kN,约占整桩承载力的 1/9。随荷载水平继续增大,当桩顶荷载为 2 200 kN 时,此时桩顶位移为 44.99 mm,即达到了位移极限。此时桩端阻力约为 280 kN,桩端阻力约占总荷载的 1/8,即桩端应力达到了 2 MPa,桩端土体达到了承载力特征值。由以上分析可知,螺纹桩在低荷载水平下,桩侧阻力沿桩身均匀发挥,桩端阻力较小,随荷载水平的增大,桩端阻力大幅提高,桩侧阻力从桩端处开始大幅提高。桩端土体在高应力水平下发生较大的压缩变形,桩体发生较大的沉降位移,此时桩顶位移达到了沉降极限,即荷载达到了极限荷载。

2 桩型设计

主要针对螺纹桩的螺齿厚度、螺齿宽度、螺齿间距以及螺纹桩内外直径进行了研究,螺纹桩模型如图 4 所示。

2.1 螺齿厚度的设计

螺齿主要是将竖向荷载传递给齿底端面土体,以此来增加桩侧的阻力,提高桩的极限承载力。

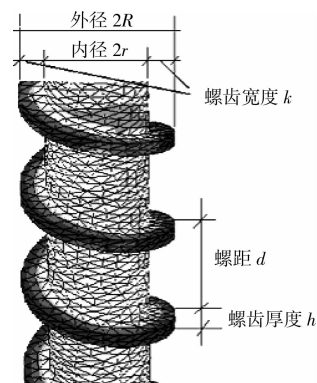


图 4 螺纹桩的几何参数图

螺齿的厚度主要根据螺齿的宽度来选择其尺寸,并且保证螺齿在传力过程中能正常工作。利用

宽厚比进行螺齿厚度的确定。螺齿的宽厚比应满足式(1):

$$k/h \leq \tan \alpha \quad (1)$$

式中: k 为螺齿宽度, h 为螺齿厚度, α 为刚性基础台阶的宽厚比最小允许值,即 $\alpha=45^\circ$,综合施工以及安全因素在螺纹桩型设计时适宜取: $k/h=1$ 。

2.2 螺齿宽度的设计

螺齿宽度是影响螺纹桩承载力性能的最重要因素之一,数值计算螺纹桩的桩型参数如表1。

表1 螺纹桩桩型参数表

桩型	内径/mm	螺距/mm	宽厚比	桩长/m	螺齿宽度/mm
A1	400	700	1	8	50
A2	400	700	1	8	60
A3	400	700	1	8	70
A4	400	700	1	8	80
A5	400	700	1	8	90
A6	400	700	1	8	100

在分析螺齿宽度对螺纹桩竖向承载力性能影响的同时,计算了桩径为400 mm、560 mm的直型桩的极限承载力,以此与螺纹桩承载力性能进行比较,结果见图5。

由图5中 $P-S$ 曲线可见,螺齿宽度对螺纹桩极限承载力影响比较显著,当螺齿宽度为50 mm时(即A1桩型),螺纹桩的竖向极限承载力达1 570 kN,较直径为400 mm的直型桩的极限承载力提高了20%;当螺纹桩螺齿宽度80 mm时(即内径为400 mm、外径为560 mm的螺纹桩),其极限承载力达2 150 kN,而同外径的直型桩极限承载力为1 950 kN,其极限承载力较同外径的直型桩提高10%。

当螺齿宽度为100 mm时,螺纹桩的极限承载力达到2 500 kN,可知在其它参数相同条件下,随螺纹桩螺齿宽度的增加,螺纹桩的极限承载力也增大。因此在桩型设计时,螺纹桩齿应尽量增大提高单桩的极限承载力,得到更优的经济指标。

