



自动化集装箱码头综合管沟结构设计

刘毅

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510290)

摘要: 综合管沟是近10年来我国城市地下管线铺设的新型设计思路, 在港口工程中的应用较为少见。港口工程具有独特的平面布置, 场区内管线类型、地基条件、荷载、地面设施、交互节点等均与其他管沟大不相同, 结构设计条件非常复杂。针对上述问题, 在广州港南沙四期工程综合管沟结构设计中, 结合自动化集装箱码头的特点, 对荷载条件、沉降要求等方面进行了研究, 提出了多功能盖板段、渐变式复合地基等方面的优化设计思路, 完成了适用于自动化集装箱码头的综合管沟结构设计, 有效解决了管线综合的问题。本文所阐述的结构设计经验对后续的自动化集装箱码头综合管沟结构设计具有一定的参考意义。

关键词: 综合管沟; 结构设计; 集装箱码头; 自动化

中图分类号: U 652.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)10-0143-06

Structural design of utility tunnel for automated container terminal

LIU Yi

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510290, China)

Abstract: Utility tunnel is a new design idea for laying underground pipelines in cities in the past 10 years. However, its application in port engineering is relatively rare. The port project has a unique layout. The pipeline types, foundation conditions, loads, ground facilities, and interactive nodes in the site are very different from those of urban utility tunnel. The structural design conditions are very complex. In view of the above problems, in the utility tunnel design of Guangzhou Port Nansha Phase 4 Project, combined with the characteristics of the automated container terminal, the load conditions, settlement requirements and so on are studied. Then the optimization design ideas of multi-functional cover section and the gradient composite foundation are proposed. Through the above optimization design ideas, the utility tunnel structure design suitable for automated container terminals has been completed, which effectively solves the problem of pipeline integration. The structural design experience described in this paper has certain reference significance for the structural design of the utility tunnel of subsequent automated container terminals.

Keywords: utility tunnel; structural design; container terminal; automation

目前我国港口工程中的管线主要采用直埋方式敷设, 虽然这种敷设方式设计方案成熟、施工简单、投资小, 但管线的直埋方法存在明显的弊端, 主要缺点有: 1) 不利于发现管线的损坏, 由于直埋式管线检测仪器的局限, 不容易及时发现管线破裂, 导致延误最佳维修时机, 造成一定的

损失和恶劣影响; 2) 维修或更换管线的成本高; 3) 管线敷设和维护均需要进行开挖, 影响场地使用, 也可能对相邻管线造成破坏^[1-2]。

广州港南沙四期工程是大湾区首个全自动化集装箱码头, 为解决上述港区管线直埋的弊端, 该工程借鉴城市综合管廊的设计思路, 共建设约

3.7 km综合管沟，同时将电气、给排水、通信等管线纳入其中，解决了上述管线直埋敷设的问题。

1 工程概况

1.1 工程地质

根据地质勘察报告，对综合管沟结构设计相关的工程地质可划分为4层，分别为：

1)处理后的淤泥：包括原状淤泥吹填的疏浚土，已采用真空预压进行地基加固，平均厚度约13 m。

2)黏土：厚度在0.4~8.3 m之间变化，湿、中等-硬、切面稍光滑、黏性较好，以黏性土为主，局部混少量细砂。

3)黏土-粉质黏土：厚度在0.4~7.0 m之间变化，灰白色、黄褐色、饱和、中等-硬、稍具黏性，局部含铁质胶结碎块及较多细砂。

4)黏土：厚度在0.5~12.8 m之间变化，灰色、湿、中等、以黏土为主、切面较光滑、黏性较好，局部夹薄层细砂。

1.2 设计水位

本项目原地形为海域，采用吹填成陆的方式形成陆域，并进行地基处理。成陆后地下水主要受海水补给，因此地下水位参照海水潮位进行设计。设计水位采用以下数值：设计高水位(高潮10%)：3.24 m；设计低水位(低潮90%)：0.53 m；极端高水位(50 a一遇)：4.57 m；极端低水位(50 a一遇)：-0.10 m。

