

UDC

中华人民共和国国家标准



P

GB. 50199 – 2013

水利水电工程结构可靠性 设计统一标准

Unified standard for reliability design of hydraulic
engineering structures

2013 – 09 – 06 发布

2014 – 05 – 01 实施

中华人民共和国住房和城乡建设部
中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局

联合发布

中华人民共和国国家标准

水利水电工程结构可靠性
设计统一标准

Unified standard for reliability design of hydraulic
engineering structures

GB 50199 - 2013

主编部门:中国电力企业联合会

批准部门:中华人民共和国住房和城乡建设部

施行日期:2014年5月1日

中国计划出版社

2013 北 京

中华人民共和国国家标准
水利水电工程结构可靠性
设计统一标准

GB 50199-2013

☆

中国计划出版社出版

网址: www.jhpress.com

地址: 北京市西城区木樨地北里甲 11 号国宏大厦 C 座 3 层

邮政编码: 100038 电话: (010) 63906433 (发行部)

新华书店北京发行所发行

北京世知印务有限公司印刷

850mm×1168mm 1/32 4 印张 97 千字

2014 年 4 月第 1 版 2014 年 4 月第 1 次印刷

☆

统一书号: 1580242·213

定价: 24.00 元

版权所有 侵权必究

侵权举报电话: (010) 63906404

如有印装质量问题, 请寄本社出版部调换

中华人民共和国住房和城乡建设部公告

第 136 号

住房城乡建设部关于发布国家标准 《水利水电工程结构可靠性设计 统一标准》的公告

现批准《水利水电工程结构可靠性设计统一标准》为国家标准,编号为 GB 50199—2013,自 2014 年 5 月 1 日起实施。其中,第 3.2.1、3.3.1 条为强制性条文,必须严格执行。原《水利水电工程结构可靠度设计统一标准》GB 50199—94 同时废止。

本标准由我部标准定额研究所组织中国计划出版社出版发行。

中华人民共和国住房和城乡建设部
2013 年 9 月 6 日

前 言

本标准是根据住房和城乡建设部《2008年工程建设标准规范制订、修订计划(第二批)》(建标〔2008〕第105号)要求,由水电水利规划设计总院会同有关单位共同修订而成。

本标准编制过程中,编制组进行了深入调查研究,认真总结了实践经验,并广泛征求了有关方面的意见,最后经审查定稿。

本标准共分9章和7个附录,主要内容包括总则、术语和符号、基本规定、极限状态设计原则、结构上的作用和环境影响、材料和岩土性能及几何参数、结构分析和试验辅助设计、分项系数概率极限状态设计方法、可靠性管理等。

本标准修订的主要内容包括:

(1)对结构设计方法,在原标准规定的以概率理论为基础、以分项系数表达的极限状态设计方法基础上,增加了在缺乏统计资料时,结构设计可根据可靠的工程经验或必要的试验研究进行,也可以采用容许应力法或单一安全系数法等进行设计的规定。

(2)增加了设计使用年限和耐久性的规定。

(3)增加了水工结构设计时应考虑环境影响的规定。

(4)增加了水工结构构件承载能力极限状态持久设计状况目标可靠指标 β 限值的規定。

(5)在可变作用标准值的确定原则中,增加了由重现期来表达的方法。

(6)增加了结构分析中试验辅助设计的规定。

(7)增加了既有结构可靠性评定的规定。

(8)增加了术语一节。

(9)增加了基于可靠指标的设计的规定。

(10)取消了原标准正常使用极限状态作用效应短期组合和长期组合验算的规定,将正常使用极限状态作用组合修订为按作用的标准组合或标准组合并考虑长期作用的影响。

(11)删除了地震作用作为可变作用的分类,将地震作用仅按偶然作用考虑。

(12)删除了在作用效应基本组合中,对概率极限状态设计,一个主要可变作用可采用设计基准期的概率分布模型及其参数,其他可变作用应采用年(或时段)的概率分布模型及其参数的规定。

(13)删除了原标准中的“质量控制”一章。

(14)删除了原标准中的“附录 A 水工建筑物级别”。

本标准中以黑体字标志的条文为强制性条文,必须严格执行。

本标准由住房城乡建设部负责管理和对强制性条文的解释,由中国电力企业联合会负责日常管理,由水电水利规划设计总院负责具体技术内容的解释。本标准在执行过程中如有修改和补充之处,请将有关意见和建议反馈给水电水利规划设计总院(地址:北京市德外六铺炕北小街2号,邮政编码:100120),以供今后修订时参考。

本标准主编单位、参编单位、主要起草人和主要审查人:

主编单位:水电水利规划设计总院

参编单位:中国水电顾问集团中南勘测设计研究院

主要起草人:党林才 冯树荣 李佛炎 李光顺 肖峰
周跃飞

主要审查人:王柏乐 艾永平 陈厚群 许松林 汪毅
严军 楚跃先 周厚贵 史志华 金峰
侯建国 李德玉 吕明治 徐建强 魏坚政
饶宏玲

目 次

1	总 则	(1)
2	术语和符号	(2)
2.1	术语	(2)
2.2	符号	(7)
3	基本规定	(11)
3.1	一般规定	(11)
3.2	结构安全级别和可靠度	(11)
3.3	设计使用年限和耐久性	(12)
4	极限状态设计原则	(14)
4.1	极限状态	(14)
4.2	设计状况	(15)
4.3	极限状态设计	(15)
5	结构上的作用 and 环境影响	(19)
5.1	结构上的作用	(19)
5.2	作用的随机特性	(19)
5.3	作用的代表值	(20)
5.4	环境影响	(21)
6	材料和岩土性能及几何参数	(22)
6.1	材料、地基、围岩性能的随机特性	(22)
6.2	材料、地基、围岩性能的标准值	(22)
6.3	几何参数的随机特性和标准值	(23)
7	结构分析和试验辅助设计	(24)
7.1	一般规定	(24)
7.2	作用模型	(24)

7.3	结构模型和分析方法	(25)
7.4	试验辅助设计	(25)
8	分项系数概率极限状态设计方法	(26)
8.1	一般规定	(26)
8.2	承载能力极限状态设计	(27)
8.3	正常使用极限状态设计	(30)
8.4	分项系数确定	(30)
9	可靠性管理	(32)
附录 A	随机变量的统计参数和概率分布	(33)
附录 B	结构可靠指标的计算方法和目标可靠指标的 确定	(40)
附录 C	作用的统计参数和概率分布	(45)
附录 D	结构抗力的统计参数和概率分布	(50)
附录 E	试验辅助设计	(53)
附录 F	结构系数的计算方法	(57)
附录 G	既有结构的可靠性评定	(59)
	本标准用词说明	(64)
	引用标准名录	(65)
	附:条文说明	(67)

Contents

1	General provisions	(1)
2	Terms and symbols	(2)
2.1	Terms	(2)
2.2	Symbols	(7)
3	Basic requirement	(11)
3.1	General requirement	(11)
3.2	Structural safety class and degree of reliability	(11)
3.3	Design working life and durability	(12)
4	Principles for limit state design	(14)
4.1	Limit states	(14)
4.2	Design situations	(15)
4.3	Limit state design	(15)
5	Structural actions and environmental influences	(19)
5.1	Structural actions	(19)
5.2	Random characteristics of actions	(19)
5.3	Representative values of actions	(20)
5.4	Environmental influences	(21)
6	Material, rock and soil properties and geometrical parameters	(22)
6.1	Random characteristics of material, foundation and surrounding rock properties	(22)
6.2	Characteristic values of material, foundation and surrounding rock properties	(22)
6.3	Random characteristics and characteristic values of	

geometrical parameters	(23)
7 Structural analysis and test-aided design	(24)
7.1 General requirement	(24)
7.2 Action model	(24)
7.3 Structural model and analysis method	(25)
7.4 Test-aided design	(25)
8 Probability-based limit state design method by the partial factor	(26)
8.1 General requirement	(26)
8.2 Ultimate limit state design	(27)
8.3 Serviceability limit state design	(30)
8.4 Determination of the partial factor	(30)
9 Reliability implementation	(32)
Appendix A Statistical parameters and probability distribution of random variables	(33)
Appendix B Calculation method of structural reliability index and determination of the target reliability index	(40)
Appendix C Statistical parameters and probability distribution of actions	(45)
Appendix D Statistical parameters and probability dis- tribution of structural resistance	(50)
Appendix E Test-aided design	(53)
Appendix F Calculation method of structural factor	(57)
Appendix G Reliability assessment of existing structures	(59)
Explanation of wording in this standard	(64)
List of quoted standards	(65)
Addition; Explanation of provisions	(67)

1 总 则

1.0.1 为统一水利水电工程结构可靠性设计的基本原则和设计标准,使水工结构设计符合安全适用、经济合理、技术先进的要求,制定本标准。

1.0.2 本标准适用于各类水工建筑物整体结构、结构构件以及地基基础的设计,也适用于施工阶段和使用阶段的结构设计及既有结构的可靠性评定。

1.0.3 水工结构设计宜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。当缺乏统计资料时,结构设计可根据可靠的工程经验或必要的试验研究进行,也可采用容许应力法或单一安全系数法等方法进行。

1.0.4 各类水工结构设计规范应共同遵守本标准规定的基本准则,并对计算分析、细部构造设计、材料性能、施工质量、运行条件及维护等提出相应的规定。

1.0.5 水利水电工程结构可靠性设计,除应执行本标准外,尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 水工结构 hydro-structure

为防治水患、开发水利,实现水利、水电、港口、航道等工程目标而修建的直接或间接承受水作用的各种水工建筑物(hydraulic structure)以及组成这些建筑物的具有一定强度和刚度并有机组合在一起各连续部件,统称为水工结构,或简称结构。

2.1.2 结构体系 structural system

结构中的所有承载构件及其共同工作的方式。

2.1.3 结构构件 structural member

结构在物理上可以区分出的部件。

2.1.4 结构模型 structural model

用于结构分析、设计等的理想化的结构体系。

2.1.5 设计使用年限 design working life

设计规定的结构能发挥预定功能或仅需局部修复即可按预定功能使用的年限。

2.1.6 设计状况 design situations

代表一定时段内结构体系、承受的作用、材料性能等实际情况的一组设计条件,在该条件下结构不超越有关的极限状态。

2.1.7 持久设计状况 persistent design situation

在结构使用过程中一定出现,且持续期很长的设计状况,其持续期一般与设计使用年限属同一数量级。

2.1.8 短暂设计状况 transient design situation

在结构施工和使用过程中出现概率较大,而与设计使用年限相比,其持续期很短的设计状况。

2.1.9 偶然设计状况 accidental design situation

在结构使用过程中出现概率很小,且持续时间很短的设计状况。

2.1.10 极限状态 limit states

整个结构或结构的一部分超过某一特定状态就不能满足设计规定的某一功能要求,此特定状态为该功能的极限状态。

2.1.11 承载能力极限状态 ultimate limit states

对应于结构达到最大承载力或不适于继续承载的变形的状态。

2.1.12 正常使用极限状态 serviceability limit states

对应于结构达到正常使用或耐久性能的某项规定限值的状态。

2.1.13 抗力 resistance

结构承受作用效应的能力。

2.1.14 可靠性 reliability

结构在规定的时间内,在规定的条件下,完成预定功能的能力。

2.1.15 可靠度 degree of reliability

结构在规定的时间内,在规定的条件下,完成预定功能的概率。

2.1.16 失效概率 probability of failure

结构不能完成预定功能的概率。

2.1.17 可靠指标 reliability index

度量结构可靠度的数值指标。

2.1.18 基本变量 basic variable

代表物理量的一组规定的变量,用于表示作用和环境影响、材料和岩土的性能以及几何参数的特征。

2.1.19 功能函数 performance function

关于基本变量的函数,该函数表征一种结构功能。

2.1.20 概率分布 probability distribution

随机变量取值的统计规律,一般采用概率密度函数或概率分布函数表示。

2.1.21 统计参数 statistical parameter

在概率分布中用来表示随机变量取值的平均水平和离散程度等的数字特征。

2.1.22 分位值 fractile

与随机变量概率分布函数的某一概率相应的值。

2.1.23 名义值 nominal value

用非统计方法确定的值。

2.1.24 极限状态法 limit state method

不使结构超越某种规定的极限状态的设计方法。

2.1.25 概率极限状态法 probability-based limit state method

结构设计时,直接以影响结构可靠度的基本变量作为随机变量,根据结构的极限状态方程计算结构的失效概率或可靠指标的方法;或者以允许失效概率或目标可靠指标为基础,建立结构可靠度与极限状态方程之间的数学关系,将结构的极限状态方程转化为基本变量标准值(或代表值)和相应的分项系数形式表达的极限状态设计表达式进行设计的方法。

2.1.26 容许应力法 permissible(allowable)stress method

使结构或地基在作用标准值下产生的应力不超过规定的容许应力(材料或岩土强度标准值除以某一安全系数)的设计方法。

2.1.27 单一安全系数法 single safety factor method

使结构或地基的抗力标准值与作用标准值的效应之比不低于某一规定安全系数的设计方法。

2.1.28 作用 action

施加在结构上的集中力或分布力(直接作用,也称为荷载)和引起结构外加变形或约束变形的原因(间接作用)。

2.1.29 作用效应 effect of action

由作用引起的结构的反应,包括内力、变形和应力等。

2.1.30 单个作用 single action

可认为与结构上的任何其他作用之间在时间和空间上为统计独立的作用。

2.1.31 永久作用 permanent action

在设计所考虑的时期内始终存在且其量值变化与平均值相比可以忽略不计的作用,或其变化是单调的并趋于某个限值的作用。

2.1.32 可变作用 variable action

在设计使用年限内其量值随时间变化,且其变化与平均值相比不可忽略不计的作用。

2.1.33 偶然作用 accidental action

在设计使用年限内不一定出现,而一旦出现其量值很大,且持续时间很短的作用。

2.1.34 地震作用 seismic action

地震对结构所产生的作用。

2.1.35 土工作用 geotechnical action

由岩土、填方或地下水传递到结构上的作用。

2.1.36 固定作用 fixed action

在结构上具有固定空间分布的作用,但其数值可能是随机的。当固定作用在结构某一点上的大小和方向确定后,该作用在整个结构上的作用即得以确定。

2.1.37 自由作用 free action

在结构上给定的范围内具有任意空间分布的作用。

2.1.38 静态作用 static action

使结构产生的加速度可以忽略不计的作用。

2.1.39 动态作用 dynamic action

使结构产生的加速度不可忽略不计的作用。

2.1.40 有界作用 bounded action

具有不能被超越的且可确切或近似掌握其界限值的作用。

2.1.41 无界作用 unbounded action

没有明确界限值的作用。

2.1.42 设计基准期 design reference period

为确定可变作用等的取值而选用的时间参数。

2.1.43 作用的标准值 characteristic value of an action

作用的主要代表值,可根据对观测数据的统计、作用的自然界限或工程经验确定。

2.1.44 作用的设计值 design value of an action

作用标准值与作用分项系数的乘积。

2.1.45 作用(荷载)组合 combination of actions(loads)

在不同作用的同时影响下,为验证某一极限状态的结构可靠度而采用的一组作用的组合。

2.1.46 基本组合 fundamental combination

按承载能力极限状态设计时,持久设计状况或短暂设计状况下,永久作用与可变作用的组合。当作用与作用效应之间按线性关系考虑时,作用基本组合的效应设计值即为各作用设计值效应的组合。

2.1.47 偶然组合 accidental combination

按承载能力极限状态设计时,永久作用、可变作用与一种偶然作用的组合。当作用与作用效应之间按线性关系考虑时,作用偶然组合的效应设计值即为各作用设计值效应的组合。

2.1.48 标准组合 characteristic combination

按正常使用极限状态设计时,对永久作用、可变作用均采用标准值为作用代表值的组合。

2.1.49 环境影响 environmental influence

环境对结构产生的各种力学的、物理的、化学的或生物的不利影响。环境影响会引起结构材料性能的劣化,降低结构的安全性或适用性,影响结构的耐久性。

2.1.50 材料性能的标准值 characteristic value of a material property

符合规定质量的材料性能概率分布的某一分位值或材料性能的名义值。

2.1.51 材料性能的设计值 design value of a material property

材料性能的标准值除以材料性能分项系数所得的值。

2.1.52 几何参数的标准值 characteristic value of a geometrical parameter

设计规定的几何参数公称值或几何参数概率分布的某一分位值。

2.1.53 结构分析 structural analysis

确定结构上作用效应的过程。

2.1.54 线弹性分析 linear-elastic analysis

基于线性应力-应变或弯矩-曲率关系,采用弹性理论分析方法对结构几何形体进行的结构分析。

2.1.55 非线性分析 non-linear analysis

基于材料非线性变形特性对结构的几何形体进行的结构分析。

2.1.56 既有结构 existing structure

已经存在的各类工程结构。

2.1.57 评估使用年限 assessed working life

可靠性评定所预估的既有结构在规定条件下的使用年限。

2.1.58 荷载检验 load testing

通过施加荷载评定结构的性能或预测其承载力的试验。

2.2 符 号

2.2.1 结构可靠度

T ——结构的设计基准期;

R ——结构的抗力;

S ——结构的作用效应;

- Z ——结构的功能函数；
- μ_R ——抗力的平均值；
- σ_R ——抗力的标准差；
- δ_R ——抗力的变异系数；
- μ_S ——作用效应的平均值；
- σ_S ——作用效应的标准差；
- δ_S ——作用效应的变异系数；
- p_S ——结构的可靠概率；
- p_f ——结构的失效概率；
- β ——结构的可靠指标；
- β_f ——目标的可靠指标；
- Ω_i ——第 i 种结构的权系数；
- X_i ——第 i 个随机变量(包括基本变量和附加变量)；
- μ_{X_i} ——随机变量 X_i 的平均值；
- σ_{X_i} ——随机变量 X_i 的标准差；
- X_i^* ——随机变量 X_i 的设计验算点；
- μ'_{X_i} ——随机变量 X_i 的当量正态分布平均值；
- σ'_{X_i} ——随机变量 X_i 的当量正态分布标准差；
- a_i ——随机变量 X_i 的敏度系数。

2.2.2 作用和作用效应

- F ——作用；
- G ——永久作用；
- G_k ——永久作用的标准值；
- Q ——可变作用；
- Q_k ——可变作用的标准值；
- A ——偶然作用；
- A_k ——偶然作用的代表值；
- P ——预应力作用的有关代表值；
- F_k ——作用的标准值；

F_d ——作用的设计值；
 μ_i ——作用的平均值；
 μ_G ——永久作用的平均值；
 μ_Q ——可变作用的平均值；
 σ_i ——作用的标准差；
 δ_i ——作用的变异系数。

2.2.3 材料性能和几何参数

f_k ——材料性能的标准值；
 f_d ——材料性能的设计值；
 f_c ——结构中材料的性能值；
 f_s ——试件中材料的性能值；
 μ_m ——材料性能的平均值；
 δ_m ——材料性能的标准差；
 a ——几何参数；
 a_k ——几何参数的标准值；
 μ_a ——几何参数的平均值；
 δ_a ——几何参数的变异系数；
 ω_0 ——反映结构材料性能与试件性能差别的影响系数。

2.2.4 分项系数和功能限值

γ_0 ——结构的重要性系数；
 ψ ——设计状况系数；
 γ_1 ——作用的分项系数；
 γ_m ——材料性能的分项系数；
 γ_G ——永久作用的分项系数；
 γ_Q ——可变作用的分项系数；
 γ_p ——预应力作用的分项系数；
 γ_d ——结构系数；
 C ——正常使用极限状态下结构的功能限值。

