

文章编号: 1007-2993(2023)02-0174-07

大直径顶管进出洞口对矩形竖井结构的 受力影响研究

海涵¹ 何伟¹ 詹源² 陈孝湘³ 龚建伍⁴

(1. 国网陕西省电力有限公司建设分公司, 陕西西安 710065; 2. 中国能源建设集团陕西省电力设计院有限公司, 陕西西安 710054; 3. 中国电建集团福建省电力勘测设计院有限公司, 福建福州 350003;
4. 武汉科技大学城市建设学院, 湖北武汉 430081)

【摘要】 作为顶管工程最为重要的构筑物之一, 顶管始发井或接收井需要在井壁上开设尺寸不一的圆形洞口供顶管进出, 洞口的设置影响了井体结构受力。以有限元软件为分析工具, 依托西安市某 DN3500 内径电力顶管工程, 研究采用明挖顺作法施工的井壁开洞对井体结构的受力影响规律, 将之与同等条件下的沉井结构内力计算结果进行对比, 得出了不同工艺井侧壁开洞前后的内力变化规律, 并提出了相应的井结构优化设计建议, 为相关工程的设计与分析提供参考。

【关键词】 大直径顶管; 始发井; 预留洞口; 结构受力; 有限元

【中图分类号】 TU 990.3

【文献标识码】 A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2023.02.008

Influence of Internal Force in the Rectangular Shaft for the Pipe Jacking with a Reserved Hole

Hai Han¹ He Wei¹ Zhan Yuan² Chen Xiaoxiang³ Gong Jianwu⁴

(1. State Grid Shaanxi Electric Power Co., Ltd. Construction Branch, Xi'an 710065, Shaanxi, China; 2. Shaanxi Electric Power Design Institute Co., Ltd. of CEEC, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. PowerChina Fujian Electric Power Survey & Design Institute Co., Ltd., Fuzhou 350003, Fujian, China; 4. School of Urban Construction, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, Hubei, China)

【Abstract】 The launching shaft or the receiving shaft are the most critical structures in the pipe jacking project, and circular holes of different sizes are needed on the shaft wall for the pipes to enter and exit. The setting of the holes affects the stress of the shaft structure. Relying on a DN3500 inner diameter electrical power pipe jacking project in Xi'an, the influence law of the shaft wall opening constructed by the open excavation method on the shaft structure was studied using the finite element method. The results were compared with the open caisson under the same conditions. The internal force calculation results of the design are compared, and the internal force variation law before and after the open excavation of the shaft with different methods was obtained. The corresponding structure optimization design suggestions are put forward and provide reference for the design and analysis of related projects.

【Key words】 pipe jacking with large diameter; launching shaft; the reserved hole; structure stress; finite element method

0 引言

作为市政管网、城市综合管廊或地下人行通道等城市基础设施的主要施工工法之一, 顶管技术被广泛应用于下穿道路、河流等不可明挖施工的工程中^[1-2], 近年来, 在以城市电力电缆隧道为代表的管廊工程中, 更是发挥了举足轻重的作用^[3-5]。

一直以来, 顶管用沉井的设计都遵循《给水排水

工程钢筋混凝土沉井结构设计规程》(CECS 137: 2015)的规定^[6], 即将沉井沿着竖向每隔一定的高度(通常是 4~6 m 一段)截取一延米, 假定其符合平面应变进行结构计算, 得到内力组合后配筋。由于沉井下沉时顶、底板未封, 侧壁的上下边属于自由边界, 应用前述计算方法是合理的。对于井壁上开洞口的影响, 由于管网顶管井的洞口较小(通常 $\phi \leq 2.0$ m),

基金项目: 国网陕西省电力有限公司科技项目(电缆工井涉及河道防护措施研究)

作者简介: 海涵, 男, 1983 年生, 河南开封人, 大学本科, 高级工程师, 主要从事输变电工程的技术管理与研究工作。 E-mail: haihanxiansheng@126.com

