

刚性钉形桩承载特性物理模型试验及有限元研究

刘明泉^{1,2}, 高 岭³, 李晓芝^{1,2}

(1. 唐山学院 土木工程学院, 河北 唐山 063000;

2. 河北省建筑工程与尾矿综合利用重点实验室, 河北 唐山 063000;

3. 河北省交通规划设计院, 石家庄 050000)

摘要:采用物理模型试验和 ABAQUS 有限元模拟相结合的方法, 对刚性钉形桩承载力组成及扩大头尺寸对承载力影响规律进行了研究。研究表明: 扩大头能提高刚性钉形桩承载力; 端阻力对桩承载力影响较大, 扩大头直径增加桩承载力提高明显; 桩承载力理论计算结果与试验和模拟结果之间存在一定差异, 当采用理论公式计算时, 应对理论计算结果进行适当折减。

关键词:刚性钉形桩; 承载特性; 物理模型试验; 有限元模拟

中图分类号:TU473.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-349X(2020)06-0050-05

DOI:10.16160/j.cnki.tsxyxb.2020.06.011

Physical Model Test and Finite Element Study on Bearing Properties of Rigid Nail-Shaped Pile

LIU Ming-quan^{1,2}, GAO Ling³, LI Xiao-zhi^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Tangshan University, Tangshan 063000, China;

2. Hebei Key Laboratory for Building Engineering and Tailings Utilization, Tangshan 063000, China;

3. Hebei Transportation Planning and Design Institute, Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: With physical model test and finite element simulation by ABAQUS, the composition of the bearing capacity and the influence of the enlarged head size on the capacity are studied about the rigid nail-shaped pile. The results show that: The bearing capacity of the rigid nail-shaped pile can be improved by enlarging the head size; The bottom resistance has a great influence on the bearing capacity, and the capacity can be raised significantly with the diameter of the enlarged head increasing; there are some differences between the theoretical calculation and the tested and simulated results, and thus the results should be appropriately reduced when theoretical calculation method is applied.

Key Words: rigid nail-shaped pile; bearing properties; physical model test; finite element simulation

0 引言

钉形桩是一种变截面桩, 在桩顶一定高度范围内有扩大头, 常以复合地基的形式用于对

软土地基的加固处理^[1-2]。普通钉形桩由水泥土搅拌桩结合双向搅拌工艺改进而成, 解决了普通搅拌桩质量差、有效处理深度浅、桩土共同

基金项目:河北省建设科技研究计划项目(20190502)

作者简介:刘明泉(1975—), 男, 河北唐山人, 副教授, 博士, 主要从事岩土工程研究。

作用难以协调等缺点,在市政道路、公路和铁路路基工程中取得了良好的加固效果^[3-5]。普通钉形桩属于柔性桩,随着对钉形桩复合地基研究的深入,人们发现:扩大头部分和桩身部分常常由于强度不足而出现剪切破坏和受压鼓胀破坏,在铁路和高填方路基下还有可能发生复合地基整体剪切破坏,这给钉形桩应用范围带来了一定制约;此外,柔性桩还面临着有效桩长的问题^[6],这对钉形桩处理深度形成了限制。混凝土桩属于刚性桩,其桩身强度和刚度很大,抗剪和抗压性能良好,而且不存在有效桩长的困扰。变截面钻孔灌注桩技术的出现和发展^[7-10],使刚性混凝土钉形桩成为可能。刚性钉形桩可以克服现有柔性钉形桩强度低、处理深度受限的缺点,具有更好的应用前景。但目前对刚性钉形桩承载特性还没有明确的认识,尚需进一步加以研究。

本文针对刚性钉形桩承载特性,采用物理模型试验和有限元模拟相结合的方法,研究扩大头尺寸对钉形桩承载性能的影响规律。

1 物理模型试验

1.1 试验材料和设备

物理模型试验用钉形桩的外形如图 1 所示。

表 1 模型尺寸 mm

参数	普通桩 PZ	钉形桩 1 DZ1	钉形桩 2 DZ2	钉形桩 3 DZ3	钉形桩 4 DZ4	钉形桩 5 DZ5	钉形桩 6 DZ6	钉形桩 7 DZ8
L	600	600	600	600	600	600	600	600
H	0	100	200	300	100	100	100	100
D	50	100	100	100	60	70	80	90
d	50	50	50	50	50	50	50	50

