



大直径PHC桩竖向承载特性数值模拟研究

桑登峰, 谭德银, 赵冉

(中交四航工程研究院有限公司 水工构造物耐久性技术交通行业重点实验室, 广东 广州 510230)

摘要: 以珠海高栏港码头结构为工程背景, 对码头的大直径PHC桩的数值模拟技术和承载特性进行研究。首先采用ABAQUS进行数值模拟, 并将数值模拟结果与试验结果进行对比分析, 验证了有限元分析的可行性, 然后通过桩径、桩长, 桩侧土和桩端土等一系列参数的变化, 探讨这些参数对PHC桩 $Q-S$ 曲线的影响。结果表明, 有限元计算出的位移比实测结果高出2%~20%, 桩长超过50 m的PHC桩属于超长桩。

关键词: 大直径PHC桩; 竖向抗压; 现场试验; 数字模拟; 超长桩

中图分类号: TU 473.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)01-0168-05

Numerical simulation on vertical bearing capacity characteristics of large-diameter PHC pipe pile

SANG Deng-feng, TAN De-yin, ZHAO Ran

(Key Laboratory of Harbor & Marine Structure Durability Technology,

CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

Abstract: In order to study the numerical simulation techniques and vertical capacity characteristics of large-diameter PHC pipe pile, based on high-piled wharf of Zhuhai Gaolan port, we conduct the numerical simulation on large-diameter PHC pipe piles of the wharf by ABAQUS, the result of which is validated by comparing with that by the field test. Then we study the vertical compression $Q-S$ curves of PHC pile through changing the parameters of pile diameter, pile length, soil of pile shaft and pile toe etc. The results show that the displacement value of numerical simulation is about 2% to 20% smaller than that of the field test in the loading process, and the length of pile which is larger than 50 m belongs to super long pile.

Key words: large-diameter PHC pipe pile; vertical compression; field test; numerical simulation; super long pile

大直径PHC管桩因其桩身质量可靠、适应性强、造价经济等优点使其在港口码头结构中得到了广泛的应用。从20世纪末至今, 大量学者也对其进行了深入的研究。陈春雷等^[1]对PHC管桩施工进入厚粉砂土层中的施工控制进行研究, 发现总锤击数偏高, 桩身贯入困难, 易出现桩身破坏, 建议采用“重锤低击”的方式施打。邢皓枫等^[2]进行了PHC管桩沉桩效应的测试和分析, 发现沉桩锤击数与地基土性质有很大相关性, 桩壁越薄其土塞效应越明显, 在桩体承载力计算时忽略土

塞效应是很不经济的; 沉桩过程产生很大的挤土效应不仅产生超孔隙水压力, 而且随孔压消散, 地基土得到密实、消除或降低液化性, 其侧摩阻力可提高80%以上, 有利于桩体强度的发挥。王春盛^[3]通过3根试验桩, 实测PHC管桩受荷过程的桩侧摩阻力和桩端阻力, 分析了PHC管桩的荷载传递过程及承载力的发挥过程。吕黄等^[4]对4组大直径PHC桩的竖向静载进行试验, 通过桩身预埋的应变式钢筋计测试桩身承载力分布情况。蔡健等^[5-8]通过桩基静载试验和高应变动力测试试验,

收稿日期: 2013-05-22

作者简介: 桑登峰(1983—), 男, 硕士, 工程师, 从事水运工程检测、评估与维修加固的研究。

对深厚软土地基中超长PHC管桩的承载性状进行了系统的研究。阳吉宝^[9-10]利用解析法和荷载传递法对超长桩的荷载传递机理从理论上做了较为全面的分析,并对极限承载力及各种桩长的确定作了讨论。

从上述研究可以看出,关于大直径PHC管桩的研究大都集中在沉桩控制和承载能力两个方面,这是由于在复杂的工程地质条件下,准确把握沉桩控制标准和承载特性对工程安全意义重大。目前实际工程中桩基承载力检测的常用的方法有静载试验法和高应变法,其中静载试验是确定单桩轴向承载力及其沉降特性的最直接也是最可靠的方法。静载试验费用高、工期长,采用数值模拟分析可解决这一难题,但静载试验的数值模拟需综合考虑桩身性质、土的性质及桩土共同作用等问题,数值模拟结果往往难以达到预期目的。为了研究大直径PHC桩的承载力特性,特别是新近推广的直径1 400 mm的PHC的承载特性,本文从数值分析和现场试验两个方面对大直径PHC桩的承载力特性进行了系统研究。首先采用通用有限元软件ABAQUS对试验桩进行建模,对比试验结果和数字模拟结果,验证理论模型,然后研究桩长、桩径、桩身刚度,桩侧土性质和桩端土性质等参数变化对桩基承载力特性的影响。进一步明确了大直径PHC桩的竖向承载力特性。