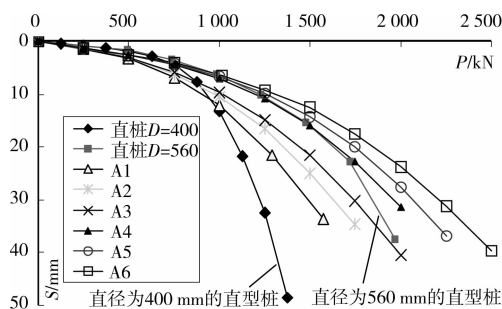


图5 螺齿宽度对螺纹桩竖向极限承载力影响 $P-S$ 曲线

2.3 螺距的设计

螺距的尺寸直接影响着桩的承载力以及桩体材料用量,螺距越大混凝土用量越多,螺距越大混凝土用

量随之减少,但螺纹桩的极限承载力也随之降低。螺距尺寸对螺纹桩极限承载力性能影响计算参数如表2所示。

表2 螺纹桩桩型参数表

桩型	内径/mm	螺齿宽度/k	宽厚壁/(k·h ⁻¹)	桩长/m	螺距/mm
B1	400	80	1	8	500
B2	400	80	1	8	600
B3	400	80	1	8	700
B4	400	80	1	8	800
B5	400	80	1	8	900
B6	400	80	1	8	1 000

在分析螺距尺寸对螺纹桩竖向承载力性能影响的同时,计算了桩径为400 mm、560 mm的直型桩的极限承载力,以此与螺纹桩极限承载力性能进行比较,结果见图6。

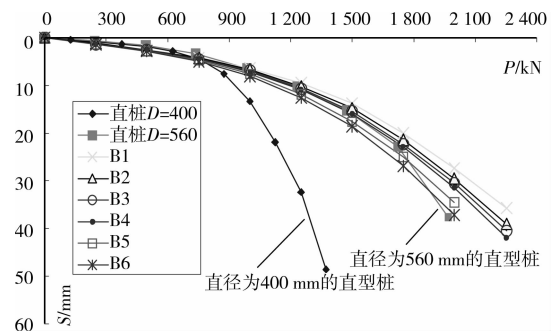


图6 螺距尺寸对螺纹桩极限承载力影响的 $P-S$ 曲线

由图6可见,螺距的尺寸对单桩极限承载力影响不显著,但对沉降位移影响比较明显。数值计算结果表明:桩径560 mm的直型桩与螺纹桩在低应力水平下,位移值相近,直型桩在1 950 kN荷载作用下其位移37.5 mm,而不同螺距尺寸的螺纹桩在2 000 kN荷载作用下其桩顶位移分别为:27.28 mm、29.56 mm、30.49 mm、31.38 mm、34.55 mm、37.25 mm;当螺纹桩桩顶荷载继续增加至2 250 kN时,螺纹桩的沉降位移分别为:35.71 mm、39.02 mm、40.45 mm、42.02 mm。由以上数据可见:桩径为560 mm的直型桩与等外径螺距为1 000 mm的螺纹桩极限承载力相近,随螺距的减小,在相同桩顶荷载作用下,螺纹桩的沉降位移逐渐减小,螺纹桩的承载性能加强。由以上数据可知螺距在500~800 mm时,单桩的极限承载力较大,在设计合理桩型尺寸时螺距在500~800 mm较优,综合考虑施工条件以及经济指标适宜选取螺距为600 mm~700 mm。

2.4 螺纹桩内、外径的设计

螺纹桩的内径首先应满足其自身的安全要求,由于螺纹齿增加了单桩极限承载力,但螺齿对于桩的抗压性能影响较小,因此螺纹桩的设计应重视螺纹桩内径的设计,而且要满足式(2)和式(3)的要求:

对于轴心受压桩:

$$P_{\max} \leq \varphi(A_p f_c + A_s f_y) \quad (2)$$

式中: f_c 为混凝土轴心抗拉强度设计值; A_s 为钢筋面积; f_y 为钢筋抗拉强度设计值; P_{\max} 为等效荷载基本组合时单桩竖向力设计值; φ 为工作条件系数(安全系数); A_p 为桩横截面面积(取内径面积)。

