

文章编号: 1005-0523(2009)04-0034-05

大直径变截面桩竖向承载力及沉降算法研究

梁 韵, 任士房, 耿大新, 上官兴

(华东交通大学 土木建筑学院, 江西 南昌 330013)

摘要:大直径变截面桩荷载传递机理复杂,传统桩基理论已不能恰当分析其工作机理和受力性能。针对此类问题,从大直径变截面桩的实际受力状态出发,通过分析桩体所受摩阻力和端承力的发挥情况划分桩体不同受力状态,在考虑一定安全储备的基础上选取其中一个临界状态进行研究,根据桩-土变形协调条件提出大直径变截面桩竖向承载力及沉降量的计算方法,并用该方法对苏通大桥变截面桩基础进行竖向承载力及沉降量计算,结果与通过试验得到的设计值十分接近,表明该方法比现行规范算法更准确。

关键词:大直径变截面桩;竖向承载力;沉降量

中图分类号:U443.1

文献标识码:A

近年来,大直径变截面桩凭借其独特的结构形式和巨大的竖向承载力在诸多工程中得到广泛运用,尤其是在苏通大桥中,变截面桩更显现出承载能力强、沉降变形小、施工进度快、经济效益好等优点。由于大直径变截面桩与小直径等截面桩的受力状态相差很大,且现行《公路桥涵地基与基础设计规范》钻(挖)孔灌注桩承载力的计算公式是通过113根中小直径的中长、短桩试桩资料统计归纳得出的,故传统的桩基理论体系已不能恰当分析大直径变截面桩的工作机理及受力性状,其计算理论和结果均存在缺陷。因此,迫切需要研究该桩型的受力机理并提出计算桩体竖向承载力及沉降的合理方法。

1 大直径变截面桩荷载传递机理及受力状态划分

桩身受荷时桩侧阻力与桩端阻力的发挥过程就是桩-土体系的荷载传递过程。桩顶受竖向荷载后,桩身压缩产生向下位移,桩侧表面受到土体向上的侧摩阻力,桩身荷载通过发挥出来的侧摩阻力传递到桩周土层中去,从而使桩身荷载与桩身压缩变形随深度递减。随着荷载的增加,桩端出现竖向位移和桩端反力。桩端位移加大了桩体竖向沉降,促使桩侧摩阻力进一步发挥。O Neill 等人^[2-3]指出,桩周极限摩阻力通常在基桩沉降量达到5~10 mm时完全发挥,而桩极限端承力通常在沉降量达到桩径的10%以上时才完全发挥。因而侧摩阻力先于端阻力发挥出来,且靠近桩身上部土层的侧摩阻力先于下部土层发挥。

根据苏通大桥试桩试验数据^[3],可绘制桩顶应力-相对沉降实测曲线。图1为典型的荷载变形曲线(主5#墩),可见桩体受力情况大致分为3个阶段,因此拟将大直径变截面桩受荷变形过程抽象为以下3种临界状态^[3]:

(1) 当桩顶荷载 P_0 较小时,桩尖沉降 Δ_h , 此时上段桩身桩周土壤侧摩阻力呈梯形分布,如图2(a)所示;荷载逐渐增大,桩顶周围土体达到极限侧摩阻力,如图2(b)所示;随着荷载的增大,上段桩身的桩-土表层产生相对滑移,使上段桩身桩周表层以下土体继续发挥侧摩阻力,如图2(c)所示;至上段桩身桩周土体侧摩阻力全部发挥至极限,此时达到第一临界状态,如图2(d)所示。

(2) 荷载继续增大,变截面处端承力开始发挥,如图2(e)所示;随后下段桩身桩周土体进一步发挥侧摩阻力,如图2(f)所示;随着下段桩身桩-土间相对滑移的增大,变截面处端承力 R_1 逐渐增大且桩周侧摩阻力达到极限值,此时达到第二临界状态,如图2(g)所示。

收稿日期:2009-04-03

基金项目:华东交通大学创新基金项目(82KJ31)

