

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.03.017

变截面螺纹桩竖向承载特性试验研究

周 杨^{1,3}, 肖世国¹, 徐 骏², 胡亚运¹

(1. 西南交通大学 地质工程系, 四川 成都 610031; 2. 中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610031;

3. 铁道第三勘察设计院集团有限公司, 天津 300142)

摘 要: 变截面螺纹桩是一种新型地基处理桩型。通过室内模型试验和数值模拟, 研究了变截面螺纹桩的竖向承载特性, 比较分析了变截面螺纹桩与普通螺纹直桩和普通圆柱形光面直桩承载特性的差异, 以及螺纹结构参数和地基土体参数对变截面螺纹桩竖向承载能力的影响规律。结果表明, 变截面螺纹桩的螺纹结构及圆台形桩身能大幅度提高侧摩阻力; 相同地层条件下, 变截面螺纹桩桩身材料利用率(极限荷载除以桩身体积)是普通等截面螺纹桩的 1.3 倍左右, 是普通圆柱形光面直桩的 3 倍左右; 变截面螺纹桩的结构参数中, 螺纹宽度、厚度、间距及桩身截面变化率是影响单桩竖向承载力的重要因素, 在工程设计中应予以充分考虑。

关 键 词: 变截面螺纹桩; 模型试验; 数值模拟; 承载力; 螺纹结构参数

中图分类号: TU 473.1+1

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2017)03-0747-09

Model test on vertical bearing capacity of variable cross-section thread piles

ZHOU Yang^{1,3}, XIAO Shi-guo¹, XU Jun², HU Ya-yun¹

(1. Department of Geological Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China; 2. China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd., Chengdu, Sichuan 610031, China; 3. Third Railway Survey and Design Institute Group Corporation, Tianjin 300142, China)

Abstract: Variable cross-section thread pile is a new type of piles applied in ground improvement. The vertical bearing characteristics of variable cross-section thread pile are studied by means of laboratory model test and numerical simulation. The difference of bearing characteristics between variable-section thread piles and ordinary straight piles and plain cylindrical piles is analyzed. And the influence of thread structural parameters and foundation soil parameters on vertical bearing capacity of variable cross-section thread pile is comparatively analyzed. The results show that the thread structure of the variable cross-section thread pile and the round-shaped pile body can greatly improve the side friction. Under the same stratum condition, the material utilization ratio (ultimate load divided by pile body volume) of the variable cross-section thread pile is about 1.3 times that of the ordinary section thread pile, and is about 3 times that of ordinary cylindrical smooth pile. Among the structural parameters of the variable cross-section thread pile, the thread width, thickness, spacing and change rate of pile section are the important factors affecting the vertical bearing capacity of single pile, and should be fully considered in the engineering design.

Keywords: variable cross-section thread pile; model test; numerical simulation; bearing capacity; structural parameters of screw thread

1 引 言

变截面螺纹桩是桩身截面由上而下逐渐变小的一种新型的可用于地基处理的桩型, 根据灌注螺纹桩改进而来, 考虑到桩身轴力一般为由上到下逐渐递减的规律^[1]而将桩体设计成变截面, 如图 1 所示。相对于等截面桩体, 这种桩型能有效节约桩体材料,

近几年已在工程实践中有所应用, 包括: 长沙至昆明铁路引入昆明枢纽工程动车运用所的地基处理工程、张家口至呼和浩特铁路客运专线二标段软基处理工程等。以前者为例, 通过对长螺旋桩机架进行技术改造后的含有外钻杆和内钻杆的专门成桩机具, 在下旋成孔与回升灌注桩体过程中适当地变换提升内、外钻杆实现变截面螺纹桩的施工, 桩体穿

收稿日期: 2015-03-23

基金项目: 国家自然科学基金(No.51278430); 中铁二院科研计划(No.13164197(13-15))。

This work was supported by the Natural Science Foundation of China (51278430) and the Scientific research program of China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd. (13164197(13-15)).

第一作者简介: 周杨, 男, 1989 年生, 硕士研究生, 主要从事地基处理方面的研究工作。E-mail: 1016925146@qq.com

通讯作者: 肖世国, 男, 1973 年生, 博士, 教授, 博导, 主要从事地基基础及边坡工程的研究工作。E-mail: shgxiao3852@sina.com

过软弱土地层(包括人工弃渣和软土等),桩长可达 20 m 左右。然而,工程应用超前于理论研究,目前此类桩的深入研究甚少,以往相关研究多集中于等截面螺纹桩。

孟振等^[2]通过室内模型试验得出螺纹桩的承载力要高于等直径的直桩;在桩周土体密实度增大时,螺纹桩极限承载力增加幅度要远大于直桩。李成巍等^[3]通过室内模型试验和有限元分析方法,研究了螺纹桩承载机制以及螺纹参数对螺纹桩承载能力的影响。钱建固等^[4]通过室内直剪试验,获得了螺纹间距等螺纹结构参数对螺纹桩侧摩阻力的影响规律。杨启安等^[5]、李红文等^[6]、董天文等^[7]也曾对螺纹桩极限承载力的计算方法做过讨论,为工程实际提供了有意义的参考。综合而言,针对等截面螺纹桩的竖向承载性能,以往研究进行了有益的探讨。但由于变截面螺纹桩与等截面螺纹桩在桩身结构上有明显不同,所以二者竖向承载特性也会存在一定差异。为了充分认识变截面螺纹桩竖向承载特性,本文主要通过室内模型试验及有限元数值模拟方法,探讨其单桩竖向极限承载能力及螺纹结构参数、桩身与桩周土体参数对其承载特性的影响规律。



