



高桩框架式码头结构的温度效应影响分析*

汤益佳¹, 李伟¹, 孙鹏¹, 李筹胜², 诸云鹏², 陈达²

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江杭州 310014;

2. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏南京 210098)

摘要: 随着国内三峡大坝蓄水工程、白鹤滩水电站的建设, 大坝上游的河道水位变化增大, 导致高桩框架式码头的框架高度增加, 其结构段尺寸也随之增加, 温度对结构的影响随着结构尺寸的增加而增大。结合云南省东川港建设项目一期工程格勒旅游中心码头工程, 采用 ANSYS 有限元软件建立温度应力作用下的高桩框架式码头实体模型, 研究温度变化对结构造成的不利影响, 同时研究了水平撑对结构温度效应的影响。结果表明: 季节性升温后, 结构最不利位置位于上层梁及顶板下部, 该区域拉应力较大, 可能出现混凝土拉裂破坏; 季节性降温后, 结构最不利位置位于底梁; 在结构中设置水平撑能够有效降低结构的温度应力。

关键词: 混凝土; 高桩框架式码头; 有限元方法; 温度效应

中图分类号: U 65

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)03-0065-08

Influence of temperature effect on high-pile framed wharf structure

TANG Yijia¹, LI Wei¹, SUN Peng¹, LI Chousheng², ZHU Yunpeng², CHEN Da²

(1. Power China Huadong Engineering Co., Ltd., Hangzhou 310014, China;

2. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Due to the construction of the Three Gorges Dam impoundment project and the Baihetan Hydropower Station in China, the water level of the upstream of the dam varies more dramatically. As a result, the frame height of the high-pile framed wharf increases, and the size of the structural section of the wharf increases accordingly, which further leads to a larger influence of temperature on the structure. By investigating the Gele Tourist Center wharf project, which is a first-phase project of the Dongchuan Port construction project in Yunnan Province, this paper develops a concrete high-pile framed wharf model under temperature stress by the finite-element software ANSYS. Furthermore, it examines the adverse effect of temperature change on the structure and the influence of horizontal braces on the temperature effect on the structure. The results show that after seasonal warming, the most unfavorable position in the structure is at the lower part of the upper beam and the roof in the sense that the tensile stress in this area is large, which may lead to the tensile cracking failure of the concrete. The most unfavorable position in the structure is in the bottom beam after seasonal cooling. Placing horizontal braces in the structure can effectively reduce its temperature stress.

Keywords: concrete; high-pile framed wharf; finite-element method; temperature effect

近年来, 随着水运事业的快速发展, 高桩框架式码头在内河得到越来越多的应用。随着国内三峡大坝蓄水工程、白鹤滩水电站的建设, 大

上游的河道水位变化增大, 码头高度随之增加, 出于对结构整体稳定性的考虑, 码头结构段尺寸也需要同时增大。由于结构段长度与结构温度变

收稿日期: 2022-06-09

*基金项目: 国家自然科学基金项目 (51679071)

作者简介: 汤益佳 (1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为港航工程水工结构。

形及产生的温度应力关系密切，因此温度对于高桩框架式码头结构的影响不容忽视。

混凝土建筑结构在受到温度荷载作用下膨胀、收缩，且结构受到周围约束，从而在结构内部产生应力，即温度应力^[1]。若结构温度应力过大，结构容易出现开裂、成拱等现象，从而影响结构的耐久性及安全性^[2-4]。陈忠华等^[5-6]根据检测成果分析认为，高桩码头纵横梁裂缝主要来源于温度引起的混凝土构件变形。黄沛等^[7]通过试验研究指出温度是导致高桩码头构件损坏的主因。为了分析大型混凝土结构在温差作用下变形、应力分布情况，目前的研究主要集中于理论分析及采用有限元软件进行计算^[8]。在理论分析方面，王铁梦^[9]提出应力分跨总和法用于计算弹性温度，该方法根据温度变化快慢程度取 0.3~0.5 的应力松弛系数。陈达等^[10]以结构力学的力法为基础建立不同跨数、跨度码头结构的桩基水平剪力计算公式，依此获得温度作用下的结构纵向变形公式。

针对结构的温度效应，杜飞飞等^[11]提出为了降低码头结构在使用期的应力与变形，在确定施工期时需考虑尽量减小整体温差。沈才华等^[12]提出叉桩能够有效降低升温给高桩码头带来的温度

效应。Wang 等^[13]对高桩码头的温度应力进行研究，发现在温差作用下，内力最大的桩体位于平台角点处，桩顶内力与桩的刚度成正比。为了减小桩顶的内力，基桩应对称布置，使桩顶位移的径向中心通过温差的作用接近平台的几何中心。

