

深圳 LNG 应急调峰站取水口设计

谢乔木, 卢少彦, 杨旭

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510290)

摘要: 根据深圳 LNG 应急调峰站取水口平面布置, 结合其使用功能特点和施工过程, 取水口结构采用与护岸同步施工。针对取水口结构尺寸大、质量过大、浮运安装比较困难的问题, 进行针对性的结构设计, 采取“预制浮坞式+现场二次浇筑”方案, 并对不同工况下结构内力进行数值分析。结果表明, 该方案能满足设计要求, 较好地克服施工过程中遇到的困难, 并顺利通过交工验收, 达到了节约成本和缩短工期的目的。

关键词: 取水口; 大型构件; 浮运安装; 数值分析

中图分类号: U656.1+39

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)08-0144-08

Design of water intake for Shenzhen LNG emergency peak shaving station

XIE Qiaomu, LU Shaoyan, YANG Xu

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510290, China)

Abstract: Based on the layout of the water intake for the Shenzhen LNG emergency peak shaving station, combined with its functional characteristics and construction process, the water intake structure is constructed synchronously with the revetment. In view of challenges of the large size, excessive mass, and difficulty in installation due to floating transportation of the water intake structure, a targeted structural design approach is carried out. The “prefabricated floating dock + on-site secondary pouring” scheme is adopted, and numerical analysis of internal forces under different conditions is carried out. The results show that this scheme meets the design requirements. It effectively overcomes challenges encountered during the construction process and successfully passes the final inspection, achieving the goals of cost savings and shortened construction period.

Keywords: water intake; large component; floating installation; numerical analysis

液化天然气(LNG)接收终端取水口是为 LNG 供应升温汽化海水结构设施的重要组成部分, 通常设置在水陆交界处, 其布置不仅要考虑在 50 a 一遇低水位能取到海水, 也要考虑泵房内波浪及水流形态的影响, 其主体结构通常位于水位以下较深位置, 一般取水方式采用明渠或管道取水^[1-2]。

深圳 LNG 应急调峰站工程陆域由填海形成, 采用开敞式取水口, 与护岸工程结构同步施工。为取水安全, 流道及前池均比其他工程长, 造成取水结构大型化, 如何浮运安装、与护岸同步施工快速形成吹填围堰成为本工程的关键技术。本

文针对这些关键技术提出了解决措施, 并进行详细分析, 为类似工程提供参考。

1 工程概况

本工程建设规模为: 1 座可靠泊 8 万 ~ 26.6 万 m³LNG 船专用卸船码头, 泊位长度为 380 m, 码头接卸能力 300 万 t/a; 1 座可靠泊 5 000 HP(3 680 kW) 工作船码头, 泊位长度为 50 m; 陆域由填海形成, 场地高程为 6.0 m, 面积约 25.4 万 m²; 取水口位于陆域西侧、西护岸南端, 原泥面高程约-10 m, 根据接收站要求, 本工程取水量为 5.34 万 m³/h。工程平面布置见图 1。

