

超深检查井的空间受力分析和UHPC应用探讨

谭晶晶^{1,2}

(1. 中铁二十局集团有限公司, 陕西 西安 710032; 2. 中铁建安工程设计院有限公司, 陕西 西安 710032)

摘要: 为提高城市检查井结构的使用性能, 结合矩形混凝土跌水井对非标准检查井井壁结构的受力特点进行分析, 并对基于UHPC的井壁优化设计进行研究。首先, 利用三维板壳有限元模型对非标准检查井沿高度、宽度方向的弯矩和面外位移进行了详细分析; 再基于空间分析结果和预定设计目标, 对采用不同材料及钢筋布置的井壁结构设计优化进行了对比分析。结果表明: 各侧壁板在两个方向的弯矩均不可忽略, 且面外变形具有双向板的特点, 建议当井室高度和宽度比小于5时, 采用三维空间模型进行分析; 考虑空间受力特点, 采用普通混凝土的井壁厚度可减小20%, 采用UHPC的井壁厚度可减小40%, 同时钢筋用量减少约17%, 可为非标准检查井的结构计算和设计提供理论依据, 为UHPC在检查井井壁结构中的实际工程应用提供参考。

关键词: 非标准检查井; 空间受力特点; 三维板壳有限元模型; UHPC; 优化设计

中图分类号: TU990.3

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)04-0255-05

Analysis on Spatial Stress of Ultra-deep Manhole and Discussion on Application of UHPC

TAN Jingjing^{1,2}

(1. China Railway 20th Bureau Group Co., Ltd., Xi'an 710032, China; 2. China Railway Jian'an Engineering Design Institute Co., Ltd., Xi'an 710032, China)

Abstract: In order to improve the using performance of the urban manhole structure, the stress features of wall structure of the non-standard manhole are analyzed in combination with the rectangular concrete water drop well, and the optimal design of the manhole wall based on UHPC is studied. Firstly, the three-dimensional plate-shell finite element model is used to analyze the bending moment and out-of-plane displacement of the non-standard manhole along the height and width directions in detail. Based on the spatial analysis results and the predetermined design objectives, the design optimization of the manhole wall structure with different materials and reinforcement arrangements is compared and analyzed. The results show that the bending moments of each sidewall plate in both directions are not negligible, and the out-of-plane deformation has the characteristics of two-way plates. It is recommended to use the three-dimensional spatial model for analysis when the ratio of height to width of the manhole chamber is less than 5. Considering the characteristics of spatial stress, the thickness of the manhole wall can be reduced by 20% for ordinary concrete and 40% for UHPC, and the amount of reinforcement can be reduced by about 17%, which can provide a theoretical basis for the structural calculation and design of non-standard manhole, and provide a reference for the practical engineering application of UHPC in the wall structure of manhole.

Keywords: non-standard manhole; spatial stress characteristics; three-dimensional plate-shell finite element model; UHPC; optimization design

0 引言

在当代城市基础设施建设中, 检查井是污水排放系统中不可或缺的一环。排水检查井有塑料检查

井、砖砌检查井、钢筋混凝土检查井等, 目前, 应用最广泛的是普通钢筋混凝土检查井结构。但普通钢筋混凝土检查井井壁的抗拉性能较差、使用中易出现裂缝, 难以满足当今社会的高性能要求。UHPC (Ultra-High Performance Concrete) 是一种新型水泥基工程材料, 由于其具有高强度、高韧性兼超长耐久性的特点, 在我国道路桥梁工程与建筑结构工程领域得到了长远的发展应用^[1-8]。在市政工程结构中充分利用UHPC的优异性能, 可以在降低混凝土材料

收稿日期: 2024-07-19

基金项目: 陕西省科技厅基金项目, 采用超高性能混凝土(UHPC)连接的装配式混凝土框架结构设计方法与应用研究(2024SF-YBXM-636)

作者简介: 谭晶晶(1982—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事市政工程设计与新材料等研究工作。

