

基于荷载传递法的桩基沉降计算与承载性能分析

朱永森¹, 吴艳²

(1. 自贡建工建设工程有限公司, 四川 自贡 643000; 2. 四川安优格建设工程有限公司, 四川 自贡 643000)

摘要: 地层由于土体颗粒结构疏松容易产生桩基成桩等质量问题,同时对桩基的承载性能也有较大影响。以自贡市富台家园项目为依托,针对现场两根试验桩开展桩基静载试验,结合理论分析方法,对地层中桩基承载性能进行研究。结果表明:现场两根桩的荷载-沉降曲线为陡降型,桩端与桩侧各自分担了部分荷载属于端承摩擦型桩。桩的极限承载力接近设计值,冗余量小,不利于结构安全,可以考虑固化地层或增加桩长。提出桩侧双折线模型和桩端双参数指数模型组成的桩基荷载-位移传递简化模型,采用 MATLAB 编程的迭代算法得到荷载-沉降曲线,发现理论计算值与试验实测值结果吻合度较高,表明此荷载-位移模型合理可行,可为类似地层的桩基承载性能研究提供参考。

关键词: 桩基; 静载试验; 荷载传递法; 沉降; 承载性能

中图分类号: TU473.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)17-0222-07

桩基础由于承载能力高、沉降小、稳定性好等特点在建筑工程中得到广泛的应用。地层由于土体颗粒结构疏松,而成桩过程多采用灌注桩的形式,但灌注桩在开挖过程中地层会应力释放与应力重分布,造成土体颗粒结构重新排列,钻孔侧壁与孔底土层松弛,从而影响桩基的承载性能。因此,开展桩基承载性能的研究为桩基工程设计和施工显得尤为重要。

目前,国内外学者通过低应变法^[1]、声波透射法^[2]、贯入度试验^[3]等现场试验方法和数值模拟^[4]、理论计算^[5]等多种手段研究了单桩极限承载性能。现场静载试验作为目前确定桩基承载力的最可靠方法,不仅能获得极限承载力,还能通过测量元件的埋设获得荷载的传递规律、桩身位移的变化规律,更加有利于清晰地认识桩基承载变形机理。周俊鹏等^[6]通过大型现场试验和数值模拟的方法研究了上拔-水平联合荷载对桩基承载性能的影响。乔世范等^[7]依托广州南沙港铁路隧道明挖深基坑项目,采用现场试验与理论分析的方法,研究了深厚淤泥软土地层中桩基的承载力特性。白晓宇等^[8]、Gao 等^[9]、郭健等^[10]研究分析了不同长径比、不同施工工艺与不同截面桩基础的承载特性。由此可见,现场试验仍然作为桩基承载性能研究的有效手段,备受工程界的青睐;但现场试验成本高、工作量大、不易得到有效的试验数据。因此,部分学者采

用理论分析的方法研究桩基荷载-沉降特性与桩-土荷载传递机理。王金淑等^[11]、陈黎等^[12]分别改进了 Mindlin 位移解的方法计算求解了桩基沉降以及桩基附加应力。马文杰等^[13]基于一种新型的自锚试验获得了桩基承载力数据,提出了对数荷载传递模型,利用迭代算法求解了桩基承载性状,证明了通过桩土界面荷载传递法能较好地桩基 $Q-S$ (荷载-沉降)曲线向静载试验结果进行转化。翟恩地等^[14]基于现有的桩土荷载传递曲线使用耦合合法以海上风电项目的大直径钢管桩基为算例进行了分析,验证了耦合合法的合理性,并将其计算结果与仅考虑横向非线性弹簧作用的 $p-y$ (内力-位移)曲线法的计算结果进行了对比分析。

综合上述文献分析,桩基的承载变形机理需要进一步厘清,桩端成渣与桩侧土软化特性等问题需要进一步考虑,使所建立的荷载传递模型的适应性更强。以自贡市富台家园项目为依托,通过现场桩基静载试验,研究地层中桩基的承载性能与荷载传递机理,获取理论计算相关参数,基于荷载传递法对地层桩基的承载性状进行研究,以为自贡地区桩基工程设计提供借鉴意义。