则通过现有梁板上开洞口的构造措施进行加强即可满足要求,该设计方法在长期的工程实践中也被证明是安全可靠的。

但随着顶管直径的不断增大,井壁上需要预留的洞口尺寸也越来越大(电力顶管井可达 4.0 m 以上),洞口的存在对结构整体性的削弱越来越强;但另一方面,洞口的存在也使得该位置外侧不再作用土压力,井整体的荷载又变小了,两种作用叠加后对井结构的受力产生了复杂的影响,使之与现行设计方法间存在较大的差异性,为此,国内的工程技术人员也展开了相关研究。杨金虎等^[7]采用 MIDAS 软件针对某 7.5 m(长)×6.0 m(宽)×10.3 m(高)的沉井进行有限元建模分析,并将开洞前后矩形沉井的受力性能进行比较,结果显示,沉井开洞后其内力的分布及大小均有所改变,开洞后沉井结构各部位最大弯矩均有所增大,跨中弯矩增大较多,洞口处弯矩除局部应力集中外增幅并不是很大,未开洞侧跨中弯矩增大较多。陈亮亮和管晓燕^[8]采用 PKPM 对某工程的循环水泵房进行了多种工况下的分析,提出了内隔墙设洞口对结构的影响规律,并根据优化分析结果,在工程实际中取消了内隔墙预留洞口的壁柱和临时支撑结构。牛建东等^[9]结合凯德隆电站取水水泵房沉井不同的浇筑方案开展三维数值模拟研究,得出了采用整体现浇较预留二期混凝土或者预留二期混凝土加支撑的方案要更合理的结论。

从现有的研究成果来看,大口径顶管进出开洞口对沉井结构的设计确实产生了一定的影响;另一方面,采用明挖顺作法施工的竖井结构,其井体的形成过程与沉井不同,一般工况下是底板和侧壁同步形成,在顶管施工结束后再施作顶板,井体的受力过程与沉井存在本质区别,沉井开洞口后的受力影响规律不可直接应用于竖井工程,需要结合工程实际开展相关的分析与研究。

结合西安某 330 kV 超高压电缆工程,针对排桩支护、明挖顺作法施工的大口径顶管工井,结合实际工程条件,采用有限元方法研究开孔对井结构受力的影响规律,提出相应的优化设计建议,为依托工程的设计提供依据,也为相关工程的建设提供参考。

1 依托工程概况

1.1 工井设计参数

西安市某 330 kV 电缆隧道工程需要采用 DN3500 内径的钢筋混凝土顶管下穿皂河,管道壁厚 350 mm,采用 F 型接口。根据隧道的平面布置需求,井在下穿河道的始发井呈 90°始发,井的内净空尺寸

为 10 m×10 m,深度为 18.84 m。结合工程地质条件和周边环境条件,井的基坑采用 $\phi 1000$ mm 的灌注桩围护,设 5 道内支撑明挖后顺作施工竖井(见图 1)。

结合工程地质和水文地质条件,初步估算后井的尺寸为:侧壁厚 900 mm(内外排竖向纵筋均为 $\phi 22@150$;高度方向上分段配筋,下半段环向内外排筋均为 $\phi 25@100$ 、上半段内外排均为 $\phi 22@100$)、底板厚 1200 mm(双层双向均为 $\phi 25@100$)、顶板采用梁板结构体系(板厚 400 mm,井字梁间距不超过 2000 mm,梁截面为 450 mm(宽)×1000 mm(高)),井结构采用 C30 的钢筋混凝土现场筑模浇筑,在顶管进出的位置,预留 2 个 DN4500 的圆形洞口,洞口中心距离井内底 3.15 m。基坑采用 $\phi 1000@1280$ 的灌注桩支护,桩长 27.4 m;灌注桩外设置 2 排 $\phi 800@550$ 的旋喷桩止水帷幕(见图 2)。

1.2 工程地质条件

顶管始发井位于河道附近,场地地层自上而下分别为杂填土、黄土状粉质黏土、中砂、粉质黏土、中砂、粉质黏土、中砂,地层参数及其分布厚度见表 1。

表 1 顶管始发竖井地层参数

参数土层	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	c/kPa	$\varphi/(\text{°})$	$w/\%$	层厚/m
(1-1)杂填土	14.0	0	2.0		2.95
(2)黄土状粉质黏土	18.6	20.0	18.0	18.8	6.50
(3)中砂	20.0	0	33.0		1.90
(3-1)粉质黏土	19.7	25.0	22.0		2.20
(3)中砂	20.0	0	33.0		1.60
(4)粉质黏土	19.7	16.0	24.0	22.4	1.60
(4-1)中砂	22.0	0	32.0		10.0

注:地下水位于地面以下 12.31 m。

2 预留孔口对井结构的影响分析

由于排桩与井之间未设置传递剪力的抗剪连接构造,故二者属于分离式的地下结构,同时井的整体刚度较排桩大,井体结构需要独自承担外侧水土压力,为了便于对比,分析时不考虑外侧支护排桩对土压力分布规律和井体结构刚度的影响。

井体结构受力分析采用荷载结构法,相关的模型和物理力学参数如下:

(1)在模型参数输入时,按图 1、图 2 的结构几何尺寸输入模型,包含井的四侧壁及底板部分,均采用 SAP2000 中预定义的钢筋混凝土材料模型,钢筋混凝土强度为 C30,采用线弹性模拟,弹性模量为 3.15×10^4 N/mm²,泊松比为 0.2,重度为 25 kN/m³。

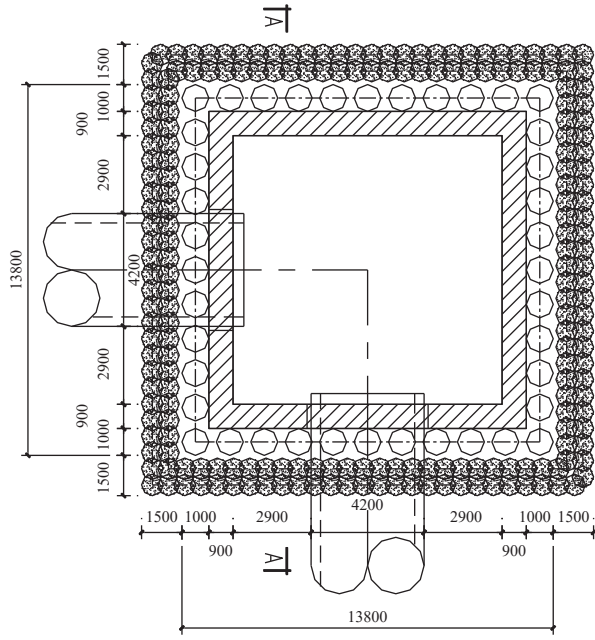


图1 排桩围护明挖顺作井及其支护平面图(单位:mm)

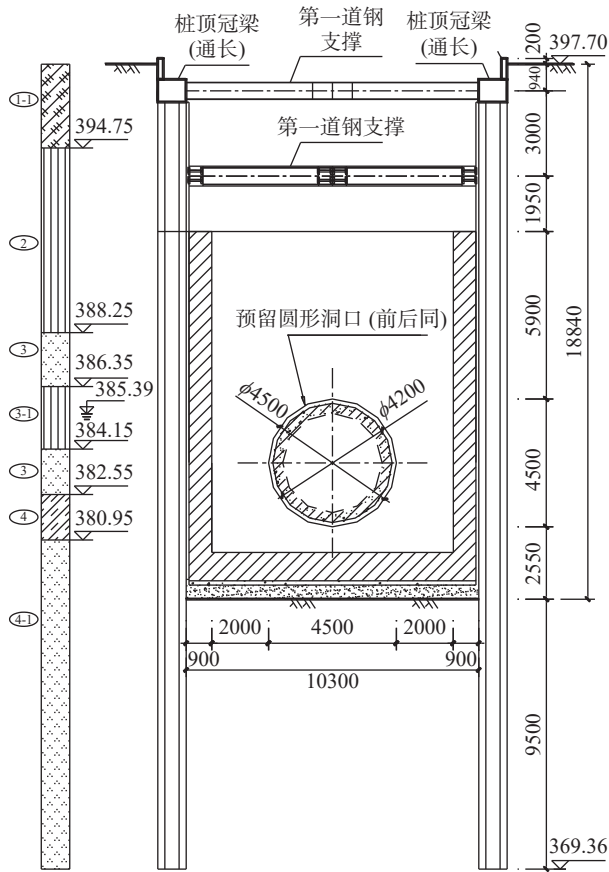


图2 排桩围护明挖顺作井及其支护剖面图(标高单位:m; 长度单位:mm)

(2)边界条件: 四边和顶部自由, 底部在每一个节点处均设置了只受压的弹簧, 考虑基坑开挖对地基土扰动的不利影响, 底板下方的基床系数取松散沙土的下限值, 即弹簧的竖向刚度为 $1 \times 10^4 \text{ kN/m}^3$ 。

(3)井四周的土侧压力采用朗肯主动土压力计算,

土侧压力系数按土层等待取值后输入, $k_a=0.30$, 即井壁顶部土侧压力为 35.3 kN/m^2 、井壁底部土侧压力为 111.9 kN/m^2 。

(4)工井顶板以上的荷载通过顶板均匀地分摊至井壁的顶部上, 线荷载为 344.6 kN/m 。

2.1 不考虑预留洞口的结构内力

采用 SAP2000 软件, 建立不含预留洞口的三维有限元竖井模型, 分析不同部位结构的内力值, 工井顶板、侧壁的最大内力值如表 2 所示, 从表 2 及图 3、图 4 的对比中可以看出:

表 2 未开洞口的竖井结构内力及应力分布情况

部位	内力及应力值						
	N_x/kN	N_y/kN	V/kN	$M_x/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_y/(\text{kN}\cdot\text{m})$	σ/kPa	
底板	最大	-83.2	-83.2	1274.6	1787.5	1787.5	1019.2
	最小	-1095.4	-1094.8	108.0	-1105.8	-1105.8	87.4
侧壁	最大	125.0	632.5	961.4	1039.3	1787.5	1444.3
	最小	-955.5	-1660.5	36.0	-499.2	-303.5	336.5

注: x 、 y 的方向为各个板件的局部坐标轴方向。

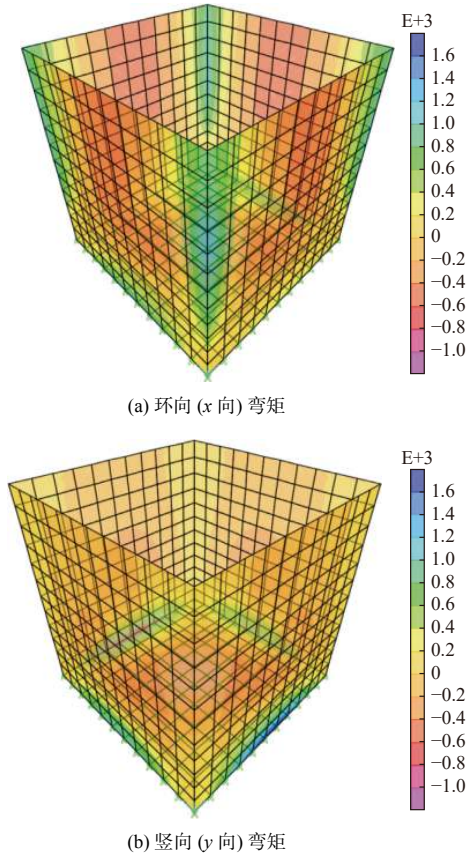


图3 不预留洞口的工井弯矩分布图(单位:kN·m)

(1)从井壁结构的环向(x 向)弯矩分布特性来看, 可将井壁自下而上分成三段: 底板以上 5.0 m 至最上

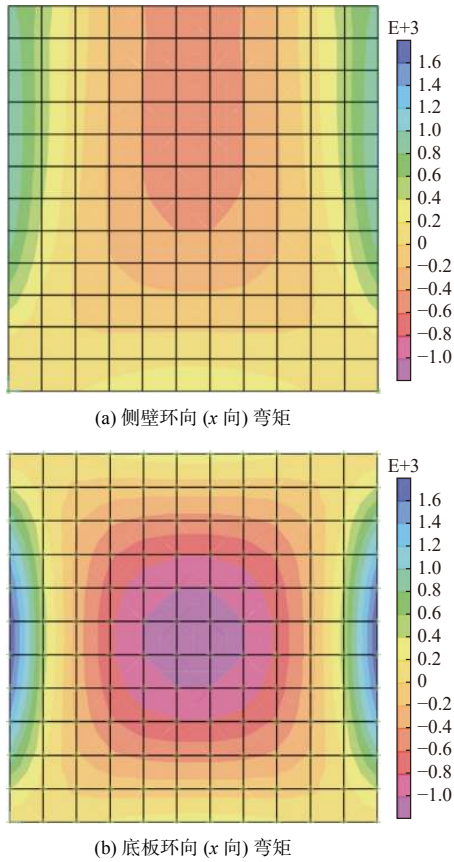


图4 不预留洞口的工井侧壁最大弯矩剖面图(单位:kN·m)

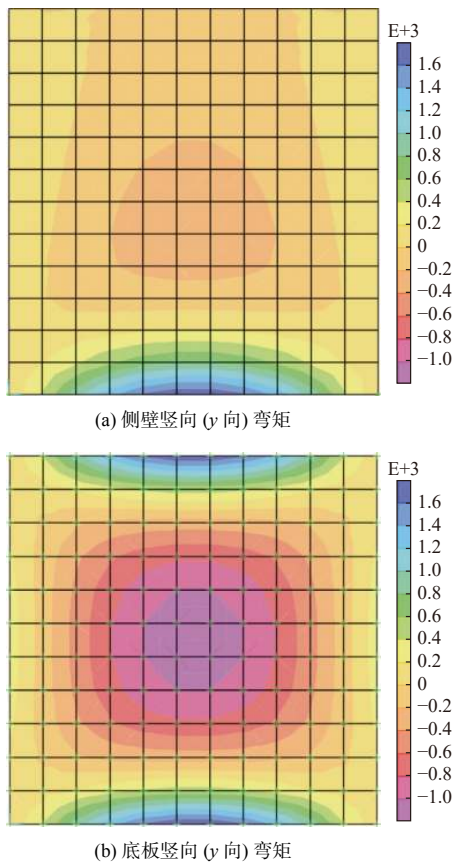


图5 不预留洞口的工井底板最大弯矩分布图(单位:kN·m)