图1 变截面螺纹桩

Fig.1 A thread pile with variable cross-section

2 模型试验

2.1 试验设计

模型箱内部尺寸长×宽×高为 70 cm×70 cm×100 cm。限于试验场地条件,对单桩进行试验,试验中最大桩径为 70 mm,试桩位于模型箱中间,距边界水平距离为 350 mm,为 5 倍桩径。地基土采用石英砂与滑石粉等材料配制成整体满足要求的试验材料^[8],通过正交配比试验^[9],确定出地基土体

材料参数。模型桩采用 ABS 工程塑料,桩及地基土材料参数见表 1,桩模型具体结构尺寸参数见表 2。

表1 模型试验中材料参数取值

Table 1 Material parameters in model tests

材料	弹性模量 E / MPa	泊松比 ν	重度 $\gamma / (\text{kN/m}^3)$	摩擦角 $\varphi / (^\circ)$	黏聚力 c / kPa
地基土	0.8	0.38	18	20	0.3
ABS 工程塑料	2 200.0	0.20	11		

表2 桩模型结构参数

Table 2 Structural parameters of model piles

桩号	螺纹净间距 / mm	桩底直径 / mm	桩顶直径 / mm	螺纹厚度 / mm	螺纹外伸 宽度/ mm	桩长 / mm
1	15					800
2	27	30	50	10	10	
3	40					
4	27	50	50	10	10	
5		70	70			

注: 1、2 和 3 为变截面螺纹桩, 4 为等截面螺纹桩, 5 为光面桩。

桩身应变测量采用电阻应变片,对称布置于桩身两侧,距桩顶距离分别为 10、20、…、70 mm,如图 2 所示。

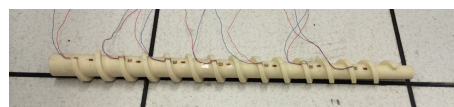


图2 应变片布设

Fig.2 Layout of resistance strain gauge

模型加载系统采用杠杆加载法,见图 3。加载端距横梁支撑点距离为桩顶到横梁支撑点水平距离的 3 倍,即每级加载中桩顶受力是所加荷载的 3 倍。考虑到砝码托盘和桩顶加载连接装置自重对试验测量精度的影响,首次加载将二者的重力折算到所加荷载中。



图3 加载装置图

Fig.3 Photo of loading device in tests

试验加载依照慢速荷载维持法,参考相关研究^[2,10],采用小于 0.01 mm/4 min 作为沉降稳定标准。当在某级荷载作用下的沉降量为前一级荷载沉

降量的 5 倍或在某级荷载作用下的沉降量为前一级荷载沉降量的 2 倍, 且经 1 h 沉降量尚未达到相对稳定, 可认为达到破坏。桩顶采用百分表测量位移, 试验整个测试系统如图 4 所示。



图 4 测试装置全景图

Fig.4 Overall view of testing instruments

考虑到变截面螺纹桩桩身结构的复杂性, 桩身侧摩阻力计算简化处理^[11], 即将螺纹与桩周土体的咬合力和桩身主体的摩阻力统一按桩身等效侧摩阻力处理。根据静力平衡原理可得桩侧等效侧摩阻力为

$$\tau = \frac{Q_{\text{上}} - Q_{\text{下}}}{S} \quad (1)$$

式中: τ 为桩侧等效侧摩阻力 (kPa); $Q_{\text{上}}$ 、 $Q_{\text{下}}$ 分别为桩身受力分析段上、下端轴力 (kN); S 为桩身受力分析段侧表面积 (m^2)。不同桩型 S 的表达是不同的, 变截面螺纹桩受力分析段侧表面积 $S_{\text{变}}$, 表达式为

$$S_{\text{变}} = \pi(R+r)\sqrt{(R-r)^2 + h^2} \quad (2)$$

式中: R 为受力分析段上端桩身半径 (m); r 为受力分析段下端桩身半径 (m); h 为受力分析段长度 (m); 普通螺纹桩与圆柱形直桩受力分析段侧表面积 S , 表达式统一为

$$S = hD\pi \quad (3)$$

式中: D 为桩身直径, 其中普通螺纹桩取螺纹内径。

2.2 试验结果及分析

2.2.1 3 种不同桩型承载特性

(1) 3 种桩型承载力对比

3 种桩型的荷载-沉降曲线如图 5 所示。根据现行规范^[12]中关于单桩竖向抗压静载试验中极限承载能力的确定方法, 可见, 螺纹直桩极限承载力为 1.4 kN, 螺纹净间距为 27 mm 的变截面螺纹桩和直桩的极限承载力为 1.25 kN。从控制沉降的角度分析, 当桩顶沉降达到 4 mm (根据相似原理^[13], 模型试验参照常见实际工程几何尺寸缩小 10 倍, 所以模型试验以桩顶沉降达 4 mm 时荷载作为极限荷

