中国港湾建设
China Harbour Engineering
Apr., 2005
Total 135, No. 2

高桩码头在横向集中水平力作用下齿槽受力的简化计算

伍荣官[1]，曹称宇[2]

（1. 中港第三航务工程局，上海 200032；2. 中交第三航务工程勘察设计院，上海 200032）

摘 要：在参考文献[1]的研究基础上，提出一些假定，推导出高桩码头在横向集中水平力作用下齿槽受力简化计算所需用的公式。由此得到的结果，其精度满足设计需求并适应多种情况。

关键词：高桩码头；齿槽；简化计算

中图分类号：U656.113　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1003-3688(2005)02-0024-04

Simplified Calculation of Load on Tongue-grooved Section Joints of A High Piled Wharf Under Transversely Concentrated Horizontal Force

WU Rong-guan[1], CAO Cheng-yu[2]

(1. CHEC-Shanghai Port Const. Corp., Shanghai, 200032, China;
2. CTE-Shanghai Design & Consulting Corp., Shanghai, 200032, China)

Abstract: Based on the studies made in Reference [1], this paper presents some assumptions to understand equations for simplifying calculations of load on tongue-grooved section joints of high piled wharfs under transversely concentrated horizontal force. The results show that the accuracy of the equations for simplifying calculations complies with the requirement of design and can be applied in many cases.

Key words: high piled wharf; tongue-grooved section; simplified calculation

1 计算公式的推导

1.1 推导公式的前提

根据参考文献[1]的研究，码头水平面抗弯刚度(EI)增大，齿槽的剪力亦随之增大，但变化不明显；并且当码头水平面抗弯刚度增大到一定值后，剪力不再增大。因此，我们采用的第一个假定认为码头水平面的刚度为无穷大。

根据[1]的研究，认为相连分段数越多，齿槽的剪力越大，但4个分段齿槽的剪力，比3个分段时的剪力仅增加0.2%。因此，在推导公式时只考虑3个分段，这样可以大大减少计算工作量。

高桩码头分段之间用齿槽相互连接，从齿槽的构造看，在水平方向只能传递剪力，基本不能传递弯矩，因此在计算简图中，齿槽用铰来代替。

在推导公式时，对每一分段中的排架数、排架间距、各排架的水平刚度 K_{ik} 和每一分段两端的悬臂长度均不需作任何限制。这样本计算方法的适用条件就更为广泛。其计算简图示于图1。

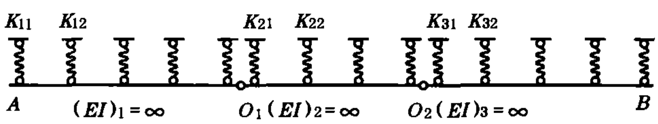

图1 计算简图

关于符号说明如下：$(EI)_i$ 为第 i 分段码头水平面的刚度，根据假定，取为无穷大；K_{ik}表示码头第 i 分段中第 k 榀排架发生单位水平位移时所需之水平力，kN/m，即文中的水平刚度。因只考虑3个分段，i=1，2，3。

1.2 公式的推导

1.2.1 集中水平力 H 作用于第1分段

1.2.1.1 将第1分段分离出来（图2）

因假定梁的刚度 $(EI)_1$ 为无穷大，在外力作用下，梁将发生平移和围绕某点旋转，该点称之为弹性中心。其实，弹性中心即为该分段中各排架水平刚度 K_{ik}的重心。因此，弹性中心的位置可按式（1）确定。

