



某外海码头特大引桥装配式桥墩设计技术

冯浩, 张蕊

(中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

摘要: 以某外海无掩护海域特大型接岸引桥为例, 针对其建设规模大、地质条件复杂、下部桥墩结构在工程投资中占比高、风浪条件差、可作业时间短、工期难控制等问题, 对下部桥墩结构方案进行了技术经济比较, 得出应用高桩墩台结构更优的结论。并针对工程桥墩数量多、尺度标准化程度高的特点, 提出预制装配式桥墩的优化设计方案。结果表明: 该结构的应用大大减小了现场混凝土浇筑量, 为降低施工难度、确保工期、降低施工期安全风险提供了有利保障。可为类似外海水工建筑物的设计提供借鉴。

关键词: 引桥; 桥墩; 装配式; 预制; 连接

中图分类号: U 656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)05-0153-08

Design technology of prefabricated piers for a large approach bridge of offshore wharf

FENG Hao, ZHANG Rui

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

Abstract: This paper takes a typical oversize shore-connecting approach bridge in an open-sea area as an example to compare the technologies and economics of lower pier structure schemes. This study considers many problems of this approach bridge, including its large construction scale, complex geological conditions, a high proportion of the lower pier structure in the engineering investment, poor wind and wave conditions, short working time, and difficult control over the construction period. The comparison indicates that the high-pile pier structure is better in the application. Moreover, according to the characteristics of a large number of engineering piers and high standardization of scale, the paper proposes an optimal design scheme for prefabricated piers. The results show that the application of the structure greatly reduces the amount of concrete pouring on site, and the structure provides a favorable guarantee for reducing the construction difficulty and safety risks during construction and ensuring the construction period. The research can provide a reference for the design of similar offshore hydraulic buildings.

Keywords: approach bridge; pier; prefabricated; precast; connection

我国海岸线绵延漫长, 总长度达 3.2 万 km, 但适合建设大型深水泊位的岸线资源稀缺。为满足码头前沿设计水深和减少运营期疏浚维护的需要, 港口规划和码头选址时, 码头前沿一般布置在天然水深基本满足设计水深的位置^[1]。对于大型深水泊位, 码头所需的水深大, 为此, 连接护岸和码头的引桥往往较长且规模占比较大。位于波浪大的外海长距离引桥, 为了控制桥面的水平

位移, 减小下部结构的自由长度, 且满足小型船舶意外走锚撞击引桥受力的要求, 常在设计水位附近增设下部混凝土桥墩, 如东海大桥工程、杭州湾大桥工程、港珠澳大桥工程、宝钢马迹山矿石码头引桥工程等。大型桥梁工程桥墩厚度较大, 多采用套箱法施工工艺^[2], 而水运工程的引桥桥墩则厚度较小, 通常采用整体现场浇筑, 虽整体性好、施工工艺较简单, 但对于开敞海域的长引

收稿日期: 2022-11-15

作者简介: 冯浩 (1976—), 男, 高级工程师, 从事港口与航道工程设计工作。

桥,存在施工难度大、作业线长、船机设备要求高、施工人员投入多、进度难控制、易发生海水污染等诸多问题。

本文以我国某30万吨级原油码头的长输引桥为研究对象,基于其超长引桥的特点,总结桥墩设计与施工的重点和难点,通过数值计算优化桥墩形状,并采用装配式桥墩方案应对风浪大、施工作业窗口期短的问题,大幅缩减工期。为类似外海水工建筑物的建设提供借鉴。

1 工程概况

工程位于我国广西北部湾钦州港,一期建设30万吨级原油泊位1个,二期预留30万吨级原油泊位1个,码头方位角基本呈南北走向,码头北端与后方作业区通过约2.98 km的引桥连接。引桥标准段宽12.7 m,沿总长方向每隔约1 km设置1个16.2 m宽的错车平台。因桥位范围内无规划航道,引桥不设通航孔,但需考虑渔船和舢板等小型船只的意外走锚撞击,经技术、经济比选,确定引桥采用60 m标准跨径、桥面简支预应力箱梁的总体设计方案,并在设计高水位附近设置下部桥墩,桥墩上设置混凝土立柱和盖梁,简支预应力箱梁搁置于盖梁上^[3]。

2 设计与施工难点

2.1 建设规模大、标准高

引桥全长2.98 km,跨越广西北部湾海域,工程规模大,属于特大型桥梁,桥墩及主要预制构件均需通过水工船机设备施工完成,且为长距离线形施工作业,水上施工作业量大,易受风浪、潮汐、材料运输供应和施工作业场地等因素影响。因此,结构形式种类、数量以及现浇工程量的比例均影响建设工期。为减少现场工作量,加快施工进度,应尽量统一结构跨度及形式,提高模块化、标准化、工厂化的预制构件比例,并且兼顾

