



# 一种连接装配式横梁的新型桩顶结构设计

狄小乐<sup>1</sup>, 吴 宇<sup>2</sup>, 陈海峰<sup>3</sup>

(1. 上海市交通建设工程安全质量监督站, 上海 200030; 2. 安徽理工大学 土木建筑学院, 安徽 淮南 232001;  
3. 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

**摘要:** 装配式高桩码头采用整体预制横梁与桩基直接连接时, 桩顶结构设计是技术方案的重难点, 在确保横梁、桩芯与桩基三者可靠连接的同时, 还要保证桩芯结构有足够的承载力。依托实际工程, 提出一种适用于整体装配式横梁的新型桩顶结构, 并对其进行计算分析。结果表明: 整体预制装配式开孔横梁预留空腔内模可采用免拆除的波纹钢管提高新老混凝土的结合能力; 桩芯结构采用型钢组替代钢筋笼是可行的技术方案; 鉴于型钢与混凝土的黏结力不同于钢筋与混凝土的黏结力, 型钢结构桩芯应进行在装配式横梁预留空腔内的锚固计算。

**关键词:** 高桩码头; 装配式; 桩芯; 型钢

中图分类号: U 656. 1+13

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)05-0048-07

## Design of a new type pile top structure for connecting prefabricated beam

DI Xiaole<sup>1</sup>, WU Yu<sup>2</sup>, CHEN Haifeng<sup>3</sup>

(1. Shanghai Traffic Construction Engineering Safety and Quality Supervision Station, Shanghai 200030, China;  
2. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;  
3. CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

**Abstract:** When the prefabricated beam of high-piled wharf is directly connected with pile foundation, the pile top structure design is the key and difficult point of the technical scheme. It is to ensure that the beam, pile core and pile foundation are connected reliably, meanwhile the pile core structure has enough bearing capacity. Based on an actual project, we put forward a new pile top structure which is suitable for the fully prefabricated beam, and carry out calculation and analysis on it. The results show that the combined capacity of new and old concrete can be improved by using corrugated steel pipe without removal for the mold of reserved cavity of the fully prefabricated beam. It is feasible to use profile steel group instead of steel bar cage in pile core structure. Considering that the bonding force between profile steel and concrete is different from that between steel bar and concrete, the anchoring calculation of the pile core using profile steel in the reserved cavity of the prefabricated beam should be carried out.

**Keywords:** high-piled wharf; prefabricated; pile core; profile steel

装配式技术已在连云港港徐圩港区的液体化工类高桩码头工程中得到一定的应用。但对于在外海浪高流急条件下建设荷载较大、等级较高的集装箱码头, 采用整体预制横梁与桩基相连时, 桩基与横梁之间的节点在波浪作用及轮压作用下

受力极大, 其设计计算是技术方案的重中之重, 目前尚无研究及应用实例。本文依托外海某集装箱码头工程实例, 介绍一种连接装配式横梁的新型桩顶结构, 并对其进行计算分析, 总结归纳设计要点, 可为类似工程提供参考借鉴。

收稿日期: 2022-11-15

作者简介: 狄小乐 (1976—), 男, 高级工程师, 从事水运工程安全质量监督。

## 1 工程概况

### 1.1 主体结构方案

依托工程为外海建设的 10 万吨级高桩梁板式集装箱码头, 码头面顶高程为 7.30 m (当地理论最低潮面), 前沿设计底高程为 -15.00 m。码头平台宽 38 m, 排架间距 7 m, 每榀排架设置 6 根  $\phi 1200$  mm 钢管桩, 桩基布置为前后双直桩及中间叉桩的方案。

上部结构采用上下两个预制装配式模块。下部模块为单榀排架的整体预制装配式下横梁, 长

38 m、宽 2.6 m、高 1.4 m。横梁在桩基位置预留 6 个空腔作为与桩基连接的后浇带。上部模块为相邻两榀排架之间的预制纵向梁系及预制面板组合形成的模块, 上部模块在上横梁侧设置端板, 作为上横梁节点浇筑的侧模板。模块均为整体预制, 横梁吊装到桩基顶部后进行空腔节点灌浆连接, 再装上部模块并浇筑面层, 使码头结构连成整体。码头靠船设施采用 1700H 鼓型橡胶护舷 (一鼓一板, 标准反力型), 系船设施采用 1 500 kN 单挡檐铸钢系船柱。码头断面如图 1 所示, 模块拼接如图 2 所示。

