

· 视 角 ·



## 水运工程抗震设防分类和设防标准分析

杨国平, 李荣庆

(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

**摘要:** 为进一步细化水运工程抗震设防类别和设防标准, 通过对国内外有关抗震设防分类和设防标准的总结分析, 针对水运工程特点和抗震设计规范现状, 对水运工程抗震设防分类和设防标准进行研究。提出了水运工程抗震设防类别按一类、二类、三类进行分类的建议。抗震设防类别为一类的工程主要包括: 地震会造成大量人员伤亡的结构; 震后能够正常使用或快速恢复使用、承担抗震救灾等特殊功能要求的结构; 破坏后修复困难的重要结构; 次生灾害严重的结构; 中断使用会对当地造成严重经济和社会影响的结构。抗震设防类别为三类的工程主要为震后容易修复的结构; 小型结构; 部分临时性结构。抗震设防分类为二类的结构主要为一类、三类以外的一般结构。在水运工程抗震设防分类的基础上, 提出了水运工程抗震设防标准, 针对不同的抗震设防分类, 提出了相应的地震作用取值和抗震措施等级建议。

**关键词:** 抗震设防分类; 抗震设防标准; 性能等级

中图分类号: U6

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)02-0001-10

### Seismic fortification classification and fortification criterion for water transport engineering

YANG Guoping, LI Rongqing

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

**Abstract:** To further refine the seismic fortification category and fortification criterion of water transport engineering, this study summarizes and analyzes the relevant seismic fortification classifications and fortification criterion both in China and internationally, and focuses on the characteristics of water transport engineering and the current status of seismic design specifications to study the seismic fortification classification and fortification criterion of water transport engineering. It is suggested that the seismic fortification categories of water transport engineering should be classified as the Class I, Class II, and Class III. The projects classified as Class I in seismic fortification mainly include: structures that can cause a large number of casualties due to earthquakes, structures that can be used normally or quickly restored after earthquakes and meet special functional requirements such as earthquake relief, key structures that, if damaged, are difficult to restore, structures with severe secondary disasters, and structures whose interruption of use will cause serious economic and social impacts on the local area. The projects with seismic fortification category as Class III are mainly temporary structures and structures that are easy to repair after earthquakes, small structures and some temporary structures. Structures classified as Class II in seismic fortification are mainly general structures other than Class I and Class III. Based on the seismic fortification classification for water transport engineering, the seismic fortification criterion of water transport engineering is proposed. According to different seismic fortification classification, the corresponding seismic action and seismic measures grades are suggested.

**Keywords:** seismic fortification classification; seismic fortification criterion; performance grade

收稿日期: 2025-10-16 录用日期: 2025-10-25

**作者简介:** 杨国平(1973—), 男, 硕士, 全国水运工程勘察设计大师, 正高级工程师, 研究方向为水运工程规划、设计、科研与咨询。

JTS 146—2012《水运工程抗震设计规范》<sup>[1]</sup>采用单水准的抗震设计方法,抗震设防目标为当遭受相当于本地区抗震设防烈度的地震影响时,可能损坏,经一般修理或不需修理仍可继续使用。国外港口工程和国内其他行业大多采用多水准的抗震设计方法,文献[2]、[3]针对我国水运工程抗震设计规范的现状和发展方向进行了总结和建议,指出多水准的抗震设计方法是水运工程抗震设计的发展趋势。多水准的抗震设计方法需要明确工程抗震设防分类、设防标准、设防目标、结构性能目标和相应的抗震验算方法。抗震设防分类和设防标准的确定是实现以上方法的首要步骤。

抗震设防分类是根据建筑遭遇地震破坏后,可能造成人员伤亡、直接和间接经济损失、社会影响的程度及其在抗震救灾中的作用等因素,对各类建筑所做的设防类别划分。现行 JTS 146—2012《水运工程抗震设计规范》规定,水运工程应按现行国家标准 GB 50223—2008《建筑工程抗震设防分类标准》<sup>[4]</sup>确定其抗震设防类别。GB 50223—2008《建筑工程抗震设防分类标准》中与水运建筑有关的内容包括:水运建筑中,50万人口以上城市、位于抗震设防烈度为7度及以上地区的水运通信和导航等重要设施的建筑、国家重要客运站、海难救助打捞等部门的重要建筑,抗震设防类别应划为重点设防类。可见,GB 50223—2008《建筑工程抗震设防分类标准》仅针对与水运交通有关的建筑做出规定,未对水运工程主体结构抗震设防类别进行明确分类。

GB 50223—2008《建筑工程抗震设防分类标准》属于基础标准,由于行业众多,只能对各类建筑作较原则的规定。国内公路、水利等行业根据该标准中的原则,针对各自特点进行了抗震设防分类,而目前水运行业尚未进一步进行抗震设防类别划分。

