



导桩式混凝土浮式防波堤 在非洲某码头工程中的应用

路卫卫, 张军, 宋兰芳, 覃杰, 陈良志

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510290)

摘要: 目前在国内极少见到混凝土浮式防波堤工程实际应用案例。介绍非洲某码头工程中导桩式混凝土浮式防波堤的方案比选及关键技术参数选取过程, 对比导桩式浮式防波堤与传统斜坡堤、锚链式浮式防波堤的特点, 并采用经验公式法计算导桩式混凝土浮式防波堤的波浪透射系数, 并比较不同研究者的波浪透射试验结果及厂家提供的产品消波性能指标。结果表明, 在风浪波高和周期较小的情况下, 导桩式混凝土浮式防波堤有较好的消浪效果, 并能提供靠船功能且具有后期易拆除、移位的特点; 对于波浪透射系数, Macagno 公式计算结果相对准确, 可在初期的方案设计阶段使用。

关键词: 浮式防波堤; 混凝土浮箱; 导桩; 透射系数

中图分类号: U 656.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)05-0061-05

Application of pile guided concrete floating breakwater to port project in Africa

LU Wei-wei, ZHANG Jun, SONG Lan-fang, QIN Jie, CHEN Liang-zhi

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510290, China)

Abstract: At present, the engineering application of concrete floating breakwaters is rare in China. Thus, we introduce the application of a pile guided concrete floating breakwater to a port project in Africa, including scheme selection and the settings of key parameters. We compare the pile guided concrete floating breakwater, conventional mound breakwater, and chain anchored concrete floating breakwater. In addition, we calculate the wave transmission coefficient of the pile guided concrete floating breakwater with an empirical formula and then compare it with the results from physical model tests conducted by others and the performance index of wave attenuation provided by the manufacturer. The results show that under the condition of a small wind wave height and a short period, the pile guided concrete floating breakwater performs well in wave attenuation, can function for boat berthing, and has the characteristic of easy demolition and position changing. The wave transmission coefficient calculated by the Macagno formula is relatively accurate, which can be used in the preliminary design phase.

Keywords: floating breakwater; concrete pontoon; pile guided; transmission coefficient

浮式防波堤一般包括浮箱式浮式防波堤、浮筏式防波堤和其他类型防波堤^[1]。浮式防波堤固定形式主要包括导桩式和锚链式两种。

关于浮式防波堤的研究, 一般侧重于透射系数和结构形式的研究。透射系数可采用理论推导、经验公式、数值模拟 3 种方法。其中数值模拟主

要采用 Fluent^[2]、Ansys AQWA^[3]、Flow 3D^[4] 等软件; 结构形式研究, 目前有单箱式、双箱、浮箱加垂板、柔性结构等形式。

国内关于浮式防波堤的研究比较多, 多数是从结构形式创新并进行模型试验研究, 或者通过模型试验验证理论计算, 基本停留在理论阶段,

国内很少见到将浮式防波堤成功应用于实际工程的情况^[5]。个别成功应用案例包括：港珠澳大桥工程通过锚链固定集装箱做临时浮式防波堤^[6]和用于养殖的浮筏式防波堤等；三峡船闸浮式导航堤采用混凝土浮箱结构^[7]，但不是作为防波堤使用。在国内更无成熟的、标准化的、规模生产的浮式防波堤成品。

本文通过非洲实际完工并成功应用的某浮式防波堤工程，介绍该浮式防波堤的平面布置、自然条件、方案比选、结构尺寸、消波性能、导桩及防波堤构造细节等，可为类似工程提供参考。

1 工程概况

非洲某集装箱码头位于波浪掩护良好的天然港湾内、回填陆域的西侧，需要建设游艇码头配套防波堤。防波堤采用长 150 m 斜坡堤与长 175 m 浮式防波堤相结合的方案，斜坡堤阻拦北侧从外海传入湾内的涌浪，浮式防波堤阻拦湾内西南侧风成浪。最终在浮式防波堤内侧（东侧）形成掩护区域，远期布设游艇码头。防波堤总体布置如图 1 所示。