用量、减小结构自身重量的同时,提高混凝土结构的强度和耐久性。

近年来,有关UHPC在市政工程结构中应用的研究逐步开展。杨益伦等^[9]对采用机制砂UHPC的井盖结构的受力性能和经济效益进行分析,结果表明新结构可降低成本、且强度韧性与施工效率高;苏家战等^[10]对UHPC检查井盖的性能进行了研究,表明其具有优越的抗车辆冲击和抗振动性能;邓云峰等^[11]采用力法针对圆形等截面UHPC排水管受力进行了分析,并优化设计了环向分区变壁厚截面排水管,减少了约30%的材料消耗;陈树辉等^[12]针对UHPC预制拼装综合管廊的抗剪性能进行了研究,提出了针对该类管廊抗剪承载力的计算方法。综上所述,可见已有UHPC在排水管、检查井盖及综合管廊等领域的丰富研究,但尚无针对检查井UHPC井壁结构的相关研究成果。

此外,为满足实际工程地质条件和配合管道的需求,检查井往往采用非标准截面、不同标高的井室结构。例如多室检查井中常出现井顶板和井底板标高不同的情况,导致该类检查井的结构受力与常规井壁的结构受力不同,因此针对城市检查井结构的计算分析方法有待完善。

本文拟针对某双室检查井的空间效应进行分析,以为城市检查井结构的准确计算提供建议;并基于检查井的空间受力特点对UHPC检查井井壁结构进行优化设计,探索UHPC在检查井井壁结构中的应用。

1 工程概况

某检查井为盖板和底板不等高的矩形混凝土跌水井,材料采用C40混凝土,钢筋采用HRB400,直径为22 mm,间距为100 mm。检查井不同井室的盖板埋深分别为21.0 m和22.2 m,底板的埋深分别为28.5 m和30.2 m,井室外壁板、中壁板厚均为500 mm,盖板、底板厚均为500 mm,其结构具体尺寸如图1所示。

土壤条件按容重为 16.4 kN/m^3 ,内摩擦角 $\varphi=15^\circ$,黏聚力 $c=33 \text{ kPa}$ 。

2 空间效应对检查井设计的影响

2.1 有限元模型

建立检查井的三维板壳有限元模型,如图2所示。为准确分析检查井的空间受力,同时考虑井室

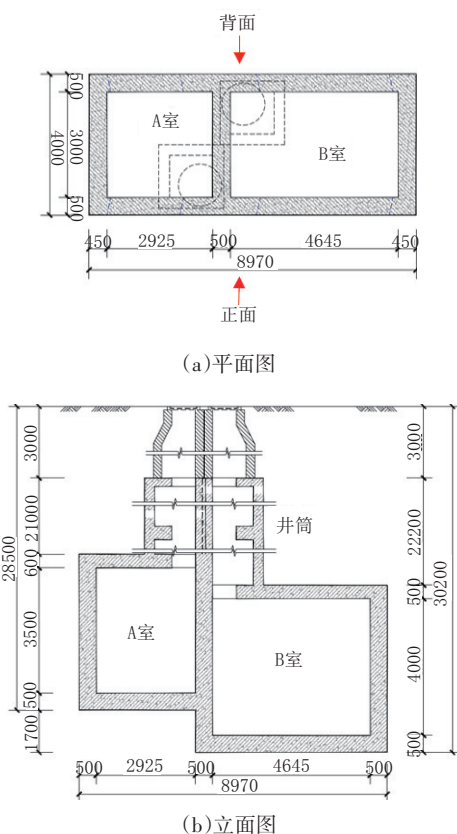


图1 检查井结构示意图(单位:mm)

