

· 港口 ·

全直桩码头结构振型反应谱抗震分析



张海荣, 钱原铭, 肖敏艳

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510230)

摘要: 针对全直桩码头结构形式, 以国外某码头工程为研究对象, 采用振型分解反应谱法对不同水平地震方向激励进行纵横轴不对称结构动力响应分析, 探讨了在不同水平地震方向作用下桩基结构位移和内力的变化规律。计算结果表明: 结构平面质量中心和刚度中心不重合时, 水平扭转效应对结构受力影响明显, 结构地震作用及其扭转耦联振动效应可采用振型分解反应谱法计算; 在水平地震作用下, 全直桩码头结构的近陆侧桩承担的水平地震力最大, 边桩比中间桩群承担了更多的水平地震力, 设计中应重视边角桩的受力情况及调整桩基布置形式来减小扭转产生的不利影响。

关键词: 全直桩码头; 振型分解反应谱法; 平动扭转耦联效应; 抗震设计

中图分类号: U 656.1⁺13

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2017)01-0051-07

Seismic analysis of the modal of vibration response spectrum for pile supported wharf structure

ZHANG Hai-rong, QIAN Yuan-ming, XIAO Min-yan

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

Abstract: Considering the structure of pile supported wharf, the response spectrum method was used to analyze the seismic response under different horizontal earthquake directions in a foreign wharf engineering project. The change rule of the structure displacement and internal force of pile foundations under the influence of different direction of earthquake is compared and studied. The results show that horizontal torsion effect has a significant influence on structure and the seismic effect of wharf structure should be calculated by translation-torsion coupling mode-superposition method while the center of mass and rigidity are inconsistent. In the condition of horizontal direction earthquake effect, the horizontal seismic force of pile closed to the landside is the biggest while the horizontal seismic force of side pile is bigger than that of middle pile group. The force influence of corner pile must be check and taken in account and the pile arrangement shall be adjusted to reduce the adverse effect caused by structure torsion during design project.

Keywords: pile supported wharf; vibration mode decomposition response spectrum method; response of translation-torsion coupling; seismic design

高桩码头结构刚度小, 常采用斜桩提高水平刚度, 抵抗由船舶或地震产生的水平荷载, 但在国内外历次震害调查发现, 大量斜桩遭受地震破

坏^[1]。全直桩码头结构柔度大、延性好, 强震作用下结构的水平侧移大, 增大结构的振动周期, 进而更好地吸收地震能量, 但在地震作用下结构

收稿日期: 2016-05-03

作者简介: 张海荣 (1987—), 男, 硕士, 助理工程师, 从事港航工程结构设计与方法研究。

的抗震性能目前尚缺乏深入研究。对于高桩码头的抗震分析,《高桩码头抗震设计标准》^[2]、《长滩港码头设计准则》^[3]、欧洲规范《结构抗震设计》^[4]和《港口结构抗震设计指南》^[5]建议采用基于力的振型分解反应谱法、基于位移的静力弹塑性分析法(PUSHOVER法)和非线性时程分析法。然而,PUSHOVER法无法反映高桩码头的平动扭转耦联变形,动力时程分析方法虽能较全面地反映高桩码头动力特性,但其计算过程复杂、耗时长,难以广泛应用于大量的常规码头工程^[6]。相对而言,反应谱方法比较方便省时,在相当程度上反映了地震作用下地面运动的强弱、场地及结构动力特性对结构受力的影响。欧美国家在设计高桩码头时从叉桩抗震性能不佳角度考虑,大部分采用直桩,因此有必要对全直桩码头结构动力响应进行研究。

本文以国外某全直桩码头为例,结合欧洲抗震规范中的要求,针对不同水平地震方向作用下采用振型分解反应谱法对码头结构进行地震响应分析,研究了码头的自振特性和桩基结构受力特性。

1 振型分解反应谱法

振型分解反应谱法是一种基于振型分解及其正交性原理的反应谱法求解多自由度体系结构地震反应的基本方法。现有的各国规范对地震荷载及结构响应的计算基本上还是以反应谱法为基础。不同国家和地区的规范采用的设计反应谱是依据大量实际地震记录的反应谱进行统计并结合工程经验加以确定的,由于不同规范采用的地震记录、抗震设计方法和思路存在差异,故设计反应谱也存在差异。

