



中外港口工程混凝土结构可靠性设计对比

李荣庆, 侯永为, 杨国平

(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 为分析各国规范在结构可靠性设计方面的异同, 选取欧洲、英国和美国规范, 首先对结构可靠性设计的主要内容, 即安全等级、结构设计使用年限、最小目标可靠指标、设计状况和极限状态设计表达式等进行对比分析; 然后结合海外工程实例, 按各国规范进行结构内力计算, 并选取典型混凝土结构构件进行设计。结果表明, 各国规范虽然都推荐了基于可靠性的概率极限状态设计方法, 但在作用计算、分项系数、组合系数、设计表达式等方面均有所不同, 按各国规范设计的结果存在差异。

关键词: 港口工程; 结构设计; 可靠性

中图分类号: U 65

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)10-0031-06

Comparison of reliability design of Chinese and foreign port engineering reinforced concrete structures

LI Rong-qing, HOU Yong-wei, YANG Guo-ping,

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

Abstract: To analyze the differences of various national codes in reliability design regulations, we select European, British and American codes, and carry out a comparative analysis of the main contents of structural reliability design regulations, i. e. safety grade, design working life, the minimum target reliability index, design situations, as well as the limit state design expressions. Combining overseas engineering practice, we conduct structural internal force calculation and choose typical concrete structural members to design according to various codes. The results show that although all codes recommend the limit state design method based on reliability, there are differences in action calculation, partial factors, combination factors and design expression, resulting in different design results based on codes of different countries.

Keywords: port engineering; structural design; reliability

结构设计理论从力学角度讲, 经历了容许应力法、破损阶段设计法和极限状态设计法; 从概率方法讲, 经历了定值设计法、半概率设计法和近似概率法。目前, 国内外大多推荐以可靠性为基础的极限状态设计法。为分析各国规范在可靠性设计规定和设计结果方面的异同, 选取中国规范^[1]、欧洲规范^[2]、英国规范^[3-5]和美国规范^[6-11]对港口工程结构可靠性设计规定的主要内容进行对比, 包括安全等级划分、结构设计使用年限、

最小目标可靠指标、设计状况和极限状态设计表达式。在对各国规范设计内容进行总结分析的基础上, 结合海外工程案例, 按各国规范进行结构内力分析和构件设计对比。

1 安全等级划分

对于结构安全等级, 各国规范主要依据可能产生的危及人的生命、造成经济损失、对社会和环境产生影响等后果的严重性进行划分, 见表 1。

收稿日期: 2021-06-08

作者简介: 李荣庆(1982—), 男, 博士, 正高级工程师, 从事工程结构设计、结构可靠度和抗震研究。

中国、欧洲和英国规范都将其分为 3 级，美国分为 4 级。中国规范针对不同的结构安全等级，采用结构重要性系数来体现；欧洲和英国规范通过对

作用系数进行调整来体现；美国规范针对不同等级，分别对雪荷载、冰荷载、风荷载和地震作用进行调整。

表 1 各国规范中的结构安全等级划分

规范	安全等级	破坏后果	结构示例或描述
中国	一级	很严重	有特殊安全要求的结构
	二级	严重	一般港口工程结构
	三级	不严重	临时性港口工程结构
欧洲、英国	RC3	CC3(严重)	体育场看台、公共建筑(如音乐厅)
	RC2	CC2(中等)	住宅和办公楼、公共建筑
	RC1	CC1(不严重)	人们不经常进入的农业建筑(如仓库)、温室
美国	IV	严重	重要设施,包括但不限于生产、加工、处理、储存、使用或处置危险燃料、危险化学品或危险废物的建筑,其所涉及的剧毒性物质超过有关部门规定的临界值,泄漏后足以造成公众威胁
	III	重大	可能引起重要的经济损失或大规模影响居民生活的 IV 类以外建筑和结构
	II	中等	I、III 和 IV 类以外的建筑
	I	较小	破坏后对人类生命影响较小

2 设计使用年限

国内外对于港口工程永久性建筑物和临时性建筑物设计使用年限的规定基本一致，有的规范对于可更换的结构构件、能源类码头和重要设施

提出特别要求。中国、欧洲和英国规范对结构设计使用年限的规定比较明确，美国不同规范^[8-9]和文献^[10]给出的数值有差异。各国设计使用年限的比较见表 2。

表 2 各国规范设计使用年限的比较

建筑物类型	设计使用年限/a			
	中国	欧洲	英国	美国
一般港口建筑物	50	50	50	50~80
临时性建筑物	5~10	10	10	-
可更换的结构构件	-	10~25	10~25	-
用于不可再生自然资源、石油化工或类似工业或商业用途的结构	-	-	15~30	25
特别重要的港口防波堤、重要防洪或海岸防护基础设施、纪念性建筑物	-	100	100	-