结构设计过程中的首要任务,即经济合理性和施工可行性。

引桥作为原油管道的输送通道,兼顾机动车辆通行,其使用要求高,结构安全按一级设计。另外,从控制桥面水平位移和垂直沉降的要求出发,下部桥墩的水平位移控制在2 cm以内、不均匀沉降控制在5 cm以内。

2.2 水文条件复杂,施工作业条件差

工程位于钦州湾口海域,属典型南亚热带海洋性气候,每年5—11月受台风影响,其中7—9月较为严重,据统计,影响本区的台风平均每年为2~4次,最多时达5次,且伴有暴雨或大暴雨。工程区域虽然水深较小,但波浪影响显著,50 a一遇最大波高达6.04 m,2 a一遇波高达到3.37 m,属于典型的外海大波海域,施工期波高大于类似工程。另外,工程区域潮差大,平均超过4.00 m。不利的气象、水文条件均影响水上施工作业的天数。

2.3 地质条件复杂,结构基础选择受限

引桥沿纵向长度方向海床天然高程-6.0~-4.0 m(当地理论最低潮面),接码头100 m长度范围段海床天然高程-22.0~-12.0 m,本工程区风化岩层埋深变化较大,覆盖土层厚薄不一,岩面起伏剧烈。下卧层分布3个风化岩层,具有岩层顶起伏大,厚度不均的共性特征,上部⑥₁散体状强风化岩层,厚度为0.6~19.6 m;⑥₂碎块状强风化层厚度为0.5~11.4 m;⑦₁中等风化层分布较广泛,顶板高程为-39.7~-10.4 m,揭示厚度一般大于2.5 m。根据上述分析,本工程地质条件复杂,各岩层具有岩面埋深薄厚不一、起伏剧烈的特点。上部散体强风化岩层,虽标贯基数大,但承载力较低;下部碎块状强风化层及中风化岩层埋深较深。这也是影响工程下部结构形式选择的主要决定因素。本区典型地质剖面见图1。

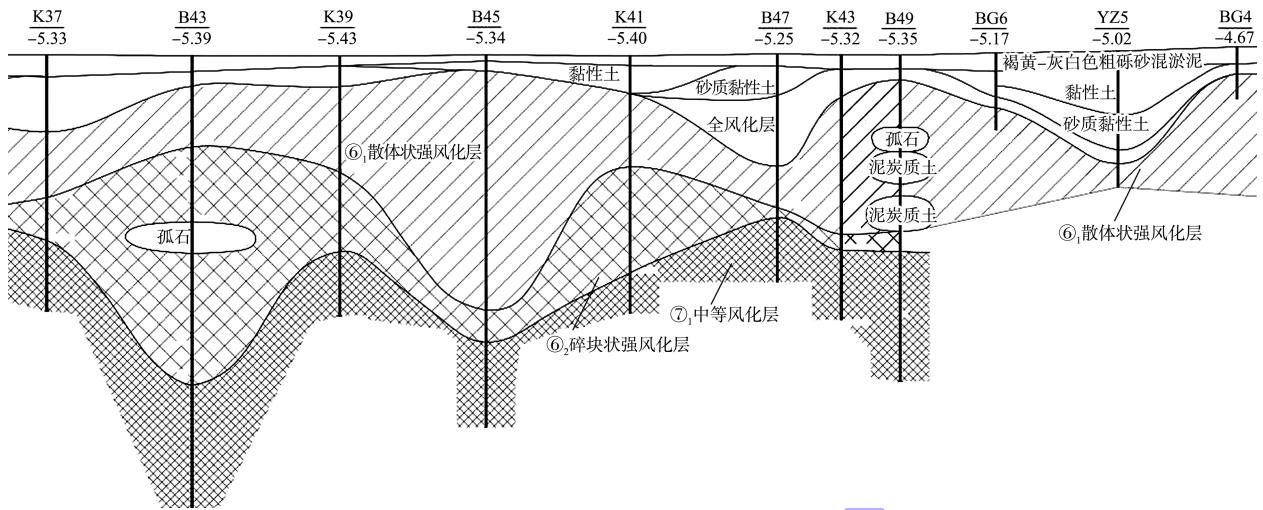


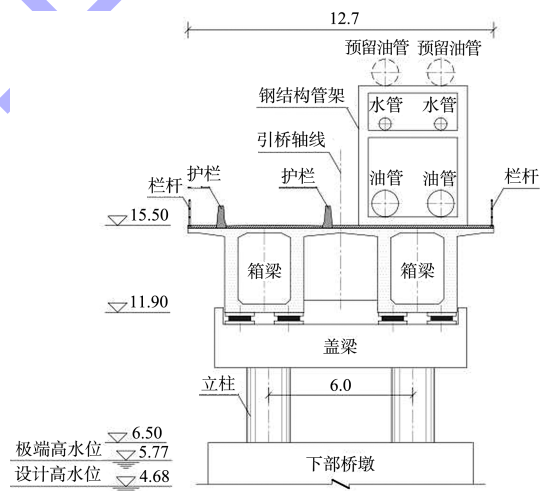
图 1 典型地质剖面 (单位: m)

