



水运工程装配桩基承台式护岸结构设计

陈明阳, 顾宽海

(中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

摘要: 针对装配桩基承台式护岸结构在水运工程中运用刚刚起步、缺乏设计方法等现状问题, 对其结构选型、构件拆分、节点连接、桩基础、计算方法等方面进行系统的总结介绍, 通过对比分析与常规现浇混凝土护岸结构的相似与不同点, 阐明了装配式桩基的适用条件、结构分析方法、结构设计重点, 以方便工程技术人员更好地理解其设计理念和方法。

关键词: 装配式护岸; 桩基; 承台; 构件拆分; 连接设计

中图分类号: U 656.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)05-0087-07

Design of prefabricated pile foundations revetment structure for water transport engineering

CHEN Mingyang, GU Kuanhai

(CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: In view of the current problems such as the initial application of prefabricated pile foundations type revetment structure in the water transport engineering and the lack of design methods, this paper comprehensively and systematically summarizes and introduces the structure from the aspects of structure selection, component splitting, connection design, pile foundation, calculation method, etc., expounds the applicable conditions, structural analysis methods and structural design key points of the prefabricated pile foundation by comparing with the cast-in-place concrete revetment structure, so as to facilitate engineers to better understand its design concepts and methods.

Keywords: prefabricated revetment; pile foundation; pile cap; component splitting; connection design

随着我国绿色环保理念的加深及转型发展的内在需求不断加强, 装配式结构在建筑业取得大力发展, 而水运工程装配式护岸结构由于其自身特点起步较晚, 近些年在一些工程中有所尝试。为适应新的发展需要, 以及更好地指导水运工程装配式护岸设计施工, 中交第三航务工程勘察设计院有限公司在全面系统地总结相关工程经验的基础上主编了上海市地方标准《水运工程装配式护岸结构技术标准》, 并将装配式护岸分为装配重力式、装配桩基承台式、装配板桩式护岸 3 大类。在设计中, 装配式护岸结构尤其是装配桩基承台式护岸并不是对常规现浇混凝土结构简单的延伸, 而是有其特定的设计理论。文中从装配桩基承台式护岸的结构选型、

构件拆分、节点连接、桩基础、计算方法等方面, 结合上海市地方标准进行全面系统地介绍。

1 装配桩基承台式护岸的特点

与常规的现浇桩基承台护岸结构相比, 装配式结构具有以下特点: 1) 质量可靠、施工效率高。装配式护岸结构可进行标准化设计, 工厂内模块化、标准化生产, 不仅质量有保证, 而且可现场机械化施工, 施工效率高。2) 节能、绿色环保。由于大部分构件均为预制件, 仅少量连接部位的节点为现浇结构, 降低了人工和设备的使用, 减少了噪声污染、污水污染、粉尘污染及现场建筑垃圾污染等等, 更加环保、节能、绿色。3) 设

收稿日期: 2022-11-15

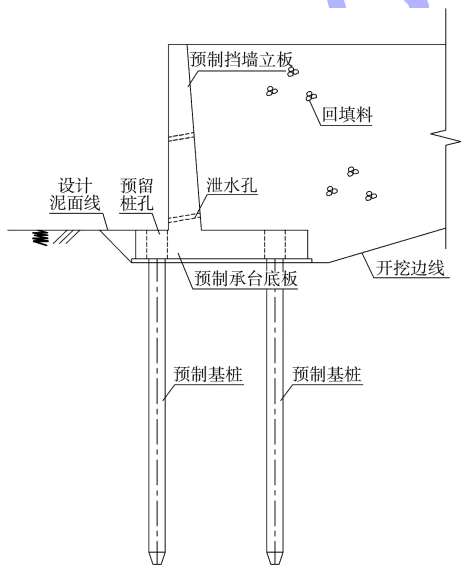
作者简介: 陈明阳 (1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事水工结构设计。

计、施工协同性高。装配式结构设计时既要充分考虑运输及安装等施工限制条件，又要提前做好运输路线、运输道路、航道的规划，选择合理可行的施工方案，需要设计与施工高度协调统一。

