



基于ANSYS有限元分析的高桩码头施工期气温控制研究*

沈才华^{1,2}, 牛兴伟¹, 孙会想¹

(1.河海大学土木与交通学院, 江苏南京210098;

2.河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏南京210098)

摘要: 提出从面板角点位移、上部结构受力和基桩受弯等方面实施多目标控制设计思想, 并通过ANSYS有限元建模分析, 详细地研究了码头面板无温差和有温差两种工况下, 高桩码头结构在不同施工期气温条件下的变形和受力变化规律。由此确定施工期气温控制为: 面板无温差时, 施工期气温控制在11.1℃以上, 能够确保角点纵向位移满足规范要求; 面板有温差时, 则施工期气温需高于21.4℃才能满足要求。

关键词: 多目标控制; 有限元; 施工期气温

中图分类号: U 656.1⁺13

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)11-0089-05

On construction temperature of high-pile wharf based on ANSYS finite element analysis

SHEN Cai-hua^{1,2}, NIU Xing-wei¹, SUN Hui-xiang¹

(1. College of Civil and Transport Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. MOE Key Lab for Geo-mechanics and Dike Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: This paper proposes the idea of multi-objective control with the displacement of corner points, internal force of upper structures and base piles flexural controlled. With the help of building ANSYS finite element model, researches the laws of transformation and the force changes of wharf structure under different construction temperatures when the panel suffers a temperature difference or not. Through these laws, conclusions can be drawn that only when the construction temperature is higher than 11.1℃, can the displacement of corner points meets the regulatory requirements when there is no temperature difference of the panel. And the value should be higher than 21.4℃ when there is a temperature difference.

Key words: multi-objective control; finite element; construction temperature

结构材料温差造成结构应力, 称为温度应力。温度应力与温差大小有关。结构温差可分为混凝土水化热引起的内外温差、结构体系的整体温差、结构构件因日照或寒流引起的梯度温差等3类^[1]。目前, 关于水化热和梯度温差已有较多的研究, 而关于整体温差的研究相对较少。《混凝土结构设计规范》^[2]指出“必要时应对温差问题进行专门的结构分析”(5.3.6款), 但对如何分析没有

给出进一步的说明。事实上, 整体温差的影响主要取决于工程区域年最高气温或者最低气温与施工期气温的差值大小。因而, 在工程区域年最高气温和最低气温确定的情况下, 如何选择合理的施工期就显得很重要。

对于高桩码头混凝土结构而言, 温度应力引起的破损现象一般包括码头上部结构和基桩的开裂、结构构造的破坏(主要出现在伸缩缝和支座

收稿日期: 2012-04-26

*基金项目: 浙江省交通厅科技资助项目(2010W17)

作者简介: 沈才华(1976—), 男, 博士, 讲师, 主要从事数值仿真及结构安全优化研究。

两个部位)等^[3]。因此,本文选择对不同施工期气温条件下的码头面板角点位移、上部结构受力以及码头基桩受弯进行研究,分析不同工况下施工期气温对码头结构的影响规律,为合理的施工期选择提供依据,从而指导设计和施工。

1 典型工程介绍及有限元建模

本文选取浙江省某高桩梁板式码头作为研究对象。该码头位于象山港内,设计船型为3.5万吨级浅吃水经济型散货船。

1.1 气温条件

工程区域地处季风亚热带润湿气候区,根据象山港周边地区4个测站的统计资料,该区域多年平均气温在16.3~17.1℃,历年极端最高气温39.7℃,历年最低气温-9.6℃。四季分明,冬季气温低,春季、秋季气温适宜,夏季高温。

1.2 地质条件

码头前沿附近水底表面以泥质沉积为主,水道底部多为滨海相沉积,以淤泥、粉质黏土为主;呈软塑-流塑状态,中部多为砾沙、碎石及卵石,交错层理发育,稍密,中密;下部多为凝灰岩。有埋深适中的码头桩基持力层。

1.3 码头概况

码头平台长451 m,宽22 m,码头平台结构采用纵横梁等高连接大节点方案,基桩采用外径1 200 mm和壁厚150 mm的预应力高强混凝土(PHC)管桩,横向排架间距为9 m,码头分段长度为76.8 m。码头面高程为6.20 m,前沿设计底高程为-16.40 m。

1.4 三维有限元建模

根据上面介绍的工程概况,取一个完整的工作段作为一个立体网格结构来建立ANSYS地层-桩-结构三维整体模型,为了提高计算效率,在模型中做了以下简化:

1) 将不均匀地层简化为均匀地层,地层类型及每层的土质参数不变。

2) 不考虑相邻基桩对土层的共同影响,即每个基桩只对自己周边的土体发生作用,其他基桩对该区域不产生影响。

3) 地层模型只建立基桩的主要影响区域,影

响区域取为大于6倍桩径的区域。

码头结构由9个排架组成,排架间距9 m,横梁长度31 m,面板分段长72 m。为了便于在后续研究中比较分析各种工况下码头结构段总体变形和位移情况,将码头面上结构段端部4个角点作为研究控制点(图1),同时定义坐标系为: X是指沿着码头长度方向即码头纵向,向右为正; Y是指沿着码头宽度方向即码头横向,向海侧为正; Z是指高度方向,向上为正。码头结构和土体采用实体SOLID45单元,基桩采用BEAM189单元。整体模型共有135 580个单元,183 763个节点(图2)。面板混凝土受气温变化影响的线胀系数 α 取 $1.0 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。

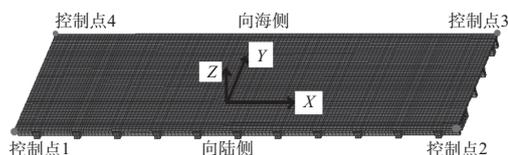


图1 码头分段控制点分布及坐标

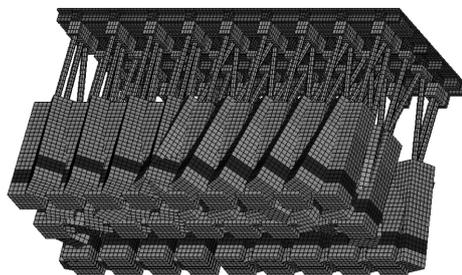


图2 码头三维实体模型

2 施工期气温影响分析

码头结构受到的温度应力与一般混凝土结构一样,分为自生应力和约束应力,此处不再详述。温度应力引起的变形对于码头上部结构内力、变形和基桩受弯均有较大影响,是进行码头结构分段长度和结构缝设计的控制因素。

本文在研究施工期气温的影响时,分为面板有温差(夏天混凝土面板受阳光直射导致面板温度假设高出下部纵横梁10℃)和面板无温差(与面板以下纵横梁的温度相同)两种工况,并将每种工况的施工期气温确定在当地平均气温(16.3 ± 10)℃的范围进行温度应力分析,具体取为6.3℃, 11.3℃, 16.3℃, 21.3℃和26.3℃共5种情况。

2.1 面板位移控制分析

分别取出码头面板4个控制角点的位移值, 包括 X , Y , Z 方向位移和总位移。通过分析发现, X , Y 方向位移变形对下部基桩的受弯有较大影响, Z 向位移变形对基桩的正截面轴心受压承载力有一定影响, 而PHC管桩的正截面轴心受压承载力一般都较大, 如文献[4]通过竖向抗压静载试验得出两种试验桩的极限承载力都为6 400 kN。参照

《混凝土结构设计规范》和文献[5]提出的计算方法可知, 本文使用的PHC管桩的正截面轴心受压承载力为12 290 kN (B型PHC管桩), 足以满足正常工程的需要, 因此只列出不同施工期气温条件下面板 X , Y 向的变形位移及最大相对变化率进行位移控制分析 (表1), 这也有助于下文基桩受弯控制研究。

表1中, U_x , U_y 分别是各控制点在 X , Y 方向

表1 不同环境温度时角点位移

气温/°C	面板无温差								面板有温差							
	控制点1		控制点2		控制点3		控制点4		控制点1		控制点2		控制点3		控制点4	
	U_x /mm	U_y /mm														
6.3	-21.5	-12.2	18.5	-10.4	17.8	2.7	-22.0	1.0	-25.4	-15.7	20.7	-12.3	20.5	4.6	-27.4	1.3
11.3	-18.8	-10.9	15.2	-8.5	14.3	2.7	-19.5	0.2	-21.8	-13.5	18.3	-11.7	18.6	3.4	-23.3	1.5
16.3	-15.8	-9.6	12.2	-6.9	11.2	2.3	-16.7	-0.4	-14.6	-9.0	19.6	-13.1	14.2	0.0	-21.9	4.1
21.3	-13.3	-8.0	8.8	-5.1	7.7	2.1	-14.2	-0.8	-17.4	-11.7	10.8	-7.5	10.4	3.5	-19.7	-0.6
26.3	-10.1	-6.4	6.0	-3.7	5.0	1.5	-11.0	-1.1	-13.3	-9.4	9.0	-6.5	8.9	2.6	-15.2	-0.3

