

大直径深海管道浮体助浮铺设管道变形数值计算分析

陈 锐

(中交第三航务工程局有限公司江苏分公司, 江苏 连云港 222042)

摘 要:以徐圩新区达标尾水排海工程为例,深水海域段排放管铺管施工需要严格控制管道弯曲曲率在允许范围之内,保证管道安全,施工难度非常大。通过介绍能够适应水深较大工况的深海铺管施工方法,对施工工艺参数进行了定量的计算分析,希望能为类似工程提供借鉴。

关键词:排海管;深海铺管施工;变形控制

中图分类号: TU990.3

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2021)12-0113-05

0 引 言

以往石化工业园区产生的废水都是直接排放至内河和近岸海域中,导致河流和近岸水域污染严重,对水体造成了巨大的破坏,直接影响了人们的生活和近岸的水产养殖产业。为了兼顾经济发展和环境保护,降低污水处理的高昂经济成本,在不污染海洋的基础上充分利用海洋自身的净化功能,实现达标尾水的顺利排放,采用长距离的海域污水排放管道进行达标尾水的集中处理和排放。

徐圩新区达标尾水排海工程设计规模为:近期排放量 8.57 万 m^3/d ,远期排放量 11.83 万 m^3/d 。项目海域工程范围以入海点为界,管道走向为向北穿越滨海大道,沿平行防波堤铺设,在防波堤东边坡脚外边沿 250 m 左右。然后在东防波堤北端折转,铺向排放口,海域段排放管全长 22 279 m,最大铺设水深约 18 m。

海域管道工程平面布置图见图 1。



图 1 海域管道工程平面布置图

以往海域管道铺设的施工水域水深较浅,只能在水深 14 m 以内的水域进行施工,无法满足长距离

海域污水管道的铺设要求。为解决较深水域的污水管道的铺设问题,将管道铺设过程中的管道弯曲曲率控制在允许范围之内,实现 14 m 水深以上海域的管道铺设施工的顺利进行,需探索深水条件下管道铺设施工方法,并对施工过程中的管道形态进行专项设计。

1 海上建设条件

1.1 潮位

徐圩港区尚无长期潮位观测资料,根据 2005 年 9 月和 2006 年 1 月水文测验期间小丁港临时潮位观测资料,与连云港长期潮位站同步潮位资料建立相关,推算获得徐圩港区设计水位如下(85 国家基准):50 a 一遇高潮位为 3.66 m(设计高水位),50 a 一遇低潮位为 -3.58 m,平均高潮位为 1.94 m,平均低潮位为 -1.72 m(设计低水位)。

1.2 波浪

海区累年平均波高为 0.5 m,各月平均波高为 0.4 ~ 0.6 m。其中,秋冬季波高略大于春夏季。各向平均波高以偏北向为最大,其中 NNW、N、NNE 向平均波高均为 0.9 m。海区累年平均周期为 3.1 s,各月平均周期介于 2.7 ~ 3.1 s 之间。累年各向平均周期以 NNE 向为最大,达 4.3 s;NE 向次之,为 4.1 s。

1.3 海底地形

连云港地区沿岸属于废黄河水下三角洲北缘的一部分,历史上受黄河夺淮入海期泥沙扩散淤积的影响,沿岸底部普遍沉积了厚度不等的粉砂—黏土质淤泥沉积层,岸滩呈现淤泥质海岸特点。海床呈冲淤平衡、略有冲刷的态势。

本项目海底路由位于连云港徐圩新区东侧近岸,

收稿日期: 2021-03-10

作者简介:陈锐(1987—),男,本科,工程师,从事港口航道及市政管道工程管理和技术管理工作。

东西连岛与灌河口之间海域,原始地貌为浅海平原,总体上呈西南高东北低的趋势。路由及其附近海域,由岸向海方向,水深逐渐增加,坡度平缓,水深范围0~18 m,等深线走向与岸线相近。

