

港珠澳大桥岛隧工程

论文集

卷IV
▼

中交港珠澳大桥岛隧工程项目总经理部

科学出版社



港珠澳大桥岛隧工程

论文集

卷IV



中交港珠澳大桥岛隧工程项目总经理部

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是在港珠澳大桥建设过程中,建设团队结合理论设计、思考、实践实施而编写的阶段性成果的汇集,本卷涵盖了设计、施工、管理等方面的内容,共计 75 篇论文。

本书可供从事桥梁道路工程设计、施工、测量、监测等专业技术人员参考,也可供高等院校交通工程、桥梁工程、道路工程等专业师生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

港珠澳大桥岛隧工程论文集. 卷IV / 中交港珠澳大桥岛隧工程项目总经理部编. —北京: 科学出版社, 2019.7

ISBN 978-7-03-061822-1

I. ①港… II. ①中… III. ①跨海峡桥-桥梁工程-文集 ②水下隧道-隧道工程-文集 IV. ①U4-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 137938 号

责任编辑: 郭勇斌 欧晓娟 / 责任校对: 邹慧卿

责任印制: 师艳茹 / 封面设计: 黄华斌

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 7 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2019 年 7 月第一次印刷 印张: 39 3/4

字数: 918 000

定价: 238.00 元

(如有印刷质量问题, 我社负责调换)

“港珠澳大桥岛隧工程论文集”编委会

主 任 林 鸣

副 主 任 刘 晓 东 尹 海 卿 刘 亚 平

编 审 委 员 (以 姓 氏 笔 画 排 序):

王 强	孔 令 磊	冯 颖 慧	刘 海 青
杨 绍 斌	吴 凤 亮	何 波	张 宝 兰
陈 伟 彬	陈 良 志	陈 林	林 巍
罗 冬	岳 远 征	周 光 强	孟 凡 利
赵 辉	高 潮	高 纪 兵	黄 维 民
宿 发 强	梁 桁	梁 杰 忠	屠 柳 青
董 政	谢 臣 伟	樊 建 华	

序 言

港珠澳大桥东连香港、西接珠海、澳门，是集桥、岛、隧为一体的超大型跨海通道，是我国继三峡工程、青藏铁路、南水北调、西气东输、京沪高速铁路之后又一重大基础设施项目。其中，岛隧工程是大桥的控制性工程，包括一条长 6.7 km 的沉管隧道和两座各 10 万 m² 的外海人工岛，采用设计施工总承包模式，由中国交通建设股份有限公司联合体承建。

沉管工法是一项综合了水工工程、地下工程、隧道工程的复合性技术，实施难度和风险非常大，因而在隧道建设中应用不多。到目前为止，全世界建成的沉管隧道只有一百多条，主要集中在美国、日本、欧洲等发达国家及地区。中国的沉管隧道建设起步较晚，在 20 世纪 90 年代初才建设了第一条沉管隧道，截至 2010 年，全国也只在内河、江湖中修建过十多条沉管隧道，长度也是几百米级的。

深埋海底、长达 6.7 km 的外海沉管隧道，放眼全球，都是令人望而生畏的难题：岛隧工程结合、软土地基不均匀沉降控制、超大管节预制、外海条件管节浮运和沉放、深水深槽条件管节对接、结构与接头的水密、最终接头等技术难题都是具有世界级挑战性的。

七年建设征程，岛隧工程建设团队攻坚克难、创新实践，完成了 100 多项试验研究，申报并取得超过 400 项技术专利，开创了公路沉管隧道“最长、最大跨径、最大埋深、最大体量”四项世界纪录，取得了大直径深插钢圆筒快速成岛新技术、半刚性沉管新结构、整体式主动止水最终接头新方案、复合地基加组合基床隧道基础新形式等多项创新成果；攻克了曲线段沉管工厂法预制、外海沉管安装等多项新技术。这些创新成果是本项目一线科技人员聪明才智与实践探索的结晶。

2011~2017 年，4000 名岛隧建设者七年如一日，坚守七年、奉献七年，确保了港珠澳大桥主体工程顺利交工验收。现将项目建设过程中编写及发表的论文约 400 篇进行梳理汇总，形成了论文集共四卷，呈现给同行和专家学者，以供参考。由于水平有限，本书难免有错误、遗漏及理解偏颇之处，还望读者不吝赐教，以便鞭策我们不断探索和提升，全体编写人员对此深表感谢。

