



软土地区大型调蓄池结构 沉井设计施工要点分析

杜振辉, 唐新玉, 岳霖

(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 针对软土地区采用沉井结构受力复杂问题, 以上海港罗泾港区集装箱码头改造一期工程中采用沉井基础的雨水调蓄池为例, 对大型调蓄池结构沉井设计施工要点进行研究。采用三维整体有限元计算分析模型, 分别对下沉到底未封底前、下沉到底封底后和正常使用 3 个阶段的沉井结构进行整体受力分析。根据受力分析结果, 考虑承载能力极限状态和正常使用极限状态验算要求, 分别对各结构构件进行配筋设计, 优化钢筋用量。根据工程沉井基础施工经验, 对沉井基础施工要点进行总结。结果表明, 针对受力复杂结构, 采用三维整体有限元分析是合理的, 某些应力集中部位应进行合理判断后再进一步进行结构设计; 沉井施工时, 需加强监测, 并制定施工应急备案, 确保施工期安全。研究成果可为类似工程设计施工提供参考。

关键词: 软土地区; 沉井基础; 有限元; 调蓄池

中图分类号: U652.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)S1-0167-08

Analysis on key points of design and construction of large storage tank structure caisson in soft soil area

DU Zhenhui, TANG Xinyu, YUE Lin

(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: Aiming at the complex stress problem of caisson structure in soft soil area, taking the caisson foundation of rainwater storage tank in the first phase of container terminal renovation project in Luojing port area of Shanghai Port as an example, the key points of caisson design and construction of large storage tank structure are analyzed. The three-dimensional integral finite element calculation and analysis model is used to analyze the overall stress of the caisson structure in three stages: before sinking to the bottom, after sinking to the bottom and normal use. According to the results of stress analysis, considering the checking requirements of ultimate limit state and service limit state, the reinforcement design of each structural member is carried out respectively, and the amount of reinforcement is optimized. Based on the construction experience of engineering caisson foundations, the key points of caisson foundation construction are summarized. The results show that it is reasonable to use three-dimensional integral finite element analysis for the stress structure with complex stress, and some stress concentration parts should be reasonably judged before further structural design. During the construction of the caisson, it is necessary to strengthen the monitoring and formulate the construction emergency record to ensure the safety during the construction period. The research results can provide reference for design and construction of similar engineering.

Keywords: soft soil area; caisson foundation; finite element; storage tank

收稿日期: 2025-05-15

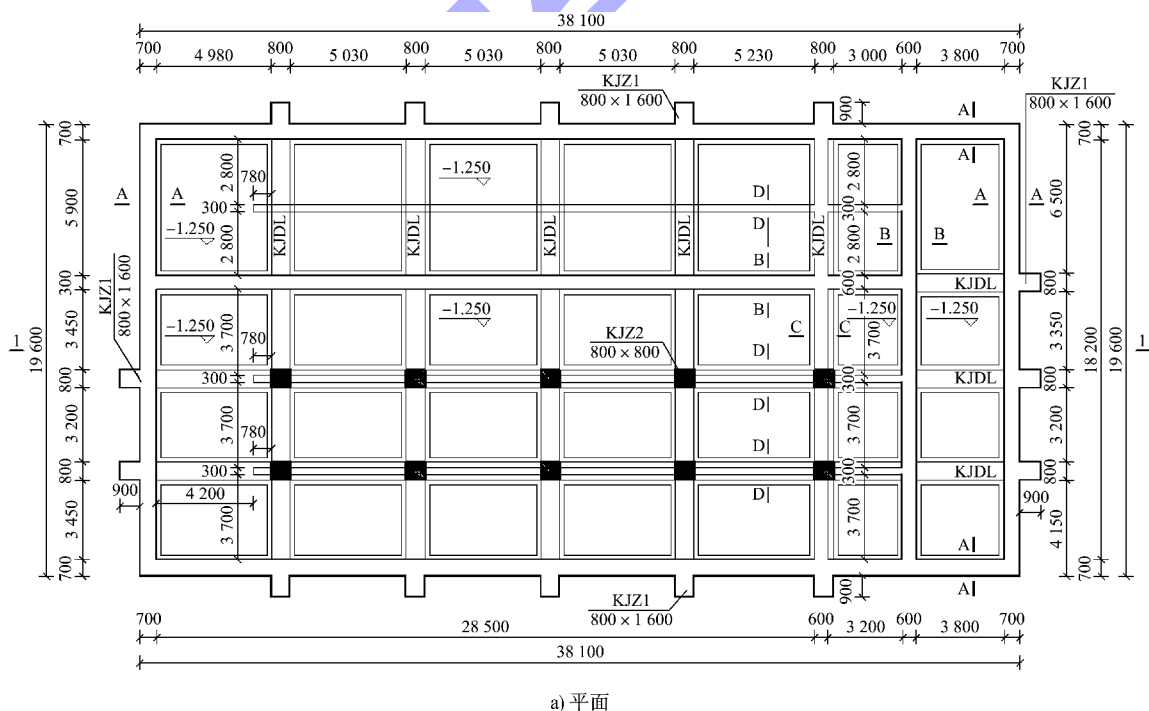
作者简介: 杜振辉(1982—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事建筑结构设计与研究。