沿为上段;底板以上 2.0~5.0 m 为中段;底板以上 0~2.0 m 为下段。井壁上段沿着高度环向(x 向)受力符合沉井结构的内力计算结果,中段的分布特性与上段近似,但内力值都较小;下段受底板刚度的影响,跨中弯矩外井外侧受拉,与上、中段的分布特性不一致,但绝对值相对较小,在结构设计时需要注意外侧受拉工况下的配筋设计。

(2)从井壁结构竖向(y 向)弯矩分布特征来看,也可将井壁自下而上分成三段:底板以上 7.0 m 至最上沿为上段;底板以上 3.0~7.0 m 为中段;底板以上 0~3.0 m 为下段。上段的 y 方向弯矩很小,也可以认为符合沉井结构的内力计算结果;在中段的跨中部位,受底板支承的影响,y 向弯矩呈现了内侧受拉的弯矩分布特性,且弯矩值达到了 $-300 \text{ kN}\cdot\text{m}$,是井结构设计时不可忽略的一个内力;受底板刚度的影响,在竖向(y 向)弯矩上,下段出现了与底板四周最大值一致的外侧受拉弯矩,达到了 $1787.51 \text{ kN}\cdot\text{m}$,是结构设计时需要重点考虑的部位,应避免井外侧壁开裂,进而出现渗漏、耐久性不足等问题。(见图 5)

(3)由于本工程底板的长度和宽度一致,使得底板的两个跨度方向(x 向、y 向)弯矩分布特性基本一致,符合双向板的受力特征。

2.2 开洞口对结构削弱有限元分析

根据工程设计的结果,在工井的侧壁上开设了 2 个 DN4500 的圆形洞口,并采用同样的荷载条件进行井的内力分析,不同部位的结构内力及应力分布情况见表 3 及图 6、图 7,从内力和应力的分布特征及其与未开孔的对比分析如下:

表3 开洞口的竖井结构内力及应力分布情况

部位	内力及应力值						
	N_x/kN	N_y/kN	V/kN	$M_x/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_y/(\text{kN}\cdot\text{m})$	σ/kPa	
底板	最大	1294.7	1341.3	266.6	1861.6	1834.2	1660.3
	最小	-1337.2	-1718.6	-343.5	-1186.6	-1187.1	584.8
侧壁	最大	1442.0	1192.4	1020.5	1055.8	4336.0	2131.8
	最小	-1327.1	-2015.1	-1387.1	-514.3	-533.7	404.1

注: x、y 的方向为各个板件的局部坐标轴方向;最大值不包括洞口应力集中部分导致的内力变化。

(1)从环向(x 向)弯矩分布特性来看,井四周侧壁的开洞对弯矩的分布几乎不产生影响,不仅分布的规律、部位一致,除了底板四周的正弯矩增大了 7.60% 之外,其余反而变小了,故对环向弯矩而言,不考虑洞口对结构整体削弱产生的影响进行简化计算是可行的。

(2)从竖向(y 向)弯矩分布特性来看,井四周侧壁的开洞对底板弯矩分布特性影响很小,其变化幅度与环向(x 向)弯矩基本一致;而侧壁竖向弯矩在洞口周边发生了较大的变化,尤其是洞口底部两侧 45° 范围内周边,更是出现了多处超过 $4000\text{ kN}\cdot\text{m}$ 的板件。竖向(y 向)弯矩在开洞口侧壁的分布也显示了明显的规律,若将井壁自上而下分为洞口上方 1 m 以上段(上段)、洞口及其上下各 1 m 段(中段)和洞口下方 1 m 及以下段(下段),则其分布规律为:上段与未开孔的井壁分布规律近似;中段呈现沿着洞口周边发生弯矩不规则、大幅度变化的趋势,是工程设计时应重点关注的部位;下段由于悬臂段较短,同时洞口的开设也使得洞外的土侧压力归零,故而使得竖向弯矩略有变小。

