

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2022.12.041

海底管道海上接收井围堰设计研究

邹 恒, 马如彬, 董蕃宗

[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘 要: 管道陆海衔接是达标尾水深海排放工程设计中的一项重难点。以徐圩新区达标尾水排海工程为例, 顶管段管道与铺管段管道需要在堤外海上完成衔接施工, 衔接施工受到风浪及潮位影响, 堤外滩涂沉积了深厚的淤泥层。此外, 衔接点周边存在防波堤、海堤及渔业养殖区等保护要求较高的建构筑物, 海上施工不利因素较多, 施工难度大。本文介绍了海上接收井围堰施工的关键技术, 分别采用公式方法和数值方法对结构强度进行对比计算, 对方案合理性和可靠性进行论证。其成果可为类似工程提供借鉴。

关键词: 排海管; 水下管道衔接; 过水围堰

中图分类号: TU992.23

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2022)12-0159-04

0 引 言

在工业园区经济快速发展的同时, 环境问题不容忽视, 水污染的治理, 直接制约社会和经济的持续发展。达标尾水排海工程能够充分利用海洋的环境功能, 在不污染海洋环境的基础上, 更好地保障陆域水环境, 对工业园区的建设具有重要的意义。

徐圩新区达标尾水排海工程设计流量: 近期排放流量 8.57 万 m³/d, 远期排放流量 11.83 万 m³/d。设计排海管道 DN1400, 须穿越现状海堤, 沿设计路线铺向指定排放口, 海域段排放管全长 22.2 km。

采用顶管工艺穿越现状海堤到达一定水深的滩涂, 在堤外海上完成与海上铺管施工的管道衔接施工。衔接施工受到风浪及潮位影响, 堤外滩涂沉积了深厚的淤泥层。此外, 衔接点周边存在防波堤、海堤及渔业养殖区等保护要求较高的建构筑物, 海上施工不利因素较多, 施工难度大。为减小海上管道衔接施工对于邻边因素的影响, 减小海上施工风险和水土土方开挖量, 拟采用双排钢板桩围堰搭设海上接收井, 在接收井内开挖基坑, 水下作业完成管道连接。

1 建设条件分析

1.1 设计水位

根据《污水排海管道工程技术规范》(GB/T

19570—2017), 污水排海管道环境条件重现期应按 50 a 设计。该工程排放口设计高水位为 50 a 一遇的高潮位 P2%=3.66 m(85 国家高程基面, 下同); 设计低水位, 采用平均低潮位为: -1.72 m。

1.2 波浪

接收井施工时间安排在 7 月份, 该海域实测最大波高约为 1.5 m, 周期 4.3 s。海流流速约为 2 m/s。

1.3 海底地形

该项目海域管道路线位于连云港徐圩新区东侧近岸区域, 海域岸滩属于淤泥质海岸, 海床基本冲淤平衡、略有冲刷。原始地貌为总体呈西南高东北低的浅海平原, 水下岸坡平均坡度 0.56°。

1.4 工程地质

根据勘察结果, 海床模型 36 m 深度范围内, 涉及的土层包含: Ⅲ1 灰黄~灰色淤泥、Ⅲ2 灰黄~灰色淤泥质黏土、Ⅳ1 灰黄色粉质黏土、Ⅳ3 灰黄色砂质粉土、Ⅳ4 灰黄色粉砂、Ⅴ1 灰黄~灰色粉质黏土、Ⅴ2 灰黄色黏质粉土。根据土层的物理力学特性进行均化处理, 模型中海床部分分三层处理(从上至下): 淤泥, 淤泥质黏土和砂质粉土(见表 1)。

表 1 各土层物理力学特性一览表

材料	密度 / (kg·m ⁻³)	弹性模量 /MPa	泊松比	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)
淤泥	1 605	5	0.48	13	8.6
淤泥质黏土	1 900	30	0.42	11.6	9.0
砂质粉土	2 000	60	0.40	0.4	16.0

