

JTG

中华人民共和国推荐性行业标准

JTG/T 3662—2026

公路沉管隧道施工技术规范

Technical Specifications for Construction of Highway Immersed Tunnel

2026-07-16 发布

2026-10-01 实施

中华人民共和国交通运输部发布

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）的要求，由中交第四航务工程局有限公司承担《公路沉管隧道施工技术规范》（以下简称“本规范”）的制订工作。

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，吸收了港珠澳大桥岛隧工程沉管隧道、深中通道岛隧工程沉管隧道及上海、广州、宁波等地区内河沉管隧道工程的建设经验，借鉴了国内外相关标准规范，在此基础上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多次修改，最终完成了本规范的编制工作。

本规范分为 15 章和 2 个附录，主要内容包括：1 总则，2 术语，3 基本规定，4 施工准备，5 施工测量，6 大型临时工程，7 管节预制与场内移运，8 基槽，9 地基与基础，10 衔接段，11 管节舾装与寄放，12 管节水上运输与安装，13 最终接头，14 回填与防护，15 施工监测，附录 A 管节浮运阻力计算，附录 B 管节定倾高度计算。

本规范由吕卫清负责起草第 1 章、第 2 章及第 3 章，苏林王负责起草第 4 章，李汉渤、邹正周负责起草第 5 章，李汉渤、陈猛负责起草第 6 章，陈伟彬、黄文慧负责起草第 7 章，何波负责起草第 8 章，桑登峰、刘志军负责起草第 9 章，陈猛负责起草第 10 章，梁邦炎负责起草第 11 章，应宗权、王殿文负责起草第 12 章，应宗权、梁邦炎负责起草第 13 章，尚乾坤负责起草第 14 章，苏林王、娄学谦负责起草第 15 章，应宗权、林美鸿负责起草附录 A 和附录 B。

请各有关单位在执行过程中，将发现的问题和意见，函告本规范日常管理组，联系人：陈猛（地址：广东省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：020-28126700，邮箱：chenmeng@ccccltd.cn），以便下次修订时参考。

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 应宗权 梁邦炎 李汉渤 陈 猛 何 波

陈伟彬 尚乾坤 桑登峰 刘志军 王殿文 姜学谦
黄文慧 邹正周

主 审：郭小红

参与审查人员：陈 越 苏权科 刘洪洲 魏立新 贺春宁 曹湘波
滕爱国 张金凤 董琴亮

参 加 人 员：宋江伟 欧伟山 吴海森 申昌洲 罗碧丹 邓春林
林美鸿 朱 成 王 冲 林伟才 嵇 廷 陈健斌
张佳伟 刘建强 陶宗恒

交通运输部信息公开
浏览专用

目 次

1	总则	1
2	术语	2
3	基本规定	4
4	施工准备	8
4.1	一般规定	8
4.2	施工条件核查	8
4.3	工艺验证性试验	9
4.4	施工工法与设备选型	11
4.5	施工总体部署	15
5	施工测量	17
5.1	一般规定	17
5.2	控制测量	19
5.3	管节预制测量	23
5.4	管节浮运与沉放对接测量	24
5.5	贯通测量	26
6	大型临时工程	28
6.1	一般规定	28
6.2	管节预制场	29
6.3	寄放区	31
6.4	管节运输航道	31
6.5	临时码头	32
7	管节预制与场内移运	34
7.1	一般规定	34
7.2	混凝土原材料及配合比设计	35
7.3	节段式钢筋混凝土管节预制	38
7.4	整体式钢筋混凝土管节预制	45
7.5	钢筋混凝土管节控裂和防渗	47
7.6	钢壳混凝土管节预制	49
7.7	管节防腐	52
7.8	预埋件与预留孔洞	53

7.9	管节场内移运	55
7.10	管节整体检漏	56
8	基槽	57
8.1	一般规定	57
8.2	基槽粗挖	58
8.3	基槽精挖	59
8.4	基槽维护性清淤	61
9	地基与基础	64
9.1	一般规定	64
9.2	地基处理	64
9.3	桩基础施工	66
9.4	垫层施工	67
10	衔接段	72
10.1	一般规定	72
10.2	围堰与基坑	73
10.3	衔接段隧道结构	75
10.4	护岸	75
11	管节舾装与寄放	77
11.1	一般规定	77
11.2	一次舾装	77
11.3	寄放	79
11.4	二次舾装	82
12	管节水上运输与安装	85
12.1	一般规定	85
12.2	管节浮运	87
12.3	驳运	91
12.4	系泊定位	92
12.5	管节沉放	94
12.6	拉合对接	97
12.7	水力压接	97
12.8	轴线调整	98
12.9	管内作业	100
12.10	管节接头施工	101
13	最终接头	104
13.1	一般规定	104

13.2	岸边干法施工最终接头·····	104
13.3	水下止水板现浇最终接头·····	105
13.4	水下 V 形块体整体吊装式最终接头 ·····	107
13.5	水下端部块体推出式最终接头·····	108
14	回填与防护·····	110
14.1	一般规定·····	110
14.2	锁定回填·····	111
14.3	一般回填·····	111
14.4	护面回填及防护·····	111
15	施工监测·····	113
15.1	一般规定·····	113
15.2	水文与气象监测·····	114
15.3	基槽与垫层回淤监测·····	115
15.4	管节预制、寄放、运输与安装监测·····	116
15.5	围堰与基坑监测·····	120
15.6	干坞监测·····	121
附录 A	管节浮运阻力计算·····	122
附录 B	管节定倾高度计算·····	123
	本规范用词用语说明·····	124

1 总则

1.0.1 为规范与指导公路沉管隧道施工，保障工程质量和安全，制定本规范。

1.0.2 本规范适用于钢筋混凝土和钢壳混凝土结构的公路沉管隧道施工。

1.0.3 公路沉管隧道施工应遵循绿色低碳、节能环保的原则，根据工程所在区域的环境保护要求，采取生态环境保护措施。

1.0.4 公路沉管隧道施工应积极稳妥地采用新技术、新材料、新设备与新工艺，不断提高建造技术水平。

1.0.5 公路沉管隧道施工除应符合本规范的规定外，尚应符合国家和行业现行有关强制性标准的规定。

2 术语

2.0.1 干坞法预制 prefabrication with dry dock

利用新建或已有干坞进行管节预制。

2.0.2 工厂法预制 prefabrication by factory

在可控制环境条件的工厂内进行管节预制，一般采用自动化设备和流水线生产方式。

2.0.3 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。

2.0.4 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、管节运输航道等工程。

2.0.5 管节运输航道 water channel for element transportation

用于管节运输的既有通航航道及其临时改线形成的或新建的航道。

2.0.6 作业窗口 weather window of operation

水文、气象、风浪等条件能够满足水上作业要求的一个连续时间段。

2.0.7 基槽精挖 precise dredging of trench

采用能控制基槽底高程误差在 0 ~ 50cm 范围内的挖泥船对沉管基槽最终成型阶段的开挖作业。

2.0.8 管节浮运 floating transportation of elements

将漂浮于水面的管节拖运或绞移到指定位置的过程。

2.0.9 管节驳运 transportation of elements by barge

将管节装载于半潜驳、浮船坞等之上或将在半潜驳、浮船坞上预制的管节运输至指定位置的过程。

2.0.10 定倾高度 metacentric height

管节定倾中心与重心延长线之间的距离。

条文说明

定倾中心是指当管节倾斜一个微小角度时浮力矢量与管节竖向中性轴平面的交点。

2.0.11 管节安装 installation of elements

管节经浮运至指定位置后，通过分阶段加载压载水箱调整负浮力，逐渐下沉并精准安放至基础垫层或临时支撑上，再通过拉合装置与衔接段结构或已沉放管节初步连接，最终利用水力压接实现密封对接的全过程。

2.0.12 管节沉放 immersion of elements

管节浮运至设计位置后，在环境参数允许条件下，通过分阶段加载压载水箱调节负浮力，逐渐下沉并精准安放至基础垫层或临时支撑的过程。

2.0.13 管节对接 joining of elements

沉放就位的管节与衔接段或已安装管节之间，通过拉合定位、水力压接实现密封连接的过程。

2.0.14 管节舾装 outfitting of elements

管节上为管节浮运、系泊、沉放、对接等需要的临时设施或其安装作业，包括端封墙、压载水箱、管系、测量塔、人孔井、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。

3 基本规定

3.0.1 公路沉管隧道施工前应根据合同文件、设计要求和建设条件，做好施工准备，主要工作内容应包括施工条件核查、资源配置、工艺验证性试验、施工技术方案选择与设备选型、施工总体部署和总平面布置等。

3.0.2 公路沉管隧道施工应根据设计及施工要求统筹考虑大型临时工程、基槽开挖、地基基础施工、衔接段施工、管节预制、管节运输、管节安装和最终接头施工等各工序的衔接和协调。

3.0.3 施工总体部署应根据工期要求和管节预制、运输与安装施工工艺，以及各关键分项工程相互衔接要求、作业窗口及环境条件等因素，确定施工总流程、关键分项工程和节点，合理配置施工装备、施工材料等资源，并制定实施性施工组织设计。

条文说明

工期要求往往决定了关键工艺流程的时间要求，合理安排施工总流程和施工顺序尤为重要。关键分项工程具体包括沉管预制场地的建设、管节预制、衔接段施工、首节管节预制、管节水上运输、基槽开挖与管节安装、最终接头施工等。管节在预制场地完成预制，然后通过场内移运及水上运输将其运至指定水域位置进行水上安装。因此，在施工总体部署中，需要确定管节预制、运输和安装的时序，确保各关键工序的衔接。

沉管隧道施工各工序的作业通常受水文气象条件的影响，且管节水上运输及安装等关键工序均属于水上作业，因此作业窗口和环境条件也是影响沉管隧道施工总体部署的重要因素。

3.0.4 施工工期总体计划应根据建设条件、关键分项工程的施工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、预制场条件、水上运输条件和施工作业窗口等确定。

条文说明

公路沉管隧道的施工是一个各关键工序环环相扣的系统工程，管节预制及安装进度与管节数量、预制场条件、水上运输条件及施工作业窗口密切相关，是制约总工期的关

键因素。

3.0.5 公路沉管隧道施工应根据工程环境影响评价结论，从场地布设、施工工艺、施工机械、材料使用和废弃物处置等方面制定预防或者减轻不利生态环境影响的对策措施，施工过程中应对环境保护目标造成的影响进行定期跟踪监测。

3.0.6 管节预制、管节场内移运、基槽开挖、垫层整平、水上运输和安装等施工采用专用装备时，应进行专项设计、制造或技术改造，其技术指标应满足施工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 20 000 ~ 80 000t，长度通常为 70 ~ 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、质量要求高，且安装位置处于深水区，水文地质环境复杂，故对施工装备提出了比较高的要求。如管节预制可能需要专门设计制造(技术改造)大型液压步履式钢结构模板(钢筋混凝土管节)，混凝土浇筑采用专项装备，管节场内移运也需要大型移运装备；基槽开挖需配备粗挖、精挖及清淤专业疏浚装备；垫层整平需采用水下机械整平装备；水上运输需采用大型拖轮等装备进行浮运，还需选用或设计制造(技术改造)浮船坞、半潜驳进行驳运；管节安装则需选用专用装备或设计制造(技术改造)大型沉放驳。

3.0.7 沉管管节的混凝土配合比、浇筑工艺参数应通过室内配合比试验、工艺验证性试验和管节局部结构模型试验确定。钢筋混凝土管节应根据配合比和模型试验制定开裂措施，钢壳混凝土管节应确定防止钢壳与混凝土顶部脱空措施及脱空检测方法。

3.0.8 公路沉管隧道施工应制定施工测量专项方案，明确平面控制网及高程控制网的布设、测量仪器设备、永久及临时测点布置、测量方法、控制指标和质量控制措施等。离岸深水区的沉管隧道工程宜组建测量控制中心。

条文说明

离岸深水区沉管隧道施工的精确性和可靠性要求高，测量效率要求也高，涉及控制测量、管节预制和对接测量、隧道贯通测量和监控测量等工作，建立测量控制中心可以协调与督促施工单位、监理单位及第三方监测单位的测量工作，研究和解决施工测量中的关键性技术难题，保证项目空间整体线性测量质量，实现沉管隧道的精确对接与贯通。

3.0.9 管节预制工法应根据设计结构形式、场地条件、预制工效、质量要求和成本

因素等进行选择，生产设备应根据预制工艺方案进行配置。

条文说明

公路沉管隧道管节常用的结构形式包括钢筋混凝土整体式管节、钢筋混凝土节段式管节以及钢壳混凝土管节。按预制场地性质分类，管节预制工法可以分为干坞法、浮坞法和工厂法等。按结构形式、制作工艺及流程分类，钢筋混凝土管节可以采用分段分层浇筑、全断面连续浇筑或分仓跳段浇筑；钢壳混凝土管节一般采用钢壳节段制作拼装然后原位或移运到异位分隔仓进行混凝土灌注。预制工法的选择一般需要考虑场地条件、质量控制要求、预制工效及成本等因素，质量控制要求根据不同管节结构形式而有所不同，钢筋混凝土管节质量控制的关键主要是混凝土控裂，而钢壳混凝土则需重点控制混凝土的体积稳定性。工厂法因环境稳定、自动化程度高，尤其适用于质量要求高或管节数量多的工程；内河沉管隧道管节数量较少，场地具备条件时，一般采用干坞法；浮坞法则适用于风浪流影响较小水域的工程。

3.0.10 管节水上运输工艺应综合考虑管节预制工艺、管节水上运输距离、通航条件、水文气象条件、水上运输装备以及管节尺寸和重量等因素，经技术经济综合比选确定。管节采用拖航方式进行水上运输且运输距离长、风浪流条件复杂时，宜进行拖航演练，验证拖轮在不同拖带方式及不同工况下的配合并测试检查通信、指挥和控制系统的有效性，拖带方式应经方案比选后确定。

条文说明

管节水上运输距离、通航条件、水文气象条件、水上运输装备以及管节尺寸和重量等因素对施工可行性、工程风险和经济性有重要影响。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将管节驳运至隧址位置。当预制场地与隧址距离较大时，可以根据运输线路上的航道条件、风浪流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和驳船选型。当管节为非自浮时，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直接决定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，作业窗口需满足装备作业能力和管节结构安全风险控制要求。

3.0.11 基槽精挖、碎石垫层整平及管节安装各工序应沿管节安装方向按单个管节分段渐次展开，工序之间应衔接紧密。

3.0.12 管节安装应根据作业窗口限制条件选择沉放时机。管节安装前应对基槽回淤

进行连续监测，对管节拉合系统、压载水系统、监控测量系统、沉放船机设备等进行全面检查，并进行功能调试直到满足沉放要求。管节安装到位后，应立即检查并确认管节平面位置、高程、轴线偏差及接头间隙等对接精度指标是否满足设计要求。

3.0.13 沉管隧道的施工监测方案应根据管节受力变形情况，以及管节预制、场内移运、水上运输及安装、基槽开挖及垫层施工等的工艺技术要求制定。施工监测宜采用自动化监测手段，并宜考虑与运营期结构监测的衔接。

条文说明

管节受力变形、结构安全是隧道沉降和线形变化的重要影响因素。沉管隧道在施工阶段工况复杂、荷载变化大，因此有必要对管节姿态、管节受力和变形进行监测。

管节的场内移运、存放、浮运、沉放及对接等施工各阶段涉及复杂的施工工艺，对管节结构安全和变形的影响大，因此施工工艺是监测方案制定的主要影响因素。

基槽开挖期间，需要根据基槽设计、开挖施工工艺技术要求等对基槽关键部位进行监测，包括监测基槽断面偏差、垫层平整度及高程、基槽回淤情况等，以满足后续工序施工要求。

3.0.14 隧道内路面施工除应符合现行《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40)和《公路水泥混凝土路面施工技术细则》(JTG/T F30)的有关规定外，尚应符合下列规定：

- 1 路面调平层施工前应按设计要求核查隧道压舱层和管节水平剪力键的顶面高程，以及隧道内净空。
- 2 路面施工应在管节接头剪力键安装之后实施。
- 3 路面施工应按设计要求设置伸缩缝。当采用无缝伸缩缝时，宜结合建设条件和设计要求开展二次设计，确定实施方案。

3.0.15 公路沉管隧道施工应按国家和行业其他现行有关标准和法规的要求进行施工安全风险辨识、评估，并应依据风险评估结论提出风险防控措施。

3.0.16 公路沉管隧道施工宜采用标准化工艺，并应用自动化、数字化和智能化技术，提高建造技术水平。

4 施工准备

4.1 一般规定

4.1.1 施工前应收集工程水文地质条件、设计文件等，并对工程水域、预制场地、管节运输航道、周边环境、水文气象和地质条件等进行现场核查。水文气象、地质、管线、通航条件、锚地和大宗材料等施工条件与资源应满足施工组织设计要求。

4.1.2 施工前宜针对管节预制、运输、安装、基槽开挖、垫层铺设整平和最终接头施工等主要工序中关键的施工工艺参数、质量控制指标、设备性能等制定试验方案。必要时应开展工艺验证性试验，并组织专项论证。

4.1.3 管节运输航道、临时通航航道的通航安全应在施工前进行专项论证。

4.2 施工条件核查

4.2.1 施工条件核查应包括且不限于水文、气象、地质、管线、抛泥区、大宗材料、通航、锚地及施工配套条件。

4.2.2 水文核查应针对隧址附近水域及运输路线水域进行，核查内容宜包括洪水、河水流量及流向、水位及流速、水(海)域的潮流、波浪、泥沙含量、水体密度、水温及盐度、河(海)床冲淤情况、水域采砂开挖情况等。

4.2.3 气象核查应针对隧道所在水域、管节预制场地及管节运输航道进行，核查内容包括气温、风速和风向、降雨量、积雪量和降雾、雷暴程度和天数、水体冻结程度和时间及台风历史情况等。

4.2.4 地质核查应针对隧道衔接段、管节预制场、管节寄放和二次舾装场地及管节运输航道等相关区域进行，核查内容包括地质、水下地形地貌、水底沉积物，以及区域地质灾害及不良地质分布状况、地震历史及地震烈度等。

4.2.5 管线核查应探明施工影响区域范围管线的走向、埋深、结构类型、服役年限、

运营状况等。

4.2.6 抛泥区应在设计文件及环评报告的基础上进一步核查，内容应包括合规性、可容纳的体积、运输距离、使用有效期、船舶航行及环境保护等要求。

4.2.7 大宗材料核查应针对砂石料、水泥、掺合料、钢材和混凝土等主材进行，核查内容宜包括材料产量、质量、运距及运输方式等。

4.2.8 通航条件核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、通航船型、航空限高等。

4.2.9 锚地核查宜包括工程区域及水上运输通道周边船舶锚地的地理位置、水深、水域面积、海(河)床面地质、掩护条件和通航限制条件、锚地容量与施工船舶规模、锚泊方式匹配性等。

4.2.10 施工配套条件核查应包括施工用水、用电、临时道路及施工场地等。

4.3 工艺验证性试验

4.3.1 管节预制工艺验证性试验应符合下列规定：

1 钢筋混凝土管节控裂方案应在配合比试验、小尺寸模型或局部模型试验与温度场数值模拟对比分析的基础上确定。

2 钢壳混凝土管节应开展自密实混凝土配合比和灌注工艺试验，对混凝土的流动性、收缩特性、混凝土灌注工艺孔设置及灌注速度、钢壳内混凝土脱空率及脱空高度等进行验证，并应满足设计要求。

3 重大工程或无成熟经验可借鉴时宜开展足尺模型试验。

4.3.2 工厂法预制管节场内移运工艺验证性试验应符合下列规定：

1 移运设备宜按不小于设计荷载的 1.1 倍进行静载工艺试验。

2 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。

3 移运设备使用前应进行联调联试。

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，满足现场实际运输要求。

4.3.3 管节浮运、沉放系泊系统设计宜采用水动力模型试验进行验证,测试参数主要包括管节运动响应、缆索力等。管节水动力性能试验参数应满足相似准则及设计要求。

4.3.4 沉管管节或其钢壳采用驳运时,宜进行管-船静载和动载模型试验。必要时应开展足尺模型上驳、驳运和卸驳全过程工艺试验。

条文说明

管-船静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管节弯曲、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,开展管节上驳试验、半潜驳运输试验、管节下驳试验,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、典型航速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 管节安装测量定位系统宜采用数值仿真与现场试验相结合的方法进行验证。

4.3.6 基槽成槽试验应测试施工水域基槽的淤积厚度、范围和速率,并开展各施工工况下基槽边坡的稳定性分析及现场施工验证。

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安装施工的影响极大。通过预先在施工水域海床开挖形成基坑后的回淤观测试验,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,可以为基槽施工和管节安装施工提供指导。

4.3.7 沉管隧道基础垫层施工宜开展工艺验证性试验,验证垫层施工工艺、控制参数的合理性。垫层施工工艺验证性试验应符合下列规定:

1 砂流法工艺验证性试验应分析确定流量、扩散半径、压力和砂体的密实度等参数,并对充盈度进行评价。充盈度应满足设计要求。

2 压浆法工艺验证性试验应分析确定注浆量、压力、浆液扩散速度等参数,并对注浆密实效果进行评价。

3 先铺法碎石垫层工艺验证性试验应分析确定施工工艺、设备适用性、整平精度、施工工效、预抬高量等参数,并确定碎石垫层的压缩模量。

条文说明

后填法垫层和先铺法碎石垫层是当前沉管隧道采用最为广泛的基础垫层形式。

采用砂流法时，砂体的密实度及充盈度是垫层施工质量控制的关键指标。砂体的充盈度是指沉管基础垫层下方充填材料的固体物质部分体积占基础垫层总体积的比例，砂流法充盈度反映了基础垫层的充填程度。为有效控制基础垫层沉降和地震抗液化需要控制密实度，为有效控制基础垫层受力及变形需要控制充盈度。由于砂流法基础在管节安装后形成，属于隐蔽工程，故需要通过工艺模拟试验分析确定施工参数，以满足设计密实度及充盈度要求。充盈度一般通过体积法综合考虑一定的损耗系数，其评价往往结合潜水探摸进行。

先铺法碎石垫层的压缩模量，是指碎石垫层在侧向完全不能变形的情况下受到的竖向压应力与竖向总应变的比值，是衡量碎石垫层的压缩性高低、计算地基沉降的重要参数，可以为沉管基础垫层铺设碎石预抬高量提供依据。

4.3.8 最终接头施工工艺验证性试验应符合下列规定：

1 水下推出式最终接头宜根据设计要求开展工艺模型试验，验证推出实现机制及施工工艺、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，可取 1:10 ~ 1:20。

2 V 形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。

条文说明

V 形块体是采用双层钢板-混凝土组合结构，块体中间设置预先压缩的柔性接头。预制 V 形块单独安装，设主动止水构造，为管节提供混凝土浇筑的干作业环境；初始止水后，浇筑合龙连接的混凝土。

4.3.9 钢壳混凝土管节施工前，应对浇筑过程可能引起的钢壳变形进行数值分析，确定合理的浇筑顺序，制定管节变形控制措施。必要时应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。

4.4 施工工法与设备选型

4.4.1 钢筋混凝土管节预制工法可分为干坞法预制、工厂法预制和浮坞法预制，工法选择应符合下列规定：

- 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，宜选择干坞法预制。
- 3 管节数量少、干坞址选择困难且运输通道满足浮坞运输要求、预制水域风浪

流影响较小时，经专项工艺验证性试验后可选择浮坞法预制。

4.4.2 管节预制生产设备配置应符合下列规定：

- 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，设备选型应根据管节及构件的重量和数量确定。
- 3 冬期施工应设置加热与保温系统，编制专项技术方案，加热温度应根据混凝土温控标准确定。
- 4 模板系统应根据实际施工工况进行专项设计和制造。
- 5 模板系统应具备足够的承载力、刚度和稳定性，并宜具备自动行走、自动伸缩等可降低人力劳动的功能。
- 6 夏季高温施工时，混凝土生产应配置遮阳保水设施、制冰设备和冷水机组。

4.4.3 管节场内运输工艺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宜采用底部分散顶推工艺，钢壳混凝土管节宜选用液压台车移运工艺。

4.4.4 节段式管节顶推系统应由顶推千斤顶、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(PTFE)板，并应具有自动纠偏功能。

4.4.5 整体式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，管节移运液压台车应满足自动调节支撑高度、双向无级变速行走的功能要求。

4.4.6 管节水上运输工艺应根据装备条件、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后确定。

4.4.7 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。管节浮运可采用拖轮或者专用船舶进行拖航，管节驳运可采用半潜驳或浮船坞进行。

条文说明

管节水上运输装备主要包括拖轮、半潜驳、浮船坞或运安一体船等。一般情况下，管节浮运采用拖轮，而驳运则采用半潜驳或浮船坞。深中通道沉管隧道工程则采用了运安一体船进行管节浮运拖航，运安一体船通过吊点与管节连接，管节与运安一体船之间通过顶紧装置连接，以满足浮运过程的动力响应要求，保障管节浮运安全。

4.4.8 管节沉放工艺应根据管节尺寸与重量、波浪水流条件、起重设备性能和基槽水深条件进行选择，宜采用驳船吊沉法。沉放驳应配备定位、吊沉、远程控制、注水、视频监测和电力等系统。

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，由于船组稳性较好，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他方法进行管节定位测量。经综合论证后，港珠澳大桥岛隧工程沉管隧道采用的是双壳体驳船吊沉法安装管节。

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，可参考图 4-1。

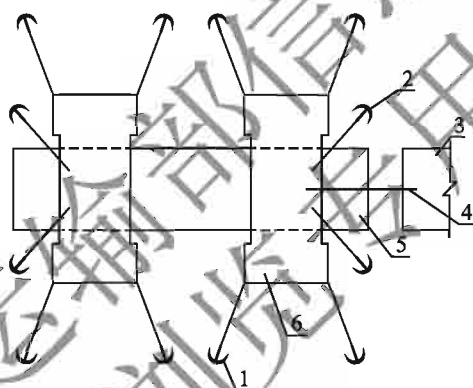


图 4-1 跨越管节布置驳船吊沉示意图

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；6-沉放驳

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，可参考图 4-2。

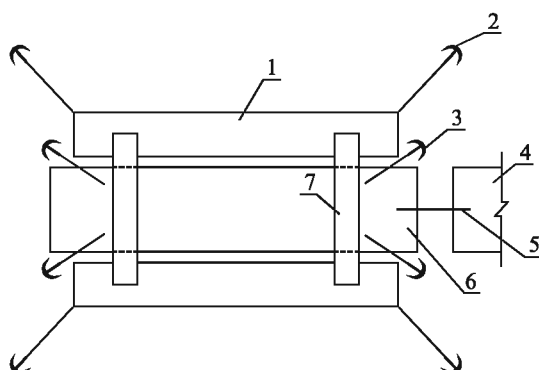


图 4-2 管节两侧布置驳船吊沉示意图

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-钢梁

4.4.9 基槽开挖工法应根据水文条件、地质条件、通航条件及工期、质量、环保、工效等要求进行选择，并与管节安装计划时间相匹配。

4.4.10 基槽开挖施工船舶选择应满足控制边坡坡率、槽底高程和平整度要求，并应符合下列规定：

- 1 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、铲斗挖泥船或凿岩船等。
- 2 黏土、密实细砂、含有少量卵石或小块石的土层宜采用耙吸式挖泥船进行开挖；中等强度以下的岩石及各类土宜采用绞吸式挖泥船开挖；全风化软岩、密实碎石土宜采用抓斗挖泥船开挖；硬岩宜采用凿岩船或水下爆破专用船进行施工。
- 3 开阔区域宜采用耙吸式挖泥船施工，边角区域、局部受限区域宜采用抓斗船施工。
- 4 土质基槽精挖宜采用有锚定位功能的抓斗船，岩质基槽精挖宜采用绞吸式挖泥船。
- 5 基槽开挖精度应符合表 4.4.10 的规定。

表 4.4.10 基槽开挖精度控制指标

序号	检测项目	允许偏差	备注
1	轴线 (mm)	± 500	分段开挖、分段量测
2	边坡坡率	不陡于设计	阶梯式开挖
3	槽底宽度 (mm)	0, +2 500	分段开挖、分段量测
4	槽底高程 (mm)	-500, +0	不允许有浅点

注：表中“+”表示向上或向外，“-”表示向下或向内。

条文说明

当基槽石方开挖采用水下爆破会危及邻近建(构)筑物的安全或影响水下生物的生存环境时，需采用施工振动影响较小的凿岩船进行施工，一般利用抓斗挖泥船配置凿岩锤改装成凿岩船。