沉井施工法是一种通过分段制作井筒结构并逐步下沉至设计高程的深基础施工技术,尤其适用于软土、高水位地区或场地开挖条件受限的深基坑及地下构筑物施工。施工时,一般在土层开挖前,将预制好的一段井筒结构在原位靠自重力局部沉入土中,之后在井筒内挖土或水力吸泥,边挖掘边下沉,通过逐节接高达到预定深度后,封底盖顶形成沉井结构基础。井筒结构由刃脚、井壁和隔墙构成,多采用钢筋混凝土现浇结构。沉井基础由于占地面积小、开挖量少、施工方便等优点一直在地下泵房、水池、桥梁墩台等地下结构基础工程中广泛应用^[1-5]。沉井基础设计施工要点一是保证沉井结构自身承载力及稳定性满足强度要求,二是确保其在施工中平稳下沉。以上海港罗泾港区集装箱码头改造一期工程中采用沉井施工的钢筋混凝土雨水调蓄池为例^[6-7],对其结构设计和施工要点进行分析,以期后续类似工程的设计施工提供参考。

1 工程概况

上海港罗泾港区集装箱码头改造一期工程新建3座雨水调蓄池,为地下钢筋混凝土构筑物,根据使用要求,布置在已建长江大堤堤脚保护线附近,不具备大开挖的施工条件,综合比较施工安全、施工周期、工法复杂性等因素,对钢板桩支护方案和沉井方案进行了系统的分析对比,工程施工工艺最终采用沉井施工法。工程雨水调蓄沉井工作井为矩形沉井,采用不排水下沉法。沉井主体结构为四面钢筋混凝土侧壁+内部钢筋混凝土隔墙和框架结构,沉井外长和外宽分别为38.1、19.6 m,壁厚0.7 m,底板厚0.9 m,沉井埋深10.0 m。

调蓄池沉井受力体系包括:纵横向框架底梁加底板,为调蓄池筏板基础;框架柱2(KJZ2)生根在筏板基础上,与中间层纵横框架梁1(KJL1)及顶板框架梁板形成整体受力框架。框架柱1(KJZ1)为侧壁的扶壁柱,是侧壁的侧向支撑;框架柱2(KJZ2)生根在底板上,是上部梁板的竖向支撑;隔墙2(Q2)厚0.60 m,是上部梁板的竖向支撑。结构平面、纵剖面、横剖面见图1。



