

· 港口 ·



[抗震设计讲座] 港口结构抗震设计方法的发展(2)

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。该系列论文共分6部分, 本文为第2部分。分析和比较了我国规范、美国指南、日本规范和《港口结构抗震设计指南》中港口水工建筑物的抗震设防原则、设防目标和设防水准、建筑物的设防类别。结果表明: 国外标准基本都采用多设防标准的抗震设计方法, 根据港口水工建筑物的重要性和性能要求划分了不同的抗震等级。

**关键词:** 港口工程; 抗震设计; 规范

中图分类号: U 612.31<sup>7</sup>

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)07-0071-06

**Development of seismic design of port and harbor structures: part 2**

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 harbour structures based on Chinese code, US guidelines and Japanese standards as well as guideline of International navigation association. This is the second of the series papers. The philosophy, performance objectives, hazard levels of seismic design and classification of marine structures specified in these codes were analyzed. It is shown that all the codes except Chinese code are multi-performance objectives and multi-hazard levels for seismic design, and different classifications are made per the consequence of collapse of structure under earthquake.

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

**2 抗震设防**

**2.1 设防原则**

抗震设防是指对建筑物进行抗震设计和采取抗震构造措施, 使建筑物具有要求的抗震能力。进行抗震设计, 要求有明确的设防原则。设防原则是指对工程进行抗震设防的总要求和总目标。世界任何一个国家的抗震设计规范, 都会在其总则或说明中, 明确规范的设防原则。这些原则概况起来包括下列几个方面: 1) 防止人员伤亡或减少人员伤亡; 2) 减轻财产损失; 3) 工程和设施允许在地震时发生有限破坏, 但应便于修复;

4) 工程和设施在遭遇地震时要保证安全, 不得向外泄漏有害物质, 不导致严重次生灾害(停止运行原则); 5) 工程和设施在遭遇地震后要保证继续运行(安全运行原则)。

很明显, 不同的设防原则会导致不同的设计方法, 同时也直接影响设防投资的规模。由于各国的国情不同, 经济和技术水平乃至使用的材料和工艺以及传统习惯和管理方法也不同, 因此对于不同的工程和不同的地区也不必采用相同的原则。为达到要求的设防目标, 抗震设计规范规定了不同的抗震设防标准和对建筑物进行了设防类

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。

别划分。

## 2.2 设防目标和设防水准

在明确抗震设防原则后,进行抗震设计还要定义设防目标和设防水准。抗震设防标准是根据社会经济条件、破坏后果和技术水平确定抗震设防参数;或者说应该选择多大强度的地震动能进行抗震设防,涉及到国家政策和人民生命财产的安全。抗震设防标准是衡量对建筑物抗震能力要求高低的综合尺度。

目前国内外设计规范一般采用多水准的抗震设计,不同的水准对应于不同的设防目标,采用不同的重现期。在我国,抗震设防的依据是抗震设防烈度及与此对应的地面最大加速度。抗震设防烈度是一个地区作为抗震设防依据的地震烈度,按国家规定权限审批或颁发的文件(图件)执行。对于不同的设防目标,我国建筑抗震设计规范<sup>[16]</sup>采用调整设防(设计)烈度及相关措施的方法。国外规范多根据不同的抗震等级,抗震计算时采用乘重要性系数的方法。

目前国际上结构抗震设计发展的一个重要方向是基于性能的设计<sup>[8-9,17]</sup>,抗震性能用一个指定的地震危险水准(地震地面运动)下的最大允许破坏状态(性能水准)来描述。一个性能目标可以包括若干地面运动水准下的不同破坏状态。因此,可以采用双水准或多水准的性能目标。ATC-40<sup>[18]</sup>中每个性能目标包含两部分:破坏形态和地震危险水准。

