

南水北调超大钢筒混凝土管道结构安全评估

胡少伟^{1,2}

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 水利部水科学与水工程重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: 我国从2006年开始首次把直径4 m的超大预应力钢筒混凝土管道(简称PCCP)用于南水北调中线京石段供水工程中. 基于PCCP结构安全使用100年的要求, 针对南水北调中线PCCP项目遇到的管芯裂缝和预应力松弛等对结构安全影响如何评估的技术难题, 采用现场实体管道试验(裂缝PCCP抗裂外压承载力试验、PCCP现场断丝原型试验、预应力钢丝松弛PCCP内水压承载试验)和非线性有限元数值模拟等方法对PCCP结构的承载能力进行了系统分析研究. 结果表明: 管芯出现一条或少量细小裂纹, 不需修补或用水泥净浆涂刷即可; 较宽的裂缝, 可按规定程序进行修补; 出现多条纵向裂缝、或环向裂缝长度超过周长的裂缝、或出现十字交叉裂缝的管芯为废品管. 预应力钢丝作为PCCP的主要承载体, 应确保钢丝质量, 避免断丝. 有关部门基于研究结果和提出的工程处置建议, 并借鉴国外先进国家PCCP制造厂商经验, 对工程中已经出现裂缝的PCCP进行了全方位安全评估, 对不满足管芯外表面裂缝控制要求的管道进行报废处理(该工程共计报废35根), 以满足工程安全需要; 对一些裂缝影响较小的PCCP可用在埋深较浅的地段, 从而节省了工程成本. 最后阐述了下一步需继续研究的工作.

关键词: 预应力钢筒混凝土管道; 抗裂外压试验; 断丝; 预应力松弛; 塑性损伤模型

中图分类号: TV332.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-640X(2009)04-0074-09

我国是一个水资源比较贫乏的国家, 地区间水资源分布严重不均衡, 随着国民经济的快速发展, 缺水已成为制约其发展的主要因素, 特别是一些工业城市. 在全国670个城市中, 有400多座存在不同程度的缺水现象, 108座城市严重缺水. 随着国民经济实力的不断加强, 国内大中城市不得不采取长距离引水, 南水北调就是在此背景下应运而生的跨流域调水工程. 该工程是人类运用现代科学技术, 改造自然, 改变人类生存环境, 保护生态平衡和促进经济发展的伟大壮举^[1].

1999年以来, 北京市连续遭遇干旱, 水资源短缺, 供需矛盾日益突出, 密云、官厅两大水库蓄水量锐减. 为确保南水北调工程进京之前北京市供水安全和2008年奥运会的举办, 水利部提出了结合南水北调中线工程京石段建设, 将沿线河北省境内的西大洋、王快、黄壁庄和岗南四座水库作为北京应急备用水源的方案. 可实现调用河北省水资源供北京市应急使用. 总干渠建成与西大洋和王快水库连接工程, 南水北调分两期向北京供水, 2007年京石段工程建成后可每年应急调水3~5亿m³, 能全线自流输水至团城湖向北京市第九水厂供水; 2010年全线贯通后年调水10亿m³. 南水北调中线京石段应急供水工程的实施, 可实现在南水北调中线工程全线通水前向北京应急供水, 对保障北京市供水安全和奥运会的成功举办具有重要意义^[2].

对于南水北调京石段工程建设, 选择什么样的长距离大口径输水管道, 将直接影响着工程的投资和工程寿命. 目前, 国内外采用的压力输水管道主要有以下几种: 预应力钢筒混凝土管、预应力混凝土管、钢管、铸铁管(球墨铸铁管)、玻璃钢管和纤维增强树脂砂浆管, 后者最大直径可达5 m, 但价格较高, 在输水管路上一

收稿日期: 2009-07-03

基金项目: 国家“十一五”支撑计划(2006BAB04A04); 国家自然科学基金资助项目(50879048)

作者简介: 胡少伟(1969-), 男, 河南杞县人, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事水工结构和材料性能研究.

E-mail: hushaowei@nhri.cn

般不选用。而预应力钢管混凝土管作为国家 21 世纪试点推广项目,以其适用范围广、经济、寿命长、抗震性能好、安装方便、基本不漏水、运行费用低等新型组合结构优点,成为南水北调中线京石段工程的首选管材。目前,南水北调中线京石段应急供水工程采用双排、直径 4 m 的预应力钢管混凝土管道(PCCP)(见图 1),是继利比亚大人工河工程之后,国际上又一次大规模使用 4 m 直径 PCCP 管道的工程项目,而且类似采用双排、埋深如此大的工程在国际上尚无先例。



