

## 高桩承台群桩基础水平位移计算与分析

刘政伟, 夏齐勇, 尹栋佳, 邹黎琼

(湖北省交通规划设计院股份有限公司, 湖北 武汉 430050)

**摘要:** 水平位移是基础设计的一项重要参数。采用数值分析方法对高桩承台群桩基础进行简化和理论推导, 提出了符合实际且简单的理论计算公式, 作为高桩承台群桩基础初步设计方案拟定阶段依据。采用有限元分析方法对龙山大桥主墩高桩承台进行模拟计算。结果表明: 桩基自由长度和桩径对于高桩承台桩顶水平位移影响非常明显, 根据双排桩推导的理论公式对于多排桩基同样适用。

**关键词:** 桥梁; 高桩承台; 群桩; 数值计算; 拟合

在一般桥梁基础工程中, 桩基础主要承受垂直的轴向荷载, 与混凝土优良的抗压承载能力相适应。但当承台露出河床较高时, 桩顶还需要承受来自上部结构传来的制动力、风力及波浪力等水平荷载, 桩基成为典型的偏压构件。桩基的轴力、弯矩、剪力等强度性能通常可以通过钢筋的配置来解决, 表征刚度特征的水平位移往往成为基础选型阶段的控制性因素。研究群桩基础水平荷载与桩基位移的相关性对于桩基础初步设计阶段的方案拟定具有十分重要的现实意义。

### 1 工程概况

龙山大桥位于湖北省丹江口市龙山镇, 桥梁跨越丹江口水库汉江干流, 桥址距丹江口水利枢纽坝址 30 km, 全桥跨径组成为  $(5 \times 30) \text{ m} + (75 + 4 \times 130 + 75) \text{ m}$ , 主桥为六跨预应力混凝土连续梁—刚构组合体系, 其中 7<sup>#</sup>、8<sup>#</sup>、9<sup>#</sup>墩与主梁固结。桥型立面布置如图 1 所示。

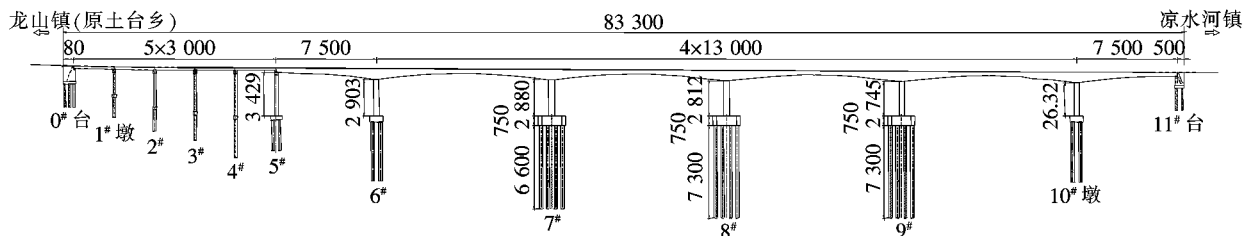


图 1 丹江口龙山大桥立面布置图(单位:cm)

桥墩采用承台—群桩基础, 承台采用 7.5 m 厚八角形桥墩, 采用 16 根直径 2.5 m 混凝土桩基按照  $4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$  矩阵排列。桩基按照嵌岩桩进行设计, 嵌入中风化岩层深度不小于 3 倍的桩径(图 2)。丹江口水库正常蓄水深度为 68 m 左右, 采用双壁钢围堰作为承台施工平台, 钢围堰的建造成为承台高程设计的重要因素。为保证承台施工的可行性, 设计桩基露出河床 46 m 左右, 基岩位于河床以下 2 m, 采用钢护筒作为桩基水下浇筑施工的模板。