2 管道结构设计

2.1 管材选择

在尾水排海工程中,管道工程投资在工程总投资中占有较大的比重,尾水排海管道属于城市地下永久性隐蔽工程设施,要求具有很高的安全性和可靠性。因此,合理选择管材是非常重要的。排海管道必须具有足够的强度,以承受外部的荷载和内部的水压。同时必须具有抵抗污水中杂质的冲刷和磨损的作用,也应有耐腐蚀性。内壁应整齐光滑,粗糙系数小,使水流的阻力尽量减小。

管材的选择取决于施工方法、管道埋深、管道内压、工程造价等因素。国内外排海工程海底放流管中,使用的管材有钢管、钢筋混凝土管、玻璃钢管和HDPE管等。PE管、HDPE管有防酸耐腐蚀、内壁光滑糙率小等特点,但重量比较轻,海上铺设管道须加混凝土配重块间隔布置,对铺管施工造成较大不便。钢管具有强度大、刚度大、各向力学性能均匀、力学性能比较明确等特点。接头可采用焊接,工艺成熟可靠,管道延性好,可容许的悬空距离长,一般海底地质沉降对管道几乎没有影响。

从降低海上埋管施工风险和控制施工工期的角度考虑,选择钢管作为海上埋管的管材。

2.2 管径确定

本排海工程水量变化较大,近期规模为8.57万 m^3/d ,远期规模为11.83万 m^3/d ,总排水流量按11.83万 m^3/d 考虑。管道直径的选择应既要保证管道流速不可过低,又要保证管道沿程损失适中,水泵扬程合理。同时,还要考虑施工方法和工程投资。根据《污水排海管道工程技术规范》(GB/T 19570—2017),“管道内最小流速不小于0.6 m/s,一般可取0.8~1.0 m/s”。根据水力计算和多方案比选,采用单根管道,管径DN1 400方案。

2.3 管壁厚度

管壁厚度根据管径大小、设计条件下的受力特点、管道防腐和经济性等因素综合确定为18 mm。

3 管道施工方法

铺管船法是海底管道最常用的安装方式。特别

是在远离海岸的海洋中敷设管道,铺管船法铺管几乎是唯一的选择。在水深较大的海域采用普通Q235B钢管进行“S”型铺设法管道敷设,管道张力较大,需要严格控制其水中形态。

本工程管道铺设作业水深大于14 m时的管道铺设长度为2 800 m,施工水深范围在14~18 m,铺设管道型号为DN1 400,外径为1 420 mm,壁厚为18 mm,钢管材质为Q235B钢板卷制而成。采用浮体助浮的方式进行施工,通过在海域管道上部绑扎浮体来调节管道注水段的下沉荷载,将管道铺设过程中的曲率控制在允许范围之内。

首先将管节运输至陆地码头,进行管节的拼装,将两节出厂的管节焊接拼装成一节。其次将焊接拼装并检测完毕的管节吊运至管节倒运驳船上。通过倒运驳船将管节运输至管道铺设船上,储运堆放。具体见图2。

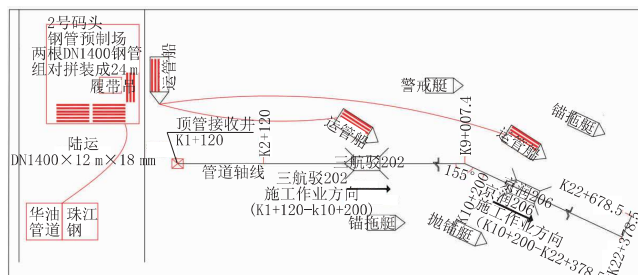


图2 海域管倒运平面施工图

管道铺设施工前,通过DGPS检查管道铺设船的铺设轴线。将管道铺设船船头船尾左右四个锚布设到指定位置,将管道铺设船精准调整到设计轴线上。在第一节钢管端部焊接封口板,并在封口板上焊接两个球阀短管作排气、排水用。通过履带式起重机吊运管节至导向架上方,在焊接平台处完成管道的焊接和检测。管道焊接并检测完毕之后,把钢管一端下滑至导向架外,压紧夹管器,焊接法兰,防腐,检查球阀是否关闭,放松夹管器卷扬机继续缓慢把钢管放下水,在管道上方绑扎浮体(见图3)。

