



# 水运工程抗震设防标准探讨

杨国平，李荣庆

(中交水运规划设计院有限公司，北京 100007)

**摘要：**按受力特点，将水运工程水工建筑物分为高桩结构、板桩结构、重力式结构和岸坡。根据对各种结构地震反应特性的分析，参考国内外有关结构抗震设计规范，考虑我国水运工程特点和规范继承性，结合标准走出去需要，给出水运工程不同结构的抗震设防标准建议，可为我国《水运工程抗震设计规范》的修订提供参考。

**关键词：**水运工程；抗震设防标准；地震水准

中图分类号：U 6

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2021)10-0020-07

## Seismic protection standards for water transport engineering

YANG Guo-ping, LI Rong-qing

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

**Abstract:** According to the force characteristics, hydraulic structures for water transport engineering are classified into high-pile structures, sheet pile structures, gravity structures, and bank slopes. Based on the analysis of the seismic response characteristics of various structures of the water transport engineering under the earthquake, with reference to the domestic and foreign structural seismic design codes, considering the characteristics of China's water transport engineering and inheritance of China's water transport engineering codes, and in conjunction with the need to go global with standards, we propose suggestions on the seismic protection standards for different structures of the water transport engineering, which may serve as reference for the revision of China's *Seismic Design Code for Water Transport Engineering*.

**Keywords:** water transport engineering; seismic protection standards; earthquake level

JTS 146—2012《水运工程抗震设计规范》<sup>[1]</sup>自发布施行以来，对促进我国水运建设技术进步、保证水运工程抗震安全发挥了重要作用。规范采用的是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时，可能损坏，经一般修理或不需修理仍可继续使用。目前，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。结合国内外有关抗震设计技术现状，我国水运工程抗震设计采用多级设防也是未来发展趋势。抗震设防标准是衡量抗震设防要求高低的尺度，主要包括用于抗震设计的地震水准和相应的抗震设防目标，是实现多级设防

须首要考虑的问题。本文通过分析国内外相关规范和我国水运工程结构特点，对水运工程抗震设防标准进行探讨。

### 1 水运工程水工建筑物多级抗震设防的必要性

水运工程水工建筑物在设计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较小。建筑物按多个设防水准进行抗震设计主要考虑地震是极具不确定性的，这种不确定性源于地质板块活动的复杂性和人们对地震认识的有限性。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, 也有可能发生比区划图规定的基本烈度强的地震。

采用单水准的基于力的设计方法可以保证结构具有抵抗设计地震作用的能力, 但超过设计地震作用时, 无法提供结构抗震性能的有关信息。如果在强烈的罕遇地震地面运动下, 仍满足承载力要求, 则工程建设成本可能会很高。因此, 采用以多水准为基础的抗震设计方法更具合理性, 对不同强度的地震应设置不同的设防目标, 采用不同的抗震设防目标是根据地震发生的不确定性和建设成本、从安全和经济角度综合考虑的一种合理对策。

国外有关港口抗震设计规范大部分采用 2 个水准的设防目标: 水准 1 为 50 a 超越概率 50% 的地震作用, 对应重现期为 75 a, 进行强度验算, 保证结构不破坏或破坏程度很小, 经小的修复可立即使用; 水准 2 为 50 a 超越概率 10% 的地震作用, 对应重现期约为 475 a, 进行弹塑性变形验算, 根据结构的重要性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。

水运工程水工建筑物主要包括码头、防波堤、护岸和通航建筑物等, 根据受力特点主要可分为高桩结构、板桩结构、重力式结构和岸坡。国外规范主要集中在对某种结构形式的规定, 没有全面统一的水运工程设计标准。另外, 中国规范由单一水准向多水准转变也需要对其适用性进行深入分析。因此, 以下针对 4 种结构形式, 根据其在地震作用下的反应特性, 在分析、借鉴国内外相关规范的基础上, 探讨合理的抗震设防标准。