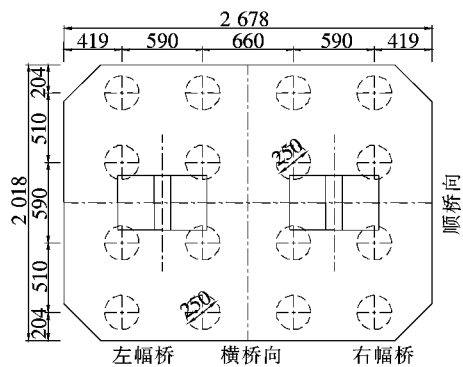


图 2 基础平面布置图(单位:cm)

收稿日期:2019-07-17(修改稿)

作者简介:刘政伟,男,大学本科,高级工程师.E-mail:8372760@qq.com

## 2 高桩承台群桩基础简化计算图式

高桩承台桩基属于典型的偏压构件,群桩基础通过承台形成框架柱式结构。在永久荷载和可变荷载作用下,群桩基础处于弹性状态,作用效应宜采用弹性理论计算,随着长细比的增加,偏压的二阶效应也更加明显。

以双排四桩基础为例,采用平面等效方法,建立如图 3 所示的简化计算图式,推导双排桩的桩基受力公式。由于桩基穿过的土层较浅,对桩基位移影响较小,计算不计入土体对桩基受力的有利作用,以桩基嵌固点作为桩基的固定边界,同排桩基通过刚度叠加等效为平面模型的一根杆件。图中  $E$ 、 $I$ 、 $L$  分别为构件的弹性模量、截面惯性矩和构件有效长度,用截面惯性矩  $I$  值表征桩基的截面特性。在弹性阶段,高桩承台体系的  $P-\Delta$  效应影响很小,承台可以简化为连接两排桩基的连接杆,从而将三维空间的群桩简化为二维平面结构。

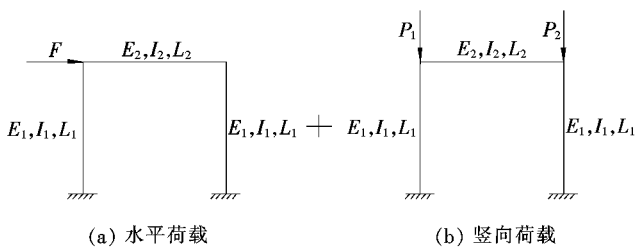


图 3 高桩承台群桩基础简化计算图式

图 3(b) 的力学模型仅引起桩基的轴向压缩,重点分析图 3(a) 的力学模型。对称结构在反对称荷载作用下,其内力和位移都是反对称的。采用力法求解,按照简化的基本体系(图 4),可以列出简化的典型方程[式(1)]:

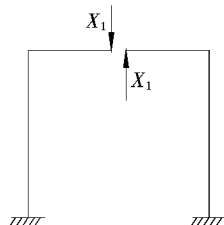


图 4 计算图式基本体系

$$\delta_{11} X_1 + \Delta_{1p} = 0 \quad (1)$$

求解模型,可以得到计算图式的弯矩图(图 5)。

$$M_0 = \frac{3FE_2 I_2 L_1^2}{6E_2 I_2 L_1 + E_1 I_1 L_2}$$

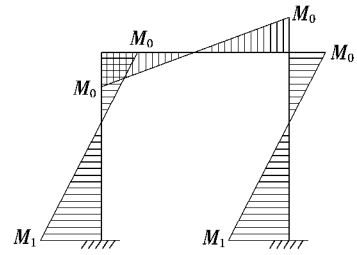


图 5 计算图式弯矩图

$$M_1 = F_1 L_1 - M_0 = \frac{3FE_2 I_2 L_1^2 + FE_1 I_1 L_1 L_2}{6E_2 I_2 L_1 + E_1 I_1 L_2} \quad (2)$$

可证:

$$F_1 L_1 > M_1 > \frac{1}{2} F_1 L_1 > M_0 \quad (3)$$

由式(3)可知:群桩效应是由于承台构件对单桩桩基弯矩进行了重新分配,使基础成为一个受力的整体;高桩承台桩基的最大弯矩出现在桩底嵌固面上,是桩基配筋设计的控制截面。