3 目标可靠指标

中国规范 GB 50158—2010《港口工程结构可靠性设计统一标准》给出持久状况承载能力极限状态下不同安全等级的目标可靠指标；欧洲规范给出承载能力极限状态、疲劳极限状态和正常使用极限状态(不可逆)下不同可靠度等级的目标可靠指标；中国、欧洲和英国规范中的目标可靠指标与可靠度等级有关。各国工程结构承载能力极限状态 50 a 基准期目标可靠指标比较见表 3，其中美国规范没有专门针对港口工程结构的目标可靠指标，作为参考，将美国建筑结构的目标可靠指标，按其风险类别大致对应的可靠度等级列于表 3。

表 3 各国规范规定的最小目标可靠指标对比

破坏后果	最小目标可靠指标(50 a 基准期)		
	中国	欧洲、英国	美国
严重	4.0	4.3	3.50~4.50
中等	3.5	3.8	3.00~4.25
不严重	3.0	3.3	2.50~3.50

4 设计状况

中国规范 GB 50158—2010《港口工程结构可靠性设计统一标准》和欧洲规范 EN 1990：2002《结构设计基础》均将港口工程结构分为 4 种设计状况，即：持久状况、短暂状况、地震状况和偶然状况。英国规范 BS 6349-1-2：2016 中规定设计状况同欧洲规范，对于港口工程，另外规定偶然设

计状况包括下列情况: 1) 船舶意外靠泊引起的作用; 2) 极端风作用和极端波浪作用的组合。美国规范中没有设计状况的概念。

5 设计表达式

中国规范针对港口工程结构设计采用以概率理论为基础、以分项系数表达的极限状态设计方法, 分为承载能力极限状态设计和正常使用极限状态设计。承载能力极限状态设计采用作用的持久组合、短暂组合和地震组合, 有特殊要求时可采用作用的偶然组合; 正常使用极限状态设计根据不同设计目的, 分别选用标准组合、频遇组合和准永久组合。

欧洲规范结构设计分为承载能力极限状态和正常使用极限状态设计。承载能力极限状态设计包括 4 种情况: 1) EQU 为结构或结构的任何一部分作为刚体失去静力平衡; 2) STR 为结构或结构构件(包括基础、桩和地连墙等)的内部失效或过大变形; 3) GEO 为地基破坏或过大变形; 4) FAT 为结构或结构构件的疲劳破坏。

当考虑结构的静力平衡极限状态时(EQU), 采用式(1)验算:

$$E_{d,dst} \leq E_{d,stb} \tag{1}$$

式中: $E_{d,dst}$ 为不稳定作用效应的设计值; $E_{d,stb}$ 为稳定作用效应的设计值。

对于结构或结构构件截面、连接的承载力或构件过大变形的极限状态(STR 或 GEO), 欧洲规范 EN 1990:2002 规定按式(2)进行计算:

$$E_d \leq R_d \tag{2}$$

式中: E_d 为作用效应设计值; R_d 为抗力设计值。

正常使用极限状态按特征组合、频遇组合和准永久组合进行验算, 需满足式(3)要求:

$$E_d \leq C_d \tag{3}$$

式中: E_d 为作用效应设计值; C_d 为正常使用极限状态相应限值。

英国海工建筑物设计遵循欧标中规定的极限状态设计理念, 针对海工建筑物特点给出相应的分项系数。英国规范中 EQU、STR、GEO 和涉及

土工作用的 STR 分别采用不同的作用分项系数, 涉及土工作用的 STR 采用欧标中的设计方法 1。对于组合系数, 英国规范按不同的作用类型规定了不同的系数取值。

美国规范 ASCE 7-16 给出荷载抗力分项系数法(LRFD)和容许应力法(ASD)的荷载组合, 但没有针对港口工程的荷载组合。美国规范 UFC 4-152-01: 2017 针对码头结构给出 LRFD 和 ASD 的荷载组合。对于混凝土结构构件设计, 美国 ACI 318-19 采用 LRFD, 设计表达式为:

$$\phi S_n \geq U \tag{4}$$

式中: ϕ 为强度折减系数; S_n 为名义强度, 按材料强度和结构尺寸的名义值计算; ϕS_n 为构件的设计强度; U 为要求的强度, 根据规范给出的荷载组合计算。

