

大直径超长桩承载特性研究

张 政

中国铁路上海局集团有限公司合肥铁路枢纽工程建设指挥部, 安徽 合肥

收稿日期: 2023年10月24日; 录用日期: 2023年12月6日; 发布日期: 2023年12月14日

摘 要

随着我国经济的蓬勃发展, 各个行业的大型工程络绎不绝, 这对于桩基础的承载力又提出了新的要求, 桩基础朝着大直径、超长桩身发展。以某桥梁大直径超长钻孔灌注桩为工程背景, 基于ABAQUS有限元数值模拟软件建立桩的数值模型, 设置了13级不同的桩顶荷载, 揭示大直径长桩的承载特性, 得到该桩桩顶荷载-沉降曲线, 并计算该桩的极限承载力。分析桩侧摩阻力分布曲线和桩顶、桩身和桩端在不同荷载下的轴力曲线, 得到大直径长桩的荷载传递规律。

关键词

大直径桩, 承载特性, 荷载传递, 数值模拟

Study on Bearing Characteristics of Large Diameter Ultra-Long Piles

Zheng Zhang

Hefei Railway Hub Project Construction Headquarters of China Railway Shanghai Bureau Group Co. Ltd., Hefei Anhui

Received: Oct. 24th, 2023; accepted: Dec. 6th, 2023; published: Dec. 14th, 2023

Abstract

With the vigorous development of China's economy, large-scale projects in various industries are endless, which puts forward new requirements for the bearing capacity of pile foundations, and pile foundations develop towards large diameter and ultra-long piles. Taking the large-diameter super-long bored piles of a bridge as the engineering background, the numerical model of the pile is established based on ABAQUS finite element numerical simulation software, and 13 levels of different pile top loads are set to reveal the bearing characteristics of the large-diameter long piles, to obtain the load-settlement curve of the top of the pile, and to calculate the ultimate bearing ca-

文章引用: 张政. 大直径超长桩承载特性研究[J]. 土木工程, 2023, 12(12): 1448-1454.

DOI: 10.12677/hjce.2023.1212165

capacity of the pile. The distribution curve of pile lateral resistance and the axial force curves of pile top, pile body and pile end under different loads are analyzed to obtain the load transfer law of large diameter long pile.

Keywords

Large Diameter Piles, Load-Bearing Characteristics, Load Transfer, Numerical Simulation

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

桩基础是一种建筑基础形式,承载力高,稳定性好,适用于各种复杂地质,在工程上应用广泛,包括桥梁工程、建筑工程、海洋工程等。随着我国经济的蓬勃发展,各个行业的大型工程络绎不绝,这对于桩基础的承载力又提出了新的要求,桩基础朝着大直径、超长桩身发展。例如:上海中心大厦[1]在进行试桩时,桩端的埋深为 80 m,有效桩长 50 m。钱塘江深水域[2]的大直径钻孔灌注桩主孔直径为 2 m,最长的桩长 94.7 m。江西的湖口大桥的桩径更是达到了 5 m。虽然我国现行的各领域桩基础规范[3] [4] [5]规定了直径超过 0.8 m 为大直径桩,但随着桩基础制作工业的发展,在不同领域,大直径桩的桩径有所增长,在桥梁工程中,目前使用的桩直径一般等于或超过 2.5 m。在工程上,最常用、最可信的大直径桩承载能力测试方法是现场静载试验法[1] [6],早期的试桩的桩长比较小,对于大直径超长桩的试桩施加荷载比较低[7] [8] [9]。

虽然静载试验的结果可靠,在工程上应用广泛,但由于加载条件和工程因素的影响,静载试验结果往往过于保守,很难完全发挥出单桩的极限承载能力[10] [11]。计算机技术日益发达,计算机的计算速度也越来越快,随着大型工程的建设需求和维护需求不断提高,人为的计算难以达到要求,数值分析法应运而生,得到了长足的发展。用于岩土工程的软件越来越多,主要分为有限元软件,有限差分软件,离散元软件,边界元软件等。数值分析法的优点在于其计算速度快,涵盖范围大,通用性强,能做一些超前的工作[12]。但岩土工程和结构工程完全不同[13],相对于结构工程,岩土工程数值分析具有多用非线性分析,初始应力大,参数不易确定,本构更复杂等特点,要做好岩土类的数值分析绝非易事。

