



《水运工程抗震设计规范》的沿革与展望

李荣庆, 吴 澎

(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 简要回顾了我国各版水运工程抗震设计规范的主要内容和特点, 介绍了国外主要港口工程抗震设计规范的设计理念和方法。结合国内外有关抗震设计规范现状, 提出了我国水运工程多级设防和基于性能抗震设计的发展设想。

关键词: 水运工程; 抗震; 性能设计

中图分类号: P 315.9

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)03-0051-06

Evolution and prospect of Code for Seismic Design of Water Transport Engineering

LI Rong-qing, WU Peng

(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: This paper presents a general review of main contents and characteristics of all versions of the code for the seismic design of water transport engineering in China, and expounds the design ideas and methods of the code for the seismic design of main port engineering works abroad. Considering the current situation of related codes for the seismic design both in China and abroad, this paper puts forward the prospect for the development of the seismic design for the water transport engineering which is characterized by multi-level earthquake motions and performance-based design in China.

Keywords: water transport engineering; seismic design; performance-based design

我国历史上曾发生过多次强烈地震。特别是自1975年以来,在我国沿海及其附近地区,发生过几次大地震,如邢台、海城以及唐山地震。其中唐山地震给天津港的港口水工建筑物造成了较严重损失。尽管近40年来我国沿海未发生过大的破坏性地震,但地震属于高度随机的自然现象,仍有着潜在威胁。与20世纪70年代相比,我国沿海港口的规模、吞吐量对国民经济的支撑作用等均发生了巨大变化,地震灾害对国民经济和社会的影响将是十分严重的。

随着人们对地震的认识,水运工程抗震设计规范水平不断发展。本文回顾了我国水运工程抗震设计规范的沿革,总结了3个版本抗震规范的主要内容和特点。简要介绍了国外主要港口工程

抗震设计规范的设计理念和方法,提出了我国水运工程抗震设计的发展方向。

1 《水运工程抗震设计规范》的沿革

在唐山地震前,我国水运工程建筑物多数不考虑抗震设防,唐山地震后,工程抗震问题引起了我国各界人士的极大关注。为了总结经验教训,交通部组织编写了《水运工程水工建筑物抗震鉴定标准》,1977年4月通过审查定稿。之后,继续组织编写了《水运工程水工建筑物抗震设计规范》,于1984年1月1日颁布试行。后来该规范进行了局部修改,汇编入1987年版《港口工程技术规范》中,即JTJ 201—1987《水运工程水工建筑物抗震设计规范》^[1]。

收稿日期: 2015-08-04

作者简介: 李荣庆(1982—),男,高级工程师,从事工程结构设计和抗震研究。

20世纪90年代,交通部组成了抗震设计规范修订组,总结十多年抗震设计经验,针对1987版规范中存在的问题,进行了模型试验、结构动力特性实测和有限元动力分析,借鉴国内外工程抗震研究成果,对1987规范进行了修订,于1998年颁布实施,即JTJ 225—1998《水运工程抗震设计规范》^[2]。

之后,交通运输部组织对JTJ 225—1998《水运工程抗震设计规范》进行了修订,于2012年1月发布,即现行的JTS 146—2012《水运工程抗震设计规范》^[3]。

2 水运工程抗震设计规范的特点

2.1 1987版规范

JTJ 201—1987《水运工程水工建筑物抗震设计规范》主要包括场地、地基与岸坡、抗震计算原则及条件、地震惯性力计算、动土压力、动水压力和抗震措施等主要内容。

1) 适用范围。

适用于设计烈度为7、8、9度的水运工程水工建筑物的抗震设计;设计烈度高于9度时,应进行专门研究,适用于码头和船闸的抗震设计。对于防波堤、修造船水工建筑物等,可参照执行。

2) 抗震设防水准和目标。

抗震设计一般采用基本烈度为设计烈度。对于次生灾害严重或特别重要的建筑物,经有关主管部门批准,可按基本烈度提高1度作为设计烈度。船闸检修情况一般按设计烈度降低1度进行验算。其目标为保障人民生命财产的安全和震后水上运输不致中断,水运工程水工建筑物抗震设计应做到:当遭受相当于抗震设防所采用烈度的地震时,一般不需整修或经一般修理后能继续使用。

