

JTG

中华人民共和国行业推荐性标准

JTG/T—

公路沉管隧道施工技术规范

Technical Specification for Construction of Highway Immersed Tunnel

征求意见稿

- - 发布

- - 施行

中华人民共和国交通运输部发布

中华人民共和国行业推荐性标准

公路沉管隧道施工技术规范

Technical Specification for Construction of Highway Immersed Tunnel

主编单位:

批准部门:

实施日期:

人民交通出版社

前 言

根据《交通运输部关于下达 2022 年度公路工程行业标准制修订项目计划的通知》（交公路函〔2022〕238 号），由中交第四航务工程局有限公司作为主编单位承担《公路沉管隧道施工技术规范》的制定工作。

编写组调研和收集了国内外沉管隧道建设相关资料，参考了相关科研成果，吸收了建设经验，借鉴了国内外相关标准规范，在此基础上以多种方式广泛征求了全国相关单位和专家意见，对主要条文内容进行了反复修改，最终完成了本规范的编制工作。

《公路沉管隧道施工技术规范》（JTG/T- ）规定了公路沉管隧道施工全过程主要控制技术标准。

《公路沉管隧道施工技术规范》（JTG/T- ）主要包括：1 总则，2 术语和符号，3 基本规定，4 施工准备，5 工程测量，6 大型临时工程，7 管节预制及场内运输，8 基槽，9 地基与基础，10 衔接段，11 管节下水及水上运输，12 管节沉放安装，13 最终接头，14 回填防护，15 路面与排水，16 附属设施，17 施工监测。

各有关单位在使用过程中，若有意见和建议，请及时函告中交第四航务工程局有限公司（地址：广州市海珠区沥滘路 368 号广州之窗总部大厦，邮政编码：510290，电话：020-84441842），以便下次修订时研用。

主 编 单 位：中交第四航务工程局有限公司

参 编 单 位：中交第一航务工程局有限公司

中交四航局第二工程有限公司

中交广州航道局有限公司

中交四航工程研究院有限公司

广州港湾工程质量检测有限公司

主 编：吕卫清

主要参编人员：苏林王 尚乾坤 李汉渤 应宗权 何 波 陈伟彬 梁邦炎

桑登峰 刘志军 黄文慧 王殿文

主 审：郭小红

参与审查人员：

参 加 人 员：陈 猛 欧伟山 吴海森 邹正周 罗碧丹 孙文火 赵 娟
刘梅梅 邓春林 林美鸿 朱 成 王 冲 娄学谦 林伟才 申昌洲 陈健斌
嵇 廷 刘 慧 张佳伟

征求意见稿

目次

前 言	1
1 总则	1
2 术语和符号	2
2.1 术语	2
2.2 符号	4
3 基本规定	5
4 施工准备	8
4.1 一般规定	8
4.2 施工条件与资源调查	9
4.3 工艺试验验证	10
4.4 施工技术方案选择与设备选型	11
4.5 施工总体部署	16
4.6 总平面布置	17
5 工程测量	19
5.1 一般规定	19
5.2 控制测量	20
5.3 管节预制测量	21
5.4 管节对接测量	22
5.5 贯通测量	23
6 大型临时工程	25
6.1 一般规定	25
6.2 预制场	25
6.3 寄放区	27
6.4 临时航道	28
7 管节预制及场内运输	29
7.1 一般规定	29
7.2 混凝土原材料及配合比设计	30

7.3 节段式钢筋混凝土管节	34
7.4 整体式钢筋混凝土管节	42
7.5 钢筋混凝土管节控裂和防渗	44
7.6 钢壳混凝土管节预制	46
7.7 预埋、预留件	50
7.8 工厂法管节场内运输	52
7.9 一次舾装及试漏	53
8 基槽	57
8.1 一般规定	57
8.2 基槽初挖	57
8.3 基槽精挖	59
8.4 基槽清淤	60
9 地基与基础	64
9.1 一般规定	64
9.2 地基处理	64
9.3 桩基础	66
9.4 垫层与整平	66
10 衔接段	70
10.1 一般规定	70
10.2 围堰与基坑	71
10.3 衔接段隧道结构	74
10.4 护岸	75
11 管节下水及水上运输	77
11.1 一般规定	77
11.2 寄放	78
11.3 二次舾装	82
11.4 浮运	85
11.5 驳运	90

12 管节沉放安装	92
12.1 一般规定	92
12.2 系泊定位	93
12.3 压载沉放	96
12.4 拉合对接	100
12.5 水力压接	100
12.6 轴线调整	102
13 最终接头	104
13.1 一般规定	104
13.2 岸上最终接头	104
13.3 水下最终接头	105
14 回填防护	108
14.1 一般规定	108
14.2 锁定回填	109
14.3 一般回填	109
14.4 护面回填及防护	109
15 路面与排水	111
15.1 一般规定	111
15.2 路面施工	111
15.3 排水系统施工	112
16 附属设施	113
16.1 一般规定	113
16.2 附属构造物施工	113
16.3 交通工程与附属设施安装	114
17 施工监测	117
17.1 一般规定	117
17.2 环境监测	118
17.3 基槽、垫层回淤监测	118

17.4 管节姿态监测	120
17.5 管节结构监测	120
17.6 围堰与基坑监测	122
17.7 坞门监测	123
附录 A 管节水密性检查表	124
附录 B 浮运水阻力与定倾高度计算	126
B.1 浮运阻力计算	126
B.2 管节定倾高度计算	126
本规范用词用语说明	128

征求意见稿

1 总则

1.0.1 为统一公路沉管隧道工程施工的技术要求，保证工程质量，制定本规范。

1.0.2 本规范适用于沉管法公路隧道施工。

1.0.3 公路沉管隧道应统筹考虑大型临时工程、基槽开挖、地基基础施工、衔接段、管节预制与出运安装等工序的衔接和协调。

1.0.4 公路沉管隧道施工必须遵守国家和行业的安全生产法律法规，并制定切实可行的基槽开挖、管节水上运输、沉放安装等安全保证措施，保障施工安全。

1.0.5 公路沉管隧道施工应遵循绿色环保、节能低碳、因地制宜原则，根据工程所在区域的环境影响评价要求，采取必要的生态环境保护措施。

1.0.6 公路沉管隧道施工宜采取信息化和数字化技术手段，不断提高数字化建造水平。

1.0.7 公路沉管隧道施工除应执行本规范外，尚应符合国家和行业其他现行有关标准、规范的规定。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 干坞法预制 Dry Dock Prefabrication

利用新建或已有干坞进行管节预制。

2.1.2 工厂法预制 Factory Prefabrication

在可控制环境条件的工厂车间内进行管节预制，一般采用自动化设备和流水线生产方式。

2.1.3 浮坞法预制 Prefabrication with Floating Dock

利用半潜驳、浮船坞等船舶或其他浮式平台进行管节预制。

2.1.4 大型临时工程 Large Temporary Facility

为沉管隧道施工需要而建设的管节预制场、寄放区、临时航道等工程。

2.1.5 临时航道 Temporary Channel

通航航道改线形成的临时性航道及管节水上运输的通道，管节水上运输通道通常指管节浮运航道或驳运航道。

2.1.6 作业窗口 Weather Window

水文、气象、风浪等条件能够满足沉管管节浮运安装作业要求的一个连续时间段。

2.1.7 精挖 Precise Dredging

采用能精准控制深度的挖泥船开挖基槽的疏浚作业。

2.1.8 衔接段 Approach Section

与沉管段两端相连接的隧道段。

2.1.9 浮运 Floating Transportation

管节一次舾装及试漏完成后，浮于水面，将其运到指定位置的过程。

2.1.10 驳运 Transportation by Barge

利用半潜泊、浮船坞等装载管节运输至指定位置的过程。

2.1.11 沉放 Immersion

将管节逐渐下沉、安放至基础垫层或临时支撑的过程。

2.1.12 水力压接 Docking by Hydraulic Pressure

管节拉合后，将相邻端封墙之间的水排出，利用待沉放管节自由端端面水压力使止水带进一步压缩的过程。

2.1.13 对接 Docking

将沉放到位的管节与接口段或已沉放的管节实现水力压接的过程。

2.1.14 压载水箱 Ballast Tank

浮运前在管节内安装可盛水的箱体或者容器，通过注水或抽水达到调节和平衡管节负浮力和上浮力的目的。

2.1.15 舾装 Outfitting

为了管节浮运、系泊、沉放、对接等需要而安装在管节上的临时设施，包括端封墙、压载水箱、管系、测量塔、人孔、系缆柱、绞缆盘底座、吊点、导缆器、拉合装置等，可分为一次舾装和二次舾装。

2.1.16 干舷高度 Freeboard

指浮运状态下静止水位至管节顶面之间的高度。

2.1.17 先铺法 Pre-bedding Method

管节沉放对接前先行完成支撑管节基础垫层施工方法。

2.1.18 后填法 Post-filling Method

管节沉放对接后完成的管节基础垫层施工方法。

2.1.19 砂流法 Sand Flow Method

通过管节侧墙、底板等结构预埋管压注砂（或砂与水泥熟料）充填管节底板与基槽底空隙形成基础垫层的方法。

2.1.20 压浆法 Grouting Method

通过管节底板预埋管灌注砂浆充填管节底板与基槽底之间空隙形成基础垫层的方法。

2.2 符号

F ——水阻力（N）；

A ——管节受水流阻力面积， m^2 ；

ρ_w ——水密度；

v ——管节对水流的相对速度（ m/s ）；

K ——挡水形状系数；

D ——管节宽度（ m ）；

T ——管节吃水（ m ）；

δ ——管节前涌水高度（ m ）；

m ——定倾高度（ m ）；

ρ ——定倾半径（ m ）；

a ——重心到浮心距离（ m ）；

I ——管节水面处的断面对纵向中心轴的惯性矩（ m^4 ）；

I_i ——第 i 个压载水舱的水面对管节纵向中心轴的惯性矩（ m^4 ）；

V ——管节的排水量（ m^3 ）；

L_i ——第 i 个压载水舱长度（ m ）；

B_i ——第 i 个压载水舱宽度（ m ）。

3 基本规定

3.0.1 公路沉管隧道施工前应应对工程水域、预制场地、临时航道及周边环境与地质条件等进行工程现场调查与勘测工作。

3.0.2 沉管隧道施工总体部署应综合考虑工期要求、管节预制安装施工工艺、隧道衔接段施工与管节安装工序衔接、作业窗口及环境条件等因素，确定施工总流程和总体施工顺序，合理配置施工装备、施工材料等资源。

【条文说明】沉管隧道施工总体部署是指在沉管隧道施工前，需要综合考虑多个因素，以确定适当的施工流程和施工顺序，并合理配置相关资源，以确保施工进度顺利。

工期要求往往决定了关键工艺流程时间要求，进而安排合理的施工流程。管节是在预制场地进行预制的，然后通过场内运输及水上运输至指定位置进行沉放安装。因此，在施工总体部署中，需要确定预制和安装的时间，确保两者之间的衔接。

衔接段施工控制是沉管隧道施工关键因素之一，影响到管节安装的控制性工期，需与管节预制及安装整体进度相匹配。在衔接段施工前需加强专项工筹，进行管线排查、地勘资料核查，对设计文件进行必要的优化，编制危大工程施工专项技术方案、绿化迁改方案并进行专家论证，对既有建（构）筑物加强保护及衔接。

作业窗口和环境条件也是重要的考虑因素。施工的时间窗口需要考虑施工环境的因素，如天气、水文条件等，以确保施工的安全性和可行性。

3.0.3 环境条件复杂或施工经验缺乏时，施工前应应对管节预制、场内移运、水上运输、沉放安装、地基与基础、最终接头等关键工艺进行验证。

3.0.4 沉管隧道基槽开挖正式作业前，宜开展沉管隧道基槽开挖工艺及回淤观测试验专题研究，并进行工艺验证。

【条文说明】沉管隧道建设过程中，泥沙回淤速率及分布情况对于管节沉放安装

施工的影响极大。通过回淤观测试验,掌握泥水密度、周边水域在一定时期内的泥沙回淤速率和分布情况,分析基槽开挖成槽后泥沙回淤强度和时空变化规律,为基槽施工和管节沉放施工提供指导。

3.0.5 地质条件复杂或地基基础使用要求高、附近区域没有可借鉴的工程经验时,应进行地基与基础的验证性施工。

3.0.6 施工前,应开展室内试验和管节局部结构模型试验,确定管节混凝土配合比、浇筑工艺参数。对于钢筋混凝土管节应确定控裂措施,对于钢壳混凝土管节则应确定防钢壳与混凝土顶部脱空的措施。

3.0.7 水流、波浪条件复杂时,浮运施工前应开展管节浮运阻力系数、稳定性模型试验。

3.0.8 大型、复杂或离岸深水区工程宜组建测量控制中心。

【条文说明】大型、复杂或离岸深水区,沉管隧道施工精度、稳定性要求高,测量效率要求高,涉及控制测量、管节预制和对接测量、隧道贯通、监控测量等工作,为了保证项目空间整体线性测量质量,实现沉管隧道的精确贯通,有必要建立测量控制中心。

3.0.9 管节水上运输工艺应根据管节预制方式、水上运输距离、水域通航条件、水流波浪条件、管节结构安全风险、水上运输装备和管节的尺寸及重量等因素确定。

【条文说明】管节水上运输工艺通常采用的方案有拖轮浮运、绞车浮运和驳船驳运等。内河沉管隧道工程如采用轴线干坞或邻近干坞预制管节时可采用岸控绞车或驳船绞车拖运;采用浮船坞预制时则通常利用浮船坞或半潜驳驳运管节至隧址位置。当预制场地与隧址距离较大时,则可根据运输线路上的航道条件、水流波浪条件等合理选择拖轮拖运或驳运方案,必要时配以辅助拖轮顶推。

管节尺寸和重量一般会影响管节能否自浮、驳船选型,当管节为非自浮时则要求采用助浮措施或驳船运输到现场,而管节尺寸和重量分布往往会直接决定了驳船适应性和可行性。运输工艺选择合理性更多考虑基于项目工期限制下的风浪流作业窗口选择,作业窗口需满足管节结构安全风险控制要求。

3.0.10 管节沉放应根据作业窗口条件选择沉放的时机,沉放前应对基槽、管节的

拉合系统、压载水系统、监控测量系统、沉放船机设备等进行检查，确保满足沉放要求。管节沉放到位后，应检查确认管节对接精度满足设计要求。

3.0.11 最终接头的施工应确保满足止水板或预制式接头的安装精度和水密性要求。

【条文说明】最终接头的施工质量，直接影响到隧道管节的整体质量、隧道贯通和运营期的使用，故应采取措施保证其水密性和安装精度。由于水下最终接头所在管节两个端面的相对姿态不同，且水下施工作业环境条件一般较差、难度较大，故应加强最终接头的测量复核，进行专项模板设计和精细安装，以确保现浇式最终接头止水板安装精度及水密性。预制式接头的水下安装，有 V 型接头和推出式接头水下安装两种，同理也需开展专项设计和论证，进行必要的陆上和水下工艺试验，以验证其水密性和安装精度，并加强测量标定，确保最终接头水下安装质量。

3.0.12 施工前，应对浮运航道、临时航道进行通航安全专项论证。

3.0.13 管节水上运输与安装应配置作业窗口预报系统、管节测量控制系统、管节压载系统；沉放安装尚应配置管节拉合控制系统、管节对接导向系统、管节水力压接系统、管节姿态调整系统等。

3.0.14 公路沉管隧道工程的施工监测应根据工程具体情况进行专项设计。施工监测方案制定应综合考虑、管节受力情况和力学性能、管节制作方法、施工工艺、环境、工期、运营维护要求等因素。

4 施工准备

4.1 一般规定

4.1.1 施工总平面布置应考虑工程规模、工期、用地情况、运输条件、管节预制方式、临时系泊区、水电保障等因素，因地制宜，合理安排。

4.1.2 施工工期总体计划应根据环境条件、工艺方案和总工期要求等确定。管节预制与安装进度计划应结合总工期要求、管节数量、航道运输条件和施工作业窗口等进行确定。

【条文说明】管节预制及安装进度计划是制约总工期的关键因素，各关键工序需要互相匹配，具体包括：管节预制工期与衔接段工期相匹配，沉管预制场地的建设与首节沉管预制开工相匹配，管节衔接段、基槽及水上运输航道的施工与管节水上运输、沉放安装相匹配。

4.1.3 管节预制、基槽开挖、衔接段钢围堰施工、垫层整平、水上运输和安装等专用装备、特种设备应进行专项设计、制造或技改，其技术指标应符合工程工况和设计精度要求。

【条文说明】沉管管节为大体量结构，重量通常达 20000t~80000t，长度通常为 70m~180m，结构复杂，技术标准严格，管节预制、基槽开挖、垫层整平、水上运输和安装施工难度大、质量要求甚高，且安装位置处于深水区，水文地质环境复杂，故管节预制需专项设计制造（技改）大型液压步履式钢结构模板（钢筋混凝土管节）、混凝土浇筑专项装备及大型移运装备；基槽开挖需采用粗挖、精挖及清淤大型专项装备；衔接段使用大型钢圆筒作为筑岛围堰时，需设计制造集吊装、定位及多锤联动振沉功能于一体的专项装备与控制系统；垫层整平需设计制造（技改）专项整平装备；水上运输需采用大型拖轮及专用装备进行浮运，还可选用或设计制造（技改）浮船坞、半潜驳进行驳运；管节安装需选用专用装备或设计制造（技改）大型沉放驳。

大型设备一般结合施工现场通航宽（高）度、水深、水域宽度和主管部门相关要求等限制条件确定。

4.1.4 复杂流态和浅窄水域中运输管节前应开展管节拖航物理模型试验。试验缩

尺模型的相似准则及参数换算应满足相关规范和设计要求。

4.1.5 采用砂流法的沉管隧道基础宜开展工艺模拟试验，分析确定施工控制参数。

4.1.6 管节预制的混凝土配合比应进行专项设计，宜通过全足尺模型或局部足尺模型试验验证混凝土相关性能指标。

4.1.7 衔接段施工前，应对施工影响区域建（构）筑物、军事设施、公用设施、地下管线、水域环境保护要求进行调研，并根据环境影响评价结论采取必要的防污、防尘、降噪、防爆等生态环境保护措施。

4.2 施工条件与资源调查

4.2.1 水文调查应针对隧址附近水域及运输路线水域进行，调查内容宜包括防洪标准、江（河）流量、水位及流速、水体重度、水（海）域的潮差变化规律、附近水域的波浪资料、泥沙含量、水温及盐度、淤积情况等，必要时可开展试挖槽、回淤监测等。

4.2.2 气象调查应针对隧道所在水域及水上运输经过水域进行，调查内容宜包括气温、风速、风向、降雨量、积雪量及降雪、雷暴程度和天数、水体冻结程度和时间、最大冻土深度等。

4.2.3 地质调查应针对衔接段、管节预制场、舾装场地、水上运输航道及临时航道等相关区域进行，调查内容宜包括地质图、附近已建工程和本工程的工程地质报告、区域地质灾害及不良地质分布状况、隧址所在水域的水底沉积物及水下地质灾害、区域地震历史及地震烈度等。工程区域存在水文地质条件复杂、岩溶极发育、大型断层破碎带、风化深槽等重大不良地质时，宜进行专项地质勘察研究。

4.2.4 地下管线调查应探明施工影响区域范围的燃气、电力、带压管线、国防光缆等重要管线的实际走向和埋深。

4.2.5 大宗材料调查应针对砂石料、水泥、粉煤灰、钢材和商品混凝土等主材进行，调查内容宜包括产量、运距及运输方式等。

4.2.6 通航条件调查宜包括工程区域及大型临时工程周边的航道等级、航运量、通航限高等。

4.2.7 锚地调查宜包括工程区域及水上运输航道周边船舶锚地的地理位置、水深、水域面积、底质、掩护条件和通航限制条件等。

4.3 工艺试验验证

4.3.1 管节预制工艺试验验证应符合下列规定：

- 1 钢筋混凝土管节控裂方案宜在模型试验与数值模拟比对分析的基础上确定。
- 2 钢壳混凝土管节应开展自密实混凝土灌注工艺试验，对混凝土的收缩特性、钢壳内混凝土脱空率及脱空高度等关键指标进行验证。

4.3.2 管节场内移运工艺试验验证应符合下列规定：

- 1 大型移运设备宜应按不小于设计荷载的 1.1 倍进行静载工艺试验。
- 2 大型移运设备使用前应进行联调联试。移运系统的运行速度、整体同步性、自动纠偏控制系统和控制系统灵敏性等参数应符合设计要求。

【条文说明】根据深中通道 800t 液压台车经验，按照设计荷载的 1.1 倍进行静载工艺试验，可满足现场实际运输要求。

4.3.3 管节浮运阻力系数、稳定性模型试验应确定管节浮运各工况条件下的拖航阻力、稳性及船机配置的合理性，试验模型缩尺比例宜选 1:30~1:50。

4.3.4 管节驳运工艺试验验证应符合下列规定：

- 1 钢壳管节采用驳运时，应进行上驳、驳运和卸驳全过程工艺试验验证。
- 2 钢筋混凝土管节采用驳运时，可采用管-船静载或动载模型试验，进行验证船体变变形和管-船协同变形情况。。

【条文说明】管-船静载是指在数值模拟分析基础上，按照一定的缩尺比例开展船体与管节的相似模型设计制作，开展陆上不同工况下荷载分布的静态加载模拟，测试不同工况下的船体和沉管弯曲、扭转情况，验证船体与沉管模型的应力与变形分布情况。管-船动载模型试验是指在数值模拟分析基础上，按照一定的缩尺比例开展船体与沉管、缆绳、支墩等构件的相似模型设计制作，在大型动力试验水池中，开展系管节上驳试验、半潜驳运输试验、管节下驳试验、管节浮运沉放试验，测试并获取拖

曳阻力响应时程曲线、阻力系数、管节六自由度运动响应时程曲线、航速度下制动所需时间及距离、拖航过程各缆索力响应时程曲线、半潜驳的稳性、管节典型截面弯矩和剪力、管节挠度变形等关键参数。

4.3.5 管节沉放安装工艺宜采用水工模型试验验证，水工模型试验内容应包括测试选定施工工况下管节沉放过程中的管节六自由度运动响应、缆索力。管节沉放安装测量定位系统验证宜采用数字仿真与现场试验相结合的方法进行。

4.3.6 基槽施工工艺试验验证应符合下列规定：

- 1 应开展施工工况的基槽边坡稳定性分析。
- 2 应测试施工水域的淤积强度、范围等。
- 3 采用新型清淤设备时，应结合隧址的水深、水流和波浪条件进行工艺验证，确定适用工况、清淤效果和施工工效。

4.3.7 大型钢圆筒振沉工艺试验验证应包括土层侧阻力、可贯入能力、振沉工效、振沉质量等内容。

4.3.8 垫层施工工艺试验验证应符合下列规定：

- 1 砂流法工艺试验验证应包括流量、压力等参数，并对充盈度进行评价。
- 2 先铺法碎石垫层试验验证应包括施工工艺、设备适用性、整平精度和施工工效等参数。

4.3.9 最终接头工艺试验验证应符合下列规定：

- 1 水下顶推式最终接头工艺验证宜采用缩尺模型工艺试验验证，内容应包括施工工艺、止水效果和施工工效等参数。模型缩尺比例宜结合施工工况条件和设计要求确定，可采用 1:10~1:20。
- 2 V 型块体整体吊装式最终接头工艺验证内容应包括吊装工艺试验、自密实混凝土灌注工艺试验和水密性试验。

4.4 施工技术方案选择与设备选型

4.4.1 钢筋混凝土管节预制工法可分为干坞法、工厂法和浮坞法，应根据场地条件、预制工效、质量要求和成本因素等进行选择，并应符合下列规定：

- 1 预制质量要求高、管节数量多时，宜选择工厂法预制。
- 2 管节数量较少，隧址附近具备建设干坞的条件时，可选择干坞法。
- 3 管节数量少、工期要求不高时，可选择浮坞法。

【条文说明】工厂法具有相对稳定的工作环境，受外部气象条件影响小，适用于技术标准严格、质量要求高的管节预制。此外，该工法可形成流水化施工，保证连续作业，施工工效高，适用于管节数量多、工期要求紧的工程。

4.4.2 钢壳混凝土管节预制宜根据场地条件、质量和工期要求，可选择干坞法浇筑、工厂法浇筑或水上浮态浇筑。采用水上浮态浇筑管节时，应考虑水流、波浪、台风等对混凝土工作性能和施工作业的影响。

4.4.3 管节预制生产设备应根据预制工艺方案进行配置，并应符合下列规定：

- 1 混凝土生产设备应满足混凝土浇筑强度要求，并配备不少于1条备用生产线。
- 2 起重、运输设备类型及数量应满足生产高峰期起重吊装需要，设备的性能选型应根据管节及构件重量和数量确定。
- 3 冬期施工应设置蒸气养护系统，蒸汽温度应根据混凝土温控标准确定。

4.4.4 管节场内运输方案和设备应根据管节预制工艺、管节重量、管节结构类型确定。采用工厂法预制的节段式管节可采用顶推工艺或液压台车移运工艺；钢壳混凝土管节宜选用液压台车工艺。

4.4.5 管节顶推系统宜采用分散布置，并应具有自动纠偏功能。顶推系统配置应符合下列规定：

- 1 顶推系统可由顶推千斤顶、支撑千斤顶、导向及纠偏装置、集中控制台等组成，滑移面宜采用不锈钢板和聚四氟乙烯板（PTFE板）。
- 2 支撑系统应为3套相互独立、三角形布设的液压千斤顶系统，以形成底部“三点”支撑，支撑系统安全系数不应小于2倍。

4.4.6 管节移运液压台车系统应采用集中布置，并应具有自动纠偏功能。管节移运液压台车系统配置应符合下列规定：

- 1 液压台车应满足自动调节支撑高度、双向无级变速行走的功能要求。
- 2 支撑系统应通过串联的形式组成 A/B 两组相互独立的油路，满足“一用一备”的要求。

4.4.7 管节水上运输方案应根据水文气象环境、运输距离、航道条件、管节尺度等特性综合比选。水上运输装备应综合考虑浮运现场航道水深、水流力、风荷载、拖航阻力、转向阻力和浅水效应可能引起的吸底力等因素进行配置，可采用拖轮或者专用船舶进行拖航。

4.4.8 管节驳运可采用半潜驳和浮船坞，并应符合下列规定：

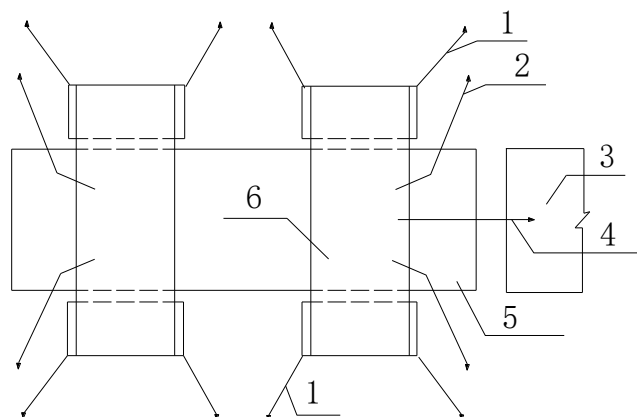
- 1 驳运前应对驳运区域的水文、气象等历史资料进行分析，并结合潮位、水深、流速、水重度、风速、波高的监测结果评估满足管节驳运的作业窗口期。
- 2 管节移运至半浅驳或浮船坞，宜采用有轨台车、无轨台车等移运工艺。管节上驳工艺应考虑潮位、波高、船体调载能力、上驳系统可靠性等因素选取，可采取坐底或浮态上驳方式。
- 3 管节驳运支撑系统应考虑船舶甲板刚度、管节刚度及重量、波浪、水流、风速等因素进行设计，支撑体系应具备适应船-管变形的功能。管节驳运过程中应对管节变形及姿态进行实时监控。

【条文说明】管节上驳、驳运及水下卸驳过程中，船体在各类荷载叠加作用下会产生动态变形，影响到管节的结构安全，因此需设计制造具有自适应调节功能的支撑体系，如液压千斤顶或高性能橡胶支垫，以动态适应船体变形并对船体变形及时补偿，从而保证管节结构应力及变形可控。

4.4.9 管节沉放方式应根据管节尺寸重量、波浪、水流及起重设备性能进行选择，宜采用驳船吊沉法。沉放驳应配备定位、吊沉、远程控制、加水、视频监测和电力等系统。

【条文说明】驳船布置形式一般根据施工区域环境条件、施工水域面积及航道情况进行选择。跨越管节布置驳船吊沉是将四方驳抬吊法中管节左右侧两艘方驳加工

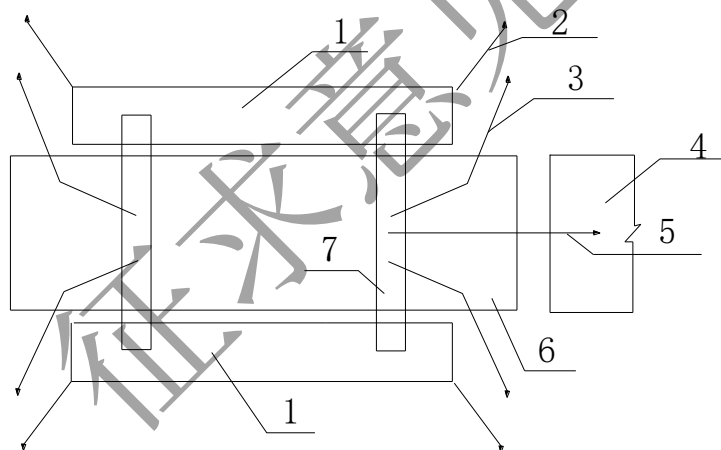
成一个整体，如图 4.4.9-1 所示。



1-沉放驳定位缆；2-横调缆；3-已沉放管节；4-纵调缆；5-待沉放管节

图 4.4.9-1 跨越管节布置驳船吊沉示意图

管节两侧布置驳船吊沉是将四方驳抬吊法中管节前后方两艘方驳用一条大的方驳代替,如图 4.4.9-2 所示。



1-沉放驳；2-沉放驳定位缆；3-横调缆；4-已沉放管节；5-纵调缆；6-待沉放管节；7-钢板梁

图 4.4.9-2 管节两侧布置驳船吊沉示意图

4.4.10 基槽施工工法应根据水文地质条件、工期、质量、环保、通航等条件进行选择，并应符合下列规定：

1 深厚基槽宜分阶段进行初挖和精挖，并与管节安装时间计划相匹配。初挖宜与已安装管节保持 100m 以上作业距离；精挖应按管节安装顺序进行流水作业，宜提前下在一个管节安装所需作业范围内进行精挖工作。