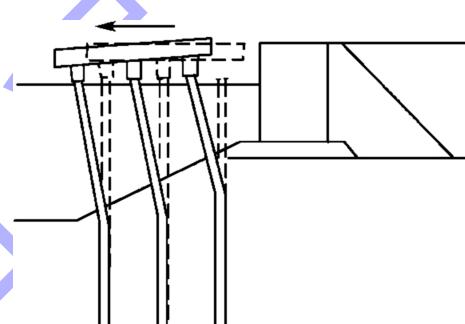
## 2 高桩结构抗震设防标准

### 2.1 地震反应特性

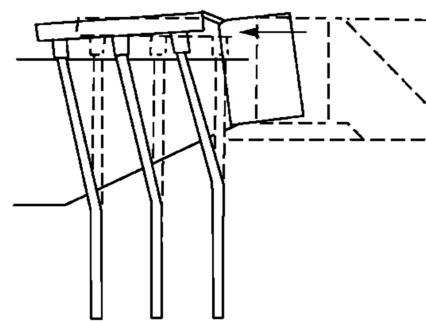
高桩结构主要由梁、板、桩等结构构件组成, 其特点是上部结构自重较大, 而下部桩的刚度相对小很多, 其地震反应特点与建筑、桥梁等结构类似。高桩码头的地震反应很大程度上受地震过程中复杂的土-结构相互作用影响。地震时, 上部

结构主要受地震水平惯性力作用, 地基土主要受地震引起的水平剪切作用, 结构的地震反应取决于桩基和上部结构水平向振动的联合作用, 结构抗震性能主要体现为由地震产生的水平变形和内力。

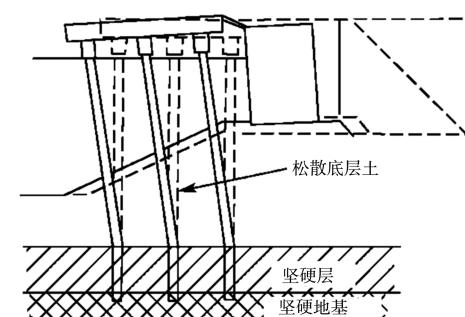
地震中典型的破坏形式取决于地震作用大小: 地震作用小时, 结构可能保持在弹性状态; 地震作用较大时, 结构将进入塑性状态。高桩结构地震破坏特点见图 1。高桩结构在地震作用下反应特性比较复杂, 其他结构形式可在高桩结构分析的基础上做适当简化, 因此以下对高桩结构设防标准做重点论证分析。



a) 板惯性力引起的变形



b) 挡土墙水平力引起的变形



c) 松散地基横向位移引起的变形

图 1 高桩结构地震破坏

## 2.2 国内外抗震设防标准分析

### 2.2.1 国际航运协会《港口工程结构抗震设计指南》

国际航运协会《港口工程结构抗震设计指南》<sup>[2]</sup>指出,设计时首先选择合适的性能等级(表1)。不同的性能等级对应不同地震水准下的可接受破坏程度,即设防目标。可接受的破坏程度对应的结构性能和使用性能见表2。此外,还应考虑保护生命财产、紧急转移和防止危险品泄漏的功能。

表 1 结构性能等级、地震水准和设防目标

| 性能等级 | 不同地震水准的设防目标 |            |
|------|-------------|------------|
|      | 水准 1        | 水准 2       |
| 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 2 基于性能设计的可接受破坏程度

| 可接受破坏程度            | 结构性能                     | 使用性能                   |
|--------------------|--------------------------|------------------------|
| I: 正常使用            | 破坏轻或没有破坏                 | 损失很小或没有损失              |
| II: 可修复            | 可控制的破坏(在极限非弹性反应或残余变形范围内) | 短期丧失(由于维修而导致结构短期或长期停用) |
| III: 接近倒塌          | 接近倒塌的破坏                  | 长期或完全丧失                |
| IV: 倒塌(对周围环境无明显影响) | 结构完全破坏                   | 完全丧失                   |

### 2.2.2 美国《高桩码头抗震设计标准》

美国《高桩码头抗震设计标准》<sup>[3]</sup>针对高桩结构采用 3 个地震水准,规定了相应的结构设防目

标,不同的设计类别采用不同的地震水准和性能水准(表3)。

表 3 不同设计类别的地震水准和设防目标

| 设计分类 | 运营水平地震(OLE)           |      | 偶遇水平地震(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 |

注:“高”指对地区经济或震后修复重要的结构;“中”指对地区经济较重要、对震后修复并不必要的结构;“低”指以上 2 种以外的分类。

### 2.2.3 日本《港口设施技术标准》

日本《港口设施技术标准》<sup>[4]</sup>采用 2 个地震水准,按性能要求将港口设施分为 4 个不同的类别(表4)。1)水准 1 下,所有类别的港口设施都要满足使用性能要求,不需修复即可立即使用。2)水准 2 下,结构性能要求则根据港口设施的类别而异:用于紧急物资输送的专用抗震强化设施,要求确保结构的使用性能(对设施地震后要求的紧