收稿日期: 2024-03-20

作者简介: 谢乔木(1979—), 男, 高级工程师, 从事港口航道与海岸工程设计。

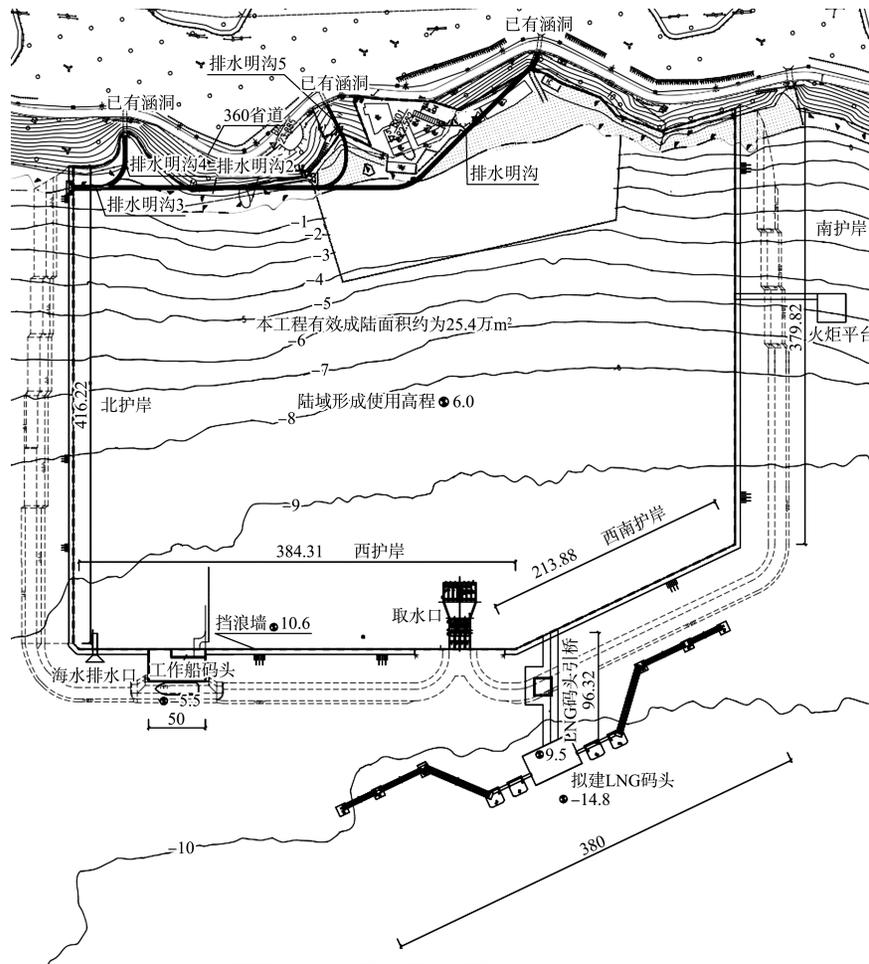
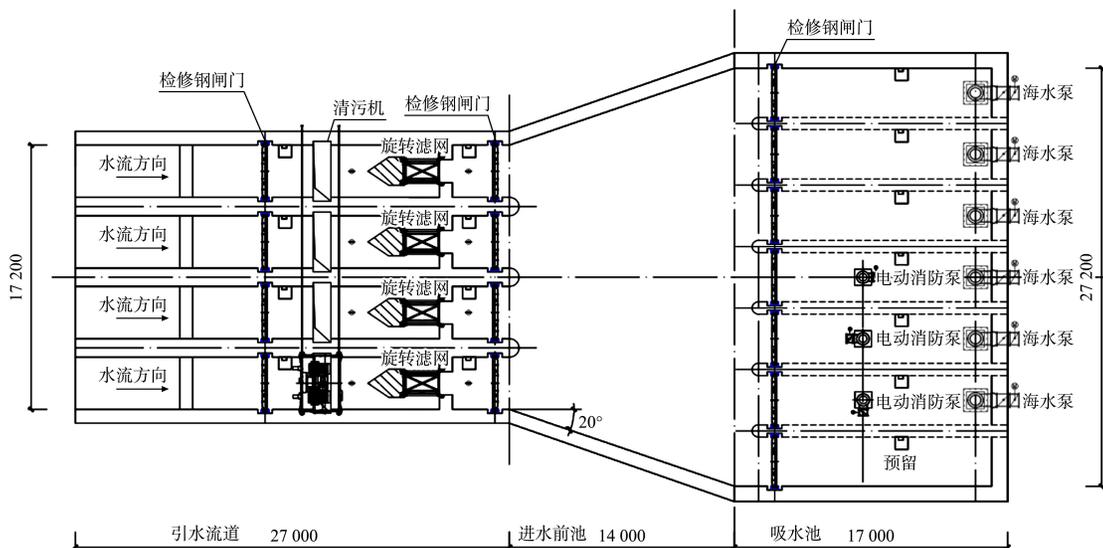


图 1 工程平面布置 (单位: m)

取水口包括引水流道(过滤涵)、进水前池(泵房前池)及吸水池(泵房)。引水流道有 4 条, 进水口位于水面以下, 中部为喇叭形进水前池(扩散角为 20°), 后部为吸水池, 水流通过流道后在前池

内充分的扩散, 分布均匀后进入吸水室仍然有足够的距离进行再调整^[3], 泵房设 7 条取水流道, 其中一期共设置 6 台海水泵(5 用 1 备), 取水口平面布置及立面见图 2。



