



# 国际港口结构抗震设计标准

王兰民<sup>1,2</sup>, Susumu Iai<sup>3</sup>, 袁中夏<sup>1,2,4</sup>

(1. 中国地震局地震预测研究所兰州科技创新基地, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000;

3. 京都大学防灾研究所, 京都 日本; 4. 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要:**从设计思想、设计方法和设计步骤等方面介绍了国际航海协会制定的国际港口结构抗震设计标准。该设计标准全面引入了性能设计的思想, 对不同港口结构在不同地基基础条件下的地震反应给予考虑。在应用上, 该标准同时具有成熟性和灵活性, 对于从事相关设计的人员是一种有益的参考。

**关键词:**国际标准; 港口结构; 抗震设计; 地震工程; 海洋工程

**中图分类号:** P315.9; TU352.1\*1      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-0844(2004)03-0193-06

## 0 引言

海岸通常是经济活跃地区, 在一个国家的经济生活中扮演着十分重要的角色。在地震多发区如日本、美国西海岸和我国环渤海、东南沿海和台湾地区, 港口所面临的地震威胁是不可低估的。一次破坏性地震对港口的破坏造成的不仅是集中而惨重的直接经济损失, 而且会带来巨大的间接经济损失。因此, 对港口结构的抗震设计自从上个世纪中期以来逐步得到了重视, 地震工程理论和技术随着电子计算机的广泛应用和迅速发展而获得了长足的进步。目前, 港口结构物的抗震设计方法和抗震技术已经呈现了“百花齐放”的局面。我国学者在这方面也做出了杰出的贡献, 特别是大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室在此领域取得了大量的研究成果。

在国际上, 海洋工程抗震设计的发展逐渐使许多学者认识到应该有一种统一的国际抗震标准来促进近海工程抗震技术在世界范围内的推广。负责港口抗震国际标准编制的国际航海协会港口结构抗震专家委员会主席井合进(Susumu Iai)教授在此方面做出了重要的贡献。井合进教授曾经长期在日本建设省港口和空港研究所工作, 在港口结构抗震研究方面有很深的学术造诣, 现在在京都大学防灾研究所工作, 在国际港口地震工程和岩土地震工程领域享有很高的知名度。

笔者近年来有幸与井合进教授进行了几次学术交流。2003年井合进教授来兰州地震研究所做学术访问, 期间作了一个系统而深入的国际抗震结构规范介绍的学术报告。井合进教授对国际港口结构抗震设计和岩土结构抗震设计规范的热情大大感染了笔者。笔者欣然命笔, 介绍该规范以飨国内相关专业人员, 以期有所裨益。

## 1 国际航海协会港口结构抗震标准编制工作简介

上个世纪80年代以来在日本和美国的几次地震中港口结构遭受了严重的破坏。如1994年的美国

收稿日期: 2004-05-21

基金项目: 甘肃省科技攻关项目(2GS035-045-081); 中国地震局兰州地震研究所论著编号: LC20040032

作者简介: 王兰民(1960-), 男(汉族), 陕西蒲城人, 研究员, 博士, 主要从事地震工程和黄土动力学研究。

North Ridge 地震、1995 年的日本阪神地震等,给港口结构抗震提出了新的难题。另一方面,地震工程技术的进步也使得制定可以在世界范围内推广的港口结构抗震标准成为可能。于是,国际航海协会在 1997 设立了一个专家委员会(PIANC/MarCom/WG34)专门负责制定港口结构抗震标准。专家委员会成员由来自阿尔及利亚、丹麦、德国、荷兰、加拿大、美国、日本、西班牙、希腊、意大利、英国共 11 个国家的专家组成。

