

全地下污水厂楼板开洞对外池壁受力的影响

唐甜甜

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘要: 随着用地建设的限制,新建污水厂多选用全地下的整体结构形式,而全地下污水厂为了满足操作、维护、通风等功能需求,水池顶板通常需要在特定的位置进行开孔,当洞口位置紧靠外池壁时,外池壁的中间约束会因此被削弱,对外池壁的受力产生影响,采用 Autodesk robot 有限元分析软件对外池壁存在不同长度洞口的受力模型分别进行分析,得出洞口尺寸对外池壁受力的影响,给出相应的设计解决方案,并给出全地下污水厂水池顶板洞口布置的建议。

关键词: 全地下污水厂;外池壁;楼板开洞;池壁受力

中图分类号: TU991.35

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)06-0442-06

Influence of Floor Slab Openings on Outer Tank Wall Force in Fully Underground Wastewater Treatment Plant

TANG Tiantian

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: With the restrictions on land use for construction, the fully underground integrated structures are more adopted for the newly-built wastewater treatment plants (WWTPs). In order to meet functional requirements such as operation, maintenance and ventilation of WWTP, the top slabs of the tanks should be usually holed at specific locations. When these openings are positioned close to the outer tank wall, the intermediate restraint of the outer tank wall is weakened, thereby influencing the force of the outer tank wall. The finite element analysis software of Autodesk Robot is used to analyze the force models of the different-length openings of outer tank wall. The impact of opening dimensions on the force of outer tank wall is obtained, and the corresponding design solutions are given. And the suggestions for the layout of openings on the top slab of the tanks in the fully underground WWTPs are proposed.

Keywords: fully underground WWTP; outer tank wall; floor slab opening; tank wall force

0 引言

城市的环境保护是城市发展必不可少的组成部分,而水环境保护是其中的重要环节。随着我国人口的增多,经济的发展,污水处理量也随之增长,但由于建设用地有限,新建污水厂多选用集约式的全地下污水厂,这种形式的污水厂具有占地面积小,环境友好的特点,上部地面还可以用于公共场所的开发,如绿地、公园等,具有很大的社会效益^[1-6]。

全地下污水厂由集约化水池及箱体结构构成,箱体的底板即为集约化水池的顶板,从而形成了一个二层的地下空间结构。为了满足操作、检修、通风等功能的需求,水池顶板通常需要在特定的位置开

洞,一般较大的洞口会尽量避免紧靠外池壁布置,当确实难以避免时,该洞口会削弱外池壁的约束,对外池壁的受力产生影响,现行国家规范中并未给出局部约束取消状态下的池壁分析方法,需要结构设计人员采用有限元软件进行特殊分析,对于一些较大的洞口我们会增设水平梁,但对于一些不可避免的楼梯间、风井、检修口等较小的洞口是否也会对外池壁产生影响,是否也需要设置水平梁,洞口尺寸多大时可以忽略其影响,规范上并无定论,一般由设计人员根据经验或者计算结果确定。本文通过对不同尺寸的外池壁开设不同长度洞口的受力情况分别进行分析,通过纵横向对比,给出相应的建议,为全地下污水厂操作层平面布置提供了指导。

1 工程概况

本文依托三亚清流园水质净化工程进行分析,

收稿日期: 2025-11-03

作者简介: 唐甜甜(1986—),女,硕士,高级工程师,从事地下结构设计工作。

本工程位于海南省三亚市,为全地下污水厂,设计规模为近期5.0万t/d,远期10万t/d。其中地下一层层高为6m,壁厚为600mm,地下二层层高为5.15~9.50m,外池壁壁厚为600~1000mm,顶板覆土0.5~2.0m,室外地面标高为7.000~7.500m(绝对标高)。

根据地勘报告,拟建场地地下水主要为赋存于①杂填土、③中砂、⑤粗砂、⑦粉砂中的孔隙潜水,主要接受大气降水入渗及地下径流补给,水位变化主要受大气降水影响。勘察期间地下水水量丰富,经钻孔揭露,稳定的地下水位埋深0.78~4.11m,地下水年变化幅度约1.5m。本工程抗浮水位取使用阶段设计地面标高7.000m(绝对标高)。

本工程地下箱体的设计工作年限为50年,抗震设防烈度为6度,地下箱体的抗震设防类别为重点设防类(乙类),安全等级为一级,重要性系数为1.1,抗震等级为三级。地下箱体的混凝土强度等级均采用C35,抗渗等级为P8。

