

基于全寿命成本分析的 UHPC 管廊优化设计

许有胜¹, 吴泽霖², 夏樟华², 丁思盼²

(1. 深圳市市政设计研究院有限公司, 广东 深圳 518035 ;

2. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108)

摘要: 文章以某试验区综合管廊为背景, 试设计 UHPC 管廊, 并分析壁厚, 提出带加劲肋的 UHPC 管廊优化构造并进行全寿命成本分析。结果表明, 优化后的 UHPC 管廊结构最大应力由 4.6 MPa 提升到 64.7 MPa, 充分发挥了 UHPC 抗压强度高的特点; 优化后 UHPC 预制拼装综合管廊全寿命成本仅为原型结构的 63%, 建设工期约为原型普通混凝土综合管廊的 48% 左右。

关键词: UHPC; 综合管廊; 全寿命; 优化构造

中图分类号: TU998.9

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2021)04-0315-07

Optimal design of UHPC pipe gallery based on life cycle cost analysis

XU Yousheng¹, WU Zelin², XIA Zhanghua², DING Sipan²

(1. Shenzhen Municipal Engineering Design Institute, Shenzhen 518035, China;

2. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: Based on the comprehensive pipe gallery in a test area, a trial design of UHPC pipe gallery was carried out, and the wall thickness was analyzed. The optimal structure of UHPC pipe gallery with stiffeners was proposed and the life-cycle cost analysis was carried out. Results show that the maximum stress of UHPC was increased from 4.6 MPa to 64.7 MPa, which can give full play to the characteristics of high compressive strength of UHPC; after optimization, the life-cycle cost of UHPC prefabricated composite pipe gallery is only 63% of the prototype structure, and the construction period is about 48% of the prototype common concrete pipe gallery.

Keywords: UHPC; comprehensive pipe gallery; life cycle; optimized structure

综合管廊起源于巴黎, 至今已有 180 多年历史^[1]。目前普通混凝土综合管廊在车辆荷载、土压力和土体沉降等纵向荷载作用下出现了很多问题, 特别是多舱管廊结构容易出现接头偏位、开裂和渗水等严重问题, 需要定期维修加固^[2-3]。随着超高性能混凝土 (ultra high performance concrete, UHPC) 的兴起, UHPC 综合管廊也逐渐问世, 凭借其超高的力学性能和耐久性, 在性能方面明显优于普通混凝土^[4]。相较于普通混凝土结构, 采用 UHPC 能够减轻结构自重。此外, UHPC 在抗渗性和抗腐蚀性上有优异表现, 可替

代在水下侵蚀环境下的普通混凝土结构, 显著提高其耐久性和使用寿命。王睿^[5]通过毛细吸水试验研究了气体渗透性与毛细吸水性能对 UHPC 渗透性能的影响。陈艳平等^[6]通过建立并计算综合管廊实例模型, 得出 UHPC 综合管廊表现出高抗渗性及耐久性。陈艳平等^[7]通过 UHPC 的高性能提出设想, 以坑内顶接的方式, 克服接头漏水及耐久性差的缺点, 认为 UHPC 相较于普通混凝土在综合管廊的应用中具有较大的前景和优势。

由于管廊建设投入成本较大且投资回收期长, 故需对其进行全寿命成本分析。李芊等^[8]总

结管廊全寿命周期各阶段的风险,提出相应的解决措施。张勇等^[9]通过参考文献,结合实例,建立了管廊全寿命周期风险评估指标体系,通过排查各风险因素,找到了因果因素,为管廊全寿命成本分析提供了重要依据。杨艳等^[10]通过对 UHPC 与混凝土管廊进行全寿命成本对比,表明 UHPC 管廊具有较好的经济性和广阔的应用前景。同时,UHPC 管廊结构由于截面厚度大幅缩减,使得其截面抗弯刚度偏小,需要对 UHPC 管廊从构造进行优化。因此,通过对 UHPC 管廊结构优化设计,提出 UHPC 管廊带加劲肋的构造,并对优化构造进行全寿命成本分析。