4.4.11 地基基础处理施工工法及施工设备应根据设计要求、质量控制标准、通航条件、风浪条件和施工成本等因素综合比选确定。

4.4.12 水中最终接头施工工法及设备应根据接头形式及作业要求确定。水下止水板现浇最终接头、水下 V 形块体整体吊装式最终接头施工应根据风浪流条件及构件最大重量配置起重船、运输船等施工装备。

4.4.13 用于水上运输与水下监测的船机设备宜配置吊装设备。

4.5 施工总体部署

4.5.1 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。

4.5.2 沉管段施工顺序应从隧道衔接段向沉管段推进。沉管段施工宜安排沉管隧道一端的衔接段先行施工，另一端的衔接段施工时序应根据总体工期计划及最终接头位置进行安排。最终接头的位置应根据管节预制及安装工期计划，并结合所处地质、水深、流速及结构设计要求等因素综合比选确定。

4.5.3 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、运输通道、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综合确定。

4.5.4 施工总平面布置应考虑工程规模、工期、用地、施工水域、运输通道、管节预制方式、大型临时工程、临时围堰、水电资源保障等因素，因地制宜，合理安排。

4.5.5 管节水上运输与安装施工作业窗口应在统计分析作业区的水深和水流、波浪、风速与能见度等水文气象条件的基础上，按管节水上运输及安装船机装备的作业能力、各工序作业时长要求与潮汐、水文气象的时空变化规律综合确定。当处于开敞海域、感潮河口环境时，沉管隧道工程的沉管水上运输与安装施工作业水文气象限制条件宜通过数值模拟验证、物理模型试验和工程经验确定；缺乏试验成果和经验时，沉管水上运输安装施工作业水文气象限制条件可按表 4.5.5 确定。

表 4.5.5 管节浮运、安装施工作业窗口限制条件

作业阶段和内容	流速 (m/s)	波高 (m)	波周期 (s)	风速 (级)	能见度 (m)
管节出坞	≤0.5	≤0.8	≤6	≤6	≥1 000
管节浮运	≤0.8	≤0.8	≤6	≤6	≥1 000
管节半潜驳、浮船坞下潜	≤0.5	≤0.8	≤6	≤6	≥1 000
管节基槽内纵拖	≤0.5	≤0.8	≤6	≤6	≥1 000
管节沉放、对接	≤0.5	≤0.6	≤6	≤6	≥1 000

注：表中流速为管节安装水域的水面以下 10m 范围内的流速平均值。

条文说明

沉管水上运输、安装是沉管隧道施工的关键工序，也是安全风险最大的分项工程。管节往往尺寸、重量巨大，如果采用浮运方式，其在水中受风浪流影响大，特别是跨海

或感潮河段沉管隧道，由于海况、水流条件比较复杂，沉管的运动响应难以预测和控制，施工安全风险高，因此在施工作业前需要研究作业区的水流、波浪、风速与能见度等水文气象及潮汐的时程空域变化规律，根据理论分析、物理模型试验等，结合工程经验确定各工序作业的水文气象条件，然后根据水上运输、安装施工作业总时长要求，在预测作业区的水深和水流、波浪、风速与能见度等水文气象条件的基础上，选择管节水上运输、安装的最佳作业时机，从而制定管节的水上运输、安装计划。

港珠澳大桥岛隧工程、大连湾海底隧道和深中通道岛隧工程管节浮运及安装施工作业窗口的选取见表 4-1。

表 4-1 参考工程项目管节浮运、安装作业窗口限制条件

施工项目	作业阶段和内容	流速 (m/s)	波高 (m)	波周期 (s)	风速 (级)	能见度 (m)
港珠澳大桥岛隧工程	出坞、编队	≤ 0.4	≤ 0.8	≤ 6	≤ 6	$\geq 1\,000$
	航道浮运	≤ 0.8	≤ 0.8	≤ 6	≤ 6	$\geq 1\,000$
	转向区转向	≤ 0.5	≤ 0.8	≤ 6	≤ 6	$\geq 1\,000$
	基槽内纵拖	≤ 0.5	≤ 0.8	≤ 6	≤ 6	$\geq 1\,000$
	基槽内系泊	≤ 0.6	≤ 0.8	≤ 6	≤ 6	$\geq 1\,000$
	沉放等待	≤ 1.3	≤ 0.8	≤ 6	≤ 6	$\geq 1\,000$
	沉放对接	≤ 0.5	≤ 0.6	≤ 6	≤ 6	$\geq 1\,000$
大连湾 海底隧道	出坞、浮运、基槽内纵拖	≤ 0.5	≤ 0.6	≤ 6	≤ 6	$\geq 1\,000$
	沉放等待	≤ 0.5	≤ 0.6	≤ 6	≤ 6	$\geq 1\,000$
	沉放对接	≤ 0.5	≤ 0.5	≤ 6	≤ 6	$\geq 1\,000$
深中通道 岛隧工程	出坞	≤ 0.4	≤ 0.8	≤ 6	≤ 6	$\geq 1\,000$
	浮运	≤ 0.8	≤ 0.8	≤ 6	≤ 6	$\geq 1\,000$
	基槽内纵拖	≤ 0.6	≤ 0.8	≤ 6	≤ 6	$\geq 1\,000$
	沉放等待	≤ 1.3	≤ 0.8	≤ 6	≤ 6	$\geq 1\,000$
	沉放对接	≤ 0.6	≤ 0.8	≤ 6	≤ 6	$\geq 1\,000$

5 施工测量

5.1 一般规定

5.1.1 沉管隧道施工测量应遵循从整体到局部、先控制后碎部、分级布网和逐级控制的原则。

5.1.2 沉管隧道施工测量准备工作应符合下列规定：

- 1 工程勘察、设计阶段的控制网交桩后，应按同等精度进行复测。
- 2 覆盖施工区域的分级加密平面控制网、高程控制网应根据施工需要建立，并与首级控制网联测。
- 3 施工测量方案应根据管节结构形式及施工精度要求等编制，选定测量控制等级，确定测量方法。
- 4 应复核勘测阶段提供的水下地形测量成果。当施工所需范围超出勘察阶段测量区域时，宜扩大测量范围。

5.1.3 沉管隧道施工测量控制网应符合下列规定：

- 1 施工测量控制网应采用隧道勘察阶段的控制基准、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需要等因素，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应与同一测区陆上地形图一致，地形图比例、范围及精度等应满足施工要求。
- 4 测量控制网应覆盖施工区域。当沉管隧道施工最远作业区离岸超过 2km 时，应设置水上测量平台。

5.1.4 航道水深、基槽开挖前泥面高程、基槽开挖后槽底高程、抛石基床及碎石垫层顶面高程等可采用 GNSS-RTK + 单频测深仪、GNSS-RTK + 双频测深仪或 GNSS-RTK + 多波束测量。异常浅点区域、航线途经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。

5.1.5 沉管隧道基槽开挖、地基与基础等施工测量可结合施工工艺，选用全站仪极坐标法或 GNSS-RTK 法或 GNSS 施工定位系统。GNSS 施工定位系统在施工前应进行精

度校核。

5.1.6 衔接段施工平面位置可采用全站仪极坐标法或 GNSS-RTK 法，高程宜采用水准测量方法。

5.1.7 现场测量控制点与施工区域最小距离不宜小于 30m，并应采取隔离防撞、防腐等措施防止控制点遭受破坏。

5.1.8 沉管隧道基槽回淤厚度和边坡稳定性检测宜采用多波束测深和泥浆密度仪相结合的测量方法。

条文说明

先铺法施工回淤检测分为基槽抛石夯平前、碎石垫层铺设前、管节沉放前三个不同的检测阶段。

后填法施工回淤检测分为临时支撑碎石垫层铺设前、临时支撑安放前、管节沉放前三个不同的检测阶段。

5.1.9 沉管隧道施工期间的控制点、变形测量等宜与运营期间的健康监测同步综合布设、观测，并做好运营前后监测数据的衔接及移交工作。

5.1.10 隧道跨水域宽度超过 5km 时，宜建立 GNSS 连续运行参考站系统。

条文说明

GNSS 连续运行参考站系统由不少于 4 个 GNSS 连续运行参考站、1 个数据中心、1 个监测站和数据通信网络组成，为工程建设提供 RTK 和 GNSS 静态数据服务。

港珠澳大桥岛隧工程、深中通道岛隧工程等长大沉管隧道工程，均由建设单位委托第三方建立测量控制中心，其主要任务是建立工程测量质量保证体系，建立项目高精度的测量基准、GNSS 连续运行参考站系统并维护其在工程建设期间的精确性、可靠性和稳定性，协调与督促施工单位、监理单位及第三方监测单位的测量工作，研究和解决施工测量中的关键性技术难题，实现隧道的精确贯通。

5.1.11 隧道完工后，应进行隧道轴线、里程、路面高程和覆盖层顶面高程等交工测量。

5.1.12 隧道交工后，应提交贯通测量技术成果书、贯通误差的实测成果及说明、净宽(高)断面测量、永久轴线点和水准点的实测成果及示意图等测量文件。

5.2 控制测量

5.2.1 沉管隧道两岸应各埋设不少于 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，并应分别与埋设在同一岸侧的至少 2 个平面控制点通视。

5.2.2 跨海沉管隧道工程平面控制网等级应符合表 5.2.2 的规定，并应根据其施工允许误差确定测量等级，测量方法、布点等宜进行专项设计。

表 5.2.2 跨海沉管隧道平面控制测量等级

控制网类别	测量等级	最弱边边长相对中误差	测量方法	用途
首级控制网	一等	同岸：1/300 000	卫星定位测量	测量基准
		跨海：1/3 000 000		
首级加密控制网	二等	1/150 000	卫星定位测量、 导线测量、 三角形网测量	高精度施工测量
一级施工加密控制网	三等	1/100 000		局部施工测量
二级施工加密控制网	四等	1/70 000		附属设施等施工测量

注：当一等边长小于 1km 时，最弱边边长中误差应小于 4mm；当二、三、四等边长小于 0.5km 时，最弱边边长中误差应分别小于 3mm、4mm、5mm。

条文说明

随着沉管隧道建设技术的发展，国内已经实施了沉管隧道跨越水域宽度超过 5km 的港珠澳大桥岛隧工程及深中通道岛隧工程。该测量控制网均采用专项设计，其中，首级平面控制网按照《全球导航卫星系统(GNSS)测量规范》(GB/T 18314—2024)中 B 级要求施测，首级平面加密控制网按照《公路勘测规范》(JTG C10—2007)中 GNSS 二等要求施测。

5.2.3 内河沉管隧道工程平面控制网等级应符合表 5.2.3 的规定，并应根据其施工允许误差确定测量等级，测量方法、布点等应符合现行《沉管法隧道施工与质量验收规范》(GB 51201)的有关规定。

表 5.2.3 内河沉管隧道工程平面控制测量等级

隧道总长 L (m)	跨越水域宽度 L_0 (m)	测量等级
$5\,000 > L \geq 3\,000$	$L_0 \geq 500$	二等
$2\,000 \leq L < 3\,000$	$300 \leq L_0 < 500$	三等
$1\,000 \leq L < 2\,000$	$150 \leq L_0 < 300$	四等
$L < 1\,000$	$L_0 < 150$	一级

注：当按隧道总长或跨越水域宽度确定的测量等级不一致时，宜按精度高的等级执行。当内河隧道总长 $L \geq 5\,000\text{m}$ 时，应按照表 5.2.2 的要求执行。

5.2.4 卫星定位平面控制测量等级的主要技术指标应符合表 5.2.4 的规定。

表 5.2.4 卫星定位平面控制测量等级的主要技术指标

测量等级	固定误差 a (mm)	比例误差系数 b (mm/km)	基线边方位角中误差 (")
一等	≤ 5	≤ 1	≤ 1.0
二等	≤ 5	≤ 1	≤ 1.3
三等	≤ 5	≤ 2	≤ 1.7
四等	≤ 5	≤ 3	≤ 2.0

5.2.5 卫星定位测量作业技术要求应符合表 5.2.5 的规定。

表 5.2.5 卫星定位测量作业技术要求

项目	测量等级			
	一等	二等	三等	四等
接收机类型	双频	双频	双频	双频/单频
仪器标称精度 (mm)	$5 + 1 \times 10^{-6} \times d$	$5 + 1 \times 10^{-6} \times d$	$5 + 1 \times 10^{-6} \times d$	$5 + 2 \times 10^{-6} \times d$
卫星截止高度角 (°)	≥ 15	≥ 15	≥ 15	≥ 15
同时观测有效卫星数 (个)	≥ 4	≥ 4	≥ 4	≥ 4
时段长度	$\geq 23\text{h}$	$\geq 4\text{h}$	$\geq 90\text{min}$	$\geq 60\text{min}$
观测时段数	≥ 3	≥ 2	≥ 2	≥ 1
数据采样间隔 (s)	10 ~ 30	10 ~ 30	10 ~ 30	10 ~ 30
位置精度因子 (PDOP)	≤ 6	≤ 6	≤ 6	≤ 6

注： d ——基线长度 (km)。

5.2.6 全站仪导线可布设成附和导线、闭合导线或导线网。各等级全站仪导线测量的主要技术要求应符合表 5.2.6 的规定。

表 5.2.6 全站仪导线测量的技术要求

测量等级	测角中误差 (")	测距相对中误差	方位角闭合差 (")	导线全长相对闭合差	测回数		
					0.5"级全站仪	1"级全站仪	2"级全站仪
二等	1	1/250 000	$\pm 2 \sqrt{n}$	1/100 000	6	9	—
三等	1.8	1/150 000	$\pm 3.6 \sqrt{n}$	1/55 000	4	6	10
四等	2.5	1/100 000	$\pm 5 \sqrt{n}$	1/40 000	4	4	6

注： n ——附和导线、闭合导线中的测角个数。

5.2.7 三角形网测量的等级划分及主要技术要求应符合表 5.2.7 的规定。

表 5.2.7 三角形网测量的主要技术要求

测量等级	测角中误差 (")	三角形最大闭合差 (")	测边相对中 误差	测回数		
				0.5"级全站仪	1"级全站仪	2"级全站仪
二等	1.0	3.5	1/250 000	6	9	—
三等	1.8	7.0	1/150 000	4	6	9
四等	2.5	9.0	1/100 000	2	4	6

5.2.8 跨海沉管隧道高程控制测量等级应符合表 5.2.8 的规定，并应根据其施工允许误差确定测量等级，测量方法、布点等宜进行专项设计。

表 5.2.8 跨海沉管隧道高程控制测量等级

控制网类别	测量等级	测量方法	用途
高程基准传递网	一等	水准测量、跨河水准测量	高程基准引测及跨海两岸高程联测
首级高程控制网、 首级加密施工控制网	二等	水准测量、跨海高程传递测量	测量基准高精度施工测量
一级施工加密控制网	三等	水准测量、三角高程测量、 跨海高程传递测量	局部施工测量
二级施工加密控制网	四等	水准测量、三角高程测量、 跨海高程传递测量	附属设施及其他施工测量

条文说明

随着沉管隧道建设技术的发展，国内已经实施了沉管隧道跨越水域宽度超过 5km 的港珠澳大桥岛隧工程及深中通道岛隧工程。该测量控制网均采用专项设计，其中，首级高程控制网按照《国家一、二等水准测量规范》(GB/T 12897—2016) 中一等水准要求施测，首级加密控制网按照《国家一、二等水准测量规范》(GB/T 12897—2016) 中二等水准要求施测。

5.2.9 内河沉管隧道高程控制测量等级应符合表 5.2.9 的规定，并应根据其施工允许误差确定测量等级，测量方法、布点等应符合现行《沉管法隧道施工与质量验收规范》(GB 51201) 的有关规定。

表 5.2.9 内河沉管隧道高程控制测量等级

隧道总长 L (m)	跨越水域宽度 L_s (m)	测量等级
$5\,000 > L \geq 3\,000$	$L_s \geq 500$	二等
$1\,000 \leq L < 3\,000$	$150 \leq L_s < 500$	三等
$L < 1\,000$	$L_s < 150$	四等

注：当按隧道总长或跨越水域宽度确定的测量等级不一致时，宜按精度高的等级执行。当内河隧道总长 $L \geq 5\,000\text{m}$ 时，应按照表 5.2.8 的要求执行。

5.2.10 三角高程测量的主要技术要求应符合表 5.2.10 的规定。

表 5.2.10 三角高程测量的主要技术要求

测量等级	边长 (m)	观测次数	对向观测高差 较差 (mm)	附和路线或闭合环 高差闭合差 (mm)	检测已测测段的 高差之差 (mm)
三等	≤600	2 组对向观测	$25 \sqrt{D}$	$12 \sqrt{\sum D}$	$\pm 20 \sqrt{\sum L_i}$
四等	≤800	1 组对向观测	$40 \sqrt{D}$	$20 \sqrt{\sum D}$	$\pm 30 \sqrt{\sum L_i}$

注：D——三角高程测量边长(km)； $\sum L_i$ ——测段间累计测距边长(km)。

5.2.11 卫星定位高程测量主要技术要求应符合表 5.2.11 的规定。高程异常模型宜综合利用卫星定位测量、水准测量、重力测量、地形测量及重力场模型等资料，按物理大地测量计算方法获得。

表 5.2.11 卫星定位高程测量主要技术要求

等级	模型内符合中误差 (mm)	模型外符合中误差 (mm)	检测较差 (mm)
四等	2.0	3.0	6.0

条文说明

高程异常变化平缓的平原、盆地或面积小于 30km² 区域，可以采用“四参数”模型 (Δ_x 、 Δ_y 两个平移参数，旋转参数 θ ，尺度缩放参数 k)。高程异常变化剧烈的山地、丘陵或大于 30km² 的区域，可以采用“七参数”模型 (Δ_x 、 Δ_y 、 Δ_z 三个平移参数， ω_x 、 ω_y 、 ω_z 三个旋转参数，尺度缩放参数 k)。

5.2.12 当水准路线跨越江河或海域时，应采用跨河(海)水准测量方法进行高程传递，并应符合下列规定：

- 1 当跨河(海)视线长度超过 3.5km 时，可采用经纬仪倾角法、三角高程法，并进行专项设计。
- 2 当二等水准视线长度不超过 100m，三、四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。
- 3 当二等水准视线长度超过 100m，三、四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。

5.2.13 施工控制网复测频率应符合下列规定：

- 1 施工加密控制网应根据实际情况进行复测，两次复测的间隔时间不应超过 3 个月。
- 2 沉管隧道两端衔接段的施工控制网宜每 3 个月复测一次，每月尚应对控制点进

行稳定性检核。

3 管节浮运与沉放对接测量及贯通测量施工控制网宜在管节安装前进行一次复测。

5.3 管节预制测量

5.3.1 管节预制测量应包括控制网测量、模板测量、钢端壳测量和舾装预埋件测量等。

5.3.2 管节预制、钢壳制造控制网的布网形式、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》(GB 50026—2007)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。广州洲头咀隧道和车陂南隧道沉管管节采用干坞法预制工艺，平面控制网按照《工程测量规范》(GB 50026—2007)中三等边角网精度布设，高程控制网按照国家三等水准测量精度布设。

5.3.3 管节预制、钢壳制造控制网布设应符合下列规定：

- 1 应先建立场区控制网，再建立管节预制、钢壳制造控制网。
- 2 场区控制网的坐标系统应与工程设计采用的坐标系统相同。

5.3.4 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 当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 当钢端壳采用二次安装成型时，宜采用全站仪极坐标法，辅以钢尺量距测量。
- 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，并宜选择无风或微风、温差不大于 10℃ 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。

5.3.5 钢壳混凝土管节在钢壳块体、节段拼装焊接完成后，应分别对节段三维线形、总体尺寸和净空尺寸进行测量。

5.3.6 管节预制完成后，应对成型管节的三维线形、总体尺寸和净空尺寸进行测量。

5.3.7 沉管隧道模板、舾装预埋件等宜采用配备自动跟踪、非接触功能的极坐标放样方法进行测量。

5.3.8 管节一次舾装完成后，应对管节进行标定测量。标定测量应符合下列规定：

- 1 管节标定测量可分为一次标定测量和二次标定测量。
- 2 一次标定测量应在管节端封墙临时水密门关闭前完成，确定管节坐标系下管节顶面特征点、管节端面特征点、测量设备安装点和管内贯通测量标志点等之间的空间关系。
- 3 二次标定应在测量塔、拉合单元等安装完成后进行，通过将管节顶面特征点与测量塔标志点进行联测，获取测量塔各标志点的管节坐标系坐标。
- 4 标定测量应采用固定的仪器、固定的点位。标定测量时管节宜坐底处于静止状态。

条文说明

管节坐标系以管节端面特征点为基础，以管节实际轴线在管节底面的投影为 X 轴，并以指向 GINA 止水带端的方向为 X 轴正方向； X 轴与管节 GINA 止水带端钢端壳底边线交点为原点 O ，使用左手法则建立 Y 坐标轴。过原点 O 做垂直与 XOY 平面的线为 Z 轴，并以向上方向为 Z 轴正方向。管节坐标系设立可参考图 5-1。

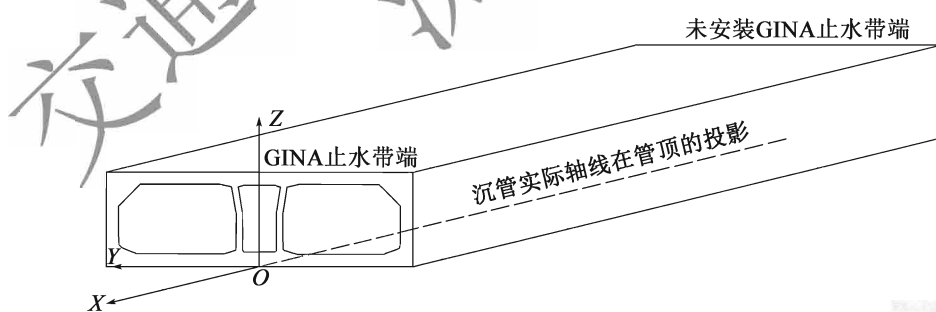


图 5-1 管节坐标系示意图

5.4 管节浮运与沉放对接测量

5.4.1 管节起浮及浮运过程中，应利用管内安装的姿态仪对管节横摇、纵摇姿态进行实时监控，通过浮运导航系统对管节航迹进行实时监控。

5.4.2 管节对接测量的绝对定位测量可采用全站仪极坐标法或 GNSS-RTK 法，相对定位测量可采用声呐法或机械拉线法。

条文说明

采用全站仪极坐标法时，在管节顶部设置测量塔，塔顶安装棱镜，管节沉放过程中，通过全站仪测定棱镜的坐标，再解算得到管节特征点的位置。

采用 GNSS-RTK 法时，在管节顶部设置测量塔，塔顶安装 GNSS 天线，管节沉放过程中，确定 GNSS 天线的坐标，再解算得到管节特征点的位置。

采用声呐法时，在待沉管节对接端和已沉管节自由端设置超声波发射换能器和接收换能器，测量两个管节间的距离，通过距离交会得到待沉管节相对于已沉管节的实时位置。

采用机械拉线法时，在待沉管节对接端和已沉管节自由端设置拉线单元、距离传感器、感应板等传感器，通过传感器进行水下距离测量，进而得到待沉管节对接端相对于已沉管节自由端的位置。

5.4.3 管节对接测控系统选择应满足下列要求：

1 管节顶部宜设置双测量塔。当水深或流速过大可能造成测量塔变形或倾斜时，可在测量塔顶部安装姿态仪予以测量塔定位误差修正。测量塔顶相对管节变形不宜超过 15mm。

2 当管节距岸边视线长度小于 1km 时，可采用全站仪极坐标法、GNSS-RTK 法或两者组合形成的测量定位系统，并辅以姿态传感器组成的测量定位系统进行管节安装定位。

3 当管节距岸边视线长度大于 1km 时，可采用全站仪极坐标法、GNSS-RTK 法、声呐法、机械拉线法或两者组合形成的测量定位系统，辅以姿态传感器、陀螺定向仪等组成的测量定位系统进行管节安装定位。

4 浑浊度较高、悬浮物较多的水域不宜采用声呐法。

5 水流较大时不宜采用机械拉线法。

6 当同时采用全站仪极坐标法和 GNSS-RTK 法组合测量定位时，管节沉放阶段宜以 GNSS-RTK 法定位为主，管节对接阶段宜以全站仪极坐标法测量定位为主。

7 当管节单向沉放安装超过 3km 时，宜在中部增设陀螺定向仪测量定向边的方位角，对导线测量方位角进行修正。

5.4.4 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测量塔定位设备和管内姿态仪。

3 管节安装宜由管节姿态监测子系统进行管节测控，GNSS-RTK 法与全站仪极坐

标法的测量结果应进行相互检核，并应由潜水员配合探摸检查。

4 管节测量塔应至少各安装两台 GNSS 天线，标称精度应满足水平精度为 $\pm(8 + 1 \times 10^{-6}D)$ mm、垂直精度为 $\pm(15 + 1 \times 10^{-6}D)$ mm 的要求，其中， D 为基线长度(km)。

5 管内应至少安装两台姿态仪，标称精度为 $\pm 0.005^\circ$ 。

6 管节沉放期间宜采用 GNSS-RTK 法采集管节管顶特征点坐标并传输至管节姿态监测子系统进行比对，平面坐标允许误差为 ± 20 mm，高程坐标允许误差为 ± 20 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管节姿态监测子系统进行比对，平面坐标允许误差为 ± 20 mm，高程坐标允许误差为 ± 20 mm。

5.4.5 水下端部块体顶推式最终接头对接测量可采用摄像法、机械拉线法或两者组合。

条文说明

随着预制顶推式沉管最终接头工法的应用，传统的测量塔定位方法难以满足最终接头安装定位的要求。一般可通过在最终接头顶推端、对接端分别安装摄像仪或机械拉线设备。最终接头顶推安装开始后通过启动测量系统实时测量显示最终接头与对接端的距离、轴线偏差等数据，指导沉管合龙。条件允许时，宜同时安装两套系统进行相互校核。

5.4.6 管节安装前，应提前 2~3d 对测量控制点进行检测。

5.5 贯通测量

5.5.1 管节安装后应及时对管节轴线、高程、姿态(纵倾及横倾)、结合腔错台等进行管节贯通测量。全隧贯通后应进行全隧道贯通测量。

5.5.2 隧道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卫星定位平面控制网，洞内平面控制网采用导线网。
- 3 管节内支导线的布设形式应结合管节结构形式、压载设施等影响通视条件的因素综合考虑；通视条件允许时，应布设成双线形联合锁网。

5.5.3 每个管节安装完成后应测量复核对接轴线，对两端对接情况进行线形拟合，并应进入管节内部测量管节轴线、里程、纵坡、横倾等参数。

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，并根据线形调整方案确定下节管节垫层高程、轴线位置等线形参数。

5.5.4 沉管隧道贯通前，宜通过测量塔投点测量复核导线贯通测量方法的准确性。

条文说明

为验证贯通测量方法的准确性，在管节沉放过程中，通过测量塔顶端的 GNSS 天线与施工控制网、采用快速静态测量方法联测，并将测量塔顶端坐标投影到管节内连接点，从而得到该点的坐标；同时，根据洞内导线网的成果、采用全站仪测量管节内连接点坐标。通过比较两种方法得到的连接点坐标，验证贯通测量方法的准确性。

5.5.5 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 大型临时工程施工应根据设计文件,结合场地周边环境、水文地质、交通及施工工艺等编制相应的专项施工方案。

6.1.2 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、现场搅拌站设置、大宗材料和散体物料堆场等因素。预制区总平面应结合管节预制工法,根据管节平面尺寸、管节数量、施工工期、生产强度要求及经济性等因素设计。

条文说明

干坞法和工厂法预制场的建设内容和功能区有所不同,干坞法预制场的预制区主要是指干坞,而工厂法预制管节是在工厂厂房内(预制区)进行的。预制区总平面设计的关键是生产线数量、预制台座的确定及各功能区的布置。管节的生产强度要求是在分析确定单个管节生产周期的基础上根据施工工期要求确定的,管节生产线和预制台座的数量根据生产强度要求考虑模板周转、场地大小及经济性确定。

6.1.3 工厂法和干坞法预制管节宜优先考虑在坞内寄放。采用坞外寄放时,寄放区应选择在非通航水域,水深、风浪、水流等应满足管节寄放安全性要求。寄放区面积应综合考虑预制及安装进度、管节数量、二次舾装等因素。

6.1.4 管节运输航道设置应符合下列规定:

1 管节运输航道应综合考虑现有航道、水流及波浪条件、运输距离、管节尺寸、管节水上运输掉头区、管节安装顺序和航道疏浚量等因素,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 管节运输航道应优先利用既有航道。无既有航道或管节运输作业对航运造成较大影响时,应经设计并报政府主管部门批准后新开挖管节运输航道。管节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,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。