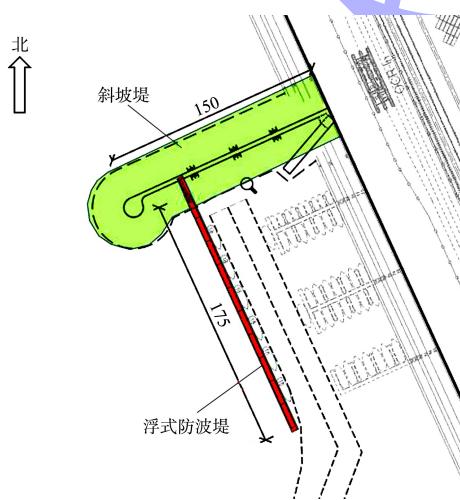


图 1 防波堤总体布置（单位：m）

斜坡堤堤头涌浪（有效波）：1、10、100 a 一遇波高分别为 0.64、0.77、0.88 m，北向，周期 15 s。采用波浪数学模型对工程区域 1997—2013 年后报波浪时间序列推算分析，堤头涌浪有效波 96% 的时间不大于 0.4 m，堤头绕射至游艇停泊区域残余波高

大都小于 0.1 m。涌浪波高云图见图 2a）。

浮式防波堤风浪（有效波）：1、10、100 a 一遇波高分别为 0.45、0.57、0.82 m，西南向，周期 2~3 s。采用波浪数学模型对工程区域 1997—2013 年的风浪进行后报获得波浪时间序列，并进一步分析，得到风浪年最大波高一般不超过 0.6 m，97% 时间不大于 0.3 m。风浪波高云图见图 2b）。

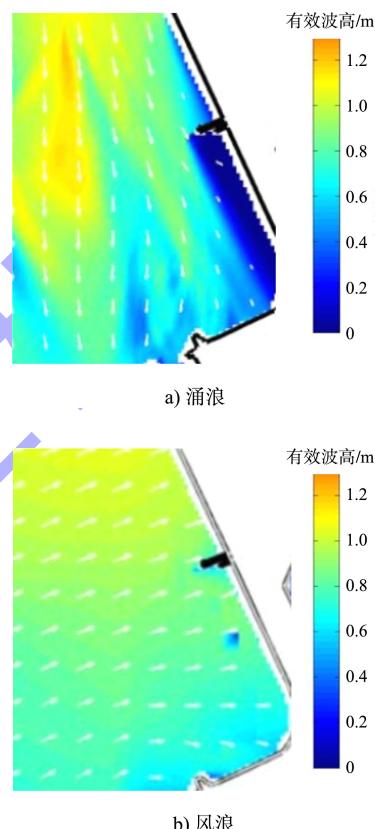


图 2 有效波高云图

2 防波堤方案比选

2.1 北侧防波堤结构形式

北侧防波堤需要掩护涌浪，所以需要采取斜坡式实体防波堤（浮式防波堤对涌浪几乎没有掩护作用），长 150 m 实体防波堤基本掩护住了涌浪。北侧防波堤设置后，仍有西侧风浪，其风浪超出了游艇码头系泊条件（横浪有效波高 $H_s < 0.3$ m，顺浪 $H_s < 0.7$ m， $H_{1\%}$ 按 1.5 倍 H_s 考虑）^[8]。因此，须建设应对西南向风浪的防波堤对游艇码头区域进行掩护。

2.2 西侧防波堤结构形式

斜坡式防波堤与浮式防波堤的特点比较：

1)对于波高相对较小的风浪, 浮式防波堤比实体堤造价低; 2)浮式防波堤顶部可以兼作通道, 且内侧可以兼靠游艇; 3)游艇码头扩建时, 浮式防波堤后期拆除和移位更加方便。

锚链式浮式防波堤与导桩式浮式防波堤的特点比较: 1)工程位置水深较浅, 潮位变化相对于与水深比值较大, 不同水位时锚链对浮箱稳定性存在较大差异; 2)考虑内侧兼靠游艇船舶, 导桩式浮式防波堤稳定性更好, 且游艇停靠泊区域不受锚链影响。

混凝土浮式防波堤与浮式浮箱比较, 混凝土防波堤更宽、更长、吃水更深, 特点为: 1)稳定。混凝土浮箱采用整体式结构, 单个浮箱宽 2~10 m、长 15~20 m、高 1.0~1.8 m, 稳定性能好, 能承受 6 kN/m² 均载以及船舶荷载。2)消波。由于具有较大的宽度、吃水、体积, 所以消浪性能较好。