作者简介:梁 韵(1986-),女,山东济南人。

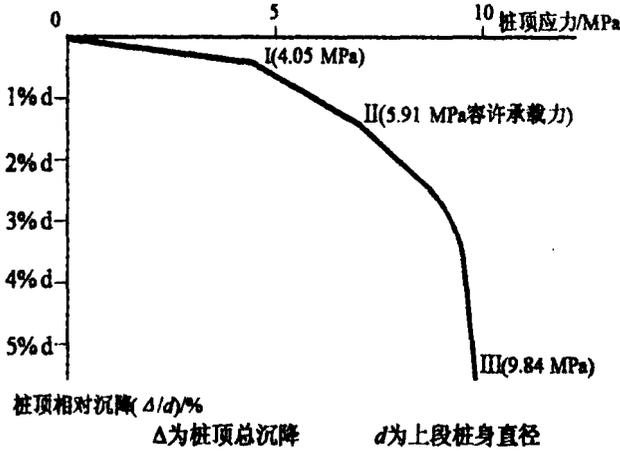


图1 苏通大桥主5*墩桩顶应力一对沉降实测曲线

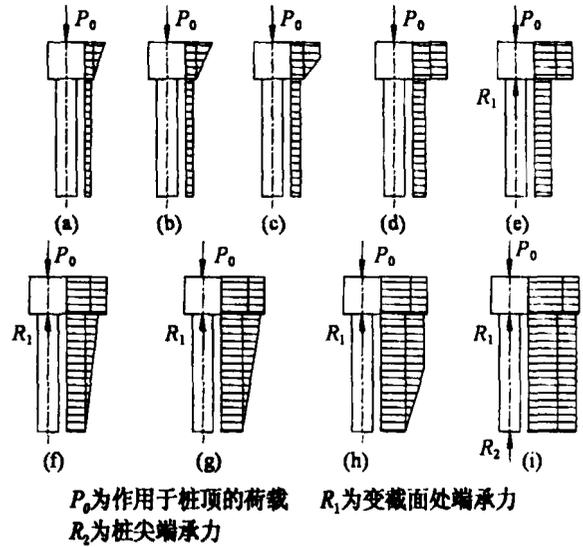
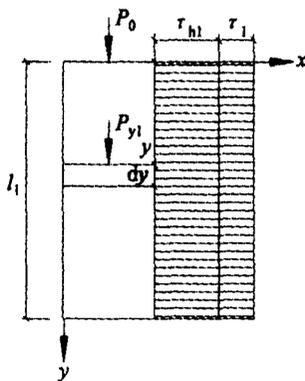


图2 竖向桩侧受力变化情况

(3) 荷载进一步增大,变截面以下土体逐渐达到极限侧摩阻力,如图2(h)所示;荷载继续增加,下段桩身桩周土体全部达到极限侧摩阻力,桩尖端承力 R_2 开始发挥,达到第三临界状态,如图2(i)所示,此时桩体达到极限承载力。

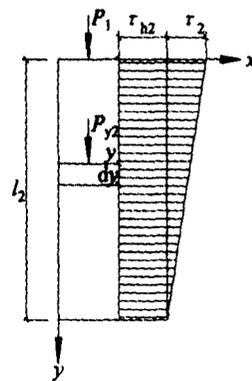
根据以上受力分析,考虑一定安全储备,本文选取第二临界状态为计算桩体容许承载力的受力状态。

2 大直径变截面单桩竖向承载力及沉降计算公式推导



P_0 为作用于桩顶的竖向荷载
 P_{y1} 为上段桩身任意截面处的轴力
 l_1 为上段桩身长度
 τ_1 为上段桩身压缩引起的上段桩周土壤摩阻力
 τ_{h1} 为桩尖沉降引起的上段桩周土壤摩阻力

图3 上段桩身任意截面受力分析



P_1 为作用于变截面处的轴力
 P_{y2} 为下段桩身任意截面处的轴力
 l_2 为下段桩身长度
 τ_2 为下段桩身压缩引起的下段桩周土壤摩阻力
 τ_{h2} 为桩尖沉降引起的下段桩周土壤摩阻力

