



境外高桩码头结构抗震设计方法

张磊, 程泽坤, 范晔

(中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

摘要: 针对境外高桩码头结构在强震作用下的抗震设计问题, 建立一套适应境外抗震设计习惯和境外咨询公司认可的方法是十分必要的。结合三航院承担的拉美地区某高桩码头的抗震设计以及与境外咨询公司的沟通交流情况, 重点介绍了高桩码头结构抗震设计方法和技术细节, 可供海外工程设计时参考。

关键词: 高桩码头结构; 抗震分析; 拟静力弹塑性分析; 基于性能设计; 反应谱

中图分类号: U 656.1⁺13

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)10-0133-05

Anti-seismic design for overseas high-pile wharf

ZHANG Lei, CHENG Ze-kun, FAN Ye

(CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: It is necessary to set up an anti-seismic design process, particularly applicable with overseas anti-seismic designing flow and could be approved by international consulting firms, for high-pile wharf design in severe earthquake conditions. This article is focused on introducing the anti-seismic design methods and related technological details based on design works carried out by CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd. in corporation with other foreign consulting firms, of a high-pile wharf in Latin America. The results may serve as reference for overseas design works.

Key words: high-pile wharf structure; anti-seismic analysis; pushover analysis; performance-based design; response spectrum

国内港航设计企业参与国际市场竞争, 都面临着诸如设计理念、设计规范等方面与境内的不同, 适应人家的设计习惯是做好境外工程设计的关键。本文针对境外高桩码头结构在强震作用下的抗震计算问题, 结合三航院承担的拉美地区某码头的抗震设计以及与境外多家咨询公司的沟通交流情况, 重点介绍了高桩码头结构弹塑性抗震设计方法, 包括分析过程、地震组合形式、能力谱和需求谱的建立、性能点的确定等, 可供海外工程设计时参考。

1 抗震标准的主要差异

国内抗震设计规范与欧美抗震设计规范在设

防标准、计算方法等方面存在一些差别, 以国内水运工程抗震设计规范与PIANC标准为例, 在码头结构抗震设计方面存在的主要差别体现在以下两点:

1) 抗震设防标准: 《水运工程抗震设计规范》按50 a超越概率10%的地震烈度为基本烈度进行抗震设计。PIANC的“Seismic Design Guidelines for Port Structures”明确按两级设防, Level 1超越概率50%, 重现期72 a; Level 2超越概率10%, 重现期475 a。此两种标准中, Level 1不允许结构损坏, Level 2则允许结构部分出现塑性变形^[1]。

2) 计算方法: 《水运工程抗震设计规范》在计算地震力时, 通常根据地震基本烈度、结构自

收稿日期: 2013-08-10

作者简介: 张磊(1985—), 男, 硕士, 助理工程师, 从事港口水工建筑物设计。

震周期和场地特性等,按照地震反应谱求出地震动力放大系数,再乘以地震系数及结构重力求出地震水平力,然后按静力方法计算出结构内力,进行结构承载力验算,是一种承载能力设计方法^[2]。而PIANC抗震计算往往对于Level 2阶段采用结构非线性分析方法,允许一定程度的损坏,由一系列结构性能如结构应变、变形等定量指标控制设计。

2 弹塑性抗震计算分析

受地壳板块运动的影响,环太平洋沿岸地区地震烈度一般较大,水平地震加速度一般在0.4g左右,结构的抗震计算是设计中最为主要的内容之一。按照欧美通常的抗震设计标准,Level 2允许结构部分进入塑性变形状态,因此基于结构性能设计的Pushover方法用于弹塑性抗震设计无疑是最为有效的方法之一。

Pushover方法是对结构在地震作用下进行弹塑性变形分析的一种简化方法,分为两个步骤:第1,建立结构能力谱曲线;第2,评估结构的抗震性能,即确定结构在预定地震水平下的反应。该方法是通过在结构计算模型上施加按某种规则分布的水平侧向力,逐级加大,一旦有构件开裂(或屈服)即修改其刚度(或使其退出工作),进而修改结构总刚度矩阵,进行下一步计算,依次循环直到结构达到预定的状态(成为机构、位移超限或达到目标位移),得到结构能力曲线。通过判断是否出现性能点,从而判断结构是否达到相应的抗震性能目标^[3-4]。

