



L型框架码头扭转耦联振型反应谱分析

莫 鎏^{1,2}, 何光春^{1,3}, 朱 擘^{1,2}

(1.重庆交通大学 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074;

2.重庆交通大学 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074; 3.西南水运工程科学研究所, 重庆 400074)

摘要: L型框架码头平面布置不规则, 质量、刚度不均匀、不对称, 水平地震作用下应考虑扭转影响。采用SAP2000有限元分析软件, 考虑沿建筑结构的两个主轴方向及与主轴斜交方向的水平地震作用, 对内河某L型布置的框架码头进行扭转耦联的振型反应谱分析。通过数值计算求得L布置码头结构在地震作用下的内力反应和位移变形, 对码头结构的动力承载性状做出了评价, 找出结构薄弱位置, 为该类工程的结构设计和方案优化提供参考依据。

关键词: 振型反应谱; 扭转耦联; L型框架码头; 数值计算

中图分类号: U 656.1⁺13

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)05-0068-04

Elastic response spectrum considering torsion-coupled effects of L-framed wharf

MO Wu^{1,2}, HE Guang-chun^{1,3}, ZHU Bo^{1,2}

(1. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of the Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University,

Chongqing 400074, China; 3. Southwest Water Transport Engineering Institute, Chongqing 400074, China)

Abstract: L-framed wharf is irregular in plan with uneven distributed mass and stiffness, and torsion effect shall be considered under the horizontal earthquake effects. Using the finite element analysis software SAP2000, and considering the horizontal earthquake induced response along two main axes direction and spindle oblique direction of the structure, this article analyzes the elastic response spectrum considering torsion-coupled effects of L-framed wharf in inland river. Based on the numerical calculation for the internal force response and displacement deformation of this arrangement wharf structure under seismic action, this paper makes the evaluation for the dynamic bearing behavior of the wharf structure, and finds out the structural weak position, serving as reference for the engineering structure design and optimization.

Key words: elastic response spectrum; torsion-coupled effects; L-framed wharf; numerical calculation

长江中上游河段属于大型山区河流, 水位落差随季节变化, 最大可达30 m以上。直立式框架码头因适应内河水位变化能力强, 在长江中上游乃至整个山区河流逐渐成为主要的码头结构形式^[1]。对规则布置的码头结构抗震性能已有不少研究, 贾宏宇等^[2]对寸滩港架空直立式集装箱码头进行了有限元动力仿真计算; 李颖等^[3]采用了超级桩

模型对预应力高桩码头进行了地震响应分析。而平面布置不规则、不对称的码头形式应考虑质量和刚度的偏心引起的地震扭转效应及地震地面运动扭转分量的影响^[4], 其震害较对称布置的码头结构有所不同, 因此, 有必要对其进行水平地震作用下扭转影响的抗震反应分析。

本文主要研究对象为“L”型布置的内河高

收稿日期: 2012-10-20

作者简介: 莫鎏(1989—), 女, 硕士, 主要从事港口、航道及近海工程设计。

桩框架码头, 考虑双向水平地震作用的扭转效应进行抗震反应分析。对不规则框架码头进行抗震分析, 能够为码头结构抗震相关设计以及规范改进积累经验和资料。

1 相关理论

作为结构抗震设计的基础理论之一, 反应谱被广泛应用于结构抗震分析和设计, 并被大多数地震国家的结构抗震设计规范所采用^[5]。根据GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》^[6]5.2.3规定, 建筑结构估计水平地震作用扭转影响时, 应采用振型分解反应谱法。

多层结构体系考虑平移-扭转耦联振动时, 其运动微分方程可表示为:

$$\mathbf{M} \times \ddot{\mathbf{D}}(t) + \mathbf{C} \times \dot{\mathbf{D}}(t) + \mathbf{K} \times \mathbf{D}(t) = -\mathbf{M} \times \ddot{\mathbf{D}}_g(t) \quad (1)$$