1) 我国JTJ 225—1998《水运工程抗震设计规范》。

我国JTJ 225—1998《水运工程抗震设计规范》采用《中国地震烈度区划图》(1990)<sup>[19]</sup>确定的基本烈度作为设计烈度。基本烈度为50 a内超越概率为10%的烈度,重现期为475 a。规定当设计烈度为6度时,可不进行抗震计算,但需按规范采取抗震构造措施。对于设计烈度高于9度的建筑物,抗震设计应作专门的研究进行论证。对次生灾害严重或特别重要的建筑物及高烈度区,要求做地震危险性分析,当需要采用高于或低于基本烈度作为设计烈度时,要经过批准。

2) 美国《加利福尼亚海洋油码头抗震准则》。

对于油码头的设计,美国《加利福尼亚海洋油码头的抗震准则》<sup>[6]</sup>采用4个抗震设防标准:①水准1,50 a内超越概率为50%。这一地震的重现期为72 a,认为是常遇地震,在设施使用年限内可能发生一次或多次,用于强度验算。②水准2,50 a内超越概率为10%。这一地震的重现期为475 a,认为是主要地震,用于强度和延性验算。③水准3,50 a内超越概率为5%。这一地震的重现期为975 a,认为是罕遇地震,用于强度和延性验算。④水准4,50 a内超越概率为3%。这一地震的重现期为1 641 a,认为是极罕遇地震,用于防护体系验算。

对于海洋石油港口设施的设计,抗震准则的实施目标是:①在结构的整个使用年限内,可以抵抗一次或多次常遇地震,结构无任何损伤的征兆,使用中的设备不应发生大的事故。②可抵抗认为是很少发生的主要地震,为保证生命安全,避免全部倒塌,但允许出现能够修复的可控制非弹性变形。③在罕遇地震发生和发生后,与安全操作、停止运行和紧急操作功能相关的关键设施和部件能够安全运行。④在极罕遇地震发生和发生后,避免危险和污染物大量泄露。

在具体设计中,需要对使用极限状态和损伤控制极限状态进行验算。①使用极限状态:所有结构和基础能够承受水准1下的地震作用,震后无须修复即可使用。②损伤控制极限状态:除有特别规定,在水准2地震作用下,允许结构及基础出现可修复的损坏,但不允许倒塌,以保证生命安全。在这一水准地震下,结构或基础出现允许范围内的永久变形和可修复的损坏;在水准4地震作用下,有危险性物质的码头不出现大量危险物泄露。

3) 美国《海洋油码头》<sup>[3]</sup>。

在美国《海洋油码头》<sup>[3]</sup>中,抗震性能按两个水准确定。

水准1要求保障海洋油码头正常运营,具体为:①小的损坏或无结构破坏;②临时或不会造成使用中中断。

水准2要求抵抗主要结构破坏或倒塌,具体

为：①损坏可修复、具有可控制的非弹性结构性能；②防止结构倒塌；③暂时丧失运行功能，数月内可修复；④防止大量油泄漏（≥1 200桶）。

设计中要求对码头结构的变形能力进行验算，满足表1的要求，其中风险等级见表2。已有海洋油码头风险等级按下面条件划分：①油运输中暴露的总体积；②每年每泊位系统的油运输次数；③泊位的最大船容量（DWT）。如果采用风险降低措施，油运输中暴露的最大容量少于1 200桶，可降低设施的等级。所有新的海洋油码头归为高风险等级。

表1 美国《海洋油码头》地震性能要求

风险等级	抗震性能水准	50 a内超越概率/%	重现期/a
高	1	50	72
	2	10	475
中	1	65	48
	2	15	308
低	1	75	36
	2	20	224

表2 美国《海洋油码头》中的风险等级

风险等级	油泄漏/桶	每泊位每年运转次数/次	最大船容量/ (DWT × 1000)
高	≥1 200	N.A.	N.A.
中	<1 200	≥90	≥30
低	<1 200	<90	<30