1 工程概况

项目位于四川省自贡市自流井区学院街道,地处汇东路以北、内六铁路以南、富台山隧道以西、汇

收稿日期: 2024-04-07

作者简介: 朱永森(1986—),男,四川泸县人,工程师,研究方向为施工技术;吴艳(1992—),女,四川自贡人,工程师,研究方向为施工技术。

柴口隧道以东。项目区域位置如图 1 所示。场地规划总用地面积约 22 639 m²,总建筑面积约 54 805.24 m²,由公寓、酒店、商业及地下室组成,其中公寓及酒店为地上为高层建筑,商业为 2 层的低层建筑,地下室为地下 1 层、2 层。

项目位于自贡市,属亚热带湿润季风气候,雨量充沛,但分配不均,云雾多,霜雪少,日照少,无霜期长。拟建场地原始地貌为剥蚀低丘地貌,地处斜坡、冲沟区域,斜坡坡脚为一小河,周边工程建设对其进行过回填。根据地勘资料试验场地周边土层主要参数见表 1。

2 现场静载试验

2.1 试验方案设计

此次试验设置了 2 根桩径 1 m、桩身长 15 m、混凝土强度等级为 C30 的钢筋混凝土灌注桩,试验桩桩身配筋为 20 根直径 22 mm 的 HRB400 钢筋,箍筋为 HPB300 的直径 10 mm@100/150,加劲筋为 HRB400 直径 22 mm@2000,混凝土桩纵向钢筋保护层厚度 50 mm。桩头按照规范规定凿除桩顶破碎层和软弱混凝土,对桩头进行钢板围裹以防试验过程中桩头破坏。采用堆载反力装置开展单桩静载试验[图 2(a)],试验中一台千斤顶施加荷载,钢梁与上覆荷载为反力装置提供反力,沉降位移采用 4 只 FP-50 位移传感器测得,静载试验荷载与时间数据由 Y-LINK 静力载荷测试系统自动采集存储。

为测得桩身轴力与桩侧摩阻力,在试验桩主应

力筋上沿深度方向从桩顶至桩底每隔 1.6 m 布置一组(同一水平截面 3 个)钢筋应力计,离桩底最近一组与上一组距离为 2 m,每根桩共计 24 个钢筋应力计,桩身配筋与钢筋应力计埋设示意图如图 2(b)所示,钢筋应力计数据由 DM-YB1840 动静态应变测试系统自动采集获得。

2.2 试验加载

试验前在试压表面用粗砂找平,其厚度不超过 20 mm;放上承压板,安装加荷。试验采用慢速维持荷载法进行分级加载与分级卸荷,其操作过程按照《建筑基桩检测技术规范》(JGJ 106—2014)^[15]的有关规定执行。每级加载量为设计单桩承载力特征值 2 倍的 1/10,第一级按 2 倍分级荷载加载。每级荷载施加后第 5、15、30、45、60 min 观测一次读数,以后每 30 min 测读一次。当每 1 h 的沉降不超过 0.1 mm,并连续出现两次(由 1.5 h 内连续 3 次观测值计算),认为已达到相对稳定,可加下一级荷载。当桩的沉降量为前一级沉降量的 5 倍且桩顶总沉降量超过 40 mm,或桩的沉降量大于前一级沉降量的 2 倍,且经 24 h 尚未达到相对稳定时终止加载。卸荷时每级卸荷值是加载值的 2 倍。

