

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2023.02.053

双排钢板桩围堰受力与计算方法研究

沈 印¹, 游剑南²

[1.上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200092; 2.江阴市防汛防旱服务中心,江苏 江阴 214431]

摘 要:双排钢板桩围堰具有占地面积小、施打及拆除方便、对河道水质影响小等优点,在挡水高度不太高的情况下相对于传统土石围堰具有明显的优势,在全国各地水利项目施工导截流期间得到了广泛的使用。但由于仅作为临时结构,常常根据经验进行设计,对于该种结构的内力计算也缺乏研究。若要得到准确的结构内力,需用有限元法进行分析,无法满足广大设计人员的现实需求。在对该种结构型式受力分析的基础上,利用传统土压力理论及 m 法推算出双排钢板桩围堰的计算等式,并通过与有限元计算方法的比较验证计算结果。

关键词:双排;钢板桩;围堰;计算

中图分类号:TV551

文献标志码:A

文章编号:1009-7716(2023)02-0209-05

0 引言

双排钢板桩围堰具有占地面积小、施打及拆除方便、对河道水质影响小等优点,在挡水高度不太高的情况下相对于传统土石围堰具有明显的优势,在全国各地水利项目施工导截流期间得到了广泛的使用。但由于仅作为临时结构,往往根据经验进行设计或由施工单位自行设计,对于该种结构的计算尚缺乏研究。若要得到准确的内力及变形结果,需用有限元进行分析,无法满足广大设计人员的现实需求。因而易发生过设计或欠设计的情况,即围堰断面过大、桩长过长,造成不必要的浪费;或者施工期间围堰变形过大、透水严重,影响堰内结构施工的情况。本文将在传统土压力理论及竖向弹性地基梁计算方法的基础上对双排钢板桩的受力及计算方法进行分析研究,并通过与有限元法的比较验证了本文的计算结果。

1 双排钢板桩内力计算总体思路

由于双排钢板桩设计参数较多,为便于计算分析,本文对该结构进行了一些假定。(1)假定桩间拉杆数不超过2根。(2)假定外河侧水位不高于上侧拉杆,内河侧水位不高于下侧拉杆。在此基础上,桩间填土采用主动土压力公式计算并考虑有限空间的影响,泥面以下桩基内力采用竖向弹性地基梁进行计算,泥面以上桩基内力可分段求解并通过材料力学

公式计算。计算中共存在两个未知数分别为两根拉杆的拉力。最终可通过在拉杆作用点前后排桩间距离的变化量等于拉杆伸长量列出两个方程并求出拉杆拉力。结构计算图示如图1所示。

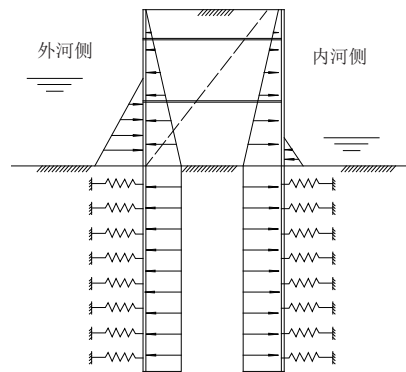


图1 双排钢板桩围堰计算图示

2 有限空间土压力计算

在钢板桩间距较大的情况下,双排钢板桩内填土产生的土压力可采用无限空间土压力理论计算。但当钢板桩间距较小时,需考虑滑动土体受前后排桩的限制作用,采用有限空间下的土压力计算方法。考虑有限空间内的土压力需采用库伦土压力理论,具体推导过程如下:

由于钢板桩为直立,且滑动摩擦系数较小,可假定为墙背光滑且土体与墙背的摩擦角为 0° ,在不考虑黏聚力的情况下,无限空间库伦土压力计算图示如图2所示,计算公式如下^[1]:

$$\frac{E}{\sin(\theta-\varphi)} = \frac{W}{\sin(90^\circ-\theta+\varphi)}$$

$$W = \frac{\gamma H^2}{2 \tan \theta}$$

收稿日期:2022-01-17

作者简介:沈印(1987—),男,硕士,高级工程师,主要从事市政水利设计研究工作。

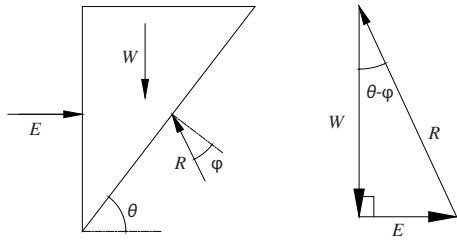


图2 库伦土压力计算图示

$$E = \frac{\gamma H^2}{2} \frac{\tan(\theta - \varphi)}{\tan \theta}$$

$$K_a = \frac{\tan(\theta - \varphi)}{\tan \theta}$$

式中: E 为主动土压力, kN; W 为滑动土体自重, kN; ψ 为土体内摩擦角; H 为填土高, m。

此种情况下可以求出当 $\theta = 45^\circ + \psi/2$ 时, 土压力最大, 故此角度为主动土压力的破裂角。

当土体受后方结构限制时, 主动土压力图示如图3所示。公式推导过程如下:

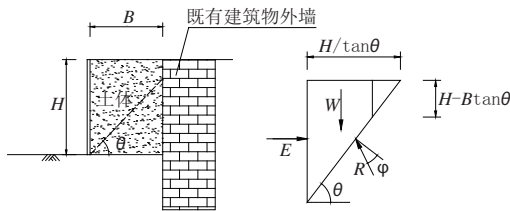


图3 有限空间库伦土压力计算图示

$$W = \frac{\gamma H^2}{2 \tan \theta} - \frac{\gamma(H - B \tan \theta)^2}{2 \tan \theta}$$

$$E = (\gamma B H - \frac{\gamma B^2}{2} \tan \theta) \tan(\theta - \varphi)$$

对 E 求 θ 的导数, 从而求得 E 最大时的 θ 值:

$$\frac{dE}{d\theta} = 0$$

$$\frac{dE}{d\theta} = \gamma \left[\frac{-B^2}{2 \cos^2 \theta} \tan(\theta - \varphi) + \gamma(BH - \frac{B^2}{2} \tan \theta) \frac{1}{\cos(\theta - \varphi)^2} \right]$$

$$\frac{B}{2 \cos \theta^2} \tan(\theta - \varphi) =$$

$$(H - \frac{B}{2} \tan \theta) \frac{1}{\cos(\theta - \varphi)^2}$$

$$\frac{B}{2 \cos \theta^2} \sin(\theta - \varphi) = (H - \frac{B}{2} \tan \theta) \frac{1}{\cos(\theta - \varphi)}$$

$$\sin(\theta - \varphi) \cos(\theta - \varphi) = (\frac{2H}{B} \cos \theta^2 - \sin \theta \cos \theta)$$

$$\sin 2\theta (\cos 2\varphi + 1) - \cos 2\theta (\sin 2\varphi + \frac{2H}{B}) - \frac{2H}{B} = 0$$

$$\tan \theta = \frac{-\cos 2\varphi - 1 + \sqrt{2 + 2\cos 2\varphi + \frac{4H}{B} \sin 2\varphi}}{\sin 2\varphi}$$

$$\theta = \arctan \left[\frac{-\cos 2\varphi - 1 + \sqrt{2 + 2\cos 2\varphi + \frac{4H}{B} \sin 2\varphi}}{\sin 2\varphi} \right]$$

该 θ 值即有限空间下的库伦土压力滑动摩擦角。同样可求得有黏聚力 C 时的库伦土压力滑动摩擦角计算公式, 具体计算图示如图4所示。推算过程如下:

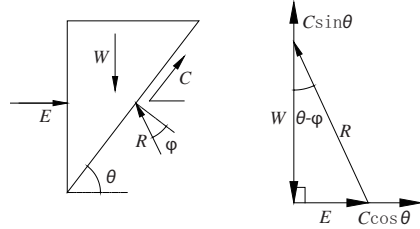


图4 考虑黏聚力后有限空间库伦土压力计算图示

$$\frac{E + C \cos \theta}{\sin(\theta - \varphi)} = \frac{W - C \sin \theta}{\sin(90^\circ - \theta + \varphi)}$$

$$W = \frac{\gamma H^2}{2 \tan \theta} - \frac{\gamma(H - \frac{B}{2} \tan \theta)^2}{2 \tan \theta}$$

$$E = (W - C \sin \theta) \tan(\theta - \varphi) - C \cos \theta$$

$$E = (\gamma B H - \frac{\gamma B^2}{4} \tan \theta) \frac{\tan(\theta - \varphi)}{2}$$

$$\frac{dE}{d\theta} = 0$$

$$\text{令 } k = \frac{\gamma B^2 + 4BC}{2}$$

$$k \sin 2\varphi \tan^2 \theta + 2k(\cos 2\varphi + 1) \tan \theta - k \sin 2\varphi - 4\gamma B H = 0$$

$$\tan \theta = \frac{-K(\cos 2\varphi + 1) - \sqrt{2K^2(\cos 2\varphi + 1) + 4K\gamma B H \sin 2\varphi}}{K \sin 2\varphi}$$

$$\theta =$$

$$\arctan \left[\frac{-K(\cos 2\varphi + 1) - \sqrt{2K^2(\cos 2\varphi + 1) + 4K\gamma B H \sin 2\varphi}}{K \sin 2\varphi} \right]$$

至此, 已可根据钢板桩内填土参数、填土高度求出任意前后排桩间距下钢板桩所受的主动土压力。

3 泥面以下桩身内力计算

泥面以下桩身内力和变形计算采用竖向弹性地基梁的方法, 计算推导过程如下:

根据桩的绕曲线微分方程^[2]:

$$EI \frac{d^4 y}{dz^4} + m b_0 z y - e_{aik} b_0 = 0 (h_d \geq z \geq 0)$$

则边界条件为:

$$\left. \begin{aligned} EI \frac{d^3 x}{dz^3} \Big|_{(z=0)} &= V_0 = \frac{h}{2} (q_1 + q_2) \\ EI \frac{d^2 y}{dz^2} \Big|_{(z=0)} &= M_0 = \frac{h^2}{2} (2q_1 + q_2) \\ \frac{dx}{dz} \Big|_{(z=0)} &= \theta_0 = -(\delta_{MV} H_0 + \delta_{MM} M_0) \\ y \Big|_{(z=0)} &= y_0 = \delta_{VV} H_0 + \delta_{VM} M_0 \end{aligned} \right\}$$

式中: δ_{VV} 、 δ_{VM} 、 δ_{MM} 称为柔度系数; H_0 、 M_0 为泥面以上桩身所受合力,其中包括土压力、水压力及拉杆拉力。

取 $\bar{h} = \alpha h_d$,由下式计算:

$$\delta_{VV} = \frac{1}{\alpha^3 EI} A_{VV}$$

$$\delta_{VM} = \delta_{MV} = \frac{1}{\alpha^2 EI} B_{MV}$$

$$\delta_{MM} = \frac{1}{\alpha EI} C_{MM}$$

其中:

$$A_{VV} = (B_3 D_4 - B_4 D_3) / (A_3 B_4 - A_4 B_3)$$

$$B_{MV} = (A_3 D_4 - A_4 D_3) / (A_3 B_4 - A_4 B_3)$$

$$C_{MM} = (A_3 C_4 - A_4 C_3) / (A_3 B_4 - A_4 B_3)$$

$$E_{VE} = (E_4 B_3 - B_4 E_3) / (A_3 B_4 - A_4 B_3)$$

$$E_{ME} = (E_4 A_3 - A_4 E_3) / (A_3 B_4 - A_4 B_3)$$

推算得基坑底以下深度 z 处钢板桩水平剪力 V 、弯矩 M 、转角 θ 、位移 y 分别为:

$$V_z = \alpha^3 EI (y_0 A_4 + \frac{\theta_0}{\alpha} B_4 + \frac{M_0}{\alpha^2 EI} C_4 + \frac{V_0}{\alpha^3 EI} D_4 + \frac{e_{aik} b_0}{\alpha^4 EI} E_4)$$