a) 平面布置

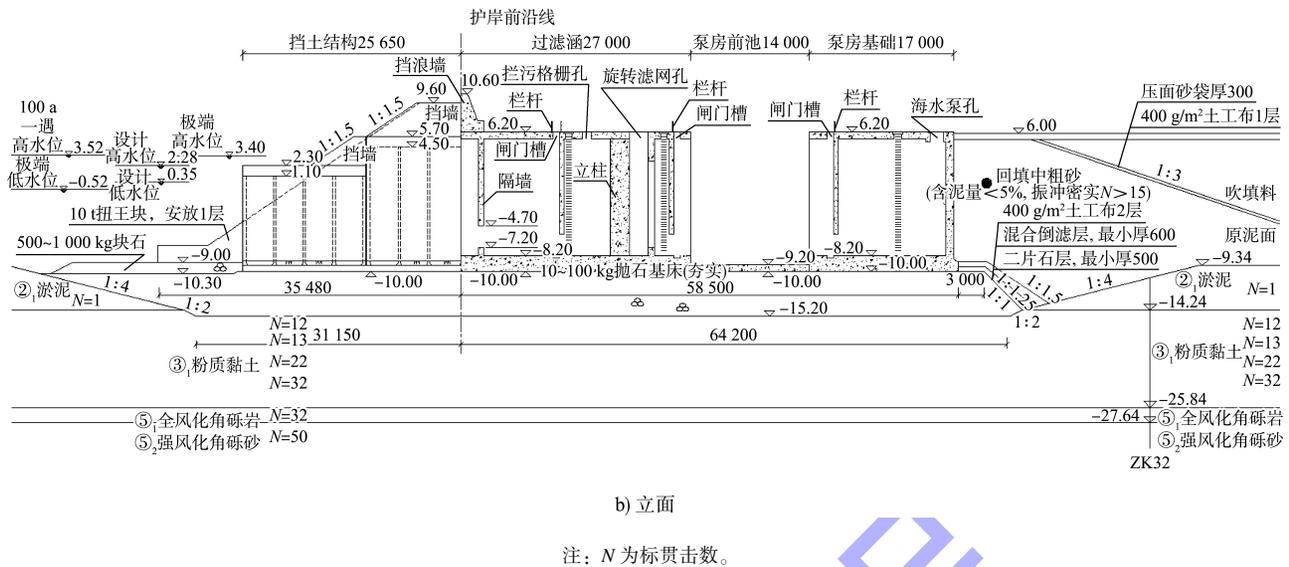


图2 取水口平面布置及立面 (尺寸: mm; 高程: m)

2 工程地质及水文条件

2.1 工程地质

工程区内上部地层②₁淤泥分布广泛,具有一定厚度,局部揭露淤泥层厚度达6.20 m,其强度低,岩土工程性质差;其下③₁粉质黏土呈可塑状,揭露平均层厚为5.67 m,平均标贯击数12击;中部地层③₃砾砂、③₄卵石均为中密-密实状态,承载力中等-较高;场地下部地层⑤₂强风化砾岩、⑥₂强风化花岗岩强度较高。取水口结构的基础地层为③₁粉质黏土,承载能力满足设计要求^[4]。

2.2 水文条件

设计潮位^[5-6]:设计高水位(高潮累积频率10%)2.28 m,设计低水位(低潮累积频率90%)0.35 m,极端高水位(50 a一遇)3.40 m,极端低水位(50 a一遇)-0.52 m。设计波浪50 a一遇 $H_{1\%}$ 为5.70 m。

3 取水口设计关键技术

3.1 取水口总体施工布局分析

由于本工程地质情况和护岸采用抛填堤心石的斜坡式结构,取水口结构难以通过应急调峰站成陆后沉井结构施工或采用地连墙形成基坑围护结构,进行开挖干地施工。

根据以往工程经验,取水口结构可采用预留其施工位置,设置凹式临时护岸,待施工结束后再回填取水口与临时护岸衔接的区域,完成陆域回填。该方案具有陆域形成工期不受取水口结构影响、互相干扰小的优点,但由于取水口位置水深浪大,内凹式临时护岸较长,需要护面块体防护,工程造价较高,后期护面块体需要拆除。

采取与护岸同步施工方案虽然陆域形成受取水口结构施工的影响,但由于护岸总长度约为1400 m,护岸开始施工到合龙工期约15个月,该工期应能满足取水口结构的基槽开挖、抛石基床施工和箱涵预制、运输及安装的要求,工程造价较前者低。因此,取水口结构采用与护岸同步施工的方案。

3.2 结构设计关键技术

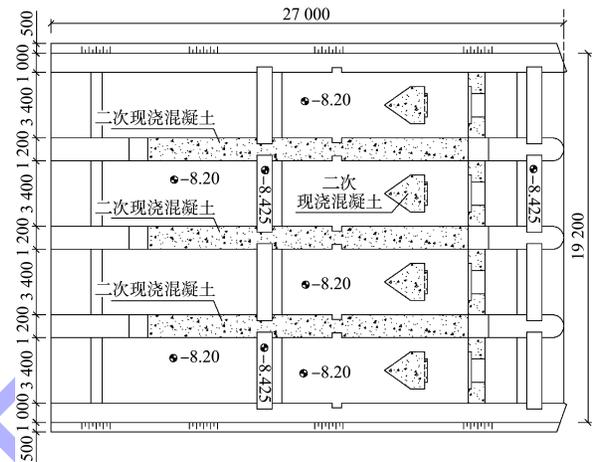
由于取水口位置大概在-10 m水深处,离岸距离约350 m,与护岸同步施工形成围蔽结构后进行后方吹填形成陆域,因此取水口采用开敞式岸壁取水,由挡土结构、过滤涵、泵房前池和泵房基础4部分组成,这些结构需要在海上施工与护岸快速形成围蔽,最好的办法是采用预制结构,在预制场完成预制后拖运至现场进行安放。