1 本构模型

1.1 土的本构模型

实际工程中遇到的土及其受荷条件差异较大,很难提出一种满足所有土质所要求的广义的应力应变关系,故通常用理想化的地基模型来模拟实际的土性态。本文计算时假定土体的变形由线弹性阶段变形和非线性阶段变形组成,线弹性阶段采用理想弹性模型,非线性阶段选用Mohr-Coulomb模型。ABAQUS中提供的Mohr-Coulomb模型假定作用在破坏面上的应力是处于最大的主应力圆上,也就是说可以用 σ_3 和 σ_1 为直径的圆,与中间应力 σ_2 无关。Mohr-Coulomb模型屈服准则假定当土体任何点的剪应力达到某个值时破坏发生,

考虑了正应力的最大主剪应力屈服理论,在 τ - σ 坐标系中,其屈服或破坏线见图1,限于篇幅,仅绘出黏性土的极限平衡应力圆;无黏性土的 c 值为

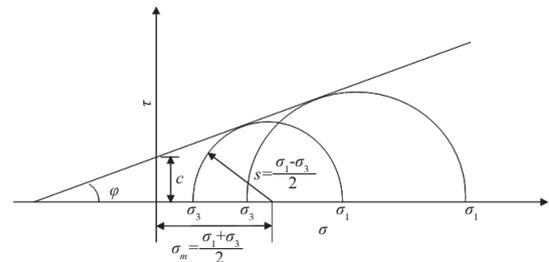


图1 τ - σ 空间的Mohr-Coulomb准则

零,可参照图1绘出。

1.2 PHC桩的本构模型

PHC桩采用C80混凝土,其轴心抗压强度为37.5 MPa,弹性模量为 3.8×10^4 MPa。在模型中,桩土的弹性模量相差两个数量级以上,因此在工作荷载作用下,桩身一般处于弹性阶段,但为计算的精确性,建模时考虑了塑性阶段的本构关系。

ABAQUS提供了3种混凝土本构模型:弥散裂纹混凝土模型(Concrete smeared crack model)、混凝土损伤塑性模型(Concrete damaged plasticity)及混凝土裂纹模型(Cracking model for concrete)。本文选用混凝土损伤塑性模型(简称CDP模型)。CDP模型处理塑性变形时没有裂纹的概念,与弥散裂纹模型相比,具有一定的优越性,它可以用于单向加载、循环加载以及动态加载等场合,具有较好的收敛性。

在弹性阶段,该模型采用线弹性模型对材料的力学性能进行描述。计算时可以将混凝土看成弹性均质材料,用广义胡克定律可将本构关系表达为张量形式:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (1)$$

式中: C_{ijkl} 为材料常数,为一四阶张量,假定材料为各向均质时,可用两个常数 λ 和 μ 来表达, λ 和 μ 称为Lame常数, σ_{ij} 与 ε_{kl} 分别为应力与应变张量。

在塑性阶段,CDP模型损伤后的弹性模量可以表示为损伤因子 d 和初始无损弹性模量的关系式:

$$E = (1-d)E_0 \quad (2)$$

式中: E_0 为初始(无损)弹性模量; d 为损伤因子,

ABAQUS 假定

$$(1-d)=(1-s_d d_c)(1-s_c d_t) \quad (3)$$

式中： d_t 应力状态变量； d_c 为单轴拉压损伤变量；在单轴循环荷载状态下， s_t, s_c 分别为与应力反向有关的刚度恢复应力状态的函数,用以下两个方程定义:

$$\begin{cases} s_t = 1 - w_t r^*(\sigma_{11}) & 0 \leq w_t \leq 1 \\ s_c = 1 - w_c [1 - r^*(\sigma_{11})] & 0 \leq w_c \leq 1 \end{cases} \quad (4)$$