急物资输送功能,不是设施设计要求的功能),即设施损坏很小,不会影响紧急物资的运输;用于干线货物输送的专用抗震强化设施,要求确保结构的可修复性,即结构虽然遭受损坏,但通过应急修复,在一定时间内(约 1 周)即可恢复到能够运送紧急物资的程度。用于紧急物资输送的一般抗震强化设施与专用抗震强化设施的不同是,水准 2 地震后恢复紧急物资运输允许的时间不同。

表 4 日本规范中抗震强化设施的类别

| 抗震强化设施   | 水准 2 地震作用后的性能                         | 功能要求                  | 要求的性能 | 允许的修复程度 |
|----------|---------------------------------------|-----------------------|-------|---------|
| 专用紧急物资运送 | 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 | 地震后具有的必要功能(不需要原设计的功能) | 使用性   | 小的修复    |
| 专用干线货物运送 | 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    |
| 一般紧急物资运送 | 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       | 地震具有的必要功能(不需要原设计的功能)  | 可修复性  | 一定程度的修复 |

#### 2.2.4 中国《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)

我国 GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》<sup>[5]</sup>采用 3 个水准的设防目标, 3 个水准的地震作用分别称为多遇地震、设防地震和罕遇地震, 50 a 的超越概率分别为 63.2%、10% 和 2%~3%。在水准 1 下, 建筑物一般不受损坏或不需修理可继续使用; 水准 2 下, 建筑物可能损坏, 经一般修理或不需修理仍可继续使用; 水准 3 下, 建筑物不致倒塌或发生危及生命的严重破坏。结构在水准 1 下, 应满足承载能力极限状态验算要求和弹性变形不超过规定限值, 保障人的生活、生产、经济和社会活动正常进行; 水准 2 下, 要求结构具有相当的变形能力, 不发生不可修复的脆性破坏, 通过结构的延性设计(满足规范的抗震措施和抗震构造措施)来实现, 以保障人身安全和减小经济损失; 水准 3 下, 结构弹塑性变形不超过规定限值, 避免倒塌, 以保障人身安全。

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

我国 JTG/T 2231-01—2020《公路桥梁抗震设计规范》<sup>[6]</sup>采用 2 个水准, 分别称为 E1 和 E2 地震作用: E1 地震作用为工程场地重现期较短的地震作用; E2 地震作用为工程场地重现期较长的地震作用。其基本思想是将桥梁划分为 A、B、C 和 D 类, 设防要求依次降低, 除 D 类桥梁可采用单水准抗震设防外, 其余类别应用 2 个水准设防。在 E1 地震作用下, 结构总体反应在弹性范围, 基本无损伤, 震后可正常使用。E2 地震作用下, A 类可发生局部轻微损伤, 无需进行修复或经简单修复即可正常使用; B 类和 C 类震后经临时加

固后可供维持应急交通使用。不同类别的地震作用在基本地震动峰值加速度(重现期 475 a 的 II 类场地地震动峰值加速度)基础上, 通过桥梁抗震重要性系数进行调整。桥梁抗震重要性系数  $C_i$  和地震作用重现期  $T_i$  见表 5。

表 5 桥梁抗震重要性系数  $C_i$  和地震作用参数

| 桥梁抗震设防类别 | E1 地震作用   |         | E2 地震作用  |              |
|----------|-----------|---------|----------|--------------|
|          | $C_i$     | $T_i/a$ | $C_i$    | $T_i/a$      |
| A        | 1.0       | 475     | 1.7      | 2 000        |
| B        | 0.43(0.5) | 75(100) | 1.3(1.7) | 1 000(2 000) |
| C        | 0.34      | 50      | 1.0      | 475          |
| D        | 0.23      | 25      | -        | -            |

注: 括号内的数值适用于高速公路和一级公路上的 B 类大桥和特大桥。

#### 2.3 推荐的抗震设防标准

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所规定的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, 其核心是建立设防水准和设防目标之间的关系。目前, 设防水准都是采用地震重现期或设计使用年限内某一超越概率来描述。

国外高桩结构抗震设计大部分采用 2 个水准, 美国虽然提出第 3 水准, 但其地震动参数取为大震的 2/3 作为设计地震, 设计地震的 50 a 超越概率为 5%(美国中东部)~10%(美国西部), 对应重现期为 475~975 a。

