

文章编号 :1006 - 2106(2007)02 - 0065 - 04

摩擦桩竖向承载力计算方法研究^{*}

冯国军^{**}

(铁道第三勘察设计院 , 天津 300142)

摘要 :研究目的 :解决现行桩基竖向承载力计算方法与桩 - 土体系的竖向变形相互独立的问题。

研究方法 :首先 ,通过分析桩 - 土体系的变形机理得出合适的荷载传递函数模型 ;其次 ,根据桩 - 土体系的变形协调原则对桩基础的竖向承载力进行分析研究。

研究结果 :针对现行桩基竖向承载力计算方法的不足 ,提出了一种与桩 - 土体系竖向变形相协调的计算方法。

研究结论 :以变形协调原则与荷载传递法为基础推导的桩基承载力计算方法 ,能够解决桩基竖向承载力与竖向位移计算各自独立这一矛盾 ,满足工程设计要求。

关键词 :桩基础 ;变形协调原则 ;荷载传递法 ;竖向承载力

中图分类号 :U443.15 **文献标识码** :A

Research on Computing Method for Vertical Bearing Capacity of Friction Pile Foundation

FENG Guo - jun

(The Third Survey and Design Institute of China Railway , Tianjin 300142 , China)

Abstract :**Research purposes** :The purposes are to solve the problems existed in present computing method for vertical bearing capacity of pile foundation and the problems related to the vertical independent distortions each other between pile and soil mass system.

Research methods :First , the appropriate load transfer function model is obtained through the analysis of distortion mechanism of pile and soil mass system , then , the analysis and research are made on vertical bearing capacity of pile foundation based on the principle of compatibility of deformation between pile and soil mass system.

Research results :Aiming at the existing problems existed in the computing method for vertical bearing capacity of pile foundation , a new computing method is proposed , by which the vertical deformations between the pile and soil mass system can be calculated compatibly.

Research conclusions :The result shows the contradiction of separate calculating the vertical bearing capacity of pile foundation and the vertical displacement can be solved and the requirement of engineering design can be satisfied by adopting this computing method for vertical bearing capacity , which is formed mainly on the basis of principle of compatibility of deformation and load transfer method.

Key words : pile foundation ; principle of compatibility of deformation ; load transmission method ; vertical bearing capacity

桩的承载力特性是桩基理论研究中的重要课题。 国内外的学者在这一领域进行了长期探索 ,取得了众

* 收稿日期 :2006 - 11 - 07

** 作者简介 :冯国军 ,1980 年出生 ,男 ,助理工程师。

多有价值的成果。但是由于桩、土相互作用的复杂性,影响因素的多样性(包括桩侧土的性质及土层分布、桩端土层的性质、桩的几何特性、成桩效应等)^[1],在目前桥梁桩基设计计算中仍存在不完善之处。现行计算方法是按岩土阻力确定钻(挖)孔灌注桩的单桩容许承载力^[2,5]。该组公式反映的桩侧阻力和桩端阻力与桩-土体系的变形无关。而实际上桩的承载力是桩-土体系共同作用的结果,承载力与桩-土体系的变形密切相关。本文从变形协调角度出发对桩基竖向承载力的计算进行了探讨,推导的桩基竖向承载力计算公式弥补了桩基竖向承载力与竖向位移相互独立这一缺憾,并能满足工程设计要求。

1 桩-土体系的变形机理

桩尖沉降量 Δ_h 引起成均匀分布的剪应力 τ_h , 桩身弹性压缩位移 Δ_l 引起呈倒三角形分布的剪应力(假定中间呈线性变化), 表层土壤的剪应力为 τ_1 , 桩尖处土壤的剪应力为 0。由 Δ_h 与 Δ_l 引起的应力叠加后桩顶处(地面线或局部冲刷线处)剪应力 $\tau_0 = \tau_h + \tau_1$, 桩尖处剪应力为 τ_h 。

桩顶荷载 P 逐渐增大, τ_h 和 τ_0 也随之增大, 直至 $\tau_0 = [\tau]$, 即达到表层土壤的极限摩阻力, 此时桩-土体系的内力和变形达到第一临界状态。荷载继续增大时, 增加的荷载传递到下一层土, 表层以下土壤剪应力逐渐增大, 直至桩周土壤都达到极限摩阻力, 称之为第二临界状态。当荷载继续增大, 桩身整体将产生滑移, 荷载增大全部由桩尖土层的支承力来承担, 达到极限承载力, 这是第三临界状态, 此时桩周土和桩尖地基土都达到了极限状态。