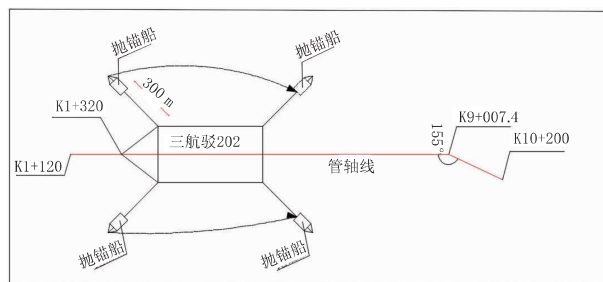


图3 管道铺设船布锚位置及布锚图

松开抱紧器,控制锚机,通过收缆拖动管道铺设船向后移动,向管道内部灌水,进水量采用流量计进

行准确计量。在管道沉放过程中,控制管道移动的速度和注水的速度一致。同时对托管架前端的受力情况进行观测,校核注水与沉管速度的同步性,观察安装在管道上的测量浮标的水下深度校验管道在水下的形态。管道下滑至海底之后,安排潜水员割除管道上绑扎的浮体(见图 4),通过运输船回收利用。

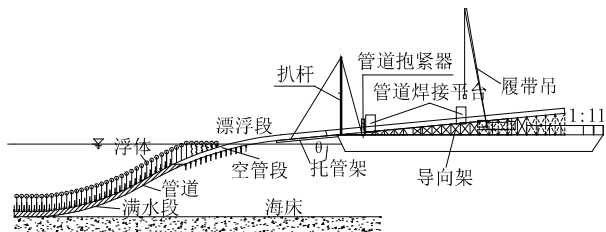


图 4 浮体助浮管道铺设施工示意图

管道铺设施工过程中遇到台风或者暴风雨等恶劣天气预报时,为避免恶劣天气导致施工船只和已经完成铺设的管道造成破坏,需要及时停止管道的焊接作业,使用封头堵板将管道封住。同时松开管道抱紧器,将管道缓慢下放至海中。使用水泵向管道内部注水下放至海底,标记弃管位置。继续进行管道铺设施工时,使用起重船将管头吊起。同时打开管道另一端的出水阀门向管道内部充入高压气体,将管道内部的海水从另一端的阀门排出,使管道浮起,并将管道拖至抱紧器继续进行焊接和管道铺设作业。

为保证铺设完毕管道的质量符合要求,在管道铺设完毕覆土之前需要进行管道水压试验。在管道注水端焊接封头堵板,将管道脱离托管架,使管道转变为弃管状态,进行灌水和排气,以无变形、无渗漏、不降压为合格。

已经铺设完毕的管道,经过试压检测合格之后,采用多功能水力冲沟机进行沟槽冲沟开挖埋设,在铺设完毕的管道下放冲出沟槽,利用管道自身重力将管道埋设至沟槽之中。然后回填沟槽,将管道埋设至设计深度。最后回填海砂碎石,保护海域管道。

深海管道敷设过程中,管道一端置于海底,另一端与铺管船甲板上的导管架和托管架相连接。中间有一段较长的悬跨段。悬跨段变形较大且受力复杂,管道可能发生弯曲。悬跨段管道为几何非线性和弹塑性大变形结构,而管道的悬跨长度和着地点的受力情况未知,分析难度较大。本文采用有限元方法建立管道和水域模型,研究管道敷设过程中悬跨段在重力、浮力、水流力等作用下的变形特征。同时,根据曲率半径不小于 800 m 的管道设计要求,分析管道敷设过程中应采取的必要措施。