图 1 PCCP 管道结构与应用

Fig. 1 Structure of PCCP and its in-situ application

1 预应力钢管混凝土管(PCCP)发展状况

预应力钢管混凝土管(以下简称 PCCP)是指在带钢管的混凝土管芯上缠绕环向预应力钢丝并在外层喷射水泥砂浆保护层而制成的管子(见图 1)。PCCP 分为内衬式和埋置式,两种类型都在钢管端部焊有钢制接口^[3]。内衬式管采用离心成型方式在薄钢管内形成混凝土管芯,经养护后,在钢管表面缠绕高强钢丝,再喷制砂浆保护层;埋置式管是将薄钢管嵌置于内外模之间,立式浇注混凝土,振动成形,经养护后在混凝土管芯缠绕高强预应力钢丝,最后喷制砂浆保护层。内衬式适用于管径小于 1.5 m 的管道,南水北调采用的 PCCP 为埋置式。

PCCP 既具有钢管和预应力钢筋混凝土管的优点,又具有一定的特性。根据研究、设计、生产和应用的经验,预应力钢管混凝土管的优点可概括如下:①高强度:由于复合结构的特点,国内应用其输水工作压力已达 2.0 MPa,覆土已达 12 m;②高抗渗性:最优化地利用钢材和混凝土,薄钢板起到高抗渗的作用;③高密封性:采用钢制承插口接头和两道密封胶圈,保证了密封性;④耐久性好:管体表面不需防腐涂料,而钢管由水泥混凝土包裹,受到碱性钝化膜的保护,延长了寿命;⑤接口尺寸精确,因可使用限制接口(restrained joint),管道转弯时可免去支墩,安装方便,加快了施工进度;⑥管道维护费用低。据美国压力管协会统计,在钢管、混凝土管和球墨铸铁管中,PCCP 的维护费用最低,同时 PCCP 还可以带压打孔,安装支线。

PCCP 的历史可追溯到 1893 年,巴黎总工程师邦纳(Bonna)设计和制造了钢管混凝土管,管径为 1 800 mm,内压力 0.35 MPa,第一次铺设于巴黎科隆贝(Clombes)引水管网,其长度为 1.5 km;1939 年邦纳公司制造了预应力钢管混凝土管,并敷设于巴黎郊区。1942 年美国开发了预应力钢管混凝土管,使其在技术上得以发展进步;1950 年司曼(F. Fseaman)和 1960 年肯尼逊(H. F. Kennison)对管体进行了荷载试验;1950~1963 年,肯尼逊和司祖勒(A. B. Siule)研究了管的结构性能和设计标准;1967~1972 年,鲁必逊(R. C. Robinson)对保护层和抗腐蚀进行了研究;20 世纪 80~90 年代,黑格(F. J. Heger)、兹加米(MZ. Zarhamee)和丹纳(W. R. Dama)等学者对预应力钢管混凝土管的力学性能及其计算进行了广泛深入的研究^[4,5]。1992 年美国国家标准研究所和美国供水协会(AWWA)联合颁布了预应力钢管管的标准(ANSI/AWWA C301 和 ANSI/AWWA C304^[6,7]),内容包括 PCCP 设计和制造;最新的标准是 ANSI/AWWAC301-99 和 ANSI/AWWAC304-99,同时还编制了混凝土压力管道手册 AWWA M9,内容包括管的水力因素、结构设计参数和安装方法等。美国现只有 4 家生产厂家,即阿麦隆(Ameron)、普莱斯兄弟公司(Price Brothers)、即福希(Gifford

Hill Amecan) 和格瑞太克斯(Gretex),其中以阿麦隆和兄弟公司规模最大.阿麦隆公司为美国加州的中央亚利桑那工程制作了管径为 6.4 m 的大型管道,内压 0.98 MPa,管顶覆土 10.5 m,修建长度 10.5 km;卡司太克工程管径为 5.1 m,内压 0.95 MPa,长度 9.5 km,管顶覆土 13.5 m;还有管径为 7 m 的倒虹吸工程,距离不长.普莱斯兄弟公司除美国中部、东部工程外,为利比亚的大人工河现场制作了大直径的预应力钢筒混凝土管,第 1 期工程为 1 900 km,第 2 期工程为 1 700 km,管径大部分是 4 m,小部分为 2.8,2 和 1.6 m,内压大部分是 1.0~1.2 MPa,小部分是 0.6,0.8,1.6 和 1.8 MPa,现已通水运营.目前在美国、加拿大、英国、法国、德国、意大利、巴西、土耳其、沙特、利比亚、韩国、印尼和泰国等国的许多引水供水工程均采用 PCCP 作为输水管道.由于美国国内近年来几乎没有新的管道建设工程,因此,其管道研究重点已转向管道病害检测、维修加固、更新改造、地震灾害等方面的研究.