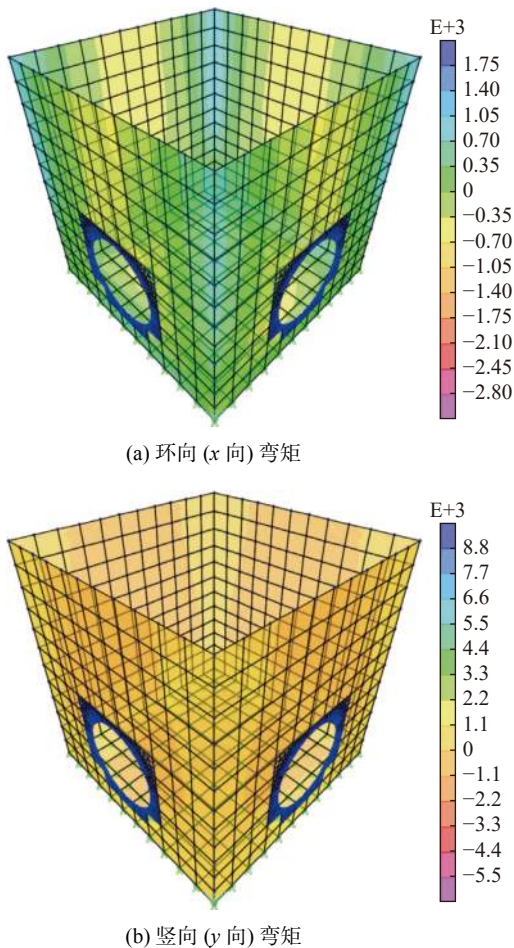


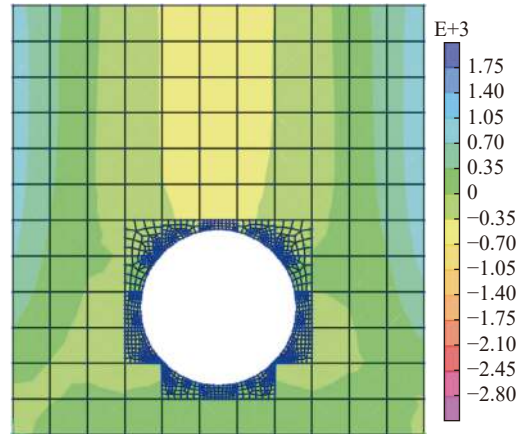
图6 预留洞口的工井最大弯矩分布图(单位: $\text{kN}\cdot\text{m}$)

(3)开洞口后,洞口上下范围的环向(x 向)轴力、竖向(y 向)轴力和剪力都有所增大,其主要原因是洞口的开设减小了结构传递轴力和剪力的构件面积,在同等荷载作用下就会带来延米内力的变化;与此同时,洞口周边 1 m 范围和井底部以上、洞口顶部以下的井侧壁交角处会产生应力集中,进而造成了局部部位

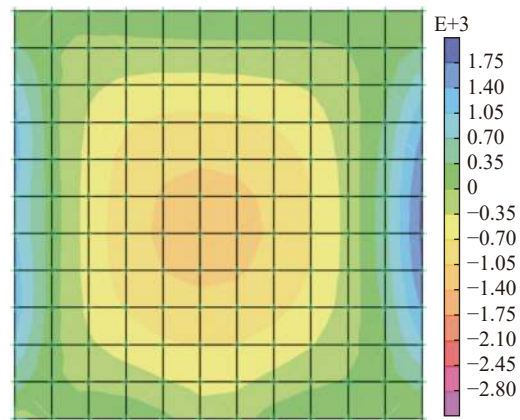
的环向轴力、竖向轴力和剪力的急剧增加,部分内力的增幅超过了 10 倍(在SAP2000中,各类内力是通过应力积分后得到的,沿剖面非线性分布)。

(4)与未留设洞口的工井内力相比,预留洞口后,底板的内力几乎不发生变化;侧壁环向(x 向)的弯矩值也变化很小,主要是竖向(y 向)的弯矩值发生了一定的变化,而且集中于洞口上下 1 m 的高度范围内。

(5)针对开洞后井的内力变化和局部应力集中的情况,工程设计时应专项、重点分析该区域受力和配筋。洞口周边应力集中的不利情况可采取在洞周增设暗框架的方式来减小对结构的不利影响。



