

软土地基超长 PHC 管桩的荷载传递机理分析

周万清 李贤武¹

(三峡大学土木与建筑学院,宜昌 443002;中国建筑第三工程局有限公司¹,武汉 430040)

摘要 软土地基中超长预应力混凝土管桩在桥梁和建筑工程中得到了广泛的应用,但超长预应力混凝土管桩的承载机理还不很清楚。土体采用非线性弹性 Duncan - Chang 模型,桩土界面采用 Goodman 接触面单元,桩体部分采用 Hognestad 方程对桩土的相互作用进行非线性有限元分析。结果表明:在有效荷载作用下,桩身变形在弹性范围内,桩底沉降是持力层的压缩变形。

关键词 超长预应力混凝土管桩 接触 桩土共同作用

中图法分类号 TU473.1; **文献标志码** A

由于软土一般具有厚度大、含水量高、孔隙比大、强度低、压缩性高等特点,因此软土地基的承载力低,承受荷载后变形大,在建设中有疏忽,必然导致建筑物的开裂,甚至损坏和失稳。所以软弱地基中超长桩的使用是大量而且非常必须的。现行规范对超长桩的设计并非建立在超长桩的承载变形机理的基础之上,这种理论与实践之间的矛盾,使得研究超长桩荷载传递机理不仅是桩基础理论自身发展的需要,更是工程界的迫切要求。

本文土体采用非线性弹性 Duncan - Chang 模型,桩土界面采用 Goodman 接触面单元,桩体部分采用 Hognestad 方程对桩土的相互作用进行非线性有限元分析。

1 本构关系

1.1 土的本构关系

工程实际中可能遇到的土类及其受荷条件千差万别,通常用理想化的地基模型来模拟实际的土性态。代表性的地基模型主要有:线性弹性地基模型、非线性弹性地基模型、弹塑性地基模型、黏弹性地基模型、黏塑性地基模型、准弹性地基模型、内时

地基模型等七类^[1]。目前应用较广泛的有 Duncan-Chang 模型为基础的弹性非线性模型,用增量法可获得与实际相符的相互作用问题的结果。

E_T 为切线弹性模量, ν_t 为切线泊松比。

$$E_T = \left[1 - \frac{R_f(1 - \sin\varphi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2C \cos\varphi + 2\sigma_3 \sin\varphi} \right]^2 KP_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \quad (1)$$

$$\nu_t = \frac{G - F \lg \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)}{(1 - A)^2} \quad (2)$$

$$A = \frac{D(\sigma_1 - \sigma_3)}{KP_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \left[1 - \frac{R_f(1 - \sin\varphi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2C \cos\varphi + 2\sigma_3 \sin\varphi} \right]}.$$

式中: P_a 为大气压力; C, φ 是强度指标,其 K, n, R_f, D, F 和 G 为六个计算参数,可以通过土的常规三轴试验获得。

由式(2)算得 ν_t 的有时可能大于 0.5,在试验中测得的 ν_t 值也很有可能超过 0.5,这是由于土体存在剪胀性。然而,有限元计算中, ν_t 若大于或等于 0.5,劲度矩阵就出现异常。因此,实际计算中,当 $\nu_t > 0.49$ 时,令 $\nu_t = 0.49$ 。

对于卸载的情况,应由卸荷试验测定弹性模量,以 E_{ur} 表示。邓肯等人假定 E_{ur} 不随 $\sigma_1 - \sigma_3$ 变化,仅随 σ_3 而变。回弹模量 $E_{ur} = K_{ur} P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n$ 。

在有限元计算中要给出一个在什么情况下使

第一作者简介:周万清(1978—),重庆丰都人,讲师,博士,研究方向:地基与基础。

用回弹模量 E_w 的标准,实际上是一个屈服准则。当然,这里不需要像弹塑性模型的屈服准则那样严格,只要有一个粗略的规定即可。可以采用下面的标准:当 $\sigma_1 - \sigma_3 < (\sigma_1 - \sigma_3)_0$, 且 $s < s_0$ 时,用 E_w , 否则用 E_T 。这里 $(\sigma_1 - \sigma_3)_0$ 为历史上曾经达到的最大变应力, s_0 为历史上曾达到的最大应力水平。