2.2.5 数学符号

- $\Phi(\cdot)$ ——标准正态分布函数；
 $\varphi(\cdot)$ ——标准正态分布的概率密度函数；
 $\Phi^{-1}(\cdot)$ ——标准正态分布的反函数；
 $F(X)$ ——随机变量 X 的概率分布函数；
 $F^{-1}(X)$ ——随机变量 X 的概率分布函数的反函数；
 $f(X)$ ——随机变量 X 的概率密度函数；
 $E(X)$ ——随机变量 X 的数学期望；
 $D(X)$ ——随机变量 X 的方差；
 $\exp(\cdot)$ ——指数函数；
 $S(\cdot)$ ——作用效应函数；
 $R(\cdot)$ ——结构抗力函数；
 $g(\cdot)$ ——结构功能函数。

3 基本规定

3.1 一般规定

3.1.1 水工结构的设计、施工和维护应使结构在规定的設計使用年限內以安全且经济的方式满足规定的各项功能要求。

3.1.2 水工结构在设计使用年限內应满足下列功能要求：

- 1 在正常施工和正常使用时，应能承受可能出现的各种作用。
- 2 在正常使用时，应具有设计规定的工作性能。
- 3 在正常维护下，应具有设计规定的耐久性。
- 4 在出现预定的偶然作用时，主体结构应能保持必需的稳定性。

3.1.3 水工结构设计时，应避免结构出现损坏或少出现损坏，并根据下列要求采取适当的措施：

- 1 应避免、消除或减少结构可能受到的危害。
- 2 应采用对可能受到的危害反应不敏感的结构类型。
- 3 应采用当结构出现可接受的局部损坏时结构的其他部分仍能保持安全可靠的结构类型。
- 4 不宜采用无破坏预兆的结构体系。
- 5 应使结构具有整体稳固性。

3.1.4 宜采取下列措施满足结构设计的基本要求：

- 1 宜采用适当的材料。
- 2 宜采用合理的设计和构造。
- 3 对结构的设计、制作、施工和使用(包括定期的检查、维护和维修)等宜制定相应的控制措施。

3.2 结构安全级别和可靠度

3.2.1 水工建筑物设计时，应根据水工建筑物级别，采用不同的

结构安全级别。水工建筑物结构安全级别的划分应符合表 3.2.1 的规定。

表 3.2.1 水工建筑物结构安全级别

水工建筑物的结构安全级别	水工建筑物级别
I	1
II	2,3
III	4,5

3.2.2 结构及结构构件的安全级别,根据其在水工建筑物中的部位、本身破坏对水工建筑物安全影响,可比水工建筑物的结构安全级别降低一级,但不应低于 III 级。地基的结构安全级别应与水工建筑物的结构安全级别相同。

3.2.3 可靠度水平的设置应根据结构构件的安全级别、失效模式和经济因素等确定。对结构的安全性和适用性可采用不同的可靠度水平。

3.2.4 当有充分的统计数据时,结构构件的可靠度宜采用可靠指标 β 度量。结构构件设计时采用的可靠指标,可根据对现有结构构件的可靠度分析,并结合使用经验和经济因素等确定。

3.3 设计使用年限和耐久性

3.3.1 水工结构设计时,应规定结构的设计使用年限。

3.3.2 1 级~3 级主要建筑物结构的设计使用年限应采用 100 年,其他永久性建筑物结构应采用 50 年。临时建筑物结构的设计使用年限应根据预定的使用年限和可能滞后的时间采用 5 年~15 年。

3.3.3 水工结构设计时,应对环境影响进行评估。当结构所处的环境对其耐久性有较大影响时,应根据不同的环境类别采用相应的结构材料、设计构造、防护措施、施工质量要求等,并应制定在使用期间的定期检修和维护制度,以保证结构在设计使用年限内满足安全和正常使用的要求。

3.3.4 环境对结构耐久性的影响,可根据工程经验、试验研究、计算或综合分析等方法进行评估。

3.3.5 环境类别的划分和相应的设计、施工、使用及维护的要求等,应遵守国家现行相关标准的规定。

4 极限状态设计原则

4.1 极限状态

4.1.1 水工结构应按承载能力极限状态和正常使用极限状态设计。

4.1.2 水工结构设计应对结构的各种极限状态规定明确的标志及限值。

4.1.3 当结构或结构构件出现下列状态之一时,应认为超过了承载能力极限状态:

- 1 整个结构或结构的一部分作为刚体失去平衡。
- 2 结构构件因超过材料强度而破坏,或因过度的变形而不适于继续承载。
- 3 结构或结构构件丧失稳定。
- 4 整个结构或结构的一部分转变为机动体系。
- 5 土、石结构或地基、围岩产生渗透失稳等。
- 6 地基丧失承载力而破坏。

4.1.4 结构达到影响正常使用或耐久性的限值,且出现下列状态之一时,应认为超过了正常使用极限状态:

- 1 影响结构正常使用或外观的变形。
- 2 对运行人员或设备、仪表等产生影响正常工作的振动。
- 3 对结构外形、耐久性以及防渗结构抗渗能力有影响的局部损坏。
- 4 影响正常使用的其他特定状态。

4.1.5 水工结构的破坏可分为以下两类:

- 1 第一类破坏为非突发性的破坏,破坏前可见到明显征兆,破坏过程缓慢。

2 第二类破坏为突发性的破坏,破坏前无明显征兆,或结构一旦发生破坏难于补救或修复。

4.1.6 结构设计时,应对结构的不同极限状态分别进行计算或验算;当某一极限状态的计算或验算起控制作用时,可仅对该极限状态进行计算或验算。

4.2 设计状况

4.2.1 结构设计时,应根据结构在施工、安装、运行、检修不同时期可能出现的不同作用、结构体系和环境条件,按以下三种设计状况设计:

1 持久设计状况应用于结构使用时的正常情况。

2 短暂设计状况应用于结构出现的临时情况,包括结构施工和维修时的情况等。

3 偶然设计状况应用于结构出现的非常情况,包括结构在承受永久作用和一些可变作用的同时,遭遇某一种偶然作用的情况等。

4.2.2 结构设计时,对不同的设计状况,应采用相应的结构体系、可靠度水平、基本变量和作用组合等。

4.3 极限状态设计

4.3.1 对本标准第 4.2.1 条规定的三种设计状况应按下列要求分别进行极限状态设计:

1 对三种设计状况,均应进行承载能力极限状态设计。

2 对持久设计状况,应进行正常使用极限状态设计。

3 对短暂设计状况,可根据需要进行正常使用极限状态设计。

4 对偶然设计状况,可不进行正常使用极限状态设计。

4.3.2 水工结构设计应根据在不同设计状况下,对可能同时出现的作用,按承载能力极限状态和正常使用极限状态分别进行作用

组合,并应采用各自的不利组合进行设计。

4.3.3 进行承载能力极限状态设计时,应根据不同的设计状况采用下列作用组合:

1 基本组合应用于持久设计状况或短暂设计状况。

2 偶然组合应用于偶然设计状况。在每一种偶然组合中,应只考虑一个偶然作用。

4.3.4 对于偶然设计状况,应按下列原则进行设计:

1 对主要水工建筑物的主要承载结构,应按作用的偶然组合进行设计,或采取防护措施,使主要承载结构不致丧失承载能力。

2 在主要建筑物偶然设计状况下,次要水工建筑物和主要水工建筑物的非主要承载结构产生局部破坏时,不得影响主要水工建筑物主要承载结构的安全。

4.3.5 进行正常使用极限状态设计时,应采用标准组合或标准组合并考虑长期作用的影响。

4.3.6 在结构可靠度分析时,应将作用和材料、地基、围岩的性能及结构的几何参数等作为基本变量,将计算模式不定性等作为附加变量。

4.3.7 基本变量应作为随机变量,基本变量统计参数和概率分布可按本标准附录 A 确定。

4.3.8 在结构可靠度分析时,也可将结构的作用效应或结构抗力作为综合的基本变量。

4.3.9 结构的功能函数 Z 可按下式计算:

$$Z = g(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (4.3.9)$$

式中: $g(\cdot)$ ——结构的功能函数;

$X_i (i=1, 2, \dots, n)$ ——基本变量和附加变量。

4.3.10 结构的极限状态应按下式表达的极限状态方程确定:

$$g(X_1, X_2, \dots, X_n) = 0 \quad (4.3.10)$$

4.3.11 结构按极限状态设计应符合下式要求:

$$g(X_1, X_2, \dots, X_n) \geq 0 \quad (4.3.11-1)$$

当仅有结构抗力和作用效应两个综合的基本变量时,应符合下式要求:

$$R - S \geq 0 \quad (4.3.11-2)$$

式中: R ——结构抗力;

S ——作用效应。

4.3.12 结构的可靠度和可靠概率计算应符合下列规定:

1 结构的可靠度宜采用可靠指标 β 表达,可靠指标 β 可按下列公式计算:

$$\beta = \phi^{-1}(1 - p_i) \quad (4.3.12-1)$$

$$p_i = P[g(\cdot) < 0] \quad (4.3.12-2)$$

式中: $\phi^{-1}(\cdot)$ ——标准正态分布函数的反函数;

p_i ——结构的失效概率。

2 结构的可靠概率 p_s 按下式计算:

$$p_s = P[g(\cdot) \geq 0] \quad (4.3.12-3)$$

或

$$p_s = 1 - p_i \quad (4.3.12-4)$$

式中: p_s ——结构的可靠概率。

4.3.13 结构的可靠指标宜根据基本变量和附加变量的平均值、标准差及概率分布按本标准附录 B.1 进行计算。

4.3.14 与结构的各种设计状况和极限状态相对应的结构可靠度设计水平应达到规定的目标可靠指标。目标可靠指标应根据现行各类水工结构设计规范可靠度校准结果,结合正常设计与施工的结构可靠度分析和运行经验,并应经安全与经济的综合分析确定。结构可靠度校准与目标可靠指标的确定可按本标准附录 B.2 进行。

4.3.15 承载能力极限状态设计的目标可靠指标应按结构安全级别、设计状况、破坏类型分别给出。对同一结构安全级别的结构,短暂设计状况和偶然设计状况的目标可靠指标可低于持久设计状况的目标可靠指标;第二类破坏的结构目标可靠指标应高于第一

类破坏的结构目标可靠指标。

4.3.16 结构构件宜根据规定的可靠指标,采用由作用的代表值、材料性能的标准值、几何参数的标准值和各相应的分项系数构成的极限状态设计表达式进行设计。水工结构构件承载能力极限状态持久设计状况的目标可靠指标 β_1 不应低于表 4.3.16 的规定。有条件时也可按本标准附录 B.3 的规定,直接采用基于可靠指标的方法进行设计。

表 4.3.16 水工结构构件持久设计状况承载能力极限状态的目标可靠指标 β_1

结构安全级别		I 级	II 级	III 级
破坏类型	第一类破坏	3.7	3.2	2.7
	第二类破坏	4.2	3.7	3.2

4.3.17 结构正常使用极限状态的目标可靠指标可根据不同结构的特点和工程经验确定。

5 结构上的作用和环境影响

5.1 结构上的作用

5.1.1 结构上的各种作用,当在时间上或空间上互相独立时,每一种作用可作为单独的作用;当某些作用相关密切,且经常以它们的不利值同时出现时,也可将它们一起作为单个作用。

5.1.2 结构上的作用可按下列性质分类:

1 按随时间的变化分类:

- 1)永久作用;
- 2)可变作用;
- 3)偶然作用。

水工结构上的作用随时间的变化可按本标准附录 C 进行分类。

2 按随空间的变化分类:

- 1)固定作用;
- 2)自由作用。

3 按结构的反应特点分类:

- 1)静态作用;
- 2)动态作用。

4 按有无限值分类:

- 1)有界作用;
- 2)无界作用。

5 其他分类。

5.2 作用的随机特性

5.2.1 结构上的作用宜作为随机变量,当其变异性不大时,可作

为常量。

5.2.2 结构上的可变作用随时间变化的随机过程,可作为随机变量。可变作用的概率分布可按本标准附录 C 确定。

5.2.3 水工建筑物结构设计时可变作用的设计基准期应按下列规定确定:

1 1级~3级主要建筑物结构的设计基准期应采用 100 年,其他永久性建筑物结构应采用 50 年。

2 临时建筑物结构的设计基准期应根据设计使用年限及可能滞后的时间确定。

3 特大型工程建筑物结构的设计基准期应经专门研究确定。

5.2.4 在结构可靠度分析中,作用的统计参数和概率分布可根据实际观测或试验数据按本标准附录 A 的统计方法确定。统计数据应有代表性,当统计资料不充分时,可结合工程经验综合分析判断确定。

5.2.5 当结构的作用是根据多个随机变量计算确定时,其统计参数可采用本标准附录 A 的方法确定,也可按工程实践经验确定。

5.3 作用的代表值

5.3.1 当采用分项系数表达的概率极限状态设计方法时,永久作用和可变作用的代表值应采用作用的标准值,偶然作用的代表值可根据具体水工结构设计规范的规定确定。

5.3.2 永久作用的标准值,可采用规定的概率分布中的某个分位值;也可以根据传统方法或某种显著特征确定。

5.3.3 可变作用的标准值可采用设计基准期或年(时段)内的最大(小)值概率分布中指定的某个分位值,应按本标准附录 C 确定。对有传统的取值或有显著特征,以及难以依靠统计资料按概率分布的分位值确定标准值的可变作用,可根据工程经验通过分析判断确定。有明确额定限值的有界可变作用,应规定该额定限值为标准值。

5.4 环境影响

5.4.1 环境影响可分为永久影响、可变影响和偶然影响。

5.4.2 对结构的环境影响应进行定量描述；当没有条件进行定量描述时，也可通过环境对结构的影响程度的分级等方法进行定性描述，并应在设计中采取相应的技术措施。

6 材料和岩土性能及几何参数

6.1 材料、地基、围岩性能的随机特性

6.1.1 材料和地基、围岩的物理力学特性和其他性能,应按国家现行有关标准经试验确定。

6.1.2 材料、地基、围岩的性能宜采用随机变量概率分布模型描述。统计参数和概率分布宜采用本标准附录 A 的方法确定。当统计资料不充分时,人工材料性能可采用正态分布或对数正态分布;岩、土材料,地基和围岩性能可采用对数正态分布或其他分布。

6.1.3 岩、土材料和地基、围岩试件性能的统计参数与概率分布,应按工程现场取样或现场试验数据确定。当数据较少时,可按照岩、土分类并结合其他工程同类试验数据进行统计分析确定。

6.1.4 按试件确定的材料、地基、围岩的性能,应通过换算系数或函数转换为结构中材料、现场地基、围岩的性能。结构中材料、现场地基、围岩的性能的不定性,应由试验性能的不定性和换算系数或函数的不定性两部分组成,应按本标准附录 D 的方法计算。

6.2 材料、地基、围岩性能的标准值

6.2.1 当采用以分项系数形式表达的概率极限状态设计方法时,材料、地基、围岩性能的标准值应根据符合规定质量的材料试样、现场取样、现场试件的试验性能的概率分布的某一分位值确定。

6.2.2 人工材料(不包括大体积混凝土)的强度标准值可采用概率分布的 0.05 分位值,水工结构大体积混凝土的强度标准值可采用概率分布的 0.2 分位值,岩土材料及其人工地基强度的标准值可采用概率分布的 0.1 分位值。岩基和围岩强度标准值宜根据原位测试和室内试验的结果,按照现行国家标准《水力发电工程地质

勘察规范》GB 50287 的规定确定。当试验数据不充分时,可采用现行国家标准《水力发电工程地质勘察规范》GB 50287 的规定值,也可根据工程经验,经分析判断确定。当有条件时,也可按概率分布的某个分位值确定。

6.2.3 材料、地基、围岩的变形模量、泊松比等物理性能的标准值可采用概率分布的 0.5 分位值。设计上有特殊要求时,经专门论证,可按概率分布较不利的分位值确定。

6.2.4 水工结构材料、地基、围岩的性能,长期在有害介质或其他不良环境的影响下可能恶化时,性能标准值应予以折减。

6.3 几何参数的随机特性和标准值

6.3.1 结构截面及轮廓尺寸等几何参数可作为随机变量。几何参数的各种统计参数,应根据正常生产情况下结构几何尺寸的测试数据,用数理统计方法确定。当测试数据不充分时,可根据国家现行有关标准规定的公差,经分析判断确定。几何参数的概率分布可采用正态分布。当结构几何参数的变异性对结构抗力、作用效应及其他性能影响很小时,几何参数可作为常量。

6.3.2 结构及结构构件的几何参数的标准值可采用设计文件规定的尺寸。

6.3.3 地基、围岩中地质软弱面的几何参数,可根据勘察资料、地质条件和工程经验确定,其标准值可采用地质建议值。

7 结构分析和试验辅助设计

7.1 一般规定

7.1.1 结构分析应包括下列内容：

- 1 确定结构的作用、作用组合及其效应。
- 2 确定结构抗力和其他性能。

7.1.2 作用组合效应和结构抗力应根据作用、结构材料性能、几何参数、计算模式等通过结构分析确定。

7.1.3 结构分析可采用计算或模型试验等方法。

7.1.4 结构分析的精度应能满足结构设计要求，必要时宜进行试验验证。

7.1.5 在结构分析中，宜分析环境对材料、构件和结构性能的影响。

7.2 作用模型

7.2.1 对与时间无关的或不计累积效应的静力分析，可只分析发生在设计基准期内作用的最大值和最小值；当动力性能起控制作用时，应有比较详细的过程描述。

7.2.2 当结构承受自由作用时，应根据每一自由作用可能出现的空间位置、大小和方向，分析确定对结构最不利的荷载布置。

7.2.3 在不能准确确定作用参数时，应对作用参数给出上、下限范围，并应进行比较后确定不利的作用效应。

7.2.4 当分析地基与结构相互作用时，岩土作用可采用相应的分析模型进行模拟。

7.2.5 当动力作用被认为是拟静力作用时，可通过把动力作用分析结果包括在静力作用中，或对静力作用乘以等效动力放大系数等方法来确定动力作用效应。当分析水体与结构动力相互作用

时,水体作用可采用相应的附加质量模型进行模拟。

7.2.6 当动力作用引起的振幅、速度、加速度使结构有可能超过正常使用极限状态的限值时,应根据实际情况对结构进行正常使用极限状态验算。

7.3 结构模型和分析方法

7.3.1 结构分析可采用多种计算模式,可靠度分析所采用的极限状态方程应以国家现行有关标准规定的计算模式为基础。

7.3.2 结构分析采用的计算模式和基本假定应能体现结构在极限状态下的反应,以减少计算模式和基本假定引起的不定性。

7.3.3 在结构可靠度分析中,作用组合效应和结构抗力计算模式的不定性,可用附加变量反映,其统计参数可通过国家现行有关标准规定的计算模式的计算结果与较精确模式的计算结果,或与模型试验、原型观测等结果进行比较,经统计分析或根据工程经验综合判断确定。在采用分项系数表达的概率极限状态设计方法中,计算模式不定性可在结构系数中反映。

7.3.4 当结构的变形可能使作用的影响显著增大时,应分析结构变形对作用效应的影响。

7.3.5 结构分析应根据结构类型、材料性能和受力特点等因素,采用线性、非线性分析方法或试验分析方法;当结构性能始终处于弹性状态时,可采用弹性理论进行结构分析。

7.3.6 当动力作用使结构产生较大加速度时,应分析其动力效应。

7.4 试验辅助设计

7.4.1 对没有适当分析模型的特殊情况,可进行试验辅助设计,具体方法宜符合本标准附录 E 的规定。

7.4.2 采用试验辅助设计的结构,应达到相关设计状况的可靠度水平,并应分析试验结果的数量对相关参数统计不定性的影响。

8 分项系数概率极限状态设计方法

8.1 一般规定

8.1.1 在分项系数概率极限状态设计式中,应以分项系数和基本变量的代表值反映功能函数中基本变量的不定性,并应与规定的目标可靠指标相联系。设计式中所包含的各种分项系数,宜根据有关基本变量的概率分布和统计参数及规定的可靠指标进行计算分析,并结合工程经验,经优化确定。当缺乏统计数据时,可根据传统的或经验的设计方法,采用国家现行有关标准规定的各种分项系数。