将工程划分为不同的类别区别对待,设定不同的抗震设防标准,采用不同的抗震设计要求,是根据现有技术和经济条件的实际情况,达到减

轻地震灾害又合理控制投资的重要对策。随着水运工程建设的发展、结构抗震设计水平的提高和实现多水准抗震设计方法的需要,有必要针对水运工程特点对抗震设防类别进行划分,并在此基础上确定抗震设防标准。因此,为区分水运工程在遭遇地震破坏后,可能造成人员伤亡、直接和间接经济损失、社会影响的程度及其在抗震救灾中的作用,本文参考国内外相关规范规定,通过对各规范中抗震设防类别的分析研究,针对水运工程特点,提出我国水运工程抗震设防分类和设防标准的建议。

## 1 国内外抗震设防类别划分

### 1.1 中国标准

中国各行业抗震设计规范均针对各自行业相应结构特点规定了抗震设防类别,经分析,各规范分类依据基本一致,均根据工程遭受地震破坏后可能造成的人员伤亡、经济损失、社会影响程度及其在抗震救灾中的作用等因素进行划分,本文选取代表性的建筑、公路桥梁和水利行业的分类标准简要总结如下。

#### 1.1.1 GB 50223—2008《建筑工程抗震设防分类标准》

GB 50223—2008《建筑工程抗震设防分类标准》规定,建筑工程应分为以下4个抗震设防类别。

1) 特殊设防类:指使用上有特殊设施,涉及国家公共安全的重大建筑工程和地震时可能发生严重次生灾害等特别重大灾害后果,需要进行特殊设防的建筑(简称甲类)。

2) 重点设防类:指地震时使用功能不能中断或需尽快恢复的生命线相关建筑,以及地震时可能导致大量人员伤亡等重大灾害后果,需要提高设防标准的建筑(简称乙类)。

3) 标准设防类:指大量的除1、2、4款以外按标准要求进行设防的建筑(简称丙类)。

4) 适度设防类:指使用上人员稀少且震损不致产生次生灾害,允许在一定条件下适度降低要

求的建筑(简称丁类)。

在此规定下,针对防灾救灾建筑、基础设施建筑、公共建筑和居住建筑、工业建筑、仓库类建筑分别进行了明确规定。

### 1.1.2 JTG/T 2231-01—2020《公路桥梁抗震设计规范》

JTG/T 2231-01—2020《公路桥梁抗震设计规范》<sup>[5]</sup>根据公路桥梁重要性和修复(抢修)的难易程度,将其分为 4 个抗震类别,见表 1。A 类抗震设防要求最高,B、C 和 D 类抗震设防要求依次降低。对抗震救灾以及在经济、国防上具有重要意义的桥梁或破坏后修复(抢修)困难的桥梁,应提高抗震设防类别。

表 1 公路桥梁抗震设防类别

Tab. 1 Seismic fortification categories of highway bridges

桥梁抗震设防类别	适用范围
A 类	单跨跨径超过 150 m 的特大桥
B 类	单跨跨径不超过 150 m 的高速公路、一级公路上的桥梁; 单跨跨径不超过 150 m 的二级公路上的特大桥、大桥
C 类	二级公路上的中桥、小桥; 单跨跨径不超过 150 m 的三、四级公路上的特大桥、大桥
D 类	三、四级公路上的中桥、小桥

### 1.1.3 GB 51247—2018《水工建筑物抗震设计标准》<sup>[6]</sup>

水工建筑物根据其重要性和工程场地地震基本烈度按表 2 确定其工程抗震设防类别。其中水工建筑物级别按水工建筑物所在工程的等别、作用和其重要性划分<sup>[7]</sup>。

表 2 水工建筑物抗震设防类别

Tab. 2 Seismic fortification categories of hydraulic structures

工程抗震设防类别	建筑物级别	场地抗震设防烈度
甲类	1 级(壅水和重要泄水)	≥VI 度
乙类	1 级(非壅水)、2 级(壅水)	
丙类	2 级(非壅水)、3 级	≥VII 度
丁类	4 级、5 级	

## 1.2 国际航运协会报告

*Seismic Design Guidelines for Port Structures: Report of Working Group No. 34 of the Maritime*

*Navigation Commission (PIANC, 2001)*<sup>[8]</sup>按结构的地震影响后果,规定了不同性能等级,见表 3。性能等级按重要性不同进行分级,相当于国内的抗震设防类别。

表 3 国际航运协会(PIANC)报告中的性能等级

Tab. 3 Performance grades in PIANC report

性能等级	根据结构的地震影响后果
S	1)地震破坏时会造成大量生命安全和财产损失的关键结构; 2)震后修复时能够正常使用的关键结构; 3)处理危险品的关键结构; 4)如果中断使用,可能对地震破坏区造成严重经济和社会影响的关键结构
A	严重性略低于 S 等级中 1)~4)的重要结构,或破坏后修复困难的结构
B	S, A 和 C 以外的普通结构
C	小型、容易修复的结构