本文结合云南省东川港建设项目一期工程格勒旅游中心码头工程，采用 ANSYS 有限元软件建立温度应力作用下的高桩框架式码头结构模型，分析温度变化对结构造成的不利影响，同时分析水平撑对结构温度效应的影响，为类似结构设计提供参考。

1 工程概况

东川港格勒旅游客运中心一期工程位于云南省昆明市东川区拖布卡镇格勒村小江与金沙江的交汇口，码头平台采用高桩框架结构，尺寸为 161.4 m×96.4 m。

表 1 为工程所在区域 2015—2020 年的气温变化，图 1 为白鹤滩运行调度水位变化。可以看出，工程区达到最低温度时处于每年 1—2 月，此时库区水位在 815~825 m；工程区达到最高温度时处于每年 5—6 月，此时库区水位在 770~780 m。

表 1 2015—2020 年白鹤滩区域气温变化

年份	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年平均	极端最高	极端最低
2015	12.9	17.1	22.9	21.6	26.3	26.8	23.4	22.9	23.1	19.3	18.7	12.5	20.6	39.2	1.1
2016	13.6	11.8	20.6	23.2	25.5	25.1	25.8	25.3	21.7	21.0	16.9	13.7	20.4	37.2	-2.0
2017	15.9	15.2	19.7	21.6	24.6	24.5	24.0	25.1	24.4	20.4	16.6	12.1	20.3	37.7	-1.0
2018	14.0	15.0	21.1	23.5	25.5	23.9	26.5	24.5	23.0	18.8	17.9	15.4	20.8	37.2	0.0
2019	16.0	21.1	20.4	25.3	27.9	28.1	25.0	26.0	23.4	21.6	19.2	13.6	22.3	39.7	2.7
2020	16.1	16.1	22.2	21.9	25.0	28.4	26.4	26.0	22.8	19.6	17.4	12.2	21.2	39.1	1.4

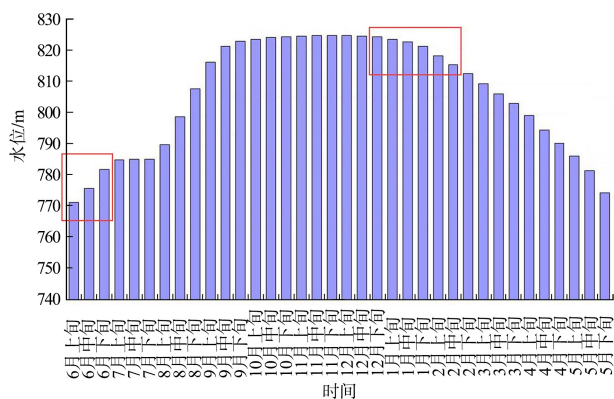


图 1 白鹤滩近年水位变化

2 数值模型建立

2.1 有限元模型

本文根据设计的桩基分布图、码头结构设计图纸、客运中心大楼建筑设计图纸及造型设计图纸建立了格勒旅游中心码头三维有限元模型。如图 2a)，模型中考虑了码头地基土、码头下部桩基、码头主体框架结构、码头上层建筑物，码头结构从左至右依次为客运大楼段、中间段、船头段。

计算任务含有土体、建筑结构等多组实体，

均采用实际尺寸进行模拟, 计算几何模型较为复杂。为减少边界效应的影响, 土体计算模型的范围边界取 228 m×84 m×53 m(长×宽×高)。模型网格划分见图 2b), 土体部分网格尺寸为 10.0 m, 桩基网格尺寸为 1.6 m, 码头主体结构网格尺寸为 2.0 m, 码头上部结构网格尺寸为 1.0 m。

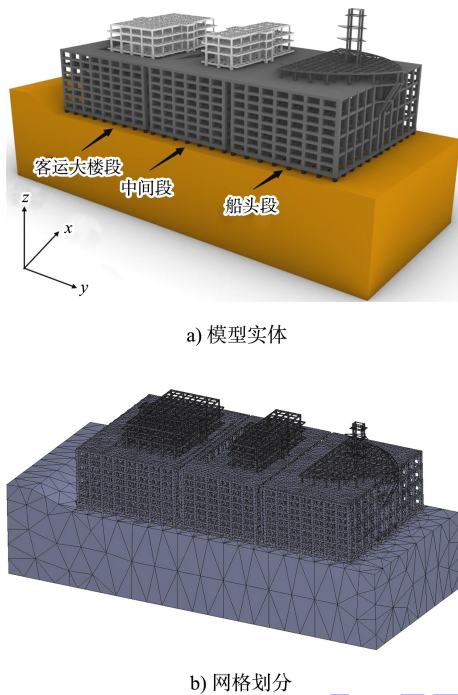


图 2 计算模型

由于土体构成复杂, 土层分布具有不均匀性、各向异性等因素, 且土体地基沉降等因素非本工程考虑重点, 为便于进行数值分析, 对土体进行相应的假设: 假定在同一土层中, 土是均匀、连续的; 土是各向同性的, 即在各方向上具有相同的物理性质。模型中码头框架等混凝土结构均按各向同性弹性材料考虑, 即模型中土体、混凝土结构均采用线性模型, 计算参数见表 2。