载) 时, 螺纹直桩荷载约为 1.4 kN, 变截面螺纹桩荷载为 1.2 kN 左右, 直桩荷载约为 0.95 kN。分别计算变截面螺纹桩、螺纹直桩和直桩 3 种桩型体积, 分别为 1.31 、 1.92 、 $3.08 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ 。以极限荷载除以桩身体积, 以此作为桩身材料利用率。可得变截面螺纹桩材料利用率是螺纹直桩的 1.26 倍, 是等外径光面直桩的 2.97 倍。因此, 变截面螺纹桩能大幅度节省桩身材料。

同时, 由图 5 还可以看出, 加载前期, 二者承载能力差别不大, 到加载后期, 侧阻已完全发挥, 端阻逐步发挥, 由于螺纹直桩桩端横截面积较大, 所以最终导致等截面螺纹桩的极限承载力高于变截面螺纹桩。

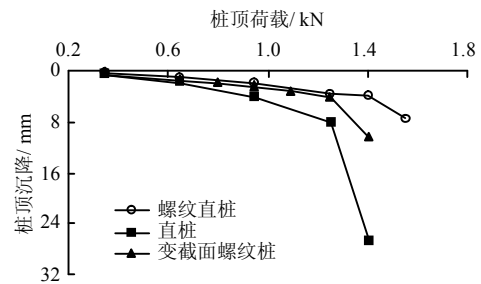
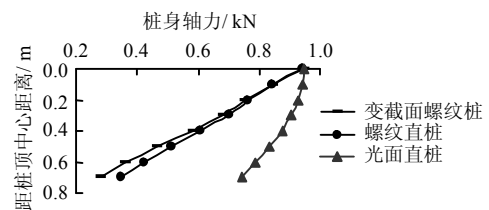


图 5 3 种模型桩荷载-沉降曲线图

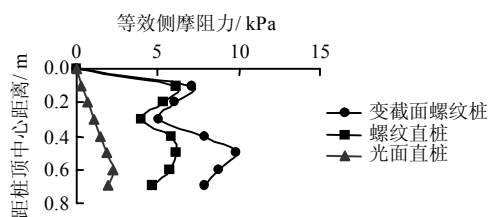
Fig.5 Load-settlement curves of three types of model piles

(2) 变截面螺纹桩桩身荷载传递特性

图 6 所示为荷载为 0.95 kN 时 3 种桩型桩身轴力及侧摩阻力分布曲线图。由图可见, 相同桩顶荷载作用下, 变截面螺纹桩桩身轴力递减程度大于螺



(a) 轴力



(b) 等效侧摩阻力

图 6 3 种桩型相同荷载作用下桩身轴力及侧摩阻力分布曲线

Fig.6 Axial force and side friction curves of three types of piles under the same load

纹直桩和光面直桩, 变截面螺纹桩侧阻发挥要略优于等截面螺纹桩, 但明显优于光面直桩。

图 7、8 给出了变截面螺纹桩和光面直桩的荷载传递曲线图。由图可见, 桩身轴力沿桩身深度方向上逐渐递减, 随着荷载增加桩端阻力逐渐增加, 变截面螺纹桩端阻增加幅度小于等桩顶螺纹外径的光面直桩; 同时, 变截面螺纹桩侧摩阻力随着荷载增加逐渐增大, 增加幅度逐渐变小; 直桩侧摩阻力随荷载增加, 变化幅度很小。

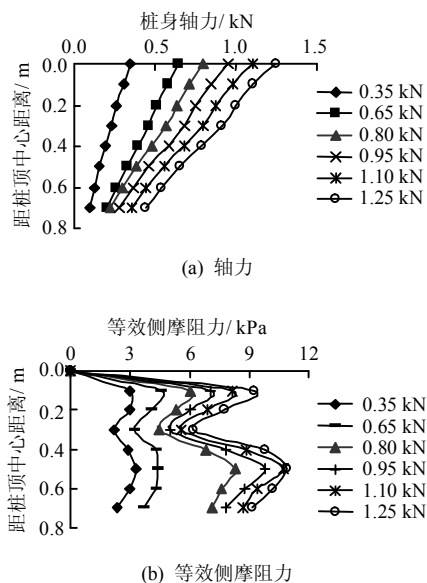


图 7 变截面螺纹桩身轴力及侧摩阻力分布曲线
Fig.7 Axial force and side friction curves of variable cross-section thread piles