## 1.3 日本标准

日本现行标准 *Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan* (OCDI, 2020)<sup>[9]</sup>中采用两个水准的地震地面运动。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,结构性能要求则根据港口设施的等级而异。按性能要求将港口设施分为抗震强化设施和非抗震强化设施,其中抗震强化设施分为 3 类,分别是用于紧急物资输送的专用抗震强化设施、用于干线货物输送的专用抗震强化设施和用于紧急物资输送的一般抗震强化设施。

用于紧急物资输送的专用抗震强化设施,指在水准 2 地震后能立即供船舶停靠且能供人员上下船、紧急物资等货物装卸等的设施。要求在水准 2 地震的偶然状况下,确保结构的可使用性,此处的可使用性不是指设施在水准 2 地震作用下不发生破坏,而是指设施需要保持紧急物资装卸的功能。

用于干线货物输送的专用抗震强化设施,指在水准 2 地震后较短时间内可恢复到能够装卸干线货物的设施。

用于紧急物资输送的一般抗震强化设施,指在水准 2 地震后一定时间内可供船舶停靠,且能供人员上下船、紧急物资等货物装卸等的设施。

### 1.4 美国标准

美国标准 ASCE/COPRI 61-14 *Seismic Design of Piers and Wharves*<sup>[10]</sup>, 建议的 3 种设计分类如下。

1) 高: 对地区经济或震后恢复重要的结构, 且需要比“保护生命安全”更高的抗震性能水准。

2) 中: 对地区经济较重要, 震后恢复不重要, 但需要比“保护生命安全”更高的抗震性能水准。

3) 低: 以上两种以外的分类。

### 1.5 欧洲标准

欧洲规范 Eurocode 8 (EN 1998-1) *Design of Structures for Earthquake Resistance-Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings*<sup>[11]</sup> 根据倒塌对人员伤亡的后果、震后公共安全和保护重要性、倒塌对社会和经济的影响将建筑分为 4 类, 见表 4。

表 4 EN 1998-1 中的建筑重要性类别

Tab. 4 Importance classes for buildings in EN 1998-1

重要性类别	描述
I	就公共安全而言属次要的建筑, 如农用建筑等
II	不属于其他类别的一般建筑
III	考虑倒塌后果, 抗震能力很重要的建筑, 如学校、礼堂、文化机构等
IV	地震时为保护公众, 必须保持完整性的建筑, 如医院、消防站、发电厂等

### 1.6 英国标准

英国标准 BS 6349-1:1984 *British Standard Code of Practice for Maritime Structures-Part-1: General Criteria*<sup>[12]</sup> 和 BS 6349-1:2000 *Maritime Structures-Part 1: Code of Practice for General Criteria*<sup>[13]</sup> 未对抗震设防做出详细规定。现行英国标准 BS 6349-1-2:2016+A1:2017 *Maritime Works-Part 1-2: General Code of Practice for Assessment of Actions*<sup>[14]</sup> 增加了地震作用的相关内容, 包括海工结构重要性类别划分、抗震设防水准和性能要求。海工结构根据合理的风险评估, 分为以下重要性类别, 见表 5。

表 5 BS 6349 海工结构重要性类别

Tab. 5 Importance classes for maritime structures in BS 6349

重要性类别	海工结构分类
IV	如果遭到破坏, 将严重破坏经济或社会活动, 或可能导致大量人员伤亡的关键结构; 失效将导致严重环境后果的结构; 处理危险材料的关键结构
III	重建成本较高, 破坏可能导致人员伤亡的关键结构; 震后恢复需要保持可使用的重要结构; 结构破坏后修复困难的结构; 结构失效将导致严重环境后果的结构
II	不属于其他分类的一般结构
I	小型、易修复的结构

## 2 国内外工程抗震设防类别现状分析

通过对国内外对抗震设防分类的分析, 国内外规范在专业术语写法方面存在差别。国内主要建设行业称为抗震设防类别, 建筑行业和水利行业分为甲、乙、丙、丁四类; 公路桥梁行业分为 A、B、C、D 四类。国际航运协会称为性能等级, 分为 S、A、B、C 四类; 日本标准中分为抗震强化设施和非抗震强化设施, 其中抗震强化设施分为用于紧急物资输送的专用抗震强化设施、用于干线货物输送的专用抗震强化设施和用于紧急物资输送的一般抗震强化设施三类; 美国标准设为高、中、低三个分类; 欧洲标准和英国标准分为 I、II、III、IV 四类。

尽管国内外规范在专业术语写法方面存在差别, 建筑物形式不同, 划分的类别数目不同, 但其分类依据基本一致, 均根据工程遭受地震破坏后可能造成的人员伤亡、经济损失、社会影响程度及其在抗震救灾中的作用等因素进行划分, 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, 抗震设计中越需要采用严格的措施。

在设防类别划分方面, 国内外规范都有一类涉及面较广、数量较大的工程类别, 虽然各规范中规定的术语写法不同, 但其性质基本一致, 均针对数量较大的普通结构。因各规范写法不同, 本文称之为按标准要求设防的工程类别。对于按标准要求设防的工程类别, 较具代表性的为: 国际航运协会将普通结构划分为 B 类, GB 50223—