6.1.5 管节采用驳运时，现场下潜区宜在靠近水上运输通道及基槽附近设置，下潜区水深、底部尺寸应满足半潜驳或浮船坞安全下潜及管节离驳、浮运要求。

6.1.6 管节预制场平面设计应根据管节预制工艺，合理布置钢筋加工区、钢壳卸驳区、混凝土生产运输区、浇筑区、舾装区、材料堆放区和临时码头等临时工程。

6.1.7 预制场建设完成后应及时进行试车。

6.1.8 管节运输过程的应急避风码头及防台区应优先选择在有掩护水域，并应与主航道保持安全距离。水深应满足管节吃水深度要求，并预留至少 1.5m 的安全余量。防台区边界应设置航标、夜间警示灯及浮标，间距宜不大于 50m。

6.2 管节预制场

6.2.1 管节预制场的平面尺寸应综合考虑管节预制工艺、管节平面尺寸、施工通道、外侧模体系尺寸、模板拆除端部出腔所需富余空间、周围排水系统布置等因素，并结合安全富余宽度确定。

6.2.2 采用干坞法预制管节时，进出干坞的通道的布置应综合考虑场内道路、运输车辆、道路坡度、运输强度等因素。干坞内应配置满足 10 年一遇暴雨重现期排水能力的排水设施。

6.2.3 干坞施工应符合现行《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120)和《建筑深基坑工程施工安全技术规范》(JGJ 311)的有关规定。基坑开挖至坞底时，应复核地基承载力是否符合设计要求。

6.2.4 钢筋混凝土管节工厂法预制场工艺设计及平面布置应符合下列规定：

1 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。

2 预制生产线布置应能形成流水化生产，满足管节钢筋加工、钢筋笼绑扎与运输、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。

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 混凝土生产区宜邻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、集料堆场、外加剂库房等。

6 混凝土浇筑区应配置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 混凝土拌和站宜根据夏季施工要求设置制冰或冷水机组,冬期施工应配置加热与保温措施。

6.2.5 钢壳混凝土管节预制生产线布置在船坞或干坞内时,应满足钢壳制作、混凝土浇筑、一次舾装、二次舾装及起浮出坞等功能要求。

6.2.6 钢壳混凝土管节工厂法预制场工艺设计和平面布置应符合下列规定:

1 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、浇筑区及浅坞区宜在同一轴线。

2 钢壳主体结构应在专业化加工厂内制作。

3 钢壳单元拼装生产线布置在船台时,应能形成流水化生产,满足钢壳上驳、驳运、卸驳等功能要求。

4 钢壳卸驳码头宽度设置应考虑钢壳尺寸、船舶尺寸及施工通道等因素。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。

6.2.7 浮坞法管节预制场工艺设计和平面布置应符合下列规定:

1 浮坞法预制场应优先考虑布置在隧址附近,宜采用浮船坞或半潜驳坐底方式施工。

2 浮坞选型应考虑管节平面尺寸与重量、船舶载重量与甲板有效面积、船体结构刚度、最大下潜深度等因素,并应满足单次预制管节数量、预制精度和变形等要求。

3 管节预制台座和作业通道应沿浮船坞或半潜驳甲板纵轴线对称布置。管节预制台座应设置找平层、脱模层,满足场地平整度及管节起浮要求。

4 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。

5 管节预制测量体系应基于浮船坞或半潜驳船体本身独立建立。

6 浮坞下潜区深度应满足浮船坞或半潜驳在管节起浮脱离后能继续下沉,且甲板面与管节底部安全距离不少于0.5m等要求。

7 管节预制前,应对浮船坞或半潜驳支撑体系的强度及刚度进行复核。

6.3 寄放区

6.3.1 采用坞内寄放管节时，管节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，水深应满足管节系泊设计要求。当寄放区水深不足时，应按现行《疏浚与吹填工程施工规范》(JTS 207)要求进行疏浚，并应根据所处水域回淤情况预留备淤深度。

6.3.3 采用坞外坐底寄放管节时，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，整平允许精度误差为 $\pm 40\text{mm}$ 。

条文说明

本条参考《码头结构施工规范》(JTS 215—2018)中对重力式码头抛石基床细平的允许偏差。

6.3.4 采用坞外坐底寄放管节时，系泊系统设计应基于寄放区极端水文气象组合工况，综合考虑最不利水流力、波浪力及管节抗滑力等协同作用，并通过数值模拟或物理模型试验验证。采用坞外漂浮寄放管节时，系泊系统设计还应考虑最不利风速、波浪参数等因素。

6.4 管节运输航道

6.4.1 管节运输航道水深应满足管节吃水、航行时下沉、富余深度和备淤深度要求，航道开挖应按照设计水深控制。

6.4.2 管节长距离海上运输时宜靠近海岸线，并宜设置临时避风区。复杂区段管节运输航道应通过专项研究确定。

6.4.3 应定期对航道回淤进行监测并清淤，回淤速率超过每月 10cm 时宜调整航道设计或施工计划。

6.4.4 航道上方净空高度应满足拖轮桅杆高度与安全余量之和的要求，从桥下通过时应结合通航孔尺寸动态调整编队宽度；航道边界宜布设防撞浮筒及橡胶护舷，关键区

域应设置防撞桩。

6.4.5 管节施工区域与原有通航航道交叉或占道时，宜设计新的临时通航航道，并进行通航论证。

6.4.6 出坞段航道的布置应考虑航道水流、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出坞段航道的宽度应考虑管节两侧富余宽度。采用绞移浮运时单侧富余宽度宜不小于 5.0m，采用拖轮拖航时单侧富余宽度宜不小于 20.0m。
- 2 对设置坞门需重复使用的干坞，宜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。

6.4.7 管节运输航道疏浚与维护施工应符合现行《疏浚与吹填工程施工规范》(JTS 207)的有关规定。

6.5 临时码头

6.5.1 临时码头的选址应符合下列规定：

- 1 水域开阔，波浪高度宜不大于 0.5m，流速宜不大于 0.8m/s。
- 2 用于浮态浇筑管节的码头前沿水深应不小于沉管吃水深度 + 1.5m 安全余量。
- 3 码头场址应与桥梁、高压线、水下管线等构筑物保持安全距离。
- 4 码头陆域应满足重型设备(如门式起重机、运输车辆)通行要求。

6.5.2 临时码头的平面布置应综合考虑工程所需地材量、交通量、管节出运工艺、岸线水文条件等因素，临时码头的进出航道不宜与管节出运航道交叉。

6.5.3 新建临时码头或改造既有码头总平面应根据码头运输工艺要求进行设计，并应考虑其运输能力要求、承载能力要求和使用期限等因素。

6.5.4 临时码头的承载能力要求应根据起重机、罐车、泵车等设备确定。

6.5.5 钢壳混凝土管节预制场临时码头的设计应满足钢壳管节的上驳、卸驳工艺要求，具体应符合下列规定：

- 1 码头宜设置滑移轨道，轨道坡度应不大于 1%，末端与驳船甲板衔接高宜不大于 10mm。
- 2 卸驳宜优先选择平潮期，码头与驳船高差应不大于 200mm，利用潮位自然

调平。

- 3 可设置液压升降平台，以补偿潮位变化的影响。
- 4 码头卸驳区宜预埋钢支座，支座顶部设橡胶垫层，避免钢壳底部应力集中。

6.5.6 临时码头应设置防洪、防风、防滑等措施，并应配置足够的安全设施和应急救援设备。

6.5.7 对既有码头改造前应进行码头结构可靠性评估，不满足承载能力要求的构件应进行加固。

交通运输部信息公开
浏览专用

7 管节预制与场内移运

7.1 一般规定

7.1.1 管节预制前应组织施工图会审，并根据施工图要求编制管节预制专项施工方案。

7.1.2 钢筋混凝土管节预制施工前，应针对管节防渗、控裂要求进行专项研究和试验，确定管节混凝土原材料、最优配合比、施工工艺、装备配置、养护工艺，制定混凝土控裂措施。原材料选择和混凝土配制应满足混凝土耐久性指标要求。

条文说明

沉管隧道所处环境复杂，使用要求高，故对混凝土管节耐久性、防渗、裂缝控制等性能参数提出了相关要求。因此需要结合工程实际，开展针对性研究，包括文献调查、理论研究、建模分析等，优选适宜的原材料、进行混凝土配合比设计、优化施工工艺，以及对关键装备进行研发。开展管节局部模型试验，必要时开展足尺模型试验，对配合比、混凝土性能参数及工艺进行验证。

7.1.3 腐蚀环境下服役的沉管隧道采用钢筋混凝土管节结构的，管节预制时应通过检测电导率确认钢端壳、外露预埋件与管节内部钢筋之间的绝缘状况。

条文说明

如果沉管钢端壳、外露预埋件与沉管混凝土中的钢筋通过直接接触或其他途径实现了电连接，则可能因为服役过程中钢材腐蚀环境的差异导致钢端壳、外露预埋件和钢筋之间存在电位差，加速腐蚀。因此，在河口或跨海等腐蚀环境下进行沉管隧道管节制作时，需要严格限制钢筋与钢端壳、外露预埋件的电连接。

7.1.4 钢筋混凝土管节预制模板宜采用模块化移动式支架模板体系。

7.1.5 管节预制过程中，在混凝土配合比设计、混凝土浇筑阶段应严格控制混凝土密度，混凝土密度的允许偏差应满足设计要求，设计无要求时宜在 $\pm 50\text{kg/m}^3$ 范围内。

条文说明

混凝土密度直接影响管节干舷，对管节浮运、沉放作业影响大。密度偏大时，管节起浮困难或干舷偏小；密度偏小时，管节干舷偏大或压载要求高。广州车陂南隧道和洲头咀隧道管节混凝土密度控制偏差范围均为 $\pm 50\text{kg/m}^3$ ；港珠澳大桥岛隧工程沉管隧道及大连湾海底隧道沉管管节混凝土密度控制偏差范围均为 $\pm 30\text{kg/m}^3$ 。

7.1.6 钢筋混凝土节段式管节应按节段进行全断面一次性浇筑。采用干坞法预制的节段式管节宜沿纵轴线方向节段间隔施工，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。

7.1.7 钢筋混凝土整体式管节宜按纵向分段全断面一次性浇筑，采用分段连续浇筑的，浇筑间隔时间不应大于7d。采用分段跳仓浇筑的，分段之间可设置后浇带。浇筑长度应根据管节设计长度、断面尺寸、控裂要求、现场条件等因素综合确定，宜取15~20m。

条文说明

受实际施工能力限制，一般需要对整体式管节进行分段浇筑，在分段施工长度内全断面浇筑混凝土。经验表明，全断面浇筑是控制结构裂缝的有效措施。整体式管节采用分段连续浇筑的，浇筑间隔时间是后期混凝土收缩控裂的关键因素。管节分段之间采用设置后浇带进行预制时，一般将管节暂时划分为若干分段，一段时间后已浇筑分段混凝土完成收缩，再浇筑分段结合部混凝土，从而将管节连成整体。

7.1.8 钢壳混凝土管节浇筑前，应针对混凝土微膨胀或低收缩工作性能、隔仓顶部脱空控制要求、钢壳变形控制要求等开展专项研究、数值模拟和工艺试验，确定混凝土最优配合比、浇筑工艺、装备及参数。

条文说明

钢壳混凝土沉管隧道要求施工过程中严格控制钢壳结构变形、隔仓脱空。需结合工程项目实际，采用文献调研、理论研究、数值模拟等手段，优选施工工艺，开展局部模型或足尺模型试验，对配合比、混凝土施工性能参数及工艺进行验证，必要时，可研发专用装备。

7.1.9 管节几何尺寸应满足设计允许偏差要求。

7.2 混凝土原材料及配合比设计

7.2.1 混凝土原材料性能指标波动范围应满足规范要求，集料含泥量、含水率等关

键指标应严格控制波动幅度。

7.2.2 钢筋混凝土管节混凝土原材料的性能应符合下列规定：

1 水泥应采用不低于 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《通用硅酸盐水泥》(GB 175—2023)的规定，水泥的 C3A 含量宜不大于 8%。

2 粗集料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/T 14685—2022)中 I 或 II 类碎石要求。

3 细集料宜采用级配良好无碱活性中砂，细度模数宜控制在 2.4~3.0 之间，含泥量不大于 1.0%，泥块含量不大于 0.5%，氯离子含量不大于 0.02%，其他指标应符合现行《建筑用砂》(GB/T 14684)的规定。

4 粉煤灰宜采用符合《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》(GB/T 1596—2017)规定的 I 级、II 级粉煤灰。

5 矿渣粉应选用 S95 级及以上等级，其性能指标应满足《用于水泥、砂浆和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》(GB/T 18046—2017)中磨细粒化高炉矿渣粉的要求。

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

沉管管节的混凝土细集料一般采用天然河砂。砂的细度模数控制在 2.4~3.0 之间，有利于控制混凝土工作性能的稳定性，降低混凝土的开裂风险。

大连湾海底隧道项目由于当地缺乏天然河砂，对采用机制砂进行了专项论证，在实际工程中应用机制砂配制沉管管节混凝土，也取得了预期效果。机制砂生产选用干法风选工艺，该工艺可将机制砂中石粉含量控制在 $(10 \pm 2)\%$ 之间。机制砂加工破碎过程容易损伤造成一些微裂纹，吸水率略大于河砂。最终生产的混凝土和易性、保水性、强度、耐久性满足要求。混凝土密度略大于天然河砂配制的混凝土，混凝土表面抗裂性会受石粉含量影响而增加。

7.2.3 钢筋混凝土管节混凝土配合比设计应按现行《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55)的有关规定执行，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 混凝土抗裂性能可通过开裂敏感性试验进行评价。

3 混凝土配合比设计应通过使用级配、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 混凝土配制宜采用大掺量矿物掺合料的胶凝材料体系，降低水化热。单掺、混掺矿物掺合料的适宜掺量范围应符合表 7.2.3 的规定。

表 7.2.3 管节混凝土矿物掺合料组成

矿物掺合料种类	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	30 ~ 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、工作性能等因素确定，胶凝材料用量宜控制在 $360 \sim 450 \text{kg/m}^3$ 之间，混凝土水胶比宜控制在 $0.32 \sim 0.45$ 之间。

6 混凝土坍落度应根据浇筑施工工艺进行选择，泵送混凝土坍落度宜控制在 $180 \sim 220 \text{mm}$ 之间，坍落扩展度宜控制在 $400 \sim 550 \text{mm}$ 之间。

条文说明

采用大掺量矿物掺合料有利于降低混凝土水化热、改善工作性能及降低成本。为保证混凝土工作性能、力学性能、耐久性能及体积稳定性，优先采用硅酸盐水泥。

管节混凝土浇筑作业受钢筋影响工作空间狭窄，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，坍落度上限为 220mm ，在此范围，增加扩展度检测，检验混凝土的工作性能。

7.2.4 钢壳混凝土管节混凝土原材料的性能应符合下列规定：

- 1 水泥、粉煤灰、矿粉、减水剂的材料性能应符合本规范第 7.2.2 条的相关规定。
- 2 粗集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宜不大于 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 7.2.4 的规定，其他性能应满足《建设用卵石、碎石》(GB/T 14685—2022) 中 I 类或 II 类碎石要求。

表 7.2.4 粗集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	≤ 0.2

3 细集料宜采用河砂，级配宜为 II 区的中粗砂，细度模数宜为 $2.4 \sim 3.0$ ，其他性能应符合现行《建筑用砂》(GB/T 14684) 的规定。

4 采用硅灰、石灰石粉等其他掺合料时，应通过试验验证，确保混凝土性能满足工程应用要求，并符合现行《砂浆和混凝土用硅灰》(GB/T 27690) 及《石灰石粉混凝土》(GB/T 30190) 等标准的有关规定。

5 必要时，可使用具备引气、增稠等复合性能的减水剂、微膨胀剂等。减水剂的性能应符合现行《混凝土外加剂》(GB/T 8076) 的有关规定。

7.2.5 钢壳混凝土管节自密实混凝土配合比设计除应符合现行《自密实混凝土应用

技术规程》(JGJ/T 283)的规定外,尚应符合下列规定:

- 1 配合比设计应考虑管节隔仓结构形式、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、工作性能等要求。
- 2 配合比设计宜采用绝对体积法。
- 3 水胶比宜不大于0.45,胶凝材料用量宜控制在 $400 \sim 600\text{kg}/\text{m}^3$ 之间。
- 4 钢壳自密实混凝土拌合物应检测扩展度及保持扩展度稳定的时间,可选择L形仪流动高度比、V形漏斗时间等指标组合控制。选取的指标应经过工艺验证性试验后采用。

条文说明

钢壳沉管管节混凝土扩展度稳定的时间为可浇筑时间,自密实混凝土在可浇筑时间内完成浇筑可实现在钢壳中的填充效果。根据深中通道的大数据分析及现场混凝土质量控制经验,当自密实混凝土扩展度指标超出 $600 \sim 720\text{mm}$ 时,浇筑后的隔仓脱空可能无法满足设计要求。

7.3 节段式钢筋混凝土管节预制

7.3.1 节段式钢筋混凝土管节预制模板设计应符合下列规定:

- 1 模板及支架应根据安装、使用、拆除、循环流水等工况进行设计,并应满足承载力、刚度和整体稳定性要求。
- 2 预制台座或底模结构应满足施工承载力的要求,干坞法预制时尚应采取支垫木板、竹胶板、牛皮纸等措施减少管节起浮的吸附力。
- 3 外侧模宜设置混凝土浇筑侧压力反力支撑结构。无法设置时,侧模与内模间可采用止水对拉杆或侧模撑杆及抗浮锚杆。

条文说明

节段式管节模板采用模块化移动式支架可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,需在干坞内灌水让管节起浮。一般而言,为满足管节安装要求,管节在干坞起浮时干舷较小,故要尽量减少管节起浮时与预制台座的吸附力。可采用混凝土垫层或透水槽作为底胎模结构,铺脱模层(如砂层加木板、竹胶板上铺设油毡原纸、牛皮纸等)。若管节底部设置有防水底钢板作为永久结构,则防水底钢板兼作脱模层。

大连湾海底隧道管节预制采用干坞法,在竹胶板上铺设2层油毡原纸及1层牛皮纸作为预制台座,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,拉杆孔可能成为侧墙的渗水通道,故优先选择在侧模外部设置支撑结构。

7.3.2 节段式钢筋混凝土管节预制模板制作安装与拆除应编制专项施工方案，进行技术论证，并符合下列规定：

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

2 混凝土浇筑完毕后，拆模时机应满足混凝土强度、保温、保湿要求。设计无特别要求时，应符合现行《混凝土结构工程施工规范》(GB 50666)的有关规定或经过专项验算。如采用止水对拉杆，模板拆除后，应修补侧墙上的预留孔，修补方案经工艺试验确定。

3 模板系统应进行定期保养，确保模板的各部件及部件之间的连接状态良好，各项允许偏差在允许范围内。

4 模板制作、安装的允许偏差值应符合表 7.3.2 的规定。

表 7.3.2 节段式钢筋混凝土管节预制模板制作及安装允许偏差

序号	检测项目	允许偏差(mm)		
		节段侧模板	节段内模板	节段端头模板
1	模板高程	±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

注：管节外形尺寸偏差影响管节自重和起浮干舷，需要严格控制模板制作、安装的允许偏差值。

7.3.3 节段式钢筋混凝土管节钢筋制作与安装应符合下列规定：

1 直径大于 25mm 的钢筋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 管节拉筋宜采用锚固板构造，并符合现行《钢筋混凝土用锚固板钢筋》(GB/T 42355)的有关规定。

3 管节主筋接头应设置在受力较小处。

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符合表 7.3.3-1 的规定。

表 7.3.3-1 钢筋加工允许偏差

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符合表 7.3.3-2 的规定。

表 7.3.3-2 钢筋安装允许偏差

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符合表 7.3.3-3 的规定。

表 7.3.3-3 钢筋笼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	混凝土浇筑养护后钢筋笼保护层偏差	-5, +15

条文说明

管节结构需要使用大量的箍筋，采用摩擦焊锚固板形式拉钩筋可以提高闭合箍筋的加工、安装工效和质量。这种形式的拉钩筋已在港珠澳大桥岛隧工程沉管隧道管节预制及大连湾海底隧道管节预制中成功应用。

管节钢筋保护层是重要控制指标，钢筋接头尽量避开框架节点；顶、底板横向跨中受力较大部位，尽量避免钢筋连接。

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

7.3.4 节段式钢筋混凝土管节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 混凝土生产前，应根据实测集料含水率调整混凝土实施配合比，并采用现场原材料对混凝土配合比进行复盘检验。
- 3 水泥在搅拌站的入机温度不宜高于 60℃。
- 4 混凝土搅拌投料顺序、搅拌时间应满足混凝土性能要求，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。
- 5 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。混凝土供应应连续不间断，且入模时混凝土均匀性和工作性能良好。

条文说明

水泥的入机温度低对控制混凝土的水化温升有帮助。若混凝土拌和系统制冰能力强可有效保障冰供应,则能较好控制入模温度,对水泥入机温度可不作限制。混凝土搅拌时间由混凝土出机性能要求决定。搅拌时间过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。

港珠澳大桥岛隧工程沉管混凝土搅拌时间为 120s,深中通道岛隧工程沉管自密实混凝土搅拌时间为 120s;大连湾海底隧道沉管混凝土搅拌时间夏季为 120s、冬季为 150s;广州车陂南隧道和洲头咀隧道预拌混凝土搅拌时间均由最初的 90s 调增为 120s。

7.3.5 节段式混凝土管节预制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。冬期施工应设置加热保温系统。
- 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 节段式钢筋混凝土管节混凝土浇筑除应符合现行《混凝土结构工程施工规范》(GB 50666)及《公路桥涵施工技术规范》(JTG/T 3650)的有关规定外,尚应符合下列规定:

- 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深度综合确定。
- 2 侧墙、中隔墙浇筑高度差应小于 1 m,浇筑速度应满足模板设计要求。
- 3 混凝土入模温度宜不大于 28℃,在气温较高的地区夏季施工时宜采用加碎冰或加冷水等方式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。
- 4 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、中隔墙浇筑高差太大可能导致模板变形超限。一般中隔墙浇筑高度比侧墙浇筑高度高 1m,轴线两边对称浇筑,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温差、表面与环境温差要求,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,对于降低混凝土的入模温度具有显著效果。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。

7.3.7 节段式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。冬期施工时，宜采用暖棚法养护。有条件时，可采用智能化养护，利用软硬件控制系统动态调整养护参数，温差超过规定值时可采用自动喷淋。

2 养护期混凝土的温度控制指标应符合表 7.3.7 的规定，并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不应低于 14d。

表 7.3.7 养护期混凝土温度控制指标

序号	项目	指标
1	混凝土内部最高温度	$\leq 70^{\circ}\text{C}$
2	混凝土内表温差	$\leq 25^{\circ}\text{C}$
3	混凝土表面温度与环境温差	$\leq 20^{\circ}\text{C}$
4	表面温度与养护水温差	$\geq 5^{\circ}\text{C}$ 且 $\leq 15^{\circ}\text{C}$
5	拆模后混凝土表面与环境温差	$\leq 15^{\circ}\text{C}$
6	养护湿度	$\geq 95\%$

3 养护过程中，应监测混凝土内部以及养护环境温度变化。

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的方式进行控制。

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 节段式钢筋混凝土管节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，钢端壳板材下料的平整度偏差宜不大于 1mm/m，出厂前应进行试拼验收。

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。钢端壳面板焊接应按照先对接后角焊的顺序进行，并应采取焊前固定措施减少变形。

3 钢端壳分段焊接时，焊口尺寸、焊接质量除应符合《钢结构工程施工质量验收标准》(GB 50205—2020)中二级焊缝的有关规定外，还应满足 GINA 止水带及 Ω 止水带压件螺栓孔孔距设计规定的偏差要求。设计未规定时，GINA 止水带接触面偏差应控制在 $\pm 5\text{mm}$ 范围内，每延米偏差应控制在 $\pm 3\text{mm}$ 范围内。

4 钢端壳采用一次安装成型工艺时，现场安装应设置临时支撑架，临时支撑架应满足抵抗浇筑混凝土时的变形控制要求。安装时应根据中线、基线等控制线确定半成品的安装位置，宜在半成品构件及安装支撑架相应位置标出控制线、安装编号。钢端壳拼装接缝划分应与 GINA 止水带压块接缝划分一致。

5 临时支撑架应满足抵抗浇筑混凝土时的变形控制要求，钢端壳安装时宜预留 2~3mm 负偏差并结合临时支撑架上的可调螺杆控制定位。管节混凝土浇筑过程中应监测一次成型钢端壳的变形情况，变形超出允许偏差时应及时调整。

6 钢端壳面板内侧转角处应设置注浆管。

7 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。钢端壳面板调整过程中，宜采取固定人员、固定仪器、固定测站及固定方法进行测量。

8 钢端壳的制作与安装偏差应符合表 7.3.8 的规定。

表 7.3.8 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	Ω 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

条文说明

一次安装成型钢端壳工艺，适用于不设置后浇带的管节预制，即整体式管节顺浇法预制、节段式管节工厂法流水匹配预制或节段式管节干坞法跳仓预制，可以节省二次安装钢端壳及在钢端壳面板与腹板之间空腔内灌浆的工序时间，避免与关键工序一次舾装交叉施工，从而不影响一次舾装关键工序时间，如襄阳项目整体式管节顺浇法预制、港珠澳大桥岛隧工程项目节段式管节工厂法流水匹配预制、大连湾海底隧道项目节段式管节干坞法跳仓预制等均采用了一次安装成型钢端壳工艺。

一次安装成型钢端壳一般由两块面板拼接成 L 形，且因防水要求不可在面板上开设透气孔，钢端壳 L 形内侧在混凝土浇筑时空气排出困难，因此在面板内侧转角处设置注浆管，防范使用期水沿着钢端壳边缘与混凝土交界处的缝隙渗漏。端部混凝土强度达到设计要求时开始注浆，注浆压力一般按照水压力的 1.5 倍考虑。

钢端壳的安装精度直接影响与 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设计要求。

7.3.9 节段式钢筋混凝土管节节段接头的可注浆式中埋钢边止水带、 Ω 止水带施工及水密性检查应符合下列规定：

1 安装止水带前应检查止水带外观情况，并借助钢尺等测量止水带尺寸规格，保障止水带满足使用要求。

2 可注浆式中埋钢边止水带接头不得设置在结构拐角处。

3 可注浆式中埋钢边止水带安装应固定在专门的钢筋夹或主筋上，止水带与水平夹角宜为 $15^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 。

- 4 可注浆式中埋钢边止水带中心线与节段接头中心线偏差不应超过 10mm，应在设计位置采用模具固定中埋止水带。
- 5 节段间 Ω 止水带应按照管节断面形式定制，在可注浆式中埋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 Ω 止水带应通过螺栓固定在 Ω 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 的规定。

表 7.3.9 节段间 Ω 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	Ω 止水带接触面平整度	每 0.5m $\leq$ 1

- 7 中埋式钢边止水带与节段间 Ω 止水带之间形成的空腔应设置检漏水管。
- 8 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，检查应在出厂前进行。

条文说明

中埋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 Ω 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 Ω 止水带空腔内注入有压水，检查中埋式止水带、 Ω 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，需要采取措施消除。

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。如港珠澳大桥岛隧工程沉管隧道项目中，埋深约为 25m 时，要求节段接头符合表 7-1 的规定，在 0.36MPa 水压作用下维持 2h 无压力下降。

表 7-1 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且混凝土强度及龄期达到设计要求后进行，安装、张拉与锚固除应符合现行《公路桥涵施工技术规范》(JTG/T 3650) 的相关规定外，尚应符合下列规定：

- 1 应配置张拉架辅助预应力张拉施工。

- 2 预应力张拉方向应垂直于管节端面，在管节断面方向左右对称进行。
- 3 两端头预留钢绞线工作段长度应满足张拉要求。
- 4 锚板应准确安装在锚垫板的限位槽内，再将工作夹片安装至每根钢绞线并打紧，使锚板不脱离限位槽。

7.3.11 节段式管节永久性预应力结构的孔道注浆应符合现行《公路桥涵施工技术规范》(JTG/T 3650)的有关规定。预应力钢束张拉完毕后宜采用真空辅助压浆工艺，真空泵最大工作压强不应低于0.1MPa。

7.3.12 节段式管节预制张拉完成后应采用全站仪、钢尺等对管节几何尺寸进行检查。

7.4 整体式钢筋混凝土管节预制

7.4.1 整体式钢筋混凝土管节模板设计除应符合本规范第7.3.1条的有关规定外，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。