$$x_1 = \sum_{k=1}^{5} K_{1k} \cdot e_k \Big/ \sum_{k=1}^{5} K_{1k} \tag{1}$$

收稿日期：2004-07-12　修改稿日期：2004-09-17

作者简介：伍荣官（1931－ ），男，原中港第三航务工程局总工程师，教授级高工

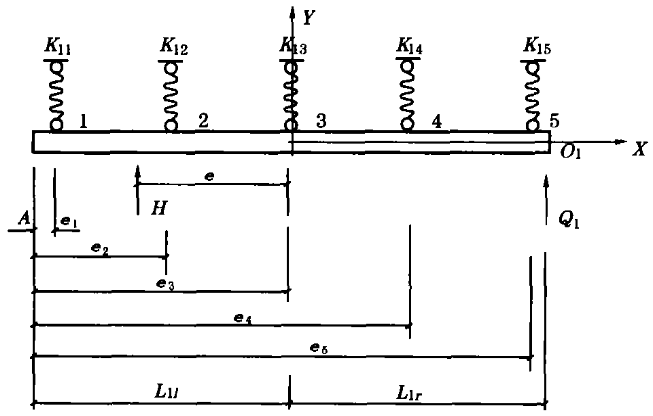

图 2 排架第 1 分段

式中：x_1 为弹性中心距第 1 分段左端 A 点的距离，m；K_{1k} 为第 1 分段第 k 榀排架的水平刚度，kN/m，其数值与排架内的桩断面、桩数、桩在泥面下某一深度的嵌固点到横梁底部的长度和桩的斜度等有关，一般情况下，常常采用相对值；e_k 为第 k 榀排架到 A 点的距离，m。

式(1)中 $\sum_{k=1}^{5} K_{1k}$ 是因为图 2 中，该分段只有 5 榀排架。

在第 1 分段上受有外力 H 和齿槽 O_1 处的剪力 Q_1，假定 Q_1 为正。在 H 和 Q_1 作用下，第 1 分段 O_1 的位移可按式(2)计算：

$$\Delta_{11} = \frac{H + Q_1}{\sum_{k=1}^{5} K_{1k}} + \frac{(He + Q_1 L_{1r}) L_{1r}}{\sum_{k=1}^{5} K_{1k} x_{1k}^2} \tag{2}$$

式中：Δ_{11}为第 1 分段在 O_1 点的位移，m；e 为 H 作用点与弹性中心的距离，该值的正、负号取决于在弹性中心的左、右，在左为负、反之为正；L_{1r}为齿槽 O_1 点到弹性中心的距离，m，因在坐标原点之右，故为正值；x_{1k}为第 1 分段中第 k 榀排架到坐标原点亦即弹性中心的距离，有正、负。

1.2.1.2 将第 2 分段分离出来（图 3）

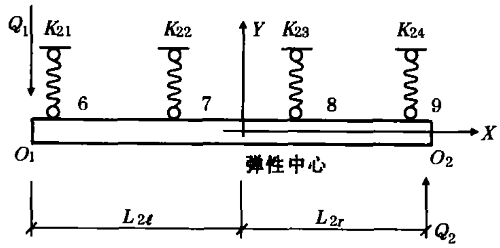

图 3 排架第 2 分段

同样，先求出第 2 段的弹性中心位置，并以此点作为坐标原点。第 2 分段上只有齿槽 O_1 和 O_2 的剪力 Q_1 与 Q_2。Q_1 的大小与第 1 分段上 O_1 点的 Q_1 相同，但方向相反，故为负值；Q_2 定为正值。

在 Q_1 与 Q_2 作用下，O_1 点的位移为：

$$\Delta_{21} = \frac{Q_2 - Q_1}{\sum_{k=6}^{9} K_{2k}} - \frac{Q_1 L_{2l}^2 + Q_2 L_{2l} L_{2r}}{\sum_{k=6}^{9} K_{2k} x_{2k}^2} \tag{3}$$

O_2 点的位移为：

$$\Delta_{22} = \frac{Q_2 - Q_1}{\sum_{k=6}^{9} K_{2k}} + \frac{Q_1 L_{2l} L_{2r} + Q_2 L_{2r}^2}{\sum_{k=6}^{9} K_{2k} x_{2k}^2} \tag{4}$$

1.2.1.3 将第 3 分段分离出来（图 4）

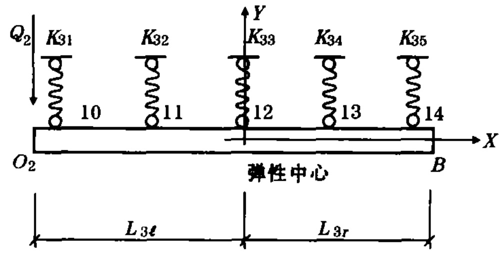

图 4 排架第 3 分段

同样求出弹性中心的位置，在第 3 分段只有 Q_2（负值，理由同第 2 分段上的 Q_1）。在 Q_2 作用下，O_2 的位移为：

$$\Delta_{32} = -\frac{Q_2}{\sum_{k=10}^{14} K_{3k}} - \frac{Q_2 L_{3l}^2}{\sum_{k=10}^{14} K_{3k} x_{3k}^2} \tag{5}$$

