

# 预应力混凝土槽形板桩截面优化分析

黄建华<sup>1,2</sup>, 常建华<sup>1,2</sup>, 覃少杰<sup>1,2</sup>, 朱永涛<sup>1,2</sup>

(1.福建工程学院 土木工程学院, 福建 福州 350118;

2.地下工程福建高校重点实验室, 福建 福州 350118)

**摘要:**通过分析高强预应力混凝土板桩截面的抗弯系数的3种不同计算方法,探讨了板桩截面形状、尺寸与抗弯系数之间的关系。与现有的其它类似板桩产品相比,新研发的高强预应力槽形板桩有效提升了截面抗弯系数,提高了混凝土板桩的抗弯弯矩和抗裂弯矩。研究成果将对高性能预应力混凝土板桩优化设计和施工具有指导意义。

**关键词:** 高强预应力; 混凝土板桩; 抗弯系数; 抗弯弯矩; 抗裂弯矩

**中图分类号:** TU443

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1672-4348(2018)03-0224-06

## Section optimization analysis of pre-stressed slotted concrete sheet pile

HUANG Jianhua<sup>1,2</sup>, CHANG Jianhua<sup>1,2</sup>, QIN Shaojie<sup>1,2</sup>, ZHU Yongtao<sup>1,2</sup>

(1.School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2.Key Laboratory of Underground Engineering in Colleges and Universities of Fujian Province, Fuzhou 350118, China)

**Abstract:** By analyzing three different calculation methods of the bending coefficient of the section of high-strength pre-stressed sheet piles, the relationship among the shape, size, and bending coefficient of the pile's section was discussed. Compared with other similar products, the newly developed high-strength prestressed slotted sheet piles have their sections' bending coefficient effectively improved, and their bending moment and crack-resistance moment improved as well. The research results will provide guidance for the optimization design and construction of high performance prestressed concrete sheet piles.

**Keywords:** high strength pre-stress; concrete sheet piles; bending coefficient; bending moment; cracking moment

板桩的发展源于日本横滨国立大学 S.Ikeda 教授 1989 年和 1993 年相继在国际混凝土学术会议作了成功研发预应力混凝土板桩报告<sup>[1]</sup>。国内 2009 年开始应用 U 型板桩并与国外公司合作,对板桩技术进行优化,应用在航道护岸、海上围堰、基坑支护工程中<sup>[2-3]</sup>。目前常见混凝土板桩有 3 种截面形式:平板桩、U 形板桩、波形板桩等<sup>[4]</sup>。波形板桩的力学性能计算方面也取得了一系列成果。上官京灵<sup>[5]</sup>等采用 I 字形截面构件

水平承载力计算方法计算 U 型预应力混凝土支护板桩水平承载力。黄建华<sup>[6]</sup>等将板桩企业抗裂弯矩计算法和 GB50010-2010 的方法进行对比,分析了两种算法特点及适用范围。得出两种算法在计算思路、过程及结果上的差异和产生差异的原因,为高强预应力板桩的设计和发展提供了新思路。付文龙<sup>[7]</sup>结合基坑支护设计施工工程项目,应用预应力钢筋混凝土 T 型板桩,通过理论计算与工程应用,分析了 T 型板桩力学特点、

收稿日期: 2018-01-11

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51678153);福州市科技计划项目(2017-G-69);校企合作开发基金项目(GY-Z17145)

第一作者简介: 黄建华(1969-),男,福建莆田人,教授,博士(后),研究方向:岩土与环境、地下围护与结构。

工艺特性、工程应用过程的技术要点等。陆春阳<sup>[8]</sup>根据平面假定、材料应力应变关系和静力平衡条件导出混凝土受弯构件正截面抗裂弯矩计算公式。周文苑<sup>[9]</sup>等开发了新型预应力高强混凝土矩形支护桩,研究了矩形支护桩的受弯破坏特征、裂缝开展情况和受弯承载力,提出矩形支护桩抗裂弯矩和极限弯矩计算方法的修正建议。刘帆<sup>[10]</sup>等对后张法预应力混凝土工字型截面桩进行抗弯、抗剪力学性能试验,完善预应力工字型桩力学性能理论公式。胡少伟<sup>[11]</sup>等建立了预应力混凝土波形板桩正截面抗弯承载力的计算模型,分析得到了中性轴高度、截面弯矩、截面曲率表达式以及挠度的计算方法。