2 数值分析模型

本文选取了该污水厂二沉池外侧池壁进行分析,池壁共两层,其中地下一层层高为6m,壁厚为600mm,地下二层池体高度为5.85m,壁厚为800mm,顶板覆土2m。为体现出不同池壁长宽比状态下中板开洞对池壁受力的影响,池壁宽度分别选取6m、12m进行计算。

本文采用Autodesk robot有限元分析软件对池壁进行计算,选取壳单元模拟水池壁板。壳单元为4节点单元,既能承受平面内力(如:轴力、剪力),又能承受平面外力(如弯矩、扭矩),可以很好地模拟水池壁板面外弯曲行为。材料弹性模量为 $3.15 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$,泊松比为0.2。

全地下污水厂外池壁一般承受内水压力或外土压力,本文主要分析外土压力作用下池壁受力的变化,内水压力作用下池壁的弯矩受力方向与外土压力相反,其变化可参考外土压力。地下二层池壁考虑三边固接,地下一层池壁考虑顶板处简支,两侧自由,中板处无开洞位置为简支,开洞处自由。本文按准永久组合控制裂缝(控制裂缝最大宽度为0.2mm),按基本组合控制强度,计算以下两种组合:准永久组合:恒载+0.5×活载;基本组合:1.1×(1.3×恒载+1.4×活载);地下水位以下池壁侧向土压力按水土合算进行计算,计算见式(1)、式(2),地下水位以上池壁侧向土压力按水土分算进行计算,计算见式(3)、式

(4)^[7]。外池壁受力见图1。

$$P_{ak} = (\gamma h + q)K_a - 2c\sqrt{K_a} \quad (1)$$

$$K_a = \tan^2(45^\circ - \frac{\varphi}{2}) \quad (2)$$

$$P_{ak} = (\gamma h + q - u_a)K_a - 2c\sqrt{K_a} + u_a \quad (3)$$

$$u_a = \gamma_w h \quad (4)$$

式中: P_{ak} 为外池壁主动土压力标准值,kN; γ 为土体重度,取 18 kN/m^3 ; q 为地面超载,kN/m²,取 10 kN/m^2 ; K_a 为主动土压力系数; c 为土层黏聚力,kPa,本文不考虑; φ 为土层内摩擦角,°,取 20° ; γ_w 为地下水重度, kN/m^3 ,取 10 kN/m^3 。

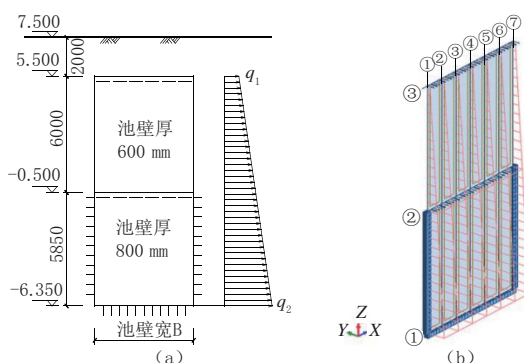


图1 外池壁受力及约束简图

全地下污水厂外池壁在操作层处最易产生的洞口一般为风井洞口、楼梯洞口或者水池的设备吊装口及观测口。对于设备吊装口这类比较大的洞口我们一般会通过设置水平梁来解决中板局部约束缺失的问题,本文研究的是风井、楼梯间这类尺寸较小的洞口。为减小洞口尺寸,一般在平面布置时我们会尽量将楼梯间或风井洞口的短边设置与池壁方向平行,洞口短边尺寸一般为2.5~2.6m,但由于风井洞口可能会紧靠楼梯间洞口,这样洞口长度最大可能会达到6m。因此本文在中板上分别设置不同尺寸的洞口,洞口尺寸分别取为1~6m,每1m一个模型,洞口均靠左边布置,考虑到楼梯间短边尺寸取2.5m较多,增加2.5m宽洞口计算,在洞口所在位置取消其简支约束。洞口位置见图2。

3 计算结果分析

外池壁配筋主要弯矩见图3。其中 M_{x1} 为左侧(靠近洞口侧)下层外侧x向弯矩, M_{x2} 为右侧(远离洞口侧)下层外侧x向弯矩, M_{x3} 为下层内侧x向弯矩, M_{x4} 为上层内侧x向弯矩, M_{y1} 为下层外侧y向弯矩, M_{y2} 为下层内侧y向弯矩, M_{y3} 为中板外侧y向弯矩, M_{y4} 为上层内侧y向弯矩。