2 基槽开挖可根据设备能力、地质条件及工效等选用耙吸式挖泥船、绞吸式挖

泥船、抓斗挖泥船或铲斗挖泥船，必要时配备凿岩船。

3 黏土、密实细砂、含有少量卵石或小块石的土层可采用耙吸式挖泥船进行初挖；中等强度以下的岩石及各类土均可采用绞吸船初挖；全风化软岩、密实碎石土可采用抓斗挖泥船初挖，土质基底可采用挖泥船精挖；强风化以上硬岩宜采用凿岩船进行施工。

4.4.11 抛石基床厚度大于 2m 时，应分层抛填及夯实施工，基床表面整平的允许偏差为 $\pm 150\text{mm}$ 。

【条文说明】本条参考《码头结构施工规范》（JTS 215）中对重力式码头抛石基床粗平的允许偏差。

4.4.12 筑岛围堰采用大型钢圆筒结构施工时，钢圆筒安装宜采用振沉法，并应根据设计要求、地质条件、工期、质量等条件设计、制造专项装备与控制系统。

4.4.13 垫层施工可采取先铺法或后填法，施工方案及设备应根据水文地质条件、水深、水域面积及碎石垫层分层要求等综合比选确定，并应符合下列规定：

- 1 碎石垫层应一次摊铺及整平。
- 2 先铺法用碎石整平船整平时，整平船应具备浅水区域避风、抗台自存等能力，并配备锚泊、定位、升降、抛石整平和石料输送（控制）等系统。
- 3 后填法基础可采用砂流法、压浆法施工。砂泵扬程、功率和流量应满足灌砂充盈度、密实度、扩散半径的要求；压浆泵压力、功率、流量应满足压浆充盈度、扩散半径的要求。

【条文说明】管节数量少、风浪条件良好、水深小、施工水域小时，一般采用水下整平架或水下整平机器人、导轨刮平法铺设。管节数量多、风浪条件较大、水深大、施工水域大时，则可采用整平船铺设，铺设及整平一次成型。

4.4.14 最终接头施工工艺应符合下列规定：

- 1 岸上最终接头应采用临时围堰形成干作业条件，满足浇筑混凝土的要求。
- 2 水中最终接头施工应根据接头形式及作业要求，配置水上运输、吊装与水下监测的船机设备。

【条文说明】钢封式水中接头配置起重船、运输驳、潜水工作船进行止水板安装；V型块体水中接头配置大型起重船、运输驳、潜水工作船进行吊装；推出式水中接头采用潜水工作船对接头顶推过程进行监测和探摸。

4.5 施工总体部署

4.5.1 施工总流程及总体施工顺序应符合下列规定：

- 1 沉管隧道施工总流程应结合工程规模、施工组织模式、施工总体顺序、各区（段）间施工逻辑关系等因素进行编排。
- 2 沉管隧道工程应先开展两端衔接段施工。水下沉管段施工顺序应根据管节预制及安装进度、最终接头位置合理安排。

【条文说明】水下沉管段施工顺序，通常是安排沉管隧道一端的衔接段先行施工，另一端的衔接段一般根据最终接头位置及总体工期安排进行施工，以便开展管节预制及安装这一条关键路线的流水作业。最终接头的位置一般根据管节预制及安装的工期计划，并结合地质、水深、流速及其在隧道纵面上的位置等因素综合优选。

4.5.2 施工关键路线宜按施工总流程要求，在分析和统筹预制场建设、管节预制、衔接段施工、运输航道、基槽、地基基础施工、管节运输、管节安装和最终接头等工期要求的基础上进行确定。

4.5.3 施工作业窗口的选取应在统计分析作业区的水流、波浪、风速与能见度等水文气象参数的基础上，按作业时长与水文气象的作业限制条件综合确定。水文气象作业限制条件宜通过物理模型试验确定，试验成果不足时，可参考表 4.5.3-1 的要求。

表 4.5.3-1 施工作业窗口表

作业阶段和内容	流速* (m/s)	波高 (m)	波浪周期 (s)	风速 (级)	能见度 (m)
管节出坞	≤0.3	≤0.8	≤6	≤6	≥1000
航道浮运	≤0.8	≤0.8	≤6	≤6	≥1000
半潜驳、浮船坞下潜	≤0.3	≤0.8	≤6	≤6	≥1000
管节基槽内纵拖	≤0.5	≤0.8	≤6	≤6	≥1000
管节沉放等待	≤1.1	≤0.8	≤6	≤6	≥1000
管节沉放、对接	≤0.5	≤0.6	≤6	≤6	≥1000

基槽开挖	按照《疏浚与吹填工程技术规范》JTS207 执行
------	--------------------------

*注：流速为管节水下高度范围内流速平均值。

【条文说明】港珠澳大桥和大连湾隧道管节安装施工作业窗口的选取如下：

表 4.5.3-2 管节安装作业窗口条件限制参考表

施工项目	作业阶段和内容	流速 (m/s)	波高 Hs (m)	波浪周期 (s)	风速 (级)	能见度 (m)
港珠澳大桥	沉放等待	1.3	0.8	≤6	≤6	≥1000
	沉放对接	0.5	0.6	≤6	≤6	≥1000
大连湾 海底隧道	沉放等待	0.5	0.6	≤6	≤6	≥1000
	沉放对接	0.5	0.6	≤6	≤6	≥1000

4.6 总平面布置

4.6.1 大型临时工程选址应符合下列规定：

- 1 大型临时工程不得建造在易发生滑坡、坍塌、泥石流、山洪等危险地段和低洼积水区域，并应避开水源保护区、水库泄洪区、濒险水库下游地段、强风口和危房影响范围。
- 2 预制场地宜选在距隧道位置较近、寄存及航道条件良好的位置。

4.6.2 办公区、生活区和施工作业区应分区设置，且应采取相应的隔离措施，并设置导向、警示、定位、宣传标识。

4.6.3 预制场地规模应结合选定的管节预制工法，根据管节尺寸、数量、工期及经济性确定。预制场功能分区及布局应考虑水陆运输条件、临时码头设置、土方弃运、吊装作业、现场搅拌站的设置、大宗材料、散体物料堆场等因素。机械设备、附属车间、加工场等场地布置应相对集中。

4.6.4 工厂法和干坞法预制管节宜优先考虑在坞内寄存；采用坞外寄放时，寄放区应选择水深足够、风浪小、水流缓的非通航水域。寄放区面积应根据预制及安装进度、管节数量、二次舾装要求等确定。

4.6.5 临时航道设置应符合下列规定：

- 1 临时航道的规划与布置应与预制场址、管节寄放和安装作业区、现有航道及

锚地相协调。

2 水上运输路线设计应考虑现有航道位置、水流及波浪条件、运输距离、管节尺寸、管节浮运或驳运掉头区、管节安装顺序和航道疏浚量等因素。

4.6.6 管节沉放安装的施工作业区应包括转向等待系泊区、基槽内纵向浮运区和沉放安装等待系泊区，转向等待系泊区范围应根据运输方式、锚缆长度、沉放驳尺寸等因素综合确定，沉放安装等待系泊区范围应根据浮运方式、锚缆长度、沉放驳尺寸和沉放工艺等因素综合确定。

4.6.7 管节采用驳运时，现场下潜区应在靠近水上运输航道及基槽附近设置，下潜区水深、底部尺寸应满足浮船坞或半潜驳安全下潜及管节离驳、浮运要求。

征求意见稿

5 工程测量

5.1 一般规定

5.1.1 测量工作应遵循从整体到局部、先控制后碎部、从高级到低级、分级布网和逐级控制的原则。

5.1.2 测量前准备工作应符合下列规定：

1 测量前应对施工现场进行踏勘、接收和收集相关测量资料，对既有测量控制点进行复测、加密和保护。

2 施工前应根据管节结构形式及施工精度要求等编制施工测量方案，选定测量控制等级，确定测量方法。

3 水下地形测量的范围应取距隧道轴线两侧各不少于 500m。有特殊要求时，可扩大测量范围。

5.1.3 沉管隧道施工测量体系应符合下列规定：

1 施工测量控制网应采用隧道勘测阶段的控制基准、平面和高程控制网。

2 施工控制网应在首级网基础上，根据控制点的点位分布、测量作业区域及施工内容等因素，逐级布设首级加密网、一级加密网、二级加密网。

3 水下地形测量的平面和高程控制系统宜与同一测区陆上地形图一致，地形图比例及范围应满足施工要求。

【条文说明】港珠澳大桥岛隧工程和深中通道岛隧工程首级加密控制网观测技术要求：平面控制网按《公路勘测规范》（JTG C10）中 GPS 二等精度。高程控制网按照国家二等水准测量精度。

5.1.4 施工前，应根据沉管隧道施工精度要求布设工程平面和高程测量控制网，并与首级控制网联测。

5.1.5 测量控制网应覆盖施工区域。沉管隧道施工最远作业区离岸超过 5km 时，宜设置水上测量平台。

5.1.6 航道水深、基槽开挖前后泥面标高、抛石基床及碎石垫层顶面标高应采用多波束扫测。异常浅点区域、航线途径区域有效水深范围内有岩层或水下障碍物时，应处理后采用硬式扫床进行检查、复核。

5.1.7 沉管隧道工程的测量除应符合本规范的规定外，尚应符合国家及行业测绘现行规范标准的规定。

【条文说明】相关的国家及行业测绘现行规范标准主要包括《国家一、二等水准测量规范》（GB/T12897）、《国家三、四等水准测量规范》（GB/T 12898）、《全球定位系统（GPS）测量规范》（GB/T18314）、《工程测量规范》（GB50026）、《精密工程测量规范》（GB/T15314）、《水运工程测量规范》（JTS 131）、《测绘技术总结编写规定》（CH/T1001）、《公路勘测规范》（JTG C10）等。

5.1.8 隧道工程完工后，应进行隧道轴线、里程、路面标高和覆盖层顶标高等竣工测量并绘制竣工图。

5.2 控制测量

5.2.1 沉管隧道两端应各埋设不少于 5 个平面控制点，控制点宜布设成强制对中墩。同一隧道洞口应埋设不少于 2 个平面控制点，并应分别与埋设在端头的其余平面控制点通视。

5.2.2 施工测量控制网的精度等级、误差要求、仪器性能、布点和测量方法等应符合《沉管法隧道施工及质量验收规范》（GB51201）有关规定。

5.2.3 沉管隧道水准测量应采用跨河（海）水准测量方法进行高程传递。当跨河（海）视线长度超过 5km 时，可采用三角高程法和 GNSS 技术高程传递的组合方案，并进行专项设计。

【条文说明】当一、二等水准视线长度不超过 100m，三、四、五等水准视线长度不超过 200m 时，跨河（海）水准测量可采用一般水准测量方法观测，但在测站上应变换仪器高观测 2 次。当一、二等水准视线长度超过 100m，三、四、五等水准视线长度超过 200m 时，跨河（海）水准路线应根据视线长度、仪器设备和现场条件等情况，选用经纬仪倾角法、三角高程法进行观测。

5.2.4 施工控制网复测频率应符合下列规定：

1 施工过程中,首级控制网全部或部分网点应进行定期或不定期复测,两次复测间隔不超过 12 个月。

2 施工加密控制网应根据实际情况不定期复测,最长不应超过 3 个月。

【条文说明】组建测量控制中心的工程,首级控制网由测量控制中心负责每年复测一次。建立在人工岛上的施工控制网宜 3 个月复测一次,每月进行稳定性检核。离岸区管节对接测量及贯通测量施工控制网宜在每节管节沉放安装前进行一次复测。

5.3 管节预制测量

5.3.1 管节预制控制网的布网形式、等级和精度应根据预制场建设规模、总平面布置、管节预制工艺的精度要求等因素综合选择。

【条文说明】由于沉管隧道防水要求极高,为保障钢端壳表面平整度,提高钢端壳安装精度,以及管节顶推匹配预制浇筑工艺要求,港珠澳大桥岛隧工程和深中通道岛隧工程管节预制平面控制网按照《工程测量规范》(GB50026)中二等边角网精度布设,高程控制网按照国家二等水准测量精度布设。

5.3.2 管节预制控制网布设应符合下列规定:

- 1 管节预制控制网应先建立场区控制网,再建立管节预制控制网。
- 2 场区控制网的坐标系统宜与工程设计采用的坐标系统相同。

5.3.3 管节钢端壳测量应符合下列规定:

- 1 钢端壳安装应采用固定的仪器、固定的点位进行安装测量控制。
- 2 钢端壳采用一次安装成型时,宜采用全站仪极坐标法直接测量。
- 3 钢端壳采用二次安装成型时,宜采用钢尺量距法测量。
- 4 管节预制完成后,应对钢端壳端面进行三维测量和平面拟合。

5 钢壳混凝土管节的钢端壳施工测量应在钢壳全部拼装、焊接完成后进行,并宜选择无风、气温相对稳定的夜间进行。

【条文说明】为准确得到钢端壳端面的平整度和钢端壳端面与管节实际轴线的关系,在管节预制完成后进行三维测量、拟合;对钢端壳端面进行平面拟合以确保钢

端壳端面平整度满足要求。

5.3.4 钢壳混凝土管节钢壳块体、节段焊接完成后，应分别对其空间线形进行测量。

5.4 管节对接测量

5.4.1 管节对接前应进行测量检查和复核，测量检查和复核应符合下列规定：

1 隧道基础采用先铺法时，基槽与垫层回淤情况应采用多波束测量系统进行复核。回淤检测应分为基槽抛石夯实前、碎石垫层铺设前、管节沉放前三个不同的检测阶段。

2 隧道基础采用后填法时，回淤检测应在临时支撑碎石垫层铺设前、临时支撑安放前、管节沉放前分别进行。

3 已沉放管节的沉降、对接轴线应进行测量复核，并应对两端对接进行线形拟合。

5.4.2 管节对接测控系统可根据下列原则进行选择：

1 当管节距岸边小于 1km 的近岸区，可采用由测量塔法、全站仪法等定位测量系统。

2 当管节距岸边大于 1km 的离岸区，可采用由测量塔法与声呐法或机械拉线法等组合方式，辅以高精度倾斜仪或光纤罗经配合进行管节安装定位。

【条文说明】混浊度较高、悬浮物较多水域一般不采用水下声呐定位法。水流较大时不宜采用机械拉线法。当水深或流速造成测量塔形变或倾斜时，在测量塔顶部安装高精度倾斜仪予以测量塔定位误差修正。

5.4.3 管节对接测控系统配置应符合下列规定：

1 管节对接测控系统应配置安装船定位，管节姿态监测，GNSS-RTK 与全站仪检核等子系统。

2 安装船定位子系统应配置 GNSS，管节姿态监测子系统应配置管节首尾测量塔定位设备和管内倾斜仪。

3 管节浮运距离大于 1km 时,管节浮运宜由安装船定位子系统与管节姿态监测子系统同时进行定位;管节安装宜由管节姿态监测子系统进行管节测控,GNSS-RTK 与全站仪检核子系统应进行相互检核,并应由潜水员配合探摸检查。

4 管节首尾测量塔应至少各安装两台 GNSS,标称精度应满足水平精度为 $8\text{mm}\pm 1\text{ppmRMS}$,垂直精度为 $15\text{mm}\pm 1\text{ppmRMS}$ 。

5 管内倾斜仪应至少安装两台,标称精度为 $\pm 0.005^\circ$ 。

6 管节沉放期间宜采用 GPS-RTK 采集管节管顶特征点坐标并传输至系统进行比对,平面坐标允许误差为 $\pm 20\text{mm}$,高程坐标允许误差为 $\pm 30\text{mm}$ 。

7 管节坐底后宜采用全站仪测量测量塔棱镜坐标并传输至系统进行比对,平面坐标允许误差为 $\pm 20\text{mm}$,高程坐标允许误差为 $\pm 30\text{mm}$ 。

5.4.4 管节安放前,应在管节上标定安装定位测量特征控制点、设备安装点。应建立管节坐标系,确定管节各特征控制点与设备之间的相互关系。

5.4.5 管节安放实时定位测量方法应根据离岸距离、水深、水质、流速等作业条件选择,宜采用组合测量定位系统。

【条文说明】组合测量定位系统主要包括测量塔全站仪法、测量塔实时动态差分卫星定位法、声呐法、机械拉线法等,根据工程实际需求,选择两种或几种定位方法进行组合使用。

5.4.6 每个管节安装完成后应进入管节内部测量管节轴线、里程、纵坡、横倾等。

【条文说明】管节安装线形控制需根据已安装管节测量数据与待安装管节长度、轴线、钢端壳倾角等数据进行后续管节安装线形拟合、预估,并根据线性调整方案确定下节管节垫层标高、轴线位置等线形参数。

5.5 贯通测量

5.5.1 管节贯通测量控制网应符合下列规定:

- 1 控制网应分为洞外控制网和洞内控制网,控制点宜采用强制对中观测墩。
- 2 洞外平面控制网宜采用 GNSS 网,洞内平面控制网采用导线网。

【条文说明】港珠澳大桥岛隧工程和深中通道岛隧工程，洞外控制网平面控制网按《公路勘测规范》(JTG C10)中 GPS 二等精度，洞内导线网采用《工程测量规范》(GB50026)中二等精度，高程控制网按照国家二等水准测量精度。通视条件受全断面水箱影响，在水箱拆除前应在中管廊布设支导线进行测量；当水箱拆除后，在左右行车道布置交叉双导线并通过安全门将左右行车道导向网进行联测，形成双线性联合锁。

5.5.2 每节管节安装前，均应提前 2d~3d 对贯通测量控制点进行检测。

5.5.3 管节安装后应及时对管节轴线、高程、姿态（纵倾及横倾）、结合腔错牙等进行贯通测量。

5.5.4 管节轴线宜采用两台全站仪先后间隔 30min 独立测量一次，高程采用全站仪三角高程与电子水准仪分别测量一次。

6 大型临时工程

6.1 一般规定

6.1.1 大型临时工程应根据场地周边环境、水文地质条件、交通条件及施工工艺进行深化设计，并编制专项施工方案。

6.1.2 预制场地生产工艺设计应围绕管节生产为主线，合理布置钢筋加工厂、混凝土生产与运输、大宗材料存储和临时码头等临时工程。

6.1.3 工厂法预制厂建设完成后应及时进行试车。

6.1.4 管节水上运输航道应优先利用现有航道，运输前应采用多波束扫测水下地形、地貌，并对航道水深和宽度不满足管节运输要求的区段进行疏浚。无既有航道或管节运输作业对航运造成较大影响时，可新开挖管节运输的临时航道并报政府主管部门批准后实施。

6.2 预制场

6.2.1 干坞法预制场平面布置应符合下列规定：

1 干坞平面布置应考虑场地地形、水域条件、地质条件等因素。干坞坞口方向应考虑管节出坞时横向风、浪、流对管节稳定性的不利影响。

2 干坞可采用长方形布置，长轴向宜与岸线垂直。

3 钢筋加工车间、模板加工车间等不宜设置在坞内。

4 场地条件允许时，宜布置下坞通道。下坞通道布置应考虑运输车辆、道路坡度、交通量等因素，结合干坞预制场内道路一并考虑。

6.2.2 干坞法预制场设计与施工应符合以下要求：

1 深基坑开挖应遵循开槽支撑、先撑后挖、分层开挖、严禁超挖的原则。

2 开挖至坞底时，应复核地基地质情况，非持力层应进行地基承载力检测。

3 干坞止水结构应稳妥可靠，渗漏量在可控范围。

4 干坞周边应设置封闭的防渗系统、地面排水沟等防水、排水设施。

5 坞门宜结合坞口条件采用浮式结构，可采用钢筋混凝土、钢结构及组合结构等型式。

6 底胎模结构应满足施工承载力、沉降和管节起浮的要求。

7 坞内应布置水泵等排灌水系统。

6.2.3 钢筋混凝土管节工厂法预制场平面布置及工艺设计应符合下列规定：

1 生产线布置应考虑一定的生产冗余能力，满足管节预制连续生产需要。

2 预制生产线布置应能形成流水化生产，满足管节钢筋施工、混凝土浇筑与养护、顶推、一次舾装、坞内移运、二次舾装及出坞等功能要求。浅坞应与预制生产线同一轴线，预制区和浅坞作业区之间应设置挡水闸门。

3 生产线主要功能区应依据流水线设计原则，合理布置钢筋加工区、钢筋绑扎区、模板修整区、混凝土生产区、混凝土浇筑区、混凝土养护区、浅坞区、深坞区等。

4 钢筋加工区宜与绑扎区并列布置，可采用垂直主生产线的布置方式。加工区内不同区域间的钢筋宜通过轨道过跨车转运，钢筋加工区与对应绑扎区可通过门式起重机和桥式起重机立体交叉转运。

5 混凝土生产区宜临近生产线及上料岸线，应采用封闭式拌和楼，并配置料仓、胶凝材料罐体、骨料堆场、外加剂库房及制冷（冰）设备等。

6 混凝土浇筑区设置应满足钢筋笼体系转换起吊要求的起重设备和混凝土浇筑布料设备。

7 工厂法混凝土拌和站宜设置制冰或冷水机组。

6.2.4 钢壳混凝土管节工厂法预制场平面布置应符合下列规定：

1 钢壳主体结构应在船厂或其他具备加工能力的场地进行制作。

2 预制生产线布置应能形成流水化生产，满足钢壳驳运、管节移运、混凝土浇筑、一次舾装、坞内移运、二次舾装及出运等功能要求。

3 预制场主要功能区应依据流水线设计原则合理布置钢壳卸驳区、混凝土生产区、混凝土浇筑区、浅坞区、深坞区等。卸驳码头、卸驳区、浇筑区及浅坞区应在同

一轴线。

4 钢壳卸驳码头宽度应根据钢壳尺寸、船舶尺寸及施工通道等因素确定，两侧施工通道宽度宜大于 15m。钢壳卸驳码头的港池水深及水域面积应满足驳船的航行及靠（离）泊要求。

【条文说明】深中钢壳混凝土管节预制场位于珠海牛头岛，钢壳加工场所位于广州南沙某船厂，钢壳管节整体制作成形后运输至预制场，钢壳管节与预制场分开有利于更好利用社会资源。

6.2.5 浮坞法预制场选型及平面布置应符合下列规定：

1 浮坞法预制场选型应考虑最大载重量、船体的刚度、最大下潜深度等因素，并应满足管节预制精度和变形要求。

2 管节底胎模和作业通道应沿浮船坞或半潜驳甲板纵轴线对称布置。管节底胎模应设置找平层、脱模层，满足场地平整度及管节起浮要求。管节混凝土浇筑宜采用浮船坞或半潜驳坐底方式施工。

3 浮坞法预制场应配备可提供材料运输、人员交通设施的码头。

4 浮船坞或半潜驳的吨位、结构刚度、甲板有效面积应满足管节长度、重量及单次预制管节数量要求。

5 管节预制测量体系宜基于浮船坞、半潜驳船体本身独立建立。

6.3 寄放区

6.3.1 采用坞内寄放管节时，预制场平面布置应考虑寄放区的设置。

6.3.2 采用坞外漂浮寄放管节时，寄放区应按现行行业标准《疏浚与吹填工程施工规范》（JTS 207）进行疏浚，水深应满足管节系泊设计要求，并应根据所处水域回淤情况设置备淤深度。

6.3.3 采用坞外管节坐底寄放时，基础施工应符合下列规定：

1 管节坐底寄放区基础宜采用碎石垫层，其铺设面积及厚度应根据承载力计算确定，厚度不宜小于 80cm。

2 管节底部碎石垫层应按粗平和细平两阶段施工，宜按细平要求进行整平，整平精度的允许误差为 $\pm 50\text{mm}$ 。

【条文说明】本条参考《码头结构施工规范》（JTS 215）中对重力式码头抛石基床细平的允许偏差。

6.4 临时航道

6.4.1 管节运输的临时航道设计应与隧址、管节沉放作业区及现有航道相协调，并应符合下列规定：

1 航道设计水深应满足管节吃水、航行时下沉值、富裕深度，并考虑一定的备於深度。

2 临时航道有效宽度和曲率半径应根据管节运输工艺、水流、波浪等因素进行综合确定，并应符合现行国家标准《内河通航标准》（GB 50139）、《航道工程设计规范》（JTS181）的有关规定。

3 管节长距离海上运输时宜靠近海岸线，并宜设置临时系泊避风区。

4 复杂区段应通过专项研究确定。

6.4.2 管节施工区域与原有航线交叉或占道时，应设计新的临时航道，并进行通航论证。

6.4.3 出坞段航道的布置应根据航道水流、气象、出坞工艺等因素，确定出坞航道航线布置、航道宽度及底部高程，并应符合下列规定：

1 坞口范围或寄放区内的出坞段航道的宽度应不少于 2 倍管节宽度。

2 管节浮运出坞航线与常风向、常流向出现较大的夹角情况下，应在坞口范围布置防撞设施。

3 坞口处水流复杂时宜进行相应的模型试验验证。

6.4.4 临时航道的疏浚施工应符合现行《疏浚与吹填工程施工规范》（JTS207）有关规定。

7 管节预制及场内运输

7.1 一般规定

7.1.1 钢筋混凝土管节预制施工前,应针对防渗、控裂要求进行专项研究和工艺试验,确定混凝土最优配合比,制定混凝土控裂措施。原材料选择和混凝土配制尚应满足混凝土耐久性指标要求。

【条文说明】钢筋混凝土沉管隧道一般为深埋地下隧道结构,所处环境条件复杂,使用要求高,故对管节耐久性、防水、裂缝控制、混凝土性能参数控制提出了严格要求。因此需要结合工程实际,开展针对性的课题研究,包括文献分析、理论研究、建模分析等,优选适宜的施工工艺,对关键装备进行研发、优化。并且进行了沉管管节混凝土配合比设计、管节局部模型试验及足尺模型试验,对优选的配合比、混凝土性能参数及工艺进行验证。港珠澳大桥沉管隧道、大连湾海底沉管隧道等项目均开展了上述的专题研究和工艺试验,取得了预期效果。

7.1.2 钢筋混凝土节段式管节宜按节段纵向长度进行全断面一次性浇筑。采用干坞法预制的节段式管节应沿纵轴线方向分别按奇偶数字号的节段顺序间隔施工,采用工厂法预制的节段式管节应沿纵轴线方向流水作业、匹配预制。

7.1.3 钢筋混凝土整体式管节应按纵向分段浇筑。浇筑长度应根据管节设计长度、管节尺寸、控裂风险要求、现场条件等因素确定,宜取 15m~25m 长度全断面一次性浇筑。分段之间可设置后浇带。

【条文说明】整体式管节一般按照底板、中墙、外墙和顶板先后浇筑混凝土,可采用设置后浇带等方式控制混凝土开裂。

7.1.4 钢筋混凝土管节采用分层浇筑时,应进行专项论证,且施工缝位置不应设在结构受力最大位置处。

【条文说明】节段式管节长度划分要考虑实际施工能力和工艺控制水平,实现一次性匹配浇筑全部混凝土,确保节段混凝土浇筑的整体质量。

7.1.5 钢壳混凝土管节浇筑前，宜针对混凝土工作性能、仓格顶部脱空控制要求、钢壳变形控制要求等开展专项研究和工艺试验，确定混凝土最优配合比、浇筑工艺及参数。

【条文说明】钢壳混凝土沉管隧道荷载作用大、使用要求高，故对施工过程中的钢壳结构变形、管节脱空控制提出了严格要求。深中通道沉管隧道项目结合工程实际，采用文献分析、理论研究、建模分析等手段，优选施工工艺，对关键装备进行研发、优化，并针对钢壳混凝土管节的混凝土配合比设计、局部模型试验及足尺模型试验，对优选的配合比、混凝土施工性能参数及工艺进行验证，取得了预期效果。

7.1.6 钢壳混凝土管节宜采用跳仓法对称、均衡浇筑。

7.1.7 管节预制过程中应严格控制混凝土重度，混凝土重度的允许偏差宜为 $\pm 50\text{kg/m}^3$ 。

【条文说明】混凝土重度对管节浮运、沉放影响大。重度偏大时，管节起浮困难或干弦偏小；重度偏小时，管节干弦偏大或压载要求高，所以应该控制混凝土的重度。广州市车陂路-新滘东路隧道和洲头咀隧道项目管节混凝土重度控制偏差范围均为 $\pm 50\text{kg/m}^3$ ，港珠澳大桥沉管隧道及大连湾海底沉管隧道管节混凝土重度控制偏差范围均为 $\pm 30\text{kg/m}^3$ 。

7.1.8 管节场内运输应根据管节变形、控裂等要求确定运输工艺及参数，运输过程中应采取监测和纠偏措施。

7.1.9 钢筋混凝土管节专项控裂方案，应根据配合比、环境条件、施工方案等因素制定，结合数模分析优化配合比参数与混凝土性能指标、工艺参数及相关技术措施，并应开展温度监测及现场模型试验进一步验证和调整。

7.2 混凝土原材料及配合比设计

7.2.1 管节预制用混凝土所选用原材料应确保性能稳定，符合现行国家及行业标准的规定。

7.2.2 钢筋混凝土管节原材料的性能应符合下列规定：

- 1 混凝土强度等级应采用不低于 42.5 级的中低热硅酸盐水泥、普通硅酸盐水

泥，水泥质量应符合国家标准《通用硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥》（GB175）的规定，水泥的 C3A 含量宜不宜大于 8%，比表面积宜控制在 $300\text{m}^2/\text{kg}\sim 400\text{m}^2/\text{kg}$ 。

2 粉煤灰宜采用《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》（GB/T1596）要求的 II 级及以上等级粉煤灰。