3 试验结果分析

3.1 荷载-沉降曲线分析

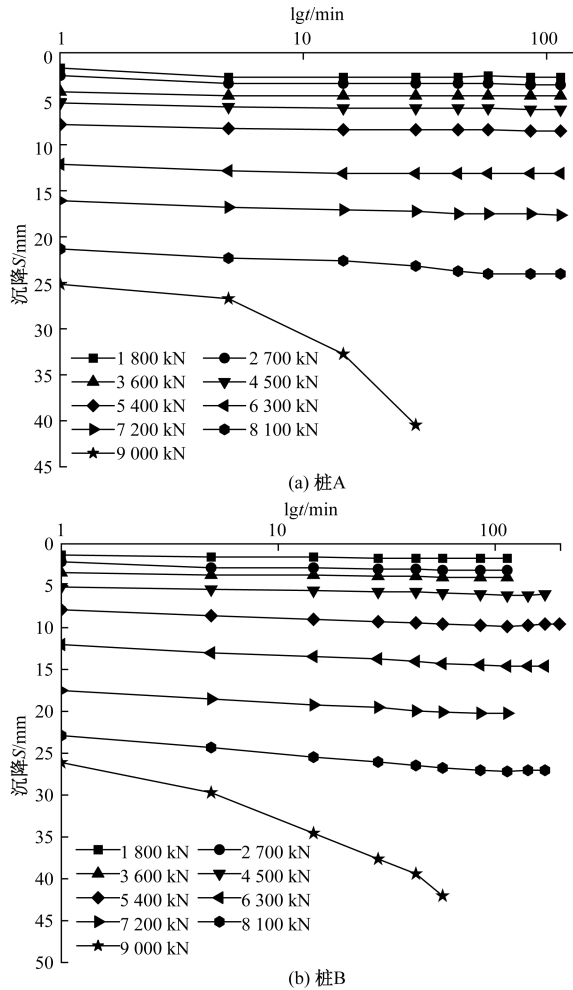
根据静载试验结果数据,绘制出各桩基础的荷载-沉降(Q-S)曲线(图 3)与各级荷载作用下桩顶沉降量与沉降时间之间的关系(S-lgt)曲线(图 4)。



图 1 项目区域位置

表 1 土层主要参数

地层	层厚/m	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	弹性模量 E/MPa
人工填土层(Q_4^{ml})-杂填土	0.5	18.5	3	20	3.5
第四系全新统残坡积粉质黏土($Q_4^{\text{dl+el}}$)-软塑粉质黏土② ₁	1.3	18.2	10	9	2.8
第四系全新统残坡积粉质黏土($Q_4^{\text{dl+el}}$)-可塑粉质黏土② ₂	0.8	18.8	14	12	4.0
侏罗系中统沙溪庙组泥岩(J_2s)-强风化泥岩③ ₁	0.7	23.5	35	20	12
侏罗系中统沙溪庙组泥岩(J_2s)-中风化泥岩③ ₂	4.6	24.0	85	24	13
侏罗系中统沙溪庙组砂岩(J_2s)-强风化砂岩④ ₁	3.4	24.0	40	22	16
侏罗系中统沙溪庙组砂岩(J_2s)-中风化砂岩④ ₂	10.2	24.5	140	30	22

图4 桩顶沉降量与沉降时间关系($S-lgt$)曲线

式中: σ_{si} 为第 i 个截面钢筋所受到的内力值; K 为标定系数; ϵ_i 为同一截面上钢筋应力计的应变平均值; σ_{ci} 为第 i 个截面混凝土受到的内力值; E_s 、 E_c 分别为钢筋和混凝土弹性模量; Q_i 为第 i 个截面桩身轴力; A_{si} 、 A_{ci} 分别为钢筋和混凝土的截面面积。

根据试验结果与式(1), 计算得到桩 A 与桩 B 在不同荷载等级下随桩深变化的轴力值, 绘制成轴力曲线, 如图 5 所示。

由图 5 可知, 在加载初期桩身轴力较小, 随着荷载等级的提高, 桩身轴力与桩端阻力也相应增大, 桩端阻力逐渐发挥; 在最大荷载时, 桩 A、桩 B 的桩端阻力分别为 2 669.74、2 963.92 kN。不同荷载等级下, 桩身轴力的曲线斜率不同; 随着荷载等级的提高, 桩身轴力曲线斜率越小, 桩侧摩阻力发挥越小。同一竖向荷载等级下, 桩身轴力沿深度方向上部轴力衰减变化较小, 桩身下部轴力衰减较快, 并在素填土与粉质黏土地层交界面附近数值变化较大, 迅速发生衰减。