8.1.2 确定分项系数时应遵循下列原则:

- 1 同一种作用,在不同水工结构中宜采用相同分项系数。
- 2 同一种材料性能,在不同水工结构中宜采用相同分项系数。
- 3 优选的一组分项系数应使设计的水工结构计算得到的可靠指标逼近目标可靠指标。

8.1.3 在采用分项系数表达的概率极限状态设计式中,应采用下列分项系数:

1 结构重要性系数 γ_0 ,对应结构安全级别为 I 级、II 级、III 级的结构或结构构件不应小于 1.1、1.0、0.9。

2 设计状况系数 ψ ,反映结构不同设计状况应有不同目标可靠指标。对应持久设计状况、短暂设计状况、偶然设计状况,设计状况系数 ψ 应分别取不同数值。

3 作用分项系数 γ_i ,反映作用对其标准值的不利变异,应按下式计算:

$$\gamma_i = \frac{F_d}{F_k} \quad (8.1.3-1)$$

式中： F_k ——作用的标准值；

F_d ——作用的设计值。

4 材料性能分项系数 γ_m ，反映材料性能对其标准值的不利变异，应按下式计算：

$$\gamma_m = \frac{f_k}{f_d} \quad (8.1.3-2)$$

式中： f_k ——材料性能的标准值；

f_d ——材料性能的设计值。

5 结构系数 γ_d ，用以反映作用组合效应计算模式不定性和抗力计算模式不定性，以及上述分项系数未能反映的其他不定性。

8.2 承载能力极限状态设计

8.2.1 结构或结构构件按承载能力极限状态设计时，应分析下列状态：

1 结构或结构构件(包括基础等)的破坏或过度变形，此时结构的材料强度起控制作用。

2 整个结构或其中的一部分作为刚体失去静力平衡，此时结构材料或地基的强度不起控制作用。

3 地基破坏或过度变形，此时岩土の强度起控制作用。

8.2.2 结构或结构构件按承载能力极限状态设计时，应符合下列规定：

1 结构或结构构件(包括基础等)的破坏或过度变形的承载能力极限状态设计，应按下式计算：

$$\gamma_0 \psi S_d(\cdot) \leq \frac{1}{\gamma_{dn}} R_d(\cdot) \quad (8.2.2-1)$$

当结构的承载能力由材料的强度控制时：

$$R_d(\cdot) = R\left(\frac{f_k}{\gamma_m}, a_k\right) \quad (8.2.2-2)$$

式中： $S_d(\cdot)$ ——作用组合の效应(如轴力、弯矩、剪力或应力等)

设计值函数；

$R_d(\cdot)$ ——结构抗力设计值函数；

γ_0 ——结构的重要性系数；

ψ ——设计状况系数；

γ_{dn} ——相应第 n 种作用组合的结构系数；

a_k ——几何参数的标准值。

2 整个结构或其中的一部分作为刚体失去静力平衡的承载能力极限状态设计,应按下式计算:

$$\gamma_0 \psi S_{d, \text{dst}}(\cdot) \leq \frac{1}{\gamma_{dn}} S_{d, \text{stb}}(\cdot) \quad (8.2.2-3)$$

式中: $S_{d, \text{dst}}(\cdot)$ ——不平衡作用组合效应设计值函数;

$S_{d, \text{stb}}(\cdot)$ ——平衡作用组合效应设计值函数。

3 地基的破坏或过度变形的承载能力极限状态设计,可采用以概率理论为基础并且用分项系数表达的概率极限状态法进行,也可采用容许应力法等进行。采用概率极限状态法进行时,其分项系数的取值与式(8.2.2-1)中所包含的分项系数的取值可有区别。

8.2.3 承载能力极限状态设计表达式中的作用组合,除应满足本标准第 4.3.3 条要求外,还应符合下列要求:

1 当结构中永久作用位置的变异对静力平衡或类似的极限状态设计结果很敏感时,该永久作用的有利部分和不利部分应分别作为单个作用。

2 当一种作用产生的几种效应非全相关时,对产生有利效应的作用,其分项系数的取值宜降低。

8.2.4 承载能力极限状态基本组合效应设计值应按下列规定确定:

1 承载能力极限状态基本组合的效应设计值应按下式计算:

$$S_d(\cdot) = S(\gamma_G G_k, \gamma_P P, \gamma_Q Q_k, a_k) \quad (8.2.4-1)$$

式中: $S_d(\cdot)$ ——作用组合的效应设计值函数;

- G_k ——永久作用的标准值；
- P ——预应力作用的有关代表值；
- Q_k ——可变作用的标准值；
- γ_G ——永久作用的分项系数；
- γ_P ——预应力作用的分项系数；
- γ_Q ——可变作用的分项系数。

2 当作用与作用效应按线性关系考虑时，基本组合的效应设计值可按式计算：

$$S_d(\cdot) = \sum_{i \geq 1} \gamma_{Gi} S(G_{ik}, a_k) + \gamma_P S(P, a_k) + \sum_{j \geq 1} \gamma_{Qj} S(Q_{jk}, a_k) \quad (8.2.4-2)$$

式中： $S(G_{ik}, a_k)$ ——第 i 个永久作用标准值的效应；

$S(P, a_k)$ ——预应力作用代表值的效应；

$S(Q_{jk}, a_k)$ ——第 j 个可变作用标准值的效应。

8.2.5 承载能力极限状态偶然组合的效应设计值应按下列规定确定：

1 承载能力极限状态偶然组合的效应设计值按下式计算：

$$S_d(\cdot) = S(\gamma_G G_k, \gamma_P P, A_k, \gamma_Q Q_k, a_k) \quad (8.2.5-1)$$

式中： A_k ——偶然作用的代表值。

2 当作用与作用效应按线性关系考虑时，偶然组合的作用组合效应设计值可按式计算：

$$S_d(\cdot) = \sum_{i \geq 1} \gamma_{Gi} S(G_{ik}, a_k) + \gamma_P S(P, a_k) + S(A_k, a_k) + \sum_{j \geq 1} \gamma_{Qj} S(Q_{jk}, a_k) \quad (8.2.5-2)$$

式中： $S(A_k, a_k)$ ——偶然作用的效应代表值。

8.2.6 在承载能力极限状态偶然组合的设计表达式中，与偶然作用同时出现的某些可变作用的标准值可根据观测资料和工程经验适当折减。

8.2.7 在偶然设计状况下，宜分析偶然作用对结构抗力的影响。

8.3 正常使用极限状态设计

8.3.1 结构或结构构件正常使用极限状态设计应符合下列规定:

1 结构或结构构件正常使用极限状态设计,应按作用的标准组合或标准组合并考虑长期作用的影响,按下式计算:

$$r \cdot S(G_k, P, Q_k, f_k, a_k) \leq C \quad (8.3.1-1)$$

式中: C ——结构或结构构件正常使用功能限值。

2 当作用与作用效应按线性关系考虑时,标准组合的效应设计值可按下式确定:

$$S(\cdot) = \sum_{i \geq 1} S(G_{ik}, f_k, a_k) + S(P, f_k, a_k) + \sum_{j \geq 1} S(Q_{jk}, f_k, a_k) \quad (8.3.1-2)$$

式中: $S(\cdot)$ ——标准组合的效应设计值函数。

8.4 分项系数确定

8.4.1 结构重要性系数 γ_0 应按本标准第 8.1.3 条规定采用。

8.4.2 设计状况系数 ψ 应按水工结构国家现行有关标准的规定采用。

8.4.3 作用分项系数的确定应符合下列规定:

1 当作用服从正态分布时,分项系数 γ_i 应按下列式计算:

$$\gamma_i = \frac{1 + K_{f1} \delta_i}{1 + K_{f2} \delta_i} \quad (8.4.3-1)$$

$$K_{f1} = \Phi^{-1}(p_{f1}) \quad (8.4.3-2)$$

$$K_{f2} = \Phi^{-1}(p_{f2}) \quad (8.4.3-3)$$

式中: γ_i ——作用分项系数;

δ_i ——作用的变异系数;

p_{f1} 、 p_{f2} ——相应于作用的设计值、标准值在标准正态分布上的概率, p_{f1} 宜在其设计验算点附近选用;

K_{f1} 、 K_{f2} —— p_{f1} 、 p_{f2} 的反函数。

2 当作用服从对数正态分布时,分项系数 γ_i 应按下式计算:

$$\gamma_i = \exp[(K_{f1} - K_{f2}) \sqrt{\ln(1 + \delta_i^2)}] \quad (8.4.3-4)$$

3 当作用服从极值 I 型分布时,分项系数 γ_i 应按下式计算:

$$\gamma_i = \frac{1 - 0.45005\delta_i - 0.77970\delta_i \ln\{-\ln[\Phi(K_{f1})]\}}{1 - 0.45005\delta_i - 0.77970\delta_i \ln\{-\ln[\Phi(K_{f2})]\}} \quad (8.4.3-5)$$

8.4.4 材料(包括地基、围岩)性能分项系数的确定应符合下列规定:

1 当材料(包括地基、围岩)性能服从正态分布时,材料性能分项系数应按下式计算:

$$\gamma_m = \frac{1 - K_{m2} \delta_m}{1 - K_{m1} \delta_m} \quad (8.4.4-1)$$

$$K_{m1} = |\Phi^{-1}(p_{m1})| \quad (8.4.4-2)$$

$$K_{m2} = |\Phi^{-1}(p_{m2})| \quad (8.4.4-3)$$

式中: δ_m ——材料性能的变异系数;

p_{m1} 、 p_{m2} ——相应于材料性能的设计值、标准值在标准正态分布上的概率, p_{m1} 宜在其设计验算点附近选用;

K_{m1} 、 K_{m2} —— p_{m1} 、 p_{m2} 反函数的绝对值。

2 当材料(包括地基、围岩)性能服从对数正态分布时,材料性能分项系数应按下式计算:

$$\gamma_m = \frac{1}{\exp[(K_{m2} - K_{m1}) \sqrt{\ln(1 + \delta_m^2)}]} \quad (8.4.4-4)$$

8.4.5 结构系数应由具体水工结构设计规范根据目标可靠指标和上述已定的分项系数,按本标准附录 F 确定。

8.4.6 当永久作用效应对结构构件的承载能力有利时,作用分项系数应小于或等于 1.0。

9 可靠性管理

9.0.1 为保证结构具有规定的可靠性,除应进行必要的设计计算外,还应对结构的材料性能、施工质量、使用和维护等提出相应的技术要求。

9.0.2 水工结构的设计应由具有相应资格的单位和技术人员进行。

9.0.3 水工结构的设计应符合有关荷载、抗震、地基基础等国家现行标准的规定。

9.0.4 水工结构的设计应对结构可能受到的偶然作用、环境影响等采取必要的防护措施。

9.0.5 水工结构应按设计规定的用途使用,并应定期检查结构状况,进行必要的维护和维修;当需变更使用用途时,应进行设计复核和采取必要的安全措施。

9.0.6 水工结构在达到设计使用年限后,应按本标准附录 G 进行既有结构的可靠性评定。

附录 A 随机变量的统计参数和概率分布

A.1 随机变量的统计参数

A.1.1 已知随机变量 X 的 n 个试验值或观测值 $x_i (i=1, 2, 3, \dots, n)$, 其统计参数的确定应符合下列规定:

1 样本均值可按下式计算:

$$\mu_X = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (\text{A. 1. 1-1})$$

式中: μ_X ——样本均值;

n ——试验值或观测值的个数;

x_i ——随机变量 X 的第 i 个试验值或观测值。

2 标准差可按下式计算:

$$\sigma_X = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu_X)^2} \quad (\text{A. 1. 1-2})$$

式中: σ_X ——随机变量 X 的标准差。

3 变异系数可按下式计算:

$$\delta_X = \frac{\sigma_X}{\mu_X} \quad (\text{A. 1. 1-3})$$

式中: δ_X ——随机变量 X 的变异系数。

A.2 概率分布的显著性检验

A.2.1 卡平方 (χ^2) 检验宜按下列步骤进行:

1 将观测到的 n 个子样排序 ($x_1 < x_2 < x_3, \dots, < x_n$), 根据子样范围划分 m 个等距区间, 使子样全部落入区间范围内, 计算子样落入区间 (a_{i-1}, a_i) 内的频数 $k_i (i=1, \dots, m)$, 子样落入该区间内的频率可按下式计算:

$$L_i = k_i/n \quad (\text{A. 2. 1-1})$$

式中： L_i ——子样落入区间 (a_{i-1}, a_i) 内的频率；

k_i ——子样落入区间 (a_{i-1}, a_i) 内的频数；

n ——子样数量。

2 建立 H_0 ，假设分布函数 $F(x)$ 。

3 $F(x)$ 在区间 (a_{i-1}, a_i) 内的概率可按下式计算：

$$p_i = F(a_i) - F(a_{i-1}) \quad (\text{A. 2. 1-2})$$

式中： p_i ——按概率分布函数 $F(x)$ 子样在区间 (a_{i-1}, a_i) 内的概率；

$F(a_i)$ 、 $F(a_{i-1})$ ——概率分布函数 $F(x)$ 在 a_i 、 a_{i-1} 处的概率。

4 子样频率与假设分布 $F(x)$ 计算概率间的总偏差统计量可按下式计算：

$$D = \sum_{i=1}^m \frac{(k_i - np_i)^2}{np_i} \quad (\text{A. 2. 1-3})$$

式中： D ——子样频率与假设分布 $F(x)$ 计算概率间的总偏差；

m ——子样范围划分为等距区间的数量。

5 根据显著性水平(一般取 0.05)和自由度查 χ^2 分布表,得检验临界值 $\chi_{0.05}^2$,若 $D < \chi_{0.05}^2$,则原假设成立。自由度可按下式计算：

$$D_f = m - r - 1 \quad (\text{A. 2. 1-4})$$

式中： D_f ——自由度；

r —— $F(x)$ 分布中用子样估计的参数个数。

A. 2. 2 柯尔莫哥洛夫-斯米尔诺夫(K-S)检验宜按下列步骤进行：

1 将观测子样排序 $(x_1 < x_2 < \dots < x_n)$,经验分布可按下式计算：

$$F_n(x) = \left\{ \begin{array}{ll} 0 & x \leq x_1 \\ \frac{k}{n} & x_k < x \leq x_{k+1}, k=1, 2, \dots, n-1 \\ 1 & x > x_n \end{array} \right\} \quad (\text{A. 2. 2-1})$$

式中： $F_n(x)$ —— x 的经验分布函数。

2 统计量可按下式计算：

$$D_n = \max_{1 \leq k \leq n} \{ |F_n(x_k) - F(x_k)|, |F_n(x_{k-1}) - F(x_k)| \} \quad (\text{A. 2. 2-2})$$

式中： D_n ——用子样经验分布 $F_n(x)$ 和假设分布 $F(x)$ 建立的统计量。

3 根据显著性水平(一般取 0.05),查 K-S 检验临界值表得 $D_{n,0.05}$,若 D_n 小于 $D_{n,0.05}$,则假设被接受。

A. 3 概率分布函数、密度函数及其数字特征

A. 3. 1 常用的概率分布函数、密度函数、数学期望、方差宜按下列公式计算：

1 当正态分布时可按下列公式计算：

$$F(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right] dx \quad (\text{A. 3. 1-1})$$

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right] \quad (\text{A. 3. 1-2})$$

$$E(X) = \mu \quad (\text{A. 3. 1-3})$$

$$D(X) = \sigma^2 \quad (\text{A. 3. 1-4})$$

式中： $F(x)$ ——概率分布函数；

μ —— X 的平均值；

σ —— X 的标准差；

$f(x)$ ——概率密度函数；

$D(X)$ ——方差；

$E(X)$ ——数学期望。

2 当对数正态分布时可按下列公式计算：

$$F(x) = \frac{1}{\zeta \sqrt{2\pi}} \int_0^x \frac{1}{x} \exp\left[-\frac{(\ln x - \lambda)^2}{2\zeta^2}\right] dx \quad (\text{A. 3. 1-5})$$

$$f(x) = \frac{1}{x\zeta\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln x - \lambda)^2}{2\zeta^2}\right] \quad (\text{A. 3. 1-6})$$

$$E(X) = \exp\left(\lambda + \frac{\zeta^2}{2}\right) \quad (\text{A. 3. 1-7})$$

$$D(X) = \exp(2\lambda + \zeta^2) \cdot [\exp(\zeta^2) - 1] \quad (\text{A. 3. 1-8})$$

式中： λ —— $\ln X$ 的平均值；

ζ —— $\ln X$ 的标准差。

3 当极值 I 型分布时可按下列公式计算：

$$F(x) = \exp\{-\exp[-a(x-u)]\} \quad (\text{A. 3. 1-9})$$

$$a = \frac{\pi}{\sqrt{6}\sigma} \quad (\text{A. 3. 1-10})$$

$$u = \mu - \frac{0.5772\dots}{a} \quad (\text{A. 3. 1-11})$$

$$f(x) = a \cdot \exp[-a(x-u)] \exp[-e^{-a(x-u)}] \quad (\text{A. 3. 1-12})$$

$$E(X) = \mu \quad (\text{A. 3. 1-13})$$

$$D(X) = \sigma^2 \quad (\text{A. 3. 1-14})$$

式中： a —— X 的敏度系数；

u ——计算参数。

A. 3. 2 简化的概率密度函数、概率分布函数、数学期望、变异系数宜按下列公式确定：

1 当均匀分布时可按下列公式计算：

$$f(x) = \frac{1}{b-a} \quad (\text{A. 3. 2-1})$$

$$F(x) = \frac{x-a}{b-a} \quad (\text{A. 3. 2-2})$$

$$E(X) = \frac{1}{2}(b+a) \quad (\text{A. 3. 2-3})$$

$$\delta_x = \frac{b-a}{\sqrt{3}(b+a)} \quad (\text{A. 3. 2-4})$$

式中： a —— X 的下限；

b —— X 的上限；

δ_x —— X 的变异系数。

2 当等腰三角形分布时可按下列公式计算：

$$f(x) = \begin{cases} \frac{4(x-a)}{(b-a)^2} & a \leq x \leq c \\ \frac{-4(x-b)}{(b-a)^2} & c \leq x \leq b \end{cases} \quad (\text{A. 3.2-5})$$

$$F(x) = \begin{cases} \frac{2(x-a)^2}{(b-a)^2} & a \leq x \leq c \\ 1 - \frac{2(x-b)^2}{(b-a)^2} & c \leq x \leq b \end{cases} \quad (\text{A. 3.2-6})$$

$$E(X) = \frac{1}{2}(a+b) \quad (\text{A. 3.2-7})$$

$$\delta_x = \frac{1}{\sqrt{6}} \left(\frac{b-a}{b+a} \right) \quad (\text{A. 3.2-8})$$

式中： a —— X 的下限；
 b —— X 的上限；
 c —— X 的中点。

3 当递减直角三角形分布时可按下列公式计算：

$$f(x) = -\frac{2(x-b)}{(b-a)^2} \quad (\text{A. 3.2-9})$$

$$F(x) = 1 - \frac{(x-b)^2}{(b-a)^2} \quad (\text{A. 3.2-10})$$

$$E(X) = \frac{1}{3}(b+2a) \quad (\text{A. 3.2-11})$$

$$\delta_x = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{b-a}{b+2a} \right) \quad (\text{A. 3.2-12})$$

式中： a —— X 的下限；
 b —— X 的上限。

4 当递增直角三角形分布时可按下列公式计算：

$$f(x) = \frac{2(x-a)}{(b-a)^2} \quad (\text{A. 3.2-13})$$

$$F(x) = \frac{(x-a)^2}{(b-a)^2} \quad (\text{A. 3.2-14})$$

$$E(X) = \frac{1}{3}(a + 2b) \quad (\text{A. 3. 2-15})$$

$$\delta_x = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{b-a}{a+2b} \right) \quad (\text{A. 3. 2-16})$$

