

· 港口 ·



[抗震设计讲座] 港口结构抗震设计方法的发展(6)

贡金鑫

(大连理工大学 海岸与近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 以我国、美国和日本的港口码头设计规范、手册为基础, 对我国、美国和日本港口码头抗震设计的方法进行了分析, 同时介绍了国际航运协会标准《港口结构抗震设计指南》的有关规定。此系列论文共分6部分, 该文为第6部分, 重点分析了美国多本手册中关于高桩码头抗震构造措施的规定及与我国规范的差别。分析表明: 美国规范明确了码头布置的规则性和不规则性、桩基布置原则及板-桩连接的钢筋细部规定等。抗震设计中我国规范与美国规范在叉桩使用方面的规定相差较大。

关键词: 港口工程; 抗震设计; 规范

中图分类号: U 612.3⁺7

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)01-0071-05

Development of seismic design of port and harbor structures: part 6

GONG Jin-xin

(The State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: A comparative study is made on seismic design of port structures based on Chinese code, US guidelines, Japanese standards, as well as the guideline of International Navigation Association. This is the sixth of the series papers and the measures for strengthening structures to resist earthquake proposed in these codes are analyzed. It is shown that in US guidelines, the criteria for identifications of regularity and irregularity of wharf and principle of pile arrangement are presented, the details of reinforcement of connection between slab and pile are highlighted. There is a great difference for the application of brace pile in seismic design in Chinese code and US guideline.

Key words: port and harbor structure; seismic design; code and standard

9 抗震措施

总结历次大地震灾害的经验教训, 人们发现, 由于地震作用有诸多不确定性和复杂性, 一个建筑物抗震性能的好坏, 在概念上是清楚的, 而具体界限往往是模糊的。从这个意义上讲, 抗震设计仍然是一门“艺术”, 有待于设计人员主观能动性的发挥。因此, 抗震计算和抗震构造是抗震设计中不可分割的两个组成部分, 且设计的指导思想——概念, 要比数值计算更为重要。本节主要论述高桩码头的抗震措施。

9.1 码头布置

高桩码头布置的规则性与不规则性对其抗震具有重要影响, 不规则性包括平面不规则性和竖向不规则性。如果码头平面上不规则, 质量中心与刚度中心不重合, 在地震作用下, 码头会发生扭转, 使结构受力复杂, 容易引起结构破坏。竖向不规则出现在码头下土剖面竖向有突然变化的情况。

在平面上, 美国《海洋油码头》^[3]按图19将海洋油码头分为规则或不规则形式。如果抗震缝

收稿日期: 2012-01-09

作者简介: 贡金鑫(1964—), 男, 教授, 主要从事结构设计理论和方法的研究。

将布置不规则（如T形布置）的码头分为两个或多个规则形式，则可按规则形式进行分析。所谓抗震缝为将结构分离为地震中可按两部分独立运动考虑的缝。如果将不规则海洋油码头分成地震时独立的两个部分，应考虑管线和支撑的相对移动，包括相位差。

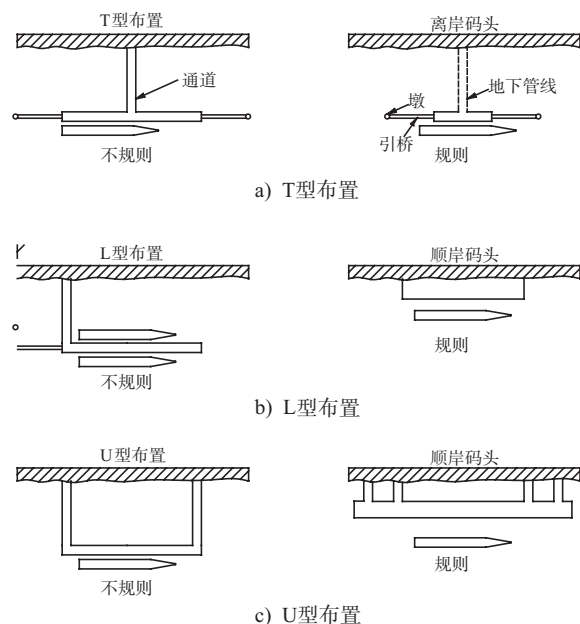


图19 美国《海洋油码头》中码头的规则和 irregular 性描述

美国《长滩港码头设计准则》（2007）^[4]划分的码头平面上的规则和 irregular 形式见图20。图20b）码头的 irregular 是因为丁坝使码头产生扭转，图20c）码头的 irregular 是因为码头刚度的不同会使码头产生不同步振动，图20d）码头的 irregular 是因为转角会使码头产生应力集中。

