

· 港 口 ·



[抗震设计讲座] 港口结构抗震设计方法的发展 (4)

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4部分, 分析和比较了我国、美国和日本规范中重力式码头和板桩码头抗震设计的方法。比较表明, 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结果确定的地震系数中包含着要求控制的变形。对于板桩码头抗震设计, 我国、美国和日本规范计算拉杆拉力和板桩墙弯矩时采用的方法不同。

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(2012)09-0070-04

Development of seismic design of port and harbor structures: part 4

GONG Jin-xin

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

Abstract: A comparative study was made on seismic design of port and harbor structures based on the Chinese code, US guidelines and Japanese standards as well as guideline of International navigation association. This is the fourth of the series papers and briefing the methods of design of gravity type quay wall and sheet pile bulkhead. It is shown that, for the design of gravity type quay wall, the seismic coefficient is height-dependent in Chinese code and deformation-decisive which is based on analysis of seismic hazard in Japanese standard. For the design of anchored sheet pile bulkhead, the method for computing tie rod force and moment in sheet pile are different in these codes.

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

6 重力式码头抗震设计

重力式码头由置于海床上的沉箱或其它重力式挡土结构组成。墙后回填土的压力由墙体和墙底摩擦力平衡。对于坚硬地基上的重力式码头, 典型的地震破坏形式是向海方向的位移和倾斜, 如图6a)所示。对于松散回填土或天然松散砂土地基上的重力式码头, 破坏形式包括墙下基础的整体变形及其引起的向海的大位移、倾斜和沉降, 如图6b)所示。对于宽高比较小的墙体(尤其是小于0.75的), 主要破坏形式是倾斜而不是水平滑移。

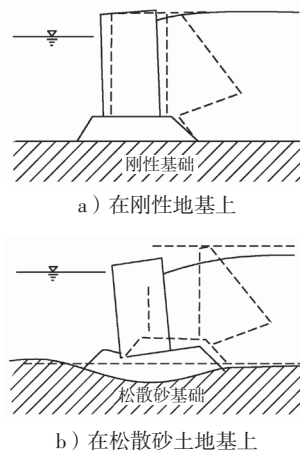


图6 重力式码头的破坏形式

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。

为防止地震作用下重力码头发生滑移和倾斜，我国规范给出了岸壁式重力码头和重力墩码头抗震验算的表达式。在永久状况和水准1地震可变状况下，日本《港口设施技术标准与解说》（2007）除要求进行抗倾和抗滑稳定性验算外，还要求进行地基承载力和圆弧滑动验算。我国与日本规范的差别反映在如下两个方面：

1) 重力式码头可视为一个刚体，但在有一定变形的基础上，其反应加速度沿码头高度增大。我国规范计算重力式码头本身的惯性力时，考虑了加速度系数沿码头高度的变化。

2) 尽管我国、美国和日本标准对重力式码头滑移和倾斜的验算方法是相似的，但日本标准明确了容许的变形程度（反映在地震系数中），而我国和美国是不明确的。

国际航运协会《港口结构抗震设计指南》（2001）^[9]指出：根据重力式码头地震破坏的特点，抗震设计控制的变形参数包括沿墙面线的位移、沉降、倾斜和位移差，码头前沿的变形包括前沿及前沿后的下沉、不均匀沉降和倾斜（图7），变形控制的标准见表10。

