

板桩防波堤在海外浅海区域 工程中的应用

姜宁林，黄胜

(中交第二航务工程勘察设计院有限公司，湖北 武汉 430060)

摘要：浅海区域波浪、水流等自然条件相对较好，采用常规实体斜坡式防波堤投资较高，可考虑采用直立式板桩防波堤结构进行替换，节约工程投资。基于实际工程项目，采用美标计算板桩防波堤前波浪力，并通过物理模型试验对波浪力进行验证；最后通过岩土有限元软件 PLAXIS 分析板桩防波堤各构件内力及整体位移。分析结果表明：1) 板桩防波堤各构件内力较小，可采用相应型号的预制构件作为板桩防波堤主体结构；2) 板桩防波堤整体位移可控；3) 在浅海区域，采用板桩防波堤结构合理可行。

关键词：浅海区域；板桩防波堤；波浪力；内力；位移

中图分类号：U 656

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2021)11-0050-05

Application of sheet pile breakwater in shallow water area of overseas projects

JIANG Ning-lin, HUANG Sheng

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

Abstract: The natural conditions such as wave and current in shallow sea area are relatively good, and the investment in conventional mound-type breakwater is relatively high. The vertical sheet pile breakwater structure can be considered for replacement to save engineering investment. Based on the actual project, the American standard is used to calculate the wave force in front of the sheet pile breakwater, and the wave force is verified by the physical model test. Finally, the inner force of each component and the overall displacement of the sheet pile breakwater are analyzed by the geotechnical finite element software PLAXIS. The analysis results show that: 1) The inner force of each component of sheet pile breakwater is relatively small, and the corresponding type of prefabricated components can be used as the main structure of sheet pile breakwater. 2) The overall displacement of sheet pile breakwater is controllable. 3) It is reasonable and feasible to use sheet pile breakwater structure in shallow water area.

Keywords: shallow water area; sheet pile breakwater; wave force; inner force; displacement

海外工程项目中，有不少码头项目是作为能源电力项目的配套工程建设的，码头所处位置面临恶劣的波浪、水流、泥沙等自然条件。为有效掩护码头港池区域，须建设防波堤，以确保港池内泊稳条件良好、保证船舶的安全靠泊和装卸作业。在进行防波堤结构选型时，需要综合考虑工

程所在地区自然条件、施工条件、材料供应等多方面因素。

常用的防波堤结构有斜坡式和直立式两种^[1-2]。实体斜坡式防波堤结构安全可靠、耐久性好，在诸多项目中得到应用，但其断面尺寸大、石料耗用多、费用高。直立式防波堤结构又分为

重力式直立堤和桩式直立堤, 重力式直立堤对地基承载力要求较高、适用性较差; 桩式直立堤可承受外部荷载有限、适用性也较差。

浅水海域的波浪、水流等条件相对较好, 采用常规的实体斜坡式防波堤工程量大, 可考虑施工方便、造价较低的板桩防波堤结构^[3]。本文依托实际工程项目, 根据 Goda 公式进行板桩防波堤前波浪力分析, 并采用岩土有限元分析软件 PLAXIS 计算板桩防波堤各构件内力、板桩防波堤的整体位移。本文分析成果可为浅海区域类似项

目防波堤结构的设计提供一定的参考。

1 工程概况

孟加拉某 2×660 MW 燃煤发电项目位于孟加拉南部、孟加拉湾以西, 距离吉大港约 40 km。为保证燃煤电厂所需煤炭的稳定供给, 规划建设了一座专用煤炭进口码头, 码头设计船型为 6 000 吨级驳船, 主体结构包括 2 个 6 000 吨级卸船泊位, 接岸引桥以及南、北两条防波堤。码头、防波堤平面布置见图 1。