收稿日期: 2022-02-18

作者简介: 邹恒(1991—), 男, 硕士, 工程师, 从事水运工程设计研究。

2 海上接收井结构设计

2.1 顶管段管道结构设计

达标尾水排海管道是地下永久性隐蔽工程设施,管材选择安全性和可靠性较高的钢管。

为防止淤泥和油污的沉积,根据《污水排海管道工程技术规范》要求的管道最小流速为 0.6 m/s,一般可控制在 0.8~1.0 m/s。根据多方案的计算与比选,管道排放方式采用单根管径 DN1400 管道排放方案。

该工程排海管须穿越现状海堤,管道内尾水采用压力管排放,对重力式斜坡堤堤身造成一定的影响,同时从减少海底埋管施工对局部水体中悬浮物量和底栖生物破坏程度及有利于施工角度出发,管道穿堤及近岸滩涂管道施工方案采用有较大埋深的顶管方案。穿堤管道拟采用 DN1800 钢管,内套 DN1400 钢管,内外套管之间采用橡胶条和泥浆填充,以减小压力管道可能产生的自身震动对海堤堤身的影响,管壁与土堤结合处不会因震动而产生渗水问题。

2.2 铺管段管道结构设计

海上管道采用 S-lay 铺管结合冲射后开沟槽法施工,将管道在船上进行焊接和涂装,再利用敷管船将管道下沉敷设至海底既定的管位,再冲射开槽,将管道埋设至设计标高。

2.3 海上围堰结构设计

顶管段管道与铺管段管道需要在堤外海上完成衔接施工。为减小海上管道衔接施工对于邻边因素的影响,减小海上施工风险和水下土方开挖量,该工程采用双排钢板桩围堰搭设接收井,为顶管段管道与铺管段管道的连接提供有利条件。

接收井处现状海底泥面高程约 -3.4 m,通过船只海上赶潮施工打入钢板桩形成基坑围护,在围护内侧开挖基坑,采用水下作业方式完成管道连接。

双排钢板桩海上围堰为方形,净尺寸为 10.0 m × 15.0 m。堰顶高程为 3.00 m,围堰内侧坑底高程 -8.70 m。钢板桩型号为拉森 IVw,桩长 24 m,有效幅宽 600 mm,有效高度 210 mm,厚度 18 mm。内外两排钢板桩之间采用 $\phi 140$,壁厚 10 mm 的钢管做支撑,钢管内采用 $\phi 40$ 钢拉杆将内外两层钢板桩拉紧。两道支撑轴线高程分别为 -0.3 m 和 2.5 m,支撑水平间距为 1 500 mm。拉杆及钢管支撑与钢板桩连接处采用 28#a 槽钢做圈梁加固,围堰外侧采用两层型号为 20#a 的槽钢叠放,拉杆与圈梁之间采用铆钉连