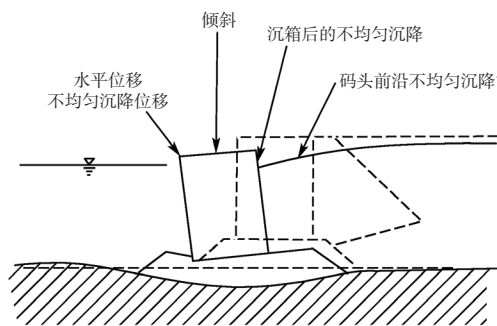


图7 描述重力式码头破坏的参数

表10 国际航运协会《港口结构抗震设计指南》中重力式码头的破坏准则

| 破坏程度 | 重力墙 | | 前沿 | | |
|------|--|--------------|-------------|-------------------|--------------|
| | 标准化的残余水平位移 (d/H)/% ^① | 向海的残余倾斜角/(°) | 前沿沉降差/m | 前沿和非前沿间的 沉降差/m | 向海的残余倾斜角/(°) |
| I | <1.5 ^② | <3 | <0.03 ~ 0.1 | <0.3 ~ 0.7 | <2 ~ 3 |
| II | 1.5 ~ 5 | 3 ~ 5 | 不适用 | 不适用 | 不适用 |
| III | 5 ~ 10 | 5 ~ 8 | 不适用 | 不适用 | 不适用 |
| IV | >10 | >8 | 不适用 | 不适用 | 不适用 |

注：① d 为墙体顶部的残余水平位移； H 为重力式墙的高度。② 也可用水平位移差不超过30 cm作替代准则。

7 板桩码头

板桩码头是由板桩墙、拉杆和锚碇结构及周围的土组成的土-结构体系。板桩码头地震中典型的破坏形式依赖于结构条件和岩土条件，如图8所示。板桩码头结构破坏主要由结构的强度控制，其次才是位移。

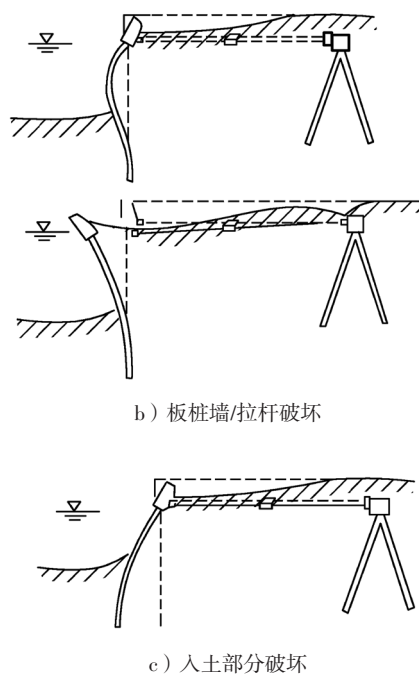
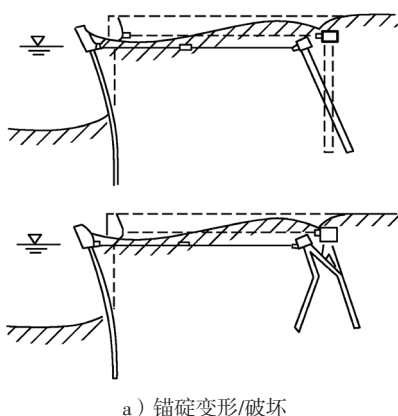


图8 板桩码头的变形和破坏方式

7.1 板桩墙入土深度

确定板桩墙的入土深度时,要求设计地震作用下板桩墙不会发生绕锚碇点的稳定破坏,即满足“踢脚”稳定要求。简化计算时,除土压力按动土压力考虑并考虑动水压力外,计算方法与静力时的情况相同。对于黏性土,我国、美国和日本规范中动主动土压力和动被动土压力的计算方法不同,对于板桩墙入土深度计算,同样也采用不同的计算公式,特别是在日本《港口设施技术标准与解说》(2007)^[8]中,板桩墙入土深度不是按墙绕锚碇点的力矩平衡确定,而是直接根据土粘聚力与码头面荷载、土密度和剩余水头的关系确定。另外,在我国《水运工程抗震设计规范》^[1]中,踢脚稳定验算时不再考虑墙后动水压力的作用,这是因为动水压力已在水下地震角中考虑,美国和日本砂性土考虑了墙后动水压力的作用。

7.2 拉杆拉力和板桩墙弯矩

板桩码头作为一种土-结构相互作用体系,拉杆拉力和板桩墙弯矩往往是一起计算得到的,计算方法有多种,如自由支撑法、弹性线法和竖向弹性地基梁法等,各规范计算中采用方法不同,土压力分布假定也不同。弹性线法只适用于单锚板桩墙的弹性嵌固状态,而竖向弹性地基梁法适用于任何工作状态。拉杆拉力和板桩墙弯矩的计算除土压力按动土压力考虑并考虑动水压力外,计算方法与静力时的情况相同。