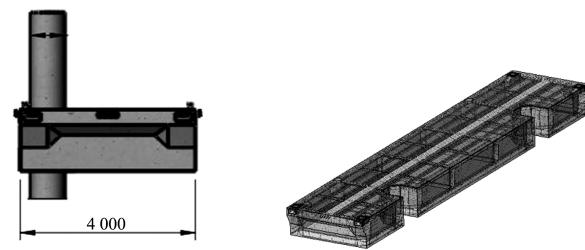
3)坚固。采用钢筋混凝土结构。

经综合考虑, 导桩式混凝土浮式防波堤更适合于本工程。对于西侧浮式防波堤的布置, 为减少北堤堤头局部绕射波浪影响, 浮式防波堤位置比北堤堤头向东缩进 40 m 左右。

3 浮式防波堤结构

混凝土浮式防波堤的浮箱顶部、侧壁、仓隔采用 C50 混凝土, 仓隔内填充聚苯乙烯泡沫。

单个浮箱宽 4 m、长 20 m、高 1.4 m, 浮箱吃水 0.8 m。单个浮箱采用 2 根导桩在侧面固定, 浮箱结构见图 3。



a) 导桩固定后的浮箱断面(单位:mm) b) 浮箱整体

图 3 单个浮箱结构

4 透射系数计算

采用 Macagno、Wiegel、Ruol 公式^[9]对导桩式箱式混凝土浮箱透射系数 C_t 进行计算。

Macagno 公式:

$$C_t = \frac{1}{\sqrt{1 + \left[\frac{k_i B \sinh(k_i d)}{2 \cosh(k_i d - k_i D)} \right]^2}} \quad (1)$$

Wiegel 公式:

$$C_t = \frac{\sqrt{2k_i(d-D) + \sinh[2k_i(d-D)]}}{\sinh(2k_i d) + 2k_i d} \quad (2)$$

Ruol 公式:

$$\begin{cases} C_t = \beta(\chi) C_{t, \text{Macagno}} \\ \beta(\chi) = \frac{1}{1 + \left(\frac{\chi - \chi_0}{\chi_0} \right) \exp \left[- \left(\frac{\chi - \chi_0}{\sigma} \right) \right]} \\ \chi = \frac{T_p}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{D + 0.35B}} \end{cases} \quad (3)$$

式中: C_t 为波浪透射系数; B 为结构宽度; D 为结构吃水; d 为水深; L 为波长; T_p 为波浪谱峰周期; k_i 为入射波波数; $\beta(\chi)$ 为修正系数; χ 、 χ_0 为无量纲系数; σ 为无量纲系数, 取 0.192; $C_{t, \text{Macagno}}$ 为 Macagno 公式计算的透射系数。

波浪透射系数计算结果见表 1。

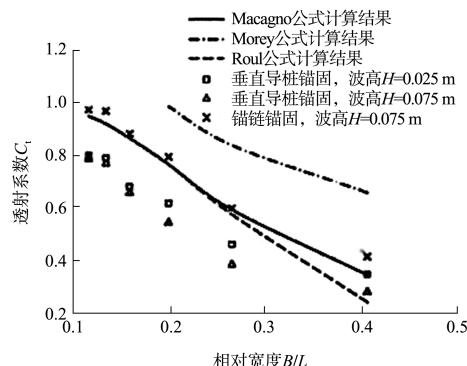
表 1 各公式计算得到的浮式防波堤透射系数

H_s/m	L/m	B/L	B/d	D/d	浮式防波堤透射系数		
					Macagno 公式 计算结果	Wiegel 公式 计算结果	Ruol 公式 计算结果
0.45	6.24	0.64	0.80	0.16	0.22	0.45	0.21
0.57	7.90	0.51	0.80	0.16	0.32	0.54	0.29
0.82	11.20	0.36	0.80	0.16	0.50	0.66	0.47