2.1 计算步骤

弹塑性抗震分析一般步骤如下:1)高桩码头结构水平抗震分析模型简化为单自由度体系,桩土相互作用采用 p - y 曲线方法;2)确立工程所在场地的反应谱,基于反应谱计算分析结构位移需求曲线;3)对码头结构进行PUSHOVER分析,获得码头结构力-位移性能曲线;4)比较2)和3)计算结果,寻找两曲线交点,即性能点;5)将性能点对应的结构在用需求曲线表征的地震作用下的结构承载力和位移等相应,与设计目标比较是否满足;6)如果满足设计目标要求,可认为

结构成立,否则修改设计返回上述步骤计算。

2.2 技术标准

根据欧美码头结构抗震设计规范^[5-7],高桩码头抗震设计的主要技术标准包括以下方面:

1) 地震标准(表1)。

表1 设计地震标准等级

地震	50 a内超越概率/%	重现期/a
正常使用等级地震OLE	50	72
偶然性等级地震CLE	10	475

2) 破坏准则。

桩基泥面下(或抛石堤护面以下)不应产生塑性铰。

3) 地震组合。

组合一:100%横向+30%纵向。

$$D_{X1}=D_{XL}+0.3D_{XT} \quad (1)$$

$$D_{Y1}=D_{YL}+0.3D_{YT} \quad (2)$$

组合二:100%纵向+30%横向。

$$D_{X2}=0.3D_{XL}+D_{XT} \quad (3)$$

$$D_{Y2}=0.3D_{YL}+D_{YT} \quad (4)$$

式中: D_{XL} 为纵向反应谱所产生的码头横向位移; D_{XT} 为横向反应谱所产生的码头横向位移; D_{YL} 为纵向反应谱所产生的码头纵向位移; D_{YT} 为横向反应谱所产生的码头纵向位移; D_{X1} , D_{X2} 为横向及纵向反应谱组合后产生的码头横向位移; D_{Y1} , D_{Y2} 为横向及纵向反应谱组合后产生的码头纵向位移^[5,8]。

计算位移的需求值时,应分别计入码头在横向及纵向反应谱作用下的响应:

$$D_{\max}=\max(\sqrt{D_{X1}^2+D_{Y1}^2},\sqrt{D_{X2}^2+D_{Y2}^2}) \quad (5)$$

4) 桩土相互作用采用 P - Y 曲线法^[9-11]。根据不同土体类型采用循环荷载类型土体 P - Y 曲线。

5) 地震作用下桩顶位移限值的规定^[12]。桩顶向海侧位移所对应的桩转角应控制在 $2^\circ\sim 3^\circ$ 。

6) 抗震能力标准^[6,8]。对于高桩码头结构,应保证CLE等级下塑性铰发生在桩的顶部。对塑性铰的具体应变限值见表2,3。

2.3 评估方法

弹塑性抗震计算过程中,可以通过求得结构的最大应变需求值 ϵ_{md} ,将其与表2和3给定的应变

表2 桩顶塑性应变限值

桩型	设计等级		
	OLE	CLE	DE
灌注桩	$\varepsilon_c \leq 0.005$	$\varepsilon_c \leq (0.005 + 1.1\rho_s) \leq 0.025$	ε_c
	$\varepsilon_{sd} \leq 0.015$	$\varepsilon_{sd} \leq 0.6\varepsilon_{smd} \leq 0.06$	$\varepsilon_{sd} \leq 0.8\varepsilon_{smd} \leq 0.08$
混凝土管桩	$\varepsilon_c \leq 0.004$	$\varepsilon_c \leq 0.006$	$\varepsilon_c \leq 0.008$
	$\varepsilon_{sd} \leq 0.015$	$\varepsilon_{sd} \leq 0.4\varepsilon_{smd} \leq 0.04$	$\varepsilon_{sd} \leq 0.6\varepsilon_{smd} \leq 0.06$
钢管桩	$\varepsilon_c \leq 0.010$	$\varepsilon_c \leq 0.025$	ε_c
	$\varepsilon_{sd} \leq 0.015$	$\varepsilon_{sd} \leq 0.6\varepsilon_{smd} \leq 0.06$	$\varepsilon_{sd} \leq 0.8\varepsilon_{smd} \leq 0.08$