上部5 m的井筒结构。

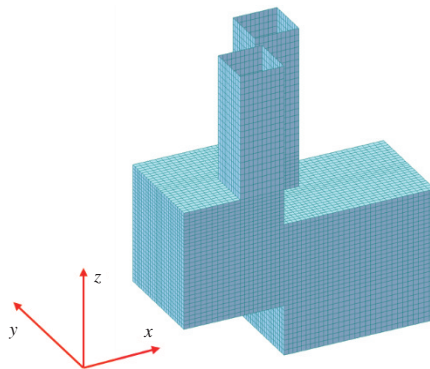


图2 检查井结构有限元模型

进行结构受力分析需考虑的作用包括自重、侧向和竖向土压力的作用;由于井室埋深较大,忽略地面施工荷载和车辆荷载的影响。A室侧壁在顶底端部的侧向土压力分别为 172.2 、 195.8 kN/m^2 ,B室侧壁在顶底端部的侧向土压力分别为 179.3 、 205.8 kN/m^2 ;A室、B室盖板上的竖向土压力分别为 398.2 、 417.9 kN/m^2 。

设置边界条件时需考虑在井室底部设置基底混凝土层,约束各井室底板的Z向位移,并约束背面底板左侧边的X向位移及底板背面侧边的Y向位移。

2.2 计算结构分析

在自重、侧向和竖向土压力的共同作用下,井室

侧壁沿宽度、高度方向的弯矩分布如图 3 和图 4 所示,横向面外位移分布如图 5 所示。

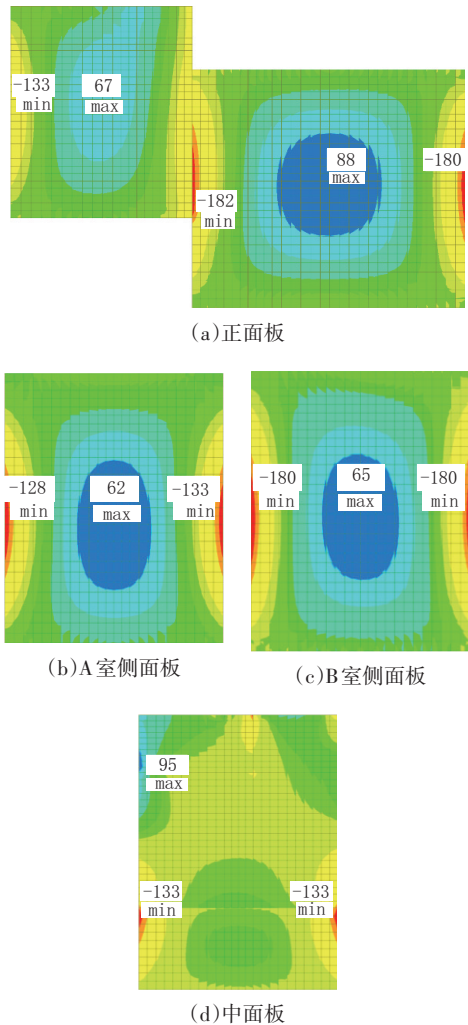


图 3 各侧壁沿宽度方向的弯矩分布(单位:kN·m)

如图 3、图 4 所示,各侧壁板两个方向的弯矩为同一数量级,故不能忽略高度方向的弯矩作用。以正面壁板为例,沿宽度、高度方向的最大正弯矩分别为 88、113 kN·m,最大负弯矩分别为-182、-293 kN·m。由于 A、B 井室的高度不同,中壁板不同高度的弯矩分布特点也不同:2 个井室共用的中部壁板弯矩较小,基本小于 50 kN·m;上下部承受侧向土压力处的部分弯矩较大,与单箱井室的受力类似。各侧壁板的面外变形呈现双向板的变形特点,如图 5 所示。对于井室的中壁板,两个箱室共用高度的中间部分相对于外侧壁板受力较小,但 A 室高出部分和 B 室低出部分的中壁板沿宽度方向的弯矩最大值较大,略小于单室壁板弯矩值。