1.3 地震烈度

本项目场地处于地震基本烈度Ⅶ度区，地震动峰值加速度为0.10g。

2 设计荷载

1)龙门吊。龙门吊跨距31 m(带单侧外伸悬臂，轨距内跨10排箱)，4个轮/腿，轮距1.05/1.35 m，基距17 m。设计荷载按工作状态考虑，最大轮压370 kN，下设钢轨(明轨)。

2)集装箱正面吊运车。正面吊运车设计荷载

按空载考虑，前轴轮压100 kN/轮，后轴轮压200 kN/轮；前轮每个轮胎接地面积46 cm×22 cm，后轮每个轮胎接地面积46 cm×43 cm。

3)无人驾驶集卡。按工作状态考虑，无交互作业时最大轮压125 kN，接地面积约1 312 cm²。

4)集装箱牵引半挂车。满载时前轮轮压20 kN/轮，后轮轮压70 kN/轮。

3 结构设计

3.1 设计特点

与城市综合管廊相比，港口工程中的综合管沟主要具有以下特点^[3]：1)容纳管线数量相对较少，单舱管沟足以容纳。2)港口工程运营情况复杂，综合管沟下穿多个不同区域，其上的设计荷载也各不相同。在港口中，管沟需下穿龙门吊轨道梁，钢轨传递的上部荷载极大；港区道路上行走的是无人驾驶集卡和集装箱正面吊运车，其路面荷载远大于城市道路。3)与城市综合管廊主要沿道路敷设不同，港口综合管沟主要穿越港区堆场，可结合堆场区的平面布置设置不同的结构形式。4)城市综合管廊一般沿线200 m左右设置管线交互节点，港口综合管沟由于与外部电缆沟、变电房、消防栓等用水、用电设施交互频繁，节点密集。

根据以上特点，结合港口堆场布置，综合管沟沿道路侧边布置，沿线穿过港区道路、堆场侧边空地和轨道梁，因此分为暗埋段、盖板段和轨下段3种主要的结构形式，见图1。1)暗埋段：为综合管沟的最主要断面形式，主要位于需下穿港区道路、码头前沿作业、堆场以及其他需暗埋的区域。2)盖板段：主要位于堆场区，由于港区道路转弯半径的要求，在每块堆场的两端存在一块空地，不堆置集装箱，也无车辆通行要求，属于未被利用的区域。为充分利用港区土地，在综合管沟穿过此区域时，将管沟上抬高伸出地面，在顶部设置1 m宽的开口，并用钢盖板进行封盖。盖板段沿综合管沟延伸方向布置，布置间距约30~60 m，长度约13 m。在管沟内管线安装施工

期间, 盖板段可作为施工人员出入的通道, 水管和电缆线都可通过此处下料安装; 在管沟运营期间, 通过打开钢盖板可以起到供检修出入、通风、

采光照明等作用。3) 轨下段: 主要位于龙门吊轨道梁下方, 其顶部兼做轨道基础, 上部直接承载龙门吊钢轨。

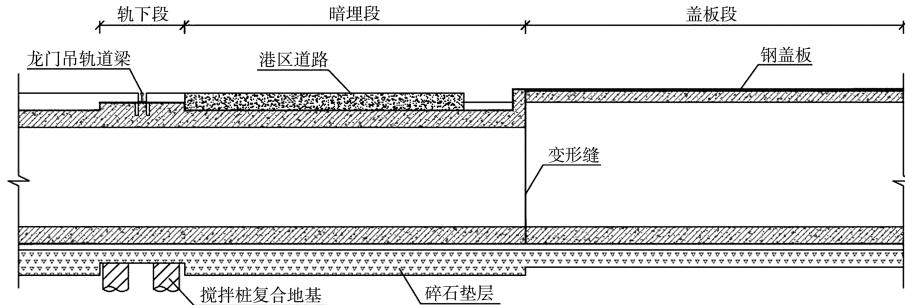


图 1 综合管沟沿线结构形式

3.2 暗埋段设计

为减小土方开挖和配合盖板段, 本项目管沟不宜深埋, 因此覆土厚度较小, 下穿道路时上部直接与路面结构相接, 直接承受上部路面荷载。经研究分析, 路面荷载以正面吊运车后轮压荷载最大, 以此作为结构设计荷载输入条件。暗埋段结构断面见图 2, 采用现浇 C35 钢筋混凝土结构, 内部尺寸宽 2 m, 高 2.35 m。管沟侧墙厚度 30 cm, 底板和顶部厚度均为 40 cm, 为提高抗浮能力和减小基底压力, 底板两侧外挑 40 cm。由于基底所在持力层为真空预压处理后的吹填淤泥, 地基承载力尚有欠缺, 因此在采用底板外挑措施以外, 底部还设置 C15 素混凝土垫层和 60 cm 厚碎石垫层。