3 桥墩设计方案

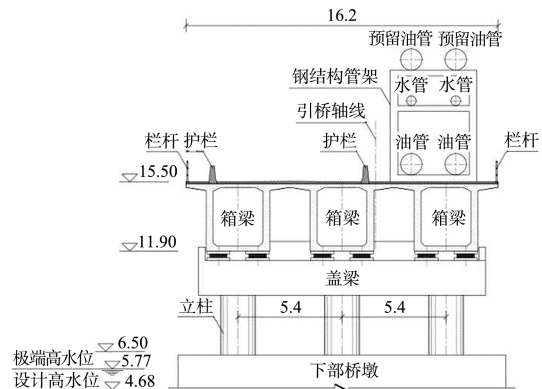
3.1 引桥总体设计方案

引桥总长 2.98 km, 桥位范围内无规划航道, 可不设通航孔, 但需考虑渔船和舢板等小型船只的意外走锚撞击, 按照 1 000 吨级船舶撞击力设计。通过调研国内类似大型桥梁的建设成果 (桥梁跨度 50~70 m, 桥面采用箱梁结构), 进行桥墩跨径和桥面构件类型的比选。结合本工程设计荷载、构件尺度、数量、浮吊和架桥机的吊运安装能力等因素, 针对 50、60、70 m 标准跨径方案进行投资对比, 其中 50、70 m 跨径方案分别是 60 m 跨径投资的 1.04、1.10 倍。最终采用标准跨径 60 m、桥面简支预应力箱梁的总体设计方案。箱梁底高程依据《公路桥涵设计通用规范》, 按照 50 a 一遇波高 (6.04 m) 条件下底面不受波浪力, 并预留 1.50 m 净空设计, 确定箱梁底高程为 11.90 m。为减少下部结构高度和船舶的意外走锚撞击, 在设计高水位附近设置下部桥墩, 桥墩上设置混凝土立柱和盖梁, 简支预应力箱梁搁置于盖梁上。引桥设 2 个错车平台, 间距约 1 km。引桥横断面由电缆通道、车行道、管架通道、检修通道等组成, 标准段宽 12.7 m, 错车平台段宽 16.2 m。引桥面高程 15.50 m, 预应力箱梁高 3.5 m, 盖梁断面尺度 2.5 m×1.8 m, 通过立柱与下部结构桥墩

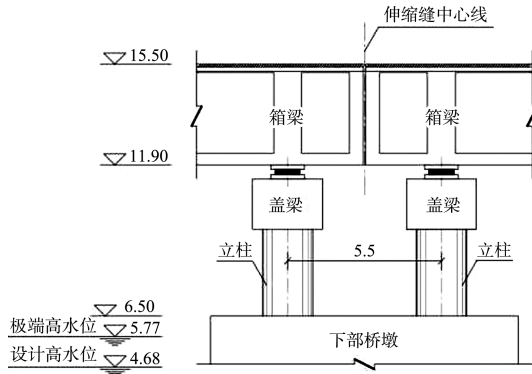
连接, 桥墩顶高程 6.50 m, 标准段每个桥墩上布设 4 根圆形立柱、2 根盖梁, 错车平台段每个桥墩上布设 6 根圆形立柱、2 根盖梁。标准段、错车平台段横断面以及桥墩处纵断面见图 2。



a) 标准段横断面



b) 错车平台段横断面



c) 桥墩处纵断面

图2 引桥断面 (单位: m)

3.2 桥墩及基础结构

根据地勘报告, 散体状强风化砂岩-泥岩普遍埋深-10.8~-6.2 m, 厚 0.6~5.0 m 分布不均, 局部厚达 5.2~19.6 m, 地基承载力 300~400 kPa, 开