注: ε_c 为混凝土压缩应变; ε_{sd} 为桩顶钢管或桩顶混凝土配筋的应变值; ρ_s 为箍筋体积率[一道箍筋的体积/(箍筋间距×箍筋内围面积)]; ε_{smd} 为桩顶混凝土配筋的峰值应变值。

表3 泥面处塑性应变限值

桩型	塑性铰位置	设计等级		
		OLE	CLE	DE
灌注桩	10 D_p 深度以上	$\varepsilon_c \leq 0.005$	$\varepsilon_c \leq (0.005 + 1.1\rho_s) \leq 0.025$	$\varepsilon_c \leq (0.005 + 1.1\rho_s) \leq 0.025$
		$\varepsilon_p \leq 0.015$	$\varepsilon_p \leq 0.025$	$\varepsilon_p \leq 0.035$
	10 D_p 深度以下	$\varepsilon_c \leq 0.008$	$\varepsilon_c \leq 0.012$	ε_c
		$\varepsilon_p \leq 0.015$	$\varepsilon_p \leq 0.025$	$\varepsilon_p \leq 0.050$
混凝土管桩	10 D_p 深度以上	$\varepsilon_c \leq 0.004$	$\varepsilon_c \leq 0.006$	$\varepsilon_c \leq 0.008$
		$\varepsilon_p \leq 0.015$	$\varepsilon_p \leq 0.025$	$\varepsilon_p \leq 0.025$
	10 D_p 深度以下	$\varepsilon_c \leq 0.004$	$\varepsilon_c \leq 0.006$	$\varepsilon_c \leq 0.008$
		$\varepsilon_p \leq 0.015$	$\varepsilon_p \leq 0.025$	$\varepsilon_p \leq 0.050$
钢管桩	10 D_p 深度以上	$\varepsilon_s \leq 0.010$	$\varepsilon_s \leq 0.025$	$\varepsilon_s \leq 0.035$
	10 D_p 深度以下	$\varepsilon_s \leq 0.010$	$\varepsilon_s \leq 0.035$	$\varepsilon_s \leq 0.050$
灌芯钢管桩	10 D_p 深度以上	$\varepsilon_s \leq 0.010$	$\varepsilon_s \leq 0.035$	$\varepsilon_s \leq 0.050$
	10 D_p 深度以下	$\varepsilon_s \leq 0.010$	$\varepsilon_s \leq 0.035$	$\varepsilon_s \leq 0.050$

注: ε_p 为预应力钢筋应变; ε_s 为钢管桩应变值; D_p 为桩直径。

能力值 ε_c 值进行比较;也可以从表中给定的应变能力值出发,求得结构的最大位移能力值 A_{mc} ,并将其与位移需求值 A_d 进行比较。两种方法所用到的条件是一样的,可根据具体需要选用。

3 工程实例

本文所选用的实例是位于拉美地区某集装箱码头,该码头设计年吞吐能力为40万TEU,场地水平地震加速度为0.385g,码头结构采用高桩码头结构形式,采用SAP2000通用分析软件所提供的Pushover分析功能对码头结构进行抗震计算。

3.1 码头结构

排架间距为8 m,桩基全部采用 ϕ 1 200钢管桩,其中,后3排桩灌芯处理,灌芯长度从桩端至泥面以上5 m处;上部采用桩帽节点+纵横梁面板体系,横梁宽1.2 m,高2.47 m。码头上部结构

纵向设2道宽1.4 m,高2.47 m的轨道梁及1道1 m宽,高2.47 m的纵梁,其间以总厚700 mm的叠合面板连接。钢管桩采用420级钢,混凝土抗压强度 $f'_c=25$ MPa(图1)。

3.2 SAP2000建模计算

码头一个结构分段的计算模型见图2。

桩基模型假定:1)桩顶灌芯的上半部分考虑为钢筋混凝土;2)桩顶灌芯的下半部分考虑为钢管桩与钢筋混凝土的复合截面;3)灌芯钢管桩部分考虑为钢管桩与混凝土的复合截面;4)桩入土部分采用P-Y曲线模拟桩土相互作用。