1.2.1.4 建立求解 Q_1 和 Q_2 的方程式

因齿槽位移的协调性，故有

$\Delta_{11}=\Delta_{21}$和 $\Delta_{22}=\Delta_{32}$，将(2)，(3)，(4)和(5)式代入，可解得 Q_1 和 Q_2 的两个联立方程式为：

$$\left(\frac{1}{\sum_{k=1}^{5} K_{1k}} + \frac{1}{\sum_{k=6}^{9} K_{2k}} + \frac{L_{1r}^2}{\sum_{k=1}^{5} K_{1k} x_{1k}^2} + \frac{L_{2l}^2}{\sum_{k=6}^{9} K_{2k} x_{2k}^2}\right) Q_1 - \left(\frac{1}{\sum_{k=6}^{9} K_{2k}} - \frac{L_{2l} L_{2r}}{\sum_{k=6}^{9} K_{2k} x_{2k}^2}\right) Q_2 + \left(\frac{1}{\sum_{k=1}^{5} K_{1k}} + \frac{e L_{1r}}{\sum_{k=1}^{5} K_{1k} x_{1k}^2}\right) H = 0 \tag{6}$$

$$\left(\frac{L_{2l} L_{2r}}{\sum_{k=6}^{9} K_{2k} x_{2k}^2} - \frac{1}{\sum_{k=6}^{9} K_{2k}}\right) Q_1 + \left(\frac{1}{\sum_{k=6}^{9} K_{2k}} + \frac{1}{\sum_{k=10}^{14} K_{3k}} + \frac{L_{2r}^2}{\sum_{k=6}^{9} K_{2k} x_{2k}^2} + \frac{L_{3l}^2}{\sum_{k=10}^{14} K_{3k} x_{3k}^2}\right) Q_2 = 0 \tag{7}$$

这里必须说明，在推导各公式时已经考虑了 Q_1 在第 1 分段为正，在第 2 分段中为负和 Q_2 在第 2 分段中为正，在第 3 分段中为负，以及 L_{1l}、L_{2l}、L_{3l}为负，L_{1r}、L_{2r}、L_{3r}为正。因此在计算时只须将绝对值代入即可。但 e 的正、负值要根据其所在坐标而定，然后代入有关公式。

1.2.2 集中水平力 H 作用于第 2 分段

按 1.2.1 所述，同样可得到此时求解 Q_1 与 Q_2 的联立方程式如下，这里不再赘述。

$$\left(\frac{1}{\sum_{k=1}^{5} K_{1k}} + \frac{1}{\sum_{k=6}^{9} K_{2k}} + \frac{L_{1r}^2}{\sum_{k=1}^{5} K_{1k} x_{1k}^2} + \frac{L_{2l}^2}{\sum_{k=6}^{9} K_{2k} x_{2k}^2}\right) Q_1 + \left(\frac{1}{\sum_{k=6}^{9} K_{2k}} - \frac{L_{2l} L_{2r}}{\sum_{k=6}^{9} K_{2k} x_{2k}^2}\right) Q_2 + \left(\frac{1}{\sum_{k=6}^{9} K_{2k}} - \frac{e L_{2l}}{\sum_{k=6}^{9} K_{2k} x_{2k}^2}\right) H = 0 \tag{8}$$

$$\left(\frac{1}{\sum_{k=6}^{9} K_{2k}} - \frac{L_{2l} L_{2r}}{\sum_{k=6}^{9} K_{2k} x_{2k}^2}\right) Q_1 + \left(\frac{1}{\sum_{k=6}^{9} K_{2k}} + \frac{1}{\sum_{k=10}^{14} K_{3k}} + \frac{L_{2r}^2}{\sum_{k=6}^{9} K_{2k} x_{2k}^2} + \frac{L_{3l}^2}{\sum_{k=10}^{14} K_{3k} x_{3k}^2}\right) Q_2 + \left(\frac{1}{\sum_{k=6}^{9} K_{2k}} + \frac{e L_{2r}^2}{\sum_{k=6}^{9} K_{2k} x_{2k}^2}\right) H = 0 \tag{9}$$