2 桩-土体系荷载传递函数的选取

目前, 探讨桩身的荷载传递机理多采用荷载传递法, Kezd(1957 年)、佐滕悟(1965 年)、Coyle 和 Reese(1966 年)、Holloway(1975 年)以及房卫民、潘时声等大量国内外学者相继对该法进行了讨论, 提出了不同的荷载传递函数模型。

2.1 桩侧阻力-桩土相对位移的函数模型

桩侧阻力-桩土相对位移 $[\tau(x)-u]$ 之间的关系相当复杂, 一般的方法是通过试验实测出桩侧各层土的 $\tau(x)-u$ 关系, 然后以某种简单的数学模型去描述它。通过研究发现, 佐滕悟(1965 年)提出的线弹性-全塑性数学模型不仅简单, 而且能比较客观的反映桩侧土的实际受力性状, 下面对该模型加以介绍(如图 1 所示)。万方数据

$$\tau(x) = \begin{cases} K\mu (\mu < \mu_m) \\ \tau_\mu = f (\mu \geq \mu_m) \end{cases} \quad (1)$$

式中 K ——土的抗剪变形系数;

f ——桩侧极限摩阻力;

μ_m ——桩侧摩阻力充分发挥所需的桩土相对位移。

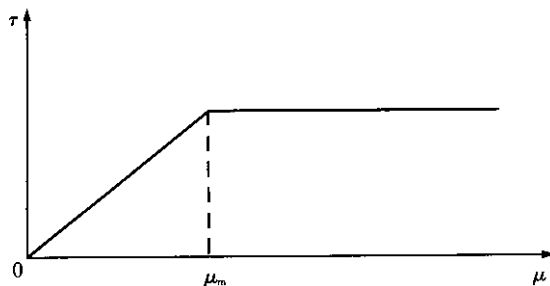


图 1 $\tau(x)-u$ 曲线

2.2 桩尖阻力-桩尖土位移函数模型

对于桩尖支承力-桩尖土位移(P_h-u)之间的关系, 不同学者有不同的看法。文献[3]认为 P_h-u 呈线弹性关系, Delpak 等人(2000)^[4]认为 P_h-u 之间的关系可以用抛物线来描述。参考文献[2]中 ρ_1 (承台板沿构件轴线方向产生单位位移时引起构件顶面处的轴向力)的计算公式为:

$$\rho_1 = \frac{1}{\frac{l_0 + \varepsilon h}{EA_h} + \frac{1}{C_0 A}} \quad (2)$$

$$\text{其中 } \delta_2 = \frac{1}{C_0 A} \quad (3)$$

式中 δ_2 ——桩尖以下地基土在单位竖向力作用下产生的位移。

桩尖地基土支承力与其位移呈线弹性关系, 但随着摩擦桩入土深度的不同会影响桩底土承载力的发挥, 桩入土越深桩侧摩阻力在整个荷载中占的比例越大, 支承力占的比例越小^[2]。桩底支承力与入土深度有关, 引入反映桩长变化对承载力影响的系数 k_h , 因此桩尖支承力-桩尖土位移(P_h-u)之间的表达式可以写成:

$$P_h = k_h \cdot K_h \cdot u \quad (4)$$

式中 P_h ——桩尖支承力;

k_h ——反映桩的入土深度与桩底支承力之间关系的系数;

K_h ——桩尖处地基土的竖向刚度。

$$K_h = C_h A_h \quad (5)$$

式中 C_h ——桩尖平面内地基土的等效竖向地基系数, 即考虑沉渣影响后的桩底土竖向地

基系数。因为沉渣层相对来说很薄,对地基系数的影响很小,取 $C_0 = C_h$ 足够满足工程设计的要求。

A_h ——桩身截面积(按桩的设计直径 χ m^2)。

3 摩擦桩竖向承载力计算公式推导

根据以上所述,现将桩土内力和变形第一临界状态的荷载作为桩的容许荷载来推导桩的承载力计算公式以及在其作用下桩土体系的内力公式。

3.1 桩尖支承力计算

桩顶在地面处作用有垂直荷载 P_0 ,按照现有土力学理论,这个荷载通过桩周摩阻力以 $\frac{\varphi}{4}$ 角扩散到桩尖平面,桩尖平面处的土基的沉降^[3]为:

$$\Delta_h = \eta \cdot \frac{P_0}{C_0 A} \quad (6)$$

$$\text{联立式(4)、(5)、(6),可得 } P_h = \lambda P_0 \quad (7)$$

$$\text{式中 } \lambda = \eta \cdot k_h \frac{C_h A_h}{C_0 A} \quad (8)$$

P_h ——桩尖支承力;