最后，衷心感谢各级领导和同仁对港珠澳大桥岛隧工程的支持、关心与帮助！

中国交通建设股份有限公司联合体
港珠澳大桥岛隧工程项目总经理部

2018 年 11 月

目 录

序言

- 沉管隧道半刚性管节.....林 鸣 刘晓东 林 巍 等 (1)
- 记忆支座——沉管隧道管节接头差异沉降问题解决方案.....
.....林 鸣 林 巍 尹海卿 等 (22)
- 沉管隧道管节拖航水阻力原型试验.....林 鸣 林 巍 黄维民 等 (39)
- 沉管隧道与人工岛的理念与实现——港珠澳大桥岛隧工程.....
.....林 鸣 刘晓东 林 巍 等 (53)
- 人工岛快速成岛技术——深插大直径钢圆筒与副格.....
.....林 鸣 林 巍 王汝凯 等 (69)
- 沉管隧道 78 000 t 管节多点式分段顶推.....
.....林 巍 王晓东 董 政 等 (89)
- 沉管隧道管节：出坞、拖航、系泊与沉放准备的关键问题.....
.....林 巍 林 鸣 花田幸生 等 (102)
- 沉管隧道混凝土管节与碎石基床摩擦力原型观测与试验.....
.....林 巍 尹海卿 张建军 等 (112)
- 沉管隧道节段接头可注浆止水带使用改良.....
.....林 巍 林 鸣 Joel Van Stee 等 (124)
- 沉管隧道线形管理.....林 巍 尹海卿 林 鸣 等 (134)
- 沉管隧道最终接头新工法的几个特殊结构问题.....
.....林 巍 刘凌锋 苏怀平 等 (148)
- 沉管隧道整体式最终接头的地基刚度差异问题及处置措施.....
.....林 鸣 林 巍 姬 海 等 (158)
- 沉管隧道的设计.....林 巍 刘凌锋 林 鸣 (169)
- 沉管隧道最终接头超短束大位移张拉工艺.....张 洪 刘经国 游 川 (180)
- 管节安装测量塔浮态标定方法研究.....锁旭宏 张 超 成益品 (189)

管节沉放姿态控制影响因素分析	苏长奎	(197)
港珠澳大桥岛隧工程东人工岛岛隧结合部清淤施工工艺浅析	杨秀武 何波	(202)
港珠澳大桥检修道清水混凝土预制工艺	曾庆喜 刘宇	(208)
港珠澳大桥人工岛清水混凝土建筑的结构设计	梁继忠 肖春发 刘观发	(215)
挤密砂桩施工参数及充盈系数试验与分析	尚乾坤 魏红波 宋江伟	(221)
BJ200 无缝伸缩缝标准化施工工艺研究	张洪游 川 刘国柱 等	(229)
BIM 技术在港珠澳大桥东人工岛室外水电管线预埋工程中的应用	钟明乾 刘宇	(237)
平台式碎石铺设整平船抬升系统齿轮齿条失效分析	王明祥 李家林	(244)
地下空间电气设备用房通风空调设计探讨	许伟航	(251)
外海人工岛岛上建筑工程的给排水设计分析	陈海琪	(255)
适用于大型浮式坞门的新型坞口底板结构	黄丹苹 马勇 陈良志	(261)
港珠澳大桥岛隧工程精细化质量管控	刘忠鹏 陈斌	(267)
外海施工人员水上交通解决方案	彭晓鹏	(275)
港珠澳大桥岛隧工程施工计划与进度控制管理	刘洋 吴凤亮 李德辉	(280)
港珠澳大桥沉管预制自防水混凝土施工关键技术	刘洋 李德辉 孟庆龙	(285)
港珠澳大桥沉管隧道管内 HSE 标准化建设	王国发 吕宏宇 高昊然 等	(290)
西人工岛房屋建筑负一层模板及混凝土质量通病治理	吕鹏 杨润来 陈三洋	(298)
港珠澳大桥东人工岛房建大台阶精细化安装工艺	刘宇 游川	(309)
港珠澳大桥西人工岛混凝土产品认证技术总结	江宪权 陈国平 洪志军	(316)
港珠澳大桥珠澳口岸人工岛陆域形成回填材料关键技术研究	杨昌斌 陈聪	(323)
浅析降水井打设工艺改进	莫日雄 代伟	(333)
港珠澳大桥东人工岛非通航孔桥锚下有效应力控制技术	刘海青 莫日雄 陈利军	(341)
东人工岛管线槽预制弧形侧板安装工艺	莫日发 张世杰	(348)
港珠澳大桥东人工岛无填料振冲技术的参数设置及应用	黄存东 王聪	(356)
东人工岛水下钢套筒承台施工工艺	黄存东 吕迪	(363)