对于轴心抗拉桩:

$$P_{\max} \leq \varphi A_s f_y \quad (3)$$

式中: A_s 为钢筋面积; f_y 为钢筋抗压强度设计值; φ 为工作条件系数(安全系数)。

可以根据以上公式来设计螺纹桩的内径尺寸、配筋及选用的混凝土标号。

3 单桩竖向承载力特征值的确定

3.1 桩端阻力特征值

螺纹桩端受力原理与普通桩相同,螺纹桩承载力公式中仍采用钻孔灌注桩的端承载力特征值:

$$P_d = q_{pk} A_p \quad (4)$$

其中: q_{pk} 为桩端持力层端阻力特征值; A_p 为螺纹桩桩端截面面积, $A_p = \pi r^2$ (r 为桩内径)。

3.2 桩侧阻力特征值

由于螺纹桩桩身有螺齿与土体直接接触,使得桩周土体的破坏机理与普通直型桩截然不同。螺纹桩在竖向荷载作用下,产生竖向位移,因此每周螺齿直接挤压剪切其下土体,使桩周土体承载能力得到了充分的发挥,从而提高了桩的极限承载力。桩周土体对桩螺齿的反力通过螺齿传递给桩体,以平衡上部结构传递下来的荷载。螺纹桩侧承受阻力分为 3 部分:直桩侧阻力、螺齿外侧阻力、螺齿底端阻力。

直桩侧阻力:螺纹桩在受力时,螺齿挤压剪切其下土体,使得土体产生压缩变形,此时螺纹桩直桩段相对于桩周土体有相对移动的趋势,由此产生了直桩段的桩侧阻力,随应力水平的提高,此段土体随螺纹桩同时产生竖向位移,这时直桩侧阻力将发挥到最高值。

螺齿外侧阻力:螺齿外侧阻力相当于普通直型桩的侧阻力,随桩顶竖向荷载的施加,桩体将相对于土体产生竖向相对位移,此时螺齿外侧的土体对螺齿外侧产生侧阻力。

螺齿底端阻力:螺纹桩在竖向荷载作用下,桩体将产生竖向位移,产生竖向位移的过程就是螺齿挤压其下土体的过程,土体受到压缩将有反作用力作

用于螺齿即螺齿端阻力。

不同的桩型参数下的极限承载力曲线如图 7 所示。

通过试验以及有限元数值计算的结果,推荐螺纹桩承载力特征值计算采用公式(5):

$$R_a = q_{pa} A_p + \alpha \sum u_p q_{sia} l_i \quad (5)$$

式中: α 为桩侧阻力放大系数, $\alpha = -0.0044(k^2/d)^2 + 0.126(k^2/d) + 1$, R_a 为单桩竖向承载力特征值; q_{pa} 、 q_{sia} 分别为桩端阻力特征值,第 i 层土桩侧阻力特征值; A_p 为桩底端横截面面积; U_p 为桩身周边长度; l_i 为桩体穿过的第 i 层岩土层的厚度。

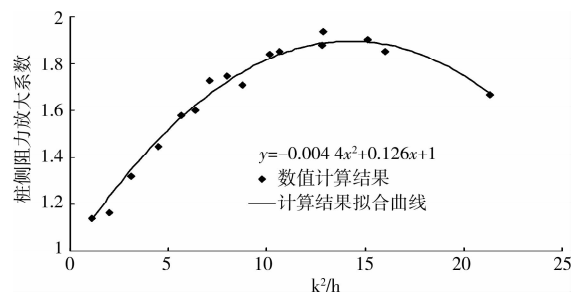


图 7 桩侧阻力系数拟合曲线

4 外径相同直径桩与螺纹桩静载荷试验研究

4.1 试桩内容

现场测试试验根据《建筑桩基检测规范》(JGJ106-2003),试验采用快速维持荷载法,由电动液压千斤顶分级加载。主要试验内容为利用静载荷试验方法测各种桩的极限承载力。