我国《水运工程抗震设计规范》^[1]规定,计算板桩墙弯矩和拉杆拉力时可采用弹性线法和竖向弹性地基梁法,推荐采用竖向弹性地基梁法。如前所述,墙后土中水的动水压力已在表观地震系数或水下地震角中考虑,所以不再另行计算。美国《钢板桩设计》采用自由支撑法计算拉杆拉力和板桩墙弯矩,为考虑板桩墙柔性的影响,采用Rowe的弯矩折减系数对计算的弯矩进行折减。日本《港口设施技术标准与解说》(2007)采用等效梁法计算板桩墙的最大弯矩和拉杆拉力,即将板桩墙近似看作是支撑于拉杆锚碇点和泥面的一根简支梁,其上作用有泥面以上的所有荷载。图9分别给出了我国、美国和日本标准中板桩墙弯矩和拉杆拉力计算的模型。

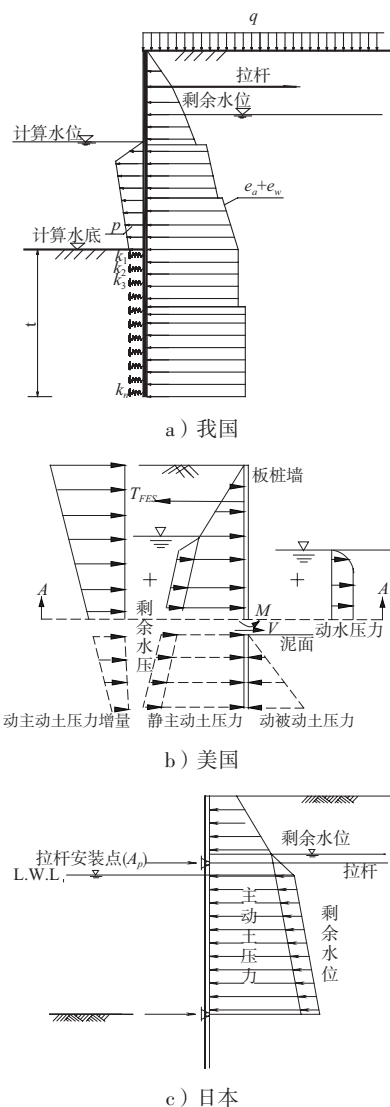


图9 我国、美国和日本标准中板桩墙弯矩和拉杆拉力计算的模型

7.3 锚碇验算

锚碇结构要承受拉杆力和墙后土体的动主动土压力的作用,并由墙前土体的动被动土压力来平衡。为了保证锚碇墙的稳定,使锚碇稳定的水平力(或力矩)应大于使锚碇滑动的水平力(或力矩),计算方法与静力时的情况相同。

采用锚碇板时,我国《水运工程抗震设计规范》^[1]、美国《钢板桩设计》和日本《港口设施技术标准与解说》(2007)均要求板桩墙后的主动破坏面和锚碇板前的被动破坏面不相交。当根据锚碇位置引出的板桩主动破坏面和锚碇板的被动破坏面在地面以下相交时,日本标准认为作用于交点以上竖直面上的被动土压力不起抵抗作用,

同时给出了动被动土压力的折减公式。锚碇板底面以下有软弱黏土层时，锚碇板下端以下会产生滑动面，锚碇板不能充分发挥其抵抗作用，这时需按圆弧或直线滑动面进行稳定性分析。采用锚碇直桩时，日本标准要求距桩和拉杆锚碇点 $l_{m1}/3$ 处引出的桩前土体的被动破坏面，与自泥面引出的板桩墙后土体主动破坏面，在桩和拉杆锚碇点的水平面以下不相交；采用锚碇叉桩时，日本标准认为拉杆拉力不只是由各桩的轴向承载力来抵抗时，要求由自泥面引出的板桩主动破坏面的后部确定。国际航运协会《港口结构抗震设计指南》（2001）给出了描述板桩码头破坏准则的参数（图10）。

