

广东省地方标准制订
《水下埋置式预制墩台技术规程》
(送审稿)

编制说明

港珠澳大桥管理局

浙江大学

2021 年 8 月

目 录

一、任务来源.....	1
二、编制的目的和意义.....	2
三、遵循的原则和编制依据.....	3
1 遵循原则.....	3
2 编制依据.....	4
四、标准编制过程.....	5
1 计划与安排.....	5
2 标准文稿的编制情况.....	5
3 标准文本征求意见情况.....	7
五、标准的主要内容说明.....	8
1 范围（对应规范第 1 章）	8
2 基本规定（对应规范第 4 章）	8
3 设计技术（对应规范第 5 章）	8
4 工厂预制（对应规范第 6 章）	14
5 墩台运输（对应规范第 7 章）	16
6 水下墩台安装（对应规范第 8 章）	20

一、任务来源

按照广东省市场监督管理局通告（粤市监标准[2021]-25 号），本标准于 2021 年 1 月纳入广东省地方标准制修订计划项目。本标准是为了统一水下埋置式预制墩台设计和施工的技术要求，确保桥梁下部结构预制墩台建设工程质量而制定。

港珠澳大桥是我国近年来交通建设的大成，大桥建设中采用的关键技术之一——埋置式预制墩台。不同于一般的预制桥墩，埋置式预制墩台是指将墩身与承台整体预制，并将承台设置在海床面以下；通过将构件大型化、最大程度实现结构预制化，避免了海上现浇施工承台作业，提高了施工效率和施工质量。对于确保桥梁下部结构施工过程的安全和混凝土结构耐久性具有重要意义。其次，埋置式承台结构，将下部结构中横截面面积最大的部分置于海床以下，可以有效降低桥梁下部结构的阻水率，减小对当地水文环境的影响，解决了伶仃洋弱水动力条件下的防洪要求（桥梁下部结构阻水率不超过 10%）；墩台装配化施工加快了工程施工进度，单个整体式桥墩工厂预制时间仅 32 天，海上安装时间仅 7 天；桥墩与承台在工厂整体预制，施工质量高，工厂预制墩台合格率 100%，保障了桥梁 120 年使用寿命，大桥的建成进一步将我国从桥梁大国推向桥梁强国。

港珠澳大桥深水区非通航孔桥 127 个承台墩身（最大吊重约 3200t），浅水区非通航孔 63 个承台墩身（最大吊重约 2400t）全部采用埋置式预制墩台。墩台安装过程中创造性地提出了大圆筒干法施工工法和分离式柔性止水工法，成功实现了墩身与承台一体化预制的装配化施工。其中大圆筒干法施工实现了 7 天完成一个整体式墩台的安装，显著提高施工效率；针对分离式柔性止水工艺，专门研发了可适应于水深超 20m 海洋环境的桩与墩台连接工艺，设计开发了分离式柔性止水装置，实现了深水环境下钢管桩与预制承台间快速止水，显著降低施工成本、提高了施工工效。

由于我国缺乏埋置式预制墩台技术规范，严重制约了埋置式预制墩台吊装施工在我国其它跨海大桥上的应用。为了推广港珠澳大桥埋置式预制墩台技术成果，港珠澳大桥管理局和浙江大学共同承担了“埋置式承台设计及施工技术规程研究”项目，系统研究了埋置式预制墩台设计、预制、运输和安装技术，研究成果覆盖

埋置式预制墩台建造关键技术，解决了埋置式预制墩台应用推广的关键技术问题。该项目以港珠澳大桥埋置式预制墩台的成功建设经验为基础，总结编写了《水下埋置式预制墩台技术规程》（初稿）。目前该项目已经验收、结题。

在《水下埋置式预制墩台技术规程》（初稿）成果基础上，港珠澳大桥管理局和浙江大学共同组建了标准编制工作小组，结合广东省地方标准要求，对原《规程》（初稿）进行修改完善，形成了新的《水下埋置式预制墩台技术规程》（初稿）。

二、编制的目的和意义

随着我国经济发展和综合国力的提高，基础设施建设从陆地、江河延伸到海洋，已建成杭州湾大桥、港珠澳大桥，正在建造的深中通道、厦门东二通道，未来规划建设渤海湾大桥、杭州湾高铁大桥以及琼州海峡大桥等跨海大桥。然而海洋环境下受台风、海浪、强日照以及繁忙的航道通行等因素的影响，对跨海桥梁建设形成了诸多限制，跨海桥梁建设具有施工作业时间短、施工难度大、施工风险高等特点。近年来，我国在跨海桥梁建设上进行了大胆实践和有益探索，从杭州湾大桥建设中采用的承台现浇、墩身预制进行跨海桥梁下部结构施工到港珠澳大桥逾千吨预制墩台安装。工程实践表明，在跨海桥梁下部结构建设中，采用预制墩台吊装施工具有一系列优点，诸如减少海上现浇作业时间可显著降低恶劣气象条件带来的施工风险；工厂预制，建造质量更有保障；由于现场施工少，对环境污染小，环保效应显著。因此采用预制装配桥墩在未来我国跨海通道建设中将发挥更大作用。

然而对于埋置承台的设计及施工，目前我国还没有相应的规范。我国现行与桥梁下部结构相关的标准主要有：《公路桥涵设计通用规范》（JTG D60-2015）、

《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T 3650-2020）和《公路桥涵地基与基础设计规范》（JTG 3363-2019）。《公路桥涵设计通用规范》主要对桥涵设计需遵循规范、原则、要求、桥涵作用及取值、作用组合等内容进行规定；《公路桥涵施工技术规范》对不同桥型、桥梁上下部结构的施工方法等内容进行规定；《公路桥涵地基与基础设计规范》给出了工程地质参数取值，对桥梁基础设计计算以及主要构造进行规定。这些规范是桥涵、地基基础设计施工的最基本要求，但是由于水下

埋置式墩台是一新型结构，上述规范均未对埋置墩台设计施工做出具体规定，尤其是涉及止水环节的水下止水设计和止水施工工艺。现行规范不能满足水下埋置墩台设计施工要求。港珠澳大桥建设中尽管积累了丰富的跨海埋置承台设计和施工经验，但这种经验仅限于单位和个人的认知，由于大家对问题理解的差异，在其它工程中无法有效的传承和推广埋置承台设计和施工技术。因此有必要制定水下埋置式预制墩台技术规程，完善埋置承台设计及施工技术标准体系，规范并指导埋置承台设计和施工作业，确保工程建造质量。

在“一带一路”倡议下，广东提出了“十三五”期间打造成为“21 世纪海上丝绸之路”国家门户的规划，而基础设施互联互通又是“一带一路”建设的优先领域。可见我省对海洋交通基础设施的需求之大。

在“一带一路”战略和粤港澳大湾区建设的背景下，我省对海洋交通基础设施建设仍有巨大需求，面对未来我省跨海大桥建设的广阔前景与缺乏相应的埋置式预制墩台技术规程这一矛盾，借鉴港珠澳大桥埋置式预制墩台设计和施工的成功经验，总结提炼港珠澳大桥埋置式预制墩台建设成果，编制《水下埋置式预制墩台技术规程》，目的在于填补行业空白，在交通建设领域为更好地推广跨海条件下埋置式预制墩台技术。通过本项目的实施形成适应我国国情、具有可操作性的水下埋置式预制墩台设计和施工技术，对指导我省跨海桥梁下部结构预制装备施工，提高施工质量，确保结构的耐久性具有实际意义；对今后我国建造类似跨海桥梁工程，如渤海湾大桥、杭州湾通道以及琼州海峡大桥可直接提供技术指导，具有重要的意义。

三、遵循的原则和编制依据

1 遵循原则

本标准严格按照 GB/T 1.1-2020 的要求进行编写，遵循“相关性、一致性、准确性、透明性、真实性”的基本原则。

2 编制依据

《水下埋置式预制墩台技术规程》在内容上主要参考以下文件：

GB/T 1499.1 钢筋混凝土用钢第 1 部分：热轧光圆钢筋

GB/T 1499.2 钢筋混凝土用钢第 2 部分：热轧带肋钢筋

GB/T 1591 低合金高强度结构钢

GB/T 14370 预应力筋用锚具、夹具和连接器

GB/T 20065 预应力混凝土用螺纹钢筋

GB/T 25826 钢筋混凝土用环氧涂层钢筋

GB/T 33959 钢筋混凝土用不锈钢钢筋

GB/T 51028 大体积混凝土温度测控技术规范

GB/T 714 桥梁用结构钢

GB 18173.2 高分子防水材料 第 2 部分：止水带

GB 50496 大体积混凝土施工规范

GB 50982 建筑与桥梁结构监测技术规范

JTG B02 公路工程抗震设计规范

JTG D60 公路桥涵设计通用规范

JTG D64 公路钢结构桥梁设计规范

JTG 3362 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范

JTG 3363 公路桥涵地基与基础设计规范

JTG/T 3310 公路工程混凝土结构耐久性设计规范

JTG/T 2231-01 公路桥梁抗震设计规范

JTG/T 3360-01 公路桥梁抗风设计规范

JTG/T 3650 公路桥涵施工技术规范

JT/T 822 公路桥梁铅芯隔震橡胶支座

JT/T 852 公路桥梁摩擦摆式减隔震支座

JT/T 927 桥梁双曲面球型减隔震支座

JT/T 928 桥梁超高阻尼隔震橡胶支座

JTS 145-2 海港水文规范

JTS 131 水运工程测量规范

JTS 167-13 插入式钢圆筒结构设计与施工规范

JTS 257 水运工程质量检验标准

JTS 204 水运工程爆破技术规范

JTS/T 209 水运工程结构防腐蚀施工规范

JTJ 211 海港总平面设计规范

JTJ 319 疏浚工程技术规范

JGJ 18 钢筋焊接及验收规程

JGJ 107 钢筋机械连接通用技术规程

JG/T 502 《环氧树脂涂层钢筋》

JG 171 镦粗直螺纹钢筋接头

DB44/T 2294 海洋工程不锈钢钢筋应用技术规范

DL/T 5215 水工建筑物止水带技术规范

LD 48 起重机械吊具与索具安全规程

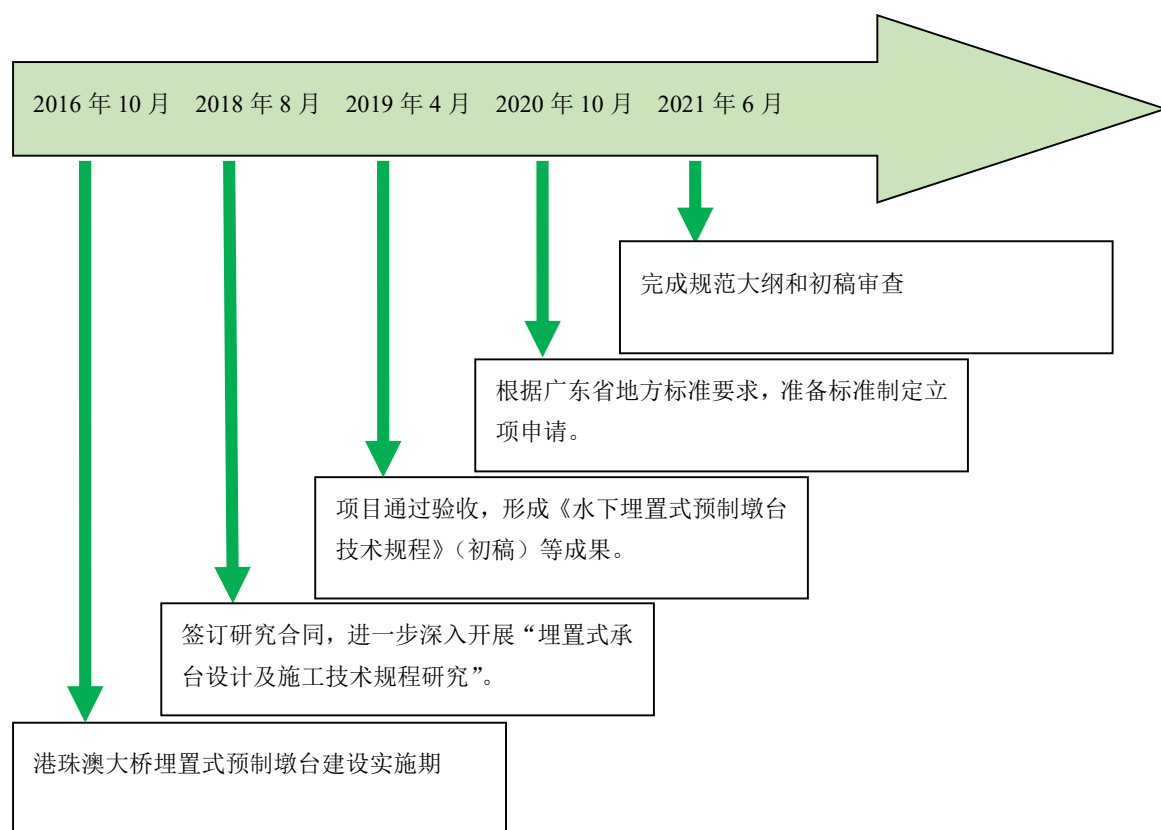
四、标准编制过程

1 计划与安排

起止时间	工作内容
2018.08-2019.04	依托“埋置式承台设计及施工技术规程研究”课题，形成《水下埋置式预制墩台技术规程》（初稿）成果
2019.05-2020.10	对《规范》（初稿）进行修改完善
2020.10-2020.11	提交立项申请
2021.01-2021.06	规范大纲和初稿审查，根据审查意见修改形成征求意见稿
2021.07-2021.08	规范征求意见，对征求意见稿进行修改形成报批稿

2 标准文稿的编制情况

本标准的前期研制进度如下图所示：



(1) 2018年8月-2019年4月，港珠澳大桥管理局和浙江大学开展“埋置式承台设计及施工技术规范研究”，在项目研究过程中，通过调研当时国内外相关标准，并结合港珠澳大桥埋置式预制墩台设计和施工经验，形成《水下埋置式预制墩台技术规程》（初稿）。