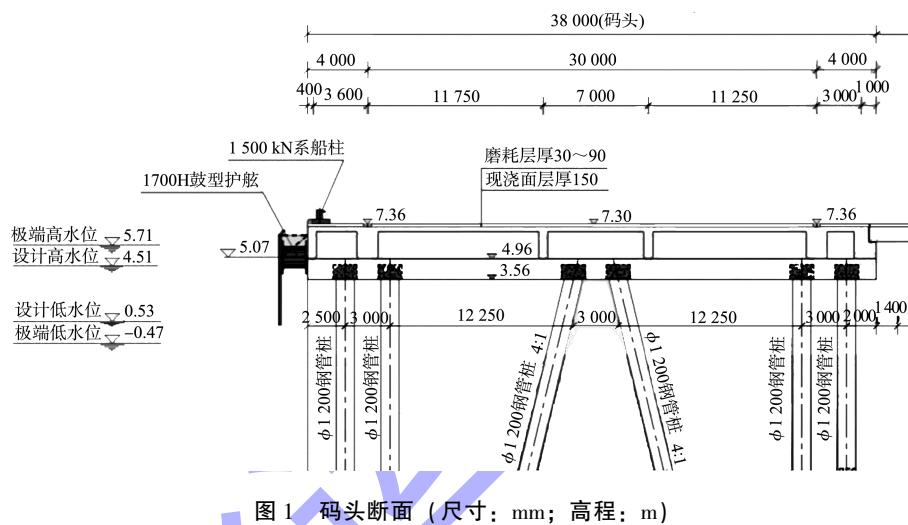


图 1 码头断面 (尺寸: mm; 高程: m)

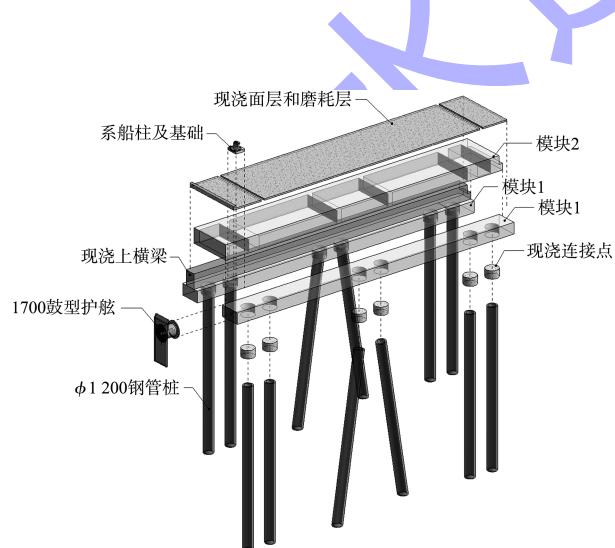


图 2 模块拼接

### 1.2 结构受力情况

1) 本工程为集装箱码头, 岸桥轨距为 30 m, 基距 14.2 m, 每腿 10 轮, 平均轮距 1.2 m。工作轮压(风速 25 m/s): 海侧 671 kN/轮, 陆侧 897 kN/轮;

非工作轮压(风速 70 m/s): 海侧 939 kN/轮, 陆侧 1 507 kN/轮。可见, 岸桥荷载较大, 轨道梁下的桩基在岸桥垂直力及水平力荷载下呈现压弯构件的特性。

2) 码头外海侧配套新建 1 道防波堤。防波堤建成后, 码头区域中段受防波堤掩护条件较好, 前沿波高基本控制在 2.5 m 以下, 但码头两端受防波堤口门来浪的影响, 波高较大, 局部接近 4 m。同时由于码头面高程较低, 波浪水平力及上托力较大, 部分桩基呈现拉弯构件的特性。本工程防波堤建成后码头设计控制波要素见表 1。

