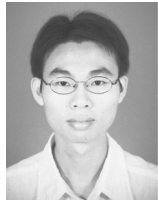


· 地基与基础 ·



满足桩轴向刚度条件的高桩码头桩基计算模型

杨锡镒

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510230)

摘要: 通过在桩身一定的位置施加一个轴向弹簧, 建立高桩码头的桩基计算模型。根据《高桩码头设计与施工规范》中关于桩轴向刚性系数的计算公式, 给出了不同情况下轴向弹簧刚度系数大小以及施加位置的计算方法。该方法能满足嵌固点法和 m 法计算模式下桩基计算模型的轴向刚度相同且与规范规定一致。结合该方法, 分别采用嵌固点法和 m 法建立某高桩码头工程实例的空间有限元模型。计算结果对比表明: 桩身轴力、桩顶弯矩、上部结构各构件的内力均十分接近, 验证了该方法的合理可行性, 可为高桩码头结构计算提供参考。

关键词: 高桩码头; 桩基; 桩轴向刚度; 计算模型

中图分类号: U 656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)12-0165-06

Pile foundation calculation model of high-piled wharf satisfying pile's axial stiffness condition

YANG Xi-liu

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

Abstract: Pile foundation calculation model of high-piled wharf is established applying an axial spring on a certain position of the pile body. According to the calculation formula of axial stiffness coefficient of pile in *Design and Construction Code for Open Type Wharf on Piles*, a calculation method for the stiffness coefficient and applied position of the axial spring in different situations is given. By the method, the axial stiffness of pile foundation model in imaginary fixing points method and m -method calculation mode are same and consistent with the code. Combined with this method, two spatial finite element models for a high-piled wharf engineering example are established by imaginary fixing points method and m -method respectively. The comparison of the calculation results show that axial force of pile shaft, bending moment at pile top and the internal forces of each component in superstructure are similar. It proves that the suggested method is feasible and reasonable, which serve as references for structure calculation of high-piled wharf.

Key words: high-piled wharf; pile foundation; axial stiffness of pile; calculation model

桩的轴向刚度是指桩顶轴向单位变形所需的轴向力。由于桩顶连接桩帽作为纵横梁的支座, 因此桩的轴向刚度不仅影响桩基, 而且还影响上部结构纵横梁的内力计算, 是高桩码头结构内力计算的一个重要参数。

近年来, 虽然国内有不少学者对单桩的轴向刚度进行了深入的研究和分析^[1-5], 但这些研究主

要集中于单桩轴向刚度的计算方法及其影响因素分析, 并没有提出在具体结构计算中如何建立桩基计算模型才能满足桩的轴向刚度条件。文献[6]根据数理统计的方法确定桩土的轴向刚度与桩土极限阻力之间的比例关系, 从而可以计算泥下桩侧土的轴向刚度及桩尖土的轴向刚度, 提出了桩土轴向一维有限元计算模型, 但该方法只能与 m 法配套使用,

收稿日期: 2013-03-19

作者简介: 杨锡镒(1982—), 男, 博士, 工程师, 主要从事港口工程结构计算及程序开发。

不适用于嵌固点法,具有一定的局限性。

目前,许多工程师在进行高桩码头结构计算时,大多采用梁单元模拟桩,并通过施加弹簧来模拟桩土之间的相互作用。当采用嵌固点法时,常在嵌固点处施加一个与桩轴线平行的轴向弹簧;当采用m法时,除了在桩尖处施加轴向弹簧外,还会在桩身泥面以下的部分施加与桩身垂直的桩侧弹簧。基于这一建模思路,一般认为桩基计算模型的轴向刚度仅与轴向弹簧的刚度系数大小有关,但经过理论分析发现,当桩的入土长度足够长时,轴向弹簧如果依然施加在嵌固点或桩尖处,桩基计算模型的轴向刚度将不符合给定的桩轴向刚度条件。

