

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2023.12.030

压力管顶管穿堤关键技术及安全影响分析

马如彬

(上海市城市建设设计研究总院集团有限公司,上海市 202301)

摘 要:江苏某地区达标尾水排海工程采用压力流排放,排海管井陆域工作井穿越现状海堤和滩涂地进入深海区,由于大管径管道施工过程中将对海堤安全及近岸滩涂地的水生态造成较大影响,结合现状海堤结构型式以及周边海域水文条件,经综合比选,推荐采用顶管穿堤方式施工,通过理论计算与有限元计算方法对顶管穿越海堤施工过程进行了安全影响分析与计算,并提出了有针对性的预防和减轻海堤沉降的关键技术,工程实施效果显著,类似工程建设可参考应用。

关键词:排海压力管;顶管穿堤;关键技术;安全影响

中图分类号: TU992.23

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2023)12-0111-04

0 引 言

在推动城市经济建设过程中,污水的排放成为限制企业入驻的限制因素之一,故解决好污水的排放问题至关重要。

江苏某地区达标尾水排海工程采用压力流排放,设计规模 9.8 万 t/d,实施排海管道总长 9 997 m,包括放流管长 9 797 m 及扩散管长 200 m。其中陆上顶管工作井至海上接收井长约 700 m 为顶管穿堤段,其余海域管路为埋管段,排海管道采用 DN1420 钢管,壁厚 20 mm。排海管道平面布置见图 1。

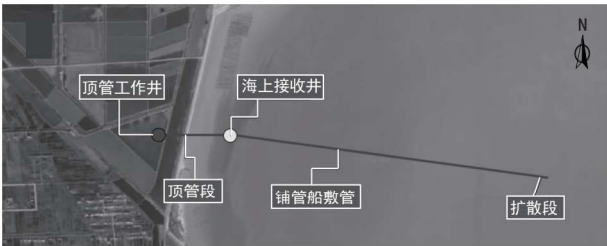


图 1 排海管道平面布置图

排海管入海处需穿越现状海堤,采用顶管穿堤方式,压力管道使用时将会产生震动,铺设在大堤的堤身对大堤的安全存在一定影响,需对压力管穿堤段提出专项设计方案,并对其穿堤施工引起的大堤沉降和整体抗滑稳定进行安全影响分析。

1 建设条件

1.1 设计水位

根据《污水排海管道工程技术规范》(GB/T

19570—2017)^[1]第 6.2.28(b)条,环境条件重现期应按 50 a 设计,因此,本工程排海管道设计高水位取 50 a 一遇高潮位 2.63 m(1985 国家基准面,下同),设计低水位取 50 a 一遇低潮位 -2.24 m。

1.2 波浪

工程区附近波浪测站全年有效波高 H_s 均值为 0.79 m,最大值为 3.39 m; H_{max} 均值为 1.21 m,最大值为 5.66 m; $H_{1/10}$ 均值为 0.92 m,最大值为 0.1 m; T 均值为 3.5 s,最大值为 6.1 s。

1.3 地质

穿越海堤处土层自上而下分布为 1-2 层素填土、2 层黏质粉土、3A 层黏土、4A 层砂质粉土,其中顶管穿越施工主要涉及第 2 层黏质粉土。各土层物理力学性质指标见表 1。

表 1 土层物理力学性质指标表

层号	$w / \%$	$r / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	e	E_{s1-2} / MPa	固结快剪(标准值)	
					C_k / kPa	$\varphi_k / (^\circ)$
1-2	29.5	18.7	0.850	6.61	7.26	21.0
2	23.6	19.4	0.694	10.06	6.69	28.74
3A	41.5	17.5	1.173	2.92	16.49	13.26
4A	23.6	19.3	0.694	11.61	4.80	30.3

2 压力管顶管穿堤关键技术

2.1 排海管入海点设计

本次排海管入海穿越现状海堤,经调查,管道穿越一线堤防通常采用架管或顶管方式。由于架管方式跨越海堤对堤顶道路过往车辆通行有一定影响,另外,管道跨越之后海堤之后,在近海滩涂段进行开槽