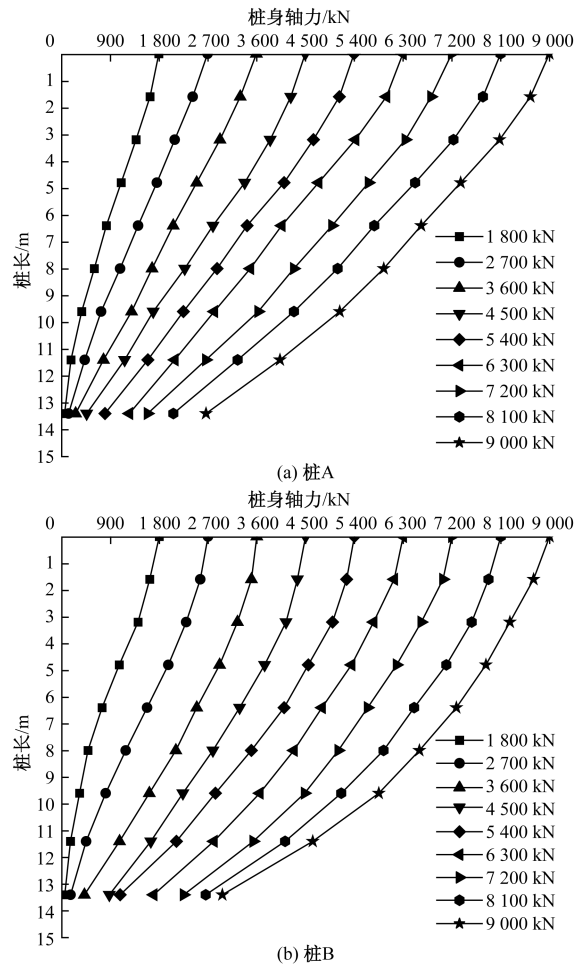


图5 桩身轴力

根据静力平衡原理, 不考虑桩身自重影响, 通过上述桩身轴力的变化值推算求得桩侧摩阻力值, 即

$$q_{si} = \frac{Q_i - Q_{i+1}}{ul_i} \quad (2)$$

式中: q_{si} 为第 i 断面与 $i+1$ 断面间侧阻力; u 为桩身周长; l_i 为第 i 断面与第 $i+1$ 断面之间的桩长。

根据式(2)获得桩 A、桩 B 在不同荷载等级下随深度分布的桩身侧摩阻力分布曲线, 如图 6 所示。

由图 6 可知, 当施加荷载较小时, 桩身侧摩阻力发挥较为均匀, 桩身两端小中间大, 侧摩阻力分布曲线呈现半弧形。随着荷载等级的增大, 侧阻出现先增大后减小、再减小最后增大的波动现象且峰值逐渐增大的同时往桩身下部传递, 说明桩端土体对桩侧摩阻力存在着强化效应。如桩 A 在 8 100 kN 荷载等级下, 第 1 次最大侧摩阻力出现在埋深 -6.4 m 处, 大小为 149.98 kPa; 再随之减小, 第 2 次最大侧摩阻力出现在埋深 -13.4 m, 大小为 188.79 kPa。桩 B 与桩 A 的侧摩阻力荷载等级较低时, 桩侧摩阻力分布规律一致; 但在较高荷载等级时两者的分布规律有所差别,