表 2 材料参数

材料	密度 $\rho/(t \cdot m^{-3})$	弹性模量 E/MPa	剪切模量 G/MPa
土体	2.0	21	8.75
钢筋混凝土	2.5	30 000	12 800

2.2 工况及荷载

根据水位及气温变化数据, 考虑 3 种分析工况: 1) 自重工况: 仅考虑自重荷载, 不考虑水位与温度变化; 2) 升温工况: 施加温度(升温)与自

重荷载, 水位高度 775 m; 3) 降温工况: 施加温度(降温)与自重荷载, 水位高度 820 m。施加温度荷载时, 升温工况考虑水位位于框架结构以下; 降温工况考虑水位位于框架结构第 7、8 层之间(临近土体地基的底梁为第 1 层, 码头平台的顶梁为第 9 层)。

升温过程模型温度变化见图 3a)。施工期环境温度约为 25 °C, 升温工况模拟施工结束至当地气温达到最高温的过程, 即模型环境温度由 25 °C 提高至 39 °C(极端最高气温平均值)。温度计算平衡后, 将平台顶板温度逐步提高至 52 °C, 模拟 39 °C 环境温度下, 太阳暴晒顶板导致顶板表层温度继续升高的过程; 水位以下桩体及土体由 25 °C 提高至 30 °C, 码头上层建筑物与建筑物所遮蔽的面板由 25 °C 提高至 32 °C。

降温过程模型温度变化见图 3b), 模拟施工结束至当地气温达到最低温时工况, 模型环境温度由 25 °C 降低至 0 °C(极端最低气温平均值); 水位以下框架结构、桩体及土体由 25 °C 降低至 5 °C, 码头上层建筑物由 25 °C 降低至 5 °C。

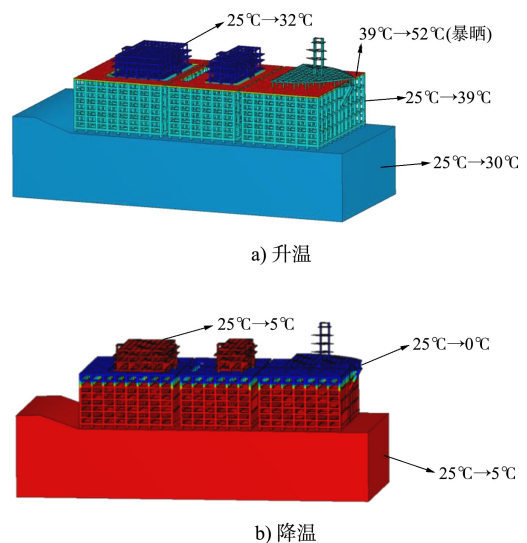


图 3 温度荷载施加过程

3 框架码头结构温度效应分析

考虑到框架码头结构构件较多, 为便于描述, 对本文所研究的大型框架码头结构按横、纵 2 个方向根据柱的位置进行剖分, 横向与纵向剖面的划分见图 4。为便于区分, 为横向剖面编号添加前

缀 A，即横向剖面编号为 A1~A24；为纵向剖面编号添加前缀 B，即纵向剖面编号为 B1~B12，其中偶数层仅在靠船侧 B1、B12 截面布置纵梁。

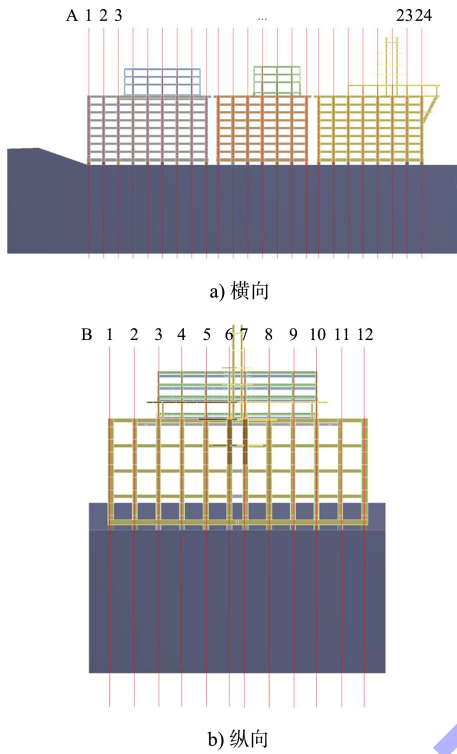
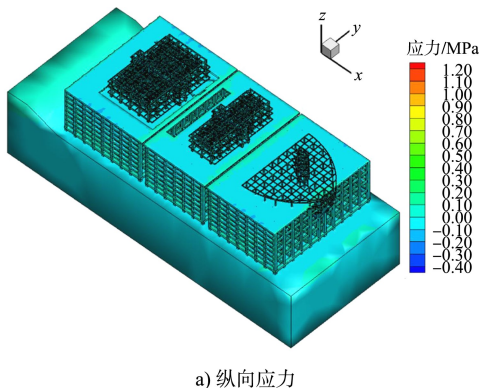