本文采用考虑平扭耦联效应的振型分解反应谱法进行结构地震响应分析。在求解多自由度结构系统地震响应时,求解各阶振型的等效地震荷载,再按静力法求得结构的地震作用效应(内力和变形),经组合后求得结构总的地震效应。

第 j 质点在第 i 振型的地震荷载可表示为

$$P_{ji} = m_j \gamma_i \phi_{ji} K_H \beta_i g \quad (1)$$

$$M_{ji} = J_j \gamma_i \theta_{ji} K_H \beta_i g \quad (2)$$

式中: P_{ji} 为在第 i 振型下质点 j 水平地震惯性力; M_{ji} 为在第 i 振型下质点 j 的弯矩; ϕ_{ji} 为第 j 质点在第 i 振型的位移值; β_i 为可由设计反应谱曲线确定的 i 阶振型的动力放大系数,欧洲规范 BS EN 1998 中通过性能系数 q 折减得到设计反应谱; γ_i 为振型参与系数; θ_{ji} 为质点 j 在第 i 振型下对转动轴的相对扭转角振型位移值; K_H 为水平向地震系数; m_j 为质点 j 的质量; J_j 为质点 j 绕转动轴的转动惯量。

结构各质点每阶振型的最大水平地震力可以由式(1)求得,再将地震荷载作用于结构,可求得结构位移、内力等反应量 S_i 的最大值。分析中应包含足够的振型,以确保结构在各主要运动方向都具有 90% 以上的参与质量;由于在地震作用时通常不会同时出现不同振型的 $S_i (i=1,2,3,\dots,n)$ 最大值,因此结构地震作用效应采用完全二次方根组合法(CQC法)^[7]考虑结构空间各振型的相互影响。

2 计算模型

2.1 工程背景

本文研究对象为国外某全直桩码头结构段,其结构段长 240 m、宽 40.82 m,面板厚为 0.45 m,码头面高程 3.5 m,设计码头前沿底高程 -14.0 m,横排间隔布置 8 根钢管桩,两相邻横排间在前后轨道梁处各增加 1 根钢管桩,直径 d 为 1 067 mm,壁厚 17.50 mm,底高程 -45.0 m;土层由厚的沉积层、中密或密实的砂土和砂砾组成;截面尺寸为:横梁 1.5 m×1.5 m,轨道梁 1.9 m×1.6 m,纵梁 1.5 m×1.25 m,前边梁 1.95 m×1.5 m,后边梁 1.55 m×1.25 m;横排间距为 6.3 m,排架编号为 1~77,往陆侧向纵排依次编号为 A~H 号;码头结构断面与桩基布置见图 1、2。

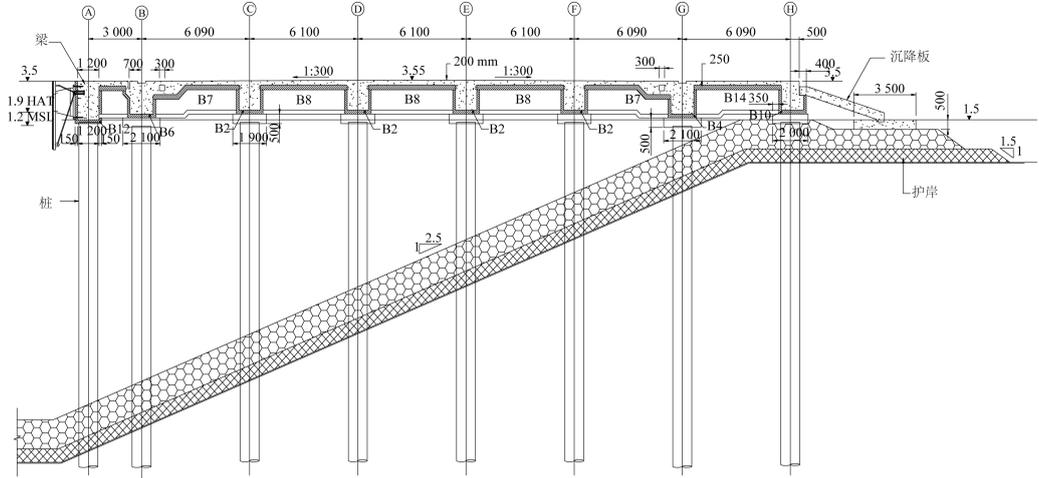


图 1 码头结构断面 (尺寸: mm; 高程: m)