3 矿渣粉应选用 S95 级及以上等级，比表面积不应小于 $400\text{m}^2/\text{kg}$ ，其他指标应满足《用于水泥、砂浆和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》（GB/T 18046）中磨细粒化高炉矿渣粉的要求。

4 碎石宜采用最大粒径不大于 25mm 的连续级配无碱活性碎石，指标应满足《建设用卵石、碎石》GB/T14685 中 I 或 II 类碎石要求。

5 中砂宜采用级配稳定无碱活性天然中砂，细度模数宜控制在 2.4~3.0，其含泥量不大于 3.0%，泥块含量不大于 1.0%，氯离子含量不大于 0.02%，其他指标应满足《建筑用砂》GB/T14684 的规定。

6 减水剂宜采用缓凝型高性能减水剂，掺减水剂混凝土的 28d 收缩率比不应大于 95%。

【条文说明】在缺乏天然河砂地区，如大连湾等地，也有采取机制砂配制沉管混凝土的工程案例。这种情况下，一般需要进行专项论证，采用优选机制砂。

7.2.3 钢壳混凝土管节原材料的性能应符合下列规定：

1 粗骨料宜采用连续级配或 2 个以上单粒径级配搭配使用，配制自密实混凝土最大公称粒径不宜大于 20mm，自密实混凝土的针片状颗粒含量、含泥量及泥块含量应符合表 7.2.3-1 的规定，其他性能应符合《建设用碎石卵石》（GB/T14685）中 I 类或 II 类碎石要求

表 7.2.3-1 自密实混凝土粗骨料的针片状颗粒含量、含泥量及泥块含量

项 目	针片状颗粒含量	含泥量	泥块含量
指标（%）	≤ 8	≤ 1.0	≤ 0.5

2 自密实混凝土细骨料宜采用河砂，级配宜为 II 区的中粗砂，细度模数宜为 2.4~3.0，其他性能应符合《建筑用砂》GB/T14684 的规定。

3 水泥应选用强度等级不低于 42.5 级的中低热硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥，C3A 含量宜不大于 8%，比表面积宜控制在 $300\sim 400\text{m}^2/\text{kg}$ 范围，水泥其他性能应符合现行国家标准《硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥》（GB175）的规定。

4 粉煤灰应选用 II 级及以上等级粉煤灰，性能应符合现行国家标准《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》（GB 1596）的规定。

5 矿粉应选用 S95 级及以上等级，比表面积应不小于 $400\text{m}^2/\text{kg}$ ，其他性能应满足现行国家标准《用于水泥和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》（GB/T 18046）的规定。

6 采用如硅灰、石灰石粉等其他掺合料时，应通过充分验证，确保混凝土性能满足工程应用要求及符合国家现行有关标准的规定。

7 减水剂宜采用缓凝型高性能减水剂，掺减水剂混凝土的 28d 收缩率比不应大于 100%。有需要时，经小模型试验验证后，可使用具备引气、增稠等复合性能的减水剂。减水剂的性能应符合现行国家标准《混凝土外加剂》（GB8076）的规定。

8 拌合用水及养护用水应符合现行行业标准《混凝土用水标准》（JGJ63）的有关规定。

【条文说明】对钢壳沉管管节混凝土原材料的选用提出严格要求，是保证混凝土稳定性的需要，稳定的原材料对确保自密实混凝土的稳定的工作性能尤其重要，直接影响到自密实混凝土的填充效果。

砂的细度模数控制在 $2.4\sim 3.0$ 范围，是结合车陂隧道工程项目、港珠澳大桥岛隧工程、深中通道工程的施工经验，不仅有利于控制混凝土工作性能的稳定性，还有利于降低混凝土的开裂风险。

7.2.4 钢筋混凝土管节混凝土配合比设计可参照规范《普通混凝土配合比设计规程》（JGJ55）执行，应通过计算和试配确定，并应符合下列规定：

1 配合比应能满足混凝土工作性能、物理性能、力学性能、耐久性能、抗裂性能等要求。

2 混凝土抗裂性能的相关变化规律可通过混凝土水化热、抗压强度、劈裂抗拉强度、弹性模量等试验进行研究。

3 配合比设计应在满足强度和耐久性要求的条件下,通过使用级配、粒形良好的集料来降低混凝土中浆体比率,减少混凝土中胶凝材料用量,提高混凝土的体积稳定性。

4 混凝土配制应采用大掺量矿物掺合料的胶凝材料体系,单掺、混掺矿物掺合料的适宜掺量范围宜满足表 7.2.4-1 的规定。

表 7.2.4-1 管节混凝土矿物掺合料组成

矿物掺和料种类	占胶凝材料质量百分比/%
单掺粉煤灰	20~50
单掺磨细粒化高炉矿渣粉	30~70
混掺粉煤灰与磨细粒化高炉矿渣粉	50~70

5 胶凝材料用量以及水胶比宜根据混凝土强度等级、抗渗等级、耐久性指标、稠度等因素确定,胶凝材料用量宜控制在 $360\text{kg/m}^3 \sim 450\text{kg/m}^3$,混凝土水胶比宜控制在 0.32~0.45 之间。

6 混凝土坍落度应根据管节施工工艺进行选择,泵送工艺混凝土坍落度宜控制在 180mm~220mm 范围,坍落扩展度宜控制在 350mm~500mm。

7 配制混凝土的重度应满足设计要求。

8 钢筋混凝土管节采用顺浇整体浇筑成型的管节预制工艺时,可采用小尺寸模型或局部足尺模型试验,验证混凝土配合比并验证浇筑工艺。

【条文说明】 采用大掺量矿物掺合料是考虑控裂、改善工作性能及降低混凝土成本,表 7.2.5-1 掺合料最大掺量参考了港珠澳大桥研究成果。为保证混凝土工作性能、力学性能、耐久性能及体积稳定性,一般优先采用硅酸盐水泥。

浇筑管节混凝土作业范围狭窄、配筋密,通常采用大流动性混凝土,大流动性混凝土定义为拌合物坍落度不低于 160mm 的混凝土(《普通混凝土配合比设计规程》JGJ55-2011),坍落度试验方法检测上限为 220mm,在此范围,增加扩展度检测,更能真实反映出混凝土的工作性能。

钢筋混凝土管节顺浇整体浇筑成型的预制工艺是指采用分段浇筑、流水匹配预制整体式管节的施工方法。因管节分段之间不设后浇带,仅设施工缝,施工缝附近的

新浇混凝土结构容易出现开裂，需采用缩短分段浇筑间隙时间及调控新旧混凝土温差等措施降低混凝土结构的开裂风险。由于管节混凝土浇筑控裂风险高和工艺复杂，正式实施前需采用小尺寸模型或局部足尺模型试验对浇筑工艺进行验证。

7.2.5 钢壳混凝土管节自密实混凝土配合比设计可参照《自密实混凝土应用技术规范》（JGJ/T 283）、《自密实混凝土设计与施工指南》（CCES 02）、《自密实混凝土应用技术规程》（CECS 203）执行，并应符合下列规定：

- 1 钢壳混凝土管节自密实混凝土配合比设计应考虑管节结构形式、施工工艺和作业环境等因素，满足混凝土自密实性能、力学性能等要求。
- 2 钢壳混凝土管节自密实混凝土配合比设计宜采用绝对体积法。
- 3 钢壳混凝土管节自密实混凝土水胶比不宜大于 0.45，胶凝材料用量宜控制在 $400\text{kg/m}^3 \sim 550\text{kg/m}^3$ 之间。
- 4 当原材料和施工环境温度等变化导致混凝土自密实性能不满足要求时，应调整或重新设计配合比。
- 5 配制混凝土的重度应满足设计要求。

7.2.6 钢壳混凝土管节自密实混凝土浇筑前，宜通过小尺寸模型或局部足尺模型试验，验证混凝土配合比及浇筑工艺。

7.3 节段式钢筋混凝土管节

7.3.1 管节模板体系应根据其结构形式确定，宜采用模块化移动式支架模板体系。模板设计应符合下列规定：

- 1 模板及支架应根据安装、使用和拆除工况进行设计，并应满足承载力、刚度和整体稳固性要求。
- 2 底胎模结构应满足施工承载力的要求，干坞法预制时尚应采取措施减少吸附力。
- 3 侧模外侧应设置侧模支撑结构。无法设置时，侧模与内模间、两侧模间可采用对拉杆。

【条文说明】 节段式管节一般结构体系大，其模板重复使用次数多，使用模块化移动式支架模板可以提高预制工效及质量。

采用干坞法进行节段式管节预制时，在管节预制完成后，需要对干坞进行灌水让管节起浮。一般而言，为满足管节安装时负浮力要求，管节在干坞起浮时干舷较小，故要尽量减少管节起浮时与底胎膜的吸附力。

新建干坞可以采用无砂混凝土垫层或透水槽作为干坞面层结构，现有干坞应在干坞底板加设脱模层（如砂层加木板等）。若管节底部设置有防水底钢板作为永久结构，则防水底钢板兼做底胎膜；若管节底部未设置钢板，工厂法、平台法预制适宜使用钢模作为底胎膜，干坞法预制适宜使用在竹胶板上铺设油毡原纸、牛皮纸作为底胎膜。大连湾管节预制采用干坞法，使用竹胶板上铺设 2 层油毡原纸及 1 层牛皮纸作为底胎膜，并临时铺设防火布加以保护。

管节外侧墙一般为自防水结构，对拉杆孔可能成为侧墙的渗水通道，故方案需优先选择在侧模外部设置剪力墙。有条件设置高剪力墙时，可以取消设置在侧模顶部的侧模间对拉杆，便于顶板混凝土施工。

7.3.2 模板施工应编制专项施工方案，必要时应进行技术论证，并应符合下列规定：

1 管节预制模板中的底板、跨中、顶点、端头等关键部位，应设置变形、位移、沉降等观测点，混凝土浇筑过程中应实时观测。

2 模板拆除前，应确保相应位置混凝土达到设计要求的拆模强度。设计无要求时，应满足《混凝土结构施工规范》（GB50666）的有关规定。模板拆除后，侧墙上的对拉杆预留孔应进行修补，修补方案应经工艺试验确定。

3 模板系统应进行定期保养，确保模板的各部件及各部件之间的连接处于良好的状态。

4 模板制作、安装的允许偏差值应符合表 7.3.2-1 要求。

表 7.3.2-1 管节预制模板制作及安装允许偏差

序号	检测项目	规定值或允许偏差（mm）		
		节段侧模板	节段内模板	节段端头模板
1	模板标高	±5	±5	±5

2	模板长度	±20	±20	-20, +5
3	模板宽度	-20, +5	±10	-10, 0
4	模板高度	-20, +5	0, +10	-10, 0
5	轴线偏位	10	10	10
6	模板垂直度	8	6	/
7	模板接缝表面错台	2	2	2
8	模板表面平整度	5	5	5

【条文说明】管节外形尺寸影响到管节起浮，需要严格控制模板制作、安装的允许偏差值。

7.3.3 钢筋制作与安装应符合下列规定：

- 1 钢筋的连接应采用机械连接，机械连接的钢筋切割应采用锯切工艺。
- 2 管节拉钩筋宜采用摩擦焊锚固板构造。
- 3 管节横向主筋接头不得设置在框架节点范围附近，管节顶、底板内侧横向主筋接头不得设于跨中，外侧横向主筋接头应设于跨中附近。
- 4 钢筋笼内应设置劲性骨架，劲性骨架宜采用角钢制作。
- 5 钢筋的加工允许偏差应满足表 7.3.3-1 要求。

表 7.3.3-1 钢筋加工尺寸允许偏差

序号	项目	允许偏差（mm）
1	受力钢筋沿长度方向的净尺寸	±10
2	弯起钢筋弯折点位置	±20
3	箍筋外轮廓尺寸	±5

- 6 钢筋的安装允许偏差应满足表 7.3.2-2 要求。

表 7.3.2-2 钢筋安装尺寸允许偏差

序号	项目		允许偏差（mm）
1	绑扎钢筋网	网的长、宽	±10
		网眼尺寸	±20
2	受力钢筋间距	两排及以上排距	±5
		同排间距	±10
3	箍筋间距		±10

4	钢筋骨架尺寸（长、宽、高）	±10
---	---------------	-----

7 钢筋笼的保护层厚度允许偏差应满足表 7.3.2-3 要求。

表 7.3.2-3 管节保护层厚度允许偏差

序号	项目	允许偏差（mm）
1	混凝土浇筑前钢筋笼保护层偏差	-5, +10
2	混凝土浇筑养护后保护层偏差	-5, +15

【条文说明】管节结构需要使用大量的箍筋及拉钩筋，采用摩擦焊锚固板形式拉钩筋可以提高拉钩筋生产功效和质量。这种形式的拉钩筋在港珠澳大桥沉管隧道管节预制及大连湾海底隧道管节预制中得到了成功的应用。

管节节段框架节点，顶、底板内侧横向跨中，外侧靠近墙体部分为管节受力较大部位，故钢筋连接接头不应该设置在此处附近。管节横向主筋接头通常不设置在框架节点范围附近，管节顶、底板内侧横向主筋接头不应该设于跨中，可以设置在 1/3～1/4 跨度等应力较小处，外侧横向主筋接头应该设于跨中附近。

设置劲性骨架的目的为承担管节顶、底板上层钢筋重量，维持墙体钢筋的稳定性，增强钢筋笼整体刚度，提升钢筋笼的绑扎精度。

7.3.4 混凝土制备及运输应符合下列规定：

- 1 混凝土制备宜配备专用混凝土拌和系统、温控系统。
- 2 混凝土制备与运输能力应满足管节混凝土连续浇筑工艺要求，应根据不同地区不同季节等因素确定混凝土制备温度控制标准。混凝土运输应连续不间断，且入模时混凝土均匀性和工作性仍能保持。
- 3 混凝土生产前，应根据实测集料含水量确定混凝土施工配合比，并采用现场原材料对混凝土配合比进行复盘检验。
- 4 混凝土搅拌投料顺序、搅拌时间应满足搅拌机性能、混凝土性状要求，宜通过现场试验确定。矿物掺合料宜与水泥同步投料，液体外加剂宜滞后于水和水泥投料。

【条文说明】混凝土搅拌时间由混凝土出机性能要求确定。搅拌时间短会导致混凝土工作性能不稳定，从而影响管节预制质量；搅拌时间过长会导致混凝土离析、混

凝土生产工效低。

港珠澳大桥沉管隧道项目钢筋混凝土管节预制混凝土搅拌时间为 120s，采用大掺量矿粉和粉煤灰；深中通道沉管隧道项目钢筋混凝土管节预制混凝土搅拌时间为 120s，采用大掺量胶凝材料配制高流动性自密实混凝土；大连湾沉管隧道项目钢筋混凝土管节预制混凝土搅拌时间夏季为 120s、冬季为 150s；广州市车陂路-新滘东路隧道和洲头咀隧道项目钢筋混凝土管节预制采用商品混凝土，混凝土搅拌时间均由最初的 90s 调增为 120s。

7.3.5 预制混凝土浇筑工艺及设备配置应满足下列要求：

- 1 混凝土拌和站应设置制冰或冷水机组。
- 2 混凝土浇筑宜采用地泵配合布料杆进行布料。底板等腔内施工可采用小型固定式布料杆布料，墙体、顶板宜采用移动式布料杆布料。

7.3.6 混凝土浇筑应参照《混凝土结构工程施工规范》（GB50666）的有关规定，并应符合下列规定：

- 1 混凝土浇筑分层厚度应根据混凝土的供应量、一次分层摊铺面积、混凝土初凝时间及振捣棒有效长度综合确定。
- 2 侧墙、中隔墙应间隔浇筑，浇筑高度差及浇筑速度应满足模板受力要求。
- 3 连续浇筑的上下层混凝土布料浇筑间歇不应超过混凝土的重塑时间。
- 4 冬期施工时，混凝土入模温度不应低于 5℃，宜采用暖棚法养护。
- 5 夏季施工时，混凝土入模温度不宜大于 28℃，宜采用加碎冰或加冷水降低混凝土出机温度。使用碎冰代替部分拌和水时，碎冰厚度不宜超过 3mm，混凝土中使用碎冰替代拌和水的最大数量不宜超过 80%，加冰后混凝土搅拌时间不应少于 120s。
- 6 浇筑前，应在已浇节段端面涂刷隔离剂。涂刷隔离剂时，不得污染止水带。

【条文说明】侧墙、中隔墙浇筑高度差及浇筑速度超出模板设计时采用的参数时可能导致模板变形甚至倒塌。中隔墙浇筑高度一般比侧墙浇筑高度高 1-2 米，以防模板整体偏位。

冬期施工时采用暖棚法,可以通过控制暖棚内温度以满足混凝土内表、表环温差要求,减少裂缝产生。

利用碎冰替代部分拌和水拌制混凝土,是控制管节混凝土浇筑温度最有效的技术措施,冰融化为相同温度的水,需要吸收 335kJ/kg 的热量,对于降低混凝土的浇筑温度具有显著效果。碎冰在每立方米混凝土中的用量增加 10kg,混凝土浇筑温度可降低约 1.0℃~1.4℃。为保证碎冰经搅拌并输送至浇筑现场后,碎冰能完全融化,碎冰厚度不超过 3mm,适当延长搅拌时间,且碎冰替代拌和水的最大数量一般不超过 80%。

在已浇节段端面涂刷隔离剂是为了避免节段间混凝土粘连的要求,若节段间混凝土发生粘连,可能在节段间错动时造成端面混凝土破坏。

7.3.7 钢筋混凝土管节的混凝土养护应符合下列规定:

- 1 混凝土浇筑完毕后,应采取保温、保湿措施进行养护。
- 2 混凝土养护期间应采取措施保证混凝土温度控制指标应满足表 7.3.7-1 要求。应采取措施保持混凝土表面处于潮湿状态,混凝土潮湿养护时间应不低于 14d。

表 7.3.7-1 混凝土温控指标

序号	项 目	指 标
1	混凝土入模温度	$\geq 5^{\circ}\text{C}$ 且 $\leq 30^{\circ}\text{C}$
2	混凝土内部最高温度	$\leq 70^{\circ}\text{C}$
3	混凝土内表温差	$\leq 25^{\circ}\text{C}$
4	混凝土表面温度与环境温差	$\leq 20^{\circ}\text{C}$
5	表面温度与养护水温差	$\leq 15^{\circ}\text{C}$
6	拆模后混凝土表面与环境温差	$\leq 15^{\circ}\text{C}$
7	养护湿度控制	$\geq 80\%$

3 养护过程中,应监测混凝土内部以及养护环境温度变化。模板拆除应在混凝土内部温度达到最高值之后,且环境温度与混凝土表层温度差在允许范围内时。

4 管节养护可设置棚罩,养护环境温湿度可通过在养护棚罩内部喷淋水雾方式进行控制。

5 对完成早期养护的管节,应根据外界天气情况的变化采取相应保温措施。

7.3.8 钢端壳制作与安装应符合下列规定：

- 1 钢端壳应在专业加工厂制作，出厂前必须进行试拼验收，并应采取措施确保其运输过程中不变形。
- 2 钢端壳分段在场内组装焊接时，焊接应在专门制作的平台上进行，平台应具有足够的刚度和强度。
- 3 钢端壳分段焊接时，焊缝处焊口尺寸、焊接质量除应满足《钢结构工程施工及验收规范》（GB50205）中二级焊缝的有关规定外，还应满足 GINA 止水带及 OMEGA 止水带压件螺栓孔孔距偏差要求。
- 4 钢端壳现场安装应设置临时支撑架，临时支撑架应能够抵抗浇筑混凝土时的侧向推力。安装时应根据中线、基线等控制线确定半成品的安装位置，宜在半成品构件上及安装支承架相应位置标出控制线、安装编号。
- 5 钢端壳面板内侧转角处应设置注浆管。
- 6 安装完成后应复核钢端壳中心线、对角线及端斜面等各个控制参数。误差符合设计要求后方可施焊。
- 7 钢端壳的制作与安装偏差应符合表 7.3.8-1 要求。

表 7.3.8-1 钢端壳制作及安装允许偏差

序号	项目	允许偏差（mm）
1	外包宽度	± 10
2	外包高度	± 10
3	面板平整度（整体）	5
4	GINA 止水带接触面局部平整度	每 1m ≤ 1
5	OMEGA 止水带接触面局部平整度	每 0.5m ≤ 1
6	横向垂直度	3
7	竖向倾斜度	3

- 8 管节混凝土浇筑过程中应监测钢端壳的变形情况，变形超出允许偏差时应及时调整。

【条文说明】一次安装成型式钢端壳一般由两块面板拼接成“L”型，且因防水要

求不可在面板上开设透气孔，钢端壳 L 型内侧在混凝土浇筑时空气排出困难，可能导致产生局部浇筑质量较差，因此在面板内侧转角处设置注浆管。堵漏，防止海水沿着钢端壳边缘与混凝土交界的位置存在缝隙而渗水的风险。端部混凝土强度达到设计要求方可开始注浆，注浆压力一般按照最大水深压力的 1.5 倍考虑。港珠澳大桥沉管的压浆压力约 0.6MPa，最大不超过 1MPa。

钢端壳的安装精度直接影响了与 GINA 止水带的结合程度以及管节接头间的对接角度，故需采取措施确保其安装精度满足要求。

7.3.9 中埋式钢边橡胶止水带、OMEGA 止水带等多道防水措施施工及水密性检查应符合下列规定：

- 1 中埋式钢边止水带接头不得设置在拐角处。
- 2 中埋式钢边止水带边缘宜设置注浆管，注浆管在注浆前应进行疏通。
- 3 中埋式钢边止水带安装应固定在专门的钢筋夹或主筋上，顶板与底板平直段应按照盆形安装，止水带与水平夹角宜为 $15^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 。
- 4 中埋式钢边止水带中心线与节段接头中心线偏差不应超过 10mm。
- 5 节段间 OMEGA 橡胶止水带应按照管节断面形式定制，在中埋式钢边止水带注浆完成后进行安装，且宜预留 1 个接口在安装完成后现场接驳。
- 6 节段间 OMEGA 止水带应通过螺栓固定在 OMEGA 止水带预埋件上，其预埋件制作及安装允许偏差应符合表 7.3.9-1 要求。

表 7.3.9-1 节段接头 OMEGA 止水带预埋件制作及安装允许偏差

序号	项目	允许偏差 (mm)
1	净宽度	-5, +10
2	净高度	-5, +10
3	OMEGA 止水带接触面平整度	每 0.5m $\leq$ 1

8 中埋式钢边止水带与节段间 OMEGA 止水带之间形成的空腔应设置检漏水管。

9 节段接头间的水密性应满足在设计要求的压力及保压时间内止水带及混凝

土不发生渗漏的要求，检查应在坞内注水前进行，确保在设计要求的压力及保压时间内接头间不发生渗漏。

【条文说明】底板及顶板平直段止水带与水平呈一定夹角是便于浇筑时气体的排出。

检漏水管主要用于检测中埋式止水带及 OMEGA 止水带的水密性，通常在底部设置注水管，顶部设置出水管。

节段接头的水密性检查是通过预埋的检漏水管（包括出气孔）往中埋式钢边止水带与节段接头间 OMEGA 止水带空腔内注入有压水，检查中埋式止水带、OMEGA 止水带以及空腔周边的混凝土是否有渗漏，若检查出有渗漏，应该采取措施消除。

根据管节的埋深不同，选择不同的压力作为节段接头试验的压力，如港珠澳沉管隧道项目中，埋深约为 25m 时，要求节段接头按照表 7.3.9-2 的要求在 0.36MPa 水压作用下维持 2h 无压力下降。

表 7.3.9-2 检漏水压加压表

检漏水压（MPa）	保持时间（h）	现象（是否产生渗漏）
0.1	0.5	无渗漏
0.2	0.5	无渗漏
0.3	0.5	无渗漏
0.36	2	无渗漏

7.3.10 节段式管节整体张拉应在所有节段浇筑完成后且混凝土强度（或龄期）达到设计的要求后进行，安装、张拉与锚固应参照《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T F50）的有关规定。

7.3.11 节段式管节预应力孔道注浆应参照《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T F50）的有关规定。预应力钢束张拉完毕后应采用真空辅助压浆工艺，采用的真空泵最大工作压力应不低于 0.1MPa。

7.4 整体式钢筋混凝土管节

7.4.1 模板工程除应符合 7.3 节有关规定外，尚应符合下列规定：

- 1 外侧墙模板不宜设置对穿拉杆螺栓，可采用桁架结构。
- 2 管节内模板应根据预制工艺选用分段或通长设置，采用不设置后浇带的全断面顺浇法预制宜采用通长内模，可缩短新旧混凝土浇筑间隔时间。

7.4.2 钢端壳面板与腹板间应采用高强无收缩砂浆灌注，灌注施工应符合下列规定：

- 1 灌浆料应采用高强度、无收缩、易流动及低水率的砂浆，强度等级不小于设计要求。
- 2 灌注施工应按照从下至上、从中间到两边，分步对称缓慢均匀进行。灌注压力宜控制在 0.35MPa~0.5MPa。
- 3 灌注施工过程中每个隔腔实际灌注量和理论灌注量应进行逐一对比。发现异常时应停止灌浆，查明原因并采取措施。

7.4.3 混凝土浇筑分为全断面一次性浇筑及分层浇筑两种方式，除应满足 7.3 节有关规定外，尚应符合下列规定：

- 1 分层浇筑宜从管节的一端往另一端推进，墙体及顶、底板的分层厚度不宜大于 500mm。
- 2 管节整体分层连续浇筑，应缩短每层间歇时间，且上层混凝土应在下层混凝土初凝之前浇筑完毕，混凝土初凝时间不宜小于 12h。
- 3 施工缝宜留设在结构受剪力较小且便于施工的位置。墙体水平施工缝不应留在剪力最大处或底板与侧墙的交接处，应留在高出底板表面不小于 300mm 的墙体上。墙体有预留孔洞时，施工缝距孔洞边缘不应小于 300mm。
- 4 后浇带宜在相邻分段混凝土浇筑完成并充分收缩后进行浇筑，且间隔时间宜取 42d~60d。
- 5 内模拆除后，应采用土工布或帆布等材料封盖管节两端，并采取必要的措施保证管内温度、湿度满足养护要求。

7.4.4 整体式管节防水应符合下列规定：

- 1 管节混凝土防水应满足《地下工程防水技术规范》（GB 50108）的相关规定，试配混凝土抗渗等级应比设计要求提高 0.2MPa。
- 2 施工缝止水带和防水材料的尺寸、规格、性能指标、埋设位置应符合设计要求。
- 3 管节结构与钢端壳、端封墙、防水底钢板、管节顶部人孔、垂直千斤顶等交界部位的防水应采取加强处理措施。

7.5 钢筋混凝土管节控裂和防渗

7.5.1 管节混凝土的温度控制宜按照内降外保的原则，对混凝土外部采取覆盖蓄热或蓄水保温等措施，必要时可在混凝土内部设置冷却水管通循环水冷却。在混凝土内部通水降温时，进出口水的温差宜小于或等于 10℃，且水温与内部混凝土的温差宜不大于 20℃，降温速率宜不大于 2℃/d。

7.5.2 混凝土施工控裂应符合下列规定：

- 1 全断面一次性浇筑时，应控制底板混凝土的静停时间，底板与墙体结合处的混凝土应振捣密实。顶板混凝土宜从两侧向中间浇筑。
- 2 分层浇筑时，上层混凝土浇筑之前应对下层混凝土的顶面作凿毛处理，且新浇混凝土与下层已浇筑混凝土的温差宜小于 20℃，并宜采取措施将各层间的浇筑间歇期控制在 7d 以内。
- 3 后浇带防水构造必须符合设计要求。后浇带混凝土应一次浇筑，不得留设施工缝。
- 4 管节施工前应根据原材料、配合比、环境条件、施工方案和施工工艺等因素，进行温控设计，并应在浇筑后按该设计要求对混凝土内部和表面的温度实施监测和控制。

5 管节浇筑时应控制混凝土入模温度、内部最高温度及内外温差。水泥在搅拌站的入机温度不宜高于 60℃。6 管节混凝土采用硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥时，其浇筑后的养护时间不宜少于 14d，并使混凝土表面始终保持湿润状态。寒冷天气或

遇到气温骤降天气时浇筑混凝土，除应对其外部加强覆盖保温外，尚宜适当延长养护时间。

7 冻融环境下的混凝土管节在施工养护结束至初次受冻的时间不得少于 1 个月并避免与水接触。冬期施工中混凝土暴露在负温环境时的强度应大于 10MPa。

【条文说明】混凝土浇筑的间歇期越短，则各层混凝土的龄期差越小，对结构越有利，因此，在管节大体积混凝土的浇筑施工中，需要加强施工的组织管理，使其间歇期尽可能缩短。

7.5.3 钢筋混凝土管节抗渗应满足《地下工程防水技术规范》（GB50108）的有关规定外，并应符合下列规定：

1 管节采用自防水混凝土，防水混凝土可通过降低水胶比，或掺加掺合料、外加剂等措施配制而成，混凝土抗渗等级不小于 P8。防水混凝土应满足抗渗等级要求。

2 管节底板采用防水钢板时，其厚度及焊缝等级符合设计要求，防水钢板允许变形量不应大于 20mm，施工过程中应采取防止钢板变形的措施。

3 喷涂型防水涂料及配套使用的底涂料、涂料修补材料，层间处理剂的施工要求、性能指标及基面处理要求应符合国家现行相关标准的规定。

4 管节结构与钢端壳、端封墙、防水底钢板、管节顶部人孔、垂直千斤顶等交界部位的防水应采取加强处理措施。

5 施工过程中采取成品保护措施，不得损坏防水层。

7.5.4 混凝土生产过程温度监测应符合下列规定：

1 管节混凝土在施工过程中应监测混凝土的入模温度、内部温度、内表温差、降温速率、环境温湿度，并应根据监测结果及时调整和优化温控措施。必要时应进行应变监测。

2 管节混凝土温度监测、应变监测宜采用具有自动采集、无线传输等功能的设备。监测系统应适应管节预制施工要求，具有良好的抗冲击、防水性能。温度测试元件的选择、安装及保护应符合《大体积混凝土施工标准》（GB50496）的规定。