上的位移。通过计算各控制点在不同施工期气温下位移的变化率可以发现, 面板无温差时, 各控制点的 X 向位移变化率平均为85.6%, Y 向位移变化率平均为91.6%; 面板有温差时, 各控制点的 X 向位移变化率平均为48.2%, Y 向位移变化率平均为78.1%, 说明施工期气温对码头面板位移的影响不可忽略。图3为控制点4 (最大位移点) X 方向上位移随施工期气温变化图。

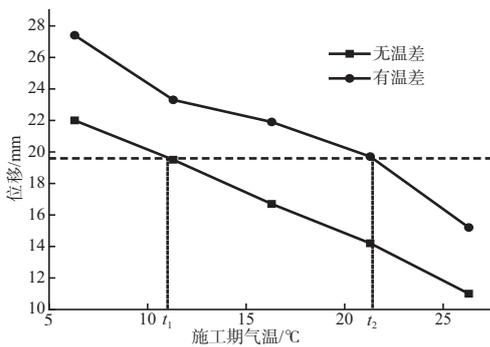


图3 X 向最大位移与施工期气温变化关系

由图3可以看出, 面板无温差时, 控制点处的位移值随施工期气温的增大 (与当地最高气温之间的温差减小), 几乎呈线性下降; 而有温差时, 控制点处的位移值逐步非线性减小。

如果假设码头面板分段之间的伸缩缝宽度为《高桩码头设计与施工规范》规定的上限值 30 mm^[6], 另据有限元接触分析得, 本文实例中面

板分段接触后可以继续变形9.2 mm而不出现挤压破坏, 则当使用期气温为当地最高气温39.7°C, 面板无温差时, 在施工期气温高于 t_1 即11.1°C (插值求得) 的工况下, 相邻码头面板之间的分缝处不会发生挤压破损。而若面板有温差时, 在施工期气温高于 t_2 即21.4°C (插值求得) 的工况下, 面板才不会出现破损, 可见面板温差对接触缝控制有一定影响, 此时, 施工期气温对码头面板变形的影响更明显, 因而对施工期的选择要求也更为严格。

2.2 上部结构内力控制分析

文献[7]调查了天津某高桩码头的破损情况, 分析得知, 温度应力不能释放, 导致多处桩帽和管沟梁等上部结构出现了较为严重的破损。因而有必要对码头上部结构进行内力分析。通过有限元计算发现, 上部结构中的纵横梁和桩帽对施工期气温变化引起的温度应力较为敏感, 不同施工期气温下的上部结构受力及发生部位如表2所示。

表2 不同施工期气温时上部结构受力情况

气温/°C	面板无温差				面板有温差			
	纵横梁		桩帽		纵横梁		桩帽	
	拉应力 /MPa	压应力 /MPa						
6.3	3.06	1.12	2.83	11.2	6.66	5.21	2.86	12.1
11.3	2.97	1.10	2.95	11.2	6.66	5.20	2.82	11.9
16.3	2.84	1.06	3.04	11.2	6.67	5.19	2.79	11.8
21.3	2.76	1.04	2.77	11.2	6.66	5.17	2.79	11.7
26.3	2.64	1.01	2.64	11.1	6.66	5.17	2.79	11.7

从表2可以看出，码头面板无温差时，纵横梁最大拉应力和压应力发生在施工期气温为6.3℃时，其值分别为3.06 MPa和1.12 MPa。随着施工期气温从6.3℃上升到26.3℃，拉应力减小了13.7%，压应力减小了9.8%。面板有温差时，纵横梁的受力比无温差时有所增大，因而施工期气温对纵横梁的受力影响相对要减弱很多，压应力最大变化率仅为0.77%。另外，根据有限元计算云图发现（图4），面板无温差时，最大拉应力和压应力都发生在横梁上，见图4a）；而当面板有温差时，则发生在纵梁上，见图4b）。因此，可以根据码头面板设计时是否采取控制面板与下面结构之间温差的措施，决定对横梁还是纵梁适当提高抗拉强度。

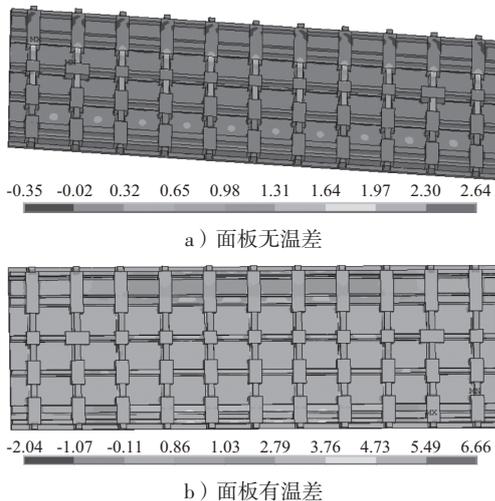


图4 上部结构及桩帽应力云图（单位：MPa）

对于桩帽而言，面板无温差时，拉应力随施工期气温变化规律为先增大再减小，最大拉应力发生在施工期气温为16.3℃时，拉应力最大变化率为13.2%；压应力基本不变，与最大拉应力都发生在桩帽与基桩连接处。面板有温差时桩帽受力几乎不受施工期气温影响，最大拉压应力同样发生在桩帽与基桩连接处。