式中： a —— X 的下限；
 b —— X 的上限。

A. 4 综合变量的分布参数

A. 4. 1 当综合变量 X 是独立随机变量 $Y_i (i=1, 2, \dots, n)$ 的线性函数时, 宜符合下列规定:

1 综合变量 X 可按下式计算:

$$X = a_0 + \sum_{i=1}^n (a_i \cdot Y_i) \quad (\text{A. 4. 1-1})$$

式中: X ——综合变量;

$Y_i (i=1, 2, \dots, n)$ ——独立随机变量;

$a_0, a_i (i=1, 2, \dots, n)$ ——常量。

2 综合变量 X 的均值和标准差可按下列公式计算:

$$\mu_X = a_0 + \sum_{i=1}^n (a_i \cdot \mu_{Y_i}) \quad (\text{A. 4. 1-2})$$

$$\sigma_X = \sqrt{\sum_{i=1}^n (a_i \cdot \sigma_{Y_i})^2} \quad (\text{A. 4. 1-3})$$

式中: μ_X —— X 的均值;

μ_{Y_i} —— Y_i 的均值;

σ_X —— X 的标准差;

σ_{Y_i} —— Y_i 的标准差。

A. 4. 2 当综合变量 X 是独立随机变量 $Y_i (i=1, 2, \dots, n)$ 的幂函数时, 宜符合下列规定:

1 综合变量 X 可按下式计算:

$$X = a \prod_{i=1}^n Y_i^{b_i} \quad (\text{A. 4. 2-1})$$

式中： $a, b_i (i=1, 2, \dots, n)$ ——常量。

2 若随机变量 $Y_i (i=1, 2, \dots, n)$ 均符合对数正态分布，则综合变量 X 的均值和变异系数可按下列公式计算：

$$\mu_X = a \prod_{i=1}^n (\mu_{Y_i})^{b_i} \quad (\text{A. 4. 2-2})$$

$$\delta_X = \sqrt{\sum_{i=1}^n (b_i \cdot \delta_{Y_i})^2} \quad (\text{A. 4. 2-3})$$

A. 4. 3 当综合变量 X 是独立随机变量 $Y_i (i=1, 2, \dots, n)$ 的任意函数时，宜符合下列规定：

1 综合变量 X 可按下式计算：

$$X = U(Y_1, Y_2, \dots, Y_n) \quad (\text{A. 4. 3-1})$$

式中： $U(Y_1, Y_2, \dots, Y_n)$ ——独立随机变量 $Y_i (i=1, 2, \dots, n)$ 的函数。

2 综合变量 X 的平均值和标准差的近似式为：

$$\mu_X \approx U(\mu_{Y_1}, \mu_{Y_2}, \dots, \mu_{Y_n}) \quad (\text{A. 4. 3-2})$$

$$\sigma_X \approx \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\left. \frac{\partial U}{\partial Y_i} \right|_{Y_i = \mu_{Y_i}} \cdot \sigma_{Y_i} \right)^2} \quad (\text{A. 4. 3-3})$$

附录 B 结构可靠指标的计算方法和 目标可靠指标的确定

B.1 结构可靠指标的计算方法——一次可靠度法

B.1.1 当结构极限状态方程只有作用效应 S 和结构抗力 R 两个相互独立的综合变量,且均为正态分布时,结构可靠指标的计算应符合下列规定:

1 结构的极限状态方程为:

$$R - S = 0 \quad (\text{B.1.1-1})$$

式中: R ——结构抗力;

S ——结构的作用效应。

2 结构的可靠指标可按下式计算:

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (\text{B.1.1-2})$$

式中: β ——结构的可靠指标;

μ_R ——抗力的平均值;

σ_R ——抗力的标准差;

μ_S ——作用效应的平均值;

σ_S ——作用效应的标准差。

B.1.2 结构的基本变量 $X_i (i=1, 2, \dots, n)$ 服从正态分布且相互独立,当结构的极限状态方程为式(B.1.2-1)表示的线性方程时,结构的可靠指标 β 可按式(B.1.2-2)计算:结构的极限状态方程和结构的可靠指标 β 可按下列公式计算:

$$a_0 + \sum_{i=1}^n (a_i \cdot X_i) = 0 \quad (\text{B.1.2-1})$$

$$\beta = \frac{a_0 + \sum_{i=1}^n (a_i \cdot \mu_{X_i})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (a_i \cdot \sigma_{X_i})^2}} \quad (\text{B. 1.2-2})$$

式中： a_0, a_i ——常量；

X_i ——基本变量；

n ——基本变量 X_i 的数量；

μ_{X_i} ——基本变量 X_i 的平均值；

σ_{X_i} ——基本变量 X_i 的标准差。

B. 1.3 结构的基本变量 $X_i (i=1, 2, \dots, n)$ 服从正态分布且相互独立，当极限状态方程符合式(B. 1.3-1)，且设计验算点就在失效边界上时，结构的可靠指标 β 可由式(B. 1.3-2)计算，结构的极限状态方程和结构的可靠指标 β 可按下列公式计算：

$$g(X_1, X_2, \dots, X_n) = 0 \quad (\text{B. 1.3-1})$$

$$\beta = \frac{\mu_{X_i} - x_i^*}{\alpha_i \sigma_{X_i}} \quad (\text{B. 1.3-2})$$

$$\alpha_i = \frac{\sigma_{X_i} \left. \frac{\partial g}{\partial x_i} \right|_{x^*}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\sigma_{X_i} \left. \frac{\partial g}{\partial x_i} \right|_{x^*} \right)^2}} \quad (\text{B. 1.3-3})$$

$$g(X_1^*, X_2^*, \dots, X_n^*) = 0 \quad (\text{B. 1.3-4})$$

式中： x_i^* —— X_i 的设计验算点；

α_i —— X_i 的敏度系数。

B. 1.4 结构的基本变量 $X_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为任意分布且相互独立时，可将任意分布的基本变量在验算点处进行当量正态化，结构可靠指标 β 按下列公式计算：

$$\beta = \frac{\mu'_{X_i} - x_i^*}{\alpha_i \cdot \sigma'_{X_i}} \quad (\text{B. 1.4-1})$$

$$\mu'_{X_i} = x_i^* - \phi^{-1}[F_{X_i}(x_i^*)] \sigma'_{X_i} \quad (\text{B. 1.4-2})$$

$$\sigma'_{X_i} = \frac{\varphi\{\phi^{-1}[F_{X_i}(x_i^*)]\}}{f_{X_i}(x_i^*)} \quad (\text{B. 1. 4-3})$$

$$g(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) = 0 \quad (\text{B. 1. 4-4})$$

$$\alpha_i = \frac{\sigma_{X_i} \left. \frac{\partial g}{\partial x_i} \right|_{x_i^*}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\sigma'_{X_i} \left. \frac{\partial g}{\partial x_i} \right|_{x_i^*} \right)^2}} \quad (\text{B. 1. 4-5})$$

式中： μ'_{X_i} ——随机变量 X_i 的当量正态分布平均值；

σ'_{X_i} ——随机变量 X_i 的当量正态分布标准差；

$F_{X_i}(x_i^*)$ ——随机变量 X_i 在设计验算点 x_i^* 处的概率分布函数值；

$f_{X_i}(x_i^*)$ ——随机变量 X_i 在设计验算点处 x_i^* 的概率密度函数值。

B. 1. 5 结构可靠指标 β 可按迭代计算框图(图 B. 1. 5)进行计算。

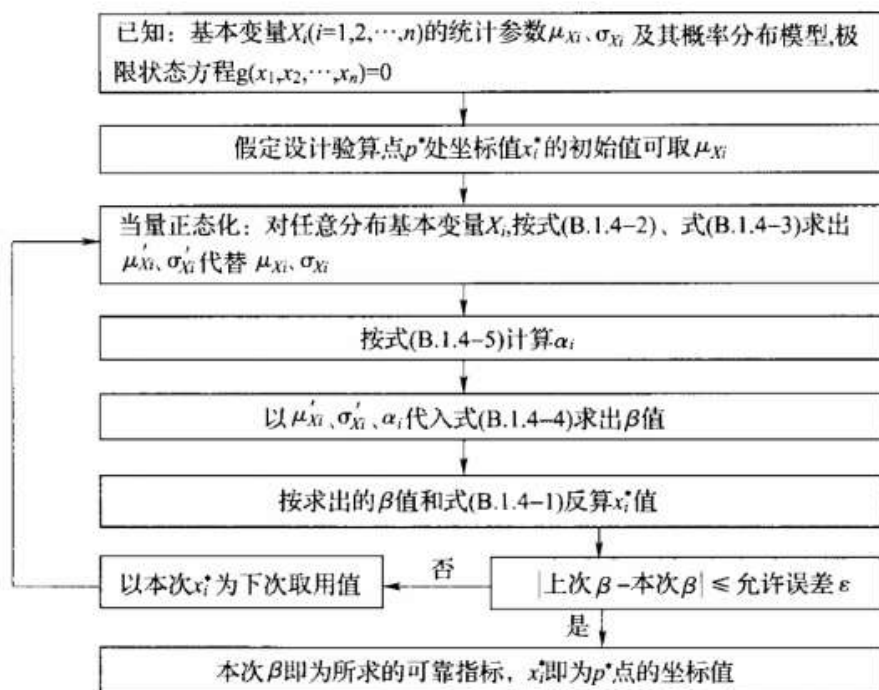


图 B. 1. 5 可靠指标计算框图

B.2 结构可靠度校准与目标可靠指标的确定

B.2.1 用校准法确定目标可靠指标的步骤应符合下列要求：

1 根据目标可靠指标的适用范围，应按现行行业标准《水工混凝土结构设计规范》DL/T 5057 的有关规定，选出各种典型结构或结构构件作为校准法的计算对象，应按结构安全级别分为三组。

2 在每一组结构或结构构件中，应按它们在工程中用量多少、造价大小，并结合工程经验，判断确定其加权系数 ω_i ，同一组内的加权系数总和应为 1。

3 应以现行设计规范的安全系数或容许应力为约束条件，材料用量最少为目标，对典型结构或结构构件进行优化设计。

4 应确定优化后的结构或结构构件的作用效应和抗力的统计参数和概率模型。

5 应分别计算出各种典型结构或结构构件的可靠指标 β_{1i} 。

6 求出的结构安全级别相同的同一组结构或结构构件的加权平均可靠指标，应为该结构安全级别按规范校准的可靠指标，加权平均可靠指标可按下列式计算：

$$\beta_1 = \sum_{i=1}^n (\omega_i \cdot \beta_{1i}) \quad (\text{B. 2. 1})$$

式中： β_1 ——同一组结构或结构构件的加权平均可靠指标；

ω_i ——同一组结构或结构构件的加权系数；

β_{1i} ——同一组的各结构或结构构件的可靠指标。

7 对已建成的若干水工结构或结构构件，应按结构安全级别分组。每组内的加权系数应与公式(B.2.1)中的加权系数一致。应重复上述第 4~第 6 步骤，计算出每一组实际水工结构或结构构件的加权可靠指标 β_2 。

8 根据加权可靠指标 β_1 、 β_2 ，在综合考虑安全与经济的最佳平衡后，应确定不同结构安全级别的目标可靠指标 β_t 。

B.3 基于可靠指标的设计

B.3.1 当根据目标可靠指标进行结构或结构构件设计时,可靠指标应满足下式规定:

$$\beta \geq \beta_t \quad (\text{B.3.1})$$

式中: β ——所设计结构或结构构件的可靠指标;

β_t ——所设计结构或结构构件的目标可靠指标。

当不满足式(B.3.1)的要求时,应重新进行设计,直至满足要求为止。

B.3.2 当按可靠指标方法设计的结果与传统方法设计的结果有明显差异时,应分析产生差异的原因。只有当可靠指标方法设计的结果合理后方可采用。

附录 C 作用的统计参数和概率分布

C. 0. 1 水工结构上若干作用随时间的变化可按表 C. 0. 1 进行分类。

C. 0. 2 作用的标准值可按下列公式计算：

1 当作用为正态分布时，作用的标准值可按下列公式计算：

$$F_k = \mu_i(1 + K_{12}\delta_i) \quad (\text{C. 0. 2-1})$$

$$K_{12} = \phi^{-1}(p_{12}) \quad (\text{C. 0. 2-2})$$

式中： F_k ——作用的标准值；

μ_i ——作用的平均值；

δ_i ——作用的变异系数；

K_{12} ——作用标准值在标准正态分布概率 p_{12} 的反函数。

2 当作用为极值 I 型分布时，作用的标准值可按下列公式计算：

$$F_k = \mu_i(1 - 0.45005\delta_i - 0.77970\delta_i \ln\{-\ln[\phi(K_{12})]\}) \quad (\text{C. 0. 2-3})$$

C. 0. 3 在设计基准期内最大值的概率分布，对于风、雪压力以及天然河道、湖泊的静水压力等无人控制的可变作用，当用极值统计法确定时，可变作用可按下列步骤进行计算：

1 应将设计基准期分为 n 个时段，时段 τ 的选择宜使每时段的作用最大值相互独立。每个时段长度可用下列公式计算：

$$\tau = \frac{T}{n} \quad (\text{C. 0. 3-1})$$

式中： τ ——每个时段的长度；

T ——设计基准期；

n ——时段数。

2 对时段 τ 内的作用最大值进行调查统计，每个时段选一个作用最大值 Q_i ，可取得 Q_i 的数据样本。

表 C.0.1 水工结构作用随时间变化的分类

作用类型 / 结构类型	建筑物设备自重	土压力	围岩压力、地应力	预应力	静水压力	浪压力	渗透压力	浮托力	水流冲击力、脉动压力	温度作用、湿度作用	泥沙压力	孔隙水压力	风荷载	雪荷载	冰压力	冻胀作用	灌浆压力	水击压力	冲击、碰撞、制动力	人群、堆放物品荷载	外水压力	地震作用
混凝土坝、水闸	G	G	—	G	Q A	Q	Q	Q	Q	Q	G Q	—	—	—	Q	Q	Q	—	—	Q	—	A
土石坝、堤	G	G	—	—	Q A	Q	Q	Q	Q	Q	G	Q	—	—	Q	Q	—	—	—	Q	—	A
溢洪道闸墩	G	G	—	G	Q A	Q	Q	Q	Q	Q	—	—	—	—	Q	—	—	—	—	—	—	A
水电站厂房、泵站	G	G	—	G	Q A	Q	Q	Q	Q	Q	G Q	—	Q	Q	Q	—	Q	—	Q	Q	—	A
隧洞、调压井 地下结构	G	—	G	G	Q A	—	Q	Q	—	Q	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Q	A

3 可对 Q_i 的样本进行统计分析,计算统计参数估计值,作出样本的频数直方图,估计概率分布,并经概率分布拟合优度检验,选定时段 τ 内的作用最大值概率分布函数 $F_\tau(Q_i)$ 。

4 根据时段内的作用最大值概率分布函数 $F_\tau(Q_i)$,可按下列式计算设计基准期内作用最大值 Q_T 的概率分布函数:

$$F_T(Q_T) = [F_\tau(Q_i)]^n \quad (\text{C. 0. 3-2})$$

式中: $F_T(Q_T)$ ——设计基准期内作用最大值 Q_T 的概率分布函数;

$F_\tau(Q_i)$ ——时段 τ 内的作用最大值概率分布函数。

5 由时段概率分布函数 $F_\tau(Q_i)$ 的统计参数 μ_{Q_i} 、 σ_{Q_i} 推求设计基准期内作用最大值 Q_T 的统计参数 μ_{Q_T} 、 σ_{Q_T} 。

当 $F_\tau(Q_i)$ 符合极值 I 型分布时, $F_T(Q_T)$ 也符合极值 I 型分布,其统计参数应按下列公式计算:

$$\mu_{Q_T} = \mu_{Q_i} + \frac{\ln(n)}{\alpha} \quad (\text{C. 0. 3-3})$$

$$\alpha = \frac{\pi}{\sqrt{6}\sigma_{Q_i}} = \frac{1.2826}{\sigma_{Q_i}} \quad (\text{C. 0. 3-4})$$

$$\sigma_{Q_T} = \sigma_{Q_i} \quad (\text{C. 0. 3-5})$$

式中: μ_{Q_T} ——设计基准期内作用最大值 Q_T 的均值;

μ_{Q_i} ——时段 τ 内的作用最大值 Q_i 的均值;

σ_{Q_i} ——时段 τ 内的作用最大值 Q_i 的标准差;

σ_{Q_T} ——设计基准期内作用最大值 Q_T 的标准差。

C. 0. 4 可变作用的标准值也可由可变作用在设计基准期 T 内最大值概率分布中指定概率 p 的分位值。此时,对标准值 Q_k 在设计基准期内最大值分布上的超越概率应为 $1-p$ 。

C. 0. 5 一般情况下,可采用重现期 T_R 来表达可变作用的标准值 Q_k 。重现期是指连续两次超过作用值 Q_k 的平均间隔时间, Q_k 的概率分布函数可按下列式计算:

$$F(Q_k) = 1 - 1/T_R \quad (\text{C. 0. 5-1})$$

式中： $F(Q_k)$ ——可变作用标准值 Q_k 的概率分布函数；

T_R ——重现期。

重现期 T_R 、概率 p 和确定标准值的设计基准期 T 可按下式计算：

$$p = (1 - 1/T_R)^T \quad (\text{C. 0. 5-2})$$

在重现期较长的情况下,还可用下式进行近似计算：

$$T_R \approx \frac{1}{\ln(1/p)} T \quad (\text{C. 0. 5-3})$$

附录 D 结构抗力的统计参数和概率分布

D. 0. 1 影响结构抗力不定性的因素应包括结构材料、岩、土、地基等的性能以及几何参数和计算模式的不定性等。

D. 0. 2 结构材料、岩、土和地基的性能应符合下列规定：

1 结构材料、岩、土和地基性能的不定性应符合下列规定：

1) 结构材料、岩、土和地基性能的不定性 K_M 应按下列公式计算：

$$K_M = \frac{1}{\omega_0} K_0 K_f \quad (\text{D. 0. 2-1})$$

$$K_0 = \frac{f_c}{f_s} \quad (\text{D. 0. 2-2})$$

$$K_f = \frac{f_s}{f_k} \quad (\text{D. 0. 2-3})$$

式中： K_M ——反映结构材料、岩、土和地基性能不定性的参数；

K_0 ——反映结构中材料、岩、土和地基试件性能与材料、岩、土和地基试件性能差异的系数；

K_f ——反映材料、岩、土地和地基试件的性能值与性能标准值差异的系数；

f_c ——结构中材料、岩、土和地基试件的性能值；

f_s ——材料、岩、土和地基试件的性能值；

f_k ——材料性能的标准值；

ω_0 ——考虑材料缺陷、施工质量、尺寸效应、加荷速度、试验方法、时间效应等因素影响的系数。

2) 结构材料、岩、土和地基性能不定性 K_M 的平均值 μ_{K_M} 和变异系数 δ_{K_M} 可按下列公式计算：

$$\mu_{K_M} = \frac{\mu_{K_0} \mu_m}{\omega_n f_K} \quad (\text{D. 0. 2-4})$$

$$\delta_{K_M} = \sqrt{\delta_{K_0}^2 + \delta_m^2} \quad (\text{D. 0. 2-5})$$

式中： μ_{K_M} ——结构材料、岩、土和地基性能不定性 K_M 的平均值；
 δ_{K_M} ——结构材料、岩、土和地基性能不定性 K_M 的变异系数；

μ_{K_0} —— K_0 的平均值；

μ_m ——材料性能的平均值；

δ_{K_0} —— K_0 的变异系数；

δ_m ——材料性能的变异系数。

2 试件材料、岩、土和地基强度性能标准值宜符合下列规定：

1) 当概率分布为正态分布时，可按下式计算：

$$f_k = \mu_m (1 - K_{m2} \delta_m) \quad (\text{D. 0. 2-6})$$

式中： K_{m2} ——见式(8. 4. 4-3)。

2) 当概率分布为对数正态分布时，可按下式计算：

$$f_k = \frac{\mu_m}{\sqrt{1 + \delta_m^2}} \exp\left[-K_{m2} \sqrt{\ln(1 + \delta_m^2)}\right] \quad (\text{D. 0. 2-7})$$