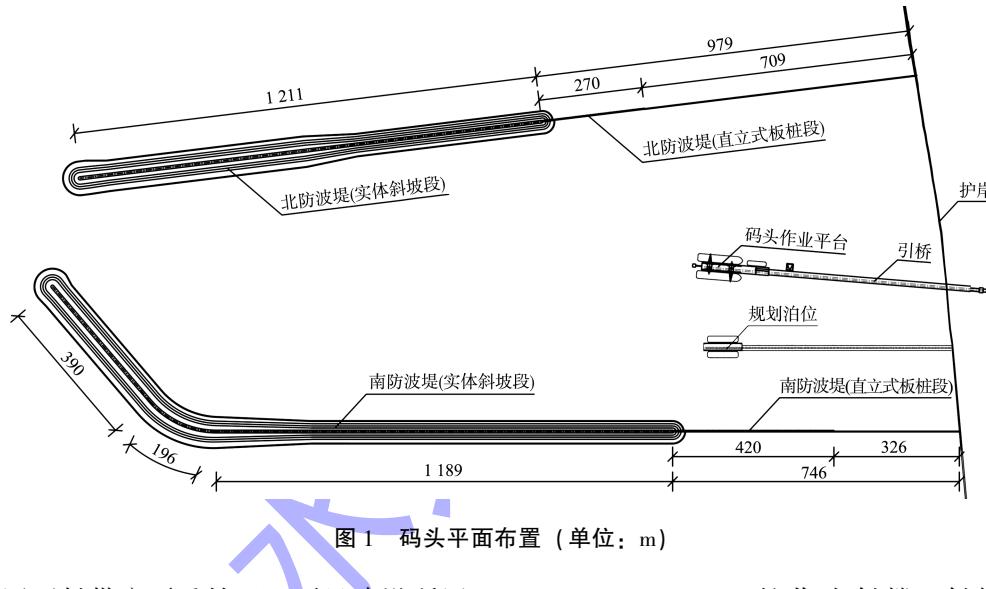


图 1 码头平面布置 (单位: m)

孟加拉国石料供应严重缺乏, 项目建设所用石料需从周边国家进口, 石料单价昂贵。因码头作业及挡沙要求, 防波堤采用环抱式布置形式, 防波堤头部位于破波带附近。项目所在区域海底地形平缓, 南、北防波堤分别长 2 521、2 190 m, 地质以黏土为主, 承载能力较差。综合考虑自然条件、工程投资、施工便利等多种因素, 深水区域采用实体斜坡式防波堤结构, 近岸浅水区域采用直立式板桩防波堤结构。

以南防波堤(直立式板桩段)为例, 根据海底高程不同又分为两部分: 第 1 部分为带斜撑的板桩防波堤, 海底高程为 2.00~3.00 m, 防波堤主体结构采用 U-CS1200 混凝土板桩, 港池侧设置

$\phi 1 000$ mm PHC 柱作为斜撑, 斜撑间距 4 m; 第 2 部分为单板桩防波堤, 海底高程为 3.00 m 至陆域护岸, 防波堤主体结构采用 U-CS1200 混凝土板桩, 不设斜撑。板桩防波堤泥面位置采用 300~500 kg 块石护底, 护底块石下方设有土工布及土工格栅。工程位于潮差大的孟加拉湾, 若根据常规设计要求确定防波堤顶高程, 则项目总投资较高。根据实际功能需要, 考虑在极端高水位情况下无需对码头进行掩护, 满足挡沙要求即可, 根据泥沙物理模型试验^[4], 板桩防波堤顶高程确定为 7.0 m。