3) 场地、地基和岸坡。

场地土按岩土性状简单分为I、II、III共3类,对场地划分为抗震有利、不利和危险地段。

给出了场地土液化判别的方法。标准贯入击数考虑了建筑物建造前、后地面高程和地下水位有较大变化时的修正。

地基的抗震强度验算中,采用了对地基土静承载力乘提高系数的方法来确定地基土的抗震容许承载力。对桩的垂直承载力,采用了降低安全系数的方法。

对于岸坡稳定,采用以圆弧滑动法为基础的拟静力法进行分析。与静力计算不同的是,土条上附加了由地震加速度所产生的地震惯性力。

4) 地震惯性力计算。

采用设计反应谱来计算地震惯性力,设计反应谱见图1。各种结构的地震惯性力主要采用拟静力法或振型分解反应谱法计算。

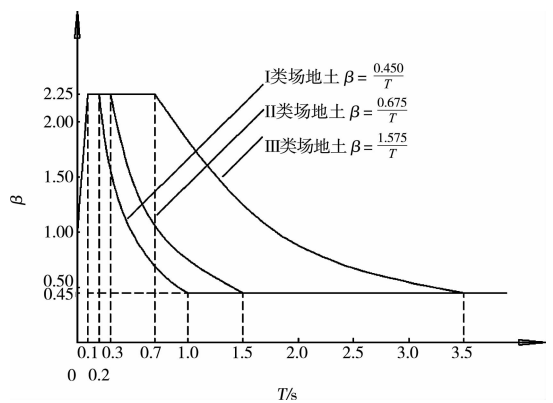


图1 1987版《水运工程水工建筑物抗震设计规范》中的设计反应谱

5) 结构强度和稳定抗震验算。

强度和稳定验算均采用单一安全系数法,除单锚板桩码头外,规范并未单独给出各种结构的设计表达式,仅规定了计算原则。抗震稳定计算的安全系数,按有关规范中特殊荷载组合情况采用。对于单锚板桩码头,不计板桩自重产生的地震惯性力,采用修正的嵌固支承法按动土压力计算板桩的入土深度、最大弯矩和拉杆拉力。

6) 动土压力。

对于无黏性土,规范直接采用物部-岗部公式。对于黏性土,规范提出了一种以黏性土的库仑土压力理论为基础的惯性力法。针对水运工程水工建筑物特点,对填土表面水平的情况编制了计算表格。

7) 动水压力。

对于直墙式建筑物的动水压力,以韦斯特加

德公式为基础, 引入折减系数考虑刚性建筑物在有限的矩形水域中振动与韦斯特加德公式半无穷大水层解的差别。对于作用在墩、柱式建筑物上的动水压力, 根据刚性圆柱在水中振动所得动水压力精确解和刚性方柱在水中振动时用变分法计算的结果, 给出附加质量系数, 并引入重力墩形状系数, 以适用各种长宽比的重力墩。

8) 抗震措施。

在借鉴国内外有关抗震措施经验的基础上, 根据抗震模型试验、宏观震害和国内外有关抗震资料, 给出了有关地基、岸坡加固措施和水工建筑物抗震措施。

2.2 1998 年版规范

20 世纪 90 年代, 1987 版《港口工程技术规范》中有关结构设计的部分进行了较大修订, 设计方法由安全系数法修订为以概率论为基础、以分项系数表达的极限状态设计法。为与各结构设计规范相协调, 交通部组织对 1987 版抗震设计规范进行了修订, 规范于 1998 年颁布实施, 主要修订内容如下:

1) 适用范围。

设计烈度由 7、8、9 度改为 6、7、8、9 度, 并规定 6 度时可不计算, 但应采取抗震措施。

2) 抗震设防水准。

抗震设计应采用 1990 年版《中国地震烈度区划图》确定的基本烈度为设计烈度。即 50 a 内, 一般场地条件下, 可能遭遇超越概率为 10% 的烈度值, 相应的重现期为 475 a。而对于次生灾害严重或特别重要的水工建筑物以及高烈度区, 规范规定应作危险性分析, 当需要采用高于或低于基本烈度作为设计烈度时, 应经批准。

3) 地基。

地基液化判别分两步进行。当初判为液化时再进行第 2 步判别, 节省了勘察工作量。引入黏粒含量项, 扩大了液化判别公式使用范围。

增加液化土强度问题, 液化土层宜不计其强度, 尽量采取抗液化措施; 但如有一定经验或经

论证可利用该层土部分强度时, 给出了液化土层力学指标折减的方法, 以降低工程造价。

4) 地震作用计算。

设计反应谱由 3 条谱曲线改为 4 类谱曲线, 由 I、II、III 类场地所对应的特征周期为 0.2、0.3、0.7 s 改为 I、II、III、IV 类场地所对应的特征周期分别为 0.2、0.3、0.4、0.65 s。谱形状由原来的 T_g/T 改为 $(T_g/T)^{0.9}$, 见图 2。