收稿日期: 2023-08-24

作者简介: 马如彬(1981—),男,硕士,高级工程师,从事水利工程设计工作。

埋设,实施过程中将对管道周边水体中的悬浮物量及底栖生物产生较大不利影响,因此,该工程推荐采用了近海滩涂段管道施工采用对环境影响较小的顶管方案。

该排海管道采用顶管的方式穿越海堤及近海滩涂后进入深海区。顶管工作井位于海堤内侧陆域范围,顶管接收井设置在海域侧泥面约 -3.0 m 处,顶管总长约 700 m 。

由于本工程采用压力管排放,根据《堤防工程设计规范》^[2],压力管不宜铺设在大堤的堤身穿越大堤。此次采用DN1820、壁厚 20 mm 钢管顶管穿越大堤,穿越后再敷设DN1420排海管道,内外套管之间采用减震橡胶支架支撑,见图2。

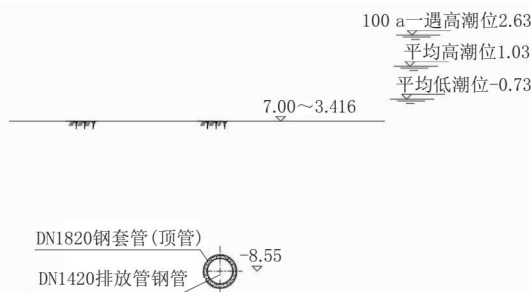


图2 顶管断面示意图

2.2 顶管穿堤段海堤加固设计

顶管穿越海堤的施工过程中,对堤身影响的主要原因是由于顶管顶进过程中周边土体产生变形,土体变形量跟地区土质情况相关,松软的、高含水率的地层中,顶管施工造成的土体变形相对较大。根据类似工程经验和监测数据,顶管在软土地层中顶进,造成的地表变形主要以沉降为主,对堤防设施造成的不利影响主要是绝对沉降量和不均匀沉降。

为减少顶管施工造成的土体变形,从而保证堤防设施的安全,采取了如下措施:

(1)管道周边的浆液置换。施工过程中,对推进完成后的管道周边,用惰性浆液将触变泥浆置换。惰性浆液采用M10水泥砂浆,通过压注触变泥浆的系统及管路进行置换。

(2)围岩注浆。触变泥浆置换为惰性浆液后,进行围岩注浆。利用管内注浆孔或埋设注浆管对穿越海堤段管道进行围岩注浆,范围为沿管道外壁向外 2 m 环状区域,浆液采用双液浆,见图3。

2.3 顶管套管封堵设计

DN1820钢管顶进完成后,拆除工具管内的刀头、机电设备,保留密封实施,防止海水倒灌。在DN1820顶管下方两侧每 6 m 焊接两个钢支撑橡胶

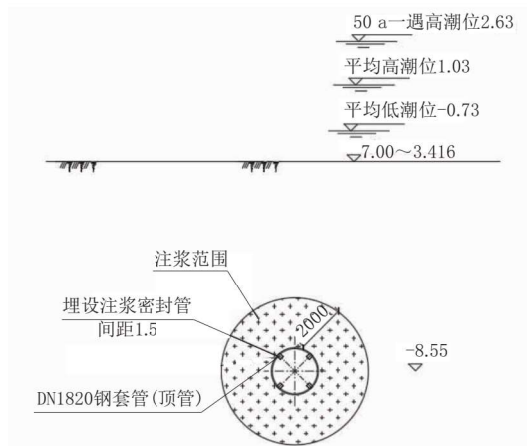


图3 围岩注浆断面示意图

滚轮,直接在井内利用原千斤顶顶进DN1420钢管穿管,钢管下吊后在沉井内焊接,先推进一节 3 m 左右的钢管,在固定好后安装法兰封堵板,然后在推进其余钢管,在沉井内按 6 m 一节焊好,完成一节推进一节,直至全部焊接完成后,将推进钢管与先前推进已做好封堵板的管道按照设计要求连接好后,再将DN1820钢管、DN1420钢管及顶管工作井间采用钢环、橡胶止水环和螺栓进行止水封堵,顶管接收井处内外套管间采用干拌袋装混凝土封堵,见图4。