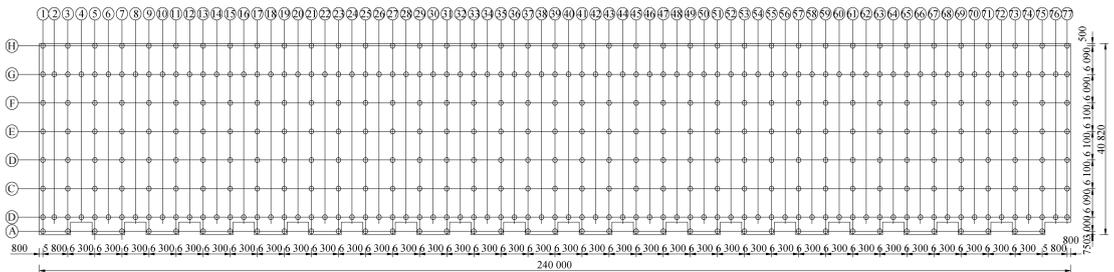


图 2 码头桩基布置

2.2 有限元模型的建立

2.2.1 计算模型及参数

本文利用大型通用有限元软件 ANSYS 建立码头整体空间计算线弹性模型, 模拟水平地震作用下的结构反应。根据全直桩码头结构的特征, 将码头面板采用壳单元 (SHELL43), 纵横梁和钢管桩离散为三维梁单元 (BEAM188), 其既可满足计算精度, 而且减小计算规模, 便于后处理分析, 通过定义截面偏移来模拟梁板间的实际相对位置; 采用土弹簧 COMBIN14 实现土对桩的垂直约束作用。

模型整体坐标系的原点取码头结构①号排架最陆侧桩桩顶, 横向为 Z 轴, 指向海侧为正; Y 轴正向为竖直向上; X 轴为纵向, 坐标系满足右手法则。本工程结构材料属性见表 1。

表 1 结构材料参数

材料	弹性模量 E/GPa	质量密度 $\rho/(\text{t}/\text{m}^3)$	泊松比 μ
面板和梁	30	2.5	0.166
钢管桩	205	7.8	0.300

2.2.2 边界条件

本工程码头结构不分段, 计算模型选取码头整体结构, 且不考虑码头前方桩台与接岸结构的相互作用; 码头结构各构件之间按照整体的刚性连接设计, 弹性长桩的受弯嵌固深度用 m 法计算, 桩端采用弹性嵌固点法考虑, 取嵌固深度为 5.0 m。

2.2.3 地震反应谱的选取

本工程所处区域水准 2 下的基岩峰值加速度 (PGA) 为 0.36g, 场地类别为 C 类场地, 结构常阻尼比 $\xi = 0.05$, 地基系数 $S = 1.15$, 性能系数 $q = 2.0$, 采用欧洲规范 EN 1998-1:2004 规定的 1 型设计反应谱曲线进行地震响应分析。