表 1 码头前沿 50 a 一遇控制波要素

水位	$H_{1\%}/$ m	$H_{4\%}/$ m	$H_{13\%}/$ m	平均波高 $H_m/m$	周期 $T/s$	波长 $L/m$
极端高水位	3.93	3.32	2.68	1.70	10.9	149
设计高水位	3.80	3.21	2.60	1.64	10.9	146

3) 根据主体结构内力计算结果, 码头桩顶节点主要受上拔力及弯矩作用, 且直桩受力大于斜桩, 其内力设计值组合见表 2。

表 2 桩顶结构受力

桩力设计值/ kN	弯矩设计值/ (kN·m)	对应工况
-2 697(拉桩力)	650	极端高水位 50 a 一遇波浪荷载( $H$ 处)
2 507(压桩力)	1 629	极端高水位 50 a 一遇波浪荷载(0.375 $H$ 处)

注:  $H$  为波高。

## 2 桩顶节点方案分析

为便于整体式横梁的安装, 横梁在桩基位置预留空腔作为与桩基连接的后浇带, 空腔直径为 1 600 mm、高 1 000 mm。直桩伸入后浇带 100 mm, 桩芯结构伸出桩顶 900 mm, 横梁搁置在直桩桩芯顶部。斜桩伸入后浇带 100 mm, 桩芯结构采用“斜调直”的方式伸出桩顶 800 mm, 不考虑其承担施工期上部模块的搁置作用。在横梁内设置灌浆孔和溢浆孔, 横梁安装完成后进行预留空腔的灌浆, 使得桩基与横梁有效连接, 如图 3 所示。

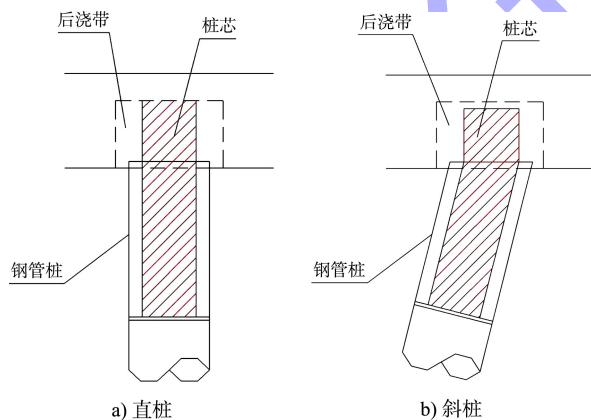


图 3 节点连接

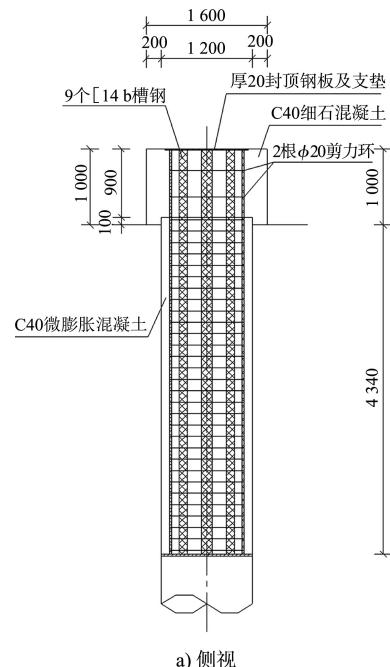
本技术方案下桩顶节点的设计重难点为:

1) 施工期横梁的预制及安装。①横梁预制时需要提前支立 6 个空腔内模, 内模须考虑拆除难度; ②横梁空腔内壁需要保持粗糙度, 以便与后浇带混凝土良好连接, 传统方法为拆模后人工凿毛, 功效低下, 应考虑创新方案; ③伸出桩顶的桩芯结构作为预制横梁的搁置面, 桩芯结构选型