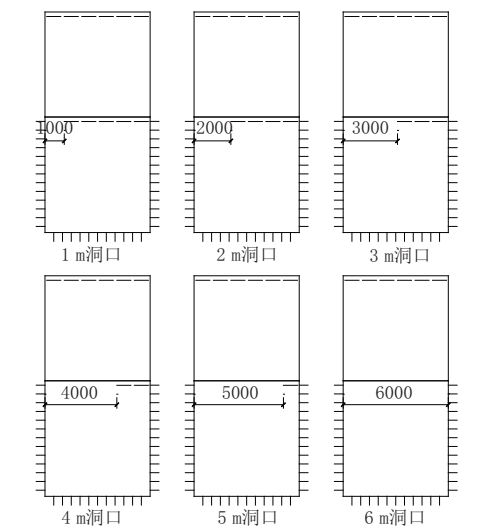


图2 外池壁洞口位置示意图(6 m宽)(单位:mm)

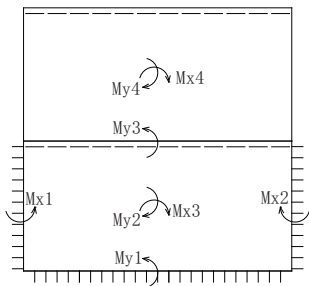


图3 外池壁主要弯矩位置

6 m宽外池壁计算弯矩结果见图4,从图4可知,下层池壁外侧 x 向弯矩 M_{x1} 、 M_{x2} 最大值位于左右两侧中部,内侧 x 向弯矩 M_{x3} 最大值位于下层池壁中部,下层池壁外侧 y 向弯矩 M_{y1} 最大值位于下侧中部,下层池壁内侧 y 向弯矩 M_{y2} 最大值位于下层池壁中部。

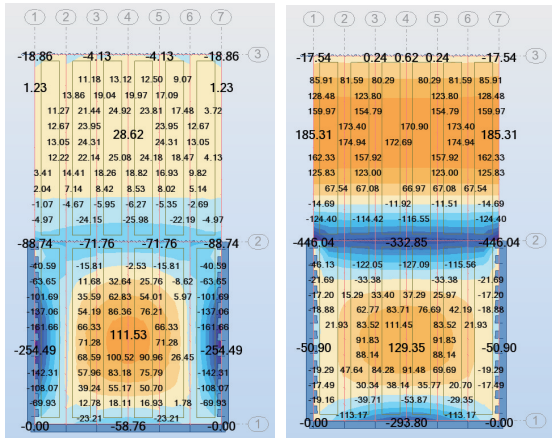


图4 x 向/ y 向弯矩计算结果(6 m宽池壁)

不同洞口尺寸下6 m宽及12 m宽外池壁弯矩的计算结果分别见表1、表2,剪力计算结果分别见表3、表4。

表1 6 m宽外池壁弯矩计算结果(准永久组合)

弯矩/(kN·m)	开洞宽度/m							
	0	1	2	2.5	3	4	5	6
M_{x1}	252.4	251.1	250.6	253.9	312.7	432.4	611.2	729.6
M_{x2}	252.4	251.8	249.9	249.5	251.2	269.0	333.9	729.6
M_{x3}	108.8	108.3	107.2	107.6	143.3	213.7	285.2	316.2
M_{y1}	292.3	290.8	289.5	289.6	291.3	301.7	318.8	324.9
M_{y2}	125.6	125.4	124.0	122.0	118.4	103.2	75.5	52.1
M_{x4}	27.7	27.2	26.7	30.1	46.8	81.9	117.3	134.9
M_{y3}	331.9	332.2	329.3	347.3	356.5	383.6	386.9	356.8
M_{y4}	182.9	183.5	186.2	188.9	192.6	203.4	219.6	233.2

表2 12 m宽外池壁弯矩计算结果(准永久组合)