美国规范中的适用性验算包括变形验算和裂缝验算。变形验算直接计算构件在不乘系数荷载下的挠度, 裂缝控制通过限制受拉纵向钢筋间距来实现。

考虑欧洲规范是针对大土木做出的原则性规定, 英国规范以欧洲规范的理念为指导, 针对海工建筑物给出了设计方法, 更具代表性, 因此以下结合工程案例按中国、英国和美国规范进行分析比较。

6 工程案例

6.1 工程概况

码头面高程 4.0 m, 码头前沿底高程-17.8 m。码头采用高桩梁板结构, 排架间距 9.0 m, 每榀排架布置 5 根钢管桩, 前轨和后轨下采用直径 1.2 m 钢管桩, 中间 3 根为直径 1.016 m 钢管桩。轨道间距 35.0 m。相邻排架中间的前、后轨道梁下各增设 1 根直径 1.2 m 钢管桩。横梁断面尺寸为 1.6 m×2.2 m, 轨道梁断面尺寸为 1.6 m×2.1 m, 均为现浇钢筋混凝土结构。面板采用叠合板, 预制板厚 0.4 m, 为普通钢筋混凝土结构, 面板现浇层最薄处 0.15 m, 面板总厚度 0.55 m。码头下方抛石棱体坡度 1:2。结构断面见图 1。

规范中护舷选型考虑护舷制造误差、温度、靠泊速度和靠泊角度的影响, 且须计算船舶撞击能标准值和设计值, 分别用于正常靠泊和操作不当引起的偶然工况。根据各国规范分别进行护舷设计, 以设计最大船型为例, 按各国规范计算的结果见表 7。

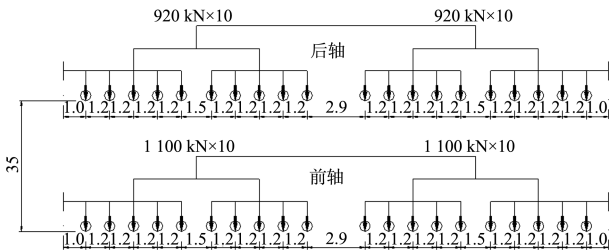


图 2 集装箱岸桥工作状态时荷载 (单位: m)

表 7 基于各国规范的护舷设计对比

规范	护舷型号	最大有效撞击能量/kJ	设计吸能/kJ	最大反力/kN
中国	SCN1100 F1.3 超级锥型护舷	482	590	897
英国、美国	SCN1400 F2.0 超级锥形护舷	标准值:791 设计值:1 187	1 305	2 029

4)系缆力。中国规范计算系泊荷载根据风和水流对船舶共同作用确定, 同时需要根据船舶载质量满足系缆力最小要求。英国规范确定船舶系缆力标准值考虑以下几种情况: ①工作或者非工作状态下, 根据环境条件计算的可能出现的最大荷载; ②以折减的缆绳破断力作为系缆力标准值; ③以 1.18 倍缆绳破断力作为偶然工况下系缆力标准值。经分析和计算, 各国系缆力计算结果见表 8。

表 8 系缆力计算对比

规范	系缆力标准值/kN
中国	1 500
英国、美国	正常工况:1 560;偶然工况:3 068

6.3.3 作用组合

按本文第 5 节所述进行组合。其中按美国规范时, 采用 UFC 中 LRFD 法对应的组合。

6.4 结构分析

采用三维空间杆系有限元法进行结构分析, 梁和桩采用梁单元模拟, 面板采用壳单元模拟, 桩土相互作用采用土弹簧模拟, 土弹簧特性分别按各自规范考虑。因轨道梁主要承受机械荷载和堆载, 横梁除承受以上荷载外, 还承受各国计算方法差别较大的船舶作用等。因此, 为体现不同作用计算方法对构件设计的影响, 选取轨道梁和横梁分别进行计算对比。结果见表 9~10。

表 9 轨道梁内力计算对比

规范	承载能力极限状态持久组合			正常使用极限状态准永久组合		正常使用极限状态标准组合	
	正弯矩/(kN·m)	负弯矩/(kN·m)	剪力/kN	正弯矩/(kN·m)	负弯矩/(kN·m)	正弯矩/(kN·m)	负弯矩/(kN·m)
中国	8 668	7 521	5 034	3 791	3 785	—	—
英国	8 104	7 021	4 793	3 021	2 871	—	—
美国	9 978	8 615	5 613	3 193	3 163	6 273	5 613