4) 日本《港口设施技术标准和解说》(2007)<sup>[8]</sup>。

日本《港口设施技术标准和解说》(2007)<sup>[8]</sup>采用两个地震水准和基于性能的设计方法，按性能要求将港口设施分为4个不同的类别，所有类别的港口设施在水准1地震下都要保持要求的使用性能，不需修复即可立即使用；在水准2地震下，不同类别的抗震设施的要求见表3。水准1地震的重现期为475 a，水准2地震为约2 000 a。

5) 国际航运协会《港口结构抗震设计指南》(2001)<sup>[9]</sup>。

表3 日本《港口技术设施标准和解说》中抗震强化设施的类别

性质	抗震强化设施	水准2地震作用后的性能		要求的性能	允许的修复程度
		结构	性能		
特定	紧急物资运输	地震后，结构保持整体稳定，能够很快恢复使用、运送乘客和运输紧急救援物资	地震后具有必要的功能（不需要原设计的功能）	使用性*	小的修复
	干线货物运输	地震后，结构保持整体稳定，能够快速恢复使用和干线货物运输	原设计要求的功能	可修复性	小的修复
一般	紧急物资运输	地震后，结构保持整体稳定，能够在一段时期内进行紧急物资运输	地震具有必要的功能（不需要原设计的功能）	可修复性*	一定程度的修复

注：\*表示对设施地震后要求的性能（紧急物资运输），不是设施设计要求的性能。

《港口结构抗震设计指南》<sup>[9]</sup>是一本基于性能的设计指南，采用两个地震水准进行抗震设计：①水准1（L1）：在结构设计使用期内，可能经常发生的地震，超越概率为50%；②水准2（L2）：能够产生非常强烈地面运动的地震，超越概率为10%。

如果港口结构使用期为50 a，则水准1和水准2地震的重现期分别为75 a和475 a。

可接受的破坏程度根据业主要求而定，表4为设计中结构破坏和功能丧失的可接受程度。结构破坏程度直接与恢复结构的全部功能所需要的工程量有关，定义为地震造成的直接损失；功能丧失类型与恢复全部或部分使用功能所

需时间和成本有关，与使用功能丧失对应的经济损失称为间接损失。这里所指的功能除为海洋运输提供服务外，还包括人员生命和财产的保护、紧急运输功能、防止危险物品泄漏。在按表4定义了设计地震水准和可接受的破坏程度后，要求的结构性能可根据表5所列的性能等级S,A,B和C确定。在基于性能的设计中，结构与这些性能等级相一致。

该指南指出，采用水准1和水准2双水准设计方法的目的是如下：1) 保证水准1地震下港口的安全性与使用性要求；2) 描述水准2地震下港口的破坏程度与破坏方式。双水准设计方法特别适用于中等和强烈地震活动区。在这种情况下，水准2

表4 基于性能设计的可接受破坏程度<sup>①</sup>

破坏程度	结构性能	使用性能
程度 I：正常使用	很小或没有破坏	很小或没有丧失使用功能
程度 II：可修复	控制范围内的破坏 <sup>②</sup>	使用功能短期丧失 <sup>③</sup>
程度 III：接近倒塌	接近倒塌的破坏	使用功能长期或完全丧失
程度 IV：倒塌 <sup>④</sup>	结构完全破坏	使用功能完全丧失

注：①还应考虑保护人的生命财产、紧急转移及防止危险品泄漏的功能。②在有限的非弹性反应或残余变形范围内。③因为维修而导致结构短期或长期丧失功能。④对周围环境没有明显的影响。

表5 性能等级S,A,B和C要求的结构性能

性能等级	设计地震	
	水准1 (L1)	水准2 (L2)
S级	程度 I：正常使用	程度 I：正常使用
A级	程度 I：正常使用	程度 II：可修复
B级	程度 I：正常使用	程度 III：接近倒塌
C级	程度 II：可修复	程度 IV：倒塌