4 数值模型

4.1 水动力基本方程

有限元计算中,假设流体是不可压缩的,能够传递能量和浮力。与 ALE 变形网格一起使用,可以进行流固耦合分析。其流体的控制方程为:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho v dV + \int_S \rho v \times (v - v_m) \cdot n ds = - \int_V \nabla p dV + \int_S \tau \cdot n ds + \int_V f dV \quad (1)$$

对于稳态水流而言,动量守恒方程的积分形式变成:

$$\int_S \rho v \times (v - v_m) \cdot n ds = - \int_V \nabla p dV + \int_S \tau \cdot n ds + \int_V f dV \quad (2)$$

式中: V 为具有表面积 S 的任意控制流体; n 为 S 的外法向; ρ 为流体密度; v 为速度矢量; v_m 为移动网格的速度; f 为体积力,本文主要为重力 g ; τ 为黏性切应力。

上述不可压缩流体方程,被称为纳维-斯托克斯方程。在工程应用的复杂几何边界上求其解答,必须采用一些特定的算法才能实现。因本文计算为围堰结构和水流的相互作用问题,围堰在外力作用下发生变形,对于任意一个变形区域,使用先进的二阶投影形式。然后基于固定网格的 SIMPLE 算法,采用压力的一个节点为中心的有限元离散和所有其他传输变量的体积中心的有限体积离散。当保持与传统有限体积法相关联的局部保守属性时,此种混合法可保证解的精确性。

4.2 有限元模型

本文建立有限元模型分析不同水深管道悬空段的变形情况,应根据本项目管道深海敷设的水深变化,分别建立不同尺寸的流体域和管道模型,设计了 12 m、14 m、15 m、16 m、17 m、18 m、19 m 共 7 个水深工况。不同水深管道水下悬空段长度分别为 132 m、154 m、165 m、176 m、187 m、198 m 和 209 m,同时考虑 20.1 m 长托管架上的管道。根据装管后敷管船船头吃水深度为 2.6 m,按照导管架倾斜角度考虑,托管架通常约有 1.73 m 长在水面以下。有限元模型中按托管架均在水面以上考虑,其计算结果偏于安全。

水域模型尺寸考虑管道长度和水流波长等因素,垂直于管道轴线方向取 10 个波长(本文取 60 m),管道轴线方向考虑管道悬空段和托管架长度,深度方向按计算水深考虑。管道初始状态按照导管架的倾斜度插入水中,见图 5。

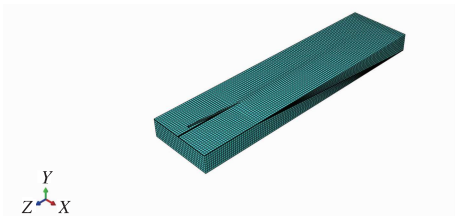


图 5 有限元计算模型

(1)单元尺寸

管道采用 8 节点修正二次六面体拉格朗日单元 (C3D8R),水采用 8 节点流体单元(FC3D8)。管道壁厚方向设一个单元,即单元尺寸为 18 mm,管道轴线方向尺寸 0.5 m。水单元尺寸与管道轴线方向单元尺寸一致。

(2)参数的选取

计算中需考虑流体(海水)与管道的相互作用。有限元计算中根据能量传递的方式进行。海水材料参数应包括与温度相关的参数,本文所取参数按气温 20℃时考虑。具体参数选取见表 1。

表 1 参数选取

项目	海水	钢管
密度/(kg·m ⁻³)	1 050	7 850
弹性模量/GPa		210
泊松比		0.3
动力黏度	0.001	
热膨胀系数	0.000 208	
比热熔	4 182	
热传导系数	0.6	

(3)荷载与边界条件

管道的重力通过施加重力荷载实现,采用平滑分析步施加,加载时间取 10 s。水流浮力和水流波浪力由水体运动与管道的相互作用施加。后续施加的浮漂力按集中荷载施加。

管道按简支边界考虑,即触入海底处为三方向位移约束,20.1 m 长托管架处按竖向位移为零的边界处理。托管架顶端除了约束管道竖向位移外,与管道轴线垂直的水平方向位移亦约束,管道边界条件见图 6。