(a) 侧壁环向(x 向)弯矩



(b) 底板环向(x 向)弯矩

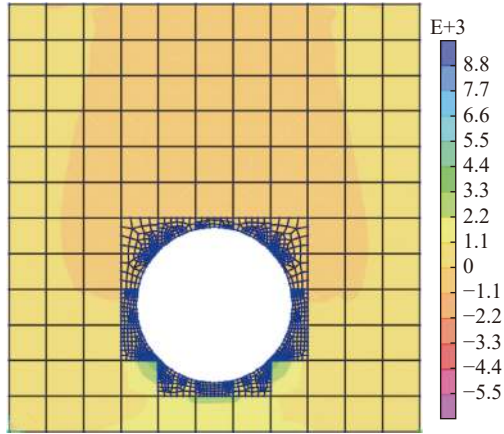
图7 预留洞口的工井侧壁最大弯矩分布图(单位: $\text{kN}\cdot\text{m}$)

2.3 与无底板工井(沉井未封底)内力的对比

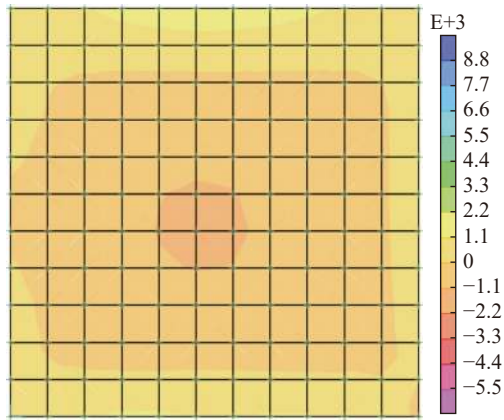
为了对比沉井等后设置底板工井结构的内力,对比分析同等尺寸、同等地质条件下的沉井受力分析结果(见表4、图8)。

从表4本身开洞前后的对比可以看出,其分布规律与有底板的基本上类似,即开设洞口后,除洞口外侧 1 m 范围内的板件外,其余部位的环向(x 向)、竖向(y 向)弯矩值的绝对值都只是略有增大;虽然增大的幅度不大,但是采用未开设洞口的方法进行结构

内力的配筋存在一定的安全隐患,可能导致结构的安全性和耐久性存在一定的不足。



(a) 侧壁竖向(y向)弯矩



(b) 底板竖向(y向)弯矩

图8 预留洞口的工井底板最大弯矩分布图(单位:kN·m)

表4 开洞前后沉井结构内力及应力分布情况

部位	内力及应力值					
	N_x /kN	N_y /kN	V /kN	M_x /(kN·m)	M_y /(kN·m)	σ /kPa
未开洞	最大 67.9	-501.0	314.8	2552.2	504.7	1553.2
侧壁	最小 -1686.5	-1224.9	-314.8	-1203.2	-182.2	491.1
开洞	最大 1442.1	-511.6	752.7	2774.9	682.5	4140.0
侧壁	最小 -3722.7	-2203.9	-852.1	-1258.9	-192.1	-1777.8

注: x 、 y 的方向为各个板件的局部坐标轴方向;最大值不包括洞口应力集中部分导致的内力变化。

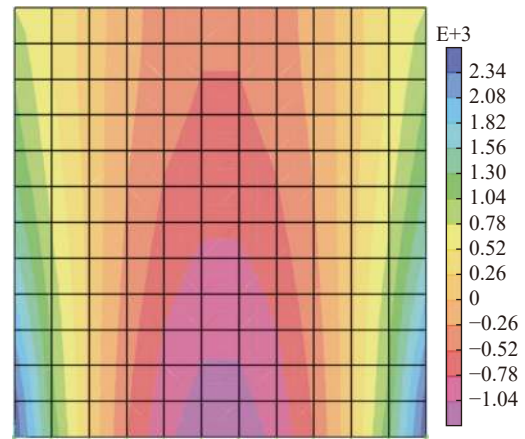
通过图9的内力分布图可知,开设洞口周边1m范围内的板件内力分布较为复杂,在结构设计时,应通过设置若干环向的暗梁和加强钢筋来避免应力集中的问题,以保证结构的安全。

从是否设置包含底板的工井内力对比来看,有以下两个规律:

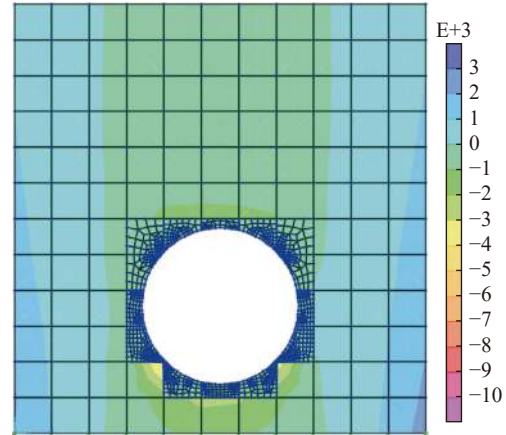
(1)未设置底板前,由于侧壁的上下端为自由边,故其受力以环向为主,从弯矩值的对比来看,环向