2008《建筑工程抗震设防分类标准》将大量的按标准要求设防的建筑划分为丙类。

在标准要求设防类工程基础上,国内外标准都是进一步提高或降低后,规定其他相应设防类别。在按标准要求设防的工程类别基础上降低要求的,各规范中都规定只有一类,如国际航运协会将该类工程划分为C类,主要为小型、容易修复的结构;GB 50223—2008《建筑工程抗震设防分类标准》将该类工程划分为丁类,指使用上人员稀少且震损不致产生次生灾害,允许在一定条件下适度降低要求的建筑,如一般储存物品的价值低、人员活动少、无次生灾害的单层仓库。

在按标准要求设防的工程类别基础上提高要求的,国内外标准中的规定存在一定区别。有的标准划分为一类,如美国标准的“高”设计分类;有的标准划分为两类,如国际航运协会的S类和A类,其中S类为地震影响后果严重的结构,A类为严重性略低于S类的结构;GB 50223—2008《建筑工程抗震设防分类标准》划分为两类,分别为特殊设防类(甲类)和重点设防类(乙类)。甲类指使用上有特殊设施,涉及国家公共安全的重大建筑工程和地震时可能发生严重次生灾害等特别重大灾害后果,需要进行特殊设防的建筑。其中严重次生灾害,指地震破坏引起放射性污染、洪灾、火灾、爆炸、剧毒或强腐蚀性物质大量泄漏、高危险传染病病毒扩散等灾难性灾害。乙类指地震时使用功能不能中断或需尽快恢复的生命线相关建筑,以及地震时可能导致大量人员伤亡等重大灾害后果,需要提高设防标准的建筑。

### 3 水运工程抗震设防分类建议

#### 3.1 水运工程抗震设防分类分析

##### 3.1.1 标准设防类工程

抗震设防分类的依据基本为工程遭受地震破坏后可能造成的人员伤亡、经济损失、社会影响程度及其在抗震救灾中的作用等。在对比分析国内外相关工程抗震设防分类基础上,结合水运工程特点,本文首先着眼于大量的一般水运工程,参照

GB 50223—2008《建筑工程抗震设防分类标准》中的丙类,将其定位为标准设防类,同时也相当于国际航运协会规定的S、A、B、C类中的B类。在此基础上,再考虑与一般结构相比,抗震有较低要求或更高要求时的分类如何确定。

##### 3.1.2 可适当降低抗震要求的工程

在按标准要求设防的工程类别基础上降低要求的,各规范中都规定只有一类,具有共同特点,即主要为小型、容易修复的结构或使用上人员稀少且震损不致产生次生灾害的结构。对于水运工程来讲,在可适当降低要求的工程特点与其他行业工程相比也具有共性,因此,将这类相对于一般结构可适当降低抗震要求的结构统一设置为一档,主要对象为震后容易修复的工程、小型结构和部分临时性工程等。

##### 3.1.3 提高抗震要求的工程

在按标准要求设防基础上提高要求的工程类别,主要从人员数量和性质、重要性、可能造成的次生灾害3个方面进行分析。

###### 3.1.3.1 人员数量和性质

GB 50223—2008《建筑工程抗震设防分类标准》中的乙类工程中所述的“大量人员伤亡”,未明确“大量”所对应的统一具体数值。梳理该标准中乙类建筑工程中与人员数量有关的规定,以铁路建筑、公路建筑、水运建筑和体育建筑为例,总结分析如下。

1) 铁路建筑中,特大型站和最高聚集人数很多的大型站的客运候车楼:特大型站,指全年上车旅客最多月份中,一昼夜在候车室内瞬时(8~10 min)出现的最大候车(含送客)人数的平均值,即最高聚集人数大于10 000人的车站;大型站的最高聚集人数为3 000~10 000人,标准将人员密集的人数很多的大型站界定为最高聚集人数6 000人。

2) 公路建筑中,一级长途汽车站的客运候车楼,指日发送旅客折算量(指车站年度平均每日发送长途旅客和短途旅客折算量之和)大于7 000人次的客运站的候车楼。

3) 水运建筑中,国家重要客运站,指JGJ 86—

1992《港口客运站建筑设计规范》<sup>[15]</sup>规定的一级客运站,其设计旅客聚集量(设计旅客年客运人数除以年客运天数再乘以聚集系数和客运不平衡系数)大于2 500人。目前这一标准已经废止,现行行业标准JGJ/T 60—2012《交通客运站建筑设计规范》<sup>[16]</sup>按年平均日旅客发送量划分站级分级,年平均日旅客发送量大于或等于3 000人的为一级客运站。

4) 体育建筑中,观众座位很多的中型体育场,指观众座位容量不少于30 000人或每个结构区段的座位容量不少于5 000人,观众座位很多的中型体育馆(含游泳馆)指观众座位容量不少于4 500人。