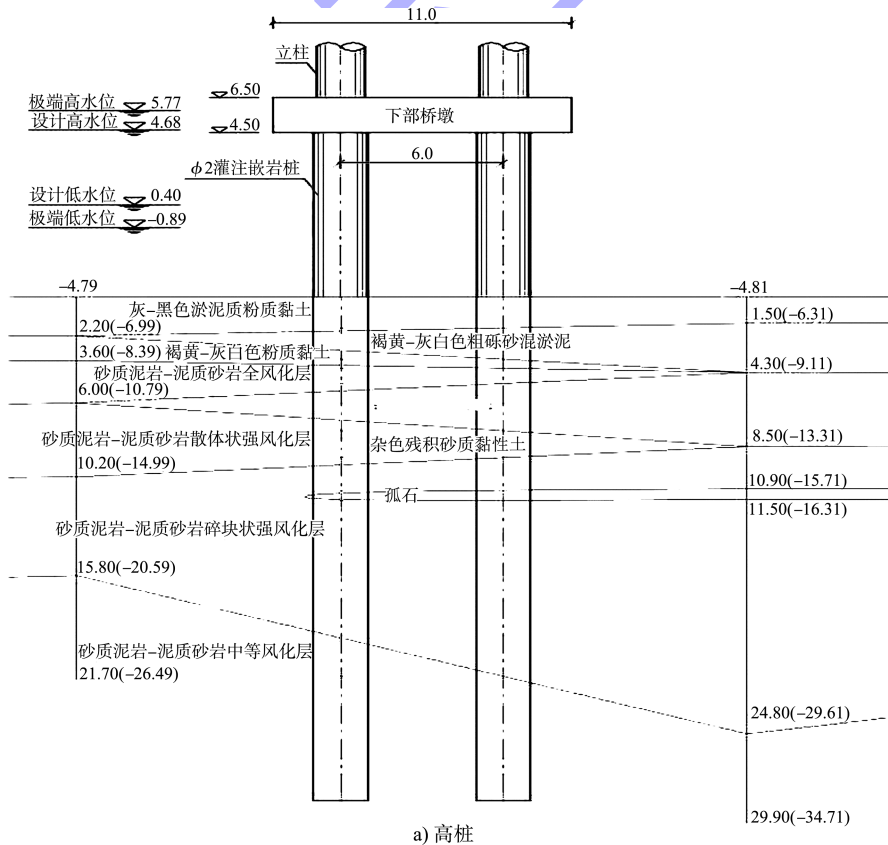
挖后具有遇水软化、地基承载力下降的现象; 碎块状强风化砂岩-泥岩厚度较薄区为 0.5~5.6 m, 厚度较大区为 6.3~11.4 m, 地基承载力 400~500 kPa。

基于结构的重要性的和油管的使用要求, 加之下部桥墩的不均匀沉降和水平位移要求高, 选取碎块状强风化砂岩-泥岩埋深在 2~10 m 的引桥标准区段, 进行高桩墩台基础和沉箱重力式基础的方案对比分析^[4](表 1), 具体方案为:

1) 高桩墩台方案。每座桥墩布置 4 根 $\phi 2.0$ m 的嵌岩灌注桩, 桩尖进入中等风化岩层, 深度以满足设计桩力为控制标准, 上部结构为现浇墩台, 其顶面设置立柱。墩台厚 2 m, 外轮廓采用大、小圆弧相结合的形式。见图 3a)。

表 1 方案技术、经济对比

基础方案类型	水平位移/cm	沉降	技术可行性	持力层及施工特点	单座墩台造价/万元
高桩墩台	1.23	基本无沉降	可行	碎块状强风化砂岩; 岩性较软, 冲孔容易	435
沉箱重力式	0	略有沉降	可行	碎块状强风化砂岩; 局部需水下炸礁、施工难度大	798