取水口挡土结构可采用常规的沉箱结构, 而过滤涵及泵房基础的流道隔墙沿着进水方向设置, 过滤涵流道长度为 27 m, 泵房基础流道长度为 16 m, 纵向跨度较大, 运营期过滤涵及泵房基础流道内设备均需要考虑干检修, 除了考虑检修期结构止水抗浮外, 还要考虑在设计高水位时土压力及水压力作用下结构安全, 因此过滤涵及泵房基础外壁、隔墙、底板都较厚, 为了能够很好地止水提供干检修条件, 过滤涵及泵房基础宜采用整体预制。

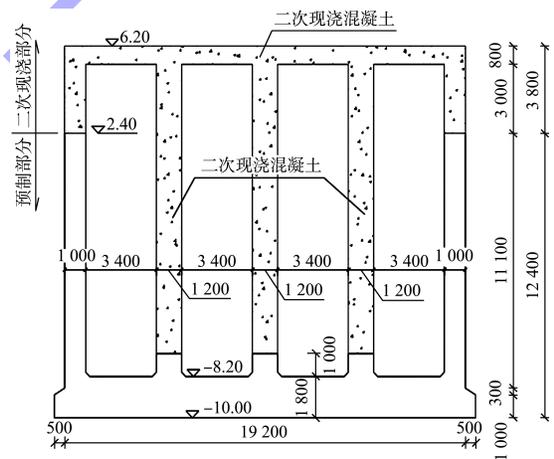
根据结构设计, 过滤涵和泵房基础整体预制总质量分别为 9 635 和 8 325 t, 而基床高程为 -10 m, 在乘潮水位(1.5 m)时, 过滤涵和泵房基础的过水流道采用钢封门封闭后浮力仅分别为 54.92 和 48.80 MN, 因此构件的浮运安装是设计考虑的关键因素。设计考虑在浮力确定情况如何减少预制构件质量, 通过采取“预制浮坞式+现场二次浇筑”的设计方案可以很好地解决上述问题。

“预制浮坞”总体设计思路即将过滤涵和泵房基础结构预制部分设计成方形的“桶”, 中间的隔墙和顶板进行二次浇筑, 可以减少构件的预制质量, 解决预制构件浮运安装问题。由于隔墙现浇需要在干地条件下进行, 过滤涵和泵房基础结构的检修闸门口需要采用钢封门临时封堵, “浮坞”灌水沉放安装好后, 再进行四周回填块石或中粗砂进行抗浮, 再二次抽水形成干地, 浇筑隔墙及顶板。按上述思路进行专门的结构设计, 最危险工况为施工期, 构件安放结束后, 为满足干施工条件, 需要将“坞”内水抽干。为抗浮需要, 先将过滤涵和泵房基础结构四周的壁板加高至顶板位置, 抽水时预留 60 cm 深水体, 以增加配重, 同时将构件四周回填中粗砂至 4.0 m 高程, 通过竖向土压力及趾部上方土体重力抗浮, 要求构件抗浮系数不小于 1.05^[7]。底板在结构周围土体回填及水压力作用下, 厚度取 1.8 m, 同时底板面积大, 为加强施工期底板刚度, 需要先预制 1 m 高的流道隔墙, 根据施工期受力按梁进行设计。侧

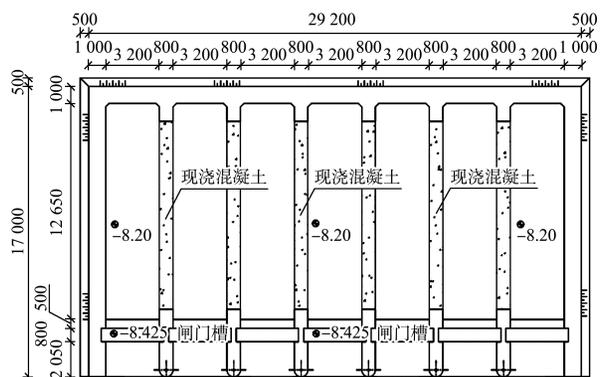
壁为抵抗水压力及土压力的作用, 壁厚取 1.0 m。闸门(取水)挡板厚度取 60 cm, 流道隔墙预制的隔墙上, 施工期预制段隔墙按竖向悬臂梁进行设计, 抵抗水压力。过滤涵及泵房基础预制结构见图 3。