不同数值分析软件的特色不一样,FLAC3D 采用混合离散技术,对于土体的塑性计算更简便、准确[14],但其前处理模块较弱,通常情况下,FLAC3D 模型的前处理需要借用其他软件(如 ANSYS、ABAQUS、HYPERMESH 等)。高晋明[15]采用 FLAC3D 建立三维大直径桩的数值模型,用此模型模拟了静载试验,得出了桩的承载并与实际工程进行了对比,结果可靠。马雪涛[16]利用 FLAC3D 建立三维管桩数值模型,探究了不同管壁厚度对管桩的承载性能和荷载传递的影响。ABAQUS 是一种大型的有限单元软件,其前处理能力较之于 FLAC3D 要强大许多,阙逸琛[17]基于 ABAQUS,建立了复杂交互条件下的桩土模型,整个过程操作简便,结果也可靠。

本文以某桥梁大直径超长钻孔灌注桩为工程背景,采用 ABAQUS 数值模拟的方法,揭示大直径超长桩的承载特性及荷载传递规律,以此为基础为工程提出相关建议,提供参考。

2. 工程背景

以某桥梁桩基工程为背景,沿线地表基本被第四系地层覆盖,为淮北冲积平原之粉质黏土、黏土、

粉土及砂砾石土等,除低洼地有淤泥质土外,大多为粉质黏土、黏土、粉土和粉细砂,土质较好,属中~中低压缩性土。沿线的上部土层有弱膨胀性,第四系地层厚度在 20 m~110 m 左右。沿线不良地质主要为采空区、地震液化、人为坑洞、危岩、落石以及水源地附近的地面沉降。沿线煤矿采空区主要分布在位于宿州凹断褶束范围内的淮北市和宿州市一带。淮北冲积平原区的上部土层有弱膨胀性。

3. 静载试验数值模拟

借助 ABAQUS 有限元软件,以某桥梁工程某桩基工程为研究对象,建立三维模型,探究大直径超长桩的承载特性及荷载传递规律,计算出该桩的极限承载力,揭示该桩不同埋深摩阻力、轴力的分布规律。

图 1 即为所建模型示意图。

该桩总长 101 m,是超长大直径的钻孔灌注桩,为了减少运算量,采用半结构的分析方法。模型由桩和土体两种材料组成,由于桩在承受荷载的过程中会发生沉降,桩-土会产生较大的切应力,桩身土体也会因此发生较大的影响,考虑建立较大的土体模型,以避免对计算结果产生影响:模型深度 160 m,宽度取 100 m;桩的直径为 2.5 m,最深处埋深为 101 m。为了模拟真实工况,施加荷载前,需要严格约束土体模型在 X、Y 方向上的位移,底部位移也应当进行 X、Y、Z 三个方向的约束。此外,由于模型采用的是半结构对称的分析方法,还需要在对称面上定义对称约束($U_2 = 0$)。模型坐标轴位于土体的顶面,即顶面: $Z = 0$ m,底面: $Z = -160$ m。除了以上特殊位面的土体施加了约束以外,其余土体均可正常运动。