式中： $r^*(\sigma_{11}) = \begin{cases} 1 & \sigma_{11} > 0 \\ 0 & \sigma_{11} < 0 \end{cases}$

1.3 桩土接触作用

桩与土的接触问题是一个高度非线性行为，处理其接触问题时需要确定桩土接触区域、接触面间的接触状态及接触行为的本构模型。本文计算桩土接触区域以及接触面间的接触状态选用面面接触(surface to surface contact)，接触面选用有限滑移 (finite sliding)模型，允许两个接触面之间可以有任意的相对滑动。

对于法线作用，采用“硬接触”来模拟。这种接触方式假定桩土间接触压力大于零时就存在接触约束，接触压力为零或负值时，两者表面分开，约束移除，通过接触面间隙“开”和“闭”控制表面上的接触压力，可较好地模拟桩与土体之间可能发生的脱离。

对于切向作用，接触面切向选用库伦摩擦模型(Penalty)，采用摩擦系数 μ 来表征在两个表面间

的切向摩擦行为。库仑摩擦的计算公式为：

$$\tau = \mu P \quad (5)$$

式中： τ 是临界切向力； μ 是摩擦系数； p 是法向接触压强 (CPRESS)。在切向力达到临界切应力之前，摩擦面之间不会发生相对滑动。

2 工程实例分析

2.1 土层参数

各土层参数采用《珠海高栏港区集装箱码头二期工程地质勘查报告》。文中仅列出S1桩位各土层的工程性状、土层厚度及主要参数，见图2和

	-0.7 m (泥面)
④ ₃ 中粗砂	-13.4 m
② ₄ 细砂	-16.9 m
③黏土	-21.3 m
② ₄ 细砂	-28.8 m
④黏土	-32.7 m
④ ₃ 中粗砂	-33.7 m
④黏土	-34.2 m
⑤ ₂ 粗砂	-36.1 m
④黏土	-38.5 m
⑤ ₂ 粗砂	-42.1 m
⑧ ₁ 全风化岩	-57.2 m

图2 S1桩 (珠海) 各土层分布及其厚度

表1 S1桩 (珠海) 各土层的工程性状及主要参数

土层编号	土层名称	状态	压缩模量/MPa	摩擦系数	摩擦角/(°)	粘聚力/kPa	泊松比	密度/(g·cm ⁻³)
④ ₃	中粗砂	中密	15.0	0.50	28	0	0.26	1.95
② ₄	细砂	中密	13.3	0.45	30	0.04	0.27	1.95
③	黏土	可塑-硬塑	5.9	0.30	12	40	0.28	1.72
② ₄	细砂	松散	6.3	0.35	24	0.02	0.27	1.95
④	黏土	可塑	6.8	0.25	15	35	0.30	1.68
④ ₃	中粗砂	稍密	13.3	0.45	30	0.03	0.27	1.95
④	黏土	可塑	6.8	0.25	15	35	0.30	1.68
⑤ ₂	粗砂	松散	6.3	0.35	24	0.02	0.27	1.95
④	黏土	硬塑	7.5	0.47	16	0.04	0.30	1.95
⑤	粗砂	密实	15.0	0.50	30	0.04	0.25	2.05
⑧ ₁	全风化岩		60.0	0.70	44		0.25	2.81

表1。其中, -0.7 ~ -13.4 m为淤泥置换中粗砂。

2.2 有限元计算与现场试验对比分析

为了验证本构模型和土层参数取值的可靠性, 采用有限元软件ABAQUS对高桩码头的PHC桩静载试验进行模拟分析, 并与现场压桩静载试验实测值进行比较, 有限元分析与现场静载实测结