1 UHPC 综合管廊试设计

1.1 工程背景

结合某工程实例,以环湖路 SG-075 试验段内综合管廊标准段为原型,展开 UHPC 综合管廊试设计研究。结构为单箱矩形结构,标准断面宽 3.9 m,高 4.1 m,箱体四面板厚均为 350 mm。结构采用 C40 混凝土,抗渗等级 S6。四面外侧保护层厚度为 50 mm,内侧 45 mm。结构尺寸和配筋见图 1。

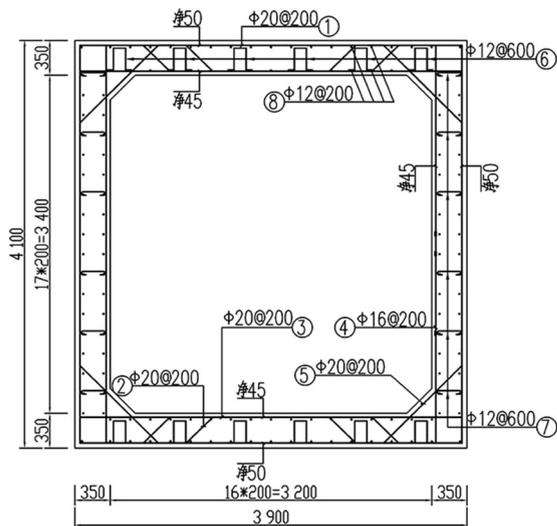


图 1 管廊标准断面尺寸及配筋图(单位:mm)

Fig.1 Standard section size and reinforcement drawing of pipe gallery (unit: mm)

1.2 试设计验算结果

使用 MIDASGEN 建立三维板壳实体单元模型,计算出来的最大弯矩值为 390.1 kN·m,剪力最大值为 523.8 kN。根据有限元计算结果和某工程实例综合管廊的设计尺寸,得出 UHPC 管廊设计相关参数:标准断面宽 3.9 m,高 4.1 m,箱体标

准段侧壁、顶板厚度为 0.22 m,底板厚度为 0.25 m,单室箱涵,采用双层双向配筋,钢筋均选用三级钢筋 HRB400,四面外侧保护层厚度为 25 mm,内侧 23 mm。布筋如图 2 所示。

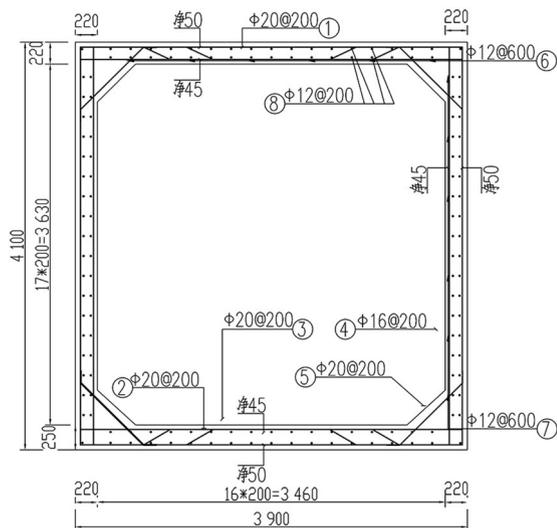


图 2 UHPC 管廊标准断面尺寸及配筋图(单位:mm)

Fig.2 Standard section size and reinforcement drawing of UHPC pipe gallery (unit: mm)

对管廊进行正常使用状态抗裂及抗弯承载力验算,结构承载力及抗裂验算均符合要求,但由于其造价是混凝土管廊的 2 倍多,不利于推广。UHPC 结构截面厚度较 C40 混凝土大幅缩减,使得其截面抗弯刚度偏小,在满足规范中受弯构件的容许挠度限值外,其截面无法进一步减薄,UHPC 材料性能无法得到充分利用。

2 基于全寿命分析的结构优化

2.1 模型建立

运用 ABAQUS 软件建立 UHPC 综合管廊模型,进行有限元分析。UHPC 应力-应变关系采用单轴压缩和单轴拉伸试验中测算得到的本构关系。UHPC 的受拉和受压应力-应变曲线如图 3 与图 4 所示。