基于此,本文根据《高桩码头设计与施工规范》中关于桩轴向刚性系数的计算公式,给出了不同情况下桩轴向弹簧刚度系数大小以及施加位置的计算方法,希望能为高桩码头结构计算提供有价值的参考。

1 桩轴向弹簧刚度系数大小的计算

按照前文所述的桩基计算模型建模思路,桩入土部分的桩土相互作用简化成轴向弹簧和侧向弹簧施加在桩单元上,如图1所示。

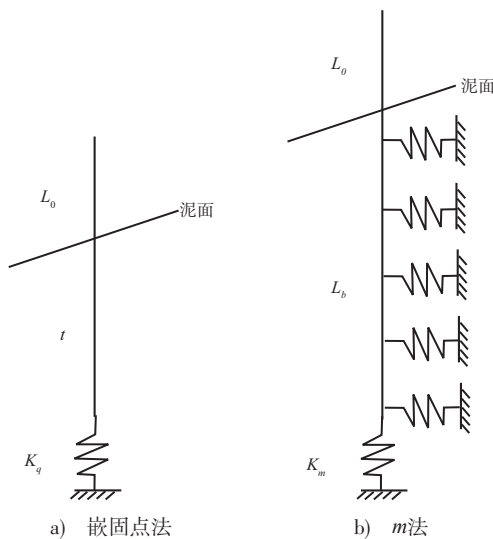


图1 桩基计算模型

图1中t为受弯嵌固点距离泥面的深度,可按JTS 167—4—2012《港口工程桩基规范》^[7]中的规定计算;K_q为采用嵌固点法建立桩基计算模型时

轴向弹簧的刚度系数;L_b为桩的实际入土长度;K_m为采用m法建立桩基计算模型时轴向弹簧的刚度系数。

根据JTS 167—1—2010《高桩码头设计与施工规范》^[8]中的规定,当无试桩资料时,摩擦桩的轴向刚性系数可按以下公式计算:

$$\frac{1}{K} = \frac{L_0}{EA} + \frac{1}{C} \quad (1)$$

式中:K为桩的轴向刚性系数(kN/m),即桩顶轴向单位变形所需的轴向力;L₀为桩在计算泥面以上的长度(m);E为桩材料的弹性模量(kPa);A为桩身横截面面积(m²);C为桩入土部分的单位变形所需的轴向力(kN/m),变形包括土中桩身的压缩变形与桩端下土的沉降变形两部分,可按式(2)计算:

$$C = T_c Q_{ud} \quad (2)$$

式中:T_c为系数(m⁻¹),宜取115~145,采用钢管桩时,宜取小值;Q_{ud}为单桩垂直极限承载力标准值(kN)。

根据参数C的物理意义,式(1)中的1/C则表示桩入土部分在单位轴向力作用下发生的变形,结合图1所示的桩基计算模型,可把1/C拆分成两部分,用以下公式表示:

嵌固点法 $\frac{1}{C} = \frac{t}{EA} + \frac{1}{K_q} \quad (3)$

m法 $\frac{1}{C} = \frac{L_b}{EA} + \frac{1}{K_m} \quad (4)$

由式(3)和式(4)可知,桩基计算模型的轴向弹簧刚度系数可按式(5)计算:

嵌固点法 $K_q = \frac{1}{\frac{1}{C} - \frac{t}{EA}} \quad (5)$

m法 $K_m = \frac{1}{\frac{1}{C} - \frac{L_b}{EA}} \quad (6)$

但值得注意的是,图1所示的桩基计算模型无法模拟桩侧土在桩身轴线方向上产生的摩擦阻力,而实际上由于这部分摩擦阻力的存在,桩入土部分受到的轴向力将随深度的增加而逐渐减小,桩身的压缩变形也随深度的增加而逐渐减小。因此,假设在桩顶施加一个单位轴向力,桩入土部分的桩身压缩变形实际上要小于式(4)中的L_b/EA。并当桩的入土长度L_b越大,按式(2)