接。围堰四角采用厚度为 20 mm 的钢板做角撑。材质为 Q235B,允许应力 $\delta=205$ MPa。

接收井围堰平面布置及接收井围堰断面见图 1、图 2 所示。

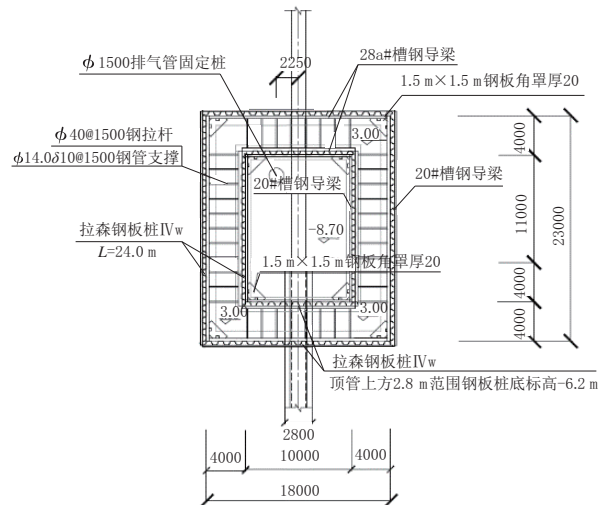


图1 接收井围堰平面布置图

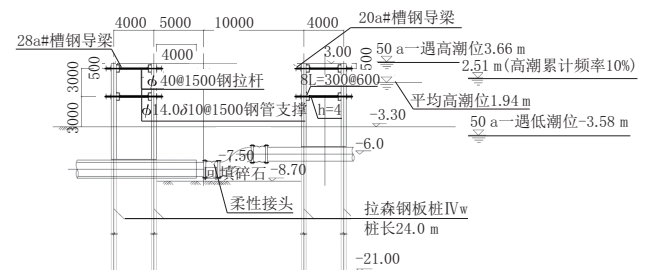


图2 接收井围堰断面图

3 钢板桩围堰强度计算

根据以上接收井钢板桩围堰结构设计方案,对设计方案的合理性和可靠性进行分析与计算复核。

围堰结构设计需要确定围堰高度和宽度、钢板桩的长度和选型,以及连接杆件的选型。其计算包括钢板桩插入深度计算,堰体抗剪、抗倾与抗滑稳定计算,以及拉杆与钢板桩的内力计算。

3.1 钢板桩入土深度计算

钢板桩入土深度应满足内侧钢板桩踢脚稳定,对钢板桩下一道拉杆安装点以下的围护结构作为脱离体,将作用于围护结构上的外力进行力矩平衡分析,从而求得抗倾覆分项系数:

$$K_{\text{踢}} = \frac{M_R}{M_S} \geq 1.20$$

3.2 堰体宽度计算

堰体宽度应满足抗剪、抗倾要求。

抗剪稳定验算采用美国 KARI 太沙基方法:

$$K_{\text{剪}} = \frac{2BP_{\Delta} \cdot tg\varphi}{3M} \geq 0.70$$

式中: M 为外力对开挖面的力矩; P_A 为堰中心线上的压力, φ 为内摩擦角。

抗倾稳定:

$$K_{\text{倾}} = \frac{0.5B \cdot G + B \cdot T}{M} \geq 1.40$$

式中: G 为堰体每延米重; T 为每延米钢板桩与土的摩阻力。

经过复核, 围堰的入深度、堰体抗剪与抗倾稳定均满足设计要求。

3.3 拉杆与钢板桩内力计算

钢板桩内力采用变位法进行计算, 在外力作用下, 内外侧两道钢板桩产生变位, 在两道拉杆处的横向变位相等。

悬臂梁受任意分布横向荷载作用下任意一点的挠度, 见图 3 所示。

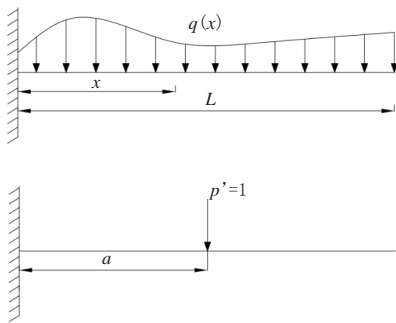


图 3 悬臂梁受任意分布横向荷载作用示意图

求任意一点 $x=a$ 处的挠度 $w(a)$, 在该点作用单位力 $P'=1$, 由单位力产生的挠度很容易通过卡氏第二定理求出, 为:

$$w'(x, a) = \frac{x^2}{6EI} (3a - x), \quad 0 < x \leq a$$

$$w'(x, a) = \frac{a^2}{6EI} (3a - x), \quad a < x \leq L$$

使用互等定理有:

$$\int_0^L q(x) w'(x, a) dx = P' w(a)$$

代入 $w'(x, a)$ 的表达式, 注意 $P'=1$, 得:

$$w(a) = \frac{1}{6EI} \left[\int_0^a q(x) x^2 (3a - x) dx + \int_a^L q(x) a^2 (3x - a) dx \right]$$