a) 平面

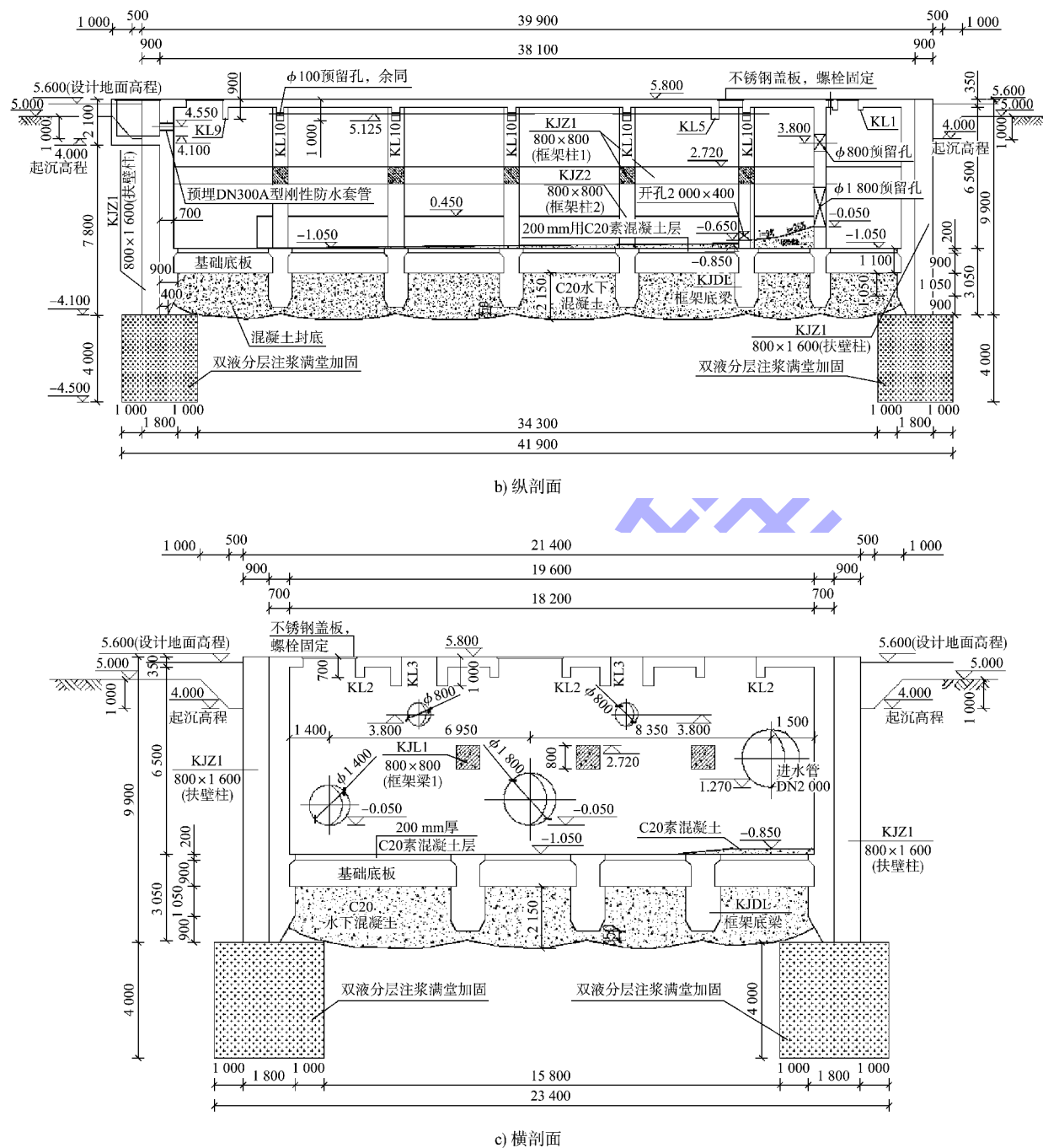


图1 结构平面及剖面 (高程: m; 尺寸: mm)

Fig. 1 Plane and profile of the structure (elevation: m; dimension: mm)

2 结构分析参数

工程设计工作年限为 50 a^[8], 结构安全等级为二级, 抗震设防烈度为 7 度, 基本地震加速度为 0.10g, 设计地震分组为第二组, 抗震设防类别为乙类, 抗震构造措施按 8 度要求, 抗震设计等级为二级。抗浮水位按地面下 0.5 m 考虑, 抗浮安全系数大于或等于 1.05。