2.2 参数分析

运用 ABAQUS 进行参数分析。在试验设计的基础上,取消原试验的荷载简化施加方式,以原型 C40 综合管廊结构尺寸为准,将试验设计施加荷载转变为土体荷载与地面附加荷载,使模型更接近于管廊结构实际受力环境。

本文设置 5 个分析步,step1~step4 为预制拼

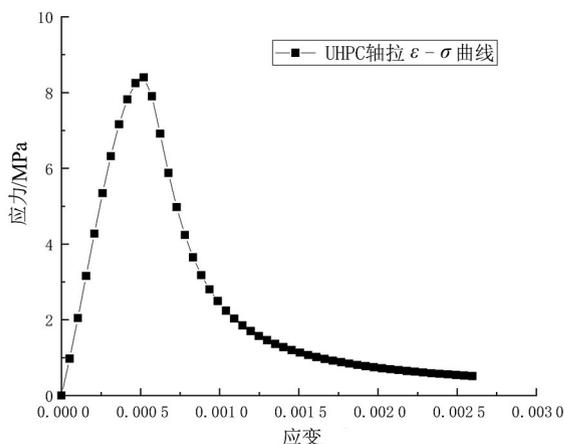


图3 UHPC受拉应力-应变关系

Fig.3 Stress-strain relationship in tension of UHPC

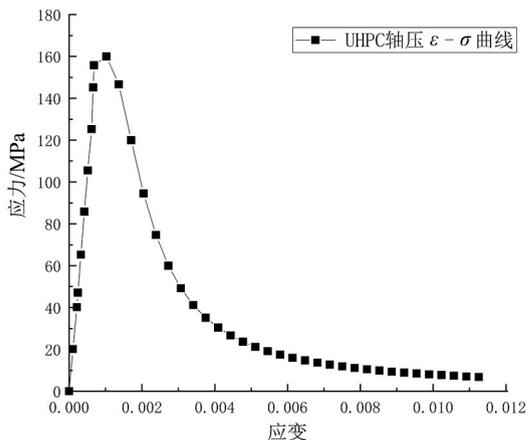


图4 UHPC受压应力-应变关系

Fig.4 Stress-strain relationship in compression of UHPC

装管廊正常使用受力模拟阶段,step5为预制拼装管廊承载能力模拟阶段。主要设置了结构壁厚、配筋率两种参数。模拟变量参数如表1所示。

表1 参数分析设置

Tab.1 Parameter analysis setting

| 模型 | 有无 腋角 | 壁厚/ mm | 配筋率/ % | 混凝土 强度等级 | 舱数 |
|------|----------|-----------|-----------|-------------|----|
| Pt-1 | 有 | 350 | 2 | C40 | 单 |
| Pt-2 | 有 | 300 | 2 | C40 | 单 |
| Pt-3 | 有 | 250 | 2 | C40 | 单 |
| Pt-4 | 有 | 350 | 3 | C40 | 单 |
| Pt-5 | 有 | 350 | 4 | C40 | 单 |

接头下缘的张开量随荷载逐渐增大,张开后的预制混凝土板间不存在压应力,接头受压区减少。接缝上缘混凝土接触区的压应力也在不断增大。同时预应力筋也发生相应的变形,随着荷载的继续增大,接缝的张开量迅速增大,当预应力筋达到屈服强度 807 MPa 时,接头达到屈服状态。

2.2.1 结构壁厚对管廊结构受力性能影响

通过有限元结果对比 Pt-1、Pt-2 模型,随着壁厚从 350 mm 减薄至 300 mm,混凝土最大压应力增加 110.3%,结构最大挠度增加 25%。对于 Pt-2 在 Step-5 阶段,管廊结构挠度已超限,并且出现超限的裂缝导致结构计算不收敛;Pt-3 模型壁厚为 250 mm,在 Step-3 阶段已不满足受力要求,在 Step-4 开始不收敛。故管廊结构壁厚的减薄面临着结构刚度不足所导致的受弯构件挠度和裂缝超限的问题。