式中: $\mathbf{M}$ 为广义质量矩阵; $\mathbf{C}$ 为阻尼矩阵; $\mathbf{K}$ 为广义侧移刚度矩阵; $\mathbf{D}(t)$ 为广义位移向量; $\mathbf{D}_g$ 为地面运动水平加速度时间历程函数。

将振型向量 $\mathbf{X}_j$ ($j=1, 2, \dots, 3n$) 的集合, 即振型矩阵 $\mathbf{A}$ 代入方程(1), 利用振型正交原理, 将方程(1)分解为 $3n$ 个相互独立的二阶微分方程, 代入相应振型自振周期的地震影响系数 α_j , 并对方程进行变形, 得到考虑扭转地震效应时 j 振型 i 层的水平地震作用标准值计算公式:

$$\begin{cases} F_{xji} = \alpha_j \gamma_{ij} X_{ji} G_i \\ F_{yji} = \alpha_j \gamma_{ij} Y_{ji} G_i \\ F_{tji} = \alpha_j \gamma_{ij} r_i^2 \phi_{ji} G_i \end{cases} \quad (2)$$

$i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m$

式中: $F_{xji}, F_{yji}, F_{tji}$ 分别为 j 振型 i 层的 x 方向、 y 方向和转角方向的地震作用标准值; X_{ji}, Y_{ji} 分别为 j 振型 i 层质心在 x, y 方向的水平相对位移; ϕ_{ji} 为 j 振型 i 层的相对扭转角; r_i 为 i 层转动半径; γ_{ij} 为计入扭转的 j 振型的参与系数。

由式(2)计算得到相应各振型的水平地震作用 F_j , 即可计算出振型水平地震作用 F_j 产生的作用效应 S_j , 然后将各振型的地震作用效应 S_j 进行组合获得总的地震效应 S_{EK} 。

单向水平地震作用的扭转效应公式:

$$S_{EK} = \sqrt{\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m \rho_{jk} S_j S_k} \quad (3)$$

$$\rho_{jk} = \frac{8\zeta_j \zeta_k (1 + \lambda_T) \lambda_T^{1.5}}{(1 - \lambda_T)^2 + 4\zeta_j \zeta_k (1 + \lambda_T)^2 \lambda_T} \quad (4)$$

式中: S_{EK} 为地震作用标准值的扭转效应; S_j, S_k 分别为 j, k 振型地震作用标准值的效应; ζ_j, ζ_k 分别为 j, k 振型的阻尼比; ρ_{jk} 为 j 振型与 k 振型的耦系数; λ_T 为 k 振型与 j 振型的自振周期比。

双向水平地震作用的扭转效应, 按下列公式中的较大值确定:

$$S_{EK} = \sqrt{S_x^2 + (0.85S_y)^2} \quad (5)$$

$$S_{EK} = \sqrt{S_y^2 + (0.85S_x)^2} \quad (6)$$

式中: S_x, S_y 分别为 x 向、 y 向单向水平地震作用按式(3)计算的扭转效应。

2 工程实例

2.1 工程概况

图1为重庆某内河高桩框架码头结构断面, 根据工程实际, 采用了“L”型布置形式。码头平台下游宽度为28 m, 上游宽度为16 m, 码头前沿长度为48.6 m, 按二级建筑物设计。排架间距为8 m, 共6跨7榀排架。横向桩距为6 m, 下游侧共4跨, 5列桩基; 上游侧共2跨, 3列桩基。桩基采用嵌岩钻孔灌注桩, 前3排桩径为1.6 m, 共21根, 后2排桩径为1.2 m, 共8根, 前两排桩顶用底横撑连接。设计高水位为293.00 m, 设计低水位为278.00 m, 码头结构为5层系统。