须考虑一定的强度及刚度。

2) 使用期桩顶节点传力。①上部结构受力首先通过预制横梁传递给后浇带混凝土, 但横梁预留空腔内壁与后浇带混凝土之间为无钢筋通过的素混凝土接触面, 应考虑采取连接加强措施; ②荷载通过后浇带混凝土传递给桩芯, 须确保后浇带与桩芯结构的可靠连接; ③荷载通过桩芯结构传递给钢管桩, 须确保钢管桩与桩芯结构的可靠连接; ④桩芯结构作为钢管桩的延伸, 应验算其抗弯、抗拉(压)承载力, 以满足桩顶结构受力要求。

基于上述分析, 提出技术方案: 横梁预留空腔内侧壁预埋波纹钢管, 既作为装配式横梁预制时的免拆除内模板, 又作为新老混凝土连接加强措施。桩芯结构采用现浇混凝土结构(材质为 C40 微膨胀混凝土), 桩芯骨架采用型钢组(材质为 Q355B 钢)替代钢筋笼, 并于顶部设置钢板及垫板以便横梁搁置, 避免了钢筋柔度较大无法支撑预制横梁的问题。型钢伸入空腔, 增设箍筋作为剪力环, 在空腔后浇带内锚固。型钢配置按桩顶刚接的要求进行设计, 考虑由桩芯型钢混凝土承担桩顶轴力及弯矩, 计算型钢采用 9 根 14b 槽钢。桩芯混凝土灌注至极端低水位, 长度为 4.34 m。桩顶结构如图 4 所示。



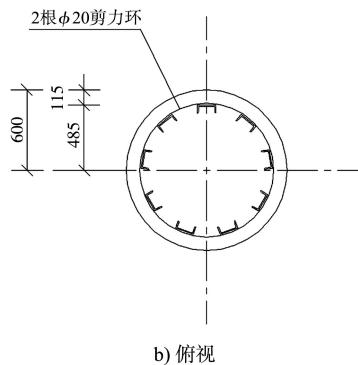


图4 桩顶结构 (单位: mm)

### 3 桩顶结构计算

#### 3.1 计算、验算内容

空腔内后浇带混凝土与预制横梁预留空腔内壁之间的连接强度验算; 桩芯在钢管桩内的最小锚固长度计算; 桩芯在横梁预留空腔内的最小锚固长度计算; 桩芯结构抗弯、抗拔验算。

#### 3.2 理论计算

##### 3.2.1 预留空腔后浇带与装配式横梁的连接

为增强空腔节点内后浇混凝土与预制横梁内壁之间的黏结强度, 在空腔内侧设置波纹钢管, 通过波纹的“咬合”作用提高节点抗拔承载力。波纹钢管直径 1 600 mm、总高度 1 000 mm, 设置 5 道波纹, 单圈高度 200 mm、凸出宽度 30 mm、壁厚为 5 mm。波纹咬合力可按下式计算:

$$T_u = n\pi d h f_c \quad (1)$$

式中:  $T_u$  为咬合力, N;  $n$  为波纹圈数量, 取 5;  $d$  为波纹钢管直径, 取 1 600 mm;  $h$  为波纹凸出宽度, 取 30 mm;  $f_c$  为混凝土轴心抗压强度设计值, 对于 C40 混凝土取 19.1 MPa。

经计算, 该波纹钢管能有效提高后浇带与预制混凝土结合面的连接强度, 使得抗拔承载力达到 14.401 MN, 满足计算上拔力的要求。

##### 3.2.2 桩芯结构与钢管桩的连接

参照 JTS 215—2018《码头结构设计规范》<sup>[1]</sup>, 芯柱嵌岩桩的相关计算公式为:

$$L = \frac{\alpha N}{\tau_0 \pi d} \quad (2)$$

式中:  $L$  为芯柱传递轴向力所需最小长度, m;

$\alpha$  为系数, 取 1.2;  $N$  为轴力设计值, 取 2 697 kN;  $\tau_0$  为芯柱与桩内壁结合面的抗剪强度设计值, 无经验时可取 270~370 kPa, 验算极端荷载时取大值, 其他情况取小值;  $d$  为桩的内径, 取 1.16 m。