D. 0. 3 结构几何参数应符合下列规定：

1 结构几何参数的不定性反映结构实际尺寸与其标准值的差异。几何参数的不定性用 K_a 表示，应按下式计算：

$$K_a = \frac{a}{a_k} \quad (\text{D. 0. 3-1})$$

式中： K_a ——反映结构几何参数不定性的参数；

a 、 a_k ——结构的几何参数实际值和标准值。

2 几何参数不定性 K_a 的平均值和变异系数可按下列公式计算：

$$\mu_{K_a} = \frac{\mu_a}{a_k} \quad (\text{D. 0. 3-2})$$

$$\delta_{K_a} = \delta_a \quad (\text{D. 0. 3-3})$$

式中： μ_{K_a} ——几何参数不定性 K_a 的平均值；

μ_a ——结构几何参数实际值的平均值；

δ_{K_a} ——结构几何参数不定性的变异系数；

δ_a ——结构几何参数实际值的变异系数。

3 当结构截面最小尺寸大于 3m 时，其制作尺寸偏差与截面尺寸相比可忽略不计，几何参数可视为常量。

D.0.4 结构抗力的统计参数和概率分布应符合下列规定：

1 综合抗力不定性附加变量可按下式计算：

$$K_R = \frac{R}{R_k} \quad (\text{D.0.4-1})$$

或

$$K_R = K_M K_a K_P \quad (\text{D.0.4-2})$$

式中： K_R ——结构抗力不定性附加变量；

R ——结构或结构构件中的真实抗力；

R_k ——以规范规定的材料性能和几何参数标准值及抗力计算公式求得的综合抗力值；

K_P ——结构抗力计算不定性附加变量，可按工程经验判断确定。

2 单一材料的结构或结构构件综合抗力不定性附加变量 K_R 的平均值及其变异系数可按下列公式计算：

$$\mu_{K_R} = \mu_{K_M} \mu_{K_a} \mu_{K_P} \quad (\text{D.0.4-3})$$

$$\delta_{K_R} = \sqrt{\delta_{K_M}^2 + \delta_{K_a}^2 + \delta_{K_P}^2} \quad (\text{D.0.4-4})$$

式中： μ_{K_R} —— K_R 的平均值。

δ_{K_R} —— K_R 的变异系数。

3 复合材料的结构或结构构件及非线性函数表示的综合抗力可用误差传递方法计算。

4 结构综合抗力 R 的概率分布可假定为对数正态。

附录 E 试验辅助设计

E.1 一般规定

E.1.1 试验辅助设计应符合下列要求：

1 在试验进行之前，应制定试验方案，试验方案应包括试验目的、试件的选取和制作，以及试验的实施和评估等所有必要的说明。

2 为制定试验方案，应预先进行定性分析，确定结构或结构构件的可能临界区域和相应极限状态标志。

3 试件应采用与构件实际加工相同的工艺制作。

4 按试件结果确定设计值时，应分析试验数量的影响。

E.1.2 试验辅助设计应通过适当的换算系数或修正系数考虑试验条件与结构实际条件的不同。换算系数 η 应通过试验或理论分析来确定。影响换算系数 η 的主要因素包括尺寸效应、时间效应、试验的边界条件、环境条件、工艺条件等。

E.2 试验结果的统计评估原则

E.2.1 统计评估应符合下列基本原则：

1 在评估试验结果时，应将试件的性能和失效模式与理论预测值进行对比，当偏离预测值过大时，应分析原因，并做补充试验。

2 应根据已有的分布类型与参数信息，以统计方法为基础对试验结果进行评估；本附录给出的方法仅适用于统计数据（或先验信息）取自同一母体的情况。

3 试验的评估结果仅对所考虑的试验条件有效，不宜将其外推应用。

E.2.2 材料性能、模型参数或抗力设计值的确定应符合下列基

本原则：

1 可采用经典统计方法或贝叶斯法推断材料性能、模型参数或抗力设计值；先确定标准值，然后除以一个分项系数，必要时要考虑换算系数的影响。

2 在进行材料性能、模型参数或抗力设计值评估时，应结合试验数据的离散性、与试验数量相关的统计不定性和先验的统计知识进行评估。

E. 3 单项性能指标设计值的统计评估

E. 3. 1 单项性能指标设计值统计评估应符合下列规定：

1 单项性能 X 可代表构件的抗力或提供构件抗力的性能。

2 当没有关于平均值的先验知识时，可基于经典方法按本标准第 E. 3. 2 条进行估算。其中 X 的变异系数“ δ_X 未知”对应于没有变异系数先验知识的情况，“ δ_X 已知”对应于已知变异系数全部知识的情况。

3 当已有关于平均值的先验知识时，可基于贝叶斯法按本标准第 E. 3. 3 条进行设计值的估算。

E. 3. 2 采用经典统计方法计算应符合下列规定：

1 当性能 X 服从正态分布时，其设计值可按下式计算：

$$X_d = \eta_d \frac{X_{K(n)}}{\gamma_m} = \frac{\eta_d}{\gamma_m} \mu_X (1 - k_{nk} \delta_X) \quad (\text{E. 3. 2-1})$$

式中： X_d ——性能 X 的设计值；

η_d ——换算系数的设计值，换算系数的评估主要取决于试验类型和材料；

γ_m ——分项系数，具体数值应根据试验结果的应用领域来选定；

k_{nk} ——标准值单侧容限系数；

μ_X ——性能 X 的平均值；

δ_X ——性能 X 的变异系数。

2 当性能 X 服从对数正态分布时, X 设计值可按下列公式计算:

$$X_d = \frac{\eta_d}{\gamma_m} \exp(\mu_y - k_{nk} \sigma_y) \quad (\text{E. 3. 2-2})$$

$$y = \ln X \quad (\text{E. 3. 2-3})$$

$$\mu_y = m_y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln x_i \quad (\text{E. 3. 2-4})$$

$$\text{当 } \delta_X \text{ 已知时, } \sigma_y = \sqrt{\ln(\delta_X^2 + 1)} \quad (\text{E. 3. 2-5})$$

$$\text{当 } \delta_X \text{ 未知时, } \sigma_y = S_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\ln x_i - m_y)^2} \quad (\text{E. 3. 2-6})$$

式中: μ_y —— 变量 y 的平均值;

σ_y —— 变量 y 的均方差;

x_i —— 性能 X 的第 i 个试验观测值。

E. 3. 3 采用贝叶斯法计算宜符合下列规定:

1 当性能 X 服从正态分布时, X 设计值可按下列公式计算:

$$X_d = \eta_d \frac{X_{K(n)}}{\gamma_m} = \frac{\eta_d}{\gamma_m} (m'' - k_m \sigma'') \quad (\text{E. 3. 3-1})$$

$$k_m = t_{p, v} \sqrt{1 + \frac{1}{n''}} \quad (\text{E. 3. 3-2})$$

$$n'' = n' + n \quad (\text{E. 3. 3-3})$$

$$v'' = v' + v + \delta(n') \quad (\text{E. 3. 3-4})$$

$$m'' n'' = m' n' + m_x n \quad (\text{E. 3. 3-5})$$

$$[(\sigma'')^2 v'' + (m'')^2 n''] = [(\sigma')^2 v' + (m')^2 n'] + [(\sigma_X)^2 v + (m_X)^2 n] \quad (\text{E. 3. 3-6})$$

式中: $t_{p, v}$ —— 自由度为 v'' 的 t 分布函数对应分位值 p 的自变量值;

m', σ', n', v' —— 先验分布参数;

m_X —— 性能 X 的平均值, $m_X = \mu_X$;

σ_x ——性能 X 的均方差。

2 先验分布参数 n' 和 v' 的确定,应符合下列原则:

- 1) 当有效数据很少时,应取 n' 和 v' 等于零,此时贝叶斯法评估结果与经典统计方法的“ δ_x 未知”相同;
- 2) 当根据经验可以取平均值和标准差为定值时, n' 和 v' 可取相对较大值,如取 50 或更大;
- 3) 在一般情况下,可假定只有很少数据或无先验数据,此时 $n'=0$,可获得较佳的估算值。

附录 F 结构系数的计算方法

F.0.1 结构系数计算应具备下列条件：

1 应已知结构的分项系数极限状态设计表达式、结构重要性系数 γ_0 和设计状况系数 ψ 。

2 应已知作用的概率分布模型、平均值、变异系数以及作用效应计算模式不定性的统计参数和作用的标准值及分项系数。

3 应已知结构材料性能的概率分布模型、平均值、变异系数以及抗力的计算模式不定性的统计参数和材料性能的标准值及分项系数。

4 应已确定结构目标可靠指标 β_1 。

F.0.2 结构系数的计算可按下列步骤进行：

1 可假设结构系数 γ_d 的初始值 γ_{d0} ，利用已知的作用和材料性能的标准值、分项系数，根据分项系数极限状态设计式计算出结构的几何尺寸。

2 利用求得的结构几何尺寸、作用和结构材料性能的统计参数和作用效应与抗力的计算模式不定性统计参数，可计算出抗力和作用效应的相应参数，并可依据概率极限状态方程按本标准附录 B 的方法计算 β_i 。

3 算得的可靠指标与目标可靠指标可按式(F.0.2-1) 进行比较：

$$|\beta_i - \beta_1| \leq \epsilon \quad (\text{F.0.2-1})$$

式中： β_i ——第 i 步计算得到的可靠指标；

β_1 ——目标可靠指标；

ϵ ——允许误差。

4 当本条第 3 款不能满足时，重复上述 1~3 各步骤。 γ_d 可按式(F.0.2-1) 计算：

$$\gamma_d = \begin{cases} \gamma_d - \Delta\gamma_d & \beta_i - \beta_r > 0 \\ \gamma_d + \Delta\gamma_d & \beta_i - \beta_r < 0 \end{cases} \quad (\text{F. 0. 2-2})$$

式中： $\Delta\gamma_d$ ——计算 γ_d 时采用的步长。

5 当本条第 3 款能满足时，则假定的 γ_d 即为所求。

F. 0. 3 选定规范采用的结构系数的方法和步骤：

1 对于同类结构，应根据影响结构系数计算的各种因素对工程造价大小的影响程度，确定各种因素的加权系数。

2 已知目标可靠指标 β_i 、相应的结构重要性系数 γ_0 、材料性能分项系数 γ_m 、作用分项系数 γ_r 、设计状况系数 ψ ，可按分项系数设计式计算各种设计状况下的结构系数 γ_{di} 。

3 可根据各种因素的加权系数对结构系数 γ_{di} 加权平均，求得 γ_d 。也可从各种设计状况下算得的一系列 γ_{di} 中，综合分析选出一个 γ_d 。

4 利用上述得出的结构系数 γ_d 和相应的各种其他分项系数，可进行试设计，并可根据试设计成果和工程设计经验分析判断，最终确定规范选用的 γ_d 值。

附录 G 既有结构的可靠性评定

G.1 一般规定

G.1.1 本附录适用于按国家现行有关标准设计和施工的既有水工结构的可靠性评定。

G.1.2 在下列情况下,宜对既有结构的可靠性进行评定:

- 1 结构的使用时间超过设计使用年限。
- 2 结构的用途或使用要求发生改变。
- 3 结构的使用环境出现恶化。
- 4 结构存在较严重的质量缺陷。
- 5 出现影响结构安全性、适用性或耐久性的材料性能劣化、构件损伤或其他不利状态。
- 6 对既有结构的可靠性有怀疑或有异议。

G.1.3 既有结构的可靠性评定应在保证结构性能的前提下,尽量减少工程处置工作量。

G.1.4 既有结构的可靠性评定可分为安全性评定、适用性评定和耐久性评定,必要时尚应进行抗灾害能力评定。

G.1.5 既有结构的可靠性评定应根据国家现行有关标准的要求进行。

G.1.6 既有结构的可靠性评定应按下列步骤进行:

- 1 应明确评定的对象、内容和目的。
- 2 应通过调查或检测获得与结构上的作用和结构实际的性能和状况相关的数据和信息。
- 3 应对实际结构的可靠性进行分析。
- 4 应提出评定报告。

G.2 安全性评定

G.2.1 既有结构的安全性评定应包括结构体系和构件布置、连接和构造、承载力等三个评定项目。

G.2.2 既有结构的结构体系和构件布置应以现行结构设计标准的要求为依据进行评定。

G.2.3 既有结构的连接和与安全性相关的构造应以现行结构设计标准的要求为依据进行评定。

G.2.4 结构体系和构件布置、连接和构造的评定结果满足本标准第 G.2.2 条和第 G.2.3 条要求的结构,其承载力可根据结构的不同情况采取下列方法进行评定:

- 1 基于结构良好状态的评定方法。
- 2 基于分项系数或安全系数的评定方法。
- 3 基于可靠指标调整抗力分项系数的评定方法。
- 4 基于荷载检验的评定方法。
- 5 其他选用的评定方法。

G.2.5 当结构处于良好使用状态时,宜采用基于结构良好状态的评定方法,对同时满足下列要求的结构可评定其符合承载力要求:

- 1 结构未出现明显的影响结构正常使用的变形、裂缝、位移、振动等适用性问题。
- 2 在评估使用年限内,结构上的作用和环境不会发生显著的变化。

G.2.6 当采取基于分项系数或安全系数的方法评定时,对同时满足下列要求的结构可评定其承载力符合要求:

1 构件的承载力按现行结构设计标准提供的结构计算模型确定,且应对模型中的指标或参数进行符合下列实际情况的调整:

- 1) 构件材料强度的取值是以实测数据为依据,按现行结构

检测标准规定的方法确定；

- 2) 计算模型的几何参数是按构件的实际尺寸确定；
- 3) 在计算分析构件承载力时,考虑了不可恢复性损伤的不利影响；
- 4) 经过验证后,在计算模型中增补对构件承载力有利因素的实际作用。

2 作用和作用效应按现行标准的规定确定,并进行了下列参数或分析方法的调整：

- 1) 永久作用以现场实测数据为依据,按现行工程结构荷载标准规定的方法确定；
- 2) 部分可变作用根据评估使用年限情况采用考虑结构设计使用年限的荷载调整系数；
- 3) 在计算作用效应时,考虑轴线偏差、尺寸偏差和安装偏差等的不利影响；
- 4) 按可能出现的最不利作用组合确定作用效应。

3 按上述方法计算得到的构件承载力不小于作用效应或安全系数不小于有关结构设计标准的要求。

G. 2.7 当可确定构件的实际承载力及其变异系数时,可采用基于可靠指标调整抗力分项系数的评定方法,对同时满足下列要求的构件可评定其承载力符合要求：

- 1 作用效应的计算应符合本标准第 G. 2. 6 条的规定。
- 2 应根据结构构件承载力的实际变异情况调整抗力分项系数。

3 按上述原则计算得到的承载力不小于作用效应。

G. 2.8 对具备相应条件的结构或结构构件,可采用基于荷载检验的评定方法,对同时满足下列要求的结构或结构构件可评定其承载力符合要求：

- 1 检验荷载的形式与结构承受的主要作用的情况基本一致,检验荷载不使结构或结构构件出现不可逆的变形或损伤。

2 荷载检验及相应的计算分析结果符合有关标准的要求。

G.2.9 对承载力评定不符合要求的结构或结构构件,应提出采取加固措施的建议,必要时,也可提出限制使用的要求。

G.3 适用性评定

G.3.1 在结构安全性得到保证的情况下,对影响结构正常使用的变形、裂缝、位移、振动等适用性问题,应以现行结构设计标准的要求为依据进行评定,但在下列情况下可根据实际情况调整或确定正常使用极限状态的限值:

1 已出现明显的适用性问题,但结构或构件尚未达到正常使用极限状态的限值。

2 相关标准提出的质量控制指标不能准确反映结构适用性状况。

G.3.2 对已经存在超过正常使用极限状态限值的结构或构件,应提出进行处理的意见。

G.3.3 对未达到正常使用极限状态限值的结构或构件,宜进行评估使用年限内结构适用性的评定,此时宜遵守下列原则:

1 评定时可采用现行结构设计标准提供的计算模型,但模型中的指标和参数应进行符合结构实际情况的调整。

2 在条件许可时,可采用荷载检验或现场试验的评定方法。

3 对适用性评定为不满足要求的结构或构件,应提出采取处理措施的建议。

G.4 耐久性评定

G.4.1 既有结构耐久性评定应用于判定结构相应耐久年数与评估使用年限之间的关系。耐久年数为结构在环境作用下达到相应正常使用状态限值的年数。

G.4.2 结构在环境作用下的正常使用极限状态限值或标志应按下列原则确定:

1 结构构件出现尚未明显影响承载力的表面损伤。

2 结构构件材料的性能劣化,使其产生脆性破坏的可能性增大。

G.4.3 既有结构的耐久年数推定,应将环境作用效应和材料性能相同的结构构件作为一个批次。

G.4.4 评定结构构件的耐久年数,可根据结构已经使用的时间、材料相关性能变化的状况、环境作用情况和结构构件材料性能劣化的规律推定。

G.4.5 对耐久年数小于评估使用年限的结构构件,应提出适宜的维护处理建议。

G.5 抗灾害能力评定

G.5.1 既有结构的抗灾害能力宜从结构体系和构件布置、连接和构造、承载力、防灾减灾和防护措施等方面进行综合评定。

G.5.2 对可确定作用的地震、台风、雨雪和水灾等自然灾害,宜通过结构安全性校核评定其抗灾害能力。

G.5.3 对发生在结构局部的爆炸、撞击、火灾等偶然作用,宜通过减小其偶然作用及作用效应的措施、结构不发生与起因不相称的破坏和减小偶然作用影响范围的措施等评定其抗灾害能力。减小偶然作用及作用效应的措施包括防爆与泄爆措施、防撞击和抗撞击措施、可燃物质的控制与消防设施等。减小偶然作用影响范围的措施包括结构变形缝设置和防止发生次生灾害的措施等。

G.5.4 对结构不可抗御的灾害,应评价其预警措施和疏散措施等。

本标准用词说明

1 为便于在执行本标准条文时区别对待,对要求严格程度不同的用词说明如下:

1)表示很严格,非这样做不可的:

正面词采用“必须”,反面词采用“严禁”;

2)表示严格,在正常情况下均应这样做的:

正面词采用“应”,反面词采用“不应”或“不得”;

3)表示允许稍有选择,在条件许可时首先应这样做的:

正面词采用“宜”,反面词采用“不宜”;

4)表示有选择,在一定条件下可以这样做的,采用“可”。

2 条文中指明应按其他有关标准执行的写法为:“应符合……的规定”或“应按……执行”。

引用标准名录

《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153

《水力发电工程地质勘察规范》GB 50287

中华人民共和国国家标准

水利水电工程结构可靠性
设计统一标准

GB 50199 - 2013

条文说明

修 订 说 明

《水利水电工程结构可靠性设计统一标准》GB 50199--2013, 经住房城乡建设部 2013 年 9 月 16 日以第 136 号公告批准发布。

本标准是在《水利水电工程结构可靠度设计统一标准》GB 50199—1994 的基础上修订而成, 上一版的主编单位为: 原能源部、水利部水利水电规划设计总院, 副主编单位为: 原能源部、水利部北京勘测设计研究院, 参加单位为: 原能源部、水利部西北勘测设计研究院, 原能源部、水利部华东勘测设计研究院, 原能源部、水利部上海勘测设计研究院, 原能源部、水利部成都勘测设计研究院, 主要起草人为: 董育坚、袁玖、沈义生、张学易、黄振兴、苗琴生、韩焕文、段乐斋、潘玉华、张亦昭、蔡定一、吴熊飞、黄东军、聂广明、干城、石波、柏宝忠、艾永平、方光达。