尽管 PCCP 在国外的发展和应用已逾百年,但我国研制 PCCP 起步较晚.1984 年,苏州混凝土水泥制品研究院与辽宁营口自来水公司合作研制简易 PCCP,并在输水管线上使用;1985 年,南京水泥管厂与北京市政工程研究所合作,试制了口径 0.6 和 1.2 m 的 PCCP,安装于福建建阳水电站工程和南京市供水管线上;1989 年,我国山东电力管道公司引进美国 PCCP 生产线,从此拉开了我国生产 PCCP 的序幕.1992 年开始,深圳太阳管道公司、江苏无锡华毅管道有限公司也相继从美国引进关键制造设备,进行 PCCP 的研制生产,从而带动了 PCCP 在我国的逐步使用.目前,PCCP 已经广泛使用于我国的水利、电力、市政排水等领域.如新疆引额济乌大倒虹吸使用了管径 2.8 m 的 PCCP;深圳东部供水工程使用了管径 2.6 m 的 PCCP;苏州工业园区清源水业使用了管径为 1.4~2.0 m 的 PCCP;山西省万家寨引黄工程使用了管径 3.0 m 的 PCCP,铺设长达 43.2 km,这一工程是我国成功应用 PCCP 的典范^[8].从 2006 年开始,直径达到 4 m 的超大口径 PCCP 管道被南水北调中线京石段应急供水工程选用,双排铺设达 56.4 km,这一超大口径 PCCP 管道工程的应用对南水北调中线工程的全面贯通起到了保证作用.

2 在研的国家科技支撑计划课题和国家自然科学基金研究内容

国家科技支撑计划课题《南水北调超大口径 PCCP 管道结构安全与质量控制研究》紧密结合南水北调实际工程及国内 PCCP 行业技术发展,基于 PCCP 结构安全运行 100 年的要求,对管道结构计算与设计进行系统研究,重点针对 PCCP 结构的管芯裂缝、预应力钢丝松弛、断丝等技术难点进行分析,通过原型管的现场试验及有限元数值模拟,评价裂缝管与松弛管的结构安全,提出相关评价标准,为南水北调工程建设及我国 PCCP 的设计、制造和安装标准的制定与完善提供技术支持.

国家自然科学基金项目《基于 FEMOL 的大口径 PCCP 结构计算与安全评价》针对南水北调中线工程超大口径 PCCP 的管芯裂缝、断丝两大技术难点,在分析比较有限元法和有限元线法(FEMOL)优缺点的基础上,基于 FEMOL 理论,结合美国规范和我国国家标准,进行大口径 PCCP 计算分析和安全评价.基金项目将应用 FEMOL 理论,利用减少奇异单元技术,把裂尖奇异无解问题转换为规则可解问题^[9-11],从而提高 PCCP 开裂分析的可行性和精度,具有源头创新理论价值,并丰富了 FEMOL 理论在实际工程中的应用;基金项目将以实际工程为依托,结合国家科技支撑计划课题进行大量现场试验,达到解决实际问题的目的.

以上两课题以南水北调工程建设及我国 PCCP 的设计、制造和安装标准的制定与完善为课题目标,针对我国 PCCP 研究严重滞后的现状,对管道结构安全、质量控制标准进行系统研究,从而推动了 FEMOL 理论的发展,推动 PCCP 这一新型管道结构更好地发展.

3 研究成果

3.1 PCCP 现场原型试验

3.1.1 裂缝 PCCP 抗裂外压承载力试验 据北京河山引水管业有限公司现场制管经验介绍,PCCP 在生产

管芯混凝土后出现管芯外壁纵向裂缝现象^[12],经缠丝后此种裂缝有所闭合.为此,本试验对此种预存管芯纵向裂缝 PCCP 进行外压承载能力分析,选取带有典型裂缝的 PCCP,放入最不利位置进行外压承载试验(见图 2).预存裂缝描述如下:从插口端开始垂直向下延伸,裂缝长度 2 m,管肩处裂缝 5 mm,裂缝宽度 0.25 mm.



图 2 裂缝位置及加载装置图

Fig. 2 Cracking position of PCCP and its load tests

外压承载试验按《预应力钢管混凝土管》^[12]中规定的三点法进行.管道安装完成后,利用人工压动千斤顶,按每分钟不大于 110 kN/m 的加荷速度均匀加荷,按设计荷载的 20%、40%、60%、80%、90%、100% 及 110% 进行加压和恒压检查.在设计荷载值的 100% 范围,恒压时间为 5 min,大于设计荷载时,恒压时间为 5~10 min;检查管子受压和裂缝情况并作记录,观察裂缝并测量其宽度;若裂缝宽度较小或无裂缝,可继续加荷至裂缝宽度达到 0.25 mm 并沿管身平行纵轴线 300 mm 以上,读取此时的荷载值,此荷载为实际管体抗裂外压检验荷载.试验加荷过程及结果见表 1.