a) 高桩

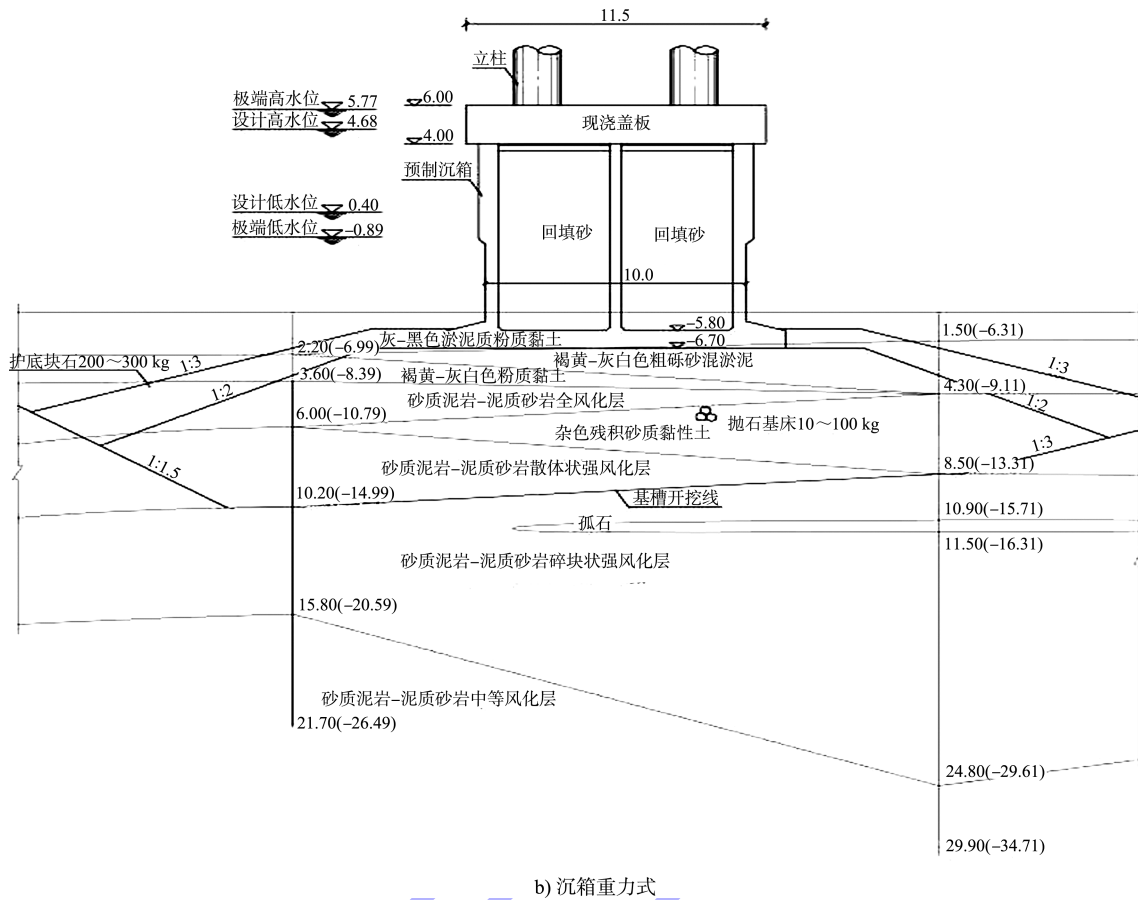


图 3 桥墩结构方案 (单位: m)

2) 沉箱重力式方案。工程区域波浪大, 为减少波浪力, 采用圆形沉箱, 兼顾引桥整体外形美观, 沉箱直径不宜大于桥面宽度。圆沉箱尺寸为 $\phi 10\text{ m}$ (外径) $\times 11\text{ m}$ (高), 盖板尺寸为 $\phi 11.5\text{ m}$ (直径) $\times 2\text{ m}$ (厚), 沉箱底设置抛石基床, 基床顶部设置护底块石, 沉箱内回填砂。因散体状强风化砂岩-泥岩遇水软化、承载力下降, 将该层开挖清除, 以碎块状强风化砂岩-泥岩作为抛石基础的持力层。见图 3b)。

经对比分析, 两方案在技术上均可行。在施工难度上, 高桩方案不改变天然地形, 无需开挖, 天然水深可满足大型浮吊、打桩船、桩驳的施工吃水要求, 且持力层岩性较软, 容易冲孔; 而沉箱重力式方案因结构受力要求, 需开挖基槽, 清除散体状强风化砂岩-泥岩, 开挖量和抛石基床回填量大, 对局部散体状强风化砂岩厚度较大的区域, 需水下炸礁。相比较, 高桩方案施工工艺简单, 工期得到有

效保障, 且经济效益显著, 引桥基础全部采用高桩墩式, 建成后整体美观度较高, 优势明显。

3.3 桥墩形状的优化设计

工程所在区域属典型外海大波水域, 墩台的外形轮廓受到不同波浪力, 将影响其桩长和桥面的水平位移。

常规的引桥下部一般有圆形和矩形桥墩。本项目引桥桩基全部采用 $\phi 2.0\text{ m}$ 嵌岩灌注桩, 为控制桥面水平位移, 桩基与桥墩按刚性连接设计, 规定桩基处外部宽度不得小于 0.4 倍桩径^[5]。上部结构竖向力通过立柱传递到下部桥墩, 对于 60 m 标准跨径方案, 单个立柱荷载超过 8 000 kN, 为减小偏心受力, 桩基的位置应与立柱位置对齐, 或尽量减小偏差。标准段总计 49 个桥墩, 错车平台段共 4 个加宽桥墩, 为保证模板的统一性和桥墩的外观协调性, 标准段和错车平台段桥墩各按 3 种形状 (直角矩形、圆形、大小圆弧结合形)