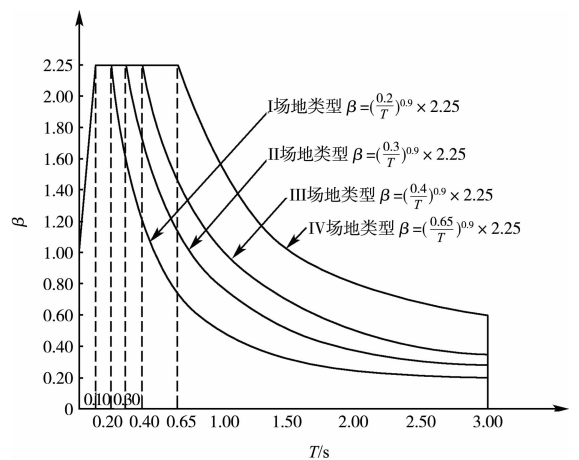


图 2 1998 版《水运工程抗震设计规范》中的设计反应谱

5) 动土压力。

地震土压力公式作了修改, 统一了砂性土与黏性土地震土压力计算公式, 并符合国内外公认的计算方法。

6) 结构抗震验算。

增加了“结构抗震验算”一节, 规定了构件强度和结构稳定验算的设计表达式。与 1987 版规范相比, 1998 版规范在各种结构抗震验算公式上, 发生了较大变化, 由单一安全系数法改成了分项系数表达的概率极限状态设计法, 并引入抗震调整系数, 使新老规范的安全水平大体一致。修改后的公式便于和新修订的港工规范配套使用, 也为与国际先进标准接轨创造了条件。

2.3 2012 年版规范

我国现行 JTS 146—2012《水运工程抗震设计规范》于 2012 年 1 月颁布、3 月实施。是结合我国水运工程的特点、现状和发展趋势, 并借鉴国内外相关规范和汶川等大地震的经验教训, 对

1998 版规范进行的修订版本。规范共分 6 章和 5 个附录，包括场地评价、地震作用和结构抗震验算、抗震措施等主要内容。

1) 抗震设防水准。

为与 JTS 165-5—2009 《液化天然气码头设计规范》相协调，将 1998 规范抗震设防水准作了部分修订，增加了确定抗震设防类别和设防标准的规定。为与之协调，摒弃了“设计烈度”的说法，改为“设防烈度”，给出了对应的设计基本地震加速度，为将来可能实现直接采用地震动参数进行抗震设计提供过渡。

2) 场地和地基。

进一步完善了场地土覆盖层厚度的确定方法。增加了地基液化等级划分方法及消除地基液化沉降的措施。

3) 地震作用计算。

对设计反应谱的表达形式做了变化，由原来的 4 条合并为 1 条，其中特征周期根据场地类别和设计地震分组确定。并将自振周期延长至 6.0 s。结合水运工程建筑物的特点，设计反应谱仍采用阻尼比为 0.05，见图 3。

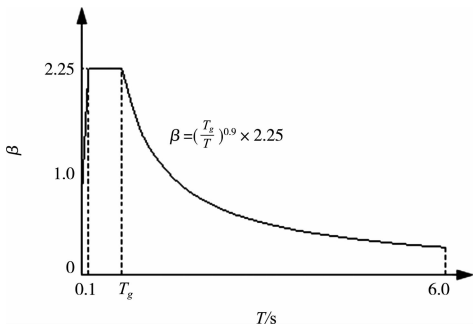


图 3 2012 版《水运工程抗震设计规范》中的设计反应谱

4) 重力墩式码头的加速度分布。

通过专题研究表明，无论是否考虑地基柔性影响，1998 规范的重力墩式码头加速度分布系数在 0.5 倍墩高以下均小于动力法计算值，因此修改了重力墩式码头的加速度分布系数，修改后的图形面积增加了 14.3%，但图形重心下降了 4%，见图 4。

5) 时程分析法。

除采用拟静力法和振型分解反应谱法外，对于

7 度区码头高度大于 35 m 或 8 度区高度大于 30 m 的重要梁板式高桩码头及高度大于 30 m 的重要重力式码头，要求采用时程分析法进行补充计算。其中，“重要”是指码头使用要求高或震后造成的损失后果十分严重。