7.4.2 整体式钢筋混凝土管节采用二次成型钢端壳时，钢端壳面板与腹板间应采用高强微膨胀砂浆灌注，且灌注施工应符合下列规定：

- 1 灌浆料应采用高强度、微膨胀、易流动及低水率的砂浆，强度等级应符合设计要求。
- 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0.35~0.5MPa之间，灌浆料强度应满足设计要求。
- 3 应逐一比对灌注施工过程中每个隔腔实际灌注量和理论灌注量。发现异常时应查明原因并采取措施。

7.4.3 整体式钢筋混凝土管节可采用预留后浇带法或顺浇法，混凝土浇筑除应符合本规范第7.3.6条的相关规定外，尚应符合下列规定：

- 1 浇筑宜从管节的一端往另一端推进，墙体及顶、底板的混凝土浇筑单层下料厚度不宜大于500mm。
- 2 应缩短每层下料间歇时间，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 后浇带混凝土强度应较相邻分段的混凝土强度高一个等级。后浇带宽度应满足设计要求，应采用微膨胀混凝土。

4 后浇带外侧模板可直接采用标准段的外侧钢模；内侧模板宜采用借助在相邻分段端部预埋螺母进行固定的钢-木结构模板。

5 后浇带主筋原则上不宜断开，如必须断开时，主筋需焊接，并且接头错开距离应大于 35 倍钢筋直径，且不小于 500mm。位于同一连接区段内的纵向受拉钢筋接头面积百分率不宜大于 50%。

6 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 42 ~ 60d。

7 后浇带内腔底板混凝土浇筑宜通过在顶板设置浇筑孔进行。

8 采用顺浇法时，应考虑不同季节温度变化的影响，采取优化混凝土配合比、保温、减少新旧分段浇筑间隔时间及新旧分段之间温度差等措施降低收缩开裂风险，并应采用数值模拟、模型试验、现场验证等方式验证控裂措施有效性。

9 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。

条文说明

预留后浇带法是整体式管节混凝土浇筑的常用方法，但后浇带留置期间钢筋会锈蚀，混凝土面会结垢污染，凿毛、清理、除锈困难，成为管节渗漏点和结构安全隐患。加之后浇带模板需要单独支设，无法实现相邻节段的顺序施工，工艺较为烦琐。

襄阳市东西轴线道路工程鱼梁洲段项目整体式钢筋混凝土管节全断面顺浇，大幅提高施工效率。但由于管节单次浇筑的整体尺寸较大，混凝土收缩总量较大，增加了管节本体的开裂风险。因此，采用顺浇法进行管节预制要开展专项控裂研究，在模拟分析和试验研究充分论证的基础上，明确控裂措施的有效性。

7.4.4 管节钢端壳制作及安装应符合下列规定：

1 钢端壳半成品制作、成品拼装及焊接工艺要求均按本规范第 7.3.8 条的相关规定执行。

2 钢端壳可采用二次安装成型工艺，应预先在管节端面设置型钢框架作为定位用的梁和柱，并与混凝土一起先浇筑，混凝土成型后应依托该梁和柱精确定位测控二次安装钢端壳面板。

3 钢端壳面板和腹板的翼缘板焊接时应考虑焊接变形并采取反变形措施。

4 钢端壳面板与腹板之间空腔内灌注高强无收缩砂浆，应按照本规范第 7.4.2 条的规定执行。

5 钢端壳的制作及安装允许偏差除应符合表 7.3.8 的规定外，尚应符合表 7.4.4 的规定。

表 7.4.4 钢端壳结构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	翼缘板宽或腹板宽	$500\text{mm} \leq W \leq 1\,000\text{mm}$	± 3	尺量或激光测距仪
		$1\,000\text{mm} \leq W \leq 2\,000\text{mm}$	± 4	
		$W \geq 2\,000\text{mm}$	$\pm (3 + W/2\,000)$	

注：W 指 H 形钢端壳的腹板宽或 L 形钢端壳的翼缘板宽。

条文说明

钢端壳分一次成型和二次成型。一次成型占用关键路线时间，难度大，成本略有优势。二次安装成型精度控制相对容易。

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采用循环水冷却。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°C ，且水温与内部混凝土的温差宜不大于 20°C ，降温速率宜不大于 $2^{\circ}\text{C}/\text{d}$ 。

7.5.2 钢筋混凝土管节混凝土施工控裂应符合下列规定：

1 混凝土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 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。

3 管节浇筑时应控制混凝土入模温度、内部最高温度及内表温差。

4 混凝土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。气温骤降时除应对混凝土外部加强覆盖保温外，尚宜适当延长养护时间。

5 后浇带防水构造应符合设计要求。后浇带浇筑应符合现行《补偿收缩混凝土应用技术规程》(JGJ/T 178) 的有关规定。

6 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。冬期施工混凝土暴露在负温环境时的强度应大于 10MPa 。

7.5.3 钢筋混凝土管节抗渗应符合下列规定：

1 管节自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，

混凝土抗渗等级应满足设计要求。

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

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、管节顶部人孔井、垂直千斤顶等交界部位的防水应采取加强处理措施,并与外防水涂层形成完整的防渗体系。

5 施工过程中应采取成品保护措施,不得损坏防水层。

7.5.4 管节混凝土生产过程温度监测应符合下列规定:

1 管节混凝土施工前应进行温度监测方案专项设计。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、冷却水温度、内表温差、降温速率、环境温湿度和风速等参数,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、安装及保护应符合现行《大体积混凝土施工标准》(GB 50496)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 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,并应采取加强保温等措施。

条文说明

混凝土管节具有对称轴线,因此仅选择管节平面对称轴线的一侧作为测试区。

7.5.5 整体式管节防水应符合下列规定:

1 管节混凝土防水应符合现行《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、埋设位置等应满足设计要求。

7.6 钢壳混凝土管节预制

7.6.1 钢壳宜在钢结构加工生产车间采用智能化、自动化加工与焊接工艺和设备制作。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 焊缝质量应符合设计和现行《钢结构工程施工质量验收标准》(GB 50205)的相关规定，受力板焊缝应进行 100% 无损探伤检测。

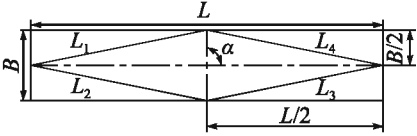
3 钢壳制作过程中，预留预埋件和工艺孔施工应统筹考虑，钢壳顶部孔洞应覆盖、排水通畅且不积水，浇筑混凝土时隔仓内应无积水和杂物。

4 钢壳内预留孔洞切口应打磨平整，隔舱内部应清理干净无杂物，制作及运输过程中预留孔洞应采用盖子覆盖。

5 钢壳沉管防腐涂装体系和牺牲阳极块的施工应满足设计要求，运输和施工过程中出现损坏的应在管节下水前完成修补。

6 钢壳主体实测项目及允许偏差应符合表 7.6.1 的规定。

表 7.6.1 钢壳主体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	管节宽度	-5, +15	尺量或激光测距仪：每 10m 一点
2	管节高度	-5, +20	尺量或激光测距仪：每 10m 一点
3	管节长度	$\pm [10 + (L - 20) / 10]$	尺量(或激光测距仪)：每管节 2 处，每处 1 个点
4	车道孔净宽	-5, +15	尺量或激光测距仪：每 10m 一个断面，每断面 3 个点
5	管廊净宽	± 5	
6	内孔净高	-5, +20	
7	构件厚度	± 10	尺量或激光测距仪：每 10m 一个断面，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	± 10	尺量或激光测距仪：10m 范围
9	顶板水平精度	± 15	尺量或激光测距仪：10m 范围
10	侧墙垂直度	± 10	尺量或激光测距仪：10m 范围(侧立面)
11	纵向端面板平整度	± 5	尺量(直尺、塞尺)或激光测距仪：每端 6 个点
12	直角度	$L/1\,000$	尺量或激光测距仪：顶板两侧及中央四条边长， $\text{Max}(L_m - L_n) \leq L/1\,000$ ，其中 $m、n$ 取 1、2、3、4 

注：表中 L 为管节长度， B 为管节宽度，均以 m 为单位。

条文说明

钢壳混凝土管节尺寸较大，雨水、杂物进入预留孔洞检查和清理工作十分困难，如清理不到位会影响混凝土浇筑，制作及运输过程中预留孔洞要采用盖子覆盖。

钢壳制作总拼后的焊缝，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，在施工后全部修补封闭，避免混凝土浇筑过程漏浆或溢出到其他隔仓中。

7.6.2 钢壳混凝土管节钢端壳制作及安装应按照本规范第 7.4.4 条的规定执行，钢端壳灌浆应按照本规范第 7.4.2 条的规定执行。

条文说明

深中通道沉管隧道项目钢壳混凝土管节按照所划分的隔仓、均衡对称、跳仓浇筑混凝土，时间长达约一个月，混凝土入仓浇灌过程对钢端壳变形的影响甚小，按照专业加工厂内制作与安装完成的精度控制即可满足最终的允许偏差要求。

7.6.3 钢壳自密实混凝土浇筑施工应符合现行《水运工程自密实混凝土技术规范》(JTS/T 226)的有关规定，并应符合下列规定：

1 钢壳混凝土浇筑宜采用陆上浇筑，特殊情况下可采用浮态浇筑，宜优先采用陆上浇筑。采用陆上浇筑时，应对浇筑底部支撑体系进行专项设计，并定期对浇筑区域地基基础沉降、位移进行监测。

2 钢壳混凝土管节自密实混凝土浇筑可根据现场施工条件灵活选择泵送或直送工艺，宜采用自动化浇筑工艺及设备。

3 钢壳混凝土管节自密实混凝土出机前宜通过坍落扩展度、扩展时间 T500、V 形漏斗时间、L 形仪流动高度比 H_2/H_1 、含气量、温度等进行质量控制，质量控制指标应符合表 7.6.3-1 和表 7.6.3-2 的规定。

表 7.6.3-1 自密实混凝土出机时混凝土指标的规定值或允许偏差

项次	检查项目	规定值或允许偏差
1	坍落扩展度(mm)	600 ~ 720
2	扩展时间 T500(s)	2 ~ 5
3	V 形漏斗时间(s)	5 ~ 15
4	L 形箱试验值	≥ 0.8
5	含气量(%)	≤ 4
6	密度(kg/m^3)	2 300 ~ 2 400
7	出机温度($^{\circ}\text{C}$)	≤ 30

表 7.6.3-2 自密实混凝土入仓前混凝土指标的规定值或允许偏差

项次	检查项目	规定值或允许偏差
1	坍落扩展度(mm)	600 ~ 720
2	扩展时间 T500(s)	2 ~ 5
3	V 形漏斗时间(s)	5 ~ 15
4	L 形箱试验值	≥0.8
5	含气量(%)	≤4
6	入仓前温度(℃)	≤32

4 隔仓内混凝土浇筑速度不宜大于 $30\text{m}^3/\text{h}$ ；混凝土液面距离顶板 20cm 内，浇筑速度不宜大于 $15\text{m}^3/\text{h}$ 。

5 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确定。混凝土浇筑接近仓格顶板时，应适当降低浇筑速度。

6 单个仓格浇筑时，应保持混凝土浇筑连续性，自密实混凝土从出机至浇筑完成的间隔时间不应超过 90min；浇筑的环境温度宜为 $5 \sim 35^\circ\text{C}$ ；泵送距离宜不大于 150m。

7 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。

8 钢壳混凝土浇筑完成后，应在 7d 后开展仓格顶面的脱空检测，脱空超出设计要求时应采取修补措施。

9 脱空检测合格后，应对预留孔洞进行封堵及涂装，封堵结构及涂装要求不低于原结构相关要求。

条文说明

混凝土到达现场后先进行坍落扩展度和 V 形漏斗时间检测，坍落扩展度和 V 形漏斗时间检测合格后马上进行浇筑，其他指标同步进行试验。后续管节混凝土除坍落扩展度及 V 形漏斗时间外，其他指标检测频率可根据首件管节浇筑质量进行调整。

钢壳混凝土管节隔仓浇筑过程中，隔仓中气体需要充分排出，避免在隔仓内形成气泡，因此液面高度接近仓顶时需要控制浇筑速度。

控制混凝土浇筑速度是为了使混凝土能自动填充钢壳的各位置，同时尽可能排出气泡，保证混凝土填充的密实度。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。

深中通道岛隧工程项目施工中，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 30cm 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 混凝土浇筑中钢壳变形控制应符合下列规定：

- 1 首件管节混凝土浇筑过程中应采用全站仪等进行钢壳变形监测。
- 2 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 的规定。

表 7.6.4 浇筑后预制成品几何尺寸的允许偏差、检查方法

检查项目	规定值或允许偏差 (mm)	检测方法
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 处
内孔净高	-15, +20	尺量或激光测距仪：每 10m 一个断面，每断面 3 处
壁厚	± 10	尺量或激光测距仪：每 10m 一个断面，每断面顶、底板各 4 个点，每个竖墙 2 个测点
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；

7.6.5 钢壳自密实混凝土脱空缺陷检测宜采用冲击映像法与中子法相结合的方式

条文说明

深中通道钢壳混凝土管节采用了冲击映像法与中子法相结合的仓格顶面脱空检测技术。冲击映像法要求对底板顶平面和顶板顶平面进行 100% 全域检测，检测出“分格存在脱空 $> 5\text{mm}$ 的单点或分格中脱空 $> 3\text{mm}$ 的面积大于 30%”疑似脱空区域，采用中子法进行复检。其他方法可试验论证后使用。

7.7 管节防腐**7.7.1 钢筋混凝土管节混凝土保护层应符合下列规定：**

- 1 钢筋混凝土管节下水前应检查保护层偏差情况，偏差超标准时应论证或采取补救措施。
- 2 钢筋混凝土管节的防水防腐体系，应在管节下水前完成施工并验收。

7.7.2 钢壳防腐施工除应符合现行《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情况，受损时应修补至不低于原设计等级。
- 2 牺牲阳极块施工应符合现行《海港工程钢结构防腐蚀技术规范》(JTS 153-3)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。
- 3 钢壳混凝土管节预埋件、紧固件的防腐措施应满足设计要求。

7.8 预埋件与预留孔洞

7.8.1 预埋件与预留孔洞施工应符合下列规定：

- 1 预埋件和预留孔洞应分类，编号、标识、中心位置等应符合设计规定。允许偏差应符合现行《沉管法隧道施工与质量验收规范》(GB 51201)和《公路沉管隧道设计规范》(JTG/T 3371-01)的有关规定。
- 2 预埋件应按设计要求采取防腐措施。
- 3 施工前，应采用三维可视化技术检查预埋件和预留孔洞与管节钢筋的交叉碰撞情况，当无法避开干扰时应采取措施。
- 4 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。

7.8.2 Ω 止水带的预埋件应检查整体尺寸、螺栓间距，混凝土浇筑前采用螺栓结合润滑脂封闭。

条文说明

预埋件在混凝土浇筑过程中易发生混凝土堵塞问题，清理需要花费大量时间和成本，因此需要在混凝土浇筑前封闭预埋孔洞。止水带的螺栓间距影响止水效果。

7.8.3 中埋可注浆式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、底板安装钢边止水带时，应采取固定措施实现设计要求的倾角。

7.8.4 端封墙枕梁预埋件与钢梁牛腿预埋件安装应保持在同一平面。

条文说明

端封墙枕梁预埋件的作用是和钢梁牛腿预埋件形成封门止水面，如不在同一平面，将给后续止水密封工作带来困难。

7.8.5 GINA 止水带紧固件安装应符合下列规定：

- 1 GINA 止水带安装前应检查螺栓间距，选用 1m 长的端钢壳面板及相应的压块、螺栓、螺母等进行预压、预紧试验。

2 应按自下而上、左右对称的顺序安装 GINA 止水带压板。底板位置应先安装外侧压板再安装内侧压板；侧墙内外侧压板应同时安装；顶板位置应先安装内侧压板再安装外侧压板。

3 安装压板时，每个螺栓预紧力应按厂家要求施加，并用预紧力扳手验收。

7.8.6 预应力孔道的波纹管宜采用直径不大于 12mm 的钢筋固定，定位钢筋间距可取 400mm。波纹管与连接件、锚垫板的连接处宜采用热缩套密封，混凝土浇筑前应安装内衬管。

7.8.7 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。

7.8.8 管顶舾装预埋件安装应符合下列规定：

1 管顶舾装预埋件应采取防腐措施，涂层的最小厚度应符合表 7.8.8-1 的规定。

表 7.8.8-1 管顶舾装预埋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 管顶舾装预埋件位置允许偏差应符合表 7.8.8-2 的规定。

表 7.8.8-2 管顶舾装预埋件位置允许偏差表

序号	预埋件位置	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位置	±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、吊点预埋件平面位置	±20

7.8.9 检修道钢筋接驳器宜在隧道主体结构施工时预埋。

7.8.10 钢壳混凝土管节混凝土下料孔、排气孔设置应符合下列规定：

1 隔仓内部 T 形纵肋位置宜等间距设置通气孔，通气孔间距宜为 300mm，T 形肋间距不宜大于 1m。

2 每个隔仓顶部宜设置 1 个下料孔，孔径不宜大于 300mm。沿着隔仓周边宜均匀设置排气孔，孔径不宜大于 90mm，间距不宜大于 2m。

- 3 隔仓面板内存在不同厚度钢板拼接时，应在拼接位置处设置排气孔。
- 4 下料孔、排气孔封堵应满足设计要求。

条文说明

深中通道钢壳混凝土标准隔舱尺寸为 $3\text{m} \times 3.5\text{m}$ ，设置 1 个下料孔和 10 个排气孔，下料孔孔径为 273mm ，排气孔孔径为 89mm ，排气孔最大间距为 1.9m 。隔舱结构较大时，根据具体情况增加下料孔和排气孔。深中通道项目进行足尺模型试验时，发现不同厚度钢板拼接位置脱空严重，后在拼接位置增加 3 个 30mm 排气孔，并通过隔舱模型试验验证，结果显示增加 30mm 排气孔可以有效减少脱空。

7.9 管节场内移运

7.9.1 管节场内移运布置应符合下列规定：

- 1 采用轮轨式移运工艺时，应布置轨道梁、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。

条文说明

采用工厂法预制工艺时，为了实现流水线的高效作业，管节预制完成后需进行流转，提供场地以供后续管节制作。

7.9.2 管节运输轨道梁施工及轨道安装应符合下列规定：

- 1 轨道梁承载力和沉降指标应满足管节移运及质量控制精度要求，必要时可采用桩基础提高承载力、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无收缩灌浆材料填充。
- 3 轨道安装前对轨道梁安装面高程进行测量复核，梁面精度应满足设计要求，轨道安装后允许偏差应满足移运设备额定偏差要求。

7.9.3 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的 90%，第二级宜为管节重量的 100%。每级加载完成后应静置 5min 。
- 3 顶推过程应实时监测轴线偏差、顶推系统、支撑系统，千斤顶应具备数字化控制功能，顶推产生的管节局部应力不得大于混凝土抗压强度设计值。
- 4 管节顶推速度应根据顶推千斤顶的性能确定，宜取 $75 \sim 110\text{mm/min}$ 。
- 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,应采用楔形支撑对顶推系统进行置换。

条文说明

管节顶推时,需要先将荷载转移到支撑千斤顶系统,再由顶推系统推动支撑千斤顶系统,实现管节移动。

7.9.4 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。
- 2 支撑体系转换宜分级进行,第一级宜为管节重量的90%,第二级宜为管节重量的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,移运过程应监测行程、轴线偏差情况。
- 4 台车系统宜分步将管节荷载转移至楔形支撑系统。

7.10 管节整体检漏

7.10.1 一次舾装安装并验收合格后,应进行管节整体检漏。

7.10.2 管节整体检漏前应采用水密性检验。水密性检验前,应确认管节结构的制作质量满足设计、施工要求。

7.10.3 管节整体检漏应符合下列规定:

- 1 管节整体检漏前应进行管节接头水密性检验。
- 2 管节整体检漏前应关闭水密舱门及阀门,封闭管外的进气管口、接头抽水管口,采用法兰盲板封闭端封墙的电孔口。
- 3 管节侧墙、底板、顶板的检漏水位应按设计要求分阶段进行,最终检漏水位应淹没管顶不小于0.2m,静置时间不少于24h,有条件时可模拟安装条件进行检漏。
- 4 检漏过程中,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。
- 5 检漏过程中发现漏点时,对不同部位应采取相应的堵漏措施,视堵漏情况决定是否继续注水。

条文说明

管节水密性要求比较高,一旦出现渗漏,会影响隧道的使用功能和寿命,因此管节渗漏检查需严谨细致。

8 基槽

8.1 一般规定

8.1.1 沉管隧道基槽开挖作业前，应核实施工水域水动力条件及海床地质条件，根据回淤数值模拟分析或成槽试验结果，编制基槽开挖专项施工方案。

8.1.2 基槽施工前的准备工作应符合下列规定：

1 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、施工放样等应符合现行《水运工程测量规范》(JTS 131)、《疏浚与吹填工程设计规范》(JTS 181-5)及《疏浚与吹填工程施工规范》(JTS 207)的相关规定。

2 应检验与校核施工设备性能、平面定位系统、高程系统等。

3 应办理水上水下活动许可证、废弃物海洋倾倒许可证。

8.1.3 深基槽施工宜分粗挖和精挖两个阶段进行，浅窄基槽施工可一次精挖成槽。

条文说明

为保障基槽最终成型质量，在基槽设计底线以上一定厚度设为精挖层，采用具备高精度开挖能力的船舶设备挖掘，精挖层以上至海床面，则可采用常规挖泥设备和工艺，以提高效率。对于黏土或沙质底层，精挖层厚度一般可取2~3m；若底质遇岩石，则根据爆破线或凿岩工艺预留厚度。

8.1.4 基槽开挖施工分条长度、分层厚度的选取应符合现行《疏浚与吹填工程施工规范》(JTS 207)的有关规定。

8.1.5 沉管隧道基槽成槽后，应及时监测回淤量并进行维护性清淤，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 基槽精挖交工验收后与管节沉放前宜对边坡稳定性、回淤形态等关键指标进行监测和分析。

8.1.7 基槽开挖施工时应遵守国家与当地有关环保规定，采取合理的施工工艺和必要措施严格控制悬浮物扩散，并对水域悬浮物扩散和浑浊度等进行检测。

8.1.8 采用爆破清礁成槽时，爆破施工应符合现行《爆破安全规程》(GB 6722)和《水运工程爆破技术规范》(JTS 204)的有关规定。

8.1.9 浅基槽凿岩施工宜根据岩层特性、厚度，选取合适的锤型、重量和布锤间距。临近养殖区、水生生物保护区或建(构)筑物施工时，凿岩锤的选取还应考虑施工产生的冲击波和振动波造成的影响。凿岩布点间距应综合考虑凿岩锤的大小、形状和岩层的层厚及硬度。

条文说明

凿岩锤以斧头形凿岩锤为主，以铅笔形凿岩锤为辅，随斧头形凿岩锤重量增减，最佳行距会相应增减；岩石分层厚度由现场试验实测凿击厚度确定。一般情况下，凿岩锤的布点距离控制在斧头形凿岩锤厚度或铅笔形和多齿形凿岩锤直径的1.5~3.0倍。凿岩锤的布点间距见表8-1。

表 8-1 不同岩层和凿岩锤的布点间距参考表(单位：m)

岩质	8t 凿岩锤	18t 凿岩锤	35t 凿岩锤
强风化岩	2.0~2.5	2.5~3.0	2.5~3.0
中风化岩	1.5~2.0	1.5~2.0	1.8~2.5
微风化岩	不适用	1.0~1.5	1.5~1.8

广州车陂南隧道所在航道为Ⅲ级航道，可通航2 000吨级船舶，平均水深约3.5m。沉管基槽开挖底高程-14.0m，中风化以下岩层配置18t铅笔凿岩锤进行破碎处理，采用6m³抓斗船清礁。

8.2 基槽粗挖

8.2.1 耙吸船粗挖施工应符合下列规定：

- 1 基槽开挖应提前安排，粗挖施工宜与已安装管节保持不小于100m的作业距离。
- 2 宜先疏浚基槽区域内表层，随后采用分层开挖，每层开挖厚度可取2~3m。
- 3 平面和深度控制可采用疏浚监测系统，基槽开挖平面精度应满足设计要求，开挖深度宜按每层2~3m均匀加深。
- 4 作业受横流影响时，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 开挖线应根据设计确定，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。

条文说明

在缓流阶段开挖可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。

8.2.2 抓斗船粗挖施工应符合下列规定：

- 1 施工船舶宜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 开挖施工可采用分段、分层、分条进行，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 100 ~ 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 2 ~ 3m。
- 6 边坡开挖宜按台阶齿状进行，开挖断面线应与设计边坡基本一致。

8.2.3 凿岩船粗挖施工应符合下列规定：

- 1 凿岩分层厚度应根据岩层特性、锤形、锤重、提升高度等因素确定。
- 2 应根据潮位变化及时调整凿岩锤提升高度。
- 3 施工分条间宜搭接 2m。

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。
- 2 基槽粗挖施工检测应符合现行《水运工程质量检验标准》(JTS 257)的有关规定。

8.3 基槽精挖

8.3.1 基槽精挖应综合考虑管节安装前(后)工序、基槽回淤速率等因素，沿管节安装方向按单个管节分段渐次进行流水作业，且宜提前在下一个管节安装所需作业范围内进行。

条文说明

提前在下一个管节安装所需作业范围内进行精挖，并安排基槽精挖的前(后)工序，碎石垫层整平及管节沉管安装按单个管节分段沿管节安装方向渐次展开，是为了各工序相互衔接，提高工效，并尽可能避免基槽精挖后基槽底及碎石垫层铺设后垫层面的回淤。

8.3.2 精挖可分为边坡精挖及槽底成型区精挖。施工前宜选划典型区域进行精挖试

验,测定精挖效果及综合工效,选定最佳施工参数及工艺。超挖深度应小于 0.5m。

条文说明

对抓斗挖泥船进行技术改造主要是将原有以潮位为基准的深度控制模式改为采用 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,替换原挖泥控制系统,以便实现抓斗挖泥船施工过程可视、可控、可测。

8.3.3 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。

8.3.4 抓斗船精挖施工应符合下列规定:

- 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不大于 6 级,波高不大于 1.5m,流速不大于 1.5m/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,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,开挖出一条近似水平波纹线,如图 8-1 所示。

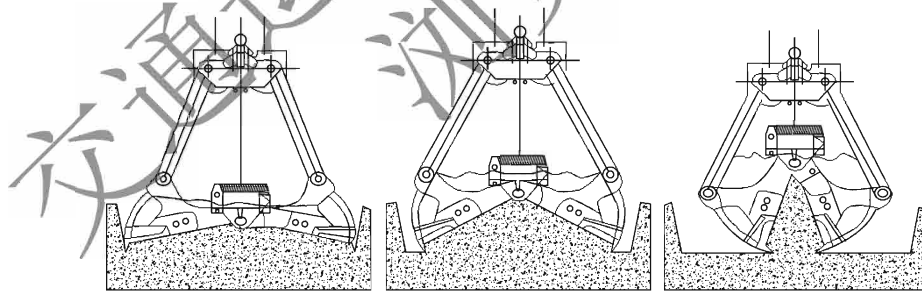


图 8-1 抓斗精挖功能原理示意图

8.3.5 凿岩船精挖施工宜配置计算机测控系统,并应根据岩层特性、潮位变化实时调整凿岩锤提升高度。

8.3.6 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,保证系统误差在规定值之内。

- 2 基槽断面开挖精度应符合设计要求。
- 3 应每2~3d用多波束测深仪对精挖基槽进行检测测量,发现欠挖和漏挖时应及时进行补挖。

8.4 基槽维护性清淤

8.4.1 隧道基槽粗挖后精挖前、基槽精挖后块石抛填前、块石振密(夯平)后碎石抛填前及碎石整平后管节沉放前,应及时对基槽内回淤情况进行检测,根据回淤量、现场作业条件及要求及时进行维护性清淤。

条文说明

根据《沉管法隧道施工与质量验收规范》(GB 51201—2016)的有关规定,碎石整平后管节沉放前密度大于 $1.26\text{g}/\text{cm}^3$ 的回淤沉积物厚超过4cm,或者密度大于 $1.15\text{g}/\text{cm}^3$ 的回淤沉积物厚超过10cm时,应进行清淤。

8.4.2 清淤施工前,宜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。狭窄水域和管节附近、最终接头等局部清淤应采用定点式专用清淤船清淤;开敞水域条件下,大面积的清淤可采用耙吸船。

8.4.3 清淤施工设备选型应考虑淤泥流动特点、周边情况和通航条件等因素,根据回淤量及作业空间大小选择,宜采用配置动态寻迹和定位系统(DPDT)及航迹显示系统(DTPS)的耙吸船和专用清淤船清淤相结合的方式,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。
- 2 槽内出现高强度回淤时,开敞水域宜先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。