表 1 加荷试验过程

Tab. 1 Load tests

| 加荷率 / % | 加荷量 / kN | 压力表读数 / MPa | 裂宽 / mm | 加荷率 / % | 加荷量 / kN | 压力表读数 / MPa | 裂宽 / mm |
|------------|-------------|----------------|------------|------------|-------------|----------------|------------|
| 20 | 386.2 | 3.6 | 无 | 110 | 2 124.3 | 24.8 | 无 |
| 40 | 772.5 | 8.3 | 无 | 120 | 2 317.4 | 27.1 | 无 |
| 60 | 1 158.7 | 13.0 | 无 | 130 | 2 510.6 | 29.5 | 无 |
| 80 | 1 545.0 | 17.7 | 无 | 140 | 2 703.7 | 31.8 | 0.10 |
| 90 | 1 738.1 | 20.1 | 无 | 150 | 2 896.8 | 34.2 | 0.18 |
| 100 | 1 931.2 | 22.4 | 无 | | | | |

可见,试验荷载加至设计压力(393.2 kN/m)的 130% 时,管内壁没有出现可见裂缝;加至设计压力的 140% 时,管内壁出现宽 0.1 mm、长 300 mm 的裂缝,裂缝位于施压的垂线插口端下端;试验荷载加至设计压力的 150% 时,管内壁出现新裂缝,裂缝宽度为 0.18 mm,长为 500 mm,在原管芯裂缝位置,插口端腰部砂浆保护层出现 2 条发丝裂缝,裂缝长度为 300 mm;而原 PCCP 管芯混凝土裂缝没有扩展.

3.1.2 PCCP 现场断丝原型试验 PCCP 这一组合结构型式利用预应力高强钢丝使管芯混凝土产生预压应力,从而提高 PCCP 的承载能力.据国外 PCCP 制造厂商统计,经长期运行管道会不同程度出现断丝现象,影响 PCCP 安全性.为此,本试验依据《预应力钢管混凝土管》对 PCCP 进行断丝承载能力分析.将成型好的 PCCP 放入如图 3 所示加载装置,在管腰中间位置及两边各 1.5 m 位置凿出 3 个断丝区域,裸露出钢丝,便于在试验过程中切断钢丝,切断后的钢丝见图 4,在钢丝上粘贴光纤光栅应变计,试验加载过程中,用光纤光栅动态采集系统采集钢丝的应变变化过程,在 PCCP 内部混凝土布置电阻式应变片,用应变静态采集仪采集管芯混凝土的应变变化情况.



图3 断丝管加载装置

Fig. 3 Loading device for PCCP with broken wires



图4 钢丝切断

Fig. 4 Broken wires

外压加载试验按《预应力钢筒混凝土管》中规定的三点法进行,试验中用千斤顶人工加压,分别按40%,60%,70%,80%,90%,100%的抗裂外压检验荷载加压.试验中主要凭经验判断裂缝发生位置和借助于放大镜来发现裂缝,用卷尺测量裂缝长度,用裂缝测宽仪测量裂缝宽度,记录裂缝发生时的荷载值以及裂缝的扩展情况,每次加载到对应试验压力时,停止加压,稳压5 min,检查水泥砂浆保护层质量,并记录加压过程中管道预应力钢丝和外壁砂浆保护层的应变过程,动态采集预应力钢筋应变过程.试验发现,当加载至80%的设计荷载时,管底木棍与管身发出微弱声音;加载至100%设计荷载时,管芯混凝土同时出现以下裂缝:①管顶纵向裂缝:裂缝贯穿5 m长的管顶,裂缝宽度为0.25 mm;②管底纵向裂缝:裂缝贯穿5 m长的管底,裂缝宽度为0.1 mm;③沿管身环向裂缝:裂缝位置为北侧插口端内部边缘1.85 m处断丝侧半个环向裂缝,裂缝宽度为0.15 mm;④沿管身环向裂缝:裂缝位置为北侧插口端内部边缘2.5 m处断丝侧半个环向裂缝,裂缝宽度为0.15 mm,即断丝对应位置内侧管芯混凝土发生环向裂缝(较为明显);⑤沿管身环向裂缝:裂缝位置为离北侧插口端内部边缘3 m处断丝侧半个环向裂缝,裂缝宽度为0.15 mm.