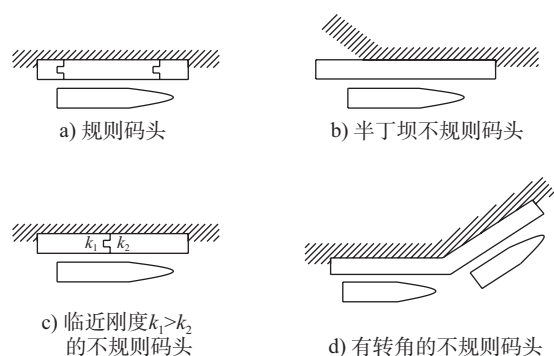


图20 美国《长滩港码头设计准则》中码头的规则和 irregular 性描述

9.2 结构体系

与重力式和板桩码头相比，高桩码头属于柔性结构。因此，将高桩码头设计为具有一定

变形能力和延性的结构，使其“以柔克刚”，对于抗震非常重要。美国《长滩港码头设计准则》（2007）规定，码头结构应按延性体系设计。桩与板界面形成码头结构的整体部分，应设计为具有延性性质。应按强梁（板）弱柱（桩）框架概念设计结构体系。要进行能力设计以保证要保护位置的强度超过塑性铰抗弯强度。我国JTJ 225—1998《水运工程抗震设计规范》^[1]的规定与此相反，规定“应优先采用刚度较大的码头上部结构”。

9.3 桩基布置及细部连接

我国规范对于高桩码头抗震中叉桩或斜桩的应用也与美国的做法有很大不同。我国JTJ 225—1998《水运工程抗震设计规范》规定，高桩码头桩基的布置应符合下列要求：1）每个区段内的桩基，特别是叉桩宜对称布置。2）适当增加叉桩，叉桩宜布置在排架中支座垂直反力大的位置。3）不宜采用全部钢筋混凝土直方桩码头结构，若全部采用直桩，宜采用钢桩，桩顶结点设计，应保证其整体性和良好的延性。4）高桩码头后方桩台桩顶与上部结构的连接宜作成固结。

美国《长滩港码头设计准则》（2007）^[4]规定，应全部采用具有与板良好连接的直桩，以保证结构具有延性性能。没有码头业主的书面许可，新建码头不应采用叉桩。吊车轨道梁只能支撑在直桩上。应采用跨越两个轨道的结构构件或码头板保持轨道间的距离。

美国《加利福尼亚海洋油码头抗震准则》规定，除以下几种情况外，新建工程一般不采用斜桩：1）在水准2地震作用下，斜桩应设计为弹性；2）在某些特定研究中，保证某些结构（包括斜桩）的反应能够控制在规定的极限状态内。

从传统的概念上，叉桩或斜桩是高桩码头抵抗水平力的构件，事实上，对于船舶撞击等非地震作用，叉桩或斜桩确实起到了抵抗水平力的作用。但对于地震作用，情况并非如此。对于使用叉桩或斜桩的高桩码头，与使用全直桩的码头相比，刚度增大，自振周期变短，一般在0.2~0.7 s的范围内。由图14表示的地震反应谱可以看出，这一自振周期恰落在地震放大系数比较大的范围内，即使用叉桩或斜桩导致高桩码头承受的地震

力增大,而承受轴力时混凝土的塑性变形能力较差,很容易在板-桩节点处发生破坏,或桩发生剪切破坏。美国1989年的洛马·普里埃塔地震,1994年的加利福尼亚北岭地震高桩码头都发生了这种形式的破坏。地震高发区的高桩码头使用钢筋混凝土直桩,减小了码头的刚度和地震力,同时可利用桩的弯曲变形和抵抗弯矩来承受地震引起的水平荷载和位移。在强烈地震下,直桩发生一定程度的弯曲破坏是不可避免的。但相对于斜桩-板连接处的剪切破坏,弯曲破坏的桩更易于修复。文献[37]采用有限元方法对3种码头进行了分析,全直桩码头为全部采用直桩的码头,有斜桩码头分2种情况,一种是1根直桩顶部另设置1对斜桩,其余直桩全部与全直桩码头相同;另一种是将直桩截面尺寸和配筋减小后设置1对斜桩使其荷载-变形特性与全直桩码头相近。研究表明,有斜桩码头的刚度较大,水平位移、直桩桩端弯矩和水平力均较小,但残余位移较大。当地震作用较强时,由于斜桩变形能力较差,混凝土容易压碎,丧失水平承载力。计算分析也同时表明,近陆侧直桩比斜桩承受更大的地震弯矩和水平侧向力。