- 港珠澳大桥东人工岛清水立柱标准化、装配化施工工艺.....
.....彭成隽 陈传正 莫日雄 等 (371)
- 港珠澳大桥主体建筑清水混凝土开裂研究.....刘思楠 王佰文 黄存东 (380)
- 浅谈港珠澳大桥东人工岛人员管理.....邹宇霆 杨泗兵 (385)
- 港珠澳大桥东人工岛清水混凝土施工质量管理.....宋 奎 赵文俊 (389)
- 最终接头后注浆基础成套施工技术.....张 洪 苏怀平 王 李 (399)
- 基于风险管理的质量要点化控制.....杨 震 孙 志 (407)
- 浅析班组文化建设在 HSE 管理中的作用.....鹿钦周 李德辉 (414)
- 最终接头本体施工工艺与质量控制简述.....杨 震 张 洪 孙 志 (420)
- 沉管隧道钢壳高流动性混凝土浇筑施工技术.....苏怀平 王 李 (428)
- 港珠澳大桥沉管最终接头制造技术.....游 川 胡 质 王 李 (435)
- 沉管隧道中管廊电缆通道隔断隔墙施工工艺.....胡 质 李德辉 (443)
- BJ200 无缝伸缩缝的引入与检测分析.....张 洪 魏长城 (450)
- 港珠澳大桥岛隧工程路面深化设计方案简介.....刘经国 张 洪 刘晓东 (459)
- 清水混凝土脱模剂施工工艺研究.....曾庆喜 杨家青 (466)
- 港珠澳大桥沉管隧道检修道安装工艺.....李德辉 胡 质 (473)
- 港珠澳大桥沉管最终接头临时主动防水系统中 M 形止水带的应用.....
.....陈 聪 陈刚强 董洪静 (479)
- 装配式绑扎平台在曲线段沉管顶板钢筋绑扎中的改造技术.....
.....张文森 朱 成 (486)
- 工厂法曲线沉管预制测量技术.....邹正周 黄文慧 季拥军 (491)
- “捷龙”轮艏喷管快速接头改造.....卓震东 (499)
- 深水基槽高精度清淤施工技术研究.....陶宗恒 何 波 (507)
- 外海沉管隧道最终接头清淤技术.....陈 林 何 波 杨秀武 (513)
- GNSS 与超级终端在碎石基础铺设中的应用.....张 超 魏红波 孙阳阳 (522)
- 测量平台稳定性监测.....张 超 锁旭宏 曾凡军 (532)
- 大型外海沉管隧道水力压接工艺及控制方法.....孙 健 马宗豪 管泽旭 等 (541)
- 港珠澳大桥 6000 t 级最终接头吊装技术研究.....朱 岭 侯亚飞 汤慧驰 等 (547)
- 港珠澳大桥沉管安装潜水作业风险分析与管理.....吕标兵 (553)
- 港珠澳大桥沉管施工船机设备风险预控研究.....周相荣 刘炳林 张克超 (558)

港珠澳大桥沉管隧道施工风险管理体系研究.....尚乾坤 傅秀萍 朱 岭 等 (565)

港珠澳大桥岛隧工程临时用电安全管理措施.....张克超 (574)

组合式测控技术在外海超长沉管隧道安装中的应用.....锁旭宏 (581)

最终接头施工水上安全保障技术研究.....李 瀚 傅秀萍 (593)

外海深水高精度碎石基床铺设整平船建造与应用.....宿发强 李家林 王明祥 (603)

超大型沉管隧道管节浮运安装船的建造与应用.....李家林 王明祥 王明亮 等 (610)

抛石整平船清淤系统技术改造.....李家林 王明祥 (617)

沉管隧道半刚性管节*

林 鸣¹, 刘晓东², 林 巍², 尹海卿³, 李 毅²

(1. 中国交通建设集团有限公司, 北京; 2. 中交公路规划设计院有限公司, 北京;
3. 中交第三航务工程局有限公司, 上海)

摘 要: 港珠澳大桥沉管隧道上覆回淤厚度 21 m, 导致原先的节段式管节结构的失效概率大。为了降低风险, 作者提出“半刚性管节结构”概念。通过不剪断原先节段式管节结构的临时预应力, 来确保节段接头端面的摩擦力, 从而用摩擦力与剪力键一同抵抗剪力, 同时维持节段之间的相对转动能力; 即令管节结构的健壮性得到提高。本文结合足尺物模试验对这个新结构的优势进行了论证, 对其中的关键问题——预应力体系的设置进行了详述, 并且介绍了港珠澳大桥沉管隧道半刚性管节的应用案例。半刚性管节, 与节段式管节相比, 在一些情况下, 只是将临时预应力转变为永久预应力, 施工费用增加不多, 但是管节的整体性与健壮性显著提高, 因此半刚性管节是一种性价比较高的结构形式; 特别对于水下基础施工质量控制困难、基础差异沉降不确定性大的工程, 半刚性管节是值得考虑的一种管节纵向结构形式。

关键词: 沉管隧道; 预应力; 结构; 回淤; 深埋; 摩擦力

1 总 论

1.1 背 景

在港珠澳大桥沉管隧道工程中, 沉管隧道管节的节段接头的竖向剪力键因差异沉降而损坏的可能性大。因为隧道的埋深大, 沉管隧道安装后, 顶部会被 21 m 厚的回淤覆盖, 回淤物的容重 5 kN/m^3 。部分回淤在远期可能由于航道的规划而被再次挖除。而且, 隧道下方的地层是沿着隧道纵向 0~30 m 不等厚的软土, 参见图 1。

