

文章编号:1002-3682(2015)02-0051-09

中日直立式双板桩防波堤设计方法 比较研究*

姜宁林, 谢宁宁

(中交第二航务工程勘察设计院有限公司, 湖北 武汉 430060)

摘 要:直立式双板桩防波堤是一种对深水软土地基有较强适应性的防波堤结构,但是目前尚无系统的设计方法。本文以某外海深水直立式双板桩防波堤为例,分别采用国内规范和日本规范给出的方法计算直立式双板桩防波堤的入土深度和桩身内力。结果表明,中日规范在直立式双板桩防波堤的设计中均有一定的局限性:对于国内规范,当堤顶宽度较小时,其墙后主动土压力的计算会与实际情况有较大差别;对于日本规范,当堤顶宽度较大时,墙后填土产生的抵抗弯矩不符合实际情况。由此,对直立式双板桩防波堤的设计,建议同时采用中日两种计算方法进行设计并相互验证,共同拟定合理的结构断面。

关键词:直立式双板桩;防波堤;入土深度;内力

中图分类号: U656.2

文献标识码: A

近年来,随着海岸工程建设的发展,大部分自然条件优越的海岸带已被开发利用,后续海岸工程的建设多面临水深、浪高、流急和地基软弱等不利的自然条件。而对于这些自然条件相对较差的海岸工程的外海防波堤建设而言,选择适合的防波堤结构型式是工程成功与否的关键因素。

外海防波堤常用的结构型式主要分斜坡式和直立式两种^[1]。出于边坡稳定的要求,普通斜坡式防波堤的断面较大,而且由于外海施工条件恶劣,导致其施工难度大、进度慢^[2];出于地基承载能力的要求,常规直立式防波堤如沉箱、方块结构要求工程所在地具有良好的地基基础^[1]。相对于前两种结构形式,直立式双板桩防波堤对深水软土地基有较强适用性,而且具有砂石用料省、施工速度快等优点,更适用于外海深水防波堤的建设^[2]。但是到目前为止,直立式双板桩结构在深水防波堤的建设中运用还较少,对其设计方法的研究也相对较少。本文以某外海深水直立式双板桩防波堤为例,分别采用国内设计与日本设计方法进行对比分析,以期直立式双板桩防波堤的在外海工程中的设计应用提供相应的理论依据。

1 国内规范设计方法

对于直立式双板桩防波堤的设计,国内常用的处理办法是将内、外排桩视为各自独立

* 收稿日期:2014-11-28

作者简介:姜宁林(1987-),男,助理工程师,硕士,主要从事港口海岸工程结构设计方面研究. E-mail: hhun-ljiang@163.com

的单排桩,按有锚板桩的计算方法进行计算。对于有锚板桩结构的计算,我国 JTS 167-3—2009《板桩码头设计与施工规范》^[3]中推荐竖向弹性地基梁法,该方法的基本假定是:将土体视作弹性变形介质,具有沿深度成正比增长的地基系数;桩的位移与桩的长度相比较小;桩处于弹性状态,并服从虎克定律^[4-5]。

竖向弹性地基梁法的计算图式见图 1^[3],其中, R_a 表示拉杆拉力(kN/m); q 表示码头后方均布荷载(kN/m²); p 表示波浪力(kN/m²); e_a 表示主动土压力强度(kN/m²); e_w 表示剩余水压力强度(kN/m²); t 表示设计入土深度(m); k_1, \dots, k_n 表示弹性杆的弹性系数(kN/m)。该计算方法将板桩墙从计算水底处分为两个部分,计算水底以上的部分是底端固结的悬臂梁,计算水底以下部分则是埋在土体中的竖向弹性地基梁。其主要设计步骤包括水平地基抗力系数、板桩墙入土深度的计算和板桩墙内力计算。