本次修订的主要内容为:

(1) 对结构设计方法, 在原标准规定的以概率理论为基础、以分项系数表达的极限状态设计方法基础上, 增加了在缺乏统计资料时, 结构设计可根据可靠的工程经验或必要的试验研究进行, 也可以采用容许应力法或单一安全系数法等进行设计的规定。

(2) 增加了设计使用年限和耐久性的规定。

(3) 增加了水工结构设计时应考虑环境影响的规定。

(4) 增加了水工结构构件承载能力极限状态持久设计状况目标可靠指标 β 限值的规定。

(5) 在可变作用标准值的确定原则中, 增加了由重现期来表达的方法。

(6) 增加了结构分析中试验辅助设计的规定。

(7) 增加了既有结构可靠性评定的规定。

(8)增加了术语一节。

(9)增加了基于可靠指标的设计的规定。

(10)取消了原标准正常使用极限状态作用效应短期组合和长期组合验算的规定,将正常使用极限状态作用组合修订为按作用的标准组合或标准组合并考虑长期作用的影响。

(11)删除了地震作用作为可变作用的分类,将地震作用仅按偶然作用考虑。

(12)删除了在作用效应基本组合中,对概率极限状态设计,一个主要可变作用可采用设计基准期的概率分布模型及其参数,其他可变作用应采用年(或时段)的概率分布模型及其参数的规定。

(13)删除了原标准中的“质量控制”一章。

(14)删除了原标准中的“附录 A 水工建筑物级别”。

为便于广大设计、施工、科研、学校等单位有关人员在使用本标准时能正确理解和执行条文规定,《水利水电工程结构可靠性设计统一标准》编制组按章、节、条顺序编制了本标准的条文说明。对条文规定的目的、依据以及执行中需注意的有关事项进行了说明。但是,本条文说明不具备与规范正文同等的法律效力,仅供使用者作为理解和把握标准规定的参考。

目 次

1	总 则	(73)
2	术语和符号	(74)
3	基本规定	(75)
3.1	一般规定	(75)
3.2	结构安全级别和可靠度	(75)
3.3	设计使用年限和耐久性	(76)
4	极限状态设计原则	(79)
4.1	极限状态	(79)
4.2	设计状况	(81)
4.3	极限状态设计	(82)
5	结构上的作用和环境的影响	(91)
5.1	结构上的作用	(91)
5.2	作用的随机特性	(93)
5.3	作用的代表值	(95)
5.4	环境影响	(96)
6	材料和岩土性能及几何参数	(98)
6.1	材料、地基、围岩性能的随机特性	(98)
6.2	材料、地基、围岩性能的标准值	(99)
6.3	几何参数的随机特性和标准值	(102)
7	结构分析和试验辅助设计	(103)
7.1	一般规定	(103)
7.2	作用模型	(103)
7.3	结构模型和分析方法	(104)
7.4	试验辅助设计	(106)

8	分项系数概率极限状态设计方法	(108)
8.1	一般规定	(108)
8.2	承载能力极限状态设计	(110)
8.3	正常使用极限状态设计	(111)
8.4	分项系数确定	(112)
9	可靠性管理	(113)

1 总 则

1.0.1~1.0.3 根据国家工程结构类标准、规范体系框架的规定,《水利水电工程结构可靠性设计统一标准》属于第二层次的标准,直接下辖于《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153—2008,各类水工建筑物荷载和结构设计规范属于第三层次的规范。第1.0.1条~第1.0.3条内容,基本保留了《水利水电结构可靠度设计统一标准》GB 50199—1994(以下简称原标准)的相应各条内容。但是,鉴于《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153—2008中明确了如下原则:“工程结构设计宜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;当缺乏统计资料时,工程结构设计可根据可靠的工程经验或必要的试验研究进行,也可采用容许应力或单一安全系数等经验方法进行。”因此,将原标准中第1.0.1条中有关“可靠度设计”的提法改为“可靠性设计”,并将本标准名称一并作相同的更改。在第1.0.2条中明确水工结构设计的第三层次标准、规范应以本标准规定为原则进行编制和协调。

2 术语和符号

本章的术语主要参照《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153—2008并结合水工结构可靠性设计的具体情况新增内容。

3 基本规定

3.1 一般规定

3.1.1 一般情况下,结构的安全性以结构的可靠度来表示。结构的可靠度与结构的使用年限的长短有关。本标准中所指的结构可靠度或失效概率,对新建结构,是指设计使用年限的结构可靠度或失效概率,当结构的使用年限超过设计使用年限后,结构的失效概率可能较设计预期值增大。

3.1.2 本条是按原标准第 1.0.6 条,将“设计基准期内”改为“设计使用年限内”而成。设计基准期是确定可变作用(荷载)取值选用的时间参数,而结构设计功能目标应是在一定的设计使用年限内必须保证的基本要求,因此在本条中参照《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153—2008 进行了修改。

在水工结构应满足的四项功能中,第 1 项、第 4 项是对结构安全性的要求,第 2 项是对结构适用性的要求,第 3 项是对结构耐久性的要求,综合起来就是对结构可靠性的要求。

所谓设计规定的耐久性能,系指结构在规定的 work 环境中,在预定的时期内,其材料性能的劣化不致导致结构出现不可接受的失效概率。从工程概念上说,足够的耐久性能就是指在正常维护条件下结构能够正常使用到规定的设计使用年限。

3.1.3、3.1.4 为满足对结构的基本要求,使结构避免或减少可能的损坏,这里列出了宜采取的一些主要措施。

3.2 结构安全级别和可靠度

3.2.1 水工建筑物设计时根据的水工建筑物级别,与水工建筑物的重要性及其破坏可能产生的后果直接相关。本标准按工程

结构破坏后果的严重性将水工建筑物的结构安全级别划分为三级,与原标准一致。表 3.2.1 中水工建筑物级别按《水电枢纽工程等级划分及设计安全标准》DL 5180—2003 的规定划分。原标准附录 A 规定了结构安全级别与水工建筑物级别的关系以及建筑物级别与工程等别的关系,因《水电枢纽工程等级划分及设计安全标准》DL 5180—2003 标准已经颁布,本次修订不再设此附录。

3.2.2 建筑物中的关键结构或结构构件的破坏,将造成建筑物主体结构破坏,其结构安全级别应与建筑物结构安全级别一致。一些次要结构或结构构件破坏不会导致主体结构破坏,故其结构安全级别可降低一级。

根据国外较早资料分析,坝基丧失稳定在重力坝失事中占 34%,在拱坝中占 37%,在支墩坝中占 47%,在当地材料坝中占 30%。我国失事的水利水电工程中,坝基失稳占的比例也比较大。因此,对水工建筑物地基安全的要求应给予足够的重视。本条提出地基的结构安全级别应与水工建筑物的结构安全级别相同。

3.2.3、3.2.4 参照《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153—2008 新增条文。可靠指标 β 的功能主要有两个:其一,是度量结构构件可靠性大小的尺度,对有充分统计数据的结构构件,其可靠性大小可通过可靠指标 β 度量与比较;其二,目标可靠指标是分项系数法所采用的各分项系数取值的基本依据。

3.3 设计使用年限和耐久性

3.3.1 按照《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153—2008 的规定,在设计文件中需要标明结构的设计使用年限,而无需标明结构的设计基准期、耐久年限、寿命等。

3.3.2 随着我国市场经济的发展,以及根据国际上工程结构的设计惯例,迫切要求明确各类水工结构的设计使用年限。国际标准

《结构可靠性总原则》ISO 2394 : 1998 和欧洲规范《结构设计基础》EN1990 : 2002 也给出了各类结构的设计使用年限的示例。表 1 是欧洲规范 EN1990 : 2002 给出的设计使用年限类别的示例,表 2~表 5 是我国一些建筑行业的设计使用年限示例。

表 1 设计使用年限类别示例(EN1990 : 2002)

类别	设计使用年限(年)	示 例
1	10	临时性结构
2	10~25	可替换的结构构件
3	15~30	农业和类似结构
4	50	房屋结构和其他普通结构
5	100	标志性建筑结构、桥梁和其他土木工程结构

表 2 我国房屋建筑结构的设计使用年限示例(GB 50153—2008)

类别	设计使用年限(年)	示 例
1	5	临时性建筑结构
2	25	易于替换的结构构件
3	50	普通房屋和构筑物
4	100	标志性建筑和特别重要的建筑结构

表 3 我国公路桥梁结构的设计使用年限示例(GB 50153—2008)

类别	设计使用年限(年)	示 例
1	30	小桥、涵洞
2	50	中桥、重要小桥
3	100	特大桥、大桥、重要中桥

表 4 我国港口工程结构的设计使用年限示例(GB 50153—2008)

类别	设计使用年限(年)	示 例
1	5~10	临时性港口建筑物
2	50	永久性港口建筑物

表 5 我国城市桥梁等市政工程结构的设计使用年限示例
(GB/T 50476—2008)

类别	设计使用年限(年)	示 例
1	不低于 100 年	城市快速路和主干道上的桥梁以及其他道路上的大型桥梁、隧道、重要的市政设施等
2	不低于 50 年	城市次干道和一般道路上的中小型桥梁、一般市政设施

另外,我国铁路桥涵结构的设计使用年限规定为 100 年(GB 50153—2008)。

参照上述国内外关于设计使用年限的规定,本标准对水工结构的设计使用年限确定为:1 级~3 级主要建筑物为 100 年,其他的永久性建筑物为 50 年,临时建筑物可采用 5 年~15 年。

3.3.3~3.3.5 按《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153—2008 有关条文提出的原则性要求。关于环境类别的划分和相应的设计、施工、使用及维护等的要求,在《水工混凝土结构设计规范》DL/T 5057、《水工建筑物抗冰冻设计规范》DL/T 5082、《水工混凝土配合比设计规程》DL/T 5330 等规程规范中有相应规定。

4 极限状态设计原则

4.1 极限状态

4.1.1、4.1.2 保留原标准的相关条文。整个结构(包括地基、围岩)或结构的一部分,超过某一特定状态就不能满足设计规定的某一功能要求,此特定状态即称为该项功能的极限状态。

设计限值是指结构或结构构件按极限状态设计时采用的作为极限状态标志的应力或变形的界限值。

在结构设计中,要求结构具有各种功能,如承受荷载的功能、维持正常工作的功能,对极限状态规定明确的标志及限值,才能对结构可靠度进行分析。

极限状态的标志及限值是通过对结构各种功能失效的机理研究后确定的。当失效机理研究不十分充分时,为满足工程设计需要,也可以根据理论研究成果结合工程经验判断或按现行规范确定。如材料破坏的强度准则,即为结构达到承载能力极限状态的标志之一;又如混凝土重力坝,将滑动力达到抗滑力作为抗滑稳定承载能力极限状态的标志。水工结构大多属大体积结构,当结构的点应力或变形(按材料力学方法计算成果)到达某一限值时,即认为结构到达该功能的极限状态。随着对结构功能失效机理的深入研究,结构各种功能的极限状态标志及限值也会越来越接近实际。

4.1.3、4.1.4 保留原标准相关条文。承载能力极限状态是指结构或结构构件达到最大承载能力,或达到不能继续承载的变形的极限状态。正常使用极限状态是指结构或结构构件达到使用功能的某一规定限值的极限状态。

工程结构设计方法有容许应力法、破损阶段设计法以及多系数和单一系数极限状态设计法。容许应力设计法在规范材料容许

应力时所采用的安全系数是一个经验系数,不同规范、不同时期可能有不同取值。破损阶段设计法的安全系数和容许应力法一样,也是按经验取值。容许应力法和破损阶段法都是以材料强度的利用留有一定余度作为设计准则,采用单一安全系数,而且是一个笼统的粗略的经验系数,在确定安全系数时没有针对组成结构的材料、作用在其上的荷载性状、不同的变异性对结构安全影响大小等的不同加以区别对待,因而可能使结构在某些情况下过分安全,而在另一些情况下却不够安全。

极限状态设计方法与前两种方法不同,它是以结构设计功能的极限状态为设计的准则。极限状态设计表达式中的材料性能、作用等都采用具有一定概率意义的设计值。设计表达式中采用的标准值一般可根据统计数据确定,使结构安全评价更为合理。因此,本标准提出水工结构一般应按极限状态设计。整个结构或结构的一部分发生强度破坏、失去稳定(刚体稳定和弹性稳定)、变成机动体系或过大塑性变形致使结构几何形状发生显著改变,虽然未达到最大承载力,但无法使用,都属于超过了承载能力极限状态。

在土、石结构(坝或地基)或围岩承受渗透水压发生渗透失稳时,属于超过承载能力极限状态。防止渗透失稳对水工结构而言是甚为重要的。

闸门结构在水压作用下虽能满足承载能力极限状态要求,但若对闸门变形控制不够,超过某一限值,就要影响水工建筑物的正常运行。拱坝坝顶或坝肩变形、土石坝的不均匀沉陷、水流冲刷对建筑物的影响等都需要有正常使用的限值。机械振动使厂房结构受迫振动,应对它作出限制,以免影响仪表的正常运行和工作人员的健康。因而第4.1.4条对水工结构作了有关正常使用极限状态的规定。

正常使用极限状态通常是用结构在使用时某一参数达到其功能限制值来表示。这个限制值是根据长期工程经验对各种情况作

出判断而确定的。

4.1.5 保留原标准相关条文。对水工结构的破坏,明确地划分为两类,以便提出不同的可靠度水平要求,在经济上更为合理。

在结构或结构构件中,破坏有预兆的,是属于非突发性的,属于第一类破坏;破坏无预兆的,是属于突发性的,划属第二类破坏。由于第二类破坏发生突然,人们来不及采取措施防止,破坏后带来的损失较第一类破坏大得多,难于及时补救,因此要求的可靠度也较高。大坝为挡水建筑物,一旦破坏,后果严重,且难于修复,因此按第二类破坏对待。

4.2 设计状况

4.2.1、4.2.2 保留原标准相关条文。设计状况是结构在施工、安装、运行、检修各个时期可能出现的不同结构体系、环境、作用(荷载)等构成的设计条件。

持久设计状况是在结构正常使用过程中,一定出现且持续时间很长,一般与结构的设计使用年限为同一数量级的设计状况。

短暂设计状况是在结构施工(安装)、检修或使用过程中,短暂出现的设计状况。

偶然设计状况是在结构使用过程中出现概率很小,持续期很短的设计状况。

为了使水工结构可靠性设计更加合理,水工结构根据作用持续期长短,结合相应期间的结构状况和设计环境,将设计状况区分为持久设计状况(如正常运行时的状况)、短暂设计状况(如施工、检修时的状况)和偶然设计状况(如出现非常运用洪水、设防地震、排水失效时的状况)三种是合适的。

三种不同设计状况,不仅作用的大小和持续期可能不同,而且结构的构成、形式以及支承传力条件、结构中的材料性能值也可能不同。例如,双曲拱坝在施工期的短暂设计状况就与正常运用的持久设计状况不同,这时拱坝坝块之间的接缝尚未灌浆,未形成拱

结构,而是单个独立的坝块,且所承受的作用也不同,坝体混凝土强度还未达到设计龄期的强度,这是短暂设计状况。所以,结构设计应根据不同的设计状况,考虑可能出现的作用及其组合,选用相应的结构计算模式、材料性能参数和作用的设计值。

这三种设计状况,失事的后果不同,应采用不同的可靠度水平来设计。例如,大坝在建成后正常挡水,属持久设计状况,满库蓄水,一旦失事会带来重大的社会经济损失;大坝在施工期及检修期,属短暂设计状况,由于尚未蓄水或蓄水位较低,一旦失事所造成的损失远较前者为小,故设计可靠度可以小些;关于偶然设计状况,由于结构在使用过程中发生偶然作用的概率很小,可能发生,也可能不发生,一旦发生,作用的量值很大,故为了经济合理起见,设计可靠度可以取得更小。近年来许多水工结构设计规范也是这样规定的。

4.3 极限状态设计

4.3.1、4.3.2 工程结构按照极限状态设计时,对不同的设计状况应采用相应的作用组合,在每一种作用组合中还必须选取其中的最不利组合进行有关的极限状态设计。设计时应针对各种有关的极限状态进行必要的计算或验算,当有实际工程经验时,也可采用构造措施来代替验算。

当考虑偶然事件的作用时,主要承载结构可仅按承载能力极限状态进行设计,采用的结构可靠指标可比持久设计状况时适当降低。但对主要承载结构按偶然组合进行设计时,应使其不丧失承载能力,且能在局部结构破坏后不发生连续倒塌,避免过大的生命、财产的损失。对有些偶然作用,可采用防护措施使主要承载建筑物不丧失承载能力,如设置非常溢洪道,防止洪水漫顶等。

作用组合效应为各种作用合成引起的内力、变形等。如轴力、弯矩、剪力等,或是位移、变形、裂缝等,作用组合效应需通过结构

计算求得。

当作用与其效应按线性关系考虑时,作用组合的效应是结构上几种同时出现的作用分别产生的作用效应的叠加。各种水工结构上作用效应的组合,应按照实际可能同时发生的各种作用,以它们的效应进行组合。有些作用对一些结构是重要的,而对另一些结构可能不重要,例如温度作用,对拱坝是重要的,必须考虑它对拱坝整体应力的影响;而对分段式混凝土重力坝,一般主要考虑其对坝体施工期应力的影响。又如冰压力与浪压力不同时发生,不应考虑其组合。对于拱坝,水压力与温降组合对结构某些部位不利,水压力与温升组合对结构的其他部位不利。因此,应取各部位的最不利情况进行组合。

4.3.3 保留原标准相关条文。基本组合是按承载能力极限状态设计时,永久作用与可变作用的组合。当作用与效应按线性关系考虑时,作用组合的效应即为各作用效应的组合,亦即按各作用效应的线性叠加。

偶然作用是按承载能力极限状态设计时,永久作用、可变作用与一种偶然作用的组合。同样,作用组合与效应按线性关系考虑时,作用组合的效应即可由各种作用效应叠加而得。

水工建筑物的偶然作用,通常考虑校核洪水位下的水压力和地震作用。大型水利水电工程的挡水建筑物,除按一般水利水电工程那样考虑设计地震作用外,还应保证校核地震作用下的安全性。设计地震作用和校核地震作用均属偶然作用。

水利水电工程的工程量一般均较大,施工条件复杂,受气温、洪水等影响大,工期长,结构物常常在施工的过程中尚未形成整体就要承受一定的作用。例如混凝土拱坝施工时,常分成纵、横缝浇筑,在未进行接缝灌浆形成整体前要分块挡水,坝体自重直接传至基岩,有时因有倒悬而引起不利应力。钢筋混凝土护坦,当检修时,护坦上的水全部抽干,而底板上浮力及渗透压力仍然存在,这样对抗浮稳定不利。施工、检修应作为短暂设计状况,考虑永久作

用和可变作用组合的效应。

偶然作用在设计基准期内出现的概率很小,两种偶然作用同时发生的概率更小,因此,偶然组合只考虑一种偶然作用与永久作用和可变作用进行组合。

4.3.5 对正常使用极限状态设计,原标准规定“应按相应于持久设计状况的长期组合和短期组合设计。”由于可变作用标准值的长期组合系数 ρ 值在原标准中只提供了附录 F“确定长期组合系数 ρ 的方法”,但鉴于水工建筑物荷载统计的系统性和完整性均不完善,相关规范均难以给出 ρ 值,使作用效应的长期组合(或准永久组合)难以计算。为此,一些规范只能以笼统说法不作具体规定,如用“可按 GB 50199 的有关规定及工程经验取用”等说法,如《水电站压力钢管设计规范》DL/T 5141—2001 等;一些规范则索性规定采用 $\rho=1.0$,如《混凝土重力坝设计规范》DL 5108—1999 和《水工隧洞设计规范》DL/T 5195—2004 等。因此,本标准不再采用按长期组合设计考虑长期作用组合系数的规定。