专家组的主要目标是制定一套可以得到广泛国际支持的港口结构抗震设计标准。因为港口结构特征的巨大差异性,要求采用一种基于地震反应和性能要求的演进式抗震设计思路。这个专家组从已经得到实践证明的简化设计方法直到最先进的分析方法中慎重选择合适的抗震设计分析方法,并将它们有机地整合成一套统一的港口结构抗震设计方法。2001 年,国际航海协会港口结构抗震专家委员会将数年的研究成果辑成“港口结构抗震设计指南”(Seismic Design Guidelines for Port Structures)一书出版<sup>[1]</sup>。然而,国际航海协会港口结构抗震专家委员会的使命还没有完成,考虑到港口结构种类的复杂、建设场地地震地质和岩土工程条件的差异,该专家组目前还在进行更多的研究和协商,按计划要到 2007 年才能最后完成国际港口结构抗震设计标准的编制。

## 2 港口结构的地震反应

传统的设计思想是在地震作用下结构必须保持稳定。设计中通常要通过计算和评价确定一个临界值:当地震作用低于这个临界值,结构保持稳定而且不会有移动;地震作用高于这个值,结构可能会遭受破坏。这样的设计思想到了上个世纪 80 年代以后受到了挑战,特别是 90 年代的几次地震让人们意识到,抗震设计要考虑比结构稳定临界值更多的内容,这就是所谓的结构性能。结构的性能包括了结构变形、失效和破坏程度几方面的情况。这就是目前逐渐被越来越多的人接受、并且陆续反映在许多国家的建筑规范中的性能设计(Performance-based design)思想。

不同的港口结构其地震反应是不同的。现归纳为三种主要类型分述如下。

### 2.1 重力式海堤<sup>[2]</sup>

重力式海堤是置于海床的沉箱或者其他类型的刚性墙。它靠底部的摩擦来维持稳定。在地震作用下,重力式海堤的典型失效模式有三种:向海的移动、沉降和倾斜。发生这三种情况与重力式海堤的基础和地震作用条件有关。建立在刚性基础上的重力式海堤由于基地的稳定性比较好,惯性力比较大,在地震力作用下挡土墙压力增大,海堤可能发生向海的平移。而如果海堤的宽高比较小小时,海堤也同时可能发生向海倾斜(图 1(a))。这是多数重力式海堤在地震作用下遭受破坏的情形。相反,如果海堤建立在比较松散的基础之上,如经过一定处理的密实度不太高的砂层或者含软泥的砾石层上时,在地震作用下底部土层就可能发生较大变形。加上孔隙水压力的增长,这样重力式海堤会发生复杂的地震反应,经常同时发生向海的移动、倾斜和基地沉降<sup>[3]</sup>。这种破坏模式在 1995 年的神户地震中引起了关注(图 1(b))。

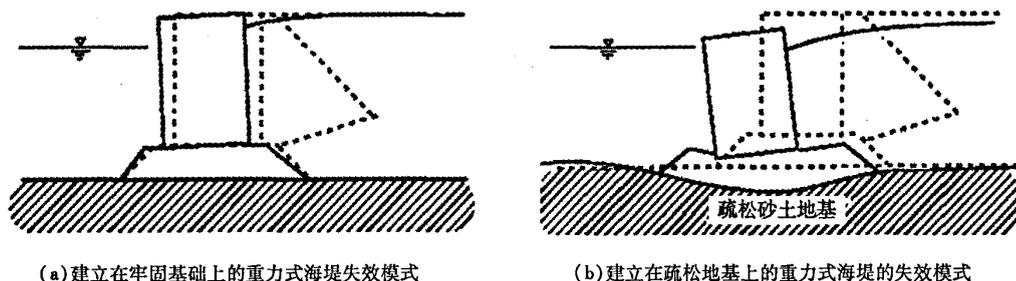


图 1 重力式海堤的失效模式

Fig. 1 Failure modes of gravity quay wall in earthquake.