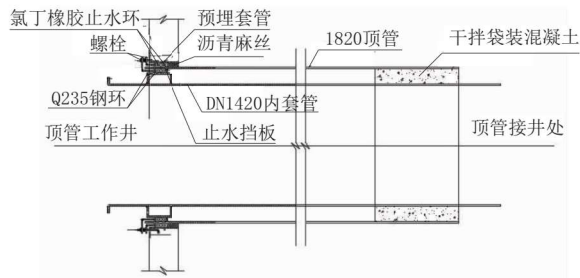


图4 顶管套管封堵示意图

3 顶管穿越海堤安全影响分析

本项目需要穿越现状海堤,此次采用顶管穿越,长约 700 m ,管中心标高 -8.55 m ,顶管采用泥水平衡工艺施工,从工作井出发,穿越大堤顶入海中。管材均为DN1820钢管,壁厚 $\delta=20\text{ mm}$ 。

根据地形测量资料,现状海堤路面标高 7.0 m ,堤脚与现状地坪相接,标高约 4.17 m ,本次穿越大堤段顶管覆土厚度为 $10.89\sim13.72\text{ m}$ 。为了分析顶管施工对大堤沉降位移的影响,本次影响分析采用理论公式法及有限元数值模拟法两种方法预测分析顶管穿越施工引起的大堤变形。

3.1 顶管施工影响沉降估算

(1)经验公式法

关于顶管施工引起的地层变形国内外对各种计

算方法做了大量计算和研究，比较典型的经验方法有国外的 Peck 法^[3]。下面将采用这种方法对顶管施工沉降进行分析。

Peck 法横向地面沉降估算公式为：

$$S(x)=S_{\max}\cdot\exp(\frac{x^2}{2i^2})$$
$$S_{\max}=\frac{V_s}{\sqrt{2\pi i}}$$