弯矩/(kN·m)	开洞宽度/m							
	0	1	2	2.5	3	4	5	6
M_{x1}	297.4	297.9	297.0	300.7	309.4	351.1	511.0	688.6
M_{x2}	299.7	299.9	299.8	299.7	299.4	298.3	295.4	289.8
M_{x3}	91.0	93.4	93.5	93.6	175.7	229.7	323.8	376.9
M_{y1}	497.4	495.2	494.1	493.1	491.9	491.3	509.7	568.2
M_{y2}	239.5	238.6	237.9	237.3	236.6	236.8	240.5	242.6
M_{x4}	30.5	30.8	29.9	30.7	41.7	87.5	122.2	153.7
M_{y3}	378.1	365.0	363.6	367.9	398.6	449.0	497.7	525.1
M_{y4}	178.6	181.3	183.5	185.9	189.3	199.4	212.8	229.6

根据表1生成6 m宽外池壁弯矩随洞口尺寸的变化图如图5所示。根据表2生成12 m宽外池壁弯矩随洞口尺寸的变化图如图6所示。从图中可以看出,当洞口尺寸不大于2.5 m时,外池壁各个部位弯矩变化均不大,局部略有增加,弯矩增长最大不超过13.3 kN·m;当2.5 m<洞口尺寸≤3 m时,部分位置弯

表 3 6 m 宽外池壁剪力计算结果(基本组合)

剪力/kN	开洞宽度/m						
	0	1	2	2.5	3	4	5
下层 X 向	463.7	463.4	461.2	459.9	620.3	872.6	1083.8
上层 X 向	17	158	246.2	312.4	426	588.1	716.7
下层 Y 向	544.8	544.4	585.1	648.3	706.6	808	773.1
上层 Y 向	460.9	444.3	536.1	580.8	623.3	697.2	662

表 4 12 m 宽外池壁剪力计算结果(基本组合)

剪力/kN	开洞宽度/m						
	0	1	2	2.5	3	4	5
下层 X 向	487.4	487.4	487.4	487.3	648.4	935.2	1 241.4
上层 X 向	111.5	111.5	255.6	353.7	449.2	637.5	822.6
下层 Y 向	717.27	717.1	716.1	714.9	765.3	930.3	1 087.9
上层 Y 向	553.3	553.1	551.7	577.2	629.1	735.5	842.5

矩开始出现明显增长,其中 6 m 宽外池壁的下层外侧水平向弯矩 M_{x1} (即靠近洞口一侧的水平外侧弯矩)的增长绝对值最大,达到 $60.3\text{ kN}\cdot\text{m}$,且影响范围主要为中板上下 1 m 左右的位置,除此以外内侧水平向弯矩 M_{x3} 、 M_{x4} 的增长比例也比较大,最大达到 69%,且 12 m 宽外池壁的下层内侧水平向弯矩 M_{x3} 弯矩增长幅度明显大于 6 m 宽的外池壁,达到 93.1%。当洞口尺寸大于 3.0m 时,对于 6 m 宽外池壁,除下层内侧竖向弯矩 M_{y2} 随着洞口尺寸的增大而减小外,其余各个部位的弯矩值均随着洞口尺寸的增大而增加,其中下层外侧 x 向弯矩 M_{x1} 的绝对增长数值最大,当洞口尺寸达到 6 m 时,6 m 宽外池壁弯矩比无洞口时增加了 $477.2\text{ kN}\cdot\text{m}$;对于 12 m 宽外池壁,除下层外侧水平向弯矩 M_{x2} 随着洞口尺寸的增大略有减小外,其余各个部位的弯矩值均随着洞口尺寸的增大而增加,且随着洞口尺寸的增大下层外池壁 x 向弯矩 M_{x1} 的最大值会逐渐由池壁左侧中点处移至靠近中板处, M_{x3} 的最大值会逐渐由下层外池壁的中心逐步移动至中板开洞的中心处。