进行数值分析计算，以标准段为例，桥墩形状见图4，数值计算结果见表2。

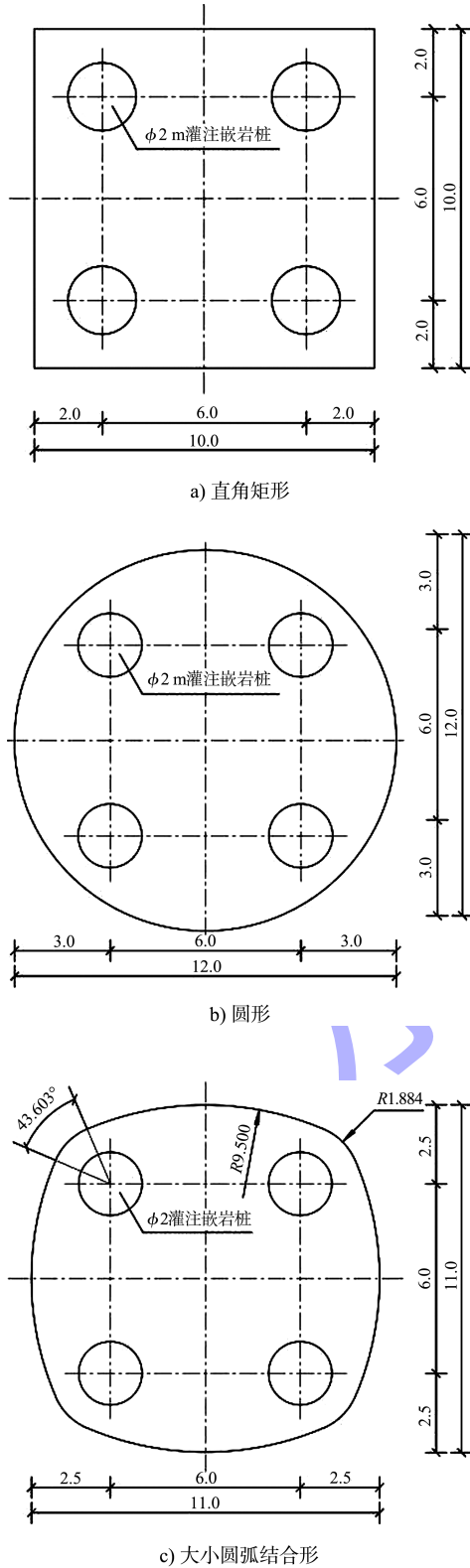


图4 标准段桥墩形状比选 (单位: m)

表2 标准段不同桥墩平面形状数值对比

桥墩形状	平面尺寸/ m	厚度/ m	桥墩 体积/ m^3	最大 桩力/ MN	设计 桩长/ m	最大水 平位移/ mm
矩形	10×10	2	200.0	15.742	35	12.14
圆形	$\phi 12$	2	226.2	15.422	34	11.27
大小圆弧组合形	11×11	2	207.1	15.178	33	10.98

对比3种平面形状的桥墩，矩形桥墩桩力和水平位移均最大，圆形次之，大小圆弧组合形最小；墩台混凝土体积矩形最小，大小圆弧组合型略大于矩形，圆形最大；水平位移均满足要求，但矩形桥墩桩力最大，所需的桩长也最大（以地勘报告B12孔计算）。综合比选，大小圆弧组合形桥墩桩力最小、桩长最短、水平位移最小，又能兼顾外观观感，是最适宜的桥墩设计方案。

3.4 装配化桥墩方案

本工程桥墩共53座，其中标准段桥墩49座，错车平台段桥墩4座。为控制引桥面沉降、位移及考虑1000吨级船舶的意外走锚撞击，引桥设置了下部桥墩，其高程在设计高水位附近。结合桩基设计方案和施工可行性，确定下部桥墩顶高程为6.50 m，底高程为4.50 m，厚度为2 m。工程区域设计高水位为4.68 m，桥墩底高程略低于设计高水位。

传统的码头和引桥的墩台一般采用现场整体浇筑混凝土，本工程采用装配式桥墩方案，其优势包括：

1) 无掩护外海水域的常年波浪较大，2 a一遇的波高达3.37 m，施工作业条件较差，作业天数少。提高构件预制装配化可有效解决施工作业天数少的问题。

2) 特大型桥梁的桥墩数量多，施工作业线长，如桥墩全部采用现场整体浇筑，需要投入更多的海上施工船机设备、模板数量和施工人员，不利于工期的保证和人员安全^[6]。虽然桥墩数量多，但只有两种规格，且桩基均采用 $\phi 2.0\text{ m}$ 嵌岩灌注桩，有利于工厂批量预制和现场装配化施工。