图4 下段桩身任意截面受力分析

上段桩身所受轴力,在桩顶处为 P_0 ,如图3所示。上段桩身任意深度 y 处轴力 P_{y1} 为

$$P_{y1} = P_0 - T_{y1} = P_0 - \int_0^y U_1(\tau_{h1} + \tau_1)dy = P_0 - U_1 y(\tau_{h1} + \tau_1) \quad (1)$$

式中, U_1 为上段桩身周长。

以 T_1, T_{h1} 分别表示上段桩身压缩、桩尖沉降引起的上段桩周土壤总侧摩阻力, $T_1 = U_1 \tau_1 l_1$ 、

$T_{h1} = U_1 \tau_{h1} l_1$, 上段桩身压缩变形 Δ_1 为

$$\Delta_1 = \int_0^{l_1} \frac{P_{y1}}{EA_1} dy = \frac{1}{EA_1} \left(P_0 l_1 - \frac{T_1 l_1}{2} - \frac{T_{h1} l_1}{2} \right) \quad (2)$$

式中: E 为桩体弹性模量; A_1 为上段桩身截面积。

$$\text{如图 4 所示, 作用于变截面处的轴力 } P_1 \text{ 为 } P_1 = P_0 - T_1 - T_{h1} - R_1 \quad (3)$$

下段桩体任意深度 y 以上桩周承受的总摩阻力 T_{y2} 为

$$T_{y2} = \int_0^y U_2 \left(\tau_{h2} + \frac{l_2 - y}{l_2} \right) dy = U_2 \tau_{h2} y + U_2 \tau_2 \left(y - \frac{y^2}{2l_2} \right) \quad (4)$$

式中: U_2 为下段桩身周长。

以 T_2, T_{h2} 分别表示下段桩身压缩、桩尖沉降引起的下段桩周土壤总侧摩阻力, $T_2 = U_2 \tau_2 l_2, T_{h2} = \frac{1}{2} U_2 \tau_{h2} l_2$ 。下段桩身压缩变形 Δ_2 为

$$\Delta_2 = \int_0^{l_2} \frac{P_{y2}}{EA_2} dy = \frac{l_2}{EA_2} \left(P_0 - T_1 - T_{h1} - R_1 - \frac{T_{h2}}{2} + \frac{T_2}{3} \right) \quad (5)$$

式中: A_2 为下段桩身截面积; R_1 为变截面处端承力。

因为 $P_0 = T_1 + T_2 + T_{h1} + T_{h2} + R_1 + R_2$, 所以

$$\Delta_2 = \frac{l_2}{EA_2} \left(R_2 + \frac{T_{h2}}{2} + \frac{T_2}{3} \right) \quad (6)$$

式中: R_2 为桩尖端承力。

上、下段桩体桩周土壤极限侧摩阻力分别为: $[\tau]_1 = \tau_1 + \tau_{h1}, [\tau]_2 = \tau_2 + \tau_{h2}$, 其中 $[\tau]_1, [\tau]_2$ 可采用实测数据或查《公路桥涵地基与基础设计规范》(多层土时取加权平均值)。

假设桩体变截面以下桩身侧摩阻力以 θ 角扩散至桩尖, 形成一个面积为 A_h 的圆面受力区, 上部桩身轴压力在此圆面内均匀分布。 θ 角为桩体范围内地基压力扩散角, 建议长桩取 $1^\circ \sim 5^\circ$, 短桩参照《桥涵地基与基础》^[4] 中相应规定取值。

$$A_h = \frac{\pi}{4} (d_1 + 2l_2 \tan \theta)^2 \quad (7)$$

式中: A_h 为桩尖圆面受力区; d_1 为上段桩身直径。

$$\Delta_h = \eta \frac{P_1}{C_h A_h} \quad (8)$$

式中: Δ_h 为桩尖沉降; C_h 为桩底土的地基系数; η 为大于 1 的增大系数。

假设变截面处竖向土抗力符合文克尔假定, 并假定地基系数 C 随深度呈线性增长, 即 $C = mz$ 。则由文克尔假定 $\sigma_x = Cx_z$, 可得变截面处端承力 R_1 为

$$R_1 = \sigma_1 A_0 = \frac{\pi}{4} \sigma_1 (d_1 - d_2) = \frac{\pi}{4} (d_1 - d_2) m l_1 (\Delta_h + \Delta_2) \quad (9)$$