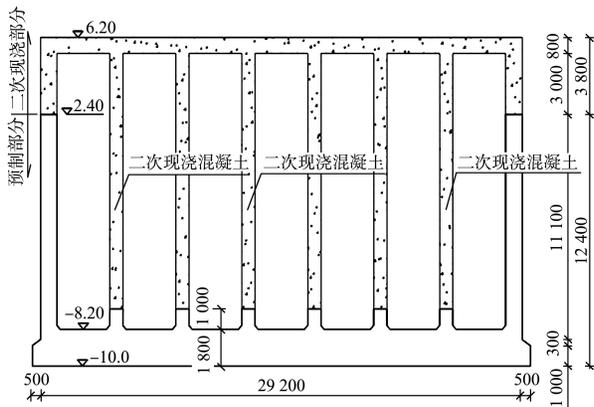
a) 过滤涵预制平面



b) 过滤涵预制断面



c) 泵房基础预制平面



d) 泵房基础预制断面

图3 过滤涵及泵房基础预制结构 (尺寸: mm; 高程: m)

泵房基础及过滤涵预制构件最大吃水 10.9 m, 干舷高度较低为 1.5 m, 而且要等潮水, 设计与施工单位通过分析决定采用起重船提升 1 m 的助浮方式安装, 需要提供 2 520 kN 吊力进行助浮。预制构件由半潜驳运载到施工现场, 半潜驳于现场下潜坑定位下潜, 泵房基础、过滤涵由 1 MN 起重船辅助浮态出半潜驳。经起重船托运至安装位置后, 根据现场水位条件, 使泵房基础、过滤涵直接坐落于基床上, 然后打开注水阀门, 压载水使其稳定的坐落于基床上。预制构件临时航道拖运布置见图 4。

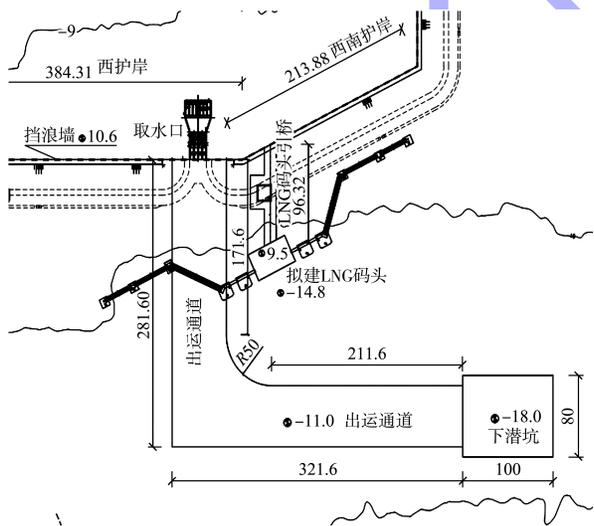
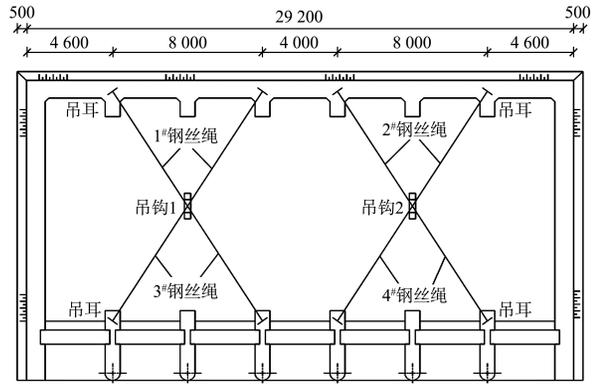
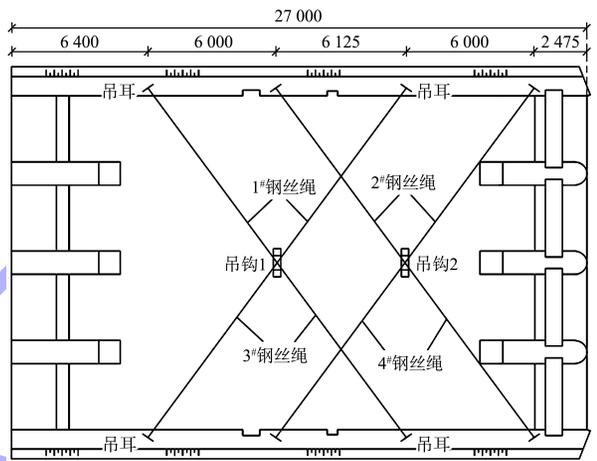


图4 预制构件临时航道拖运布置 (单位: m)