图21为美国地震区全直桩码头桩的布置方法,各桩的功能是不同的,近海侧桩群通常为重力桩(用G表示),主要承担竖向荷载,同时承担不超过10%的水平地震力,一般延性要求不高;而近陆侧桩群(用S表示)则承担少量竖向荷载和大部分水平地震力,因此要求具有非常高的延性。地震发生时,水平力主要由近陆侧桩群承担。为保证桩-板连接足够强,连接方法非常重要。美国《长滩港码头设计准则》(2007)^[4]规定,应采用软的钢销栓连接面板。不允许将预应力筋伸进码头板内做弯曲连接。图22为桩板连接处的细部钢筋构造。纵向销栓钢筋的体积配筋率为1%~4%。为保证连接处的抗剪要求,规定了锚固在连接处、绕桩销钉约束钢筋的有效体积比。美国《海洋油码头》^[3]还规定了伸入板内钢筋的延伸长度。文献[38]对桩-板连接处的抗震性能进行了专门的研究。

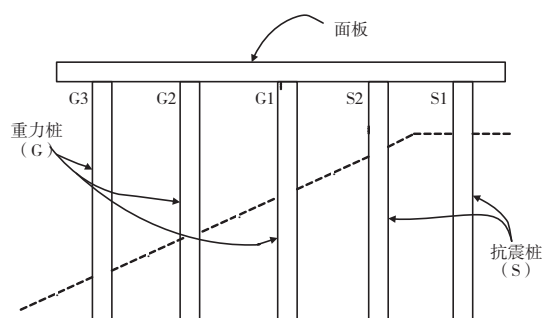


图21 高桩码头断面

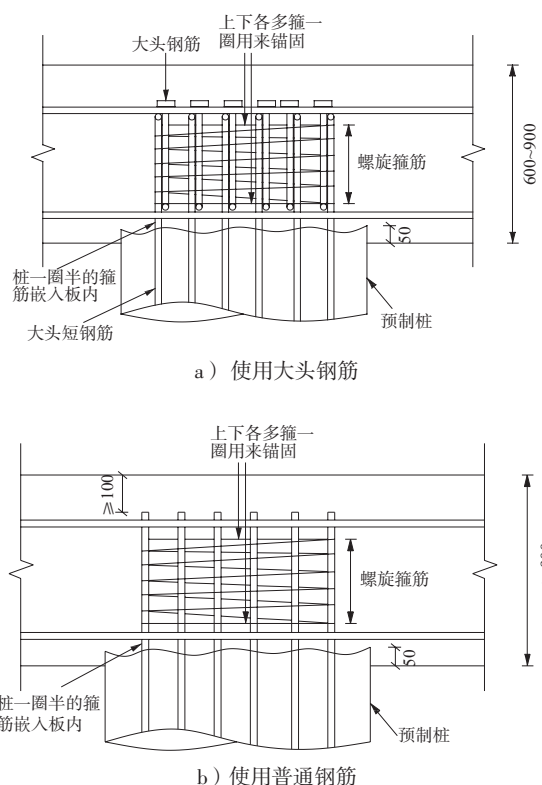
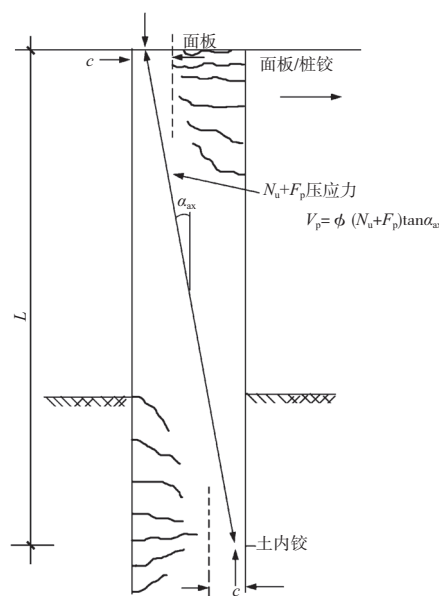
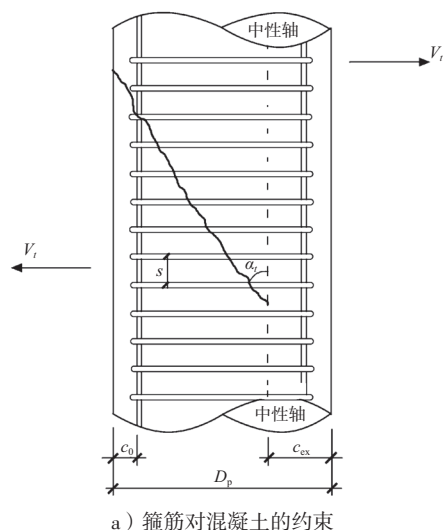