Peck 公式中有 V_s 和 i 两个参数。合理确定这两个参数对于正确预测地面沉降的量值和分布情况起着至关重要的作用^[4]。

a. 地层损失 V_s

根据统计,在正常施工条件下,地层损失 V_s 可表示为：

$$V_s=V_i\pi R^2$$

式中： V_i 为地层损失率,参考相似工程顶管施工经验,本次沉降计算时, V_i 取用 5% ; R 为掘进机外半径。

b. 沉降槽宽度系数 i

研究表明, i 取决于接近地表的土层强度、顶管埋深和顶管半径,计算公式为：

$$i=\frac{Z}{\sqrt{2\pi}\cdot\tan(45^\circ-\phi/2)}$$

式中： Z 为地面至顶管中心深度； ϕ 为土的内摩擦角。

本工程顶管穿越段海堤下管道中心线高程约 -8.55 m,海堤堤顶标高 7.0 m,采用 Peck 公式计算的海堤堤顶处沉降值结果见表 2。

表 2 不同位置处顶管穿堤地面横向沉降计算成果表 单位:mm

穿堤位置	x/m					
	0	5	10	15	20	25
堤顶	5.89	4.99	3.0	1.29	0.39	0.08

如表 2 所示,顶管施工后,最大沉降出现在顶管中心处,堤顶最大沉降值为 5.89 mm。

(2)有限元分析法

本次采用有限元分析软件建立了顶管施工过程的有限元模型,预测施工过程引起的土体变形情况。

模型建立：

a. 土体采用岩土工程中较为常用的硬化土模型。计算中土层分布采用邻近工程地质钻探资料,地质参数根据土层物理力学性质参数表设置。

b. 地下水位按照地质勘察报告提供的数据,取地面以下 1.0 m。

c. 管道和土体间的相互作用模拟采用无厚度的 Goodman 接触单元。

d. 计算区域:竖直向 Y 向取距离管道管底以下 20 m,水平向 X 向取管道穿越处两侧各 20 m,共 40 m。计算模型及结果见图 5 ~ 图 7。

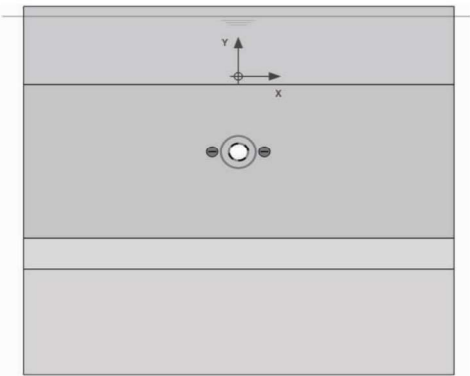


图 5 顶管施工引起大堤沉降计算模型

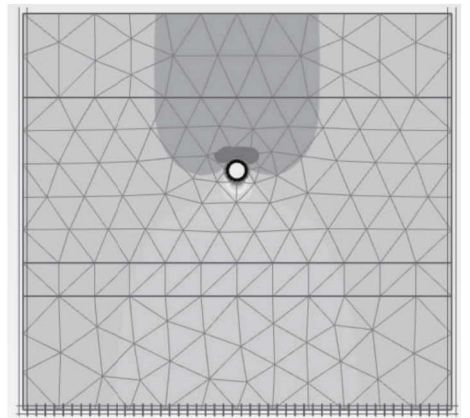


图 6 顶管施工引起大堤沉降计算云图

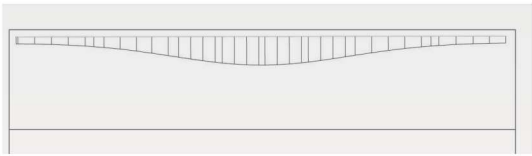


图 7 顶管施工引起大堤上部防浪墙墙顶沉降变形曲线

由计算可知：顶管施工引起大堤的最大沉降量发生在顶管中心轴线处,约为 5.80 mm。

采用经验公式法与有限元分析法两种方法预测分析顶管穿越大堤施工引起的地层变形，计算结果表明两种分析方法的计算结果基本一致，得出了顶管施工过程中的土体位移规律：地表沉降呈对称分布,最大沉降量发生在管道中心轴线处,向左右沉降分别逐渐减小。

为预防和减轻海堤沉降,工程实施过程中对推进完成后的管道周边采用惰性浆液置换触变泥浆,置换后再利用管内注浆孔对穿堤段管道进行围岩注浆,监测数据表明沉降控制效果显著。

3.2 顶管施工后大堤整体抗滑稳定验算

(1)计算方法

顶管施工后的海堤整体抗滑稳定采用《海堤工

程设计规范》[5]中的瑞典圆弧滑动法分析验算。

(2)地质参数取用

顶管穿越施工过程中,会对管道周围部分土体强度产生影响,根据有关非开挖技术施工等研究文献,地下管道施工过程中周围土体抗剪强度会有所降低,一般管径越大,影响越大,预计本工程抗剪强度平均降低约5%,相关土力学指标折减5%计算施工后的海堤整体抗滑稳定系数。

(3)计算工况组合

对大堤临水侧和背水侧选取下列两种计算工况分别计算:

工况一(临水侧):外海侧取50a一遇低潮位-2.24m,低于滩地时取滩面高程,背水侧取现状地面高程以下0.5m地下水位,计算大堤临水侧稳定;

工况二(背水侧):外海侧取50a一遇高潮位2.63m,背水侧取现状地面高程以下1m地下水位,计算大堤背水侧稳定。

(4)计算结果

顶管穿越段海堤整体抗滑稳定复核计算结果见表3。

表3 管道顶管穿越大堤前后断面整体稳定计算结果表

工程位置	顶管穿越大堤前 安全系数		顶管穿越大堤后 安全系数		最小 安全 系数 $K_{\min}$
	工况一	工况二	工况一	工况二	
	临水侧	背水侧	临水侧	背水侧	
顶管穿越段大堤	1.589	4.729	1.369	4.023	1.25