划分为乙类的建筑工程,在人员数量方面,水运建筑中与人员有关的数量最低,为2 500人,该数值为JGJ 86—1992《港口客运站建筑设计规范》规定的一级客运站的标准,按现行行业标准JGJ/T 60—2012《交通客运站建筑设计规范》,这一数量为年平均日旅客发送量大于或等于3 000人。可见,水运工程涉及的人员数量与建筑工程中的人员数量有一定差别。在人员性质方面,水运工程中涉及的人员,对于货运码头,主要包括码头生产作业人员,且多数集中在陆域,码头操作人员有限;对于客运码头,人员出现在码头的时间仅集中于上下船环节,大部分时间集中于陆域的候船大厅。水运工程中的人员具有流动性质,而建筑工程中的人员相对聚集且在一段时间内相对固定,两者具有很大区别。因此,从人员数量和性质方面,水运工程与GB 50223—2008《建筑工程抗震设防分类标准》中的乙类工程均有所差别,均不会高于乙类建筑。

### 3.1.3.2 重要性

GB 50223—2008《建筑工程抗震设防分类标准》中规定的典型甲类建筑如下:防灾减灾建筑中,三级医院中承担特别重要医疗任务的门诊、医技、住院用房,承担研究、中试和存放剧毒的高危险传染病病毒任务的疾病预防与控制中心的建筑或其区段;电力建筑中,国家和区域的电力调度中心;邮电通信建筑中,国际出入口局、国际无线电台、国家卫星通信地球站、国际海缆登陆站;广播电视建筑中,国家级、省级的电视调

频广播发射塔建筑,当混凝土结构塔的高度大于250 m或钢结构塔的高度大于300 m时,国家级卫星地球站上行站。以上建筑均属于使用上有特殊设施,涉及国家公共安全的重大建筑工程和地震时可能发生严重次生灾害等特别重大灾害后果,需要进行特殊设防的建筑。

水运工程主要包括港口工程、航道工程、航运枢纽及通航建筑物工程、修造船厂水工工程等。以港口工程来讲,港口是临水地区人员与货物的出入口,是船舶进出和安全停靠的停泊地。港口作为交通运输中的枢纽,是货物集散、暂存、换装并转换运输方式的中心,是水上运输和陆上运输的连接点。从物理条件上,港口是各种水工建筑物、构筑物和设施及设备的综合体,从功能作用上,港口是货物装卸、存储、运输场所,是物流与供应链上的重要环节。其一般特点为生产性和工业性为主,修造船厂水工工程和通航建筑物等其他水运工程也具有相同特点。从水运工程特点来看,其与上述甲类建筑在重要性方面存在很大区别,可认为不属于甲类建筑相应范畴。

### 3.1.3.3 可能造成的次生灾害

GB 50223—2008《建筑工程抗震设防分类标准》中规定的严重次生灾害,指地震破坏引发放射性污染、洪灾、火灾、爆炸、剧毒或强腐蚀性物质大量泄漏、高危险传染病病毒扩散等灾难性灾害。水运工程中可能产生的次生灾害主要包括两方面,一是工程结构自身破坏带来的灾害,二是装卸货物可能带来的影响。第一方面,水运工程离城市和重要建筑都较远,结构破坏形式主要为结构的滑移、沉降、倒塌和岸坡的滑坡等,结构自身破坏一般不会造成严重次生灾害。第二方面,港口工程装卸货物可能造成次生灾害的工程主要为油气化工码头和罐区。油气化工码头中的液化天然气码头和液化石油气码头火灾危险性分类属于甲A类。从危险性来讲,两者应同等对待。但目前仅对液化天然气(liquefied natural gas, LNG)码头及直接掩护罐区的护岸结构有提高抗震要求的规定,液化石油气(liquefied petroleum gas, LPG)码头及直接掩护罐区的护岸结构也应提高抗震要求。

根据震后影响分析, 码头均要求在水陆域分界线位置设置紧急切断阀, 码头输料臂和船舶之间设置紧急脱离装置, 当发生极端情况时, 均可紧急切断, 具有的潜在危险仅为在一段管道内存有少量货物。地震破坏引起次生灾害有限, 达不到特别严重的程度。罐区的货物与码头相比, 集中放置且数量较大, 若地震发生破坏, 直接掩护罐区的护岸结构带来的影响要高于码头, 但两者地震破坏产生的影响均达不到 GB 50223—2008《建筑工程抗震设防分类标准》中规定的严重次生灾害, 因此也不属于 GB 50223—2008《建筑工程抗震设防分类标准》中的甲类建筑范畴。

基于上述分析, 从可能造成次生灾害的角度来讲, 直接掩护 LNG 罐区的护岸、直接掩护 LPG 罐区的护岸虽达不到甲类建筑范畴, 但与一般护岸结构相比, 应视为提高抗震要求的工程。LNG 码头、LPG 码头震时可紧急切断, 危险性虽低于直接掩护罐区的护岸结构, 但保守考虑, 也应将其视为提高抗震要求的工程。