条文说明

动态寻迹和定位系统(DPDT)是利用各类传感器监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进器(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。航迹显示系统(DTPS)挖泥轨迹显示系统能够显示疏浚矩阵、差异矩阵,视需要对水深测量文件色块进行调整,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。

8.4.4 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置,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 总体清淤方向由坡顶向坡底、由边坡向槽底方向推进。清淤过程中同时通过动态寻迹和定位系统(DPDT)、航迹显示系统(DTPS)等导航系统获得基槽开挖情况,实时调整下耙深度。船舶可按0.5~1.0kn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。舱容装满后应停止清淤施工,运至纳泥区抛泥。

条文说明

根据现场风、浪、流、涌等环境力影响合理调整船舶向、偏航角和航速,控制挖泥船耙头,以与预定航迹最小的偏差航行。经多次试航作业,综合选取合适的船舶向和航速,并输入系统参数完成设置。

由驾驶员人工控制船舶,以合适的船舶向和航速航行至清淤施工区域预定航迹线的起点,然后切换到动态寻迹和定位系统(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按设定高程开始疏浚作业。

8.4.5 专用清淤船清淤应符合下列规定:

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、GNSS-RTK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并采用六锚定位方式,清淤施工宜采用“定点式”工艺。

4 分条施工宜结合施工环境合理进行,分条宽度宜取20~40m。

5 清淤施工前,应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。单点吸淤时间应根据淤积物厚度和泥浆密度计读数确定。

7 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外10~15m范围。

8 吸淤头应与已安放管节端封墙保持一定的安全距离,安全距离宜取2~3m。

条文说明

通过典型施工分析清淤设备和工艺的适用性及施工效率，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显示并监测清淤深度，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。

8.4.6 清淤施工过程中应监测基槽边坡回淤及坍塌情况。监测应符合下列规定：

- 1 基槽清淤施工监测可通过多波束水深扫测、音叉密度仪密度监测、回淤盒监测与取样等方式进行，并据此分析和控制施工质量。
- 2 多波束水深监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/d。
- 3 在抛石夯平及碎石垫层铺设整平等工序前及施工期间，宜进行回淤盒监测，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 地基与基础施工前应根据施工总体部署、地基与基础设计要求，结合水文气象条件、地质条件及周边环境等因素确定施工工艺，并应制定工艺技术方案保障地基处理、基槽开挖、基础施工、垫层施工等前后工序的有效协同衔接。

9.1.2 地质与水文等条件复杂、附近区域没有可借鉴的工程经验时，地基处理正式施工前应在典型地质区域开展现场工艺验证性试验。

9.1.3 水下作业时应采取合理可行的环境保护措施。

9.1.4 天然地基上垫层施工采用先铺法时，应在基槽成槽质量验收合格后及时进行。

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 沉管段采用换填、深层水泥搅拌桩、挤密砂桩、碎石桩等处理地基时，施工及检验应符合现行《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)及《水下深层水泥搅拌桩法施工质量控制与检验标准》(JTS/T 325)等的相关规定。

9.2.3 采用抛石换填处理地基且抛石基床厚度大于 2m 时，应分层抛填及密实施工。抛石基床与设计高程的允许偏差宜为 $\pm 150\text{mm}$ 。

条文说明

抛石基床密实施工一般采用重锤夯实或振动锤振实，其高程允许偏差参考《码头结构施工规范》(JTS 215—2018)中有关重力式码头抛石基床粗平精度的要求。

9.2.4 基床抛石施工前应对基槽底泥沙回淤情况进行检测, 重度大于 11.0kN/m^3 且厚度大于 30cm 的回淤沉积物应及时采用专用清淤装备进行清除。

9.2.5 基床抛石施工除应符合现行《水运工程地基基础施工规范》(JTS 206) 的相关规定外, 尚应符合下列规定:

- 1 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 $4.0 \sim 5.0\text{m}$ 。
- 2 抛填溜管或船舷宜配置超声波探头, 实时监控抛填顶高程。
- 3 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。
- 4 抛填施工可分为粗抛及精抛两个步骤, 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。

9.2.6 基床抛石密实施工除应符合现行《水运工程地基基础施工规范》(JTS 206) 的相关规定外, 尚应符合下列规定:

- 1 基床抛石密实施工应按照分断面、分段、分层进行, 并应控制各分段、分层部位搭接部位的密实质量。
- 2 基床分层抛石密实施工前, 应对基槽回淤沉积物重度和厚度进行检测, 满足设计要求时再进行施工。
- 3 浅水、小流速水域沉管隧道基床抛石分层密实施工可采用夯实设备及配套船机, 夯实装备应具备定点定距夯平作业功能, 夯平搭接距离应通过试验确定, 应保证夯平作业全范围覆盖。
- 4 深水、大流速水域沉管隧道基床抛石分层密实施工宜采用液压振动锤进行振动整平。振动整平施工应配备信息化监测设备同步监测抛石振沉量, 并通过振沉量进行施工过程控制。

9.2.7 采用深层水泥搅拌桩对地基进行加固处理时, 施工除应符合现行《水下深层水泥搅拌桩法施工质量控制与检验标准》(JTS/T 325) 外, 尚应符合下列规定:

- 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、计量仪器精度等。
- 3 宜采用一体化水泥搅拌桩施工装备进行施工。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径曲线。
- 4 喷浆方式应根据桩长、土层性质、设备性能等综合选择, 并根据贯入的土层性

质调整工艺参数，保障施工质量。

5 搅拌轴的垂直度应小于 $1/100$ ，转速允许偏差应为 $\pm 2\text{r/min}$ ，下贯或提升速度的允许偏差应为 $\pm 0.1\text{m/min}$ 。搅拌叶片的有效直径减小量不应大于 10mm 。

6 搅拌桩施工宜按泥面高程先高后低的顺序进行，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，已隆起土体应采取清除等必要处理措施。

条文说明

一体化水泥搅拌施工装备集水泥存储、浆液拌制与泵送、土体深层搅拌等功能于一体，并配置施工控制系统的深层搅拌施工装备，通常指适用于水上作业的一体化专业施工船舶，已在深中通道工程成功应用。

9.2.8 采用挤密砂桩、碎石桩对地基进行加固处理时，施工应符合下列规定：

1 正式施工前应根据现场工艺验证性试验结果，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、桩顶及桩底高程、填料量、桩身密实度等指标满足设计要求。

3 宜采用挤密砂桩、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。

9.3 桩基础施工

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

1 预制桩打桩前应制定合理的施打顺序和技术措施，以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，间歇一定时间后再沉桩。

3 应观测成桩施工影响范围内的岸坡及邻近建(构)筑物的位移和变形。

9.3.2 桩顶打至泥面或水面以下时，应采用送桩器继续沉桩至桩端设计高程。

9.3.3 沉桩高程误差范围应在 $0 \sim -5\text{cm}$ 之间，沿隧道平面横向误差应不大于 10cm ，纵向误差应不大于 15cm ，垂直误差应不大于 0.4% 。

9.3.4 桩顶与管节底部之间的囊袋灌浆施工应符合下列规定：

- 1 管节沉放对接后应及时进行囊袋灌浆，使管节由临时支撑转换为桩基支撑。
- 2 施工时应先灌注支撑千斤顶邻近的灌浆孔，再从管段自由端向对接端灌注，直至达到每孔设计灌浆量。
- 3 灌浆过程中应监测千斤顶压力和灌浆口压力，防止管节抬升。

9.4 垫层施工

9.4.1 垫层施工前，应根据施工区域的气象、环境水文等资料，编制施工船舶作业窗口限制条件表。

9.4.2 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 先铺法碎石垫层宜沿管节段横向分层一次摊铺及整平。采用碎石整平船作业时，整平船宜具备浅水区域避风、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系统等。

2 后填法基础可采用砂流法、压浆法、囊袋灌浆法。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、功率和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、风浪流条件良好、水深小时，一般采用水下整平架或水下整平机器人、导轨刮平法铺设；风浪流较大及水深大的大型工程应用该方法时，需要开展现场试验并进行工效分析。管节数量多、风浪流较大、水深大时，一般需要采用整平船铺设垫层，铺设及整平一次成型。

9.4.3 碎石垫层铺设施工，宜在抛石密实整平施工完成之后随即展开。碎石垫层施工延迟时，应在施工前对抛石基床上回淤情况进行检测，重度大于 12.6kN/m^3 且厚度大于 10cm 的回淤沉积物应及时进行清除。

条文说明

一般情况下，回淤清除采用专用清淤船作业。当出现大面积、大量的回淤，可安排具有动态寻迹和定位系统(DPDT)、航迹显示系统(DTPS)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可用专用清淤船。清淤范围需向相邻的待沉放管节方向延长 $40\sim 60\text{m}$ 。

9.4.4 先铺法基础垫层的碎石粒径、级配以及压缩模量等参数宜通过典型施工试

验确定。

9.4.5 后填法施工垫层应在管节沉放对接后及时进行，其临时支撑应能够提供足够的承载力，承载力应根据管节设计所需的负浮力进行计算确定。

9.4.6 砂流法垫层施工应符合下列规定：

- 1 管节预制时应预留砂流孔，孔周不得出现渗漏，并应在管节沉放前进行检查。
- 2 灌砂材料粒径与配合比、灌砂压力应根据试验确定。
- 3 横向灌砂应按先中间后两侧顺序对称进行。
- 4 灌砂后留下的冲击坑、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。
- 5 施工过程中应采取理论用砂量与实际灌注量对比分析、压力监控、潜水探摸及水下声呐探测等组合手段对灌砂量进行控制，并监测千斤顶压力和管节状态，防止管节抬升。
- 6 垫层施工完成后，应按设计要求对灌砂冲击坑和砂流槽进行灌浆处理。

条文说明

灌砂可根据管节宽度在管节横向布置两个或三个灌砂口，常用的两种灌砂管路布置形式如图 9-1 和图 9-2 所示。

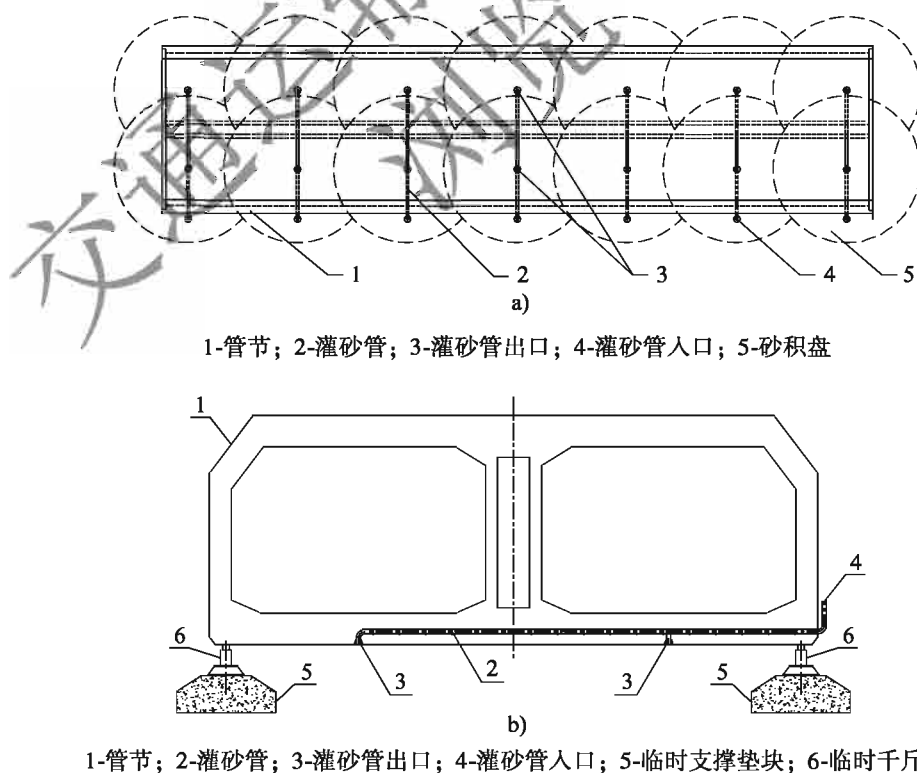
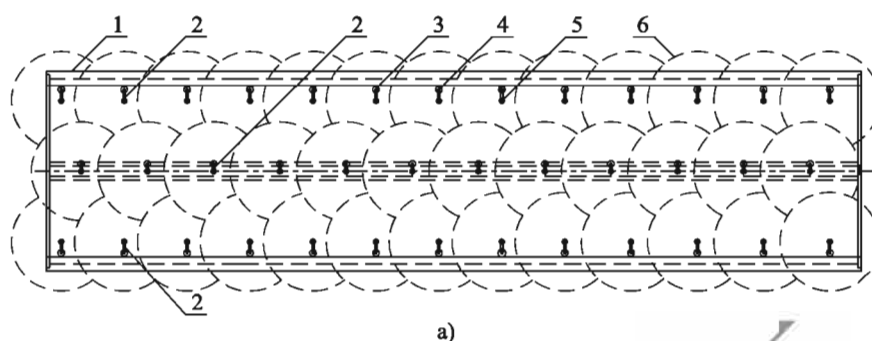
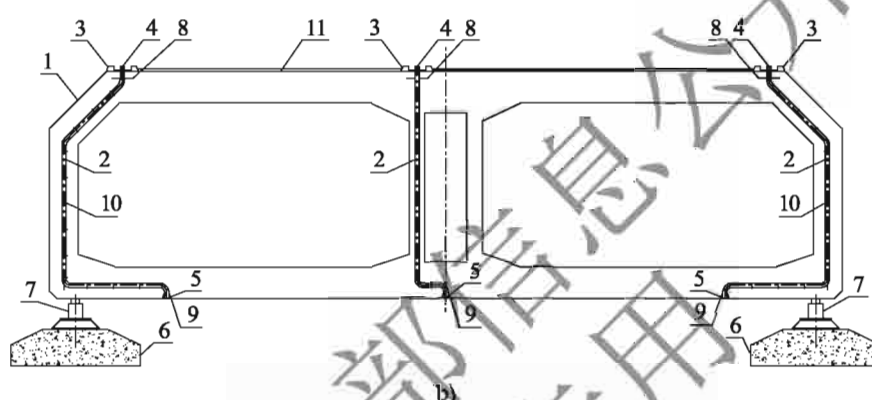


图 9-1 灌砂管路布置方式一



1-管节；2-灌砂管；3-灌砂管顶板保护墩；4-灌砂管入口；5-灌砂管出口；6-砂积盘



1-管节；2-灌砂管；3-灌砂管顶板保护墩；4-灌砂管入口；5-灌砂管出口；6-临时支撑垫块；7-临时千斤顶；
8-灌砂管入口止水钢板；9-灌砂管出口止水钢板；10-灌砂管固定箍筋；11-管节防锚层

图9-2 灌砂管路布置方式二

灌砂施工质量的好坏将直接影响沉管隧道的运行质量，如灌砂不足将使沉管沉降过大，若灌砂太多则导致沉管被抬高影响使用，一般可采取如下措施进行控制：

(1)用砂量对比分析：根据砂积盘尺寸及形状估算出每个砂积盘的理论用砂量，实际灌注时用砂量与其对照判断。

(2)压力监测：灌砂作业时，随着砂积盘的形成，会间歇与管底间封闭成密闭空间，使灌注压力增大，为此在灌砂管上安装压力表，以监测灌注过程中的压力变化，防止管节被抬高。

(3)管节状态监测：灌砂过程中，在管内架设测量仪器，监测管节姿态变化与振动情况，当仪器显示变化时，立即停止作业。

(4)潜水探摸：当通过压力读数和测量显示有抬高迹象时，潜水员下水探摸沙盘两侧的形成情况，以此来确定灌砂效果。

(5)采用水下声呐装置测量管底砂积盘形成情况。

9.4.7 压浆法垫层施工应符合下列规定：

- 1 在管节预制时应预留压浆孔，孔周不得出现渗漏，并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、配合比与压注压力应满足设计要求或根据试验确定。
- 4 压浆过程中应对压浆压力、压浆量、浆液扩散半径、千斤顶压力、管节姿态、管节上抬量和横向水平高差进行监测。
- 5 压浆宜从管节下坡向上坡方向逐孔交错进行。
- 6 应根据压浆压力、压浆量等控制浆料充填程度，浆料充填率可采用冲击影像、探地雷达等方法检测。

9.4.8 先铺法碎石垫层整平施工应根据施工水域水深、水流波浪复杂程度选择适用的抛石、整平工艺和施工装备，并应符合下列规定：

- 1 碎石垫层施工前应根据不同的地基处理形式及其上覆荷载设定预抬高量，预抬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。
- 2 碎石垫层整平宜分粗平和精平两个阶段。
- 3 碎石垫层施工完成后，应采用多波束仪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，应潜水探摸确认。

条文说明

先铺法碎石垫层整平根据碎石垫层铺设工艺的不同，一般可以采用两种装备进行：一种是采用带有移动式刮平用轨道的水下刮平框架，常用于相对浅水水域的碎石垫层整平施工；另一种是配备了一种专门设计的竖向溜管在移动抛填碎石的同时进行刮平的专用抛石整平船，溜管底部往往装有声呐测量装置，如图 9-3 所示，整平精度较高，一般用于深水、复杂水流水域碎石垫层整平施工。

此外，还有一种由工作母船、整平机和测控系统三大部分组成的自升式多功能整平装备。其中，工作母船是深水整平机与水下抛石基床整平作业机械化相关设备的载体和工作基站；深水基床整平机的作用是在已预抛石料并且经过夯实处理的基床上进行补充抛石精细整平作业；测量控制系统是利用计算机实现对水下整平机高程测量定位和对整平船的作业检测。

管节下沉、着床对接完成后，后续由于管节重力、压载及管节顶面回填对碎石垫层产生作用力，碎石垫层基础会有一定沉降，因此应考虑根据不同管节的地基基础形式及其上覆荷载确定相应的预抛高量值。

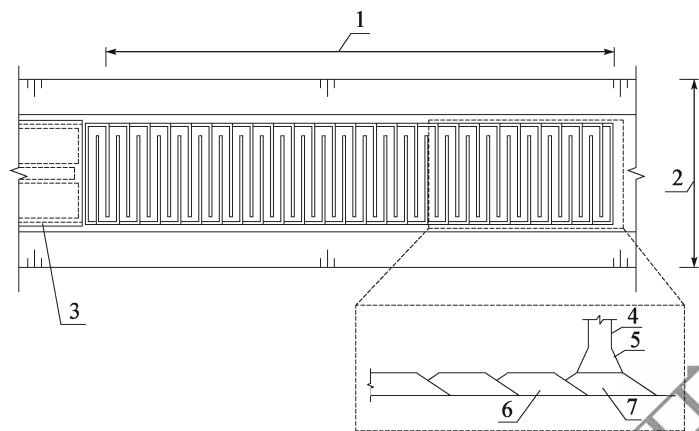


图 9-3 专用整平船垫层整平施工工艺原理图

1-单个垫层整平范围；2-基槽范围；3-已沉放的管节；4-整平船供料管；5-供料管开口；6-已整平的碎石垫层；7-整平中的碎石垫层

9.4.9 先铺法碎石垫层施工采用专用整平船舶时应符合下列规定：

- 1 专用整平船舶应配备合适的供料船、拖轮、锚艇及石料运输船。
- 2 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，通过卫星导航定位系统精确定位抛锚。
- 3 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。
- 4 在铺设结束前的最后阶段，应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 5 ~ 10m 之间。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。

9.4.10 先铺法碎石垫层整平施工允许偏差应满足表 9.4.10 的要求。

表 9.4.10 先铺法碎石垫层整平施工允许偏差

序号	检查项目	允许值(mm)	备注
1	碎石垫顶部高程	±40	85% 以上测点满足偏差要求；碎石垫顶部高程施工控制以设定的预抬高量为准
2	垫层两侧顶边线平面允许偏差	-200， +1 000	—
3	碎石垫纵向宽度	不小于设计值	
4	单个管节相邻整平船位内碎石垫顶测点平均值(或基面)	≤20	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根据基坑支护及围堰施工、起重设备作业、基坑进出通道、场内施工道路及材料堆放等因素确定，并应符合下列规定：

1 场内施工道路应根据基坑支护结构施工设备、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根据吊装工作量、材料运输、设备安拆、周围建(构)筑物等因素确定，并应避免作业期间相互干扰及对周边既有建(构)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、现场环境条件综合确定，并应采取措施降低水上作业施工对通航、生态环境的影响。

10.1.3 衔接段处沉管基槽开挖时，开挖边线应与围堰和护岸结构保持安全距离，安全距离不宜小于20m。

10.1.4 衔接段围堰拆除及围堰范围内的二次基槽开挖施工应采取措施避免影响衔接段结构的安全。

10.1.5 衔接段施工应对施工区域内既有管线进行排查、保护或迁改。邻近港口码头、锚泊(防台)区、水利防洪或军事设施时，应根据评估结论采取专项防护措施。

10.1.6 衔接段施工前应评估施工期土石方外运、排水、噪声等对周边环境及居民的影响，并采取相应防护措施。涉及绿化迁改时，应制定专项迁改及复绿方案。

10.1.7 衔接段邻近既有地面地下建(构)筑物时，应制定专项保护方案，并落实保护和监控措施。

10.1.8 衔接段邻近自然生态保护区时，施工前应开展生态专项调查，施工过程中应落实相应生态保护措施。

10.2 围堰与基坑

10.2.1 围堰施工前应调查并确认施工区域生态、环境条件和保护要求。

10.2.2 围堰采用大型钢圆筒结构时，钢圆筒插设宜采用振沉法。钢圆筒振沉施工前应进行工艺验证性试验，验证内容应包括土层侧阻力、可贯入能力、振沉工效、振沉质量等内容。施工除应符合现行《码头结构施工规范》(JTS 215)的有关规定外，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方驳的作业要求。
- 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要求，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 起重船应配置钢圆筒起吊和振沉系统，满足克服土侧压力拆除钢圆筒的要求。
- 5 运输驳船应经验算，满足稳性要求。钢圆筒与钢副格应进行封仓加固专项设计，满足运输稳定要求。钢圆筒、钢副格运输和吊装过程中应采取措施保护樺槽和樺头不受损坏。
- 6 钢圆筒插打宜采用液压多锤联合振沉装备，振沉后应均匀回填砂，回填参数应满足设计要求，过程中应监测筒体位置、高程与倾斜率。
- 7 钢副格应沿岛壁先外后内、对称插设与振沉。
- 8 钢圆筒未进入不透水层时，应利用钢圆筒围堰内侧所形成的回填面进行止水帷幕施工。
- 9 钢圆筒振沉施工如遇到硬夹层应采取合适的助沉措施。

10.2.3 双排钢板桩围堰施工除应符合现行《钢围堰工程技术标准》(GB/T 51295)的有关规定外，尚应符合下列规定：

- 1 施工过程中发现存在片石、块石等障碍物时，应提前引孔或开挖清除。
- 2 沉桩过程中出现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等情况时，应立即停止施工，分析原因并采取必要措施。
- 3 施打过程中应控制钢板桩垂直度，并应及时调整打桩机导向架的偏位。
- 4 钢板桩墙间填料应及时分层回填和压实，填料种类、分层厚度及回填步距应满足设计要求。
- 5 钢板桩墙间拉杆应及时安装、紧固。

10.2.4 锁扣钢管桩围堰施工除应符合现行《钢围堰工程技术标准》(GB/T 51295)的有关规定外,尚应符合下列规定:

- 1 全面插打钢管桩前应先试桩,核对水文地质情况,验证施工工艺与停止贯入标准。
- 2 锁扣钢管桩施工应根据地质条件制定专项工艺方案,保障止水与结构质量。
- 3 应在钢管桩上设置防止人员坠落的临时保护盖板。

10.2.5 沉箱围堰施工除应符合现行《码头结构施工规范》(JTS 215)的有关规定外,尚应符合下列规定:

- 1 沉箱吊装时,应根据现场作业条件、沉箱重量等选择起重设备。陆上吊装沉箱时,尚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。
- 3 沉箱基槽抛石、沉箱基床整平及沉箱安装等工序前应检查回淤情况,不满足要求时应进行清淤。沉箱安装完成后应及时回填。
- 4 围堰与岸端搭接处以及围堰底部的止水施工应满足设计要求。
- 5 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。压浆施工因故中断时,应在两次施工结合面处利用高压水进行冲洗,并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 模袋围堰施工除应符合现行《水运工程土工合成材料应用技术规范》(JTS/T 148)的有关规定外,尚应符合下列规定:

- 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 水深较大时,模袋铺设工艺应根据现场条件合理选择。
- 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 模袋填充后应采取有效措施减少模袋内的水分。
- 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,可以使相邻模袋紧密贴合,避免在接缝处形成三角缝。

10.2.7 围堰拆除应符合下列规定:

- 1 施工前应编制围堰拆除专项方案,验算围堰拆除过程中的结构稳定性,并对衔接段端封墙进行水密性试验。
- 2 围堰拆除应选择在非洪水、非结冰等条件下进行。

- 3 围堰拆除过程中应采取措施满足环境保护及水土保持要求。
- 4 围堰拆除过程中围堰内外水位应保持一致，拆除顺序可根据现场条件合理确定。
- 5 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。
- 6 深水或复杂水域环境下的围堰钢管桩拆除可采用水下无人切割设备。

10.2.8 基坑开挖施工应符合现行相关标准的有关规定。

10.3 衔接段隧道结构

10.3.1 衔接段与沉管段对接端面的钢端壳制作与安装应符合本规范第7.3.8条的规定，端钢壳吊装施工应采取固定和保护措施，避免与基坑支护结构发生碰撞。

10.3.2 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。

10.3.3 隧道主体结构的基础、混凝土施工应符合现行《公路桥涵施工技术规范》(JTG/T 3650)的有关规定。

10.3.4 隧道外侧墙模板宜采用桁架式模板，不宜采用对拉杆的加固方式。

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，采用可移动桁架模板作隧道顶板模板，对比满堂支架，可以节省大量安拆作业。

10.3.6 隧道结构混凝土可采用分段流水或纵向跳段法施工，分段长度应根据结构抗裂要求与工艺方案确定。

10.3.7 衔接段隧道顶部回填应在隧道结构混凝土达到设计强度后进行。回填高度、回填材料及压实度均应满足设计要求。

10.4 护岸

10.4.1 衔接段范围内既有护岸结构拆除之前，围堰应满足施工期间的防冲蚀、防洪、防渗要求并经过验收。

10.4.2 基槽开挖影响隧道邻近护岸结构稳定时,应按设计要求对护岸结构进行局部加强。

10.4.3 斜坡式护岸结构施工除应符合现行《防波堤与护岸施工规范》(JTS 208)的有关规定外,尚应符合下列规定:

- 1 应采取防护措施保护邻近建(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。

10.4.4 直立式护岸结构施工除应符合现行《防波堤与护岸施工规范》(JTS 208)的有关规定外,尚应符合下列规定:

- 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、工期要求等综合选型。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。
- 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。

11 管节舾装与寄放

11.1 一般规定

11.1.1 管节一次舾装应包括压载水箱、端封墙、GINA 止水带、吊点及系缆柱等安装，且应在干坞灌水或管节下水前完成。

11.1.2 压载水箱、端封墙安装满足设计要求后应采用水密性试验进行检漏。

11.1.3 管节二次舾装宜包括测量(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、沉放驳连接与调试、管节轴线调整系统等。舾装水域应综合场地条件、水域水文条件、安装工效等因素比选确定，可选择在坞内、寄放区或管节沉放区域进行。

条文说明

二次舾装一般在管节起浮后、安装前完成。对于需进行寄放的管节，可根据沉放安装工期计划倒排二次舾装施工计划。

11.1.4 管节寄放方式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寄放。

11.2 一次舾装

11.2.1 压载水箱施工应符合下列规定：

1 压载水箱最大储水量应能满足管节 1.05 ~ 1.06 倍抗浮安全系数的要求，压载水箱的富余高度不应少于 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，并考虑与进(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 水位标尺应设置在水箱内便于观察的位置。

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。主管管径应满足 180min 内注水量使得管节抗浮安全系数达到不小于 1.02

的要求,分支管管径宜取 100 ~ 300mm。

5 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的要求。压载系统安装完成后,应对水泵及其配套供电系统进行试运转,并对管路、水箱进行全面的水密试验。

条文说明

管节在沉放时需具备 1.01 ~ 1.02 的抗浮安全系数,而水容重处于动态变化的状态影响管节的抗浮安全系数。考虑到半日潮的影响,当测定水容重满足要求时,在一定时间内使管节具备相应的抗浮安全系数,启动沉放施工,故管节压载至抗浮安全系数不小于 1.02 的用时不超过 180min,主管管径依此选取。