2.2.2 配筋率对管廊结构受力性能影响

通过有限元结果对比 Pt-1、Pt-4、Pt-5 3 种配筋率分别为 2%、3%、4%的管廊结构可得出,随着配筋率的增大,土体应力基本无变化,混凝土应力和结构挠度变化幅度不超过 2%,管廊受力钢筋的应力逐渐减小,但均未屈服。由此可见,配筋率的变化主要影响钢筋的应力,配筋率为 2%时,钢筋应力为 387.0 MPa,出于安全考虑,可取最佳配筋率为 2.5%。

2.2.3 UHPC 预制拼装综合管廊结构优化

现阶段研究成果表明,UHPC 中所含钢纤维可降低结构受拉区变形,起到很好的阻裂作用,对结构的刚度具有较大的提升效果^[11-14]。但根据有限元计算结果,UHPC 管廊结构壁厚仅比普通混凝土结构减薄了不到一半,UHPC 管廊结构就因刚度不足而破坏。

对比 UHPC 管廊结构与原型普通混凝土结构的材料配置差异,分析出现 UHPC 管廊结构刚度明显减小的原因:一方面是 UHPC 管廊结构壁厚大幅度减薄,结构截面惯性矩减小,使得结构在同荷载作用下,其最大挠度也随之增大;另一方面是结构壁厚减薄后纵向受拉钢筋较原型普通混凝土结构配置减少,故结构缺乏钢筋对裂缝的阻裂效果,导致裂缝宽度发展较快。以上两方面原因抵消了 UHPC 材料中钢纤维对结构刚度的提高作用。故可以采用提高结构受拉侧配筋率和相关构造措施对结构刚度进一步优化。

考虑提高 UHPC 管廊结构受拉侧配筋率会进一步提升工程造价,不利 UHPC 综合管廊的应用与推广。因此,尝试采用箱梁构造优化措施中增设加劲肋和纵隔板的措施提高管廊结构的刚度,达到对结构的受力性能与构造优化目的,验证加劲肋和纵隔板在 UHPC 预制拼装综合管廊结构中的受力优化效果。参考 UHPC 在桥梁箱形结构中的应用^[15-16]。设置加劲肋和纵隔板防止箱形结构发生畸变,对箱形结构顶、底板加劲,减少结构横向预应力设置,防止承压失稳,同时对箱形结构腹板加劲,可减少结构竖向预应力设置。

参照文献[17]提出设置加劲肋的预制拼装综合管廊优化结构构造图,对原试设计管廊结构进行壁厚减薄,通过结构内壁设置横、纵向加劲隔板的构造措施进行优化,横、纵向加劲隔板均匀分布,结构壁厚较优化前试设计所设减薄近一半,具体构造尺寸如图 5 所示。

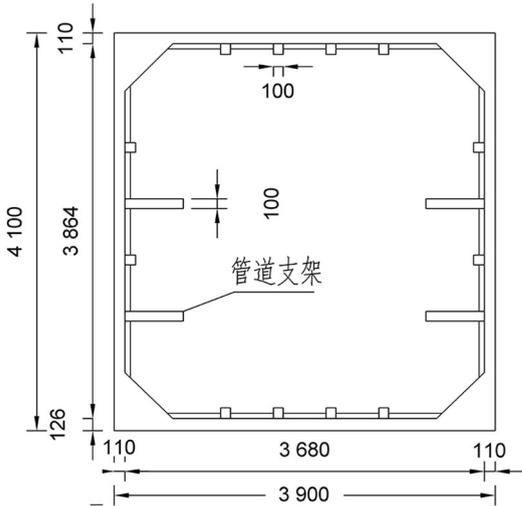


图 5 管廊优化结构构造图(单位:mm)

Fig.5 Optimal structure diagram of pipe gallery (unit: mm)

2.3 优化效果分析

加劲肋结构受其形状、分布位置、密度等因素影响,提出一套通用的加劲肋结构的计算方法较为困难。现阶段规范中也还未有完善的关于带加劲肋和隔板的箱形结构承载力计算方法。有限元法则能够适应不同的结构形式,对带加劲肋的特殊结构具有较好的计算效果。