$$M_z = \alpha^2 EI (y_0 A_3 + \frac{\theta_0}{\alpha} B_3 + \frac{M_0}{\alpha^2 EI} C_3 + \frac{V_0}{\alpha^3 EI} D_3 + \frac{e_{aik} b_0}{\alpha^4 EI} E_3)$$

$$\theta_z = \alpha (y_0 A_2 + \frac{\theta_0}{\alpha} B_2 + \frac{M_0}{\alpha^2 EI} C_2 + \frac{V_0}{\alpha^3 EI} D_2 + \frac{e_{aik} b_0}{\alpha^4 EI} E_2)$$

$$y_z = y_0 A_1 + \frac{\theta_0}{\alpha} B_1 + \frac{M_0}{\alpha^2 EI} C_1 + \frac{V_0}{\alpha^3 EI} D_1 + \frac{e_{aik} b_0}{\alpha^4 EI} E_1$$

其中各参数计算式如下:

$$A_1 = 1 - \frac{(\bar{h})^5}{5!} + 6 \cdot \frac{(\bar{h})^{10}}{10!} - 6 \cdot 11 \cdot \frac{(\bar{h})^{15}}{15!} + \dots$$

$$B_1 = \bar{h} - 2 \cdot \frac{(\bar{h})^6}{6!} + 2 \cdot 7 \cdot \frac{(\bar{h})^{11}}{11!} - 2 \cdot 7 \cdot 12 \cdot \frac{(\bar{h})^{16}}{16!} + \dots$$

$$C_1 = \frac{(\bar{h})^2}{2!} - 3 \cdot \frac{(\bar{h})^7}{7!} + 3 \cdot 8 \cdot \frac{(\bar{h})^{12}}{12!} - 3 \cdot 8 \cdot 13 \cdot \frac{(\bar{h})^{17}}{17!} + \dots$$

$$D_1 = \frac{(\bar{h})^3}{3!} - 4 \cdot \frac{(\bar{h})^8}{8!} + 4 \cdot 9 \cdot \frac{(\bar{h})^{13}}{13!} - 4 \cdot 9 \cdot 14 \cdot \frac{(\bar{h})^{18}}{18!} + \dots$$

$$E_1 = \frac{(\bar{h})^4}{4!} - 5 \cdot \frac{(\bar{h})^9}{9!} + 5 \cdot 10 \cdot \frac{(\bar{h})^{14}}{14!} - 5 \cdot 10 \cdot 15 \cdot \frac{(\bar{h})^{19}}{19!} + \dots$$

$$A_2 = -\frac{(\bar{h})^4}{4!} + 6 \cdot \frac{(\bar{h})^9}{9!} - 6 \cdot 11 \cdot \frac{(\bar{h})^{14}}{14!} + 6 \cdot 11 \cdot 16 \cdot \frac{(\bar{h})^{19}}{19!} - \dots$$

$$B_2 = 1 - 2 \cdot \frac{(\bar{h})^5}{5!} + 2 \cdot 7 \cdot \frac{(\bar{h})^{10}}{10!} - 2 \cdot 7 \cdot 12 \cdot \frac{(\bar{h})^{15}}{15!} + \dots$$

$$C_2 = \bar{h} - 3 \cdot \frac{(\bar{h})^6}{6!} + 3 \cdot 8 \cdot \frac{(\bar{h})^{11}}{11!} - 3 \cdot 8 \cdot 13 \cdot \frac{(\bar{h})^{16}}{16!} + \dots$$

$$D_2 = \frac{(\bar{h})^2}{2!} - 4 \cdot \frac{(\bar{h})^7}{7!} + 4 \cdot 9 \cdot \frac{(\bar{h})^{12}}{12!} - 4 \cdot 9 \cdot 14 \cdot \frac{(\bar{h})^{17}}{17!} + \dots$$

$$E_2 = \frac{(\bar{h})^3}{3!} - 5 \cdot \frac{(\bar{h})^8}{8!} + 5 \cdot 10 \cdot \frac{(\bar{h})^{13}}{13!} - 5 \cdot 10 \cdot 15 \cdot \frac{(\bar{h})^{18}}{18!} + \dots$$