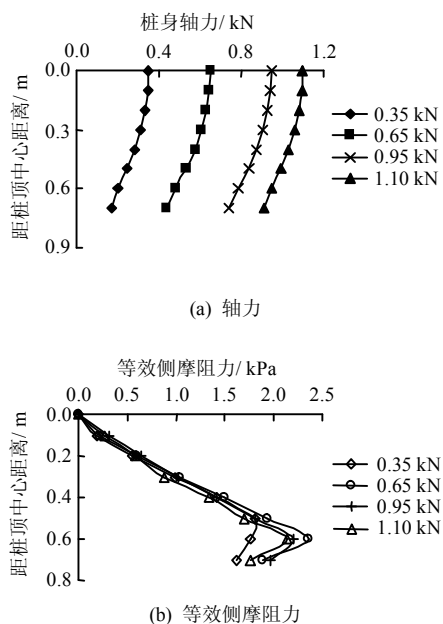


图 8 直桩桩身轴力及侧摩阻力沿桩身分布曲线
Fig.8 Axial force and side friction curves of straight piles

变截面螺纹桩端阻所占总承载力比值为 25.8%~35.1%, 光面直桩为 47.7%~82.6%, 螺纹直桩为 28.4%~43.7%。3 种桩型端阻占承载力比值随荷载的变化曲线见图 9, 由图可见, 变截面螺纹桩主要通过侧摩阻力向桩周土体传递荷载, 端阻作用发挥相对较小。

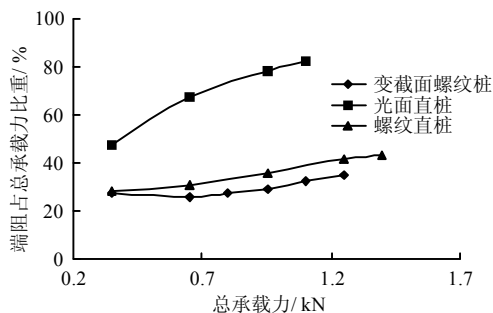


图 9 不同桩型端阻占总承载力比例
Fig.9 Proportion of end-resistance of different pile-types to total bearing capacity

(2) 螺纹间距对变截面螺纹桩承载力的影响

试验中设计 3 种螺纹净间距, 分别为 15、27、40 mm, 经加载试验获得荷载-沉降曲线, 如图 10 所示。由图可见, 螺纹净间距为 27 mm 时单桩竖向承载能力最高, 螺纹净间距为 15 mm 时最低, 即针对同一地基土存在最优螺纹净间距使变截面螺纹桩竖向抗压承载力发挥最高。

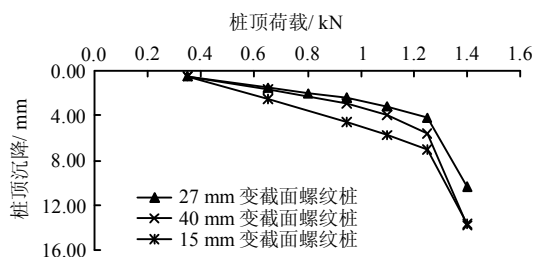


图 10 不同螺纹净间距的桩荷载-沉降曲线
Fig.10 Load-settlement curves of a pile with various net spacing

3 数值模拟分析

针对试验模型, 为便于数值模拟的可操作性, 根据相似原理并考虑实际情况, 扩大试验模型建立数值模型 (几何相似比为 1:10, 重度相似比为 1:1), 采用三维有限元方法进一步模拟分析。采用 MIDAS GTS 岩土有限元软件建立三维实体模型, 采用循环网格划分方法划分网格, 以四面体为基本单元, 分别建立地基网格和桩体网格, 如图 11 所示。桩、土

之间采用 Coulomb friction 理论建立接触单元,地基土体采用 Mohr-Coulomb 弹塑性模型,桩体采用线弹性模型,具体参数选取如表 3 所示。

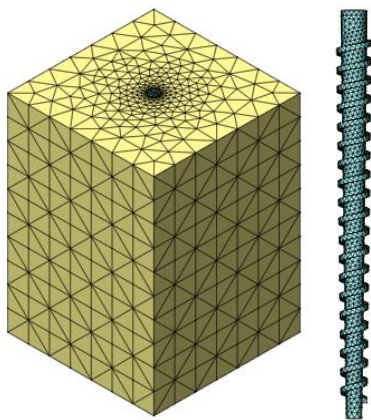


图 11 地基与桩体网格划分
Fig.11 Meshes of foundation and pile

表 3 数值模型材料参数取值
Table 3 Material parameters in numerical model

材料	弹性模量 E / MPa	泊松比 ν	重度 $\gamma / (\text{kN/m}^3)$	摩擦角 $\varphi / (^\circ)$	黏聚力 c / kPa
地基土	8	0.38	18	20	3
混凝土	22 000	0.20	22		

通过数值模拟,获取桩周土体塑性区及其随荷载发展变化,如图 12 所示。由图可见,随着荷载增加,等效塑性应变区由桩顶逐渐向桩底发展,当荷载增加到一定程度端阻开始发挥,当塑性区贯通,达到极限荷载,此时桩整体发生刺入式破坏,螺纹周围土体发生局部剪切破坏。

变截面螺纹桩(螺纹净距为 270 mm)、螺纹直桩和圆柱形直桩的承载力模拟计算结果分别为 1 206、1 350、930 kN。可得变截面螺纹桩单位桩身材料的利用率是等截面螺纹桩的 1.3 倍,是光面直桩的 3.1 倍。因而,数值模拟与前述模型试验结果相近。