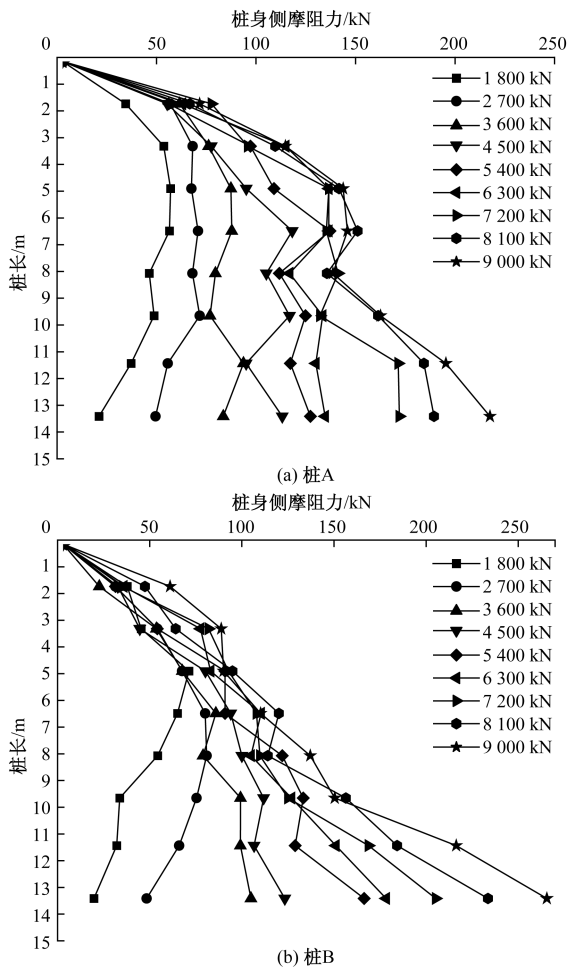


图6 桩身侧摩阻力

桩B侧摩阻力沿着埋深几乎是一直增大,最大值出现在13.4 m埋深位置。由此可见,桩侧摩阻力的发挥是一个从上到下,从小到大地逐渐变化过程^[6],并且在地层中由于土体颗粒结构疏松与桩基接触的摩擦系数较小使得桩基侧摩阻力的发挥效果不是很好,在后期设计过程中应考虑压力注浆或压实地层等方法,提高地层与桩基之间的摩擦效应,从而提高侧摩阻力的发挥效应。

4 基于荷载传递法单桩沉降计算

4.1 桩土相对位移分析

依据上述桩身轴力与桩身侧摩阻力的传力特征分析,绘制得到桩侧摩阻力与桩土相对位移曲线(图7)。为方便表述将每根桩基础同一标高位置的钢筋应力计定义为截面,从桩顶至桩端依次为截面1~截面8。由图7可知,桩侧摩阻力随着桩土相对位移增大而增大,桩顶施加荷载等级越大桩身侧摩阻力与桩土相对位移越大。桩A与桩B在第1个截面的极限侧摩阻力分别为69.63、58.73 kPa,其对应的桩土相对位移分别为32.45、36.45 mm;

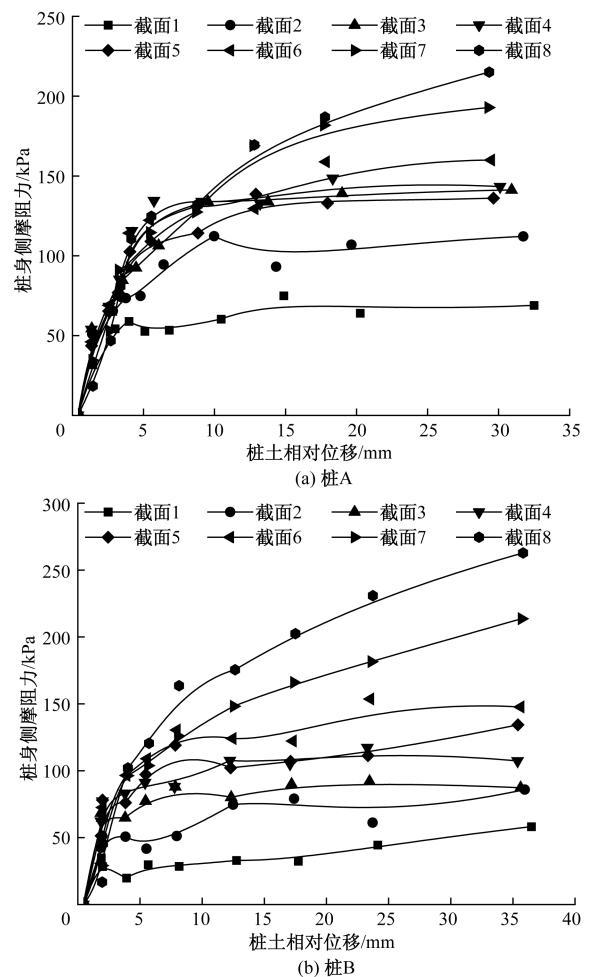


图7 桩土相对位移

第2个截面极限侧摩阻力与桩土相对位移分别为113.26、86.80 kPa, 31.7、35.91 mm。在第1个截面与第2个截面侧摩阻力的增幅较大,表明在相同荷载等级下桩土相对位移变化较明显,由于第1层土是素填土与第2层粉质黏土层之间性质不同导致截面桩土相对位移变化,也使桩身侧摩阻力明显增大。同理,在第6、7、8截面桩身侧摩阻力发生明显的增幅波动也是由于在这些截面位置地层改变,粉质黏土层逐渐向泥岩层过渡。