### 3.2 分类建议

通过对水运工程和建筑工程在人员数量和性质、重要性、可能造成的次生灾害 3 个方面的区别分析, 认为水运工程基本不在甲类建筑范畴, 按标准要求设防基础上提高要求的工程类别, 部分可认为在乙类建筑范畴。国际航运协会中规定的 S 类和 A 类, 其区别在于 A 类为“严重性略低于 S 类的结构”和“破坏后修复困难的结构”, 在具体操作上也不便于进一步区分。

鉴于水运工程的特点, 综合对标 GB 50223—2008《建筑工程抗震设防分类标准》中甲类和乙类建筑的相应规定, 建议比一般结构抗震有更高要求的结构统一归纳并设置为一档, 主要包括: 地震会造成大量人员伤亡的结构; 震后能够正常使用或快速恢复使用、承担抗震救灾等特殊功能要求的结构; 破坏后修复困难的重要结构; 次生灾害严重的结构; 中断使用会对当地造成严重经济和社会影响的结构。对应的目标工程主要包括: 对抗震救灾有特殊要求的工程、对地区经济影响特别严重的工程、客运码头、直接掩护 LNG 罐区

的护岸、直接掩护 LPG 罐区的护岸、LNG 码头、LPG 码头以及有其他特殊(战备)需要的码头等。

通过以上分析, 根据建筑遭遇地震破坏后, 可能造成人员伤亡、直接和间接经济损失、社会影响的程度及其在抗震救灾中的作用等因素, 建议水运工程抗震设防分类按一类、二类和三类进行划分。将大量的一般水运工程设定为二类, 相当于国际航运协会规定的 B 类和 GB 50223—2008《建筑工程抗震设防分类标准》中规定的标准设防类。比一般结构抗震要求高的设定为一类, 比一般结构抗震要求低的设定为三类。推荐的水运工程抗震设防类别划分见表 6。水运工程抗震设防类别与国内外规定的大致对应关系见表 7。

表 6 水运工程抗震设防类别划分

Tab. 6 Seismic fortification categories for water transport engineering

抗震设防类别	适用范围
一	1) 地震会造成大量人员伤亡的结构; 2) 震后能够正常使用或快速恢复使用、承担抗震救灾等特殊功能要求的结构; 3) 破坏后修复困难的重要结构; 4) 次生灾害严重的结构; 5) 中断使用会对当地造成严重经济和社会影响的结构
二	一、三以外的一般结构
三	1) 震后容易修复的结构(如堆场轨道梁、船台、滑道、道堆构筑物); 2) 小型结构; 3) 部分临时性结构

表 7 水运工程抗震设防类别与国内外标准规定的大致对应关系

Tab. 7 Relationship between seismic fortification categories for water transport engineering and domestic and international regulations

名称	抗震设防类别			
	甲	乙	丙	丁
国家标准	甲	乙	丙	丁
国际航运协会报告	S	A	B	C
美国标准	高		中	低
欧洲标准	IV	III	II	I
英国标准				
本文建议	一	二	三	

## 4 水运工程抗震设防标准现状分析

设防标准是为保证工程结构在其设计使用年限内的地震损失不超过规定的水平或社会可接受的水平, 规定工程结构必须具备的抗震能力。确

定抗震设防标准需要在安全性和经济性之间寻求最佳平衡点。

我国建筑、公路桥梁等相关行业都规定了相应的抗震设防标准。GB 50223—2008《建筑工程抗震设防分类标准》针对不同抗震设防类别的建筑对其地震作用和抗震措施进行调整，其中丙类应按本地区抗震设防烈度确定其抗震措施和地震作用；乙类按高于本地区抗震设防烈度一度的要求加强其抗震措施，同时按本地区抗震设防烈度确定其地震作用；甲类按高于本地区抗震设防烈度提高一度的要求加强其抗震措施，同时按批准的地震安全性评价结果且高于本地区抗震设防烈度的要求确定其地震作用，丁类允许比本地区抗震设防烈度的要求适当降低抗震措施。JTG/T 2231-01—2020《公路桥梁抗震设计规范》通过桥梁抗震措施等级和抗震重要性系数调整各类桥梁的抗震设防标准。GB 51247—2018《水工建筑物抗震设计标

准》主要以提高水平向设计地震动峰值加速度代表值调整设防标准。

国外港口方面的抗震设计规范虽然未使用抗震设防标准这一术语，但通过以下方式实现类似功能。国际航运协会报告通过规定不同性能等级对应的结构可破坏程度来体现，见表8；美国标准通过不同设计分类对应的性能水准来体现，见表9；日本标准则通过水准2下不同设施应达到的性能要求来体现，见表10。

表8 国际航运协会报告中的结构性能等级和可接受破坏程度  
Tab. 8 Performance grades and acceptable extent of damage in PIANC report