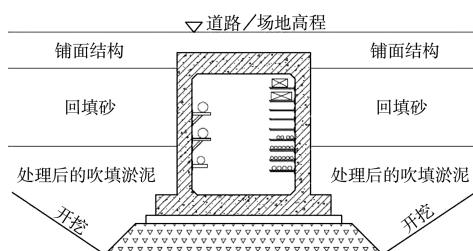


图 2 暗埋段结构断面

3.3 盖板段设计

盖板段主要位于堆场边缘, 距离最近的箱脚梁基础边缘约 4.4 m, 按土压力理论, 箱脚梁荷载对管沟结构影响较小。管沟顶部为防止雨水倒灌, 顶板伸出地面 30 cm 高度, 车辆无法通行, 管沟

上部和钢盖板仅考虑人行荷载, 因此盖板整体所受荷载较小。盖板段结构断面见图 3, 采用现浇 C35 钢筋混凝土结构, 内部尺寸宽 2 m, 高 2.35 m。管沟底板厚 40 cm, 侧墙和顶板厚 30 cm, 顶部设 1 m 宽条带式开口, 采用钢盖板封闭, 底部设置 C15 素混凝土垫层和 40 cm 厚碎石垫层。

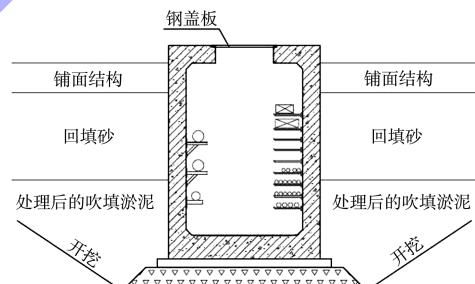


图 3 盖板段结构断面

3.4 轨下段设计

轨下段位于堆场区龙门吊轨道梁下方, 龙门吊在台风期间最大轮压将达到 485 kN, 但台风期间龙门吊应锁定, 且需避开综合管沟下穿的位置, 因此在结构设计时应反馈相关专业考虑。结构设计时以正常工作状态轮压作为荷载输入条件, 考虑顶部钢轨的分摊荷载作用, 进行计算时, 可将单腿 4 轮荷载转化为均布荷载作用于箱涵顶部考虑。轨下段结构断面见图 4, 采用现浇 C35 钢筋混凝土结构, 结构内部尺寸与暗埋段相同, 底板厚度为 40 cm, 顶板厚度约 58 cm, 侧墙厚度 30 cm, 底部设置 C15 素混凝土垫层和 30 cm 厚碎石垫层, 地基采用水泥搅拌桩复合地基, 顶部设置轨道扣

件螺栓预留钻孔，用于铺设钢轨。

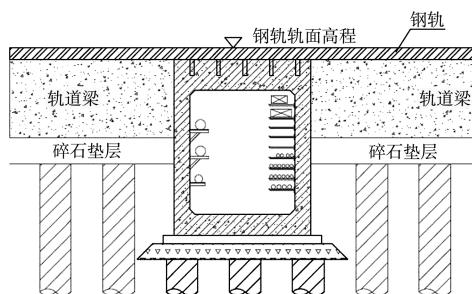
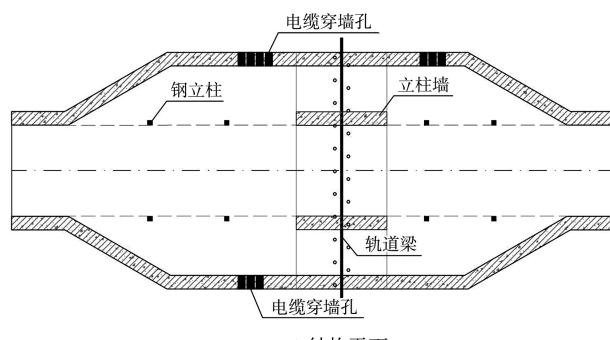