南防波堤带斜撑的板桩防波堤是该区域波浪荷载作用最大点所在位置, 带斜撑的板桩防波堤典型断面见图 2。

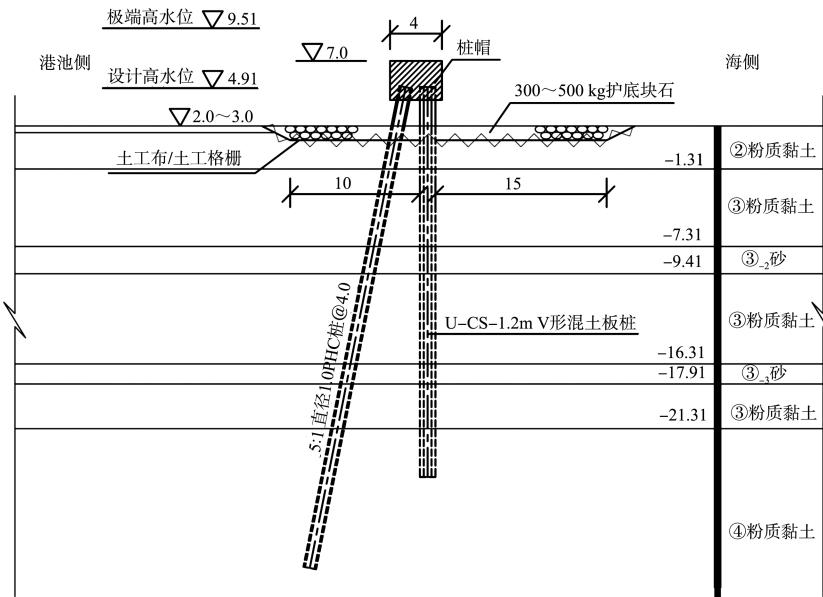


图 2 带斜撑的板桩防波堤典型断面 (单位: m)

2 自然条件

工程位于孟加拉湾，直面印度洋，防波堤掩护范围海底高程-5~5 m(海图基准CD面起算)。交通运输部天津水运工程科学研究所于2017年8月—12月对本工程所在海域开展了外海波浪观测，其最大波高9.08 m、周期14.52 s、波长159 m。根据波浪数学模型报告成果^[5]，板桩防波堤所在位置设计波要素见表1。

表 1 100 a 一遇设计波要素

水位/m	$H_{1\%}/m$	$H_{4\%}/m$	$H_{13\%}/m$	H_m/m	T_m/s	L_m/m
极端高水位 9.51	(5.20)	(5.20)	(5.20)	5.00	14.52	122.72
设计高水位 4.91	(1.82)	(1.82)	(1.82)	1.41	14.52	72.72

注: ()表示波浪破碎, H_m 为平均波高, T_m 为平均波周期, L_m 为平均波长。

3 板桩防波堤前波浪力分析

3.1 理论公式计算

该项目执行欧洲或美国标准, 板桩防波堤前波浪力采用 Goda 公式进行计算。Goda 公式是针对不规则波浪基于小尺度物理模型试验得到的直立式墙前波浪力计算公式, 其具体计算规定如下^[6]:

$$\eta^* = 0.75(1+\cos\beta)\lambda_1 H_{\text{design}} \quad (1)$$

$$p_1 = 0.5(1+\cos\beta)(\lambda_1\alpha_1 + \lambda_2\alpha_2\cos^2\beta)\rho_w g H_{\text{design}} \quad (2)$$

$$p_2 = \begin{cases} (1 - \frac{h_c}{\eta^*}) p_1 & (\eta^* > h_c) \\ 0 & (\eta^* \leq h_c) \end{cases} \quad (3)$$

$$p_3 = \alpha_3 p_1 \quad (4)$$

式中: η^* 为波压力最高点到静水面的高度 (m); β 为波浪入射角度 ($^\circ$); H_{design} 为设计波高, 一般取 1.8 倍有效波高, 对于破碎波, 取 5 倍有效波高长度外测点的波高值 (m); ρ_w 为水的密度 (kg/m^3); g 为重力加速度 (m/s^2); p_1 为静水面位置波浪压强 (kPa); p_2 为直立式结构顶面波浪压强 (kPa); p_3 为直立式结构底面波浪压强 (kPa); λ_1 、 λ_2 为结构类型调整系数, 对于直立式结构取 1.0; α_1 、 α_2 、 α_3 根据以下公式计算:

$$\alpha_1 = 0.6 + 0.5 \left[\frac{4\pi h_s/L}{\sinh(4\pi h_s/L)} \right]^2 \quad (5)$$

$$\alpha_2 = \min \left[\frac{h_b - d}{3h_b} \left(\frac{H_{\text{design}}}{d} \right)^2, \frac{2d}{H_{\text{design}}} \right] \quad (6)$$

$$\alpha_3 = 1 - \frac{h_w - h_c}{h_s} \left[1 - \frac{1}{\cosh(2\pi h_s/L)} \right] \quad (7)$$

式中: h_s 为静水面到泥面线的高度 (m); L 为 5 倍有效波高长度外测点的波长 (m); d 为静水面到基床顶面的高度 (m); h_b 为 5 倍有效波高长度外静