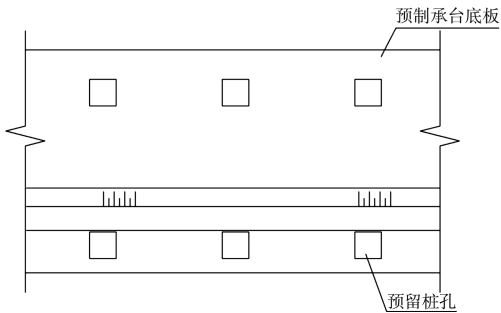
4) 投资低、易控制。装配式护岸一般需要在工厂预制，相比于现浇结构，会产生模板、制作场地等额外费用，而当预制规模达到一定程度后，模板等费用充分摊销，成本降低。经测算，当预制装配护岸长度超过 3 km 后，预制拼装成本大大降低，造价优势突显。另外，由于装配式护岸结构是工厂化预制、机械化施工，总体受外界干扰小，施工效率高，工期短，成本控制影响因素少，成本控制难度相对较小。

2 装配桩基承台式护岸选型

装配式护岸分为装配重力式、装配桩基承台式、装配板桩式护岸。其中装配重力式结构应用较为常见，当遇到承载能力较低的软土地基时需进行地基处理。采用不同的地基处理方式，其结构形式会有所变化。当采用水泥搅拌桩、旋喷桩等进行地基处理时，仍可采用重力式结构形式。当采用桩基方案时，往往要求桩基与上部结构底板整体连接，由此演变成了软土地基常用的低桩承台结构，典型的结构形式见图 1。



a) 护岸结构断面

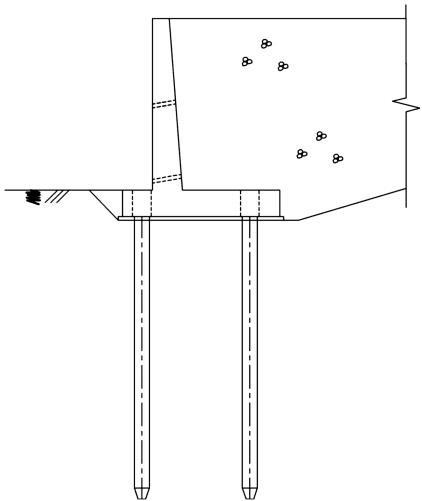


b) 承台平面

图 1 装配桩基承台式护岸典型结构

装配桩基承台式护岸由预制基桩、承台板等上部结构组成，它们通过节点连接形成整体结构。上部结构为护岸的挡土结构，可采用预制 L 形挡墙、预制扶壁、预制生态砌块、预制箱体等结构形式。基桩可采用钢筋混凝土方桩、预应力混凝土方桩、预应力混凝土管桩等桩型。

装配桩基承台式护岸结构形式一般根据自然条件、材料来源、使用要求和施工条件等因素，经技术经济比较确定。装配桩基承台式护岸结构总高宜为 3~7 m，各种结构形式通常的适用条件为：1) 挡土高度较小的上部结构可采用装配预制 L 形挡墙，见图 2a)；2) 挡土高度 6 m 以上的上部结构可采用装配预制扶壁式挡墙，见图 2b)；3) 挡土高度小、对生态要求高的上部结构可采用预制生态砌块、预制箱体结构，见图 2c)、2d)。