针对目前工程中应用的 U 形板桩和波形板桩截面高度较小,沉桩时容易产生桩头破损;桩与桩之间的连接企口过小,在沉桩过程中容易出现企口开裂破损,导致桩位偏差等问题,项目组研发了新型高强预应力混凝土槽形板桩,通过理论计算验证了高强预应力混凝土槽形板桩截面力学性能优势,为今后板桩的试验分析、设计生产等提供理论基础和依据。

## 1 板桩截面抗弯系数计算

### 1.1 板桩截面

新型高强预应力混凝土槽形板桩截面整体呈槽形,企口布置于左右两侧腹板,如图 1 所示。槽形板桩单桩截面如图 2 所示,在工程应用中,单个板桩通过企口(即一侧的凹槽和对侧的凸榫)相互连接,形成一个整体板桩墙,如图 3 所示。力学计算分析中把截面简化等效为两个规则矩形拼接而成的 T 型截面,横截面尺寸如图 4 所示。

### 1.2 截面抗弯系数算法一

#### 1.2.1 计算方法

把 T 形截面看作是矩形 I 和 II 所组成,T 形截面的形心必然在对称轴上,以 T 形截面底边为 z 轴,截面对称轴为 y 轴建立平面直角坐标系,如图 4 所示,利用组合图形的叠加原理求抗弯系数。

矩形 I 的形心:

$$\bar{y}_1 = t_0 + \frac{t_1}{2} \quad (1)$$

$$\bar{z}_1 = 0 \quad (2)$$

矩形 II 的形心:



图 1 高强预应力混凝土槽形板桩

Fig.1 High-strength pre-stressed slotted concrete sheet piles

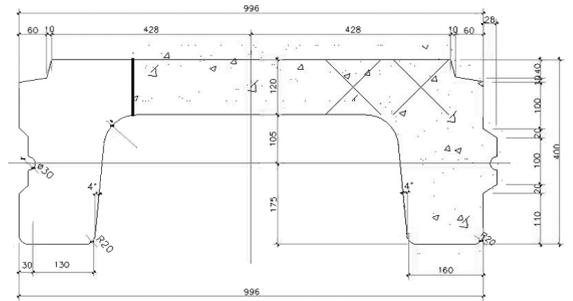


图 2 单个构件装配生产截面(单位:mm)

Fig.2 Section of a single pile under assembly production (unit:mm)



图 3 工程实际受力截面

Fig.3 Stress section of the piles in use

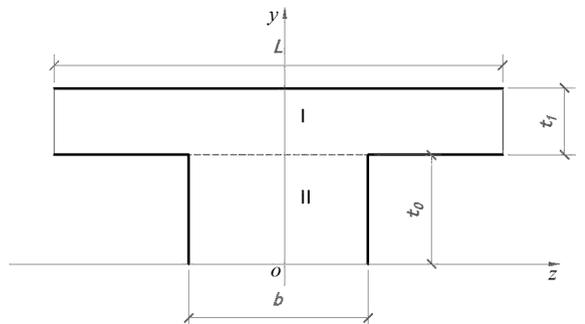


图 4 算法一 T 形截面计算简图

Fig.4 Calculation diagram of the T-section

$$\bar{y}_2 = \frac{t_0}{2} \quad (3)$$

$$\bar{z}_2 = 0 \quad (4)$$

组合图形形心:

$$\bar{y} = \frac{\bar{y}_1 \cdot A_1 + \bar{y}_2 \cdot A_2}{A_1 + A_2} \quad (5)$$

$$\bar{z} = 0 \quad (6)$$

式中,  $A_1$ 、 $A_2$  为矩形 I 和 II 的面积。

求惯性矩  $I_z$  :

$$I_z = I_1 + I_2 \quad (7)$$

根据材料力学 T 型截面对形心建立坐标系求惯性矩, 有如下公式:

$$I_1 = \frac{Lt_1^3}{12} + A_1 \cdot (\bar{y} - \bar{y}_1)^2 \quad (8)$$

$$I_2 = \frac{b \cdot t_2^3}{12} + A_2 \cdot (\bar{y} - \bar{y}_2)^2 \quad (9)$$

$$\text{最后求截面系数: } W = \frac{I_z}{\bar{y}} \quad (10)$$

### 1.2.2 计算实例

取高强预应力混凝土槽形板桩截面尺寸  $L=996$  mm,  $b=240$  mm,  $t_0=250$  mm,  $t_1=100$  mm 进行计算。