国内建筑结构的 3 个地震水准的设防目标是通过两阶段设计方法来实现: 第 1 阶段为承载力验算, 采用水准 1 的地震动参数计算弹性地震作

用, 进行承载力抗震验算, 通过概念设计和抗震构造措施满足水准 3 的设防要求, 适用于大多数结构; 第 2 阶段为弹塑性变形验算, 对强烈地震时易倒塌的结构、特别不规则结构和其他有特殊要求的建筑, 进行结构薄弱部位的弹塑性层间变形验算, 并采取相应的抗震构造措施, 实现水准 3 的设防要求。

公路桥梁结构中, 除 D 类结构外, 采用两阶段设计实现 2 个水准的设防目标: A 类桥梁、B 类和 C 类中的斜拉桥和悬索桥以及采用减隔震的桥梁, 2 个阶段均采用弹性设计, 但 E1 地震作用下采用截面全刚度, E2 地震作用下可采用开裂截面刚度; 其他 B、C 类桥梁, 第 1 阶段采用 E1 地震作用进行弹性设计, 第 2 阶段采用延性抗震设计, 并引入能力保护设计原则。

我国 JTS 146—2012《水运工程抗震设计规范》采用 50 a 超越概率 10% (重现期 475 a) 的地震动参数, 抗震设防目标为“中震可修”。规范虽然采用“中震”水准, 但在计算各种结构的地震作用时, 考虑不同的综合影响系数将地震作用折减后采用弹性抗震设计, 其含义是允许结构进入塑性, 对结构延性性能有相应需求, 但设计中没有给出必要的延性抗震设计方法和目标。

国外港口工程针对“中震”采用重现期 475 a 的地震动参数, 这与我国水运工程和建筑等其他行业规定基本相同; “小震”采用重现期 75 a 的地震动参数, 而我国建筑和构筑物抗震设计中“小震”采用重现期 50 a 的地震动参数。我国现行《水运工程抗震设计规范》中综合影响系数取值范围一般在 0.25~0.30, 相当于折减后的地震作用重现期在 50 a 左右, 因此, 考虑到规范的延续性并与我国其他相关行业协调, 建议“小震”采用重现期 50 a 的地震动参数。根据高桩结构地震反应特点, 借鉴国内外相关抗震设防标准, 并考虑规范的延续性, 推荐高桩结构采用 2 个抗震设防水准: 水准 1 采用 50 a 超越概率 63.2% 的设计地震动参数, 结构在水准 1 下应保持使用性能, 结构反应保持弹性范围; 水准 2 采用目前规范中 50 a 超越概率 10% 的设计地震动参数, 结构在水

准 2 下达到“中震可修”的目标。

### 3 板桩结构抗震设防标准

#### 3.1 地震反应特性

典型的板桩结构由板桩、拉杆和锚碇结构组成。板桩上部由锚碇支撑, 下部沉入地基中。典型地震破坏形式取决于结构、地基条件和地震作用大小, 地震作用下可能发生结构的稳定性破坏和结构强度破坏(图 2)。