计算的 C 值就越大,就会可能出现 $1/C \leq L_b/EA$,甚至是 $1/C \leq t/EA$ 的情况。此时,按照式(5)和式(6)计算得到的轴向弹簧刚度系数为负值,这显然是不对的。

有些工程师认为当 $1/C \leq t/EA$ 或 $1/C \leq L_b/EA$ 时,只需把轴向弹簧的刚度系数取一个极大值(例如 10^9 kN/m),让弹簧的压缩变形趋于0即可,轴向弹簧依然施加在模型的嵌固点或桩尖处。但其实这种做法是不够的,桩基计算模型的轴向刚性系数仍与规范规定不符。

首先,把式(3)和(4)代入式(1)得:

$$\text{嵌固点法} \quad \frac{1}{K} = \frac{L_0}{EA} + \frac{t}{EA} + \frac{1}{K_q} \quad (7)$$

$$m\text{法} \quad \frac{1}{K} = \frac{L_0}{EA} + \frac{L_b}{EA} + \frac{1}{K_m} \quad (8)$$

假设轴向弹簧始终施加在模型的嵌固点或桩尖处,根据式(7)和式(8),按照前文所述的轴向弹簧刚度系数计算方法,计算3种情况桩基计算模型的轴向刚性系数,如表1所示。

从表1可以看出,只有当 $t/EA < L_b/EA < 1/C$ 时,嵌固点法和 m 法桩基计算模型的轴向刚性系数才会相等并且与规范规定一致,其余情况都不相等。因此,当 $1/C \leq t/EA$ 或 $1/C \leq L_b/EA$ 时,轴向弹簧不能直接施加在模型的嵌固点或桩尖处。

表1 各情况下桩基计算模型的轴向刚性系数

情况	方法	轴向刚性系数	结论
$\frac{t}{EA} < \frac{L_b}{EA} < \frac{1}{C}$	嵌固点法	$\frac{1}{K} = \frac{L_0}{EA} + \frac{t}{EA} + \frac{1}{K_q} = \frac{L_0}{EA} + \frac{t}{EA} + \left(\frac{1}{C} - \frac{t}{EA}\right) = \frac{L_0}{EA} + \frac{1}{C}$	相等
	m 法	$\frac{1}{K} = \frac{L_0}{EA} + \frac{L_b}{EA} + \frac{1}{K_m} = \frac{L_0}{EA} + \frac{L_b}{EA} + \left(\frac{1}{C} - \frac{L_b}{EA}\right) = \frac{L_0}{EA} + \frac{1}{C}$	
$\frac{t}{EA} < \frac{1}{C} \leq \frac{L_b}{EA}$	嵌固点法	$\frac{1}{K} = \frac{L_0}{EA} + \frac{t}{EA} + \frac{1}{K_q} = \frac{L_0}{EA} + \frac{t}{EA} + \left(\frac{1}{C} - \frac{t}{EA}\right) = \frac{L_0}{EA} + \frac{1}{C}$	不等
	m 法	$\frac{1}{K} = \frac{L_0}{EA} + \frac{L_b}{EA} + \frac{1}{K_m} = \frac{L_0}{EA} + \frac{L_b}{EA} + \frac{1}{10^9} \approx \frac{L_0}{EA} + \frac{L_b}{EA}$	
$\frac{1}{C} \leq \frac{t}{EA} < \frac{L_b}{EA}$	嵌固点法	$\frac{1}{K} = \frac{L_0}{EA} + \frac{t}{EA} + \frac{1}{K_q} = \frac{L_0}{EA} + \frac{t}{EA} + \frac{1}{10^9} \approx \frac{L_0}{EA} + \frac{t}{EA}$	不等
	m 法	$\frac{1}{K} = \frac{L_0}{EA} + \frac{L_b}{EA} + \frac{1}{K_m} = \frac{L_0}{EA} + \frac{L_b}{EA} + \frac{1}{10^9} \approx \frac{L_0}{EA} + \frac{L_b}{EA}$	