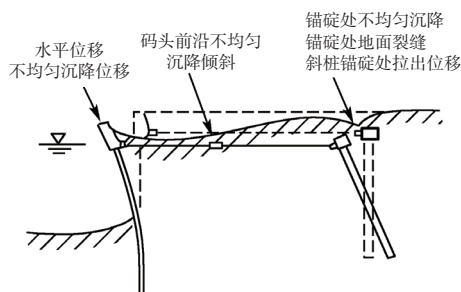


图10 板桩码头变形参数

1) 位移。

①板桩墙和码头前沿：参照重力式码头的参

数；②锚碇：沉降差，锚碇处的地面开裂，斜桩锚碇的拔出位移。

2) 强度。

①板桩（泥面）；②拉杆（包括节点）；③锚碇结构。表11为不同性能要求下的变形控制指标。

表11 国际航运协会《港口结构抗震设计指南》中板桩码头的破坏准则

| 破坏程度 | 残余位移 | | | | | 峰值响应应力/应变 | | | |
|------|-------------------------------------|----------------------|------------------|-----------------|----------------------|----------------------|----------------------|--------------------|--------------------|
| | 板桩墙 | | 前沿 | | | 板桩墙 | | 拉杆 | 锚碇 |
| | 标准化的残余水平位移 $(d/H) 1\%$ ^① | 向海的残余倾斜角/ $(^\circ)$ | 前沿沉降差/m | 前沿和非前沿区域内的沉降差/m | 向海的残余倾斜角/ $(^\circ)$ | 泥面以上 | 泥面以下 | | |
| I | $<1.5\%$ ^② | <3 | $<0.03 \sim 0.1$ | $<0.3 \sim 0.7$ | $<2 \sim 3$ | 弹性 | 弹性 | 弹性 | 弹性 |
| II | 不适用 | 不适用 | 不适用 | 不适用 | 不适用 | 塑性（小于延性系数/泥面以上的极限应力） | 弹性 | 弹性 | 弹性 |
| III | 不适用 | 不适用 | 不适用 | 不适用 | 不适用 | 塑性（小于延性系数/泥面以上的极限应力） | 塑性（小于延性系数/泥面以下的极限应力） | 塑性（小于延性系数/拉杆的极限应力） | 塑性（小于延性系数/锚碇的极限应力） |
| IV | 不适用 | 不适用 | 不适用 | 不适用 | 不适用 | 塑性（大于延性系数/泥面以上的极限应力） | 塑性（大于延性系数/泥面以下的极限应力） | 塑性（大于延性系数/拉杆的极限应力） | 塑性（大于延性系数/锚碇的极限应力） |

注：①d为墙体顶部的残余水平位移；H为泥面至板桩码头的高度。②也可采用水平位移差小于30 cm作替代准则。

板桩码头不同构件的破坏所产生的后果不同，所以确定板桩码头破坏的优先次序和破坏程度非常重要。如果锚碇结构破坏比板桩墙更难以修复，国际航运协会《港口结构抗震设计指南》

（2001）建议采用的破坏顺序为（图11）：①锚碇位移（在破坏程度I内，见表11）；②板桩墙屈服（泥面以上）；③板桩墙屈服（泥面以下）；④锚碇屈服；⑤拉杆屈服。如果板桩墙破坏要比锚碇结构更难以修复，那么锚碇屈服应发生在板桩墙屈服之前。关于板桩码头抗震设计方法的详细比较见文献[30]。

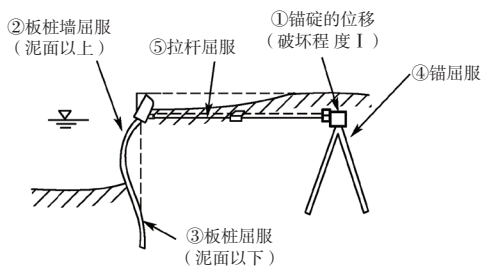


图11 建议的板桩式码头优先破坏次序

参考文献：

[30] 张娟, 贡金鑫. 中美日板桩码头抗震设计方法比较研究[J]. 水运工程, 2010(9): 136-154.

（本文编辑 武亚庆）