图22 桩板连接的钢筋细部(单位:mm)

为保证桩具有足够的抗剪能力,美国《海洋油码头》^[3]给出了桩受剪承载力的计算方法。与常规的柱或桩抗剪计算不同的是,对于受较大地震作用的高桩码头,为保证码头有一定的变形能力和延性,要求桩的受剪承载力大于受弯承载力,这样在桩达到其抗弯强度之前,桩中的纵向钢筋先受拉屈服,桩-板连接处及土某一位置出现塑性铰,如图23所示。但随着塑性铰的转动,塑性铰处的抗剪能力减弱,当塑性铰转到一定程度时,可能会发生剪切破坏。所以这种情况下的剪切破坏是与塑性铰的转动情况有关的,《海洋油码头》^[3]采用的公式是用塑性铰曲率延性系数表示的。

美国统一设施准则《设计：墩与码头》(UFC 4-152-01)^[7]中, 桩基码头分为4种形式, 即全直桩体系、直/斜桩体系、全斜桩体系和有隔震的斜桩体系, 其中有隔震的斜桩体系是专门用于抗震的结构体系。这种体系在码头板和斜桩之间采用了经校准的隔震器或地震“熔断器”。一旦临界水平荷载使得隔震器滑移, 该系统允许码头板出现较大的位移。考虑水平系缆力的大小, 以避免水平系缆力超过了隔震器的临界水平力。在这种情况下, 需要建造单独的保护结构。



b) 斜压杆的水平分量
图23 桩的抗剪机制

10 结论

本系列论文分6部分, 以我国、美国和日本港

口码头设计的规范、手册为基础, 对我国、美国和日本港口码头抗震设计的方法进行了分析, 同时讨论了国际航运协会标准《港口结构抗震设计指南》的有关规定, 分析得出如下结论:

1) 由于地震发生的高度随机性, 建筑场地发生超越抗震设防标准的可能性依然存在, 国外标准基本都采用多设防标准的抗震设计方法, 根据码头结构的重要性和性能要求划分了不同的抗震等级, 特别是港口运输深受地震灾害影响的日本, 对不同类别码头不同抗震设防标准下的性能要求做了细致的规定。

2) 在场地类别判别方面, 我国、美国和日本规范采用的方法各不相同。我国规范采用场地土类别、覆盖层厚度和剪切波速确定, 美国采用平均剪切波速并参考平均标准贯入击数或平均不排水抗剪强度确定, 日本规范则根据土的类型和土层厚度确定。

3) 我国、美国和日本规范采用的地基土液化判别方法各不相同。我国规范分为初判和必要时细判两个步骤, 美国规范采用地震剪力法计算抗液化安全系数, 日本的方法比较复杂, 必要时需进行地基反应分析和进行循环三轴试验。美国的设计准则还给出了预测由液化导致的地基沉降和侧向扩展的方法。

4) 我国、美国和日本规范采用的动主动土压力和动被动土压力方法各不相同。我国规范公式考虑了土粘聚力的影响, 与经典的物部-冈部公式相比, 也适用于黏性土; 美国直接采用物部-冈部公式或以静土压力为基础的简化计算方法; 对于砂性土, 日本规范采用物部-冈部公式, 对于黏性土, 采用自己的计算公式。