可以看出, Macagno 公式计算的波浪透射系数与 Ruol 公式接近, 为 0.2~0.5, Wiegel 公式计算透射系数为 0.45~0.66。

国内有多位专家学者进行了导桩式浮式防波堤透射系数物理模型试验, 试验结果都证明实际透射系数小于 Macagno 公式的计算结果。例如, 根据

刘韬等^[10]的试验数据可知，在 B/L 为 0.36、有效波高为 0.5 m 时，波浪透射系数为 0.35，见图 4a)；根据董华洋等^[11]试验数据可知，在 B/L 为 0.3、有效波高为 2 m 时，波浪透射系数为 0.4，见图 4b)。



a) 刘韬(模型比尺1:20)

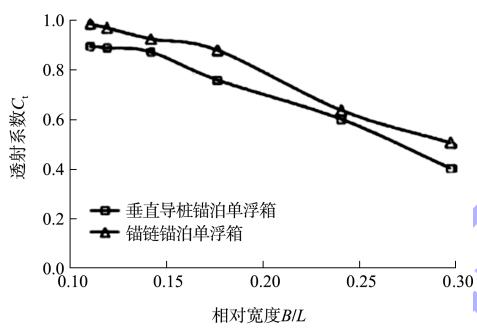


图 4 其他研究者的试验数据

另外，根据 Inter Boat Marinas 厂家提供的产品数据，宽 3.8 m 的混凝土浮箱，在有效波高为 0.8 m、 B/L 为 0.36 时，消浪系数为 0.62，即透射系数 0.38，见图 5，小于前述公式的计算结果。

根据公式的计算结果、其他研究者的试验数据、部分厂家提供的产品性能数据综合可知，采用 Macagno 公式计算垂直导桩式浮式防波堤的透射系数基本合理，但相对较保守。在 B/L 为 0.36 时，Macagno 公式计算的透射系数为 0.5，实际可取 0.4。

综上所述，本工程采用宽 4 m 的浮式防波堤，堤后 100 a 一遇极端风浪的有效波高在 0.3 m 以下，平时堤后大部分时间风浪有效波高不大于 0.1 m。

最终采用 Lindley 公司的 QMF4000 型浮式防波堤，单个浮箱尺寸为宽 4 m、长 20 m、高 1.2 m，浮箱吃水 0.8 m。

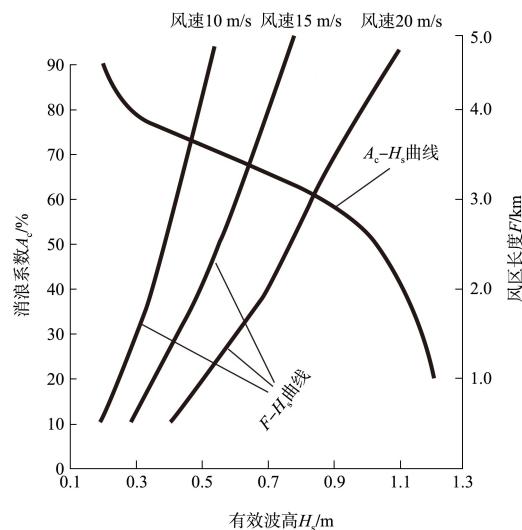


图 5 厂家提供的浮箱产品消浪系数

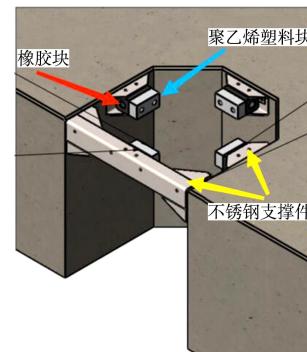
5 导桩选取及浮箱细部构造

5.1 导桩选取

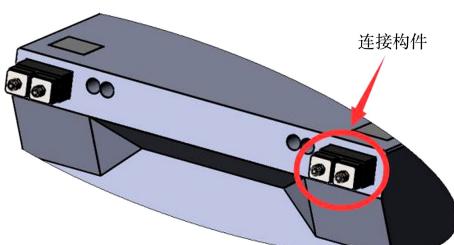
结合当地地质条件，导桩采用灌注桩。导桩的计算主要考虑浮箱在波浪作用下的挤靠力、船舶的系缆力、水流力的共同作用。经计算，单个浮箱需要 2 根直径 0.8 m 的灌注桩，使用 2 根桩比单桩更稳定，并能减少浮箱之间连接构件的受力。