管节初步对接后,及时排出接头间的水体,完成水力压接。考虑到管节对接的时间是在平潮期,时长一般是在 60min 内,故按 30min 内将管节接头间的水体全部排出的时间进行水泵选型。

11.2.2 钢结构端封墙安装应符合下列规定:

- 1 采用 H 型钢和钢面板组成钢结构端封墙时,H 型钢骨架与钢面板应紧密贴合。
- 2 端封墙的安装顺序宜为先安装顶板牛腿,再安装封门 H 形钢梁,然后再分块拼装焊接钢面板。钢面板焊缝应进行水密性试验。
- 3 端封墙应至少设置一扇供人员和物资进出的水密舱门,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 端封墙与端面预埋件焊接时应采取措施避免高温造成混凝土开裂。
- 5 底板枕梁、顶板牛腿与封门 H 形钢梁的间隙采用 V 形钢板填充时,应焊接固定。

11.2.3 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 止水带应在环境温度 5 ~ 25℃ 之间的阴凉环境下储存,应避免曝晒,并远离火、油、铜材、镁粉等。
- 3 GINA 止水带进场后应开箱检查确保其结构完整、无破损。
- 4 安装 GINA 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,吊索与 GINA 止水带的连接部位宜采用木制保护罩,GINA 止水带的上层与下层可用麻绳连接。
- 5 GINA 止水带压板宜按照自下而上的顺序进行安装。底板位置宜先安装外侧压板后安装内侧压板;侧墙内外侧压板宜同时安装;顶板位置宜先安装内侧压板后安装外侧压板。
- 6 GINA 止水带安装后,应及时安装保护罩,且不应过早撕膜。保护罩宜采用钢结构,并安装在管节顶对应的预埋地脚螺栓上。

条文说明

GINA 止水带是沉管隧道防水的关键部件，在施工过程中确保其不受破坏，因此在管节一次舾装时安装保护罩，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，故止水带出厂时表面要保留薄膜，不要过早撕膜。

11.2.4 管面舾装件安装与拆卸应符合下列规定：

- 1 吊点、系统缆柱应沿纵向中轴对称布置，并宜通过螺栓与管节侧墙顶部的预埋件相连，螺栓拧紧力矩应满足设计要求。
- 2 管节测量塔、吊点、系统缆柱、滑轮组、导缆器等应在管节沉放到位后在水下完成拆卸。
- 3 拆卸后应检查相关预埋件防腐蚀措施的有效性。

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，重复利用。港珠澳大桥岛隧工程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。

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

11.2.5 压载水箱检漏应对所有水箱进行满水试验，重点观察焊缝、管道拼接位置水密情况。

11.2.6 端封墙检漏时应在 Ω 止水带钢板的空隙内灌水，并加压至设计要求的压力进行检漏。 Ω 止水带钢板上灌水检漏的开孔位置和数量应根据现场条件确定，检漏结束后应按设计要求进行封孔。

11.2.7 压载水箱注水前，应校核管节重量、注水的水密度，根据管节重量分布、注水的水密度控制管节起浮后的姿态和干舷。

11.3 寄放

11.3.1 寄放区水域水文波浪条件情况较好时，宜采用漂浮寄放；寄放区水域台风频发、临近航道、水流流速较快或波浪较大时，宜采用坐底方式。

11.3.2 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、副锚缆破断拉力安全系数不应小于2,并按现行《钢丝绳 破断拉力测定方法》(GB/T 8358)的有关规定进行检验。

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,根据卷扬机布设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。港珠澳大桥岛隧工程沉管隧道深、浅坞平行布置,移动方式为坞内横移,参考图 11-1 和图 11-2。

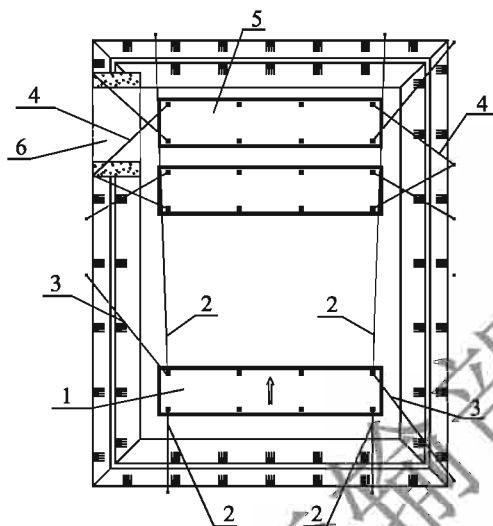


图 11-1 管节直拉式横移示意图

1-待横移管节; 2-直拉缆绳; 3-斜拉缆绳;
4-系泊缆绳; 5-已就位管节; 6-坞口

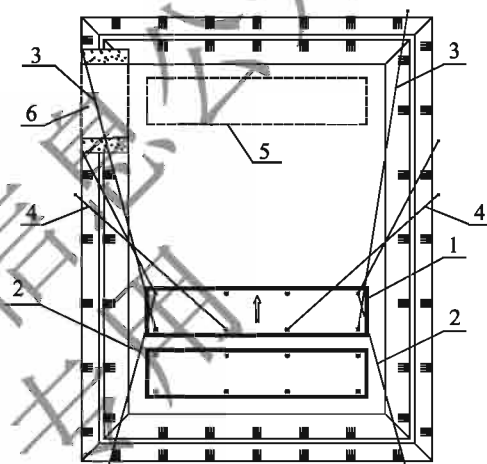


图 11-2 管节斜拉式横移示意图

1-待横移管节; 2-后方斜拉缆绳; 3-前方斜拉缆绳;
4-中部斜拉缆绳; 5-管节横移位置; 6-坞口

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。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。而管节坞内寄放时通常规模有限,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。港珠澳大桥岛隧工程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。

11.3.3 管节坐底寄放施工前应符合下列规定:

- 1 锚块应按设计要求预制。
- 2 管节坞外坐底寄放宜根据水流方向选择位置抛投锚块系泊。
- 3 管节压载水箱注水时管节抗浮安全系数应不小于 1.05。

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 11-3。

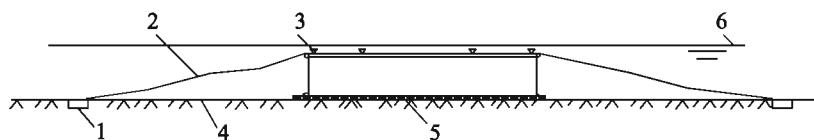


图 11-3 管节坐底寄放示意图

1-锚块；2-锚缆；3-系缆柱；4-海床；5-整平层；6-水面

11.3.4 管节漂浮寄放前，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，可通过物模试验或数值分析确定。

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，管节漂浮寄放示意图 11-4。

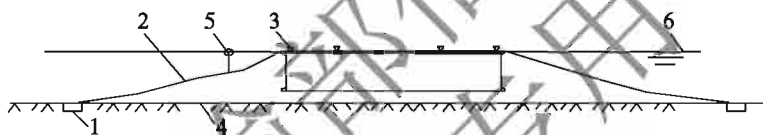


图 11-4 管节漂浮寄放示意图

1-锚块；2-锚缆；3-系缆柱；4-海床；5-浮鼓；6-水面

11.3.5 管节漂浮寄放系泊方式可选择单点系泊和多点系泊，并应符合下列规定：

- 1 采用坞内漂浮寄放或寄放区面积较小时，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，锚块设计应能抵抗管节横向水流作用力。
- 5 寄放前，应对寄放区进行扫测清淤。

条文说明

鉴于安全因素的考虑，一般情况下管节漂浮寄放优先选择多点系泊的方式。

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。典型的管节四点系泊布置见图 11-5。

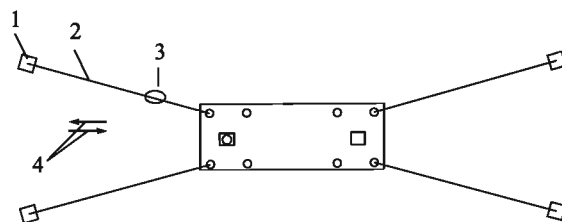


图 11-5 管节四点系泊示意图

1-锚块；2-锚缆；3-浮鼓；4-水流方向

如寄放区水流紊乱且流速不大、水域面积足够，也可考虑采用单管节或双管节单点系泊。典型的管节单点系泊布置见图 11-6。

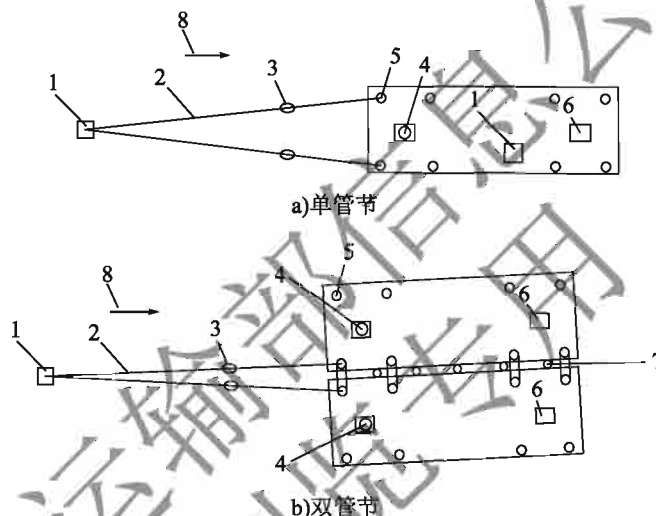


图 11-6 管节单点系泊示意图

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

11.3.6 管节长期寄放期间，应对管节内部渗漏情况、端封墙变形、端钢壳及 GINA 止水带水生物附着情况、管顶舾装件预埋件锈蚀情况、系泊系统有效性及管节寄放区等安排定期巡查，进行必要修复或疏浚清淤。

11.4 二次舾装

11.4.1 管节二次舾装应根据舾装作业条件、舾装件重量等采用起重船安装法或塔式起重机安装法。

条文说明

根据船机设备的不同，管节二次舾装主要的方案有起重船安装法和塔式起重机安装

法，其优缺点对比分析如表 11-1 所示。

表 11-1 起重船安装法和塔式起重机安装法对比表

舾装位置	起重船安装法	塔式起重机安装法
机械位置	舾装管节附近	专门的起重机轨道上
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

11.4.2 沉放驳安装应符合下列规定：

- 1 沉放驳安装前，应进行管节整体浮游稳定性分析，确定沉放驳安装对管节浮游稳定性、干舷的影响。
- 2 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。
- 3 采用管节两侧布置驳船沉放时，安装水域应能满足施工船的安全作业要求。

11.4.3 测量塔和人孔井安装应符合下列规定：

- 1 安装前应对测量塔和人孔井的安装位置及变形进行复核。
- 2 测量塔应分段安装，每节段先用锚栓初步定位，待其稳定后再对锚栓施加预紧力，并进行下一节段测量塔安装。
- 3 测量塔法兰连接端面平面度公差应不大于 5mm，验收标准应符合现行《钢结构高强度螺栓连接技术规程》(JGJ 82) 的相关规定。
- 4 测量塔安装完成后应进行标定。
- 5 人孔井宜设置在测量塔内部中心处，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。

11.4.4 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，应复测已安装管节的轴线偏移量，并据此进行导向杆、导向架的轴线调整。
- 2 导向杆及导向架安装时，横向定位允许偏差应为 $\pm 10\text{mm}$ 。
- 3 拉合装置安装完毕后，应进行调试。

条文说明

拉合装置一般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。

11.4.5 测量设备安装应符合下列规定：

- 1 全站仪棱镜和卫星导航定位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, 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管节内部底板顶面, 在管外安装时应做好防水处理。
- 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 测量设备安装完成后应进行标定后再接入测量控制系统。

条文说明

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。

11.4.6 电缆安装应符合下列规定:

- 1 管内供电系统应预留快速接头电缆, 与管外电源连接, 钢封门法兰孔处应预留管节间电缆连接。
- 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水下接头。

11.4.7 管顶舾装件安装应符合下列规定:

- 1 管顶舾装件应采取防腐措施, 涂层的最小厚度应符合表 7.8.8-1 的规定。紧固件涂层的最小厚度应符合表 11.4.7-1 的规定。

表 11.4.7-1 紧固件涂层最小厚度

构件名称	防腐措施	厚度 (μm)
管顶舾装件紧固件	锌基铬酸盐涂层	6
	抗碱封闭涂层	10

- 2 管顶舾装件安装允许偏差应符合表 11.4.7-2 的规定。

表 11.4.7-2 管顶舾装件安装允许偏差表

序号	主控项目	允许偏差 (mm)
1	拉合台座水平位置	± 10
2	导向架	横向: ± 10 ; 纵向: ± 20
3	导向杆	横向: ± 10 ; 纵向: ± 20

12 管节水上运输与安装

12.1 一般规定

12.1.1 管节水上运输工艺可采用拖轮浮运、绞车浮运、拖轮+绞车浮运、运安一体船浮运、驳运等方式。

12.1.2 管节水上运输与安装作业窗口的确定应符合本规范第4.5.5条的规定，并应满足下列要求：

- 1 管节水上运输作业窗口应与管节沉放作业窗口统筹考虑。
- 2 作业窗口应综合考虑气象水文、浮运方式管节浮游稳定性、管节姿态、缆绳张力、缆索吊力、封门应力、船机设备配置、绞车系统、监测通信系统等因素进行调整。
- 3 跨海或感潮河段沉管隧道管节浮运宜在涨潮时进行，内河沉管隧道管节浮运宜安排在丰水期。

12.1.3 管节运输过程中航道富余水深应不低于1.0m。

条文说明

港珠澳大桥岛隧工程、深中通道岛隧工程管节浮运时，临时航道富余水深在1.0m以上；大连湾海底隧道临时航道富余水深0.5m，乘潮作业富余水深不低于1.0m。浮运距离较短时，可以采取乘潮浮运；较远时，一般需要满足全天浮运的水深要求。

12.1.4 管节水上运输作业前应持续对作业区域水位(潮位)、水流、水密度等参数进行监测，实测天数不宜少于30d；并应检查船舶操纵系统及工作状态、测量控制系统、船管连接状态等。

12.1.5 施工前应结合航道沿线水文气象预报情况，编制应急预案。

12.1.6 先铺法管节安装工序宜按图12.1.6实施。

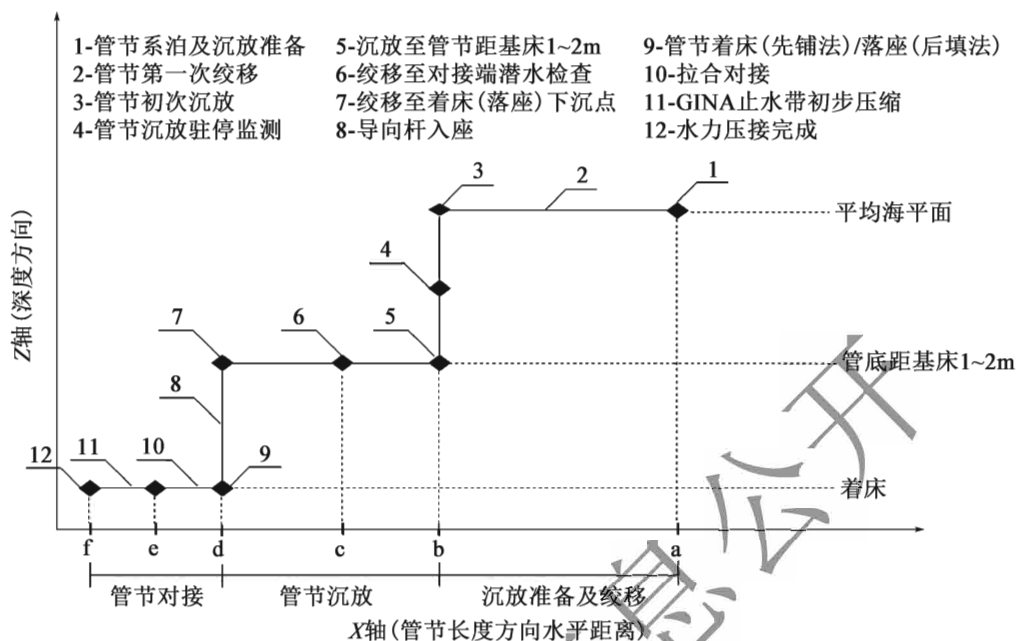


图 12.1.6 管节安装工序图

注: X 轴上 a~f 点是指待安管节首端端钢壳至已安管节尾端端钢壳的距离。其中, a 是管节系泊点; b 是管节初次沉放点; c 为绞移至对接前潜水检查点; d 为着床(落座)下沉点, 需考虑 GINA 止水带自身高度、合理安全距离; e 为 GINA 止水带初步压缩点, 需根据 GINA 止水带高度和 GINA 止水带初步压缩量确定; f 为水力压接完成点, 需根据 GINA 止水带高度和水力压接压缩量确定。

12.1.7 管节安装工艺和装备选型应考虑干舷、水体密度沿水深的变化、流速、风浪、安装精度、管节尺寸和重量以及工序衔接要求等因素的影响。

12.1.8 管节水上运输应配置作业窗口预报、管节测量控制、管节压载、应力监测等系统; 沉放与安装应配置管节拉合、管节对接导向、管节水力压接、管节姿态调整、水下检查等系统。

12.1.9 管节水上运输与安装应全程监测风速风向、波浪、水流、缆绳力及管节姿态等参数, 宜配置水上运输导航软件系统辅助决策。

12.1.10 管节水上运输与安装作业阶段, 严禁人员进入管节内部。

12.1.11 管节系泊作业、安装过程中应对施工区域内的航道进行封航, 并在上下游规定距离内设置警戒船。

12.1.12 管节水下对接后, 应对 GINA 止水带的压缩量及水密效果进行检查。

12.2 管节浮运

12.2.1 管节浮运准备工作应符合下列规定：

- 1 浮运前，应采取措施实时获取管节位置、受力以及气象水文等监测参数。
- 2 管节浮运时的干舷应满足浮游稳定性要求，宜采用压载方式调节，干舷值宜根据风浪流条件等因素控制在 100 ~ 300mm 范围内。当沉放设备在管节浮运前进行安装，且其重量作用在管节之上时，则应在浮运阶段预留相应的干舷值。
- 3 管节浮运的最小制动距离和最小制动时间应通过浮运演练确定。当水文条件特殊时，应综合考虑制动力、水深条件、浪流参数等的影响，宜通过数值模拟或物理模型试验确定。
- 4 管节浮运前，应对管节浮游稳定性以及拖带受力进行复核计算。
- 5 管节浮运作业前应备用拖曳缆索。

条文说明

沉管管节浮运过程中，其干舷是影响沉管管节浮游稳定性的决定性及其安全性因素，干舷也对浮运阻力、管节压载沉放作业时间等有重要影响。如果选用较小的干舷，浮运过程中管节顶易没水，不能保证管节顶持续有干作业面，且其端部易下沉，碰撞河（海）床面的风险较大；如果选用的干舷较大，管节浮运时的稳定性将降低，风阻力将增大，沉放压载的作业时间也会延长，特别是如果在海上浮运管节，干舷过大将不利于作业窗口的选择。对于仅在内河中浮运的管节，因为波浪影响较小或几乎没有，管节的竖向摆动较小，河水密度稳定，而且可考虑顺流浮运以减小管节的下沉，所以干舷允许值范围可以选较小的值。对于需要在海上浮运的管节，一般由于海水风、浪、流条件复杂，海水密度可能沿水深有较大变异等，浮运过程中管节稳定性安全风险往往比较高，干舷可能需要控制在较高的值。

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。

12.2.2 管节起浮控制应符合下列规定：

- 1 管节起浮前应进行临时系泊，临时系泊缆绳应保持适当预紧力。
- 2 管节起浮前，压载水箱应保留抗浮系数不低于 1.01 的压载水，确保管节始终处于坐底状态。
- 3 坞内水位应达到起浮水位。
- 4 管节起浮时，根据管节重量和体积精确计算管节浮力及所需排水量，应严格按照计算结果进行控制性排水，使管节缓慢起浮。
- 5 管节起浮过程中，各水箱应同步均衡排水，各水箱水位差不应大于 100mm。
- 6 管节起浮过程应对管节的姿态进行全程监测。

7 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压载水量以及测定管节起浮区域的水密度。

12.2.3 管节出坞应符合下列规定:

- 1 宜采用绞车系统进行管节出坞;绞车无法设置在岸上时,可将绞车置于锚泊的方驳上。
- 2 应预备不少于1艘拖轮作为应急备用。
- 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

管节绞拖出坞工艺布置参照图 12-1 进行。

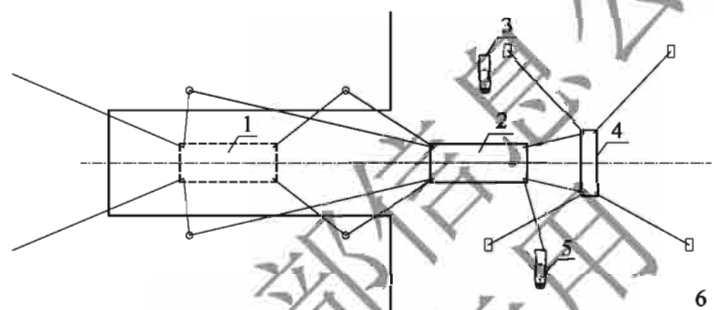


图 12-1 管节绞拖出坞工艺示意图

1、2-管节; 3-警戒船; 4-定位方驳; 5-侧向辅助拖轮; 6-水流方向

12.2.4 管节出坞后,浮运施工应符合下列规定:

- 1 应根据浮运距离和水域通行条件选用拖航或绞移方式。
- 2 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式抵抗横向水流力。采用岸控绞车浮运时,浮运速度宜不大于 0.2m/s 。
- 3 浮运距离较长时,应采用拖航方式或专用安装船进行管节浮运,拖航过程中宜采用绞车拖运方式穿越通航空间受限桥梁。管节浮运速度应根据浮运船机功率和船机操作性能综合确定,宜取 $0.5 \sim 2.0\text{m/s}$ 。

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,综合确定管节拖航速度一般不大于 2.0m/s 。

旁线干坞优先选择岸控绞车。旁线干坞多位于支流或人工开挖水域,江面宽度通常不大于 500m (如广州珠江隧道仅 400m),横向流速普遍小于 0.5m/s ,为岸控绞车提供

理想作业环境。管节预制区与沉放区距离短(通常小于1km)，绞车拖运效率更高。内河沉管隧道项目采用轴线干坞、旁线坞时，可采用绞移浮运或船舶拖带浮运，绞移浮运时速度一般不大于0.5m/s，船舶拖带浮运时速度一般不大于1.0m/s。

12.2.5 管节浮运转弯控制应符合下列规定：

- 1 浮运转弯时应根据现场实测流速流向控制管节转弯半径。
- 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。

12.2.6 管节浮运控制指标应符合表 12.2.6 的规定。

表 12.2.6 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 $\leq 0.2^{\circ}$	逐管节检查	2	姿态仪
2	纵倾	纵向倾角 $\leq 0.1^{\circ}$	逐管节检查	2	姿态仪
3	航行轨迹	浮运航道范围并满足设计要求	—	—	GNSS

注：干舷应根据设计和施工要求确定。通常内河沉管干舷不小于50mm，外海沉管干舷不小于150mm。

条文说明

管节浮运干舷的选择影响管节的浮运安全性和沉放作业经济性。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，或由于水体密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，港珠澳大桥岛隧工程沉管管节浮运干舷值为200~300mm。

12.2.7 拖航浮运时，管节拖缆布置及拖轮配置应根据航道条件、前进方向与水流方向夹角、管节体量以及拖轮性能等综合选定，并应符合下列规定：

- 1 拖航船舶的功率无法抵抗全部拖航阻力或需额外提供侧向拖带力时，可增设傍拖拖轮，侧向辅助顶推管节前进。
- 2 浮运过程中宜配1~2艘备用拖轮。
- 3 管节的浮运方式应根据航道水文环境和作业阶段的变化进行相应转换。

条文说明

管节浮运方式根据管节及航道条件的具体情况而定，可以选择三拖轮、四拖轮或五拖轮进行拖带等多种方式。以港珠澳大桥岛隧工程沉管隧道管节浮运为例，浮运航道处

于外海环境,受到风浪流条件复杂,采用四艘拖轮拖带浮运的方案,该方案操作性好、抵抗横向水流性能好。在浮运过程中,还配置了傍拖拖轮进行辅助拖航,并在浮运的不同阶段对傍拖方式有所调整。此外,为应对浮运过程中可能出现的紧急情况,浮运过程中配置备用拖轮。

12.2.8 采用安装船浮运时,应考虑管节宽度、坞口宽度与安装船型宽的匹配性。

12.2.9 管节浮运阻力计算应符合下列规定:

- 1 浮运阻力应考虑水阻力、风阻力、波浪增阻等因素。
- 2 浮运阻力应考虑管节可能遇到的不同迎流角度下的水阻力。试验资料缺乏时,水阻力计算可按附录 A.0.1 确定。
- 3 风阻力计算可按附录 A.0.2 确定,二次舾装前进行管节浮运时可不考虑风阻力。
- 4 波浪增阻可按附录 A.0.1 中管节吃水再增加航程中可能出现的有效波高的 0.6 倍进行分析计算。浮运航线海况复杂时,波浪增阻计算可结合模型试验与数值分析确定。

条文说明

由于管节吃水大而干舷小,管节浮运过程中的水阻力占比最大。水阻力一般通过物理模型试验获得,也可根据经验公式计算获得。采用经验公式计算时,水阻力系数选取的合理性非常关键。经验表明,阻力系数的选取是个工程难题,它不仅与管节吃水与水深比、浮运方向与水流的夹角等参数有关外,还与航(河)道宽度等参数有关,因此水阻力系数的取值范围变化较大,附录 A.0.1 中给出的取值仅供参考。浮运航道水文条件复杂或航道浅窄时,应开展管节浮运物理模型试验,试验工况考虑管节浮运方向与水流的夹角、涨落潮导致的水深变化、航(河)道宽度等因素,以确定各种可能工况下的水阻力系数等关键参数。

管节浮运前未进行二次舾装时,由于管节受风面积小,加之浮运作业通常选择在风速较低的时段,此时浮运风阻力一般可忽略不计。

管节浮运过程的波浪增阻参考现行《码头结构施工规范》(JTS 215)的相关规定。

12.2.10 管节浮游稳定性分析应满足下列要求:

- 1 管节以水压载时,浮游稳定性应考虑压载水的影响,并应采取措施保证各压载水箱互不相通。
- 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。管节定倾高度可按附录 B 计算。
- 3 管节浮运过程的稳性消失角不应小于 30°,以避免管节浮运时在外力作用下发生倾斜失稳。

- 4 曲线管节、V 形管节等异形管节宜采取压载措施控制纵向及横向平衡。
- 5 管节浮游稳定性不符合要求时，宜采用助浮措施。

条文说明

管节的浮游稳定性主要由定倾高度和复原力臂曲线的消失角两个因素决定。参考《码头结构施工规范》(JTS 215—2018)中关于沉箱定倾高度的相关规定，管节定倾高度不应小于 0.3m。

沉管浮运中的稳性消失角是指沉管在浮运过程中，当其横倾角超过一定值时，复原力矩降为零的角度。这一角度称为稳性消失角，也称为初稳性消失角。

12.2.11 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。

12.2.12 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，缆绳宜采用尼龙缆或高强尼龙缆。

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 60m。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力确定。正常情况下，缆绳承受的负荷不应大于破断力的 0.5 倍。

4 拖力点、拖力眼板和系统缆柱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力。

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力的 1.5 倍。

12.3 驳运

12.3.1 管节驳运前应对驳运水域的水文、气象等历史资料进行分析，并结合潮位、水深、流速、水密度、风速、波高、气象等监测结果分析确定管节驳运的作业窗口。

12.3.2 驳船结构强度、稳性应满足上驳、预制以及运输的要求，并应检查驳船动力系统、导航设备等。管节与驳船连接处应进行加固，设置支撑和限位装置，防止运输过程中移位。

12.3.3 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，支撑体系应具备适应船舶甲板与管节变形的功能。当船体变形影响结构安全时，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,影响管节的结构安全;对于钢筋混凝土结构的管节,主要风险在于管节开裂;而对钢壳混凝土管节,主要风险在于混凝土的连接受到影响。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。

管节一般为钢筋混凝土或钢壳混凝土结构,其刚度较大。管节与半潜驳之间因刚度差异大,在水上运输时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。

12.3.4 管节移运至半潜驳或浮船坞,宜采用有轨台车、无轨台车等移运设备。

12.3.5 管节上驳工艺应根据潮位、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。

12.3.6 管节卸驳下潜水域应根据与隧址距离、地质条件、船舶通航情况、风浪流条件等因素布置,并应符合下列规定:

- 1 下潜水域尺寸应满足半潜驳下潜作业要求,富余宽度宜不小于1倍船宽。
- 2 下潜区域水深应满足半潜驳下潜深度要求,并考虑1.0m以上富余水深。半潜驳下潜深度还应考虑半潜驳型深、支座高度、管节吃水等因素。

12.3.7 管节卸驳工艺应根据管节宽度、长度以及半潜驳净宽等因素确定,选择纵向或横向绞移卸驳方式,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。

12.4 系泊定位

12.4.1 系泊系统宜根据试验和分析计算进行设置,并考虑作业工况下可能遭遇的波浪、水流及天气等因素。当波浪和水流力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浮游稳定性。

12.4.2 系泊系统应根据水动力模型试验和计算分析确定,并应符合下列规定:

- 1 管节安装时,系泊缆拉力应考虑承受管节水流和波浪影响、锚缆仰角等因素。
- 2 系泊锚类型应根据锚泊力要求、地质条件及水深等选择。现场施工区域条件允

许时，宜选用重力式锚块；施工区域的土层分布较好或抛锚位置水深较大时，宜采用大抓力锚。

12.4.3 系泊锚设置应避开水下构筑物、管线等的保护范围。抛锚应在管节水上运输到隧址前完成，并对系泊锚进行预拉。

12.4.4 重力式锚体的起抛锚宜采用起重船进行，法向承力锚(VLA)、大抓力锚宜采用三用拖轮。

12.4.5 系泊缆布置应符合下列规定：

- 1 系泊缆选型应进行受力计算，具备足够的抗破断的能力，安全系数应不小于5。
- 2 抛锚位置应考虑锚类型、缆绳与管节轴线角度等因素。
- 3 管节运输到位后，应根据系泊方案连接系泊缆，形成管节系泊定位锚系。

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。

重力式锚块的稳性较好，锚体不易移动，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，锚块抗拉力需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，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。管节系泊系统布置示意图见图 12-2。

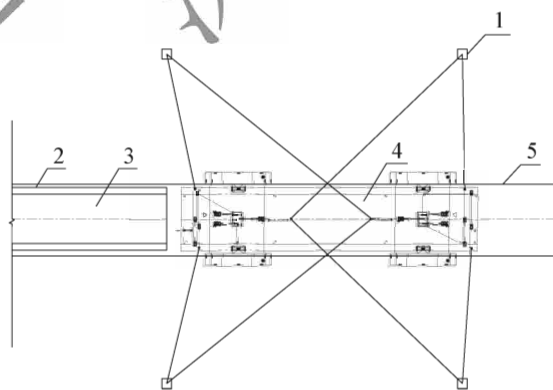


图 12-2 重力式锚块系泊系统布置示意图

1-重力式锚块；2-管节结构边线；3-已安装管节；4-待安装管节；5-基槽边线

由于法向承力锚(VLA)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。采用法向承力锚(VLA)系泊方案时，管节系泊系统布置见图 12-3。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。

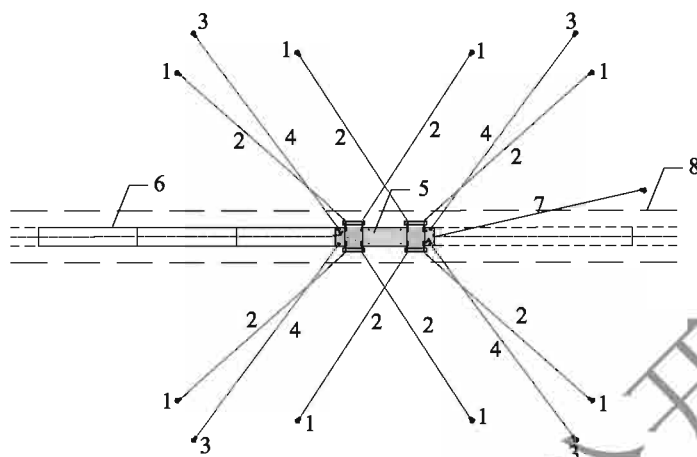


图 12-3 法向承力锚 (VLA) 块或大抓力锚方案系泊系统布置图

1-沉放驳系泊大抓力锚；2-沉放驳系泊横调缆；3-管节安装大抓力锚；4-管节安装横调缆；5-待安装管节；6-已安装管节；7-辅助调节缆；8-基槽边线

12.4.6 管节系泊作业时，管节位置应根据测控数据实时调节，并保持与已安装管节端的安全距离。安全距离的确定应考虑水域宽度、波浪、水流等影响因素，内河可取 10~30m，外海可取 20~50m。

12.5 管节沉放

12.5.1 管节沉放前的准备工作应符合下列规定：

- 1 管节沉放前，宜采用吊缆绞车调整管节纵坡。
- 2 应拆除 GINA 止水带保护罩、检查 GINA 止水带完整性，并清除异物。
- 3 应对已安装管节对接端的钢端壳进行检查，并清除异物。
- 4 采用先铺法施工碎石垫层时，应对基槽或碎石垫层回淤进行检测；采用后填法施工基础垫层时，应对管节临时支撑的坐标和高程进行复核。
- 5 应定时对沉放水域的水体密度进行测量，并根据水体密度的变化及时调整压载方案。
- 6 应检查拉合系统、对接导向系统、水力压接系统、轴线调整系统等的工作状态。

条文说明

由于风暴及波流等作用可能会导致隧址处水域河(海)床面上出现悬移质甚至推移质泥沙，导致水体密度发生变化，需根据水体密度的变化调整水箱压载重量，使得管节在全部工况下均能满足抗浮安全要求。

12.5.2 沉放驳配置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

驳船航区属性明确规定了该艘驳船的安全活动范围，必须严格遵守证书上标明的航区规定。

12.5.3 采用先铺法基床时，管节对接端宜用导向杆定位装置进行定位；采用后填法基床时，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千斤顶。

12.5.4 管节沉放应根据与已沉放管节对接端的距离分阶段下沉，确定各阶段的沉放控制参数，并通过管节水下姿态监测系统对管节进行监测。

12.5.5 采用先铺法基床时，管节沉放过程中应对管节压载量、下沉速度、纵向坡度和轴线偏差等关键参数进行控制，并应符合下列规定：

1 根据沉放深度分步下放，下放过程宜采用吊缆“四机联动”模式控制下放速度不大于 $0.5\text{m}/\text{min}$ 。

2 应控制系泊缆收放绞移待安装管节，绞移至对接端水平距离 5m 左右，调整管节轴线位置，使其与设计轴线基本重合。

3 每次下放完成后宜驻停超过 10min ，直至管节首端/尾端距基床不小于 1m 。应在控制缆力的同时控制管节和安装船位置，管节首尾轴线偏差小于 100mm ，管节与对接端间距偏差不应小于 100mm 。

4 管底距垫层或基床顶面小于 2m 时，下沉速度宜调整为 $0.1\text{m}/\text{min}$ 左右。

5 管节下沉至离基床顶面 $1\sim 2\text{m}$ 处后，应向对接端平移，平移速度应不大于 $0.2\text{m}/\text{min}$ 。

6 应通过控制系泊缆和安装缆收放，绞移管节至对接端 2m ，缆绳收放速度宜控制在 $1\text{m}/\text{min}$ 左右。绞移到位待流速满足潜水施工要求后，宜采用潜水检查对接端管节端钢壳、GINA 止水带及基床等。

7 管底距基床顶面设计高程为 $0.5\sim 1\text{m}$ 时，应调整管节纵向坡度和轴线偏差，轴线偏差应不大于 0.3m 。

8 管底距基床顶面设计高程为 0.5m 时，管节首尾轴线偏差应不大于 50mm ，管节与对接端间距偏差应不大于 50mm 。

9 安装缆宜采用“寸动”模式，控制系泊缆和安装缆收放，绞移管节至对接端 0.8m ，缆绳收放速度控制宜小于 $1\text{m}/\text{min}$ 。

10 管节压载沉放过程中，应向压载水箱注水至要求的水位高度，管节抗浮系数宜取 $1.01\sim 1.02$ 。

11 管节沉放期间，宜分阶段下沉并驻停，每次驻停时长宜不少于 10min ，驻停期间应监测沉放驳吃水、端封墙关键位置应力应变、管节姿态等情况。

12 管节着床过程中应利用横调缆准确控制管节首尾轴线位置,水下旋出导向托架的螺旋千斤顶对管节首端进行限位,确认管节轴线位置满足要求后,将管节下放至基床,并控制其对基床的压力。

13 宜利用拉合千斤顶将管节从距离对接端 0.8m 处拉合至 GINA 止水带初步压缩。拉合期间,在 GINA 止水带鼻尖初步接触钢端壳时,应对管节姿态进行精确微调。

14 管节对接完成且进行姿态调整后,应打开尾端端封墙上部排水进气阀,将结合腔的水受控制地排出。GINA 止水带压缩 5~6 cm 后,应逐步增加排水进气阀开度。待结合腔内液位高度与排水进气阀持平。

12.5.6 采用后填法施工垫层并设置鼻托导向时,应对初步下沉、靠拢下沉和落座下沉三阶段进行沉放控制,并应符合下列规定:

1 初步下沉阶段,应利用定位缆调整好管节,使其与已沉管节保持 5~10m 的距离,先往管内压舱水箱加水,提供足够的负浮力。应利用沉放驳上的卷扬机控制沉放速度,管节下放速度不应大于 0.30m/min,直到管节底距离设计高程 2~4 m。

2 靠拢下沉阶段,应先将管节向前平移至已沉管节处,然后再将管节下沉到管底达设计高程处,并调整好管节的纵向坡度,管节轴线误差不应大于 ± 0.3 m。管底与设计高程的距离及管端位置,宜考虑鼻托导向架是否会碰到 GINA 止水带橡胶的因素影响。

3 落座下沉阶段,应先将管节平移至距已沉管节 0.5~0.7m 处,轴线误差不大于 0.03 m 即开始落座下沉。应严格控制下沉速度,尽量减少管节的横向摆动,使其前端自然对中。管节落座时应先将前端搁在“鼻式”托座上,通过鼻托上的导向装置自然对中,再将后端轻轻地搁置在临时支座千斤顶上。

12.5.7 管节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的抗浮安全要求。
- 2 压载水加载过程中,应向水箱内均匀、对称逐级加水。
- 3 压载水系统宜能实现远程集中操控。

条文说明

压载水箱的容量设计主要考虑以下因素:

- (1) 开始沉放时,消除管节干舷所需的重量;
- (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,为维持管节稳定性额外增加的重量。

12.5.8 采用导向定位杆时,导向杆入座过程中应进行水下实时监视。

12.6 拉合对接

12.6.1 拉合对接前，应清除 GINA 止水带四周、对接端面的杂物，水下检查主(被)动拉合单元搭接情况。应拉动千斤顶，消除主、被动拉合单元与拉合台座之间的缝隙，将拉合千斤顶显示的管节间距作为起始间距。

12.6.2 拉合装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、技术成熟度等因素进行选择，水下对接拉合千斤顶宜设于中部或顶部靠两侧位置。

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

12.6.4 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。

12.6.5 管节拉合对接应对称、逐级、缓慢，宜按每级 50 ~ 100kN 进行，直至 GINA 止水带的鼻尖接触到已安装管节的钢端壳为止。初步拉合对接速度宜不大于 70mm/min。

12.6.6 应利用拉合千斤顶实现 GINA 止水带的初始压缩，压缩量宜为 20 ~ 40mm。

12.7 水力压接

12.7.1 水力压接前，应复核拉合装置测量数据，并检查确认 GINA 止水带贴合情况，管内人员应检查进气阀门开关、管路阀门开关、压力表读数以及拉合系统等。

12.7.2 水力压接控制应符合下列规定：

- 1 水力压接应分一次水力压接和二次水力压接两个阶段。
- 2 管节水力压接应利用接合腔内压强与大气压强差排水，应控制阀门开度，防止 GINA 止水带过快压缩，压接力不应大于管节外部水压的 1.03 倍。
- 3 一次水力压接是 GINA 止水带初步压缩，压缩量宜为 20 ~ 40mm。
- 4 二次水力压接是 GINA 止水带充分压缩，压缩量宜为 100 ~ 200mm，每个管节的 GINA 止水带压缩量应根据水深、止水带性能、止水带理论压缩曲线、设计要求等指标进行调整。
- 5 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内的水位时，应启动排水泵助排。

6 水力压接过程中,拉合系统应采取同步模式辅助完成 GINA 止水带均匀压缩,GINA 止水带的压缩情况宜通过测量两管节钢端壳之间距离进行判断。

7 水力压接过程中,应实时测量管节姿态、管节吊力等参数。

12.7.3 结合腔排水完成后,应确认 GINA 止水带压缩量满足设计及止水带理论压缩曲线的要求。

12.7.4 管节水力压接完成后,应复核管节轴线、姿态、位置等参数。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;若不满足设计要求,应根据偏差情况进行轴线调整或管节重新安装。

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井门进入管内,检查管内情况并进行贯通测量。

12.7.5 采用后填法施工基床时,管节水力压接过程中应逐步放松管节上的吊力控制千斤顶均衡支撑,并实时监测千斤顶顶升力变化。

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,应实时监测垂直千斤顶的顶力变化,并应保持垂直千斤顶受力均匀。

12.8 轴线调整

12.8.1 相邻管节断面相对偏差与管节轴线偏差允许值设计未明确的,允许偏差宜为 $\pm 50\text{mm}$ 。管节水力压接完成后,对接精度超出管节设计允许偏差时,应进行管节轴线调整。

条文说明

相邻管节断面相对偏差、管节轴线偏差允许值与结构安全与使用要求直接相关,也受限于施工工艺、装备及施工环境条件、水下测量精度等,一般根据设计要求确定。一

般水深较浅或水流条件不复杂的内河、跨海沉管隧道的相邻管节断面相对偏差与管节轴线允许偏差取值小，而水深较大或波浪流条件复杂的跨海沉管隧道工程取值相对大。

12.8.2 沉管隧道管节轴线调整可采用接头横向错位法、顶头摆尾法、管外定位法等方法进行纠偏。

条文说明

目前，沉管隧道管节安装轴线纠偏方法可分为管节安装前预判纠偏及管节安装后实测纠偏。管节安装前纠偏方法主要为接头横向错位法；管节安装后的实测纠偏又分为管内纠偏、管外纠偏及重新对接调整。管内纠偏方法主要为顶头摆尾法和管外定位法。

(1) 接头横向错位法

管节水压接后稳定压载前，利用管尾横调缆调整管节轴线，再利用稳定压载加大管尾垂直千斤顶摩擦力来置换横调缆锚泊力，最后松横调缆，达到轴线纠偏的目的，其本质属于管外顶推法。具体纠偏方法：按常规方法沉放—管外测量配合横调缆调整管节轴线—管节落座—水压接—打开水密门—管内轴线测量—管内测量配合管尾横调缆调整管节轴线—稳定压载—锁定回填—松管尾横调缆—管内测量复核。

(2) 顶头摆尾法

顶头摆尾法是在接头结合腔的超限一侧设置顶推千斤顶，利用顶推力置换 GINA 橡胶止水带所承受的部分水压力，使止水带卸荷反弹，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方法如图 12-4 所示。

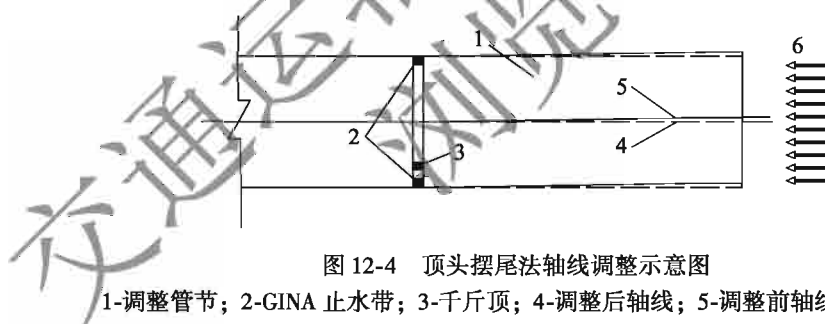


图 12-4 顶头摆尾法轴线调整示意图

1-调整管节；2-GINA 止水带；3-千斤顶；4-调整后轴线；5-调整前轴线；6-水压

(3) 管外定位法

韩国釜山—巨济沉管隧道施工通过在管外布置提升与定位系统进行管节轴线调整。该套设备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，并通过门形框架的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，从而实现纠偏。

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

12.9 管内作业

12.9.1 管内作业的作业条件、人员防护和操作、准入管理及应急救援等应符合现行《密闭空间作业职业危害防护规范》(GBZ/T 205)等相关标准的规定。

12.9.2 管内应设置警戒区、警戒线及警戒标志等,还应配置足够的照明设施,确保施工作业通视良好。

12.9.3 管内作业通风宜按现行《公路隧道施工技术规范》(JTG/T 3660)的要求进行设计,合理选择通风方式。对于结合腔等狭小区域,应增大通风量和换气频次。施工过程中应加强对空气质量的监测。

12.9.4 端封墙拆除及压载置换等管内作业应在管节安装完成且沉降基本稳定后进行。

12.9.5 鼻托梁和导向装置的拆除应符合下列规定:

- 1 鼻托梁拆除前,应在上、下鼻托梁对应的两个剪力键之间安装千斤顶,拆除鼻托梁。
- 2 鼻托梁拆除时应采取措施保护剪力键不受破坏。
- 3 采用砂流法施工垫层的管节导向装置宜在基础灌砂后 24h 内拆除。

12.9.6 端封墙拆除应符合下列规定:

- 1 最终接头相邻管节的端封墙应在最终接头锁定回填完成后拆除,其他管节接头两端的端封墙应在下一个管节安装完成且锁定回填完成后拆除。除最终接头外,应保留最后三道封门不予拆除。
- 2 钢端封墙拆除宜遵循重复利用原则,应分区、分块切割拆除,同一焊接区域不应多次焊接。
- 3 端封墙拆除时,应对 GINA 止水带采取有效保护措施。
- 4 拆除端封墙枕梁时,应保留竖向钢筋,作为水平剪力键的钢筋。
- 5 拆除 H 形钢、上部牛腿时,宜搭设脚手架作业平台。

条文说明

由于钢材淬硬倾向,同一焊接区域要避免多次焊接,因此端封墙在循环利用时,通过重新制作加宽密封钢板,以满足端封墙与密封钢板焊接质量要求,确保端封墙整体水密效果。

位于管节接头两端的端封墙需在下一个管节安装完成且其上方的锁定回填完成后方

可拆除,保障管内作业安全的要求。美国联邦公路管理局(FHWA)发布的《公路隧道设计与施工技术手册——土建部分》(Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels—Civil Elements)及港珠澳大桥岛隧工程、深中通道岛隧工程均有该规定和要求。

12.9.7 压载置换施工应符合下列规定:

- 1 压载置换应在管节锁定、部分一般回填以及管节沉降稳定后进行,并应按设计要求分级、分步压载,压载速度和压载量应结合监测情况调整。
- 2 压载施工时,应先进行管节一端压载混凝土施工,再分块、分段切割拆除压载水箱。
- 3 行车孔内压载水箱拆除应对称进行,浇筑一段压载混凝土时拆除对应的等重压载水箱。
- 4 压重混凝土浇筑完毕后,管节的结构抗浮安全系数应不小于 1.1。

12.10 管节接头施工

12.10.1 节段接头间宜外贴橡胶止水带,安装位置应满足设计要求,且界面无尖锐物体,安装时周边 2m 范围内不应进行明火作业。

12.10.2 中埋式可注浆止水带应固定于专用钢筋夹或主筋上,顶板与底板应采用盆形安装,止水带仰角宜为 $15^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 。

12.10.3 节段间注浆前,应确保注浆管畅通,能形成回路,注浆时的压力及注浆完成后的保压时间应满足设计要求。

12.10.4 Ω 止水带安装应满足下列要求:

- 1 安装前应在现场平铺展开,时间不宜小于 24h。
- 2 安装前应测定接头两侧端部钢板间距离、两块预埋钢壳面的高度差、水平偏差等,并根据设计要求的数据,测取 Ω 止水带实际安装面上各位置长度数据。
- 3 安装前应检查安装贴面平整性、预埋螺栓完好性和压块数量等。
- 4 Ω 止水带热熔对接应进行工艺试验,确定合理的熔接温度、压力和时间等参数。
- 5 所有安装紧固件应进行防腐蚀处理。
- 6 Ω 止水带安装完成后应进行整体水密试验。

12.10.5 剪力键施工应符合下列规定:

- 1 钢结构剪力键宜采用焊接或栓接形式进行安装。

2 剪力键及橡胶支座施工应在管段沉降稳定后进行。

3 施工人员应现场测量钢剪力键垫层空间高度尺寸,以便安装零件时做出相应调整。垫层零件组装完成后应再次对组件整体进行检查,确保其相对位置和高度满足设计要求。

4 端封墙处的水平剪力键施工前应凿出端封墙枕梁钢筋,并应保留所有竖向筋,与水平剪力键混凝土浇筑为一体。无端封墙处的水平剪力键,应在管节底板预埋水平剪力键锚筋及钢筋接驳器,并与水平剪力键浇筑为一体。

5 节段接头竖向剪力键间宜设置橡胶、沥青缓冲层,管节接头竖向剪力键间宜设置记忆支座或橡胶支座。

条文说明

港珠澳大桥岛隧工程沉管隧道的顶部覆土厚度高达21m,通过记忆支座来保护沉管管节接头结构,避免其因差异沉降而受损。记忆支座置于竖向剪力键之间,用最合理的方式分配差异沉降引起的结构内力与地基反力,起到既保护结构又发挥结构最大能力的作用。

12.10.6 管节节段间注浆应满足下列要求:

1 节段间注浆可分为中埋式注浆止水带注浆和 Ω 预埋件全断面注浆。

2 中埋式可注浆止水带注浆管设置间距为4m左右,注浆压力及注浆保压时间应满足设计要求。

3 Ω 预埋件全断面注浆管搭接长度不少于0.2m,注浆应能形成回路。

12.10.7 管节预应力拉索施工应符合下列规定:

1 节段接头处预应力拉索各项作业前应做好对 Ω 止水带的保护。

2 有黏结预应力管道间宜采用热缩套密封,并满足水密性及真空度要求。

3 无黏结预应力管间宜通过内插管、密封圈、热缩套等连接、密封,并满足水密性及真空度要求。

4 应按设计要求对预应力拉索及其连接套筒进行防腐处理。

5 预应力施工除符合本条规定外,尚应满足现行《预应力筋用锚具、夹具和连接器》(GB/T 14370)、《公路桥涵施工技术规范》(JTG/T 3650)等标准的要求。

条文说明

预应力孔道压浆前应试抽真空,检查管道的密封性。若真空度能够满足规范要求($-0.1 \sim -0.08\text{MPa}$),则应按照真空辅助压浆施工。若真空度无法达到设计要求或无法保持等,则维持既有的真空度,按普通压浆方式进行压浆,但必须确保管道压浆后的密实性。

12.10.8 管节接头处压载混凝土应在底板水平剪力键正上方直接浇筑形成伸缩缝。

12.10.9 中隔墙竖向剪力键、侧墙剪力键及水平剪力键应在沉管基槽回填完成且地基沉降基本稳定后进行施工。橡胶支座的厚度应在钢剪切键安装后，根据各剪切键的间距确定。

交通运输部信息公开
浏览专用

13 最终接头

13.1 一般规定

13.1.1 最终接头应根据施工总体部署、进度计划、结构形式和设计要求进行施工。

13.1.2 最终接头施工作业窗口应根据施工水域风、浪、流等水文气象条件综合选择。

13.1.3 湿法施工最终接头施工前，应安排潜水员对最终接头位置的杂物、淤积情况、两端端面姿态进行检查。潜水作业应符合现行《公路工程施工安全技术规范》(JTG F90)的有关规定。

13.1.4 岸边干法施工最终接头施工时，止推结构、止水带或止水帷幕施工质量应满足设计要求。

13.1.5 最终接头施工过程中，已安装管节的 GINA 止水带应稳定可靠。

13.1.6 管内施工作业现场应根据环境条件及密闭空间人员安全作业、职业健康要求设计，并布置通风、照明等设施。

13.2 岸边干法施工最终接头

13.2.1 岸边干法施工最终接头应采用临时围堰等止水结构，形成干法施工作业条件。

条文说明

岸边干地施工法是在最后一节沉管管节沉放完毕后，采用临时围堰等止水构造形成陆域干作业空间，无水条件下完成最终接头混凝土建造。

轴线干坞法沉管隧道可以采用岸边干法施工最终接头：干坞基坑开挖前需在坞门处施作一次临时围堰结构、坞门结构后，进行管节的预制、干坞内注水、一次围堰结构拆

除或坞门移除、管节浮运安装。管节安装完成后，坞门处进行临时止水围堰施工，并抽排完干坞内的水，最后进行现浇隧道连接段施工。

临时止水围堰可以采用混凝土砌块围堰、沙土围堰、模袋砂围堰、水下混凝土围堰、空腔钢闸门和双壁钢壳混凝土等方案，需进行技术可行性、整体稳定性、工程实施风险、止水效果、工期、成本等方面的综合比选。

13.2.2 管节端部应按设计要求设置止推构造，避免围堰内抽水时已安装管节的GINA止水带回弹。止推构造可采用止推墩、管顶钢斜撑等方式。

条文说明

为防止受压GINA止水带卸荷回弹，需在围堰内抽水前设置水下止推结构，一般采用浇筑水下混凝土止推墩、设置管顶支撑等方式。此外，襄阳汉江沉管隧道工程采用了基于摩擦力的新型止推技术，通过管节与周围地层的摩擦力和临时限位结构的拉力来补偿水压力的消失，从而保持GINA止水带压缩的稳定性。

13.2.3 最后一节管节安装前，应先按照设计要求施工预埋止水带、注浆管等止水结构。管节底部与基坑底之间的止水带、止浆条应牢固封闭。

13.2.4 临时围堰抽水前，应完成管节底部、临时围堰周围的注浆密封作业。

13.2.5 钢筋混凝土最终接头宜沿沉管隧道纵向长度全断面一次性浇筑成型，并应根据环境条件采取混凝土控裂措施。

13.3 水下止水板现浇最终接头

13.3.1 水下止水板最终接头应采取四周安装带有止水橡胶的钢封板、设置止推梁等措施形成施工作业条件。

条文说明

水下止水板最终接头施工包括以下步骤：

(1)基槽检查与清淤：先于接头位置进行基槽检查，并进行淤泥清除，为止水钢板的铺设做准备。

(2)管节沉放：接头两侧的管节按照预定位置沉放到位，形成待合龙的最终接头段。

(3)止推梁安装：潜水员在水下安装管节间的止推梁，为止水板的安装提供支撑。

(4)止水钢板安装：在管节的底部、两侧及顶部安装止水钢板，并通过抽水操作确

保止水板达到预期的初步止水效果。

(5) 止水钢板接头清理及加固：水力压接后，及时清除接头积水及淤泥，并对止水钢板做必要的加固。

(6) 结构封闭：在管节内部完成钢筋的绑扎工作后，灌筑自密实混凝土，最终完成接头施工。管节最终接头结构布置可参考图 13-1。

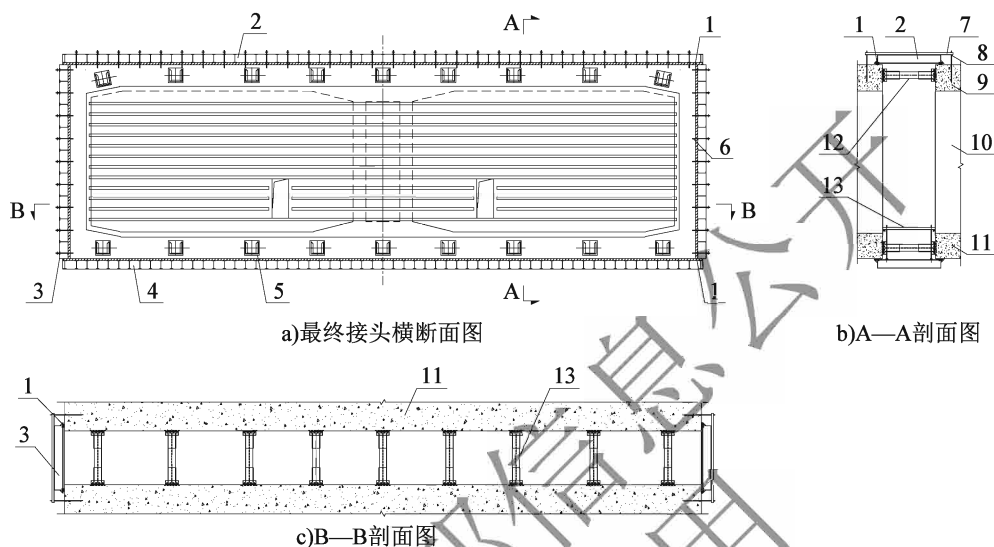


图 13-1 管节最终接头结构布置示意图

1-止水带；2-顶封板；3-侧封板；4-底封板；5-止推安装底座；6-预埋套筒；7-顶封板压梁；8-连接螺杆；9-隧道顶板；10-已安装管节；11-隧道底板；12-止推梁；13-底封板吊梁