图 4 剖面划分

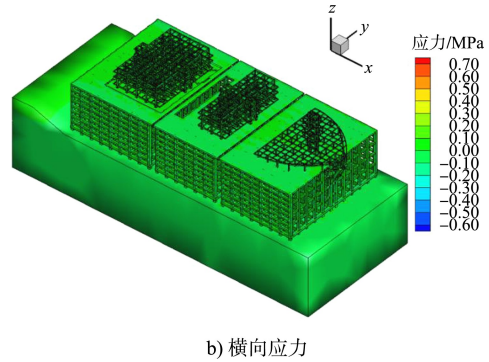
3.1 自重工况

为了更直观地了解温度对高桩框架式码头的影响，本文不考虑其他活荷载对码头结构的影响，选取自重工况作为变温工况的参照工况。

只考虑自重的工况下，梁在不同剖面纵向的最大压应力约为 0.30 MPa，最大拉应力约为 0.80 MPa；梁在不同剖面横向的最大压应力约为 0.30 MPa，最大拉应力约为 0.50 MPa。最大应力均出现在上层建筑物的截面，自重作用下框架码头结构的应力见图 5。



a) 纵向应力



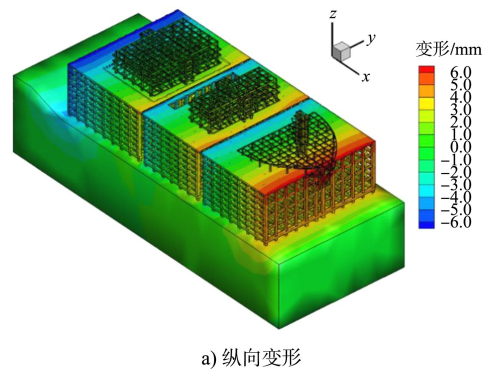
b) 横向应力

图 5 自重工况下码头结构的应力分布

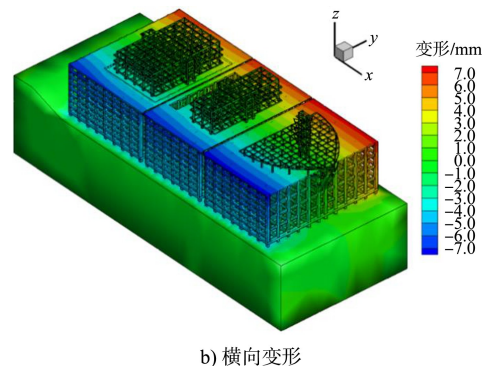
3.2 升温工况

3.2.1 码头结构的变形

从图 6a)中可以看出，由于上层建筑物沿纵向不对称布置，客运大楼段靠近建筑物一侧的码头顶面变形较小，最大纵向变形为 3.0 mm；远离建筑物一侧的码头顶面变形较大，最大纵向变形为 6.0 mm。中间段靠近建筑物一侧的码头顶面最大纵向变形为 4.0 mm；远离建筑物一侧的码头顶面位移最大纵向变形为 5.0 mm。船头段靠近建筑物一侧的码头顶面最大纵向变形为 6.0 mm；远离建筑物一侧的码头顶面位移最大纵向变形为 5.0 mm。



a) 纵向变形



b) 横向变形

图 6 升温工况下码头结构的变形

从图 6b) 中可以看出, 由于上层建筑物沿横向对称布置, 结构的横向变形对称分布。

3.2.2 典型剖面应力分布

在升温工况下, 面板膨胀程度较横梁大, 此时面板受柱的约束而整体受压, 柱受面板膨胀向外位移, 而第 7 层梁受热膨胀程度小于柱的位移, 因此拉应力主要集中在第 7 层梁。选取带有建筑物的截面作为典型截面, 如图 7a) 所示, 纵向拉应力主要分布在第 7 层纵梁及顶纵梁下部, 第 7 层纵梁平均拉应力为 0.40 ~ 1.00 MPa; 如图 7b) 所示, 横向拉应力主要分布在第 7 层横梁及顶横梁下部, 第 7 层横梁平均拉应力为 0.40 ~ 1.00 MPa。