图 4 轨下段结构断面

3.5 交互节点设计

港口综合管沟中水电管线与沟外的用水、用电设备交互频繁，因此沿线需设置大量的管线交互节点，节点的位置主要根据堆场内电缆沟、用电设备、消防设施等进行布置，间距约 30~80 m。节点主要设置于暗埋段，结构平面形式见图 5a)，在暗埋段标准断面的基础上，两侧沟壁逐渐外扩 1.3 m，在增扩空间中，管线分散从不同的套管中穿过管沟外墙。节点中部在原外墙位置设置钢立柱，用于安装管线托架，因此节点中部区域管线、托架布置断面与标准段相同，其结构断面形式见图 5b)。部分出线口临近轨道梁，存在轨道梁横跨节点的情况。由于钢轨传递的荷载较大，因此对轨道梁下方的节点区段采用 3 舱箱涵结构，中间设置 300 mm 厚的立柱墙，对顶、底板起支撑作用，中间孔的尺寸与暗埋段相同，管线托架的布置也与之相同，两侧孔洞宽度 1 m，其结构断面形式见图 5c)。由于其位于轨道下方，管沟壁外侧即为轨道梁基础，不存在管线进出的要求，因此立柱墙的设置并不影响节点的管线交互功能。



a) 结构平面

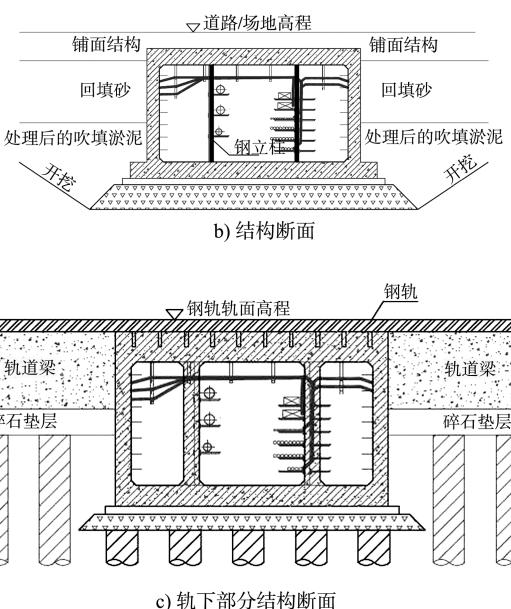
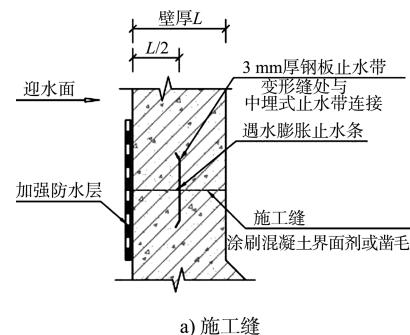


图 5 交互节点设计

3.6 防水设计

本项目位于海边，地下水由海水直接补给，尽管地基为真空预压处理后的淤泥，属于弱透水层，但表层存在约 1.5 m 厚用于提高地面承载力的砂垫层，因此管沟受地下水影响较大，在结构设计中仍需重点考虑结构防水。与城市综合管廊不同，港区综合管沟容纳的管线数量有限，其巡查、检修频率远低于城市管廊，根据 GB 50108—2008《地下工程防水技术规范》，适用范围为人员临时活动的场所，防水等级可按三级考虑（城市综合管廊防水等级二级）。因此本项目管沟主体结构采用防水混凝土，施工缝采用钢板止水带，变形缝采用中埋式橡胶止水带，施工缝和变形缝外侧均额外设置一层外贴式防水卷材加强层，防水构造见图 6。