根据相似原理换算后,3 种试验桩型情况下,数值模拟获得的桩身轴力和等效侧摩阻力沿桩身分布如图 13 所示。由图可见,数值模拟与模型试验桩身等效侧摩阻力分布规律较为一致,二者的等效侧摩阻力沿桩身分布曲线的相关系数,变截面螺纹桩为 84.4%,螺纹直桩为 94.6%,光面直桩为 99.6%。变截面螺纹桩数据偏差稍大,可能与试验过程中应变片粘贴质量有关,但总体而言,数值模拟与模型试验的结果较为接近。

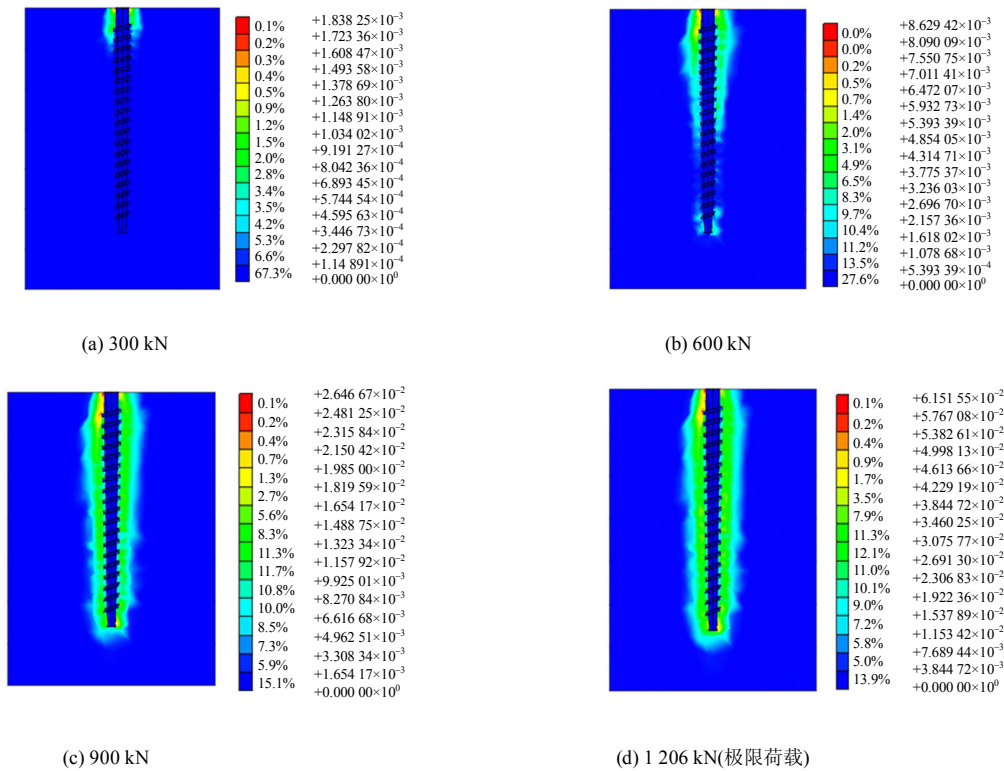


图 12 不同荷载下桩周等效塑性应变区
Fig.12 Equivalent plastic shear strains under different loads

前述数值模拟与试验结果相互验证,说明了二者的合理性。下面进一步通过数值模拟分析桩身结

构和地基参数对变截面螺纹桩竖向承载特性的影响规律。

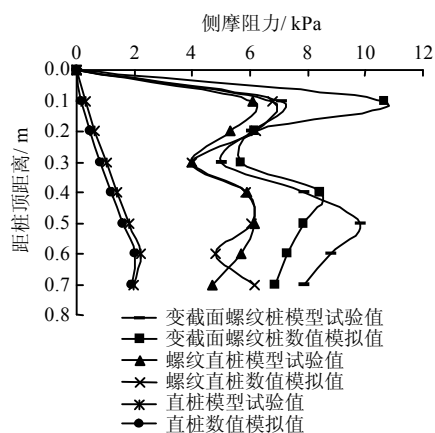


图 13 不同桩型等效侧摩阻力的数值模拟及模型试验值对比

Fig.13 Comparison between experimental and computed results of side friction of different types of piles