$$A_3 = -\frac{(\bar{h})^3}{3!} + 6 \cdot \frac{(\bar{h})^8}{8!} - 6 \cdot 11 \cdot \frac{(\bar{h})^{13}}{13!} + 6 \cdot 11 \cdot 16 \cdot \frac{(\bar{h})^{18}}{18!} - \dots$$

$$B_3 = -2 \cdot \frac{(\bar{h})^4}{4!} + 2 \cdot 7 \cdot \frac{(\bar{h})^9}{9!} - 2 \cdot 7 \cdot 12 \cdot \frac{(\bar{h})^{14}}{14!} + \dots$$

$$C_3 = 1 - 3 \cdot \frac{(\bar{h})^5}{5!} + 3 \cdot 8 \cdot \frac{(\bar{h})^{10}}{10!} - 3 \cdot 8 \cdot 13 \cdot \frac{(\bar{h})^{15}}{15!} + \dots$$

$$D_3 = \bar{h} - 4 \cdot \frac{(\bar{h})^6}{6!} + 4 \cdot 9 \cdot \frac{(\bar{h})^{11}}{11!} - 4 \cdot 9 \cdot 14 \cdot \frac{(\bar{h})^{16}}{16!} + \dots$$

$$E_3 = \frac{(\bar{h})^2}{2!} - 5 \cdot \frac{(\bar{h})^7}{7!} + 5 \cdot 10 \cdot \frac{(\bar{h})^{12}}{12!} - 5 \cdot 10 \cdot 15 \cdot \frac{(\bar{h})^{17}}{17!} + \dots$$

$$A_4 = -\frac{(\bar{h})^2}{2!} + 6 \cdot \frac{(\bar{h})^7}{7!} - 6 \cdot 11 \cdot \frac{(\bar{h})^{12}}{12!} + 6 \cdot 11 \cdot 16 \cdot \frac{(\bar{h})^{17}}{17!} - \dots$$

$$B_4 = -2 \cdot \frac{(\bar{h})^3}{3!} + 2 \cdot 7 \cdot \frac{(\bar{h})^8}{8!} - 2 \cdot 7 \cdot 12 \cdot \frac{(\bar{h})^{13}}{13!} + \dots$$

$$C_4 = -3 \cdot \frac{(\bar{h})^4}{4!} + 3 \cdot 8 \cdot \frac{(\bar{h})^9}{9!} - 3 \cdot 8 \cdot 13 \cdot \frac{(\bar{h})^{14}}{14!} + \dots$$

$$D_4 = 1 - 4 \cdot \frac{(\bar{h})^5}{5!} + 4 \cdot 9 \cdot \frac{(\bar{h})^{10}}{10!} - 4 \cdot 9 \cdot 14 \cdot \frac{(\bar{h})^{15}}{15!} + \dots$$

$$E_4 = \bar{h} - 5 \cdot \frac{(\bar{h})^6}{6!} + 5 \cdot 10 \cdot \frac{(\bar{h})^{11}}{11!} - 5 \cdot 10 \cdot 15 \cdot \frac{(\bar{h})^{16}}{16!} + \dots$$

泥面处的桩身内力及变形计算值为含有拉杆拉力值的计算式。

4 泥面以上桩身内力计算

由于桩身受非连续的特性,泥面以上桩身内力需进行分段计算,每段均通过材料力学公式 $EI\omega'' = M$ 列出各段的位移 ω 及转角 ω' 公式,利用各段在分界点处的位移 ω 及转角 ω' 与相邻段一致求出位移及转角公式中的常数。通过与泥面处桩身位移的关系式求出桩身各点位移为:

$$x = \omega + x_0 + \theta_0 d$$

式中: x_0 为桩身泥面处的位移值, m ; θ_0 为桩身泥面处的转角值, $^\circ$ 。

最终通过前后排桩在拉杆处的位移差等于拉杆伸长量求出拉杆拉力值。

泥面以上钢板桩受力图示如图5所示。

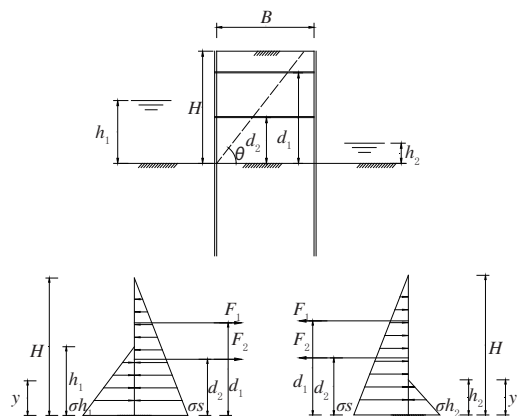


图5 泥面以上钢板桩受力图示

泥面以上位移计算过程如下:

当 $y \leq d_2$ 时

$$EI\omega'' = \frac{-(\gamma_s Ka - \gamma)}{6} y^3 + \frac{1}{2} (\gamma_s KaH - \gamma h) y^2 + F_1 y + F_2 y$$

$$-F_1 d_1 - F_2 d_2 - \frac{1}{6} (\gamma h^3 - \gamma_s KaH^3) - \frac{1}{2} (\gamma_s KaH^2 - \gamma h^2) y$$

$$EI\omega' = \frac{-(\gamma_s Ka - \gamma)}{24} y^4 + \frac{1}{6} (\gamma_s KaH - \gamma h) y^3 + \frac{F_1}{2} y^2 + \frac{F_2}{2} y^2$$

$$-F_1 d_1 y - F_2 d_2 y - \frac{1}{6} (\gamma h^3 - \gamma_s KaH^3) y$$

$$- \frac{1}{4} (\gamma_s KaH^2 - \gamma h^2) y^2 + C_1$$

$$EI\omega = \frac{-(\gamma_s Ka - \gamma)}{120} y^5 + \frac{1}{24} (\gamma_s KaH - \gamma h) y^4 + \frac{F_1}{6} y^3 + \frac{F_2}{6} y^3$$

$$- \frac{F_1 d_1}{2} y^2 + \frac{F_2 d_2}{2} y^2 - \frac{1}{12} (\gamma h^3 - \gamma_s KaH^3) y^2$$

$$- \frac{1}{12} (\gamma_s KaH^2 - \gamma h^2) y^3 + C_1 y + C_2$$

当 $y=0$ 时, $\omega' = 0, \omega = 0$, 求得 $C_1 = C_2 = 0$ 。同理, 第二段 $d_2 < y < h_1$ 时:

$$EI\omega'' = \frac{-(\gamma_s Ka - \gamma)}{6} y^3 + \frac{1}{2} (\gamma_s KaH - \gamma h) y^2 + F_1 y - F_1 y d_1$$

$$- \frac{1}{6} (\gamma h^3 - \gamma_s KaH^3) - \frac{1}{2} (\gamma_s KaH^2 - \gamma h^2) y$$

$$EI\omega' = \frac{-(\gamma_s Ka - \gamma)}{24} y^4 + \frac{1}{6} (\gamma_s KaH - \gamma h) y^3 + \frac{F_1}{2} y^2$$

$$-F_1 d_1 y - \frac{1}{6} (\gamma h^3 - \gamma_s KaH^3) y - \frac{1}{4} (\gamma_s KaH^2 - \gamma h^2) y^2 + C_1$$

$$EI\omega = \frac{-(\gamma_s Ka - \gamma)}{120} y^5 + \frac{1}{24} (\gamma_s KaH - \gamma h) y^4 + \frac{F_1}{6} y^3$$

$$- \frac{F_1 d_1}{2} y^2 - \frac{1}{12} (\gamma h^3 - \gamma_s KaH^3) y^2 - \frac{1}{12} (\gamma_s KaH^2 - \gamma h^2) y^3$$

$$+ C_1 y + C_2$$

当 $y=d_2$ 时, $\omega_1' = \omega_2', \omega_1'' = \omega_2''$, 求得 $C_1 = -\frac{d_2^2}{2} F_2; C_2 = \frac{d_2^3}{6} F_2$ 。