(1) 有限元模拟分析

有限元模拟分析显示,优化结构腋角区域包括加劲肋区域无明显应力集中现象,结构挠度最大处为顶底板跨中位置,结构损伤破坏部位主要为顶底板跨中区域,腋角处也存在一定程度的损伤破坏。可以看出,优化后结构设置加劲肋区域受传力合理,结构损伤破坏位置也易于预测控制。

(2) 受力指标承载力分析

表 2 为 UHPC 管廊优化前后结构性能对比。由表 2 可见,优化后管廊结构各阶段混凝土最大压应力值大幅提高,接近材料的极限承载值,材料利用率得到明显提高。优化后管廊结构在 Step-4 正常使用阶段处于弹性受力状态,在 Step-5 承载能力阶段出现受力钢筋屈服,故说明优化后结构能满足正常的承载要求。优化前管廊结构在 Step-4 阶段的最大挠度为 179.7 mm,优化后管廊结构在 Step-4 阶段的最大挠度为 186.8 mm,管廊结构在壁厚大幅减薄情况下挠度与优化前基本持平,优化后结构刚度较优化前明显提高。优化结构受力均匀,传力机制合理,除腋角存在轻微的应力集中外,其他区域包括加劲肋区域无明显应力集中现象,结构挠度最大和损伤破坏部位均为顶底板跨中区域,挠度和应力较优化前结构相差较小,但结构自重较优化前可以降低 40%左右,从而降低管廊材料成本和施工运输等工程造价。

表 2 UHPC 管廊优化前后结构性能对比

Tab.2 Comparison of structural performance before and after optimization of UHPC pipe gallery

| 参数模型 | 分析阶段 | 混凝土最大压应力/MPa | 受力钢筋最大应力/MPa | 结构最大挠度/mm | 结构自重/t | 应力集中现象 |
|------|--------|--------------|--------------|-----------|--------|--------|
| 优化前 | step-3 | 2.9 | 18.1 | 113.9 | 1.0 | 腋角处轻微 |
| | step-4 | 3.7 | 274.3 | 179.7 | 1.0 | |
| | step-5 | 4.6 | 342.9 | 224.6 | 1.0 | |
| 优化后 | step-3 | 11.1 | 77.5 | 82.6 | 0.6 | |
| | step-4 | 51.8 | 308.3 | 186.8 | 0.6 | |
| | step-5 | 64.7 | 385.4 | 233.5 | 0.6 | |

(3) 经济指标经济性分析

对管廊结构优化前后的工程数量和工程造价进行比较分析,如表3和表4所示。

表3 优化前后工程数量比较(试验标准节段)

Tab.3 Comparison of engineering quantity before and after optimization (test standard section)

| 项目 | C40 | 试设计 | 优化后 |
|----------------------|------|------|------|
| 混凝土用量/m ³ | 5.24 | 3.71 | 2.32 |
| 钢筋用量/t | 1.24 | 0.96 | 0.52 |
| 总重/t | 6.48 | 4.67 | 2.84 |

表4 优化前后工程材料造价比较(试验标准节段)

Tab.4 Comparison of engineering material cost before and after optimization (test standard section)

| 项目 | C40 | 试设计 | 优化后 |
|----------|------|------|------|
| 混凝土价格/万元 | 0.26 | 1.48 | 0.93 |
| 钢筋价格/万元 | 0.56 | 0.43 | 0.23 |
| 总价/万元 | 0.82 | 1.91 | 1.16 |

表3和表4给出了预制拼装综合管廊结构优化前后标准段的工程数量和工程造价比较。从表中可以看出,结构优化后标准段的混凝土用量为2.32 m³,比优化前试设计管廊标准段的混凝土用量3.71 m³减少了将近40%;结构优化后标准段钢筋用量为0.52 t,比优化前试设计标准段钢筋用量0.96 t少了46%,比原型普通混凝土结构标准段钢筋用量1.24 t少了58%;优化后标准段结构总体重量2.84 t,较优化前试设计标准段结构自重4.67 t减少了40%,较原型普通混凝土结构标准段自重6.48 t减少了56%;总体工程造价较优化前试设计结果可减少40%左右,仅比原型普通混凝土结构造价提升40%左右。由于加劲肋提高了结构的刚度,使得箱形结构的挠度值减少,从而使用较薄的截面形式就能满足结构的受力要求,使结构得到优化。设置的横、纵向加劲肋对管廊结构特别是顶底板的横、纵向刚度的贡献,使得板结构横、纵向拉应力显著减小,设置加劲肋和纵隔板前后结构的惯性矩相似,故优化前后结构的抗弯能力相差不大,优化后的UHPC管廊结构在受力性能满足要求的前提下,可避免结构设计过于保守、安全系数过大的问题,充分提高材料利用率,进而工程材料造价得到大幅优化。