水面到泥面线的高度 (m); h_c 为静水面到结构顶面的高度 (m); h_w 为结构顶面的高度 (m)。

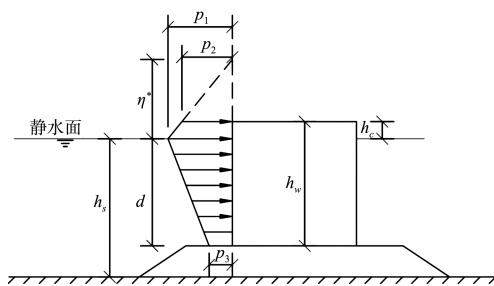


图 3 Goda 公式直立式墙前波浪力计算

根据上述理论公式, 该码头板桩防波堤前波浪力计算结果见图 4。

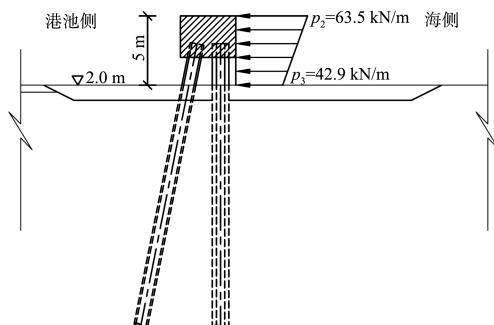


图 4 板桩防波堤前波浪力计算结果

2.2 物理模型试验

物理模型试验中通过在板桩防波堤迎浪面安装压力传感器测量板桩防波堤前的波浪压强, 采用不规则波, 波浪力结果为多组次试验的平均值^[7]。板桩防波堤前实测波浪力分布见图 5。

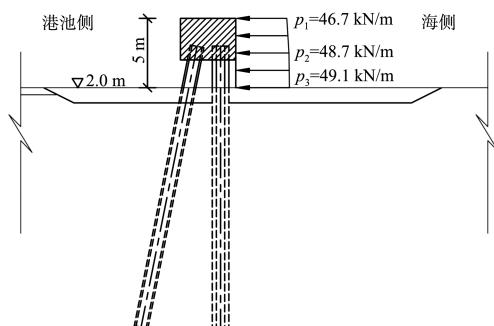


图 5 物理模型试验板桩防波堤前波浪力分布

根据理论公式计算, 板桩防波堤前的波浪力为 266 kN/m; 根据物理模型试验实测值, 板桩防

波堤前的波浪力为 240 kN/m。理论公式较物理模型试验结果约大 10%, 基于保守考虑, 采用理论公式计算所得波浪力进行分析。

4 板桩防波堤结构内力计算

采用 PLAXIS 岩土工程有限元分析软件进行板桩防波堤结构内力计算。结构计算模型中海底高程为 2.00 m, 前墙采用 U-CS1200 型混凝土板桩, 港池内侧采用 $\phi 1000$ mm PHC 桩作为斜撑, 斜撑间距 4 m。前墙混凝土板桩和支撑 PHC 桩采用梁单元模拟, 土体采用 15 节点三角形单元模拟。土体本构模型采用 HS 模型(土体硬化模型), 土体硬化模型是一种较为先进的土体本构模型, 考虑了土体刚度随应力水平的增加而增加的特性, 与土体非线性的特性较为符合^[8]。