地震下的破坏准则可能不能保证水准1地震下的安全性和使用性，水准1地震下的性能标准也不能保证水准2地震下的性能标准。所以，较强的水准2地震不一定能够单独决定最终的设计，最终设计也可能受水准1地震下的性能准则影响或控制。

对于地震活动较低的地区，水准1地震可能没有太多的工程意义。在这种情况下，只使用水准2地震及规定的破坏准则即可，因为水准2地震下的性能要求足以保证对水准1地震所要求的性能。需要注意的是，这种情况下单一水准的设计方法在某些程度上类似于传统的设计方法，区别仅在于结构设计时与规定的可接受的破坏程度一致。

综上，除我国水运工程抗震设计规范外，国外规范都采用多目标、多水准的抗震设计方法，更为先进的则采用了基于性能的设计方法，如国际航运协会标准和日本标准。2007年颁布的土耳其《港口结构抗震设计规范》(2007)也采用了基于性能的抗震设计方法<sup>[20]</sup>，首先，按照港口结构的预期抗震性能、使用及功能的重要性，将其分为特殊结构、一般结构、简单结构和非重要结构。结构的性能水平按不同损坏程度分为最低损坏水平(MD)、可控制的损坏水平(CD)、一般损坏水平(ED)和倒塌破坏。抗震设计中地震地面运动

采用E1、E2和E3共3个设计水准，重现期分别为72 a，475 a和2 475 a，50 a内的超越概率分别为50%，10%和2%。在不同的地震水平下，要求满足不同的性能目标。

我国GBJ 11—1989《建筑结构抗震规范》<sup>[21]</sup>1989年就采用了“三设防水准、两阶段验算”的抗震设计方法。抗震设防的一般目标是：当遭受多遇的、低于本地区设防烈度的地震影响时，建筑物一般不受损坏或不需修理仍可继续使用(第1水准)；当遭受本地区设防烈度的地震影响时，建筑物可能有一定程度的损坏，经一般维修或无需修理仍可继续使用(第2水准)；当遭受高于本地区设防烈度的预估罕遇地震影响时，不致倒塌或发生危及生命的严重破坏(第3水准)。概括起来就是要做到“小震不坏，中震可修，大震不倒”。小震、中震和大震的定义如图1所示。小震不坏、大震不倒的抗震设防目标是通过下列两个阶段的抗震设计来实现的。第1阶段：通过对多遇地震烈度、弹性地震作用下结构截面强度的验算，隐含着设防烈度的地震作用下的变形验算，保证小震不坏和中震可修；第2阶段：通过对罕遇地震烈度地震作用下结构薄弱部位的弹塑性变形验算，并采取相应的构造措施保证大震不倒。对2008年5月12日我国汶川大地震中房屋建筑破坏的调查结果看<sup>[22]</sup>，尽管一些地区的实际烈度大大超过了设防烈度，但按GBJ—1989规范及GB—2001规范设计、建造的房屋破坏程度相对较轻，或坏而未倒，起到了“大震不倒”的作用，保障了人生命的安全。由此可见结构抗震多设防水准的重要性。

《建筑结构抗震规范》在经过GBJ 11—2001版修订和2008年的局部修订后，2010年颁布的GBJ 11—2010版增加了抗震性能设计的方法，标志着我国建筑抗震向性能化方向发展，对提高我国建筑结构的抗震设计水平具有重要意义。文献[23]介绍了日本在建筑、桥梁、港口和水工结构抗震性能设计方面发展；文献[24]结合我国汶川地震，介绍了美国和日本桥梁抗震性能设计方面的特点。