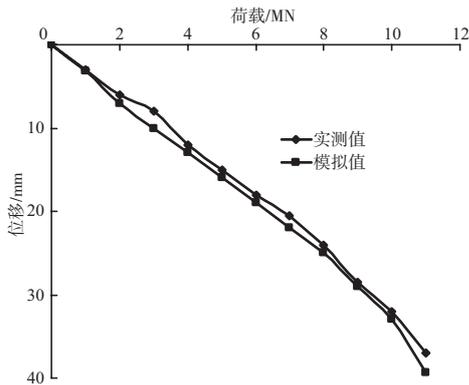


图3 静载实测和有限元模拟Q-S曲线对比

果的比较见图3。

从图3可以看出, 有限元计算出的位移比实测结果高出2% ~ 20%, 这是由于打桩引起的附加应力和土的挤密都会有效提高桩基承载力和降低桩顶位移, 而有限元分析没有考虑这些因素。理论分析结果相对于实测值偏小, 可见采用ABAQUS对PHC桩在竖向荷载作用下的有限元模拟结果较为准确, 采用理论数值模拟来控制桩基承载力和桩顶沉降能满足现实设计要求。可以作为桩土共同作用的数值方法来对PHC桩的承载力特性进行定性和定量分析。

3 竖向抗压承载特性分析

桩的Q-S曲线, 即桩的荷载-沉降关系是桩受力特征的宏观表现。研究桩的Q-S曲线特征是揭示桩抗压承载特性的重要途径之一。

3.1 桩长对Q-S曲线的影响

直径为1 400 mm的超大直径PHC桩的桩顶荷载-位移曲线见图4。

由图4可知, 随着桩长的增大, 桩顶荷载-位移曲线的拐点逐渐下移, 桩身的极限承载力增大; 但当桩长超过50 m时, 桩顶沉降达到40 mm, 而桩顶荷载-位移曲线尚未出现拐点, 桩身承载力

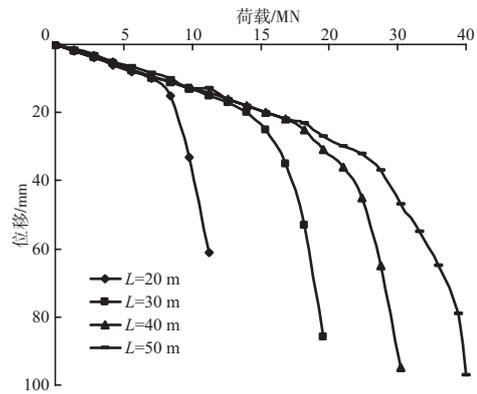


图4 桩长与桩顶Q-S的关系

尚未达到极限。此时, 桩基的极限荷载仍按照出现拐点来判断显然是不合理的, 因此, 对于桩长超过50 m的大直径PHC桩, 极限荷载应根据桩顶沉降确定比较合理。

3.2 桩径对Q-S曲线的影响

桩长为30 m的大直径PHC桩不同桩径桩顶荷

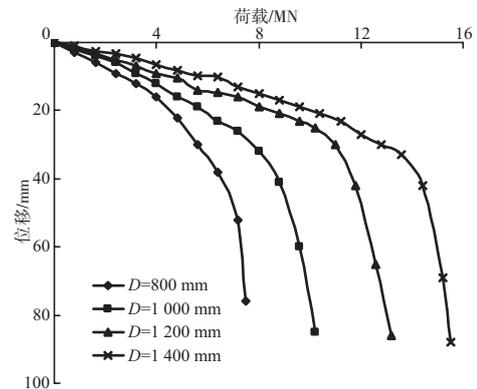


图5 桩径与桩顶Q-S的关系

载-桩顶位移比例关系见图5。

由图5可知, 随着桩径的增大, 桩顶荷载-位移曲线的拐点逐渐下移, 桩身的极限承载力增大, 可见, 当桩长相同时, 随着桩径的增大, 桩的极限荷载增加非常明显。因此, 对于超长桩, 桩顶沉降达到设计要求, 而其承载力并未达到极限, 为了充分发挥其承载力, 可以适当增大桩径, 有时甚至可以通过增大桩径来缩小桩长。