a) 预制 L 形

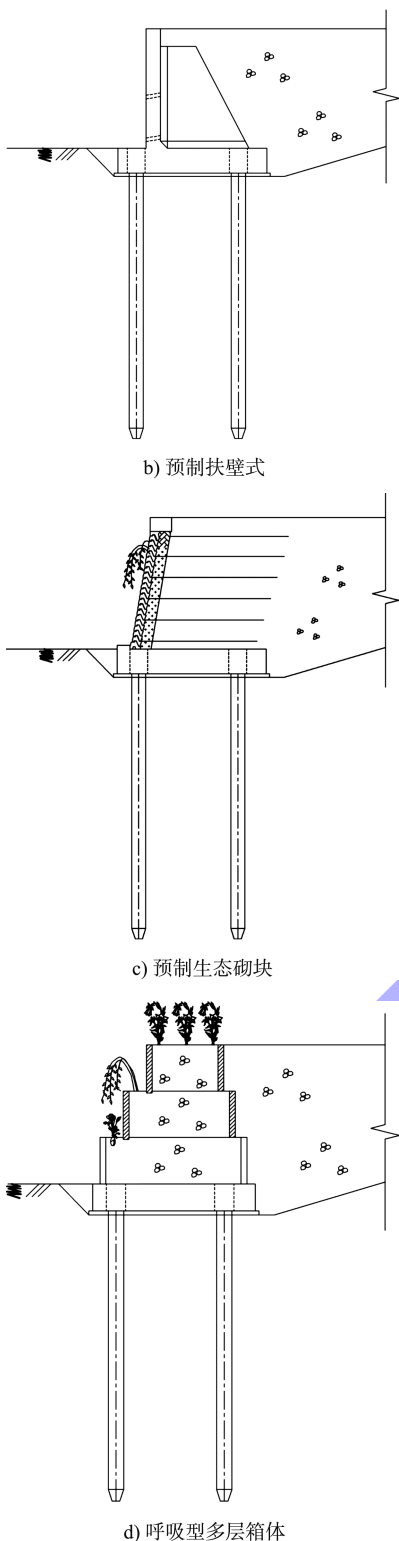


图 2 装配桩基承台式护岸常用结构形式

3 结构计算

装配式护岸结构的安全等级和设计方法可参考相关标准规范，其中安全等级参照 JTS 154-1—2011《防波堤与护岸设计规范》^[1]的有关规定，根据其失效后果严重程度进行确定。失效后果很严

重、有特殊安全要求的结构安全等级取一级，一般结构取二级，临时结构取三级。关于装配式护岸结构的设计使用年限，考虑与现浇混凝土结构等效的原则，取 50 a。装配式护岸结构设计以概率理论为基础，采用分项系数表达的极限状态设计方法。

装配桩基承台式护岸计算内容包括验算桩基承载力、整体稳定性、构件内力及强度、构件的裂缝宽度、结构变形等。装配桩基承台式护岸结构计算模型和计算方法的选取要符合结构的实际受力状况。桩的轴向刚性系数计算方法可按照现行行业标准 JTS 167—2018《码头结构设计规范》^[12]的有关规定进行计算。桩土相互作用可按 m 法或假想嵌固点法考虑，其计算模式见图 3。

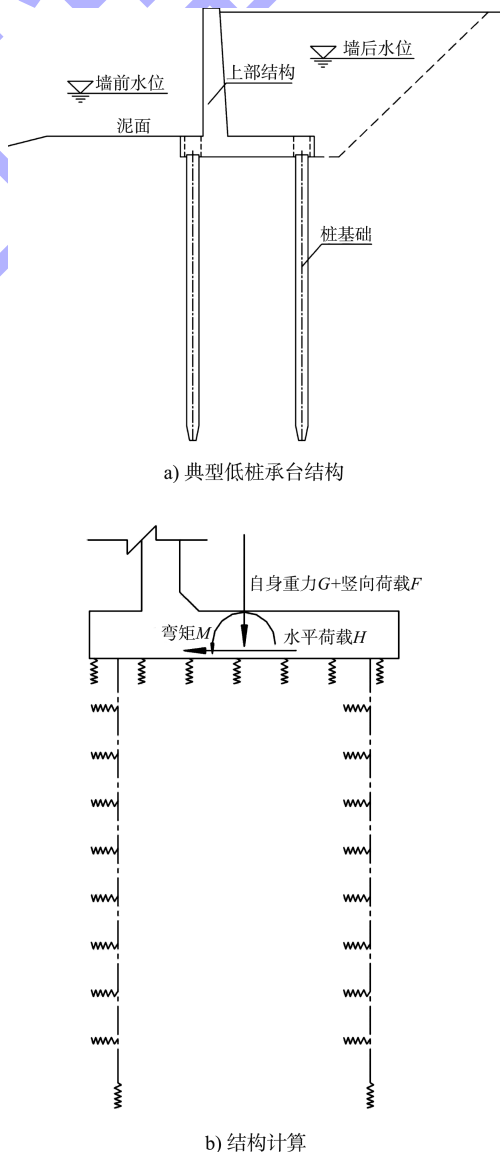


图 3 结构计算模式

桩基计算方法、控制要求如下：1) 通常情况宜按所有竖向荷载由桩基承担的全桩基模式计算，竖向和水平受力计算可按照 JTS 167—2018《码头结构设计规范》的有关规定执行。2) 有经验时亦可采用复合桩基础^[3]进行设计，竖向和水平受力计算可按照上海市标准 DGJ 08-11—2010《地基基础设计规范》^[4]的有关规定执行。3) 桩基泥面处水平位移不宜大于 10 mm，且应同时满足周边环境变形控制要求。