### 2.2 锚固的席桩墙

锚固的席桩墙由墙体、固定锚和拉杆构成(图 2),它们对整个结构的稳定共同起着稳定的作用。在极

限稳定状态下,应该确定那一部分首先屈服。如果锚发生太大的位移,整个席桩墙有发生崩溃的危险。但是,一定的锚位移却能降低拉杆的张力和墙体的弯矩,从而对整个席桩墙的稳定是有益的。因此席桩墙均衡性的地震反应对确定席桩墙在地震作用下合理的性态是至为关键的,也就是说,在地震作用下只要墙体、固定锚和拉杆的变形在控制范围内,而且整体的稳定和平衡没有被破坏的话,锚固的席桩墙还是能够继续使用。

岩土工程条件的不同可以导致锚固席桩墙在地震作用下的破坏模式不同。根据土层的松散程度和饱和度可以发生三种破坏模式。

(1)如果松散土层的变形主要影响的是固定锚的话,固定锚将发生向海的倾斜和移动(图3(a))或者固定锚上部遭受破坏而屈服(图3(b))。相应地,固定锚的这种变化引起墙体、尤其是墙体上部的向海位移。在这种情况下,由于固定锚的失效,席桩墙基本难以继续使用。而这也是在地震中见到最多的破坏方式。

(2)如果松散土层的变形主要是墙后填土的位移和变形,而固定锚基本保持稳定的话,那么可能发生的破坏方式有:A.如果拉杆的强度相对较高,那么通常与拉杆链接的墙体上部的变形不大,基本保持稳定,而墙体的中部由于填土的位移而发生向海的翘曲,严重者墙体中部可以屈服破坏(图4(a));B.如果拉杆的强度比较低而发生断裂时,那么墙体底部在摩擦力作用下可以保持相对稳定,发生的变形不会太大,而墙体上部由于拉杆的断裂而失去平衡向海倾移(图4(b))。

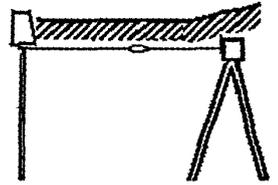
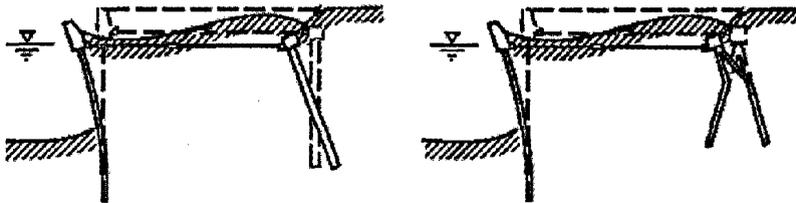


图2 锚固的席桩墙构成示意图

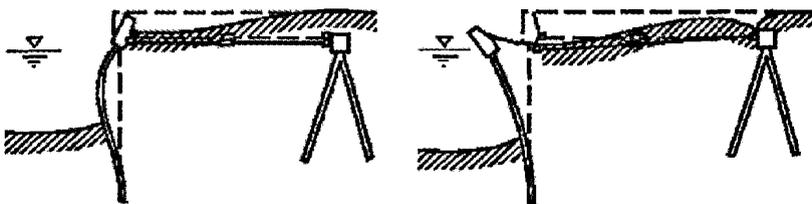
Fig. 2 Sketch of anchored sheet pile quay wall.



(a) 锚向海移动 (b) 固定锚屈服破坏

图3 由于固定锚变形/破坏引起的锚固席桩墙的破坏模式

Fig. 3 Failure modes of sheet pile wall caused by deformation/failure of anchor.



(a) 墙体变形引起的破坏 (b) 拉杆断裂引起的破坏

图4 由于墙体变形/拉杆断裂引起的锚固席桩墙的破坏模式

Fig. 4 Failure modes of sheet pile wall caused by wall deformation or tie-rod break.