根据工程地质勘察报告,雨水调蓄池持力层为②₃灰色砂质粉土,其天然承载力特征值 $f_{ak} \geq 85$ kPa,修正后的地基承载力特征值 $f_a \geq 126$ kPa,大于基底平均反力 122.5 kPa,地基承载力满足规范要求。同时,考虑结构的整体稳定性,要求基底以下土层不得扰动。

3 雨水调蓄池沉井结构设计

3.1 结构分析工况

雨水调蓄池沉井结构的受力分析包括施工阶段验算和使用阶段验算。其中施工阶段验算又分为下沉到底未封底前和下沉到底封底后两种验算工况。

3.2 结构有限元分析

3.2.1 下沉到底未封底前

对于受力比较复杂的工程结构,采用三维有限元分析可较准确反映结构受力特性^[9-10]。工程采用 Midas 软件对调蓄池沉井结构进行整体三维受力分析,结构主要承受水池外侧土压力,模型见图 2。

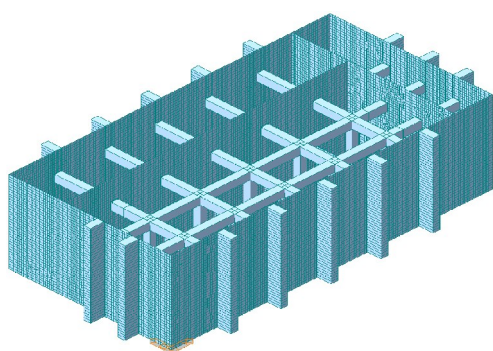
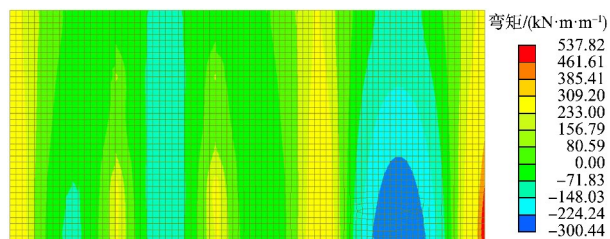


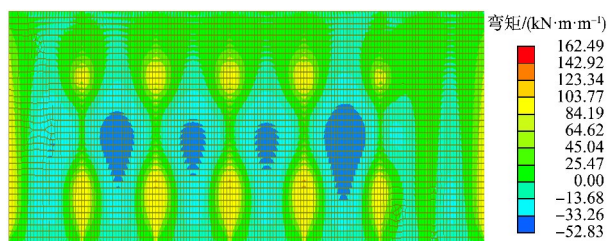
图 2 施工阶段三维分析模型

Fig. 2 Three-dimensional analysis model of construction stage

工程沉井结构拟采用 3 次浇筑、2 次下沉的方式施工。根据计算结果,将沉井井壁在竖向分为 3 个结构段,分别为 $-4.100 \sim -1.050$ m、 $-1.050 \sim 2.550$ m、 $2.550 \sim 4.900$ m。根据埋入土层中的深度, $-4.100 \sim -1.050$ m 结构段承受的荷载最大,该结构段的内力分析结果分别见图 3、4。