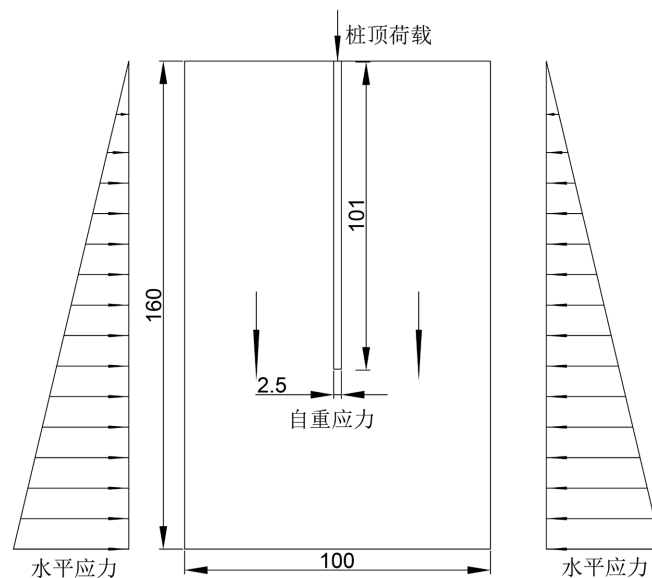


Figure 1. Schematic diagram of the numerical model

图 1. 数值模型示意图

由工程地质条件可知,桩周土均为粉质粘土和黏土,此类土体的参数变化范围比较广,在同一地区,物理参数也随着度变化而不同。选择土体物理参数时,为了简化模型,考虑折中的均一参数。剪胀角用于定义土体的体积应变,工程上没有固定的规定用于选取剪胀角,不少工程上认为剪胀角等同于内摩擦角,而实际上,土体的体积应变应当更小,即剪胀角应当大于 0,且小于内摩擦角[19]。具体的土体参数与大直径超长桩相关参数见表 1 和表 2。

Table 1. Soil parameters**表 1.** 土体参数

| 密度 | 弹性模量 | 泊松比 | 粘聚力 | 剪胀角 | 内摩擦角 |
|---------------------|--------|------|--------|-----|------|
| 2 KN/m ³ | 30 MPa | 0.29 | 25 KPa | 2° | 25° |

Table 2. Parameters related to large diameter extra-long piles**表 2.** 大直径超长桩相关参数

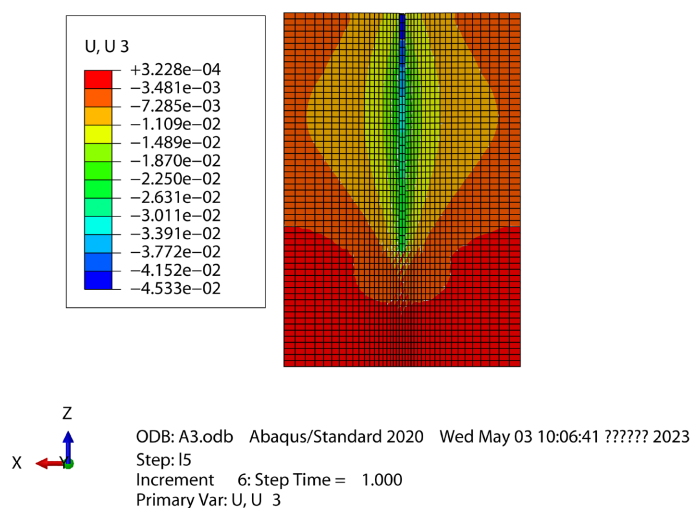
| 桩径 | 桩长 | 弹性模量 | 泊松比 | 密度 |
|-------|-------|----------|-----|-----------------------|
| 2.5 m | 101 m | 31.5 GPa | 0.5 | 2.5 KN/m ³ |

数值模拟结果

根据文献[18], 大直径长桩的桩的极限承载在 79~82 MN, 设置桩顶荷载共计 14 级, 具体如表 3 所示。模型一共 15 个分析步, 用时 658 s。在桩顶荷载的作用下, 桩、土产生相对位移, 桩发生沉降情况如图 2 所示, 图 3 为桩顶在不同级数荷载下的沉降曲线, 图 4 为桩顶、桩身和桩底部在不同桩顶荷载下的轴力, 图 5 为在 50 MN 桩顶荷载作用下的桩侧摩阻力分布曲线。

Table 3. Different pile top load settings**表 3.** 不同桩顶荷载设置情况

| 荷载级数 | 荷载大小 MN | 荷载级数 | 荷载大小 MN |
|------|---------|------|---------|
| 1 | 10 | 8 | 80 |
| 2 | 20 | 9 | 90 |
| 3 | 30 | 10 | 100 |
| 4 | 40 | 11 | 110 |
| 5 | 50 | 12 | 120 |
| 6 | 60 | 13 | 130 |
| 7 | 70 | | |