沉管管节结构的原方案是节段式, 每隔 22.5 m 的节段接头部位有竖向混凝土剪力键。因埋深大的问题, 节段接头剪力键的承载力不足。

曾经考虑过减轻隧道上方荷载的两个方案, 见图 2。一个是在未来 120 年的隧道运营

* 本文曾刊登于《水道港口》2018 年增刊 2。

期间，不断地疏浚，移除隧道上方的回淤；另一个是在施工期，在隧道上方预先填上轻质的材料，轻质材料的容重与水接近。但是，这两个减载方案的花费巨大，且工期不可控。

与其改变隧道结构的外部环境，不如改变它的结构。作者提出了半刚性管节结构来解决大埋深的问题^[1]，不需要减载。这个方案的投资费用比前两个方案要少，因为减少了大量的海上作业，结构与原设计方案相比其主要变化只是不剪断沉管隧道的临时预应力，而是将它们永久地使用。而且，也降低了海上作业的风险。

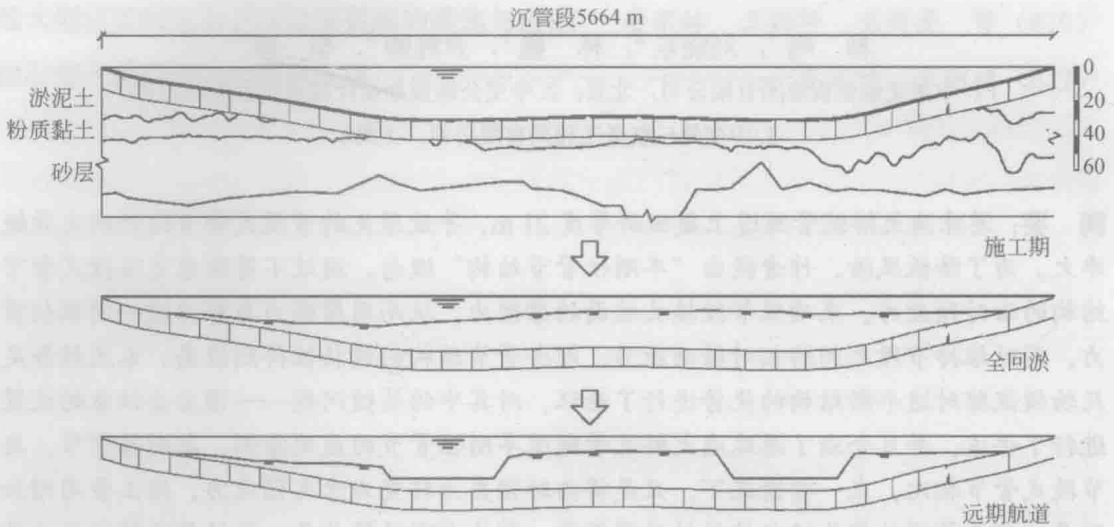


图1 “深埋”问题——隧道顶部荷载大，且随着时间变化

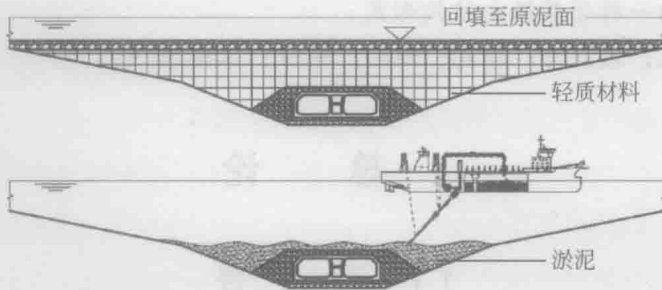


图2 大埋深问题的两个减载方案

1.2 半刚性管节的概念

半刚性管节是一种节段式的管节结构。该结构利用节段接头端面的摩擦力抵抗（部分）剪力，从而加强节段接头的抗剪能力。保证足量的摩擦力是通过合理地设置纵向的预应力筋，从而得到足够的节段接头的正压力。同时，在大荷载与不均匀沉降的不利组合作用下允许节段之间发生一定量的转动（即允许节段接头的上缘或下缘张开），以使得管节结构能够通过纵向的变形来适应地基。总之，半刚性管节结构是一种利用剪力键与摩擦力并保

留结构的纵向柔性来提高健壮性 (robustness) 与整体性 (integrity) 的管节结构。

为了进一步说明半刚性管节的原理, 下一节首先回顾已有沉管管节结构形式, 再通过半刚性管节结构与已有结构形式的比较来证明半刚性管节的优势。

2 半刚性管节结构

2.1 以往沉管管节结构回顾

沉管结构形式总体上可分为钢壳式与混凝土式。按时间发展顺序, 钢壳式管节又分为双钢壳、单钢壳和三明治, 这三种形式都是整体式管节; 混凝土式管节又分为整体式与节段式^[2,3]。半刚性管节结构是基于混凝土节段式管节的基本构造, 因港珠澳大桥岛隧工程沉管隧道的深埋问题而得以发展。所有沉管结构形式见图 3。