(4) 优化后构造全寿命成本分析

考虑管廊的建设期成本(材料、运输吊装、基坑支护和工期)和运营期成本(检测、维修)^[18-19],对管廊结构优化后进行全寿命成本分析。

管廊全寿命期限和折现率选取直接影响其全寿命周期成本的科学性。一般来说,管廊使用期间的所有费用与管廊全寿命期限成正比,选取综合管廊的设计使用寿命100 a为其全寿命期限。折现率是指将未来有限期预期收益折算成现值的比率。折现率的微小变化,会造成管廊全寿命周期成本的巨大差异。为减少两者对分析结果的影响,在对比分析中,本文选取了同样的管廊全寿命期限和折现率。

在分析之初,必须确定两个影响参数:分析基年和折现率。分析基年为管廊建设初年。折现率为未来成本与收益折成现值的比率。对于折现率 I 与成本现值 C_0 的换算公式可表示为

$$C_0 = \frac{C_N}{(1+I)^{T_N} - T_0} \quad (1)$$

式(1)中, C_N 为发生在 T_N 时刻的成本, T_0 为成本分析基年。

管廊全寿命周期成本计算模型为各阶段成本现值的总和。

$$C = C_j + C_y \quad (2)$$

式中, C 为管廊全寿命周期成本; C_j 为管廊建设期成本; C_y 为管廊运营期成本。

优化后的UHPC综合管廊建设工期要远小于原型C40普通混凝土综合管廊。以平潭综合管廊试验区单条1 km线路为例,由UHPC预制拼装管综合管廊与原型普通混凝土管廊的建设工期对比情况可知,在养护龄期方面,UHPC较普通混凝土28 d的养护龄期可节省64%。且由于优化后的UHPC管廊结构自重仅为原型结构44%,相同的运输吊装器械,在预制长度方面,UHPC管廊为原型普通混凝土结构的3倍左右,从而使得施工周期缩短,减少了接头数量。综上所述,UHPC预制拼装综合管廊建设工期约为原型普通混凝土综合管廊的48%左右,在节省成本及工期长短方面有明显优势。

由工程可行性研究报告可知,管廊建设期成本包括管廊主体、基坑支护和其他工程费用。由于优化后UHPC管廊自重较原型普通混凝土管廊减少了56%,相应的基坑支护费用减少25%。

UHPC 管廊节段比 C40 混凝土更轻,其运输成本较节省。优化后的 UHPC 综合管廊对吊装机具要求也大幅减少,C40 原型综合管廊需 20 t 规格的单体梁门式起重机,优化后结构仅需要 10 t 的电动单梁桥式起重机即可满足吊装需求,不仅吊装费用更加经济,吊装方式也更加多样化。

运营期成本包括检测、维修成本。根据文献 [20],当检测结构的检测量和周期不变时,管廊第 i 项检测内容所产生成本的计算模型:

$$C_{Ci} = R_C \cdot A_{Ci} \cdot \frac{\frac{1}{(1+I)T_i} \left\{ 1 - \left[\frac{1}{(1+I)T_i} \right]^{(N/T_i-1)} \right\}}{1 - \frac{1}{(1+I)T_i}} \quad (3)$$

式(3)中, C_{Ci} 为管廊第 i 项检测内容发生的成本(万元); R_C 为管廊每次检测的单价(万元); A_{Ci} 为第 i 项管廊的检测量; N 为管廊的服务年限(a); T_i 为管廊的检测周期(a); I 为折现率(%)。