2 桩轴向弹簧施加位置的计算

考虑到桩基计算主要包括轴向承载力和水平力作用下桩弯矩的计算,而嵌固点法中的嵌固深度 t 和 m 法中的桩入土长度 L_b 对水平力作用下桩的弯矩计算至关重要,因此在图1所示的桩基计算模型中,不能为了满足桩轴向刚度条件就去修改模型的桩长。而最简单的处理方法是,把轴向弹簧的施加位置修改到桩身的适当位置,则既可满足桩的轴向刚度条件又不影响水平力作用下桩弯矩的计算。弹簧施加位置的计算方法如下。

2.1 嵌固点法

1) 根据《港口工程桩基规范》计算受弯嵌固点距离泥面的长度 t 。

2) 判断 $1/C$ 与 t/EA 的大小关系。

① 当 $\frac{1}{C} > \frac{t}{EA}$ 时。

桩的轴向弹簧刚度系数按式(5)计算,且轴向弹簧施加在桩基计算模型的嵌固点处,如图2a)所示。如此,桩基计算模型的轴向刚性系数为:

$$\begin{aligned} \frac{1}{K} &= \frac{L_0}{EA} + \frac{t}{EA} + \frac{1}{K_q} = \frac{L_0}{EA} + \frac{t}{EA} + \left(\frac{1}{C} - \frac{t}{EA}\right) \\ &= \frac{L_0}{EA} + \frac{1}{C} \end{aligned} \quad (9)$$

② 当 $\frac{1}{C} \leq \frac{t}{EA}$ 时。

桩的轴向弹簧刚度系数取一极大值,例如 $K_q=1 \times 10^9$ kN/m。轴向弹簧施加的位置应使该位置以上的桩身在单位轴向力作用下产生的压缩变形刚好等于 $1/C$ 。即轴向弹簧施加位置距离泥面的长度按下式计算,桩基计算模型如图2b)所示。

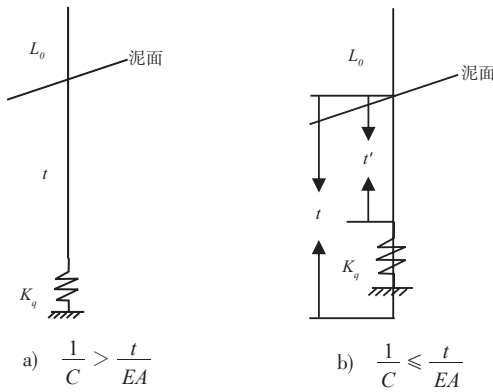


图2 嵌固点法桩基计算模型

$$t' = \frac{EA}{C} \quad (10)$$

如此，桩基计算模型的轴向刚性系数为：

$$\frac{1}{K} = \frac{L_0}{EA} + \frac{t'}{EA} + \frac{1}{K_q} = \frac{L_0}{EA} + \frac{EA}{C} + \frac{1}{K_q} \approx \frac{L_0}{EA} + \frac{1}{C} \quad (11)$$

2.2 m法

1) 根据实际桩尖坐标和泥面坐标，计算桩的实际入土长度 L_b 。

2) 判断 $1/C$ 与 L_b/EA 的大小关系。

①当 $\frac{1}{C} > \frac{L_b}{EA}$ 时。

桩的轴向弹簧刚度系数按式(6)计算，且轴向弹簧施加在桩基计算模型的桩尖处，如图3a)所示。如此，桩基计算模型的轴向刚性系数为：

$$\frac{1}{K} = \frac{L_0}{EA} + \frac{L_b}{EA} + \frac{1}{K_m} = \frac{L_0}{EA} + \frac{L_b}{EA} + \frac{1}{K_m} \quad (12)$$