a) 施工缝

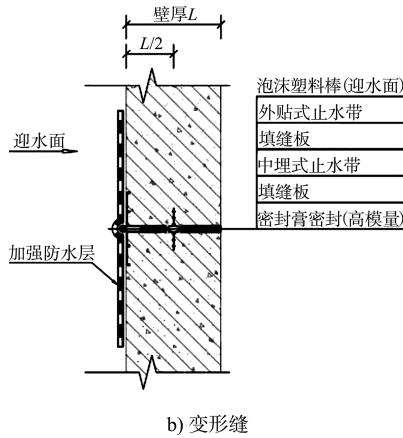


图 6 防水构造

3.7 排水设计

管沟中的水主要来源于大气降水时从盖板段钢盖板缝隙间以及管沟侧壁的渗漏水，水量不大，但为防止日积月累，仍需设置专门的排水系统将管沟内积水排出。为了与管沟外部直埋的管线配合，港区内地势与管沟高程一致，无法通过管沟自身坡度排水。因此，在管沟中采用水泥砂浆找坡，在横断面上，按 0.5% 坡度向一侧汇水，并在坡底设置宽 0.2 m、深 0.1 m 的排水沟。在纵断面上，沿管沟每 100 m 设置 1 个坡顶点，向两侧按 0.5% 的坡度找坡，在坡底设置集水坑，并安装自启动抽水泵，将积水抽排至管沟附近的雨水管中。

3.8 地基设计

管沟的地基主要为真空预压处理后的淤泥，地基承载力约 70~80 kPa，满足盖板段的地基承载力要求，但对于暗埋段和轨下段承载力均不足。其中暗埋段主要下穿道路，上部承受路面荷载，地基处理方案可考虑 2 种不同的思路：一是对地基本身进行加固，采用水泥搅拌桩形成复合地基，提高地基的承载力；二是采用底板外挑的形式，增加基础下方的换填垫层厚度，减小淤泥表面所受荷载。方案 1 可有效提升地基强度，但同时也会大幅度提高地基刚度，但由于港区道路均采用天然地基，如果横穿道路的综合管沟采用复合地基，运营期间两者在受同样使用荷载的情况下，必然产生较大的差异沉降，影响道路使用。因此本项目采用第 2 种处理方式，经造价对比，方案 2

也更具有经济性。

轨下段的上部荷载较大，无法采用方案 2 的处理方式，与之相连的轨道梁地基采用搅拌桩复合地基。采用复合地基的轨下段与采用天然地基的暗埋段地基刚度不等，造成两者之间的差异沉降较大。为解决此问题，延轨下段向两侧的暗埋段采用渐变式的复合地基过渡，复合地基的置换率不变，桩长逐渐缩短，直至过渡至天然地基，过渡形式见图 7。

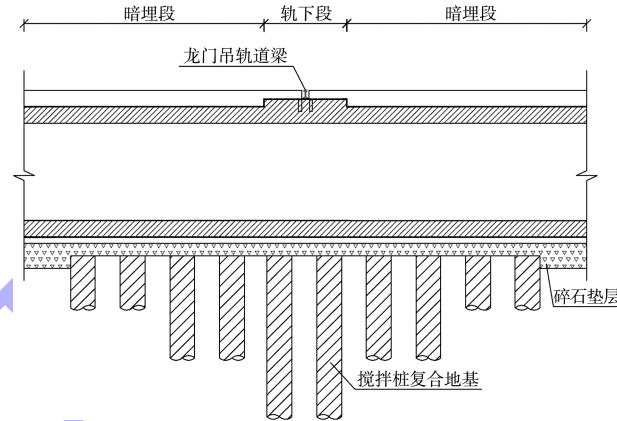


图 7 轨下段复合地基渐变式过渡

4 施工方法

由于综合管沟的基槽开挖深度较浅，采用明挖施工最为合适，施工方法主要考虑主体结构的施工方式，进行现浇施工和预制装配施工的比选。

现浇施工作为传统钢筋混凝土结构施工工艺，具有非常明显的优缺点：1) 钢筋绑扎、混凝土浇筑均在现场完成，整体性较好；2) 设计、施工到维护全过程经验成熟，规范、标准齐全；3) 现浇施工需要在现场进行混凝土养护，所需时间较长。