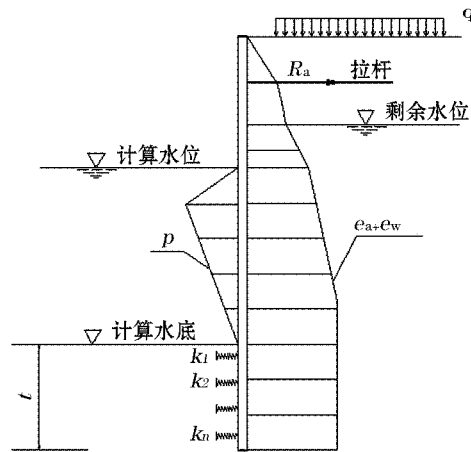


图 1 竖向弹性地基梁法计算图式^[3]

Fig. 1 Computational scheme of the anchor-free sheet pile wall^[3]

1) 水平地基抗力系数

根据 JTS 167-3—2009《板桩码头设计与施工规范》^[3]要求,深度 z 处土的水平地基抗力系数 k 为

$$k = mz \quad (1)$$

式中, m 为土的水平地基抗力系数随深度增长的比例系数(kN/m⁴); z 为计算点的深度(m)。

2) 板桩墙入土深度的计算

板桩墙入土深度根据“踢脚”稳定性来确定^[3]。为保证板桩墙的“踢脚”稳定性,墙前被动土压力对拉杆锚碇点的稳定力矩须大于墙后主动土压力以及剩余水压力对锚碇点的转动弯矩,即满足如下公式:

$$\gamma_0 \left[\sum \gamma_G M_G + \gamma_{Q1} M_{Q1} + \psi(\gamma_{Q2} M_{Q2} + \gamma_{Q3} M_{Q3} + \dots) \right] \leq \frac{M_R}{\gamma_R} \quad (2)$$

式中, γ_0 表示结构重要性系数; γ_G 表示永久作用分项系数; M_G 表示永久作用标准值产生

的作用效应(kN·m),包括墙后土体本身产生的主动土压力的标准值和剩余水压力的标准值对拉杆锚碇点的“踢脚”力矩; $\gamma_{Q1}, \gamma_{Q2}, \gamma_{Q3}, \dots$ 表示可变作用分项系数; M_{Q1} 表示主导可变作用效应(kN·m),通常是码头地面可变作用产生的主动土压力的标准值或墙前波吸力的标准值对拉杆锚碇点的“踢脚”力矩; M_{Q2}, M_{Q3}, \dots 表示非主导可变作用标准值产生的“踢脚”力矩(kN·m); ψ 表示作用组合系数; M_R 表示板桩墙前被动土压力的标准值对拉杆锚碇点的稳定力矩(kN·m); γ_R 表示抗力分项系数,取为 1.25。

3) 板桩墙内力计算

通过板桩墙顶端位移为零的条件求出拉杆拉力。将板桩墙简化为埋在土体中的弹性构件,板桩墙顶位于地面,桩顶在外部荷载作用下产生横向位移及转角,由此计算板桩墙内力。

2 日本规范设计方法

日本《渔港防波堤、系船岸等的设计准则与算例》^①的设计准则为:第一,计算填砂的剪切抵抗力;第二,双排板桩墙的整体剪切抵抗力是填砂的剪切抵抗力与双排板桩墙与上部结构形成排架结构的抵抗力之和。其主要设计步骤如下:

1) 选取钢板桩截面

钢板桩截面模量计算方法如下:

$$Z \geq \frac{M_{\max}}{\sigma_a} \times 10^{-3} \quad (3)$$

式中, M_{\max} 为填土和残留水压力生成的钢板桩的最大弯矩(kN·m); σ_a 为容许应力强度(N/mm²); Z 为钢板桩最小的截面模量(m³)。

2) 计算有效堤高

有效提高的计算方法如下:

$$H_1 = H_0 + \frac{1.5}{\beta} \quad (4)$$

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k_h \cdot B}{4E \cdot I}} \times 10^{-3} \quad (5)$$

式中, H_0 为从海底面到上部混凝土下端的高度(m); β 为特征值(m⁻¹); k_h 为土的侧向反力系数(kN/m³),根据日本规范^②取值 12 000 kN/m³; B 为桩的宽度(m); E 为钢材的弹性模量(N/mm²); I 为钢板桩的截面惯性矩(m⁴)。

3) 计算钢板桩的抵抗弯矩

钢板桩抵抗弯矩的计算方法如下:

$$M_s = 1.2M_0 - M_f \quad (6)$$

$$M_0 = \sum_i (p_i y_i) \quad (7)$$

式中, M_s 为钢板桩的抵抗弯矩(kN·m); M_0 为有效提高下端外荷载产生的弯矩(kN·m);

① 日本全国渔港协会. 渔港防波堤、系船岸等的设计准则与算例. 1992.