2.2 数值模型及抗震设计反应谱

采用有限元计算软件SAP2000进行抗震反应谱分析, 混凝土强度等级为C30, 弹性模量为30 GPa。计算荷载除结构自重外, 同时考虑均布荷载作用, 均布荷载值20 kPa, 组合值系数1.0。计算模型将桩基设置为固结, 桩尖处约束 X, Y 和 Z 方向的位移。结构惯性力可作为静荷载加载到框架上, 加速度荷载在每个节点和单元上都计算, 并在整个结构上求总和。数值模型如图2所示。

根据文献[6], 同时考虑汶川地震对西部地区的巨大影响, 抗震设防烈度按6度考虑, 设计基本地震加速度0.05g, 设计地震分组为第1组, II类场地, 特征周期 $T_g=0.35$ s, 结构阻尼比 $\zeta=0.05$, 对应基本烈度的水平地震影响系数最大值 $\alpha_{\max}$ 为0.04。可得所采用的反应谱曲线, 如图3所示。

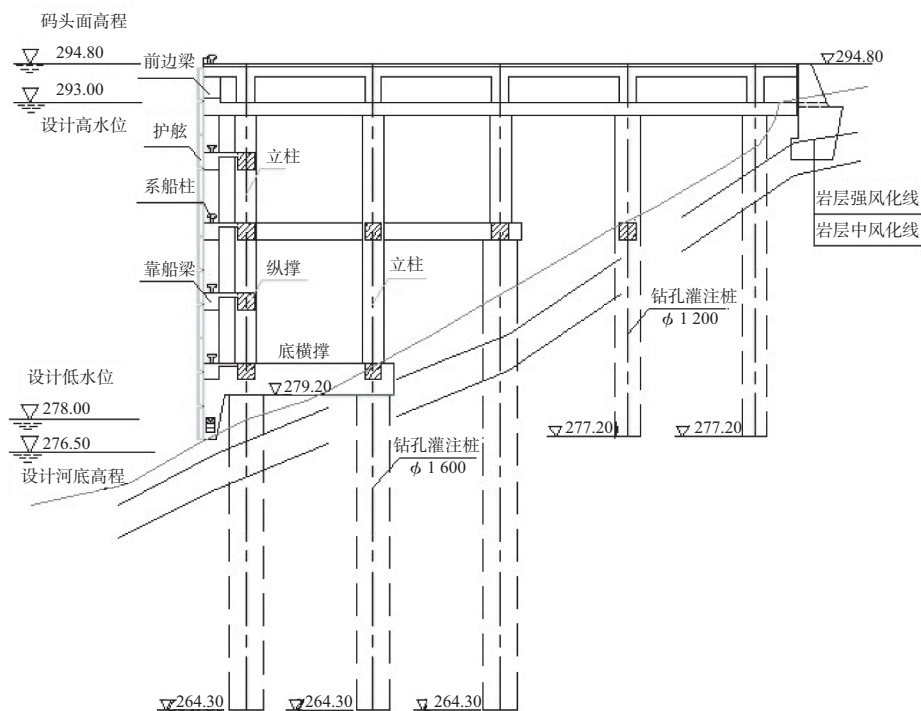


图1 码头结构典型断面

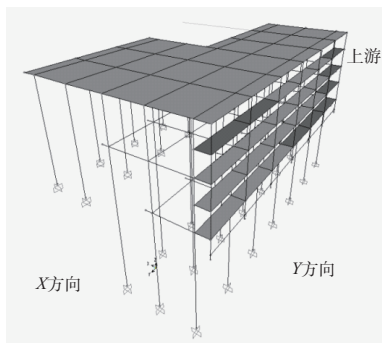
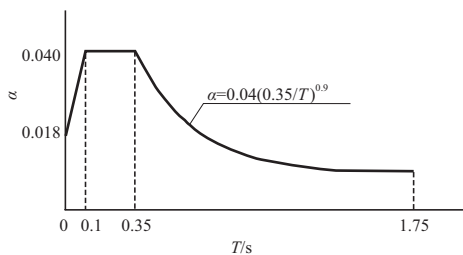