(2) 2020年8月—2020年11月，港珠澳大桥管理局和浙江大学基于《水下埋置式预制墩台技术规程》（初稿）已有成果申请广东省标准编写，共同组建了标准编制工作小组，开展标准制定的立项申请。

(3) 2021年1月—2021年6月，标准编制人员根据广东省地方标准编写要求，编制了标准编写工作大纲和修改完善《标准》（初稿），并召开了大纲和初稿审查会，根据会议专家意见，修改完善，形成了《水下埋置式预制墩台技术规程》征求意见稿。

(4) 2021年7月—2021年8月，标准编制人员根据征求意见稿反复进行讨论并对标准进行修改完善，形成了《水下埋置式预制墩台技术规程》送审稿。

3 标准文本征求意见情况

2021年7月15日，港珠澳大桥管理局向业主单位、设计科研单位、施工单位和高校，共18家单位征求意见，根据征求意见对《水下埋置式预制墩台技术规程》进行了修改，主要修改内容如下：

(1)替换了原规程中引用的已作废的标准，“JTJ 275 海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范”替换为“JTS/T 209 水运工程结构防腐蚀施工规范”（2 规范性引用文件）。

(2)修改了“预制墩台”和“围堰止水法墩台安装”两个术语的解释条文（3 术语和符号）。

(3)将墩台设计使用寿命修改为与《公路桥涵设计通用规范》相一致（条文 4.5）。

(4)增加了规程部分条款对其它规范的引用，如条文 5.2.3 引入了“《高分子防水材料 第 2 部分：止水带》（GB 18173.2）和《水工建筑物止水带技术规范》（DL/T 5215）”两本规范。

(5)删除了对一般性内容进行规定的条文（原条文 6.2.1.1）。

(6)修改了规程中的错别字，如“止摆与减震”修改为“止摆与减振”（条文 8.5.3）。

(7)调整了部分文本格式，如原条文编号 1.1 修改为 1.0.1（章节 1、3 和 4）。

(8)重新梳理了规程的条文说明，并增加了部分条文说明（条文说明 1.0.4）。

(9)对规程部分用词进行了修改完善，如原文出现的“钢套箱”统一修改为“钢围堰”。

(10)删除规程后面的“条文说明”等内容，将该部分内容统一放在编制说明中。

根据对征求意见的回复，形成了《水下埋置式预制墩台技术规程》（征求意见稿）反馈意见表。

五、标准的主要内容说明

1 范围（对应规范第 1 章）

1.1 水下埋置式预制墩台设计与施工应贯彻执行国家有关技术经济政策，有序推行智慧建造，积极稳妥地采用新技术、新工艺、新材料、新设备。（对应规范 1.4）

（说明：目前工程建设中正在推行智慧建造，未来桥梁工业化中融合智慧建造技术，无疑是发展方向，对于埋置式预制墩台这种桥梁工程中的大型预制构件生产，应积极应用智慧建造技术。）

2 基本规定（对应规范第 4 章）

2.1 水下埋置式墩台施工应考虑对桥址环境的保护，应编制环保专项施工方案。（对应规范 4.8）

（说明：水下埋置式墩台施工前应开展施工污染源分析，对施工噪声和施工废弃物进行控制，制定大气污染防治、水污染防治和生态环境保护措施。）

3 设计技术（对应规范第 5 章）

3.1 材料（对应规范 5.2）

3.1.1 水下埋置式预制墩台应根据施工区域水深情况选择满足相应水压条件的止水材料，止水材料性能应通过试验验证，试验应满足《高分子防水材料 第 2 部分：止水带》（GB 18173.2）和《水工建筑物止水带技术规范》（DL/T 5215）的要求。（对应规范 5.2.3）

（说明：水下埋置式预制墩台施工止水材料可选择 GINA 橡胶止水带。止水带选型的决定因素是水压大小与最小压缩量：水压力越大，对止水带产生的压缩量越大，产品的性能与之相适应才能保证水密性。橡胶止水带的胶料应满足硬度、强度、伸长率及热老化性等物理性。

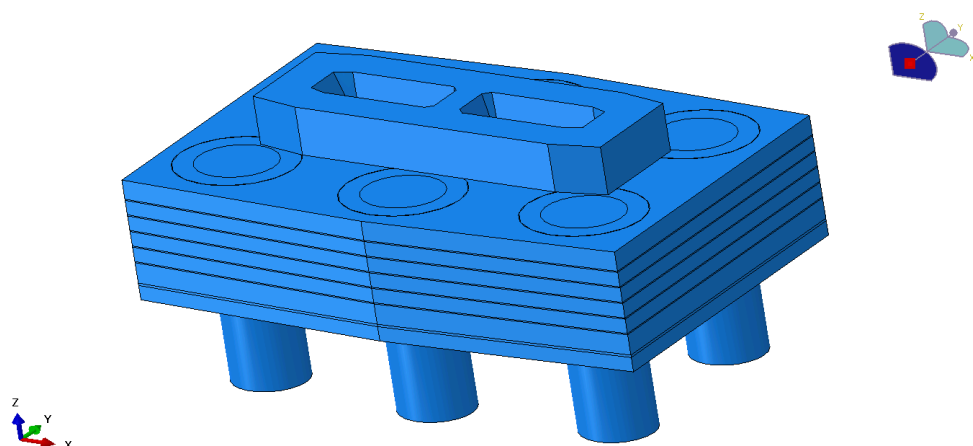
港珠澳大桥水下埋置式预制墩台安装中采用的 GINA 止水带可满足 10~20 米

水深止水要求，对于 GINA 止水带，应开展止水材料性能试验。）

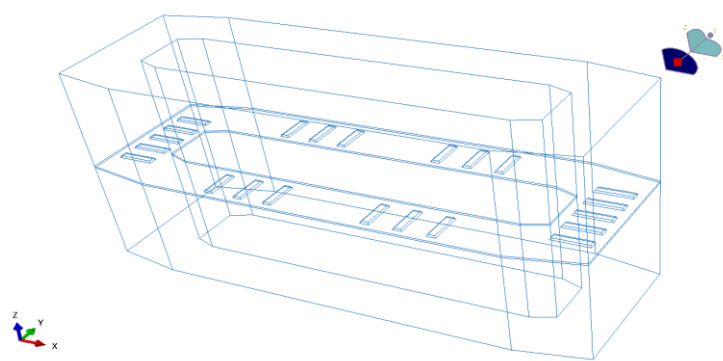
3.2 结构计算（对应规范 5.4）

3.2.1 水下埋置式预制墩台的施工过程中应对承台与桩基的临时连接部位、分段墩身连接部位进行精细化分析，连接部位应满足受力要求。（对应规范 5.4.2）

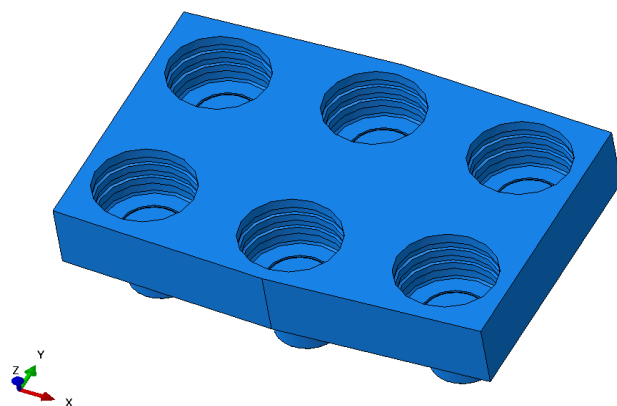
（说明：对于水下埋置式预制墩台局部受力复杂区域宜采用三维模型进行精细受力分析，如港珠澳大桥埋置式预制墩台采用了三维实体单元进行设计计算分析。）



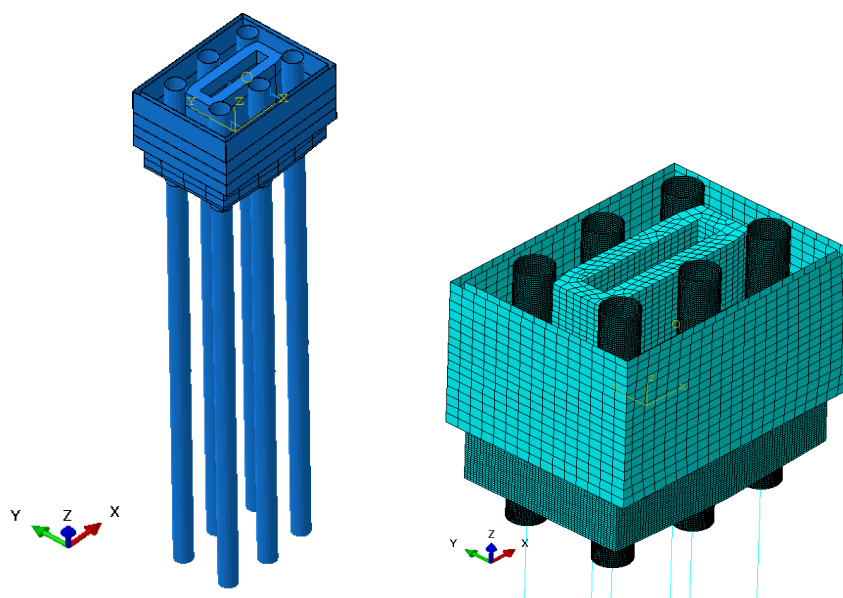
a) 实体模型



b) 墩身剪力键模型



c) 考虑后浇孔的承台模型



d) 考虑桩基、承台、墩身与围堰的整体模型

图1 墩台三维实体模型

3.3 承台与桩基连接设计（对应规范 5.5）

3.3.1 水下埋置式预制墩台在承台中设置预留孔时，应考虑桩基尺寸、桩基施工的平面及垂直度误差后，预留孔孔壁与桩基间仍有满足施工作业的空间，且墩台结构受力满足要求。（对应规范 5.5.1）

（说明：承台与桩基的连接设计时应考虑可能存在的桩基平面位置和垂直度偏差后与承台预留孔的匹配，既要考虑预留孔施作的作业空间，又要考虑施工偏差对墩台及桩基受力的影响。港珠澳大桥根据墩台高度和结构受力计算，提出了桩基施工在设计标高处桩顶平面位置偏差不超过 100mm、桩基垂直度偏差不超过

1/250、墩台安装垂直度偏差不超过 1/3000 且不大于 20mm 的规定。)

3.3.2 承台预留孔壁应进行切槽处理，以增加连接时的咬合力，切槽设计应满足以下要求。(对应规范 5.5.2)

(说明：承台与桩基的连接宜做切槽处理，切槽构造的主要几何要素是槽深（图 2 中的 d）与槽高（图 2 中的 h），已有的研究表明，采用矩形切槽时，当槽深与槽高比值在 0.15 至 0.3 之间，且槽高与槽间距比值在 0.6 至 1.6 之间时，承台与桩基的界面抗剪承载力较大（徐乾乾，桥墩与承台整体预制拼装关键技术研究[D]，浙江大学，2021）。)

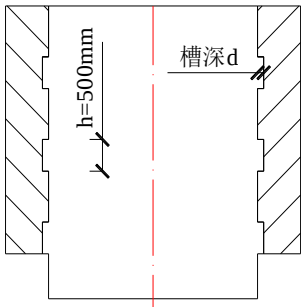


图2 承台与桩基的连接构造

3.3.3 当采用插入不透水层或设有封底混凝土的钢围堰进行止水安装时，应重点考虑结构支撑体系转换时预留孔临时连接区域受力；预留孔中应设置剪力键以辅助传力，剪力键设计应符合以下规定。(对应规范 5.5.4)

(说明：预制墩台安装过程临时连接区域由于受力集中，往往控制设计，如港珠澳大桥水下埋置式预制墩台安装过程通过设置剪力键实现承台底板与钢管桩的临时连接（如下图 2 所示），施工过程中该连接区域受力大，进行了专门的设计计算。)

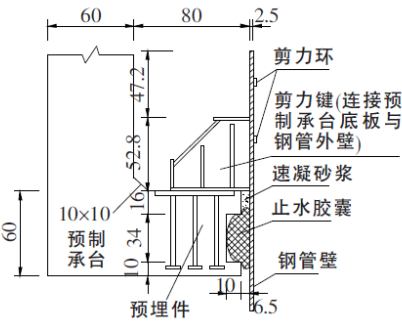


图3 承台与桩基采用剪力键进行临时连接

3.3.4 当采用柔性止水方法进行墩台安装时，预留孔临时连接按 5.5.3 进行设计；并对承台以上墩身区域和承台内预留孔与桩基连接区域进行止水设计。（对应规范 5.5.5）

（说明：分离式柔性止水是指利用外置结构，如托盘或抱箍，依靠外置结构水平顶面和竖向侧面，在桩基与承台之间形成分开的两道止水面——水平方向的止水面和竖直方向的止水面，这样处理虽然增加了止水作业面，但是降低了桩基垂直度精度要求，提高了止水可靠性。）

3.4 分段墩身连接设计（对应规范 5.6）

3.4.1 应考虑桥墩高度及数量、施工设备吊重能力和结构耐久性等因素后进行墩身分段。（对应规范 5.6.1）

（说明：承台底板与钢管桩的临时连接预制墩台高度和重量主要受现今主要装备能力和工程经验等因素制约，港珠澳大桥采用最大起吊能力为 4000t 的大型浮吊进行预制墩台安装，为了配合设备安装能力，设计时预制墩身最高不超过 30m、重量不超过 3200t。对于一般的预制墩台安装，在满足工期、造价、风险可控的前期下，尽可能加大预制墩台高度和重量，有利于减少运输和安装次数，降低工程成本，减少施工风险。）