将图7的桩身侧摩阻力与桩土相对位移曲线进行拟合处理发现,桩侧摩阻力与桩身沉降关系用陈龙珠双折线模型(式3)能较好地拟合,其每个截面的拟合系数均达到了0.85以上。

$$\tau_z = \begin{cases} k_1 S, & S \leq S_u \\ k_1 S_u + k_2 (S - S_u), & S > S_u \end{cases} \quad (3)$$

式中: τ_z 为桩身Z处的桩侧摩阻力; k_1 、 k_2 为桩周土弹性极限位移前后的抗剪刚度系数; S_u 桩周土弹性极限位移。图8为A、B两根桩的桩端阻力与桩端位移关系曲线。由图8可知,A、B两根桩在前3级

荷载作用下桩端阻力较小,随着施加荷载的增大而增大,在极限荷载下,桩 A、B 桩端阻力占桩顶荷载的比值分别为 29.66%、32.93%,均大于 15%^[17],表明桩端阻力与侧摩阻力共同发挥作用抵挡桩基础产生位移,表现出端承摩擦桩的特征。

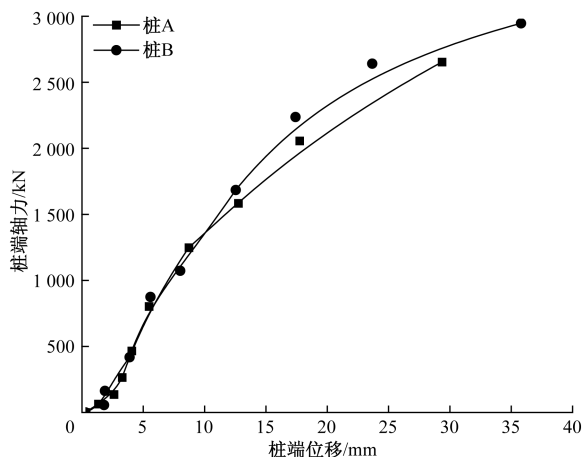


图 8 桩端阻力与桩端位移关系曲线

采用 1stop 拟合软件将图 8 数据进行归一化处理,桩端轴力与桩端位移关系曲线呈双参数指数模型:

$$Q_z = \alpha[1 - e^{-\beta S_c(Z)}] \quad (4)$$

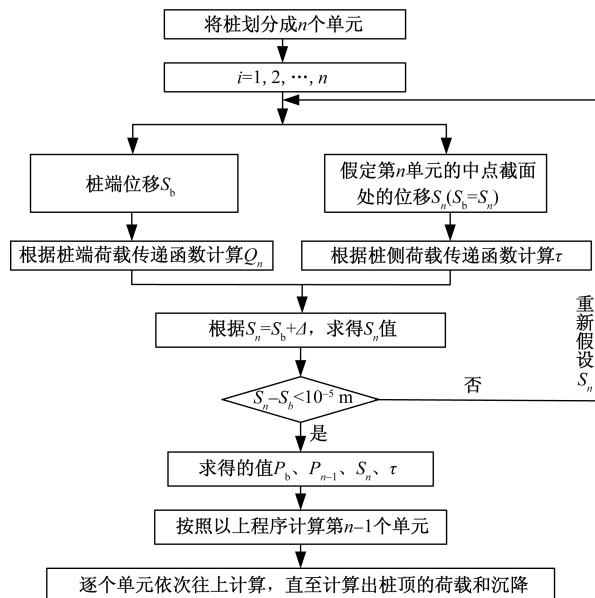
式中: Q_z 为桩身 Z 处的桩端阻力; $S_c(Z)$ 为 Z 位置处的桩土相对位移量; α 、 β 为桩端轴力的荷载传递参数。

4.2 地层单桩沉降计算

利用荷载传递法求解单桩沉降的基本思想是将桩体单元进行等距离离散化,通过现场试验数据拟合得出荷载传递函数,在此基础上建立静力平衡方程和位移协调方程,最终使用试验数据获得桩端阻力陈龙珠双折线函数和桩侧摩阻力双参数指数函数,采用 MATLAB 编程进行迭代计算获得单元表面轴力及桩侧摩阻力,其具体迭代计算流程如图 9 所示。