表 10 横梁内力计算对比

规范	承载能力极限状态持久组合			正常使用极限状态准永久组合		正常使用极限状态标准组合	
	正弯矩/(kN·m)	负弯矩/(kN·m)	剪力/kN	正弯矩/(kN·m)	负弯矩/(kN·m)	正弯矩/(kN·m)	负弯矩/(kN·m)
中国	8 847	7 670	2 872	3 475	5 110	—	—
英国	6 590	7 809	2 848	2 611	2 888	—	—
美国	6 628	8 774	2 923	3 117	3 020	4 585	5 625

6.5 构件设计

梁抗剪设计对比分别见表 11~13。

轨道梁正截面设计、横梁正截面设计、轨道

表 11 轨道梁正截面设计对比

规范	弯矩	承载力所需钢筋面积/万 mm ²	实配钢筋/万 mm ²	裂缝宽度/mm	裂缝限值/mm	最大钢筋间距/mm	控制因素
中国	正弯矩	1.290 2	1.981 4	0.20	0.20	—	裂缝
	负弯矩	1.114 4	1.981 4	0.20	0.20	—	裂缝
英国	正弯矩	1.271 3	1.271 3	0.18	0.30	—	承载力
	负弯矩	1.225 2	1.225 2	0.18	0.30	—	承载力
美国	正弯矩	1.488 7	1.488 7	—	—	150	承载力
	负弯矩	1.280 1	1.280 1	—	—	190	承载力

表 12 横梁正截面设计对比

规范	弯矩	承载力所需钢筋面积/万 mm ²	实配钢筋/万 mm ²	裂缝宽度/mm	裂缝限值/mm	最大钢筋间距/mm	控制因素
中国	正弯矩	1.248 6	1.754 5	0.20	0.20	—	裂缝
	负弯矩	1.077 9	2.450 2	0.20	0.20	—	裂缝
英国	正弯矩	0.982 9	0.982 9	0.23	0.30	—	承载力
	负弯矩	1.164 7	1.164 7	0.18	0.30	—	承载力
美国	正弯矩	0.928 7	0.928 7	—	—	166	承载力
	负弯矩	1.236 5	1.236 5	—	—	200	承载力

表 13 轨道梁抗剪设计对比

规范	剪力设计值/kN	承载力设计值/kN	箍筋
中国	5 034	5 287	4 ￠16@240
英国	4 793	5 059	4 ￠16@240
美国	5 613	5 497	4 ￠16@140

4) 根据抗剪承载力计算结果可知,按美国规范验算抗剪承载力较严格,中国规范与欧洲规范结果相近。

6.6 结果分析

1) 承载能力极限状态下,按美国规范计算的作用效应设计值最大,其原因是美国规范中的荷载分项系数取值较大,且对于起重机械荷载和堆载同时按主导荷载进行组合。

2) 中国规范和欧洲规范均给出了裂缝宽度验算公式,通过计算确定满足裂缝要求的配筋;美国规范一般通过控制钢筋间距的形式控制裂缝。与欧洲规范相比,中国规范在荷载组合和裂缝宽度限值方面规定均较严格。

3) 按中国规范设计的钢筋混凝土结构一般是裂缝控制,实配钢筋远大于按承载力计算要求的钢筋,其原因一是裂缝宽度限值规定较严格;二是作用组合差别较大,如船舶撞击力、系缆力和波浪力等,英国规范取准永久组合系数为 0,认为该类作用的时间短,裂缝开展后可随荷载撤去而闭合,裂缝开展影响的主要是钢筋的耐久性问题,因此不考虑持续时间短的撞击力、系缆力和波浪力。

7 结论

1) 在混凝土结构设计理念方面,各国均推荐以概率论为基础、以分项系数表达的极限状态设计方法。

2) 各国规范对于结构安全等级主要依据可能产生的危及人的生命、造成经济损失、对社会和环境产生影响等后果的严重性进行划分,中国、欧洲和英国划分为 3 级,采用结构重要性系数来体现;美国划分为 4 级,分别对雪荷载、冰荷载、风荷载和地震作用进行调整。

3) 各国规范对于港口工程永久性建筑物和临时性建筑物设计使用年限的规定基本一致。

4) 各国规范对结构目标可靠指标给出相关规定,中国与美国规范中的最小目标可靠指标大体相当,均低于欧洲规范。

5) 中国与欧洲、英国规范中的设计状况基本一致,分为持久状况、短暂状况、偶然状况和地震状况;美国没有设计状况的概念。

(下转第 43 页)