② THE OVERSEAS COASTAL AREA DEVELOPMENT INSTITUTE OF JAPAN. Technical standards and commentaries for port and harbour facilities in Japan. 2009.

M_f 为填土产生的抵抗弯矩($\text{kN} \cdot \text{m}$); p_i 为外力(kN); y_i 为有效堤高下端到外力作用点的距离(m)。

a. 波浪力的计算^③

波浪力计算图如图 2 所示, 其中 p_1, p_2, p_3 和 p_4 表示各作用点处的波压力强度(kPa); H 表示波高(m); h 表示建筑物前水深(m); h_s 表示设计水位至建筑物顶部高度(m)。具体计算过程如下:

$$p_1 = (p_2 + \gamma h) \left(\frac{H + \delta_0}{h + H + \delta_0} \right) \quad (8)$$

$$p_2 = \frac{\gamma H}{\cosh \frac{2\pi h}{L}} \quad (9)$$

$$p_3 = \frac{H + \delta_0 - h_s}{H + \delta_0} p_1 \quad (10)$$

$$p_4 = 1.5 \gamma H \quad (11)$$

$$\delta_0 = \frac{\pi H^2}{L} \coth \frac{2\pi h}{L} \quad (12)$$

式中, γ 为水的重度(kN/m^3); L 为波长(m)。

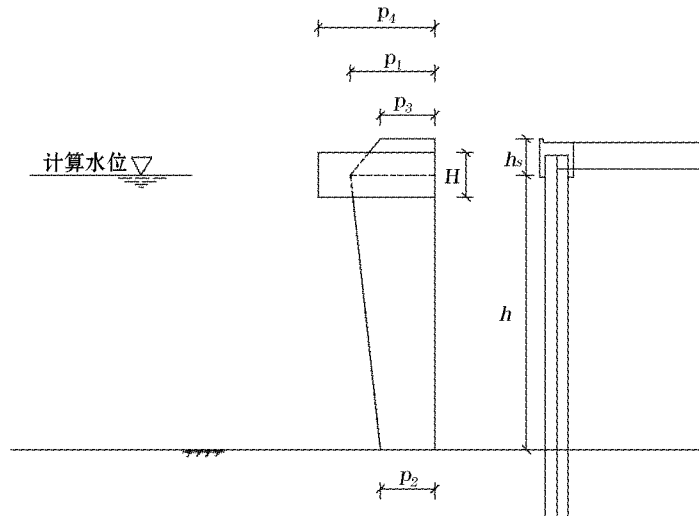


图 2 日本规范给出的波浪力计算图

Fig. 2 Calculation chart of wave force according to the Japanese specification

③ 日本全国渔港协会. 渔港技术准则. 1999.

b. 土压力产生弯矩的计算^④

土压力产生弯矩的计算方法如下:

$$M_f = \frac{1}{6} \gamma' H_1 B_0^2 \left(3 - \frac{B_0}{H_1} \cos \phi \right) \sin \phi \quad (13)$$

式中, M_f 为填土产生的抵抗弯矩($\text{kN} \cdot \text{m}$); γ' 为填土在水中的单位体积重量(kN/m^3); H_1 为有效堤高(m); B_0 为堤体的宽度(m); ϕ 为填土的内摩擦角($^\circ$)。