由计算结果可见,受顶管穿越施工影响,穿越管道位置大堤整体抗滑稳定系数略有降低,相较大堤穿越前,工况一系数减小13.8%,工况二系数减小14.9%,但仍满足大堤整体抗滑稳定要求。如无法满足安全系数要求,应对顶管穿堤段采取加固措施。

断面整体抗滑稳定计算见图8~图11。

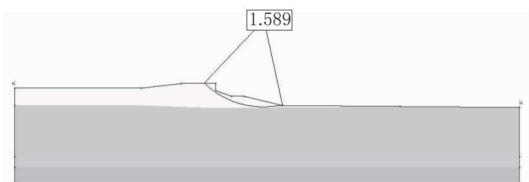


图8 顶管穿越大堤前工况一整体稳定计算结果图

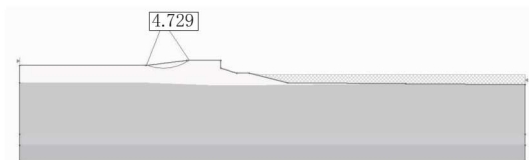


图9 顶管穿越大堤前工况二整体稳定计算结果图

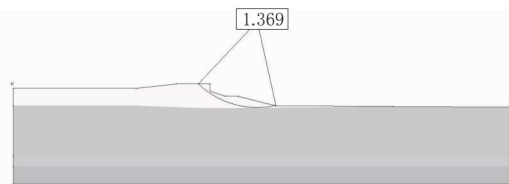


图10 顶管穿越大堤后工况一整体稳定计算结果图

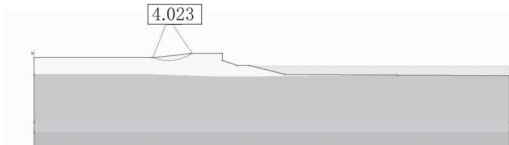


图11 顶管穿越大堤后工况二整体稳定计算结果图

4 结 语

江苏某地区达标尾水排海工程采用压力流排放,入海处采用顶管穿堤方式,压力管道铺设在大堤的堤身对大堤的安全存在一定影响,本文介绍了压力管顶管穿堤的关键技术,并对其穿堤施工进行了安全影响分析,主要结论如下:

(1)根据《堤防工程设计规范》压力管不宜铺设在大堤的堤身穿越大堤,采用内、外套管穿堤工艺可以减小内部压力管道使用时产生震动对现状大堤的影响。

(2)施工过程中,对推进完成后的管道周边,用惰性浆液将触变泥浆置换。惰性浆液采用M10水泥砂浆,通过压注触变泥浆的系统及管路进行置换。

(3)为防止海水倒灌,内、外套管顶进完成后,需对DN1820钢管、DN1420钢管及顶管工作井间采用钢环、橡胶止水环和螺栓进行止水封堵,顶管接收井处内外套管间可采用干拌袋装混凝土封堵。

(4)采用经验公式法及有限元分析法两种方法预测分析顶管穿越大堤施工引起的地层变形,土体位移规律为地表沉降呈对称分布,最大沉降量发生在管道中心轴线处,向左右沉降分别逐渐减小。

(5)顶管穿越施工过程中,周围土体抗剪强度会有所降低,应复核土体抗剪强度降低后的海堤整体抗滑稳定,如无法满足安全系数要求,应对顶管穿堤段采取加固措施。

参考文献:

- [1] GB/T 19570—2017,污水排海管道工程技术规范[S].
- [2] GB 50286—2013,堤防工程设计规范[S].
- [3] 王乐天,宁小亮,黄鹏辉.大直径深埋顶管施工对地表沉降的影响[J].地质科技通报,2022,41(6):323-330.
- [4] 尹光明,傅鹤林,侯伟治. Peck公式参数的几种取值方法研究[J].铁道科学与工程学报,2022,19(7):2015-2022.
- [5] GB/T 51015—2014,海堤工程设计规范[S].