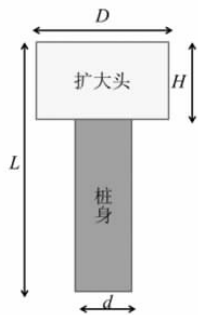
模型试验在模型箱内进行。模型箱采用角钢焊接制作,箱内填土采用砂土分层填筑,两侧为透明亚克力板,以便控制填土高度,如图 2 所示。加载设备采用自制反力架,如图 3 所示,荷载测量设备采用数显压力传感器。

1.2 试验方案

在试验前根据箱体尺寸和试验桩尺寸布置试验点,如图 4 所示。

试验时,先进行普通桩和土体静载荷试验,然后进行钉形桩静载荷试验。加载时,采用慢

各试验桩总桩长 L 统一为 600 mm,根据扩大头尺寸,共设计了 7 种不同尺寸的钉形桩和 1 种普通桩(无扩大头),具体尺寸如表 1 所示。



(a)外形示意图



(b)试验桩

图 1 钉形桩模型



图 2 模型箱

速维持荷载法分级加载,每级荷载为最大试验荷载值的 1/10。普通桩的最大试验荷载由压

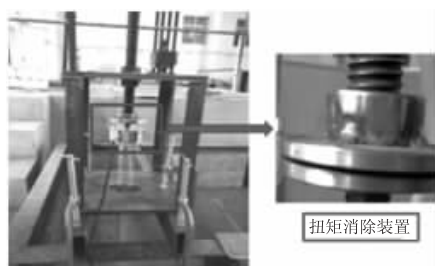
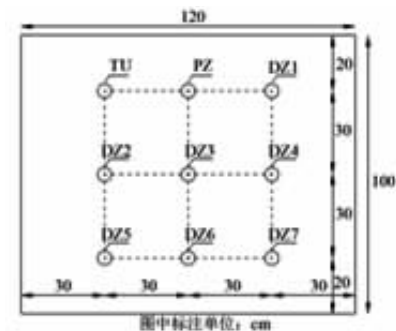


图 3 反力架



(a) 平面设计图



(b) 箱内试验点

图 4 试验点布置

入桩身时压力传感器测量得到的最大荷载近似估算;钉形桩的最大试验荷载由先前已经完成的土体极限荷载和普通桩极限荷载之和近似确定。每次加载后记录加载板沉降量一次,每一级加载之后,按第 5 min, 15 min, 30 min, 45 min, 60 min 测读桩顶沉降量及相应的荷载,以后每隔 30 min 测读一次。终止试验的条件符合相关规范^[11]中对静载荷试验的要求。