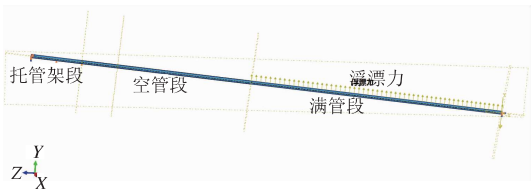


图 6 管道边界条件

在水体的侧面施加速度边界条件,速度方向与管道轴线垂直。边界流速按 Stokes 五阶波理论计算,

水域边界按自由流入边界考虑。以下计算水流流速取 2 m/s 考虑,平均波高取 0.5 m,平均周期取 3.1 s。

5 管道变形分析

敷管过程中,管道受到导管架、托管架和海底的约束作用。同时受到重力、水流浮力等的作用。管道在施工过程中,为将管道沉入海底,需在管道内注水。为防止重力作用下,悬空管道的屈曲变形过大,会在管道出水端留出空管段。空管段的长度需根据管道屈曲变形的要求(按设计控制曲率半径为 800 m 考虑,根据弹性力学计算,管道最大控制应力为 188 MPa)确定。本文根据不同水深,经过大量试算,得出不同水深下管道的变形和浮漂安装方案,保障管道能够安全、顺利敷设。

管道铺设有限元计算部分结果如下所示:

(1)管道敷设水深为 12 m 时,管道总长度为 142 m,水下空管段长度为 45 m,满管段长度为 87 m。管道最大竖向变形 43 cm,最大上浮量为 17 cm;管道最大应力为 156 MPa≤188 MPa,满足设计要求(见图 7、图 8)。



图 7 12 m 水深管道竖向变形

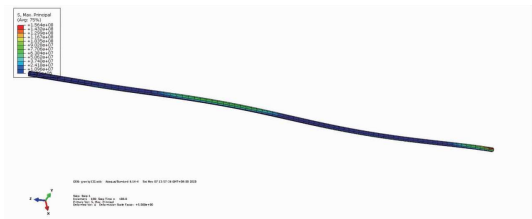


图 8 12 m 水深管道最大应力图

(2)管道敷设水深为 14 m 时,管道长总长度为 174 m,水下空管段长度为 64 m,满管段长度为 90 m。管道最大竖向变形 17 cm,最大上浮量为 99 cm,管道最大应力为 183 MPa≤188 MPa(见图 9、图 10),满足设计要求,但是管道应力已接近极限状态,且管道上浮量较大。因此,施工到 14 m 水深的海域,应密切监测管道变形及应力,且空管段不应超过 64 m。

(3)管道敷设水深为 15 m 时,管道总长度为 185 m,水下空管段长度为 55 m,满管段长度为 110 m。管道最大竖向下沉量 134 cm,最大上浮量为 21 cm,管道最大应力为 268 MPa≥188 MPa(见图 11、图