《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153—2008 规定,正常使用极限状态设计时,可采用标准组合、频遇组合、准永久组合三种组合情况。将作用组合效应的名称与作用代表值的名称相对应,方便设计人员应用。所谓标准组合,是指正常使用极限状态设计时,采用标准值作为作用代表值的组合,一般用于不可逆正常使用极限状态。同样,频遇组合或准永久组合,是指将频遇值或准永久值作为作用代表值的组合,频遇组合宜用于可逆正常使用极限状态,而准永久组合,则用于长期效应是决定性因素时的正常使用极限状态。

可变作用的频遇值是指在设计基准期内被超越的总时间占设计基准期的比率较小的作用值,或被超越的频率限值在规定频率内的作用值,可通过频遇值系数对作用标准值的折减来表示。可变作用的准永久值是指在设计基准期内被超越的总时间占设计基准期的比率相对较大的作用值,可通过准永久值系数对作用标准

值的折减来表示。

与长期组合系数情况一样,如果要按《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153-2008 反映可变作用的频遇值,频遇值系数也难以进行计算。由于频遇值系数和准永久值系数均小于 1.0,显然作用的频遇值和准永久值均小于标准值,作用组合的效应值常比标准组合的效应值小,在正常使用极限状态设计时,往往不是控制条件。

因此,结合水工建筑物各种作用的统计状况的特殊性,以及水工建筑物可靠性设计的历史传统,本次修订时,只采用了作用的标准组合或标准组合并考虑长期作用的影响。例如,对混凝土结构的抗裂设计,可采用作用的标准组合;对混凝土结构的限裂和挠度控制设计,由于它们的计算公式中,本身就涉及初始应力或长期刚度和短期刚度内容,因此也就是属于标准组合并考虑长期作用的影响。

4.3.6 保留原标准相关条文。基本变量是影响结构可靠度的各种主要随机变量,它们一般是可量测的物理量。附加变量是反映计算模式不定性等随机变量。

水工结构的基本变量有:各种作用,如水压力、渗透水压力、外水压力、泥沙压力、地震作用、温度作用等;各种材料(包括人工材料、岩、土材料)、地基、围岩的物理力学性能,如强度、弹性模量、容重、泊松比等;结构的几何尺寸,如截面尺寸、钢筋保护层厚度、钢筋断面积等。

计算模式不定性对结构可靠度有所影响,是结构极限状态设计式中应予考虑的随机变量。在以综合作用效应或结构综合抗力作为基本变量时,计算模式不定性已在其中有所考虑。

4.3.8 抗力是结构或结构构件承受作用的能力,如强度、刚度、抗裂度等。在进行结构可靠度分析或规范校准时,为了简化极限状态方程,避免极限状态方程形成高次非线性,可采用综合抗力和综合作用效应。这种由若干基本变量组合的综合变量,可采用误差

传递法来推求其统计参数,当其概率分布为正态或对数正态时,可直接计算出结构或结构构件的可靠指标。

4.3.9 保留原标准相关条文。功能函数是描述结构设计功能的基本变量(包括附加变量)的函数。

根据结构设计预定的功能,由作用、结构材料(包括人工材料和岩、土材料)、地基、围岩性能、几何参数、计算模式不定性等建立可以计算结构功能的函数:

$$Z = g(X_1, X_2, \dots, X_n)$$

当 $Z > 0$ 时,结构处于可靠状态; $Z < 0$ 时,结构处于失效状态; $Z = 0$ 时,结构处于极限状态。

由于结构完成的功能不同,可组成不同的功能函数,从而也可以有许多不同的极限状态方程。

4.3.10 极限状态方程是以各有关基本变量(包括附加变量)为参数,表现结构或结构构件处于极限状态时的关系式。

4.3.12 保留原标准相关条文。可靠指标是度量结构可靠性的一种数量指标。它是标准正态分布反函数在可靠概率处的函数值。可靠概率是结构或结构构件能够完成预定功能的概率值。失效概率是结构或结构构件不能完成预定功能的概率。

本标准中所指的结构可靠度是结构在设计使用年限内,在持久设计状况、短暂设计状况和偶然设计状况下,具有的各种规定功能的可靠度。

结构可靠概率 p_s 常是一个很接近 1 的数值,如 0.99999 或 0.999 等,而结构失效概率 p_f 又是一个很小的数值,如 0.00001 等,使用很不方便,因此以“可靠指标”作为评价或衡量结构可靠度水平的定量依据,并以符号 β 表示,它与失效概率 p_f 有如下关系:

$$\begin{aligned} p_f &= 1 - \Phi(\beta) \\ p_f &= \Phi(-\beta) \\ \beta &= \Phi^{-1}(1 - p_f) \end{aligned}$$

表 6 是可靠指标 β 与可靠概率 p_s 、失效概率 p_f 的对照表。

表 6 可靠指标 β 与可靠概率 p_s 、失效概率 p_f 的对照表

p_s	0.8413	0.9495	0.97725	0.99865	0.9998964	0.99996833	0.99999660
p_f	1.59×10^{-1}	5.05×10^{-2}	2.27×10^{-2}	1.35×10^{-3}	1.04×10^{-4}	3.17×10^{-5}	3.40×10^{-6}
β	1.00	1.64	2.00	3.00	3.71	4.00	4.50

过去的的安全系数不能确切地反映结构可靠度大小,如砖石结构偏压构件的安全系数 K 为 2.3,钢筋混凝土偏压构件的安全系数 K 为 1.55,但是钢筋混凝土偏压构件的可靠指标却比前者大。因此采用可靠指标 β 作为统一的可靠度量度尺度,可以对不同结构类型、不同材料(包括岩、土)的结构可靠性进行定量的比较。

4.3.13 计算结构可靠指标 β 的方法很多,如 JC 法、数值积分法、JC-数值联合法、分位值法、蒙特卡洛法等。为便于比较,需要统一可靠指标的计算方法,为此,附录 B.1 中主要推荐了在方法上比较成熟,运算上比较简单,国际标准和国内标准均普遍采用的一次二阶矩法(一次可靠度法)。

目前,对于水工结构设计,有些基本变量如作用、材料性能等统计资料仍然不很完善,基本变量的统计参数和概率分布模型仍需根据现有的统计资料,结合工程经验判断而定,随着统计数据不断积累,可进一步修订这些参数,使算得的可靠指标更接近实际。

4.3.14~4.3.17 目标可靠指标是规范规定结构设计应达到的可靠指标。结构设计中,应根据结构安全级别对不同设计状况下的各种极限状态的不同破坏类型制定适当的目标可靠指标,以保证结构在安全和经济上趋于最佳平衡。目前,确定目标可靠指标的方法有校准法、风险分析法、最佳经济效益法等,考虑到统计资料仍然不够充分,还需继承已有设计经验,本次修订仍然推荐校准法作为选定结构目标可靠指标的方法。校准法就是对原有结构设计规范、正常设计和施工的水工结构进行反演分析,得出设计隐含的总体可靠度水平。采用校准法确定总体可靠度水平时,还应该调查分析影响结构可靠度的各种因素对可靠度影响的权重,以加权平均可靠指标代表总体可靠度水平。

早期为了配合原标准的编制,曾经对当年采用的《水工钢筋混凝土结构设计规范》SDJ 20—1978 以及《混凝土重力坝设计规范》SDJ 21—1978 用校准法分析了代表性水工结构承载能力极限状态持久设计状况的总体可靠度水平,如表 7、表 8 所示。

表 7 水工钢筋混凝土结构可靠度分析结果汇总及目标可靠指标 β 建议值

类别号	考虑情况	加权方案	结构安全级别/建筑物级别								
			I 级/1 级			II 级/2,3 级			III 级/4,5 级		
			β_y	β_c	β_s	β_y	β_c	β_s	β_y	β_c	β_s
1	仅考虑 R200+16Mn 和 5 种不同荷载组合	算术平均	3.94	4.05	4.00	3.32	3.76	3.57	2.87	3.45	3.20
2			3.94	4.05	4.00	3.32	3.77	3.58	2.87	3.46	3.21
3			3.93	4.12	4.04	3.32	3.82	3.61	2.86	3.51	3.23
1	考虑 5 种材料组合与 5 种荷载组合	对 p_f 加权	3.53	3.79	3.65	3.06	3.52	3.24	2.67	3.26	2.89
2			3.53	3.81	3.66	3.06	3.56	3.25	2.67	3.29	2.89
3			3.53	3.84	3.66	3.06	3.58	3.25	2.67	3.30	2.90
1	考虑 5 种材料组合与 5 种荷载组合	对 β 加权	4.00	3.98	3.99	3.34	3.67	3.53	2.85	3.39	3.16
2			4.00	4.01	4.01	3.33	3.71	3.55	2.85	3.41	3.17
3			3.99	4.07	4.03	3.33	3.76	3.57	2.85	3.45	3.19
目标可靠指标 β 建议值			3.7	4.2	-	3.2	3.7	-	2.7	3.2	-

注:类别号 1 表示按太平湾水电站混凝土统计资料可靠度分析结果;类别号 2 表示按全国混凝土覆盖 80% 批点数据可靠度分析结果;类别号 3 表示按全国合格水平混凝土统计资料可靠度分析结果; β_y 表示第一类破坏(延性破坏)可靠指标; β_c 表示第二类破坏(脆性破坏)可靠指标; β_s 表示总体可靠指标。

表 8 混凝土重力坝坝基抗滑稳定和抗压强度设计可靠度分析结果汇总及目标可靠指标 β 建议值

混凝土等级	抗 滑	抗 压	
C10	$\beta > 4.0$	$\beta > 3.9$	
>C15	$\beta > 4.1$	$\beta > 4.1$	
结构安全级别	I	II	III
β 建议值	4.2	3.7	3.2

此外,后来的《碾压式土石坝设计规范》DL/T 5395—2007 修订过程中也对坝坡抗滑稳定可靠度进行了校准分析,其结果如表 9 所示。

表 9 碾压式土石坝坝坡抗滑稳定可靠度校准分析及目标可靠指标 β_1 的取值建议

水工建筑物级别		1	2,3	4,5	
结构安全级别		I	II	III	
总体可靠指标 β 的平均值	瑞典圆弧法	3.93	3.60	2.90	
	简化毕肖普法	4.62	3.71	3.05	
	摩根斯坦-普瑞斯法	4.65	3.74	3.07	
	滑楔法	$\beta_1 = 0$	3.90	3.57	2.86
		$\beta_1 \neq 0$	4.65	3.70	3.02
β_1 建议值		4.2	3.7	3.2	

注: $\beta_1 = 0$ 为假定滑楔之间的作用力为水平, $\beta_1 \neq 0$ 为假定滑楔之间的作用力平行于坡面或坡面与楔体斜面的平均坡度。

《水电站压力钢管设计规范》DL/T 5141—2001 修订过程中,对 I 级结构进行了可靠度校准分析,结果如表 10 所示。

表 10 压力钢管结构可靠度校准结果 β 值及目标可靠指标 β_1 的取值

管型	明管	地下埋管	坝内埋管	坝后背管
β 校准值	4.24~4.52	3.77~3.85	3.71~3.73	4.30~5.83
β_1 取值	4.2	3.7	3.7	4.2

我国工民建与港口工程结构持久设计状况承载能力极限状态的结构设计可靠指标如表 11 所示。

表 11 工民建与港口工程结构持久设计状况承载能力极限状态的结构设计可靠指标 β 值

破坏形式		工 民 建		港 口 工 程	
		延性	脆性	延性	脆性
安全等级	I	≥ 3.7	≥ 4.2	≥ 4.0	
	II	≥ 3.2	≥ 3.7	≥ 3.5	
	III	≥ 2.7	≥ 3.2	≥ 3.0	

另外,国外一些工程结构设计规范,采用分项系数极限状态设计方法,取用的可靠指标值也都大致在上述我国规范取值范围内。北美加拿大公路桥梁设计规范(CHBDC)1997年第4版规定:承载能力极限状态可靠指标 $\beta=3.5$,正常使用极限状态可靠指标 $\beta=1.0$ 。北欧建筑管理委员会(NKB)工作报告1999:01E:结构设计基础建议,对包括混凝土梁、柱和钢梁、柱以及木梁、柱的设计基本情况,取 $\beta=4.7$ 。

综合分析上述资料,对不同安全级别和破坏类型的结构或结构构件,应采用不同的可靠指标。水工结构构件持久设计状况承载能力极限状态的目标可靠指标如表4.3.16所示。

5 结构上的作用和环境的影响

5.1 结构上的作用

5.1.1 根据作用形态的不同,可分为直接作用和间接作用。前者是指施加在结构上的集中力或分布力,习惯上常称为荷载;不以力的形式出现在结构上的作用,归类为间接作用,它们都是引起结构外加变形和约束变形的原因,例如地面运动(地震)、基础沉降、材料收缩、温度变化等。无论是直接作用还是间接作用,都将使结构产生作用效应,诸如应力、内力、变形、裂缝等。

我国工程界习惯于把上述直接作用和间接作用统称为“荷载”。根据国际标准《结构可靠性总原则》ISO2394:1998、欧洲规范《结构设计基础》EN1990:2002 以及现行国家标准《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153—2008 规定,将各种荷载统称为作用。

5.1.2 作用按随时间的变化分类是作用最主要的分类,它直接关系到作用变量概率模型的选择,而且按各类极限状态设计时,所采用的作用代表值一般与其出现的持续时间长短有关。

永久作用是在设计所考虑的时期内始终存在,且其量值不随时间变化,或其变化与平均值相比可以忽略不计的作用。永久作用在采用随机变量概率模型来描述时,它的随机性通常表现在随空间变异上。

可变作用是在设计使用年限内其量值随时间变化,且其变化与平均值相比不可忽略不计的作用。可变作用的统计参数与时间有关,故宜采用随机过程概率模型来描述,但在实用上经常可将随机过程概率模型转化为随机变量概率模型来处理。

偶然作用是在设计使用年限内出现概率很小,或者说不一定

出现,而一旦出现其量值很大且持续时间很短的作用。

作用按不同性质进行分类,是出于结构设计规范化的需要。按随时间变化分类属于可变荷载的各种力素,应考虑它对结构可靠性的影响;按随空间变化的分类属于自由作用(原标准中称为可动作用)的,应考虑它在结构上的最不利位置;按结构反应特点分类属于动态作用的,还应考虑结构的动力响应。

在选择作用的概率模型时,很多典型的概率分布的取值往往是无界的,而实际上很多随机作用的量值由于客观条件的限制而具有不能被超越的界限值,例如大坝的校核洪水位等。选用这类有界作用的概率模型时,应考虑它们的这个特点,例如可采用截尾的分布类型。

作用的其他分类,例如,当结构进行疲劳验算时,可按作用随时间变化的低周性和高周性分类;当考虑结构徐变效应时,可按作用在结构上持续期的长短分类。

虽然作用按时间变化分类分为永久作用、可变作用和偶然作用三种,但是在国内外不同规范中对这三种作用分类可能有不同的规定。例如,水压力作用,本标准作为可变作用和偶然作用,前者是指设计条件下的水库水位对应的水压力,后者则是指校核条件下(一般指水库在最高洪水位)对应的水压力。而国际标准《结构可靠度设计总原则》ISO—2394、欧洲共同体《混凝土结构共同统一规定》ECNo. 2 等将水压力作为永久作用和可变作用。水工中水压力为主要作用,在早期的设计规范中的定值法设计则将校核洪水位对应的水压力作为特殊作用,自原标准将这时的水压力作为偶然作用以来,相继修订的各种水工结构设计规范均已统一作为偶然作用。又如,地震作用在我国早期的《水工建筑物抗震设计规范》SDJ 10—1978 规定作为特殊作用,与其他作用组合时作为特殊组合。自原标准以后相继修订的《水工建筑物抗震设计规范》DL 5073—2000 及其他水工结构设计规范中,均统一按偶然作用对待,本次修订时不再作为可变

作用。

除上述水压力和地震作用以外,本标准附录 C 中的各种作用随时间变化分类情况一般均比较一致:

扬压力、动水压力、土的孔隙水压力等与坝前水位或上下游水位、水的运动有关,且随水位的变动而变动,故作为可变作用。

泥沙压力随水库蓄水运用过程以及排沙设施运用在设计使用年限内变动,作为可变作用;有些水库不设排沙设施,泥沙淤积随时间增长,淤积高程逐渐提高,以致达到设计淤沙高程,可作为永久作用。

浪压力随风速、风向和水面吹程不同而变化,作为可变作用。

风、雪、人群、堆放物品等作用,根据《建筑结构可靠度设计统一标准》GB 50068 规定为可变作用。

电站运行时产生的水击压力,作为可变作用。

5.2 作用的随机特性

5.2.1 保留原标准相关条文。永久作用对结构长时间起作用,又称恒载,在设计基准期(T)内必然出现,其值基本不变,从而随机过程就转化为与时间无关的随机变量, $\{G(t)=G, t \in [0, T]\}$,所以样本函数的图象是平行于时间轴的一条直线。此时,作用一次出现的持续时间 $\tau=T$,在设计基准期内的时段数 $r=\frac{T}{\tau}=1$,而且出现的概率 $p=1$ 。

混凝土自重是水工结构的永久作用,而且可能是主要的永久作用,尤其是大体积挡水建筑物。其自重根据结构设计尺寸和单位重确定,由于它们受尺寸、材料容重、制作方式等各种因素的变异影响,因而可作为随机变量。但水工混凝土结构中的坝体尺寸较大,尺寸变异往往可以忽略。如混凝土重度,根据曾经对新安江、富春江水库大坝的取样抽查,由不同岩石骨料、不同骨料级配的 275 个子样统计,混凝土重度统计参数的均值为 24.32kN/m^3 ,

变异系数 $\delta=0.015$, 如果按 0.05 和 0.95 的分位值取值, 则其标准值分别为 23.3kN/m^3 和 24.9kN/m^3 。与混凝土坝设计通常取值为 24kN/m^3 相比, 相差仅 -1.2% 和 3.75% 。考虑到混凝土坝体按承载能力极限状态设计时, 自重既可能是作用, 又可能是抗力, 而且其变异系数又不大, 故可作为定值对待。《水工混凝土结构设计规范》DL/T 5057—2009 规定混凝土重度应由试验确定。当无试验资料时, 素混凝土可取 24kN/m^3 , 钢筋混凝土可取 25kN/m^3 , 都可当定值处理。

5.2.2 保留原标准相关条文。可变作用的样本函数的共同特点是一次出现的持续时间 $\tau < T$, 在设计基准期 T 内的时段数 $r > 1$, 且在 T 内至少出现一次, 所以平均出现次数 $m = pr \geq 1$ 。不同的可变作用, 其统计参数 τ 、 p 以及任意时点作用的概率分布函数 $F_Q(x)$ 都是不同的。目前对各类可变作用随机过程的样本函数及其性质了解不多, 为了简化起见, 可采用极值统计法或平稳二项随机过程概率模型来描述。

平稳二项随机过程概率模型是将作用随机过程在任一时间取值的随机变量(截面随机变量), 转换为 T 年内作用最大值 Q_T 的概率分布 $F_T(Q_T)$ 。极值统计法是将设计基准期 T 年分为 n 个时段, 调查统计每个时段 ($\tau = T/n$) 内作用最大值 Q_i (随机变量) 的分布 $F(Q_i)$, 并假定各时段内的 Q_i 相互独立, 然后按最大值的极值分布原理, 给出设计基准期内最大值 Q_T 的分布 $F_T(Q_T)$ 的方法。极值统计法做起来比较简明, 故本标准推荐极值统计法。