$$\bar{y}_1 = t_0 + \frac{t_1}{2} = 250 + 50 = 300 \text{ mm} \quad (11)$$

$$\bar{y}_2 = \frac{t_0}{2} = 125 \text{ mm} \quad (12)$$

$$\bar{y} = \frac{\bar{y}_1 \cdot A_1 + \bar{y}_2 \cdot A_2}{A_1 + A_2} =$$

$$\frac{300 \times 996 \times 100 + 125 \times 240 \times 250}{160\ 000} = 234.21 \text{ mm} \quad (13)$$

$$I_1 = \frac{996t_1^3}{12} + A_1 \cdot (\bar{y} - \bar{y}_1)^2 =$$

$$\frac{996 \times 100^3}{12} + 99\ 600 \times (234.21 - 300)^2 = 514\ 094\ 182.8 \text{ mm}^4 \quad (14)$$

$$I_2 = \frac{b \cdot t_2^3}{12} + A_2 \cdot (\bar{y} - \bar{y}_2)^2 =$$

$$\frac{240 \times 250^3}{12} + 60\ 000 \times (234.21 - 125)^2 = 1\ 028\ 109\ 446 \text{ mm}^4 \quad (15)$$

$$I_z = 514\ 094\ 182.8 + 1\ 028\ 109\ 446 = 1\ 542\ 203\ 629 \text{ mm}^4 \quad (16)$$

$$W = \frac{I_z}{\bar{y}} = \frac{1\ 542\ 203\ 629}{234.21} = 6\ 584\ 704.4 \text{ mm}^3 \quad (17)$$

由此得到高强预应力混凝土槽形板桩的截面抗弯系数为  $6.58 \times 10^6 \text{ mm}^3$ 。

## 1.3 截面抗弯系数算法二

### 1.3.1 计算方法

该方法同样将板桩截面等效为 T 形截面, 两个矩形形心以及组合图形形心计算方法同上。以组合图形形心为原点, 截面对称轴为  $y$  轴, 平行于 T 形截面底边为  $z$  轴建立直角坐标系, 如图 5 所示, 用积分的方法计算 T 型截面惯性矩。

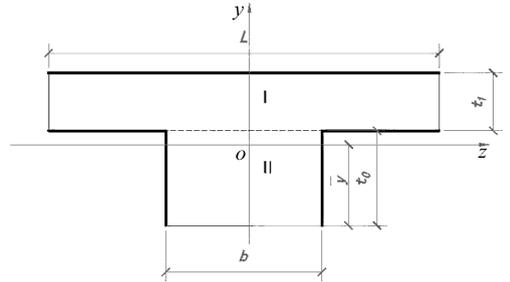


图 5 算法二 T 形截面计算简图

Fig.5 Calculation diagram of the T-section

$$I_1 = \int_{A_1} y^2 dA = \int_{t_0 - \bar{y}}^{t_0 - \bar{y} + t_1} Ly^2 dy = \frac{L}{3} [(t_0 - \bar{y} + t_1)^3 - (t_0 - \bar{y})^3] \quad (18)$$

$$I_2 = \int_{A_2} y^2 dA = \int_{-\bar{y}}^{t_0 - \bar{y}} by^2 dy = \frac{b}{3} [(t_0 - \bar{y})^3 - (-\bar{y})^3] \quad (19)$$

$$\text{截面惯性矩 } I_z = I_1 + I_2 \quad (20)$$

### 1.3.2 计算实例

取混凝土槽形板桩截面尺寸  $L=996$  mm,  $b=240$  mm,  $t_0=250$  mm,  $t_1=100$  mm 进行计算, 其中两个矩形形心以及组合图形形心计算方法同计算方法一。

$$I_1 = \int y^2 dA = \int_{15.79}^{115.79} 996y^2 dy =$$

$$\frac{996}{3} \times (115.79^3 - 15.79^3) = 514\,010\,180.40 \text{ mm}^4 \quad (21)$$

$$I_2 = \int y^2 dA = \int_{-234.21}^{15.79} 240y^2 dy = 80 \times [15.79^3 - (-234.21^3)] = 1\,028\,109\,446 \text{ mm}^4 \quad (22)$$

$$I_z = 514\,010\,180.4 + 1\,028\,109\,446 = 1\,542\,119\,626 \text{ mm}^4 \quad (23)$$

$$W = \frac{I_z}{\bar{y}} = \frac{1\,542\,119\,626}{234.21} = 6.58 \times 10^6 \text{ mm}^3 \quad (24)$$