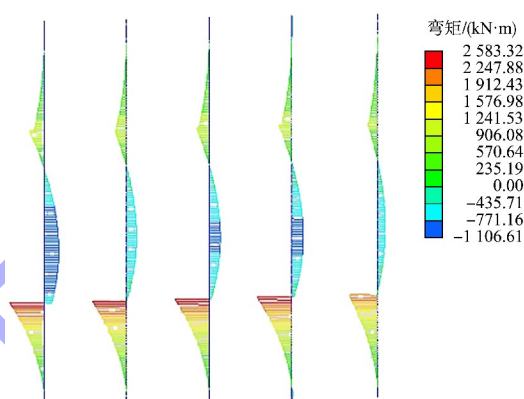
a) 水平向弯矩



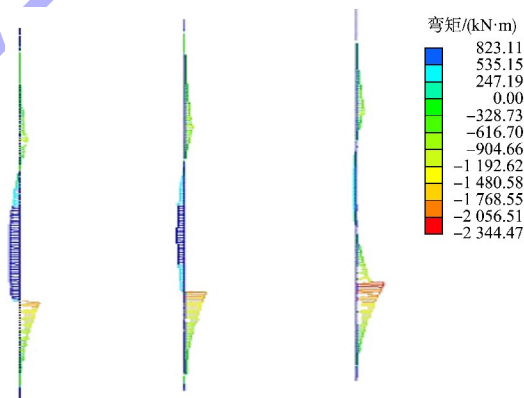
b) 竖向弯矩

图 3 施工阶段四周侧壁弯矩云图

Fig. 3 Bending moment nephogram of the surrounding side walls during the construction stage



a) 水平向弯矩



b) 竖向弯矩

图 4 施工阶段侧壁扶壁柱弯矩云图

Fig. 4 Bending moment nephogram of sidewall buttress column during the construction stage

3.2.2 下沉到底封底后

当调蓄池沉井结构下沉至设计高程、用素混凝土封底后,沉井结构自重为 42 398.6 kN,面积均载为 56.78 kPa,作用在框架底梁上。框架底梁弯矩云图见图 5,底梁上侧最大弯矩为 5 356 kN·m,下侧最大弯矩为 4 753 kN·m。

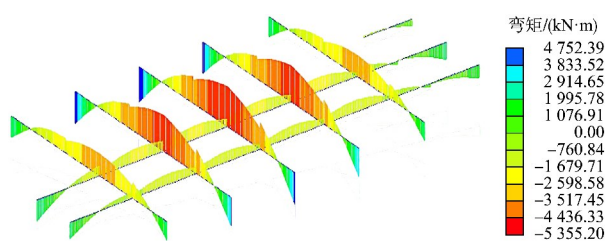


图 5 施工阶段框架底梁弯矩云图

Fig. 5 Bending moment nephogram of frame bottom beam during the construction stage

3.2.3 正常使用阶段

正常使用阶段荷载为: 顶板均载 10 kPa; 池内满水状况时, 水重力密度按 10.8 kN/m^3 , 在构筑物内侧施加静水压力; 池外土压力的主动土压力系数取 0.5, 地面均载为 20 kPa。结构三维计算模型见图 6, 施加各荷载单独计算后按规范进行组合, 根据最不利组合内力值, 设计构件配筋^[11]。

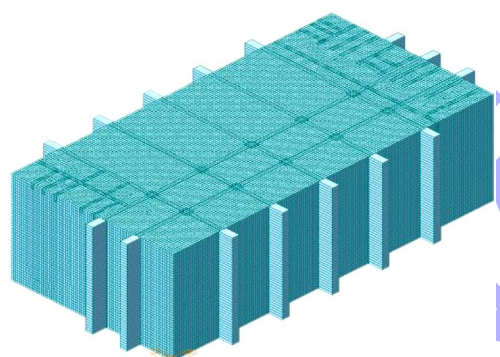
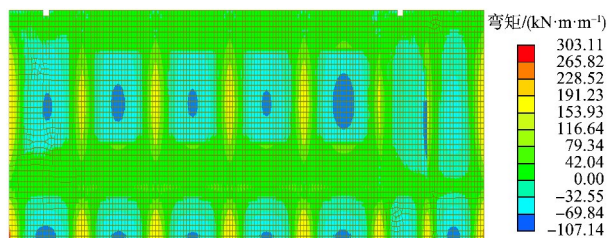


图 6 正常使用阶段结构三维模型

Fig. 6 Three-dimensional model of structure during normal use stage

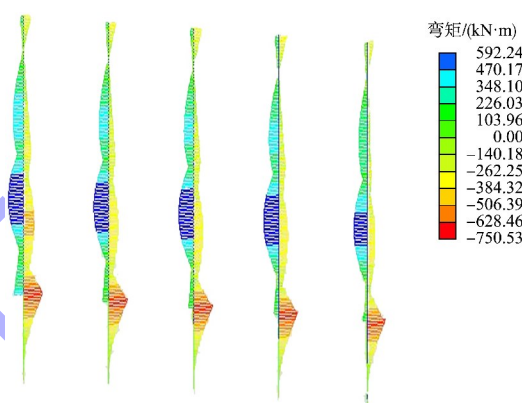
根据计算结果, 将沉井井壁在竖向分为 3 个结构段, 分别为: $-4.100 \sim -1.050 \text{ m}$ 、 $-1.050 \sim 2.550 \text{ m}$ 、 $2.550 \sim 6.100 \text{ m}$ 结构段, 其中 $-4.100 \sim -1.050 \text{ m}$ 结构段受力结果分别见图 7、8。