同理, 求得第三段 $h_1 < y < d_1$, 第四段 $d_1 < y$ 时各点的位移。

根据拉杆点前后排桩位移值的差等于拉杆的伸长量可列出二元一次方程组:

$$\omega_{2前} - \omega_{2后} = F_2 / EA_2 \times L$$

$$\omega_{1前} - \omega_{1后} = F_1 / EA_1 \times L$$

式中: EA 为拉杆变形参数, kN ; L 为拉杆长度, m ;

解方程组得 F_1 :

$$F_1 = \frac{-(C_3 + C_4) \times (2 \times K_2 - \frac{L}{EA_2}) + (C_1 + C_2) \times 2 \times K_4}{(2 \times K_3 - \frac{L}{EA_1}) \times (2 \times K_2 - \frac{L}{EA_2}) - 4 \times K_1 \times K_4}$$

$$F_2 = \frac{-(C_1 + C_2) \times (2 \times K_3 - \frac{L}{EA_1}) + (C_3 + C_4) \times 2 \times K_1}{(2 \times K_2 - \frac{L}{EA_2}) \times (2 \times K_3 - \frac{L}{EA_1}) - 4 \times K_1 \times K_4}$$

式中:

$$B_1 = \frac{-(\gamma_w - \gamma_s Ka)}{120 EI}$$

$$B_2 = \frac{(\gamma_s KaH - \gamma_w h_1)}{24 EI}$$

$$B_3 = \frac{(\gamma_w h_1^3 - \gamma_s KaH^3)}{12 EI}$$

$$B_4 = \frac{(\gamma_s Ka)}{60 EI}$$

$$B_5 = \frac{(\gamma_s KaH)}{24 EI}$$

$$B_6 = \frac{(\gamma_s KaH^3)}{24 EI}$$

$$C_1 = -B_1 d_2^5 - B_2 d_2^4 - B_3 d_2^3 + \delta_{VV}(Ea - Ew) + \delta_{VM} \left(\frac{H}{3} Ea - \frac{h_1}{3} Ew \right) + \delta_V Eep + \delta_{MV}(Ea - Ew) d_2$$

$$+ \delta_{MM} \left(\frac{H}{3} Ea - \frac{h_1}{3} Ew \right) d_2 + \delta_{Mee} d_2$$

$$C_2 = -B_1 d_2^5 - B_2 d_2^4 - B_3 d_2^3 + \delta_{VV}(Ea - Ew)$$

$$+ \delta_{VM} \left(\frac{H}{3} Ea - \frac{h_2}{3} Ew \right) + \delta_V Eep + \delta_{MV}(Ea - Ew) d_2$$

$$+ \delta_{MM} \left(\frac{H}{3} Ea - \frac{h_2}{3} Ew \right) d_2 + \delta_{Mee} d_2$$

$$C_3 = B_4 d_1^5 - B_5 d_1^4 + B_6 d_1^3 + \frac{\gamma_w h_1^5}{40 EI} - \frac{\gamma_w h_1^4 d_1}{12 EI}$$

$$+ \delta_{VV}(Ea - Ew) + \delta_{VM} \left(\frac{H}{3} Ea - \frac{h_1}{3} Ew \right) + \delta_V Eep$$

$$+ \delta_{MV}(Ea - Ew) d_1 + \delta_{MM} \left(\frac{H}{3} Ea - \frac{h_1}{3} Ew \right) d_1 + \delta_{Mee} d_1$$

$$C_4 = B_4 d_1^5 - B_5 d_1^4 - B_6 d_1^3 + \frac{\gamma_w h_2^5}{40 EI} - \frac{\gamma_w h_2^4 d_1}{12 EI}$$

$$+ \delta_{VV}(Ea - Ew) + \delta_{VM} \left(\frac{H}{3} Ea - \frac{h_2}{3} Ew \right) + \delta_V Eep$$

$$+ \delta_{MV}(Ea - Ew) d_1 + \delta_{MM} \left(\frac{H}{3} Ea - \frac{h_2}{3} Ew \right) d_1 + \delta_{Mee} d_1$$