4) 验算钢板桩的应力

钢板桩应力的验算方法如下:

$$M_{\max} = EI \beta^2 Y_{\text{TOP}} \times 10^3 \quad (14)$$

$$Y_{\text{TOP}} = \frac{M_s H_1^2}{24 EI} \times 10^3 \quad (15)$$

$$\sigma = \frac{M_{\max}}{Z} \times 10^3 \leq \sigma_a \quad (16)$$

式中, Y_{TOP} 为框架结构的顶部位移量(m); M_s 为钢板桩的抵抗弯矩($\text{kN} \cdot \text{m}$); H_1 为有效堤高(m); σ 为钢板桩的弯曲应力强度(N/mm^2); M_{\max} 为钢板桩的最大弯矩($\text{kN} \cdot \text{m}$); Z 为假定的钢板桩截面系数(m^3); σ_a 为钢板桩的容许弯曲应力强度(N/mm^2)。

5) 计算钢板桩的入土深度

钢板桩的入土深度计算方法如下:

$$l = \frac{5\pi}{4\beta_0} \quad (17)$$

式中, l 为从海底面算起的入土深度(m); β_0 为特征值(m^{-1}), 其计算同公式(5), 其中 I 取钢板桩腐蚀前的数值。

3 工程实例分析

针对以上两种设计方法, 本文以某外海深水防波堤工程为例对直立式双板桩防波堤的设计进行分析研究。该防波堤工程采用直立式双板桩的结构型式, 按照总图及工艺布置的要求, 堤体宽度确定为 26.6 m。该防波堤结构主要由双排组合钢管板桩、拉杆、联系撑等组成, 在钢板桩之间设置钢拉杆, 上部结构采用整体现浇墩台, 港池外侧设有防浪墙, 钢板桩之间回填中粗砂, 在钢板桩两侧均抛填块石进行护底(图 3)。计算时设计水位取设计高水位 1.02 m, 设计波高采用 50 a 一遇累计频率为 1% 的波高 5.27 m。

本工程的地质勘测结果显示, 地基中有一层厚度约为 10 m 的软弱淤泥夹层, 其土体主要参数见表 1, 其中 m 值根据勘察报告的土层描述参考国内规范选取^[3,6]。

^④ 日本港湾协会. 港湾设施技术上的标准. 1999.

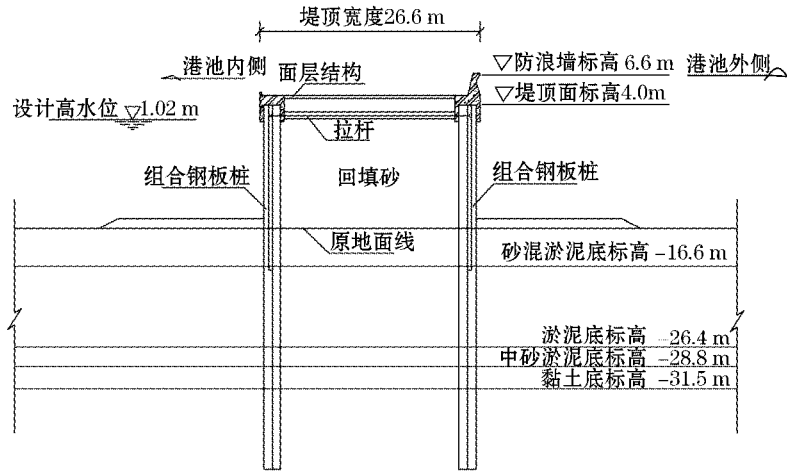


图3 直立式双板桩防波堤断面图

Fig. 3 Cross section of vertical double sheet pile breakwater

表1 土体参数

Table 1 Parameters of the soil

土体名称	重度/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ $^{\circ}$	m 值/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-4}$
砂混淤泥	18.0	8.0	10.0	5 000
淤泥	15.7	8.0	4.0	2 000
中砂混淤泥	19.5	0.0	30.0	6 000
黏土1	18.7	25.7	22.7	8 000
黏土2	18.4	41.0	17.0	8 000
珊瑚礁灰岩	17.0	0.0	40.0	15 000