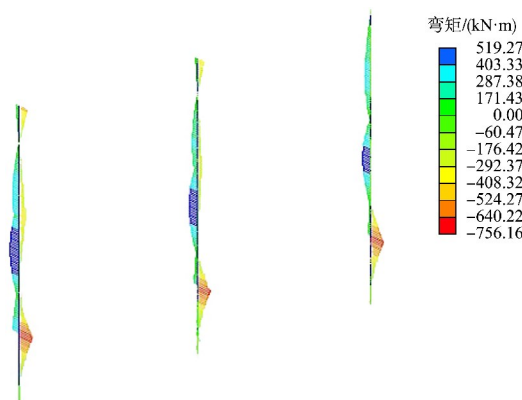
b) 竖向弯矩

图 7 正常使用阶段四周侧壁弯矩云图

Fig. 7 Bending moment nephogram of the surrounding side walls during normal use stage



a) 水平向弯矩



b) 竖向弯矩

图 8 正常使用阶段侧壁扶壁柱弯矩云图

Fig. 8 Bending moment nephogram of sidewall buttress column during normal use stage

正常使用阶段沉井结构自重 G 为 88 035.6 kN, 面积均载为 51.34 kPa, 作用在框架底梁上, 框架底梁弯矩云图见图 9, 底梁上侧最大弯矩为 5 175 kN·m, 下侧最大弯矩为 4 325 kN·m。

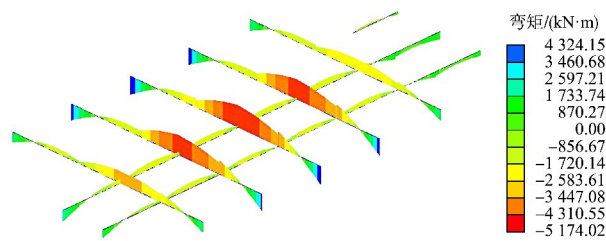


图 9 正常使用阶段框架底梁弯矩云图
Fig. 9 Frame bottom beam bending moment during normal use stage

3.3 结构构件设计

根据结构三维分析结果，考虑承载力极限状态和正常使用极限状态验算要求，对各结构构件进行配筋设计，侧壁、隔墙和底板的计算配筋和实配钢筋结果见表 1，框架柱、框架梁和框架底梁的计算配筋见表 2，钢筋设计结果见表 3。

表 1 侧壁、隔墙和底板配筋设计结果
Tab. 1 Reinforcement design results of side walls, partitions and floors

构件	高程/m	位置	弯矩/(kN·m·m ⁻¹)			计算配筋/ mm ²	实配钢筋/ mm ²	备注
			施工阶段	使用阶段	包络弯矩			
四周侧壁 (Q1)	-4.10~-1.05	水平外侧	538	306	538	5 969	8 042	d32@100
		水平内侧	301	100	301	2 764	6 158	d28@100
		竖向外侧	148	262	262	2 333	4 909	d25@100
		竖向外侧	54	20	54	构造配筋	3 801	d22@100
	-1.05~2.55	水平外侧	461	190	461	4 438	4 909	d25@100
		水平内侧	250	109	250	2 226	3 801	d22@100
		竖向外侧	163	261	261	2 324	3 801	d22@100
		竖向外侧	53	84	84	构造配筋	3 801	d22@100
	2.55~6.10	水平外侧	326	186	326	2 803	3 801	d22@100
		水平内侧	148	87	148	1 273	3 142	d20@100
		竖向外侧	135	159	159	1 367	3 142	d20@100
		竖向外侧	20	79	79	构造配筋	3 142	d20@100
隔墙 2	全段	水平	105	183	183	1 860	3 142	d20@100
		竖向	121	201	201	2 043	3 142	d20@100
底板	-	X 向上侧	-	110	-	构造配筋	2 534	d22@150
		X 向下侧	-	0	-	构造配筋	2 534	d22@150
		Y 向上侧	-	92	-	构造配筋	2 534	d22@150
		Y 向下侧	-	0	-	构造配筋	2 534	d22@150