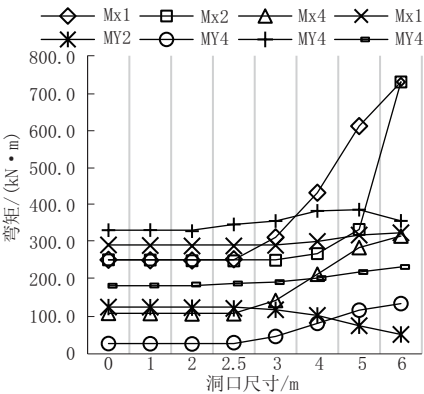


图 5 6 m 宽外池壁弯矩随洞口尺寸变化图

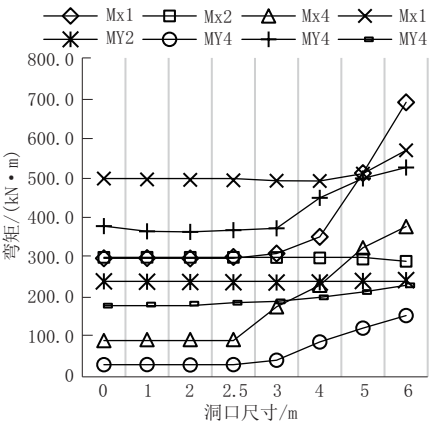


图 6 12 m 宽外池壁弯矩随洞口尺寸变化图

根据表 3、表 4 的结果我们可以看出,随着洞口尺寸的增大,除了 6 m 宽外池壁的 y 向剪力出现了先增大后减小的情况,其余外池壁的剪力值均随着洞口尺寸的增大而增大,这可能是由于当洞口边缘离右侧池壁还有一定距离时,洞口的集中剪力存在充分的影响长度,而当洞口边缘已经靠近右侧池壁时,由于池壁右侧支座处剪力骤减,导致 4 m 宽洞口附近每延米的剪力反而比 5 m 宽洞口的附近每延米的剪力大。本工程下层池壁壁厚 800 mm,可承受的最大剪力为 829 kN,上层池壁壁厚 600 mm,承受的最大剪力为 609 kN。通过差值法,可以看出不论是 6 m 宽外池壁还是 12 m 宽外池壁,当洞口尺寸超过 2.8 m 时,上层池壁的剪力值均超过了 609 kN。也就是说当洞口尺寸超过 2.8 m 时,需要采取措施降低外池壁的剪力值。

以 12 m 宽外池壁为例进行配筋计算,未开洞的外池壁配筋计算结果见表 5,设置 3 m 洞口的外池壁配筋计算结果见表 6。从结果中可以看出,下层池壁 x 向内侧配筋、上层中板处 y 向外侧配筋均需要加大一档,原配筋不完全满足计算要求,需要局部增大配

筋或者在中板约束缺失处设置水平梁。通过计算,向外侧可承受 385 kN·m 的弯矩,通过差值法可知,下层 x 向内侧可承受 170 kN·m 的弯矩,上层中板处 y 当洞口尺寸不大于 2.7 m 时,池壁配筋无需调整。

表5 12m宽外池壁弯矩配筋结果(无开洞)

构件	部位	板厚/mm	保护层/mm	$M_q/(kN\cdot m)$	直径/mm	间距/mm	配筋率/%	裂缝/mm
下层 X 向	外侧	800	35	299.7	18	100	0.32%	0.175 2
下层 X 向	内侧	800	35	91	18	150	0.21%	0.106 7
下层 Y 向	外侧	800	35	497.4	22/20	100	0.43%	0.175 7
下层 Y 向	内侧	800	35	239.5	22	150	0.32%	0.157 7
上层 X 向	内侧	600	35	30.5	16	150	0.22%	0.052 8
上层 Y 向	外侧	600	35	378.1	22/20	100	0.58%	0.190 4
上层 Y 向	内侧	600	35	178.6	20	150	0.35%	0.163 6

表6 12m外池壁弯矩配筋结果(开洞3m)

构件	部位	板厚/mm	保护层/mm	$M_q/(kN\cdot m)$	直径/mm	间距/mm	配筋率/%	裂缝/mm
下层 X 向	外侧	800	35	309.4	18	100	0.32	0.169 4
下层 X 向	内侧	800	35	175.7	20	150	0.21	0.152 1
下层 Y 向	外侧	800	35	491.9	22/20	100	0.43	0.180 4
下层 Y 向	内侧	800	35	236.6	22	150	0.32	0.155 8
上层 X 向	内侧	600	35	41.7	16	150	0.22	0.072 2
上层 Y 向	外侧	600	35	398.6	22	100	0.63	0.194 0
上层 Y 向	内侧	600	35	189.3	20	150	0.35	0.173 4

综上所述,当洞口尺寸不大于 2.7 m 时,外池壁厚及配筋均无需调整。但当洞口尺寸大于 2.7 m 时,需要对外池壁采取措施,一般我们会在洞口处设置水平梁的方式减小开洞对外池壁的影响。水平梁的高度一般需要通过计算确定,不同高度的水平梁承担的荷载不同,对洞口的约束作用也不一样。