吊点设置时, 取泵房基础、过滤涵预制结构按两种规格进行计算, 起重船配置 2 个吊钩, 每个吊钩负责 4 个吊点, 为安全稳妥, 提升时构件按 6 个吊点受力计算(即每个吊钩按 3 个吊点计算), 构件吊点布置见图 5。



a) 泵房基础



b) 过滤涵

图5 泵房基础和过滤涵吊点布置 (单位: mm)

3.3 结构数值计算分析

本工程取水口除挡土结构采用常规的沉箱外, 过滤涵及泵房基础均为异型构件, 需要结合施工现场设备进行专门设计, 对施工到投入运营各种工况进行计算^[8]。计算工况如下。

3.3.1 施工期

工况 1: 起重船助浮吊运安装阶段, 此时起重船起吊缆绳与构件外壁形成一定角度, 作用在外壁上的水平力较大。工况内力组合为: 吊装力+静水压力+自身重力。

工况 2: 预制构件抽掉压载水阶段, 此时为现浇内隔墙, 需要四周先回填至 4.0 m 抗浮, 再抽压载水后现浇内部隔墙。工况内力组合为: 土压力(4.0 m)+静水压力(设计高水位)+自身重力。

3.3.2 使用期

工况 3: 运营期流道内有水流, 结构内外水头差考虑平均潮差的 1/3, 场地回填至设计高程 6.0 m。

工况组合内力为: 土压力(6.0 m)+水压力(极端高水位)+自身重力+均载(20 kPa)+波浪力(过滤涵前墙,波高 5.7 m)。

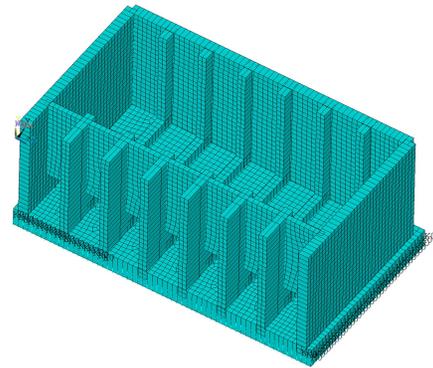
3.3.3 检修期

工况 4: 检修时单流道抽干逐一检修, 采用侧边流道无水其余有水及中间流道无水其余有水进行对比分析。工况组合内力为: 土压力(6.0 m)+水压力(极端高水位)+自身重力+均载(10 kPa)+波浪力(过滤涵前墙,2 a 一遇波浪 2.7 m)。

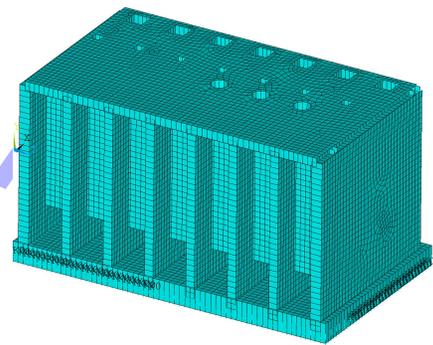
3.3.4 地震

工况 5: 地震工况内力组合为地震土压力+动水压力+自身重力+均载。

采用有限元软件 ANSYS 进行内力分析, 基床土体采用采用 combin14 单元模拟, 顶板、底板、隔墙、侧壁等采用 shell43 单元, 施工期预制隔墙部分按梁考虑, 采用 beam188 单元模拟。对模型外围节点进行水平方向的约束, 回填土压力、水压力及均载通过外荷载的方式施加在模型上^[9]。过滤涵和泵房基础有限元模型见图 6、7。