该方法在计算图形截面惯性矩时,采用对图形进行积分的形式来计算,在示例板桩截面尺寸相同的情况下,得到的结果与方法一相同,高强预应力混凝土槽形板桩的截面抗弯系数为  $6.58 \times 10^6 \text{ mm}^3$ 。

### 1.4 截面抗弯系数算法三

#### 1.4.1 算法介绍

算法一与算法二都是利用等效 T 型截面进行抗弯截面系数计算,而算法三直接采用单块板桩截面进行计算,把截面看成是一个组合矩形计算。下图为计算简图,将整个图形看作由矩形 I、II、III 组成,选取坐标系如图 6 所示。

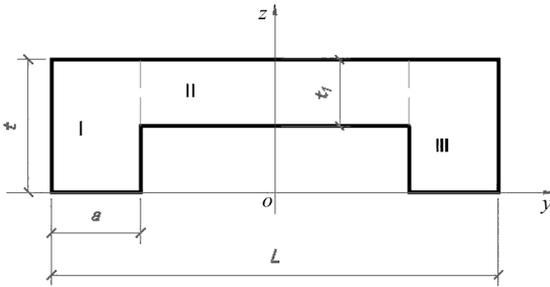


图 6 槽形截面计算简图

Fig.6 Calculation diagram of the slot-shaped section

#### 1.4.2 计算形心坐标

分别求出各矩形的面积和形心坐标:

$$\text{矩形 I} \quad A_1 = at \quad (25)$$

$$\bar{y}_1 = \frac{a - L}{2} \quad (26)$$

$$\bar{z}_1 = \frac{t}{2} \quad (27)$$

$$\text{矩形 II} \quad A_2 = t_1(L - 2a) \quad (28)$$

$$\bar{y}_2 = 0 \quad (29)$$

$$\bar{z}_2 = t - \frac{t_1}{2} \quad (30)$$

$$\text{矩形 III} \quad A_3 = at \quad (31)$$

$$\bar{y}_3 = \frac{L - a}{2} \quad (32)$$

$$\bar{z}_3 = \frac{t}{2} \quad (33)$$

根据组合图形形心坐标公式,求得整个图形形心坐标为:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \bar{y}_i}{\sum_{i=1}^n A_i} = \frac{at \cdot \frac{a - L}{2} + at \cdot \frac{L - a}{2}}{2at + t_1(L - 2a)} = 0 \quad (34)$$

$$\bar{z} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \bar{z}_i}{\sum_{i=1}^n A_i} = \frac{at^2 + t_1(L - 2a) \left( t - \frac{t_1}{2} \right)}{2at + t_1(L - 2a)} = y_{\max} \quad (35)$$

#### 1.4.3 导出计算截面惯性矩公式

以高强预应力生态板桩横截面对称轴为 y 轴,通过截面形心且平行于截面为 z 轴(中性轴)建立平面直角坐标系,如图 7 所示。

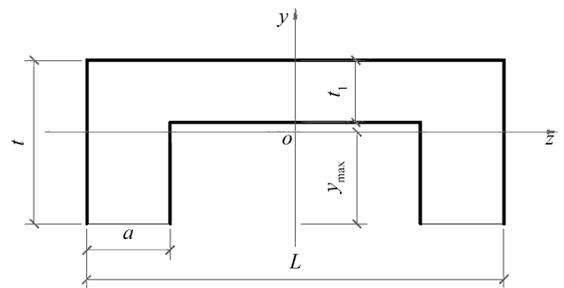


图 7 截面惯性矩计算简图

Fig.7 Calculation diagram of the section's inertia moment

导出简图对 z 轴的惯性矩公式

$$I_z = \int_{-t-y_{\max}}^{t-y_{\max}} y^2 dy + 2a \int_{-y_{\max}}^{t-t_1-y_{\max}} y^2 dy = \frac{1}{3} [L(t - y_{\max})^3 + (2a - L)(t - t_1 - y_{\max})^3 + 2ay_{\max}^3] \quad (36)$$