3.1.3 预应力钢丝松弛 PCCP 内水压承载试验 预应力钢丝作为 PCCP 的主要承载体,如施工安装放置时间过长,会造成 PCCP 预应力钢丝松弛,降低 PCCP 的承载能力.为此,对现场放置 400 d 的 PCCP 进行内水压承载试验.将 PCCP 吊装至试验台架上(见图 5),PCCP 内水压装置为内置具有足够刚度的钢筒,在钢筒外侧套上 PCCP,PCCP 与内置钢筒具有 10 cm 的间隙,在间隙中通入水,再用打压机进行加压,PCCP 的上下顶均用密封圈密封住,每次加载到设置压力时,用江苏东华测试技术有限公司的静态应变测试系统 DH3186 进行应变采集数据.PCCP 加压前通水浸泡 24 h,使管芯混凝土表面湿润,并保证 PCCP 不漏水.试验规则参照规范^[12],加压开始后,以 0.4,0.6,0.8,1.0,1.2,1.4 和 1.6 MPa 的设置压力进行加压测试,每次压力达到设置压力后,稳压 5 min,仔细观察混凝土与砂浆保护层裂缝的出现与发展,用数显仪器测量裂缝的宽度.

内水压加压过程中,管道受力均匀,当加载至 1.2 MPa 时,砂浆保护层出现第 1 根微小裂缝,裂缝长度为 300 mm,宽度为 0.03 mm,随着内水压的增大,裂缝沿纵向向下延伸;当加载至 1.4 MPa 时,砂浆保护层出现 4 根微小裂缝,长度 300~500 mm 不等,宽度 0.03~0.05 mm 不等;随着内水压的增大,承插口的裂缝同时沿着管道纵向和混凝土厚度方向扩展;加载至 1.6 MPa 时,管端截面沿着环向大致均匀分布着 15 根裂缝,原有裂缝扩展,裂缝长达 700 mm,宽 0.1 mm(见图 6).从 PCCP 的开裂过程来看,首先是砂浆保护层在 1.2 MPa 时沿圆周环向均匀出现裂缝,随着内水压的增大,砂浆保护层裂缝沿纵向延伸,当内水压达到 1.6 MPa 时,承插口管端混凝土出现径向裂缝,继而裂缝扩展.砂浆保护层先于管芯混凝土开裂,这是由于在 PCCP 制造过程中,预应力钢丝使管芯混凝土内产生预压应力,而缠丝之后才喷涂砂浆保护层,这使得砂浆保护层不产生预压应力,所以当内水压增大时,砂浆保护层直接承受拉应力,而管芯混凝土先由预压应力抵消一部分拉应力,直到预压应力全部抵消后才会承受拉应力.



图5 内水压加载装置

Fig.5 Loading device for internal pressure test



图6 加载裂缝

Fig.6 Cracks by loading

3.2 PCCP 数值计算分析

与物理模型试验相比,数值计算模拟有其优势的一面.采用有限元数值模拟,可建立大尺寸模型以尽量避免尺寸效应的影响,受力分析也更形象.课题基于 ABAQUS 有限元软件,采用塑性损伤模型对混凝土在受力过程中因损伤积累而产生裂缝扩展与演变、直至宏观破坏进行分析^[13-15].

应变率是表征材料变形速度,是应变对时间的导数.混凝土的应变率可分解为弹性应变率和塑性应变率, $\varepsilon = \varepsilon^{el} + \varepsilon^{pl}$,其中: ε 为总应变率; ε^{el} 为弹性应变率; ε^{pl} 为塑性应变率.

标量弹性损伤模型的应力-应变关系为: $\sigma = (1 - d)D_0^{el} : (\varepsilon - \varepsilon^{pl}) = D : (\varepsilon - \varepsilon^{pl})$,其中: D_0^{el} 为材料初始(未损伤)弹性刚度; $D^{el} = (1-d)D_0^{el}$ 为损伤弹性刚度; d 为标量刚度损伤变量,取值在 0(未损伤)到 1(完全损伤)之间.

模型中混凝土的弹塑性屈服面为: $f(\bar{\sigma}^{pl}, \bar{\varepsilon}^{pl}) = \frac{1}{1 - \alpha}(\bar{q} - 3\alpha\bar{p} + \beta(\bar{\varepsilon}^{pl}) < \bar{\sigma}_{max} > - \gamma < \bar{\sigma}_{max} >) - \bar{\sigma}_c(\bar{\varepsilon}_c^{pl})$,其中:带“-”的应力为有效应力,带“~”的应变为等效应变; α 和 γ 为与尺寸无关的材料常数; $\bar{p} = -\frac{1}{3}\bar{\sigma} : I$ 为有效静压力; I 为应力不变量; $\bar{q} = \sqrt{\frac{3}{2}(\bar{s} : \bar{s})}$ 为 Mises 等效有效应力; $\bar{s} = \bar{p}I + \bar{\sigma}$ 为有效应力张量 $\bar{\sigma}$ 的偏分量; $\bar{\sigma}_{max}$ 为 $\bar{\sigma}$ 的最大特征值;函数 $\beta(\bar{\varepsilon}^{pl}) = \frac{\bar{\sigma}_c(\bar{\varepsilon}_c)}{\bar{\sigma}_t(\bar{\varepsilon}_t^{pl})}(1 - \alpha)(1 + \alpha)$.