3 结构地震响应分析

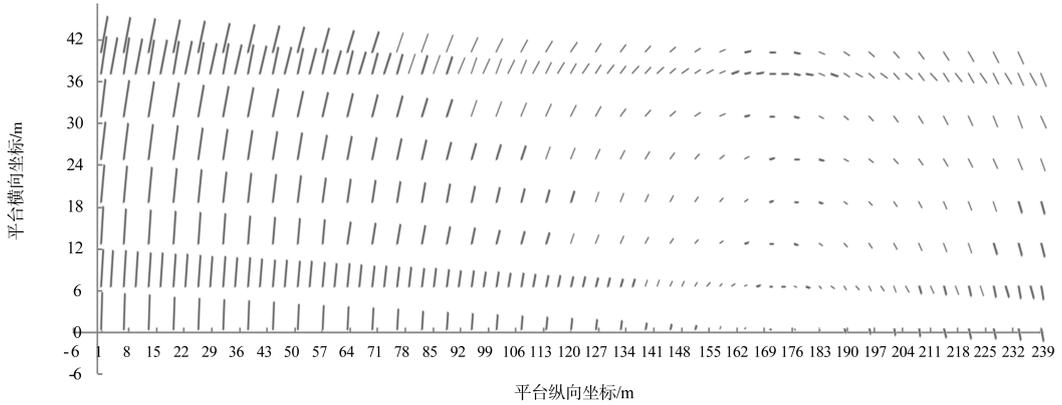
3.1 自振频率和周期

笔者采用分块 Lanczos 法对码头进行模态分析, 提取前 5 阶模态的固有频率、周期及累积质

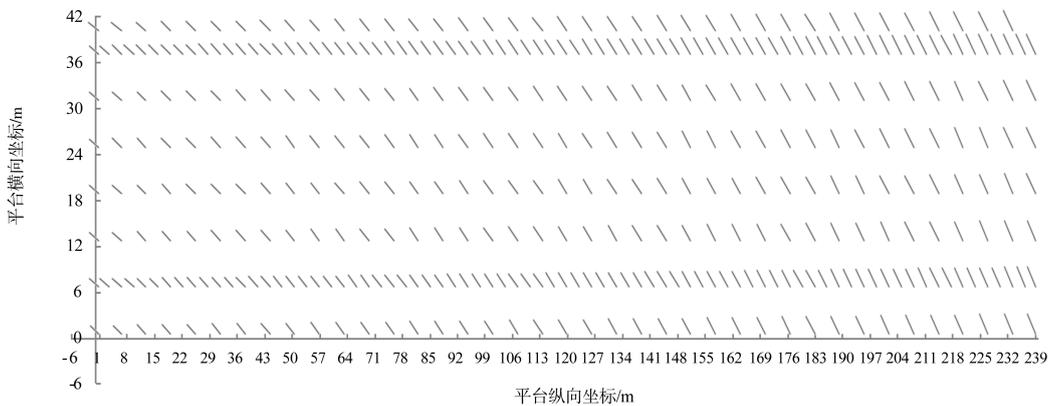
量参与系数。从表 2 可看出，第 3 阶已满足规范中累积质量 90% 以上的参与要求。图 3 为全直桩码头前 3 阶振型，可以看出，第 1 阶、第 3 阶为平动与扭转耦合振型，第 2 阶为平动振型。对于结构平面质量中心与刚度中心不重合且存在偏心情况的高桩码头结构，平动与扭转耦联效应尤为明显，这与文献[8-9]所研究的规律一致。

表 2 前 5 阶模态频率及累积质量参与系数

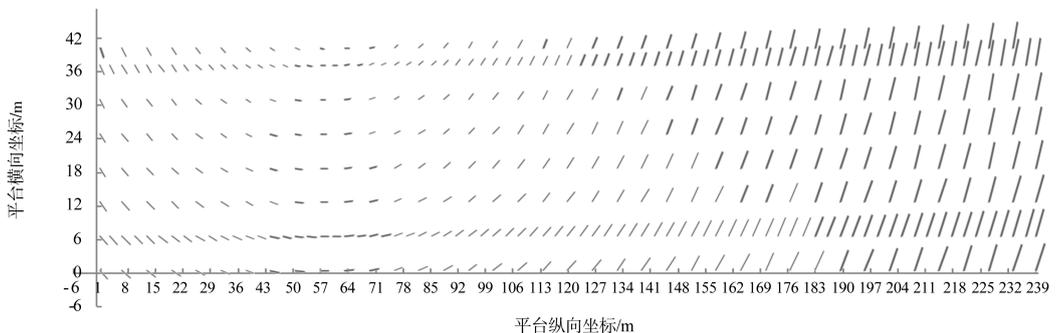
振阶	频率/ (rad/s)	周期/s	动力放大 系数	累积质量 参与系数
1	0.894	1.119	0.771	0.356 9
2	0.959	1.043	0.827	0.739 2
3	1.003	0.997	0.865	0.999 8
4	1.770	0.565	1.438	1.000 0
5	3.618	0.276	1.438	1.000 0