管廊运营期检测成本的计算模型:

$$C_C = \sum_{i=1}^n C_{Ci} \quad (4)$$

式(4)中, C_C 为管廊运营期专项检测成本(万元); n 为管廊的检测量。

当维修量和维修周期不变时,管廊第 i 项维修内容所产生成本的计算模型:

$$C_{Ri} = R_R \cdot A_{Ri} \cdot \frac{\frac{1}{(1+I)T_i} \left\{ 1 - \left[\frac{1}{(1+I)T_i} \right]^{(N/T_i-1)} \right\}}{1 - \frac{1}{(1+I)T_i}} \quad (5)$$

式(5)中, C_{Ri} 为管廊第 i 项维修内容发生的成本(万元); R_R 为管廊每次维修的维修成本综合单元(万元); A_{Ri} 为第 i 项管廊的维修量。

管廊运营期检测成本的计算模型:

$$C_R = \sum_{i=1}^m C_{Ri} \quad (6)$$

式(6)中, C_R 为管廊运营期专项维修成本(万元); m 为管廊的维修量。结合式(4)和式(6),经平潭综合管廊试验区管委会测算管廊结构维护费用约为 145.3 万元/(km·a)(不含大中修),其中入廊管道维护费用约为 81.3 万元/(km·a),管廊管道支架维修更换费用约为 30.0 万元/(km·a),廊体结构接缝维修防护费用约为 34.0 万元/(km·a)。UHPC 管廊结构预制长度可为原型普通混凝土结构的 2~3 倍,试验标准节段 UHPC 管廊接头数量和现浇缝可至少减少一半,故 UHPC 综合管廊结构廊体接缝维修防护费用可缩减至 17.0 万元/(km·a)。Ludwig 等^[21]通过快速氯离子迁移系数法,表明离子侵蚀对 UHPC 管廊结构的影响可以忽略不计,则 UHPC 管廊结构在其全寿命周期内除常规的运营检查外,进行结构大中修的概率极小,设原型普通混凝土综合管廊结构全寿命周期内至少进行一次大中修,大中修的费用约为 98.3 万元/km。综上分析,优化后的 UHPC 管廊全寿命成本分析如表 5 所示。

由表 5 可见,优化后的 UHPC 预制拼装综合管廊全寿命成本为原型结构的 85%。考虑到管廊管道支架维修更换费用约为 30.0 万元/(km·a),对所优化管廊结构的侧墙横向加劲肋进行隔距适当延长作为管道支架使用,可很好地解决传统钢结构管道支架易锈蚀的缺陷,节省管廊管道支架维修更换费用,优化后的 UHPC 管廊结构全寿命周期成本为试验标准节段 9.8 万元,仅为原型 C40 综合管廊结构全寿命周期成本的 63%,故优化后的 UHPC 综合管廊结构全寿命周期成本得到大幅降低。

综合考虑预制拼装综合管廊全寿命周期内的成本造价与建设工期,相比于普通混凝土综合管廊,优化后的 UHPC 综合管廊更具发展价值。且 UHPC 管廊结构可凭借其优异的耐久性能满足甚至延长管廊设计使用年限,具有较大的经济和社会效益。

表 5 UHPC 全寿命成本分析
Tab.5 UHPC lifetime cost analysis

| 项目 | 建设期成本 | | | | 运营期成本 | 全寿命成本 |
|---------|-------|----------|----------|------|---------------|-------|
| | 材料成本 | 运输成本(台班) | 吊装成本(台班) | 基坑支护 | 后期维护成本(100 a) | |
| 原型(C40) | 0.82 | 0.08 | 0.09 | 0.08 | 15.51 | 16.58 |
| 优化后 | 1.16 | 0.02 | 0.06 | 0.06 | 12.83 | 14.13 |

3 结语

1)采用箱梁和箱涵中提高结构刚度所采用的加劲肋和纵隔板,可使板结构横、纵向拉应力显著减小,设置加劲肋和纵隔板前后结构的惯性矩相似,故优化前后结构的抗弯能力相差不大。优化后结构有限元模拟结果显示,所优化结构受力均匀,传力机制合理,结构挠度最大和损伤破坏部位均为顶底板跨中区域,挠度和应力较优化前结构相差较小,优化后的UHPC管廊结构混凝土最大应力由4.6 MPa提升到了64.7 MPa,充分提高了材料利用率。