图2 数值模型



注: α 为地震影响系数, T 为结构自振周期(s), 阻尼比 $\zeta=0.05$ 。

图3 设计反应谱曲线

2.3 分析结果及评价

分别以平行横向排架的X方向、顺河的Y方向等2个方向施加水平激励, 按式(3)进行振型组合, 式(5), (6)进行方向组合。对码头进行模态分析可知码头结构第7阶振型在X,Y方向的振型参与质量已超过了90%, 故取前7阶振型进行反应谱分析。结构前7阶振型信息见表1。

表1 结构前7阶振型信息

振型数	周期/s	振动方式
1	0.786 715	Y向平动
2	0.714 052	X向平动
3	0.624 984	扭转
4	0.199 015	X向平动+扭转
5	0.184 239	X向平动+扭转
6	0.180 771	Y向平动+扭转
7	0.156 254	竖向振动

由表1可知, 各排架在平面内扭动的主振型为三阶模态振型, 该阶模态对应频率为1.600 Hz, 周期为0.625 s。码头结构总位移及X方向、Y方向位移见图4~6, 结构顶部X方向、Y方向最大位移值见表2; 将L型框架码头结构自上而下分为3层, 在双向地震水平激励下每层的扭矩见图7~9。

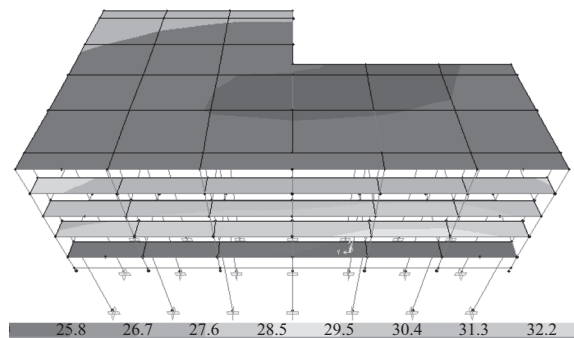


图4 码头结构变形 (单位: mm)

表2 码头结构顶部最大位移值

X向/mm	Y向/mm	相对位移差/%
23.53	25.95	9.6

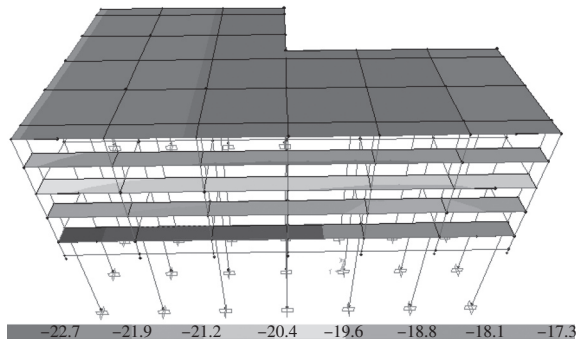


图5 码头结构X轴方向位移 (单位: mm)

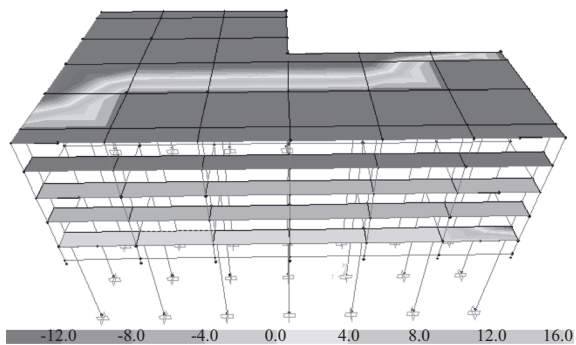


图6 码头结构Y轴方向位移 (单位: mm)