a) 第1阶振型



b) 第2阶振型



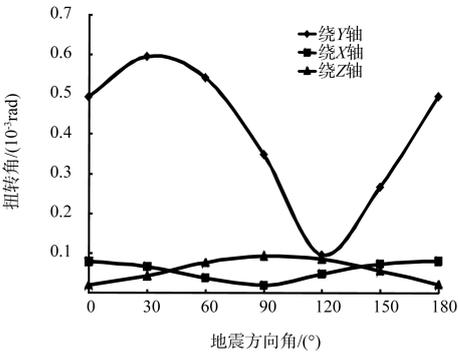
c) 第3阶振型

图 3 码头平台振型

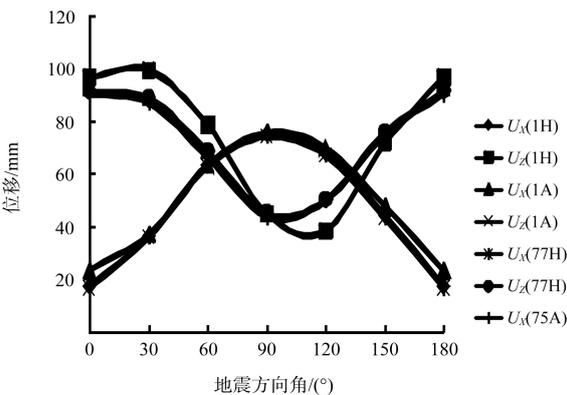
3.2 结构内力和变形分析

本文采用振型分解反应谱法, 结合振型特征, 分别从地震方向角 $\theta = 0^\circ、30^\circ、60^\circ、90^\circ、120^\circ、150^\circ、180^\circ$ 对码头结构进行地震动激励, 并按 CQC 法进行效应组合, 其中 θ 角为与 Z 轴正向的夹角。图 4 为在不同地震方向角 θ 下, 码头平台中心扭转角及边角单桩的桩顶纵横向位移、轴力、弯矩、剪力、扭矩变化值。图 5~7 为在水平纵横向地震作用下, 码头排架间各桩基内力值分布情况。

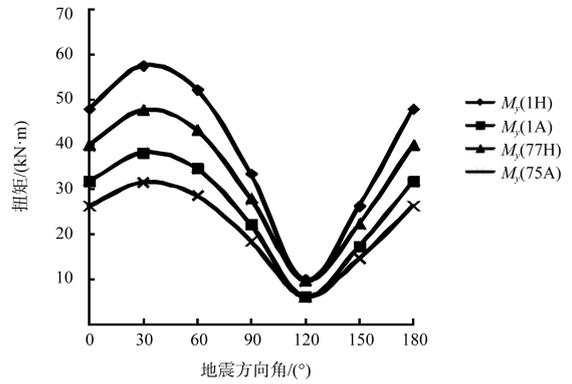
在结构的模态分析中, 可知码头质量中心与刚度中心的连线与 Z 轴的夹角为 128.67° , 从图 4 可以看出, 地震方向角 $\theta = 128.67^\circ$ 时, 平台不产生扭转, 各桩桩顶扭矩最小, 纵向位移却相对较大; 地震方向角 $\theta = 38.67^\circ$ 时, 平台扭转效应最大, 各桩顶扭矩也最大, 横向位移出现较大值; 桩顶位移、剪力、弯矩的极值发生在地震方向角 θ 在 $0^\circ、30^\circ、90^\circ、120^\circ$ 附近; 码头结构平台的竖向位移、横轴转角、纵轴转角极小, 可忽略。



