



波浪上托力作用下高桩码头结构的动力分析

卢生军¹, 陈国平²

(1. 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510230;

2. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 通过有限元计算软件ANSYS, 对波浪上托力作用下高桩码头结构进行动力分析。研究表明: 波浪缓变压强作用下, 采用动力计算和采用静力计算得到的码头结构各处的内力基本相同, 波浪缓变压强可等效为静力来计算码头结构内力; 波浪冲击压强作用下, 采用动力计算得到的码头结构内力明显小于静力计算结果, 波浪冲击压强作用下的高桩码头结构宜进行动力分析; 由于波浪上托力频率与码头结构自振频率相差甚远, 因此其作用下的高桩码头结构不会产生共振现象。

关键词: 波浪上托力; 高桩码头; 动力分析

中图分类号: O 353.4; U 656.1⁺13

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)12-0052-05

Dynamic analysis of high-pile wharf under wave uplift force

LU Sheng-jun¹, CHEN Guo-ping²

(1. CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;

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

Abstract: The dynamic analysis of high-pile wharf under the wave uplift force action is carried out by finite element software ANSYS. The results show that the internal force of dynamic and static calculation in all parts of the wharf structure is basically the same under the action of wave slowly varying pressure, so we can calculate the internal force through static analysis; but the internal force of dynamic calculation is much smaller than that of the static calculation under the action of wave impact pressure, therefore the dynamic analysis may be used to consider the interaction between wave impact pressure and high-pile wharf; High-pile wharf does not produce resonance phenomenon under the wave uplift force action because of the huge difference between wave uplift force frequency and structure natural frequency.

Key words: wave uplift force; high-pile wharf; dynamic analysis

随着高桩墩台、高桩梁板等码头结构形式被越来越多地应用于半掩护或无掩护的筑港海域, 如何准确评估波浪对此类码头结构的作用逐渐成为了设计人员所必须关心的问题。关于此类码头结构面板底部所受的波浪上托力, 日本的合田良实^[1], 国内的过达^[2], 周益人等^[3-5], 刘海青等^[6]都曾进行过大量的研究。纵观这些研究成果不难发现, 虽然他们关于波浪上托力大小的研究结果差别较大, 但都发现作用在此类码头面板底部的波

浪上托力具有明显的随时间变化的动荷载特征, 且其通常由一个随时间变化相对较慢的缓变压强和一个随时间急剧变化的冲击压强组成。

目前设计中在考虑波浪上托力对此类码头结构的作用时, 均是忽略结构本身的惯性效应和阻尼, 将其直接等效为静荷载去计算码头结构的内力, 而关于波浪上托力作用下此类码头结构的动力分析还不多。因此, 通过有限元计算软件ANSYS, 对波浪上托力作用下高桩码头结构进行

收稿日期: 2013-04-02

作者简介: 卢生军(1986—), 男, 硕士, 主要从事波浪与水工建筑物的相互作用研究。

动力分析, 并将分析结果与以往的静力分析进行对比, 从而为设计中在考虑波浪对此类码头结构的作用时提供一些参考。

1 单自由度阻尼系统的受迫振动

根据达朗贝尔原理, 单自由度阻尼系统在简谐荷载作用下的运动平衡方程如式(1)所示:

$$F\sin(\theta t) - m\ddot{y}(t) - C\dot{y}(t) - ky(t) = 0 \quad (1)$$

式中: $F\sin(\theta t)$ 为干扰力; $-m\ddot{y}(t)$ 为结构惯性力; $-C\dot{y}(t)$ 为阻尼力; $-ky(t)$ 为弹性力。

引入阻尼比 $\zeta = \frac{C}{2m\omega}$, 于是可得方程(1)在稳态受迫振动时的解为:

$$y(t) = \mu \frac{F}{m\omega^2} \sin(\theta t - \varphi) \quad (2)$$

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{(1 - \beta^2)^2 + 4\zeta^2\beta^2}} \quad (3)$$