A ——桩身四周自地面或局部冲刷线按 $\frac{\varphi}{4}$ (φ 为

桩身所穿过土层的平均内摩擦角)向下扩散至桩尖底面处的面积,当此面积大于按构件底面中心距计算的面积时,则采用按构件底面中心距计算的面积;

C_0 ——基底土的竖向地基系数;

η ——增大系数。

3.1.1 参数 C_0 取值

参考文献[2]采用地基系数随深度呈直线增长的变化规律。本文认为地基系数随深度呈直线增长的变化规律适用于桩长不太长的情况;文献[5]也认为地基系数随深度增长到某一深度之后趋于定值。通过分析本文认为当入土深度 $h \leq 20d$ 时地基系数随深度呈直线增长; $h > 20d$ 时地基系数不再变化,即当 $h \leq 20d$ 时取 $C_0 = m_0 h$,当 $h > 20d$ 时取 $C_0 = 20 dm_0$ 。

3.1.2 参数 η 取值

假设:

(1) 桩尖平面处地基土的沉降曲线符合二次抛物线形式;

(2) 在距桩心 $\frac{d}{2} + h \times \tan(\varphi/4)$ 处桩尖土沉降为0;

(3) 以桩尖平面处的水平轴为 y 轴,桩身轴线为 x 轴(向上为正方向,如图2所示)。

则桩尖平面处地基土的沉降曲线为:

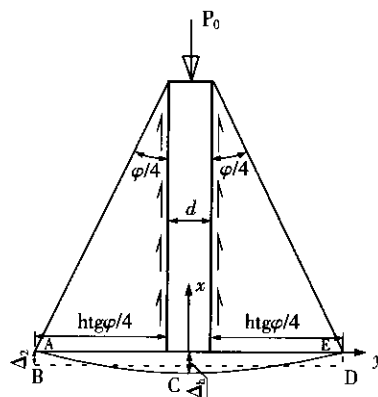


图2 桩尖支承力计算图示

$$f(y) = \frac{\Delta_h}{a^2} y^2 - \Delta_h \quad (9)$$

$$\text{式中 } a = h \tan \varphi / 4 + \frac{d}{2} \quad (10)$$

$$S_{ACE} = \int_{-a}^a f(y) dy = \frac{4}{3} a \cdot \Delta_h \quad (11)$$

$$\text{矩形面积 } S_{ABDE} = 2a \cdot \Delta_2 \quad (12)$$

根据面积相等的原则 $S_{ACE} = S_{ABDE}$, 所以

$$\eta = \frac{\Delta_h}{\Delta_2} = 1.5 \quad (13)$$

对于单桩 $\eta = 1.5$; 对于群桩,在桩尖处有应力重叠效应,在无实测资料的情况下建议取 $\eta = 1.1 \sim 1.3$ (土质好时取小值,差时取大值)。

3.1.3 参数 k_h 取值

由于钻孔桩桩壁的粗糙和灌注混凝土的胶结作用,摩擦桩的入土深度会影响桩底土承载能力的发挥,为了反映桩底支承力与桩入土深度的关系引入系数

k_h , k_h 参考文献[2]制定。 $\frac{h}{d} = 10 \sim 50$ 时, $k_h = 0.9 \sim 0.5$; 中间值可以内插。

3.2 桩周摩阻力计算

桩周摩阻力的计算以桩土变形理论为基础;以桩顶平面处的水平轴为 y 轴,桩身轴线为 x 轴(x 轴以向下为正,如图2所示)。

3.2.1 桩身弹性压缩变形 Δ_1 的计算

桩身轴向力方程:

$$P_x = P_0 - T_x = P_0 - U \left[\tau_h + \left(1 - \frac{x}{2h} \right) \tau_1 \right] \cdot x \quad (14)$$

桩身的弹性变形为^[3]:

$$\Delta_1 = \int_0^h \frac{P_x}{EA_h} dx = \frac{h}{EA_h} \left[P_0 - \frac{Uh}{2} \left(\tau_h + \frac{2}{3} \tau_1 \right) \right] \quad (15)$$

联立式(14)(15)得 $\Delta_1 = \frac{h}{EA_h} \left(P_h + \frac{T_h}{2} + \frac{T_1}{3} \right)$ (16)