(x 向)弯矩远大于竖向(y 向)弯矩,和文献[6]推荐的算法得到的结果是一致的;但对于底板与侧壁一并浇筑的竖井结构,其侧壁的弯矩分布显示出了明显的不同:除了环向(x 向)的弯矩外,在竖向(y 向)也出现了大于环向的弯矩值,但主要是分布于井壁的下段。

(2)未设置底板的井侧壁幅值(绝对值之和)超过了3700 kN·m,设置了底板之后的仅为1500 kN·m,采用沉井的内力计算方法来计算含底板竖井的内力,会造成浪费。



(a) 未开洞时环向(x向)弯矩



(b) 开洞口后的环向(x向)弯矩

图9 沉井四周井壁受开洞口影响的弯矩分布图(单位:kN·m)

3 结论

针对西安某DN3500内径顶管工程的明挖顺作施工的工作竖井,结合工程地质条件和竖井的实际预留洞口需求,分析开洞对结构内力分布的影响规律,并将其与内净空相同的沉井结构内力计算结果进行对比,得出以下结论:

(1)沉井结构开洞口对结构整体的影响较小,但洞口周边局部范围的内力变化较大;开洞口后的井壁内力分布规律基本不发生变化,只是绝对值略有增大;

但在洞口周边 1 m 范围内的板件应力集中现象明显,需要采取加强构造,避免出现局部破坏。

(2)与沉井相比,井壁和底板同时浇筑的顶管竖井结构,其侧壁受力规律呈现出了较大的不同,其环向(x 向)弯矩值显著变小而竖向(y 向)弯矩值显著增大,此时若再采用沉井的方法计算内力则会存在较大偏差;在该类型井结构设计时,应建立包含底板的三维模型计算内力,并开展结构的配筋,尤其要注意侧壁与底板连接处的井壁外侧竖向钢筋的配置和裂缝控制。

(3)对于底板侧壁同时浇筑的顶管竖井,开洞前后环向(x 向)的弯矩值变化很小,但竖向(y 向)的弯矩值,尤其是洞口下方侧壁板的弯矩值发生了成倍的增加,同时洞口周边 1 m 范围内也发生了较大的应力集中,结构设计应充分考虑到这些不利因素的影响。

(4)开洞口对井壁的轴力、剪力的分布也发生了一定的影响,其主要原因是开洞口导致了结构整体削弱,传递荷载的构件截面尺寸发生了突变,造成了应力集中。

(5)对采用明挖顺作法施工的、侧壁与底板同时浇筑的顶管竖井结构而言,预留洞口对始发井结构的受力影响较大,在结构设计时应考虑洞口的部位、大小对结构的影响。

参 考 文 献

- [1] 车爱伟,李龙伟,胡 坤,等.过河顶管技术在国外大口径输水管线工程的应用[J].中国给水排水,2019,35(16):77-81.
- [2] 陈孝湘,陈 勇,赵剑豪,等.海底超长距离大口径混凝土顶管顶力及摩阻力测试分析[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2020,39(3):136-141.
- [3] 贺 雷,刘华清,崔明杰,等.砂砾地层电力顶管施工引起的地面变形研究[J].现代隧道技术,2020,57(2):141-148.
- [4] 郭福龙.市政综合管道穿越障碍物顶管施工设计和应用[J].中国给水排水,2019,35(14):72-75.
- [5] 牛国伦,马保松,张 鹏,等.大直径顶管施工管土相互作用实测分析——以佛山市电力隧道顶管工程为例[J].隧道建设(中英文),2021,41(8):1353-1360.
- [6] CECS 137: 2015 给水排水工程钢筋混凝土沉井结构设计规程[S].北京,中国计划出版社,2015.
- [7] 杨金虎,余志斌,李 明,等.矩形沉井开洞受力对比分析[J].湖北电力,2011,35(2):47-49.
- [8] 陈亮亮,管晓燕.内隔墙设洞口的大型沉井三维结构分析[J].电力勘测设计,2011,(2):57-59.
- [9] 牛建东,冉 凯,周小林,等.凯德隆电站取水泵房沉井结构有限元分析[J].水利水电技术,2019,50(9):89-97.

收稿日期:2021-12-15