



河道整治工程中直立式护岸结构选型

杨静思，陈志乐

(中交水运规划设计院有限公司，北京 100007)

摘要：针对横琴岛天沐河直立护岸段下卧深厚软土且陆域施工条件受限的情况，选择双排咬合灌注桩+格构式水泥搅拌桩基础、悬臂板桩+格构式水泥搅拌桩基础、扶壁结构+灌注桩基础3个直立式护岸结构方案，分别从结构安全、施工难易程度及工期、与周边工程衔接性、经济性等方面进行比较，推荐采用双排咬合灌注桩结构形式。工程实践结果表明：双排咬合灌注桩结构能较好地适应有限的施工场地和深厚的软土地基，工期较短且造价经济，可为类似河道整治工程提供参考。

关键词：河道整治；双排咬合灌注桩；直立式护岸；悬臂板桩；扶壁结构

中图分类号：U 617

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2021)10-0271-05

Selection of vertical revetment structure in river regulation

YANG Jing-si, CHEN Zhi-le

(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: In consideration of the limited construction area and thick soft silty soil, three structural schemes, i.e., double-row interlocking piles with cement mixing piles, cantilever sheet pile with cement mixing piles, buttress structure with bored piles, are compared from the structure safety, construction difficulty, construction period, surrounding projects coordination and economic efficiency. The results show that the double-row pile structure is the best due to its adaptability to the limited construction site and thick soft silty soil, and thus may provide reference for similar river regulation projects.

Keywords: river regulation; double-row interlocking piles; vertical revetment; cantilever sheet pile; buttress structure

1 工程概况

横琴新区是继上海浦东新区、天津滨海新区之后第3个由国务院批准的国家级新区。根据《横琴总体发展规划》，横琴新区定位为粤港澳区域型商务服务基地、世界级旅游度假基地、融合港澳优势的国家级高新技术产业基地。“天沐河防洪景观工程”属于横琴新区综合开发子项目之一，设计范围包括6.76 km河道的开挖疏浚、岸线整治、堤岸建设等，河道两侧堤岸总长13.67 km。在满足挡潮、排水要求的前提下，兼顾市政、交通、水环境、水资源、生态景观和游艇码头远期规划的要求。

天沐河北岸自东端入海处向内1 km规划游艇码头，受航道宽度限制，采用直立护岸结构。由于相邻工程较多，对施工条件限制大；本工程为片区整体开发的重要节点，工期紧张；下卧深厚淤泥类软土，同时须考虑直立式岸壁的挡土需求，故对直立式护岸结构形式进行深入分析研究。

2 自然条件

拟建场地主要由第四系海陆交互相的淤泥、陆相的粉质黏土、冲积及陆相粉质黏土、冲积相黏土、燕山三期花岗岩构成^[1]。第四系海陆交互相层淤泥以下土层构成：上部淤泥层、中部

陆相粉质黏土、中下部冲湖积相、陆相粉质黏土、冲湖积相黏土。其中,上部淤泥层(②₁层淤泥、②₂层淤泥、③夹层淤泥混贝壳、③层淤泥)工程性

能极差,标贯击数<3,中下部淤泥质黏土、粉质黏土的工程性能均较差。治理段地层物理力学参数建议值如表1所示,典型地质剖面见图1。

表1 地层物理力学参数建议值

土层编号	土层名称	天然密度/ (g·cm ⁻³)	十字板剪切强度 C_u /kPa	固快黏聚力 c /kPa	固快内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	实测标贯击数/ 击
② ₁	淤泥	15.7	8.0	6.8	15.5	1
② ₂	淤泥	15.5	9.6	6.1	14.8	1
③ _夹	淤泥混贝壳	15.5	—	5.0	14.5	1
③	淤泥	15.8	13.2	6.4	14.6	1
⑤ ₁	淤泥	16.1	17.7	6.7	14.7	2
⑤ ₂	淤泥质黏土	16.7	24.1	9.3	15.2	4
⑤ ₃	粉质黏土混砂	17.6	—	9.0	16.6	21
⑥ ₁	粉质黏土/黏土	19.4	—	21.1	17.1	13
⑥ ₂	黏土混砂	18.3	—	17.4	16.5	10
⑥ ₃ _夹	中粗砂	18.0	—	0	32.0	26
⑥ ₃	中粗砂	18.0	—	0	32.0	32