3.1 国内规范计算结果

对于直立式双板防波堤的计算,国内常用的处理方法是将直立式双板桩防波堤结构简化为各自独立的有锚板桩进行设计,在这个简化过程中,堤顶宽度的大小是简化合理与否的关键因素。对于有锚板桩结构,规范中锚碇墙到前墙最小距离的规定,是根据板桩墙后土体主动破裂面和锚碇墙前被动破裂面在地面处的交点确定的,根据这一原则,直立式双板桩防波堤堤顶宽度可由板桩墙后主动破裂面与地面相交处的距离近似确定,如图4所示,图中 H_0 表示板桩墙后主动破裂棱体的高度(m); B 表示防波堤堤顶宽度(m)^[1]。据此计算方法可以计算出本示例工程中防波堤堤顶宽度最小值为26.0 m。

在实际的防波堤工程中,堤顶宽度的大小受总平面布置、工艺布置等诸多因素影响,变化幅度较大。现以本文工程实例的实际堤顶宽度为基准,上下浮动,选取5个代表宽度,采用国内规范的设计方法计算不同堤顶宽度下直立式双板桩防波堤的桩长及桩身弯矩。表2中的计算结果表明:随着防波堤堤顶宽度的不断增大,板桩弯矩设计值逐渐减小,但总的降低幅度较小;而当堤顶宽度为16.6 m时,板桩墙后土体主动破裂面与地面

的相交点已不在后侧板桩墙范围内,此时就不再适合使用国内规范进行计算了。

运用国内规范进行计算时:永久作用标准值产生的作用效应为墙后土体主动土压力的标准值对拉杆锚碇点的“踢脚”力矩,不考虑剩余水压力的作用;可变作用为防波堤堤顶均载(按 0.5 t/m^2 考虑)与波浪力,其中波浪力为主导可变作用。土压力的计算参照 JTS 167-3—2009《板桩码头设计与施工规范》^[3],波浪力计算参照 JTS 145-2—2013《海港水文规范》^[7]。

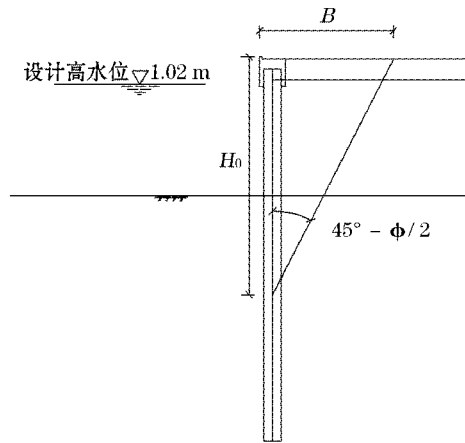


图 4 直立式双板桩防波堤堤顶宽度计算图示

Fig. 4 Calculation schemata for the crest width of vertical double sheet pile breakwater

表 2 国内规范计算结果

Table 2 Calculation results based on the Chinese specification

计算项	堤顶宽度				
	16.6 m	26.6 m	36.6 m	46.6 m	56.6 m
桩长/m	43.6	43.6	43.6	43.6	43.6
板桩弯矩设计值 /kN·m	6 634	6 543	6 379	6 255	6 134
板桩强度设计值 /kN·m	6 675	6 675	6 675	6 675	6 675
板桩型号 ^⑤	直径 2 032 mm 的钢管桩(壁厚 28 mm)+AZ26 钢板桩	直径 2 032 mm 的钢管桩(壁厚 28 mm)+AZ26 钢板桩	直径 2 032 mm 的钢管桩(壁厚 28 mm)+AZ26 钢板桩	直径 2 032 mm 的钢管桩(壁厚 28 mm)+AZ26 钢板桩	直径 2 032 mm 的钢管桩(壁厚 28 mm)+AZ26 钢板桩

⑤ ARCELORMITTAL. Steel foundation solution for projects (steel sheet piling). 2012.