图 9 14 m 水深管道竖向变形

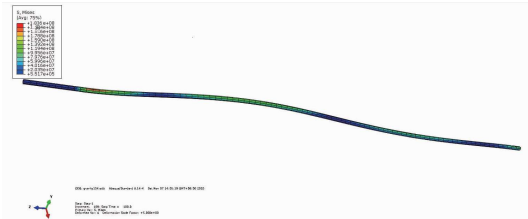


图 10 14 m 水深管道最大应力图

12),超过最大控制应力,管道竖向变形过大,已经不能满足安全施工要求。因此,应在满管段加适当数量的浮漂,增加满管段上浮力,以便调整管道姿态和应力。

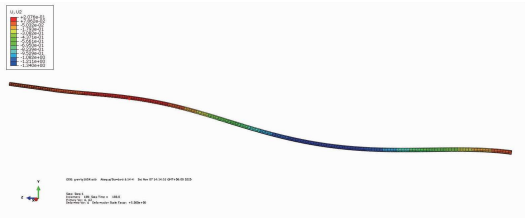


图 11 15 m 水深管道竖向变形

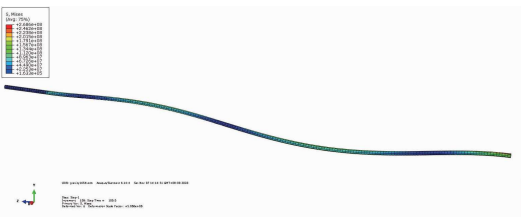


图 12 15 m 水深管道最大应力

经试算,满管段长度为 110 m,每米加 1 个浮漂(每个浮漂力按 200 kg 计),满管段管道最大竖向下沉量 21 cm,最大上浮量为 83 cm,管道最大应力为 178 MPa≤188 MPa(见图 13、图 14),满足设计要求。

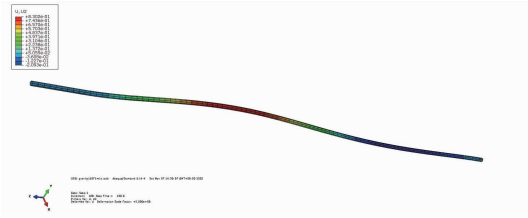


图 13 15 m 水深加浮漂管道竖向变形

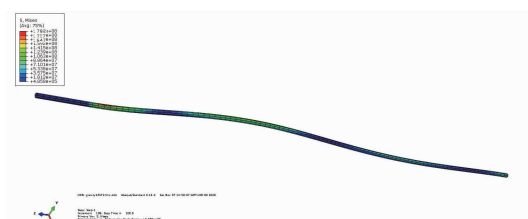


图 14 15 m 水深加浮漂管道最大应力

通过不同工况下管道变形和应力的计算分析,对不满足设计要求的工况,经过试算给出了满管段安装浮漂的方案,使管道变形与应力控制在设计范围之内,确保管道能够安全、顺利敷设。根据计算分析结果,不同水深条件下,管道空管段、满管段和浮漂安装方案见表 2。

表 2 管道浮体绑扎方案

施工水深 /m	管道悬空长度 /m	空管段长度 /m	满管段长度 /m	满管段浮漂安装	最大下沉量 /cm	最大上浮量 /cm	最大应力 /MPa
12	132	45	87	不安装	43	17	156
14	154	64	90	不安装	19	99	183
15	165	55	110	1 个 /m	21	83	178
16	176	46	130	1.5 个 /m	33	55	166
17	187	57	130	1.5 个 /m	71	76	174
18	198	28	170	2 个 /m	64	11	76
19	209	39	170	2 个 /m	35	56	167

6 结 论

徐圩新区达标尾水排海工程海域工程范围以入海点为界,海域段排放管全长 22 279 m,管道敷设最大水深达到 18 m,水深大于 14 m 的管道铺设长度为 2 800 m,管道铺设过程中需要严格控制管道弯曲率在允许范围之内,施工难度非常大。本文介绍了能够适应水深较大工况的深海铺管施工方法,并对施工工艺参数进行了定量的计算分析,得到以下结论:

(1)为适应水深较大工况,深海铺管施工可采用铺管船施工,通过控制管道注水段长度调节下沉荷载,通过在管道上部绑扎浮体助浮,控制管道在水中的姿态,将管道铺设过程中的曲率控制在允许范围之内。

(2)通过数值计算,在水深 14 m 以内水域施工,仅通过控制管道注水段长度,可控制施工过程中管道变形与应力达到设计要求。

(3)通过数值计算,管道铺设施工水深超过 14 m 时,在不加浮体辅助装置的情况下会导致管道的变形曲线超过允许的限度,应增加浮体装置减小管道满水段的下沉荷载。为控制施工过程中管道变形与应力达到设计要求,水深 15 m 工况下,满水段安装浮体 1 个 /m;水深 16~17 m 工况下,满水段安装浮体 1.5 个 /m;水深 18~19 m 工况下,满水段安装浮体 2 个 /m。

(下转第 121 页)