3.3 桩体刚度对Q-S曲线的影响

桩长为30 m的不同桩体弹性模量大直径PHC桩桩端位移与桩顶位移的关系见图6。

由图6可知, 随着弹性模量的增大, 桩顶荷

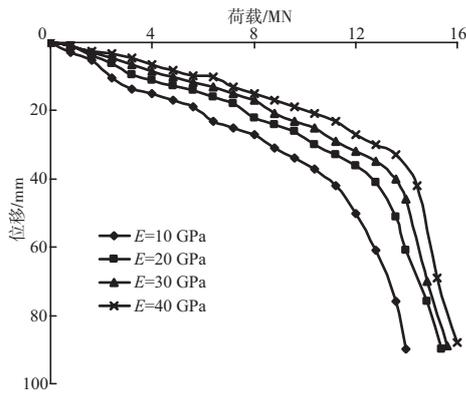


图6 桩体弹性模量与桩顶Q-S的关系

载-位移曲线的拐点逐渐下移，桩身的极限承载力增大，可见，随着桩身弹性模量的增大，桩的极限荷载有所增加。但是当桩体弹性模量为10 GPa时，桩顶荷载-沉降曲线呈现渐变型特性，因此，桩顶荷载在桩体弹性模量较小的情况下不易于向下传递。增大弹性模量，有利于提高桩基的承载力。

3.4 桩侧土对Q-S曲线的影响

桩长为30 m的大直径PHC桩在不同桩侧土中

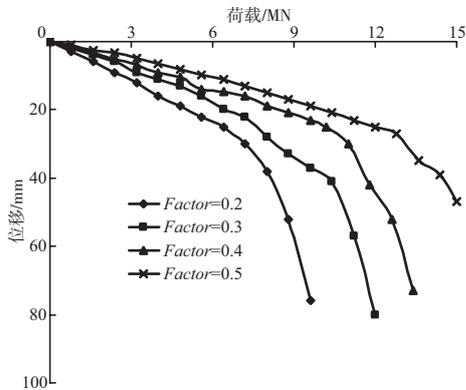


图7 桩侧土与桩顶Q-S的关系

桩顶Q-S的关系见图7。

由图7可知，随着桩侧土摩擦系数的增大，桩顶荷载-位移曲线的拐点逐渐下移，桩身的极限承载力增大，可见，随着桩侧土摩擦系数的增大，桩的极限荷载增加非常明显。因此桩侧土的土质情况对桩身沉降及桩的极限承载力有较大影响，良好的地质土层能极大地提高桩基承载力。

3.5 桩端土对Q-S曲线的影响

桩长为30 m的大直径PHC桩在不同桩端土中桩顶Q-S的关系见图8。

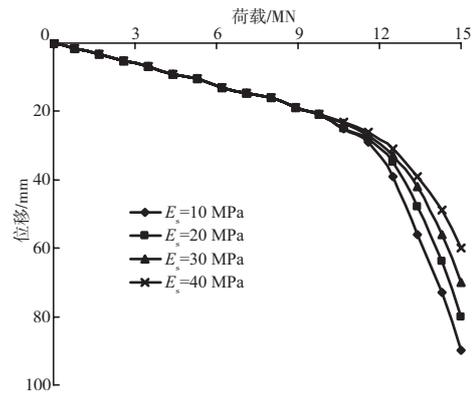


图8 桩端土与桩顶Q-S的关系

由图8可知，当荷载小于10 MN时，在相同的桩顶荷载下，桩顶荷载-位移曲线几乎重合，当荷载大于10 MN时，在相同的桩顶荷载下，桩端土压缩模量大的，桩顶沉降较小。

随着桩端土压缩模量的增大，桩顶荷载-位移曲线的拐点逐渐下移，桩身的极限承载力也有所增加，可见，随着桩端土压缩模量的增大，桩的极限荷载有所增加。在桩基工作荷载作用下，桩端土层的压缩模量对桩顶荷载-位移曲线的影响和桩长有关，桩长越短桩端土压缩模量对桩顶荷载-位移曲线影响越大。

4 结论

1) 采用ABAQUS对PHC桩在竖向荷载作用下的有限元模拟结果较为准确，有限元计算出的位移比实测结果高出2%~20%。

2) 对于桩长超过50 m的大直径PHC桩，极限荷载根据桩顶沉降确定比较合理，超过50 m的PHC桩应列为超长桩。

3) 桩径和桩长对桩基承载力都比较敏感，因此桩基设计时，要结合桩的长细比，充分考虑其经济性和适用性。

4) 桩侧土摩擦系数增大，对桩的极限荷载增加非常明显。一般情况下，黏土的摩擦系数在0.2~0.35，而砂土的摩擦系数在0.3~0.5。

5) 桩端土压缩模量增大，桩的极限荷载有所增加，桩长越短桩端土压缩模量对桩极限荷载影响越大。