3.4.2 分段墩身可采用现浇湿接缝、预应力筋干接缝、灌浆套筒或其它可靠方式进行连接。（对应规范 5.6.2）

3.4.2.1 采用现浇湿接缝时，应考虑施工作业空间要求，湿接缝高度不宜太小；应考虑后浇接缝的抗裂性能，接缝处宜采用高韧性混凝土材料。（对应规范 5.6.2.1）

（说明：湿接缝设计应在满足施工作业前提下尽可能减小接缝高度，以减少现场施工作业量，港珠澳大桥墩身湿接缝高度设置为 1.3m，可较好的满足现场接缝连接作业要求。

预制墩台湿接缝构造复杂，混凝土体积用量较大，混凝土水化热引起的温度应力及构造约束应力较大，传统的微膨胀混凝土抗裂效果不佳，新型材料如 UHPC、HTC 等新一代高性能混凝土具有优异的高抗裂性能，在工程成本控前提下，建议优先加以采纳，并可对湿接缝构造配筋同步优化，减少钢筋用量，降低施工难度、提高工效。）

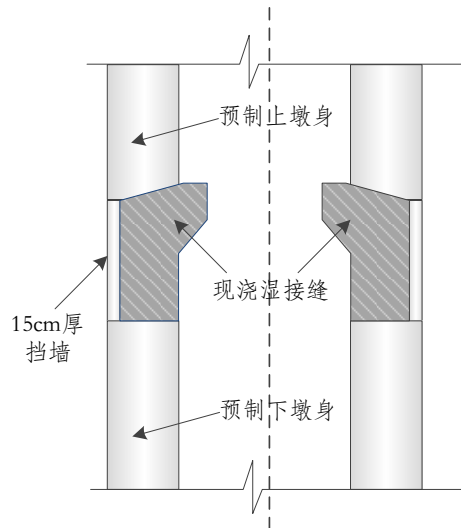


图4 分段墩身湿接缝连接示意图

3.4.2.2 采用预应力筋连接时，应评估地震作用下连接截面的承载能力。（对应规范 5.6.2.2）

（说明：对于采用预应力筋连接的分段墩身，接缝处应设置剪力键以保证接缝连接的抗剪受力，剪力键尺寸根据结构受力需要确定，港珠澳大桥干接缝处剪力键尺寸为 $100 \times 40 \times 5\text{cm}$ 。）

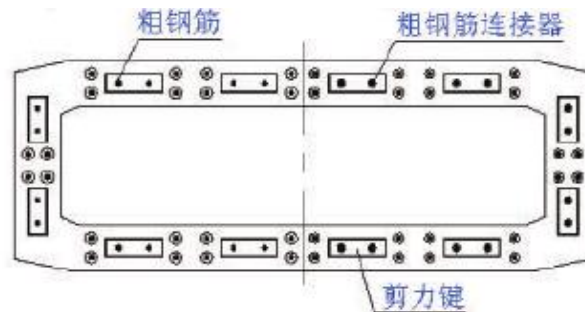


图5 分段墩身界面剪力键布置示意图

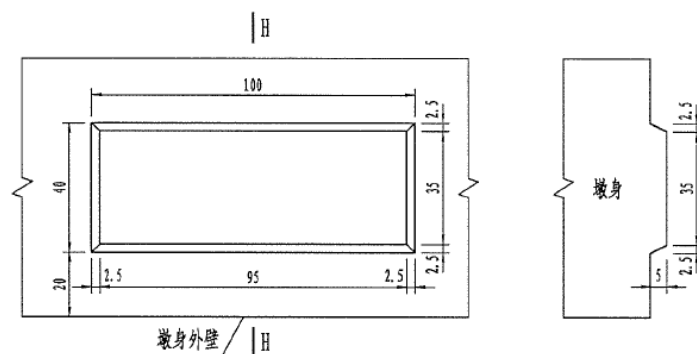


图6 分段墩身截面剪力键构造

3.4.2.3 采用灌浆套筒连接时，应评估地震作用下套筒连接区对桥墩结构变形性能的影响。（对应规范 5.6.2.3）

（说明：灌浆套筒今年来开始应用于我国预制墩台连接，在满足桥梁抗震要求的前提下也可以考虑采用灌浆套筒进行分段墩身连接。）

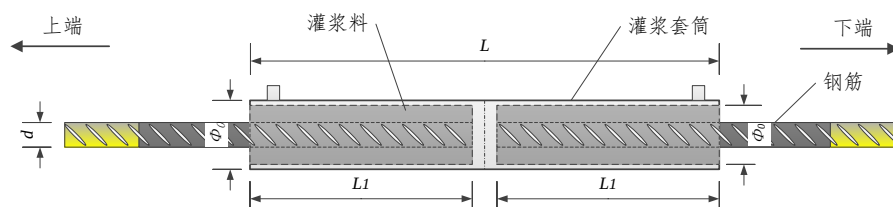


图7 灌浆套筒连接钢筋示意图

3.5 抗震设计（对应规范 5.8）

3.5.1 水下埋置式预制墩台抗震设计应符合《公路桥梁抗震设计规范》（JTG/T 2231-01）和《公路工程抗震设计规范》（JTGB02）的相关规定。（对应规范 5.8.1）

（说明：对于地震基本烈度为 7 度及以上地区采用水下埋置式预制墩台，在设计上应避免地震作用下墩台底部出现塑性区域，确保墩底部位始终处于弹性状态，这样设计的目的是考虑设置于水中海/河床以下的墩台，若在地震作用下墩底发生破坏，导致维修成本高昂，实际工程中难以接受。）

4 工厂预制（对应规范第 6 章）

4.1 预制场建设（对应规范 6.2）

4.1.1 墩台预制生产区应包括墩台预制台座、存放台座、运输路线以及配套设施。

（对应规范 6.2.3）

4.1.1.1 墩台预制台座及存放台座应满足以下要求：

a) 应根据墩台设计存储时间要求布置存放台座数量。

b) 应按照承载力极限状态和正常使用极限状态对台座进行验算，预制台座主要考虑预制墩台自重、模板自重、施工人群荷载、振捣荷载、台座自重、运输台车自重及风荷载；存放平台主要考虑预制墩台自重作用及风荷载。（对应规范 6.2.3.1）

（说明：为减小混凝土收缩徐变，预制墩台一般有存放时间要求，如港珠澳大桥设计上要求墩台存放 3 个月后方可出运吊装，且预制场内构件存储能力不小



图 9 承台围裹土工膜养护



图 10 覆盖塑料布洒水养护



图 11 塑料膜包裹养护



图 12 施工缝浸水养护

5 墩台运输（对应规范第 7 章）

5.1 场内转运与存放（对应规范 7.2）

5.1.1 应综合考虑预制场地质条件、工效、费用等因素确定墩台转运方法和设备。
（对应规范 7.2.1）

（说明：目前大吨位预制构件场内转运有两个基本方案：一是移运台车+专用轨道方案，其中移运台车为主要设备，可分为轮轨式台车和滑移式台车。该方案的滑道基础及承载力标准要求较高，钢筋混凝土基础工程造价高，但移梁设备购置费、使用费和维修费较低，操作较为简便易行。二是起吊机吊移方案，该方案起吊设备加工周期长，其设备购置费、使用费和维修费较高。港珠澳大桥墩台场内转运主要采用了第一种方案。）

5.1.2 分段式中、上节桥墩场内转运宜采用辅助平台，辅助平台应满足以下要求：
（对应规范 7.2.2）

5.1.2.1 墩身与辅助平台间应设置可靠的连接构造。（对应规范 7.2.2.3）

（说明：预制墩台分为整体式、两段式和三段式。相应地，桥墩出运采取两种方案，第一种出运方案对应整体式桥墩（带承台）及分段式下节段（承台+下节墩身），直接将预制构件放在出运台车上运输；第二种出运方案对应分段式中

节段墩身及上节段墩帽，在台车上放置转运平台，再将构件固定到出运平台上，使用平台辅助转运。港珠澳大桥转运辅助平台为箱梁主次梁结构，箱梁采用钢板焊接而成，内部填筑砵 240m³。箱梁顶板采用 δ 20mm 钢板，底板为 δ 30mm 钢板，肋板为 δ 25mm 钢板，箱梁高度 2.05m，如图 13 所示。辅助平台就位通过千斤顶顶升、横纵移台车进行场内移动。

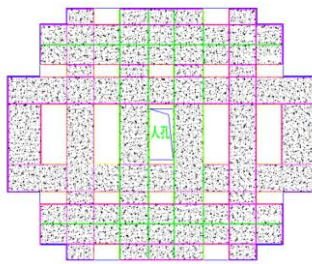


图13 场内转运辅助平台

港珠澳大桥墩台转运辅助平台在预制台座和在储存区进行调平。在预制台座辅助平台底部区域摊铺 3cm 细沙，并通过刮杠找平。辅助平台移动至设计位置（辅助平台与预制台座中线重合）后，千斤顶顶升辅助平台，抽出横移台车，千斤顶回顶，使辅助平台落座于预制台座细沙上，如图 14 所示。在储存区按设计位置及数量布设钢支墩及千斤顶，在辅助平台 4 个角点钢支墩上布设 4cm 钢板，并通过 δ 1mm~2mm 钢垫板调平，控制钢支墩顶面标高误差不超过 ± 1 mm。辅助平台移动至设计位置后，千斤顶顶升辅助平台，抽出横移台车，千斤顶回顶，使辅助平台落座于 4 个角点钢支墩上。通过钢制抄手楔子将其余钢支墩从底部支顶至与辅助平台底部充分接触后，在钢支墩底部充填环氧砂浆，如图 15 所示。

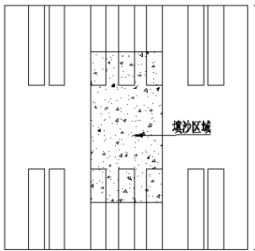


图14 辅助平台预制区调平示意图

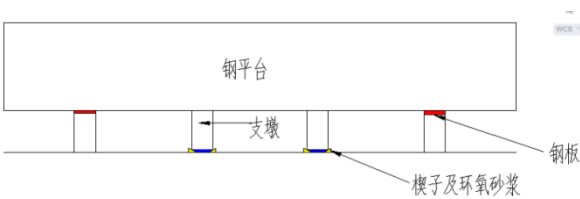


图15 辅助平台储存区调平示意图

通过精轧螺纹钢将墩身预埋内牛腿与辅助平台连接,使墩身与辅助平台连接成整体。每件墩身内部设置 8 个内加固牛腿,每个辅助平台设置 8 个滑道,分别对应 8 组内加固牛腿,加固精轧螺纹钢可在滑道内移动,用以适应不同尺寸的墩身。精轧螺纹钢直径 40mm,屈服强度为 1080MPa,通过贯穿辅助平台的精轧螺纹钢,连接器及接长螺纹钢、钢牛腿将墩身及辅助平台牢靠的连接在一起,使其变为一个整体,如图 16 所示。

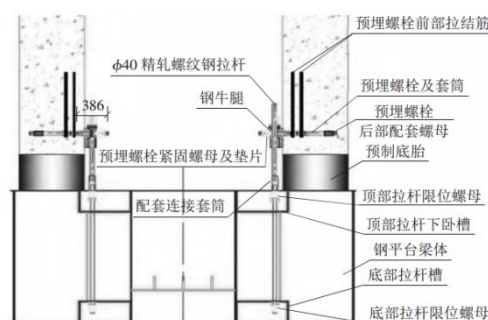


图16 墩台与转运平台间内加固系统

5.1.3 应根据墩台转运方案,分别选取重量最大、高度最高、重心最高的构件进行稳定验算。(对应规范 7.2.3)

(说明:稳定验算中,应选分别取重量最大、高度最高及重心最高的墩台计算。存放过程中导致墩台失稳的主要因素是风荷载的作用,转运过程中还受到启动、制动引起的水平惯性力作用。可能导致墩台相对于台车倾倒或墩台和辅助平台整体相对于台车倾倒。计算时,墩台相对于台车倾倒考虑桥墩及台车的结构变形,倾覆转动点从结构边沿向内移 20cm;墩台和辅助平台整体相对于台车倾倒考虑桥墩及出运平台结构变形,倾覆转动点从结构边沿向内移 10cm,如图 17 所示。)

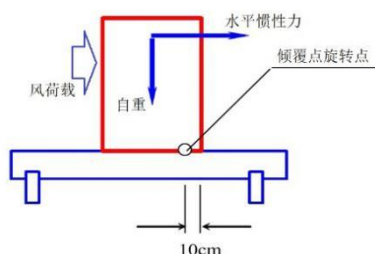


图17 墩台稳定验算的计算图示

5.2 码头装船 (对应规范 7.3)

5.2.1 墩台装船方法可采用吊装上船或轨道平移装船等方法。(对应规范 7.3.2)

(说明：大型预制构件装船是海上运输的重要一环，目前装船工艺主要有吊装上船、浮装、轨道平移装船和滚装上船等。吊装上船利用码头吊机或浮吊起吊墩台装船，需考虑墩台可吊性和码头有足够的位置够驳船和浮吊回转。浮装适用于具有自浮能力的大型构件，需考虑运输船舶具有一定的下潜功能。轨道平移装船将码头运输轨道和船上轨道对齐并驳接，墩台从存放场地移运至驳船过程中需保持驳船稳定，因此对码头强度和运输船舶压载水调节能力要求较高。滚装上船具有安全性高、摆脱吊装对重量和体积的限制和节约运输成本等优点，但装卸时间较长，受潮汐影响较大，需考虑船舶和码头有相应的滚装设施。港珠澳大桥使用了运架一体起重船吊装上船和轨道平移装船两种方法。)

5.3 水上运输（对应规范 7.4）

5.3.1 预制墩台应进行运输滑移及倾覆稳定性验算，必要时应设置临时固定装置。

(对应规范 7.4.6)