3.2 日本规范计算结果

按照日本规范设计方法,不同堤顶宽度下直立式双板桩防波堤的主要计算结果如表3所示。由表可知,防波堤堤顶宽度的变化对桩长以及桩身弯矩的影响均非常明显。桩身弯矩及桩长与防波堤的堤顶宽度成一定的反比关系,即桩身弯矩及桩长均随着堤身宽度的逐渐增大而减小。此外,表3中最后两个方案的计算结果显示桩身弯矩为负值,这是因为日本规范的计算方法考虑了堤顶宽度的影响因素,但是当堤顶宽度超过一定数值时,填土产生的抵抗弯矩大于外荷载产生的弯矩,计算结果与实际情况不符,此时就不再适合使用日本规范进行计算了。

表3 日本规范计算结果

Table 3 Calculation results according to the Japanese specification

计算项	堤顶宽度				
	16.6 m	26.6 m	36.6 m	46.6 m	56.6 m
桩长/m	48	41	35	35	35
板桩弯矩设计值 /kN·m	10 240	6 474	2 151	-1 576	-2 049
板桩强度设计值 /kN·m	11 321	6 675	2 639	/	/
板桩型号 ^⑤	直径 2 997 mm 的钢管桩(壁厚 28 mm)+AZ26 钢板桩	直径 2 032 mm 的钢管桩(壁厚 28 mm)+AZ26 钢板桩	直径 1 524 mm 的钢管桩(壁厚 18 mm)+AZ18 钢板桩	/	/

注:“/”表示无数据

4 结 论

对于直立式双板桩防波堤的设计,国内规范采用将双板桩结构简化为单板桩结构进行设计的方法,但是当防波堤堤顶宽度较小时,其墙后主动土压力的计算会与实际情况有较大差别,导致简化出现一定的不合理性。日本规范的设计准则考虑了双排板桩墙与上部结构形成的排架结构的抵抗力,但是当堤顶宽度超过一定数值时,填土产生的抵抗弯矩的计算结果不符合实际情况,此时日本设计准则推荐的计算公式将不再适用。由此可见,中日规范在直立式双板桩防波堤的设计中均有一定的局限性。因此本文建议在直立式双板防波堤工程的初步设计阶段应通过这两种计算方法互相验证,共同拟定结构断面,在详细设计阶段,应进一步借助有限元软件进行详细地分析研究,从而确定更为合理的结构断面。

参考文献:

- [1] JTS 154-1—2011 防波堤设计与施工规范[S].北京:人民交通出版社,2011.
- [2] 俞相成,谢先坤.一种直立式双排板桩海堤结构分析与探讨[J].城市道桥与防洪,2012,(5): 123-127.

- [3] JTS 167-3—2009 板桩码头设计与施工规范[S].北京:人民交通出版社,2009.
- [4] 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.
- [5] 裴张兵,王云球.板桩码头计算方法的分析比较[J].水运工程,1998,(11):6-10.
- [6] JTS 167-4—2012 港口工程桩基规范[S].北京:人民交通出版社,2012.
- [7] JTS 145-2—2013 海港水文规范[S].北京:人民交通出版社,2013.

A Comparative Study on the Design Methods of Vertical Double Sheet Pile Breakwater Between China and Japan

JIANG Ning-lin, XIE Ning-ning

(CCCC Second Harbor Consultants Co., Ltd, Wuhan 430060, China)

Abstract: The vertical double sheet pile breakwater is a breakwater structure that has a good adaptability to the deep-water soft soil foundation. However, there has been no systematical method for designing such a breakwater by now. By taking one of the deep-water vertical double sheet pile breakwaters as an example, the penetrating depth and the pile internal force of the vertical double sheet pile breakwater are calculated according to the Chinese and the Japanese specifications respectively. The calculation results show that both the Chinese and the Japanese specifications have some limitations in the design of vertical double sheet pile breakwater. Based on the Chinese specification, the calculation result of the active earth pressure behind the wall will deviate greatly from the actual situation if the crest width is smaller, whereas according to the Japanese specification, the calculated resistance moment generated by filling soil behind the wall is inconsistent with the actual situation if the crest width is relatively larger. Thus, it is recommended that for designing the vertical double sheet pile breakwater, both the Chinese and the Japanese methods should be used simultaneously and authenticated mutually, so that a reasonable structure section could be formulated jointly.

Key words: vertical double sheet pile; breakwater; penetration depth; internal force