经计算, 满足受力要求的桩芯最小锚固长度为 2.32 m。本工程桩芯设计长度考虑灌注至极端低水位, 桩顶以下总长为 4.34 m, 可满足节点连接要求。

#### 3.2.3 桩芯在横梁空腔内的锚固

常规桩芯结构采用钢筋笼作为钢结构骨架, 外伸钢筋进入上部结构时, 一般考虑钢筋与混凝土的黏结强度为混凝土抗压强度标准值的 10%。对本方案而言, 后浇带采用 C40 混凝土, 可取 2.68 MPa, 进入上部结构 30~40 倍钢筋直径一般能满足锚固要求。与常规技术方案不同的是, 本工程采用型钢替代钢筋, 型钢表面较为光滑, 黏结力低, 黏结强度考虑为 0.37 MPa<sup>[2-4]</sup>。预制横梁预留空腔高度 1 000 mm 难以满足型钢锚固要求, 故应进行深入计算研究并采取其他锚固措施。

拟增加 2 道  $\phi 20$  mm 钢筋作为剪力环<sup>[5-6]</sup>, 型钢在空腔内的最小锚固长度  $L_e$  可按以下公式进行计算:

$$L_e = \frac{\gamma p_1}{n_1 S q} \quad (3)$$

$$p_1 = p - p_2 \quad (4)$$

$$p_2 = n_2 \pi D d f_c \quad (5)$$

式中:  $\gamma$  为系数, 取 1.9;  $p_1$  为型钢承担的拉桩力, N;  $n_1$  为型钢数量, 取 9;  $S$  为单个型钢截面周长, 14b 槽钢为 520 mm;  $q$  为型钢与混凝土的黏结强度, 取 0.37 MPa;  $p$  为总拉桩力, 取 2 697 kN;  $p_2$  为剪力环承担的拉桩力, N;  $n_2$  为剪力环数量, 取 2;  $D$  为剪力环直径, 取 970 mm;  $d$  为剪力环钢筋直径, 取 20 mm;  $f_c$  为混凝土轴心抗压强度设计值, 取 19.1 MPa。

经计算, 增加 2 道  $\phi 20$  mm 钢筋作为剪力环后, 型钢在空腔内的计算最小锚固长度为 405 mm, 预留空腔高度 1 000 mm 可满足要求。

### 3.2.4 桩芯结构的抗弯、抗压(拔)计算

采用灌注桩计算方法进行验算, 在拉弯及压弯两种受力模式下, 桩芯受力骨架为 9 根 14b 槽钢, 结构承载能力满足使用要求, 见表 3。

表 3 节点抗弯、抗拔承载力验算

受力模式	桩力设计值/kN	弯矩设计值/(kN·m)	抗弯承载力设计值/(kN·m)	抗压承载力设计值/kN
拉弯构件	-2 697(拉桩力)	650	2 530	-
压弯构件	2 507(压桩力)	1 629	-	4 066

### 3.3 数值模拟

#### 3.3.1 模型建立

采用 ABAQUS 有限元软件建立单桩模型, 桩顶设置预留开孔式桩帽结构替代本工程的横梁结构, 作为荷载的加载平台, 见图 5。将桩顶轴力与弯矩的组合设计值作为外荷载加载于桩帽上的力, 通过桩帽的传力作用, 计算桩顶节点的材料应力大小及分布规律, 验证本工程装配式方案节点连接的可靠性。

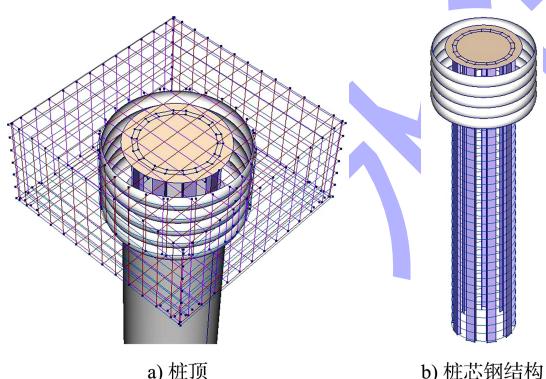


图 5 有限元模型

#### 3.3.2 外荷载输入条件

荷载 1 为垂直于桩帽顶面的上拔力  $p'$  为 2 697 kN; 荷载 2 为作用于桩帽顶面的弯矩  $M_1$  为 650 kN·m; 荷载 3 为垂直于桩帽顶面的下压力  $p''$  为 2 507 kN; 荷载 4 为作用于桩帽顶面的弯矩  $M_2$  为 1 629 kN·m。组合 1 为荷载 1+荷载 2; 组合 2