3 管节混凝土温度监测点布置，应满足监控混凝土最高温升、内表温差、降温

速率及环境温度的要求。

4 温度测试区可选管节平面对称轴线的一侧，测试区内温度测点应按平面分层布置；温度测点位置与数量可根据管节温度场的分布情况及温度控制要求确定。

5 每条温度测试轴线上，温度监测点位不宜少于 4 处，应根据管节结构的平面尺寸布置监测点。

6 沿混凝土管节厚度方向，应至少布置表层、底层和中心层温度测点，测点间距不宜大于 500mm。管节表层测点宜布置在混凝土表面以内 50mm 处。混凝土底层测点，宜布置在混凝土底面以上 50mm 处。

7 应变测试宜根据工程需要进行。布置的应变测点应能测出混凝土内部最大应变，应变测试应设置零应力测点，应变测试宜布置表层，底层和中心层应变测点；表层应变测点宜布置在管节表层钢筋以内。

8 温度监测过程中宜描绘各点温度变化曲线和断面温度分布曲线。监测结果异常时，应及时报警，并应采取相应的措施。

【条文说明】混凝土管节具有对称轴线，因此可仅选择管节平面对称轴线的一侧作为测试区。

7.6 钢壳混凝土管节预制

7.6.1 钢壳制作应符合下列规定：

1 钢壳制作总体工艺流程可划分为板单元制作、块体制作、小节段制作和管节总拼，可根据管节尺寸、原材料及设备情况划分各流程的结构尺寸。

2 钢壳制作宜采用智能化、自动化焊接工艺和设备。焊缝质量应满足设计和《钢结构工程施工质量验收标准》(GB 50205)的相关要求。

3 钢壳制作过程中，钢壳顶部应排水通畅且不积水。工艺孔洞应全部修补封闭，不应存在完全封闭、无排气通道的空间。

4 钢壳内预留孔洞切口应打磨平整，隔舱内部清理干净无杂物。

5 钢壳主体结构的实测项目应符合表 7.6.1-1 的规定。

表 7.6.1-1 钢壳成品几何尺寸的允许偏差、检查方法和频率

序号	检查项目	规定值或允许偏差	检查方法和频率
1	管节宽度(mm)	-5, +15	尺量或激光测距仪: 每 10m 一点
2	管节高度(mm)	-5, +20	尺量或激光测距仪: 每 10m 一点
3	管节长度(mm)	$\pm (10 + (L-20)/10)$	尺量 (或激光测距仪): 每管节 2 处, 每处 1 点
4	车道孔净宽(mm)	-5, +15	尺量或激光测距仪: 每 10m 一断面, 每断面 3 点
5	中管廊净宽(mm)	± 5	
6	内孔净高(mm)	-5, +20	
7	构件厚度(mm)	± 10	尺量或激光测距仪: 每 10m 一断面, 每断面顶、底板各 4 个点, 每个竖墙 2 个测点
8	底板及侧墙水平精度(mm)	± 10	尺量或激光测距仪: 10m 范围
9	顶板水平精度(mm)	± 15	尺量或激光测距仪: 10m 范围
10	侧墙垂直度(mm)	± 10	尺量或激光测距仪: 10m 范围 (侧立面)
11	纵向端面板平整度(mm)	± 5	尺量 (直尺、塞尺) 或激光测距仪: 每端 6 个点
12	直角度 (°)	$L/1000$	尺量或激光测距仪: 顶板两侧及中央四条边长: $\text{Max} (L_m - L_n) \leq L/1000$

注: 表中 L 为管节长度, 以 m 为单位;

【条文说明】深中通道项目标准管节长 165m, 宽 46m, 高 10.6m, 划分为 11 个节段, 再左右对称划分为 22 个小节段。

钢壳混凝土管节尺寸较大, 顶部排水不畅通易造成雨水堆积, 雨水如进入到钢壳内部会造成内部钢板锈蚀; 同时由于施工人员难以进入到成形后的钢壳结构内部, 雨水杂物的检查和清理工作十分困难。

钢壳制作如总拼后的焊缝, 部分位于钢壳管节结构内部, 需要预留工艺孔通道进入内部施工, 在施工后应全部修补封闭, 避免混凝土浇筑过程漏浆或溢出到其他仓格中。如存在完全封闭、无排气通道的空间, 混凝土无法填充, 会形成浇筑死角导致缺陷存在, 且这类缺陷存在于管节内部, 现有的管节实体检测技术也无法发现。钢壳结构成形后内部空间无法进入检查, 因此需在施工过程中针对封闭空间、无排气通道空

间进行专项检查。

7.6.2 钢端壳制作及安装应符合下列规定：

- 1 所有与 GINA 橡胶止水带相接触的面，焊缝均应打磨平整。
- 2 钢端壳结构的实测项目应符合表 7.6.2-1 的规定。

表 7.6.2-1 钢端壳几何尺寸的允许偏差、检查方法和频率

序号	检查项目		规定值或允许偏差 (mm)	检查方法和频率
1	中心间距	侧墙-中墙	±10	尺量或激光测距仪
		中墙-中墙	±5	
2	梁以及柱弯曲		L/1000	尺量或激光测距仪：跨中央 1 点
3	翼缘板宽 及隔板宽	0.5m≤W≤1.0m	±3	尺量或激光测距仪：支点
		1.0m≤W≤2.0m	±4	
		2.0m≤W	±(3+W/2)	
4	面板平整度		≤4	尺量（直尺、塞尺）
5	GINA 止水带接触面平整度		≤1	1m 直尺和塞尺量
6	OMEGA 止水带接触面平整度		≤1	0.5m 直尺和塞尺量
7	横向垂直度		≤3	拟合面与设计面在管节左右外缘之差
8	竖向倾斜度		≤3	拟合面与设计面在管节上下外缘之差

注：表中 L 为管节长度，以 m 为单位；

7.6.3 钢壳自密实混凝土浇筑施工应参照《水运工程自密实混凝土技术规范》（JTS/T226）的有关规定，并应符合下列规定：

- 1 钢壳混凝土浇筑可采用陆上浇筑或浮态浇筑，宜优先采用陆上浇筑。采用陆上浇筑时，应对浇筑支撑体系进行详细设计，并定期对浇筑区域地基基础位移、沉降进行监测。
- 2 钢壳混凝土管节自密实混凝土浇筑过程宜优选自动化浇筑工艺及智能设备。
- 3 钢壳混凝土管节浇筑应遵循对称、均衡浇筑顺序。钢壳自密实混凝土的浇筑

速度应经过试验研究确定,以满足钢壳混凝土管节仓格填充密实的要求。混凝土浇筑接近仓格顶板时,应适当降低浇筑速度,以满足气泡从排气管排出的要求。

4 在进行单个仓格浇筑时,应保持混凝土浇筑连续性,距离钢壳混凝土管节仓格顶部 20cm 以内的混凝土浇筑过程不应发生间断,自密实混凝土从出机至浇筑完成的间隔时间不应超过 90min。

5 仓格浇筑管和排气管中高出仓格面的混凝土应在初凝后及时清除,并进行抹平处理,且应在管节下水前对浇筑孔和排气孔等进行焊接密封处理。

【条文说明】浮态浇筑时管节处于水上漂浮状态,封门需提前施工完毕,浇筑作业受波浪、水文影响,内部作业空间受限,主要在场地、水深、航道等条件受限情况采用。

深中通道钢壳混凝土管节的自密实混凝土浇筑速度控制如下:混凝土液面距离顶板 20cm 之前,浇筑速度不宜大于 $30\text{m}^3/\text{h}$;混凝土液面距离顶板 20cm 之后,浇筑速度一般不大于 $15\text{m}^3/\text{h}$ 。浇筑速度控制使混凝土能自动填充钢壳的各个位置,同时尽可能排出气泡,保证混凝土的密实度。

发生间断后再次浇筑混凝土,由于仓格顶部结构复杂阻碍混凝土流动,将造成混凝土流动不充分,影响顶部混凝土填充密实性。

大量试验及施工经验表明 60min 内自密实混凝土性能保持良好,60min 后性能损失速度加剧,90min 后混凝土工作性能难以保证满足指标要求。

对浇筑速度、停止时机、混凝土下落高度等施工关键参数进行精确控制,当采用泵送设备浇筑时需对其进行智能化、自动化改造。

深中通道项目施工中,钢壳混凝土管节仓格的浇筑口和排气口上采用活动浇筑管和排气管,浇筑完成后管内留有一定高度混凝土,且浇筑口混凝土高度大于排气管混凝土高度。如过早拆除会造成混凝土持续溢出、回流或因压差造成混凝土泌水;过晚拆除会因混凝土凝固造成拆除困难,施工经验表明初凝后拆除较为合适。

7.6.4 混凝土浇筑变形控制应符合下列规定:

1 施工前,应对浇筑过程引起的钢壳变形进行研究分析,优选浇筑顺序,制定管

节变形控制措施，宜进行缩尺模型试验或通过足尺模型试验验证。

2 钢壳制作、运输、混凝土浇筑、管节移运过程中应进行变形监测。

3 钢壳混凝土管节预制成品几何尺寸的允许偏差应符合表 7.6.4-1 的规定。

表 7.6.4-1 管节浇筑后预制成品几何尺寸的允许偏差、检查方法和频率

检查项目	规定值或允许偏差	检测方法及检测频率	备注
管节宽度	-5, +20	尺量或激光测距仪：每 10m 一处	
管节高度	-10, +20	尺量或激光测距仪：每 10m 一处	
管节长度	$\pm (15 + (L-20)/10)$	尺量或激光测距仪：每管节 2 处	
车道孔净宽	-5, +20	尺量或激光测距仪：每 10m 一个断面，每断面 3	
中管廊净宽	± 10	尺量或激光测距仪：每 10m 一个断面，每断面 3	
内孔净高	-15, +20	尺量或激光测距仪：每 10m 一个断面，每断面 3	
壁厚	± 10	尺量或激光测距仪：每 10m 一个断面，每断面	
侧墙垂直度	± 15	尺量或激光测距仪：每 10m 一处	
底板水平精度	± 15	尺量或激光测距仪：10m 范围	
侧墙水平精度	± 15	尺量或激光测距仪：10m 范围	
顶板水平精度	± 20	尺量或激光测距仪：10m 范围	

注：表中 L 为管节长度，以 m 为单位；

【条文说明】深中通道钢壳混凝土管节在陆上进行浇筑，主要考虑钢壳、混凝土重量以及混凝土水化热对管节变形影响，如钢壳混凝土管节在水上浇筑还需考虑浮力、侧向水压力、波浪力等外部荷载的影响。

7.6.5 钢壳防腐施工除应符合《水运工程结构防腐蚀施工规范》(JTS/T 209)的相关规定外，尚应符合下列规定：

1 钢壳混凝土管节下水前应检查涂层受损情况，受损处必须用同类涂层修补至同等厚度。

2 牺牲阳极块施工应符合《水运工程结构防腐蚀施工规范》(JTS/T 209)的相关规定，牺牲阳极阴极保护工程施工质量检验应在管节覆土前完成。

7.7 预埋、预留件

7.7.1 预埋、预留件应符合下列规定：

1 各种预埋件和预留孔洞应分类，编号、标识、中心位置及标高应符合设计规定。允许偏差应符合《沉管法隧道施工与质量验收规范》(GB 51201)和《沉管法隧道设计标准》(GB/T513189)的有关规定。

2 预埋钢结构时，应根据环境条件、设计使用年限及相关技术规范采取防腐措施，各类预埋件的防腐措施应符合设计要求。

3 预埋、预留件施工前，可采用 BIM 等信息化手段对管节钢筋及预埋、预留件位置进行模拟，检查预埋、预留件与结构钢筋的交叉碰撞情况。

4 预埋件位置与钢筋位置冲突时，应在设计允许情况下采取钢筋避让原则，对切断的钢筋应进行补强。

5 预埋件宜在钢筋安装过程中初定位，在钢筋笼体系转换完成后精调，并与钢筋笼焊接固定，安装精度应满足设计要求。

7.7.2 OMEGA 止水带的预埋件应从墙体或顶、底板的两侧同时向中间进行安装，套筒、预埋件螺孔应采用螺柱结合润滑脂封闭。

7.7.3 中埋式可注浆钢边止水带宜采用现场整体式安装，注浆管应在止水带固定后进行安装。管节顶、底板安装中埋式钢边止水带时，应采取固定措施实现设计要求的向上倾角。

7.7.4 端封墙枕梁预埋件应与钢梁牛腿预埋件安装保持在同一平面。

7.7.5 预应力孔道的波纹管宜采用直径不大于 12mm 的定位钢筋固定，定位钢筋间距宜取 400mm，应对先浇端管口位置进行固定。波纹管与连接件、锚垫板的连接处宜采用热缩套密封。

7.7.6 交通工程预埋穿墙管道内部应保持通畅，在预留管道所属的节段预制完成后应试通，并在管道内预留钢丝。

7.7.7 管顶舾装件的预埋件安装应符合下列规定：

1 管顶舾装件的预埋件应采取防腐措施，涂层的最小厚度应符合表 7.7.7-1 的规定。

表 7.7.7-1 临时舾装件钢结构外露表面涂层最小厚度

序号	构件名称	防腐措施	厚度（ μm ）
1	管顶预埋件	富锌漆（底漆）	75
		环氧云铁涂料（中间漆）	250
		厚浆型环氧漆（面漆）	125

2 管节主要预埋件允许偏差应符合表 7.7.7-2 的要求。

表 7.7.7-2 管顶舾装设备预埋件允许偏差表

序号	主控项目	允许误差(mm)
1	各舾装设备预埋板螺栓孔和设备连接板螺栓孔之间的相对位置	± 1
2	拉合台座整体水平位置	± 10
3	导向杆及导向架	横向 ± 10
4	水下测控系统预埋件、导缆器预埋件、系缆柱预埋件、绞缆盘预埋件、吊点预埋件	± 20

7.7.8 附属设施预埋件施工应符合下列规定：

- 1 宜在隧道主体结构施工时预埋检修道钢筋接驳器。
- 2 施工前应复核预埋件位置，避免与隧道主体关键构件冲突。

【条文说明】施工前，施工技术人员要熟悉预埋件的分布、走向、坡度、标高，并主动与设计人员核对空间使用情况，及时提出存在的问题。施工前可对预埋件进行分类整理，确保安装无遗漏。

7.8 工厂法管节场内运输

7.8.1 管节场内运输布置应符合下列规定：

- 1 管节场内运输宜采用轮轨式移运工艺，并应布置装（卸）驳码头、轨道梁、台车轨道及台车转换装置等设施。
- 2 采用顶推式移运工艺时，应布置轨道梁、滑移轨道及千斤顶置换装置等设施。
- 3 管节坞内移运应布置锚缆、绞车（卷扬机）等绞缆设施。

7.8.2 节段式管节顶推工艺应符合下列规定：

- 1 节段式管节宜采用分散式顶推工艺进行场内移动。
- 2 管节顶推时，混凝土应满足轴心抗压强度设计要求。
- 3 管节重量转移至支撑千斤顶时，应采用分级加载方式，第一级宜为管节重量

90%，第二级宜为管节重量 100%。每级加载完成后应静置 5min。

4 管节顶推速度应根据顶推千斤顶的性能确定，宜取 75mm/min~110mm/min。

5 管节顶推时应控制顶推轴线的偏差，保证多节段顶推时节段之间不出现拉应力。

6 管节顶推完成后，应采用 V 型支撑对顶推系统进行置换。

7.8.3 整体式管节台车运输工艺应符合下列规定：

1 使用前应对台车系统进行整体调试，并进行 2m-5m 的初步双向移动调试。

2 支撑体系转换宜分级进行，第一级宜为管节重量 90%，第二级宜为管节重量 100%。每级加载完成后应静置 5min。

3 管节移运速度宜不大于 1m/min，每移运 30m 应检查管节的移动行程、轴线偏差情况。

4 管节顶推完成后，应采用 V 型支撑对顶推系统进行置换。台车系统宜分步将管节荷载转移至 V 型支撑系统。

7.8.4 管节运输设施施工应符合下列规定：

1 轨道梁承载力和沉降应满足管节移运控制精度要求，必要时可采用 PHC 桩或灌注桩基础提高承载力、减少沉降变形量。

2 顶推轨道宜采用钢混组合形式，混凝土基础与顶部滑移钢板间应用高强不收缩灌浆材料填实。

3 台车钢轨安装前对轨道梁钢轨安装面标高进行测量复核，轨面精度应满足设计要求。

7.9 一次舾装及试漏

7.9.1 压载水箱施工应符合下列规定：

1 压载水箱最大注水量应能满足管节自重 5%~6%抗浮安全系数的要求，压载水箱的富裕高度不应少于 0.5m，液面高度应考虑管节纵坡的影响。

2 管节内压载水箱的布置应满足管节浮运及沉放期间稳定性和结构受力的要求，并与考虑进（排）水系统、预埋件及压重混凝土转换施工顺序之间相互协调。

3 压载水箱宜采用钢框架和木板墙组合形式，钢框架主要部件包括钢立柱、横梁、拉杆及其预埋件等；木板墙在水箱内侧应设防水膜隔水。压载水箱在便于观察的位置应设置水位标尺。

4 压载水箱进、排水管口宜设置为与底板垂直方向，与底板的距离不宜大于水管管径的 $2/3$ 。主管管径取值应满足 180min 内注水量可使管节抗浮安全系数不小于 1.02，分支管直径宜取 100mm~300mm。

6 压载水箱进（排）水泵宜一用一备，额定流量应满足 30min 将管节接头间的水全部排出。压载系统安装完成后，应对水泵进行试运转，并对管路、水箱进行全面的水密试验。

【条文说明】压载水箱钢框架主要部件包括钢立柱、横梁、拉杆及其预埋件等。

7.9.2 端封墙安装应符合下列规定：

1 管节可采用 H 型钢和钢面板组成的钢结构端封墙，H 型钢骨架与钢面板的紧密贴合。

2 端封墙的安装顺序宜为先安装顶板牛腿，再安装封门 H 型钢梁，然后再分块拼装焊接钢面板，其中钢面板焊缝需要进行水密性试验。

3 端封墙上应至少设置一扇供人员和物资进出的水密舱门，安装前应进行水密性试验，试验压强应取管节最大埋深处水压的 1.25 倍。

4 应避免端封墙与端面预埋件焊接时的高温造成混凝土开裂。

5 底板枕梁、顶板牛腿与封门 H 型钢梁的间隙采用 V 型钢板填充时，应焊接固定。

7.9.3 GINA 止水带安装应符合下列规定：

1 止水带应整条在厂家定制加工，运输、存放过程中不应折叠、拉伸。

2 止水带宜在 25℃ 以下的阴凉环境下储存, 应避免长时间暴晒, 并远离火、油、铜、镁等材料。

3 止水带安装的钢端壳表面应进行打磨处理, 并进行平整度、防腐层、焊渣、尖锐焊缝等检查。

4 安装 GINA 橡胶止水带应采用专用吊具, 吊索宜采用丙纶类的软性吊带, 吊索间距不宜大于 1.5m 以内, 吊索与 GINA 橡胶止水带的连接部位宜采用木制保护罩, GINA 橡胶止水带的上层与下层可用麻绳连接。

5 GINA 橡胶止水带安装后, 应及时安装 GINA 保护罩。保护罩宜采用钢结构, 安装在管节顶对应的预埋地脚螺栓上, 在管节沉放前宜分片拆除。

【条文说明】GINA 橡胶止水带是沉管隧道防水的关键部件, 在施工过程中应确保其不受破坏, 因此在管节一次舾装时安装 GINA 保护罩, 保护罩要便于拆除、可重复利用。考虑到系泊、寄放等环节时间较长, 在海洋环境下会滋生海洋生物黏附在止水带表面, 影响压接和止水质量, 止水带表面出厂时薄膜宜保留, 不应过早撕膜。

7.9.4 管节吊点、系缆柱安装应符合下列规定:

- 1 吊点、系缆柱应沿纵向中轴对称布置。
- 2 宜通过螺栓与管节侧墙顶部的预埋件相连, 螺栓拧紧力矩宜满足设计要求。
- 3 管节沉放到位后在水下拆卸。

【条文说明】管节通过钢索与沉放驳相连, 钢索与管节的连接点就是吊点。吊点需在坞内安装到位, 还要便于沉放到位后水下拆卸, 可重复利用。港珠澳大桥沉管隧道每个管节设置四个吊点, 使安装船能够均衡分担管节浮态重量。

系缆柱用于管节的移坞、系泊、浮运及沉放施工, 管节角部的系缆柱在管节浮运、沉放施工过程中主要起到缆线支点的作用, 管节中间位置的系缆柱主要用于管节的坞内移动与水上浮运。

7.9.5 管节试漏应采用水密性检验。水密性检验前, 应确认管节结构和辅助安装设施的制作安装质量满足设计、施工要求。

7.9.6 压载水箱注水前, 应校核管节重量、注水的水重度, 根据管节重量分布、注水

的水重度、管节的干舷高度确定起浮水位，并控制管节起浮后的姿态。

7.9.7 管节水密性检验部位应包括端封墙、钢端壳、压载水箱、灌排水系统、管节混凝土等，检验工作应符合下列规定：

1 管节试漏前关闭水密舱门及阀门。宜采用木塞封闭管外的进气管口、抽接头水的管口，用法兰盲板水密封闭端封墙的电缆通孔口。

2 管节侧墙、底板、顶板的试漏水位应分阶段进行，最终试漏水位按淹没顶板0.5m水位计。

3 在干坞注水过程中，应全面检查管内的漏水情况，重点监测端封墙型钢焊缝处、封门型钢与混凝土连接处等位置的密封情况。

4 试漏过程中发现漏点时，对不同部位应采取相应的堵漏措施，视漏水情况决定是否继续注水。

5 在管节试漏前和管节对接后，均应进行管节接头水密性检验。

6 管节水密性检查工作可按附录A中的检查对照表进行。

【条文说明】根据不同部位渗漏情况，可采取如下相应的堵漏措施：

环氧树脂封堵法：对于较大的漏点或者较为严重的渗漏情况，可以使用环氧树脂等密封材料进行堵漏。将环氧树脂浆料注入漏点处，等其凝固后形成堵漏层。

水泥浆封堵法：对于较大的漏点或者混凝土结构中的裂缝，可以采用水泥浆封堵。将水泥浆注入漏点或裂缝中，随着水泥凝固形成堵漏层。

填缝剂封堵法：使用特定的填缝剂或者密封胶进行封堵，适用于较小的裂缝或孔洞。

钢板加固法：对于结构缺陷引起的漏水，可以使用钢板对该部位进行加固，从而消除漏点，例如端封墙、钢端壳等。

8 基槽

8.1 一般规定

8.1.1 基槽开挖施工工艺和船舶选型应综合考虑土质、水文条件、工期、施工工况、环保要求及周边水域通航条件等因素。缺乏经验的区域施工时，宜根据设计方案、工程水文地质条件等选择有代表地段进行现场试验性施工。

8.1.2 基槽施工前的准备工作应符合下列规定：

1 应熟悉设计文件，校核设计图纸。2 应进行现场调查，核实工程地质、水文条件和周边环境情况，以及江(河海)堤岸、闸门、围堰、油气管线、周边建(构)筑物、水下砂坑与障碍物及其他设施的详细资料。

3 应对施工区进行施工测量和施工放样。施工测量方法、精度、范围、施工放样等应执行《水运工程测量规范》(JTJ 203)、《疏工程技术规范》(JTJ 319)等相关规定。

4 应检验与校核施工设备性能、平面定位系统、高程系统等。

5 应办理水上水下活动许可证、废弃物海洋倾倒许可证、航行通告。

8.1.3 基槽开挖过程中应采取措施严格控制悬浮物扩散。

8.1.4 基槽初挖后，精挖交工验收与管节沉放前宜对边坡稳定性、回淤形态和强度等关键工序进行监测和分析。监测方法的具体技术要求应现行《水运工程测量规范》(JTJ203)和《深层型核子水分-密度仪现场测试规程》(SL 275.2)等相关规定实施。

8.1.5 沉管隧道基槽清淤工艺应根据回淤情况及现场施工要求确定。

8.1.6 基槽成槽后，应实时监测回淤量与清淤后的水体密度。

8.1.7 基槽开挖施工时应遵守国家与当地有关环保规定,采取合理的施工方法和必要的控制措施，并对水域土粒扩散和混浊度等进行检测。

8.2 基槽初挖

8.2.1 施工船舶选择应考虑挖泥船的作业方式、水文学质条件、进度、环保、通航及成本效益等因素，应符合下列规定：

- 1 开阔区域宜采用耙吸船施工，边角区域、局部受限区域宜采用抓斗船施工。
- 2 硬度较大粘土、粉细砂土质宜采用斗容较大抓斗船施工。
- 3 应满足控制边坡质量、槽底标高和平整度要求。

8.2.2 耙吸船初挖工艺应符合下列规定：

- 1 开挖工艺可采用分层开挖，每层开挖泥层厚度 2m~3m。宜先疏浚表层 2m 浮泥层。
- 2 施工前，应抽除泥舱内淤泥，可采用装舱水下溢流法施工。
- 3 平面和深度控制可采用疏浚监测系统，确保基槽开挖平面精度满足要求和开挖深度均匀加深。
- 4 作业时受横流影响，应控制好船位：涨退潮顶流施工时，整个施工区航迹线均匀布线，施工过程中宜确保船舶准确上线、耙头位置始终保持在计划开挖深度。
- 5 坡距应按设计坡度和开挖土质计算。开挖线应根据坡距设定，疏浚深度可在疏浚监测系统中标定。
- 6 边坡区域宜安排在缓流阶段开挖，边坡开挖宜分层分带（条）开挖。
- 7 基槽初挖应提前 6 个月以上，并与管节安装保持 1000m 以上作业距离。

【条文说明】缓流阶段开挖以减少因流急而导致船体与耙头相对位置的改变，从而影响耙的计划走向。

8.2.3 抓斗船初挖工艺应符合下列规定：

- 1 施工船舶应按垂直基槽轴线且船艏朝向水流来向布置，抛设八字形艏艉锚控制船位。
- 2 挖泥过程中应始终保持锚缆处于张紧状态以精确控制船位。
- 3 开挖工艺可采用分段、分层、分条施工，分段长度应考虑一次抛锚所能开挖

的长度及船舶横移距离，宜取 100m~150m。

- 4 施工区域分条应根据船舶宽度确定，宜取 20m。
- 5 分层厚度应根据土质、抓斗斗高及张斗宽度等因素确定，可取 2m~3m。
- 6 边坡开挖宜按台阶齿状，开挖断面线应与设计边坡基本一致。

8.2.4 基槽施工检测应符合下列规定：

1 施工中应定期进行水深检测，检测周期应根据施工设备、方法及施工阶段确定，施工测量应按现行《疏浚与吹填工程设计规范》（JTS181—5）的有关规定执行。

2 基槽初挖施工检测应按照现行《水运工程质量检验标准》（JTS257）的有关规定执行。

8.3 基槽精挖

8.3.1 基槽精挖应综合考虑管节安装顺序、基槽回淤速度等因素进行流水作业。

【条文说明】碎石垫层整平宜提前一个沉放管节，精挖管节宜提前一个碎石垫层整平管节，特殊情况分段适当提前。

8.3.2 精挖施工设备选型应符合下列规定：

- 1 基槽精挖施工宜选择大型抓斗船。
- 2 常规抓斗船无法满足精度要求时，应对抓斗船进行精挖设备技术改造。

【条文说明】对抓斗挖泥船进行改造主要是改变原有利用潮位为基准的深度控制模式为采用 RTK 基准高程的实时控制模式。通过对抓斗闭合轨迹进行干预，大幅减小挖槽开挖后槽底各点高程的高差值，实现基槽高精度挖泥施工。研发精挖计算机测控系统，接管或替换原挖泥控制系统，可实现抓斗挖泥船施工过程可视、可控、可测。

8.3.3 精挖可分为边坡精挖及槽底成型区精挖。施工前宜选划合适区域进行精挖试验，测定精挖效果及综合工效，选定最佳施工参数及工艺。

8.3.4 抓斗船精挖施工工艺应符合下列规定：

- 1 抓斗船精挖的平面位置、目标开挖高程及施工范围可通过制作施工范围的导航文件进行控制。
- 2 根据施工导航电子文件，可采用拖轮辅助抓斗船就位，锚艇协助布置施工锚。
- 3 施工作业条件可取风力 $\leq$ 蒲氏 6 级，波高 $\leq 1.5\text{m}$ ，流速 $\leq 1.5\text{m/s}$ 。
- 4 基槽精挖应按垂直基槽分条施工，分多层开挖。

【条文说明】在下斗过程中，可通过精确挖泥计算机测控系统实时调整吊斗钢丝绳的下放深度，确保抓斗在既定位置切削土体，开挖出一条平均高低差值水平纹波线。

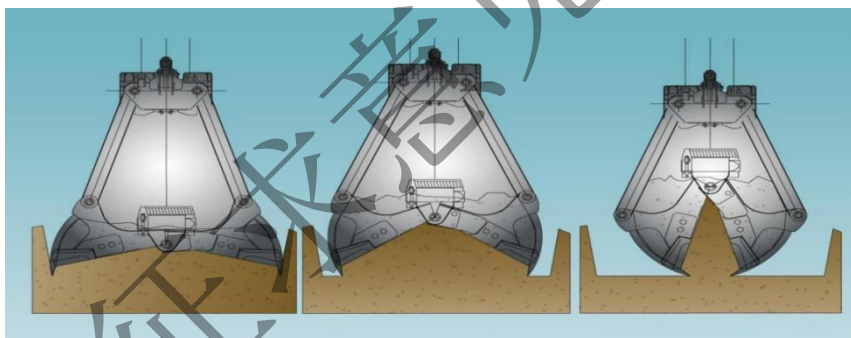


图 8.3.4-1 抓斗精挖功能原理示意图

8.3.5 精挖施工检测应符合下列规定：

- 1 应定期做好深度指示系统、深度控制系统、疏浚监测系统、抓斗船定深平挖系统等的校核、校正，以保证系统误差在规定值之内。
- 2 施工中，应每 2d~3d 定期用多波束测深仪对精挖基槽进行全覆盖检测测量，发现欠挖和漏挖时应及时进行补挖。