1.2 预应力混凝土的本构模型

预应力混凝土结构一般用于抗拉、抗弯、抗剪和抗扭等构件当中,很少用在抗压的构件当中。在预制混凝土管桩中施加预应力的作用有几点:(1)混凝土预制桩在起吊、运输的过程中减小桩身的拉应力,保证桩身质量;(2)在预制桩捶击施工时,防止桩身反弹产生拉应力导致桩身开裂;(3)对于桩身受到水平力时,预应力可提高桩身的抗弯强度,防止桩身开裂。预制混凝土管桩施加预应力虽然并不能改变混凝土的本构模型,但是改变了混凝土的初始应力^[2]。

超长嵌岩桩桩顶沉降主要是由于桩身压缩引起的,最大试验荷载下桩身压缩量占桩顶累计沉降量的 81% 以上。所以桩越长,桩身在同一荷载水平下压缩量越大,桩顶沉降也越大。在同一荷载水平下,随着桩长的增加,桩身总压缩量加大,且弹性压缩量和塑性压缩量均增大;同时在最大荷载水平下,随着桩长的增加,桩身混凝土弹性压缩量占总压缩量的比例下降,而塑性压缩量占总压缩量的比例增加^[3]。这就说明了超长桩在承受较大荷载时,桩身的上段承受的荷载也较大。超长桩在工作荷载作用下混凝土的应力-应变往往处于非弹性状态。国内外许多学者对混凝土单轴应力-应变关系进行过深入的研究,提出过不下十种本构方程,但目前国际上常用的有 Hognestad 方程和 Rüschi 方程。本文混凝土的本构模型将采用 Hognestad 方程,其具体表达式如下:

$$\text{上升段: } \sigma = \sigma_0 \left[2 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right) - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^2 \right] \quad \text{当 } \varepsilon \leq \varepsilon_0 \quad (3)$$

$$\text{下降段: } \sigma = \sigma_0 \left[1 - 0.15 \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\varepsilon_u - \varepsilon_0} \right) \right] \quad \text{当 } \varepsilon_0 < \varepsilon \leq \varepsilon_u \quad (4)$$

超长桩在工作荷载作用下,其轴向压应力一般不会超过其混凝土的强度,因而取抛物线段曲线来

推导其本构方程为:

$$E_T = \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} = \frac{2\sigma_0}{\varepsilon_0} \left(1 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right) = \frac{2\sigma_0}{\varepsilon_0} \sqrt{1 - \frac{\sigma}{\sigma_0}} \quad (5)$$

由于预应力混凝土管桩在受上部结构传来的荷载以前,已经有了预压应力。设管桩的初始预压应力为 σ_{pc} , 管桩的初始压力一般在管桩产品说明书有写,如果在说明书上没有标明时,可以取 $\sigma_{pc} = 5 \text{ MPa}$ ^[2]。其相应的初始切线弹性模量为

$$E_{T0} = \frac{2\sigma_0}{\varepsilon_0} \sqrt{1 - \frac{\sigma_{pc}}{\sigma_0}}$$

混凝土的泊松比与混凝土的强度等级没有明显的关系,一般可以取 $\mu = 0.2$ 就可以满足精度要求。

1.3 接触面的本构关系

土与结构的共同作用,历来是土力学中比较困难的问题之一。有限元法的应用为解决共同作用提供了新的有效的计算方法。共同作用有两种情况:一种是土与结构之间只有力的传递,没有相对位移,也就是没有错动和拉开。它们可以看成由两种材料组成的连续体。进行有限元计算时不产生任何困难;另一种情况是土与结构之间发生相对位移,从整体上来说是不连续的,为了进行有限元计算,就要设置所谓接触面单元,来处理这种不连续性。接触面的研究是土与结构物相互作用的主要课题之一。它包括两个方面:一是接触面的本构数学模型,是接触面应力特性研究的重要方面;二是接触面单元,是有限元计算中用以模拟接触面变形的一种特殊单元^[4]。哥德曼 (Goodman) 等人提出的岩石节理单元,被广泛用作接触面单元。这种单元为无厚度的四结点单元。两片接触面之间设想由无数的法向和切向的微小弹簧相联系。接触面上相应的应力有法向应力和剪应力,而两片接触面上各点在受力后产生的相对位移为法向相对位移和切向相对位移。假定接触面上的法向应力和剪应力与法向相对位移和切向相对位移之间无交叉影响。