**Figure 2.** Displacement cloud of pile and soil under pile top load**图 2.** 桩、土在桩顶荷载作用下位移云图

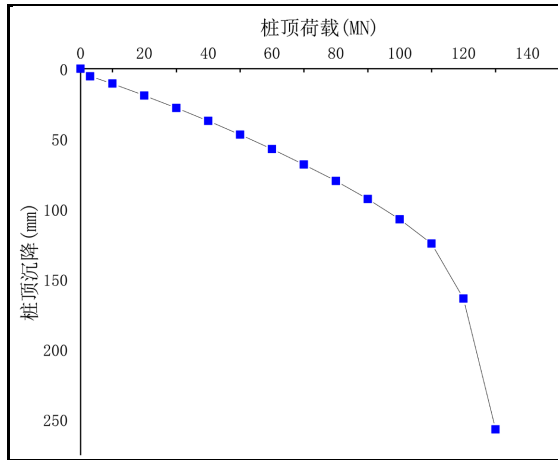


Figure 3. Pile top load-settlement curve
图 3. 桩顶荷载 - 沉降曲线

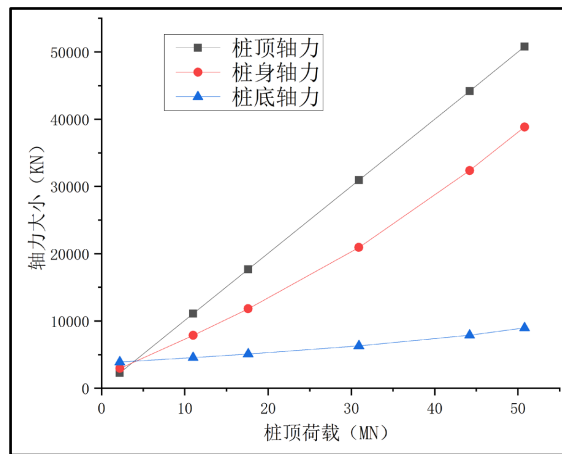


Figure 4. Axial forces of pile tops, pile bodies and pile ends under different loads
图 4. 桩顶、桩身及桩端在不同荷载作用下的轴力

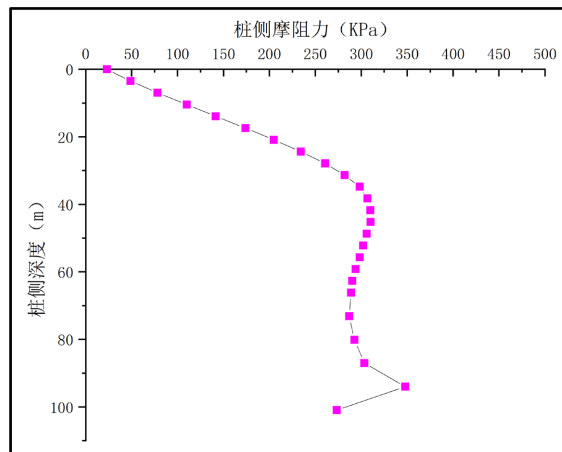


Figure 5. Distribution curve of pile side friction resistance under 50 MN pile top load
图 5. 50 MN 桩顶荷载作用下桩侧摩阻力分布曲线

由图可知, 桩在桩顶荷载的作用下发生沉降, 同时桩通过桩侧摩阻力对土体产生影响, 土体一定程度上发生变形, 离桩距离越近的土体发生的变形越大。桩的极限承载一般通过荷载 - 沉降($q-s$ 曲线)确定, 桩的沉降 - 曲线类型有两种, 曲线类型不同, 临界沉降的取值也不同。图 3 所示的荷载 - 沉降曲线即为缓降型, 根据相关资料规定[5], 大直径桩的极限沉降与其直径有关, 综合考虑后, 取桩顶沉降量为 90 mm 极限沉降, 极限承载为 84 MN。桩顶荷载由桩端阻力和桩侧阻力平衡, 当桩顶荷载较小时, 主要需要平衡的力为桩的自重, 此时桩端轴力大于桩顶轴力。随着荷载增大, 桩端阻力变化不大, 发挥占比较小, 相反桩身和桩顶的增长较大。由此可见, 从桩顶到桩端, 荷载在桩内传递过程中不断被桩侧摩擦力平衡, 到桩端时轴力增长较小, 说明桩侧摩擦力在桩承载过程中起到关键作用(在 50 MN 作用下, 桩侧摩阻力占比约为 82.4%)。桩侧摩阻力的分布呈“R”形, 由图 5 可知, 深度小于 40 m 时, 桩侧摩阻力随深度线性增加, 随后阻力大小呈下降趋势, 此时桩身摩阻力仍有发挥的余地。