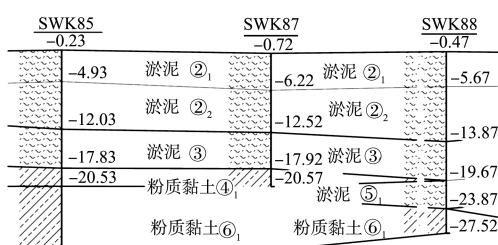


图1 直立堤地质剖面 (高程: m)

3 结构方案

3.1 结构选型原则

直立段选型应考虑以下工程特点:1)使用要求:须同时满足防洪过水断面面积要求、游艇码头靠泊要求、与后面陆域有效衔接,满足整体景观效果要求,具备挡土功能。2)施工受限:后方道路及填筑工程同步施工,直立段须先形成斜坡式围堰,为相邻道路填筑工程形成干地施工条件后,改建直立式结构。3)深厚软土地基:直立段堤岸水深较小,但区域淤泥及粉质黏土分布广且深厚,最深达25 m。即使打设塑料排水板进行堆载预压,地基承载力依然有限。

常用的河道直立式护岸结构有重力式挡墙、有锚板桩、无锚板桩、连排灌注桩等。该工程结构长度为1 km,堤顶高程3.7 m,河道清淤底高程-2.5 m。考虑后方施工条件受限,排除锚拉板

桩结构;考虑深厚软土地基条件,双排桩常配合使用水泥旋喷桩、水泥搅拌桩加强地基承载力;考虑使用要求,直立式结构应具备连续性,满足挡土防漏砂功能。结合以上工程特点,选取双排灌注桩+格构式水泥搅拌桩结构、悬臂板桩+格构式水泥搅拌桩结构、扶壁结构+灌注桩基础3种方案进行比选,从结构安全性、与周边工程衔接、施工工艺和工期、经济性等方面进行综合比较。

3.2 结构方案

3.2.1 双排灌注桩+格构式水泥搅拌桩方案

该方案直立式护岸结构采用双排咬合灌注桩结构,局部范围内采用框格式水泥搅拌桩加强。在亲水平台位置增加双排灌注桩,将复合斜坡式堤改造为直立式堤(图2)。混凝土灌注桩与混凝土素桩间隔布置形成咬合桩,桩径均为1.5 m,咬合厚度0.3 m,双桩间距4.5 m,桩顶高程1.5 m,桩底高程-30.0 m。框格式水泥搅拌桩加固范围如图2所示,高程为-20.0~1.5 m。在原泥面铺设1层100 kN/m有纺土工布,在堤脚处铺设复合砂肋软体排,吹填陆域粉细砂至1.50 m高程,堤身推填0.5 m厚中粗砂垫层至2.0 m,堤身插打排水板,在中粗砂表面铺设300 g/m²无纺土工布。濠

江路真空堆载联合预压后, 逐层铺设二级充填袋围堰至 4.50 m 高程, 后方陆域吹填至 3.70 m。道路范围分级加载至路面, 堤顶分层填筑至 3.7 m。

然后双排钻孔灌注桩施工, 冠梁体系施工, 水泥搅拌桩施工, 最后进行河道清淤。本方案工期约 21 个月, 施工进度见图 3。

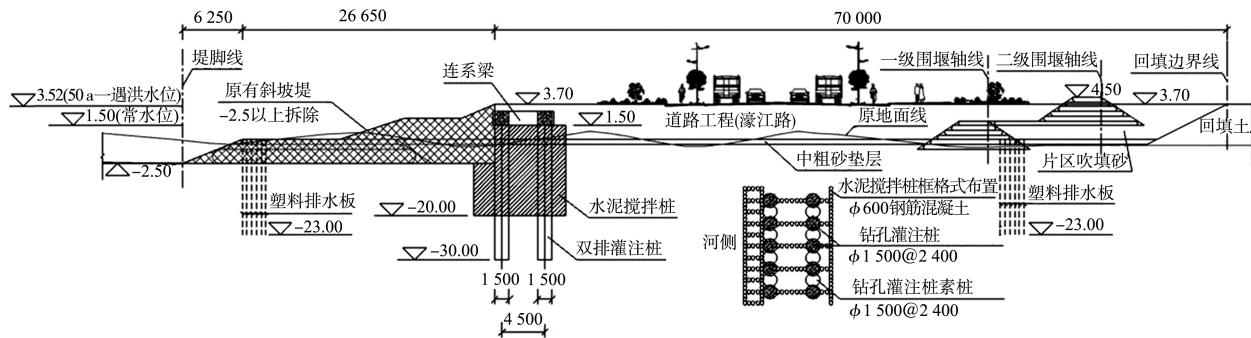


图 2 双排灌注桩结构方案断面 (高程: m; 尺寸: mm)