模型的塑性流动法则为基于 Drucker-Prager 流动面的非关联流动,

$$\varepsilon^{pl} = \lambda \frac{\partial G(\bar{\sigma})}{\partial \bar{\sigma}}$$

流动能

$$G = \sqrt{(\varepsilon\sigma_{t0}\tan\varphi)^2 + \bar{q}^2} - \bar{p}\tan\varphi$$

其中: φ 为高侧限压力条件下 $p \sim q$ 面中测得的膨胀角; σ_{t0} 为失效时的单轴拉应力; ε 为偏心率,表示该函数接近渐近线的速率.流动能是连续光滑的,所以流动方向是唯一的.

3.2.1 计算模型 PCCP 管芯混凝土模型网格全部采用八节点六面体线性减缩积分的实体单元 (C3D8R);钢管属于薄壁结构,采用四节点壳单元 (S4R);环向预应力钢丝用关键词“REBAR”来定义;砂浆保护层采用壳皮肤作用在管芯混凝土的外层.整个计算模型共包括 12 096 个节点,11 664 个单元,整体网格如图 7 所示.模拟过程中,采用显式 ABAQUS/Explicit 计算器进行计算,采用的加载方式为在管顶向下施加位移荷载,边界条件跟现场试验边界条件相一致,在管底两侧等角度固定.

3.2.2 计算结果 计算分析了完好管与预存裂缝的 PCCP 的外压承载能力,由图 8 可以看出,管芯纵向裂缝对外压承载能力影响不大.从图 9 可以看出,PCCP 在外压作用下,出现损伤开裂的区域分别为管顶与管底的内侧和管腰的外侧,与试验现象相一致.从图 9 可以看出,尽管裂缝对 PCCP 整体的承载能力影响不大,但在裂尖位置出现明显的应力集中现象(见图 10),是应力释放区.

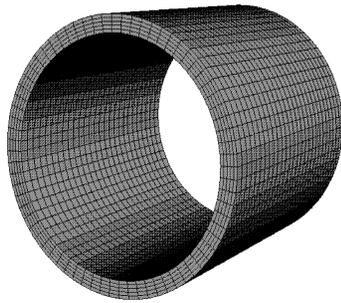


图7 整体网格
Fig.7 Integral nets

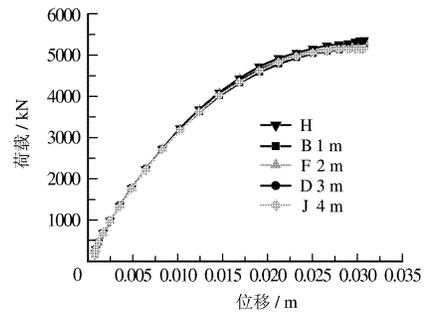


图8 完好与其它4种开裂管管顶荷载-位移曲线
Fig.8 Load-displacement curves on the top of one uncracked and four cracked pipes

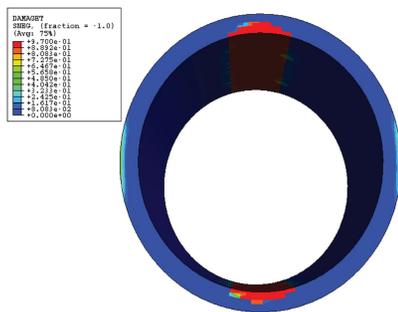


图9 损伤区域
Fig.9 Damaged position

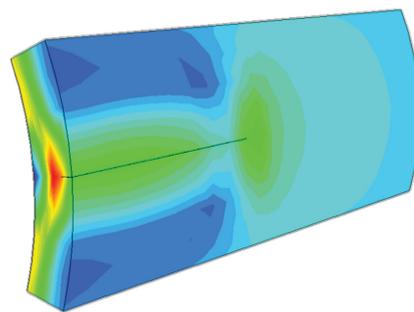


图10 应力集中现象
Fig.10 Stress concentration

3.3 阶段研究总结

通过 PCCP 现场原型承载力试验,并利用非线性有限元数值计算方法对完好管以及预存裂缝管的承载力进行模拟,结果表明,工程中实际出现的管芯混凝土纵向裂缝对结构承载力的影响不大(见表2)。

表2 裂缝管承载力比较

Tab.2 Comparison of bearing capacity of PCCP with cracks

| | | 抗裂外压/ (kN·m ⁻¹) | 抗裂内压/ MPa |
|------|-----|-----------------------------|-----------|
| 设计值 | | 393.20 | 1.73 |
| 试验值 | | 543.45 | (未提供) |
| 数值计算 | 完好 | 552 | 2.57 |
| | 1 m | 550 | 2.37 |
| | 2 m | 548.5 | 2.20 |
| | 3 m | 548.5 | 2.19 |
| | 4 m | 544.2 | 2.14 |