根据图 9 计算流程对 A、B 两根桩进行迭代计算,获得基于荷载传递法的理论计算荷载与位移。将荷载传递法的理论计算值与现场实测荷载-沉降曲线绘制图 10 所示的对比曲线。

由图 10 可知:①所计算得到的桩基荷载-沉降曲线与试验实测基本一致呈都降型,但是较试验陡降趋势有所减缓;理论值与实测值桩顶荷载最大误差为 16.78%,桩顶沉降位移的最大误差为 19.07%,分析其原因可能是试验现场条件导致,也可能是理论模型参数取值导致。②在前期 5 级加载时,理论与实测曲线线性变化吻合度较好,表明前期桩端承受荷载的作用不明显,主要由桩侧摩阻力承担;在第 5 级荷载之后实测曲线与理论曲线个别



P_b 为桩端荷载; P_{n-1} 为第 $n-1$ 个桩单元的桩端荷载; τ 为桩侧摩阻力; Δ 为两个桩单元之间的位移增量; Q_n 为第 n 个桩单元的桩端阻力

图 9 单桩沉降计算流程

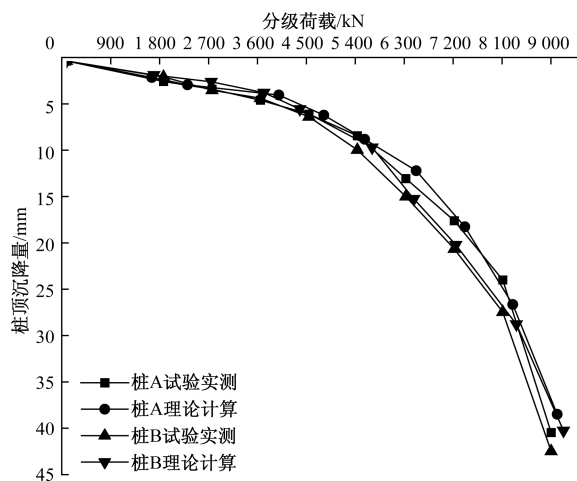


图 10 理论与实测单桩荷载-沉降曲线

荷载等级下数值出现偏差,但整体变化趋势基本吻合。随着荷载等级的增加,由于桩土发生相对位移,同时也改变了地层砂粒结构的分布使地层抵抗桩身滑移的侧摩阻力增加较小,此时部分荷载由桩端承担,桩基础呈现出端承摩擦桩的特征属于典型的端承摩擦桩。③实测值与理论计算值基本吻合,说明在此项目的地层中,桩端阻力的双折线函数和桩侧摩阻力的双参数指数函数能较好地反映荷载在土体中的传力情况,提出的传力模型与荷载传递法计算地层单桩位移的方法是可行的。

5 结论及建议

(1) 桩 A、桩 B 现场静载试验荷载-沉降曲线表现为陡降型,桩端荷载承担比分别为 29.66%、32.93%,表现为端承摩擦桩的承载性状。试验结果表明该桩

基设计存在的冗余量较小,接近临界值,能基本满足要求,建议后期加强土层固化或增加桩长。

(2)在同一级荷载等级下,桩身轴力与桩身侧摩阻力异步发挥是从上到下、从小到大一个逐渐变化的过程。在不同土层交界处桩身轴力曲线斜率发生变化,轴力衰减明显。桩侧摩阻力在桩身中部位置发挥最大,再由于桩端土体对桩侧摩阻力有着强化效应,桩侧摩阻力分布曲线沿着深度方向出现两个峰值。

(3)考虑桩侧摩阻力、桩端阻力与桩土相对位移变化,提出了一种桩侧双折线模型+桩端双参数指数模型组成的桩基荷载-位移传递简化模型,基于荷载传递法采用 MATLAB 进行程序语言编写,迭代计算获得桩基荷载-沉降曲线。计算值与试验值荷载最大相对误差为 16.78%,位移最大相对误差为 19.07%,表明理论计算选取的荷载传递函数是合理的。另外,由于试验误差与理论函数参数取值容易引起误差,后续研究会进一步提高精度。