试验现场地质资料包括岩土名称、土质描述以及土的物理力学指标如表 3 和表 4 所示。

表 3 试验场地土层分布

土层编号	岩土名称	土层描述
1	杂填土	杂色由砖块粘土等组成
2	粉质粘土	黄褐色、硬塑
3	粉质粘土	黄褐色、可塑偏硬
4	粉质粘土	黄褐色、可塑偏硬
5	粉质粘土	黄褐色、褐黄色、黄色可塑
6	粉质粘土	黄褐色、可塑偏硬
7	粉质粘土	黄褐色、可塑
8	粉质粘土	黄褐色、可塑偏软
9	粉质粘土	黄褐色、可塑

表 4 土的物理力学指标

层数	层厚/m	含水量 $w/\%$	孔隙比 e	液性指数 IL	压缩模量 ES	内摩擦角 ϕ	$f_{ak}/(\text{kPa})$
1	0.5~3.3						
2	0.4~2.7	19.4	0.630	0.14	6.75	13.0	210
3	0.6~5.9	24.1	0.791	0.51	5.02	19.4	150
4	0.4~4.5	21.6	0.724	0.35	6.30	16.0	170

续表 4

层数	层厚/m	含水量 $w/\%$	孔隙比 e	液性指数 IL	压缩模量 ES	内摩擦角 ϕ	$f_{ak}/(\text{kPa})$
5	0.5~7.3	23.5	0.763	0.51	5.60	11.4	150
6	0.5~3.3	25.8	0.804	0.68	4.56	17.8	135
7	0.7~8.1	23.8	0.744	0.52	5.19	19.5	160
8	0.8~2.7	29.4	0.808	0.81	3.63	15.6	135
9	0.4~7.1	23.2	0.658	0.53	6.67	11.2	170

试验设备如表 5 所示。

表 5 试验设备

设备名称	型号	编号	量程
静载荷测试分析仪	RSM-JC	05045	
千斤顶	QW630	Q01	630 t
位移传感器	MS-50	W01	0~50 mm
	MS-50	W01	0~50 mm

试验桩的具体尺寸如表 6。

表 6 静载荷试验桩情况

桩型	桩长/m	桩径/mm	根数
普通直桩	8	400	3
螺纹桩	8	内 400、外 560	3
普通直桩	8	560	3

4.2 试桩结果

第 1 组试验测试数据如表 7。

表 7 桩径 400 的静载试桩结果表

试验桩号	桩径/mm	桩长/m	极限荷载/kN
S1	400	8	1 200
S2	400	8	1 400
S3	400	8	1 350

3 根试验桩试验在同一试验场地,桩型以及桩体材料均相同,对比 3 根试验桩的试验结果可知,此 3 根试验桩的 $P-S$ 曲线均为陡降型沉降曲线,其承载力极限为陡降前一级荷载,极限承载力均在 1 200 kN~1 400 kN 左右,3 根实验桩的曲线如图 8。

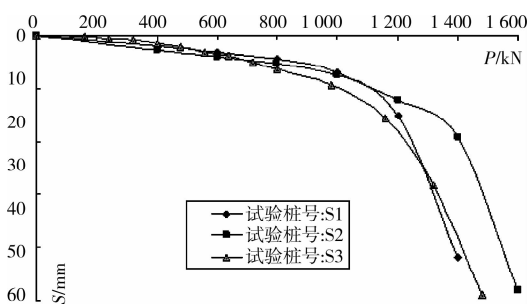


图 8 桩径 400 mm 的静载荷试验 $P-S$ 曲线

第 2 组试验数据如表 8 所示,螺纹桩的测试结果见图 9。

表 8 螺纹桩的静载试桩结果表

试验桩号	桩径/mm	螺距/mm	桩长/m	极限荷载/kN
LW1	内 400、外 560	700	8	2 000
LW2	内 400、外 560	700	8	2 000
LW3	内 400、外 560	700	8	2 200