4 结构设计

4.1 拆分与构件设计

装配桩基承台式护岸结构的拆分是构件预制的首要步骤，其预制构件包括基桩和上部结构。上部结构的拆分与装配重力式结构具有一定的相似性，拆分时应尽量减少构件种类，例如在设计时，护岸前沿线宜规则、简洁，尽量顺直布置；需转弯时，转弯半径宜统一以减少异形构件的类型；预制构件宜符合模数协调原则。

拆分设计还需满足制作、储存、运输、施工吊装、安装和质量控制等要求。水运吊装可采用固定杆浮吊，质量控制在 30 t 以下，采用全旋转浮吊质量需控制在 7 t 以下。考虑陆运吊装，一般宜控制构件质量在 15 t 以下，构件高度在 2.8 m、宽度 2.5 m 以内。

相比装配重力式护岸，装配桩基承台式结构拆分还有以下特点：1) 构件拆分宜在结构受力较小处。根据低桩承台结构的受力特点，应当保证承台板为一个整体。如图 4a) 所示，在断面内，承

台板不宜拆分为 2 个或多个构件。2) 上部预制构件长度要与桩基纵向间距相协调，并采取相关连接确保结构的整体性。如图 4b) 所示，在纵向上，每块承台板下至少有一排桩基础。

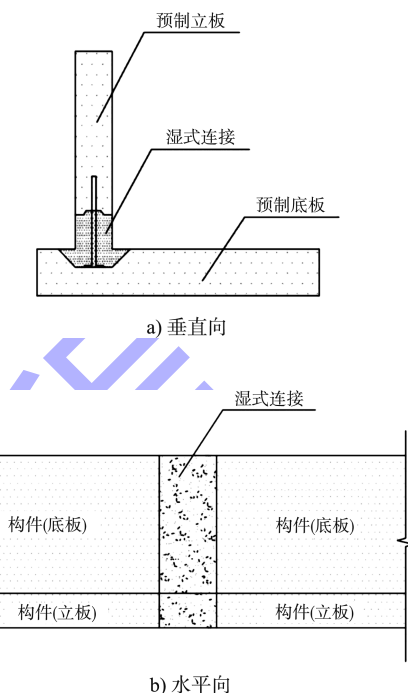


图 4 上部结构拆分

4.2 桩基设计

低桩承台的桩基础不仅要承受竖向力，还要承受水平力，是结构设计的重要内容之一。采用预制桩不仅施工速度快，还能减少现浇工作量、提高装配率、减少围堰等临时措施。因此，装配桩基承台式结构通常推荐采用预制混凝土桩，表 1 为推荐的预制混凝土桩截面形式及选型，需在技术经济分析后综合确定。

表 1 预制混凝土桩截面形式及选型

桩型	混凝土强度等级	制作工艺	截面形式/mm	适用墙高/m	单节桩长/m	是否可接桩
钢筋混凝土方桩	C40	浇注法	截面边长 300~500	3~5	≤18	是
			截面边长 400~600	5~6	≤18	是
预应力混凝土实心方桩	C60	浇注法	截面边长 300~400	3~4	≤15	是
			截面边长 400~600	4~6	≤20	是
预应力混凝土空心方桩	C50	浇注法	截面边长 300~800, 内径 150~560	3~7	≤30	是
预应力混凝土管桩	C80	离心法	φ300~800, 壁厚 60~130	3~7	≤15	是

装配桩基承台式护岸桩基的选择及布置一般考虑下列因素:1)不同于现浇低桩承台结构通常采用小直径桩,装配桩基承台式护岸基桩桩径不宜小于300 mm,尽量采用较大直径桩以减少桩头处理数量,提高装配化施工效率。表1为桩基优先采用的桩型,具体工程若因地质条件、环境条件等因素不适宜采用预制混凝土桩型时,亦可选取钻孔灌注桩、钢管桩等其他桩型。2)各类桩的中心距离底板边缘不宜小于1倍桩径,且桩的外边缘距离承台边缘不宜小于200 mm。3)同一底板下的桩基,桩底宜位于同一土层,且桩底高程相差不宜太大。4)装配桩基承台式护岸前沿可能发生冲刷时,应考虑冲刷深度对结构的影响,必要时应采取抛石、沉排等保护措施进行护底和护坡。5)预制基桩应尽量减少接头数量,接头的强度应不低于桩身的强度,接头位置宜设在桩身计算弯矩较小处,相邻桩基接头位置应错开不小于1 m。