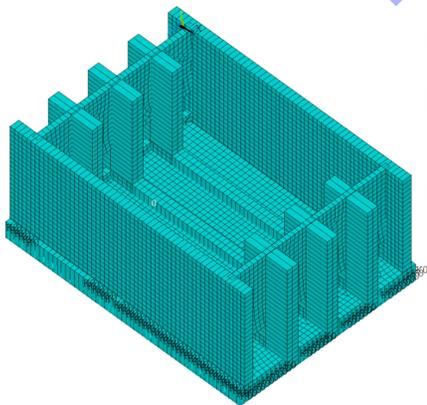
a) 施工期



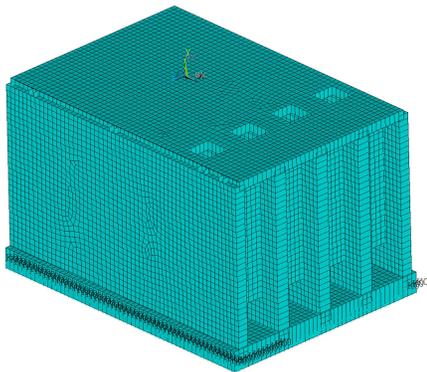
b) 使用期

图 7 泵房基础有限元模型

通过分析危险工况为施工期, 外壁所受内力较大, 过滤涵及泵房基础内力规律相似, 计算结果仅列出过滤涵内力情况, 见图 8 和表 1。



a) 施工期

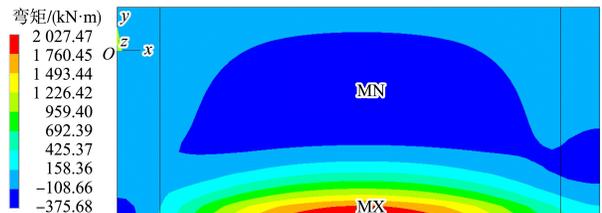


b) 使用期

图 6 过滤涵有限元模型

表 1 过滤涵结构内力包络计算结果

构件	纵向弯矩/ (kN·m)	横向弯矩/ (kN·m)
外壁	2 027	633
底板	1 354	1 925
顶板	414	450
隔墙	646	550
外壁预制隔墙(按梁考虑)	-	14 796
底板预制隔墙(按梁考虑)	-	9 639