由虚位移原理:

$$\{F\}^e = \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} [B]^T [k_0] [B] dx \{\delta\}^e = [k] \{\delta\}^e \quad (6)$$

式(6)中: L 为接触面单元长度。

单元劲度矩阵:

$$[k] = \frac{L}{6} \left\{ \begin{array}{ccccccc} 2k_s & & & & & & \\ 0 & 2k_n & & & & & \\ k_s & 0 & 2k_s & & & & \\ 0 & k_n & 0 & 2k_n & & & \\ -k_s & 0 & -2k_s & 0 & 2k_s & & \\ 0 & -k_s & 0 & 2k_n & 0 & 2k_n & \\ -2k_s & 0 & -k_s & 0 & k_s & 0 & 2k_s \\ 0 & -2k_n & 0 & -k_n & 0 & k_n & 0 \end{array} \right\} \text{对称}$$

单元刚度矩阵 $[k]$ 里弹性系数 k_n 、 k_s 的取值,与应力变形状态有关。对法向刚度 k_n ,当接触面拉开时,取一个很小的值,以便计算出的结点力很小,反映接触面两侧之间无力的联系;如果接触面没有拉开,取 k_n 为很大的值,以反映法向相对位移很小。由于在竖向荷载作用下桩土之间的接触面一般不会沿法向拉开,所以在计算中取 $k_n=10^7$ N/m。切向刚度 k_s 由所取的接触面抗剪阻力由桩-土间相对位移的函数关系来推导。一般常用克拉夫和邓肯提出的接触面双曲线方程来推导切向刚度 k_s ,其指数关系为:

$$\tau = f(s) = A[1 - \exp^{-Bs}] \tag{7}$$

式(7)中 τ 、 $f(s)$ 为桩侧摩阻力; s 为桩土相对位移; A 、 B 为岩土参数。

$$K_s = \frac{\partial \tau}{\partial s} = AB \left[1 - \frac{f(s)}{A} \right]。$$

在双曲线假定下,可推得

$$K_s = K_1 \gamma_w \left(\frac{\sigma_n}{P_a} \right)^n \left(1 - \frac{R_f \tau}{f_u} \right) \tag{8}$$

式(8)中: K_1 、 n 为参数; γ_w 为水的密度; P_a 为大气压强; f_u 为桩侧极限摩阻力,但并不是 $f(s)$ 的最大值; R_f 为 f_u 与当 $s \rightarrow \infty$ 所对应 $f(s)$ 的值的比值。

2 计算处理

2.1 计算方法

非线性弹性问题是有限元中相对简单的问题,但非线性方程组的各种解法,仍以反复求解这种线

性方程组为基础,直到获得收敛解为止。对于土体的材料非线性问题的解法,一般来说有迭代法和增量法两种^[5]。

迭代法是用修正劲度的方法(变劲度法),或保持劲度不变而用调整荷载的方法(常劲度法),重复试算逐步逼近真实解,在每次试算中作一次线性有限元计算。它可分为割线迭代、余量迭代、初应力迭代和初应变迭代等。

增量法是将全荷载分为若干级微小增量,逐级用有限元法进行计算。对于每一级增量,在计算时假定材料性质不变,作线性有限元计算,解得位移、应变和应力的增量。而各级荷载之间,材料性质变化,刚度矩阵变化,反映了非线性的应力-应变关系,这种方法实际上是用分段直线来逼近曲线。增量法有:基本增量法、中点增量法和增量迭代法。工程中广泛应用的还是中点增量法。钢筋混凝土、土及桩土接触面单元的本构模型为弹性非线性模型,所以本文拟采用中点增量法来进行有限元计算。

$$[K]\{\Delta\delta\} = \{\Delta R\} \tag{9}$$

式(9)中 $[K]$ 为刚度矩阵,是普通单元及桩单元、土单元刚度矩阵和特殊单元及桩土接触面单元刚度矩阵集成的整体刚度矩阵; $\Delta\delta$ 为位移增量; ΔR 为荷载增量。