性能等级	地震水准	
	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

表9 美国标准中的性能水准  
Tab. 9 Performance requirements in ASCE standard

设计分类	运营水平地震 (OLE)		偶发水平地震 (CLE)		设计地震 (DE)	
	地震动超越概率	性能水准	地震动超越概率	性能水准	地震水准	性能水准
高	50 a 内 50% (重现期 72 a)	轻微破坏	50 a 内 10%(重现期 475 a)	可控制、可维修的破坏	按 ASCE7 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 确定的设计地震	保护生命安全
低	-	-	-	-	按 ASCE7 确定的设计地震	保护生命安全

表10 日本标准中的不同抗震强化设施在水准2下的性能要求  
Tab. 10 Performance requirements for different seismic strengthening facilities in Japan standard at level 2

抗震强化设施	功能要求	性能要求
用于紧急物资输送的专用抗震强化设施	地震后能够很快恢复使用、运送乘客和运输紧急救援物资	使用性针对运送紧急物资,不是设施的正常装卸
用于干线货物输送的专用抗震强化设施	地震后能够快速恢复使用和干线货物运输	可修复性
用于紧急物资输送的一般抗震强化设施	地震后能够在一段时期内进行紧急物资运输	可修复性

JTS 146—2012《水运工程抗震设计规范》规定，水运工程应按现行国家标准 GB 50223—2008《建筑工程抗震设防分类标准》确定其抗震设防标准，但 GB 50223—2008《建筑工程抗震设防分类标准》未针对水运工程进行进一步细化规定。

### 5 水运工程抗震设防标准建议

抗震设防标准是衡量抗震设防要求高低的尺

度，由抗震设防烈度或设计地震动参数、抗震设防类别确定。国内规范主要根据抗震设防类别对地震作用取值和抗震措施作出规定，国外大多仅对地震作用取值作出规定。抗震设防标准是在明确抗震设防类别后，下一步进行地震作用计算、进行抗震验算并采取相应抗震措施的关键。国内相关行业都规定了各自的抗震设防标准，国外多采用性能水准的说法，不同类别的设施采用不同

的性能水准。水运工程尚缺乏相应规定,经对比分析国内外抗震设防标准相关内容后,需在抗震设防分类的基础上,进一步提出水运工程抗震设防标准。

与国内基础设施行业相关术语和规定相协调,主要参考国内其他行业抗震设计中采用的抗震设防标准,结合水运工程特点,本文以现行国家标准 GB 50223—2008《建筑工程抗震设防分类标准》相应规定为基本框架,针对大量的抗震设防类别为二类的水运工程,与国家标准基本保持一致,按本地区抗震设防烈度确定其地震作用和抗震措施。对于抗震设防类别为三类的水运工程,一般情况下仍应按本地区抗震设防烈度确定其地震作用,允许比本地区抗震设防烈度的要求适当降低其抗震措施。对于抗震设防类别为一类的水运工程,强调按批准的地震安全性评价的结果且不低于本地区抗震设防烈度的要求确定其地震作用,按高于本地区抗震设防烈度的要求加强其抗震措施。将水运工程抗震设防标准汇总如下:

1) 抗震设防类别为一类的水运工程,应按批准的地震安全性评价的结果且不低于本地区抗震设防烈度的要求确定其地震作用,并应按高于本地区抗震设防烈度的要求加强抗震措施。

2) 抗震设防类别为二类的水运工程,应按本地区抗震设防烈度确定其地震作用和抗震措施。

3) 抗震设防类别为三类的水运工程,一般情况下仍应按本地区抗震设防烈度确定其地震作用,允许比本地区抗震设防烈度的要求适当降低其抗震措施。

对于地震作用取值,二类和三类水运工程,其设防标准与国家标准 GB 50223—2008《建筑工程抗震设防分类标准》中的丙类和丁类建筑要求基本一致。甲类建筑按批准的地震安全性评价结果且高于本地区抗震设防烈度的要求确定其地震作用,乙类建筑按本地区抗震设防烈度确定其地震作用。水运工程中,具有甲类性质的并不多见,抗震设防类别划分时将提高抗震要求的工程归为一类,因此对于一类水运工程建议的抗震设防标

准在甲类和乙类相应要求之间;同时,对次生灾害严重或特别重要的水运工程建筑物以及高烈度区,行业标准 JTS146—2012《水运工程抗震设计规范》中要求应作场地地震危险性分析。综合以上因素,提出一类水运工程应按批准的地震安全性评价结果且不低于本地区抗震设防烈度的要求确定其地震作用。