任务名称	工期/月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
双排灌注桩结构方案施工进度	21.0																					
一级吹填子堤至 2.0 m	2.0																					
吹填粉细砂垫层至 1.5 m	1.0																					
推填中粗砂至 2.0 m	1.0																					
插打塑料排水板	1.5																					
道路范围真空预压	6.0																					
二级吹填子堤	1.0																					
陆域吹填至 3.7 m	2.0																					
道路范围分级加载至路面	2.0																					
堤坝分层填筑至 3.7 m	4.0																					
双排灌注桩及联系梁施工	6.0																					
搅拌桩施工	6.0																					
堤脚管袋清除	2.0																					

图 3 双排灌注桩结构方案施工进度

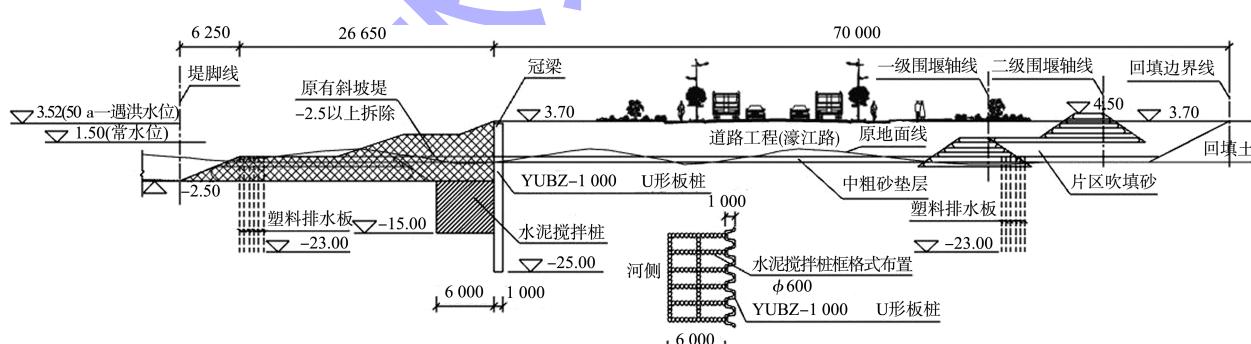


图 4 悬臂板桩结构方案断面 (高程: m; 尺寸: mm)

任务名称	工期/月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
悬臂板桩结构方案施工进度	21.0																					
一级吹填子堤至 2.0 m	2.0																					
吹填粉细砂垫层至 1.5 m	1.0																					
推填中粗砂至 2.0 m	1.0																					
插打塑料排水板	1.5																					
道路范围真空预压	6.0																					
二级吹填子堤	1.0																					
陆域吹填至 3.7 m	2.0																					
道路范围分级加载至路面	2.0																					
堤坝分层填筑至 3.7 m	4.0																					
U形板桩施工	6.0																					
搅拌桩施工	6.0																					
堤脚管袋清除	2.0																					

图 5 悬臂板桩结构方案施工进度

3.2.3 扶壁结构+灌注桩基础方案

重力式扶壁结构适用于较软土质基础, 且基坑深度不宜大于 7 m^[2]。该方案采用扶壁与灌注桩相结合的形式, 结构可靠、总体位移变形小, 地基承载力可满足要求(图 6)。空箱扶壁墙身高 6.1 m, 扶壁底高程 -3.30 m, 顶高程 3.70 m, 空箱内回填砂料, 扶壁下基础采用 3 排钻孔灌注桩, 直径为 0.8 m, 间距 2.4 m, 灌注桩桩尖打入持力层。先于原泥面铺设 1 层 100 kN/m 有纺

土工布，沿河侧做砂肋软体排至 2.0 m 高程，铺设中粗砂垫层至 1.50 m，分别打设约 30 m 宽范围的塑料排水板做真空预压和堆载预压。当真空度达 85 kPa 且保持 10 d 以上后开始充砂管袋吹填围堰施工，充砂管袋子堰分 2 级，1 级围堰顶高程为 2.50 m，2 级围堰顶高程按高于堤后陆域吹填高程 0.5 m 控制，最后至 4.50 m。真空预压