13.3.2 水下止水板接头模板应在水下测量最终接头两端面三维空间尺寸的基础上，根据受力条件及水密性要求进行设计。现浇最终接头两端应利用管节端封墙已预埋的止水钢板焊接形成止水板，宜预埋注浆管。

13.3.3 水下止水板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。墙身模板宜开设振捣孔。止推梁应受力均匀，并在端板和止推座之间的空隙采用无收缩高强度锚固剂进行塞填。锚固剂塞填应充分、均匀、密实。应在锚固体强度达到设计要求后，进行下一步施工。

13.3.4 止水底封板应在最终接头两侧沉管安装前铺设在最终接头底部。止水底封板安装前，应对止水底封板的杂物进行清除。

13.3.5 止水底封板安装后，应检查其与管节搭接宽度、橡胶止水带压缩情况，并及时抽水、监测端面变形和渗漏情况。

13.3.6 水下止水板最终接头两端管节端面混凝土应凿毛。接头纵向钢筋宜通过预埋相邻管节端面的钢筋接驳器进行连接。

13.3.7 水下止水板最终接头顶板浇筑前应预埋混凝土泵送管、注浆管及排气管。顶板及上侧墙浇筑用泵送管宜使用蝶阀装置。顶板部分应采用自密实混凝土进行浇筑。顶板注浆材料宜采用环氧砂浆。

13.3.8 混凝土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。

13.3.9 顶板浇筑或注浆期间，应密切监测泵送或注浆压力以及出浆孔的出浆情况。

13.4 水下 V 形块体整体吊装式最终接头

13.4.1 水下 V 形块体整体吊装应选择合理作业窗口进行安装作业。辅助起重船的选型应综合考虑最终接头安装精度控制要求、作业水深等因素。

条文说明

在陆地上预制完成 V 形块之后，通过连接钢束确保 V 形块中心止水带两侧块体的连通。沉管安装完成后，使用起重机将 V 形块吊装至沉管隧道的末端管节中。通过利用水压差和 V 形块的自重，实现 V 形块两端与沉管管节的紧密对接，以此达成止水和隧道贯通的目的。在止水操作完成并排空接头内部水体之后，进行 V 形块与沉管管节之间刚性接头的施工。V 形块体整体吊装式最终接头可参考图 13-2。

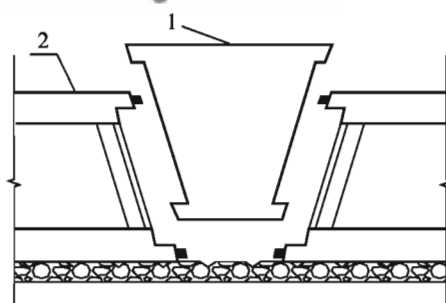


图 13-2 V 形块体整体吊装式最终接头示意图
1-V 形块体；2-已装沉管管节

港珠澳大桥岛隧工程沉管最终接头质量约 6 000t，选择了 12 000t 全回转起重船进行安装，安装作业气象窗口见表 13-1。

表 13-1 港珠澳大桥岛隧工程沉管最终接头安装作业条件表

流速 (m/s)	波高 (m)	能见度 (m)	风力 (级)	船舶限速 (kn)
≤0.5 (龙口) ≤0.6 (系泊、起吊)	≤0.6	≥1 000	≤5	≤10

13.4.2 V 形块体采用钢壳混凝土结构时，应满足本规范第 7.6 节相关钢壳混凝土管节预制施工要求。

13.4.3 采用起重船进行整体吊装 V 形块体前，应分析在波浪和水流作用下起重船与最终接头耦合运动响应，采取保障安装精度的措施。起吊和旋转过程中，应通过调整起重船压舱水保持甲板面处于水平状态。

13.4.4 V 形块体吊装施工应满足下列要求：

- 1 吊装设备的起吊效率、吊臂的旋转稳定性、下沉控制及压载水调配效率等工作指标应经试验调试确定。
- 2 现场应对脐带缆系统、测控系统、姿态调整系统等进行测试，并应进行结构水密性试验。
- 3 吊挂系统应满足最终接头吊装过程的稳定性和平衡性要求，可采用环形吊带、一吊带两挂点的方式。正式吊装前，应通过试吊方式测量最终接头倾角。
- 4 V 形块体吊装过程中，应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。

13.4.5 V 形块体整体吊装时应设置专门的定位导向装置，并应设置 GINA 止水带钢壳保护罩。

13.5 水下端部块体推出式最终接头

13.5.1 管节扩大段、支撑梁滑道、顶进节段的预埋构件安装宜采取精调、工装和预紧等措施控制安装精度。

13.5.2 止水带安装前，应检查安装区域平整度、有无尖锐物等。止水带安装紧固完成后，应进行气密性试验。

13.5.3 采用机械方式推出时，推出过程应保持推出段内外水压平衡，并保持千斤顶推出的同步性，实时监测推出段的运动姿态及止水带的水密性，并应根据监测结果动态调整推出段姿态。在最终接头扩大段侧墙宜设置纠偏千斤顶，并与测控系统联合使用实

现自动纠偏。推出段与对接管节进行水力压接时，应保持千斤顶同步卸载。

13.5.4 采用水力方式推出时，推出过程中应采取措施保持推出段内外水头差，水力推力应与底部摩擦力保持平衡。

条文说明

采用水力推出方式推出端部块体时，一般在管节安装后先利用注水系统向推出段舱内注水，通过水头差将推出段从管节扩大段内推出，使其与对接管节端面接触，完成端面止水带初始压接，然后采用抽排对接腔内水体，利用水力压接使接触端面充分压缩，最后在沉管隧道内部进行止水及纵向锁定的施工。保持水头差来保持推力和底部摩擦力平衡，可以保证推出均匀。水头差的确定与连通管中的水头损失有关，而水头损失和管径、管长、管道设计、管壁粗糙程度、推出速度等相关；推出段推出过程中，水压推力需克服推出段所受千斤顶自身黏滞阻力和滑道摩阻力做功。

13.5.5 GINA 止水带的压缩量控制应考虑鼻尖压缩量、腔内水压值、腔内排水量及预紧拉杆应力值等因素，应同步监测并逐步调控排水量、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，以实现体系安全转换。

13.5.6 纵向锁定构造和止水系统应在可伸缩止水带、可注浆止水带组成临时防水系统后，在隧道内部浇筑后浇带混凝土时完成。推出距离应满足设计要求，合龙口长度宜为 1.5~2.2m；水文条件复杂时，宜对合龙口进行数模或物模专题研究，并进行推出段重载演练。

13.5.7 推出段与对接管节连接后，应及时完成临时防水系统施工和全线贯通测量。推出段和对接管节本体应进行干环境测量标定，精确测量推出段与对接管节之间的距离，并据此确定钢筋混凝土后浇带模板尺寸或钢壳混凝土推出段的后焊段块体配切长度。

13.5.8 钢筋混凝土后浇带应采用自密实补偿收缩混凝土；钢壳混凝土推出段的后焊段块体隔仓应浇筑高流动混凝土和注浆充填基础空腔。

13.5.9 推出段与对接管节临时连接应在最终接头结构混凝土强度满足设计要求后方可拆除。

13.5.10 基础采用先铺法工艺时，应对最终接头顶进段区域的碎石基础进行空腔注浆，浆体强度应不小于 20MPa。

14 回填与防护

14.1 一般规定

14.1.1 回填与防护施工前应做好下列准备工作：

- 1 应制定满足管节水平稳定和结构安全的回填施工方案及应急预案。
- 2 水深较大、施工条件复杂时，应进行典型施工并在此基础上确定实施方案。
- 3 应根据水深、波浪、地质条件和设计方案等因素、分区分段确定回填与防护的施工方案。
- 4 回填施工工艺应结合自然条件、材料来源、使用要求等因素确定。
- 5 回填防护施工设备选型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。

14.1.2 已安装管节端部宜预留 20 ~ 30m，待下一节管节对接安装后再进行回填施工；在靠近接头处界面回填时，宜采用串筒下料。

14.1.3 回填施工应符合下列规定：

- 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 锁定回填施工宜按照先局部点锁、后横向对称推进的原则进行。
- 3 管节基础采用后填法垫层时，垫层施工前应在管节尾端附近进行局部锁定回填。
- 4 一般回填应在锁定回填之后及时实施。
- 5 护面层回填顺序可根据水深条件及设备能力确定。
- 6 露出河(海)床面或埋深较浅处的沉管段回填应考虑冲刷影响，并按设计要求设置两侧水下护坦。
- 7 回填材料及其密度、各回填层的顶面高程应符合设计要求，最终回填高度偏差应小于 0.3m。

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进行。

14.2.2 回填碎石应级配良好，不应含有土块及植物等杂质，石料饱和单轴极限抗压强度应满足设计要求，碎石粒径宜不大于 80mm。

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 0.5m。

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 3~5m，距离管节尾部端头宜为 20~30m，管节安装完成后、垫层施工前应完成锁定墩回填。

14.2.5 管节回填坡脚位置与下一个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 一般回填材料应满足设计要求。

14.3.2 一般回填施工工艺可选择能适应水上作业条件的驳船配合挖掘机抛填或抓斗船网格化定位定量抛填。

14.3.3 回填过程中管节两侧回填高差不宜超过 2m。

14.3.4 管节两侧回填区域的暴露长度宜控制在 30~50m 之间。

14.3.5 抛填船的驻位应考虑水深、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 护面块石尺寸、重量及强度应满足设计要求。

14.4.2 护面回填应分层、分段、对称铺设，边坡坡率不应大于设计坡率。

14.4.3 护面回填精度应符合现行《防波堤与护岸施工规范》(JTS 208)的有关规定。

14.4.4 管节覆盖防护层施工完成后,应按设计要求定期监测回填防护层及周边区域的冲刷情况。

条文说明

防护是指为预防沉管隧道运营期间遭遇锚击、船撞、冲刷等风险,增设的防撞、防冲刷等保护措施。

交通运输部信息公开
浏览专用

15 施工监测

15.1 一般规定

15.1.1 公路沉管隧道工程应编制专项施工监测方案。监测方案编制前应系统收集并分析工程勘察资料、气象水文数据、设计文件及施工组织方案，通过现场踏勘验证资料与实地条件的匹配性，评估监测项目实施的可行性。

条文说明

监测方案一般包括工程概况、工程地质水文条件、监测目的和依据、监测范围、监测对象及项目、监测方法、监测期及频率、监测数据处理分析、监测预警及异常状况下的处理措施、监测仪器设备和人员配备、质量安全管理等内容。

15.1.2 公路沉管隧道工程施工监测内容应包括施工环境、基槽与垫层回淤检测，管节预制、寄放、运输与安装期间的结构监测，以及围堰与基坑、干坞与工程船舶等的监测。

条文说明

施工环境监测主要包括水文监测和气象监测等。基槽与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。

管节预制、寄放、运输与安装期间结构监测主要包括沉管管节的受力、变形、应力和应变、运动姿态等情况的监测，其中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、扭转等六自由度运动姿态的监测和调整。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。干坞监测主要包括管节预制施工期时的坞门变形、止水效果和边坡工程监测。

15.1.3 监测期限应涵盖管节的预制、寄放、运输、沉放、对接以及对接后管节内外施工的各阶段。

15.1.4 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。

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

15.1.6 施工监测应采用仪器监测、人工巡检、视频等多种手段相结合的综合方法进行信息采集。条件允许时，宜采用远程自动化实时监测，自动化监测系统的精度、稳定性、可控性应满足施工要求。

条文说明

仪器监测适用于水文气象、管节姿态、管节沉降以及管节受力变形等数据的搜集。人工巡检和视频能够及时发现隧道结构裂缝、管节结构或接头渗漏水、剪力键锈蚀、剪力键支座错位变形等异常情况，与仪器监测互为补充。

15.1.7 结构安全监测的元器件选择及其参数应根据监测内容与评估要求确定。元器件的最大量程不宜大于设计值的2倍，精度不宜低于0.5%F.S.，分辨率不宜低于0.2%F.S.。监测元器件服役寿命应与监测周期匹配，其中，施工期的监测元器件服役寿命应不低于总工期，运营期监测的预埋式元器件不宜低于10年、表面安装式元器件不宜低于5年。

15.1.8 运营监测点应在施工期间埋设，运营期间延用施工期间监测点时，竣工时应将施工监测传感器和资料等一并移交给建设方指定的接收部门。

15.2 水文与气象监测

15.2.1 当工程区域无可靠历史数据时，施工前监测期不应少于1年，具备可靠的历史数据时，应开展不少于6个月的现场验证监测，且监测工作应持续至交工验收后6个月。

15.2.2 水文监测点应布置在施工影响区域半径500m范围内，气象监测点应布置在施工区域2km范围内，至少布置1个点。监测点位经纬度宜精确至0.1′，高程宜精确至0.1m。

15.2.3 水文监测除应符合现行《水运工程水文观测规范》(JTS 132)的有关规定外，尚应符合下列规定：

1 水文监测宜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。

2 水文监测项目宜包括水位、水流、波浪、作业深度水压、沉积物、水温、水域浊度(可见度)、水体温度和海冰等。

条文说明

- (1) 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。
- (2) 水流监测应包括分层流速、流向、水体容重、泥沙和径流量等。
- (3) 波浪监测应包括浪高、波速、波浪周期等。

15.2.4 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。

15.3 基槽与垫层回淤监测

15.3.1 基槽开挖施工监测应依据基槽设计、开挖施工方案要求,制定监测方案,可采用多波束声呐、回淤盒等一种或多种方法对基槽槽底及坡面、淤积等进行监测,获取基槽坡面形态等数据。基槽周边存在对变形敏感的建(构)筑物时,应参照现行《水运工程水工建筑物原型观测技术规范》(JTS 235)的有关规定执行。

15.3.2 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、清淤效果等。

15.3.3 基槽开挖施工过程中,应利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(构)筑物的重要性和结构形式等确定,宜为5~10m。
- 2 在开挖期间宜每1~2d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。

15.3.4 基槽开挖施工后、垫层施工前后及管节沉放前等阶段,应分别对基槽底部及边坡上的回淤情况进行监测,各阶段的监测次数不应少于1次。监测方法应符合现行《水运工程测量规范》(JTS 131)和《核子水分-密度仪现场测试规程》(SL 275)的相关规定。

15.3.5 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(构)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 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;监测参数包括建(构)筑物振动速度、加速度、水平位移、地表竖向位移、建(构)筑物表面裂缝等。
- 3 水平位移、地表竖向位移、建(构)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2~4周每周观测一次,爆破完成后第2~6个月每月观测1次。
- 4 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。

15.4 管节预制、寄放、运输与安装监测

15.4.1 管节监测应涵盖管节预制、寄放、运输、沉放与对接全过程关键参数和最终接头施工。

15.4.2 管节预制期监测项目可参照表 15.4.1-1 确定，管节寄放期监测项目可参照表 15.4.1-2 确定。

表 15.4.1-1 管节预制期监测项目

序号	监测项目		监测要求
1	大体积混凝土温度	浇筑温度	√
2		内部温度	√
3		环境温度	√
4		冷却水温度	√
5	应变		○
6	混凝土裂缝		√
7	钢壳混凝土管节密实性		√

注：√——应测项，○——选测项。

表 15.4.1-2 管节寄放期监测项目

序号	监测项目		监测要求
1	浅坞区起浮管底受力		√
2	坐底寄放	管节周围回淤情况	○
3		管节坐底和起浮时姿态	○
4	漂浮寄放	管节位移	○
5		管节周围回淤情况	○
6		管节的干舷	√
7	管节	渗漏水	√
8		应力(应变)	○
9		结构腐蚀	○
10	端封墙	渗漏水	√
11		应力(应变)	√
12		变形	√
13		结构腐蚀	○
14	压载水箱/水袋	渗漏水	√
15		水位	○

注：√——应测项，○——选测项。

15.4.3 管节运输、沉放和对接、最终接头施工监测应符合下列规定：

1 管节采用浮运方式时，浮运、沉放和对接期主要监测项目可参照表 15.4.1-3 确定。当管节采用一体船浮运时，应对船体姿态、船管连接以及管节倾角等进行监测。必要时，应对浮运水域流速流向、波高波向、风速风向、能见度、短时天气情况、拖航阻力等进行监测。

2 管节采用驳运方式运输时，驳运期应对管节应力、支墩应力及船舶姿态进行实时监测，沉放和对接期监测项目可参照表 15.4.1-3 确定。

表 15.4.1-3 管节浮运、沉放和对接期监测项目

序号	监测项目		监测要求
1	渗漏水		√
2	管节	运动姿态	√
3		节段张合量	○
4	端封墙	应力(应变)	○
5		变形	√
6	压载水箱/水袋水位		○
7	缆力监测		√

注：√——应测项，○——选测项。

3 管节对接后及最终接头施工监测项目可分别参照表 15.4.1-4 和表 15.4.1-5 确定。

表 15.4.1-4 管节对接后的监测项目

序号	监测项目			监测要求
1	沉管结构 (沉管段、衔接段)	渗漏水		√
2		沉降		√
3		水平位移		√
4		柔性管节	管节差异位移	√
5			管节、节段张合量	√
6		管内环境温度和管壁混凝土温度梯度		○
7		结构腐蚀		○
8	Ω 止水带		渗漏水	√
9	端封墙	渗漏水		√
10		应力(应变)		○
11		变形		√
12		结构腐蚀		○
13	压载水箱/水袋	渗漏水		√
14		水位		○

注：√——应测项，○——选测项。

表 15.4.1-5 最终接头施工监测项目

序号	监测项目		监控要求
1	端封墙	应力(应变)	√
2		变形	√
3		结构腐蚀	○
4	止水带渗漏水		√
5	水压力		√
6	钢拉杆受力		○
7	管节差异位移		√
8	基础后注浆压力		√

注：√——应测项，○——选测项。

15.4.4 温度监测宜采用自动化监测系统。钢筋混凝土管节预制时，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，并按现行《水运工程大体积混凝土温度裂缝控制技术规范》(JTS/T 202-1)的有关规定执行。

15.4.5 钢壳混凝土管节浇筑过程中，应监测结构内力和变形、外观尺寸、净空尺寸等，监测内容和频次满足设计要求。

15.4.6 管节起浮时，宜采用轴力计监测管底受力；测点宜布置在每个压载水箱正下方，并采用在线实时监测。

15.4.7 管节浮运、沉放及对接阶段姿态监测的采样间隔应不大于 50ms，关键动作时段的采样间隔应缩短至不大于 20ms，并应符合下列规定：

- 1 应采用加速度计或速度计监测浮运或驳运中管节的纵荡、横荡和垂荡，测点宜布置在管节两端。
- 2 应采用倾角仪或陀螺仪监测浮运或驳运中管节的横摇、纵摇和艏摇，测点宜布置在管节中部。
- 3 应进行水箱水位监测，根据实时监测结果及时控制各压载水箱的水位高度。
- 4 测点应布置在方便观测的管节位置，且不得妨碍正常施工作业。

15.4.8 沉管隧道施工期间，应综合评估工程现场实际情况确定管节、端封墙等的结构腐蚀监测，可采用腐蚀监测仪监测腐蚀情况。

- 15.4.9 管节应力(应变)、端封墙应力(应变)和端封墙变形监测应符合下列规定：
- 1 应根据设计要求和受力分析结果，选择受力不利位置布置测点。
 - 2 可采用振弦式、电阻式或光纤光栅式应变传感器监测管节和端封墙应力

(应变)。

3 可采用振弦式、电阻式、光纤光栅式或磁致伸缩式位移传感器监测端封墙变形。

4 寄放期监测频次不应少于1次/h；浮运、驳运、沉放和对接期监测频次不应少于30次/h。

15.4.10 管节寄放、浮运、沉放和对接期应采用摄像的方法对端封墙、压载水箱的渗漏水进行在线实时监测。

15.4.11 管节对接阶段张合量的监测应符合下列规定：

1 可采用振弦式、电阻式、光纤光栅式或磁致伸缩式位移传感器监测节段接头张合量。

2 监测测点宜对称布置在节段接头，每处不应少于2个测点。

3 在浮运、沉放和对接期监测频次不应少于3次/h；在对接后，监测频次不应少于1次/h。

15.4.12 管节对接后沉管结构混凝土、止水带、端封墙和压载水箱的渗漏水监测应符合下列规定：

1 宜采用摄像和人工巡视相结合的方法监测主体结构混凝土渗漏水。

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渗漏水，高精度压力表可安装在管廊止水带间腔的预埋水管上。

3 端封墙渗漏水宜采用摄像的方法监测。

4 监测频次不应少于1次/h。

15.4.13 沉管结构竖向位移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《水运工程测量规范》(JTS 131)的有关规定。

2 每1个管节布置4个观测点。

3 在变载期，荷载变化较大的阶段监测频次不应少于1次/h，其他阶段可适度降低监测频次，但不应少于1次/d。进入恒载期后，若沉降呈现稳定状态，可每周监测1~2次。

条文说明

公路沉管隧道施工阶段分为变载期与恒载期，变载期通常指的是沉管隧道结构承受的主要荷载不断变化，这个时期需要加强监测。恒载期指的是沉管隧道结构施工基本完成，开始承受较为稳定和可预测的荷载。

15.4.14 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时,观测方法应符合现行《水运工程测量规范》(JTS 131)的有关规定。

2 每个管节两端宜各布置1个观测点,两观测点之间宜保持通视。

3 在变载期,荷载变化较大的阶段监测频次不应少于1次/h,其他阶段可适度降低监测频次,但不应少于1次/d。进入恒载期后,若位移呈现稳定状态,可每周监测1~2次。

15.4.15 管节差异位移监测应符合下列规定:

1 可采用振弦式、电阻式、光纤光栅式或磁致伸缩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 在变载期,荷载变化较大的阶段监测频次不应少于1次/h,其他阶段可适度降低监测频次,但不应少于1次/d。进入恒载期后,若位移呈现稳定状态,可每周监测1~2次。

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

15.5 围堰与基坑监测

15.5.1 沉管隧道施工期间,衔接段的围堰工程应开展施工监测。

15.5.2 围堰工程监测方案应根据工程地质条件、水文条件、周边建(构)筑物的重要性和围堰结构形式等确定。

15.5.3 围堰工程主要监测项目应包括围堰渗漏、围堰变形、围堰受力、开挖深度、周边建(构)筑物安全、坑底变形、周边土体含水率及位移。

15.5.4 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、流砂、管涌情况,围堰周边应配备夜间照明设备。

15.5.5 围堰工程施工期间,应在监测方案确定的关键点对围堰的受力和变形进行监测,监测频次应不低于1次/d。在水文气象条件恶劣的情况下,应暂停围堰施工,并加大监测频次,配备专人巡检。

15.5.6 围堰工程施工监测应符合下列规定:

- 1 应对周边可能受影响的建(构)筑物的变形、裂缝,以及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,监测频次应不低于1次/d。围堰完工后,监测频率应不低于1次/2d。若呈现稳定状态,可每周监测1~2次。

15.5.7 护岸与边坡稳定监测应符合现行《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330)的有关规定。

15.5.8 基坑监测应符合现行《建筑基坑工程监测技术规范》(GB 50497)的有关规定。

15.6 干坞监测

15.6.1 管节预制施工监测应符合下列规定:

- 1 管节预制期间应监测坞门变形、应力和止水效果情况。
- 2 止水效果监测可通过巡检的形式开展。
- 3 坞门变形和应力监测频率不应少于1次/d。

15.6.2 坞门监测应选择受力和变形大的部位进行重点观测,并应满足设计精度要求。

15.6.3 开挖深度大或现场地质条件及周围环境复杂的干坞应进行边坡监测,监测工作除应符合现行《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330)及《建筑基坑工程监测技术规范》(GB 50497)等的有关规定外,尚应符合下列规定:

- 1 监测项目应包括边坡顶部位移、深层水平位移、支护结构应力和变形、周边建(构)筑物变形、地表裂缝以及地下水位。
- 2 监测点应布置在内力及变形等关键特征点上,并应满足监控要求。
- 3 监测预警值应满足干坞设计、管节结构设计以及周边环境中被保护对象的控制要求。

附录 A 管节浮运阻力计算

A.0.1 管节浮运水阻力可按式(A.0.1)计算:

$$R = \frac{1}{2} A \rho_w v^2 K \quad (\text{A.0.1})$$

式中: R ——水阻力(N);

A ——管节迎流面积(m^2);

ρ_w ——水密度(kg/m^3);

v ——管节对水流的平均相对速度(m/s);

K ——水阻力系数,宜根据管节的吃水、水深、迎流角度等确定管节的水阻力系数,以计算管节浮运、转体的阻力。在试验资料不足时,纵向水阻力系数可取为1.3,横向水阻力系数可取为2.0;当水流条件复杂或浅窄航道时,管节浮运水阻力系数则应通过模型试验确定。

A.0.2 管节浮运风阻力可按式(A.0.2)计算:

$$R_a = \frac{1}{2} \rho_a C_s A_a V_a^2 \quad (\text{A.0.2})$$

式中: R_a ——风阻力(N);

A_a ——管节、安装驳、测量塔及人孔井受风面积(m^2);

ρ_a ——空气密度(kg/m^3),可按 $1.22 \text{ kg}/\text{m}^3$ 取值;

V_a ——风速(m/s);

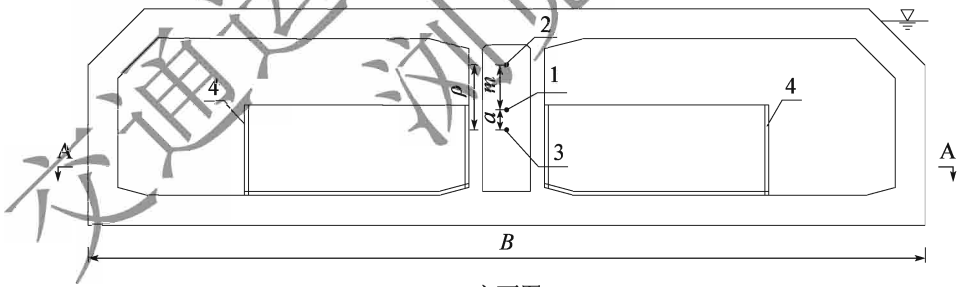
C_s ——形状系数,可取1.0。

附录 B 管节定倾高度计算

B.0.1 管节浮运过程中的定倾高度应按式(B.0.1)计算：

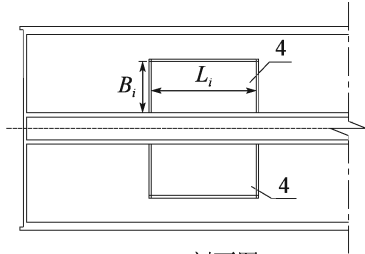
$$\begin{cases} m = \rho - a \\ \rho = \frac{I - \sum I_i}{V} \\ I_i = \frac{L_i B_i^3}{12} \end{cases} \quad (\text{B.0.1})$$

式中： m ——定倾高度(m)，见图 B.0.1；
 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*个压载水箱的水面对该水面纵向中心轴的惯性矩(m^4)；
 V ——管节的排水量(m^3)；
 L_i ——第*i*个压载水箱水面长度(m)；
 B_i ——第*i*个压载水箱水面宽度(m)。



a)立面图

1-重心；2-定倾中心(当管节倾斜一个微小角度时浮力矢量与管节竖向中性轴平面的交点)；3-浮心；4-压载水箱



b)A—A剖面图

1-重心；2-定倾中心；3-浮心；4-压载水箱

图 B.0.1 管节定倾高度计算图

本规范用词用语说明

1 本规范执行严格程度的用词,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”。

2 引用标准的用语采用下列写法:

- 1)在标准总则中表述与相关标准的关系时,采用“除应符合本规范的规定外,尚应符合国家和行业现行有关强制性标准的规定”。
- 2)在标准条文及其他规定中,当引用的标准为国家标准和行业标准时,表述为“应符合《××××××》(×××)的有关规定”。
- 3)当引用本规范中的其他规定时,表述为“应符合本规范第×章的有关规定”、“应符合本规范第×.×节的有关规定”、“应符合本规范第×.×.×条的有关规定”或“应按本规范第×.×.×条的有关规定执行”。