(说明：在驳船甲板设支墩可增加桥墩支撑，提高整体稳定性；支墩可采用钢桁架结构，按甲板纵骨间距排布，上表面应铺设 20~40mm 厚橡胶垫。抗滑移装置可由侧面支顶结构和拉杆结构组成，如图 18 所示。抗倾覆装置可采用桁架式或缆风绳式，如图 19 所示。墩台采用台车移运上船后，应将台车车两端顶紧加固。)

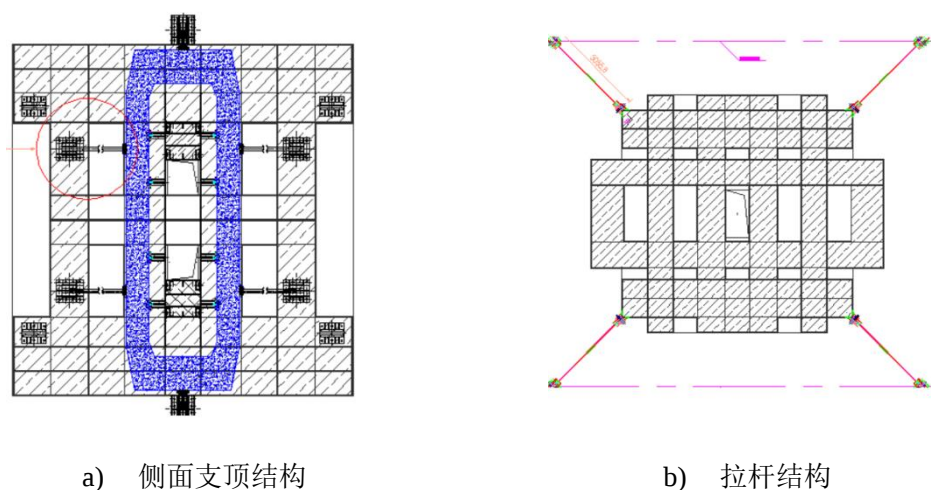


图18 抗滑移装置图

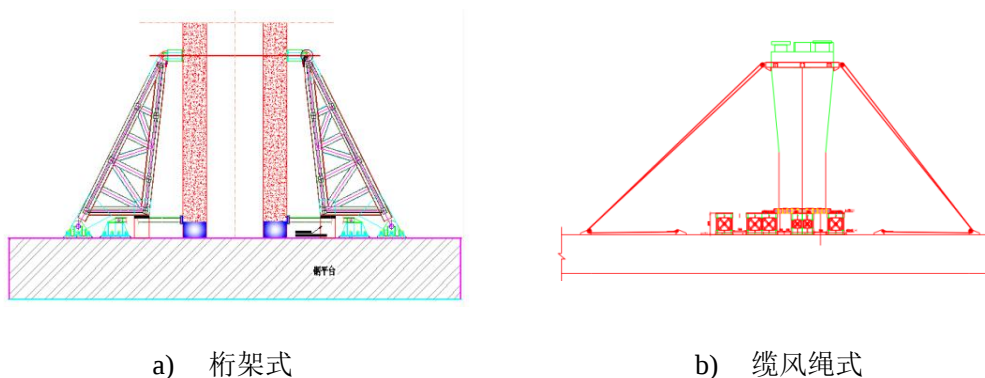


图19 抗倾覆装置图

6 水下墩台安装（对应规范第8章）

6.1 围堰结构（对应规范 8.2）

6.1.1 对于地质条件不均匀，存在孤石、片石等特殊地质情况的施工区域，宜采用无内撑或少内撑的锁口钢围堰，锁口钢围堰应满足以下要求。（对应规范 8.2.1）

（说明：无内撑锁口钢围堰施工技术相对成熟，对地质适应性较强，适用于水下地质情况复杂，岩面起伏大、覆盖层薄或无覆盖层的情况；围堰内侧无内支撑，安拆方便，施工周期短、成本投入小、耗材量少、倒用次数高、可全部回收利用、安全可靠。该方法钢围堰分块施工，对加工精度及施工精度要求较高；采用竖向连续的锁口，锁口间设置水囊或者灌注砂浆止水，止水效果较难控制，该围堰结构需浇筑封底混凝土实现底部止水，如图 20 所示。

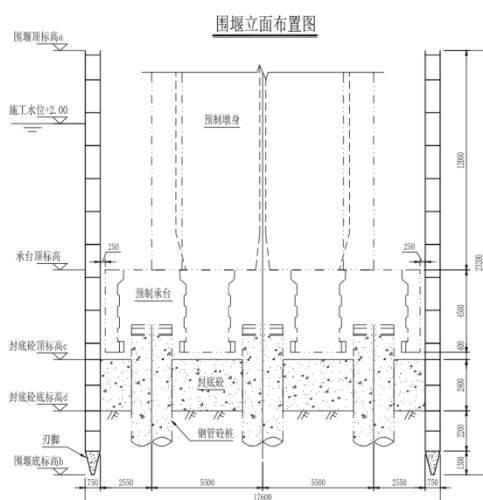


图20 无内撑锁口钢围堰法示意图

港珠澳大桥采用了无内支撑双壁钢围堰，围堰壁仓厚 0.75m，设计为可拆装式结构，平面分为 8 块，分块之间采用榫头式锁口与螺栓组合的方式进行连接。封底混凝土厚为 2.8m，采用水下 C30 混凝土。分 2 种类型，第一类型为直线型，共 4 块，第二类型为 L 型，共 4 块。平面分块见图 21。

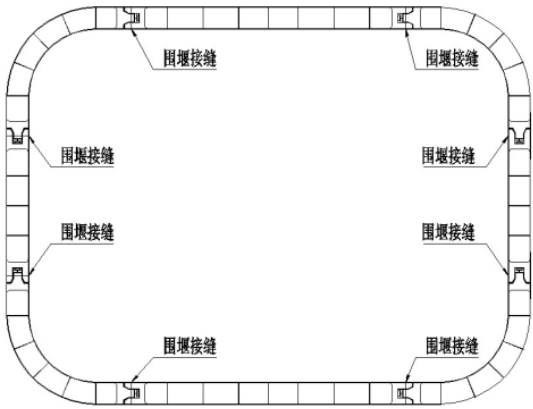


图21 围堰平面分块示意图

围堰侧板板厚为 12mm，材质为 Q345B 结构钢，局部受力较大位置采用 16mm 厚钢板，面板横向采用等边角钢进行加劲，底部角钢竖向加密。水平环及竖隔板均采用 12mm 厚钢板，材质为 Q345B 结构钢，竖板通长布置，水平环断开。围堰接缝装置：采用锁口与螺栓组合的方式进行连接，其中锁口连接沿围堰高度方向通长布置，螺栓仅在顶部 5.2m 范围内进行布置，锁口中间设置灌砂浆结构，如图 22 所示。

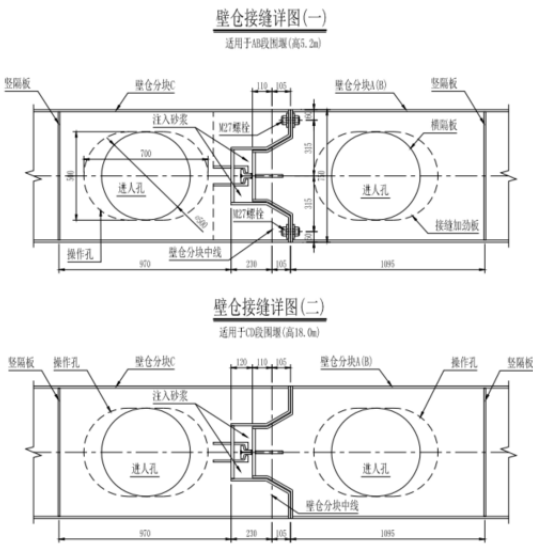


图22 围堰接缝结构图

无内撑锁口钢围堰施工流程如图 23 所示。)

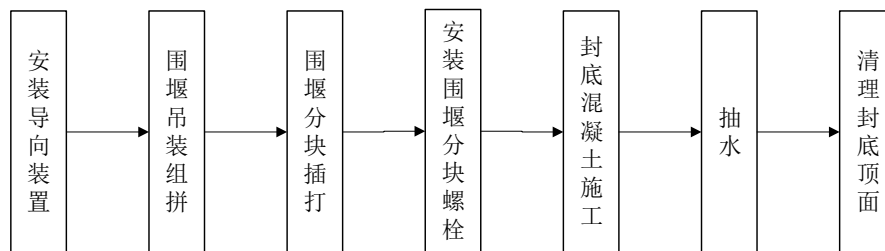


图23 无内撑锁口钢围堰施工流程图

6.1.1.1 锁口钢围堰应便于现场安装与拆除，应在围堰横向弯矩相对较小处进行分块，锁口处应采取可靠的止水措施。（对应规范 8.2.1.2）

（说明：导向装置作为围堰在着床以前围堰精度控制装置，当围堰着床以后，此装置对围堰的导向作用逐渐减弱。因此，围堰的初定位非常重要，围堰着床后应尽快下沉至稳定位置。围堰在海床上的拼装精度关键在于第一块围堰的位置与垂直度，所以在施工时选择安装的第一块围堰应为易于保证其精度的分块，因此选用顺水流方向的角块先进行安装，其结构自身双向刚度较大，而且导向结构对其位置的限制作用相对于其他分块来说比较大。）

6.1.2 对于地质条件较好，具有稳定不透水层的施工区域，宜采用直接插入不透水层的钢围堰，围堰结构应满足以下要求。（对应规范 8.2.2）

（说明：插入不透水层的钢围堰止水性好，港珠澳大桥深水区墩台安装采用了大圆筒钢围堰，整体性好，筒内设备利用效率高；与传统围堰施工相比，减少了封底施工，施工周期短；大圆筒可周转使用，经济性较好。大圆筒钢围堰法施工的技术难点在于大圆筒钢围堰的振沉和拔出，需要大型浮吊及高性能大功率液压振动锤组。其次施工水域水深需满足大型设备吃水要求；第三对地质要求较高，地层需均匀分布，且岩面埋藏较深，上覆土层需有一定厚度的不透水层

大直径钢圆筒作为码头、防波堤、护岸结构等曾在诸多工程中得到应用。大圆筒钢围堰安装施工方案为利用液压振动锤组将大圆筒围堰振沉到海床不透水层，从而形成干施工环境，如图 24 所示。

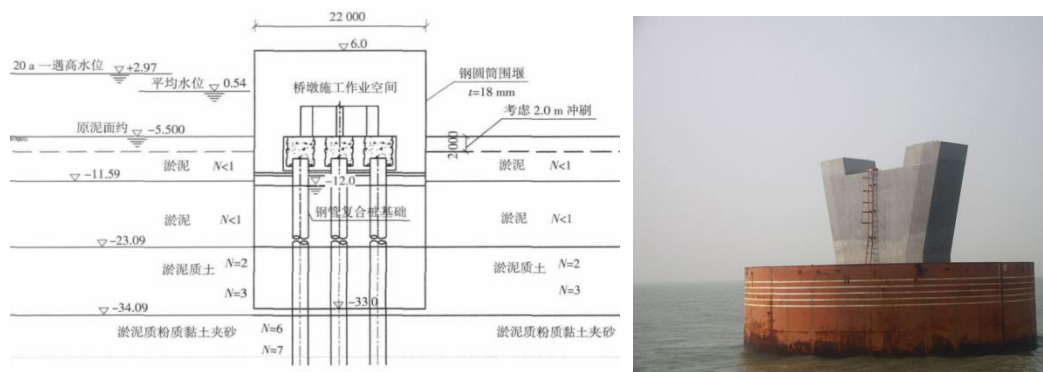


图24 大圆筒钢围堰法示意图

大圆筒顶部及底部筒壁进行钢板加厚处理。顶部 1.0m 范围及底部 0.5m 范围内钢板壁厚由 18mm 增加为 25mm；在大圆筒内壁设环向、纵向加强肋。纵向加强肋每隔 10° 设置 1 道，共 36 道，均为 T 型肋；环向加强肋从距钢圆筒顶部 5m 处向钢圆筒底部每间隔 3m 设置 1 道，共 10 道，其中 5 道 Π 型肋，5 道 T 型肋， Π 型肋和 T 型肋交错布置；采用十边形钢支撑桁架作为钢圆筒内支撑，共设 3 道内支撑，分别在筒顶以下 14m、20m、25m 处，与相应位置环向 Π 型加强肋焊接牢固，钢圆筒结构如图 25 所示。

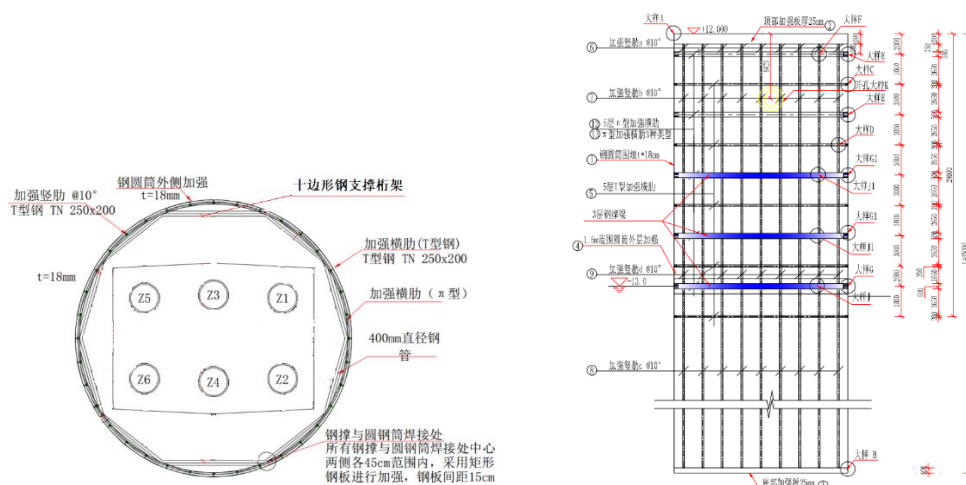


图25 大圆筒结构

港珠澳大桥选用 8 台 APE-600 型液压振动锤联动方案振沉圆筒。振沉体系由吊架、振动锤、同步装置、共振梁、液压夹具和液压设备等组成，如图 26 所示。液压振动锤采用双向齿轮箱多级传递实现机械同步，通过同步轴和同步齿轮箱的传递，保证多台液压振动锤在启动和停止阶段同步工作。