参考文献

- [1] 孙超,汪鹏,郭浩天. 管桩竖向裂缝发生机理及防治措施综述[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(2): 455-464.
- [2] 韩雨,杨伟. 声波透射法在桥梁桩基检测中的案例分析[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(7): 1617-1619.
- [3] CAI G, LIU S, TONG L, et al. Assessment of direct CPT and CPTU methods for predicting the ultimate bearing capacity of single piles[J]. Engineering Geology, 2009, 104(3/4): 211-222.
- [4] 孔德森,郭文婷,吴艳崇. 海上风机复合单桩基础水平承载力数值分析[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(20): 8350-8355.
- [5] 王腾,卢淑芹,陈金霞,等. 基于多段荷载传递法的桩基荷载-沉降解析解[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2015, 31(3): 442-448.
- [6] 周俊鹏,黄雪峰,张吉禄,等. 上拔、水平联合荷载对桩基承载性能影响的现场试验及数值模拟[J]. 中国公路学报, 2021, 34(3): 113-123.
- [7] 乔世范,蔡子勇,檀俊坤,等. 深厚淤泥软土地层桩基承载力性状研究[J]. 建筑结构, 2022, 52(S1): 2729-2735.
- [8] 白晓宇,张明义,朱磊,等. 强风化花岗岩中嵌岩短桩承载特征原位试验与有限元分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(2): 512-524.
- [9] GAO G, GAO M, CHEN Q, et al. Field load testing study of vertical bearing behavior of a large diameter belled cast-in-place pile [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019, 23(5): 2009-2016.
- [10] 郭健,王皓,骆光杰,等. 海上风机变径单桩基础水平承载特性数值分析[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(9): 3658-3664.
- [11] 王金淑,吴光,潘岳,等. 基于改进 Mindlin 解的自平衡试桩基底沉降计算[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(S1): 92-99.
- [12] 陈黎,陈超然,周志军,等. 黄土地区旋扩灌注桩附加应力分布及沉降计算[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(16): 6848-6856.
- [13] 马文杰,王旭,王炳龙,等. 基于桩土界面荷载传递的荷载-沉降曲线转化研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(S1): 41-46.
- [14] 翟恩地,石世刚,胡中波,等. 基于荷载传递曲线的大直径钢管桩水平受力特性分析方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(2): 365-375.
- [15] 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.
- [16] 辛公锋,张忠苗,夏唐代,等. 高荷载水平下超长桩承载性状试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005(13): 2397-2402.
- [17] ZHAO B, WANG X, YANG M, et al. Experimental study on static load of large-diameter piles in nonuniform gravel soil[J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 2020: 1-15.

Settlement Calculation and Load Bearing Performance Analysis of Pile Foundation Based on Load Transfer Method

ZHU Yongsen¹, WU Yan²

(1. Zigong Construction Engineering Co., Ltd., Zigong 643000, Sichuan, China;

2. Anyouge Construction Engineering Co., Ltd., Zigong 643000, Sichuan, China)

Abstract: The loose grain structure of the ground is easy to produce pile formation and other quality problems, and also has a great influence on the bearing performance of pile foundation. Based on the project of Futai Home in Zigong City, the static load test of pile foundation was carried out for two test piles on site, and the bearing capacity of pile foundation in strata was studied by theoretical analysis. The results show that the load-settlement curves of the two piles are of steep drop type, and the pile ends and pile sides share part of the load respectively. The ultimate bearing capacity value of pile is close to the design value, and the redundancy is not conducive to the structural safety, so it can be considered to solidify the sand stratum or increase the pile length. A simplified load-displacement transfer model of pile foundation composed of double-fold line model on pile side and double-parameter exponential model on pile end is proposed. The load-settlement curve is obtained by iterative algorithm programmed by MATLAB. It is found that the theoretical calculated value is in good agreement with the experimental value, indicating that this load-displacement model is reasonable and feasible which can provides a reference for the research of bearing capacity of pile foundation in similar sand stratum.

Keywords: pile foundation; static load test; load transfer method; sedimentation; load-carrying performance