2)UHPC综合管廊优化后结构较原型管廊标准段混凝土用量减少将近56%,钢筋用量减少近58%,总体重量减少56%;总体工程材料造价仅比原型普通混凝土结构造价提升40%左右。由于加劲肋提高了结构的刚度,使得箱形结构的挠度值减少,从而使用较薄的截面形式就能满足结构的受力要求,使结构得到优化。

3)优化后UHPC预制拼装综合管廊全寿命成本仅为原型结构的63%,建设工期约为原型普通混凝土综合管廊的48%左右,可大幅节省全寿命周期成本和加快施工进度,具有高于普通混凝土综合管廊的性价比和良好的发展前景。

参考文献:

- [1] 段亚刚. 小直径盾构在综合管廊建设中的关键技术研究[J]. 铁道工程学报, 2017, 34(4):65-69.
- [2] 杜任远, 黄卿维, 陈宝春. 活性粉末混凝土桥梁应用与研究[J]. 世界桥梁, 2013, 41(1):69-74.
- [3] 杨剑, 方志. 超高性能混凝土梁正截面承载力[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(2):23-30.
- [4] 刘超, 黄钰豪, 马汝杰, 等. 高应变强化超高性能混凝土T形梁抗弯承载力[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(6):744-750.
- [5] 王睿. 基于纤维分布的UHPC制备及其渗透性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2018.
- [6] 陈艳平, 王华. 利用UHPC建设地下综合管廊的初步探讨[J]. 市政技术, 2018, 36(6):144-146, 176.
- [7] 陈艳平, 王华, 赵华, 等. UHPC分批顶接超长整体综合管廊节段施工工艺设想[J]. 市政技术, 2019, 37(2):183-185, 190.
- [8] 李芊, 赵雪婷. 综合管廊全寿命周期风险分析[J]. 价值工程, 2017, 36(10):240-242.
- [9] 张勇, 张然然. 地下综合管廊全寿命周期风险评估与分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2019, 51(2):294-300.
- [10] 杨艳, 陈荣, 黄卿维, 等. UHPC管廊优化设计与全寿命成本分析[J]. 宁夏大学学报(自然科学版), 2018, 39(3):227-233.
- [11] 任重翠. 钢筋混凝土剪力墙拉剪性能试验研究[D]. 北京:中国建筑科学研究院, 2018.
- [12] 涂斌. 钢筋混凝土双向受弯简支梁受剪承载力的计算[D]. 南昌:南昌大学, 2008.
- [13] 徐海滨. HRB500钢筋预应力超高性能混凝土梁受力性能研究[D]. 北京:北京工业大学, 2015.
- [14] 张乃龙, 孙运轮, 贡金鑫. 核电厂钢筋混凝土墙平面内抗剪设计方法研究[J]. 建筑结构, 2018, 48(16):59-64, 8.
- [15] 邵旭东, 杨志杰, 邹同琛, 等. 密集横隔板UHPC箱梁桥面板双向受力性能试验[J]. 中国公路学报, 2016, 29(8):43-49, 66.
- [16] 邵旭东, 詹豪, 雷薇, 等. 超大跨径单向预应力UHPC连续箱梁桥概念设计与初步实验[J]. 土木工程学报, 2013, 46(8):83-89.
- [17] 邵旭东, 张良, 张松涛, 等. 新型UHPC连续箱梁桥的体外预应力锚固构造形式研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(3):1-7.
- [18] 陈奕林. 基于寿命周期成本理论桥梁设计方案比选研究[J]. 福建建材, 2017(8):10-11, 19.
- [19] 王树强. 太原市晋源东区综合管廊运营维护成本估算分析[J]. 山西建筑, 2017, 43(21):249-251.
- [20] 周贞霞. JA大桥全寿命周期成本预测分析[D]. 长沙:长沙理工大学, 2015.
- [21] TANG L, NILSSON L O. Rapid determination of the chloride diffusivity in concrete by applying an electric field[J]. ACI Materials Journal, 1993, 89(1):49-53.

(责任编辑:陈雯)