(3)如果松散土层的变形主要影响席桩墙的地基基础部分的话,那么主要的问题就是地基基础变形所引起的墙体底部的向海位移和挠曲变形(图5)。发生这种情况的条件是固定锚和拉杆的强度很高而固定锚嵌入的地层也相对稳定。如果墙体的强度不够高的话,那么席桩墙会发生断裂。这样的情况在实际震害调查中并不多见。这是因为在现在的设计中通常墙体嵌入部分是相对稳固的,因此通常是墙体或者固定锚的屈服和破坏发生在先。

### 2.3 桩基码头

桩基支撑的码头由上部平台和下部的桩基和防波堤构成。因为防波堤是一个斜坡面,所以不同的桩基露出防波堤的非土层支持长度是不相同的。非土层支持的桩基段的稳定性要比埋入土层的桩基段差。因此,桩基非土层支持长度的不同对于桩基的在地震作用下的反应有一定影响。桩基支持的码头有三种破坏情况:如果码头是建立在稳固的基础之上而且其下的防波堤刚性很高、相对稳定的话,造成码头破坏的主要原因就是地震惯性力作用(图 6(a))。此时靠近海岸部分的桩基的弯矩最大,因为这些桩基的非土层支持最短,变形主要非土层支持段发生。如果码头的挡土墙也发生较大的位移时,码头平台会被向海推动,从而发生如图 6(b)所示的破坏模式。对于建立在相对松散基础上的码头,因为防波堤的稳定性较差,它会在地震作用下产生位移,从而带动桩基向海移动,导致如图 6(c)所示的破坏模式。

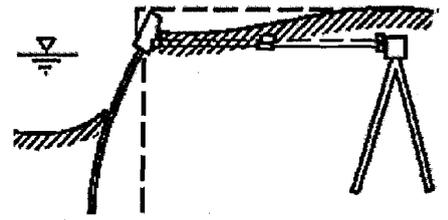
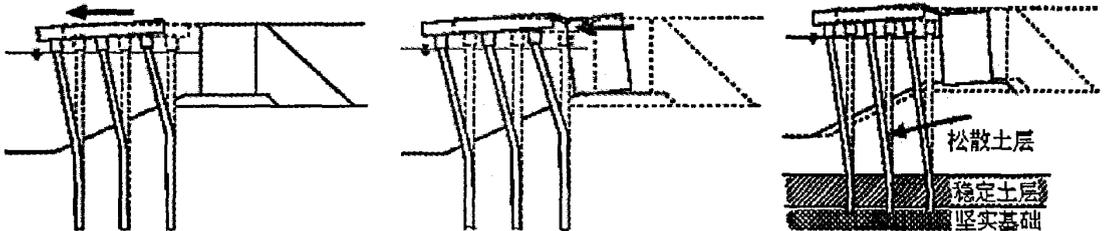


图 5 由于嵌入地基变形引起的席桩墙破坏模式

Fig. 5 Failure mode of sheet pile wall caused by failure of embedment.



(a) 由于平台惯性力引起的破坏 (b) 由于挡土墙水平推力引起的破坏 (c) 由于松散土层平移引起的破坏

图 6 桩基支撑的码头的破坏模式

Fig. 6 Deformation/Failure modes of pile supported wharf.

在通常的设计中对于第一种情况考虑的较多,而现在对于后两种情况需要更多的注意。特别是 1989 年的美国的 Loma Prieta 地震和日本的神户地震都证明了这点。

### 3 港口结构抗震性态设计的思想

性态设计是从上个世纪 90 年代以来发展起来的。在传统的设计中只是考虑让结构能够承受一定的地震作用力,但是对于超过这个极限的情况没有做太多考虑。而且,要让结构在超越概率很小的强地震作用下其极限平衡不被破坏的话,按照传统设计所需要的建设或者加固代价太高了。在性态设计中,先要确定适当水平的地震作用和能接受的结构损坏<sup>[4]</sup>。典型的地震作用水平有两个:一级地震作用是指在结构使用期内很可能会遇到的地震作用,二级地震作用则指不大可能遇到的强震作用。可接受损坏程度是按照使用者或者业主对结构的具体需要来定义的。表 1 给出了常用的损坏度定义。