以 6 m 宽外池壁为例,在洞口尺寸为 3~6 m 的外池壁中板处均设置 0.6 m×0.8 m (梁高同下层池壁厚度 0.8 m) 的暗梁,外池壁弯矩计算结果见表 7。从表 7 中可以看出,当洞口尺寸=3.0 m 时,设置暗梁后的外池壁弯矩相比于未开洞时的外池壁弯矩变化很小,增长不超过 10 kN·m,当外池壁原配筋裂缝未达到极限状态时,原配筋一般无需调整;当 3.0 m<洞口尺寸≤4.0 m 时,上层池壁外侧 y 向弯矩 M_{y3} 、下层池壁外侧 x 向弯矩 M_{x1} 、下层池壁内侧 x 向弯矩 M_{x3} 以及上层内侧 x 向弯矩 M_{x4} 均有比较明显的增长,外池壁配筋可能会发生调整,对本工程来说,经复核,中板外侧 y 向配筋需加大一档,其余配筋无需调整;当洞口尺寸大于 4.0 m 时,除下层内侧 y 向弯矩 M_{y2} 弯矩减小外,其余弯矩均产生了较大的增长,说明暗梁刚度太小,已无法为池壁提供较好的约束,暗梁高度不足,需加大梁高。以 5 m 宽洞口为例,当梁高分别增加至 1.0、1.2、1.4、1.6 m 时,池壁计算结果见表 8,相应的梁的弯矩及配筋计算结果见表 9。从表中可以看出,梁越高,外池壁的弯矩计算结果越接近未开洞

的外池壁计算结果,水平梁承担的弯矩和剪力也会随着梁高的增加而增加。

表7 不同尺寸洞口设置暗梁后外池壁计算结果(6 m宽池壁)

弯矩/(kN·m)	开洞宽度/m			
	3	4	5	6
M_{x1}	261	288	433	507
M_{x2}	252	265	311	507
M_{x3}	110	142	220	246
M_{y1}	292	300	316	322
M_{y2}	122	112	94	75
M_{x4}	31	55	93	106
M_{y3}	330	356	362	380
M_{y4}	186	193	213	212

表8 不同梁高水平梁外池壁计算结果(6 m宽池壁,5 m宽洞口)

弯矩/(kN·m)	水平梁高/m			
	1.0	1.2	1.4	1.6
M_{x1}	322	306	296	286
M_{x2}	304	297	289	280
M_{x3}	179	150	141	131
M_{y1}	315	312	309	304
M_{y2}	99	104	109	109
M_{x4}	79	61	50	45
M_{y3}	350	342	334	327
M_{y4}	203	199	196	191

从表 8 和表 9 的计算结果中可以看出,梁的外侧纵向配筋随着高度的变化并未产生较大的变化,但通过增加梁高,提高了梁的刚度,减小了外池壁的位移,为外池

表 9 水平梁弯矩、剪力及配筋计算结果(6 m 宽池壁,5 m 宽洞口)

梁高/m	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6
梁端弯矩(准永久组合)/(kN·m)	568	791	1 004	1 192	1 349
梁端弯矩(基本组合)/(kN·m)	837	1 166	1 479	1 756	1 986
剪力(基本组合)/kN	1 459	1 688	1 874	2 024	2 142
外侧纵向配筋/mm ²	14C22	16C22	16C22	16C22	14C22
裂缝/mm	0.178	0.166	0.173	0.166	0.179
计算抗剪箍筋/(mm ² ·m ⁻¹)	3 425	2 982	2 602	2 260	1 956
实配抗剪箍筋/(mm ² ·m ⁻¹)	C12@100(4)	C10@100(4)	C10@100(4)	C10@100(4)	C10@150(4)

壁中板提供了更好的约束,降低了外池壁的弯矩值。

4 结 语

本文结合三亚清流园水质净化厂二沉池外池壁计算,通过对操作层(中板)设置不同尺寸开洞后的外池壁计算结果的分析,得出以下结论及建议。

(1)当池壁跨度从 6 m 增加至 12 m 时,下层池壁内侧 x 向弯矩 M_{x3} 的数值值随着洞口尺寸的增加而增加,其增长率由 191% 增加到了 314%。在设计时需要尤其复核下层池壁 x 向内侧配筋。