2.3 空间效应影响分析

当井室高度较小时,宽度、高度方向的弯矩基本处于统一数量级,检查井各壁板的受力近似为双向

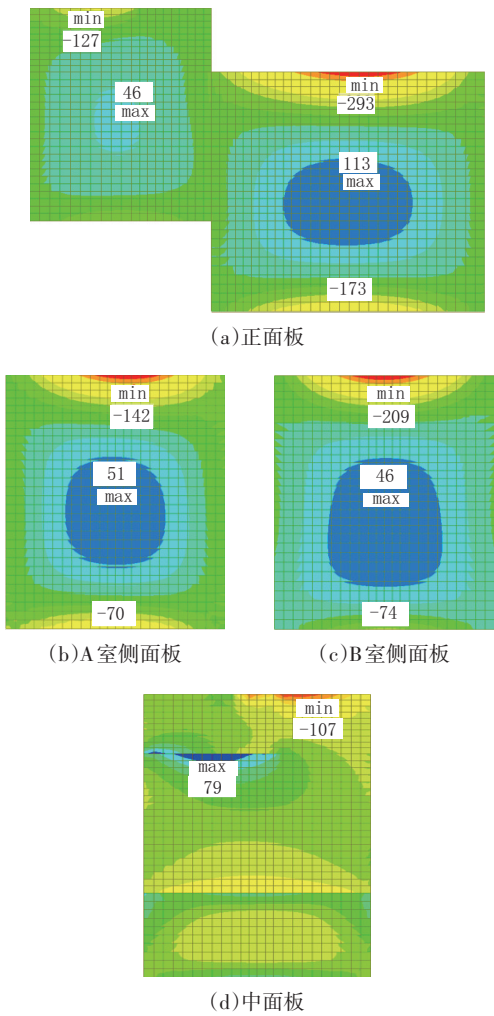


图 4 各侧壁沿高度方向的弯矩分布(单位:kN·m)

板受力特点。故此类检查井井壁结构计算不宜简化为单位长度的二维框架,采用两种方法的计算结果对比如图 6 所示,可见通过三维空间模型分析得到的井壁最大弯矩约为平面框架分析结果的 40~60%,最大位移约为 30~60%。因此,对于检查井高度较小(高度和宽度比小于 5)的情况,采用平面框架分析得到的简化计算结果会过于保守,建议采用三维板壳模型进行分析;当检查井高度和宽度的比值大于 5 时,可采用平面框架进行简化计算。

3 基于 UHPC 材料的优化设计

结合空间分析和设计验算发现,采用普通钢筋混凝土的原设计结构壁厚较大,故应对各井室壁板厚度进行优化。同时,考虑为减少检查井室各壁板的开裂风险,选择将 UHPC 材料用于井室各壁板,对检查井的结构尺寸和钢筋布置进行优化设计。UHPC 材料拟采用 UHPC120,根据《超高性能混凝土结构设计技术规程》(T/CBMT 185—2022)^[13],其拉强度

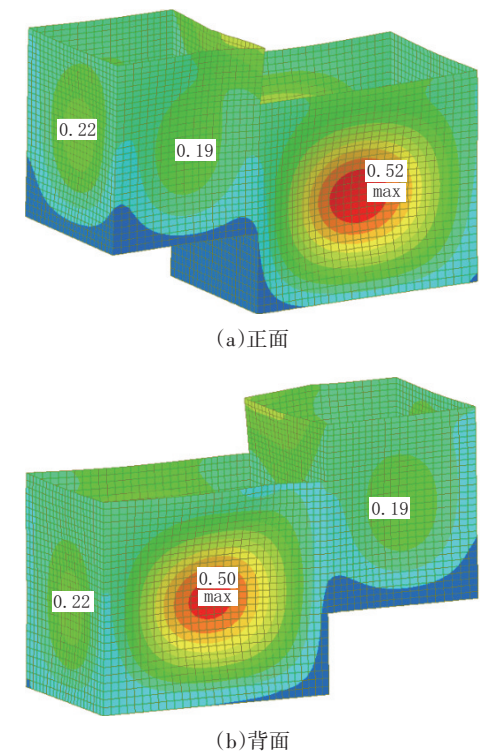


图5 各侧壁面外位移分布(单位:mm)