图26 大圆筒振沉系统示意图

大圆筒钢围堰受到振动锤组激振作用，可按振沉、墩台安装以及拔出三种工况进行计算。目前，有动摩阻力分析法（包括日本建机调查株式会社经验公式、法国 PTC 公司经验公式、美国 ICE 公司经验公式）、振幅分析法、波动方程分析法等多种计算方法。

1) 动摩阻力分析法

以 T_v 代表通过振动后降低了的摩阻力，以代表摩擦力变为时的降低率，那么，起振力和摩擦力的关系见下式：

$$p_0 \geq T_v = \mu T$$

2) 振幅分析法

该方法认为振动体系的振幅大于桩下沉过程中所需要的振幅，桩可下沉至设计要求深度。根据计算振幅的经验公式，认为振动体系的工作振幅可按照下式计算：

$$A_0 = \frac{2 \times \text{偏心力矩}}{\text{振动重量}} = \frac{2M}{Q_0}$$

3) 波动方程分析法

波动方程是一种重要的偏微分方程，在桩基工程领域，一维波动方程主要进行桩基的可打性分析以及桩基的承载能力分析。

大圆筒振动下沉主要还是依靠经验及经验公式来估计大圆筒所承受的动土阻力。因此在类似工程应用中，需采用多种计算方法综合分析确定。港珠澳大桥岛隧工程东西人工岛也采用大圆筒结构进行筑岛，振动锤所能提供的最大激振力与计算得到动摩阻力相比，得到振动系统的富裕系数，计算结果汇总见表 1。

表1 各计算方法结果汇总表

计算方法	富余度系数	
	西人工岛	东人工岛
日本建机调查株式会社公式	1.59	1.33
法国 PTC 经验公式	1.78	1.24
美国 ICE 经验公式	1.79	1.36
振幅分析法	1.42	1.25

港珠澳大桥大圆筒钢围堰施工流程如图 27 所示。

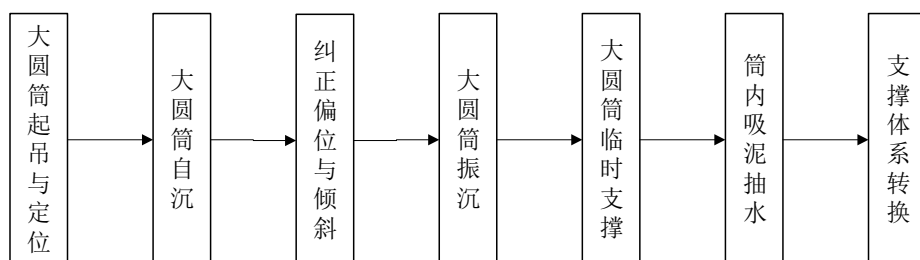


图27 大圆筒钢围堰施工流程

大圆筒钢围堰自沉和振沉过程中，都会出现偏位、倾斜现象，主要原因有以下几个方面：

1. 振沉区域的水流潮汐及风向导致的圆筒位移和倾斜；
2. 地表硬层高差较大产生的筒体自沉倾斜；
3. 振沉穿透层土质变化不一，各点端阻力差值较大，产生偏位和倾斜；
4. 振沉过程中，吊船起重量变化引起筒体偏位、倾斜及锚缆松紧度不均产生的船体变位，出现筒体偏位和倾斜。

振沉过程中应注意以下事项：

1. 自沉过程中应严格控制钩头吊重，若自沉顺利，应缓慢减载，徐徐落钩，确保钩头垂直吊大圆筒。
2. 大圆筒钢围堰振沉过程中，起重船的吊钩始终保持吊力的稳定，并控制钩头下降速度，以减小振沉过程中的倾斜与偏位；
3. 可在不停锤的情况下，采取停止钩头下降、振动上拔、松紧锚缆、升降两个钩头和仰俯扒杆等措施交替反复进行，直至筒体垂直度和偏位控制在允许范围内，再落钩继续振沉，直至达到停振标准。

钢圆筒振沉到位后，筒内需进行抽水吸泥，可采用在筒体直径方向上对称分层挖泥，采用高压水枪将筒内泥土冲成泥浆后，用泥浆泵将泥浆排至泥驳。

港珠澳大桥大圆筒钢围堰在墩台底标高以下位置安装钢抱箍，围堰与抱箍之间可设置支撑杆，使围堰与钢管桩之间形成支撑桁架，如图 28。支撑施工完成后应拆除顶部临时支撑，完成大圆筒支撑体系转换。)

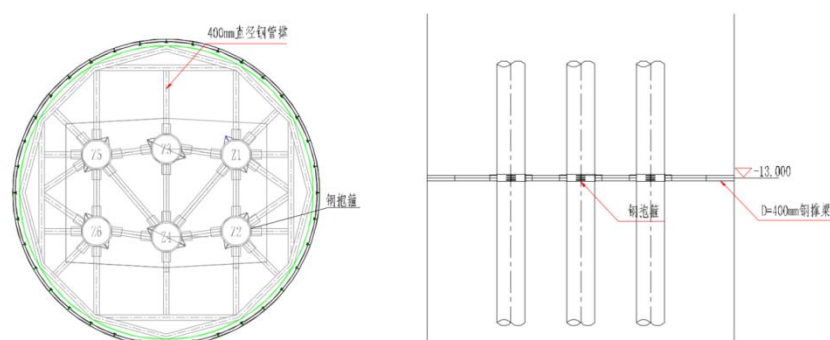


图28 大圆筒底部水平支撑示意图

6.1.3 采用柔性止水方法进行预制墩台安装时，应设置紧贴承台并附着于墩身的钢围堰，钢围堰应满足以下要求。（对应规范 8.2.3）

（说明：钢围堰整体附着于墩身上，紧贴承台上缘与预制墩台形成整体结构，该结构止水要点主要为钢围堰与墩台间隙。

港珠澳大桥柔性止水安装中采用的钢围堰如图 29 所示，钢围堰面板为 6mm 厚钢板；横向主梁为 HW390×300 型钢，间距为 100~250cm，根据内撑的位置设置；竖向主梁为 HW390×300 型钢，间距为 150~180cm，根据内撑及反压牛腿的位置进行设置；竖向加劲肋为 HW125×125 型钢，横向加劲肋为 100×8mm 钢板条，间距均为 50cm。内撑水平杆为 $\phi 168 \times \delta 16\text{mm}$ 钢管，竖杆及斜杆为 $\phi 140 \times \delta 8\text{mm}$ 钢管。内撑与墩身接触的位置设置可调节螺杆，使钢围堰与墩身接触紧密。可调节螺杆采用外套形式，为 $\phi 194 \times \delta 12\text{mm}$ 钢管，采用螺纹调节。钢管前段设置薄橡胶皮，防止对墩身混凝土表面产生刮痕或损伤。为方便钢围堰的拆除，竖杆与斜杆采用铰接的形式。墩台拆除钢围堰起吊时，内撑随之下落，逐步靠在钢围堰内壁上。墩台吊装并精确调整到位后，采用螺旋钢管将套箱壁与钢管桩进行连接，与钢管复合桩连接采用哈佛接头。

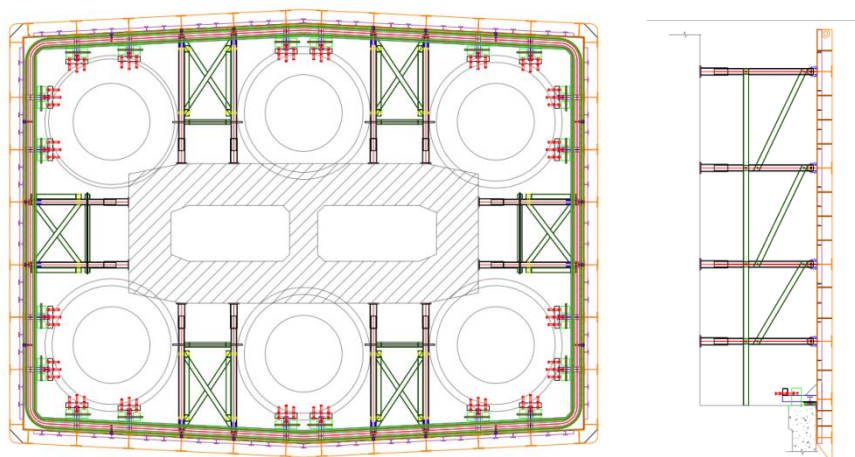


图29 钢套箱平面与立面示意图

钢围堰壁板上部设有防浪板，防浪板消波孔为类椭圆形，两端圆弧直径为 35cm，两半圆圆心间距 15cm，有效减弱浪涌对结构体系造成的挠动，如图 30 所示。

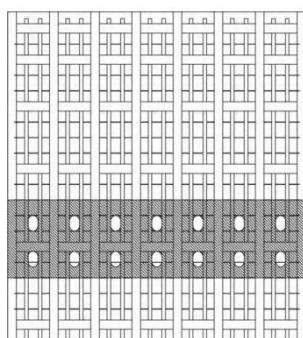


图30 钢套箱波高范围壁板设置消波孔

钢围堰与承台顶面设有 GINA 止水带，利用钢围堰自重力压缩，实现承台顶面与钢围堰间的止水。GINA 止水橡胶通过反压牛腿固定在套箱牛腿底部，沿底板布置一周，与钢围堰同步安装。GINA 止水带压缩完成后，通过楔形块将其锁紧，同时将套箱与混凝土块拉紧，形成稳固体系。为提升止水带的止水效果，可采用双峰 GINA 橡胶止水带，如图 31 所示。

港珠澳大桥双峰 GINA 止水带压荷载约为 2.5t/m，设计高度为 130mm，宽度为 250mm，压缩量约为 47.5mm，压缩率为 36.5%。该设计可实现 10~20m 水深情形下钢围堰与预制承台间隙的止水。)

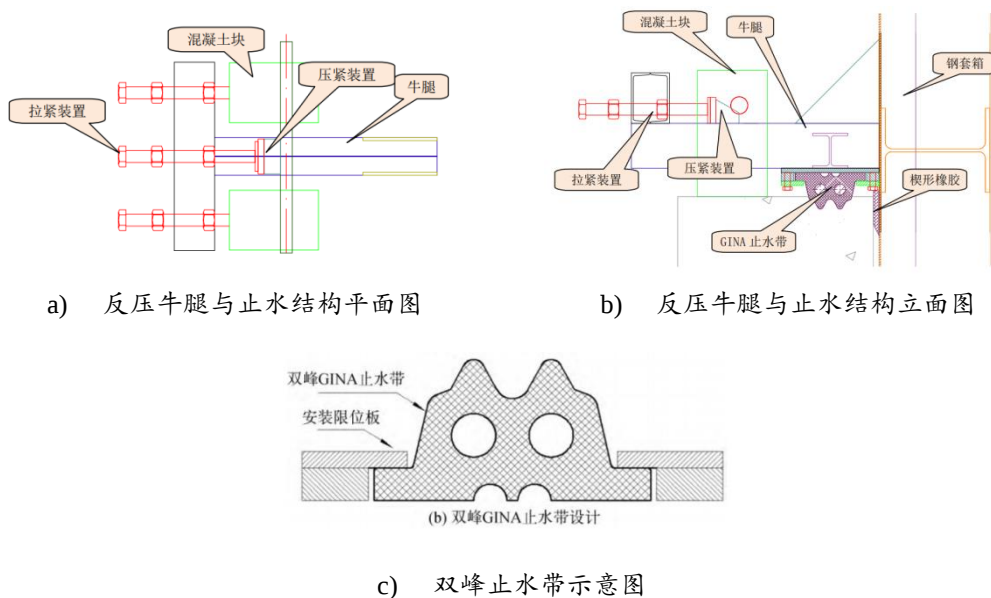


图31 钢围堰与预制承台间止水结构

6.2 吊装悬挂系统（对应规范 8.3）

6.2.1 预制墩台安装采用的吊装悬挂系统应满足以下要求：（对应规范 8.3.1）

（说明：吊装悬挂系统既是墩台吊装过程吊具的一部分，同时又兼着墩台就位后的临时支撑，以港珠澳大桥为例，说明吊装悬挂系统。

港珠澳大桥浅水区采用了多功能旋转吊具辅助“小天鹅”号运输安装的施工方案。施工时，墩台除需要纵横向移动外，还需要在悬吊状态下将预制件转动 90° 对位安装。为此设计了 2500t 级多功能旋转吊具系统（见图 32、图 33）由吊具结构梁系统、液压系统、电气系统、吊点、反压梁等构成。吊具系统总重 320t，长 23.2m，宽 18m，高 8m。在吊具结构梁系统之间设置调位油缸，使吊装部件平移及旋转，从而实现精确定位。吊具带载自航时，通过回转锁定装置，保证自航时吊具和桥梁部件平稳。2500t 级多功能旋转吊具具有起吊平稳、多种吊点互换、纵横移及旋转调节等特点，是具备起吊安装承台、墩身、墩帽等多种类型预制构件的吊具。