为荷载 3+荷载 4。荷载输入见图 6。

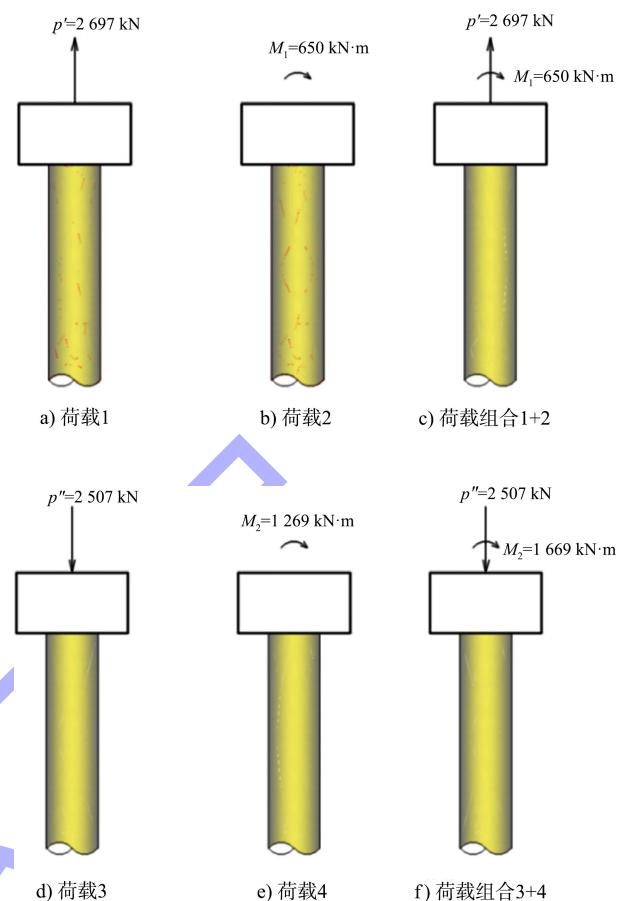


图 6 荷载输入

#### 3.3.3 计算结果

经过对钢管桩应力、型钢应力、桩芯混凝土应力、空腔节点内细石混凝土应力的计算, 结果见图 7。材料应力的最大值见表 4。可以看出, 节点内钢材、混凝土的强度满足要求, 节点连接可靠。

表 4 材料应力的最大值及上限值

工况	钢管桩应力最大值/MPa	型钢应力最大值/MPa	桩芯混凝土拉应力最大值/MPa	空腔节点内细石混凝土拉应力最大值/MPa
拉弯	40.30	39.25	1.52	1.47
压弯	79.11	65.32	1.59	1.50
允许上限值	310.00	310.00	1.71	1.71