基于此,借鉴美国 PRICE BROTHERS 公司 PCCP 生产质量控制标准,对工程实际生产过程中出现的管芯混凝土裂缝提出如下建议:管芯出现 1 条或少量细小裂纹(经缠丝后可以消除的裂纹)不用修补或用水泥净浆涂刷;较宽的裂缝,可通过规定的修补程序进行修补;对于纵向出现多条裂缝,或环向裂缝长度超过周长的裂缝,或出现十字交叉裂缝的管芯应视为废品管芯. 预应力钢丝作为 PCCP 的主要承载体,应确保钢丝质量,避免断丝出现,对断丝影响评价,需根据实际数据进一步分析。

4 为南水北调工程提供的技术支撑

针对南水北调超大口径 PCCP 出现的管芯混凝土纵向裂缝现象,通过现场调研,从混凝土裂缝产生机理进行分析,认为由于管芯混凝土较厚,水化热不均造成的温度应力引起管芯混凝土开裂,并对预存裂缝的 PCCP 进行外压承载能力试验以及基于有限元分析软件进行数值模拟分析. 外压现场试验和数值模拟结果表明:这种管芯裂缝在缠丝前出现,经缠丝后有所闭合,对管道的承载能力影响不大,在满足规范要求的情况下仍可使用,对 PCCP 制造厂商提出了以下减少裂缝的措施:①改进混凝土配合比,尽量降低单位体积混凝土中的水泥用量,降低水化热;②对拌制混凝土时水泥的温度和浇筑管芯时混凝土拌合物的温度加以控制,美国的 C301 标准规定:拌制混凝土时水泥的温度不应超过 66℃,浇筑混凝土管芯时混凝土拌合物的温度不应超过 32℃;③增加管芯脱模温度测量手段,将温度计插入管芯预留孔中测量管芯的实际温度,严格控制脱模时管芯温度与外界环境温度差,延长降温时间,降低温度变化梯度;④管芯脱模时,先松开紧固螺丝,将外模开启一条缝,让管芯散热后再脱模. 对已经出现裂缝的管,可以借鉴国外先进国家 PCCP 制造厂商的检验方法,对不满足管芯外表面裂缝控制要求的管进行报废处理(该工程共计报废 35 根),以满足工程安全需要;对一些裂缝影响较小的 PCCP 可用在埋深较浅的地段,从而节省工程成本.

PCCP 作为一种新型输水管材,国内对其结构组合分析还不够成熟,也缺乏对已运行的 PCCP 进行有效监测. 在今后工作中,将对已进行的断丝现场试验结果进行分析整理,并继续做好有限元数值分析的准确模拟,对 PCCP 裂缝现象进行更深入的区域划分,对已运行的 PCCP 损伤部位和断丝数量进行定量分析评估^[16],通过评价 PCCP 损伤程度和速率来预测 PCCP 剩余寿命,避免突发性爆管事故的发生,保证 PCCP 输水工程安全正常运行. 针对裂缝和断丝方面的安全评估研究将为 PCCP 原材料选用、裂缝预防和断丝控制提供理论依据,推动 PCCP 技术更好的发展与应用.

参 考 文 献:

- [1] 国务院南水北调办公室. 南水北调工程总体规划[Z]. 2000. (South-to-North Water Diversion. Overall plan for South-North Water Diversion Project[Z]. 2000. (in Chinese))
- [2] 北京市水利规划设计研究院. 南水北调中线京石段应急供水工程(北京段)初步设计报告[R]. 北京:北京市水利规划设计研究院, 2004. (Beijing Institute of Water. Preliminary design report for mid-route of South-to-North Water transfers of emergency water supply project (Beijing)[R]. Beijing: Beijing Institute of Water, 2004. (in Chinese))
- [3] 周冠洋, 孙海良. PCCP 在我国的研制和应用[J]. 制冷空调与电力机械, 2001, 22(1): 25-28. (ZHOU Guan-yang, SUN Hai-liang. The development and application of PCCP in China[J]. Refrigeration Air Conditioning & Electric Power Machinery, 2001, 22(1): 25-28. (in Chinese))
- [4] 潘一毅. 预应力钢管混凝土管回顾与展望[J]. 混凝土与水泥制品, 2004, 6: 29-31. (PAN Yi-yi. The retrospect and prospect of PCCP[J]. China Concrete and Cement Product, 2004, 6: 29-31. (in Chinese))
- [5] 孙绍平, 王贯明. 预应力钢管混凝土管的特性[J]. 市政技术, 2006, 24(2): 121-125. (SUN Shao-ping, WANG Guan-ming. Characteristics of PCCP[J]. Municipal Engineering Technology, 2006, 24(2): 121-125. (in Chinese))
- [6] ANSI/AWWA C304-99, AWWA Standard for design of prestressed concrete cylinder pipe[S].
- [7] ANSI/AWWA C301-99, AWWA Standard for prestressed concrete cylinder pipe[S].
- [8] 张树凯. 预应力钢管混凝土管发展与前景展望[J]. 混凝土与水泥制品, 2007(2): 25-29. (ZHANG Shu-kai. The development and prospects of PCCP[J]. China Concrete and Cement Product, 2007(2): 25-29. (in Chinese))
- [9] SI Yuan. FEMOL-theory and applications[M]. Beijing: Science Press, 1996.
- [10] HU Shao-wei, MORAN B. The finite element of lines in fracture mechanics[J]. Acta Mechanica Sinica, 2006, 10: 495-502.
- [11] HU Shao-wei, WANG Hong-xia. Study on 3D finite bodies containing cracks using FEMOL[J]. Acta Mechanica Sinica, 2004, 20(1): 83-94.