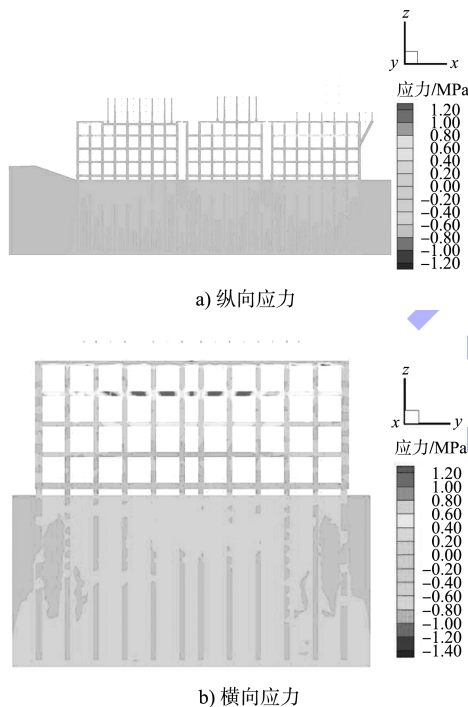


图 7 升温工况下典型剖面的应力分布

从图 7a) 可以看出, 对于客运大楼段与中间段, 由于上层建筑物对面板有遮蔽效果, 建筑物覆盖区域以下的面板膨胀程度小, 同时建筑物的自重也一定程度约束了柱的位移, 因此梁截面拉应力较小; 对于船头段, 由于上层建筑物为镂空结构, 对面板没有遮蔽效果, 因此船头段梁截面拉应力较大。

3.3 降温工况

3.3.1 码头结构的变形

从图 8a) 中可以看出, 带有由于上层建筑物沿

纵向不对称布置, 客运大楼段靠近建筑物一侧的码头顶面变形较小, 最大纵向变形为 5.0 mm; 远离建筑物一侧的码头顶面变形较大, 最大纵向变形为 8.0 mm。中间段靠近建筑物一侧的码头顶面最大纵向变形为 5.0 mm; 远离建筑物一侧的码头顶面位移最大纵向变形为 6.0 mm。船头段靠近建筑物一侧的码头顶面最大纵向变形为 10.0 mm; 远离建筑物一侧的码头顶面位移最大纵向变形为 7.0 mm。

从图 8b) 中可以看出, 由于上层建筑物沿横向对称布置, 结构的横向变形对称分布。

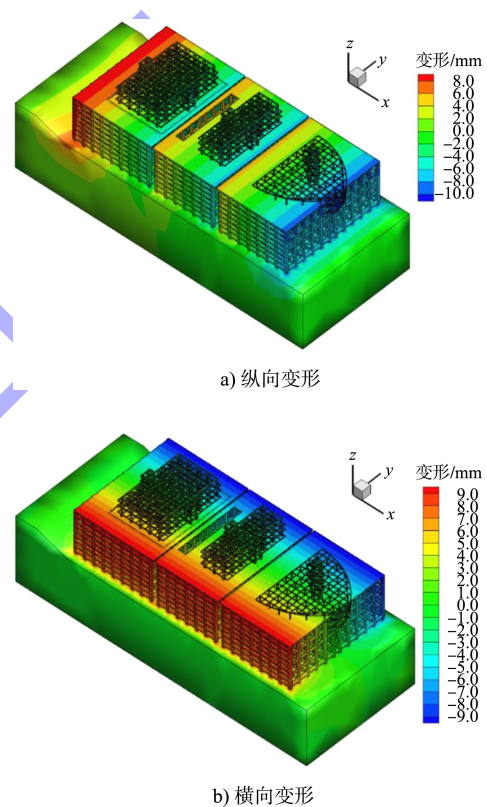


图 8 降温工况下码头结构的变形

3.3.2 典型剖面的应力分布

在降温工况下, 面板及上层梁降温幅度大, 收缩程度较高, 柱由于面板收缩向内位移, 因此上部梁及面板受到较大的压应力; 底梁收缩过程中由于收到桩基约束, 产生较大拉应力, 因此拉应力主要集中在底梁。选取带有建筑物的截面作为典型截面, 如图 9a) 所示, 纵向拉应力主要分布在底纵梁, 平均拉应力为 0.40 ~ 0.80 MPa; 如图 9b) 所示, 横向拉应力主要分布在底横梁, 平均拉应力为 0.40 ~ 1.00 MPa。