8.4 基槽清淤

8.4.1 隧道基槽施工各工序应进行维护性清淤，基槽清淤宜采用耙吸船和专用清淤船清淤相结合的方式。

8.4.2 各项清淤施工前，应选划合适区域进行典型施工，测定清淤效果及综合工效，选定最佳工艺或优化施工工艺。

8.4.3 基槽维护性清淤应贯穿于基槽初挖施工期间，可采用中大型耙吸船进行，耙头紧贴垫层泥面，逐层清除回淤物。

8.4.4 基槽精挖前清淤、基槽抛石夯平前应根据回淤量及作业空间大小选择清淤设备，可选择具有 DPDT 及 DTPS 中大型耙吸船和专用清淤船完成。

8.4.5 碎石垫层铺设施工，应在抛石夯平施工完成之后随即展开。

【条文说明】如淤积面积和淤积量较小，一般采用专用清淤船作业即可；大面积回淤且回淤量大，安排具有 DPDT、DTPS 系统的中大型耙吸船进行清淤，剩余的局限区域高精度清淤施工由专用清淤船承担；清淤范围需向相邻待沉放管节延长 40m~60m。

8.4.6 清淤施工过程中应监测边坡稳定性。

8.4.7 清淤施工设备选型应考虑淤泥量、流动特点、周边情况等因素，并符合下列规定：

1 专用清淤船应配备多种工况使用的多功能高精度清淤吸头装置。深水深槽清淤可安装超长刚性桁架结构的桥架进行。

2 槽内出现高强度回淤时，空间不受限区域宜采用中大型耙吸船进行吸淤，清除大部分回淤物后，再采用专用清淤船进一步清淤。

3 采用耙吸船清淤时，应采用 DPDT 系统、DTPS 系统等先进的生产系统。

【条文说明】，DPDT 系统是利用各类传感器测船的运动状态及风浪流等环境力，通过计算机的实时计算来控制艏侧推、CPP 及舵产生适当的推力和转矩，以抵消环境力的影响，使得挖泥船尽可能在设定的船位、艏向或预定航迹进行疏浚施工。DTPS 挖泥轨迹显示系统能够显示疏浚矩阵、差异矩阵，可对水深测量文件色块视需要进行调整，施工过程中动态显示挖泥断面，且耙头与船体的比值图完全相同。

8.4.8 耙吸船清淤工艺应符合下列规定：

- 1 耙吸船在基槽的边坡和槽底精确清淤时，应根据设计标准断面编制施工导航文件，边坡台阶清淤高差宜为 2m，均匀布线，分层清淤。
- 2 挖泥航迹线应根据开挖区域和施工作业条件合理布设，可在系统的预设航迹点表中输入航迹线各控制点坐标。
- 3 试航作业应按预设航迹线路进行。
- 4 船舶到达航迹线终点时应停止挖泥，起升耙臂到安全高度，航行至下一条航迹线，放下耙头，重复进行挖泥。
- 5 总体施工方向由坡顶向坡底、由边坡向槽底方向推进。施工过程中可同时通过 DPDT、DTPS 导航系统清晰地获得开挖情况，实时调整下耙深度，船舶可按 0.5kn~1.0kn 航速匀速前进。
- 6 回淤基槽清淤宜采取不溢流、不开高压冲水作业方式进行精确施工。装满舱容应停止清淤施工，至纳泥区抛泥。

【条文说明】根据现场风、浪、流、涌等环境力影响合理调整船艏向、偏航角和航速控制挖泥船耙头以与预定的航迹最小的偏差航行，经多次试航作业综合选取合适的船艏向和航速并输入系统参数设置。

可由驾驶员人工控制船舶以合适的船艏向和航速航行至清淤施工区域预定航迹线的起点上，然后切换到 DPDT 控制模式，系统将自动开始操作船舶，控制挖泥船按预定航迹线航行及耙头设定标高开始疏浚过程。

8.4.9 专用清淤船工艺应符合下列规定：

- 1 施工前宜进行典型施工。
- 2 清淤过程中应定期对吸淤头、测量设备、清淤控制系统、RTK-GPS 平面及深度定位系统的精度进行校验。
- 3 专用清淤船可由锚艇辅助，布锚宜垂直于基槽顺流和采用六锚定位方式，清淤施工宜采用“定点盖章”式工艺。

4 分条施工宜结合施工环境合理进行，分条宽度宜取 20m~40m。

5 清淤施工前，工程人员可绘制定点清淤网格图，并根据回淤物厚度及范围，拟定清淤遍数及点距。

6 清淤船定点清淤施工时，可利用清淤监测系统的泥浆密度显示和水深测量装置进行清淤施工监测。当清淤点的浓度和水深达到设计要求后，可通过收放锚缆移动船舶至下一个清淤点。

7 清淤整体施工顺序可呈“S”形布置，单点吸淤时间应根据淤积物厚度和泥浆密度计读数确定。

8 根据坡脚处淤泥清除、边坡淤泥回流影响的要求，清淤范围宜适当扩大至基槽槽底边线 10m~12m 范围。

9 专用清淤船应保持与已安放管节钢端门一定的安全距离，宜取 2m~3m。

10 清淤泥浆宜通过排泥管线输送至锚泊的自航泥驳，满载后运至卸泥区抛卸。

【条文说明】通过典型施工分析清淤设备和工艺的适用性、施工效率，掌握高精度定点清淤施工控制要领，优化清淤工艺，规范清淤施工操作流程和管理。施工过程中，可通过精确清淤监测系统实时电脑屏幕显示、监测清淤深度，自动生成清淤记录文件，实时记录清淤轨迹。应记录每一个定点清淤位置及完成深度，便于后期检测比对。

8.4.10 清淤施工检测应符合下列规定：

1 基槽清淤施工检测可通过多波束水深检测、音叉密度仪密度检测、人工探摸与取样等方式进行，分析和控制施工质量。

2 多波束水深检测频率应考虑清淤施工阶段、位置等因素进行选择，可取 1~3 次/天。在抛石夯平及碎石垫层铺设整平等工序前及施工期间，宜进行人工探摸，并与多波束水深检测的回淤厚度相互比对。

9 地基与基础

9.1 一般规定

9.1.1 施工前应根据施工总体部署及地基与基础设计，结合地质条件、水文、气象条件和周边环境等因素，做好地基处理、基础施工等施工工序衔接。

9.1.2 地质与水文等条件复杂、基础使用要求高、附近区域没有可借鉴的工程经验时，正式施工前应在地质条件具有代表性的区域开展现场工艺试验。

9.1.3 施工过程中发现地质、水文等条件与设计条件不符时，应停止施工，及时向业主、设计、监理等单位反馈。

9.1.4 水下作业时应采取合理可行的环境保护措施，管控施工对水域生态环境的不利影响。

9.1.5 地基与基础施工质量控制与检验应符合相应的国家及行业现行标准的规定。

9.2 地基处理

9.2.1 地基处理水上施工作业时，施工装备的性能应能满足应现场水域风、浪、流条件下稳定作业与保障定位精度的要求。

9.2.2 沉管隧道采用换填、水泥搅拌桩、砂桩、碎石桩等处理地基时，施工及检验应符合《水运工程地基基础施工规范》（JTS 206）、《水下挤密砂桩施工质量检测标准》（JTS 261）和《沉管法隧道施工与质量验收规范》（GB 51201）等国家及行业现行标准相关规定。

9.2.3 采用天然地基时，基槽成槽质量验收合格后应及早进行垫层施工。

9.2.4 水泥搅拌桩地基处理施工应符合下列规定：

1 正式施工前应开展室内水泥土配合比设计，室内试验确定的配合比应经现场工艺试验验证。

2 应定期校核搅拌轴提升和下贯速度、搅拌轴转速、喷浆和喷水流量及搅拌叶片有效直径等。

3 宜采用一体化深层搅拌施工装备进行施工,施工装备应配置具有较高信息化水平的施工控制系统,具有实时监控与调整喷浆量、喷水量、下贯速度、提升速度、转速、垂直度、搅拌头高程、施工电流值等工艺参数的性能,并通过现场工艺试验建立持力层判别标准与搅拌路线曲线。

4 喷浆方式应根据桩长、土层性质、设备性能综合选择,并根据贯入的土层性质调整工艺参数,保障施工质量。

5 施工过程中应根据土体性质、处理深度、注浆量、置换率、场地周边环境等因素,通过调整施工工艺、施工顺序等措施控制土体隆起,搅拌桩施工宜按泥面标高先高后低的顺序进行。

9.2.5 砂桩、碎石桩地基处理施工应符合下列规定:

1 正式施工前应选择工程场区地质条件具有代表性的区域开展现场工艺试验宜,验证施工装备性能及其适用性,确认桩体质量是否满足设计要求,并确定填料分段次数、振密电流、留振时间、拔压管速度、充盈系数等关键工艺参数。

2 施工中应采取措施保证砂桩、碎石桩的桩位、直径、垂直度、桩顶桩底标高、填料量、桩身密实度等。

3 水上作业时,宜采用砂桩、碎石桩专用施工装备进行施工,施工装备应配置具有较高信息化水平的施工控制系统,实时显示、监控和记录施工工艺参数。

【条文说明】砂桩、碎石桩为密实散体桩,通常采用正方形、三角形的加固布置型式,桩间距均匀分布。对于软土层厚、附加荷载较大的区域,砂桩、碎石桩可联合开展堆载预压,作为排水通道,同时减少主固结沉降量。

砂桩处理地基技术方案主要包括沉管砂桩、沉管夯扩砂桩或干振挤密砂桩,水下砂桩施工宜采用沉管砂桩。砂桩密实可采用投料重锤密实、管内投料振动密实和先拔管后投料复打密实。

碎石桩处理地基技术方案主要包括振冲法、振动沉管法。根据填料工艺的不同,可分为孔口喂料法与底部出料法。相较于孔口喂料,底部出料更能保证成桩体的均匀性和连续性,条件许可时宜优先采用底部出料工艺。根据造孔与密实辅助工艺不同,可分为湿法振冲与干法振冲。

振冲法施工应通过现场工艺试验确定以下工艺参数：振冲器下贯速率、造孔水压（湿法工艺）、造孔气压（干法工艺）、密实电流、留振时间、加密段长度、加密水压（湿法工艺）、加密气压（干法工艺）、单桩碎石填料量等。振动沉管法施工应通过现场工艺试验确定以下工艺参数：桩管造孔下贯速率、拔管速率、复打挤密次数和时间、电机的工作电流、单桩碎石填料量等。

9.3 桩基础

9.3.1 桩基工程施工除应满足《码头结构施工规范》（JTS 215）规定外，尚应符合下列规定：

- 1 预制桩打桩前应制订合理的施打顺序和技术措施避免或减少挤土效应，宜由内侧向外侧施工。
- 2 应根据地质、坡度、水流、基槽深度及设计要求等情况，间歇一定时间后沉桩。
- 3 成桩过程中应观测岸坡及邻近建(构)筑物的位移和沉降。

9.3.2 桩顶打至地面或水面以下时，应采用送桩器沉桩至设计标高。

【条文说明】送桩器为将桩顶打至地面或水面以下，套接在桩顶上传递锤击力的长替打，在设计桩顶位于地面或水面以下，且场地限制无法大面积开挖后再打桩时打桩机械及交通无法开展的情况下，在现地面处或水上打桩，用送桩器将桩顶打至地面以下。

9.3.3 桩基工程质量控制要求应符合《水运工程质量检验标准》（JTS 257）的有关规定。

9.4 垫层与整平

9.4.1 垫层施工前，应根据施工区域的气象、环境水文资料，编制施工船舶的作业控制工况、作业窗口。基槽底回淤沉积物厚度应满足设计要求。

9.4.2 先铺法基础垫层应通过试验确定碎石的合适粒径、级配以及模量参数。

9.4.3 后填法施工时，临时支座应提供有足够承载力，承载力应根据管节设计所需的负浮力大小进行计算确定。

9.4.4 砂流法施工应满足下列规定：

- 1 在管节预制时应预留砂流孔，并不得出现渗漏，并应在沉放前进行检查。
- 2 材料粒径与配合比、压力应根据试验确定。
- 3 纵向灌砂应按先中间后两侧顺序对称进行。
- 4 冲击坑、砂流槽、压砂孔采用灌浆充填时，注浆压力、浆料均应满足设计要求。

9.4.5 压浆法施工应满足下列规定：

- 1 在管节预制时应预留压浆孔，并不得出现渗漏，应在沉放前进行检查。
- 2 压浆前应在管节周边采取止浆措施。
- 3 压注材料级配、配合比与灌注压力应满足设计要求或根据试验确定。
- 4 注浆过程中应对管节上抬量和横向水平高差进行监测。
- 5 注浆宜从管节下坡向上坡方向逐孔交错进行。
- 6 应根据注浆压力、注浆量等控制灌浆充填程度，可采用砂浆测定仪检测灌浆充填率。

9.4.6 垫层块石抛填施工除应满足《水运工程地基基础施工规范》（JTS 206）相关规定外，尚应符合下列规定：

- 1 抛石船宜横跨基槽驻位，并充分考虑运料船及抛填卸料机械设备布置。
- 2 抛石船应采用精确定位控制系统，按照抛填基线进行驻位，并采取溜管投放石料。溜管管口应根据典型施工确定距离基槽顶面高度，可取 4.0m~5m。
- 3 抛填溜管或船舷应采用超声波探头等方式，实时显示抛填顶标高。
- 4 抛填施工可分为粗抛及精抛两个步骤实施，应根据抛石范围基点对每个点位进行核算，实现分断面定点抛填。

9.4.7 垫层抛石夯实施工应符合下列规定：

- 1 垫层抛石夯实施工前，应对基槽底回淤沉积物密度和厚度进行检测，满足设

计要求时再进行施工。

- 2 超深水、大流速外海垫层块石夯实施工宜采用液压振动锤进行作业。
- 3 夯实设备及船机应具备定点定距夯平作业功能，并通过试验确定夯平搭接距离，确保夯平作业全范围覆盖。
- 4 夯实施工应按照分断面、分层、分段实施，并严格控制各分段、分层部位搭接部位的夯实质量。
- 5 夯实施工应配备信息化监测设备，同步监测抛石夯沉量，并通过夯沉量进行施工过程控制。

【条文说明】信息化监测设备是垫层水下精准整平作业的质量保障的关键，通过监控系统实时显示水面线，实际的水底高程线、设计高程线和整平机不同时刻的位置和形态以及整平机整平挖斗轨迹线。

9.4.8 先铺法碎石垫层整平施工应符合下列规定：

- 1 先铺法宜分粗平和精平两阶段进行。
- 2 垫层施工时应根据不同的地基处理形式设定预抛高量。预抛高量宜在施工前通过在典型段地基及基础上进行荷载板试验确定。
- 3 先铺碎石垫层施工应采用专用整平船舶，并配备合适的供料船、拖轮、锚艇及石料运输船。
- 4 在整平船进场前，应编制整平船锚位管理计划，布锚前计算出整平船各锚位的坐标，通过 GPS 精确定位抛锚。
- 5 沉管管节的碎石垫层铺设过程中，应通过整平船锚绞车收放锚缆，实现整平船在整个管节范围内的移船和定位。
- 6 船位底层和顶层垫层铺设施工完成后，抛石管内剩余石料应在垫层铺设区域外排弃。在铺设结束前的最后阶段，应严格控制抛石管内碎石的料位高度，抛石管内料位高度宜控制在 5m~10m 之间。
- 7 碎石垫层施工完成后，应采用多波束对垫层及基槽边坡进行定期扫测直至管

节安装完成。若发现高程异常区域，应采用潜水探摸确认垫层及边坡情况。

【条文说明】专用整平船使用前，应对船体和抛石管平面及高程系统进行校准并标定，还应对高程控制及检测相关装置进行校准确认。

碎石垫层施工时，应考虑由设计单位根据不同管节的基础形式提供相应的预抛高量。专用船整平船舶应具备高精度整平作业能力，石料落点准确、排列规则，包含定位测量、水下抛石、浅水整平、质量检测等功能，船体稳定，能减小船体受气象，风浪和潮流的影响。

整平船施工前，对声纳及抛石管平面及标高等参数进行校准与确认。

9.4.9 垫层整平施工允许偏差应满足表 9.4.9-1 的要求。

表 9.4.9-1 垫层整平允许偏差要求

序号	检查项目	规定值或允许偏差	备注
1	垫层顶部标高测点允许偏差	$\pm 4\text{cm}$	85%以上测点满足偏差要求
2	垫层两侧顶边线与设计位置平面允许偏差	$\pm 20\text{cm}$	—
3	碎石垄纵向宽度	不小于设计值	
4	单个管节相邻整平船位内碎石垄顶	$\leq 2\text{cm}$	相对值

10 衔接段

10.1 一般规定

10.1.1 衔接段施工平面布置应考虑基坑支护结构施工、起重设备作业、基坑进出通道、场内施工道路、止水施工及材料堆放等因素，并应符合下列要求：

1 场内施工道路应考虑基坑支护结构施工设备作业、衔接段基坑周边道路等因素进行布置。

2 大型起重设备布置应考虑吊装工作量、材料运输、设备安拆、周围建筑物等因素，并应避免作业期间相互干扰及对周边既有建筑物产生影响。

10.1.2 衔接段围堰施工与拆除方案应根据衔接段结构、工期要求、船机设备性能、现场环境条件综合考虑，并应减少水上作业施工对通航、生态环境的影响。

10.1.3 围堰与基坑施工应编制专项施工方案并组织专家论证。

10.1.4 围堰基槽应进行清淤，清淤质量应满足设计要求，并宜设置防回淤措施。设计无规定时，应符合《码头结构施工规范》（JTS 215）的相关规定。

10.1.5 基坑开挖前应确认施工区域与既有建（构）筑物的位置关系，基坑开挖过程中应定期监测既有建（构）筑物与支护桩的变形。

10.1.6 管节与衔接段对接范围内，衔接段两侧的护岸结构与管节之间的净距应满足管节浮运及水下对接作业空间要求，且不宜小于 2.5m。当遇有水流流速较大、止推段位于曲线段或其它特殊情况时，宜适当加大净距。

10.1.7 现场测量控制点与施工桩位最小距离不宜小于 30m，并应采取措施防止控制点被施工机械破坏。

10.1.8 特殊条件下的衔接段施工应符合下列要求：

- 1 应对施工区域内的既有管线进行排查、保护或迁改。
- 2 涉及绿化迁改时，应制定迁改及复绿方案，临近红树林等植被保护区时应采取措施防止油污、固体垃圾、泥浆等流入保护区内。
- 3 临近既有地铁结构时，应采取严格控制上部桩底标高、定期监测地铁结构保障

安全。

4 临近动物保护区时，应对附近水域的生物习性、繁育状况等进行专项调查，并采取相应保护措施。

5 临近港口码头、锚泊（防台）区、水利防洪或军事设施时，应在前期进行专项评估，并根据评估结论采取相应防护措施。

6 市区内施工时，应提前评估施工期土石方外运、排水、噪声等对周边环境、城市下水道及周围居民的影响，并采取有关防护措施。

10.2 围堰与基坑

10.2.1 围堰施工与基坑开挖应按照国家及行业现行规范的有关规定执行。

【条文说明】引用的国家及行业现行标准主要包括《沉管法隧道施工与质量验收规范》（GB 51201）、《建筑地基基础工程施工规范》（GB 51004）、《建筑基坑支护技术规程》（JGJ 120）、《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T 3650）。

10.2.2 双排钢板桩围堰施工应按照《钢围堰工程技术标准》（GB/T 51295）有关规定执行，并应符合下列规定：

1 钢板桩围堰施工前应对插打范围内的地下障碍物进行勘探、调查。存在片石、块石时，应提前引孔或开挖清除。

2 施打过程中应用全站仪和水准仪控制钢板桩垂直度，并应及时调整打桩机导向架的偏位。

3 板桩墙间填料应分层回填和压实，分层厚度应控制在 30cm~50cm。

10.2.3 锁扣钢管桩、阴阳扣钢管桩围堰施工除应满足《钢围堰工程技术标准》（GB/T 51295）有关规定外，并尚应符合下列规定：

1 施工前应分析现场地质、水文资料，探查桩位处有无障碍物。

2 全面插打钢管桩前应先试桩，核对水文地质情况，验证停止贯入标准与施工工艺。

3 打桩应连续施打，不宜中途停止贯入。沉桩过程中贯入度突然发生变化、桩身严重倾斜、桩身弯曲、桩头严重损坏、桩周大量涌水或地面严重隆起时，应立即停

止施工，分析原因并采取必要改进措施。

4 阴阳扣钢管桩施工前应先对钢管排桩两侧土体进行加固、成槽，安放钢管桩、浇筑混凝土并对阴阳扣位置进行旋喷止水。

5 应在钢管桩上设置防止人员坠落的临时保护盖板。

【条文说明】试桩是核对水文、地质情况以及检验选择的施工工艺是否符合相关安全要求的重要手段。根据以往经验，桩布置比较集中且数量在 200 根以下时，建议试桩数量不少于 3 根。每增加 100 根桩，则增加 1 根试桩。如地质条件复杂、桩种类别较多，或桩布置零散、场地面积较大，可适当增加试桩数量。

10.2.4 大型钢圆筒筑岛围堰施工除应满足《码头结构施工规范》（JTS 215）第 8 章“格型钢板桩码头”的有关规定外，并尚应符合下列规定：

1 钢圆筒应陆上拼装，水域条件、拼装场地应满足起重船及运输驳的作业要求。

2 拼装场地应设置环形基础等筒体拼装辅助设施，并应满足驳岸整体稳定性，场地面积应满足材料拼装、半成品及成品临时堆放等要求。

3 用于吊装钢圆筒的吊耳结构形式、数量、分布及加固措施应根据钢圆筒结构特点确定。吊耳宜布置在钢圆筒内壁的竖向加强肋上，并应根据吊耳分布情况设置避免水平方向发生变形的吊梁。

4 起重船应满足吊起钢圆筒和振沉系统、克服土侧压力进行拆除的能力。运输驳船应经验算，满足稳性要求。

5 钢圆筒与钢副格应进行封仓加固专项设计，满足运输稳定性要求。钢圆筒、钢副格运输和吊装过程中应采取措施保护樁槽和樁头。

6 大型钢圆筒的插打宜采用液压多锤联合振沉装备，振沉完成后应从筒体中部向周边均匀回填砂，回填砂质量、分层厚度及密实方法应符合设计要求。振沉及回填过程中应进行筒体平面位置、筒顶高程和倾斜率的监测。

7 钢副格应沿岛壁先外后内、对称插设与振沉。

8 止水帷幕应在紧贴钢圆筒筑岛围堰内侧的回填砂面上进行施工，并满足设计

要求。

【条文说明】可在钢圆筒振沉施工定位驳上安装 GPS 接收机、自动跟踪全站仪和计算机处理系统,并在振沉系统上安装适配反射棱镜和液位计,共同组成钢圆筒监测定位系统。

10.2.5 沉箱等重力式围堰施工应按照《码头结构施工规范》(JTS 215)有关规定执行,并应符合下列规定:

- 1 沉箱吊装设备应根据现场作业条件、设备性能等进行技术、经济比选。
- 2 陆上吊装沉箱时,应对起重机械作业区域进行地基承载力和边坡稳定性验算。水上吊装沉箱时,应进行起重船的抗倾覆验算。
- 3 沉箱基槽抛石前、沉箱基床整平前及沉箱安装前均应检查回淤情况,不满足要求时应进行清淤。沉箱安装完成后应及时回填砂。
- 4 围堰与岸端搭接处以及围堰底部的止水施工质量应满足设计要求。围堰底部采用升浆基床时,宜先通过陆上模拟试验确定砂浆配合比与压浆工艺参数,压浆过程应保持连续。止水防渗帷幕施工质量应满足设计要求。

【条文说明】若压浆施工被迫中断,在两次施工结合面处需高压冲洗,且应将注浆管沉入施工完毕的升浆基床混凝土内,充分搅动。

10.2.6 膜袋围堰施工除应满足《水运工程土工织物应用技术规程》(JTJ/T239)有关规定外,并应符合下列规定:

- 1 回填砂质量、模袋质量、充盈度及搭接质量均应满足设计要求。
- 2 施工前应检查并清除基槽底部尖锐物与回淤,对陡坎等进行整平。
- 3 应根据水深条件采取相应的模袋铺设方式。
- 4 模袋的缝合应牢固严密,吹填顺序宜先四周、再中间,同层相邻模袋应先吹填接缝处。
- 5 堰体上升速度应根据沉降观测结果进行控制,上层模袋应在下层模袋沉降基本稳定后进行吹填。
- 6 膜袋填充后应采取有效措施减少膜袋内的水分。

7 围堰沉降稳定后方可进行基坑的排水，围堰内部回填应分层填筑和压实。

【条文说明】

先吹填接缝处，可使相邻模袋紧密贴合，避免在接缝处形成三角缝。

10.2.7 基坑开挖时应先支后挖、严禁超挖，开挖过程中应按照设计要求逐层降水，并应对围堰变形进行监测和控制。

10.2.8 围堰拆除应符合下列规定：

1 围堰拆除宜选择在枯水季节或枯水时段进行。在洪水季节或洪水时段拆除时，应进行专项论证。

2 施工前应编制围堰拆除专项施工方案，验算围堰拆除过程中的结构稳定性，组织专家论证，并对衔接段端封墙进行水密性试验。

3 围堰拆除宜从下游侧逐步向上游侧进行，拆除过程中围堰内外水位应保持一致。

4 围堰拆除过程中，应对支护桩顶位移和未拆除的支撑轴力进行监测。

5 应采取措施保护水域环境，不得影响航运和污染临近水系的水质，并符合环境保护及水土保持要求。

6 深水或复杂水域环境下的围堰桩基拆除宜采用水下无人切割设备。

7 围堰拆除施工中涉及的人工潜水作业应参照《潜水员水下用电安全规程》（GB 16636）、《空气潜水安全要求》（GB 26123）和《空气潜水减压技术要求》（GB/T 12521）的相关规定执行。

10.3 衔接段隧道结构

10.3.1 隧道结构施工中涉及的高支模等作业应编制专项施工方案，并组织专家论证审查。

10.3.2 隧道主体结构的桩基、混凝土施工应按照《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T 3650）有关规定执行。

10.3.3 隧道结构钢筋加工宜设置封闭式厂房，并宜采用智能数控设备加工。

10.3.4 隧道外侧墙模板不宜采用对拉的加固方式。

【条文说明】外侧墙模板不建议采用对拉加固的原因是为了避免形成渗水通道，增加结构漏水风险。

10.3.5 隧道顶板模板可根据钢立柱和支撑的分布情况选择满堂支架或可移动桁架模板。

【条文说明】当钢立柱分布数量较少时，可采用可移动桁架模板作隧道顶板模板，对比满堂支架，可节省大量安拆作业。

10.3.6 衔接段与沉管段对接端面的钢端壳制作与安装应符合第 7.3.8 条的规定。

10.3.7 隧道结构混凝土宜采取纵向跳段法或分段设置后浇带进行施工。施工分段长度的划分应综合考虑隧道线型和结构抗裂要求，宜控制在 20m~40m。浇筑前应清理施工缝处止水带表面，浇筑过程中应采取措施固定和保护止水带。

10.3.8 隧道结构管节对接端两侧应按照设计要求做好止水防渗处理。

10.3.9 隧道结构防水工程施工应参照《地下防水工程质量验收规范》（GB50208）和《地下工程防水技术规范》（GB50108）有关规定执行。

10.4 护岸

10.4.1 斜坡式护岸结构施工除应满足《防波堤与护岸施工规范》（JTS 208）有关规定外，并应符合下列规定：

- 1 应采取防护措施保护临近的建（构）筑物、道路或地下管线。
- 2 岸坡开挖应自上而下、分段分层进行，不得掏底开挖，岸坡坡度应满足设计

要求。

3 挖方弃土在坡顶堆放时,应严格控制堆土位置和高度,满足岸坡稳定的要求。

10.4.2 直立式护岸结构施工除应满足《防波堤与护岸施工规范》(JTS 208)有关规定外,并应符合下列规定:

1 重力式护岸结构构件基槽抛石前、基床整平前及重力式护岸结构构件安装前应进行回淤检查,不满足设计要求时应进行清淤。

2 基槽开挖设备应根据水深条件、水文地质条件、工期要求等进行选型。基槽开挖应分段、分层、分块进行。

3 构件采用陆上吊装时,应进行地基承载力和边坡稳定性验算;采用水上吊装时,应进行船舶稳性验算及吊装设备的抗倾覆验算,风浪较大时,宜采用大型船舶或起重作业平台进行安装。

4 水深较大、风浪条件恶劣时,宜利用大型驳船或打桩平台进行桩基式护岸施工。

10.4.3 恢复护岸应与原护岸有效衔接,恢复后的护岸防洪、防渗及稳定性标准不应低于原结构设计标准。

11 管节下水及水上运输

11.1 一般规定

11.1.1 管节水上运输工艺应根据水上运输距离、航道波流条件、现有装备情况等综合比选确定，可采用拖轮浮运、绞车浮运、拖轮+绞车浮运、驳运等方式。

11.1.2 管节水上运输周期应考虑运输距离、水流波浪条件、作业窗口、工期要求等因素。

11.1.3 临时航道竣工扫测合格后，方可进行管节水上运输。

11.1.4 管节水上运输应全程监测风速风向、波浪、水流、缆绳力等参数，宜配置水上运输导航软件系统辅助决策。

11.1.5 管节水上运输作业应符合下列规定：

- 1 应与管节寄放、沉放和安装作业相协调。
- 2 管节水上运输前，应统计作业区域潮位、水流、海水重度规律，实测天数不宜少于 30 天。管节浮运宜在涨潮时进行，运距短时可采用乘潮浮运。内河沉管隧道管节浮运航道水深不足时，宜安排在丰水期。
- 3 水上运输前，应检查船舶操纵系统及工作状态、测量控制系统、管节及其与船舶联接状态等。
- 4 浮运距离长、海况复杂时，宜进行运输前演练，测试导航软件，检查通信、指挥和控制系统的有效性。
- 5 应结合航道沿线水文气象预报情况，提前办理相关的施工许可。