不同结构参数的桩体（即：螺纹间距、螺纹外伸宽度、螺纹厚度和桩身截面变化率）如图 14 所示。

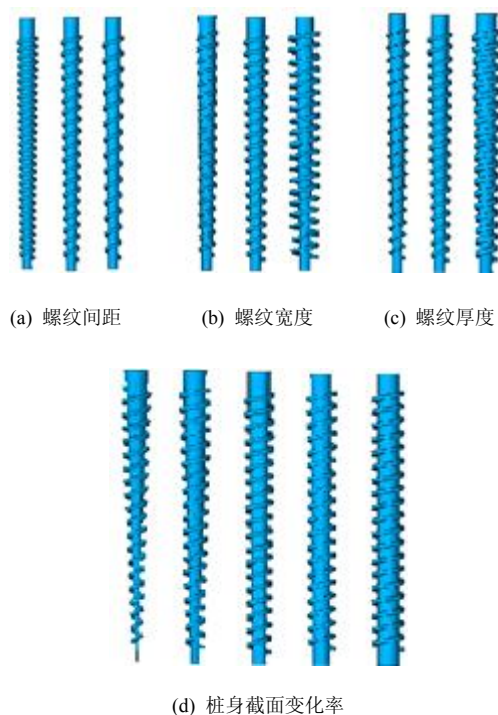
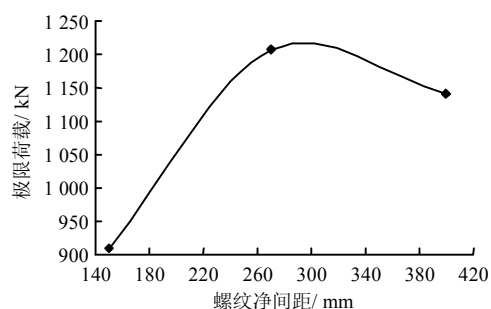


图 14 数值模拟中不同结构参数的桩体

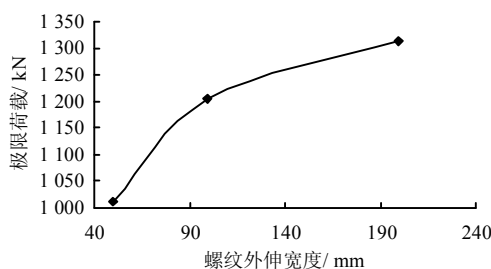
Fig.14 Piles with different structural parameters in numerical simulation

计算获得单桩极限荷载与桩身结构参数关系曲线，如图 15 所示。由图可见，变截面螺纹桩单桩竖向承载力与螺纹间距关系呈单峰曲线，即针对同样的地层条件存在最优螺纹间距（图中约为 300 mm）。螺纹宽度越大，螺纹单桩极限承载力越高，当宽度超过一定值则对竖向承载力影响能力减弱。螺纹厚度对变截面螺纹桩承载力也有一定影响，同样也存

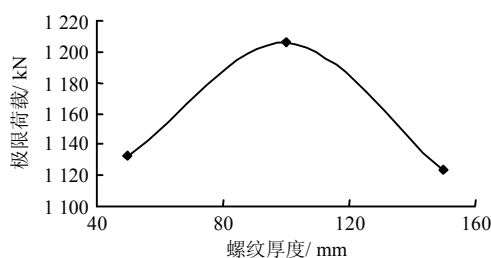
在最优螺纹厚度（图中约为 100 mm）。图 16、17 所示的相同桩顶荷载条件下不同螺纹净距和厚度时的桩周土体塑性区分布图表明，在螺纹间距为 270 mm 和螺纹厚度为 100 mm 时的塑性区分别小于间距为 150 mm 和 400 mm 以及厚度为 50 mm 和 150 mm 的情况，进一步说明了最优螺纹间距和厚度的可存在性。同时，考虑到工程中螺纹桩的材料接近于素混凝土，故建议螺纹厚度宜不小于宽度。图 18 所示的桩身材料利用率与桩身截面变化率关系曲线则表明，二者呈单峰曲线关系，即存在最优截面变化率使桩身材料利用率达到最大。



(a) 螺纹净间距



(b) 螺纹外伸宽度



(c) 螺纹厚度

图 15 单桩极限荷载与桩身结构参数关系曲线

Fig.15 Relationships between ultimate load of single pile and structural parameters of piles

因此，在变截面螺纹桩桩身结构设计时，应注意螺纹间距、螺纹宽度及厚度的优化设计；螺纹不宜过厚浪费桩身材料，也不易过薄影响螺纹强度；桩身截面变化率要结合实际工程合理设计，既要保证单桩承载力满足要求，且较容易施工，又要最大程度节省桩身材料。

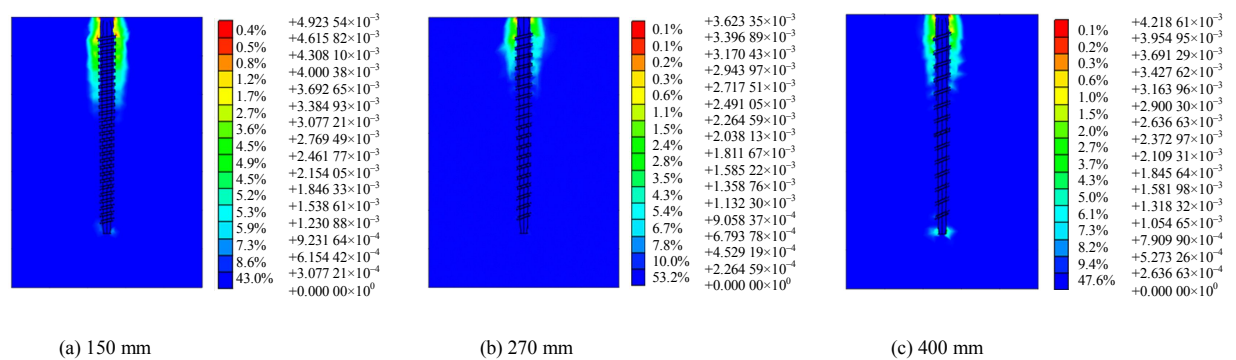


图 16 不同螺纹间距时桩周土等效塑性应变区(桩顶竖向荷载为 400 kN)