2 算例

如图 5 所示 3 个分段的码头，当 H 作用于 5 号、6 号排架时，求齿槽剪力 Q_1 与 Q_2。

先求各分段的弹性中心位置：

$$x_1 = \frac{2K \times 2.5 + 17.5K + 32.5K + 47.5K + 62.5K}{6K} = 27.5\ \text{m}$$

$$x_2 = \frac{2.5K + 17.5K + 32.5K + 47.5K}{4K} = 27.5\ \text{m}$$

第 2 分段各排架的位置和水平刚度是对称的，弹性中心应该位于分段的中间。

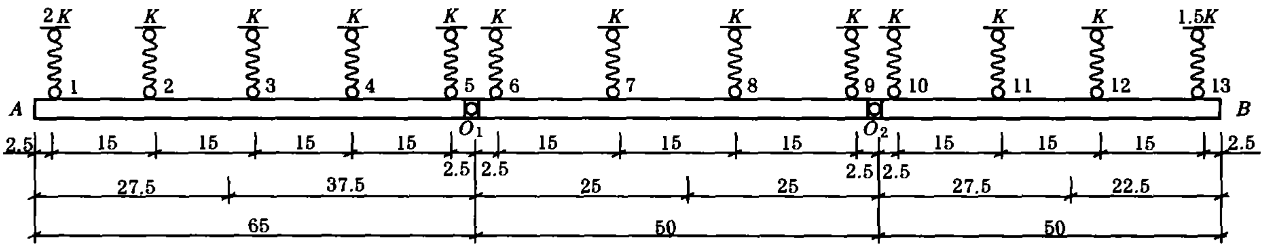

图 5 3 个分段码头算例计算图示

$$x_3 = \frac{2.5K + 17.5K + 32.5K + 47.5 \times 1.5K}{4.5K} = 27.5\ \text{m}$$

由此可得 $L_{1l}=27.5$ m；$L_{1r}=37.5$ m；$L_{2l}=L_{2r}=25$ m；$L_{3l}=27.5$ m；$L_{3r}=22.5$ m。

通过计算可得：

$$\sum_{k=1}^{5} K_{1k} = 6K;\ \sum_{k=6}^{9} K_{2k} = 4K;\ \sum_{k=10}^{13} K_{3k} = 4.5K。$$

$$\sum_{k=1}^{5} K_{1k} x_{1k}^2 = 2K(-25)^2 + K(-10)^2 + K(5)^5 + K(20)^2 + K(35)^2 = 3\,000\,K;$$

$$\sum_{k=6}^{9} K_{2k} x_{2k}^2 = K(-22.5)^2 + K(-7.5)^2 + K(7.5)^2 + K(22.5)^2 = 1\,125\,K;$$

$$\sum_{k=10}^{13} K_{3k} x_{3k}^2 = K(-25)^2 + K(-10)^2 + K(5)^2 + 1.5K(22.5)^2 = 1\,509.4\,K。$$

当 H 作用于 5 号排架上时，$e=35$ m，将有关数据代入式 (6)、(7)，整理后得：

$$1.224\,31\,Q_1 + 0.305\,56\,Q_2 + 0.604\,17\,H = 0$$

$$0.305\,56\,Q_1 + 1.528\,80\,Q_2 = 0$$

由此解得：

$$Q_1 = -0.519\,39\,H,\ Q_2 = 0.103\,81\,H$$

当 H 作用于 6 号排架上时，$e=-22.5$ m，将有关数据代入式 (8)、(9)，并整理后得：

$$1.440\,98\,Q_1 - 0.305\,56\,Q_2 + 0.750\,00\,H = 0$$

$$-0.305\,56\,Q_1 + 1.528\,80\,Q_2 - 0.250\,00\,H = 0$$

解得：$Q_1=-0.527\,42\,H$；$Q_2=0.062\,13\,H$

通过计算可知，齿槽所受之剪力约为 (52%～53%)H。对于大吨位船舶靠船时在齿槽上所受之剪力是很大的，因此无论在齿槽的构造上或配筋设计时均应引起重视。

3 齿槽的存在对排架受力的影响

当按平面问题分析梁板式高桩码头的排架时，需要知道在集中水平力作用时，排架所分配到的水平力。现在设计时都是按规范[2]附录 A 中的排架分配函数来确定的。但附录 A 中的函数均未考虑齿槽存在的影响。例如，当所考虑的码头分段系由 6 个排架（即附录 A 中的 5 跨）组成时，水平集中力 H 作用于第 1 榀排架上，附录 A 中给出第 1 榀排架分配到的水平力为 $0.524H$，第 2 榀排架则分配到 $0.381H$……。设计时，往往就以 $0.524H$ 作为控制。在通常情况下，一个泊位码头经常是由 4～5 个分段（每一分段长约为 40～60 m），彼此之间由齿槽相连接，这时 H 作用于第 1 分段第 1 榀排架时，第 1 榀排架所分配到的水平力将因齿槽的存在而减少。当 H 作用于中间各分段时，排架所分配到的水平力将减少很多。实际建造的码头，往往是由相同长度的分段所组成，而各分段内的排架数、排架间距和排架的 K 均相同。现在就用所介绍的简化法计算一下这时排架所分配到的水平力。仍按 3 个分段来考虑，实际码头的中间段由计算中的中间分段来代替。每一分段为 6 榀排架（即 5 跨）。计算简图见图 6。