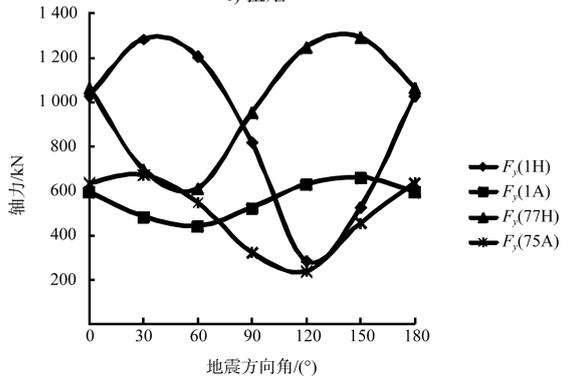
a) 平台中心扭转角



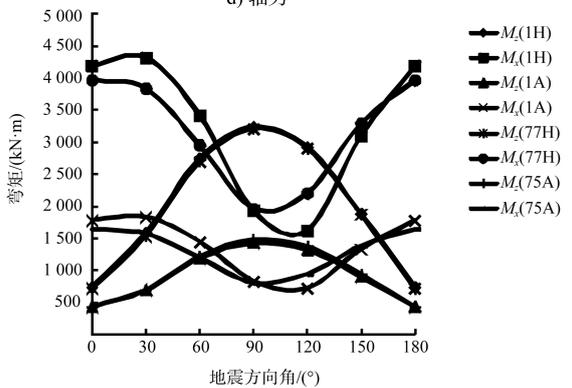
b) 位移



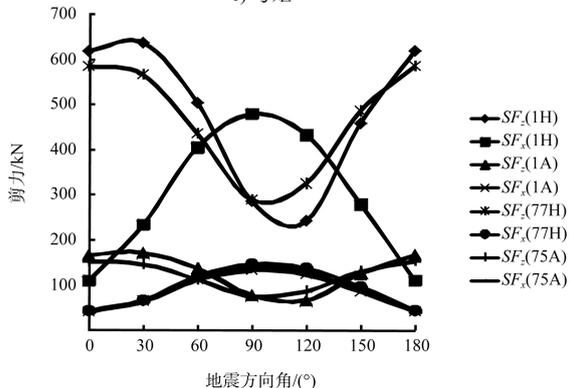
c) 扭矩



d) 轴力



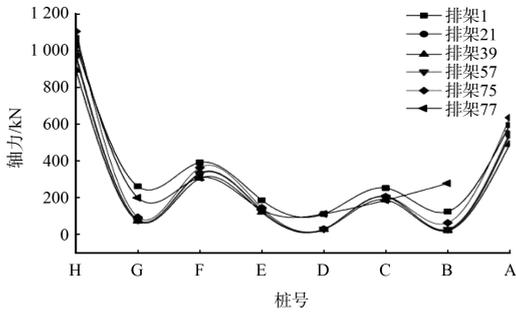
e) 弯矩



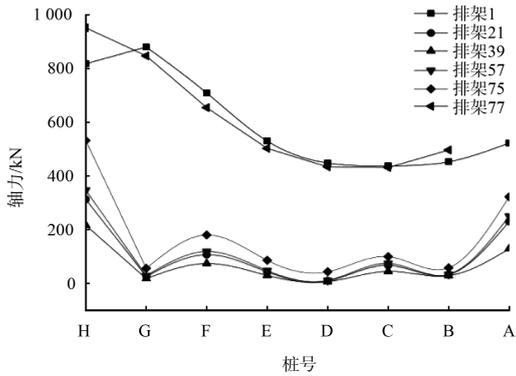
f) 剪力

注: 1A、1H、75A、77H 均为码头结构的边角桩; 其中 1A 表示第 1 横排编号为 A 的桩, 其他编号类似。

图 4 不同地震方向角作用时码头平台中心扭转角和边角桩桩顶位移、内力

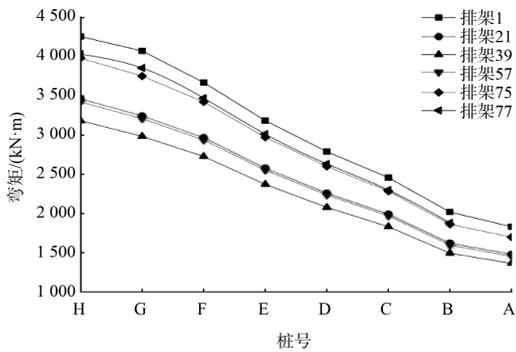


a) 横向地震作用

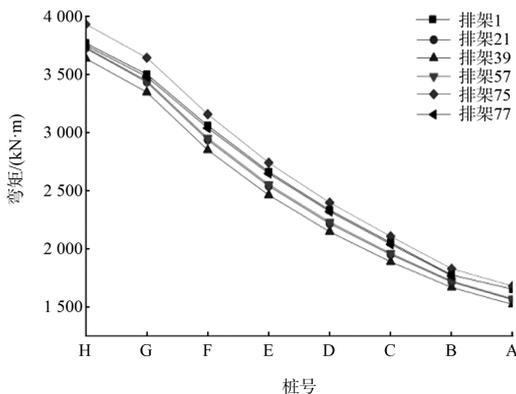


b) 纵向地震作用

图5 桩轴力