(2)当中板洞口尺寸不大于 2.7 m 时,外池壁弯矩无明显增长,外池壁配筋无需调整,但考虑到洞口周边存在局部的应力集中,除池壁常规配筋外,考虑将楼板与外池壁相交处的龙骨钢筋做通长布置。

(3)当洞口尺寸为 2.7~3.0 m 时,下层外侧 x 向弯矩 M_{x1} 及上层外侧 y 向弯矩 M_{y3} 均有明显增加,配筋需局部加大,影响范围一般为板上下 1 m 范围内,或者通过设置暗梁减少开洞对外池壁配筋的影响。考虑到设计的实用性及可操作性,更推荐设置暗梁来减小开洞的影响。

(4)当洞口尺寸为 3~4 m 时,下层外侧 x 向弯矩 M_{x1} 有较大增长,仅通过调整池壁配筋去满足弯矩计算要求不经济,建议通过设置与下层池壁同厚的暗梁减少开洞对外池壁的影响,且外池壁配筋时裂缝要稍有余量,不要配到极限。

(5)当洞口尺寸大于 4.0 m 时,除下层内侧 y 向弯矩 M_{y2} 略有减小外,其余部位弯矩均有很大的增长,特别是下层外侧 x 向弯矩 M_{x1} 、下层内侧 x 向弯矩 M_{x3} 及上层内侧 x 向弯矩 M_{x4} 的增长幅度很大,达到 174%~424%,中板开洞对池壁 x 向配筋的影响很大,建议在开洞处增设水平梁减少外池壁约束缺失导致的弯矩及剪力的增长。仅设置暗梁,刚度不足,需要设置具有一定刚度的水平梁,水平梁高度需通过计算确定,为使得水平梁达到梁的作用,建议高度不小于壁厚的 2 倍。

(6)全地下污水厂洞口布置的建议:对于全地下污水厂,在中板进行平面布置时尽量不要在靠近外池壁的位置开洞,如果一定要布置,对于楼梯间,短边长度一般为 2.5~2.6 m,尽量将短边与外池壁平行布置,一般外池壁配筋没有达到极限状态时可无需采取措施;对于风井,尽量要求设计为长方形,将短边设置为与外池壁平行,短边长度建议不超过 3.0 m。靠近外池壁处,楼梯间与风井尽量不要紧靠在一起,这样洞口尺寸会叠加,导致开洞尺寸增加。

通过统筹优化全地下污水厂的洞口布置,合理归并井道、统一尺寸、调整位置,可以有效减少对侧墙的削弱,从而提升结构受力整体性,降低造价。因此在设计初期结构专业就应该与其他各专业紧密配合,得出洞口布置的最优解。

参考文献:

[1] 杨凡.半地下式和全地下式污水处理厂布置形式分类浅析[J].中国市政工程,2017(6):42-45.
[2] 魏耀红.某地下式污水处理厂结构方案设计浅议[J].特种结构,2014,31(2):47-51.
[3] 李易峰,李航.国内外地下式污水处理厂发展现状及探讨[C]//中国土木工程学会 2019 年学术年会论文集.北京:中国土木工程学会,2019.
[4] 万玉生,叶雅丽,王长详,等.某全地下式污水处理厂结构设计的关键技术及相关问题[J].特种结构,2014,31(2):34-37.
[5] 曹卫峰,王海波,赵鹏,等.全地下污水厂特色结构布置及经济性分析[J].中国给水排水,2012,28(10):63-65;69.
[6] 李彤,尚琳,都晓宁,等.正定新区全地下污水处理厂结构设计要点[J].中国给水排水,2016,32(20):52-54;60.
[7] CECS138:2002 给水排水工程钢筋混凝土水池结构设计规范[S].
[8] 刘世德,王泽明,刘茜,等.地下式污水处理厂关键节点及设计对策[J].地下空间与工程学报,2021,17(增刊1):215-220.
[9] 闫富杰,张旭鹏.水池壁板开洞后整体性能研究[J].天津建设科技,2020,30(5):47-51.
[10] 刘静娴,朱晓章,宫鑫.市政工程调蓄池壁板精细化设计[J].建设科技,2024(8):73-75.
[11] 宋宏宇.四川某全地下污水处理厂结构设计[J].中国给水排水,2020,36(24):83-86;91.
[12] 高彦君.某大型埋地式污水厂结构设计浅析[J].城市道桥与防洪,2017(8):109-111;144.
[13] T/CAEPI 23—2019 地下室城镇污水处理厂工程技术指南[S].