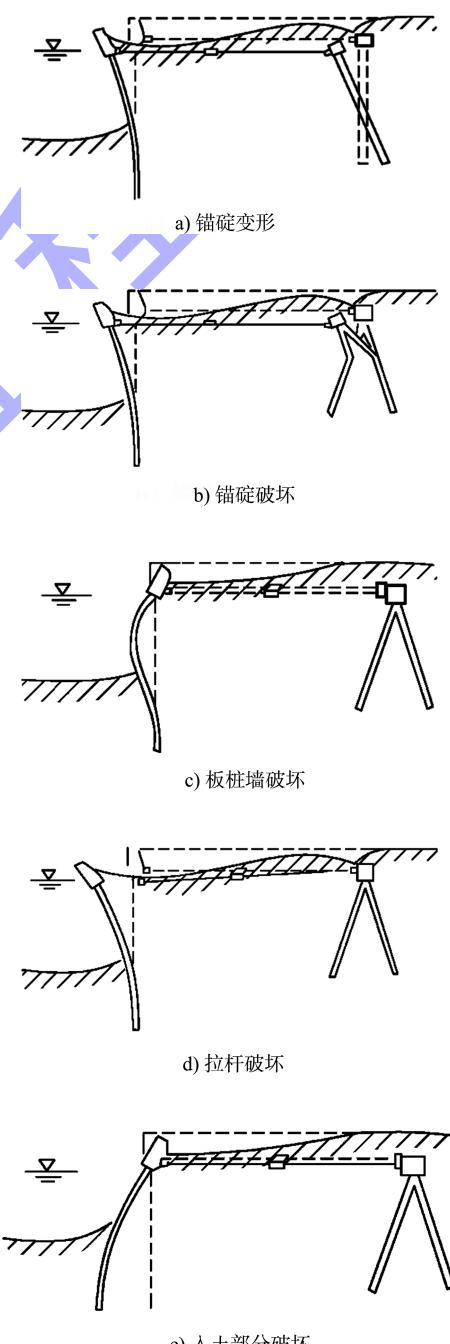


图 2 板桩结构地震破坏

板桩结构属柔性结构, 其地震反应比较复杂, 板桩变形影响墙后土压力大小, 土压力反过来影响板桩位移, 因此准确计算这种动力反应比较困难。从简单实用和便于操作的角度, 国内外规范一般采用拟静力法。板桩结构的抗震设计内容与静力计算相似, 包括板桩墙入土深度确定、板桩墙弯矩计算、拉杆拉力计算和锚碇设计等, 抗震计算时, 板桩自身的地震惯性力一般可不考虑, 与静力计算的主要区别在于所受土压力采用地震动土压力。

### 3.2 国内外抗震设防标准

国际航运协会和日本规范均推荐采用 2 个水准: 水准 1 为 50 a 超越概率 50% 的设计地震动参数; 水准 2 为 50 a 超越概率 10% 的设计地震动参数。美国未见专门的港口板桩结构设计规范, 挡土墙抗震设计手册<sup>[7]</sup> 中也未明确规定板桩挡土墙的设计水准。国内其他行业无类似结构可供参考。

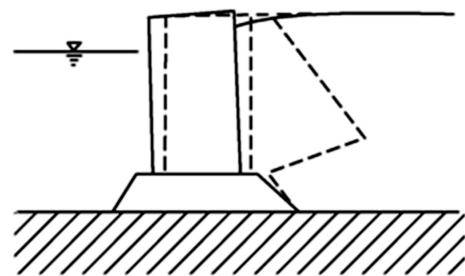
### 3.3 推荐的抗震设防标准

参考国外规范规定, 与前述高桩码头设防标准相协调, 并考虑进一步推动中国规范走出去, 进一步扩展规范的适应性, 推荐板桩结构采用 2 个地震水准: 水准 1 采用 50 a 超越概率 63.2% 的设计地震动参数, 结构在水准 1 下应保持使用性能; 水准 2 采用 50 a 超越概率 10% 的设计地震动参数, 结构在水准 2 下应具有可修复性。

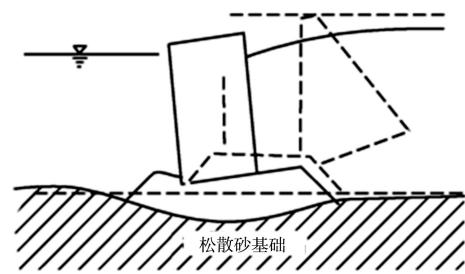
## 4 重力式结构抗震设防标准

### 4.1 地震反应特性

重力式结构靠自身重力满足稳定性要求, 各种形式的重力式结构断面都较大。结构本身的变形与地基的弹性变形相比较小, 结构本身的刚度很大, 地震时的振动特性是周期短、阻尼大、动力反应弱, 一般当作刚体按静力法计算, 其结构自身变形可忽略不计。地震中典型的破坏模式是向海方向的位移和倾斜(图 3)。地震过程中的振动特性主要由第一振型控制, 可能发生水平振动、绕基底平面形心的振动或绕抛石基床中心的振动。



a) 在刚性地基上



b) 在松散砂土地基础  
图 3 重力式结构地震破坏

### 4.2 国内外抗震设防标准

对于重力式结构抗震计算, 国际航运协会和日本规范均推荐采用 2 个地震水准, 水准定义同 3.2。美国未见专门的港口重力式结构设计规范, 挡土墙抗震设计手册中也未明确规定重力式挡土墙的设计水准, 国内《构筑物抗震设计规范》<sup>[8]</sup> 中的挡土墙和《公路桥梁抗震设计规范》中的重力式桥台, 均采用基本地震动峰值加速度进行单一水准设计。