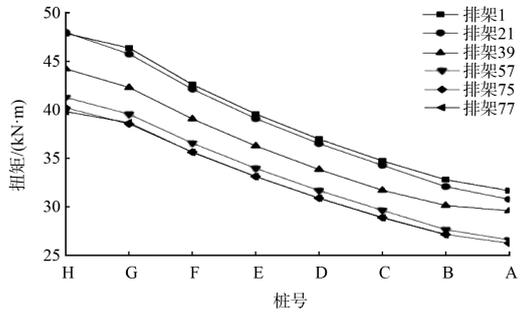


a) 横向地震作用

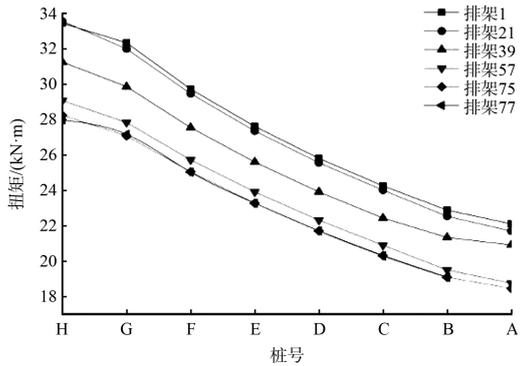


b) 纵向地震作用

图6 桩顶弯矩



a) 横向地震作用



b) 纵向地震作用

图7 桩顶扭矩

1) 桩轴力。水平横向地震作用下，单个排架边角桩 A、H 的轴力均比中间桩大，尤其是近陆侧的 H 桩最大，沿码头纵向各排架中，各对应桩基的桩轴力变化不大，中间排架桩轴力较两端边排架相对略小；水平纵向地震作用下，中间单排架的边角桩 A、H 的轴力比中间桩大，最大值出现在近陆侧的 H 桩，两端边单排架的近陆侧桩 G、H 的轴力比其余的桩大，最大值出现在近陆侧的 G 桩，沿码头纵向各排架中，各桩的桩轴力变化较大，中间排架桩轴力明显小于两端边排架。

2) 桩顶弯矩。水平纵横向地震作用下，单个排架中越靠近陆侧的各桩桩顶弯矩越大，即往陆侧向呈递增分布；沿码头纵向各排架中，两端边排架桩桩顶弯矩大于中间排架；在水平纵向地震作用下，纵向各对应桩号的桩桩顶弯矩变化不大，而在水平横向地震作用时其变化较大；桩顶剪力也有类似的分布情况。