在设计地震水平和结构损坏度定义之后就可以给出需要的性态等级,如表 2 所示。在性态设计中就是要满足这些性态要求。对结构而言,性态等级 S 的含义是保证可继续正常使用,因此需要高等级的抗震设计。等级 A 的含义是地震破坏在允许变形(破坏)之内,即结构的功能没有受到大的影响,只需稍微的维修即可正常使用。等级 B 的含义是遭受的地震灾害可承受,在高地震烈度条件下生命和部分财产可以得到保护。等级 C 的含义是当遭遇在使用期限内很可能遇到的地震灾害时,结构的破坏可以修复,而在高地震烈度条件下,则会发生灾难性的破坏。

表1 性态设计中的结构损坏度

| 损坏度       | 结构损坏      | 功能损失        |
|-----------|-----------|-------------|
| I(正常使用)   | 轻微或者没有损坏  | 使用功能几乎不受影响  |
| II(可修)    | 控制范围内破坏   | 短期不能使用,需要维修 |
| III(接近倒塌) | 严重损坏,接近倒塌 | 长期或者无法使用    |
| IV(倒塌)    | 完全倒塌      | 无法使用        |

表2 性态等级定义

| 性态等级 | 不同设计地震动水平下的结构损坏度 |         |
|------|------------------|---------|
|      | 一级               | 二级      |
| S    | 损坏度 I            | 损坏度 I   |
| A    | 损坏度 I            | 损坏度 II  |
| B    | 损坏度 I            | 损坏度 III |
| C    | 损坏度 II           | 损坏度 IV  |

性态设计的主要步骤可以用图7所示的流程图来表示。需要说明的是,性态等级有时应该按照结构的重要性去定义。对于非常重要的结构其性态等级应该采用S级,而对那些重要程度,或者说遭受破坏后损失并不很大的结构其性态等级可以适当降低。图7中的结构损坏标准是指具体确定的结构地震反应参数如位移、极限应力状态、延展因子等。经过分析后如果结构反应满足结构损坏标准限制则性态设计分析完成,否则需要修改设计或者进行地基加固,然后按同样的程序进行分析,直到分析结果满足要求为止。关于结构地震反应分析将在下文给予讨论。

### 4 港口结构地震性态评价和分析

性态设计的目的是评估港口结构的地震反应,从而得知其是否在允许极限(位移、应力、延展/应变)之内。性态等级要求高的结构需要做比较精细的分析,相反,性态等级较低的结构其分析也可以相对简化。现在有一系列可以用于分析场地效应、液化势和结构地震反应的方法。可以把这些方法归纳为如下几类<sup>[5]</sup>:

- (1)简单分析:只适用于评估位移、弹性反应极限和地震作用下永久性位移的数量级阈值;
- (2)简化的动力分析:考虑动力反应因素,但做了简化处理,能够用来大体评估位移、应力、延展/应变的程度;
- (3)动力分析:动力方法比较复杂,其实现也需要较多的输入,相应地成本也最高,可以同时港口结构的破坏模式和位移、应力和延展/应变的程度提供比较可靠的信息。

以上方法的使用主要根据结构的性态等级要求来定(图8)。当然,这是建立在通常的成本考虑之上的。大体上讲,性态等级越高对分析方法的要求也越高。

### 5 结语

国际航海协会的港口结构抗震设计标准引入了性态设计的概念。对于不同的港口结构首先要考虑它们在地震作用下的不同破坏方式,然后根据性态设计的步骤,首先由用户/业主确定可以接受的结构损坏度;设计者需要确定对一定场地的地震动强度水平、结构破坏的参数标准以及结构的性态等级;在此之上,设计者选用适当的分析方法进行结构和场地地震反应分析,如果分析结构不能满足要求,那么需要对设计进行修改或者对场地进行处理,然后按同样的步骤进行设计分析,直到结果满足要求。