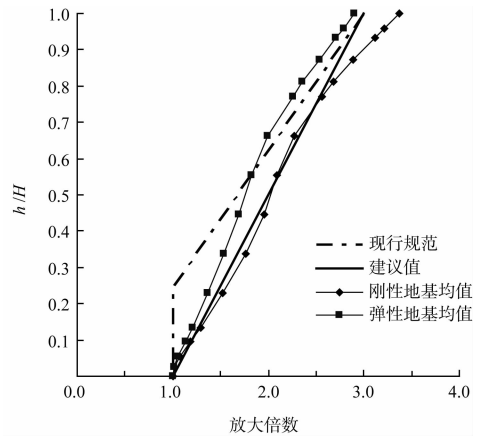


图 4 重力墩式码头加速度分布系数及比较

6) 抗震措施。

在总结国内外最新研究成果和港口震害的基础上，进一步丰富了水运工程抗震措施。

3 国外港口抗震设计规范现状

3.1 美国

美国曾很长时间缺乏全国性的码头抗震设计规范。直至 2014 年，由美国土木工程师学会出版了《码头抗震设计》^[4]，主要给出了高桩码头抗震设计的规定，是第 1 本全国性的码头抗震设计规范。主要包括抗震性能要求、设计方法、岩土和土-结构相互作用、基于力的设计、基于位移的设计、细部设计以及附属构件设计等内容。

在该规范中，提出了“高”、“中”、“低”3 种设计分类。“高”指对地区经济或震后修复重要的结构，需要比“保护生命”更高的抗震性能水准；“中”指对地区经济较重要，且对震后修复并不必要，但需要比“保护生命”更高的抗震性能水准；“低”指以上两种以外的分类。对应每种设计分类的最低设计准则见表 1。该规范允许采用基于力的设计方法和基于位移的设计方法，并给出了设计方法的选择原则。

表1 最低地震灾害和性能要求

设计分类	操作水准地震		偶发水准地震		设计地震	
	超越概率	性能水准	超越概率	性能水准	地震灾害水准	性能水准
高	50 a 内 50% (重现期 72 a)	少量破坏	50 a 内 10% (重现期 475 a)	可控制、可维修的破坏	按 ASCE7(2005) 确定的设计地震	保护生命安全
中			50 a 内 20% (重现期 224 a)	可控制、可维修的破坏	按 ASCE7(2005) 确定的设计地震	保护生命安全
低					按 ASCE7(2005) 确定的设计地震	保护生命安全

3.2 日本

日本现行《港口设施技术标准》^[5]中采用两个水准的地震地面运动。水准1为可能在设计使用年限内发生一次或两次(重现期75 a)的地面运动;水准2为大的地震地面运动,发生的可能性很小,而一旦发生则非常强烈。在2007版的标准中,将水准1地震视为经常发生的地震活动,水准2地震考虑为偶然事件。

水准1下的设计方法仍以地震系数法为主,但地震系数根据场地地震危险性分析确定,其确定过程中隐含了对结构变形的规定;水准2下则建议采用动力分析方法。在水准1下,要求所有设施能够满足使用性要求;在水准2下,结构性要求则根据港口设施的等级而异。

3.3 国际航运协会

《港口工程结构抗震设计指南》^[6]是一本基于性能的设计指南,同样采用两个水准进行抗震设计,水准1定义为在结构使用期内超越概率为50%的地震动。地震动水准2定义为在结构使用期内超越概率为10%的地震动。定义以上地震动时,如果场地附近有断层,应考虑活动地震断层发生罕遇地震引起的近场地面运动。

首先按表2选择合适的性能等级,确定可接受的破坏程度及对应的破坏准则,然后进行抗震设计。

表2 结构性能等级

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

4 《水运工程抗震设计规范》的发展展望

4.1 多级设防的抗震设计理念

在港口工程建筑物的使用年限内,可能会遭遇到不同强度的地震。小强度地震发生概率较大,而较大强度地震发生概率却较小。因此,对不同等级的地震应具有不同的设防水准,国外港口工程抗震设计规范基本都采用多设防标准的抗震设计方法。

建筑物按多个设防水准进行抗震设计时考虑地震是高度不确定性的,这种不确定性源于地质板块活动的复杂性和人们对地震的认识还有限。因此,即使进行了地震区划,未来一定时间内一个地区发生地震的强度也是不确定的,有可能发生比区划图规定的基本烈度强的地震。例如,1976年唐山大地震,设防烈度6度,历史上无大地震,实际发生11度;1995年日本阪神大地震,设防地震加速度0.3g,实际发生0.6g;2008年汶川地震,设防烈度7度,实际发生11度;2011年,日本东北海大地震,设防地震加速度0.3g,实际发生0.6g。

从国外目前的港口抗震设计规范来看,大部分采用两个水准的设防目标,水准1的重现期为75 a,进行强度验算,保证结构不坏或破坏程度很小,经小的修复可立即使用;水准2的重现期约为475 a,进行弹塑性变形验算,根据结构的抗震等级可允许不同程度的破坏,能够保持抗震救灾的功能或短期内经修复可继续使用。采用不同的抗震设防目标是根据地震发生的不确定性,从安全和经济考虑的一种合理的对策。水运工程的抗震设计,采用多级设计方法,也是必然的发展趋势。