期为 4 个月，预压完成后即可开始堤后区域吹填。真空预压完成后开始挡墙灌注桩施工，之后开挖挡墙基槽，施工空箱扶壁，扶壁墙前设 1 m 厚抛石护脚，墙后分层回填中粗砂至 1.50 m 高程，1.5 m 高程以上回填砂性土。墙后回填至 1.5 m 以上后即可破除挡水围堰进行河底清淤。本方案总工期为 26 个月，施工进度见图 7。

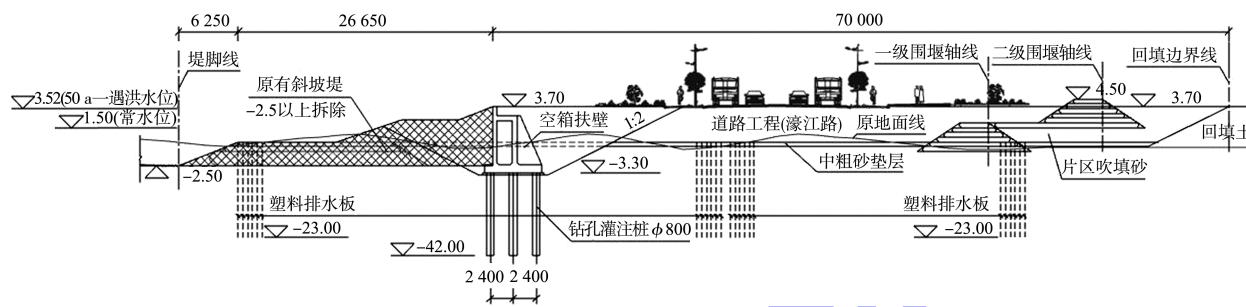


图 6 扶壁结构方案断面 (高程: m; 尺寸: mm)

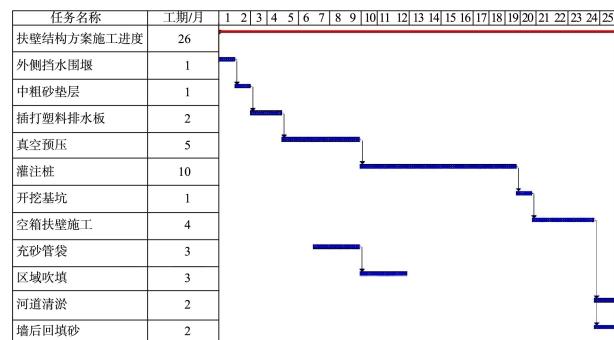


图 7 扶壁结构方案施工进度

3.3 方案比选

上述方案的主要技术经济指标见表 2。

表 2 关键经济技术指标比选

方案	结构安全及稳定性	施工工艺	施工工期/月	不确定因素
双排灌注桩+水泥搅拌桩	满足要求	不需要大开挖,有利于填筑工程尾水排放外海	21	结构较为新颖,已有较多成功案例
悬臂 U 形板桩 + 水泥搅拌桩	满足要求	不需要大开挖,有利于填筑工程尾水排放外海	21	专利产品,供货价格和施工机械存在不可控因素
扶壁+灌注桩基础	满足要求	需在围堰内进行干地施工,工艺复杂	26	工序复杂,有项目延期风险

从表 2 可知:

1) 结构可靠度: 3 个方案挡土高度相同, 所受水平力基本相同。双排灌注桩及 U 形悬臂板桩间采用水泥格构式搅拌桩, 可明显提高地基土水平抗力系数 m 值, 提高桩基水平承载力; 扶壁加灌注桩基础方案结构可靠性好, 总体位移变形小, 地基承载力可满足要求。3 个方案均能较好地满足挡墙位移控制要求。从堤防整体稳定角度, 扶壁方案堤基进行真空预压处理, 双排灌注桩和 U 形板桩方案堤基采用堆载预压和局部搅拌桩处理后堤基强度大幅提高, 对整体抗滑稳定起到关键作用, 且 3 个方案的桩基均穿透淤泥层, 进入较好土层一定深度, 可有效阻止土体深层滑动。因此, 3 个方案的整体稳定安全性均较好。