-5 ~ 0 cm, 压实厚度 25 cm, 采用钢筋钎插扎方法控制铺土厚度。超填部分顶部宽度 ≥ 30 cm, 坡比 1 : 1.5, 边坡开挖成小台阶状, 台阶高度 25 cm。

5.3.5 改性土碾压

根据碾压工艺试验确定碾压参数, 严格控制碾压遍数、行进速度、压实顺序、碾压搭接宽度以及现场环刀检测计算的含水率、干密度和压实度指标。本工程铺土完成后采用光面压路机按进退错距法于渠道方向静压 2 遍、振压 6 遍, 行车速度 2 ~ 3 km/h, 开始碾压是采用慢速。压实顺序先两侧后中间, 相邻碾压迹的搭接宽度不小于 1/10 碾宽, 对于边角部位、接头处采用打夯机夯实, 做到了无漏角、无死角, 确保了碾压均匀。碾压过程中根据天气和层面干燥情况, 进行了洒水湿润处理, 以确保含水率在最优含水率的 +1% ~ +3% 之间。碾压完成后, 在作业面上采用 100 cm³ 环刀均匀取样, 每层取样数量为 100 ~ 200 m³ 每点, 共取 3 点, 通过室内土工试验测定含水率并计算干密度及压实度。压实度检测合格后进行下一层改性土填筑施工。

5.3.6 结合面处理

为保证各土层间结合质量, 在各层碾压完成并检验合格后, 应对填筑表面进行刨毛处理, 并通过适当洒水湿润, 使含水率控制在规定范围内。本工程上下层结合面采用刨毛机进行了刨毛处理, 刨毛深度 10 ~ 20 mm, 并对下层填筑表面进行了保洁清理, 为

上层改性土填筑提供了合格基础面。

5.4 水泥土维护养生质量控制

水泥土填筑施工完成后应及时进行洒水养生, 或在填料表面覆盖土工膜或塑料薄膜养生, 防止水泥土表面开裂, 影响施工质量。每层填筑施工间隔宜 < 6 h, 如填筑施工因故中断, 应做好填筑面和基础面的保湿处理。本工程填筑施工分多层进行, 不需单独进行养生维护, 用上层填筑的水泥土对下层进行养生维护。全部填筑施工完成并检测合格后, 配备了专用洒水车, 采用雾化喷洒方式, 进行补水养生, 养生周期为 7 d。

6 结 语

通过认识膨胀土的危害、作用机理以及引江济淮工程江淮沟通段 J009-1(河渠)标膨胀土成功治理的经验, 从各工序施工质量控制角度出发, 明确质量控制要点, 对应施工各项控制指标, 对专业监理人掌握膨胀土治理方法、明确过程质量控制要点、提升管控服务能力将起到很好的促进作用。

参考文献:

- [1] 林青芝. 简述膨胀土的危害及处理方法[J]. 科技创新导报, 2010(10): 44.
- [2] 梅川. 引江济汉渠道膨胀土换填施工及质量控制[J]. 工程建设管理, 2019(1): 42-44.
- [3] 赵春吉. 水泥改性强膨胀土的试验及改性机理研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.

(上接第 117 页)

在管道下水之前将浮体按照计算好的间距通过绳索布置在管道顶部。绳索长度应该与管道空管段的水位深度保持一致, 在管道下放过程中不断在管道顶部绑扎浮体。管道下沉至海底之后, 安排潜水员割除管道上绑扎的浮体, 通过运输船回收利用。

参考文献:

- [1] 黄璟. 长距离排海管道设计[J]. 珠江水运, 2018(10): 52-53.
- [2] 耿文泽. 排海管稳定性设计与施工方案[J]. 中国给水排水, 1998, 4: 30-31, 34.
- [3] 邢文文, 岳凤伟. 沿海旅游城市敷设排海管道的设计[J]. 中国给水排水, 2013, 29(14): 59-61.
- [4] 邓力禹, 张瑞玉. 某港区污水处理厂尾水深海排放管工艺设计[J]. 珠江水运, 2014(13): 56-57.