式中 $T_h = Uh\tau_h$;

$$T_1 = Uh \frac{\tau_1}{2}.$$

3.2.2 桩周土层压缩变形计算

桩顶发生弹性压缩 Δ_1 引起的剪应力分布方程为 :

$$\tau_1(x) = \frac{h-x}{h} \tau_1 \quad (17)$$

根据佐藤悟桩侧阻力 - 桩土相对位移的函数模型 桩身弹性压缩 Δ_1 引起的桩周土体变形 Δ_1' 为 :

$$\Delta_1' = \int_0^h \frac{1}{K} \tau_1(x) dx = \frac{1}{K} \tau_1 \int_0^h \frac{h-x}{h} dx = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{K} h \tau_1 \quad (18)$$

由 Δ_h 引起的桩周土体的剪切变形 Δ_1' 为 :

$$\Delta_h' = \int_0^h \frac{1}{K} \tau_h dx = \frac{1}{K} \tau_h h \quad (19)$$

3.2.3 桩周摩阻力计算公式推导

根据桩 - 土变形的协调原则 在第一临界状态有 :

$$\frac{\Delta_h}{\Delta_1} = \frac{\Delta_h'}{\Delta_1'} = \frac{\tau_h}{\tau_1} \quad (20)$$

联立式(6)(15)(20)可得 :

$$\beta \tau_1 \frac{P_0}{Uh} = \tau_h \left(\frac{P_0}{Uh} - \frac{\tau_h}{2} - \frac{\tau_1}{3} \right) \quad (21)$$

$$\text{式中 } \beta = \frac{\eta EA_h}{2C_0 A_h} \quad (22)$$

根据桩身轴向力平衡有 :

$$P_0 - P_h = Uh \left(\tau_h + \frac{\tau_1}{2} \right) = (1 - \lambda) P_0 \quad (23)$$

$$\text{所以 } \frac{P_0}{Uh} = \frac{1}{1 - \lambda} \cdot \left(\tau_h + \frac{\tau_1}{2} \right) \quad (24)$$

联立式(21)(24)可以得到关于 τ_h 的二次方程 :

$$\frac{1 + \lambda}{2} \cdot \tau_h^2 + \frac{1 + 2\lambda - 6\beta}{6} \tau_1 \tau_h - \frac{\beta}{2} \tau_1^2 = 0 \quad (25)$$

$$\text{解得 } \tau_h = \alpha \tau_1 \quad (26)$$

$$\text{式中 } \alpha = \frac{(6\beta - 2\lambda - 1) + \sqrt{(6\beta - 2\lambda - 1)^2 + 3\lambda(1 + \lambda)\beta}}{\lambda(1 + \lambda)} \quad (27)$$

$$\text{取 } \tau_0 = \tau_1 + \tau_h \quad (28)$$

$$\text{则 } P_0 = \frac{(1 + 2\alpha)}{2(1 + \alpha)} \cdot \frac{1}{(1 - \lambda)} \cdot Uh \tau_0 \quad (29)$$

实际设计中 桩周土摩阻力大小各异 为满足工程

设计要求取 $\tau = \overline{\tau}$

$[\overline{\tau}]$ —— 桩身所穿透土层平均极限摩阻力的 0.9 倍。

则可求出桩基的竖向承载力为 :

$$[P] = \frac{(1 + 2\alpha)}{2(1 - \lambda)(1 + \alpha)} Uh [\overline{\tau}] \quad (30)$$

4 实例分析

4.1 为验证本文方法 以参考文献 [6] 143 页为例。

基本资料 基础采用 8 根直径为 1.0 m 钻孔桩高桩承台 桩间距 3.0 m 桩尖置于砂夹卵石层中 承台底面高出局部局部冲刷线 2.0 m。桩身采用钢筋混凝土 混凝土受压弹性模量 $E = 29 \times 10^6$ kPa 桩身横截面积 $A_h = 0.785$ m² 桩底位于局部冲刷线以下的深度 $h = 20$ m 土的平均内摩擦角 $\varphi = 18^\circ$ 。

计算竖向承载力 :

$$htg\varphi/4 = 1.57 > 1.5 \text{ m}, \text{所以 } A = \pi \times 1.5^2 = 7.07 \text{ m}^2 ;$$

$$\text{取 } \eta = 1.1, C_0 = C_h = 600\,000 \text{ kPa/m}, K_h = 0.8, A_h = 0.785 \text{ m}^2, A = \pi \times 1.5^2 = 7.07 \text{ m}^2, E = 29 \times 10^6 \text{ kPa}, \text{所以 :}$$

$$\lambda = \eta \cdot k_h \frac{C_h A_h}{C_0 A} = 0.0978$$

$$\beta = \frac{\eta EA_h}{2C_0 A h} = 0.1477$$

将 λ, β 值代入式(27)得 $\alpha = 0.3228$

将 $U = 3.61$ m, $h = 20$ m $[\overline{\tau}] = 65$ kPa $\times 0.9 = 58.5$ kPa $\alpha = 0.3228, \lambda = 0.0978$ 代入式(30)得计算承载力为 $[P] = 2\,913$ kN。