1.3 试验结果

模型试验结束后,对试验数据进行分析 and 整理,绘制荷载—沉降关系曲线,如图 5 所示。

由图 5 可以发现,扩大头对钉形桩承载特性有较大影响。首先,从曲线变化形态上看,普通桩

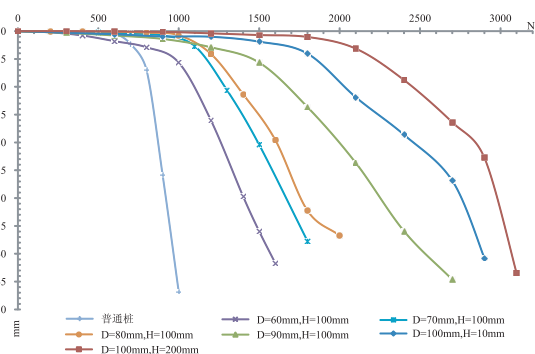


图 5 试验荷载—沉降关系曲线

荷载—沉降关系曲线呈陡降形,存在明显拐点;而随着扩大头直径和高度的增加,钉形桩的荷载—沉降关系曲线逐渐呈缓变形,无明显拐点。其次,由于存在扩大头,钉形桩承载力比普通桩大,曲线位于普通桩的右侧。钉形桩承载力与扩大头直径和高度有关,当扩大头高度不变时,直径越大桩承载力越大;当扩大头直径不变时,高度越大桩承载力越大。再次,扩大头直径越大,头下与土体接触的面积越大,由头下土体提供的端阻力越大;扩大头高度越大,与桩周围土体接触的面积越大,由桩周围土体提供的侧摩阻力越大。可见,钉形桩的端阻力和侧摩阻力对其承载力有着重要的影响。

2 有限元模拟

为研究刚性钉形桩端阻力和侧摩阻力与普通钉形桩的差异以及对承载力产生的影响,采用有限元方法进行模拟研究。

2.1 数值模型

采用 ABAQUS 有限元软件,建立数值分析模型。模型中,刚性钉形桩和普通桩为混凝土材料,采用线弹性模型模拟。桩周围土体均采用基于 Mohr-Coulomb 屈服准则的弹塑性本构模型模拟。桩尺寸设定与物理模型试验相同,分析单元采用 CAX4 平面轴对称单元^[12-13]。模拟中选用的参数如表 2 所示,基本分析模型如图 6 所示。荷载采用位移控制法施加于钉形桩顶面,分 8 级加载,每级竖向位移增量为 5 mm,总沉降为 40 mm。

2.2 模拟结果

模拟结束后,绘制荷载—沉降关系曲线,如图 7 所示。

图 7 显示,模拟得到的刚性钉形桩荷载—沉降关系曲线与模型试验得到的曲线在形状和变化规律上一致:随着扩大头直径和高度的增加,钉形桩的荷载—沉降关系曲线逐渐呈缓变形,扩大头直径和高度越大,桩的承载力越大。通过对比图 5 和图 7 可以发现,扩大头直径变化对桩承载力影响较大,当扩大头直径 D 由 60 mm

增大到 100 mm 时,桩极限荷载由 1 538 N 增大到 2 921 N,承载力增加幅度较大。扩大头高度变化对桩承载力影响较小,当扩大头高度 H 由 100 mm 增大到 200 mm 时,桩极限荷载由 2 921 N 增大到 3 140 N,增加幅度较小。由此判断,刚性钉形桩承载力受端阻力影响较大。刚性钉形桩承载力特征值如表 3 所示。

表 2 模拟时选用的参数

材料名称	厚度/m	重度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/MPa	泊松比 ν	黏聚力/kPa	内摩擦角 $^{\circ}$
地基土	1.2	19.8	10	0.35	15.2	19
普通桩	0.6	25	38 000	0.2	—	—
刚性钉形桩	0.6	25	38 000	0.2	—	—