式中: A_0 为上、下段桩身截面积之差; d_1, d_2 分别为上、下段桩身直径。

$$\text{桩尖处圆面受力区内的应力 } \sigma_2 \text{ 为 } \sigma_2 = \eta \frac{P_1}{A_h} \quad (10)$$

$$\text{桩尖处端承力 } R_2 \text{ 为 } R_2 = \sigma_2 A_2 = \eta \frac{A_2}{A_h} P_1 \quad (11)$$

由(11)式及 $P_1 = P_0 - T_1 - T_{h1} - R_1$ 得

$$R_1 = P_0 - T_1 - T_{h1} - P_1 = P_0 - T_1 - T_{h1} - \frac{A_h R_2}{\eta A_2} \quad (12)$$

$$\text{由 } R_1 = P_0 - T_1 - T_{h1} - T_2 - T_{h2} - R_2 \quad (13)$$

联立(12)(13)得
$$R_2 = \frac{T_2 + T_{h2}}{\frac{A_h}{\eta A_2} - 1} \tag{14}$$

令系数
$$a = \frac{1}{\frac{A_h}{\eta A_2} - 1} \tag{15}$$

故
$$R_2 = a(T_2 + T_{h2}) \tag{16}$$

$$R_1 = P_0 - T_1 - T_{h1} - (1 + a)(T_2 + T_{h2}) \tag{17}$$

桩周土体为弹性体,其剪切变形公式可写为: $\Delta = \frac{\bar{\tau}}{G}l$,其中 Δ 为弹性体变形量, $\bar{\tau}$ 为弹性体表面所受平均剪应力; l 为弹性体垂直于剪应力方向的长度; G 为弹性材料的剪切变形模量^[3]。

由桩尖沉降引起的上、下段桩身位移 Δ_{h1}, Δ_{h2} 分别为: $\Delta_{h1} = \frac{\tau_{h1}}{G}l_1, \Delta_{h2} = \frac{\tau_{h2}}{G}l_2$

由 $\Delta_h = \Delta_{h1} = \Delta_{h2}$,可得 τ_{h1} 与 τ_{h2} 成比例,即
$$\frac{\tau_{h1}}{\tau_{h2}} = \frac{l_2}{l_1} \tag{18}$$

$$\frac{\tau_{h2}}{2} = \frac{\Delta_{h2}}{\Delta_2} = \frac{\eta \frac{P_1}{C_h A_h}}{\frac{l_2}{EA_2} \left(R_2 + \frac{T_{h2}}{2} + \frac{T_2}{2} \right)} \tag{19}$$

令系数
$$\beta = \frac{\eta EA_2}{2l_2 C_h A_h} \tag{20}$$

得
$$\frac{\tau_{h2}}{\tau_2} = \beta \frac{P_1}{R_2 + \frac{T_{h2}}{2} + \frac{T_2}{3}} \tag{21}$$

解上式得
$$\tau_{h2} = m\tau_2 \tag{22}$$

式中:
$$m = \frac{-\left[\frac{1}{2}a + \frac{1}{6} - \beta(1+a)\right] + \sqrt{\left[\frac{1}{2}a + \frac{1}{6} - \beta(1+a)\right]^2 + (2a+1)(1+a)\beta}}{2a+1}$$

所以
$$P_0 = K_1(T_1 + T_{h1}) + K_2(T_2 + T_{h2}) + \mu_1 R_1 + \mu_2 R_2 \tag{23}$$

式中: K_1, K_2 为桩侧摩阻力修正系数,根据桩周压浆效果取值,一般取1.0~1.35; μ_1, μ_2 为桩尖反力修正系数,可根据对比实验数据及上部结构容许沉降值确定,一般取1.0~1.2。