式中: 频比 $\beta = \theta/\omega$, 为干扰力频率与结构自振频率之比; μ 为动力放大系数, 是频比 β 与阻尼比 ζ 的函数。

通常阻尼比 ζ 远小于 1.0, 因此, 如果干扰力频率小于结构自振频率, 动力放大系数随着干扰力频率的减小而趋向等于 1.0; 如果干扰力频率大于结构自振频率, 动力放大系数 μ 随着干扰力频率的增加而趋向等于零; 如果干扰力频率等于结构自振频率, 动力放大系数 μ 的大小主要取决于系统阻尼比 ζ 。

2 动力分析模型

选取某高桩梁板式码头的的一个典型结构段进行分析, 断面见图 1。结构段宽 45 m, 长 94 m, 由 14 个横向排架组成。每个排架底部为 8 根直径 914 mm 的钢管桩, 钢管桩间距 6 m, 壁厚 22 mm。

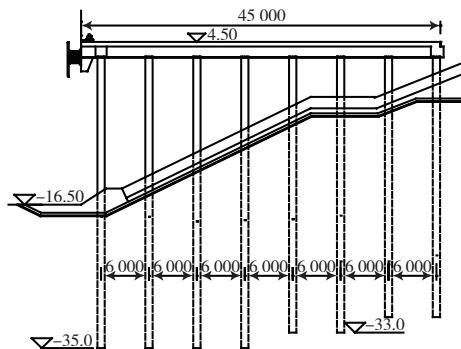


图1 码头结构断面

通过对 ANSYS 的参数化设计语言 APDL 进行二次开发, 建立了用于此结构段动力分析的数值模型。模型采用 shell43 单元模拟码头面板混凝土, 采用 beam188 单元模拟码头纵、横梁及底部钢管桩基础。桩土相互作用根据分层 m 法原理采用线性弹簧单元 combin14 模拟, 整个动力分析模型见图 2。

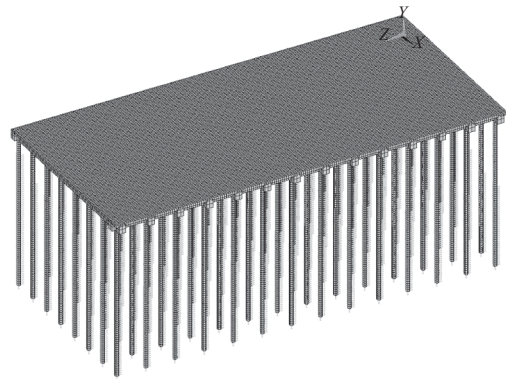


图2 动力分析模型

3 模型参数

此动力分析模型的参数主要包括系统的有效质量、地基土弹簧刚度系数、系统阻尼以及用于动力计算的波浪上托力时程荷载。

3.1 系统的有效质量

系统的有效质量主要包括结构本身的质量、附加水质量以及附加土质量。由于此高桩码头位于水中及土中的体积较小, 因此本模型忽略附加水质量及附加土质量, 结构本身的质量通过定义不同区域材料的密度来考虑。

3.2 地基土弹簧刚度系数

模型中的弹簧主要有两类, 一类是桩侧水平支撑弹簧, 用于模拟地基土对桩的水平支撑作用; 另一类是桩底端承弹簧, 用于模拟地基土对桩的竖向支撑。其中, 桩底端承弹簧的刚度系数按下式计算:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{C} - \frac{L_b}{EA}} \quad (4)$$

式中: K 为弹簧刚度系数 (N/m); L_b 为分层 m 法和加权 m 法时, 取桩的入土长度 (m); E 为桩材料的弹性模量 (N/m²); A 为桩身截面积 (m²); C 为桩入土部分的单位变形所需的轴向力 (N/m),

并按下式计算：

$$C = T_c Q_{ud} \quad (5)$$

式中： T_c 为系数（ m^{-1} ），钢管桩和混凝土桩均取130； Q_{ud} 为单桩垂直极限承载力标准值（N），按《港口工程桩基规范》有关规定计算；桩侧水平弹簧的刚度系数按下式计算：

$$K_h = m b_0 h z \quad (6)$$

式中： K_h 为水平弹簧刚度系数（N/m）； m 为弹簧位置处桩侧地基土的水平抗力系数随深度增长的比例系数（ N/m^4 ）； b_0 为桩的换算宽度（m）； h 为弹簧作用的厚度（m）； z 为弹簧位置距泥面的垂直深度（m）。