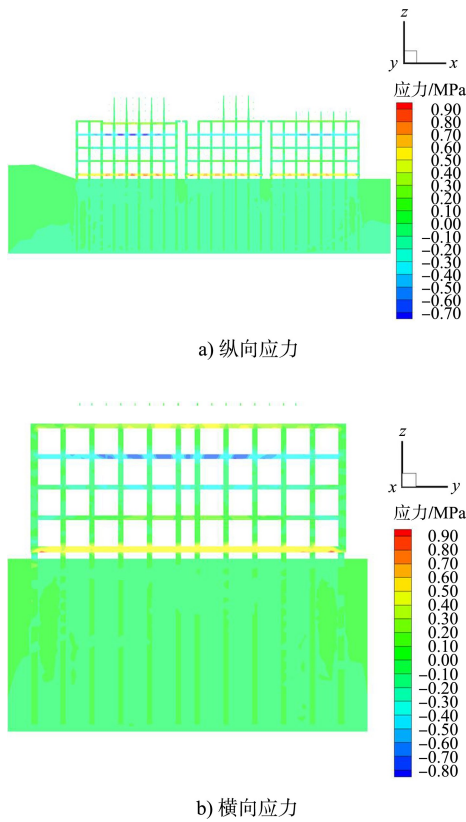


图9 降温工况下典型剖面的应力分布

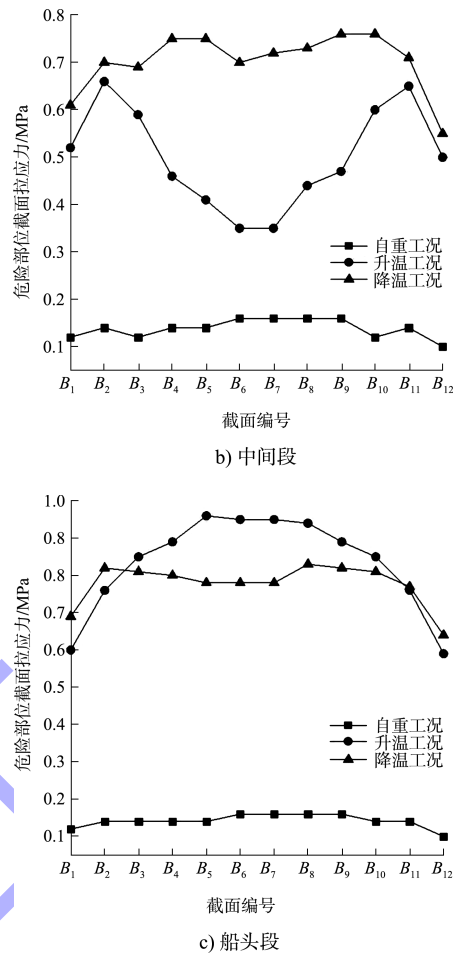
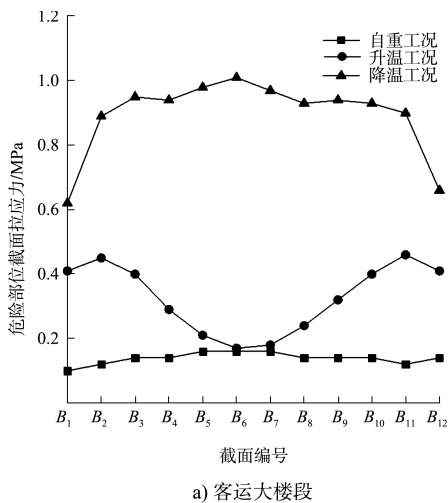


图10 不同结构段各工况下各截面最大纵向拉应力分布

3.4 工况对比分析

3.4.1 纵向拉应力

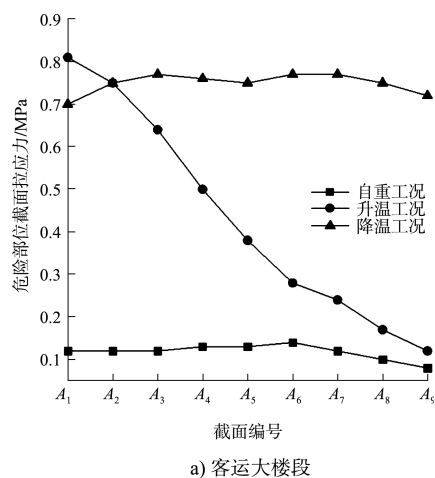
选取自重、升温、降温工况各截面最大纵向拉应力进行对比分析，纵向应力选取危险部位的 $B_1 \sim B_{12}$ 截面，客运大楼段、中间段、船头段在各工况下各截面最大纵向拉应力分布见图10。可以看出，降温工况对客运大楼段与中间段纵向拉应力的影响较大，升温工况对船头段纵向拉应力的影响较大。