悬臂梁受三角形均布荷载, 长为 L , 三角形荷载最大为 q , 位于固定端。挠度公式为:

$$w = \frac{qx^2}{120EI} [10L^3 - 10L^2x + 5Lx^2 - x^3]$$

假定钢板桩桩身基坑底处为固定端, 求在外力作用下, 两道拉杆处的水平位移。

图 4 为双排钢板桩围堰受力图。

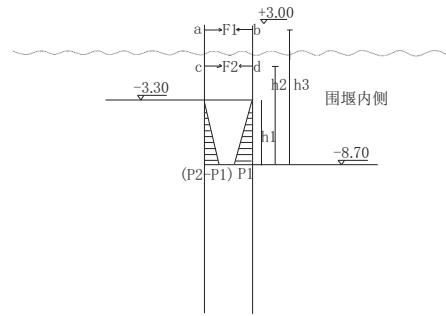


图 4 双排钢板桩围堰受力图

$$P_1 = K_a \gamma z$$

$$P_2 = K_p \gamma z$$

$$\delta_a = \frac{F_1 h_3^2}{6EI} (3h_3 - h_3) + \frac{F_2 h_2^2}{6EI} (3h_3 - h_2) - \frac{(P_2 - P_1) h_3^2}{120EI} [10h_1^3 - 10h_1^2 h_3 + 5h_1 h_3^2 - h_3^3]$$

$$\delta_b = \frac{F_1 h_3^2}{6EI} (3h_3 - h_3) + \frac{F_2 h_2^2}{6EI} (3h_3 - h_2) + \frac{P_1 + h_3^2}{120EI} [10h_1^3 - 10h_1^2 h_3 + 5h_1 h_3^2 - h_3^3]$$

$$\delta_c = \frac{F_2 h_2^2}{6EI} (3h_2 - h_2) + \frac{F_1 h_1^2}{6EI} (3h_3 - h_2) - \frac{(P_2 - P_1) h_2^2}{120EI} [10h_1^3 - 10h_1^2 h_2 + 5h_1 h_2^2 - h_2^3]$$

$$\delta_d = \frac{F_2 h_2^2}{6EI} (3h_2 - h_2) + \frac{F_1 h_1^2}{6EI} (3h_3 - h_2) + \frac{P_1 h_2^2}{120EI} [10h_1^3 - 10h_1^2 h_2 + 5h_1 h_2^2 - h_2^3]$$

$$\delta_a = \delta_b$$

$$\delta_c = \delta_d$$

$$F_1 = -112.5 \text{ kPa}$$

$$F_2 = 233.1 \text{ kPa}$$

两排钢板桩之间采用 $\phi 140$, 壁厚 10 mm 的钢管做支撑, 支撑水平间距为 1 500 mm。得到上下两道支撑所受最大应力为 33.9 MPa 和 70.3 MPa。

在求得两道拉杆支撑作用力之后, 可计算钢板桩和钢导梁受到的内力, 对钢板桩和钢导梁的强度进行复核。

4 数值计算分析

通过数值方法计算分析施工期间接收井围堰受到荷载条件下的结构内力, 设计风力 7 级, 设计风速 13.9 m/s, 平均最大波高 1.5 m, 周期 4.3 s, 水流流速为 2 m/s。在平均高潮位条件下, 滩涂面水深为 5.34 m。

数值模型需足够几何尺寸以满足数值计算的精度要求, 钢板桩围堰结构底部距离模型下方边界不

小于两倍波长,取模型地基深度 36 m。钢板桩围堰结构距离模型四周边界不小于一倍波长,顺水流方向不小于十倍波长,取 60 m。

围堰钢结构选择线弹性模型(见图 5),按照刚度等效原则将拉森钢板桩、拉杆和支撑分别进行简化处理。钢板桩换算成刚度等效的矩形钢板,拉杆支撑换算成等效圆形钢管。海床地基本构关系选择 Mohr-Coulumb 模型。钢板桩围堰与海床地基之间接触面形式为硬接触。海底土层土体取饱和土参数。