5) 对于重力式码头抗震设计, 我国规范计算惯性力时考虑了加速度系数沿码头高度的变化, 日本规范在基于地震危险性分析的地震系数中包含着控制变形。

6) 对于板桩码头抗震设计, 在确定板桩墙入土深度时, 对于黏性土, 除动主动土压力和动被动土压力计算方法不同外, 日本规范的方法与我国和美国的方法不同; 计算拉杆拉力和板桩墙弯矩时, 我国规范采用竖向弹性地基梁法, 美国

采用自由支撑法并考虑板的柔性对墙弯矩进行折减，日本规范采用等效梁法；验算锚碇结构时我国、美国和日本规范的方法相近。

7) 对于高桩码头抗震设计，我国规范采用根据我国地震区划图规定的地震烈度和场地类别确定地震力；美国规范采用谱加速度和场地类别，其特点是反映了中周期结构地震反应速度的影响；日本规范则将地震危险性分析得到的结果作为输入的地震波，根据结果的反应确定地震系数。我国、美国和日本规范均采用分项系数法验算码头构件的承载力。美国规范给出了多种码头变形的验算方法，

8) 在高桩码头抗震措施方面，美国规范明确了码头布置的规则性和不规则性、结构体系、桩基布置原则及板-桩连接的钢筋细部等。

参考文献：

- [37] 李颖, 贡金鑫. 有斜桩和无斜桩高桩码头地震反应的非线性有限元分析[J]. 水利水运工程学报, 2011(2): 1-13
- [38] Charles W R, Robert G, Jennifer L S, et al. Seismic Performance of Pile-Wharf Connections[R]. Berkeley, Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering University of California, 2001.

(本文编辑 武亚庆)

~~~~~

( 上接第50页 )

- [5] 宋德海, 鲍献文, 朱学明. 基于FVCOM 的钦州湾三维潮流数值模拟[J]. 热带海洋学报, 2009, 28(2): 7-14.
- [6] 王新中, 白玉川, 槐文信. 钦洲湾二维水流泥沙数学模型及应用[J]. 水科学与工程技术, 2006(1): 53-55.
- [7] 许家帅, 李蓓, 张征. 钦州港总体布局规划方案泥沙回淤研究[J]. 水道港口, 2008, 29(1): 31-35.
- [8] Chen C, Liu H, Beardsley R. An unstructured grid, finite-volume, three-dimensional, primitive equations ocean model: Application to coastal ocean and estuaries[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2003, 20 (1) : 159-186.
- [9] Warner, J C, Sherwood C R, Signell R P, et al. Development

of a three-dimensional, regional, coupled wave, current, and sediment-transport model [J]. Computers and Geosciences, 2008, 34: 1 284-1 306.

- [10] 天津市海岸带工程有限公司. 防城港核电厂工程2009年夏季全潮水文测验与分析报告[R]. 天津: 市海岸带工程有限公司, 2009.
- [11] 陈波, 邱绍芳, 刘敬合, 等. 廉州湾南流江水下三角洲大浅滩及潮流深槽形成原因分析 [J]. 广西科学院学报, 2007, 23(2): 102-105.
- [12] 王玉海. 哑铃形海湾水道-沙脊系统稳定性研究[R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2012.

( 本文编辑 郭雪珍 )

~~~~~

(上接第54页)

参考文献：

- [1] Jelesnianski C P. A numerical computation of storm tides induced by a tropical storm impinging on a continental shelf[J]. Mon Wea Rev, 1965, 93: 343-358.
- [2] 赵鑫, 黄世昌. 浙东沿海“9711”台风波浪场数值模拟研究[J]. 浙江水利科技, 2006(3): 24-27.
- [3] Ueno Takeo. Numerical computation of storm surge in Tosa Bay [J]. Journal of Ocean-ographic Society of Japan, 1981, 37(2): 61-73.

- [4] Booij N, Ris R C, Holthuijsen L H. A third-generation wave model for coastal regions 1: Model description and validation[J]. Journal of Geophysical Research, 1999, 104(4): 7 649-7 966.
- [5] Ris R C, Holthuijsen L H, Booij N. A third-generation wave model for coastal regions 2 Verification [J]. Journal of Geophysical Research, 1999, 104: 7 667-7 681.

(本文编辑 武亚庆)