Fig.16 Equivalent plastic shear strains of soil surrounding a pile with different net spacing between threads under vertical load of 400 kN at pile top

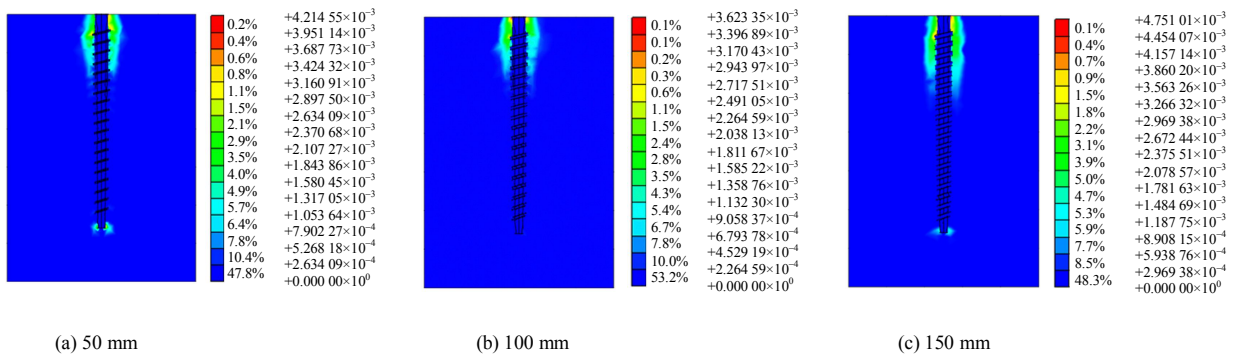


图 17 不同螺纹厚度时桩周土等效塑性应变区(桩顶竖向荷载为 400 kN)

Fig.17 Equivalent plastic shear strains of soil surrounding a pile with various thread heights under vertical load of 400 kN at pile top

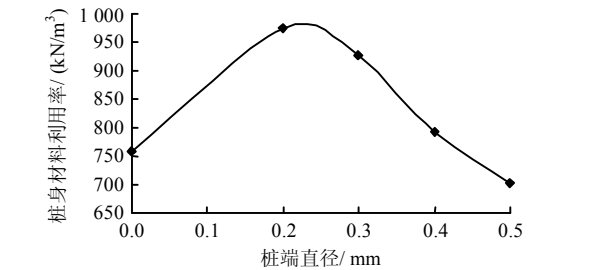


图 18 桩身材料利用率与截面变化率关系曲线

Fig.18 Curve of material utilization ratio and sectional change rate of pile

为进一步探究不同强度的桩周土体对 3 种桩承载力的影响，设置由强到弱的 5 种地基土，计算其在不同地层中极限承载力。3 种桩型的结构参数见表 4，其中 1、2 和 3 号桩分别为变截面螺纹桩、普通螺纹直桩和圆柱形直桩。地基土及桩身材料参数见表 5。计算结果如表 6 所示。

表 4 数值模拟中桩体结构参数取值

Table 4 Shape parameters of piles in numerical simulation						
桩号	螺纹净间距 / mm	桩底直径 / mm	桩顶直径 / mm	螺纹厚度 / mm	螺纹外伸宽度 / mm	桩长 / m
1	200	200	400	100	100	15
2	200	400				
3		600	600			

表 5 数值模型材料参数取值

Table 5 Material parameters of numerical model					
材料名称	弹性模量 E / GPa	泊松比 ν	重度 γ / (kN/m ³)	摩擦角 φ / (°)	黏聚力 c / kPa
地基土 1	20	0.35	19	25	20
地基土 2	16	0.38	19	22	17
地基土 3	12	0.40	19	20	14
地基土 4	8	0.42	18	18	12
地基土 5	5	0.45	18	16	10
桩	22	0.20	22		

表 6 不同地基中不同桩型极限荷载值

Table 6 Ultimate bearing capacities of different types of piles in various foundations			
地基类型	变截面螺纹桩 / kN	螺纹直桩极限荷载 / kN	光面直桩极限荷载 / kN
地基土 1	3 090	3 340	1 520
地基土 2	2 850	3 000	1 310
地基土 3	2 400	2 600	1 100
地基土 4	1 950	2 010	870
地基土 5	1 600	1 500	660

由表 5、6 可见，地基强度由强变弱的变化，3 种桩型的极限承载力都逐渐变低，其中光面直桩承载力降低得最为显著，变截面螺纹桩承载力与光面直桩承载力比值随着地基土体强度降低由 2.03 升至 2.45（见图 19），变截面螺纹桩承载力与普通螺纹直