桩顶总沉降:
$$\Delta = \Delta_h + \Delta_1 + \Delta_2 \tag{24}$$

3 算例

苏通大桥主4#墩采用变截面形式,桩身总长114 m;地面线标高-26.43 m,最大冲刷线标高-52.19 m,桩底标高-124.00 m,变截面处标高-64.88 m;上、下段桩径分别为2.8 m,2.5 m。桩身采用C35砼。详细地址资料如表1所示,计算结果列于表2^[5]。

通过试验得苏通大桥主4#墩竖向承载力设计值为57.54 MN。用《公桥基规》中的方法算得承载力容许值为46.07 MN,误差为-19.9%;用本文方法算得承载力容许值为57.06 MN,误差仅为-0.86%。结果表明该方法比现行规范算法更准确。

表1 地质资料表

土层名称	粉砂	细砂	粉砂	细砂	粉砂	细砂	粉砂	细砂	中砂	粉砂	粗砂
土层底标高/m	-34.74	-36.165	-37.59	-40.44	-50.09	-58.09	-60.98	-64.88	-73.24	-77.74	-83.74
土层摩阻力/kPa	35	40	35	45	40	45	50	55	60	55	110

土层名称	粗砂	细砂	亚粘土	中砂	细砂	砾砂	中砂	粗砂	亚粘土	细砂	亚粘土
土层底标高/m	-89.24	-92.69	-94.69	-96.69	-98.69	-100.49	-108.04	-110.04	-114.54	-121.04	-120.00
土层摩阻力/kPa	115	55	60	70	60	120	70	110	70	60	50

表2 计算结果列表

T_1/kN	T_{h1}/kN	T_2/kN	T_{h2}/kN	R_1/kN	$\mu_1 R_1/\text{kN}$	R_2/kN	$\mu_2 R_2/\text{kN}$	P_0/MN	Δ/mm
11 916.1	7 444.8	20 143.7	6 647.4	4 947.8	5 937.4	1 933.7	2 320.4	57.06	15.1

注:计算中取 $K_1 = K_2 = 1.35, \mu_1 = \mu_2 = 1.2$ 。

4 结语

大直径变截面桩的受力机理不同于一般桩基,本文方法克服了传统方法中桩基竖向承载力和沉降不相关的缺陷,根据桩侧土壤侧摩阻力及端承力的发挥情况,考虑足够的安全储备,选择其中一个临界状态,推导出合理的承载力、沉降量计算公式。用该方法对苏通大桥主4#墩进行计算,结果表明,该方法计算结果十分接近实测值,说明此方法是合理的。

参考文献:

- [1] O Neill M W. Side resistance in piles and drilled shafts[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironment Engineering, Div, ASCE, 2001, 127(1):1-15.
- [2] Randolph M F, and Wroth C P. Analysis of deformation of vertically loaded piles[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironment Engineering. Div, ASCE, 1978, 104(11):1 465-1 488.
- [3] 王伯惠,上官兴.中国钻孔灌注桩新发展[M].北京:人民交通出版社,1999.56-72.
- [4] 铁道部第三勘察设计院.桥涵地基与基础[M].北京:中国铁道出版社,2002.216.
- [5] 上官兴,蒋伟.钻孔桩实用沉降计算曲线[A].中国公路学会桥梁和结构工程分会,第十八届全国桥梁学术会议论文集[C].北京:人民交通出版社,2006.97-100.

Research on Algorithm for the Vertical Bearing Capacity and settlement of the Large Diameter Pile with Variable Cross-section

LIANG Yun, REN Shi-fang, GENG Da-xin, SHANGGUAN Xing

(School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: The load-transfer mechanism of the large diameter and variable cross-section pile is complex, while the traditional theory is not appropriate to analyze the mechanism of its load-bearing and deformation. Based on analysis of the development of the pile side friction and pile-end resistance, one of the critical states considering the safety of the reserves is studied. A method based on pile-soil deformation compatibility conditions is proposed, which can calculate the vertical bearing capacity and settlement of the large-diameter and variable cross-section pile. USE this method is used to calculate the vertical bearing capacity and settlement of this type of pile of SuTong Bridge, and the result is very close to measured value.

Key words: large diameter pile with variable cross-section; vertical bearing capacity of pile; settlement

(责任编辑:王建华)