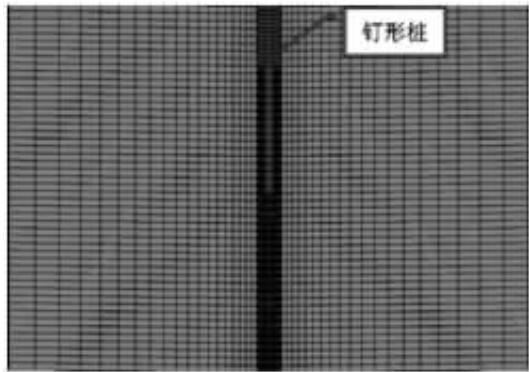


图 6 基本有限元分析模型

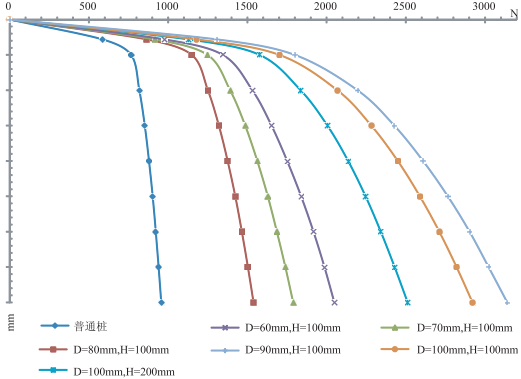


图 7 模拟荷载—沉降关系曲线

表 3 刚性钉形桩承载力特征值

承载力	普通桩	$D=60\text{ mm}, H=100\text{ mm}$	$D=70\text{ mm}, H=100\text{ mm}$	$D=80\text{ mm}, H=100\text{ mm}$	$D=90\text{ mm}, H=100\text{ mm}$	$D=1\text{ 000 mm}, H=100\text{ mm}$	$D=100\text{ mm}, H=200\text{ mm}$
试验值/N	500	775	900	1 000	1 210	1 430	1 550
模拟值/N	550	769	895	1 025	1 256	1 461	1 575
相对误差/%	+10	-0.8	-0.6	+2.5	+3.8	+2.1	+1.6

表 3 显示,模拟和试验的结果非常接近,误差较小。考虑到物理模型试验中分层土体参数的差异以及桩承受偏心作用的概率较大,认为有限元模拟结果更可靠,可作为承载力理论计算结果的检验依据。

根据钉形桩承载特点^[4],其承载力由扩大头部分提供的承载力和普通桩身部分提供的承载力组成,即:

$$R_a = R_t + R_s。$$

其中, R_a 为钉形桩承载力特征值; R_t 为扩大头部分提供的承载力; R_s 为普通桩身部分提

供的承载力。 R_t 和 R_s 可由各自端阻和侧摩阻经理论计算得到,具体计算方法详见文献[11]。

据此,对刚性钉形桩承载力进行理论计算,理论计算结果和模拟结果的比较详见表 4。

表 4 表明,刚性钉形桩端阻力在总承载力中的比例大于侧摩阻力所占比例,端阻力对承载力影响较大,理论计算结果与模型试验和数值模拟结果相一致。此外还发现,理论计算结果总体上大于试验和模拟结果,随着扩大头直径增加,理论计算结果与模拟结果之间的差异逐渐增大。造成这种现象的原因可能是由于扩

大头对桩侧摩阻分布和端阻分布形成的影响所致。因此,在通过理论公式计算刚性钉形桩承载力时,需要对理论计算结果进行适当折减,以保证设计安全。

表 4 刚性钉形桩承载力特征值理论计算和模拟结果对比

模型	侧面积/mm ²	底面积/mm ²	侧摩阻/kPa	端阻/MPa	侧摩阻力/N	端阻力/N	理论值/N	模拟值/N	差异/%
普通桩	942	19.625	161	20.3	151.7	398.4	550	550	0
D=60 mm, H=100 mm	973.4	28.26	161	20.3	156.7	573.7	730	769	-5.1
D=70 mm, H=100 mm	1 004.8	38.465	161	20.3	161.8	780.8	943	895	5.4
D=80 mm, H=100 mm	1 036.2	50.24	161	20.3	166.8	1 019.9	1 187	1 025	15.8
D=90 mm, H=100 mm	1 067.6	63.585	161	20.3	171.9	1 290.8	1 463	1 256	16.5
D=100 mm, H=100 mm	1 099	78.5	161	20.3	176.9	1 593.6	1 770	1 461	21.1
D=100 mm, H=200 mm	1 256	78.5	161	20.3	202.2	1 593.6	1 796	1 575	14.0

3 结论

本文通过物理模型试验和有限元模拟,从承载力影响因素方面入手,对刚性钉形桩承载特性进行了研究,主要研究结论如下。

(1)扩大头能提高钉形桩承载力,刚性钉形桩的承载力大于同条件下的普通桩。刚性钉形桩承载力与扩大头直径和高度有关,扩大头高度越大、直径越大,桩承载力越大。

(2)钉形桩的端阻力和侧摩阻力对其承载力有着重要的影响。钉形桩承载力受端阻力的影响较大,随扩大头直径的增加承载力提高明显。钉形桩承载力受侧摩阻力影响较小,随扩大头高度的增加承载力提高的幅度不大。

(3)钉形桩理论计算结果总体上大于试验和模拟结果,随着扩大头直径增加,理论计算结果与模拟结果之间的差异逐渐增大,因此,在进行理论计算时要适当考虑对承载力进行折减。

参考文献:

- [1] 李智杰. 沿海地区淤积质软土层地基处理技术措施研究[J]. 铁道建筑技术, 2016(11): 66-69.
- [2] 姚成. 钉形水泥搅拌桩加固软土复合地基研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2013.