a) 客运大楼段

3.4.2 横向拉应力

选取自重、升温、降温工况各截面最大横向拉应力进行对比分析，横向应力选取 $A_1 \sim A_{24}$ 截面，客运大楼段、中间段、船头段在各工况下各截面最大横向拉应力分布见图11。可以看出，降温工况对客运大楼段与中间段横向拉应力的影响较大；升温工况对船头段与中间段横向拉应力的影响较大。



a) 客运大楼段

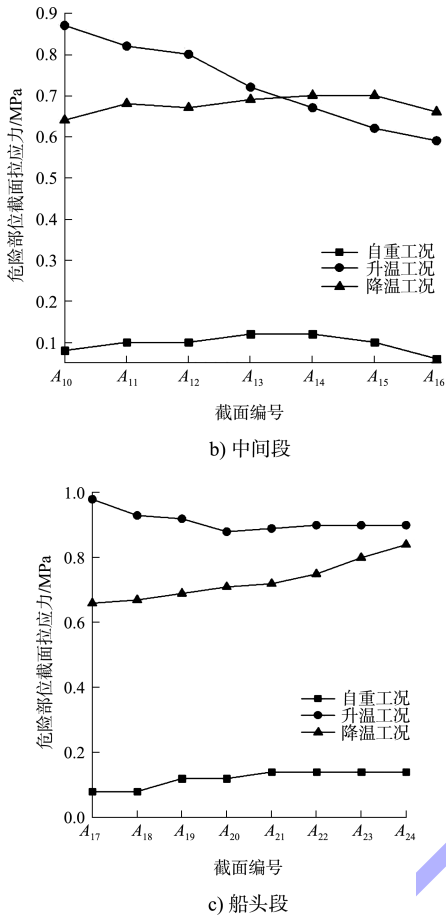


图 11 不同结构段各工况下各截面最大横向拉应力分布

3.4.3 小结

从以上的研究可以看出, 建筑物的存在对结构温度效应存在较大影响, 客运大楼与客运宾馆为结构提供良好的遮蔽效果, 因此升温对结构的影响小于降温对结构的影响; 而船头造型是镂空结构, 不能对结构提供遮蔽, 导致结构受升温的影响较大。

因此, 对于有建筑物遮蔽的结构段需要关注降温对结构的影响, 对于没有建筑物遮蔽的结构段需要关注升温对结构的影响。

3.5 水平撑对结构温度效应的影响

框架码头结构较大, 受力较为复杂, 最常见的优化形式是添加支撑, 沿水平方向布置支撑有利于船舶荷载在结构中的均匀分配^[14], 但对框架结构的温度效应有何影响尚不明确。从以上研究可以看出, 在升温与降温工况下, 结构的第1、7层受到较大拉应力, 且结构危险部位位于梁结构的跨中, 因此考虑在第1、7层沿梁结构跨中位置在整层布置水平撑, 以客运大楼段为例, 图12为水平撑布置。

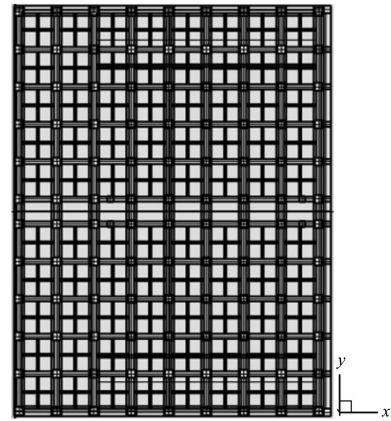


图 12 客运大楼段水平撑布置

考虑到横梁截面较多, 且横梁与纵梁应力分布规律相同, 选取 $B_1 \sim B_{12}$ 截面对结构纵向拉应力进行分析。将布置水平撑后的结构与原结构对比发现, 在升温工况下, 最大纵向拉应力降幅客运大楼段为 6.5%, 中间段为 9.2%, 船头段为 6.3%; 在降温工况下, 最大纵向拉应力降幅客运大楼段为 17.8%, 中间段为 3.9%, 船头段为 22.9%, 水平撑布置对结构温度效应影响见图 13。