②当 $\frac{1}{C} \leq \frac{L_b}{EA}$ 时。

桩的轴向弹簧刚度系数取一极大值，例如 $K_m=1 \times 10^9$ kN/m。轴向弹簧施加的位置应使该位置以上的桩身在单位轴向力作用下产生的压缩变形刚好等于 $1/C$ 。即轴向弹簧施加位置距离泥面的长度按下式计算，桩基计算模型如图3b)所示。

$$L'_b = \frac{EA}{C} \quad (13)$$

如此，桩基计算模型的轴向刚性系数为：

$$\frac{1}{K} = \frac{L_0}{EA} + \frac{L'_b}{EA} + \frac{1}{K_m} = \frac{L_0}{EA} + \frac{EA}{C} + \frac{1}{K_m} \approx \frac{L_0}{EA} + \frac{1}{C} \quad (14)$$

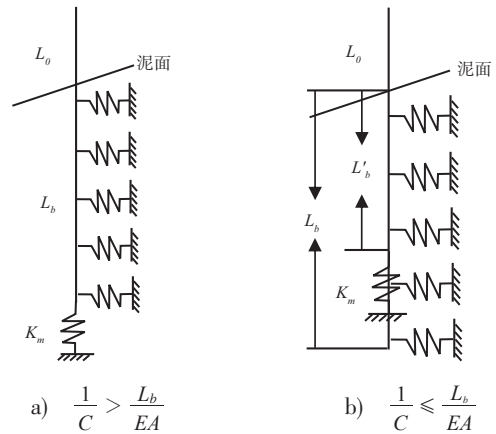


图3 m法桩基计算模型

值得注意的是，当按上述方法把轴向弹簧施加在距离泥面 t' 或 L'_b 的位置时，该位置以下的桩单元在计算时得到的轴力是仅由这部分单元的自重作用产生的，已不具有参考价值。但由于轴向弹簧只约束桩基模型在轴向方向上的位移，使其满足给定的轴向刚度条件，并不影响其他自由度，因此，该位置以上的桩单元轴力以及全部桩单元的弯矩都是可参考且符合计算要求的。

3 计算实例

为了验证本文方法的可行性，选取广东省某高桩码头的的一个结构段为工程实例，分别采用嵌固点法和分层 m 法建立该结构段的空间有限元模型进行结构计算。该码头纵向排架间距为9 m，每排架设8根基桩，其中前后轨道梁下各设一对钢管桩，采用叉桩布置，中间设置4根PHC管桩，均为单直桩，如图4所示。PHC桩桩外径为1 200 mm，壁厚150 mm，桩身混凝土等级为C40；钢管桩桩外径为1 400 mm，壁厚18 mm，所用钢材为Q345B；梁板结构的混凝土等级为C50。荷载条件包括：