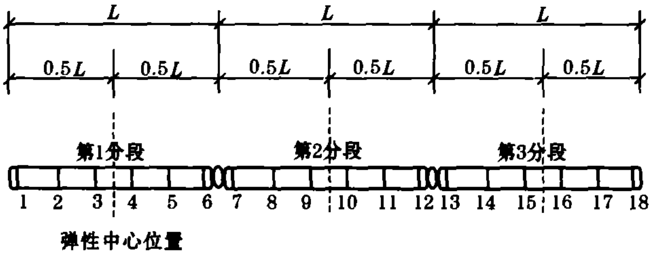

图 6 计算简图

由于每一分段长度、排架数（跨度），K 和悬臂长度均相同，每一分段的弹性中心位于分段中间。式 (6)、(7)、(8) 和 (9) 就简化成以下形式：

$$\left(\frac{2}{n} + \frac{0.5L^2}{\sum x_k^2}\right)Q_1 - \left(\frac{1}{n} - \frac{0.25L^2}{\sum x_k^2}\right)Q_2 + \left(\frac{1}{n} + \frac{0.5eL}{\sum x_k^2}\right)H = 0 \quad (6')$$

$$\left(\frac{0.25L^2}{\sum x_k^2} - \frac{1}{n}\right)Q_1 + \left(\frac{2}{n} + \frac{0.5L^2}{\sum x_k^2}\right)Q_1 = 0 \quad (7')$$

$$\left(\frac{2}{n} + \frac{0.5L^2}{\sum x_k^2}\right)Q_1 + \left(\frac{1}{n} - \frac{0.25L^2}{\sum x_k^2}\right)Q_2 + \left(\frac{1}{n} - \frac{0.5eL}{\sum x_k^2}\right)H = 0 \quad (8')$$

$$\left(\frac{1}{n}-\frac{0.25L^2}{\sum x_i^2}\right)Q_1+\left(\frac{2}{n}+\frac{0.5L^2}{\sum x_i^2}\right)Q_2+\left(\frac{1}{n}+\frac{0.5eL}{\sum x_i^2}\right)H=0 \qquad (9')$$

当 $L=55$ m，排架间距为 10 m，悬臂长为 2.5 m，$n=6$，计算得 $\sum x_i^2=(25^2+15^2+5^2)\times 2=1\ 750$，当 $H=1$ 作用于第 1 分段时，式（6′）、（7′）经简化后成为：

$$\begin{cases}1.197\ 62Q_1+0.265\ 48Q_2+(0.166\ 67+0.015\ 71e)H=0\\0.265\ 48Q_1+1.197\ 62Q_2=0\end{cases}$$

解此联立方程式，得

$$\left.\begin{aligned}Q_1&=-(0.146\ 36+0.013\ 80e)H\\Q_2&=(0.032\ 44+0.003\ 06e)H\end{aligned}\right\} \qquad (10)$$

以上是 H 作用于第 1 分段时齿槽剪力 Q_1 与 Q_2 的影响线，随 H 的位置而变化。

当 H 作用于第 2 分段时，式（8′）、（9′）成为：

$$1.197\ 62Q_1+0.265\ 48Q_2+(0.166\ 67-0.015\ 71e)H=0$$

$$0.265\ 48Q_1+1.197\ 62Q_2+(0.166\ 67+0.015\ 71e)H=0$$

由此解得：

$$\left.\begin{aligned}Q_1&=-(0.113\ 92-0.016\ 85e)H\\Q_2&=-(0.113\ 92+0.016\ 85e)H\end{aligned}\right\} \qquad (11)$$