与原文计算结果 $[P] = 2\,826$ kN 相比 计算承载力提高了 10.3%。

4.2 分别用本文方法与文献 [2] 的方法对不同地区不同桩长的桩进行计算并与试桩结果进行比较 如表 1 所示。

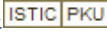
表 1 桩基承载力计算结果比较表

地区	北京市	天津市	河北省	河北省	山东省
桩径/m	1.0	1.0	1.25	1	1
桩长/m	50.9	52.9	47.9	47.9	47.9
设计承载力/kN	3 353	4 335	4 694	4 004	3 811
计算承载力/kN	3 730	5 063	5 279	4 544	4 679
试桩承载力/kN	6 766	8 550	1 1000	10 200	9 600
三者比值	1 : 1.11 : 2.02	1 : 1.15 : 1.97	1 : 1.12 : 2.55	1 : 1.13 : 2.55	1 : 1.23 : 2.52

由表 1 可见 计算承载力值较规范方法的设计承载力提高 11% ~ 23%。主力加附加力作用受压容许承载力提高 20%^[2] 的情况下 计算承载力值较试桩承

(下转第 99 页)

万方数据

作者: 冯国军, FENG Guo-jun
作者单位: 铁道第三勘察设计院, 天津 300142
刊名: 铁道工程学报 
英文刊名: JOURNAL OF RAILWAY ENGINEERING SOCIETY
年, 卷(期): 2007, 24(2)
被引用次数: 1次

参考文献(7条)

1. 刘齐建 大直径桥梁桩基竖向承载力分析及实验研究[学位论文] 2002
2. TB 10002. 5-2005. 铁路桥涵地基和基础设计规范
3. 王伯惠;上官兴 中国钻孔灌注桩新发展 1999
4. 赵明华 基于荷载传递法的高承台桩基沉降计算[期刊论文]-岩土力学与工程学报 2005(13)
5. JTJ 024-1985. 公路桥涵地基与基础设计规范
6. 铁道部第三勘察设计院 桥涵地基和基础 2002
7. 铁道部第三勘察设计院 京沪桩基承载力试验报告 2006

本文读者也读过(10条)

1. 夏锦红. 赵磊. 畅君文. XIA Jin-hong. ZHAO Lei. CHANG Jun-wen 建筑桩基承载力计算探讨[期刊论文]-建筑科学 2008, 24(11)
2. 陈迫田. 王震勇 对规范(JGJ94-94)嵌岩桩承载力计算的一点看法[期刊论文]-岩土工程界2006, 9(4)
3. 孔垂烛. KONG Chui-zhu 桩基规范中嵌岩桩竖向承载力计算方法分析[期刊论文]-平顶山工学院学报2005, 14(6)
4. 李程. 戴公连 高边坡摩擦桩承载能力的数值分析[期刊论文]-中外公路2008, 28(1)
5. 侯春辉. Hou Chunhui 关于摩擦桩承载力计算深度修正的探讨[期刊论文]-铁道标准设计2005(3)
6. 张长安 大直径深长摩擦桩承载特性研究[学位论文]2008
7. 杭广军. 许强. 田景丽 计算桩基础承载力方法的探讨[期刊论文]-中国科技博览2009(31)
8. 金菊顺. 王幼青. 肖立凡 低承台复合桩基承载力计算方法研究[期刊论文]-哈尔滨工业大学学报2004, 36(5)
9. 姜晨光. Xiaolin Bai. 巩亮生. 石伟南. JIANG Chen-guang. Xiaolin Bai. GONG Liang-sheng. SHI Wei-nan 摩擦桩单桩竖向承载力计算方法[期刊论文]-辽宁工程技术大学学报(自然科学版) 2008, 27(z1)
10. 彭劼. 施建勇. 娄亮. 郑少军 考虑时效作用的桩基承载力计算方法研究[期刊论文]-岩土力学2003, 24(1)

引证文献(1条)

1. 张麒麟. 卓卫东. 范立础 基于变形协调的斜桩轴向承载力计算方法[期刊论文]-广西大学学报(自然科学版) 2013(4)

引用本文格式: 冯国军. FENG Guo-jun 摩擦桩竖向承载力计算方法研究[期刊论文]-铁道工程学报 2007(2)