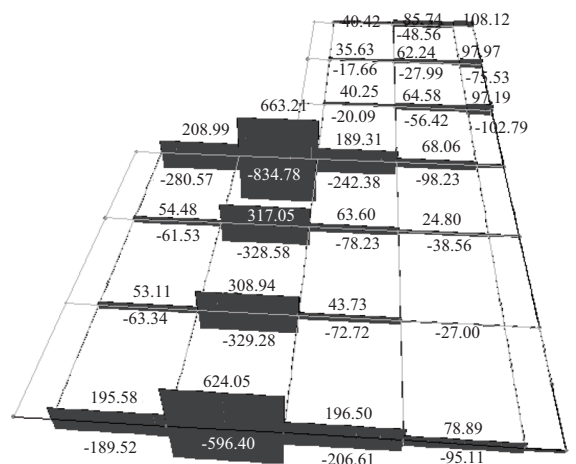


图7 结构第1层扭矩 (单位: kN/m)

从表2可以看出, 码头结构在X方向和Y方向位移值都较小, 相对位移差不超过14%, 码头结构在两个方向上的刚度差值较小, 结构整体受力性能较好。

从图5可以看出, 每列排架在X轴方向位移相差不大, 排架间位移变化平稳; 从图6可以看出, 排架Y轴方向位移沿L型布置转折处存在位移值突变, 可知码头结构L型平面布置对沿X方向各横向

排架间刚度变化影响较大, 码头结构在该方向存在较大刚度差。

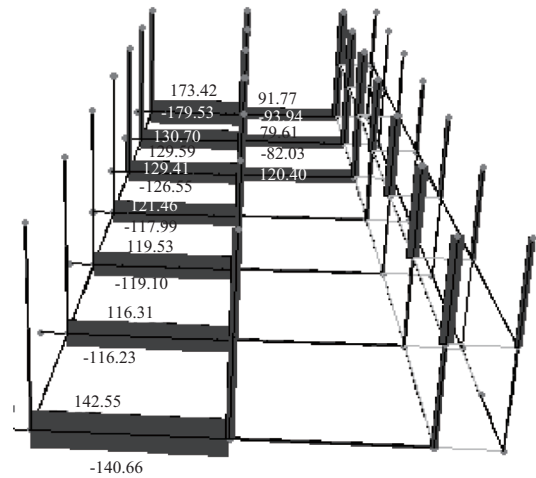


图8 结构第2层扭矩 (单位: kN/m)

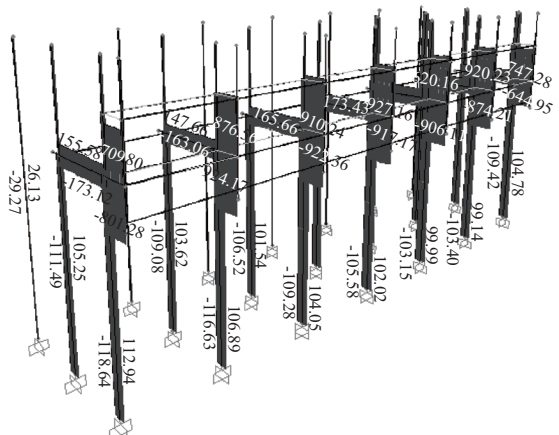


图9 结构第3层扭矩 (单位: kN/m)

从图7~9可以看出, 在双向水平地震作用下, 平行X方向的梁构件如底横撑、横梁、横撑等均产生了较大扭矩, 而平行于Y轴方向的梁构件和Z轴方向的柱构件产生的扭矩都较小, 码头结构扭矩主要由第2,3榀横向排架间的X向梁构件承担。

比较图6和7的位移-内力变化, 扭矩较大值产生在L型转折处和码头前沿, 与Y轴方向位移的相对位移差较大处和绝对位移值较大处相符合, 结构扭矩主要由Y轴方向位移引起。

从图7~9可以看出, 码头竖向第1层最大扭矩产生于码头中后部梁构件, 第3层最大扭矩产生于码头前沿梁构件, 且顺河方向码头上游梁构件扭矩大于下游梁构件, 与总位移图相符合, 码头在地震作用下发生了整体扭转。

(下转第93页)