3) 桩顶扭矩。水平纵横向地震作用下，单个排架中越靠近陆侧的各桩桩顶扭矩越大，即往陆侧向呈递增分布，且沿码头纵向各排架中，纵向各对应桩号的桩桩顶扭矩变化一致。

4) 结构响应峰值。本工程属于纵横轴不对称结构, 在不同地震方向作用下, 由表 3 可总体上看出码头结构的位移、桩轴力、弯矩、剪力、扭

矩的峰值出现在地震方向角 $\theta = 30^\circ$, 即地震方向为垂直于结构质量中心与刚度中心的连线方向, 结构受力最不利。

表 3 不同地震方向作用下结构响应最大值

地震方向角/ $^\circ$	整体位移 U_{sum}/mm	桩轴力 F_y/kN	桩弯矩/($\text{kN}\cdot\text{m}$)		桩剪力/ kN		桩扭矩 $M_y/(\text{kN}\cdot\text{m})$
			M_x	M_z	SF_x	SF_z	
0	99.9	1 173.3	4 465.3	837.3	120.5	626.4	48.8
30	106.8	1 282.8	4 598.1	1 761.5	253.1	645.4	58.8
60	101.6	1 204.5	3 640.1	3 064.7	440.3	511.1	53.3
90	88.5	952.3	2 086.5	3 632.3	522.0	293.0	34.0
120	85.9	1 247.0	2 335.1	3 286.4	472.2	328.6	9.9
150	89.4	1 291.9	3 503.7	2 124.5	305.2	492.3	26.4
180	99.9	1 173.3	4 465.3	837.3	120.5	626.4	48.8

从上述结果分析可知, 对于全直桩码头结构, 在水平地震作用下, 桩基内力最大值出现在近陆侧桩上, 即承担的水平地震力最大, 这与以往地震中近陆侧桩破坏数量比近海侧桩多的现象相符合, 这也验证了美国《长滩港抗震设计》中将近陆侧桩认为是抗震桩的合理性。同时, 边桩比中间桩群承担了更多的水平地震力, 属于危险部位, 设计时需谨慎。因此, 码头最可能发生的地震破坏为以中间部分桩为轴的扭转剪切破坏。

4 结语

1) 全直桩码头前 3 阶地震效应占主要的影响, 当码头平面质心与刚度中心不一致时, 第 1、3 阶为平扭耦联振型, 第 2 阶为平动振型。在水平地震作用下, 地震方向垂直于质心与刚度中心的连线方向的平台扭转效应最大, 且结构受力也最不利。

2) 在不同的地震方向作用下, 全直桩码头结构的近陆侧桩承担的水平地震力最大, 边桩比中间桩群也承担了更多的水平地震力, 设计中应重视码头 4 个边角桩及上部结构与桩顶的连接部位的受力情况。

3) 由于本工程属于纵横轴不对称结构, 水平扭转效应对结构受力影响明显, 尤其是地震方向为垂直于刚度中心与质量中心的连线方向, 导致梁板结构对桩顶节点截面的破坏及以中间部分桩为轴的扭转剪切破坏, 设计中应调整桩基布置形式来减小扭转产生的不利影响。

4) 刚度和质量分布不均匀的不规则高桩码

头, 在抗震设计中可采用完全二次方根法 (CQC 法) 进行组合的振型分解反应谱法计算结构平动与扭转耦联地震效应, 并且除了码头纵横向以外, 还应包含对连接于平面质心与刚度中心的垂直与平行方向进行水平地震验算。

参考文献:

- [1] SCHLECHTER S M, BOLAND J C, MCCULLOUGH N J, et al. Influence of batter piles on the dynamic behavior of pile-supported wharf structures [C]// The Ports and Harbors Technical Committee of the Coasts, Oceans, Ports, and Rivers Institute of ASCE. USA: Ports Conference 2004: 1-10.
- [2] American Society of Civil Engineers. Seismic Design of Piers and Wharves[S]. 2014.
- [3] Port of Long Beach. Port of Long Beach Wharf Design Criteria (Version 3.0) [M]. USA: Port of Long Beach, 2012.
- [4] European Committee for Standardization, EN 1998 Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance[S]. 2004.
- [5] International Navigation Association. Seismic design guidelines for port structures [M]. Netherlands: Balkema A A Publishers, 2001: 55-73.
- [6] 李颖, 贡金鑫. 预应力高桩码头振型反应谱抗震分析[J]. 大连理工大学学报, 2011, 51(6): 846-853.
- [7] 李国豪. 工程结构抗震动力学[M]. 北京: 科学技术出版社, 1980: 80-86.
- [8] 王云球, 朱秀峰, 张祖贤. 全直桩码头整体模型试验研究[R]. 南京: 河海大学, 1990.
- [9] 何良德, 张海荣, 杨洋, 等. 考虑扭转效应的全直桩码头动力简化计算方法[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2013, 41(3): 265-270. (本文编辑 武亚庆)