3.3 弹塑性分析

1) 反应谱。

根据工程所在地的抗震规范^[13],基于反应谱计算分析结构位移需求,反应谱阻尼比为5%。见图3。

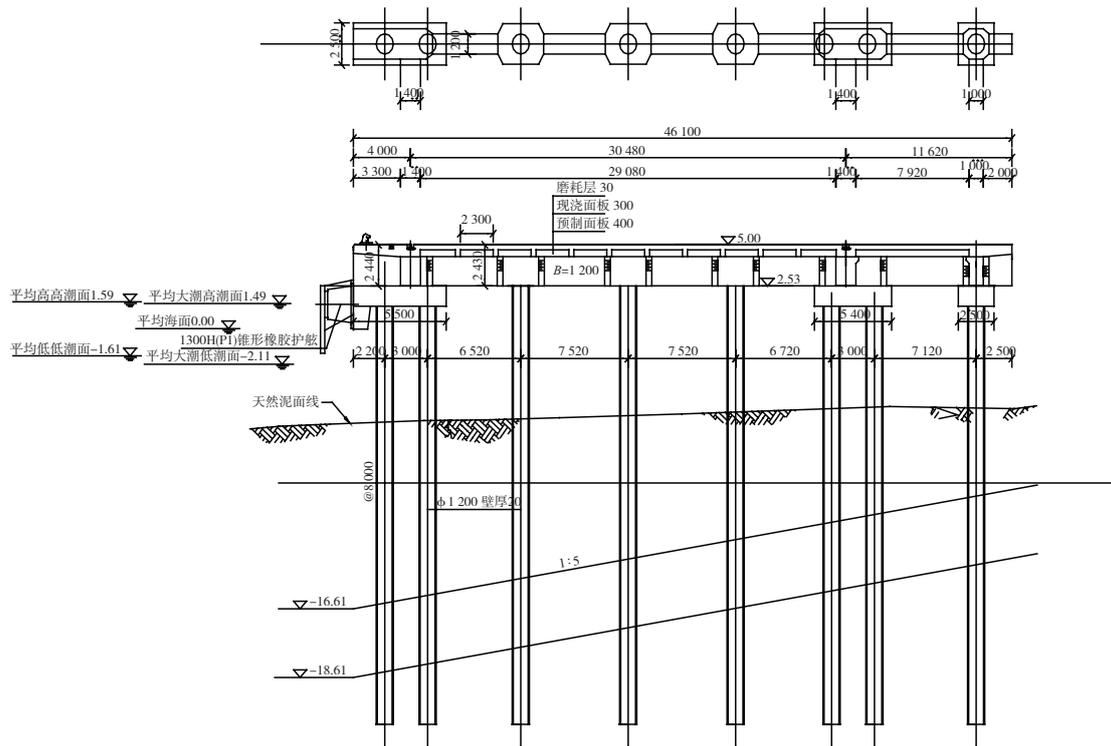


图1 码头断面

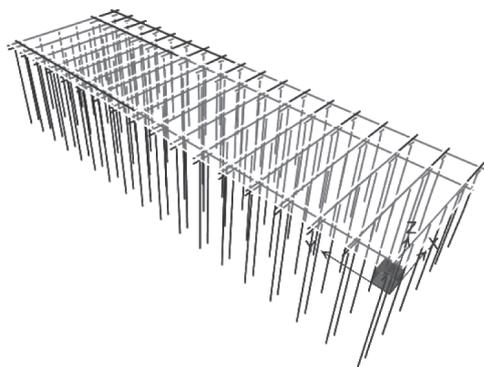
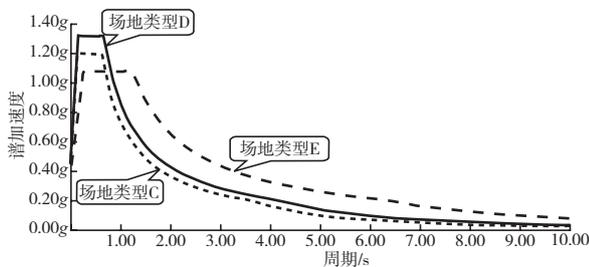


图2 SAP2000码头结构模型

2) 非线性Pushover分析。

静力非线性Pushover分析是用来评估结构在强震作用下非弹性响应的能力，针对本工程CLE抗震等级标准，分别从横向及纵向对码头结构进行推覆分析。不同基桩截面的屈服弯矩可由SAP2000的截面设计器得到。对于本工程码头结构 $\phi 1\ 200$ 钢管桩、 $\phi 1\ 200$ 灌芯钢管桩以及桩顶灌芯，不同轴力所对应的屈服弯矩可见表4。