让 H 从第 1 榀排架，移动至第 12 榀排架，可得到相应的 Q_1 和 Q_2 值，见表 1。

有了 Q_1 和 Q_2 值，就可以求得任何一榀排架上所分配到的水平力了。

表 1　H 作用在不同位置时 Q_1、Q_2、H_7 计算系数表

H 的位置	第 1 榀	第 2 榀	第 3 榀	第 4 榀	第 5 榀	第 6 榀	第 7 榀	第 8 榀	第 9 榀	第 10 榀	第 11 榀	第 12 榀
系数 Q_1	0.198 64	0.060 64	-0.077 36	-0.215 36	-0.353 36	-0.491 36	-0.535 17	-0.366 67	-0.198 17	-0.029 67	0.138 83	0.307 33
系数 Q_2	-0.044 06	-0.013 46	0.017 14	0.047 74	0.078 34	0.108 94	0.307 33	0.138 83	-0.029 67	-0.198 17	-0.366 67	-0.535 17
系数 H_7	-0.101 18	-0.030 89	0.039 41	0.109 70	0.179 99	0.250 29	0.154 96	0.144 46	0.133 95	0.123 44	0.112 94	0.102 43
注：表中系数乘以 H 值即为 Q_1、Q_2，H_7 值。												

先求 H 在第 1 榀排架时，第 1 榀排架应分配的水平力。其计算公式为：

$$H_i=\frac{\sum p}{n}+\frac{x_i}{\sum x_{ik}^2}\cdot\sum pe \qquad (12)$$

式中：H_i 为第 i 榀排架所分配到的水平力；$\sum p$ 为作用于该分段上所有的水平力；$\sum pe$ 为所有水平力对弹性中心的力矩；x_i 为第 i 榀排架与弹性中心的距离。

作用于第 1 分段上共有 2 个力：H 及 Q_1。

$$\sum p=H+Q_1=1.198\ 64H$$

$$\sum pe=He+Q_1\frac{L}{2}=-25H+27.5\times 0.198\ 64H=-19.537\ 40H$$

$n=6$，$\sum x_{1k}^2=1\ 750\ \text{m}^2$，$x_1=-25$ m。将有关数字代入式(12)得

$$H_1=\frac{1.198\ 64H}{6}-\frac{19.537\ 40H}{1\ 750}(-25)=0.478\ 87H$$

如不考虑齿槽的影响，仍可按式(12)求 H'_1，只是将 $Q_1=0$ 代人，则 $H'_1=\frac{H}{6}+(-25)H(-25)/1\ 750=0.523\ 81H$。即规范附录 A 中的值($0.524H$)。其实，规范附录 A 的表格就是按式(12)计算得到的，只是将 Q_1 取为零。

现在来计算 H 作用于从第 1 榀排架到第 12 榀排架时第 7 榀排架所分配到的水平力。计算结果列于表 1。要说明的是：当 H 在第 1 分段时，第 2 分段只有 Q_1 和 Q_2 力，用式(10)；当 H 在第 2 分段时，第 2 分段上有 H、Q_1 和 Q_2 力，用式(11)。

现以 H 作用于第 9 榀排架时，第 7 榀排架所分配到的力为例说明。此时

$$\sum p=H+Q_1+Q_2=H-0.198\ 17H-0.029\ 67H=0.772\ 16H$$

$$\sum pe=H(-5)-0.198\ 17H(-27.5)-0.029\ 67H(27.5)=-0.366\ 25H$$

$x_7=-25$，　将有关数据代入式(12)，得

$$H_7=\frac{0.772\ 16H}{6}+\frac{(-0.366\ 25H)(-25)}{1\ 750}=0.133\ 95H$$

注意：当 H 在第 1 段，计算第 2 段各榀排架时，其 Q_1 符号相反。

从 H_7 的数值显然可以得出以下的结论：在考虑齿槽的影响后，第 2 段的第 7 榀排架所分配到的最大的水平力为 $0.250\ 29H$，此时，H 作用于第 1 段的第 6 榀排架上。比规范中的 $0.524H$ 要小 50%左右。对于设计全直桩码头时，这一点非常有意义。整个码头长度只要在两端端部排架适当加强即可，其他排架，尤其是各中间分段的排架，其所受水平力是比较小的，采用一般型号的预应力混凝土大管桩就能满足设计要求。但是需要重复提起注意的是有关齿槽的构造和配筋必须慎重，一旦齿槽受到损坏，将会影响桩的受力情况。

参考文献：

[1] 曾称宇，伍荣官．高桩码头在横向集中水平力作用下齿槽的受力计算[J]．中国港湾建设，2004，(2)．

[2] JTJ291-98，高桩码头设计与施工规范[S]．