1) 堆货荷载：荷载大小为20 kPa，位于两轨道梁之间，且门机工作情况下轨道1.5 m范围内不考虑堆载。

2) 卸船机荷载：前轨道轮压1 060 kN/轮，后轨道轮压1 200 kN/轮，门机轮距1.2 m，基距14 m。

3) 船舶系缆力2 000 kN，系缆力方向与码头水平向成 15° ，与码头前沿方向成 30° ，同时作用于边跨第2榀和第4榀排架上。

以最靠近码头前沿线的第1排PHC管桩为例，

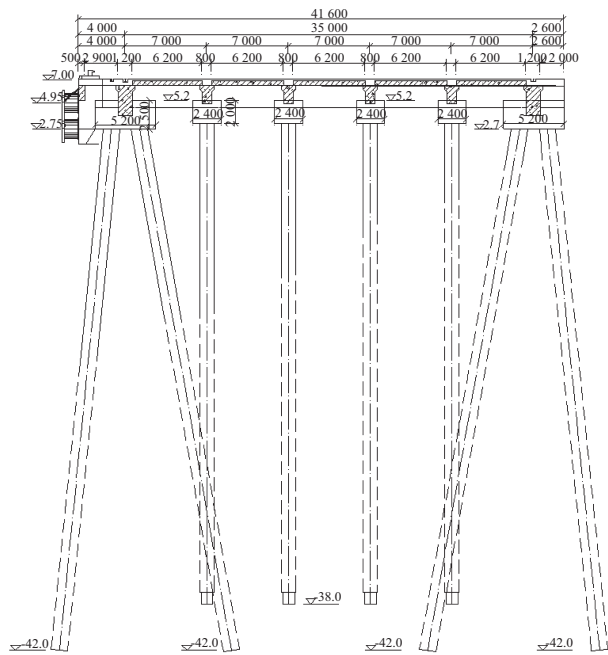


图4 码头结构断面

根据桩基穿越地基土的情况，按照《港口工程桩基规范》计算得到该排桩的受弯嵌固点距离泥面的长度 $t=5.5\text{ m}$ ；根据《高桩码头设计与施工规范》，按本文式(2)计算得到桩入土部分单位变形所需的轴向力 $C=2\ 118\ 613.179\text{ kN/m}$ ；该排桩的实际入土长度 $L_b=22.853\text{ m}$ ，通过计算可知， $t/EA < 1/C < L_b/EA$ 。其余基桩的计算过程类似。

以卸船机荷载为主导作用荷载，分别采用嵌固点法和分层 m 法建立该结构段的空间有限元模型进行计算，其中桩轴向弹簧的刚度系数大小和施加位置按本文方法计算。两种模型的计算结果见表 2~4。

从表 2~4 可以看到，2 种模型的计算结果中，除了桩 M_y 弯矩的最小值和桩 M_z 弯矩的最大值存在较大差别外，其余结果均十分接近。以某根直桩

表 2 2 种模型计算的桩位移和桩内力值

模型	桩顶位移最大值/mm			轴力/kN		M_y 弯矩/(kN·m)		M_z 弯矩/(kN·m)	
	X	Y	Z	最小	最大	最小	最大	最小	最大
嵌固点法	5.7	-4.6	-10.7	-7 847	846	-1 270	1 098	-739	543
分层 m 法	5.7	-4.6	-10.7	-7 857	823	-815	1 010	-679	189

注：其中桩轴力正值表示拉力，负值表示压力。

表 3 2 种模型计算的横梁内力值

模型	竖向弯矩/(kN·m)		水平弯矩/(kN·m)		竖向剪力/kN		水平剪力/kN	
	最小	最大	最小	最大	最小	最大	最小	最大
嵌固点法	-3 268	1 800	-463	558	-1 151	1 244	-474	409
分层 m 法	-3 269	1 839	-461	557	-1 153	1 249	-478	405

注：其中竖向弯矩值中正值表示梁上部受拉，下部受压；负值表示梁上部受压，下部受拉。

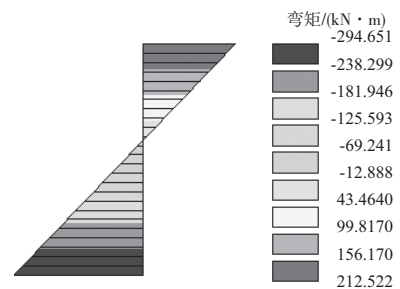
表 4 2 种模型计算的纵梁（包括轨道梁）内力值

模型	竖向弯矩/(kN·m)		水平弯矩/(kN·m)		竖向剪力/kN		水平剪力/kN	
	最小	最大	最小	最大	最小	最大	最小	最大
嵌固点法	-7 370	6 424	-568	471	-5 676	6 156	-277	346
分层 m 法	-7 374	6 338	-568	470	-5 683	6 138	-279	346

注：其中竖向弯矩值中正值表示梁上部受拉，下部受压；负值表示梁上部受压，下部受拉。

为例，根据两种模型计算的桩 M_y 弯矩结果，绘制其弯矩图进行对比，如图 5 所示。

从图 5 的对比可以发现，两种模型计算得到的桩 M_y 弯矩最大值均出现在桩顶，且结果比较接近；而桩 M_y 弯矩最小值分别出现在嵌固点处和桩身中间，数值差别较大。类似地，两种模型计算得到的桩 M_z 弯矩最小值同样出现在桩顶，结果较