注：“d32@100”表示直径 32 mm、间距 100 mm。

表 2 框架柱、框架梁和框架底梁内力计算结果
Tab. 2 Calculation result of the internal force of frame columns and beams

阶段	框架柱 1		框架柱 2		框架梁		框架底梁	
	外侧弯矩/ (kN·m)	内侧弯矩/ (kN·m)	弯矩/ (kN·m)	轴力/ kN	弯矩/ (kN·m)	轴力/ kN	上侧弯矩/ (kN·m)	下侧弯矩/ (kN·m)
施工阶段	2 584	1 107	448	305	504	3 211	5 356	4 753
使用阶段	771	593	85	1 406	109	1 019	5 175	4 325
包络值	2 584	1 107	448	1 406	504	3 211	5 356	4 753

表 3 框架柱、框架梁和框架底梁配筋设计结果

Tab. 3 Reinforcement design result of frame columns and beams

构件	配筋位置	计算配筋/ mm ²	实配钢筋/ mm ²	备注
框架柱 1	外侧	14 079	17 692	22d32
	内侧	4 643	11 258	14d32
框架柱 2	单侧	3 796	4 926	8d28
框架梁	单侧	4 460	4 926	8d28
框架底梁	上侧	11 492	17 692	22d32
	下侧	10 198	17 692	22d32

注: “22d32” 表示 22 根 $\phi 32$ mm 的配筋。

4 调蓄池沉井结构施工技术要点

沉井结构一方面通过各工况下的内力计算分析, 得出满足规范要求的沉井结构构件布置方案及配筋; 另一方面通过可控下沉的技术, 有效解决软土地区或场地开挖条件受限情况下的地下工程施工问题。沉井施工中, 应注意以下技术要点。

1) 施工前应根据已有地形、地质、物探等资料, 摸清施工场地障碍物情况, 做好施工组织设计方案。沉井施工前, 应对坑底土体进行加固处理, 强度达到要求后施工。沉井制作前, 应先在设计位置挖好基坑, 铺设一定厚度的中粗砂垫层, 确保沉井混凝土在浇筑过程中的稳定性。

2) 沉井接高时下节混凝土必须达到设计强度的 75% 以上, 且每节井壁上端应附加水平钢筋。框架、刃脚、底梁与封底混凝土接触面拆模后应凿毛。刃脚混凝土强度达到设计强度的 100% 方能下沉。沉井底高程位于淤泥质黏土层时, 应采取有效防突沉措施。沉积于表面的浮泥应予清除, 水下先抛大石块再抛碎石, 逐格对称浇筑 C20 水下混凝土。

3) 沉井下沉过程中, 应在沉井边增设水位观测孔 1 个, 在沉井下沉时开始观测, 确保井内水

位不低于井外地下水位。为了防止沉井在施工阶段上浮, 水下封底混凝土达到强度且控制井外地下水位低于高程 1.0 m 后, 方可抽取沉井内水。沉井施工时, 周边堆载应小于 20 kN/m^2 , 且严禁单侧堆载。

4) 沉井施工中需施工监测, 包括沉井下沉深度及井体偏斜量、地表水位观测及沉井内水位变化、地表沉降和沉井周围 15 m 内的建筑物及地下管线的沉降和水平位移等。

5 结论

1) 沉井结构受力复杂, 建议采用结构有限元软件进行三维整体分析, 需结合施工工艺分别针对施工阶段和正常使用阶段进行分析。

2) 根据雨水调蓄池结构有限元分析结果, 侧壁及隔墙与梁、柱连接节点处易出现应力集中的现象, 须对内力结果进行合理判断并设计, 宜在应力集中处设局部加强钢筋进行构造加强。