4. 结论

通过 ABAQUS 有限元数值模拟, 对某桥梁大直径超长桩的承载特性和荷载传递规律进行研究, 结论如下:

1) 桩在桩顶荷载的作用下发生沉降, 引起桩周土体发生少量沉降, 施工过程中应当针对此类沉降对地基进行相关处理。根据桩的荷载 - 沉降曲线, 选取桩的极限沉降量为 90 mm, 从而得到桩的极限承载为 84 MN。

2) 从数值模拟结果可以看出, 荷载从桩顶传递到桩端的过程中, 不断被桩侧摩阻力平衡, 导致达到极限承载之前, 桩端的轴力变化很小, 此时桩端阻力并未发挥太大的作用。工程上可以采用挤扩桩等工艺提高极限荷载下的桩端阻力, 以此改善桩的承载性能。

3) 桩以桩侧摩阻力为主要承载力, 桩侧摩阻力的大小与桩 - 土摩擦系数有关, 且埋深越大, 土的有效应力越大, 从而桩侧摩阻力越大。实际工程中采用桩周土注浆等方式提高桩 - 土摩擦力, 不仅可以大大提高桩的承载性能, 也能减小桩 - 土的相对位移, 但可能一定程度上会加大地表的沉降, 需要做好应对措施。

基金项目

中国铁路上海局集团有限公司科研项目(2022178)。

参考文献

- [1] 王卫东, 吴江斌. 上海中心大厦桩型选择与试桩设计[J]. 建筑科学, 2012, 28(S1): 303-307.
- [2] 陈杰, 马学峰. 钱塘江深水域大直径钻孔灌注桩施工技术[J]. 浙江建筑, 2006(10): 43-45+61.
- [3] 中华人民共和国行业标准. JGJ94-2008. 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [4] 中华人民共和国行业标准. TB10093-2017. 铁路桥涵地基与基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [5] 中华人民共和国行业标准. JTGD63-2007. 公路桥涵地基与基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [6] 谢涛. 李子沟特大桥超大群桩基础试验研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2002.
- [7] 董武忠. 洞庭湖区大直径超长钻孔灌注桩竖向承载性状试验研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2006.
- [8] 马雪涛. 超长直径钻孔灌注桩承载性能分析[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 安徽建筑大学, 2021.
- [9] 李翔宇, 盛志强, 等. 南京金茂广场二期超大吨位桩基静载试验研究[J]. 建筑科学, 2020, 36(S1): 261-266.
- [10] 曹文昭, 杨志银. 大直径超长桩静载试验中试桩-锚桩相互影响分析[J]. 工业建筑, 2022, 52(9): 206-213.
- [11] 陈旻, 上官京灵, 等. 双护筒技术在大直径灌注桩静载试验中的应用研究[J]. 重庆建筑, 2021, 20(12): 46-48.
- [12] 廖红建, 王铁行. 岩土工程数值分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 1-4.

- [13] 龚晓南. 对岩土工程数值分析的几点思考[J]. 岩土力学, 2011, 32(2): 321-325.
- [14] 唐迪, 王琨. 浅谈岩土工程的数值分析方法[C]//北京力学会, 北京力学会第二十五届学术年会会议论文集, 北京: 中国矿业大学, 2019: 874-875.
- [15] 高晋明. 基于 FLCA3D 的大直径桩竖向承载特性分析[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- [16] 马雪涛, 翟朝娇, 等. 不同壁厚的大直径管桩承载性能数值分析[J]. 洛阳理工学院学报(自然科学版), 2020, 30(4): 43-46.
- [17] 阙逸琛. 复杂交互地层超长大直径桩竖向承载特性研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 安徽理工大学, 2022.
- [18] 宫陈, 李浩男, 等. 基于 FLAC3D 的不同类型大直径桩承载性能的数值模拟研究[C]//2022 年工业建筑学术交流会议论文集(下册), 安徽电力建设第一工程有限公司, 合肥工业大学, 广州从化环保能源公司, 2022: 339-342.
- [19] 刘俊芳, 李驰. 基于莫尔-库伦模型探讨剪胀角的取值问题[J]. 内蒙古工业大学学报(自然科学版), 2015, 34(4): 293-297.