进一步对计算图式求解,水平力作用下桩顶位移为:

$$\Delta = \frac{FL_1^3}{6E_1 I_1} \left( \frac{3E_2 I_2 L_1 + 2E_1 I_1 L_2}{6E_2 I_2 L_1 + E_1 I_1 L_2} \right) = \frac{FL_1^3}{6E_1 I_1} \left( \frac{2}{3} - \frac{3E_2 I_2 L_1}{6E_2 I_2 L_1 + E_1 I_1 L_2} \right) \quad (4)$$

式中:  $E_1 = E_2 = C$  (常量),  $F$  = 常量,群桩基础桩顶位移是关于  $L_1$ 、 $I_1$ 、 $L_2$  和  $I_2$  的四元函数,即桩顶位移与桩基截面、承台截面、桩自由长度以及桩间距有关。

设桩基线刚度  $i_1 = \frac{E_1 I_1}{L_1}$ , 承台线刚度  $i_2 = \frac{E_2 I_2}{L_2}$ , 一

般情况下,高桩承台  $i_1 < i_2$ , 则式(4)进一步推导可得:

$$\frac{5FL_1^3}{126E_1 I_1} > \Delta = \frac{FL_1^3}{6E_1 I_1} \left( \frac{2}{3} - \frac{3}{6+i_1/i_2} \right) > \frac{FL_1^3}{36E_1 I_1} \quad (5)$$

由式(4)、(5)可知:减少桩基自由长度、采用大桩径桩基、减小承台截面、增大桩间距都可以减少桩顶位移量。

由式(5)可知:当桩基自由长度达到一定的长度(0.5 倍以上的桩基间距时),  $i_1/i_2$  值可以达到几十倍甚至上百倍,对计算结果影响有限,表明承台截面和桩间距对桩顶位移的影响很小。为减少工程量和施工难度,承台设计截面尺寸尽可能较小,按照构造要求选取承台截面尺寸即可。

由式(5)可知,桩基自由长度与桩基截面特性对桩顶位移的影响很大,  $\Delta$  值近似正比于  $L_1^3$ , 近似反比于  $D^4$  ( $I = \frac{\pi D^4}{64}$ )。基础设计方案应尽可能减少桩基的自

由长度,并采用允许的较大桩径桩基。

3 有限元模型计算

对于多排桩基(两排桩以上),数值解析结果更为复杂,可采用有限元分析方法进行研究。采用 Midas Civil 有限元结构分析软件建立龙山大桥模型。模型共含节点1 326 个,梁单元1 245 个。

以整桥模型为基础,分析中墩承台在某单一水平荷载  $F$  作用下,自由桩长  $L$ 、桩径  $D$ (截面惯性矩  $I$ )与承台水平位移  $\Delta$  的关系。对于该桥,水平荷载主要有上部结构传递的制动力、横风荷载和波浪力,制动力和横风荷载均按 JTG D60—2015《公路桥涵设计通用规范》计算,波浪力参照 JTS 145—2015《港口与航道水文规范》计算。水平力计算的桩基位移可以进行叠加,下文采用的水平荷载  $F$  仅包含制动力值。

当桩径  $D=2.5\text{ m}$  不变时,自由长度  $L$  与桩顶水平位移  $\Delta$  的计算结果如表 1 所示。表中实际位移值为模型计算所得,拟合位移值为拟合的  $\Delta$  关于  $L$  的三次方曲线值[式(6)]。

$$\Delta=6.0\times10^{-5}L^3 \tag{6}$$

表 1 桩顶水平位移与自由长度关系

| 自由长度 $L/\text{m}$ | 实际位移值/ $\text{mm}$ | 拟合位移值/ $\text{mm}$ | 自由长度 $L/\text{m}$ | 实际位移值/ $\text{mm}$ | 拟合位移值/ $\text{mm}$ |
|-------------------|--------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| 3                 | 0.008              | 0.002              | 30                | 1.635              | 1.62               |
| 6                 | 0.022              | 0.013              | 36                | 2.737              | 2.799              |
| 12                | 0.129              | 0.104              | 42                | 4.425              | 4.445              |
| 18                | 0.376              | 0.350              | 48                | 6.438              | 6.635              |
| 24                | 0.853              | 0.829              |                   |                    |                    |