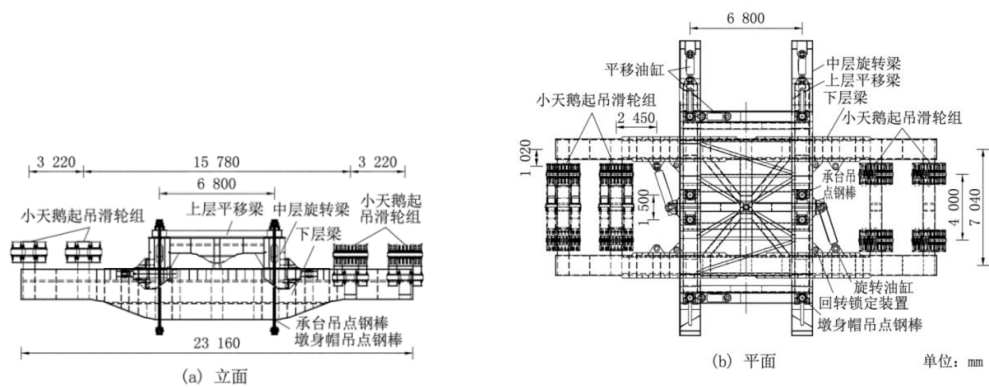


图32 2500t 级多功能旋转吊具结构示意图



图33 2500t 级多功能旋转吊具

港珠澳大桥承台共布置 8 个吊点，分别位于承台的 4 根角桩处，且每一组吊点的连线与承台中心线之间的夹角为 45° 。吊点布置及其结构见图 34。

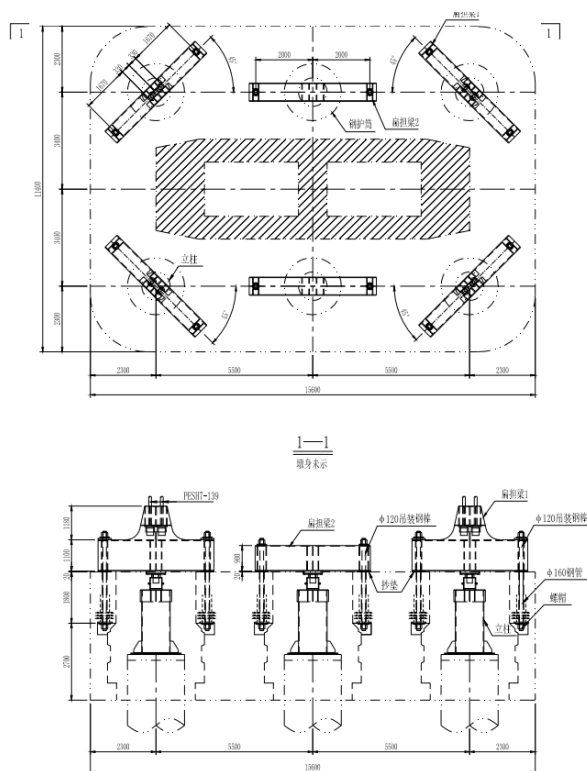


图34 吊点布置及结构图

港珠澳大桥深水区采用了 4000t 浮吊船起吊预制构件。墩台最大重量 3380 吨，悬吊系统 310 吨，合计 3690 吨。墩台运输至安装现场后，浮吊起吊墩台移动，移动浮吊，将墩台吊至钢管桩正上方，浮吊下落墩台。吊装构件墩位大、高度大，但墩台稳定性较差。港珠澳大桥设计了主要由上部吊具、下部吊具、反压梁及索具组成的悬吊系统，如图 35。上部吊具作为浮吊起吊墩台的连接机构，下部吊具作为吊装时稳定墩身的结构，示意图见图 36。反压梁是墩台吊装后的临时支撑结构，在承台预留孔顶部安装反压梁，通过高强度钢棒与承台连接，反压梁布置如图 37 所示。)

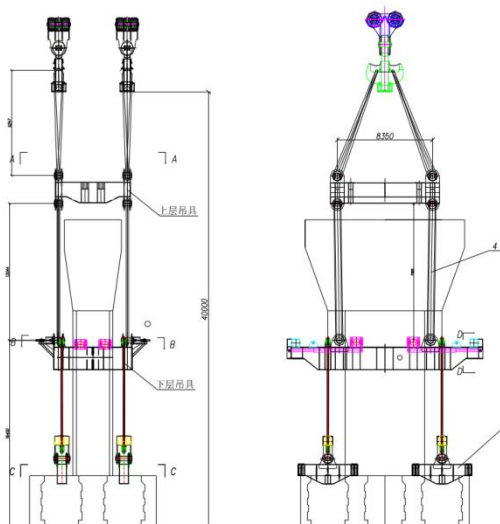


图35 吊具示意图



图36 墩台吊装示意图

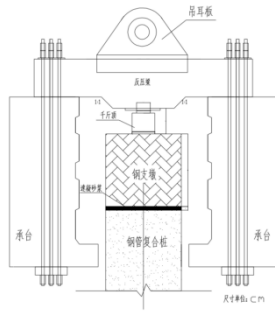
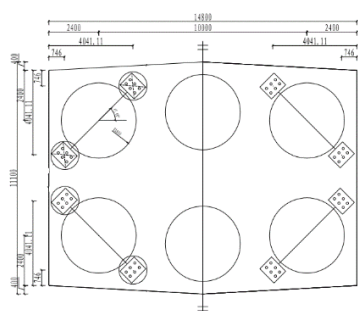


图37 反压梁示意图

6.3 围堰止水法墩台安装（对应规范 8.4）

(说明：围堰止水法墩台安装工艺流程一般如图 38 所示，对于采用竖向分层浇筑的，可不设置剪力键。)

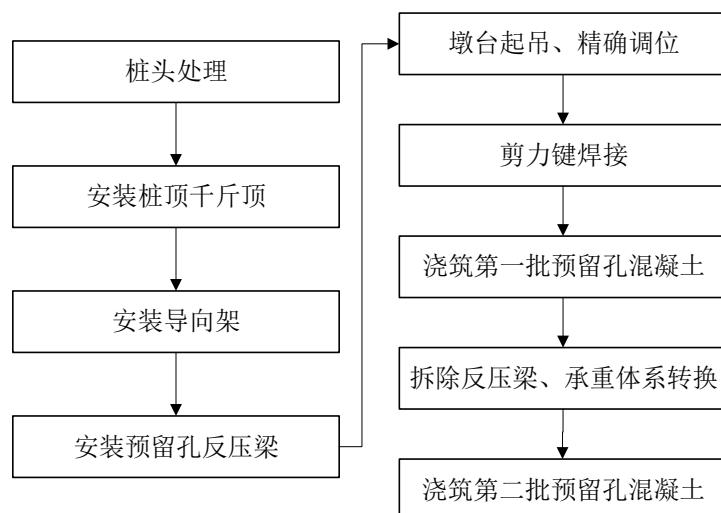


图38 围堰止水法墩台安装流程图

- 6.3.1 预制墩台吊装前应进行桩头处理和钢筋表面清理，避免钢筋伸出桩外影响墩台的安装。
- 6.3.2 应根据测量放样出的限位控制点设置导向装置。
- 6.3.3 墩台吊装应满足以下要求：
- 6.3.4 墩台调位精度应满足表 4 所列项目要求。

表4 预制墩台现场安装施工控制精度

序号	项目	允许误差 (mm)
1	垂直度	H/3000 且不大于 30
2	墩顶面高程	±10
3	轴线偏位	优先墩±20，其它墩±10

6.3.5 承台预留孔施工应按设计要求分批进行浇筑，通过体系转换完成所有预留孔施工，结构体系转换应满足以下要求。（对应规范 8.4.2~8.4.6）

（说明：以港珠澳大桥深水区墩台安装为例，墩台吊装前应进行桩头处理，切割钢管复合桩外壁钢管、凿除桩顶混凝土至桩顶设计标高，在四根角桩桩顶浇筑速凝高标号砂浆找平层，安装钢垫墩和千斤顶，调整千斤顶顶高至控制标高，并控制千斤顶顶面标高一致，千斤顶布置如图 39 所示。

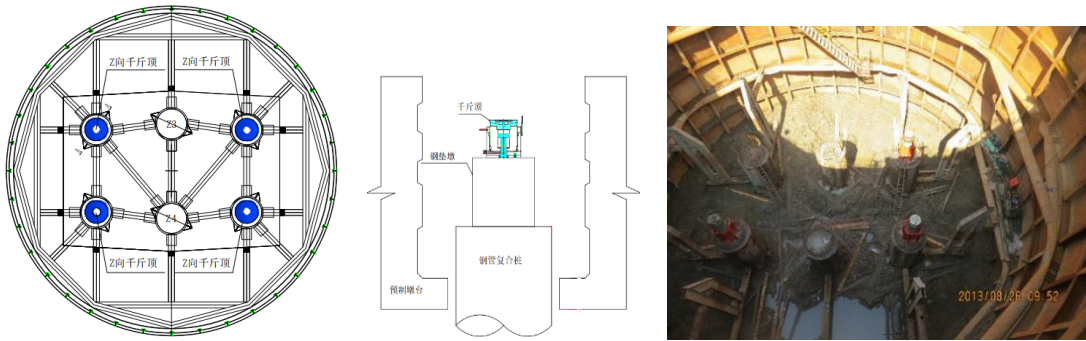


图39 桩顶千斤顶意图

桩头处理完毕后，在围堰底部支撑桁架位置根据测量放样出的限位控制点安装墩台就位导向架，导向架结构采用双拼 40#工字钢，导向架内部设置墩台调位顶丝，导向架如图 40 所示。

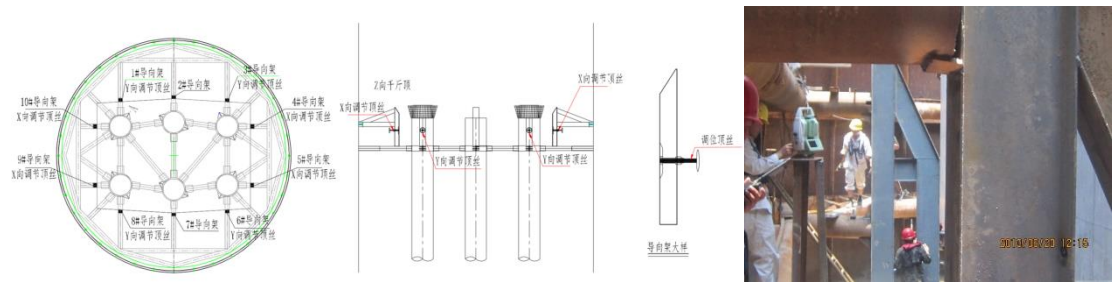


图40 导向架示意图

通过 GPS 静态测量实时调整墩台平面位置，使墩台准确套入钢管复合桩，通过导向架引导墩台就位，调整墩台使反压梁同时与千斤顶接触。

预制墩台吊装后，墩台利用预留孔内反压梁临时支承于桩基。墩台的竖向调位是利用反压梁与桩顶竖向千斤顶进行墩台位置调整；水平向调位利用调节导向架内部的调节顶丝或千斤顶完成。墩台 4 个角孔位置安装 Z 向千斤顶，详细布置见图 41。

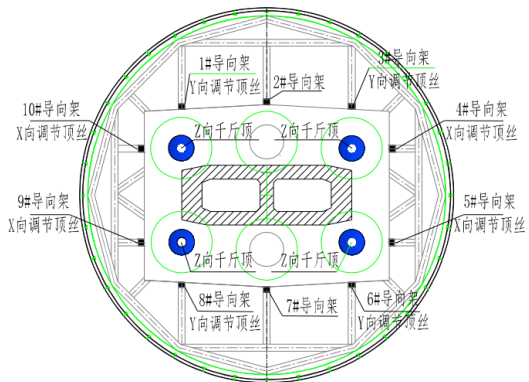


图41 墩台围堰内精确调位装置示意图

墩台调位完成后，将预制承台底部预埋钢板清理干净，在预埋钢板与钢管桩外壁之间对称焊接剪力键，剪力键布置如图 42 所示。

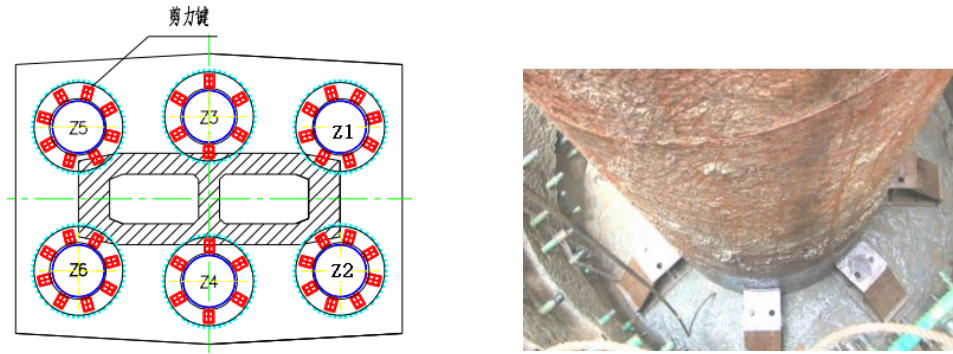


图42 剪力键示意景图

剪力键焊接完成后，连接承台预留孔钢筋，浇筑第一批预留孔（Z3/Z4）混凝土并养护，如图 43 所示。

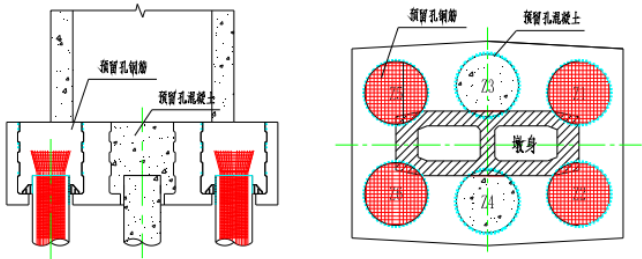


图43 第一批预留孔施工示意图

第一批浇筑的预留孔混凝土强度达到设计值的 80%后，对称拆除反压梁，承台荷载由第一批浇筑的预留孔混凝土和剪力键承担，完成体系转换。然后进行第二批预留孔（Z1/Z2/Z5/Z6）混凝土浇筑及养护，混凝土浇筑如图 44 所示。）