$$K_1 = \frac{d_2^3}{6 EI} - \frac{d_1 d_2^2}{2 EI} - \delta_{VV} - \delta_{VM} d_1 - \delta_{MV} d_2 - \delta_{MM} d_1 d_2$$

$$K_2 = -\frac{d_2^3}{3 EI} - \delta_{VV} - \delta_{VM} d_2 - \delta_{MV} d_2 - \delta_{MM} d_2^2$$

$$K_3 = -\frac{d_1^3}{3 EI} - \delta_{VV} - \delta_{VM} d_1 - \delta_{MV} d_2 - \delta_{MM} d_1^2$$

$$K_4 = -\frac{d_1 d_2^2}{2 EI} + \frac{d_2^3}{6 EI} - \delta_{VV} - \delta_{VM} d_2 - \delta_{MV} d_1 - \delta_{MM} d_1 d_2$$

$$F_1 = \frac{-(C_3 + C_4) \times (2K_2 - \frac{L}{EA_2}) + 2(C_1 + C_2)K_4}{(2K_3 - \frac{L}{EA_1}) \times (2K_2 - \frac{L}{EA_2}) - 4K_1 K_4}$$

$$F_2 = \frac{-(C_1+C_2) \times (2K_3 - \frac{L}{EA_1}) + 2(C_3+C_4)K_1}{(2K_2 - \frac{L}{EA_2}) \times (2K_3 - \frac{L}{EA_1}) - 4K_1 K_4}$$

在求出 F_1 、 F_2 后,需进一步判断是否符合实际情况。如果求出的拉杆拉力为负值,说明该拉杆不受力,可简化为单根拉杆的结构进行复核计算。

5 计算结果校核

为校对本次计算程序的准确性,与 ansys 有限元软件计算结果进行了比对分析,选取的设计参数见表 1。

表 1 复核计算参数

项目	符号	参数
钢板桩泥面以上高度 /m	H	5
前后排钢板桩间距 /m	B	7
土体重度 /($kN \cdot m^{-3}$)	γ	19
回填土黏聚力 /kPa	c	0
回填土内摩擦角 /($^\circ$)	φ	30
桩前土抗力系数 /($kN \cdot m^{-2}$)	m	6 000
桩身刚度 /($kN \cdot m^{-2}$)	EI	17 500
桩计算宽度 /m	b_0	1
桩入土深度 /m	h	10
外河侧水深 /m	h_1	4
第一根拉杆距泥面距离 /m	d_1	4
第二根拉杆距泥面距离 /m	d_2	1
第一根拉杆截面参数 /($kN \cdot m^{-2}$)	EA_1	560 000
第二根拉杆截面参数 /($kN \cdot m^{-2}$)	EA_2	560 000

分别采用有限元法及本文方法的计算结果比较见表 2。

表 2 计算结果对比

项目	位置	计算结果	
		有限元计算方法	本文计算方法
弯矩 /($kN \cdot m$)	基坑侧	67.3	72.4
	河道侧	57.9	63.5
剪力 /kN	基坑侧	40.1	40.0
	河道侧	26.8	28.8
位移 /mm	基坑侧	74	74
	河道侧	77	76

从表 2 可知,本文的计算结果与有限元法的计算结果基本一致,验证了本文计算方法的准确性。

6 结论

本文首先在传统土压力理论上推算出了在双排钢板桩内有限空间下的土压力计算方法。其次利用竖向弹性地基梁法推算出了泥面以下桩身内力及位移的计算方法。再次利用材料力学公式及前后排桩在拉杆处变形方程式求出了拉杆拉力,从而解出了桩身各点的内力及位移。最后通过与有限元法的比较验证了本文方法的准确性。由于本文计算方法完全可以在 Excel 内实现程序化,相较有限元法可大幅降低设计难度、提高设计效率。

参考文献:

[1] 卢廷浩.土力学(2版)[M].南京:河海大学出版社,2002:207-208.
 [2] 刘平.小基坑钢板桩支护设计分析与程序编制[D].北京:中国地质大学,2015.
 [3] 李晓慧.板桩码头板桩墙计算方法研究[D].大连:大连理工大学,2006.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com