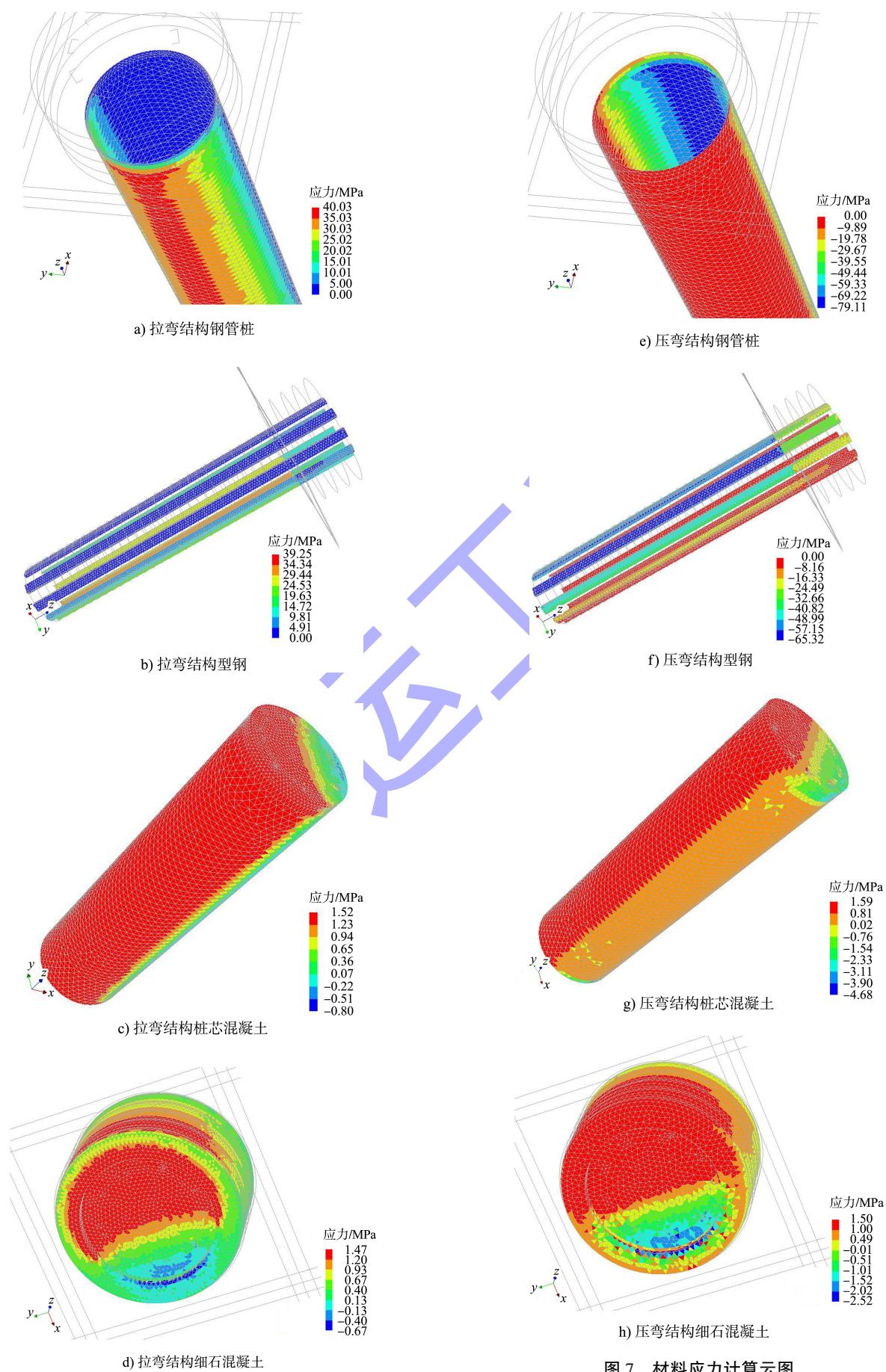


图7 材料应力计算云图

## 4 结论

- 1) 为提高开孔式横梁与后浇带之间的黏结力, 可在空腔内壁预埋波纹钢管, 依托波纹的咬合作用提高桩顶节点的抗拔性能。
- 2) 桩芯结构采用型钢组替代钢筋笼是可行的技术方案。鉴于型钢与混凝土的黏结力不同于钢筋与混凝土的黏结力, 型钢结构桩芯应进行在装配式横梁预留空腔内的锚固计算。
- 3) 对依托工程的桩顶结构进行有限元数值模拟, 得出其桩顶结构材料应力均满足要求, 节点连接安全、受力可靠, 可为类似工程提供参考。