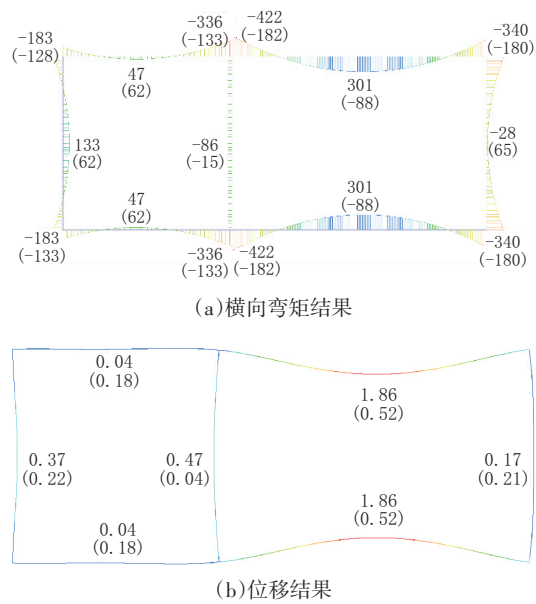


图6 空间分析与简化平面分析的结果对比

设计值为2.86 MPa,轴心抗压强度设计值为56 MPa,弹性模量为 4.41×10^4 MPa。

以保证井室侧壁正截面的受弯承载力不小于400 kN·m、裂缝宽度不大于0.2 mm为设计目标,对比不同设计方案的具体参数和设计计算结果如表1所列。

由表1可知,若保持材料和钢筋数量不变,可将井室壁厚减小至400 mm,则裂缝宽度可满足规范要求,且正截面承载力有安全储备。若采用UHPC材

表1 优化设计具体参数和计算结果对比

方案号	混凝土材料	井室侧壁厚度/mm	钢筋直径/mm	正截面受弯承载力/kN·m	裂缝宽度/mm
1	C40	500	22	580	0.15
2	C40	400	22	443	0.19
3	UHPC120	300	20	400	0.10

料,可将井室壁厚减小至300 mm、钢筋直径由22 mm减小至20 mm,则正截面承载力可满足要求,且裂缝宽度仅为规范容许值的1/2。

此外,采用UHPC壁板时还应注意,减小板厚会使结构刚度降低。当壁厚为300 mm时,B室的最大面外位移为0.71 mm,较原设计增大了约40%。

4 材料成本分析

运用UHPC的主要障碍是材料成本较高。UHPC的原材料包括混凝土、沙子、硅灰、金属纤维与高效减水剂等,UHPC120的市售价格约为5 000~7 000元/m³。材料成本对比如表2所列。

表2 材料成本分析

材料	单价/(元·m ⁻³)	检查井井室材料用量/m ³	总价/万元
C40混凝土	1 000	171.760	17.18
UHPC120	5 000	103.056	51.53

不过,应用UHPC120的情况下,可减少钢筋用量约5.27 t,从而节省钢筋材料费用约3.16万元。由于当前UHPC的应用规模小,单价仍然较高,所以成本较高,但整体上对于提升基础设施工程的建设质量、节省原材料、早日实现碳达峰均具有重要的实际意义。

5 结 语

本研究通过建立某检查井的三维板壳有限元模型,详细分析了其在自重、侧向和竖向土压力作用下的受力情况,并对采用UHPC材料的检查井结构的优化设计方案进行了对比。研究得到主要结论如下:

(1)对于井室高度和宽度比值较小(高度和宽度比小于5)的情况,井室各侧壁板在宽度和高度方向上的弯矩为同一数量级,且面外变形呈现双向板的变形特点,此时采用平面框架得到的简化计算结果更加保守,因此建议采用三维板壳模型进行分析,结果更为准确;