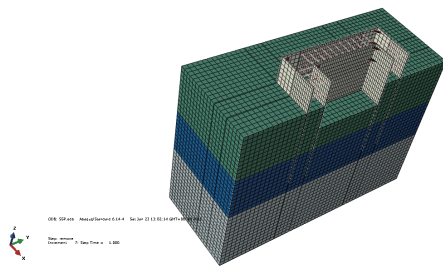


图 5 材料模型剖面图

图 6 给出了水流波浪长期稳态作用下拉杆的最大主应力,上层内支撑的最大主应力为 20.9 MPa,下层内支撑的最大主应力为 56.5 MPa。总体上内支撑应力远小于内支撑钢管材料的抗拉抗压强度。

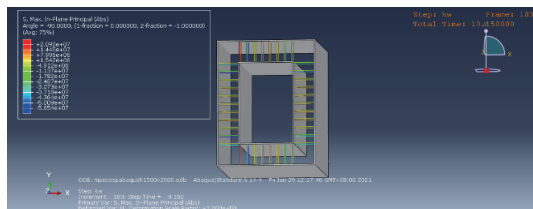


图 6 水流波浪长期稳态作用下拉杆的最大主应力图示

5 结 论

为减小海上管道衔接施工对于邻边因素的影响,减小海上施工风险和水下土方开挖量,该工程采用双排钢板桩围堰搭设接收井,为顶管段管道与铺管段管道的连接提供有利条件。

本文主要介绍了海上接收井围堰设计的主要内容,并对方案合理性和可靠性进行分析与计算复核,分别采用变位法和有限元方法对结构内力进行计算。对比之下,认为两种方法计算得到的支撑内力结果均在合理范围之内,并满足设计强度要求。

双排钢板桩围堰结构设计涉及到桩土作用和超静定问题,通过一定假设,采用变位法求解结构内力,为围堰结构中的钢结构选型或设计复核提供了一种有效方法。

参考文献:

- [1] 陈新.舟山市岛北污水处理工程排海管道的设计与施工[J].中国市政工程,2013(3):32-35.
- [2] 范旭征博.长距离排海管道陆海衔接计算研究[J].城市道桥与防洪,2021.
- [3] 马文龙,付海兴.海上长管道起浮,对接,沉放施工工艺探讨[J].中国建筑金属结构,2020,458(2):72-73.
- [4] 许金辉.潮位变动区排海管道的铺设[J].中国水运:下半月,2019(12):3.
- [5] 周连有.双排钢板桩围堰设计实例[J].港口工程,1986(4):3-7.
- [6] 王元战,郭富林.格型钢板桩结构计算方法[J].港工技术,2013,50(6):21.

(上接第 129 页)

6 结 语

本文以八一大桥南北立交独柱墩加固工程为研究背景,对八一大桥南北立交进行了抗倾覆加固的研究,提出了相应的加固方案,并对桥梁进行了抗倾覆加固计算,得出了以下结论。

(1)针对本文背景工程的具体情况,提出了三种抗倾覆方案,分别是墩柱加盖梁、增设墩柱以及增设桩基、外包墩柱加盖梁。结合桥梁的实际情况,考虑桥梁的受力、桥下空间、施工、景观、交通影响以及造价等因素,最终推荐方案三的加固方案。

(2)本文通过对 C 线桥第三段的抗倾覆计算可知,桥梁的抗倾覆能力不满足要求,需要对桥梁抗倾覆

加固,使其满足规范要求。

(3)考虑施工空间和方案的可行性,本文对 C 线桥第三段采用方案三加固,加固墩为 C20#~C22#,增设支座间距为 2.74 m,抗倾覆计算结果表明满足规范要求。

(4)由于本文依托工程的局限,最终选取了加固方案三。方案一和方案二均有其优点,在适宜的工程环境下可以考虑采用上述两种方案。

参考文献:

- [1] JTG 3362—2018,公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- [2] CJJ 99—2017,城市桥梁养护技术标准[S].
- [3] 彭卫兵,徐文涛,陈光军,等.独柱墩梁桥抗倾覆承载力计算方法[J].中国公路学报,2015,28(3):66-72.