4.3 连接设计

连接设计是装配式结构的关键内容,应保证两种的有效性、可靠性,使护岸结构形成整体。装配桩基承台式护岸结构的连接分为构件接缝和节点连接,具体包括基桩与承台底板的连接、上部结构预制构件之间的连接等。

上部结构预制构件连接方式分为干式和湿式两种,可采用螺栓连接、凹凸榫槽连接、套筒灌浆连接、浆锚搭接、焊接连接及湿法现浇连接等方式^[5]。

为保证结构的安全有效性,基桩与承台底板的节点通常采用湿式连接,其方式有钢筋混凝土连接(图5)、预埋型钢连接(图6)^[6]等。

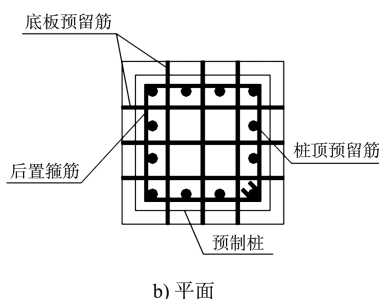
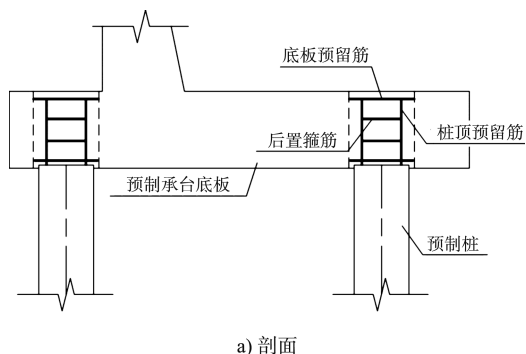


图5 钢筋混凝土连接接头

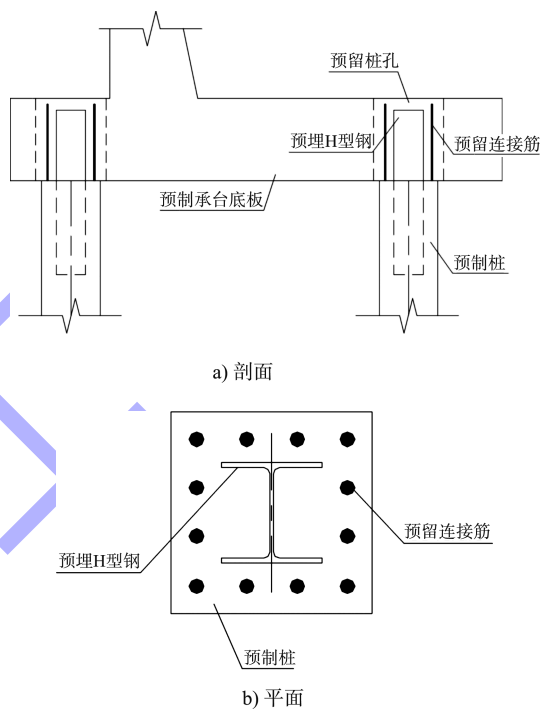


图6 预埋型钢连接接头

基桩与承台底板连接的受力分析应根据结构功能要求、受力状态等选取刚性连接或铰接的模式。当桩顶与底板的连接处抗弯要求较高时,连接处应按刚接设计;当桩与底板的连接处无抗弯要求或桩顶弯矩较小,连接处易满足抗弯要求时,连接处可按铰接设计。连接处为铰接设计时,应将桩顶伸入底板50~100 mm,桩的主筋伸入底板不宜小于400 mm;需要充分利用桩顶外伸钢筋强度时,外伸长度应满足钢筋锚固长度的规定。

为保证节点连接的可靠性,节点或接缝的混凝土材料也很关键,地方规范中对护岸混凝土材料作了相应的规定:“预制构件的混凝土强度等级不宜低于C35,且不应低于C30;预应力混凝土预制构件的混凝土强度等级不宜低于C40,且不应

低于 C30；现浇混凝土的强度等级不应低于 C30，且现浇节点或接缝处宜采用补偿收缩混凝土。”在设计时通常要求连接处的混凝土等级提高一级，连接处还要设置粗糙面和键槽。