3.3 系统阻尼

阻尼是描述振动系统在振动时能量损耗的总称，实际结构振动时耗能是多方面的，具体形式相当复杂。

经过多年的研究，国内外许多学者已经提出了各种各样的阻尼表达方法，主要分为黏性阻尼和滞后阻尼。而对结构动力计算中的黏性阻尼和滞后阻尼，在ANSYS中可以通过Rayleigh阻尼形式表示，即

$$C = \alpha M + \beta K \quad (7)$$

其中 α 、 β 为瑞利阻尼系数：

$$\alpha = \frac{2\omega_1\omega_2(\varepsilon_1\omega_2 - \varepsilon_2\omega_1)}{\omega_2^2 - \omega_1^2} \quad (8)$$

$$\beta = \frac{2(\varepsilon_2\omega_2 - \varepsilon_1\omega_1)}{\omega_2^2 - \omega_1^2} \quad (9)$$

式中： ω_1 、 ω_2 为振动体系的第一、第二阶角频率； ε_1 、 ε_2 为第一、第二阶振型阻尼比^[7]。计算中，固定阻尼比 ε_1 和 ε_2 ，然后由结构的振动频率 ω_1 和 ω_2 计算得到瑞利阻尼系数从而实现黏性阻尼和滞后阻尼。

3.4 波浪上托力时程荷载

要获得一段时间内连续作用在码头面板底部的波浪上托力，通常可以采用理论求解、数值模拟、物理模拟或者现场测量等方法。综合考虑各种方法的精度以及实际的可操作性，最终通过物理模型试验获得作用于此高桩码头面板底部的波浪上托力时程荷载。

通过二维不规则波浪水槽试验，测量得到

作用在此码头面板底部的波浪上托力时程曲线（图3）。

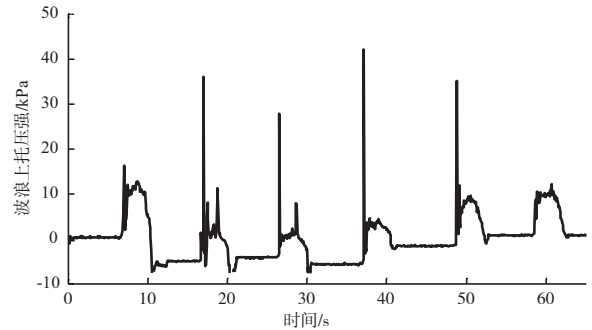


图3 波浪上托力时程曲线

4 结构动力特征

通过ANSYS进行模态分析，获得此码头结构的主要振型及其相应的自振频率见表1，图4和5。

表1 结构自振频率计算结果

阶数	1	2	3	4	5
频率/Hz	7.8	7.9	8.1	8.4	8.5

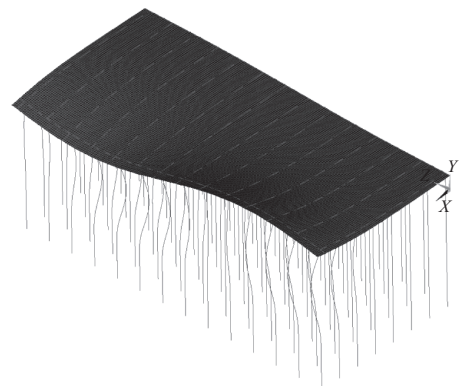


图4 一阶振型（频率为7.8 Hz）

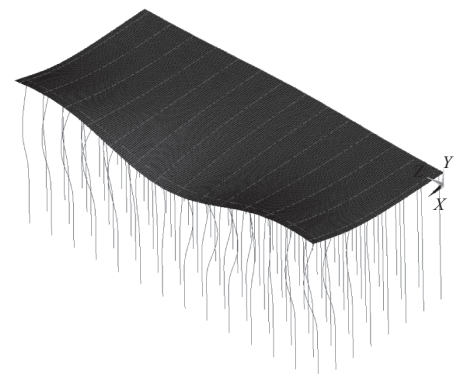


图5 二阶振型（频率为7.9 Hz）

5 计算方法及计算结果

根据波浪上托力时程曲线, 选取一段典型的带有缓变压强过程与冲击压强过程的波浪上托力时程曲线, 进行人为的光滑处理, 得到用于码头结构动力计算的波浪上托力时程荷载 (图6)。