## 参考文献:

- [1] 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. 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.
- [2] 杨有福, 韩林梅. 钢管和混凝土之间粘结强度的探讨[C]//崔京浩. 第十三届全国结构工程学术会议论文集(第Ⅱ册). 北京: 清华大学出版社, 2004: 157-160.
- [3] 王秋维, 王程伟, 刘乐, 等. 钢管混凝土界面粘结性能研究现状与分析进展[J]. 建筑结构, 2021, 51(12): 91-97.
- [4] 吴隽. 钢管混凝土研究现状综述[J]. 福建建设科技, 2021(6): 96-99.
- [5] 张敏, 马建林, 张挣鑫, 等. 钢管复合桩粘结-滑移性能研究[J]. 西南交通大学学报, 2017, 52(3): 540-545, 553.
- [6] 王耀琴, 马建林, 石聪, 等. 剪力环间距对钢管复合桩工作性能的影响研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(S2): 180-184.

(上接第 21 页)

- [4] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 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.
- [5] 中交水运规划设计院有限公司. 水运工程混凝土结构设计规范: JTS 151—2011[S]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
- [6] 欧阳伟. 超高性能混凝土在装配式建筑设计中的应用[J]. 住宅产业, 2022(7): 65-68.

(上接第 47 页)

## 4 结语

1) 模块化、装配式码头改造解决了传统危险码头上部结构建设存在的诸如构件数量多、施工速度慢; 高空作业量大、施工人员多导致工程质量难以把控、事故风险高; 影响已建工程营运, 经济性差等问题。

2) 首次提出将模块化管廊结构应用于危险品码头改造中, 并提出该结构设计与施工中的尺寸控制、限位措施以及检测和纠偏措施等关键技术。

3) 通过在典型工程中的应用, 采用合理划分模块单元、现场测量、现场拼装、增加模块内管道检测手段等质量保证措施, 并结合 BIM 技术进行施工过程管理, 大幅缩短了施工工期, 高空作业量和现场作业人员数量减少, 施工安全可靠性大幅提升, 同时因其对已建工程营运影响小的特点, 为工程带来可观的经济效益。

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.

- [2] 杨有福, 韩林梅. 钢管和混凝土之间粘结强度的探讨[C]//崔京浩. 第十三届全国结构工程学术会议论文集(第Ⅱ册). 北京: 清华大学出版社, 2004: 157-160.
- [3] 王秋维, 王程伟, 刘乐, 等. 钢管混凝土界面粘结性能研究现状与分析进展[J]. 建筑结构, 2021, 51(12): 91-97.
- [4] 吴隽. 钢管混凝土研究现状综述[J]. 福建建设科技, 2021(6): 96-99.
- [5] 张敏, 马建林, 张挣鑫, 等. 钢管复合桩粘结-滑移性能研究[J]. 西南交通大学学报, 2017, 52(3): 540-545, 553.
- [6] 王耀琴, 马建林, 石聪, 等. 剪力环间距对钢管复合桩工作性能的影响研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(S2): 180-184.
- [7] International Organization for Standardization. Petroleum and natural gas industries—fixed steel offshore structures. Second edition: ISO 19902[S]. Geneva: [s. n.], 2020.
- [8] 哈尔滨工业大学, 中国建筑科学研究院. 钢管混凝土结构技术规程: GB/T 51446—2021[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.

(本文编辑 王传瑜)

## 参考文献:

- [1] 中国建筑第五工程局有限公司, 中国建筑股份有限公司. 建设工程施工现场消防安全技术规范: GB 50720—2011[S]. 北京: 中国计划出版社, 2011.
- [2] 王修来, 李柯, 蒋小华, 等. 超大海洋平台模块化建造管道施工工艺研究[J]. 中国造船, 2012, 53(S2): 15-19.
- [3] 张蕊, 于美玉, 叶炯, 等. 一种危险品码头模块化管道装配结构及方法: 202210096269. 9[P]. 2022-05-13.
- [4] 中交第三航务工程勘察设计院有限公司. 浙江石油化工有限公司 4 000 万吨/年炼化一体化项目配套码头工程(一期)液体化工码头施工图[R]. 上海: 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 2018.
- [5] 中交第三航务工程勘察设计院有限公司. 浙江石油化工有限公司液体化工码头(一期)装卸设施改造项目施工图[R]. 上海: 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 2021.

(本文编辑 王传瑜)