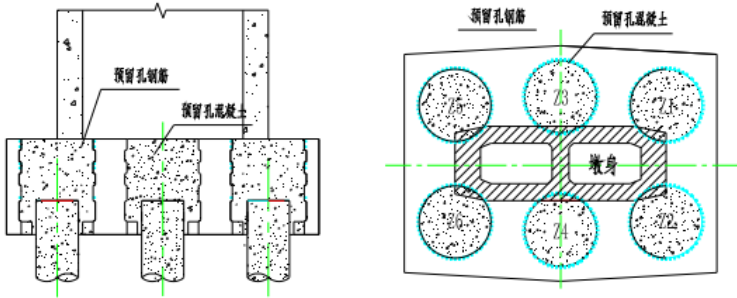


图44 第二批预留孔施工示意图

6.4 柔性止水法墩台安装（对应规范 8.5）

6.4.1 水下基坑开挖（对应规范 8.5.1）

6.4.1.1 采用柔性止水法进行墩台安装应在桩基施工前进行基坑开挖，基坑开挖前应开展以下工作。

a) 应进行现场实地调查，分析江（河、海）堤岸、闸门、围堰、管线、周边建（构）筑物、水下障碍物及其它设施的详细资料，并对基坑影响范围管线、建筑物等进行监控测量。

b) 应根据桥位水文地质条件、墩台构造、墩台安装工艺等条件，确定合理的水下基坑边坡比和基坑超挖量。

c) 水下基坑边坡比和基坑超挖量可通过计算水下基坑稳定性和回淤量进行理论分析，同时应进行现场试验予以验证，并在施工过程中根据现场情况及时修正。

d) 开挖前应进行一次完整的初始水下地形测量。根据《水运工程质量检验

标准》(JTS 257)规定绘制水深测量图。(对应规范 8.5.1.1)

(说明:需要确定合理的开挖边坡比和超挖量,以满足基础墩台安装要求,同时又不增加基坑开挖成本。基坑开挖的边坡和超挖量与墩位地质水文条件和墩台安装施工工序相关。港珠澳大桥埋置墩台水下基坑边坡比在 1:5~1:7,基坑底面较承台底面设计标高深 1.0~2.0m,基坑底面每边距承台侧边 1.0~2.0m。对于采用围堰施工的,应开挖至封底混凝土设计标高以下 50cm。

水下基坑稳定性和水下基坑回淤量是确定边坡比和超挖量的依据。目前针对边坡稳定性计算的理论方法主要包括极限平衡方法、塑性极限方法、数值计算方法等。港珠澳大桥基坑边坡稳定分析将动力、静力、渗流与边坡稳定极限平衡法进行耦合,同时计算边坡动力各个时步的安全系数,考虑动力、波浪及水下边坡渗流等因素。水下基坑回淤可参考《海港水文规范》(JTS145-2)附录P.0.2对于航道淤积的经验公式计算。目前对于海洋环境下水下基坑的计算方法还不够成熟,为了验证理论计算结果,进一步研究基坑开挖的可行性、边坡稳定性和回淤强度,需进行现场试验监测分析。港珠澳大桥在设计里程K22+853向北偏离桥轴线150m处进行了基坑边坡稳定及冲淤原位观测试验。

钢管桩外壁涂有防腐涂层,挖泥施工易造成涂层破损,影响桩基耐久性,应在钢管桩施工前进行水下基坑开挖。)

6.4.1.2 基坑开挖应按分段、分层进行施工,可分为粗挖、精挖、清淤三个阶段,开挖施工应满足以下要求。(对应规范 8.5.1.2)

(说明:对于开挖边坡的控制采取阶梯式开挖方法,根据基坑开挖精度的要求,初挖后扰动土在重力作用下自然坍塌,填充至两边预留超挖的部分,后局部找坡,开挖分层情况见下图 45。港珠澳大桥埋置式预制墩台水下基坑开挖考虑每 1.5m~2m 为一层,每一个船位布一遍斗后移船开挖下一条,以利于边坡坡比的稳定,沿着桥轴方向将基坑施工范围分成若干条,每条宽为 15m~20m。

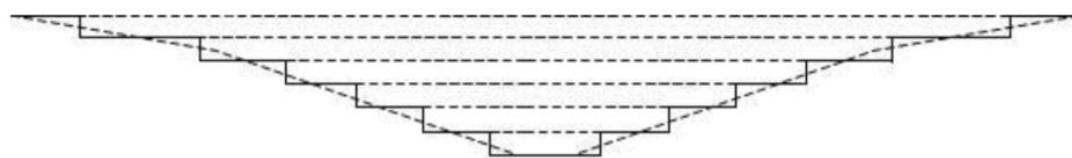


图45 分层开挖示意图

每一层交付区域采用重叠施工，为防止漏挖，抓斗船挖泥按条与条之间搭接 3m，段与段之间搭接 5m 重叠施工。）

6.4.2 承台与桩基之间柔性止水（对应规范 8.5.2）

6.4.2.1 承台与桩基之间采用分离式柔性止水体系时应满足以下要求。

a) 分离式柔性止水体系中须设置可嵌套于桩基上的托盘或抱箍或其它类似结构，分离式柔性止水结构应满足施工中的受力要求；结构顶面应具有可放置止水带的构造；结构与桩基接触面应具有可放置止水带或止水胶囊的构造。

b) 分离式柔性止水结构径向尺寸应考虑在承台预留孔尺寸、孔位和桩基施工的最不利施工误差下，环形止水带可覆盖承台预留孔底口；其与承台底面接触的顶面的平整度应不超过 3mm，内径误差应不超过 $\pm 10\text{mm}$ 。

c) 止水结构顶面应均匀布置高度限位装置，装置高度应与止水带设计压缩后的高度相同。限位装置顶面应磨平，标高误差应控制在 $\pm 3\text{mm}$ 以内。

d) 采用托盘结构时，应在环形托盘内部设置止水胶囊的充气管道；环形托盘内还应设置限位滑轮以保证托盘顺利吊装下放。

e) 分离式柔性止水体系采用的止水带或止水条的压缩量与止水效果应满足施工水深的止水要求，应在正式使用前对止水带/止水条进行压缩量与止水效果试验。

f) 分离式柔性止水体系采用的止水胶囊内部承受压力能力应不小于 1.3 倍施工水深压力，并在正式使用前对止水胶囊充气进行内压与止水效果的试验。（对应规范 8.5.2.2）

（说明：以港珠澳大桥为例说明分离式柔性止水工艺：承台与桩间柔性止水结构主要包括环形托盘、环形止水胶囊、顶面 GINA 止水带、现浇速凝砂浆及悬挂装置，如图 46 所示。托盘采用环形结构（保证止水结构的整体刚度，使整个止水结构受力均匀），每个托盘上设 6 根张拉钢绞线（承台安装到位后张拉钢绞线，使整个止水结构与承台底紧贴密实）。

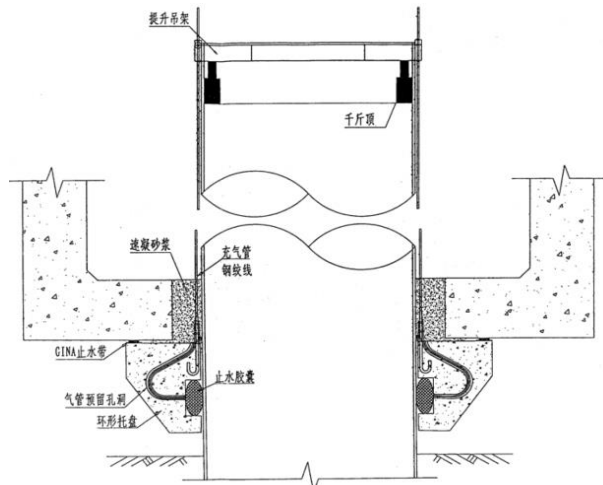


图46 分离式柔性止水结构示例

港珠澳大桥环形托盘如图 47 所示，托盘内壁设有环形预留槽，用于安装环形气囊，在环形托盘内部设有连接气囊的充气管道，充气管道从预制承台的预留孔伸出连接气源；在环形托盘的顶面均匀布置 4 个高度限位装置，保证托盘水平及防止止水带受压不均匀。托盘内径取复合桩钢管直径 $D+2\times 2\text{cm}$ 。GINA 止水带置于托盘顶部周围，止水胶囊嵌于托盘槽口内。先张拉钢绞线使 GINA 止水带压缩，实现承台底板与托盘间的止水；再向胶囊充气，实现承台与桩基间的止水。

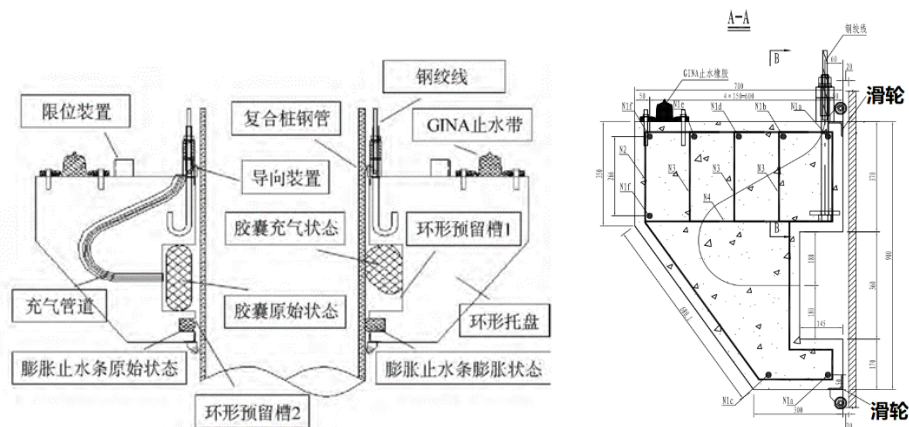


图47 承台与桩间柔性止水结构示例

止水胶囊如图 48 所示，为保证止水效果，港珠澳大桥设计要求止水胶囊正常充气压力 0.3MPa，极限充气压力 1.2MPa。施工过程中，采用了高强度橡胶复合材料和整体硫化成型工艺，止水胶囊主体结构部分采用高强度橡胶复合材料和复合帘子布整体硫化成型，橡胶材料具有高弹性、高强度，能满足 2MPa 以上内部压力，同时复合帘子布具有一定的伸张和收缩能力。



图48 止水胶囊示意图

托盘顶面 GINA 止水带安装固定如图 49 所示。垫板及压板的厚度均为 8mm，与螺栓整体预埋；托盘混凝土达到强度后，将上螺帽松开，拆除压板；安装 GINA 橡胶止水带，安装压板，拧紧螺栓。压板为分块式；垫板为整体式，由弧形钢板带焊接而成。

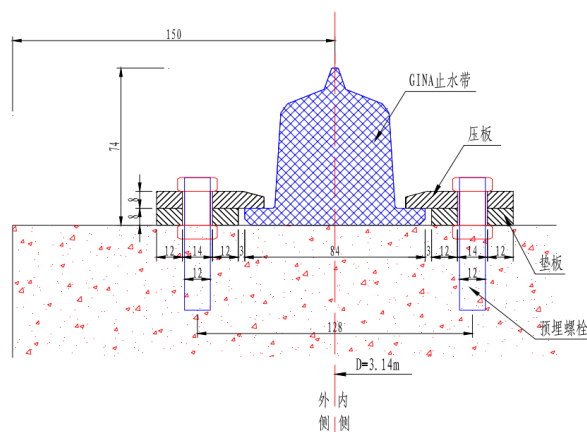


图49 托盘顶面 GINA 止水带安装示意图

托盘顶面高度限位如图 47 所示。GINA 止水带压缩后水平向为柔性结构，为防止托盘水平晃动、以及托盘在提升过程中倾斜造成一侧止水带压缩过度。港珠澳大桥在止水带外侧固定高度限位，在托盘四周均匀布置 4 个。高度限位为[10 槽钢，高度为 50mm。高度限位安装完成后，需检查其顶面标高，控制 4 个限位标高误差在 $\pm 3\text{mm}$ 以内，并将顶面磨平。)

6.4.3 墩台安装过程止摆与减震（对应规范 8.5.3）

6.4.3.1 柔性止水法施工中应控制最不利荷载作用下承台与桩基的相对位移，在后浇孔施工时，该位移值应不超过《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362）中规定的混凝土结构裂缝宽度限值。（对应规范 8.5.3.1）

(说明:埋置式预制承台后浇孔属于钢筋混凝土结构,《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362)对各类环境条件下的最大裂缝宽度给出了限制值;在后浇孔混凝土浇筑过程中,承台与桩基间的相对位移不能超过规范限值,否则后浇孔内混凝土裂缝宽度将不满足规范要求;为实现止摆与减震的控制,可采取焊接剪力键、布置临时锁定等措施,在后浇孔混凝土浇筑前实现承台与桩基相对位移控制。)

6.4.3.2 应对墩台安装过程采取可靠的止摆与减振措施,保证安装中墩台与桩基的相对位移满足施工要求,确保承台预留孔施工质量。

6.4.3.3 墩台止摆与减振应设置专门的工装进行锁定,工装应满足以下要求。

a) 工装布置位置应根据施工精度控制要求、结合理论分析结果,沿高度方向宜分别设置在墩台顶部、中部和底部。

b) 墩台顶部的锁定可通过安装在墩台吊具上的千斤顶实现;墩台中部的锁定可通过钢楔块和对拉收紧装置实现,钢楔块位于墩身与桩基之间;墩台底部的锁定可通过承台预留孔内千斤顶实现,千斤顶布置应防止墩台与千斤顶的碰撞,并能够适应桩基倾斜度的变化。(对应规范 8.5.3.2~8.5.3.3)

(说明:以港珠澳大桥为例说明柔性止水安装过程的墩台止摆与减震措施。港珠澳大桥在吊具上设置 16 个水平千斤顶,其中吊具与墩台抱紧和吊具与桩基抱紧千斤顶各 8 个。千斤顶设计吨位为 100t,机械锁承载力为 250t,见图 50。