以上对纵横梁及桩帽的受力分析可见，面板无温差时，施工期气温对上部结构纵横梁拉压应力、对桩帽拉应力的影响有一定的规律性，而桩帽的受压几乎不受影响。如果需要将纵横梁和桩帽的拉压应力控制在较小范围内，则施工期气温应高于16.3℃，这样有利于桩帽的安全。当上部结构有温差时，纵横梁及桩帽的受力相对无温差时均有所增大，导致施工期气温的影响相对减

弱，最大拉压应力作用位置由横梁转向了纵梁。因此，如果码头结构没有采取相应地减小上部结构温差的措施，则在施工期气温较低时应适当提高纵梁的抗拉和抗压强度，以保证码头纵梁的安全。

2.3 基桩受弯控制分析

《混凝土结构设计规范》中，关于管桩正截面承载力计算规定的方程组如式（1）所示，其中各个参数所代表的含义详见该规范。

$$\begin{cases} \alpha_1 \alpha_l f_c A - \sigma_{p0} A_p + \alpha f'_{py} A_p - \alpha_l (f_{py} - \sigma_{p0}) A_p = 0 \\ M_u = \alpha_l f_c A (r_1 + r_2) \frac{\sin(\pi\alpha)}{(2\pi)} + f'_{py} A_p r_p \frac{\sin(\pi\alpha)}{\pi} + (f_{py} - \sigma_{p0}) A_p r_p \frac{\sin(\pi\alpha_l)}{\pi} \\ \alpha_l = 1 - 1.5\alpha \end{cases} \quad (1)$$

文献[8]针对PHC管桩开裂弯矩和极限弯矩提出了修正建议，式（2）对式（1）中的 α 和 α_l 两个参数进行了修正，使得计算值与试验实测值吻合更加良好。

$$\begin{cases} \alpha = 0.25 A_p (5f_{py} - \sigma_{p0}) / [\alpha_l k_c f_c A + f'_{py} A_p + 2(f_{py} - \sigma_{p0}) A_p] \\ \alpha_l = 1.25 - 2\alpha \end{cases} \quad (2)$$

结合式（1）和（2）计算得出，本文使用的PHC管桩开裂弯矩和极限弯矩分别为1 397.29 kN·m和2 515.13 kN·m。在不同施工期气温下，码头基桩受到的最大弯矩及最大受弯桩型如表3所示。

气温/℃	面板无温差		面板有温差		最大受弯桩型
	X向弯矩/ (kN·m)	Y向弯矩/ (kN·m)	X向弯矩/ (kN·m)	Y向弯矩/ (kN·m)	
6.3	595.93	-478.62	576.78	511.56	直桩
11.3	-612.24	444.01	411.03	439.52	直桩
16.3	-488.44	-396.00	445.10	505.96	直桩
21.3	-391.30	-380.60	413.73	-406.44	叉桩
26.3	387.01	-358.82	388.11	-373.59	叉桩

从表3中的数据可见，不同施工期气温条件下码头基桩受到的最大弯矩都小于本例使用的PHC管桩的开裂弯矩和极限弯矩，即对PHC管桩不会造成破坏。

对比表3中数据可以看出，面板无温差时，随着施工期气温的增大，基桩受到X向最大弯矩的变化规律为先增大再减小。施工期气温为11.3℃时，基桩X向弯矩最大。Y向最大弯矩随施工期气温的增大逐渐减小，减小率最大为25%。这是由

于码头横向受到叉桩的约束以及面板受温度应力的影响在 Y 向变形较小, 导致 X 向最大弯矩的变化随施工期气温变化的曲线呈抛物线形, 当施工期气温高于 11.3°C 时便呈下降趋势。而码头面板纵向变形在施工期气温变大时, 逐渐减小, 因而 Y 向受到的最大弯矩也随之减小。面板有温差时, 基桩 X 向和 Y 向受弯规律与此时上部面板的变形规律基本一致, 即在施工期气温为 16.3°C 时, 出现局部极值现象, 这也进一步验证, 上部结构的变形对下部基桩的受弯有较大影响, 同时上部结构又受到下部基桩的约束。