### 4.3 推荐的抗震设防标准

与其他行业构筑物和桥梁中的重力式桥台不同, 水运工程中的重力式结构一般作为工程主体结构发挥使用功能, 不同水准下应具有不同的抗震设防目标, 因此对重力式结构同样推荐采用 2 个设防标准: 水准 1 采用 50 a 超越概率 63.2% 的设计地震动参数, 结构在水准 1 下应保持使用性能; 水准 2 采用 50 a 超越概率 10% 的设计地震动参数, 结构在水准 2 下应具有可修复性。

## 5 岸坡抗震设防标准

### 5.1 国内外抗震设防标准

岸坡常见的地震破坏形态是顶部明显下沉、

产生裂缝和侧移，严重的则发生滑坡。我国《水运工程抗震设计规范》《建筑边坡工程技术规范》<sup>[9]</sup>和《水利水电工程边坡设计规范》<sup>[10]</sup>均采用单一水准进行稳定性验算，没有对地震下岸坡位移分析及震后稳定性分析的相关规定。美国有关规范<sup>[11]</sup>规定，在地震作用下，岸坡有向下滑动的趋势，需要验算岸坡可能的滑动位移及地震后岸坡的稳定性(由于产生超孔隙水压力，土的抗剪强度降低)，其分析流程为：1)进行岸坡持久状况下的静力分析，安全系数不小于1.5。2)进行震后岸坡静力分析，安全系数不小于1.1。若不满足要求，须采取措施；若满足要求，继续下一步分析。3)进行岸坡地震拟静力稳定性分析，安全系数不小于1.1；若不满足要求，须进行岸坡变形分析；若满足要求，则分析完成。针对震后岸坡变形验算，美国有关规范按3个地震水准分别给出变形限值。

## 5.2 推荐的抗震设防标准

根据采用美国标准进行设计的海外项目经验，强震区的岸坡拟静力分析一般较难满足要求，因此进一步进行岸坡变形分析。我国水运工程场地大多位于基本地震动峰值加速度0.1~0.2g分区，较少在0.3g分区，但考虑到规范对海外项目的支持和标准走出去的需要，建议岸坡采用与前述3种结构相同的水准，即水准1采用50a超越概率63.2%的设计地震动参数，水准2采用50a超越概率10%的设计地震动参数，各水准下的岸坡性能通过不同的安全系数体现。

## 6 结论

1) 我国水运工程抗震设计采用多级设防是必要的，符合国内外结构抗震设计理念和技术的发展趋势。

2) 国外港口工程抗震设计规范大多采用2个水准：水准1地震作用重现期为75a，结构在水准1下应保持使用性能；水准2地震作用重现期

为475a，结构在水准2下应具有可修复性。

3) 按受力特点，将水运工程水工建筑物分为高桩结构、板桩结构、重力式结构和岸坡。建议总体上采用2个抗震设防水准：水准1采用50a超越概率63.2%的设计地震动参数，水准2采用50a超越概率10%的设计地震动参数。

## 参考文献：

- [1] 中交水运规划设计院有限公司.水运工程抗震设计规范:JTS 146—2012[S].北京:人民交通出版社,2012.
- [2] International Navigation Association. Seismic design guidelines for port structures[S]. Netherlands: Balkema Publishers, 2001.
- [3] American Society of Civil engineers. Seismic design of piers and wharves: ASCE/COPRI 61-14 [S]. Reston: American Society of Civil Engineers, 2014.
- [4] 日本港湾协会.港口设施技标准·解说(修订版)[M].北京:中国工程建设标准化协会水运工程委员会,2007.
- [5] 中国建筑科学研究院.建筑抗震设计规范(2016年版):GB 50011—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2016.
- [6] 招商局重庆交通科研设计院有限公司.公路桥梁抗震设计规范:JTGT 2231-01—2020[S].北京:人民交通出版社,2020.
- [7] Ebeling R M, Morrison E E. The seismic design of waterfront retaining structures[R]. Washington: Department of the army waterways experiment station, 1992.
- [8] 中冶建筑研究总院有限公司.构筑物抗震设计规范:GB 50191—2012[S].北京:中国计划出版社,2012.
- [9] 重庆市设计院,中国建筑技术集团有限公司.建筑边坡工程技术规范:GB 50330—2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [10] 水利部水利水电规划设计总院.水利水电工程边坡设计规范:SL 386—2007[S].北京:中国水利水电出版社,2007.
- [11] Port of Long Beach. Wharf design criteria[S]. Long Beach: Port of Long Beach, 2015.

(本文编辑 郭雪珍)