5.2 浮箱细部构造

导桩施工完成后，带凹槽的浮箱漂浮下推靠近桩基，使桩基进入固定结构内，最后完成最外侧钢结构固定构件对凹槽的封闭。抱桩导向装置由橡胶块和聚乙烯塑料块构成，塑料块与桩接触。抱箍结构见图 6a)。为保证浮箱不出现上下错动和构成整体受力，浮箱之间通过螺栓进行连接。浮箱接口位置预埋钢构件，2 个浮箱预埋钢构件之间用螺栓连接，螺栓之间采用橡胶块。浮箱连接构件见图 6b)、c)。



a) 导桩抱箍结构



b) 浮箱间的连接构件

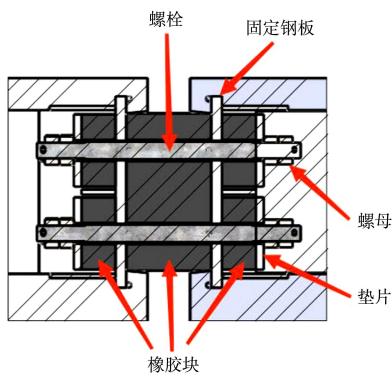
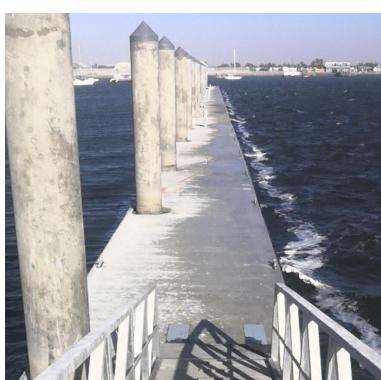


图 6 浮箱细部构造

目前, 本工程已竣工运营 2 a, 浮式防波堤消浪效果良好, 见图 7。



a) 浮箱完工后



b) 浮箱消浪效果

图 7 工程使用效果

6 结论

1) 在风浪的波高和周期较小时, 导桩式混凝土浮式防波堤具有较好的应用效果, 除具有消浪作用外, 还具有顶部通行、内侧靠泊游艇等功能, 且后期防波堤拆除和移位时较方便。

2) 对于导桩式浮式防波堤的透射系数, Macagno 公式计算结果比较合理且计算简单, 可以应用于初期的方案设计阶段。后续将对其开展进一步的物理模型试验论证。

参考文献:

- [1] 沈雨生, 周益人, 潘军宁, 等. 浮式防波堤研究进展[J]. 水利水运工程学报, 2016(5): 124-132.
- [2] 辛颖. Fluent UDF 方法在数值波浪水槽中的应用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- [3] 张伟, 程勇, 马哲, 等. 浮式方箱防波堤的 AQWA 数值模拟研究[J]. 港工技术, 2011, 48(3): 4-6.
- [4] 陈兆虎, 金磊, 徐涎笠. 基于 Flow3D 的桩基双侧挡板式透空堤受力特性[J]. 中国港湾建设, 2018, 38(12): 25-30.
- [5] 朱英妮, 陈汉宝. 浮式防波堤研究进展[J]. 水运工程, 2021(3): 64-69.
- [6] 李聪, 费晓璐. 浮式防波堤在实际工程中的应用[J]. 中国水运(下半月), 2017, 17(10): 164-165, 177.
- [7] 宋志忠, 王程. 三峡船闸浮式导航堤设计[J]. 湖北水力发电, 2007, 72(5): 47-50.
- [8] 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 重庆市交通规划勘察设计院. 游艇码头设计规范: JTS 165-7—2014[S]. 北京: 人民交通出版社, 2014.
- [9] BIESHEUVEL A C. Effectiveness of floating breakwaters wave attenuating floating structures[D]. Delft: Delft University of Technology, 2013.
- [10] 刘韬, 沈雨生. 垂直导桩锚固单浮箱式浮式防波堤消浪性能及受力研究[J]. 水运工程, 2018(3): 7-13.
- [11] 董华洋, 王永学, 陈燕珍. 不同锚泊方式的浮式防波堤消浪性能试验研究[C]//中国海洋学会海洋工程分会. 第十八届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(下). 北京: 海洋出版社, 2017: 264-268.