3) 钦州港具备大型预制构件的预制、吊装和出运能力, 工程 60 m 跨径的预应力混凝土箱梁单榀质量约 800 t, 桥墩如采用部分预制, 其质量远小于箱梁。

4) 引桥区域天然水深为 4~6 m, 可满足起重能力 1 000~2 400 t、满载吃水 2.5~4.5 m 的大型起重船的吊装和水上作业。

综上, 下部桥墩采用“碗形”预制方案, 即底板和侧壁整体预制、上部空腔现场浇筑混凝土的设计方案: 墩台预制底板厚 1 m, 并在 $\phi 2.0$ m 嵌岩灌注桩位置预留 $\phi 2.2$ m 的桩基安装孔洞, 墩台四周预制壁厚 0.5 m, 壁高一次性预制到墩台顶

面, 预制构件形成的上部碗形空腔进行现场二次浇筑混凝土, 以适当减轻预制件质量, 保证桩基、立柱与墩台的良好刚性连接。底板顶部预埋墩台体积构造短筋, 侧壁顶部内侧预埋墩台顶层短主筋, 空腔混凝土现场浇筑前, 需用同规格的钢筋与预埋的短筋绑扎或焊接。预制桥墩的平面及剖面设计见图 5, 预制桥墩参数见表 3。

采用上述预制装配化桥墩设计方案, 使位于设计水位附近、施工期受潮位和波浪影响显著的桥墩的施工难度大大降低, 现场无需搭设墩台底、侧模板, 减少现场施工人员, 保证混凝土的质量, 有效提高了外观质量。

表 3 预制桥墩参数

桥墩	平面尺寸/(m×m)	总厚度/m	预制底板厚度/m	预制侧壁厚度/m	孔洞数量/个	预制混凝土方量/m ³	预制质量/t
标准段桥墩	11×11	2	1	0.5	4	105.83	264.6
错车平台段桥墩	17×11	2	1	0.5	6	170.23	425.6

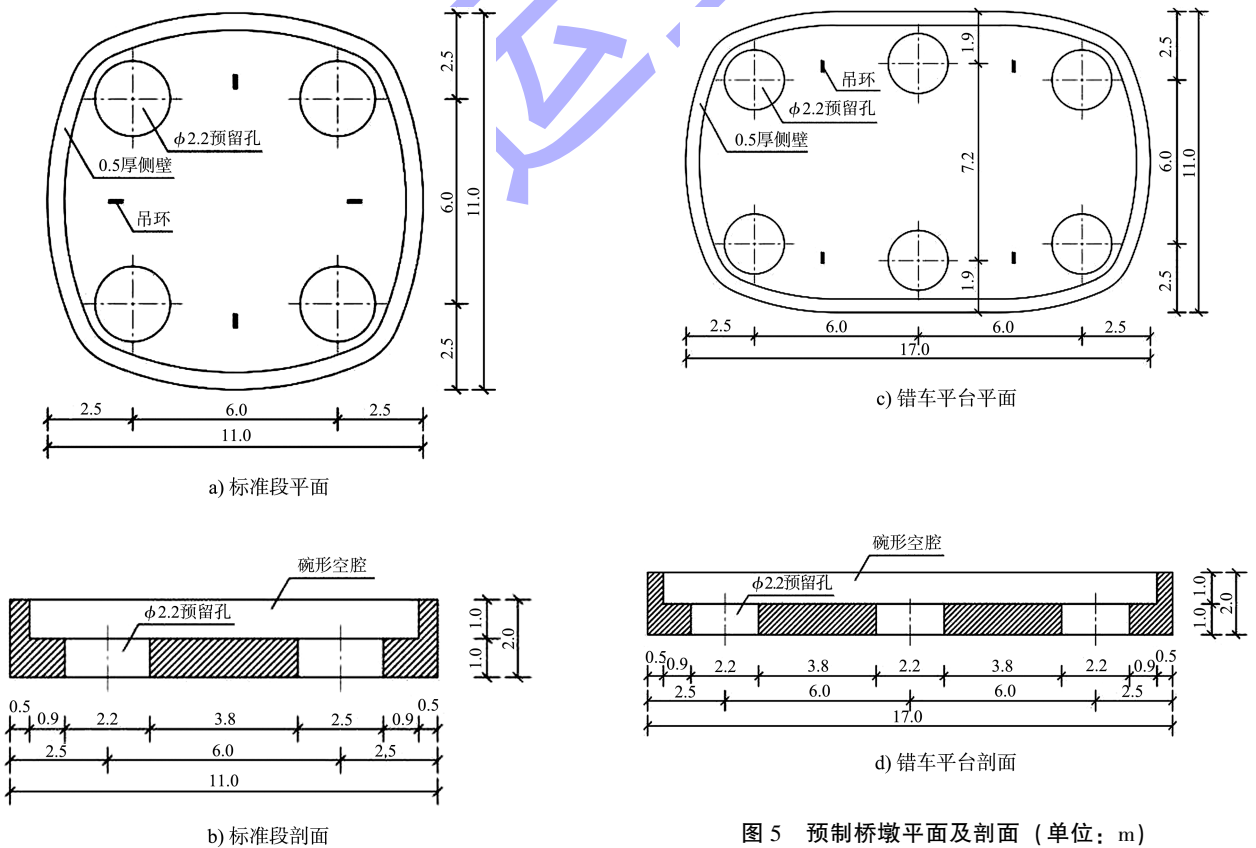


图 5 预制桥墩平面及剖面 (单位: m)