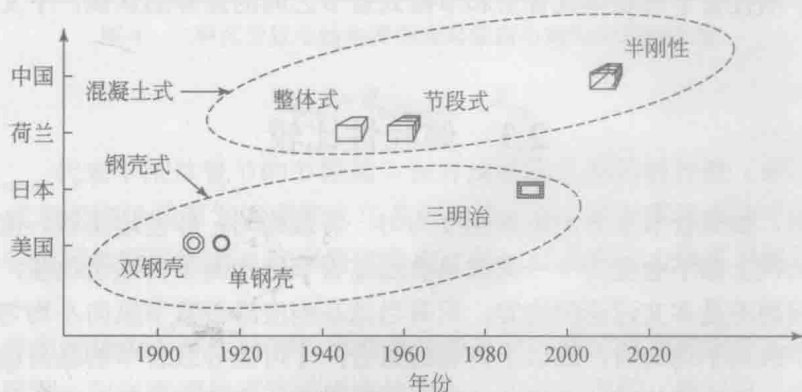


图3 沉管结构形式的分类与出现时间

以下简要回顾混凝土整体式管节与节段式管节的特点。

整体式管节是连续的结构, 中间不带柔性接头。为了避免开裂, 浇筑时分批进行, 存在纵向与竖向的冷缝。竖向冷缝通常介于底板、墙体与顶板之间。为了避免混凝土结构渗水, 整个管节通常被防水层包裹^[2,3]。比较而言, 节段式管节只有竖向冷缝, 即节段接头, 间距 20~25 m, 每个节段采用一次性浇筑。节段的混凝土可以做到自防水, 不需设置外包防水层, 但是需要控制浇筑时的温度^[3]。厄勒海峡沉管隧道第一次采用工厂法的方式预制了节段式管节, 提高了工效^[4]。节段接头的防水通常采用可注浆止水带^[5], 可注浆止水带在混凝土浇筑前就需要与节段的钢筋笼固定。节段式管节为安装作业需要施加纵向临时预应力, 安装完成后, 预应力筋在节段接头部位被剪断^[6], 让管节变柔以适应基础沉降。显而易见, 整体式管节沿着纵向的整体的抗弯刚度和抗剪刚度比节段式管节大。

2.2 半刚性管节的特点

半刚性管节同节段式管节一样,采用纵向分段的构造,且节段之间允许一定程度的转动。但是半刚性管节的不同之处在于:

1) 结构的纵向始终保持正压力。

2) 保持正压力令节段接头部位始终有摩擦力,从而节段接头部位的摩擦力和其他结构性的抗剪构造(以下用“剪力键”)可以共同承担该部位的剪力。这种协同抗剪能力通过试验得到了证明,在第3节详述。

3) 半刚性管节结构的纵向弯曲刚度随着外部条件改变。当荷载与差异沉降较小时,节段接头不张开,管节结构的弯曲刚度基本等于整体式管节的。当荷载(地震、沉船等偶然工况)与差异沉降很大时,节段接头张开,其弯曲刚度介于整体式管节与节段式管节之间。

基于对半刚性管节与整体式管节和节段式管节之间的差异的认识,下文比较三者的健壮性。

2.3 健壮性比较

首先说明,如果管节下方的地基刚度均匀、荷载均匀,即便地基软、荷载大,三种管节的纵向结构上都不会受力——荷载只会通过管节结构向下传递至地基,即属横向结构问题。该问题不是本文讨论的内容;只有当地基刚度沿着管节纵向不均匀时,或上覆荷载沿着管节纵向不均匀时,或以上两者的组合,才可能导致管节的纵向结构受力与变形。也就是说,不论整体式、节段式还是半刚性管节,它们都能接受均匀的沉降,只有在它们发生差异沉降时,才有评估它们的健壮性的必要。

图4描绘了三种沉管管节应对纵向不均匀沉降的表现。

整体式管节主要靠自身的承载力来抵抗不均匀沉降,通过较大的纵向弯曲刚度与剪切刚度,将不均匀荷载和地基刚度差异的作用转化为自身的纵向弯矩与剪力。

与整体式管节的方式截然不同,节段式管节的应对方式主要是靠变形,即通过允许节段与节段之间发生相对位移(主要是转动)来获得额外的地基反力;或者说,将每个节段受到的外部荷载尽可能多地向下传递,而不是沿着纵向传递,进而减少结构的纵向传力;对于抗剪较弱的节段接头部位,这一点极其重要。

半刚性管节的抵抗方式是两者兼施,即整体式管节的纵向传力方式加节段式管节释放变形的的方式。首先,它像整体式管节一样,利用自身刚度来吸引外部荷载,让外部荷载沿着管节纵向传递。当荷载超出了能令它的节段接头张开或错位的临界荷载时,对于超出的那一部分荷载,半刚性管节像节段式管节一样,通过释放节段之间的相对变形,来获得地基反力的帮助,从而获得一个新的力的平衡。用方程表达,半刚性管节的健壮性来自两部分:

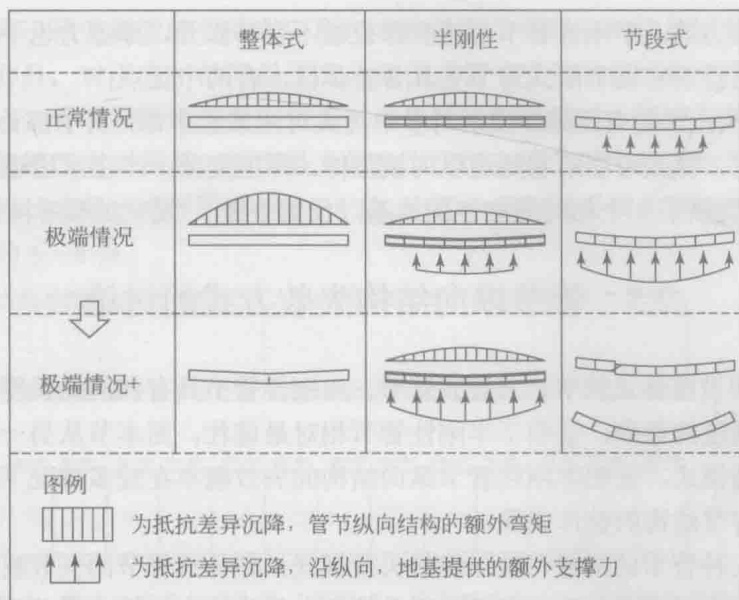


图4 三种沉管管节结构类型应对纵向不均匀沉降的表现

$$R_{\text{semi.}} = R_{\text{quasi-mono.}} + R_{\text{seg.}} \quad (1)$$

式中, $R_{\text{quasi-mono.}}$ 代表半刚性管节的节段接头张开或错动之前的健壮性 (即对作用的抵抗能力); $R_{\text{seg.}}$ 代表半刚性管节发挥变形作用获得的健壮性。这里需要假定半刚性管节与节段式管节具备相同的变形能力; 这个假定是成立的, 只要预应力体系设置得合理, 这在第4节讨论。

此外, 考虑沉管管节浮运时的长周期波浪的风险, 或运营期的差异沉降的风险, 观察以往工程案例, 可发现整体式管节通常比节段式管节做得短。所以可认为, 当节段式管节与整体式管节的长度相等时, 两者的健壮性为

$$R_{\text{seg.}} > R_{\text{mono.}} \quad (2)$$

如果 (1) 与 (2) 成立, 则可得到 (3), 即半刚性管节最健壮。

$$R_{\text{semi.}} > R_{\text{seg.}} > R_{\text{mono.}} \quad (3)$$

需要强调, 上述结论是基于节段式管节与整体式管节等长的假设, 管节长度的确定取决于诸多因素, 可参考文献 [2]。同样地, 管节结构形式的选择因素远不止是健壮性, 还有很多因地制宜的考虑, 包括管节预制方式、浮运条件、工期要求、传统习惯、施工质量控制, 以及可用的止水产品。

2.4 整体性比较

前文已述, 整体式管节的整体性最好, 节段式管节的整体性最弱。相比节段式管节,

由于保留了预应力筋,半刚性管节在接头部位较不容易张开,摩擦力也不容易发生相对错动,因此在运营期它比节段式管节更具备整体性,有两个优点:

- 1) 节段接头止水更有保障。特别对于中埋式可注浆止水带,其中部为橡胶构造,当节段接头张开时,橡胶可能沿着隧道纵向被拉伸,厚度变薄,产生水通道。
- 2) 为路面提供了一个相对更刚性的地基,反射裂缝^[7]发生的概率降低。

2.5 管节纵向结构失效方式的讨论

第 2.3 节假设整体式管节、节段式管节、半刚性管节具有相同的长度,相同的荷载与相同的地基刚度的差异,证明了半刚性管节相对最健壮。而本节从另一个视角,管节纵向结构的失效模式,证明半刚性管节纵向结构的失效概率在较多情况下较低。本节还分析了半刚性管节结构的整体表现。

表 1 列举三种管节结构最可能出现的失效模式:整体式管节的失效模式是受拉侧的结构边缘的拉应力过大或开裂;节段式管节的纵向结构的失效模式是节段接头的抗剪失效,或节段接头张开量过大(参考前文的图 4)。半刚性管节的失效模式同节段式管节——当半刚性管节的预应力筋全部断裂了以后,就会像节段式管节一样失效。下文对应每一项失效模式比较结构的安全度。