### 1.4.4 抗弯截面系数的计算公式

$$W = \frac{I_z}{y_{\max}} \quad (37)$$

### 1.4.5 计算实例

以高强预应力混凝土槽形板桩宽  $L = 996$  mm、总高  $t = 350$  mm、翼缘高  $t_1 = 100$  mm、腹板宽  $a = 120$  mm 为例,按照上述方法计算其抗弯截面系数。

$$\text{矩形 I} \quad A_1 = 120 \times 350 = 42\,000 \text{ mm}^2 \quad (38)$$

$$\bar{y}_1 = \frac{120 - 996}{2} = -438 \text{ mm} \quad (39)$$

$$\bar{z}_1 = \frac{350}{2} = 175 \text{ mm} \quad (40)$$

$$\text{矩形 II} \quad A_2 = 100 \times (996 - 240) = 75\,600 \text{ mm}^2 \quad (41)$$

$$\bar{y}_2 = 0 \text{ mm} \quad (42)$$

$$\bar{z}_2 = 350 - \frac{100}{2} = 300 \text{ mm} \quad (43)$$

$$\text{矩形 III} \quad A_3 = 120 \times 350 = 42\,000 \text{ mm}^2 \quad (44)$$

$$\bar{y}_3 = \frac{996 - 120}{2} = 438 \text{ mm} \quad (45)$$

$$\bar{z}_3 = \frac{350}{2} = 175 \text{ mm} \quad (46)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \bar{y}_i}{\sum_{i=1}^n A_i} =$$

$$\frac{42\,000 \times (-438) + 42\,000 \times 438}{2 \times 42\,000 + 75\,600} = 0 \text{ mm} \quad (47)$$

$$\bar{z} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \bar{z}_i}{\sum_{i=1}^n A_i} =$$

$$\frac{120 \times 350^2 + 100 \times (996 - 240) \times \left(350 - \frac{100}{2}\right)}{2 \times 42\,000 + 100 \times (996 - 2 \times 120)} = 234.21 \text{ mm} \quad (48)$$

$$I_z = \frac{1}{3} \left( 996 \times (350 - 234.21)^3 + (240 - 996) \times (250 - 234.21)^3 + 240 \times 234.21^3 \right) = 1.54 \times 10^9 \text{ mm}^4 \quad (49)$$

$$W = \frac{1.54 \times 10^9}{234.21} = 6.58 \times 10^6 \text{ mm}^3 \quad (50)$$

算法一和算法二采用 T 型截面计算,算法三采用组合矩形截面计算,两种截面都从工程实际

拼接在一起的板桩整体中截取。通过验证,用 3 种不同算法,对同一板桩的不同截面分别计算,得出的结果相同,可见 3 种算法都可行。

## 2 截面尺寸优化分析

定义 3 组截面,每组计算 3 个截面尺寸,应用控制变量法的原理,控制 3 组截面的截面面积相同,每组截面只改变一个截面尺寸,进而观察截面抗弯系数的改变,最后把 3 组截面的数据进行横向对比。

### 2.1 第一组截面尺寸比较

保持截面总面积为  $159\,600 \text{ mm}^2$ ,翼缘高度为  $100 \text{ mm}$  不变,  $t_0$  分别取  $200$ 、 $250$ 、 $300 \text{ mm}$ ,  $b$  分别取  $300$ 、 $240$ 、 $200 \text{ mm}$ 。求得抗弯系数  $W$  分别为  $5\,813\,165.05$ 、 $6\,584\,719.10$ 、 $7\,389\,575.92 \text{ mm}^3$ 。可见当翼缘高度和截面总面积保持不变,适当增加腹板高度  $t_0$ ,减小腹板宽度  $b$ ,可使截面抗弯系数增加。

### 2.2 第二组截面尺寸比较

保持截面总面积为  $159\,600 \text{ mm}^2$ ,腹板宽度为  $200 \text{ mm}$  不变,  $t_1$  取值分别为  $100$ 、 $120$ 、 $140 \text{ mm}$ ,  $t_0$  取值为  $300.0$ 、 $200.4$ 、 $100.8 \text{ mm}$ 。求得抗弯系数  $W$  分别为  $7\,389\,575.92$ 、 $4\,759\,336.45$ 、 $3\,214\,503.07 \text{ mm}^3$ 。可见当保持腹板宽度和截面总面积不变,增加翼缘高度  $t_1$ ,减小腹板高度  $t_0$ ,可使截面抗弯系数减小。

### 2.3 第三组截面尺寸比较

保持截面总面积为  $159\,600 \text{ mm}^2$ ,腹板高度为  $200 \text{ mm}$  不变,  $t_1$  取值  $100$ 、 $120$ 、 $140 \text{ mm}$ ,  $b$  取值  $300$ 、 $200.4$ 、 $100.8 \text{ mm}$ 。求得抗弯系数  $W$  分别为  $5\,813\,165.05$ 、 $4\,757\,317.45$ 、 $3\,234\,995.00 \text{ mm}^3$ 。可见当腹板高度  $t_0$  和截面总面积保持不变,增加翼缘高度  $t_1$ ,减小腹板宽度  $b$ ,可使截面抗弯系数减小。