对于抗震措施,建筑行业 GB 5011—2010《建筑抗震设计规范》规定了不同结构形式的抗震等级作为采取相应抗震措施的依据。如钢筋混凝土房屋根据设防类别、结构类型、设防烈度、房屋高度4个因素确定抗震等级,再根据抗震等级采取相应的抗震措施。JTG/T 2231-01—2020《公路桥梁抗震设计规范》中对抗震措施的选用,引进了抗震措施等级的概念,规定根据桥梁抗震设防类别、设防烈度确定桥梁抗震措施等级。目前水运工程抗震设计规范中,对不同结构形式做了相应的抗震措施规定,但未对抗震措施进行分级规定。后续研究可基于现有抗震措施,将其作为设防类别为二类的水运工程的规定,对一类水运工程提出更高要求,对三类水运工程可适当放宽,相应技术内容可在后续研究中逐步完善。

## 6 结论

1) 国内外抗震设计规范在关于抗震设防分类的专业术语写法方面虽存在差别,但其分类依据基本一致,均根据工程遭受地震破坏后可能造成的人员伤亡、经济损失、社会影响程度及其在抗震救灾中的作用等因素进行划分。

2) 国内抗震设防标准主要根据抗震设防分类,对其地震作用和抗震措施进行调整;国外港口工程规定相应的结构性能水准体现相应的抗震设防标准。

3) 基于对国内外抗震设防类别现状的分析,结合水运工程特点,提出水运工程抗震设防类别按一类、二类、三类进行分类的建议。抗震设防类别为一类的工程主要包括:地震会造成大量人员伤亡的结构;震后能够正常使用或快速恢复使

用、承担抗震救灾等特殊功能要求的结构；破坏后修复困难的重要结构；次生灾害严重的结构；中断使用会对当地造成严重经济和社会影响的结构。抗震设防类别为三类的工程主要为临时性结构和震后容易修复的结构、小型结构和部分临时性结构。抗震设防分类为二类的结构主要为一类、三类以外的一般结构。

4) 提出水运工程抗震设防标准。抗震设防类别为一类的水运工程，应按批准的地震安全性评价结果且不低于本地区抗震设防烈度的要求确定其地震作用，并按高于本地区抗震设防烈度的要求加强其抗震措施；抗震设防类别为二类的水运工程，应按本地区抗震设防烈度确定其地震作用和抗震措施；抗震设防类别为三类的水运工程，一般情况下仍应按本地区抗震设防烈度确定其地震作用，允许比本地区抗震设防烈度的要求适当降低其抗震措施。

#### 参考文献：

- [1] 水运工程抗震设计规范: JTS 146—2012[S]. 北京: 人民交通出版社, 2012.  
Code for seismic design of water transport engineering: JTS 146-2012[S]. Beijing: China Communications Press, 2012.
- [2] 李荣庆, 吴澎. 《水运工程抗震设计规范》的沿革与展望[J]. 水运工程, 2016(3): 51-56.  
LI R Q, WU P. Evolution and prospect of code for seismic design of water transport engineering[J]. Port & waterway engineering, 2016(3): 51-56.
- [3] 杨国平, 李荣庆. 水运工程抗震设防标准探讨[J]. 水运工程, 2021(10): 20-26.  
YANG G P, LI R Q. Seismic protection standards for water transport engineering[J]. Port & waterway engineering, 2021(10): 20-26.
- [4] 建筑工程抗震设防分类标准: GB 50223—2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.  
Standard for classification of seismic protection of building constructions: GB 50223-2008[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.
- [5] 公路桥梁抗震设计规范: JTG/T 2231-01—2020[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2020.  
Specifications for seismic design of highway bridges: JTG/T 2231-01-2020[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2020.
- [6] 水工建筑物抗震设计标准: GB 51247—2018[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.  
Standard for seismic design of hydraulic structures: GB 51247-2018[S]. Beijing: China Planning Press, 2018.
- [7] 水利水电工程等级划分及洪水标准: SL 252—2017[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2017.  
Standard for rank classification and flood protection criteria of water and hydropower projects: SL 252-2017[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2017.
- [8] PIANC Working Group 34. Seismic design guidelines for port structures[R]. Brussels: PIANC, 2001.
- [9] Technical standards and commentaries for port and harbour facilities in Japan[S]. Tokyo: The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan, 2020.
- [10] Seismic design of piers and wharves: ASCE/COPRI 61-14[S]. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2014.
- [11] Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance-part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings: BS EN 1998-1-1: 2013[S]. London: BSI Standards Limited, 2013.
- [12] British standard code of practice for maritime structures-part 1: general criteria: BS 6349-1: 1984[S]. London: BSI Standards Limited, 1984.
- [13] Maritime structures-part 1: code of practice for general criteria: BS 6349-1: 2000[S]. London: BSI Standards Limited, 2000.
- [14] Maritime works-part 1-2: general. code of practice for assessment of actions: BS 6349-1-2: 2016+A1: 2017[S]. London: BSI Standards Limited, 2017.
- [15] 港口客运站建筑设计规范: JGJ 86—1992[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1992.  
Code for design of port passenger transport station buildings: JGJ 86-1992[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1992.
- [16] 交通客运站建筑设计规范: JGJ/T 60—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.  
Code for design of passenger transportation building: JGJ/T 60-2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.