3.5 桩与预制桥墩之间的连接

桩与桥墩之间按刚性连接设计，嵌岩灌注桩直径为 $\phi 2.0\text{ m}$ ，预制桥墩在桩位处的预留孔洞直径为 $\phi 2.2\text{ m}$ ，即桩周与孔洞之间有 0.1 m 的空隙。为保证刚性连接效果，孔洞内壁进行凿毛处理，并安放喇叭口形的钢筋笼，由沿桩周均匀分布的向上弯折的主筋和水平环形箍筋焊接而成，现场吊运安装，最后在桩周灌注C45高强微膨胀细石混凝土，振捣密实。连接结构见图6。

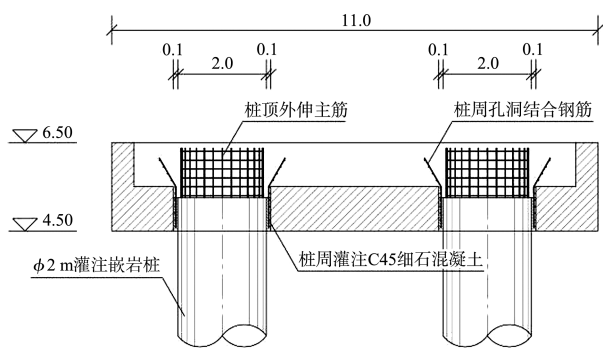


图6 桩与预制桥墩连接结构 (单位: m)

4 结语

1) 典型外海无掩护海域的特大型接岸引桥建设规模大、水文条件恶劣、地质条件复杂、施工作业条件差，因此下部结构形式的选择对于工程投资、施工工期和施工期的风险控制都尤为重要。

2) 综合工程区域建设条件以及上部结构方案的特点，针对标准跨桥墩采用高桩墩台结构和沉箱重力式结构进行方案比选，从可行性、经济性、施工难易程度等方面进行比较，得出高桩墩台结构形式优势显著。

3) 针对外海大波作用对于墩台外形轮廓敏感性高的特点，在满足结构构造要求和使用寿命的前提下，对墩台外形轮廓进行优化，减小结构质量和波浪作用产生的水平荷载，从而减小墩台水平位移，提高结构使用安全性。

4) 针对本工程墩台数量多、规格少、尺度标准化程度高的特点，采用预制装配式桥墩的设计方案，大大减小了现场混凝土浇筑量，为降低施工难度，确保工期，降低施工期安全风险，提供了有利保障。

参考文献:

- [1] 孙光圻, 吴相军. 《全国沿海港口布局规划》的编制背景与实施意义[J]. 水运管理, 2007, 29(1): 9-12.
- [2] 蔡福康. 外海桥墩承台双拼U型混凝土套箱施工技术[J]. 水运工程, 2012(6): 196-200.
- [3] 中交第三航务工程勘察设计院有限公司. 广西北部湾港钦州码头接岸工程施工图[R]. 上海: 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 2014.
- [4] 中交第三航务工程勘察设计院有限公司. 广西北部湾港钦州码头接岸工程初步设计[R]. 上海: 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 2012.
- [5] 中交第一航务工程设计院有限公司, 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 中交第四航务工程局有限公司. 码头结构设计规范: JTS 167—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
- [6] 刘绍堂, 李微晓, 赵站杨, 等. 杭州湾跨海大桥箱梁施工控制加密技术[J]. 施工技术, 2008, 37(7): 15-17.

(本文编辑 赵娟)

(上接第 146 页)

参考文献:

- [1] 中国建筑科学研究院, 北京中关村开发建设股份有限公司. 混凝土质量控制标准: GB 50164—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [2] 中交上海三航科学研究院有限公司. 港口工程后张法预应力混凝土大管桩设计与施工规程: JTS 167-6—2011[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.

- [3] 中冶建筑研究总院有限公司, 中交武汉港湾工程设计研究院有限公司. 大体积混凝土施工标准: GB 50496—2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [4] 王新刚, 孙业发, 徐鸿玉. 港珠澳大桥预制桥墩裂缝控制技术[J]. 中国港湾建设, 2015, 35(12): 66-70.
- [5] 檀军锋. 箱梁混凝土表面色差成因分析与防治[J]. 铁道建筑, 2010(6): 47-48.

(本文编辑 王璁)