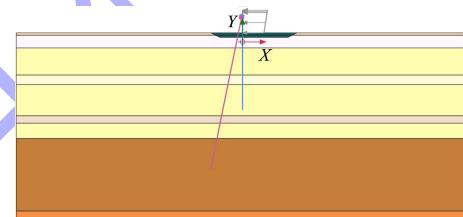


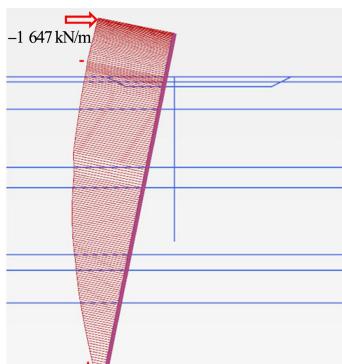
图 6 PLAXIS 计算模型

计算中采用的土体参数见表 2, 土体参数均来自本项目的地质勘察报告。

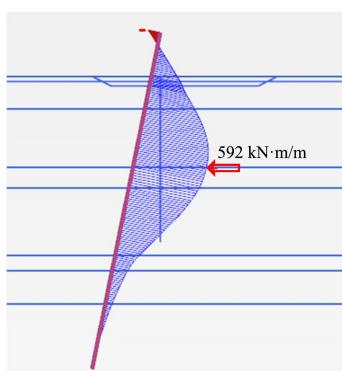
表 2 PLAXIS 有限元分析土体参数

土层编号	土层名称	土体本构模型	天然密度/ $(t \cdot m^{-3})$	弹性模量 E/MPa	黏聚力 c/kPa	摩擦角 $\varphi/(^\circ)$
①	黏土	HS	1.65	15.000	5	8
②	黏土	HS	1.76	3.120	8	16
③	黏土	HS	1.82	4.683	9	26
③ ₋₁	砂	HS	1.76	11.000	3	25
④	黏土	HS	1.83	5.950	11	19
④ ₋₁	砂	HS	1.98	28.000	4	33
⑤	黏土	HS	2.01	7.340	24	22
⑤ ₋₁	砂	HS	1.96	18.000	3	29
-	块石	MC	1.70	100.000	0	45

PHC 桩和混凝土板桩的内力、板桩防波堤的最大位移计算结果见图 7~9。

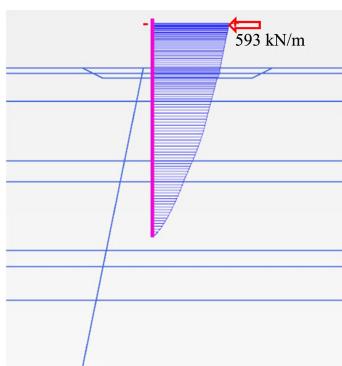


a) 最大压力

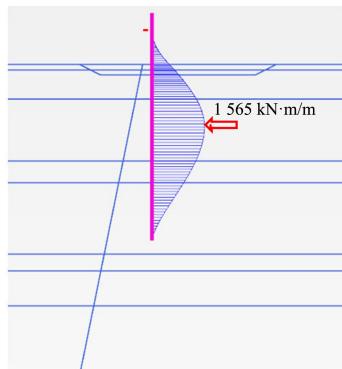


b) 最大弯矩

图 7 PHC 桩内力计算结果



a) 最大拉力



b) 最大弯矩

图 8 混凝土板桩内力计算结果

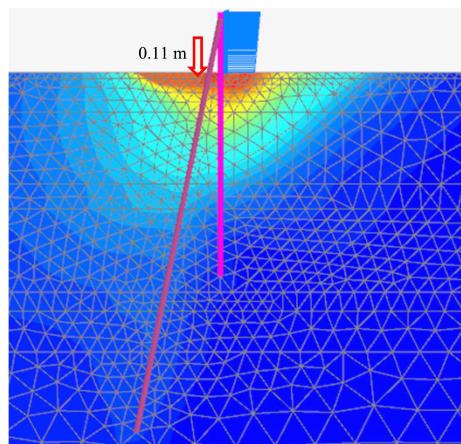


图 9 板桩防波堤最大位移

根据上述计算结果，可以选择相关厂家产品手册中直径 1.0 m PHC 桩作为斜撑、选择 U-CS-1.2 m V 型混凝土板桩作为防波堤前墙结构。

5 结语

1) 板桩防波堤主要承受的外部荷载为波浪力，根据 Goda 公式计算所得的板桩墙前波浪力与物理模型试验结果相比偏大。建议项目施工图设计中，依据理论公式计算得到的板桩墙前波浪力通过物理模型试验进一步验证，保证结构安全可靠。

2) 根据 PLAXIS 软件进行板桩防波堤结构内力及位移分析结果表明：板桩防波堤各构件内力较小，可采用相应型号的预制构件作为板桩防波堤主体结构；板桩防波堤整体位移可控。因此，浅水区域采用板桩防波堤结构是合理可行的。

3) 相对于传统的实体斜坡式防波堤，板桩防波堤具有施工方便、投资节省等优势。但板桩防波堤承受波浪等外部荷载能力有限，实际工程中应用较少。目前仅在印度尼西亚万丹码头、毛里塔尼亚友谊港、英国普尔港等工程中应用。板桩防波堤结构在浪、流往复作用下的耐久性和抗疲劳性还须通过实际工程项目进一步验证，并积累工程经验。该结构在浅海区域，尤其是在石料缺乏地区仍不失为一种具有很强竞争力的结构形式。

(下转第 80 页)