### 2.3 建筑物设防类别

建筑物抗震设防类别指根据建筑物的用途、

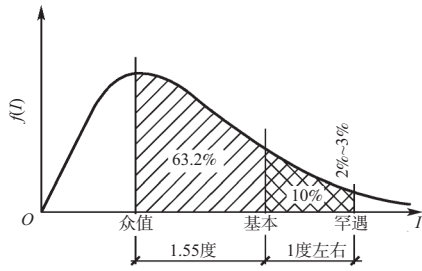


图1 3种烈度的定义

性质和作用、地震破坏后果、经济损失和社会影响而对建筑物划分的等级，不同设防类别建筑物的抗震设计要求不同。

我国JTJ 225—1998《水运工程抗震设计规范》没有划分水运工程建筑物的抗震设防类别，美国统一设施准则《设计：墩与码头》（UFC 4-152-01：2005）按码头重要性和失效后果划分为SUG III，SUG II和SUG I共3类（表6）；美国《海洋油码头》按码头风险等级分为高、中和低3类（表2）；日本《港口技术设施标准和解说》（2007）按地震后码头起的作用分为HR-E，HR-C，IR和NR共4类（表7），对于不同的类别，水准I和水准II时对码头结构的抗震性能要求不同。在L1地面运动下，要求所有设施能够满足使用性要求，不进行任何修复工作即可继续使

用。例如，对于开敞式码头，如果设计使钢桩轴向力不超过地基承载力、钢桩应力不超过极限应力及混凝土面板的合应力不超过计算的力，则认为保证了码头的使用性能。在L2地面运动下，性能要求根据港口设施的等级不同而不同。对于运输应急物资（HR-E）的设施，同样要求满足使用性能以保证顺利运送救援物资。对于国际海运集装箱码头（HR-C），在L2地面运动下要求具有可修复性能，在几个星期内，进行小的修复设施即可以重新使用。对于中等抗震设施，要求能够安全抵抗L2地面运动；国际航运协会《港口结构抗震设计指南》按码头结构的抗震效果分为4类（表7）。由表2,6~8可见，尽管港口水工建筑物形式不同，划分的类别数目不同，但划分的原则和方法基本是一致的，即建筑物越重要、受灾的直接损失和间接损失越大，所定级别越高。

表6 美国统一设施准则《设计：墩与码头》中码头结构的抗震设防类别

性能等级	结构描述
SUG III	极为重要的结构，失效后果极为严重
SUG II	中等重要的结构，失效后果可以接受，可以维修
SUG I	不属于SUG III与SUG II的结构

表7 日本《港口技术设施标准和解说》中要求的抗震性能

类别	高抗震设施		中等抗震设施（IR）	一般抗震设施（NR）
	地震后应急物资运输设施（HR-E）	国际海运集装箱码头（HR-C）		
L1	使用性	使用性	使用性	使用性
L2	使用性	可修复性	安全性	不推荐

表8 国际航运协会《港口结构抗震设计指南》中码头结构的重要性分类

性能等级	基于结构抗震效果的定义
S级	①地震破坏时会造成大量的人员生命和财产损失的关键结构
	②从地震灾害中恢复时，要求能够使用的关键结构
	③处理危险品的关键结构
	④如果中断使用，可能造成地震破坏区严重的经济和社会影响的关键结构
A级	重要的、严重性略低于等级S①~④中的结构或称结构⑤，即破坏后难于修复的结构
B级	不属于A、C和S级的普通结构
C级	小型、容易修复的结构

除表7的论述外，日本《港口技术设施标准和解说》（2007）强调了不同抗震强化设施在水准2地震下的作用和功能，如表3所示。特定抗震强化设施（紧急物资运输）要求在水准2地震的偶然状况下，保证结构的使用性能。使用性能不是指在水准2地震作用后完全未受损坏，而是指设施的损坏很小，不会影响紧急物资的运输。

专门的抗震强化设施（干线货物运输）要求在水准2地震的偶然状况下，保证结构的可修复性。可修复性是指在水准2地震作用下结构虽然遭

受损坏, 但通过应急修复, 在一定时间内可恢复到能够运送紧急物资的程度。一定时间指地震发生后约1周内。

一般的抗震强化设施(紧急物资运输)与特定抗震强化设施(紧急物资运输)的不同主要是水准2地震后, 恢复紧急物资运输允许的时间不同。

干线货物运输抗震强化设施(特定(紧急物资运输))是在水准2地震偶然状况下, 保证结构的可修复性。可修复性是指即使结构在水准2地震作用时受到了损坏, 变形也保持在规定的容许值内, 经过小的修复, 短时间内能够恢复干线货物运输。这里的短时间, 根据设施要求的功能不同而进行不同的规定。