由表 1 可得:对于多排桩基,前文推导的结论同样适用。自由长度对基础位移影响很明显,桩顶顶面位移近似与自由长度的三次方成正比,设计时应在满足施工条件下尽量减少桩基自由长度。

当自由长度  $L=48\text{ m}$  不变时,桩径  $D$  与桩顶水平位移  $\Delta$  的计算结果如表 2 所示。表 2 中实际位移值为模型计算所得,拟合位移值为拟合的  $\Delta$  关于  $D$  的四次方曲线值[式(7)]。

$$\Delta=260/D^4 \tag{7}$$

表 2 表明:对于多排桩基,前文推导的结论同样适用。桩径对基础位移影响很明显,承台顶面位移近似与桩径的四次方成反比,设计时应在满足施工条件下尽量增大桩基直径。

表 2 桩顶水平位移与桩径关系

| 桩径 $D/\text{m}$ | 实际位移值/ $\text{mm}$ | 拟合位移值/ $\text{mm}$ | 桩径 $D/\text{m}$ | 实际位移值/ $\text{mm}$ | 拟合位移值/ $\text{mm}$ |
|-----------------|--------------------|--------------------|-----------------|--------------------|--------------------|
| 2               | 15.139             | 16.250             | 2.8             | 4.167              | 4.230              |
| 2.2             | 10.468             | 11.099             | 3               | 3.214              | 3.210              |
| 2.5             | 6.438              | 6.656              | 3.2             | 2.482              | 2.479              |

目前,JTG D60—2015《公路桥涵设计通用规范》对桩顶水平位移的限值没有明确,JTG H10—2009《公路养护技术规范》规定桥梁墩台顶面水平位移限值为  $\Delta\leqslant5\sqrt{L}$  ( $L$  为相邻墩台的最小跨径)。龙山大桥在方案设计阶段参考该条款并通过折算,限定桩顶水平位移控制在  $30\text{ mm}$  以下。经计算,在汽车制动力、横向风载及破浪力的共同作用下,桩基顶面水平位移最大位移为  $24.5\text{ mm}$ ,满足设计要求。

4 结论

(1) 对于承受水平力的高桩承台,桩基的最大弯矩出现在桩底嵌固面上,是桩基配筋设计的控制截面。

(2) 采用简化的门式刚架计算图式与有限元分析模型计算结论相符合,对高桩承台群桩基础的初步设计方案具有意义,可以结合场地条件快速进行基础选型。

(3) 高桩承台水平位移与自由长度的三次方成正比,与桩径的四次方成反比。采用桩基础方案如需减小基础水平位移,减小自由长度和增加桩径应优先考虑。

(4) 按照整桥模型计算的承台水平位移与将水平力直接作用在承台计算得出的理论值相吻合。这说明高桩承台水平位移主要与作用于基础的水平推力有关,与上部结构传递的弯矩及压力等关系较小,设计时可采用隔离的基础模型加载进行计算。

参考文献:

[1] 周枚,袁万城,张玥.高桩承台基础群桩等效嵌固长度参数分析[J].长安大学学报(自然科学版),2010(3).  
[2] 宋神友,陈太聪,苏成,等.考虑端部约束的高墩偏心距增大系数计算[J].中外公路,2014(3).  
[3] JTG 3362—2018 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].  
[4] 刘伟博,张永亮,李天宝. $P-\Delta$ 效应对高桩承台体系推倒分析方法的影响研究[J].兰州交通大学学报,2013(3).