表 1 三种管节结构的失效模式及对应工况

工况		半刚性管节与节段式管节失效模式		整体式管节失效模式
		模式 A: 节段接头抗剪失效	模式 B: 节段接头过度张开	模式 C: 拉应力过大
管节安装	浮运:长周期波	—	弯矩引起	弯矩引起
	安装:长周期波	剪力引起	弯矩引起	弯矩引起
运营正常情况	上部荷载+地基刚度不均	剪力引起	弯矩引起	弯矩引起
	降温+混凝土收缩、徐变*	间接影响,减小端面摩擦力	拉力引起	拉力引起
运营灾难情况	沉船	剪力引起	弯矩引起	弯矩引起
	地震 P-wave	—	惯性力引起	—
	地震 SV-wave	惯性力引起	—	—

* 沿着管节轴向的拉力,是由于管节或节段变短引起的四周回填与基床的摩擦力。

半刚性管节在节段接头部位的抗剪安全度(对应表 1 模式 A)比节段式管节更高。对于节段式管节,节段接头的抗剪能力源于地基反力与竖向剪力键两部分。而对于半刚性管节,节段接头的抗剪能力不仅来自上述的两部分,还有另外一部分来自摩擦力。需要说明的是,前文已述半刚性管节的结构纵向刚度比节段式的大,但是两种管节结构受到的剪力是相等的,因为两种管节的变形能力相同,即利用等量的地基反力。对于变形后的半刚性管节,摩擦力在节段接头部位仍然会帮助抗剪;第 3 节会证明这一点。

再比较节段式管节与半刚性管节在节段接头部位的抗张开能力(对应表 1 模式 B)。显而易见,半刚性管节因保留了预应力而不易张开。

最后,比较整体式管节与半刚性管节的抗开裂能力(对应表 1 模式 C)。半刚性管节

的节段接头等同于预先设置的“裂缝”，所以半刚性管节的纵向结构相比整体式管节的较不容易开裂。并且，对于表 1 的降温工况，整体式管节受到的截面拉力远大于半刚性管节，原因见图 5，管节被回填与基床包裹，当管节降温收缩时，回填与基床产生的摩擦力方向与管节收缩的方向相反，截面最大的拉力出现在管节的中部。由于整体式管节的混凝土连续结构长度是半刚性管节的 5~8 倍，它的中间截面受到的摩擦力的合力也是半刚性管节截面的 5~8 倍。

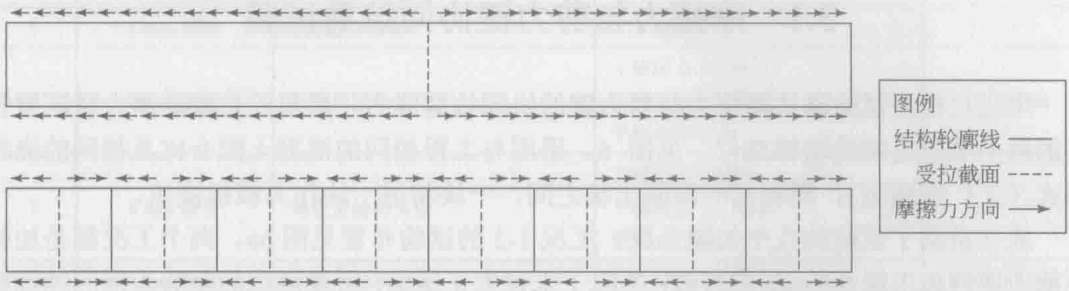


图 5 整体式管节与半刚性（节段式）管节降温收缩工况摩擦力示意图

使用半刚性管节，预应力筋的断裂也应注意。预应力筋的断裂可能因为腐蚀，因此需要通过良好的预应力防水、防腐蚀设计及施工质量控制来降低这个风险。另一个风险源是预应力筋受力过大的断裂，可通过预留预应力的张拉的度，以及设置预应力的无黏结长度来调节节段接头的允许张开量。此外，一个有趣的想法是，当纵向预应力筋全部断裂以后，半刚性管节就转变成了节段式管节。如果节段式管节在该条件下能够生存，则转变成节段式管节的半刚性管节也能生存；如果节段式管节不能生存，转变成节段式管节的半刚性管节仍然比纯粹的节段式管节有着更大的生存机会。因为在转变之前，半刚性管节“争取”了一段时间，这段时间使得隧道的外部环境趋于稳定，即远离外部荷载变化相对较大的施工期，靠近外部荷载较稳定的运营期。

由于半刚性管节比节段式管节的纵向弯曲刚度大，半刚性管节获得的地基反力比节段式管节少，所以管节接头竖向剪力键的受力比节段式管节的大。而管节接头的剪力键受到的剪力可通过延迟安装时间，甚至压载等方式抵消一部分^[2]，因此不应当是管节选型的主导问题。对于港珠澳大桥沉管隧道作者还提出了“记忆支座”的概念来保护管节接头的竖向剪力键及相邻的结构^[1]，这在《记忆支座——沉管隧道管节接头差异沉降问题解决方案》中单独讲述。