桩承载力比值则随着地基土体强度降低由 0.93 升至 1.07 (见图 19), 两比值均随着地基强度降低而逐渐升高。简言之, 相同地基条件下, 变截面螺纹桩的承载力约为桩顶螺纹外径相同的光面直桩承载力的 2~2.5 倍, 变截面螺纹桩与等截面螺纹桩承载力相差不大, 并且随着地基土体强度降低, 变截面螺纹桩的承载力逐渐略超过等截面螺纹桩。对比于模型试验中砂性地基土, 数值模拟结果显示, 变截面螺纹桩在黏性土中竖向承载能力发挥得相对更高。所以在软弱黏土地基处理中, 相对于其他桩型, 变截面螺纹桩具有较大的优越性。

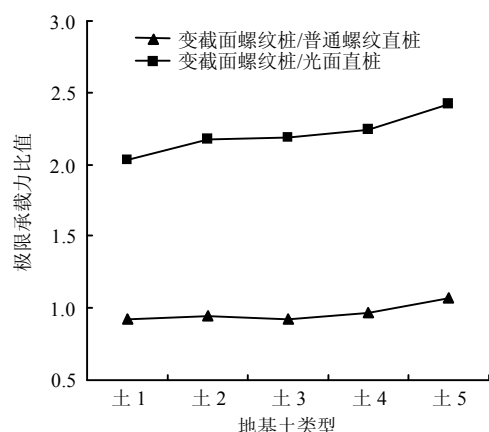


图 19 不同桩型在不同地基土中极限承载力比值

Fig.19 Ratio of ultimate bearing capacity of different pile types in different soils

4 结 论

(1) 通过室内模型试验得到在相同条件下新型变截面螺纹桩的竖向承载力与普通螺纹直桩相近, 高于圆柱形光面直桩; 承担相同竖向荷载, 桩身材料利用率, 变截面螺纹桩是普通螺纹直桩的 1.3 倍左右, 是普通圆柱形光面普通螺纹直桩的 3.0 倍左右; 变截面螺纹桩侧摩阻力发挥优于普通螺纹直桩和圆柱形光面直桩。

(2) 通过对变截面螺纹桩桩身结构及地基参数分析, 结果表明, 螺纹间距对单桩竖向承载力影响较大, 并且存在最优螺距使单桩竖向承载力发挥最大; 桩身材料利用率与桩身截面变化率呈单峰曲线关系, 即存在最优桩身截面变化率使桩身材料利用率达到最大; 螺纹宽度与桩竖向承载力呈正相关关系, 但当宽度超过一定值, 则对竖向承载力影响逐渐减小; 存在使桩承载力提高的最优螺纹厚度, 但设计中螺纹厚度不宜过厚以浪费桩身材料, 也不宜过薄以影响螺纹强度, 建议螺纹厚度宜不小于宽度; 地基土由强变弱的过程中, 变截面螺纹桩竖向承载

力相对于普通螺纹直桩及圆柱形光面直桩逐渐表现出优势, 所以在软土地基处理中, 变截面螺纹桩相对更具有优越性。

(3) 变截面螺纹桩拥有的圆台形桩身及螺纹结构具有较好的合理性, 能大幅度提高桩侧摩阻力的发挥, 从而整体提高单桩承载力且节约桩身材料, 有较大工程应用价值。

参 考 文 献

- [1] 吴兴序. 基础工程[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2007: 132.
WU Xing-xu, Foundation engineering[M]. Chengdu: Publishing House of Southwest Jiaotong University, 2007:132.
- [2] 孟振, 陈锦剑, 王建华, 等. 砂土中螺纹桩承载特性的模型试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(增刊 1): 141—145.
MENG Zhen, CHEN Jin-jian, WUANG Jian-hua, et al. Study of model test on bearing capacity of screw piles in sand[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(Supp.1): 141—145.
- [3] 李成巍, 陈锦剑, 吴琼, 等. 灌注螺纹桩承载机制与计算方法[J]. 上海交通大学学报, 2010, 44(6): 726—730.
LI Cheng-wei, CHEN Jin-jian, WU Qiong, et al. Bearing mechanism and calculation method of screw pile[J]. **Journal of Shanghai Jiaotong University**, 2010, 44(6): 726—730.
- [4] 钱建固, 陈宏伟, 贾鹏, 等. 注浆成型螺纹桩接触面特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(9): 1744—1749.
QIAN Jian-gu, CHEN Hong-wei, JIA Peng, et al. Experimental study of mechanical behaviors of grouting-screw pile interface[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(9): 1744—1749.
- [5] 杨启安, 沈保汉. 螺纹桩承载机制及承载力计算方法[J]. 工业建筑, 2013, 43(1): 67—70.
YANG Qi-an, SHEN Bao-han. The bearing mechanism and calculation method of bearing capacity of screw pile[J]. **Industrial Construction**, 2013, 43(1): 67—70.
- [6] 李红文, 李雪梅, 郑俊杰. 螺纹桩的设计及应用[J]. 土工基础, 2006, 20(2): 82—85.
LI Hong-wen, LI Xue-mei, ZHENG Jun-jie. The design and application of screw pile[J]. **Soil Engineering and Foundation**, 2006, 20(2): 82—85.