### 2.4 截面尺寸优化分析

通过对 3 组数据的分析对比可知,在板桩截面面积相同的情况下,增加腹板高度  $t_0$  所得到的截面抗弯系数比增加腹板宽度  $b$  更大;而增加腹板宽度  $b$  比增加翼缘高度  $t_1$  得到的截面抗弯系数更大;三者关系是  $t_0 > b > t_1$ 。因此,在相同截面面积下,腹板高度  $t_0$  是对截面抗弯系数影响最大的尺寸因素。

实际生产中,翼缘高度  $t_1$  和腹板宽度  $b$  应保

持在一定范围内,因此若要增加槽形板桩截面抗弯系数,可在保持翼缘高度 $t_1$ 和腹板宽度 $b$ 适当的取值范围下增加腹板高度 $t_0$ ,这样就可以在截面面积最小的情况下获得最大的截面抗弯系数,即增加腹板高度 $t_0$ 所获得的性价比最大。

### 3 结论

1)采用的3种板桩截面抗弯系数计算方法经验证均合理有效。第一、二种算法适用于T形、L形、工字型等规则矩形组合的截面或可等效为规则矩形组合截面的板桩截面抗弯系数计算;第三种算法更适用于不规则截面抗弯系数的计算分析。

2)截面的抗弯系数影响截面的抗裂弯矩和

抗弯弯矩,截面的抗弯系数越大,抗裂弯矩相应也就越大。分析可知优化板桩的截面尺寸因素可以增加板桩的截面抗弯系数。

3)保持一定板桩截面积,增加腹板高度 $t_0$ 所得的截面抗弯系数比增加腹板宽度 $b$ 的更大;而增加腹板宽度 $b$ 所得的截面抗弯系数比增加翼缘高度 $t_1$ 的更大;三者顺序关系是 $t_0 > b > t_1$ 。因此,腹板高度 $t_0$ 是对截面抗弯系数影响最大的尺寸因素,即增加腹板高度 $t_0$ 所获得的性价比最大。

4)通过增加腹板高度 $t_0$ 、减少腹板宽度 $b$ 的截面优化方案,能有效保证相同截面积下增加截面抗弯系数,从而提高截面的抗弯、抗裂弯矩,提高板桩的力学性能,增加高强预应力板桩生产和使用效益。

### 参考文献:

- [1] 蒋家奋.高强混凝土板桩—日本最近开发生产的一种新型桩材[J].混凝土与水泥制品,1995,2(5):38-39.
- [2] 周海斌.先张法预应力钢筋混凝土U型板桩作为支护桩的应用研究[D].苏州:苏州科技学院,2014.
- [3] 王新泉,陈永辉,章宇强,等.板桩加固护岸受力机制的现场试验研究[J].岩土力学,2011,32(6):1749-1756.
- [4] 郭立廷.钢筋混凝土板桩合理形式和构造的探讨[J].水运工程,1985,1(6):1-7.
- [5] 上官京灵,黄广龙,耿山河.U型预应力混凝土支护板桩承载力计算方法[J].南京工业大学学报(自然科学版),2013,35(5):100-104.
- [6] 黄建华,覃少杰,常建华,等.高强预应力混凝土板桩抗裂弯矩算法分析[J].福建工程学院学报,2018,16(1):1-7.
- [7] 付文龙.预应力钢筋混凝土T型板桩在某基坑支护设计中的应用研究[D].广州:广州大学,2016.
- [8] 陆春阳.混凝土受弯构件正截面抗裂弯矩计算[J].广西大学学报(自然科学版),2005,30(3):181-183.
- [9] 周文苑,黄广龙,凌德祥,等.预应力高强混凝土矩形支护桩的受弯性能[J].南京工业大学学报(自然科学版),2011,33(5):84-89.
- [10] 刘帆,黄广龙,徐汉东,等.后张法预应力混凝土工字型桩力学性能试验[J].南京工业大学学报(自然科学版),2014,36(4):101-107.
- [11] 胡少伟,黄逸群,范向前.预应力高强混凝土波形板桩正截面抗弯承载力的计算模型及分析[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2017,38(6):1-8.

(责任编辑:陈雯)