【条文说明】管节浮运过程中，一般需要开挖临时航道，管节水阻力随着管节富裕水深减小而增加明显。为尽可能减小临时航道开挖量，降低管节浮运阻力，确保管节运输安全，感潮河段或外海沉管隧道管节的运输可以利用涨潮期进行管节运输。对于水位变化较大的内河，则可利用丰水期进行管节浮运作业。

11.1.6 管节水上运输作业窗口的选择应符合下列规定：

- 1 管节水上运输作业气象窗口宜安排在白天时段,并与管节沉放作业一并考虑。
- 2 水上运输作业窗口应考虑窗口时长要求,水文气象作业限制条件,施工区域水文气象的长期和短期预报数据等因素,可采用作业窗口预报系统确定。
- 3 管节水上运输作业的水文、气象限制条件应综合考虑管节稳性及缆绳张力、船机设备配置等因素,可结合物理模型试验或理论分析等手段进行确定。试验成果不足时,宜参考表 4.5.3-1。

11.2 寄放

11.2.1 管节寄放应根据寄放管节数量、水深、水域水文条件、工期计划等因素比选,确定可采用坐底寄放或漂浮式寄放。

11.2.2 当寄放区水域情况较好,宜采用管节漂浮寄放;当台风频发、临近航道、水域复杂时,应采用坐底方式。

11.2.3 坞内寄放时,可采用直拉式和斜拉式移动方式将管节绞移至指定位置。管节移动速度不宜大于 0.1m/s。主、副锚缆(横移)破断荷载不应小于设计值并应经检验。

【条文说明】坞内寄放的管节横移通常由坞墙上设置的卷扬机完成,根据卷扬机布置位置和拖曳方式的不同,管节坞内移动可分为直拉式和斜拉式两种。根据深、浅坞的位置关系不同,管节坞内移动有横移和纵移两种。港珠澳大桥沉管隧道深、浅坞平行布置,移动方式为坞内横移,参考图 11.2.3-1 和图 11.2.3-2。

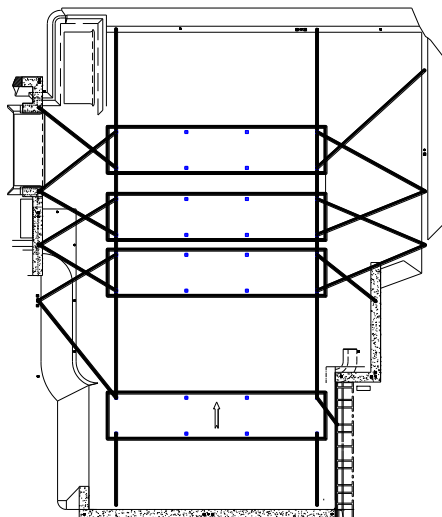


图 11.2.3-1 管节直拉式横移示意图

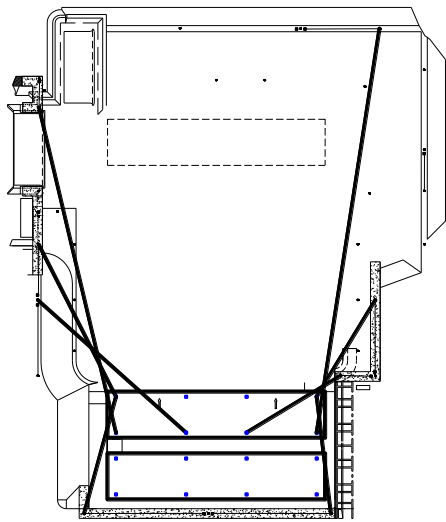


图 11.2.3-2 管节斜拉式横移示意图

直拉式横移时，缆绳与管节移动方向平行；斜拉式横移时，缆绳与管节移动相应成一定的夹角。对两种管节横移方式的优缺点进行综合适用性分析，见表 11.2.3-1。

表 11.2.3-1 管节坞内横移方法优缺点对比表

横移方法	直拉式	斜拉式
特点	管节受力方向与轴线垂直	管节受力方向与轴线不垂直
操作性	简单	比较复杂，对操作人员要求较高
可控性	较差，管节纵向移位困难	较好，管节纵横移位均比较方便
卷扬机要求	吨位较小	吨位较大
地锚要求	承载力较小	承载力较大

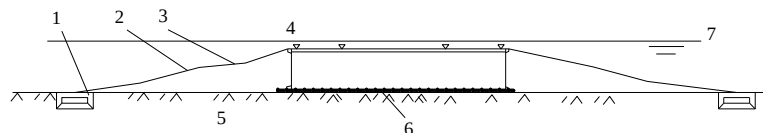
管节移动时存在纵向偏位的可能，因此需要不断地进行位置调整。而管节寄放区通常规模有限，为保证管节移动的安全，绞移系统应具有管节纵向调节能力。港珠澳大桥沉管隧道管节寄放时，首尾与坞墙间距较小，因此采用斜拉式进行。

11.2.4 管节坐底寄放时应进行垫层承载力计算及起浮工艺设计，并应满足下列规定：

- 1 管节坞外坐底寄放宜根据水流方向选择位置抛投锚块，将锚块与管节缆桩相连接。
- 2 管节压载水箱注水高度应满足负浮力和地基承载力设计要求。

【条文说明】管节坞外寄放时，外部水流确定性较差，为确保管节安全，宜设置

锚碇系统固定管节，防止管节走位。系泊系统的安装，可利用起重设备配合管节缓慢下沉，逐渐收紧系泊缆绳，直至管节坐落于垫层顶面，完成管节寄放，管节坐底寄放示意图见图 11.2.4-1。

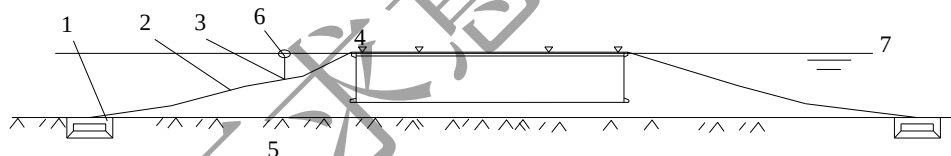


1- 锚块；2-锚缆；3-卡环；4-系缆柱；5-海床；6-整平层；7-水面

图 11.2.4-1 管节斜拉式横移示意图

11.2.5 管节漂浮寄放时，应综合风速、波高和流速等因素核算管节受力和缆绳选型。管节受到的风力、水流力和波浪力可按现行《港口工程荷载规范》（JTS 144-1）的有关规定计算。必要时，宜通过物模试验确定。

【条文说明】在寄放区指定区域抛投锚块，将管节移至寄放区顶部，用缆绳直接将锚块和管节缆桩相连并收紧，整个寄放过程，管节始终处于漂浮状态，管节不坐底寄放示意图见图 11.2.5-1。



1-锚块；2-锚缆；3-卡环；4-系缆柱；5-海床；6-浮鼓；7-水面

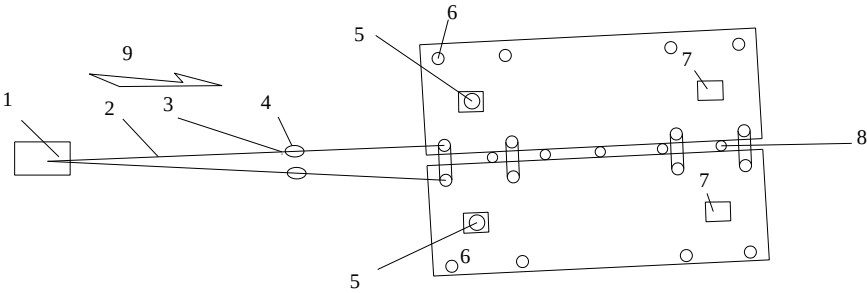
图 11.2.5-1 管节漂浮寄放示意图

11.2.6 管节漂浮寄放系泊方式可选择单点系泊和多点系泊，并应满足下列规定：

- 1 采用坞内寄放方案、寄放区面积较小时，宜采用多点系泊方案。
- 2 管节寄放区水流较大、定向往复流或受航行影响时，应优先选多点系泊方案，必要时可采取遮蔽措施降低水流流速的影响。
- 3 管节寄放区水域开阔、水深足够、不受航行影响且水流紊乱时，宜采用单点系泊方案。
- 4 系泊锚块宜采用吸附式钢筋混凝土结构重力锚块，锚块设计应能抵抗横向水流作用力。

5 寄放前，应对寄放区进行扫测清淤。

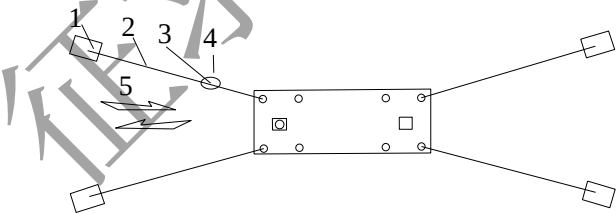
【条文说明】单点系泊可先将 2 个管节连接起来，再进行单点系泊，典型的单点系泊方案见图 11.2.6-1，单个管节寄放时，应布设至少 2 个重力锚块。单点系泊方案，此方法结构简单、成本较低。



1-锚块；2-锚缆；3-卡环；4-浮鼓；5-人孔；6-系缆柱；7-测量塔预埋件；8-橡胶靠垫；9-水流方向

图 11.2.6-1 管节单点系泊示意图

四点系泊是多点系泊中较为常见的一种方法。管节系泊时，在管节四周布设 4 个锚块，每个锚块均通过缆绳与管节顶部不同的缆桩相连，在波浪作用下，管节受缆绳力作用，其位置基本保持不变，管节四点系泊见图 11.2.6-2。



1-锚块；2-锚缆；3-卡环；4-浮鼓；5-水流方向

图 11.2.6-2 管节四点系泊示意图

单点系泊和多点系泊的优缺点对比见表 11.2.6-1。

表 11.2.6-1 管节寄放时系泊方案的优缺点比较

系泊方式	单点系泊	多点系泊
使用条件	紊乱流	定向往复流
占用水域	较大	较小
操作性	便利	一般

受力情况	简单	复杂
------	----	----

11.3 二次舾装

11.3.1 管节二次舾装应考虑舾装作业条件、舾装件重量等因素，可采用起重船法或塔吊法。

【条文说明】管节二次舾装主要包括测量（控制）塔、人孔井以及导向与拉合装置安装，压载水系统调试、测量系统安装与标定、轴线调整系统、沉放驳连接与调试等，根据船机设备的不同，管节二次舾装主要的方案有起重船法和塔吊法。起重船法和塔吊法的优缺点对比分析如表 11.3.1-1 的规定。

表 11.3.1-1 起重船法和塔吊法优缺点对比表

舾装位置	起重船法	塔吊法
机械位置	舾装管节附近	专门的吊机轨道上
起重能力	较大	较小，舾装件质量较大时需分段吊装
锚泊	需要，水域较小时锚泊复杂	不需要
操作性	灵活，但水域面积较小时操作性较差	灵活

11.3.2 管节二次舾装可选择在寄放坞内或坞外寄放区，应考虑口门宽度、水文条件、安装工效、寄放位置等因素比选确定。

11.3.3 沉放驳安装应符合下列规定：

- 1 管节采用跨越管节布置驳船吊沉沉放时，可采用绞车、拖轮等辅助拖曳设备进行安装。当沉放驳具有自航能力时，可自航至管节吊点位置进行安装。
- 2 管节采用管节两侧布置驳船吊沉沉放时，沉放驳宜采用起重船或具备吊装能力的驳船进行辅助安装，安装区域应能满足施工船的作业要求。
- 3 沉放驳安装前，应进行管节整体稳定性分析，确定沉放驳安装对管节稳性、干舷的影响。

11.3.4 测量塔和人孔安装应符合下列规定：

- 1 安装前应对测量塔和人孔的安装变形进行复核。
- 2 测量塔宜分节段安装。

3 测量塔同一高度法兰连接端面平面度公差应不大于 5mm，验收标准应符合《钢结构高强度螺栓连接的设计施工及验收规程》（JGJ82）的相关规定。

4 测量塔安装完成后应进行标定。

5 人孔井宜在顶部测量塔内设置，可采用圆形钢筒并内设爬梯。

6 人孔井与管节连接处应满足沉放深度条件下的防渗要求。

【条文说明】测量塔宜按空间体系进行结构整体分析，按浮运、沉放工况分别进行计算，塔顶水平变形不宜大于 15mm。同时还应根据防台风需求进行承载力验算。

先用锚栓初步定位，待其稳定后再对锚栓施加预紧力，并进行下一节段测量（控制）塔安装。

11.3.5 导向杆和拉合装置安装应符合下列规定：

1 导向杆、导向架装置安装前，应根据已沉管节的轴线偏移量进行轴线调整。安装时，导向杆、导向架装置的中线应与预埋件中心轴线对准。

2 拉合装置安装完毕后，应进行调试。

【条文说明】拉合装置安装应在管节浮运到位后进行安装，若不影响拖航，也可以提前安装。

3 导向杆及导向托架安装时，横向定位允许偏差应为 $\pm 10\text{mm}$ 。

11.3.6 测量设备安装应符合下列规定：

1 全站仪棱镜和 GPS 天线应安装在测量塔顶部。

2 姿态仪应平行于管节纵向轴线，宜安装在管节底板顶面。

3 声呐换能器应安装在管节对接端顶面。

4 倾斜仪宜固定在管节中隔墙上。

5 测量设备完成后应进行标定后再接入测量控制系统。

【条文说明】姿态仪可视其仪器防水性能安装在管节内部或管节顶面，在管内安装时，宜安装在底板且平行于轴线；在管外安装时，宜在顶面且平行于轴线，应做好防水处理。

管节安装时，声呐换能器分别安装在已沉管节和待沉管节的对接端。下一管节安装前，声呐换能器一般在水下安装。

11.3.7 电缆安装应符合下列规定：

1 管节舾装完成后，应在舾装区将控制系统线路与其连接。宜采用柔性电缆，并通过沉放驳固定卷筒进行收放。

2 控制系统电缆穿越钢封门时，应根据开洞处水压力情况采取合理的防渗水措施或者水下接头。

11.3.8 管顶舾装件及预埋件安装应符合下列规定：

1 管顶舾装件及预埋件均应采取防腐措施，涂层的最小厚度应符合表 11.3.8-1 的规定。

表 11.3.8-1 临时舾装件钢结构外露表面涂层最小厚度

序号	构件名称	防腐措施	厚度（ μm ）
1	管顶舾装件及预埋件	富锌漆（底漆）	75
		环氧云铁涂料（中间漆）	250
		厚浆型环氧漆（面漆）	125
2	管顶舾装件紧固件	锌基铬酸盐涂层	6
		抗碱封闭涂层	10

2 管顶舾装件及预埋件允许偏差应符合表 11.2.8-2 的规定。

表 11.2.8-2 管顶舾装设备预埋件允许偏差表

序号	主控项目	允许偏差（mm）
1	舾装预埋板螺栓孔和连接板螺栓孔之间的相对位置	± 1
2	拉合台座水平位置	± 10
3	导向架	横向： ± 10 纵向： ± 20

4	导向杆	横向: ± 10 纵向: ± 20
5	其他预埋件	± 20

11.4 浮运

11.4.1 管节坞内起浮控制应符合下列规定:

- 1 管节起浮前应完成系泊, 坞内水位应达到起浮水位。
- 2 管节压载水箱排水应均衡进行。
- 3 管节起浮过程应对管节的位置进行全程监测。
- 4 管节起浮后, 应对管节的干舷进行测量, 同时记录管内水箱的积水以及测定管节起浮区域的水重度。

11.4.2 管节浮运准备工作应符合下列规定:

- 1 浮运前, 应采取措施实时获得管节位置、受力以及气象水文等监测参数。
- 2 管节干舷值和水平状态应满足浮运稳定性要求, 宜采用压载方式调节。
- 3 水文条件特殊时, 应确定管节浮运的最小制动距离和最小制动时间。宜通过物理模型试验或原型演练确定, 试验应综合考虑制动力、水深条件, 浪流参数等的影响。
- 4 管节浮运前, 应对管节浮态稳性以及拖带受力进行复核计算。
- 5 管节浮运作业开始前应准备备用拖曳缆索。

【条文说明】管节浮运过程中可能遭遇突发大风、畸形波等难以预知的状况, 造成缆绳力远大于计算值, 一旦主拖曳缆索在浮运期间发生损坏, 应立即停止浮运作业, 并更换缆索。

11.4.3 管节浮运速度应根据浮运船机功率和船机操作性综合确定, 宜取 $0.5\text{m/s} \sim 2.0\text{m/s}$ 。采用岸控绞车进行浮运时, 浮运速度不宜大于 0.2m/s 。

【条文说明】本条依据我国海上沉箱等的拖航经验和管节数模分析结果确定, 当管节拖航速度小于 0.5m/s 时, 船机设备的操控非常困难。水阻力与管节在水中的相

对速度的平方成正比，当拖航速度过大时，拖轮功率急剧提高，因此结合我国海上拖航经验，综合确定管节拖能速度不宜大于 2.0m/s。

11.4.4 管节浮运转弯控制应符合下列规定。

- 1 浮运转弯水流速度不宜大于 0.5m/s。
- 2 应采取措施实时监控管节位置，保证转弯时管节控制在航道内，防止管节偏航出现搁浅和碰撞。
- 3 转弯半径应根据拖轮性能和航道情况综合确定。
- 4 转弯时，应加强管节姿态监控，防止管节倾覆。

11.4.5 管节浮运控制指标应符合表 11.4.5-1 的规定：

表 11.4.5-1 管节浮运控制指标

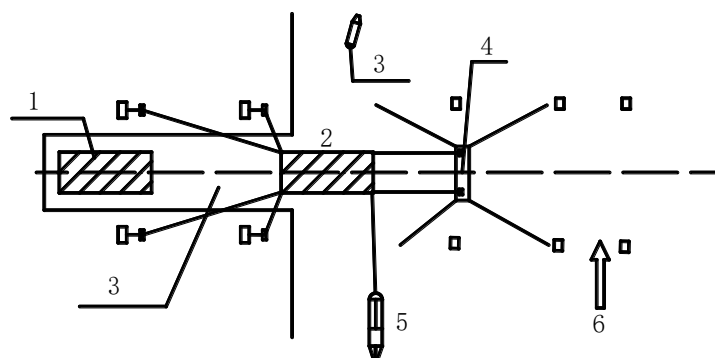
序号	项目	允许偏差	检查数量	测点	检测方法
1	横倾	绕其形心横向摆角 $\leq 2^\circ$	逐管节检查	2	姿态仪
2	纵倾	纵向倾角 $\leq 1^\circ$	逐管节检查	2	姿态仪
3	干舷高度	内河：50mm~150mm 外海：150mm~300mm	管节 4 角点	4	直尺、水准仪
4	航行轨迹	浮运航道范围并满足设计规定	/	/	GPS

【条文说明】管节浮运干舷高度的选择影响管节的整体稳定性。根据以往的工程经验，仅在内河中浮运时，管节干舷值可取 50mm~150mm；外海环境下浮运时，管节干舷高度可取 150mm~500mm。当管节干舷过高时，压载水的重量要求更大，造成施工的不经济；干舷过低时，则由于波浪或水流作用造成管节倾覆，或由于水体重度发生变化造成管节沉没。如洲头咀沉管隧道和南昌红谷隧道等内河沉管隧道管节浮运干舷约 150mm，港珠澳沉管管节浮运干舷值 200~300mm。

11.4.6 管节出坞应符合下列规定：

- 1 宜采用岸控绞车进行管节浮运；绞车不能设置在岸上时，可将绞车置于锚泊的方驳上。
- 2 应预备足够马力的拖轮作为应急备用。
- 3 当坞口较狭窄时，应在坞墩设置防撞措施且应降慢绞拖速度。

【条文说明】管节出坞工艺布置可参照图 11.4.6-1 所示：



1、2-管节；3-警戒船；4-定位方驳；5-稳定拖轮；6-水流方向

图 11.4.6-1 管节绞拖直接定位安装施工示意图

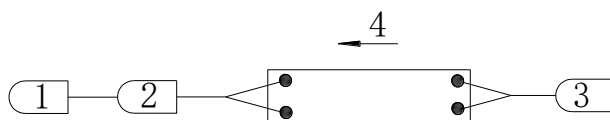
11.4.7 管节出坞后，应根据浮运距离和水域通行条件采用拖航或绞移。

1 预制干坞临近寄放区和安装区时，宜采用岸控绞车；横向水流速度较大时，宜采用拖轮侧向辅助方法抵抗横向水流力。

2 浮运距离较长时应采用拖航方式或专用安装船浮运进行管节水上运输，拖航过程中宜采用绞车拖运方式穿越通航空间受限桥梁。

11.4.8 拖航浮运时，可采用三拖轮浮运、四拖轮浮运和五拖轮浮运等，并应符合下列规定：

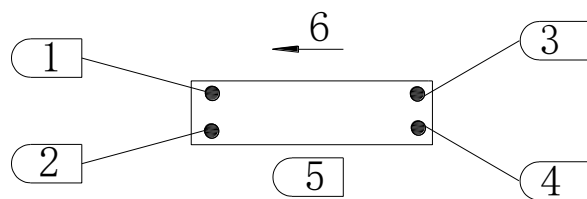
1 管节前进方向与水流方向基本一致或管节承受的横向水流力较小时，可采用三拖轮浮运方案，如图 11.4.8-1 所示。



1、2-拖航拖轮；3-拖航制动拖轮；4-管节前进方向

图 11.4.8-1 三拖轮浮运示意图

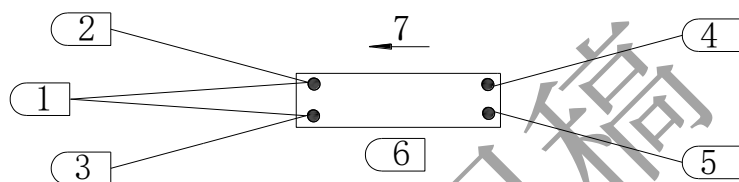
2 管节承受横向水流较大时，可采用四拖轮浮运方案，如图 11.8.4-2 所示。



1、2-拖航拖轮；3、4-拖航制动拖轮；5-备用拖轮；6-管节前进方向

图 11.4.8-2 管节四拖轮浮运示意图

3 当管节基槽浮运距离较长且横向水流力较大，或经计算采用四拖轮方案所需拖轮功率较大时，宜采用五拖轮浮运方案，如图 11.4.8-3 所示：



1-主拖轮；2、3-辅助拖轮；4、5-制动拖轮；6-备用拖轮；7-管节前进方向

图 11.4.8-3 管节五拖轮浮运示意图

4 拖航船舶的功率无法抵抗全部的拖航阻力时，或需要额外提供侧向拖带力时，可另外增设若干辅助拖轮，侧向辅助顶推管节前进。

11.4.9 采用专用安装船浮运管节时，应提前考虑管节宽度、坞口宽度与安装船型宽的匹配性。

11.4.10 管节浮运阻力分析应满足下列规定：

- 1 浮运阻力宜考虑水阻力、波浪增阻和风阻力等因素。
- 2 施工作业海况复杂时，管节浮运阻力宜通过管节浮运专项物理模型试验确定。
- 3 管节浮运水阻力计算可参考附录 B.1。

【条文说明】对于施工环境复杂的沉管隧道，首先可以根据选定的浮运工艺、现场条件进行管节浮运的数值模拟，分析浮运过程中管节的浮运阻力；结合管节浮运物理模型试验，试验工况宜考虑管节浮运方向与水流的夹角、涨落潮导致的水深变化，以确定最不利工况下的水阻力系数等关键参数。

在管节浮运前,尚应进行模拟试拖,以验证浮运工艺的可靠性、船机设备的适应性及浮运过程的操纵性。根据试拖结果,对管节浮运方案和工艺参数进行优化调整。

11.4.11 管节浮运稳性分析应满足下列要求:

1 管节以水压载时,稳性分析应考虑压载水的影响,并应采取措施保证各压载水舱互不相通。

2 管节定倾高度不应小于 0.3m;管节远程浮运时,以水压载的定倾高度不应小于 0.4m。管节定倾高度的计算可参考附录 B.2。

2 海上拖航时,管节浮运稳性尚应满足中国船级社《海上拖航指南》(GD 02)的相关要求。

3 曲线管节、带斜度管节等异形管节应采取压载措施控制纵向与横向平衡。

4 管节稳性不符合要求时,可采用助浮设备等措施。

11.4.12 管节浮运沿线水域复杂时,应分析管节启动、制动的所需距离和时长,以及管节转弯半径等操纵性工艺参数。

11.4.13 浮运时应监测波浪、水流以及拖航阻力、管节缆绳受力情况。

11.4.14 缆绳、卸扣及眼板配置应符合下列规定:

1 采用岸控绞车进行浮运时,缆绳宜采用钢丝绳;采用拖轮进行管节浮运时,缆绳宜采用尼龙缆。

2 拖轮浮运时,缆绳的长度应能消除螺旋桨效应,并满足最小制动距离的要求。拖带拖轮的缆绳长度不宜小于 120~150m。在内河水域受限时可取小值,其他情况应取大值。

3 缆绳直径应根据材质和最小破断荷载确定。正常情况下,缆绳承受的负荷不应超过最小破断荷载的 50%。

4 拖力点、拖力眼板和缆桩的极限负荷能力不得小于所有拖缆破断力之和的 1.3 倍,应急拖力点的强度不得小于主拖缆的破断强度。

5 所有卸扣、环及连接设备的极限负荷能力不得小于拖缆最小破断强度的 1.5

倍。

11.5 驳运

11.5.1 管节上浮船坞或上半潜驳时，应考虑潮位、流速、风速、波高等因素，可采取坐底或浮态上驳方式。

11.5.2 管节出运上驳时，应考虑浮船坞（半潜驳）甲板调平、搭接结构强度与刚度、出运系统可靠性等因素，并应符合下列规定：

1 上驳潮位选择应考虑上驳时长、浮船坞或半潜驳压载水调节能力、涨落潮周期等因素。管节上驳宜在一个涨落潮周期内完成。

2 浮态上驳时，浮船坞或半潜驳应根据潮水上涨和拖运管节的速度，调节浮船坞或半潜驳不同压载水仓压水的压载水量，控制甲板面与出运码头面齐平。

3 坐底上驳时，应根据管节重量、坐底基础承载力、压载水仓调节能力等因素，控制上驳速度、不同压载水仓的压载水量。

11.5.3 采用浮船坞或半潜驳水上运输管节时，应考虑船舶甲板刚度、管节长度、波浪、水流、风速等因素设计支撑系统。当船体变形影响管节结构安全时，应采取具有适应变形差异性能的支撑体系。

【条文说明】管节为钢筋混凝土或钢壳混凝土结构，其刚度较大，一般为半潜驳或浮船坞 3-5 倍。在外海运输时，管节与半潜驳之间因刚度差异大，容易造成两者无法协同变形，可采用高弹性、非线性的橡胶支撑支座或液压自平衡系统。

11.5.4 管节卸驳下潜水域布置应考虑与遂址距离、地质条件、船舶通航情况、风浪流条件等因素，并应符合下列规定：

1 下潜水域布置宜邻近沉管隧道位置。下潜水域尺寸应满足半潜驳下潜作业要求，富裕宽度不宜小于 1 倍船体宽度。

2 下潜区域水深应满足半潜驳下潜深度，并考虑 1m 以上安全富裕水深。半潜驳下潜深度应考虑半潜驳型深、支座高度、管节吃水深度等因素，并满足半潜驳稳定性要求。

11.5.5 管节卸驳工艺应考虑管节宽度、长度和半潜驳净宽等限制因素，可选择纵向或横向的绞移方式卸驳，并应符合下列规定：

- 1 管节卸驳时，应设置横向和纵向的缆绳控制系统，控制调节绞移速度和管节的位置，并采取措施保护 Gina 止水带。。
- 2 管节卸驳过程中，应采取措施实时监测绞移速度、管节位置等关键参数，并根据监测结果及时调整和反馈。

征求意见稿

12 管节沉放安装

12.1 一般规定

12.1.1 沉放安装过程应考虑潮位、风浪流条件、锚泊系统稳定性、工序衔接、管节距底要求等因素。

12.1.2 管节沉放前，应对水域流速、波高、波浪周期、风速和能见度进行监测，分析确定管节沉放作业窗口。管节沉放作业窗口限制条件应满足表 4.5.3 的要求。

12.1.3 沉放前，应对沉放水域的水容重进行测量。

【条文说明】管节沉放施工过程中要满足一定的抗浮安全要求，需根据水容重的变化调整水箱压载重量，确保管节达到在全部工况下均能满足一定的抗浮安全系数。

12.1.4 驳船吊沉法水下对接导向装备配置应考虑管节对接定位精度、对接时管节受力状态、施工难易度、技术成熟度及施工经验等因素。采用先铺法进行基础处理时，可采用导向梁（杆）定位装置进行定位；采用后填法时管节对接端宜采用鼻托定位、另一端宜设置临时支座和水下垂直千斤顶设备。