2.2 边界条件的处理

由于土体是半无限体,所以在有限元计算当中应该取确定的边界。为了反映桩尖以下土体的受力和变形,计算域通常要向下延伸约 $(20-30)R$ 的深度, R 为桩的半径。侧向土中,计算域网格所划的范围也要超过 $(20-30)R$ 。下边界和侧面都为固定边界,上侧为自由边界^[4]。

本文选用一个长为40 m,桩径为500 mm的预应力混凝土管桩,桩身混凝土的等级为 C_{60} ,拟建场地土层自上而下为:①硬黏土,厚度为5 m,②软黏土,厚度为30 m,③砂土,厚度为20 m。所以侧向土的边界为 $30R=7.5$ m,桩尖土边界为 $40\text{ m}+30R=47.5$ m。

2.3 单元网格的划分

单桩在竖向荷载作用下,其几何形状、变形及荷载都对称于桩的垂直轴线。所以在有限元计算

中,取对称平面进行二维有限元计算就可以满足精度的要求。在划分网格的时候,桩和土都采用3节点的三角形单元,桩土和土土接触面的单元选择4节点四边形的 Goodman 单元。由于桩底土和侧面的土会产生很大的剪切力,所以设置接触面的时候,不仅仅在桩土的接触面之间设置接触单元,还应该在桩下土与侧面土之间设置接触面单元,即接触面单元应该一直延伸到底面。

2.4 计算参数的选取

本文收集 Duncan-Chang 模型参数及接触面单元双曲线参数的部分经验值,这些参数来源于文献[6,7]提供的经验值或个别工程的试验值。表1中给出了土的切线弹性模量参数;表2中给出了土的切线体积模量;表3中给出了桩土接触面单元双曲线经验值系数。

表 1 Duncan-Chang 模型切线弹性模量参数					
名称	C (kpa)	Φ	R_f	K	n
软黏土	11	9	0.86	105	0.82
硬黏土	18	32	0.83	550	0.79
砂土		40	0.8	800	0.75

表 2 Duncan-Chang 模型切线泊松比参数			
名称	G	F	D
粘土	0.25	0.18	1.67
砂土	0.54	0.24	4

表 3 接触面单元双曲线参数				
	K_j	n	R_f	δ
软黏土和混凝土	4 000	0.6	0.6	$\delta = \Phi$
硬黏土与混凝土	4 000	0.6	0.6	$\delta = 0.3 \Phi$
砂土与混凝土	8 000	0.7	0.8	$\delta = 0.3 \Phi$

3 计算结果分析

通过计算分析,图1中给出了管桩的荷载与沉降曲线。当荷载为40 00 kN 的时候,桩顶沉降为31.1 mm,桩底沉降为15.54 mm。分析说明,用超长桩不仅能承受巨大的荷载,同时能大大降低桩顶的沉降。

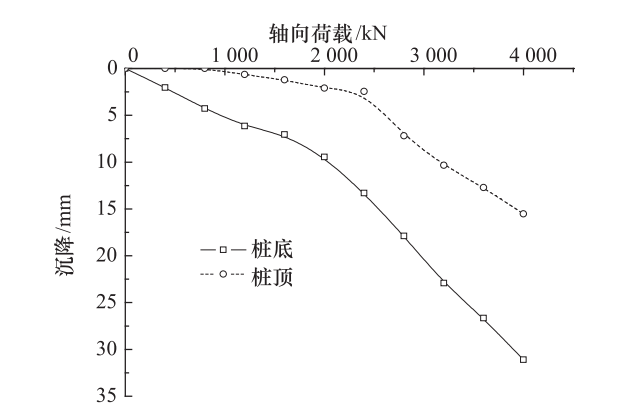


图 1 桩顶荷载与桩顶、桩尖沉降关系

图2中给出了各级荷载作用下轴力分布图。第一级荷载为800 kN,然后每级增加400 kN。从图中可以看出,在前两级荷载作用下,桩底的轴力为0。说明荷载全部由桩身摩阻力来平衡,表现为摩擦桩的受力特性。随着荷载的进一步增大,桩身摩阻力逐渐得到了发挥,桩底轴力也逐渐增大,表现为端承摩擦桩的受力特性。