4.2 基于性能的抗震设计方法

自 20 世纪 90 年代以来, 国外抗震设计规范陆续引入基于位移的抗震设计方法。美国和国际航运协会的有关规范中都提出了有关位移的破坏准则, 而日本则将位移控制反映在地震系数中。早在 1993 年, 我国就对水运工程是否采用多级设防进行过探讨^[7], 至今尚未形成共识。其主要原因之一是水运工程水工建筑物的变形验算等方法和变形破坏准则等均未进行深入研究, 而这是能否实现基于位移抗震设计的关键研究内容之一。基于性能的抗震设计对工程师、研究人员、港口业主等都将会提出许多新问题, 如水工建筑物性能水准的确定、与之对应的抗震设防水准和设防目标以及合理的抗震分析方法等。

5 结语

1) 随着对地震的认识和抗震技术的发展, 我国水运工程抗震设计规范内容不断完善。目前采用单一地震动水准、基于力的抗震设计方法。

2) 美国、日本和国际航运协会的港口工程抗震设计, 采用多个地震动水准、基于性能的抗震设计方法。

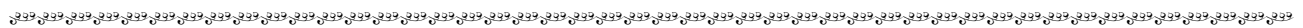
3) 从国内外工程结构抗震设计发展现状看, 我国水运工程采用多级设防和基于性能的抗震设计方法是未来的发展趋势。

4) 规范需要不断完善、充实和提高, 以适应水运事业迅速发展的需要, 为弥补水运工程震害实例少的不足, 搜集国内外震害资料、科研成果, 有针对性地开展科学研究, 是非常必要的, 有关部门应继续给予重视, 保持抗震设计规范的延续性。这不仅是为了有效减轻我国水运工程未来可能遭受的地震灾害, 在继续开辟和稳固海外水运工程建设市场方面也有重要意义。

参考文献:

[1] JTJ 201—1987 水运工程水工建筑物抗震设计规范[S].
 [2] JTJ 225—1998 水运工程抗震设计规范[S].
 [3] JTS 146—2012 水运工程抗震设计规范[S].
 [4] ASCE/COPRI 61-14. Seismic Design of Piers and Wharves[S].
 [5] 国土交通省港湾局監修. 港湾の施設の技術上の基準. 同解説[S]. 平成 19 年 7 月.
 [6] International Navigation Association. Seismic design guidelines for port structures[M]. Netherlands: Balkema Publishers, 2001.
 [7] 宫维圣. 码头和船闸建筑物的抗震[M]. 北京: 人民交通出版社, 1993.

(本文编辑 武亚庆)



(上接第 34 页)

参考文献:

[1] 陈吉余. 中国围海工程[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000.
 [2] 李瑞杰, 严以新, 宋志尧. 太平水道悬移质输运数学模型[J]. 泥沙研究, 2003(4): 46-51.
 [3] 陆永军, 李浩麟, 董壮, 等. 强潮河口围海工程对水动力环境的影响[J]. 海洋工程, 2002, 20(4): 17-25.
 [4] 陈晓英, 张杰, 马毅. 近 40 年来海州湾海岸线时空变化分析[J]. 海洋科学进展, 2014, 32(3): 324-334.
 [5] 吴慧琴, 李瑞杰, 张文虎, 等. 舟山钓梁二期围垦工程潮流泥沙数值分析[J]. 水道港口, 2014(1): 8-14.
 [6] 杨第昌, 陶建峰, 张长宽. 海州湾滩涂围垦对临洪河口

闸下河道淤积的影响[J]. 水运工程, 2014(6): 96-101.
 [7] 张玮, 安翔. 连云港海域粉沙质和淤泥质海岸泥沙运动数值模拟研究[J]. 中国港湾建设, 2012(3): 1-6.
 [8] 黄志扬. 连云港淤泥质海岸深水航道泥沙淤积数值研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
 [9] 张婧. 连云港 30 万吨级航道二期工程水沙模型研究[D]. 南京: 河海大学, 2013.
 [10] 张长宽, 陈君, 林康, 等. 江苏沿海滩涂围垦空间布局研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2011, 39(2): 206-212.
 [11] 肖辉, 赵洪波, 曹祖德. 平衡含沙量、平衡水深与海床冲淤计算[J]. 中国港湾建设, 2009(5): 16-20.

(本文编辑 武亚庆)