预制安装施工作为新发展起来的施工工艺，主要特点是：1) 主体结构在预制厂完成，成品质量较好；2) 在场外预制，场内安装，施工速度仍比现浇施工快速；3) 需额外考虑预制工厂和堆放场地；4) 单个管节长度较短，接缝多，接缝处的防水受不均匀沉降的影响较大。

结合项目的实际情况，对上述 2 种施工方法进行了比选。首先，港区地基为真空预压处理后的淤泥，之后存在次固结沉降，用现浇工艺可一次性浇筑长段管节，减少变形缝的数量，减少漏

水的可能性。其次，综合管沟的交互节点较多，且不规则，需要预埋大量的穿墙套管，各节点套管数量也不一致，难以采用预制安装施工，只能采用现浇施工。最后，现场用地紧张，缺少预制构件堆放场地，如堆放较远，将额外增加工程费用。综上对比，最终采用了较成熟的现浇工艺施工。

5 结语

1) 港口工程中采用综合管沟容纳给排水、电气、通信等管线，通过整体浅埋的方式，并结合堆场布置沿线设置盖板段，可以解决人员出入、投料、通风、照明等问题，能充分利用港区土地，节省造价。

2) 自动化码头中，综合管沟需要下穿轨道梁、道路、堆场等区域，轨道梁荷载较大，堆场荷载较小，地基基础设计中应充分考虑沿线荷载的差异，采用外挑底板、换填、复合地基及过渡段等方式，减少不均匀沉降。

3) 管沟内管线与外界交互频繁，管沟沿线节点较多，其形状不规则，侧壁预留穿墙套管的位置也不一样，适合采用现浇施工，或结合项目特点采用节点段现浇，标准段预制安装的施工方法。

4) 由于盖板段的设置和管沟防水等级的降低，

(上接第 132 页)

5 结论

1) 大型沉箱钢筋分段预制装配安装技术以机械化、智能化、装配化作业提升了施工本质安全、作业效率、成品质量，利用夹具式吊装工装、钢筋骨架预制胎架、8 字形和3字形双孔限位及旋转式立柱限位装置等，有效解决了传统钢筋绑扎工艺占用起重设备时间长、高空作业安全风险高及钢筋保护层控制难度大的问题。

2) 该安装技术与传统工艺相比，钢筋保护层厚度合格率提升5%以上、钢筋绑扎作业效率提升6.8倍、成本节省约20%以上，同时消除了高空作

管沟内必然会渗水积水，结构设计时需考虑汇集积水，并结合港区给排水设计将沟内积水排出沟外。

参考文献：

- [1] 王静芬,于芳泉.综合管沟的方案设计[J].中国市政工程,2007(5):52-53,101.
- [2] 陈明辉.城市综合管沟设计的相关问题研究[D].西安:西安建筑科技大学,2013.
- [3] 尹长虹,黄敬东,王顺柱.港口工程综合管沟设计[J].水运工程,2011(S1):126-128.
- [4] 中国建筑科学研究院.建筑地基基础设计规范:GB 50007—2011[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [5] 中国交通建设股份有限公司.港口工程结构可靠性设计统一标准:GB 50158—2010[S].北京:中国计划出版社,2010.
- [6] 中交水运规划设计院有限公司.水运工程混凝土结构设计规范:JTS 151—2011[S].北京:人民交通出版社,2011.
- [7] 中国建筑科学研究院.混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S].2015版.北京:中国建筑工业出版社,2015.
- [8] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司,中交第二航务工程勘察设计院有限公司.港口工程荷载规范:JTS 144-1—2010[S].北京:人民交通出版社,2010.

(本文编辑 王传瑜)

业安全风险，安全控制效果明显，具有较高的借鉴意义和推广价值。

参考文献：

- [1] 郑海峰,何作文,杨威,等.H型墩身钢筋胎架法整体绑扎施工控制技术[J].工程技术研究,2020,5(11):100-101.
- [2] 中冶京诚工程技术有限公司.钢结构设计标准:GB 50017—2017[S].北京:中国建筑工业出版社,2017.
- [3] 孙业发,王伟,宋书东,等.大型预制桥墩钢筋笼整体吊装对接施工技术[J].中国港湾建设,2014(9):55-58.

(本文编辑 武亚庆)