(2)基于空间分析结果,采用普通混凝土材料的井壁厚度可减小为20%,而采用UHPC材料的井壁厚

度可减小为40%,同时钢筋用量减少17%,但也应注意减小板厚会导致结构刚度降低,需在设计中予以考虑。

参考文献:

- [1] 崔冰,王景全,刘加平.UHPC桥梁研究进展与规模化应用技术路径分析[J].中国公路学报,2023,36(9):1-19.
- [2] 张永鸿,任双宏,袁顺利.国内基于超高性能混凝土(UHPC)的装配式建筑连接应用研究综述[J].建筑结构,2023,53(增刊1):1200-1205.
- [3] 邵旭东,樊伟,黄政宇.超高性能混凝土在结构中的应用[J].土木工程学报,2021,54(1):1-13.
- [4] MISHRA O, SINGH S P. An Overview of Microstructural and Material Properties of Ultra-High-Performance Concrete[J].Journal of Sustainable Cement-Based Materials, 2019, 8(2): 97-143.
- [5] 陈宝春,季韬,黄卿维,等.超高性能混凝土研究综述[J].建筑科学与工程学报,2014,31(3):1-24.
- [6] 赵人达,赵成功,原元,等.UHPC中钢纤维的应用研究进展[J].中国公路学报,2021,34(8):1-22.
- [7] 吴凯,赖建中,杜龙雨,等.3D打印超高性能混凝土的抗渗及抗冻性能研究[J].混凝土与水泥制品,2022(10):1-6.
- [8] 宋立国.超高性能混凝土在桥梁结构中应用研究[J].铁道建筑技术,2022(1):82-86.
- [9] 杨益伦,吴庆雄,陈智威,等.无配筋机制砂UHPC井盖受力性能试验研究[J].宁夏大学学报(自然科学版),2023,44(4):328-338.
- [10] 苏家战,张惠彬,黄卿维,等.配筋超高性能混凝土井盖试验及现场使用性能测试[J].福州大学学报(自然科学版),2018,46(6):867-873.
- [11] 邓云峰,刘军,向义,等.圆形截面UHPC排水管受力性能级设计优化研究[J].给水排水,2022,48(增刊1):444-449.
- [12] 陈树辉,夏樟华,吴泽霖,等.超高性能混凝土预制拼装综合管廊抗剪承载力[J].工业建筑,2023,53(5):158-164.
- [13] T/CBMF 185—2022,超高性能混凝土结构设计技术规程[S].

(上接第249页)

- [2] DEEKS A J, RANDOLPH M F. Axisymmetric time-domain transmitting boundaries[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1994, 120(1): 25-42.
- [3] 刘晶波,谷音,杜义欣.一致粘弹性人工边界及粘弹性边界单元[J].岩土工程学报,2006,28(9):1070-1075.
- [4] 马笙杰,迟明杰,陈红娟,等.黏弹性人工边界在ABAQUS中的实现及地震动输入方法的比较研究[J].岩石力学与工程学报,2020,39(7):1445-1457.
- [5] 孙纬宇,欧尔峰,严松宏.基于黏弹性边界的地震动输入方法和边界条件选择研究[J].地震工程学报,2016,38(6):929-934.
- [6] 王展,景立平,陆新宇,等.粘弹性人工边界单元及地震动输入方法比较研究[J].世界地震工程,2023,39(2):167-177.
- [7] 郝明辉,张郁山.相邻地形对地震动特性的影响分析[J].中国地震,2015,31(4):656-667.
- [8] 赵宝友,马震岳,丁秀丽.不同地震动输入方向下的大型地下岩体洞室群地震反应分析[J].岩石力学与工程学报,2010,29(增刊1):3396-3402.
- [9] 徐海滨,修力,赵密,等.地震波斜入射对高拱坝地震反应的影响[J].水力发电学报,2011,30(6):159-165.
- [10] 黄景琦,杜修力,田志敏,等.斜入射SV波对地铁车站地震响应的影响[J].工程力学,2014,31(9):81-88;103.