综上所述，半刚性管节的结构效率高，相比节段式管节将预应力筋用得更充分，因为兼顾了施工期和运营期；相比整体式管节将混凝土用得更适宜，因为通过将混凝土结构沿着纵向分节（设置诱导裂缝），从而降低了开裂的可能。

3 摩擦力对节段接头抗剪的贡献

第 2 节的结论建立在节段接头的摩擦力可以提高节段接头的抗剪能力这个观点上。

本节的试验^[8]证明了这个观点,并且为半刚性管节的结构分析与设计所需的摩擦力取值提供依据。

对摩擦力的科学研究仍在持续,摩擦力的来源被分为犁、滑、切三部分^[9]。但是工程中已将摩擦力当作永久的抗力。如澳大利亚巴林贾克(Burrinjuck)坝^[10]、瑞士苏黎世火车站及阿克斯特拉斯(Axenstrasse)桥等。

3.1 摩擦力与剪力键协同抗剪试验

用足尺模型试验确认摩擦力与剪力键的协同抗剪能力。模拟的是港珠澳大桥沉管管节的两个节段之间的墙体部位,见图6。采用与工程相同的混凝土配合比及相同的浇筑模式(工厂法预制),即相邻的混凝土块之间,一块将另一块作为模板浇筑。

表2总结了试验的几个关键工况。工况1-2的试验布置见图6a。两个工况都是加载至剪力键周边出现0.5mm的裂缝;工况1未设置正压力,所以测试的是剪力键的纯抗剪能力,工况2为了测试摩擦力的抗剪贡献,设置了正压力。工况3~5测试剪力键之间的不同厚度的沥青垫层对摩擦力抗剪协同能力的影响;通过在剪力键的正下方设置测力计,可将摩擦力的抗剪贡献与剪力键的抗剪贡献分开来读取,试验布置见图6b;工况6~7测试了单侧受压,单侧无压力时的摩擦力的贡献,试验布置仍然见图6b;工况8~9是为了测试节段接头的极限承载力,试验布置见图6c。

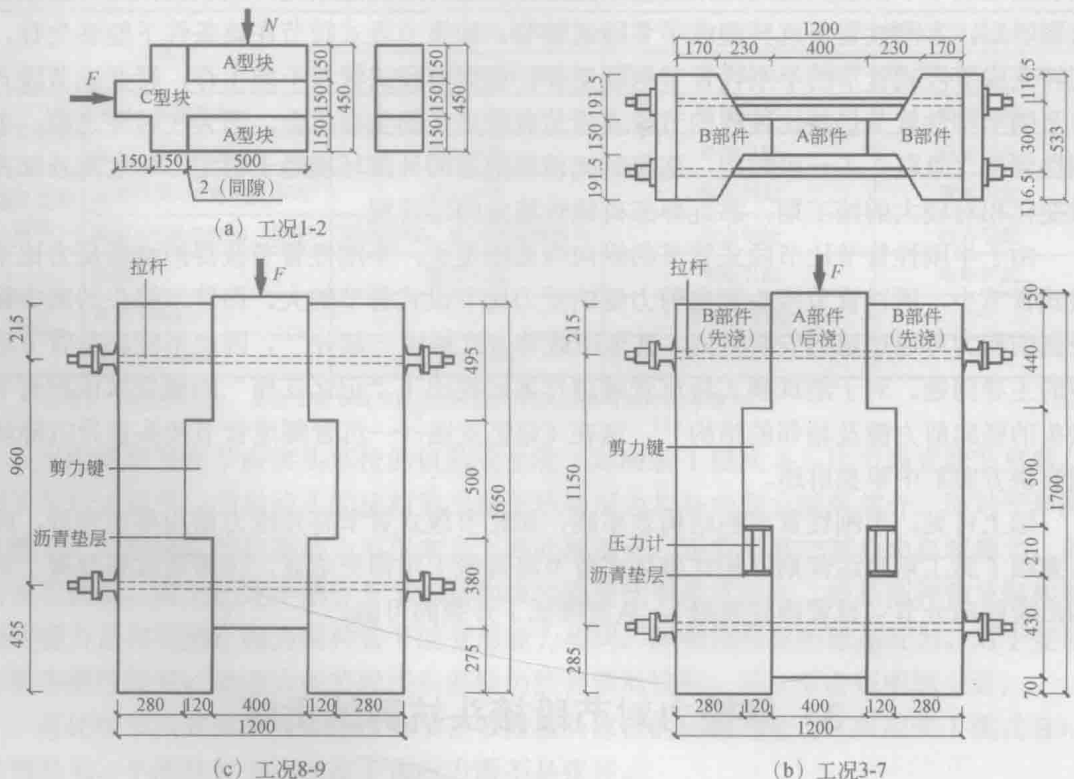


图6 摩擦力与剪力键协同作业试验方案图(单位: mm)