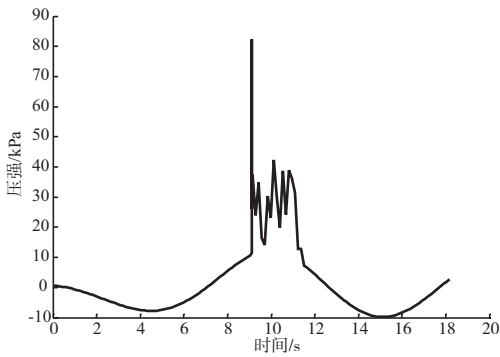


图6 用于计算的波浪上托力时程荷载

1) 动力计算。

考虑结构本身的惯性效应和阻尼效应, 将波浪上托力时程荷载作用在码头面板底部, 根据ANSYS的时程分析模块对码头结构进行动力分析。

2) 静力计算。

忽略结构本身的惯性效应和阻尼效应, 从波浪上托力时程荷载曲线上选取若干波浪上托力值, 然后将其按照静力作用在码头结构面板底部, 通过ANSYS的静力学分析模块, 分别对不同大小波浪上托力作用下的码头结构进行静力分析。

通过以上两种不同计算方法, 分别得到此码头结构不同位置处的内力 (图7~10)。

可以看出, 对于0~9 s这段缓变压强作用下的码头结构内力, 采用动力计算和采用静力计算得到的结果基本重合, 而对波浪冲击压强作用下的码头结构内力, 采用动力计算得到的结果均明显

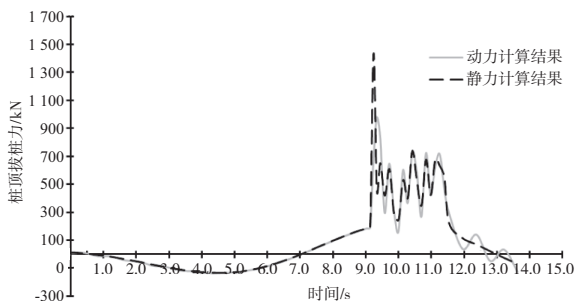


图7 桩顶拔桩力

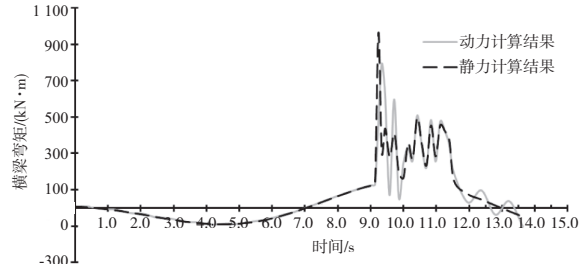


图8 横梁弯矩

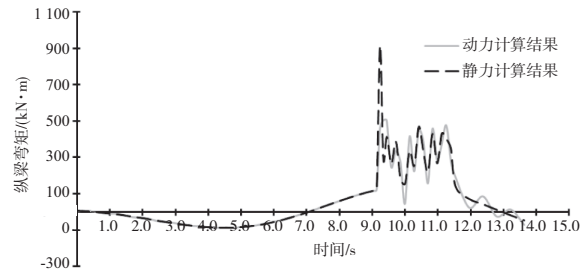


图9 纵梁弯矩

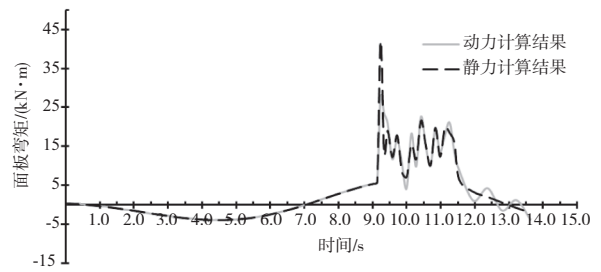


图10 面板弯矩

小于静力计算结果。波浪冲击压强峰值作用下码头结构各处内力最大值见表2。

表2 码头结构各处内力最大值

内力	桩顶拔桩力/ kN	横梁弯矩/ (kN·m)	纵梁弯矩/ (kN·m)	面板弯矩/ (kN·m)
静力	1 434.29	963.71	913.46	42.05
动力	977.88	793.94	459.74	27.75