2) 施工难易度及施工工期: 双排灌注桩与 U 形板桩方案通过堆载预压和局部搅拌桩处理提高地基强度, 桩基平台在 2.5 m 高程, 桩顶冠梁、连系梁的施工均不需要进行大开挖, 整个施工期不需要对天沐河进行断流, 有利于填筑工程的尾水排放外海。施工工序相对简单, 且不影响堤身吹填。扶壁结构是传统重力式结构形式, 施工工艺条件成熟。但本工程受施工条件限制, 扶壁结构需要进行大开

挖, 在围堰内进行干地施工。扶壁下灌注桩施工在堤身真空预压完成后才能进行, 挡墙施工需要开挖后才能进行, 堤身填筑又需要在挡墙完成后才能开工, 工序复杂。施工工期方面, 扶壁结构方案工期为 26 个月, 比另外 2 个方案长约 5 个月。

3)与周边工程的衔接性: 后方陆域的道路和填筑工程须同步施工, 3 个方案均能满足同步施工要求。

4)经济性: 扶壁方案的地基处理范围较大, 扶壁式挡墙的费用最高, 双排咬合灌注桩次之, U 形板桩价格最低。

综上所述, 扶壁方案施工工序复杂、工期最长且造价最高; 悬臂 U 形板桩投资额最小且工期较短, 但由于 U 形板桩为专利产品, 目前国内仅有 1 个厂家可以生产^[3], 供货价格和施工机械存在不可控因素; 双排灌注桩方案工期较短, 投资额较低, 且有硬法切割等较高效的施工工艺^[4], 故推荐作为最终实施方案。

4 推荐方案的结构计算分析

根据 JGJ 120—2012《建筑基坑支护技术规程》^[5]对双排咬合灌注桩的计算内容进行分析, 包括嵌固稳定性、抗倾覆和抗隆起稳定性及整体稳定性计算(表 3), 双排桩桩间水泥搅拌桩的复合地基强度计算(表 4), 双排桩及连系梁的内力及位移计算(表 5), 灌注桩承载力计算, 灌注桩及连系梁的配筋计算。

表 3 咬合灌注桩计算结果

项目	稳定系数			
	嵌固	抗倾覆	抗隆起	整体
计算结果	2.24	2.24	3.01	3.2
规范要求	≥1.20	≥1.20	≥1.60	≥1.30

表 4 搅拌桩处理前后②₁淤泥层的地基强度指标比较

处理前后	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	地基强度指标	
			处理前	处理后(框格式布置, 面积置换率 56.4%)
	8.00	0.70		
	75.24	18.35		

表 5 双排桩结构内力

结构	泥面以上最大弯矩/(kN·m)	泥面以下最大弯矩/(kN·m)	最大剪力/kN	最大位移/mm
前排桩	-1 717.8	1 461.9	-583.3	40
后排桩	-1 749.1	1 289.4	-479.8	39
连系梁	-1 749.1	-	1 022.4	19

5 结语

1)河道整治工程中的直立式护岸结构类型较多, 在选择时应综合考虑多方面因素, 包括使用要求、地质条件、与相邻工程的衔接性、施工场地、施工工艺及工期、经济性等。

2)针对河道下卧深厚淤泥软土的情况, 当土体通过堆载预压或真空预压等地基处理亦不能满足岸坡稳定要求时, 可考虑采用框格式水泥搅拌桩, 面积置换率高, 可显著改善土体性能, 提高岸坡稳定性。

3)双排咬合灌注桩结构对满足挡土要求、地基软土层深厚、施工条件受限等特定条件有独特的适应性。其结构安全性可靠, 满足直立式护岸挡土要求, 施工工序较少、速度快, 不需要建设挡水围堰而对河道断流, 可直接干地施工, 经济性较好, 可在类似工程条件下进行推广使用。

参考文献:

- [1] 中交水运规划设计院有限公司. 横琴新区天沐河防洪及景观工程地质勘察报告(施工图设计阶段)[R]. 北京: 中交水运规划设计院有限公司, 2015.
- [2] 姜兴良, 汪映红, 邹开明. 复杂场地条件下深基坑支护方案[J]. 水运工程, 2018(4): 151-155.
- [3] 华东勘测设计研究院有限公司. 横琴新区天沐河防洪工程初步设计[R]. 杭州: 华东勘测设计研究院, 2015.
- [4] 陈志乐, 杨静思, 刘林. 双排咬合灌注桩在河道整治工程中的应用[J]. 水运工程, 2020(7): 164-167.
- [5] 中国建筑科学研究院. 建筑基坑支护技术规程: JGJ 120—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.