- [12] 胡少伟, 沈捷, 游日. 预应力钢管混凝土管裂缝分析与防治措施研究[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27: 127-128. (HU Shao-wei, SHEN Jie, YOU Ri. Analysis and prevention measures on the cracks of calibre PCCP[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2008, 27: 127-128. (in Chinese))
- [13] 江见鲸, 陆新征, 叶列平. 混凝土结构有限元分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005. (JIANG Jian-jing, LU Xin-zheng, YE Lie-ping. Finite element analysis of concrete structure[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. (in Chinese))
- [14] 方秦, 还毅, 张亚栋, 等. ABAQUS 混凝土损伤塑性模型的静力性能分析[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2007, 8(3): 254-260. (FANG Qin, HAI Yi, ZHANG Ya-dong, et al. Investigation into static properties of damaged plasticity model for concrete in ABAQUS[J]. Journal of PLA University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2007, 8(3): 254-260. (in Chinese))
- [15] 张伟, 伍鹤皋, 苏凯. ABAQUS 在大体积钢筋混凝土非线性有限元分析中的应用评述[J]. 水力发电学报, 2005, 24(5): 70-75. (ZHANG Wei, WU He-gao, SU Kai. Review for application of ABAQUS in nonlinear FEM analysis of mass reinforced concrete[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2005, 24(5): 70-75. (in Chinese))
- [16] ZARGHAMEE M S. Hydrostatic pressure testing of prestressed concrete cylinder pipe with broken wires[C]//NAJAFI M. New pipeline technologies, security, and safety. Proceedings of the ASCE International Conference on Pipeline Engineering and Construction. Maryland: ASCE, 2003: 294-303.

Study on structural safety evaluating technique for pre-stressed concrete cylinder pipe (PCCP) in the South-to-North Water Diversion Project

HU Shao-wei^{1,2}

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Key Laboratory of Water Science and Engineering, MWR, Nanjing 210029, China)

Abstract: The PCCP with 4 meter in diameter has been applied in the Beijing to Shijiazhuang reach of the South-to-North Water Diversion Project for the first time since 2006 in China. Based on the safe use of PCCP engineering structure for 100 years, aiming at the technology problems of how to evaluate safety influence on PCCP with broken wires and relaxation of prestressing in the South-to-North Water Diversion Project, the bearing capacity of PCCP has been studied with the methods of actual PCCP test (anti-crack external pressure test with cracks, anti-crack external pressure test with broken wires and anti-crack internal pressure test with relaxation of prestressing) and non-linear finite element numerical simulation funded by the National Scientific and Technological Support Plan and the Nation Natural Science Foundation Project. The results show that the PCCP with a chip or a few small cracks needn't repair or just need brush cement paste; the PCCP with wide cracks should be repaired according to codes; and the PCCP with a number of vertical cracks or cross cracks and the PCCP with circumferential cracks longer than circumference are judged to be waste pipes. As the main bearing body, the quality of prestressed wires should be ensured to avoid broken wires. The impact assessment on PCCP with broken wires should be analyzed with actual test results. Based on the test results and engineer suggestions, and learning from the advanced foreign experiences, the safety assessment of PCCP with cracks has been proposed. The PCCP which does not satisfy the outer surface crack control requirements should be abandoned to meet the security needs (a total of 35 PCCP have been abandoned in this project), and the PCCP which has little cracks is used in the relatively shallow depth region to save the cost of the project. Finally, the next work which is needed to do is described in the paper.

Key words: pre-stressed concrete cylinder pipe (PCCP); anti-crack external pressure test; broken wires; relaxation of prestressing; damaged plasticity model