另外, 根据计算云图发现 (图 5), 当施工期气温较低时, 基桩最大弯矩一般发生在直桩上; 而施工期气温较高时, 则发生在叉桩上。从表 3 可以看出, 当施工期气温在 21.3°C 及以上时, 叉桩受到了 X 向和 Y 向的最大弯矩。

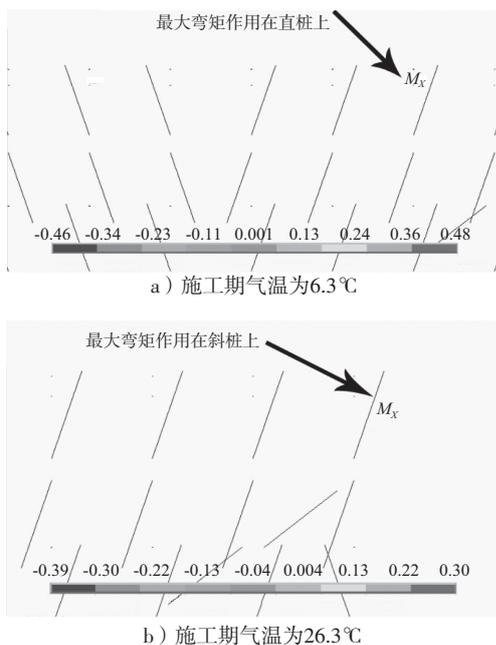


图 5 X 向最大弯矩作用位置 (单位: MPa)

通过对基桩受弯控制分析可知, 面板无温差时, X 向弯矩与施工期气温的变化呈抛物线关系, Y 向弯矩与施工期气温的变化呈线性递减关系。而面板有温差时, X 向和 Y 向弯矩在施工期气温为 16.3°C 时, 均会出现局部极大值, 但总体上施工期气温从 6.3°C 变化到 26.3°C 过程中, 基桩受弯大小还是呈下降趋势。因而, 为了将气温变化引起的基桩受弯大小控制在较小范围内, 在码头面板采取了温差控制措施时, 施工期气温需选择在

11.3°C 以上; 反之, 则需选择在 16.3°C 以上。

3 结语

本文以面板有无温差为基本工况, 分别假设 5 种不同的施工期气温, 将面板角点位移控制、上部结构内力控制和基桩受弯控制作为 3 个控制条件, 对施工期气温的影响规律进行了较为全面的分析。通过分析发现: 面板无温差时, 随着施工期气温的升高, 面板角点最大位移呈线性下降, 上部结构的内力逐渐减小, 基桩在 X 向受弯呈抛物线型变化; 面板有温差时, 受到面板温差的扰动, 角点位移随施工期气温的升高呈非线性下降, 施工期气温对拉压应力的影响相对减弱, 基桩 X 向受弯规律不明显。另外, 不论面板有无温差, 气温的升高均导致叉桩的作用逐渐明显。

基于以上对施工期气温影响规律的分析, 考虑到 PHC 管桩开裂弯矩和极限弯矩较大, 足以满足工程需要, 得出本文实例中, 面板无温差时, 施工期气温需高于 11.1°C ; 面板有温差时, 施工期气温需高于 21.4°C 。本文对施工期气温的影响实施了多目标控制研究, 总结了相应的影响规律; 同时对面板温差存在的干扰, 也进行了对比分析。实际工程中, 可以根据是否采取措施控制上部结构的温差来选择合理的施工期, 从而指导施工。

参考文献:

- [1] 何良德, 张志明, 庄宁. 全直桩码头结构温度应力计算方法[J]. 中国港湾建设, 2010(S1): 123-127.
- [2] GB 50010—2002 混凝土结构设计规范[S].
- [3] 史青芬. 高桩码头结构安全性评估[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2010.
- [4] 吉同元, 方海东, 戴鹏飞, 等. 高桩码头 PHC 管桩试桩试验分析[J]. 水运工程, 2010(6): 45-48.
- [5] 王清, 陈磊, 匡红杰, 等. 预应力混凝土管桩轴心受压承载力计算[J]. 建筑结构, 2011(2): 113-115.
- [6] JTS 1671-1—2010 高桩码头设计与施工规范[S].
- [7] 姬淑琴. 高桩码头伸缩缝对铁路钢轨变形影响的探讨[J]. 水道港口, 2002, 23(S1): 226-231.
- [8] 曾庆响, 梁焕华, 肖芝兰, 等. PHC 管桩的开裂弯矩和极限弯矩计算[J]. 工业建筑, 2010(1): 68-72.