12.1.5 沉放前，应对先铺法的碎石垫层回淤、后填法的临时支撑的坐标和高程进行核检。

12.1.6 系泊系统应根据试验和计算配置，考虑作业工况下可能遭遇的波浪和水流。当波浪和水流对管节的作用较大时，宜采用拖轮顶推方式等辅助措施增加管节稳定性。

12.1.7 管节沉放，应根据沉放深度分步下放，制定各步下放的控制参数，并通过管节水下姿态监测系统进行监测。

12.1.8 拉合对接应对称、逐级、缓慢进行，以保证 GINA 止水带均匀压缩且不受损伤。

12.1.9 管节沉放后，应对 GINA 止水带的压缩量及水密效果进行检查。

12.1.10 管节对接完成后，应进行贯通测量并检测沉放管节的轴线偏差。不满足时，应采取措施调整管节尾部标高和管节横倾。

12.1.11 当施工水域处于地铁、管线等保护范围内时，系泊锚块的设置应避开保护范围。

12.2 系泊定位

12.2.1 系泊系统设计应符合下列规定：

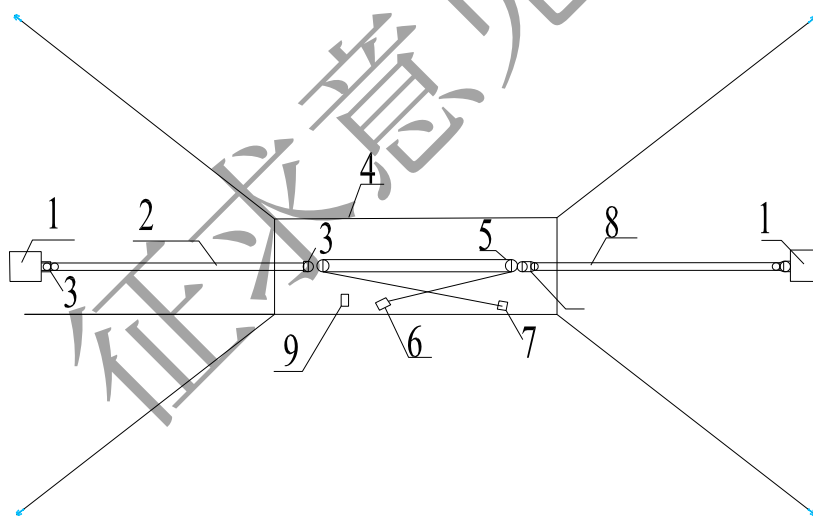
- 1 系泊系统设计应根据物理模型试验或计算分析确定。
- 2 管节所受水流力可按照《港口工程载荷规范》有关规定进行计算。波浪力的计算可采用水动力分析模型进行计算。
- 3 管节安装时，系泊缆拉力应考虑承受水流力和波浪影响、锚缆仰角因素。
- 4 锚体可采用重力式锚块、VLA 锚或海军大抓力锚。条件允许时，宜选用重力

式锚块。施工区域的土层分布较好时，可采用海军大抓力锚。锚体位置垫层不宜开挖或抛锚位置水深较大时，宜采用海军大抓力锚。

12.2.2 重力式锚体的起抛锚宜采用起重船进行，VLA 锚、海军大抓力锚宜采用三用拖轮。

12.2.3 抛锚应在管节水上运输到隧址前完成，并对系泊锚进行试拉。

【条文说明】试拉装置工作原理：工作母船系泊定位在两锚之间，母船上布置有绞车，绞车通过滑轮组与锚连接。启动绞车对锚进行牵拉，待测力卸扣读数达到锚设计锚泊力时，停止牵拉并保持静止，借助滑轮组的相对位移判断锚的位移情况，以此检验锚泊力是否满足要求。测量人员利用 GPS 接收机精确定位系泊锚点位置；起锚艇到达预设位置后进行抛锚作业；抛锚作业完成后进行系泊前拖轮预拉，给予系泊锚一定的预拉力。管节运输至系泊区等待通缆，根据系泊带缆顺序依次取缆。试拉装置示意如图 12.2.3-1 所示。



1-锚块；2-连接钢丝绳；3-卸扣；4-工程驳船；5-滑车组；6-绞车；7-眼板；8-连接钢丝绳；9-发电机

图 12.2.3-1 锚试拉装置示意图

12.2.4 系泊系统系缆布置应符合下列规定：

- 1 管节浮运到位后，应根据系泊方案连接系泊缆绳，形成管节系泊定位锚系。
- 2 抛锚位置应考虑锚块形式、缆绳与管节轴线角度等因素。
- 3 系缆选型应进行受力校核，确保具备足够的抗拉能力。

【条文说明】各锚缆围绕管节轴线对称布设,使各缆绳角度能够稳定控制安装船及管节平面位置。

重力式锚块的稳定性较好,管节沉放过程中,锚体不会移动,可以采用变倍率滑车组减小管节调整系统的荷载和调整绞车的大小,调整缆通过导向滑轮与沉放驳的绞车相连。

采用重力式锚体系泊方案时,锚块抗拉力应考虑锚块被动土压力、锚块自重与河床产生的摩擦力、泥土对锚块侧向摩擦力、锚块内腔土抗剪力等因素。锚块抗拉力校核时,可仅考虑锚块的被动土压力和锚块自重与河床产生的摩擦力。管节系泊系统布置见图 12.2.4-1。

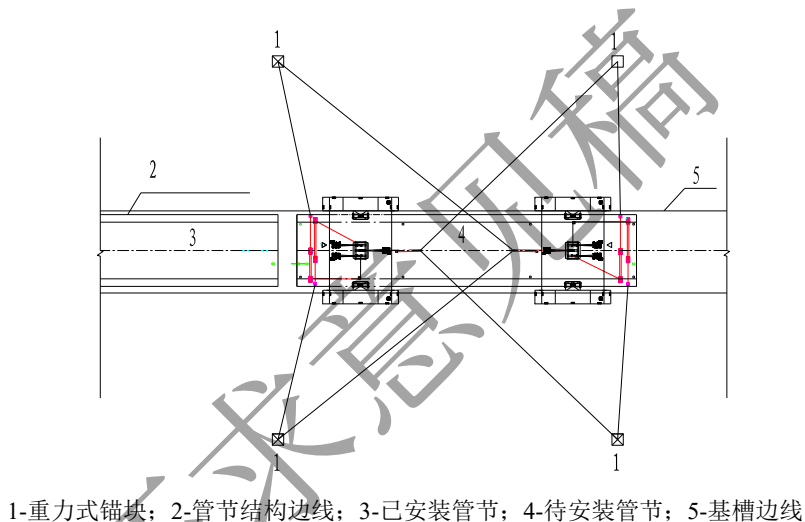
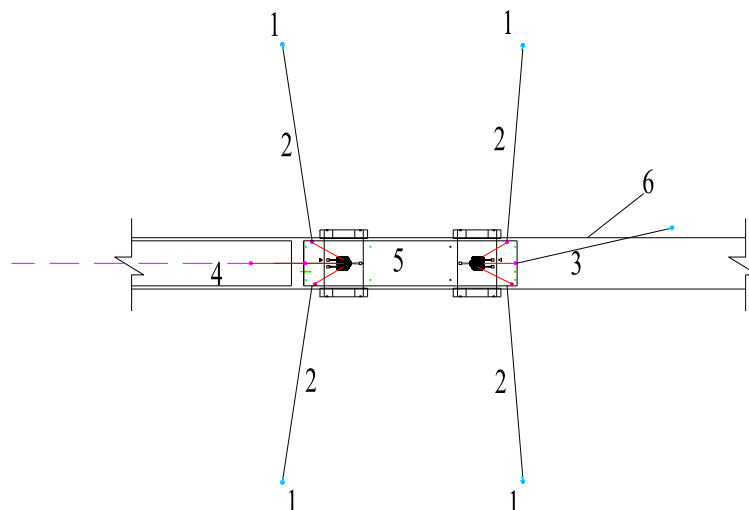


图 12.2.4-1 重力式锚块方案系泊系统布置图

由于 VLA 锚受力过程有较大的位移,因此不能采用变倍率滑车组减小管节调整系统的荷载和调整绞车的大小,调整缆通过导向滑轮与沉放驳的绞车相连。采用 VLA 锚系泊方案时,管节系泊系统布置见图 12.2.4-2 (图中沉放驳的系泊系统未给出)。海军大抓力锚的结构形式和系泊系统与 VLA 大抓力锚基本相同,其不同之处主要在于锚的成本和系泊缆长度等。



1-大抓力锚；2-横调缆；3-纵调缆；4-已安装管节；5-待安装管节；6-基槽边线

图 12.2.4-2 VLA 锚块或海军大抓力锚方案系泊系统布置图

12.2.5 管节位置应根据实时动态差分卫星定位结果进行调节。待安管节对接端与已安装管节尾部距离约 5m 时，应调整管节轴线位置，使其与设计轴线基本重合。

12.3 压载沉放

12.3.1 管节沉放前，应拆除 GINA 止水带保护罩，并检查 GINA 止水带完整性，清除污染物及异物。应对已安装管节对接端的钢端壳进行检查，并清理异物。

12.3.2 沉放安装应检查确保管节拉合控制系统、管节对接导向系统、管节水力压接系统、管节轴线系统等正常运行。

12.3.3 沉放压载水控制应符合下列规定：

1 压载水箱的容量应满足沉放过程及就位后抗浮要求，安装就位后管节负浮力宜为 5%~6%管节自重。

2 压载水加载过程中，应向水箱内均匀、对称逐级加水。

3 压载水系统宜采用远程集中操控的方式。

【条文说明】压载水箱的容量设计主要考虑以下几个方面：

(1) 开始沉放时，消除管节的干舷高度所需的重量；

(2) 沉放过程中，克服表层和底层水密度差异所需的重量；

(3) 沉放完成后，为维持管节的性，额外增加的重量。

12.3.4 管节沉放施工船机设备选型应考虑沉放区的风浪流条件、管节几何尺寸及重量、水域面积、水深、水密度影响等因素。

12.3.5 沉放驳设计应考虑隧道施工水域对驳船航区属性的要求、沉放驳调遣线路、沉放最大负浮力、管节尺度及吊点布置等因素。

【条文说明】目前管节沉放的主流方法是浮箱式驳船吊沉法和双驳船、双壳体驳船吊沉法，其中浮箱式驳船吊沉法采用浮驳或大浮箱进行管节沉放；起重船吊沉法和四方驳船吊沉的应用相对较少。对于浮箱式驳船吊沉法，由于管节锚泊性能要求较高，因此其通常和测量塔一起应用，调整缆的液压绞车位于测量塔的顶部。对于双驳抬吊或双壳体船法，由于船组稳定性较高，管节的锚泊性能要求较低，故调整缆的液压绞车可以置于沉放驳上，从而降低测量塔的重量或取消测量塔采用其它方法进行管节定位测量。经综合论证后，港珠澳沉管隧道采用双壳体驳船吊沉法安装管节。

12.3.6 沉放作业应符合下列规定：

- 1 管节沉放安装过程中，应对施工区域内的航道进行封航，并在上下游设置警戒船。
- 2 管节系泊作业应保持与已安装管节端的安全距离。
- 3 系泊完成后，应及时进行替换横调缆、拆除 GINA 保护罩、检查钢封门和 GINA 止水带等准备工作。
- 4 管节绞移可通过安装驳的定位绞车往前移动管节就位，管节与垫层间距不宜小于 1m。
- 5 管节就位后，宜利用吊缆绞车调整管节纵坡。
- 6 导向杆入座过程中应进行水下监视。

【条文说明】通过水下摄像头实时监测管节首端姿态，潜水员监测导向杆进入导向托架过程，如有不正位或异常情况及时通报。

管节对接沉放过程可参见 12.3.5-1。

管节系泊，距离对接端 50m 时：安装驳连接安装锚块，并进行准备工作，如，替换横调缆，拆除 GINA 保护罩，检查钢封门和 GINA 止水带，管节距底 $>0.6\text{m}$ ，作业时间 3h。

管节就位时：利用船舶定位绞车绞移管节至距离对接端 10m 处。解除卡槽限位，利用吊缆绞车调整管节纵坡，管节与垫层间距 $\geq 1\text{m}$ ，作业时间 2h。

收紧管节纵调缆和横调缆，施加 10t 预紧力，保证管节和安装驳相对位置的稳定。

管节绞移（10m $\rightarrow$ 2m）时：绞移安装驳，直至管节端头距离对接端 2m，管节距底 $\geq 1\text{m}$ （此时导向杆尚未进入导向架上方）；操作安装驳系泊绞车，测量，使管节相对位置偏离 $<20\text{cm}$ ，为导向杆进入导向架做准备。

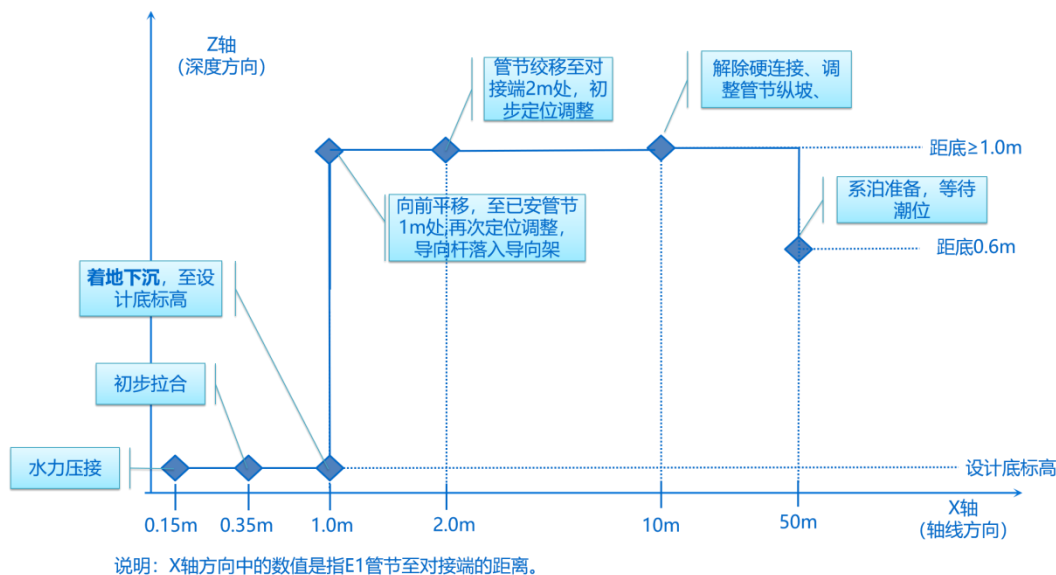
以上操作作业时间 0.5h。

管节绞移（2m $\rightarrow$ 1m）时：绞移管节至距离对接端 1m，测量管节实际位置，通过安装驳系泊缆调整整体位置，确保管节实际位置与本阶段的理论位置偏差 $<10\text{cm}$ （参照深中通道项目工程实践）；安装驳定位绞车持力锁死，保持安装船位置固定，通过纵调缆和横调缆绞车，精调管节位置，调整管节上导向杆贴近导向架一侧，释放吊缆，使导向杆落入导向架内；管节由开始的距底 1m，下落至坐底状态，每下落 0.2m 进行管节测量、调位。

以上操作作业时间 1.5h。

千斤顶拉合（1m $\rightarrow$ 0.35m）时：拉合前再次检查 GINA 止水带，确保止水带附近无杂物；利用 2 个 400t 拉合千斤顶拉合，将管节从距离对接端 1m 处拉合至 GINA 止水带初步压缩，整个行程约 0.65m。安装驳持续提供吊力，减小摩擦力，确保拉合千斤顶功效 $<50\%$ 的额定功效。拉合期间，在 GINA 止水带鼻尖初步接触钢端壳时，对管节进行精确微调。

以上操作作业时间 2h。



12.3.5-1 管节沉放对接示意图

12.3.7 管节沉放控制应考虑抗浮系数、下沉速度、纵向坡度和轴线偏差等因素，并符合下列规定：

- 1 管节沉放时抗浮系数宜取 1.01~1.02。
- 2 管节宜距对接端 5m 位置处开始下沉，下沉速度不大于 0.5m/min。
- 3 管节沉放过程中应实时校正管节位置，
- 4 管节沉放期间宜每下沉 5m 驻停一次，驻停时长不少于 10min，监测沉放驳吃水、封门应力应变、管节姿态、管内视频监控及水流情况。
- 5 管底距设计高程 0.5m~1m 时，应调整管节纵向坡度和轴线偏差，轴线偏差宜大于 30cm。
- 6 管底距垫层小于 2m 时，下沉速度宜调整为 0.1m/min 左右。
- 7 管底距垫层 0.5m 时，应控制管节首尾轴线偏差小于 5cm，管节与对接端间距偏差小于 5cm。
- 8 管节应下沉至指定深度后向对接端进行平移，平移速度不应大于 0.2m/min。
- 9 采用鼻式托座定位时，应采取措施调整上鼻托与下鼻托轴线。
- 10 缆绳下放速度宜通过试验确定，不宜大于 0.3m/min。

11 采用导向定位梁（杆）时，应在待沉放管节顶面预先设置两根导向定位梁，在已沉放好的管节顶面设置导向架，以保证定位准确，对接精度能满足要求。

12 绞移管节至对接端约 2m 时，缆绳收放速度宜小于 1m/min；至对接端 0.8m 时，缆绳收放速度宜小于 1m/min。

12.3.8 管节着床后应进行水下检查，确认拉合装置的拉合情况，并测量管节间的距离。

【条文说明】控制管节着床速度和姿态，通过安装船吃水及吊缆缆力变化，判断管节着床。

12.4 拉合对接

12.4.1 拉合对接前，应清除 GINA 止水带四周、对接端端面的杂物，检查拉合千斤顶等设备的工作性能。

【条文说明】拉合千斤顶搭接过程中，潜水员水下确认搭接情况，并持续检查对接端钢端壳有无异物。确认搭接完成后及对接端无异物后，潜水撤离对接及拉合区域准备拉合。

12.4.2 管节初步拉合对接速度不宜大于 70mm/min，平移至 GINA 止水带的鼻尖接触到已安装管节的钢端壳为止。

12.4.3 当 GINA 止水带刚接触对接段钢端壳面板时，应精确复核并调整对接端偏差，再通过拉合千斤顶压缩 GINA 止水带，使 GINA 止水带实现初步压缩，实现初步止水。

【条文说明】结合以往经验来看，为确保止水效果，GINA 止水带初步压缩量一般控制在 20mm~40mm 之间。

12.4.4 管节拉合力应根据管节着床压力、摩擦系数、安装坡度及 GINA 鼻尖压缩反力等因素综合确定。

12.4.5 拉合系统应具备距离同步和拉力同步功能。初步拉合压接应采用距离同步模式，拉合过程中应实时测量管节姿态、管节吊力等参数。

12.5 水力压接

12.5.1 水力压接前，应复核拉合装置测量数据，并由潜水员检查确认 GINA 止水带贴合钢端壳面板。

12.5.2 水力压接控制应符合下列规定：

1 应监测结合腔内水压力，适时打开安设在已安装管节端封墙顶部的进气阀。当水位降低到接近水箱里的水位时，应启动排水泵助排。

2 水力压接过程中，GINA 止水带的压缩情况可安排潜水员在水下测量两管节钢端壳之间距离进行判断。

3 结合腔内水体应受控制地排出，防止 GINA 止水带侧翻。

4 水力压接过程中，拉合系统应采取拉力同步模式辅助完成 GINA 止水带均匀压缩

5 水力压接过程中，应实时测量管节姿态、管节吊力等参数。

12.5.3 结合腔完成排水完成后，应确认 GINA 止水带压缩量满足设计要求。管节水力压接完成后，应复核管节轴线、姿态、位置等参数。如安装误差满足设计要求，应及时增加压载水使管节满足设计抗浮要求，并进行贯通测量；不满足设计要求时，应进行轴线调整。

【条文说明】管节水力压接完成后应及时对测控数据进行复核，潜水员进行水下探摸检查，确认对接情况，测量两管节间错牙、端面间距等数据并与拉合系统、测控系统数据复核。如果偏离设计轴线过多，则需要向端封墙间结合腔内灌水，调节管节位置后重新进行水力压接。

确认管节轴线符合设计要求后应立即对管节施加压载水。管节压载量符合设计要求后方可打开人孔门进入管内，检查管内情况并进行贯通测量。

12.5.4 沉管隧道基础采用后填法施工时，应逐步放松管节上的吊力控制千斤顶均衡支撑，并实时检测千斤顶顶力变化。

【条文说明】逐步放松管节上的吊力使整个管节受力由前端鼻托（前端垂直千斤顶）和后端垂直千斤顶均衡支撑，加载开始到基础垫层处理工作结束期间，应实时检测垂直千斤顶的顶力变化，并应保持垂直千斤顶受力均匀。

12.6 轴线调整

12.6.1 管节水力压接完成后,对接精度超出管节允许偏差时,应进行管节轴线调整。

【条文说明】管节安装轴线控制要求推荐为相邻管节端面横向相对偏差 $\leq 50\text{mm}$ 、相邻管节端面竖向相对偏差 $\leq 50\text{mm}$ 、管节轴线与设计轴线间横向绝对偏差 $\leq 100\text{mm}$ 、管节轴线与设计轴线间竖向绝对偏差在 $-50\text{mm}\sim+70\text{mm}$ 之间。

轴线调整过程中,可通过沉放驳船的吊缆力减小管节着床压力,减小管节与垫层的摩擦力。

12.6.2 轴线调整宜采用千斤顶进行顶头摆尾调整。

【条文说明】管节轴线调整是确保管节安装质量的重要一环,国内一般采用顶头摆尾法;韩国釜山-巨济连接线沉管隧道项目,也采用过外部定位系统(External Positioning System, EPS)。

(1) 顶头摆尾法

顶头摆尾法时在接头结合腔的超限一侧设置顶推千斤顶,顶推力置换GINA橡胶止水带所承受的部分水压力,止水带卸荷反弹,管节接头间的间隙增大,通过调整千斤顶的顶推力实现管节轴线调整。顶头摆尾法轴线调整示意图12.6.2-2。

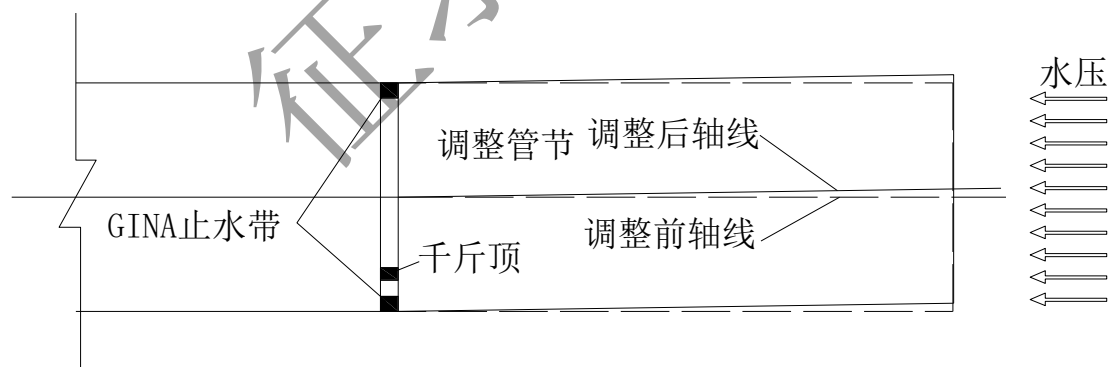


图 12.6.2-1 顶头摆尾法轴线调整示意图

(2) 外部定位系统

管外提升与定位系统由两个门形框架组成,一个安装在管节对接端,一个安装在管节尾端。框架与管节上的起重耳、吊索滑轮相连接,即可通过液压升降千斤顶在基础上提升管节,并通过侧向千斤顶调整管节轴线,使其与上节管节尾端的连接到

位。管节调整系统的操作可以在沉放驳上遥控实施，见图 12.6.2-1。

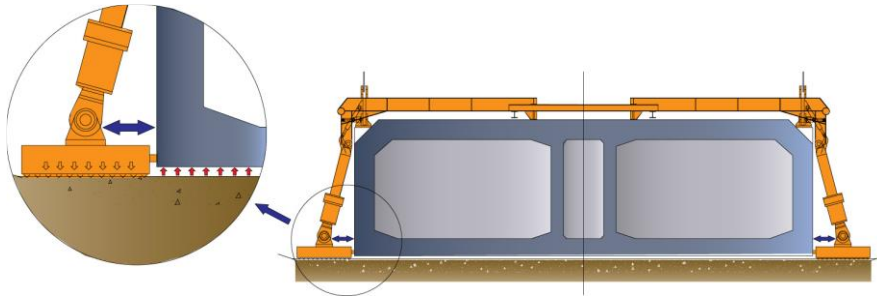


图 12.6.2-2 管节轴线调整系统示意图

12.6.3 管节安装偏差满足设计要求后，应向压载水箱内灌水均匀压载，压载抗浮系数达到设计要求后解除管节系泊锚缆。

征求意见稿

13 最终接头

13.1 一般规定

13.1.1 最终接头施工作业窗口应根据施工海域风、浪、流等水文气象条件选择。

【条文说明】各施工步骤的作业条件选择可按照表 13.1.1-1 执行。

表 13.1.1-1 安装窗口条件表

序号	作业条件	流速 (m/s)	波高 (m)	能见度 (m)	风力	航道限速 (kn)
1	船舶系泊	≤ 0.6	≤ 0.6	≥ 1000	≤ 5	--
2	起吊作业	≤ 0.6	≤ 0.6	≥ 1000	≤ 5	10
3	安装作业	≤ 0.5	≤ 0.6	≥ 1000	≤ 5	10
4	潜水作业	≤ 0.5	≤ 0.6	≥ 1000	≤ 5	10

13.1.2 最终接头施工工艺应根据最终接头类型、结构形式、水文、水深、回淤、接头位置等因素确定。

13.2 岸上最终接头

13.2.1 岸上现浇接头施工应按照《沉管法隧道施工与质量验收规范》（GB 51201）有关规定执行。

13.2.2 岸上顶推式接头施工应符合下列规定：

1 干作业施工时，宜先制作外部套筒，然后制作顶进节段，接着将顶进节段推入外部套筒内，安装止水结构后进行场地灌水。

2 应做好干坞二次止水和管节止推的准备。

【条文说明】大连湾海底隧道采用顶推式最终接头，采用钢筋混凝土结构。顶推节段为与相邻沉管管节相同断面的小型管节，宽 34.03m，高 10.05m，长 5.75m。管节对接端采用与标准段沉管隧道管节接头相同的 GINA 止水带与 OMEGA 止水带组成的防水系统。外部套筒是沉管隧道衔接段管节对接端的扩大段，外部套筒最宽处 36.23m，高 12.70m，与顶进节段咬长为 2.95 m。

施工时，在干作业条件下，先浇筑明挖隧道段外部套筒结构，再独立进行顶推节

段的预制工作；然后将顶进节段推入外部套筒内，安装可伸缩止水带和可注浆止水带组成的双道临时防水系统，然后场地灌水；对接段管节沉放完成后，利用推出装置将设置在扩大段内的顶推节段推出，并与沉管隧道端完成水力压接。最后，在可伸缩止水带、可注浆止水带组成的临时防水系统保护下，在隧道内部浇筑后浇带混凝土，完成纵向永久锁定构造和永久止水系统。

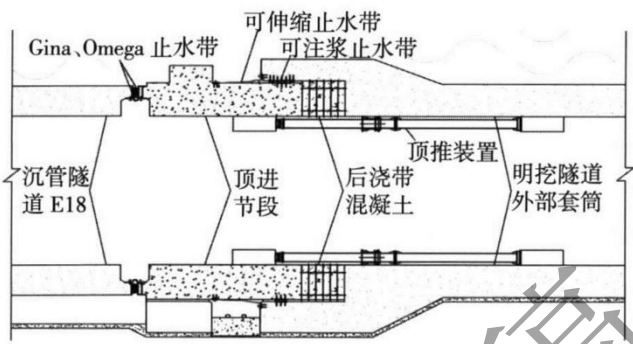


图 12.2.2-1 大连湾沉管隧道最终接头纵剖面构造图

13.3 水下最终接头

13.3.1 V 型接头施工应符合下列规定：

- 1 最终接头预制时，宜采用自动、半自动气割下料。
- 2 起吊和运输方案应经研究分析确定，并应选择对最终接头变形影响最小的方案。
- 3 最终接头安装前相关工作指标应经试验调试确定。
- 4 最终接头安装前应进行结构水密性能和顶推系统的检测试验。
- 5 应设置姿态监测系统辅助安装最终接头。
- 6 可采用沉放驳和起重船辅助最终接头沉放。起吊和旋转过程中，应通过调整起重船压舱水保持甲板面保持基本水平状态。
- 7 顶推时应采取措施确保节奏同步和液压平衡。

【条文说明】最终接头制作可参照国家及行业现行标准主要包括《低合金高强度结构钢》（GB/T1591）、《碳素结构钢和低合金钢热轧厚钢板和钢带》（GB/T3274）、《碳钢焊条非合金钢及细晶粒钢焊条》（GB/T5117）、《气体保护电弧焊用碳钢、低合

金钢焊丝》(GB/T8110)、《埋弧焊用碳钢焊丝和焊剂》(GB/T5293)、《钢结构工程施工规范》(GB 50755)等。

吊装和运输过程中,可在吊点和管内布置监测系统监测接头结构应力和变形情况。

最终接头需通过试验调试确定的工作指标包括:

- (1) 吊装船起吊、吊臂旋转、下沉、压载水工效。
- (2) 现场测试脐带缆系统。
- (3) 测试最终接头测控系统。
- (4) 现场实测入水后的最终接头姿态,现场通过轴套调平最终接头。
- (5) 演练现场作业流程,确定作业人员位置和工作职责,增加操作熟练性。
- (6) 演练作业期间的指挥系统、口令的传递和报告流程。

GINA 鼻尖初步压缩且压力表的值上升至 1.01~1.02 倍时,需停止顶推,开始排水;排水压力表值降为初始值时关闭阀门并停止排水,继续顶推,重复此步骤,使 GINA 鼻尖进一步压缩。顶压排水完成后,逐级开启上部管系阀门,接合腔内水通过管系排至管节水箱内,使 GINA 止水带进一步压缩。

13.3.2 水下顶推式最终接头施工应符合下列规定:

- 1 推出距离宜设置为 1.5m~2.2m。
- 2 GINA 压缩流程应考虑鼻尖压缩量、腔内水压力值、腔内排水量及预紧拉杆应力值等因素,同步监测并逐步调控排水压力表值、GINA 止水带压缩量及预紧拉杆应力值。不满足要求时应重新回灌腔内水,重新调控操作以安全实现体系转换。
- 3 最终接头宜采用伸缩止水带与膨胀止水带的双重密封止水措施,止水带应在接合腔排水开始至后浇带浇筑完成期间形成止水功能。
- 4 锁定装置安装完成后,应进行膨胀止水带加压,分级加压至设计标准值。
- 5 后浇带施工完成且强度达到 80%后,可进行止水带注浆。

13.3.3 水下现浇接头施工除应满足《沉管法隧道施工与质量验收规范》(GB 51201)有关规定外, 并应符合下列规定:

- 1 支撑纵梁的端板和支撑座之间的空隙应采用无收缩高强度锚固剂进行塞填。
- 2 接头两端管节端面混凝土应凿毛, 凿毛深度宜为 0.5cm~1.0cm。
- 3 接头纵向钢筋宜通过预埋在相邻管节端面的钢筋接驳器进行连接。
- 4 接头模板宜利用预埋在接头相邻管节端部的锥形螺母进行安装。
- 5 中隔墙模板宜开设振捣孔。
- 6 最终接头顶板浇筑前应预埋混凝土泵送管及注浆管。
- 7 顶板及上侧墙浇筑用泵送管宜使用闸阀装置。
- 8 顶板部分应采用自密实混凝土进行浇筑。
- 9 顶板注浆材料宜采用环氧砂浆。
- 10 浇筑期间应监测模板、钢筋、预留孔洞、预埋件等变形或堵塞情况, 发现问题应立即停止作业, 并应在已浇筑的混凝土初凝前修整完毕。

【条文说明】锚固剂塞填要求充分、均匀、密实, 无侧限抗压强度标准值须大于 20MPa。在锚固剂达到该强度后, 方可进行下一步施工。

预埋管应垂直于顶部止水板设置, 混凝土泵送管与顶部止水板之间可以预留约 30cm 距离, 预埋注浆管与顶部止水板之间可以预留约 2cm 距离。注浆管口和排气管口可间隔使用透明胶缠绕和无纺布覆盖, 以防止混凝土堵塞注浆管和排气管。

14 回填防护

14.1 一般规定

14.1.1 回填施工前应做好以下准备工作：

- 1 应提前与海事、航道、海洋、渔业、水利、港口等相关部门及航运、码头等相关单位沟通协商，并应提前办理水上施工许可证。
- 2 应制定详细的施工方案及应急预案，确保回填时管节的水平稳定和结构安全。
- 3 在水深较大、施工条件复杂的区域，应选择有代表性的地段进行现场试验，确定最佳方案。
- 4 应根据水深、波浪、地质条件和设计方案等对回填防护进行分区、分段。
- 5 应结合自然条件、材料来源、使用要求等因素确定回填施工工艺。
- 6 水上船舶施工应设置警示措施。

14.1.2 接头处回填施工前，应采取措施保护管节结构和管节接头、已安装管节的端封墙等构件。

14.1.3 回填施工除应满足《沉管法隧道施工与质量验收规范》（GB 51201）有关规定外，并应符合下列规定：

- 1 管节安装完成后应尽快回填，回填顺序、材料、范围、厚度及坡度等均应满足设计要求。
- 2 锁定回填施工应在管节沉放安装、贯通测量无误后进行，宜按照局部点锁在先、横向对称推进的原则进行。
- 3 一般回填应在锁定回填之后立即实施。
- 4 护面层回填顺序可根据水深条件及设备能力确定。
- 5 露出海床面或河床面的沉管段回填应考虑冲刷影响，并应设置两侧水下护坦。
- 6 回填材料应符合设计要求且不危害水生态。

7 各回填层顶的高程和护面块体密度应严格控制, 检验方法应满足设计要求和《水运工程质量检验标准》(JTS57) 等相关要求。

14.1.4 回填防护设备应综合考虑回填材料种类、水文气象、航道通航条件、工效、成本等因素确定, 可选用开底驳、挖掘机或装载机配合的驳船、皮带船等设备。

14.2 锁定回填

14.2.1 锁定回填应在管节对接贯通测量精度满足设计要求后尽快进行。

14.2.2 回填碎石应级配良好, 不应含有粒土块及植物等杂质, 石料饱和单轴极限抗压强度不应低于 50MPa。

14.2.3 管节两侧回填范围、厚度等均应满足设计要求, 并应对称、均匀施工。回填高差不宜超过 1m。

14.2.4 采用后填法垫层时, 锁定墩长度宜为灌沙管间距的一半, 高度宜为垫层基础以上 3m~5m, 距离管节尾部端头宜为 20m~30m, 垫层施工完成后应立即全面锁定回填。

14.2.5 回填坡脚位置与下一沉放管节端部的安全距离不宜小于 10m。

14.3 一般回填

14.3.1 一般回填材料宜采用透水性好、粒径合理、级配良好、不含粘土块及植物等杂质的中粗砂、碎石。

14.3.2 一般回填施工工艺应根据设计要求、施工能力、潮位和波浪等因素确定。

14.3.3 回填前应检查并清理基槽和坡面的回淤或塌坡。

14.3.4 回填过程中管节两侧回填高差不宜超过 2m。

14.3.5 采取多波束检查的回填区域, 暴露长度宜控制在 30m~50m。

14.3.6 抛填船的驻位应根据水深、水流和波浪等自然条件对回填材料产生漂流的影响确定。

14.4 护面回填及防护

14.4.1 护面回填应分层、分段、对称铺设, 边坡坡率不应陡于设计坡率。

14.4.2 护面块石粒径或重量应满足设计要求。

14.4.3 管节覆盖防护层施工完成后，应监测回填及周边区域的冲刷情况。

征求意见稿

15 路面与排水

15.1 一般规定

15.1.1 路面与排水施工应考虑周围的道路、居民区、雨季期、高温期、低温期等影响作业因素，并应与施工红线范围内其他作业相协调。

15.1.2 路面与排水施工工艺应考虑原材料生产及运输、现场作业条件、管节内预留孔洞等因素。

15.1.3 路面施工现场应设置警示措施，夜间施工应设置足够的照明设施。

15.2 路面施工

15.2.1 混凝土路面施工除应满足《公路水泥混凝土路面施工技术细则》（JTG/T F30-2014）有关规定外，并应符合下列规定：

- 1 施工前应对混凝土配合比进行验证。
- 2 模板宜采用钢模板。
- 3 曲线路段宜采用短模板，各块模板中点应与曲线切点重合。

15.2.2 沥青路面施工除应满足《公路沥青路面施工技术规范》（JTG F 40）有关规定外，并应符合下列规定：

- 1 防水材料应均匀涂抹在隧道压重层面，不得出现凹凸点和漏涂。
- 2 粘油层应在防水涂料硬化后均匀喷洒。
- 3 粘油层施工完成后应及时铺筑沥青层，避免粘层受污染。
- 4 沥青摊铺过程中，应测量摊铺厚度。
- 5 沉管隧道的沥青摊铺施工作业人员应配戴防毒面罩以及设置足够的通风措施。
- 6 沥青混合料运输过程中应采取措施确保沥青温度满足摊铺要求。

15.2.3 施工缝施工应参照《公路水泥混凝土路面施工技术细则》（JTG/T F30）、《公路沥青路面施工技术规范》（JTG F 40）有关规定。

15.3 排水系统施工

15.3.1 集水池、雨水泵房施工应参照《给排水管道工程施工及验收规范》（GB 50268）及《给排水构筑物工程施工及验收规范》（GB50414）有关规定，并应符合下列规定：

- 1 集水池、雨水泵房、基坑开挖应与隧道主体基坑同步施工。
- 2 集水池、雨水泵房分层施工缝处应做好防水密封措施，施工完成后应进行满水试验。
- 3 水泵安装应参照《风机、压缩机、泵安装工程施工及验收规范》（GB 50275）有关规定。

15.3.2 隧道洞口截水沟施工应参照《给排水构筑物工程施工及验收规范》（GB50414）有关规定，并应符合下列规定：

- 1 应采取措施保证截水沟盖板面与路面衔接平顺。
- 2 应采取措施保障截水沟底板平整无凹槽。

15.3.3 隧道内废水泵房施工应符合下列规定：

- 1 废水泵房应设置于隧道最低处。
- 2 废水泵房应按图纸要求预留孔洞、钢筋。
- 3 废水泵房宜与管节预制同步浇筑。

16 附属设施

16.1 一般规定

16.1.1 附属设施施工计划应与隧道主体结构施工进度相协调。

16.1.2 机电、装饰等设计图纸宜进行深化设计。

【条文说明】为避免影响后期进度,前期需认真审查图纸,提前暴露需变更内容,提前启动变更流程。机电设备采购应提前做好品牌报审,设备品牌应满足设计参数和供货需求。

16.1.3 施工前应核对机电管线位置,避免管线冲突。

【条文说明】核对管线碰撞问题可通过建立 BIM 模型进行碰撞检查。

16.2 附属构造物施工

16.2.1 安全通道施工应符合下列规定:

1 施工前应提前核对安全通道与预埋件、后浇带的位置关系,并应避免预埋件、后浇带等部位。

2 逃生门的安装应满足《建筑装饰装修工程质量验收标准》(GB 50210)有关规定。

16.2.2 电缆管沟施工应符合下列规定:

1 电缆敷设前应按设计和实际路径计算每根电缆长度,合理采购电缆,减少电缆接头。

2 电缆接头位置应选在直线部分,与管口的距离应不小于 3m,并应避免设置在道路交叉口、有车辆进出的建筑门口、电缆线路转弯处及地下管线密集处。

3 电缆敷设前应计算电缆牵引力,确定牵引方向及牵引方式。

4 电缆敷设时应避免损坏电缆沟、隧道、电缆井和人井的防水层。

5 电力电缆在终端头与接头附近宜留有备用长度。

6 敷设电缆时，机械敷设电缆速度不宜超过 15m/min，在较复杂的路径上敷设电缆时，敷设速度应放缓。侧压力和拉力不应超过最大允许牵引强度，最大允许牵引强度见表 16.2.2-1。

表 16.2.2-1 机械敷设时电缆最大允许牵引强度表

牵引方式	牵引头		钢丝网套		
受力部拉	钢导体	铝导体	铝护套	铝护套	塑料护套
允许牵引强度（N/mm2）	70	40	10	40	7

7 电力电缆切断后，端头应立即做好防潮密封。

16.2.3 隧道防火板安装应参照《隧道防火保护板》（GB28376）、《建筑防火通用规范》（GB 55037）有关规定执行。

16.2.4 隧道洞口遮光带安装应按照国家及行业钢结构工程现行规范执行。

【条文说明】引用的国家及行业钢结构工程现行规范主要包括《钢结构工程施工质量验收规范》（GB50205）、《结构用高频焊接薄壁 H 型钢》（JG/T137）、《建筑钢结构焊接技术规程》JGJ81、《屋面工程质量验收规范》GB50207、《冷弯薄壁型钢结构技术规范》（GBJ50018）等。

16.2.5 隧道装饰挂板安装应符合下列规定：

- 1 板材不应存在裂纹、分层、缺棱、缺角、鼓泡、孔洞、凹陷等缺陷。
- 2 板材切割工具应选择电动切割机，不宜选择切割刀或木工锯。
- 3 板材安装前应预先进行排版布置。
- 4 板材开孔不应使用重锤、冷凿或其它具有破坏性的敲击方式。
- 5 侧墙挂板伸缩缝位置龙骨应自成体系，体系间距不小于 50mm。
- 6 侧墙挂板安装后，保护膜去除时间应符合产品规定要求。

16.3 交通工程与附属设施安装

16.3.1 交通安全设施安装应符合下列规定：

- 1 安装前应与当地交警部门确定安装方案，相同路段的交通设施宜使用统一样

式。

2 路侧标志和悬空标志安装应参照《道路交通标志和标线》(GB 5768)有关规定执行。

3 交通标识支柱法兰盘与混凝土基础的底法兰盘应水平、密合连接。平曲线路段安装时应合理调整预埋法兰盘,确保标志面板与驾驶员视线垂直。

16.3.2 通风设施安装除应满足《通风与空调工程施工质量验收规范》(GB50169)有关规定外,并应符合下列规定:

1 射流风机、离心风机等大型通风设备安装前,应对预埋件进行抗拔试验。拉拔荷载宜不低于 15 倍风机静载,抗拔试验荷载保持时间应不少于 10min。

2 风机安装前,应进行外观清理检查。

3 风机与风管的连接宜采用柔性短管,柔性短管安装后应与风管同一中心。柔性短管应安装紧实、不扭曲,并应比安装前短 10mm。

16.3.3 照明设施安装应参照《城市道路照明工程施工及验收规程》(CJJ 89)有关规定执行。

16.3.4 消防给水和灭火设施安装应按照国家及行业消防工程现行规范执行。

【条文说明】引用的国家及行业消防工程现行规范主要包括《给水排水管道工程施工验收规范》(GB 50268)、《消防给水及消火栓系统技术规范》(GB 50974)、《建筑灭火器配置设计规范》(GB 5014)等。

16.3.5 供配电设施安装应参照国家及行业电气工程现行规范执行。

【条文说明】引用的国家及行业电气工程现行规范主要包括《电气装置安装工程 电缆线路施工及验收标准》(GB 50168)、《电气装置安装工程串联电容器补偿装置施工及验收规范》(GB 51049)、《电气装置安装工程电力变流设备施工及验收规范》(GB 50255)、《电气装置安装工程 66kV 及以下架空电力线路施工及验收规范》(GB 50173)、《电气装置安装工程爆炸和火灾危险环境电气装置施工及验收规范》(GB 50257)、《电气装置安装工程低压电器施工及验收规范》(GB 50254)、《电气装置安装工程盘、柜及二次回路接线施工及验收规范》

(GB 50171)、《电气装置安装工程接地装置施工及验收规范》(GB 50169)、
《电气装置安装工程母线装置施工及验收规范》(GB 50149)等。

16.3.6 监测与报警设施安装除应满足《道路交通信号灯设置与安装规范》(GB 14886)的有关规定外,并应符合下列规定:

- 1 监测灯应与现有交通灯联接系统及其控制箱兼容。
- 2 监测灯应按标准规定抽样测试。
- 3 灯具的各项指标应满足设计图纸和技术规范要求。

征求意见稿

17 施工监测

17.1 一般规定

17.1.1 公路沉管隧道工程的施工监测应根据工程具体情况进行专项设计。监测方案应由监测单位制订，应明确具体指标要求，并经评审后实施。

17.1.2 公路沉管隧道工程施工监测方案制定应综合考虑、管节受力情况和力学性能、管节制作方法、施工工艺、环境、工期、运营维护要求等因素。

17.1.3 环境监测区域应覆盖管节预制区、存放区、浮运区、沉管隧址区、接岸隧道区、临时围堰以及影响沉管隧道施工的周边环境区域。

17.1.4 监测期限应涵盖管节的预制、存放、浮运、沉放、对接以及对接后管节内外施工的各阶段，直至隧道通车运营方可截至。

17.1.5 公路沉管隧道工程施工应对施工环境、基槽垫层回淤、管节运动姿态、管节结构、围堰和坞门等内容进行监测。

【条文说明】施工环境监测主要包括水文环境监测、航道运行情况监测以及环境影响监测等。基槽垫层回淤监测主要包括基槽开挖偏差监测、回淤情况监测、清淤效果监测等。管节运动姿态监测主要包括自沉管管节起浮寄放到安装完成过程中，管节的位移、偏转、扭转等运动姿态的监测和调整。管节结构监测主要包括不同施工阶段，沉管管节的受力、变形、应力和应变变化情况的监测。围堰监测主要包括施工阶段围堰的受力、变形以及渗漏情况监测。

17.1.6 施工监测项目以及监测点的布设位置、数量和监测频次应满足反映沉管隧道结构和周边环境安全状态的要求。

17.1.7 施工监测测控点布置应当满足精度、施工控制和监测覆盖范围的要求。突发风险事件时的应急抢险监测应在原有监测工作的基础上有针对性地加密监测点、提高监测频率或增加监测项目。

17.1.8 施工监测点的埋设位置应便于观测，不应影响和妨碍正常施工。监测点应埋设稳固，标识清晰，并应采取有效的保护措施。

17.1.9 施工监测宜采用自动化监测。自动化监测系统的精度、稳定性、可控性应满足施工要求。

17.2 环境监测

17.2.1 水文和气象监测应在施工准备期之前半年开始进行，监测工作应持续至施工验收后半年。

17.2.2 水文监测点应布置在施工影响区域半径 500 m 范围内，气象监测点应布置在施工区域 2 km 范围内。监测点位经纬度宜记录至 0.1'，高程宜记录至 0.1 m。

17.2.3 水文监测应采用具备数据储存和数据实时传输功能的原位自动监测仪器设备，数据存储周期不应小于 30d。水文监测宜采用浮/潜标的监测方式。

【条文说明】环境监测的主要内容包括：水上风速及风向、水面气压、水面波浪情况（包括浪高、波速、波浪周期等）、作业深度水压、水流流速及流向、水下泥沙输运情况、水域浊度（可见度）、水体含盐度、水体温度和海冰等。

17.2.4 水文监测项目应包括水位、水流、波浪、沉积物、水温、海冰等。

17.2.5 气象要素监测项目应包括风速、风向、气压、空气温度、相对湿度等。

17.2.6 水位监测应包括潮高、高潮潮高、高潮潮时、低潮潮高、低潮潮时等。

17.2.7 水流监测应包括分层流速、流向等。

17.2.8 作业水域为江河时，应调查周围地区的水文环境情况，并对江河洪峰的流量和通过情况进行监测和预报。

17.2.9 作业水域为河流注入的内陆湖泊时，应对作业水域内的淤积进行监测。

17.2.10 水文监测和气象要素的监测方法和精度应符合现行《水运工程水文观测规范》（JTS 132）的有关规定。

17.3 基槽、垫层回淤监测

17.3.1 基槽开挖施工监测应依据基槽设计、开挖施工方案、基槽关键部位监测要求，制定监测方案。基槽周边存在对变形敏感的建筑及设施时，应参照《水运工程水工建筑物原型观测技术规范》（TS 235）有关规定执行。

17.3.2 水下基槽开挖施工应监测基槽断面偏差、垫层平整情况、水下回淤情况、清淤效果。

17.3.3 基槽开挖施工过程中，应采用水下断面测量对基槽断面深度、宽度、边坡坡度进行施工监测。监测工作应符合下列规定：

- 1 断面间距应根据工程地质条件、水文条件、周边建筑物的重要性和结构形式等确定，宜为 5m~10m。
- 2 在开挖期间宜每 1 天~2 天观测 1 次，开挖速度和回淤速度较快时可 2 次/d。
- 3 开挖完成后至管节沉放前应保持观测频率。

17.3.4 基槽开挖施工过程中，应采用水下高程测量。

17.3.5 对垫层的平整度进行施工检测。检测控制点应取在垫层边线和轴线上，取点间距宜为 2m~5m。

17.3.6 基槽开挖施工后、垫层施工前后及管节沉放前，应分别对基槽的回淤情况进行不少于 1 次监测。回淤严重时，应当采取清淤措施。

17.3.7 采用水下岩体爆破开挖基槽时，应对可能影响区域内的周边建筑物开展安全监测，并应符合下列规定。

- (1) 振动监测与爆破施工同步进行；
- (2) 水平位移、地表竖向位移、建筑物表面裂缝监测在炸礁前观测 1 次，在爆破时每天观测 1 次，在炸礁后 1 周内每天观测 1 次，在暂停爆破期间每周观测一次，爆破完成后第 2 周~第 4 周每周观测一次，爆破完成后第 2 个月~第 6 个月每月观测 1 次。

【条文说明】监测对象包括：周边护岸、码头、防汛（波）堤、围堰、围堤、桥梁、水下管线、岸上房屋等。监测项目包括：建筑物振动速度、加速度、水平位移、地表竖向位移、建筑物表面裂缝等。

当爆破影响较小或不存在累积效应时，可仅在爆破典型施工时进行监测。当爆破影响较大或存在累积效应时，应对爆破施工全过程进行监测。

17.4 管节姿态监测

17.4.1 管节姿态监测应在管节浮运、沉放和对接期进行，监测频率宜为 50Hz~100 Hz。

17.4.2 采用加速度计或速度计测试时程曲线，监测管节的纵荡、横荡和垂荡，监测测点宜布置在管节两端。

17.4.3 采用倾角仪或陀螺仪测试时程曲线，监测管节的横摇、纵摇和艏摇，监测测点宜布置在管节中部。

17.4.4 测点布置不得妨碍正常施工作业，选取方便观测的位置布置测点，且应避开障碍物，便于观测和数据传输。

17.4.5 根据监测结果实时控制各压载水箱水位高度。

17.5 管节结构监测

17.5.1 管节结构监测应覆盖管节预制、寄放、运输、沉放和安装全过程关键参数。

【条文说明】管节预制期：大体积混凝土温度、混凝土裂缝；工厂法或工厂法无干坞时的管节移运变形、轴线偏差、同步性；节段式管节移运到浅坞区进行支撑体系转换时的管节变形；浮坞法预制时的管节及浮船坞或半潜驳的变形。

寄存期：节段间张合量，端封墙变形、应力，管节渗漏水，压载水箱渗漏、管节起浮支座反力。

运输沉放期：节段间张合量，端封墙变形、应力，压载水箱渗漏、管节沉放对接姿态等。

安装完成后：节段/管节间张合量，管节间差异位移，端封墙变形、应力，管节渗漏水，压载水箱渗漏，管节沉降、位移，管内温度、空气质量，管节间剪力键变形及应力，管节/节段间止水带渗漏。

17.5.2 管节预制时，大体积混凝土施工应根据温度监测结果，控制内表温差和降温速率，并及时调整和优化温控措施，并应参照《水运工程大体积混凝土温度裂缝控制技术规范》（JTS/T 202-1）有关规定执行。

17.5.3 管节起浮时，宜采用轴力计监测管底受力时，测点布置在每个压载水箱下部，

应采用在线实时监测。

17.5.4 管节应力（应变）、端封门应力（应变）和端封门变形监测应符合下列规定：

- 1 根据设计要求和受力分析结果，选择受力不利位置布置监测测点。
- 2 采用光纤光栅式、振弦式或电阻式应变传感器监测混凝土管节和端封门应力（应变）。
- 3 采用光纤光栅式、磁致伸缩式、振弦式或电阻式位移传感器监测端封门变形。
- 4 寄放期监测频率应为每 1h 不少于 1 次，浮运、驳运、沉放和对接期监测频率应为每 1h 不少于 30 次。

17.5.5 管节浮运、沉放和对接期应采用摄像的方法对端封门、压载水箱/水袋的渗漏水进行在线实时监测。

17.5.6 管节对接期应监测节段张合量，并应符合下列规定：

- 1 张合量可采用光纤光栅式、磁致伸缩式、振弦式或电阻式位移传感器进行监测；
- 2 监测测点布置在节段接头，每个节段接头对称布置不少于 2 个测点。
- 3 监测频率每 1h 不少于 30 次。

17.5.7 管节沉放后应测量与已沉放管节连接的接头精度，最终接头的允许偏差应符合国家现行标准《沉管法隧道施工于质量验收规范》（GB 51201）的有关规定。

17.5.8 管节对接后应对沉管结构混凝土、 Ω 止水带、端封门和压载水箱/水袋进行渗漏水监测，并应符合下列规定：

- 1 压载水箱拆除前，采用人工巡视的方法检查沉管结构混凝土和压载水箱的渗漏水，压载水箱拆除后，采用视频和人工巡视相结合的方法监测沉管结构混凝土渗漏水，监测频率应每 1d 不少于 1 次；
- 2 Ω 止水带渗漏水采用高精度压力表测试和人工巡视的方法监测，高精度压力表安装在中下管廊止水带检漏的预埋水管上；
- 3 端封门渗漏水采用视频的方法在线实时监测；
- 4 压载水箱应采用水位计实时监测水位变化和渗漏水。

17.5.9 沉管结构沉降监测应符合下列规定：

1 采用水准仪观测底板顶面高程，观测方法应符合现行行业标准《水运工程测量规范》（JTS 131）中的有关规定；

2 压载水箱拆除前，监测线路布置在中管廊内，每 1 个节段布置 4 个观测点；

3 压载水箱拆除后，监测线路布置在左、右行车廊道内，每 1 个节段布置 4 个观测点。

4 监测频率每 1h 不少于 1 次。

17.5.10 沉管结构水平位移监测应符合下列规定：

1 采用全站仪观测水平位移，观测方法应符合现行行业标准《水运工程测量规范》（JTS 131）中的有关规定；

2 水平位移监测线路布置在中管廊内，每个管节两端各布 1 个观测点，两观测点之间保持通视。

3 监测频率每 1h 不少于 1 次。

17.5.11 管节差异位移监测应符合下列规定：

1 采用光纤光栅式、磁致伸缩式、振弦式或电阻式位移传感器监测相邻管节之间发生的竖向位移差、水平向位移差；

2 竖向位移差、水平向位移差监测测点均不少于 2 个，每种差异位移监测测点均在管节接头对称布置。

3 监测频率每 1h 不少于 1 次。

17.5.12 监测数据的处理及上报应满足工程施工进度需求，并做好数据记录和存档工作。

17.6 围堰与基坑监测

17.6.1 沉管隧道施工期间，衔接段施工所需的围堰工程应当开展施工监测。

【条文说明】主要监测项目包括：围堰渗漏、围堰变形、围堰受力、开挖深度、周边建筑物安全、周边土体含水率及位移。

17.6.2 围堰工程监测方案应根据围堰工程应根据工程地质条件、水文条件、周边建筑物的重要性和围堰结构形式等确定，应明确重点监测项目、重要测点和重要监测阶

段。

17.6.3 围堰工程施工和使用期间，应采用人工巡检的方式监测围堰渗漏、流沙、管涌情况，围堰周边应配备夜间照明设备。

17.6.4 围堰工程施工期间，应在监测方案确定的关键点布置监测围堰受力、变形的传感器，监测频率应不低于 1 次/d。在水文气象条件恶劣的情况下，应暂停围堰施工，并加大监测频率，配备专人巡检。

17.6.5 围堰工程施工期间，应符合下列规定：。

- 1 应对周边可能受影响的建筑物的变形、裂缝，地下水位等进行监测。
- 2 监测方法视监测项目可采用人工巡检、预埋传感器等。
- 3 围堰排水、开挖施工期间，监测频率应不低于每天监测一次。围堰完工后，监测频率应不低于每 2 天监测一次。

17.6.6 护岸与边坡稳定监测应参照《建筑边坡工程技术规范》（GB 50330）有关规定。

17.6.7 基坑监测应参照建筑基坑工程监测技术规范（GB50497）有关规定执行。

17.7 坞门监测

17.7.1 管节预制施工期间，应监测坞门变形、应力和止水效果情况。

- 1 止水效果监测可通过巡检的形式开展。
- 2 坞门变形和应力监测频率应为每 1d 不少于 1 次。

17.7.2 坞门监测点布置应当满足精度要求，坞门监测应该选择受力和变形大的部位重点观测。

附录 A 管节水密性检查表

序号	检查部位	检查内容	检查要求	检查人	状况	备注
1	端封墙	端封墙的材质、尺寸、焊缝情况	检查端封墙材质、端封墙的安装顺序及焊缝是否满足设计要求，有无漏焊。			
2		端封墙预埋件安装情况、预埋件与主体的黏接情况	端封墙与预埋件的焊接过程经常会出现混凝土爆裂，从而使端封墙预埋件与混凝土间形成渗水通道，检查此位置是否已进行防渗处理。			
3		端封墙支撑牛腿材质、尺寸、焊缝情况	检查端封墙牛腿与枕梁材质、安装顺序及焊缝是否满足设计要求，有无漏焊。			
4		端封墙上的密封装置（电缆孔、灌排水孔、人孔、透气孔等）	检查端封墙上的密封装置是否满足设计要求，有无漏焊情况，柔性密封垫圈材质是否满足要求，是否完好密封。			
5	钢端壳	钢端壳与混凝土粘接情况	钢端壳与混凝土粘接有无渗水情况，是否进行防渗处理。			
6	压载水箱	压载水箱材质、尺寸、焊缝	检查压载水箱的材质是否满足设计要求，检查压载水箱钢焊缝是否满足设计要求，有无漏焊情况，检查各个水箱水密性。			
7	灌排水系统	水管材质、接头连接、阀门状况	检查灌排水系统水管连接处是否密封，阀门性能是否良好，阀门是否关紧，水管是否畅通。			
8	管节后浇带	混凝土后浇带结构缝	检查混凝土表面是否有漏水现象；裂缝宽度、深度情况，是否为贯穿性裂缝；裂缝防渗处理情况。			

9	管节主体混凝土	混凝土结构裂缝、密实情况	检查混凝土表面裂缝情况；防水层（涂料层）情况；预留孔洞密封情况；裂缝防渗处理情况。			
---	---------	--------------	---	--	--	--

征求意见稿

附录 B 浮运水阻力与定倾高度计算

B.1 浮运阻力计算

B.1.1 管节浮运水阻力可按式 (B.1.1-1) 计算:

$$F = \frac{1}{2} A \rho_w v^2 K \quad (\text{B.1.1-1})$$

$$A = D(T + \delta)$$

式中:

F ——水阻力, N;

A ——管节受水流阻力面积, m^2 ;

ρ_w ——水密度, kg/m^3 , 海水取 $1.02 \times 10^3 \text{kg}/\text{m}^3$, 淡水取 $1.0 \times 10^3 \text{kg}/\text{m}^3$;

v ——管节对水流的相对速度, m/s ;

K ——挡水形状系数, 宜根据管节的吃水、水深、水流方向确定管节纵向和横向的挡水系数, 以提供浮运、转体的阻力分析, 在试验资料不足时纵向挡水系数可取为 1.3, 横向挡水系数可取为 2.0;

D ——管节宽度, m;

T ——管节吃水, m;

δ ——管节前涌水高度, m, 取 0.6 倍航程中可能出现的波高。

B.2 管节定倾高度计算

B.2.1 管节浮运过程中的定倾高度应按下式计算:

$$m = \rho - a \quad (\text{B.2.1-1})$$

$$\rho = \frac{I - \sum I_i}{V} \quad (\text{B.2.1-2})$$

$$I_i = \frac{L_i B_i^3}{12} \quad (\text{B.2.1-3})$$

式中 m ——定倾高度 (m) ;

ρ ——定倾半径 (m) ;

a ——重心到浮心距离 (m) ;

I ——管节水面处的断面对纵向中心轴的惯性矩 (m⁴) ;

I_i ——第 i 个压载水舱的水面对管节纵向中心轴的惯性矩 (m⁴) ;

V ——管节的排水量 (m³) ;

L_i ——第 i 个压载水舱长度 (m) ;

B_i ——第 i 个压载水舱宽度 (m) 。

本规范用词用语说明

对执行规范条文严格程度的用词，采用下列写法：

- 1 表示很严格，非这样做不可的用词，正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；
- 2 表示严格，在正常情况下均应这样做的用词，正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”；
- 3 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的用词，正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；
- 4 表示有选择，在一定条件下可以这样做的用词，采用“可”。

征求意见稿