虽然不同的多地震国家已经或多或少存在港口结构抗震设计规范,但是国际航海协会的这个抗震设

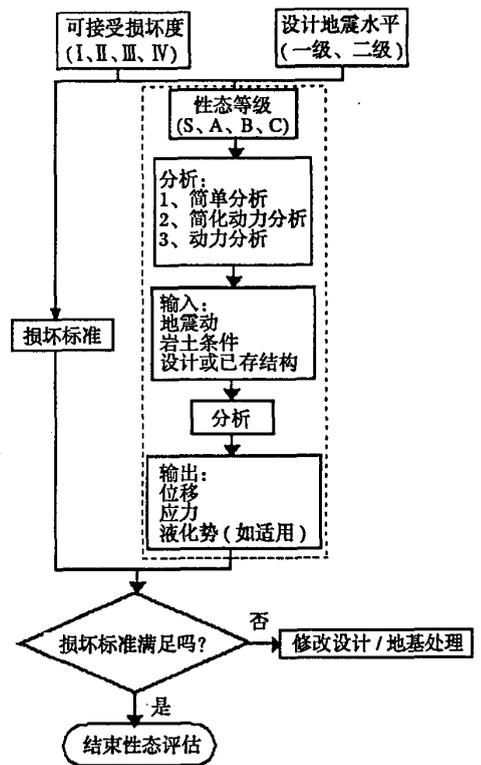


图7 港口结构抗震性态设计流程<sup>[5]</sup>

Fig.7 Flowchart of performance-based seismic design for port structures.

计标准对于指导港口结构的抗震设计,提高港口结构的抗震性能方面仍然有一定的积极意义。同时,为国际普遍推广而制定的该标准具有使用方便灵活和概念新颖的特点,对于从事港口设计的人员来说不失为一种有益的参考。

| 分析方法    | 性态等级 |   |   |   |
|---------|------|---|---|---|
|         | C    | B | A | S |
| 简单分析    |      |   |   |   |
| 简化的动力分析 |      |   |   |   |
| 动力分析    |      |   |   |   |

标准 / 最终设计适用

初步设计或弱地震强度适用

图8 不同分析方法的适用性<sup>[5]</sup>

Fig.8 The applicability of different analysis methods.

[参考文献]

- [1] PIANC. Seismic Design Guidelines for Port Structures [M]. Balkema, the Netherlands, 2001.
- [2] Steedman R S. Seismic design of retaining walls, Geotechnical Engineering[C]. in Proc. Institution of Civil Engineers[A], USA, 1998. 131:12-22.
- [3] Port and harbor research institute. Handbook on Liquefaction Remediation of Reclaimed Land [M]. Balkema, the Netherlands, 1997. 372.
- [4] SEAOC. Performance Based Seismic Engineering of Buildings[M]. Structural Engineers Association of California, Sacramento, California, USA, 1995,
- [5] Iai S, and Ichii K. Performance based design for port structures[C]. in Proc. UJNR 30th Joint Meeting of United States - Japan Panel on Wind and Seismic Effects[A]. Gaithersburg, USA, 1994.

## INTERNATIONAL STANDARDS FOR SEISMIC DESIGN OF PORT STRUCTURES

WANG Lan-min<sup>1,2</sup>, Susumu Iai<sup>3</sup>, YUAN Zhong-xia<sup>1,2,4</sup>

- (1. Lanzhou Base of Institute of Earthquake Prediction, CEA, Lanzhou 730000, China;
- 2. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, China;
- 3. Disaster Prevention Institute, Kyoto University, Kyoto, Japan;
- 4. Institute of Engineering Mechanics, Harbin 150080, China)

**Abstract:** In this paper, the design principles, methodology and steps of International Guidelines for Aseismic Design of Port Structures are introduced. This international standard incorporates performance-based design and concerns the different seismic responses under different foundation conditions for different port structures during earthquake. These guidelines are mature in technology and flexible in practical use as well, which can be beneficial reference for professional in the field of aseismic design of port structures.

**Key words:** International standard; Port structures; Aseismic design; Earthquake engineering, Ocean engineering