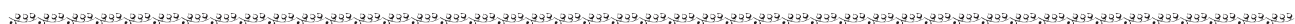
参考文献:

[16] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S].  
 [17] FEMA-445. Next Generation Performance-Based Seismic

Design Guidelines, 2006[S].

[18] ATC-40. Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings[R]. California: Report No. SSC 96-01, 1996.  
 [19] GB 18306—2001 中国地震动参数区划图[S].  
 [20] Muray A, Ülker Y, Isikhan G. A performance-based design approach in turkish seismic design code for port structures[C]. Beijing :The 14th World Conference on Earthquake Engineering, 2008.  
 [21] GBJ 11—1989 建筑抗震设计规范[S].  
 [22] 林迟, 侯爽, 欧进萍. 汶川地震中都江堰市多龄期建筑震害特征[J]. 大连理工大学学报, 2009, 49(5): 748-753.  
 [23] 日本地震工程学会, 基于性能的抗震设计研究委员会. 基于性能的抗震设计——现状与课题[M]. 王雪婷, 译. 齐玉军, 校. 贡金鑫, 审. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.  
 [24] 贡金鑫, 张勤, 王雪婷. 从汶川地震桥梁震害看现行国内外桥梁的抗震设计方法(一)[J]. 公路交通科技, 2010, 27(9): 44-54.

( 本文编辑 武亚庆 )



( 上接第70页 )

另外, 对于软黏性土, Lacasse还提出了以下的经验公式<sup>[3]</sup>:

正常固结土:  $\frac{Su}{\sigma'_0} = 0.22 \pm 0.04$  (11)

超固结土:  $\frac{Su}{\sigma'_0} = (0.22 \pm 0.04)OCR^m$  (12)

式中: m为经验系数, Lacasse建议取0.82。

根据勘察事实报告及上述的分析可知, ②黏性土不排水剪强度为120 kPa, 有效覆盖压力约为165 kPa; ②<sub>1</sub>黏性土不排水剪强度为35 kPa, 有效覆盖压力约为157 kPa; 由以上公式, 可判定②黏性土为超固结土, ②<sub>1</sub>黏性土为正常固结土。

根据事实报告提供的固结试验曲线, 估算出②黏性土层的前期固结压力P<sub>c</sub>大约为300 kPa, 压缩指数为0.18, 回弹指数为0.06, ②<sub>1</sub>黏性土层的前期固结压力P<sub>c</sub>大约为150 kPa, 压缩指数为0.45, 回弹指数为0.15, 由公式OCR =  $\frac{Su}{\sigma'_0}$ , 可得②黏性土层OCR约为1.8, ②<sub>1</sub>黏性土层近似为1.0。

6 结语

分析前期勘察资料, 进行土层划分和岩土测试数据统计, 参考国内外的分析方法, 对原位测试和室内实验数据进行综合对比分析, 提出合理的岩土工程设计参数和结论, 保证了投标和设计工作的顺利进行。随着国外勘察设计市场的进一步开拓, 针对国外工程前期勘察资料的分析工作将会越来越多, 能否全面、准确地分析国外勘察报告, 提出合理的岩土参数非常重要, 有可能会对工程投标报价和设计方案造成重大的影响。

参考文献:

[1] 约瑟夫·E·波勒斯[美].基础工程分析与设计[M]. 5版. 童小东, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004: 146-155.  
 [2] 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册[M]. 4版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007: 190-210.  
 [3] 《岩土工程手册》编写委员会. 岩土工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995: 171-174, 216-226.

( 本文编辑 武亚庆 )