a) 外壁纵向(y向)弯矩

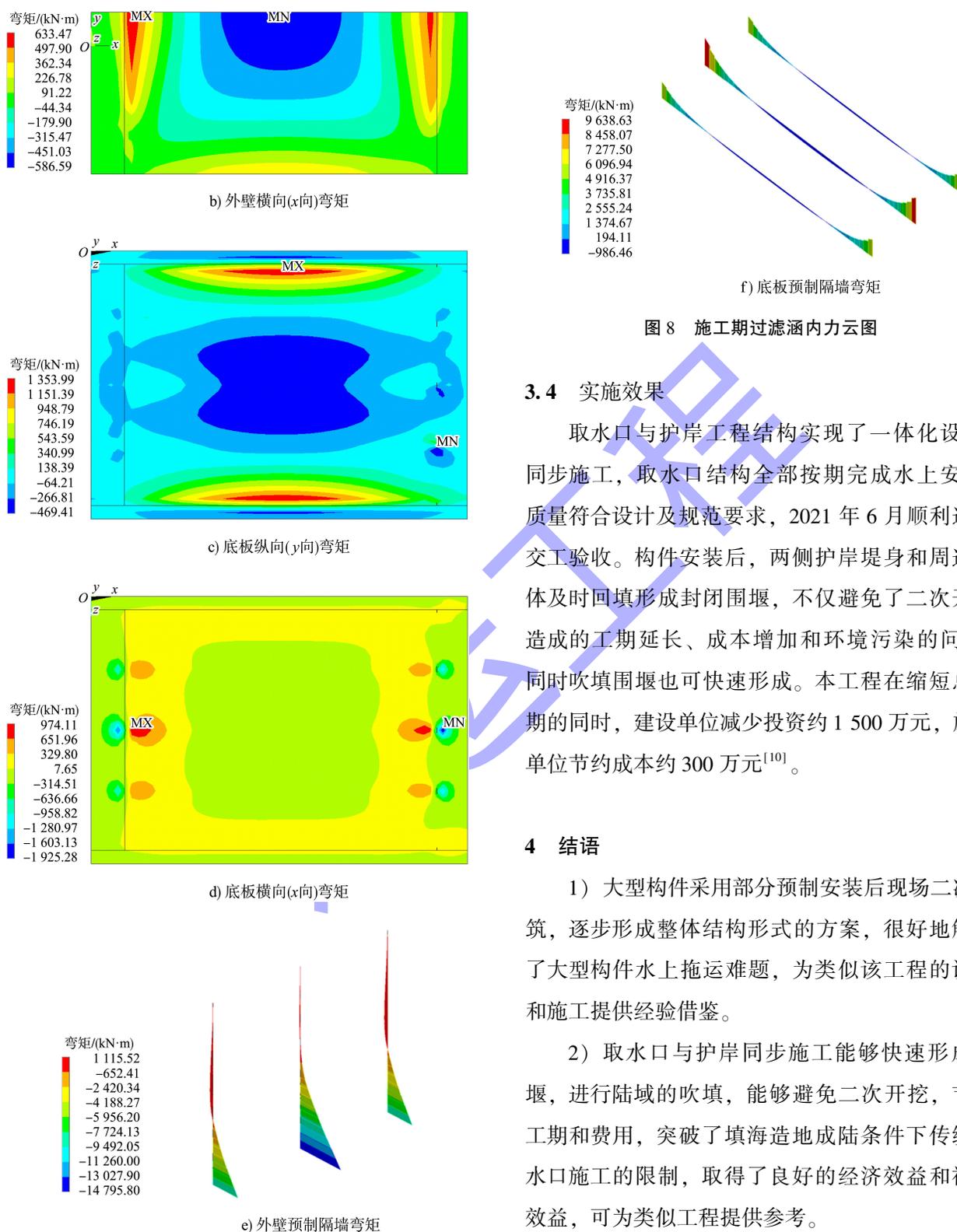


图8 施工期过滤涵内力云图

3.4 实施效果

取水口与护岸工程结构实现了一体化设计、同步施工，取水口结构全部按期完成水上安装，质量符合设计及规范要求，2021年6月顺利通过交工验收。构件安装后，两侧护岸堤身和周边棱体及时回填形成封闭围堰，不仅避免了二次开挖造成的工期延长、成本增加和环境污染的问题，同时吹填围堰也可快速形成。本工程在缩短总工期的同时，建设单位减少投资约1500万元，施工单位节约成本约300万元^[10]。

4 结语

1) 大型构件采用部分预制安装后现场二次浇筑，逐步形成整体结构形式的方案，很好地解决了大型构件水上拖运难题，为类似该工程的设计和施工提供经验借鉴。

2) 取水口与护岸同步施工能够快速形成围堰，进行陆域的吹填，能够避免二次开挖，节省工期和费用，突破了填海造地成陆条件下传统取水口施工的限制，取得了良好的经济效益和社会效益，可为类似工程提供参考。

参考文献:

- [1] 张国权, 廉立虎, 张慈珩. LNG 接收站取水口设计及施工方案设计[J]. 港工技术, 2019, 56(5): 17-20.
- [2] 李云龙, 韩亮, 李志峰. 天津 LNG 接收终端取水口施工关键技术简析[J]. 港工技术, 2016, 53(S1): 18-21.
- [3] 南京水利科学研究院. 中石油深圳 LNG 应急调峰站项目下码头工程(含陆域形成)取水前池及流道物理模型试验报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2014.
- [4] 中交第四航务工程勘察设计院有限公司. 深圳液化天然气应急调峰站项目码头工程初步设计报告[R]. 广州: 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 2017.
- [5] 中交第四航务工程勘察设计院有限公司. 液化天然气码头设计规范: JTS 165-5—2021[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2021.
- [6] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 中交第四航务工程局有限公司. 码头结构设计规范: JTS 167—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
- [7] 中交水运规划设计院. 船闸水工建筑物设计规范: JTJ 307—2001[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2001.
- [8] 周清华, 沈迪洲, 周顶. 广东 LNG 干线接收站取水口的设计[J]. 水运工程, 2009(7): 93-96.
- [9] MOAVENI S. 有限元分析: ANSYS 理论与应用[M]. 4 版. 李继荣, 王蓝婧, 邵绪强, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2015.
- [10] 武警, 侯勇, 洪亮, 等. 取水口与护岸工程一体化设计与施工[J]. 水运工程, 2019(9): 327-329, 338.

(本文编辑 王璁)

(上接第 133 页)

参考文献:

- [1] NAGAI S. Researches on steel-pipe breakwater [S]. Coastal engineering proceedings, 1966, 1(10): 850-872.
- [2] 龚崇准, 陈美发, 朱宪伟, 等. 桩式离岸堤保滩促淤工程消浪效果试验研究[J]. 海洋工程, 2001, 19(4): 72-77.
- [3] 潘军宁, 王登婷, 杨正己, 等. 方形混凝土桩列消浪效果试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2006(2): 29-34.
- [4] WEIGEL R L. Closely spaced piles as a breakwater [D]. Berkeley: University of California, 1961.
- [5] HARTMANN W. Das stabgitter in instationärer stromung sbewegung [D]. Berlin: Technische Universität, 1969.
- [6] MASSEL S R. Interaction of water waves with cylinder barrier[J]. Journal of the waterways, harbors and coastal engineering division, 1976, 102(2): 165-187.
- [7] HAYASHI T, HATTORI M, KANO T, et al. Hydraulic research on closely spaced pile breakwater [J]. Coastal engineering in Japan, 1966, 9(1): 107-117.
- [8] GRÜNE J, KOHLHASE S. Wave transmission through vertical slotted walls [C]//ICCE. 14th International Conference on Coastal Engineering. Copenhagen: ICCE, 1974: 1906-1923.
- [9] HUANG Z H, YUAN Z. Transmission of solitary waves through slotted barriers: a laboratory study with analysis by a long wave approximation [J]. Journal of hydro-environment research, 2010, 3(4): 179-185.
- [10] 王瑜. 浅水小波高条件下桩式透空堤消浪效果研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [11] 交通运输部天津水运工程科学研究所, 南京水利科学研究院. 水运工程模拟试验技术规范: JTS/T 231—2021[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2021.

(本文编辑 王璁)