a) 嵌固点法

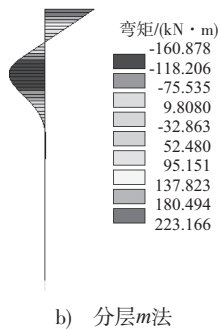


图5 2种模型中某根直桩的 M_y 弯矩图对比

为接近；桩 M_z 弯矩最大值分别出现在嵌固点处和桩身中间，数值差别较大。

造成两种模型桩身弯矩差别较大的原因是由于两种模型对桩身的水平约束假定不同引起的。嵌固点法假定桩在土下某一深度处为刚性嵌固，因而此嵌固点亦为最大弯矩所在位置及水平位移和转角零点位置。然而，大量试桩表明，桩身弯矩最大点与变形零点不在同一位置上，即这种嵌固点的假定前提本身就存在一定的局限性^[9]。 m 法是一种线弹性地基反力法，即假定桩土之间的相互作用力与桩的水平位移成正比，在水平荷载不大时，能较好地反映桩土之间的相互作用。因此，两种模型计算得到的桩身弯矩对各自模型本身来说都是合理的，存在差别也是正常的，关键在于工程人员如何选用。

虽然桩身弯矩出现一定的差别，但采用本文方法建立的两种模型计算得到的桩顶弯矩却是比较接近的，桩身轴力和桩顶位移也十分接近。正是由于桩顶各项计算结果是接近的，上部结构各构件的内力结果自然也会比较接近。因此，本文提出的方法在高桩码头结构计算中是合理可行的。

4 结论

1) 当桩的入土长度足够长，使 $1/C \leq t/EA$ 或 $1/C \leq L_v/EA$ 时，桩基计算模型的桩轴向弹簧如果依然施加在嵌固点或桩尖处，桩基计算模型的轴向刚度将不符合给定的桩轴向刚度条件。而这往往是许多工程师在结构计算中容易忽视的问题。

2) 把轴向弹簧的施加位置修改到桩身的适当位置，则既可满足桩的轴向刚度条件又不影响水平力作用下桩弯矩的计算。本文给出了不同情况下桩轴向弹簧刚度系数大小以及施加位置的计算方法，并通过工程实例对比计算，证明了该方法的合理可行性。

3) 本文提出方法中用到的一个重要参数 C ，即桩入土部分的单位变形所需的轴向力，在本文讨论过程中采用《高桩码头设计与施工规范》中规定在无试桩资料时建议的公式计算，是规范修订时通过收集大量试桩资料经统计分析确定的。而在实际应用中，当有试桩资料已知桩的轴向刚性系数，或通过除规范外其他理论方法计算得到桩的轴向刚性系数时，只需通过式(1)反算出 C 值，仍可使用本文提出的方法建立桩基计算模型，使其满足给定的桩轴向刚度条件。

参考文献:

- [1] 舒翔, 陈竹昌, 祝龙根. 摩擦群桩中单桩的等效轴向刚度及其应用[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2000, 28(6):651-655.
- [2] 舒翔, 黄雨, 陈竹昌. 单桩轴向刚度的非线性分析[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2001, 29(10):1 142-1 146.
- [3] 舒翔, 李镜培. 单桩轴向刚度理论计算公式的推导及其影响因素分析[J]. 工业建筑, 2002, 32(6):51-53.
- [4] 曾友金, 章为民, 王年香, 等. 超长单桩轴向刚度的计算及其影响因素[J]. 水利水运工程学报, 2003 (3):32-37.
- [5] 黄堂松, 丁佩民, 尚岳全. 单桩轴向刚度研究新视点[J]. 工业建筑, 2005, 35(3):42-45,52.
- [6] 陈明关, 陈奉琦. 高桩码头基桩的轴向刚度[J]. 水运工程, 2011 (2):54-57,62.
- [7] JTS 167—4—2012 港口工程桩基规范[S].
- [8] JTS 167—1—2010 高桩码头设计与施工规范[S].
- [9] 程泽坤. 横向力作用下的高桩结构分析方法对比[J]. 水运工程, 1997 (2):10-14.

(本文编辑 武亚庆)