从表2可以看出, 波浪冲击压强峰值作用下的码头结构内力, 动力计算结果约为静力计算结果的0.5至0.82倍。

6 计算结果分析

根据单自由度阻尼系统的受迫振动分析可以得出, 动荷载作用下结构的反应不仅与其刚度、质量、自振频率和阻尼等有关, 还与强迫力的频率有关。

当强迫力频率低于结构自振频率时,结构的反应趋向于静态反应,此时其主要由弹性刚度所控制。由于波浪缓变压强频率与入射波频率相同,其值通常介于0.05~0.20 Hz,而由模态分析得到的此高桩码头结构的最小自振频率为7.8 Hz,此时波浪缓变压强频率远小于结构自振频率,缓变压强作用下的结构反应主要由结构本身的刚度控制,且趋于静态反应,因此采用动力计算和采用静力计算得到的码头结构内力基本相同。

当强迫力频率高于结构自振频率时,结构的反应随强迫力频率的增加而减小,此时结构的反应主要由其质量控制。由于波浪冲击压强对码头面板的作用时间极短,且在一个波周期内只出现一次或几次,其频率通常达到50 Hz或者更大,此时波浪冲击压强频率远大于结构自振频率,其产生的结构动力反应小于由同样数值的静力产生的反应,因此采用动力计算得到的码头结构各处内力均小于由静力计算得到的结果。

当强迫力频率等于结构自振频率时,结构的反应主要由其阻尼比控制,此时的结构动力反应比相应数值的静态反应大许多,即产生共振现象。通常作用在高桩码头面板底部的波浪上托力包含一个缓变压强部分和一个冲击压强部分,但是由于缓变压强频率远小于结构自振频率,而冲击压强频率又远大于结构自振频率,因此波浪上托力作用下高桩码头结构不会产生共振现象。

由于结构的动力反应还与其本身的质量分布、刚度以及自振频率等因素有关,因此波浪冲击压强峰值作用下的码头结构内力,动力计算结果与静力计算结果的比值在码头各位置处各部相同。

7 结论

1) 对作用在高桩码头面板底部的波浪缓变压

强,采用动力计算与采用静力计算,得到的码头结构各处内力基本相同,波浪缓变压强可直接等效为静力来计算码头结构内力。

2) 对作用在高桩码头面板底部的波浪冲击压强,采用动力计算与采用静力计算,得到的码头结构各部内力、动力计算结果均明显小于静力计算结果;相同冲击峰值产生的码头结构内力,动力计算约为静力计算的0.5~0.82倍;因此,对作用在高桩码头面板底部的波浪冲击压强,设计中宜按动荷载进行动力分析。

3) 由于作用在高桩码头面板底部的波浪上托力频率与结构的自振频率相差甚远,因此其作用下的高桩码头结构不会产生共振现象。

参考文献:

- [1] 合田良实. 構造物に動く波力[G]//1967年度水工学に関する夏期研修会讲义集. 东京: 海岸港湾コース, 1967: 1-34.
- [2] 过达, 蔡保华. 透空式建筑物面板波浪上托力计算[J]. 华东水利学院学报, 1980(1): 14-33.
- [3] 周益人, 陈国平, 黄海龙, 等. 透空式水平板波浪上托力冲击压强试验研究[J]. 海洋工程, 2004(3): 30-40.
- [4] 周益人, 陈国平, 王登婷. 斜坡封闭式水平板波浪上托力计算方法及实例应用[J]. 水动力学研究与进展, 2004(9): 73-78.
- [5] Zhou Yi-ren, Chen Guo-ping. Uplift pressure of waves on a horizontal plate[J]. China Ocean Engineering, 2003, 17(3): 355-368.
- [6] 刘海青, 杨鹏. 斜坡接岸码头面板波浪上托力出现类型和统计分布[J]. 港工技术, 1998(3): 5-9.
- [7] 邱驹. 港口水工建筑物[M]. 天津: 天津大学出版社, 2002.

(本文编辑 武亚庆)