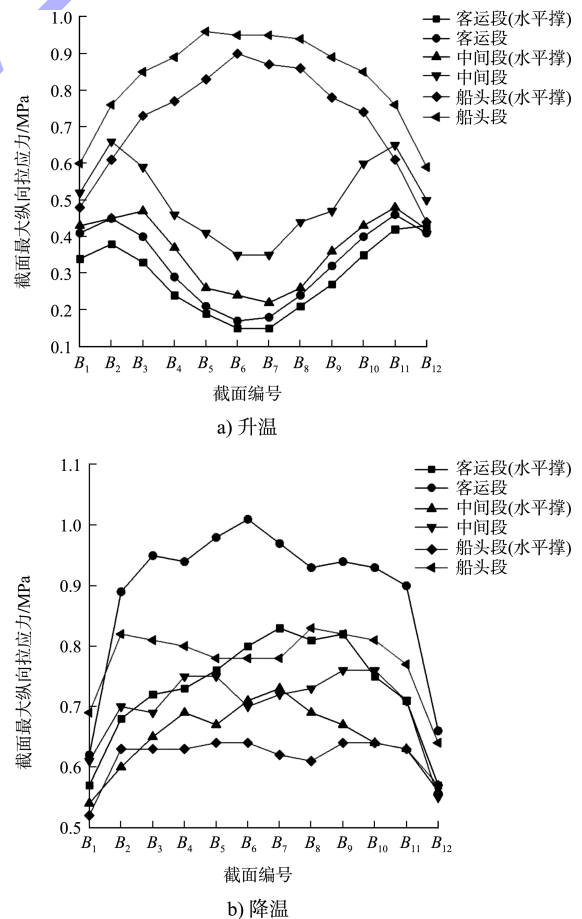


图 13 布置水平撑前后结构各截面的最大纵向应力对比

4 结论

1) 季节性升温后, 结构整体受热膨胀, 在顶板遭受暴晒情况下, 结构最不利位置位于上层梁及顶板下部, 该区域拉应力较大, 容易出现混凝土拉裂破坏。

2) 季节性降温后, 结构最不利位置位于底梁, 该区域拉应力较大, 容易出现混凝土拉裂破坏。

3) 对于有建筑物遮蔽的结构段需要关注降温对结构的影响, 对于没有建筑物遮蔽的结构段需要关注升温对结构的影响。

4) 水平撑对于结构的温度效应具有较好的优化效果, 可使结构的最大拉应力最高达到 22.9% 的降幅。

参考文献:

[1] 蔡惠华. 大体积混凝土温度裂缝施工控制[J]. 水运工程, 2007(6): 112-116.

[2] 赵有富. 公路与桥梁混凝土施工温度与裂缝防治分析[J]. 西部交通科技, 2021(10): 24-26.

[3] 林子超. 高温环境下大体积混凝土温度应力裂缝的施工控制方法[J]. 工程技术研究, 2021, 6(18): 145-146.

[4] 方娥, 康仲录, 康钦禄. 超长垃圾贮坑厂房温度应力分析及预应力设计实践[J]. 建筑技术开发, 2021, 48(17): 15-16.

[5] 陈忠华, 傅翔, 王五平, 等. 高桩码头纵梁裂缝成因分析与对策[J]. 水运工程, 2005(11): 40-44.

[6] 陈忠华, 罗锋, 方卫东, 等. 高桩码头横梁裂缝成因分析与对策[J]. 水运工程, 2006(5): 44-46, 83.

[7] 黄沛, 金秀坤, 王新刚. 天津港高桩码头面层混凝土裂缝成因分析及裂缝控制技术措施[J]. 中国港湾建设, 2009(1): 22-24.

[8] 代礼红, 卢文蕾, 解学超, 等. 应用 ANSYS 软件二次开发进行坞式船闸施工期温度及温度应力仿真分析[J]. 水运工程, 2012 (1): 138-142.

[9] 王铁梦. 工程结构裂缝控制[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.

[10] 陈达, 沈才华. 高桩码头结构分段设计理论和方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012.

[11] 杜飞飞, 龙素华. 码头荷载对全直桩码头分段长度的影响[J]. 港工技术, 2015, 52(6): 42-46.

[12] 沈才华, 牛兴伟, 孙会想. 基于 ANSYS 有限元分析的高桩码头施工期气温控制研究[J]. 水运工程, 2012(11): 89-93.

[13] WANG J J, HE L D, ZHANG Z M, et al. Research on calculation method of internal force caused by seasonal temperature difference in all-vertical-piled wharf [J]. Advanced materials research, 2014 (1065-1069): 503-508.

[14] 李鹏飞, 刘明维, 彭华君, 等. 纵撑对框架码头水平力分配系数的影响[J]. 中国科技论文在线, 2014, 9(11): 1247-1251.

(本文编辑 王传瑜)



(上接第 23 页)

[14] HOLLAND G J. An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes[J]. Monthly weather review, 1980, 108(8): 1212-1218.

[15] YIN C T, ZHANG W S, XIONG M J, et al. Storm surge responses to the representative tracks and storm timing in the Yangtze Estuary, China[J]. Ocean engineering, 2021, 233: 109020.

[16] 王俊, 田淳, 张志林. 长江口河道演变规律与治理研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.

[17] HORSBURGH K J, WILSON C. Tide-surge interaction and its role in the distribution of surge residuals in the North Sea[J]. Journal of geophysical research(Oceans), 2007, 112(C8): C08003.

(本文编辑 武亚庆)