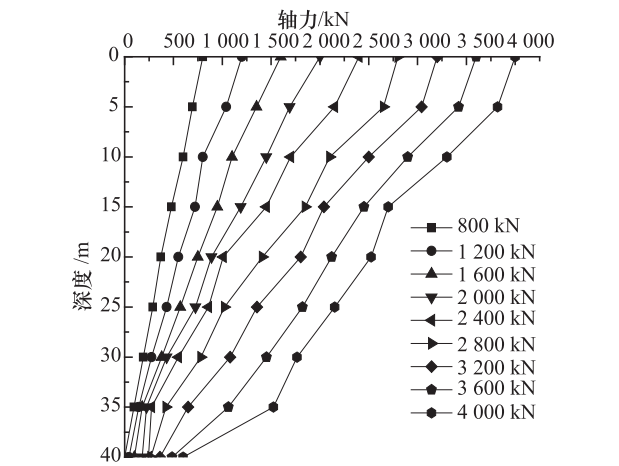


图 2 各级荷载作用下轴力分布图

4 结论

土体采用非线性弹性 Duncan-Chang 模型,桩土界面采用 Goodman 接触面单元,桩体部分采用 Hognestad 方程能对桩土的相互作用进行非线性有限元分析,并且分析结果较为符合单桩实际荷载传递机理。

(下转第 4847 页)

aggregate prepared with natural aggregate which was substitute with recycled aggregate partly or completely were different from common concrete. The influence of recycled aggregate replacement rate on properties of concrete with the same water-cement ratio was discussed in this paper. As shown in the results, on the performance, the fluidness of recycled aggregate concrete decreases with the addition of recycled aggregate, but the cohesiveness and the water-retaining property increases. On the strength, it is benefit for the strength of recycled aggregate concrete when the recycled aggregate replacement rate reaches around 50%.

[Key words] recycled aggregate recycled aggregate concrete performance strength replacement rate



(上接第 4842 页)

预应力混凝土管桩在荷载传递过程中,桩顶沉降包括桩身变形和桩底沉降。在有效荷载作用下,桩身变形在弹性范围内,桩底沉降是持力层的压缩变形。在荷载较小时,表现为摩擦桩的受力特性,随着荷载的增加,表现出端承摩擦桩的受力特性。

参 考 文 献

1 钱家欢,殷宗泽.土工数值分析.北京:中国铁道出版社,1991

2 阮起楠.预应力混凝土管桩.北京:中国建材工业出版社,1999

3 张忠苗.软土地基超长嵌岩桩的受力性状.岩土工程学报,2001;23(2):552—556

4 钱家欢,殷宗泽.土工原理与计算(第二版).北京:中国水利水电出版社,1996

5 郭乙木,陶伟明,庄茁.线性与非线性有限元及其应用.北京:机械工业出版社,2004

6 池跃君,敖立新,顾晓鲁.超长桩荷载传递机理的计算分析.特种结构,2000;17(4):12—15

7 曾友金,章为民.用有限单元法分析超长单桩的荷载传递.岩土力学,2002;23(6):803—806

Bearing Mechanism of Super-long PHC Pipe Piles
in Soft Soil Foundation

ZHOU Wan-qing, LI Xian-wu¹

(College of Civil Engineering and Architecture, China Three Gorges University, Yichang 443002, P. R. China;
China Construction Third Engineering Division Corp. LTD¹, Wuhan 430040, P. R. China)

[Abstract] Prestressed high strength concrete (PHC) pipe piles are widely used to construct foundation for bridge and construction structures in soft soil foundation, but the bearing mechanism of super long prestressed concrete pipe is not clear. The nonlinear finite element analysis of the pile – soil interaction is discussed by using the Duncan-Chang model for soil, Goodman element for the contact and Hognestad equation for the pile. Results show that the strain of pile is elastic, and the settlement of pile tip is the compression of the soil at the pile tip.

[Key words] super long PHC pile contact interaction of pile-soil