预制构件的节点与接缝的承载力在新编规范中按式(1)(2)进行验算：

1) 持久状况、短暂状况、偶然状况按作用的基本组合计算：

$$\gamma_j \gamma_0 S_d \leq R_{j,d} \quad (1)$$

2) 地震状况按作用的地震组合计算，并按相关国家标准乘以内力增大系数：

$$\gamma_j S_d \leq R_{j,d} / \gamma_{RE} \quad (2)$$

式中： S_d 为承载力极限状态下作用组合的效应设计值； $R_{j,d}$ 为接缝或节点承载力设计值； γ_0 为结构重要系数； γ_j 为接缝或节点内力增大系数，取 1.1； γ_{RE} 为接缝或节点承载力抗震调整系数，受剪取 1.0，其他取 0.85。

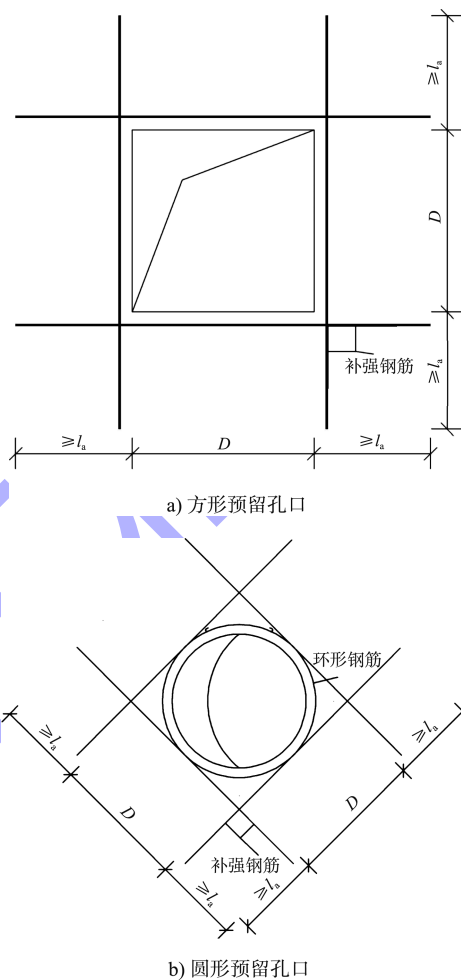
本连接承载力验算不同于 JGJ 1—2014《装配式混凝土结构技术规程》^[7]，考虑水运工程护岸的节点连接失效后的影响较大，因此连接节点承载力验算时内力均考虑了 1.1 的增大系数。

4.4 构造设计

装配桩基承台式护岸结构不仅要满足常规混凝土结构的构造要求，还有一些自身的构造要求：

1) 关于结构缝的间距，预制结构通常大于现浇结构，而桩基式结构大于重力式结构，尽管装配桩基承台结构既是预制结构又有桩基础，但其结构缝间距不宜过大，通常可取 15~20 m。结构缝宽一般可取 20 mm，缝内用弹性材料填充，有防渗要求的还要设止水措施。2) 基桩通常采用直桩，沉桩偏位不得大于 100 mm。由于叉桩沉桩偏位大、桩顶预留钢筋与承台底板交叉多，而桩基与预留孔节点连接对沉桩偏位要求较高，故推荐采用直桩。3) 预制承台底板预留孔尺寸需满足与桩径间不小于 100 mm 的净距，沉桩精度可控时可以适当减小。预制承台底板预留桩基孔口时，应在孔口四周配置补强钢筋，且面积不应小于被截断钢筋面积的 50% (图 7)。4) 为保证结构整体效果，装配桩基承台式护岸承台底板厚度不宜小于 400 mm。预制承台

板底下通常还要设 100~200 mm 厚的垫层，为满足平整度要求，高程允许偏差为 -10~0 mm。为了保证承台板与垫层间填充密实，通常在安装承台板时先铺设 20 mm 的水泥砂浆座浆层。



注： l_a 为钢筋锚固长度； D 为边长。

图 7 预制承台底板预留孔口补强配筋结构

5 结论

1) 水运工程装配桩基承台式护岸结构须根据水文、地质、使用要求、施工能力、运输条件等因素，以及防洪、环保生态或景观要求，经技术经济综合论证后选择结构形式、确定设计方案。

2) 该护岸结构设计计算应根据节点连接情况选择合理的计算模型及计算方法。

3) 该护岸上部预制构件纵向长度宜与桩基纵向间距相协调，承台板在横断面内应为一个整体，不宜拆分为 2 个或多个构件。

4) 该护岸结构桩基宜采用预制桩直桩。基桩与承台底板的节点连接宜采用湿式连接。

参考文献:

- [1] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 防波堤与护岸设计规范: JTS 154-1—2011[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [2] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司等. 码头结构设计规范: JTS 167—2018[S]. 北京: 人民交通出版社有限公司, 2018.
- [3] 陈明阳, 顾海英, 曹利利, 等. 复合桩基础在航道护岸工程中的应用[J]. 水运工程, 2021(3): 180-184, 196.
- [4] 上海现代建筑设计(集团)有限公司. 地基基础设计规

范: DGJ 08-11—2010[S]. 上海: 上海市建筑建材业市场管理总站, 2010.

- [5] 顾宽海, 汪涛, 陈明阳, 等. 装配重力式混凝土护岸结构的设计及施工[J]. 水运工程, 2021(6): 6-12, 19.
- [6] 顾宽海, 陈浩群, 张逸帆, 等. 装配式低桩承台护岸结构设计[J]. 水运工程, 2018(12): 186-192.
- [7] 中国建筑标准设计研究院等. 装配式混凝土结构技术规范: JGJ 1—2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.

(本文编辑 王传瑜)

(上接第64页)

2) 取消现场模板工程, 节省大量周转材料及拆模工序, 大幅减少现场作业人数, 降低造价。

3) 以直代弯的钢结构桩芯结构实现上部预制横梁与桩基的精准对接安装。

4) 新型密闭式钢质靠船构件规避混凝土靠船构件的施工难点, 利于工程施工安全, 提高施工效率, 运营期便于维护。

5) 构件关键节点设置联网监控点, 评估结构受力状态及劣化趋势, 为码头的管养提供依据, 实现全寿命周期监护和管理。

参考文献:

- [1] 江义, 程泽坤, 吴志良, 等. 装配式桩基码头设计建造应用现状与展望[J]. 水运工程, 2018(6): 103-109.

[2] 中交第三航务工程勘察设计院有限公司. 连云港港徐圩港区六港池 64#~65#液体散货泊位工程初步设计[R]. 上海: 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 2021.

[3] 李武, 朱琳. 高桩码头横梁装配应用技术[J]. 中国港湾建设, 2022, 42(6): 7-10.

[4] 江义, 刘亚男. 高桩码头装配式节点结合面抗剪设计方法比较[J]. 水运工程, 2019(7): 66-72.

[5] 钟扬, 邱松, 吴锋, 等. 装配式码头灌浆连接节点压弯性能试验研究[J]. 水运工程, 2020(8): 53-58.

[6] 张增德, 丁敬华, 赵春风, 等. 预制装配式结构灌浆套筒连接性能数值分析[C]//《工业建筑》2018年全国学术年会论文集(下册). 北京: 《工业建筑》杂志社, 2018: 1084-1089.

(本文编辑 王传瑜)

(上接第79页)

作用。现浇面层的连续性结构是控制排架间传递水平力的关键。在装配式高桩码头结构中, 当面层采用常规的配筋方式时, 选用全简支梁结构是可行的技术方案。

2) 高桩码头采用全简支梁结构方案时, 可采用常规连续梁排架模型进行初步计算, 宜在《码头结构设计规范》规定的基础上将水平力分配系数及计算位移值适当提高, 并与工程具体位移控制要求进行比较, 复核结构安全性、适用性及耐久性。

参考文献:

- [1] 刘松, 朱圣文, 丁志威, 等. 简支梁(板)桥上部结构企业

标准图开发[J]. 水运工程, 2002(8): 83-85.

[2] 葛雄, 魏征, 邓育林. 地震作用下多跨简支梁桥挡块优化设计研究[J]. 交通科学与工程, 2021, 37(2): 47-54.

[3] 郑清松. 码头预应力简支箱形轨道梁结构设计[J]. 水运工程, 2020(1): 40-45.

[4] 吴锋, 时蓓玲. FRP 筋混凝土简支深梁力学性能试验研究[J]. 水运工程, 2010(4): 15-17.

[5] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 码头结构设计规范: JTS 167—2018[S]. 北京: 人民交通出版社有限公司, 2018.

[6] 宗绍利. 多个横向水平力作用下高桩码头排架反力计算分析[J]. 中国水运(下半月), 2018, 18(2): 165-166.

(本文编辑 王传瑜)