3) 沉井施工时需加强监测, 并应根据“危大工程”条例要求制定施工应急备案, 确保施工期安全。

4) 工程 3 座雨水调蓄池于 2023 年 8 月开工建设, 2023 年 11 月建设完成, 目前使用情况良好。研究成果可为类似工程提供参考。

参考文献:

- [1] 陈明林, 黄博, 薛泽辰, 等. 复杂海况下跨海桥梁钢沉井基础下放过程及影响优化[J]. 西南交通大学学报, 2025, 60(2): 513-523.
CHEN M L, HUANG B, XUE Z C, et al. Steel caisson lowering process for cross-sea bridges under complex marine conditions and influence optimization[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2025, 60(2): 513-523.
- [2] 石云冈, 徐霞飞, 田鹏, 等. 复杂条件下深水沉井基础偏

- 位数值模拟分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2024, 22(1): 126-133, 155.
- SHI Y G, XU X F, TIAN P, et al. Numerical simulation and analysis of foundation offsetness of deepwater sinking well under complex conditions [J]. Journal of water resources and architectural engineering, 2024, 22(1): 126-133, 155.
- [3] 施洲, 纪锋, 余万庆, 等. 基于集对分析理论的大型沉井基础施工动态风险评估[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2021, 51(3): 419-425.
- SHI Z, JI F, YU W Q, et al. Dynamic risk assessment of huge caisson foundation construction based on set pair analysis theory [J]. Journal of Southeast University (natural science), 2021, 51(3): 419-425.
- [4] 史良洪. 超大平面沉井基础下沉施工全过程受力特性[J]. 铁道工程学报, 2018, 35(9): 42-48.
- SHI L H. Analysis on mechanics of super large plane area caisson foundation in the whole process of sinking construction [J]. Journal of railway engineering society, 2018, 35(9): 42-48.
- [5] 赖俊珊, 王广贤. 大尺寸沉井与长距离顶管在取排海水工程中的应用[J]. 水运工程, 2024(8): 343-347.
- LAI J S, WANG G X. Application of large-sized sinking well and long-distance pipe jacking in seawater intake and discharge engineering [J]. Port & waterway engineering, 2024(8): 343-347.
- [6] 中交水运规划设计院有限公司. 上海港罗泾港区集装箱码头改造一期工程初步设计[R]. 北京: 中交水运规划设计院有限公司, 2022.
- CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd. Preliminary design for phase I container terminal renovation project in Luojing port area of Shanghai Port [R]. Beijing: CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., 2022.
- [7] 上海海洋地质勘察设计有限公司. 上海港罗泾港区集装箱改造一期工程(陆域)岩土工程勘察报告(详细勘察)[R]. 2022.
- Shanghai Marine Geological Survey and Design Co., Ltd. Geotechnical engineering investigation report (detailed investigation) of the first phase of container reconstruction project (land area) in Luojing port area of Shanghai Port [R]. Shanghai: Shanghai Marine Geological Survey and Design Co., Ltd., 2022.
- [8] 工程结构通用规范: GB 55001—2021[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.
- General code for engineering structures: GB 55001-2021[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2021.
- [9] 杜振辉, 岳霖, 岳田. 散货堆场铁路卸车系统翻车机房地下结构设计[J]. 水运工程, 2021(10): 241-244, 255.
- DU Z H, YUE L, YUE T. Underground structure design of car dumper shed of railway unloading system in bulk yard [J]. Port & waterway engineering, 2021(10): 241-244, 255.
- [10] 李荣庆, 侯永为. 考虑泥沙淤积影响的高桩码头三维有限元分析[J]. 水运工程, 2016(10): 95-99.
- LI R Q, HOU Y W. Three-dimensional finite element analysis of pile-supported wharf considering sediment deposition [J]. Port & waterway engineering, 2016(10): 95-99.
- [11] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2002[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- Code for design of concrete structures: GB 50010-2002[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002.

(本文编辑 王传瑜)