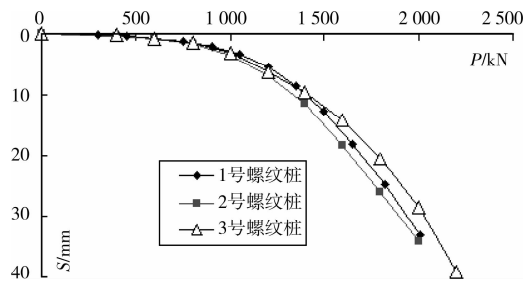


图 9 螺纹桩静载试验 $P-S$ 曲线

由试验结果可见,螺纹桩的 $P-S$ 曲线属于典型的缓变型,通过分析 $P-S$ 曲线可知典型螺纹桩的试桩曲线大体分 3 个阶段:第 1 阶段桩身稍微压缩,与土体紧密接触并与土体产生侧摩阻力,表现为弹性阶段。第 2 阶段以摩阻力不断增加至极限,桩端土层以受挤压变形为主,桩侧土体出现塑性变形,桩端土体表现为弹性。第 3 阶段表现为桩侧土体进入塑性状态,桩端土体受挤压、剪切变形急剧发展,此时桩端土体塑性变形较大,桩沉降量急增。

第 3 组静载试验检测数据如表 9,将该组试验所测得沉降与荷载绘制图 10。

表 9 桩径 560 的试桩结果表

试验桩号	桩径/mm	桩长/m	极限荷载/kN
A1	560	8	2 000
A2	560	8	2 000
A3	560	8	1 800

第 1 组静载荷试验曲线(桩径为 400 mm 的普通直型桩)均为陡降型曲线,此类桩破坏比较明显,属于刺入式破坏,达到承载力极限时桩的位移将突然剧增如图 8;第 2 组静载荷试验曲线(螺纹桩)属于缓变型曲线,此曲线没有明显的拐点,桩的承载力极限根据沉降位移确定如图 9;第 3 组静载荷试验曲线(桩径为 560 mm 的普通直型桩)属于陡降型曲线如图 10,但是其没有第 1 组陡降明显,分析原因是直径大的桩,端截面相对较大刺入式破坏难度较大。

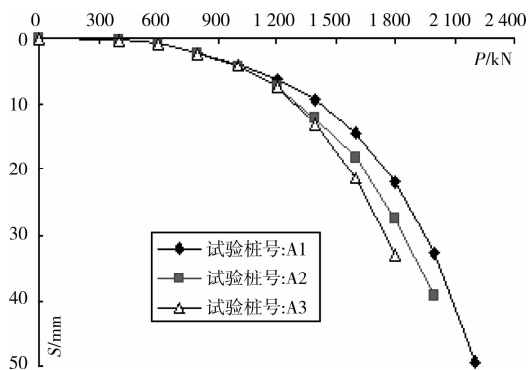


图10 桩径560 mm的静载荷试验P—S曲线

5 结论

1) 螺纹桩在低荷载水平下, 桩侧阻力沿桩身均匀发挥, 桩端阻力较小, 随荷载水平的增大, 桩端阻力大幅提高, 桩侧阻力从桩端处开始大幅提高, 随荷载水平继续增大, 桩端土体在高应力水平下发生较大的压缩变形, 桩体发生较大的沉降位移, 此时桩顶位移达到了沉降极限, 即荷载达到了极限荷载。

2) 螺纹桩单桩极限承载力较相同桩外径的直型桩极限承载力稍高, 螺齿宽度对螺纹桩的极限承载力影响非常明显, 随螺齿宽度的增加螺纹桩的极限承载力增大; 螺距对极限承载力影响也较为明显, 随螺距的减小, 螺纹桩的极限承载力增大。

3) 对数值计算的极限承载力结果进行数理统计, 得出了螺纹桩的竖向极限承载力公式。螺纹桩的极限承载力曲线属于缓变型曲线, 为其极限承载力的确定提供了理论依据。

参考文献:

- [1] WEBB D L. The behavior of bored piles in weathered diabase[J]. *Geotechnique Eng.*, 1976, 26:63-72.
- [2] 方崇, 张信贵, 彭桂皎. 对新型螺杆灌注桩的受力特征与破坏性状的探讨[J]. *岩土工程技术*, 2006, 20(6): 316-319.
FANG CHONG, ZHANG XIN-GUI, PENG GUI-JIAO. Discussion on the bearing force characteristic and the failure behavior of a new kind half-screwed filling pile[J]. *Geotechnical Engineering Technique*, 2006, 20(6): 316-319.
- [3] 王京汉, 黎光明. 螺纹桩桩基承载力静载与高应变检测对比分析[J]. *工程建设*, 2007, 39(1):14-17.
WANG JING-HAN, LI GUANG-MING. Analysis of comparing static loading test with dynamic high strain testing for screw pile foundation [J]. *Engineering construction*, 2007, 39(1):14-17.
- [4] 胡焕校, 刘静, 祝世平. 全螺旋灌注桩单桩极限承载力的预测[J]. *中南大学学报:自然科学版*, 2007, 38(6): 1239-1244.
HU HUAN-XIAO, LIU JING, ZHU SHI-PING. Prediction of single ultimate bearing capacity of screwed casting pile [J]. *J. Cent. South Univ: Science and Technology*, 2007, 38(6): 1239-1244.
- [5] 吴敏, 李波扬. 全螺旋灌注桩——螺旋桩竖向承载力初探[J]. *武汉大学学报:工学版*, 2002, 35(5):109-112.
WU MIN, LI BO-YANG. Primary discussion on vertical load bearing capacity of screwed filling piles[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2002, 35(5):109-112.
- [6] 刘金砺. 装基础设计与计算[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990.
LIU JIN-LI. Design and calculation on pile foundation [M]. Beijing: China, Architecture and Building Press, 1990.
- [7] 李波扬, 吴敏. 一种新型的全螺旋灌注桩——螺旋桩[J]. *建筑结构*, 2004, 34(4):55-57.
LI BO-YANG, WU MIN. A new screwed filling pile-screwed pile[J]. *Building Structure*, 2004, 34(4):55-57.
- [8] RANDOLPH M F, WROTH, C P. Analysis of deformation of vertically loaded piles [J]. *Geotech. Eng.*, 1978, 104(12): 1465-1488.
- [9] GUERRERO S L, VALLEJO L E. Influence of pile shape and pile interaction on the crushable behavior of granular materials around driven piles: DEM analyses [J]. *Granular Matter*, 2007, 9:241-250.
- [10] 赵明华, 李微哲, 单远铭. DX桩抗拔承载力机理及设计计算方法研究[J]. *岩土力学*, 2006, 27(2):199-203.
ZHAO MING-HUA, LI WEI-ZHE, SHAN YUAN-MING. Study on uplift mechanism and calculation of DX pile[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(2): 199-203.
- [11] ZHOU HONG-BO, CHEN ZHUCHANG. Analysis of effect of different construction methods of piles on the end effect on skin friction of piles [J]. *Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China*, 2007, 1(4):458-463.
- [12] 董天文, 梁力, 张成金. 旋入式螺旋桩[J]. *世界桥梁*, 2004(4):73-75.
DONG TIAN-WEN, LIANG LI, ZHANG CHENG-JIN. Screw piles constructed by rotary method [J]. *World Bridges*, 2004(4):73-75.
- [13] 童丽萍, 程海江, 王红心. 素混凝土桩螺旋压灌技术及其应用[J]. *郑州大学学报:自然科学版*. 2001, 33(3): 86-88.
TONG LI-PING, CHENG HAI-JIANG, WANG HONG-XIN. Techniques of spiral pressure and cementation for concrete piles and its application[J]. *Journal of Zhengzhou University:Natural Science Edition*, 2001, 33(3):86-88.
- [14] YUKSEL A, CELIKOGLU Y, CEVIK E, et al. Jet scour around vertical piles and pile groups [J]. *Ocean Engineering*, 2005, 32:349-362.
- [15] HYEONG J K, MISSION J L C, SANG P. Analysis of static axial load capacity of single piles and large diameter shafts using nonlinear load transfer curves[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2007, 11(6):285-292.