注：50 a超越概率10%。

图3 项目所在地对应不同场地类型的设计反应谱

表4 基桩各截面不同轴力对应的屈服弯矩

桩型	轴力P/kN	屈服弯矩 M_f / (kN·m)
$\phi 1\ 200$ 灌芯钢管桩	-1 000	11 267
	-2 000	11 595
	-3 000	11 808
	-4 000	12 099
	-5 000	12 420
	-6 000	12 791
桩顶灌芯上半部分	-1 000	3 483
	-2 000	3 813
	-3 000	4 080
	-4 000	4 422
	-5 000	4 662

经过计算，得组合位移最大值 D_{max} 为397 mm，桩最大转角为1.6°。

续表

桩型	轴力 P/kN	屈服弯矩 $M_y/(\text{kN}\cdot\text{m})$
$\phi 1\ 200$ 钢管桩	-1 000	7 288
	-2 000	7 335
	-3 000	7 365
	-4 000	7 400
	-5 000	7 395
	-6 000	7 380
桩顶灌芯 下半部分	-1 000	14 047
	-2 000	14 308
	-3 000	14 621
	-4 000	15 001
	-5 000	15 174

计算设置位移步长取0.05 m, 结构的横向及纵向最大位移均在计算的第8步超过397 mm。此状态下基桩弯矩需求能力比及屈服状态见表5。

表5结果表明, 码头结构部分桩顶处(M/M_y 为1.42,1.41时)在指定位移下出现了塑性铰。在CLE等级地震作用下, 允许码头结构部分桩顶进入塑性状态, 出现塑性铰。塑性铰性能状态见表6, 表中计算结果表明该码头结构抗震设防满足要求。

4 结语

强震地区高桩码头结构的抗震设计是设计工作的主要内容之一。本文通过理论与实践两方面

表5 桩基不同部位最危险铰结果

位置	N/kN	$M_2/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_3/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_y/(\text{kN}\cdot\text{m})$	M/M_y
码头横向Pushover分析(泥面处)	-4 759.76	0.96	-5 479.30	5 479.30	7 400	0.74
	-4 894.21	-86.41	-5 588.95	5 589.61	12 099	0.46
码头纵向Pushover分析(泥面处)	-4 634.95	5 384.80	-293.36	5 392.78	7 400	0.73
	-3 249.65	-5 451.11	-762.39	5 504.16	11 808	0.47
码头横向Pushover分析(桩顶处)	-1 818.59	-201.18	4 935.09	4 939.18	3 483	1.42
	-4 984.28	7.38	5 150.85	5 150.85	15 001	0.34
码头纵向Pushover分析(桩顶处)	-1 710.58	-4 858.14	823.58	4 927.45	3 483	1.41
	-5 248.63	-5 160.82	363.81	5 173.63	15 174	0.34

表6 最危险铰性能状态计算

M/M_y	材料	ε	ε 最大限值	$\varepsilon/(\varepsilon$ 最大限值)
1.42 (PUSHX)	钢筋	0.013 000	0.060	0.22
	混凝土	0.001 251	0.025	0.05
1.41(PUSHY)	钢筋	0.011 900	0.060	0.20
	混凝土	0.001 212	0.025	0.05

摸索并总结了境外高桩码头结构抗震设计的一般流程: 1) 参考工程项目地的抗震设计标准及经验, 建立地震标准; 2) 确定构件在不同设计等级下的破坏准则; 3) 通过计算确定结构的抗震能力标准; 4) 抗震性能评估; 5) 根据计算结果进行结构优化。

国内港航设计企业参与国际市场竞争都将面临着欧美公司的技术咨询审查, 因此主动掌握境外工程抗震设计的要求和习惯是非常必要的。本文通过总结拉美地区部分码头结构抗震设计的实践经验, 以及与多家国际著名咨询公司的交流成

果, 逐步摸索出一套高桩码头结构抗强震设计通行的方法和习惯, 为国内企业在国际市场上竞争获胜创造了条件。

参考文献:

- [1] MOTEMS. Marine Oil Terminal Engineering and Maintenance Standards [S].
- [2] JTS 146—2012 水运工程抗震设计规范[S].
- [3] Naeim F, Shi Z. The Seismic Design Handbook [M]. New York: Springer, 2001.

(下转第142页)