- [3] 王刚. 钉形桩在市政道路工程中的应用[J]. 西部交通科技, 2010(5): 33-37.
- [4] 乔慧园. 钉形水泥土双向搅拌桩在铁路路基工程中应用研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2014.
- [5] 朱佳莉. 井格型钉形桩在双摆渡泵站站基加固中的应用[J]. 安徽水利水电职业技术学院学报, 2018, 18(1): 9-11.
- [6] 闫超. 变截面搅拌桩复合地基稳定分析方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
- [7] 郭允庄. 钻孔变截面灌注桩施工技术研究与应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 1998(S1): 9-12.
- [8] 喻栓旗, 包胜. 变截面钻孔灌注桩水下一次成型浇筑法的创设与应用[J]. 水运工程, 2013(6): 187-190.
- [9] 贾红雨. 变截面大直径钻孔灌注桩在城市桥梁中的应用[J]. 公路与汽运, 2017(1): 152-156.
- [10] 黄天贵, 韩国明. 大直径深孔变截面钻孔灌注桩施工工艺与技术研究[J]. 公路, 2011(10): 111-118.
- [11] 中国建筑科学研究院. 建筑桩基技术规范: JG/J 94-2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008. (下转第 86 页)

- [10] WRIGHT P, KROLL M, LADO A, et al. The structure of ownership and corporate acquisition strategies[J]. Strategic Management Journal, 2002, 23(1): 41 - 53.
- [11] 周建庆, 梁彤纓, 陈修德, 等. CEO 股权激励强度对企业研发投资的影响——基于薪酬结构的视角[J]. 中国科技论坛, 2020(3): 88 - 96.
- [12] 连玉君, 彭方平, 苏治. 融资约束与流动性管理行为[J]. 金融研究, 2010(10): 158 - 171.
- [13] 曾爱民, 傅元略, 魏志华. 金融危机冲击、财务柔性储备和企业融资行为——来自中国上市公司的经验证据[J]. 金融研究, 2011(10): 155 - 169.
- [14] 殷钱茜, 胡建雄. 财务柔性、自由现金流与投资不足——来自中国上市公司的经验证据[J]. 河海大学学报(哲学社会科学版), 2016(4): 49 - 57.
- [15] 陈非, 韩晓宇. 环境不确定性、财务柔性研发投资——基于中小板上市公司的经验证据[J]. 工业技术经济, 2018, 37(10): 19 - 25.
- [16] 杜雯翠, 龚新宇, 张平淡. 行业异质性、高管薪酬与环境绩效——来自中国民营上市公司的经验证据[J]. 环境经济研究, 2019, 4(1): 39 - 55.
- [17] DE ANGELO H, DE ANGELO L. Capital structure, payout policy, and financial flexibility[R]. Working Paper, University of Southern California, 2009.
- [18] 曾爱民, 张纯, 魏志华. 金融危机冲击、财务柔性储备与企业投资行为——来自中国上市公司的经验证据[J]. 管理世界, 2013(4): 107 - 120.

(责任编辑: 李秀荣)

(上接第 54 页)

- [12] RAGNI R, BIENEN B, WANG D, et al. Numerical modelling of the effects of consolidation on the undrained spudcan capacity under combined loading in silty clay [J]. Computers and Geotechnics, 2017, 86: 33 - 51.
- [13] ZHANG J, CUI X, HUANG D, et al. Numerical simulation of consolidation settlement of pervious concrete pile composite foundation under road embankment[J]. International Journal of Geomechanics, 2016, 16(1): B4015006.

(责任编辑: 李秀荣)