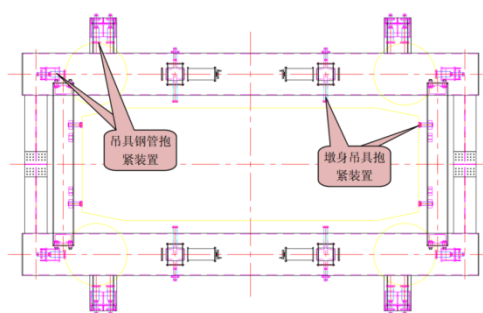


图50 墩台顶面抱紧示意图

港珠澳大桥墩台精确调整完成后,通过钢楔块将钢管桩与墩身抱紧,平面布置见图 51;钢楔块竖向间距为 1.0m。人工将钢楔块打紧,并且将钢管桩与钢楔块进行焊接。同时为保证桩整体受力,除了钢楔块的顶节装置外,利用收紧装置将钢管复合桩进行对拉,见图 52。

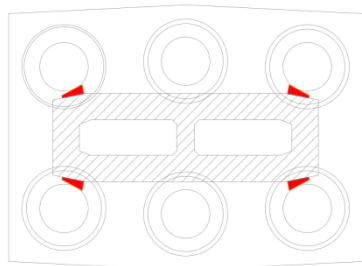


图51 钢楔块示意图

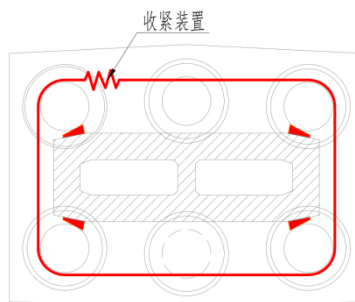


图52 钢管复合桩对拉示意图

在墩台底部预留孔内安装 12 个 100t 千斤顶，采用机械锁进行锁定，锁定承载力为 250t。千斤顶平面布置见图 53。由于钢管桩存在偏位（ $\pm 100\text{mm}$ ），为保证墩台下放过程中不会碰撞千斤顶且保证千斤顶的伸长量，单个预留孔 3 个千斤顶采用不同的长度。为适应钢管桩倾斜度的变化，千斤顶端头设置一个可竖向转动的球铰；千斤顶端头直径为 600mm，可适应钢管桩偏位 100mm 的要求，底部锁定千斤顶构造如图 54 所示。

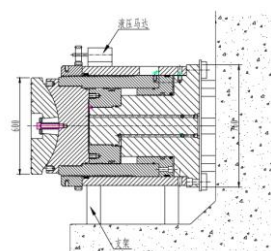
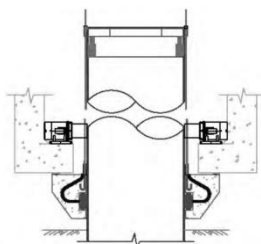
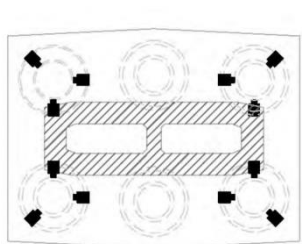


图53 墩台底部锁定示意图

图54 墩台底部锁定千斤顶示意图

港珠澳大桥钢围堰顶部与墩台吊具之间设置收紧装置，见图 55，对拉采用 5t 手拉葫芦施加约 3t 的荷载，索采用防护型合成纤维吊装带，型号为 R02-15，额定荷载 15t。

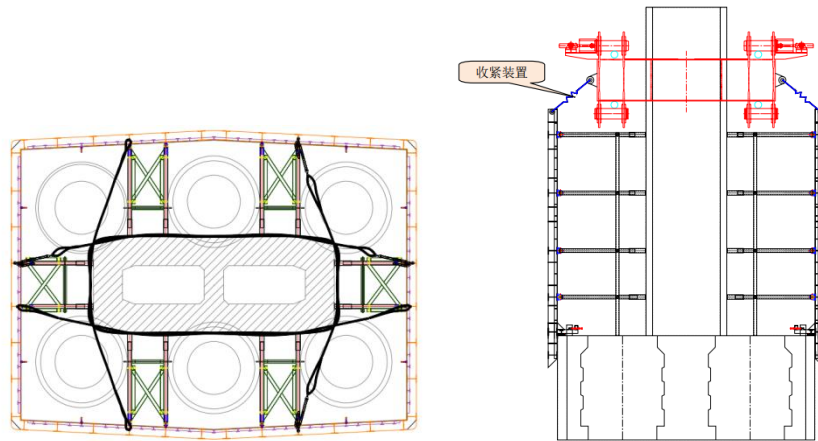


图55 钢围堰顶部与墩身对拉示意图

港珠澳大桥承台与钢围堰间的止水结构如图 56，承台顶面设置突出混凝土块，与钢围堰底部之间设置收紧装置实现止水功能同时实现钢围堰底部收紧。)

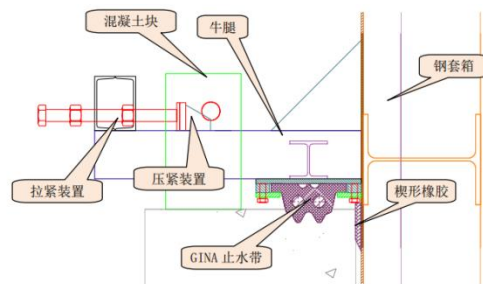


图56 承台与钢围堰之间收紧装置

6.4.4 墩台安装（对应规范 8.5.4）

（说明：柔性止水法安装的施工工艺流程如图 57 所示。）

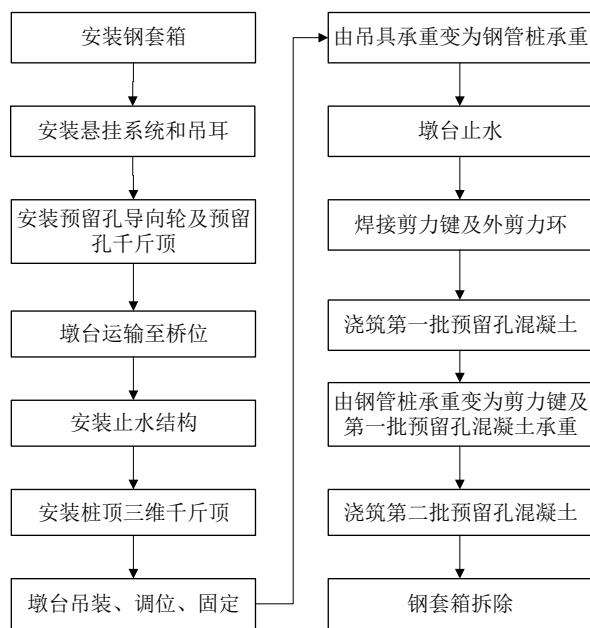


图57 柔性止水法安装的施工工艺流程

6.4.4.1 墩台安装前应对桩基表面进行彻底清理，确保桩基外壁光滑，桩外壁不得有突出的焊缝等结构，焊缝打磨控制余高应不大于 0.5mm。（对应规范 8.5.4.1）

（说明：墩台安装之前应对钢管桩表面进行打磨清理，港珠澳大桥钢管桩打磨区域如图 58 所示。）

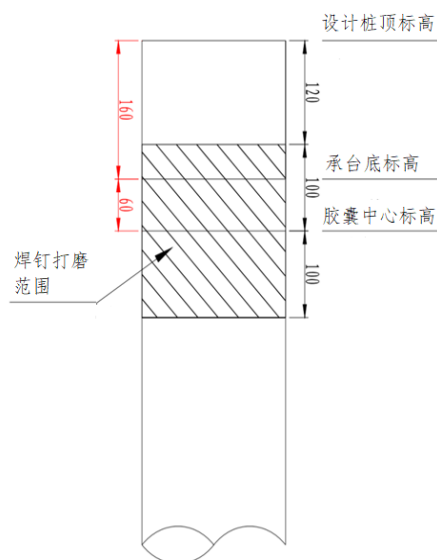


图58 钢管打磨示意图

6.4.4.2 钢管桩顶应进行抄平，作业后桩顶标高误差应控制在 $\pm 5\text{mm}$ 以内。（对

应规范 8.5.4.2)

(说明: 柔性止水法进行墩台安装时需要在钢管桩顶安装支撑及调位用的千斤顶, 为实现千斤顶顶托受力均匀, 需要对钢管桩顶进行抄平, 并控制抄平作业后的桩顶标高。)

6.4.4.3 应在承台预留孔内设置导向结构, 导向结构宜采用轮式构造。对应规范 8.5.4.3)

(说明: 墩台吊装导向轮通过承台的预埋件进行焊接固定, 结构见图 59。)

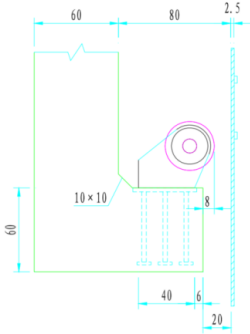


图59 柔性止水法墩台吊装导向结构

6.4.4.4 墩台下放到位后应在低水位时进行钢围堰内抽水, 抽水过程中应密切观察水位下降的速度, 和抗浮装置工作状态, 发现漏水问题时立即停止抽水, 解决问题后方可继续抽水。(对应规范 8.5.4.4)

(说明: 抽水过程中除了检查钢围堰渗水情况外, 还应关注墩台吊点处渗水情况。港珠澳大桥吊点设计如图 60 所示, 预制墩台底部钢拉杆锚固位置安装有预埋镀铬钢板, 用于安装钢拉杆锚板及密封罩, 钢拉杆锚固端设有止旋螺母, 便于钢拉杆拆卸周转, 单个锚头外围均设有防护罩。密封罩与预埋镀铬钢板间设厚度 5mm 的密封橡胶带, 实现罩内形成密闭空腔。)

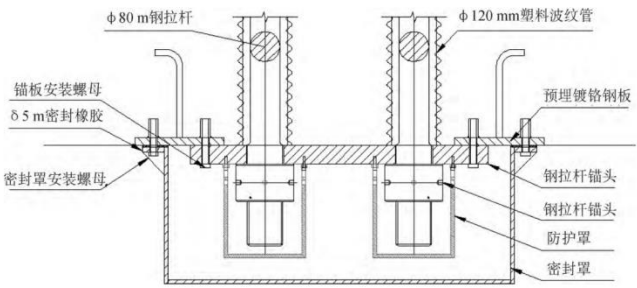


图60 吊点止水密封装置

抽水过程墩台承受浮力逐渐加大，对于可能出现上浮的情况，应关注抗浮装置受力。港珠澳大桥抗浮装置按设计高水位计算浮力，考虑有效波高大于 1 米的波出现频率取波高，计算最大浮力时水位=设计高水位+波高/2。利用二级吊具吊点，及墩台自身刚体结构，设计抗浮装置，如图 61 所示。

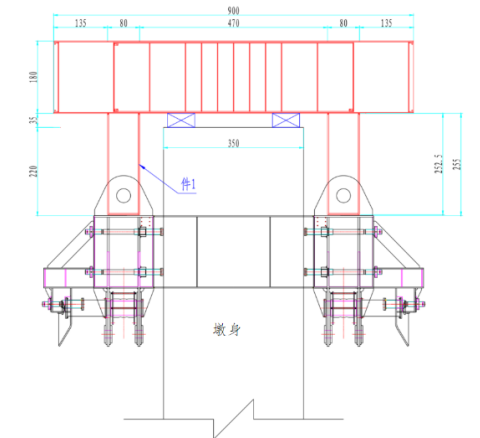


图61 抗浮反压装置结构图

港珠澳大桥墩台利用吊具体系支撑在图 62 所示的复合桩 Z1、Z2、Z5、Z6 钢管替打段上。复合桩 Z1、Z2、Z5、Z6 桩顶各设置了一套调节装置。墩台吊装到位后对其平面位置、高程进行精确调节。

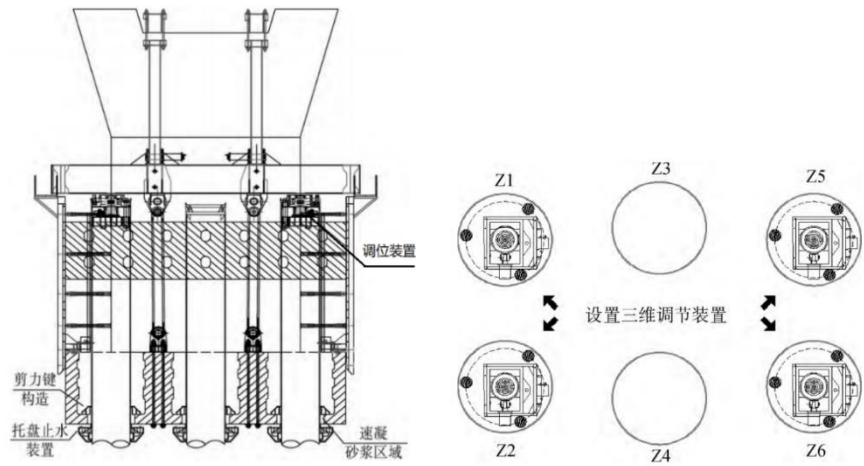


图62 柔性止水法施工墩台调位装置示意图

剪力键焊接完成后，需对桩基替打段进行割除作业，为保证墩台止水，原悬挂于桩顶的环形托盘需进行悬挂体系锚固转换。港珠澳大桥利用焊接于预留孔内桩基外围的环向剪力键和钢绞线将托盘锚固体系从桩顶锚固向桩身锚固转换。锚固体系结构见图 63。)

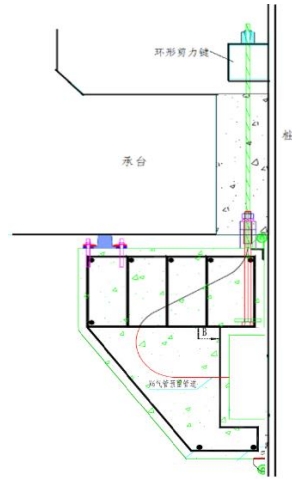


图63 环形托盘锚固转换图