5.2.3 原标准中设计基准期, 一是用于可靠指标 β 的取值, 指设计基准期的 β , 二是用于可变作用的取值。本标准中, 设计基准期只用于确定可变作用的取值。

设计基准期是为确定可变作用的取值而规定的标准时段, 它不等同于结构的设计使用年限。不同的设计基准期, 结构的目标可靠指标会有一定的差异。根据文献报道, 在抗力 R 只作随机变

量、作用效应 S 作随机过程条件下, 中国建筑科学研究院曾分别对 9 种延性构件(发生第一类破坏)、5 种脆性构件(发生第二类破坏), 在以可变荷载为主要作用下, 就不同的基准期 T 值分别求得平均的 β 值, 其关系如表 12 所示。

表 12 T 与 β 的关系

	构件破坏类型	T (年)						
		1	20	50	100	200	600	1000
β	延性破坏	4.1777	3.449	3.200	2.999	2.790	2.437	2.263
	脆性破坏	4.571	3.917	3.700	3.528	3.531	3.062	2.924

由表 12 可见, 可靠指标 β 值随着 T 值的增大而减小。例如, 当 T 值从 50 年增大至 100 年, 延性破坏的 β 值从 3.200 减小至 2.999, 脆性破坏的 β 值从 3.700 减小至 3.528, 它们仅相差 0.2 左右, 也可以说, 50 年和 100 年的 β 值变化不大。

5.2.5 在水工结构中, 有些作用需根据多个随机变量用公式计算确定, 如波浪作用、水击压力、泥沙压力、冰压力、土压力等, 都是由多个随机变量用公式推算得的作用。可用多个随机变量的平均值计算该作用的平均值, 用多个随机变量的标准差计算该作用的标准差。在本标准附录 A 中列出了它们的计算方法。

5.3 作用的代表值

5.3.1 作用代表值是在分项系数极限状态设计时采用的作用值。

作用标准值是结构或结构构件设计时采用的各种作用的基本代表值, 本标准规定按设计基准期或年(时段)内作用最大值的概率分布某一分位值确定。

在承载能力极限状态和正常使用极限状态中, 本标准对永久作用、可变作用均以标准值作为代表值。偶然作用出现的概率极小, 常常难以取得实测资料, 因此, 其代表值可根据工程经验, 经过综合分析由有关规范确定。

5.3.2 有些永久作用常具有作用及抗力双重性。当它作为抗力时,其标准值应采用概率分布的低分位值(如 0.05 分位值);当它作为作用时,其标准值应采用概率分布的高分位值(如 0.95 分位值)。

大体积混凝土结构自重的标准值,可根据结构的设计尺寸和材料的容重计算确定。某些结构自重的标准值,如隧洞衬砌,尚应考虑结构几何尺寸的变异性。

5.3.3 本标准规定以设计基准期或年(时段)内最大(小)值分布指定的某个分位值作为可变作用的代表值或标准值。当作用为不利时,应采用概率分布的高分位值(如 0.95 分位值);当作用为有利时,应采用概率分布的低分位值(如 0.05 分位值)。基于可靠指标设计时,应专门研究可变作用的组合方式。

5.4 环境影响

5.4.1、5.4.2 参照《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153 - 2008 新增条文。环境影响可以具有机械的、物理的、化学的或生物的性质,并且有可能使结构的材料性能随时间发生不同程度的退化,向不利方向发展,从而影响结构的安全性和适用性。

环境影响在很多方面与作用相似,而且可以和作用相同地进行分类,特别是关于它们在时间上的变异性,因此,环境影响可分为永久影响、可变影响和偶然影响三类。例如,对处于海洋环境中的混凝土结构,氯离子对钢筋的腐蚀作用是永久影响,空气湿度对木材强度的影响是可变影响等。

环境影响对结构的效应主要是针对材料性能的降低,它是与材料本身有密切关系的,因此环境影响的效应应根据材料特点而加以规定。在水工结构中,许多情况下环境影响属于物理性的,如高压隧洞钢筋混凝土衬砌围岩抗水力劈裂的稳定性,高水力渗透坡降对混凝土地下防渗墙混凝土的溶蚀速度等;在一些情况下也会涉及化学的和生物的伤害,如水电站高压管道钢管管壁的锈蚀

和贝类等水生物对管壁的损坏等。

如同作用一样,对环境影晌应尽量采用定量描述,但在多数情况下,这样做是困难的,因此,目前对环境影晌往往只能根据材料特点,按其抗侵蚀性的程度来划分等级,设计时按等级采取相应措施。

6 材料和岩土性能及几何参数

6.1 材料、地基、围岩性能的随机特性

6.1.1 材料包括人工材料和天然材料,如筑坝的岩、土材料属天然材料。材料和地基、围岩的性能可区分为力学性能和其他物理性能。力学性能主要指材料和地基、围岩的强度性能,包括抗压、抗拉、抗剪切(断)等强度性能,以及弹性模量、变形模量、泊松比等性能;其他物理性能指材料和岩、土的比重、含水量、渗透系数、热工性能,以及影响结构耐久性(抗冻融、抗侵蚀)等方面的性能。

上述的大部分性能可按试验规程规定的试验方法通过试验确定。不具备试验条件时,可通过工程类比、经验判断或有关规范确定。《水力发电工程地质勘察规范》GB 50287、《低合金高强度结构钢》GB/T 1591、《水工混凝土试验规程》DL/T 5150、《水工混凝土砂石骨料试验规程》DL/T 5151、《水电水利工程土工试验规程》DL/T 5355、《水工混凝土结构设计规范》DL/T 5057 等规程、规范对材料试验及性能均做出了相应规定。

6.1.2 材料和地基、围岩的性能是结构可靠度分析的基本变量,需要以适当的概率分布模型来描述。

人工材料和岩、土天然材料的性能,一般可取得较多的试验数据,有条件用统计方法确定其统计参数(平均值、标准差或变异系数)。其性能的概率分布模型可按样本大小,采用 χ^2 (卡平方)、K-S(柯尔莫哥洛夫-斯米尔诺夫)法等检验确定。

人工材料,由于在生产过程中对其质量进行了控制,其误差分布对称于平均值两侧,因此人工材料性能一般采用正态分布是较合适的。例如对混凝土试件抗压强度及钢筋试件强度所做的统计分析,所得概率分布模型为正态分布。

地基和围岩性能,通常只能进行少量试验,难以得出确切的概率分布模型。考虑到强度参数的物理意义(非负值),近似估计时其强度参数可采用对数正态分布。

6.1.4 结构中材料性能由于工艺条件、应力状况、尺寸效应和施工缺陷等因素,与试验条件下的试件性能有差别,需由试件材料性能换算得出。由于试验本身有离散性,换算系数也存在不定性。对于一般钢筋混凝土结构、钢结构、木结构等,可通过破坏试验求出它们的换算系数和换算系数的不定性,或通过较接近实际的试件(如大尺寸、全级配试件)的破坏试验结果分析确定。

6.2 材料、地基、围岩性能的标准值

6.2.1 材料性能标准值是设计结构或结构构件时采用的材料性能的基本代表值。本标准按符合规定质量的材料试件性能的概率分布的某一分位值确定。

对于有条件对材料、地基和围岩试件按试验规程进行试验的工程,可通过对试验数据统计分析确定试件性能的概率分布和统计参数。据此按本标准第 6.2.2 条~第 6.2.4 条对标准值的规定,以相应的分位值确定材料、地基和围岩性能的标准值。

6.2.2 材料强度标准值一般取概率分布的低分位值。按照《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153—2008 的规定,并参考国际上如英国、俄罗斯、德国、日本和欧洲混凝土委员会(CEB)的规定,本标准规定取 0.05 分位值作为人工材料强度的标准值。此时,当材料强度按正态分布时,其标准值为

$$f_k = \mu_f - 1.645\sigma_f$$

当按对数正态分布时,其标准值近似为

$$f_k = \mu_f \exp(-1.645\delta_f)$$

式中: μ_f 、 σ_f 及 δ_f ——材料强度的平均值、标准差及变异系数。

岩、土材料主要指筑坝等采用的岩石和土料,作为坝体的岩、土天然材料,在施工过程中其压实质量受到控制。《碾压式土石坝

施工规范》DL/T 5129—2001 规定：对堆石料、砂砾料以及对防渗土料在现场取样所测定干密度应按合格率不小于 90% 控制。由于碾压岩、土体的强度很大程度上取决于其干密度，因此岩、土材料强度的标准值采用 0.1 的分位值是可行的。此时，当材料强度按正态分布时，其标准值为

$$f_k = \mu_f - 1.28\sigma_f$$

当按对数正态分布时，其强度标准值近似为

$$f_k = \mu_f \exp(-1.28\sigma_f)$$

水工大体积混凝土结构的尺寸有时不由应力条件控制，由结构布置或重力稳定条件决定。若其强度标准值采用与水工钢筋混凝土结构的混凝土强度标准值的分位值，将会导致增大水泥用量，造成浪费。因此，《水工混凝土施工规范》DL/T 5144—2001 规定，混凝土生产质量水平的评判，当强度不低于标准值的 80% 时作为合格，达到 90% 以上时则为优良。故而规定大体积混凝土强度标准值可采用 0.2 分位值。此时，当材料强度按正态分布时，其标准值为

$$f_k = \mu_f - 0.842\sigma_f$$

当按对数正态分布时，其强度标准值为

$$f_k = \mu_f \exp(-0.842\sigma_f)$$

岩石坝基和洞室围岩的抗剪强度，一般根据现场的少量试件进行统计分析，并采用小值平均值为其标准值。

岩土性能参数的标准值，当有可能采用可靠性估值时，可根据区间估计理论确定，用子样的平均值和标准差近似地分别代替母体的平均值 μ_f 和标准差 σ_f ，单侧置信界限值由式 $f_k = \mu_f \left(1 \pm \frac{t_\alpha}{\sqrt{n}} \frac{\sigma_f}{\mu_f} \right)$ 求得，式中 t_α 为学生氏函数值，按平均值 μ_f 的置信度 $1-\alpha$ 和样本容量 n 查 t -分布表求得。

t -分布常用于随机变量的容量较小（如 $n < 10$ ）时，对其平均区间的估计。平均值区间由上、下两值组成，大值对应于上置信

限(对应分位值为 $1 - \frac{\alpha}{2}$), 小值对应于下置信限(对应分位值为 $\frac{\alpha}{2}$), 上、下两置信限可根据工程需要取用。对于材料的强度, 一般取下置信限, 对于各种作用(荷载)值则取上置信限。

6.2.3 材料、地基、围岩的变形模量、泊松比以及物理性能的标准值是决定结构构件刚度的主要参数。刚度大, 应力增大, 变形减小; 刚度小, 应力减小, 变形则增大。根据《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153—2008 的规定, 上述参数取 0.5 分位值作为标准值。但对一些利用地基、围岩的弹性抗力作为抗力的结构, 应采用不利分位值确定其标准值。如拱坝坝肩基础的变形模量对拱冠和拱座应力, 土基变形模量对建筑物不均匀沉陷有控制性影响时, 其变形模量的标准值可采用不利分位值。

6.2.4 本条规定了在确定材料标准值时, 要考虑有害介质或其他不良环境对结构材料性能的影响。

有害介质或其他不良环境对结构材料性能的影响是多方面的, 如钢材在高温、低温或重复应力循环作用下都会引起强度性能的降低; 混凝土在应力、冻融和有害介质长期作用下产生的微裂隙会导致混凝土强度的降低; 木材长期在高温($40^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$)作用下, 或在潮湿工作条件和干湿交替作用下, 强度会降低, 甚至腐烂变质; 岩体内的软弱夹层长期在水流作用下也会引起强度、抗渗、抗管涌等性能的降低。

国内外关于不良环境或有害介质对结构材料性能的影响均有所考虑。如木材长期在 $40^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$ 条件下工作时, 其强度应降低 20%; 水力渗透坡降与混凝土的溶蚀速度有关, 因此限制其渗透坡降的上限值对延长地下防渗墙的使用寿命有利。又如, 混凝土在渗水作用下会带走游离氧化钙而使其强度降低, 渗透性增加, 因此常按其强度降低 50% 的年限作为选择墙厚的准则, 这一年限 T (年) 可用下式计算:

$$T = a_{\mu} L / (kiB)$$

式中： a ——使混凝土强度降低 50% 所需的溶蚀水量 (m^3/kg)；
 μ ——每立方米混凝土用水泥量 (kg/m^3)；
 L ——墙厚 (m)；
 k ——渗透系数 ($\text{m}/\text{年}$)；
 i ——渗透坡降；
 B ——安全系数。

6.3 几何参数的随机特性和标准值

6.3.1 对于大体积水工结构，如大坝坝体、重力式挡土墙等，几何尺寸的变异性相对于平均值变异很小，故可取其为常量。当结构的截面尺寸对结构抗力等性能影响较大时，应考虑结构几何参数的变异性，压力钢管设计时应考虑钢板厚度偏差对承载能力的影响，此时钢板厚度可按《低合金高强度结构钢》GB/T 1591 等规范或钢板生产厂家提供的钢板尺寸偏差确定。

6.3.2 几何参数标准值系设计结构或结构构件时采用的几何参数代表值，一般可采用设计规定的名义值。

6.3.3 确定地基与围岩中地质软弱面的几何参数是一个相当复杂的问题，应根据勘测资料进行分析、判断，其标准值可采用地质工程师提供的建议值。

7 结构分析和试验辅助设计

7.1 一般规定

7.1.1~7.1.5 结构分析是确定结构上作用效应的过程以及设计结构应具有抗力的过程。结构上的作用效应是指在作用影响下的结构反应,包括构件截面内力(如轴力、剪力、弯矩、扭矩)以及变形和裂缝。抗力是指结构或结构构件承受外加作用的能力,如强度、刚度、抗裂度等,其他性能指结构的自振频率等。

在结构分析中,宜考虑环境对材料、构件和结构性能的影响,如湿度对木材强度的影响,高温对钢结构性能的影响等。

7.2 作用模型

7.2.1 本条是参照《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153—2008 的第 7.3.1 条新增条文。一个完善的作用模型应能描述作用的特性,如作用的大小、位置、方向、持续时间等。在有些情况下,还应考虑不同特性之间的相关性,以及作用与结构反应之间的相互作用。

在多数情况下,结构动态反应是由作用的大小、位置或方向的急剧变化所引起的。结构构件的刚度或抗力的突然改变亦可能产生动态反应。当动态性能起控制作用时,需要比较详细的过程描述。动态作用的描述可以时间为主或以频率为主给出,依方便而定。为描述作用在时间变化历程中的各种不定性,可将作用描述为一个具有选定随机参数的时间非随机函数,或作为一个分段平稳的随机过程。

7.2.2~7.2.6 第 7.2.2 条是原标准第 6.0.6 条的具体化,其中,原标准“可动作用”改称为“自由作用”。

作为一个案例,地震作用是随时间迅速变化的动态作用。在坝体和地基的动力相互作用方面,已有研究成果的主要结论表明,无限地基的能量逸散有重要影响,表现了一定的类似阻尼性质。这种阻尼性质的机理十分复杂,它隐含了相邻介质的相互作用和能量在地基中逸散的影响,与水库水位、地基土的特性以及体系振动频率和地震动强度等因素有关,并具有非线性特征,在理论上目前尚难厘清。目前工程设计中多采用在近域地基设置合适的人工边界(黏性边界、黏弹性边界、透射边界、旁轴边界、远置人工边界、无穷远方法等)模拟地震动能量向无限远域逸散的影响。水工结构设计计算中,可结合工程实际情况及动力分析的数值求解方法选择合适的人工边界处理方式。

水工建筑物的抗震计算应当考虑地震的运动特征和建筑物的动态特征,因此,应当以动力分析为基础。对于工程抗震设防类别为甲类的混凝土建筑物都应采用动力法进行抗震计算。考虑到目前土石坝坝料的非线性特性、抗震计算中的动态本构关系、非线性动力分析方法及相应的抗震安全性判别准则等都尚在继续探讨中,暂时还难以列入规范作硬性规定,因此仍以拟静力法为主进行抗震计算。此外,根据我国的具体情况,对于量大面广的中小型水工建筑物,目前也只能按拟静力法进行抗震计算,通过把动力作用分析结果包括在静力作用中或对静力作用乘以等效动力放大系数等方法来考虑动力作用效应。

当考虑结构与水体相互作用时,由于水工结构与相邻水体间的动力相互作用较为显著,目前工程设计中,对于水体的动力影响,多采用忽略水体可压缩性的、与结构一起运动的附加质量产生的动水压力作用来模拟。

7.3 结构模型和分析方法

7.3.1 结构计算是结构分析的各种手段中最常用的方法。受力比较明确、形体较简单的结构,一般用计算进行分析就可以得到较

为满意的结果。计算分析可采用不同理论、不同精度的各种方法,根据结构的具体特点选用。在结构设计中,计算方法应以各类水工结构设计规范中所规定的方法为基本方法,并以此种计算方法进行可靠性分析,其他方法可作为补充和论证。《水工混凝土结构设计规范》DL/T 5057、《混凝土重力坝设计规范》DL 5108、《水电站压力钢管设计规范》DL/T 5141 等水工结构设计规范均明确规定了各种极限状态设计的极限状态方程。

7.3.2 建立结构计算模型,一般都要对结构原型进行适当的简化,考虑决定性因素,忽略次要因素,并合理考虑构件及其连接,以及构件与基础的力-变形关系等因素。结构计算应根据不同极限状态的要求,选择能较确切地反映结构性能的计算模式。由于水工结构从施工到运行受多种复杂因素的影响,计算模式的不定性难以避免。产生不定性的主要原因是所采用的基本假定、计算公式和计算图形等与实际有一定的差异。如,在建立计算公式过程中,常采用理想弹性、塑性、匀质性、各向同性、平面变形等假定;用简单的应力图形代替实际的应力分布;用理想的简支、固端等典型边界条件代替实际边界条件;用线性方法简化计算表达式等。这些近似的处理与实际具有一定的差异。因此,为了减少计算模式的不定性,在结构极限状态设计表达式中所选用的计算模式应尽可能接近实际。

7.3.3 作用效应和结构抗力计算模式的不定性,主要是指计算中采用的基本假定和计算公式的不精确性等引起的变异性。它是个随机变量,可用附加变量反映。由于直接获得统计资料并确定其统计参数和分布比较困难,故本条提出了确定计算模式不定性附加变量统计参数的原则。

作用效应和结构抗力的计算模式不定性,对于小型结构构件,可通过破坏试验研究确定;而对于大型结构,由于无法进行破坏试验,可以根据工程经验综合分析确定。

7.3.4 在许多情况下,结构变形会引起几何参数名义值产生显著

变异。一般称这种变形效应为几何非线性或二阶效应。如果这种变形对结构性能有重要影响,原则上应与结构的几何不完整性一样在设计中加以考虑。

7.3.5 当结构的材料性能处于弹性状态时,一般可假定力与变形(或变形率)之间的相互关系是线性的,可采用弹性理论进行结构分析。在这种情况下,分析比较简单,效率也比较高;当结构的材料性能处于弹塑性状态或完全塑性状态时,力与变形(或变形率)之间的相互关系比较复杂,一般情况下都是非线性的,这时宜采用弹塑性理论或塑性理论进行结构分析。

7.3.6 结构在动力作用下产生较大加速度时,惯性力在结构分析中的影响往往不能忽略。结构动力分析主要涉及结构的刚度、惯性力和阻尼。动力分析刚度与静力分析所采用的原则一致,尽管重复作用可能产生刚度的退化,但动力影响亦可能引起刚度增大。惯性力是由结构质量、非结构质量和周围水流、空气、岩土等附加质量的加速度引起的。阻尼可由许多不同因素产生,其中主要因素有以下几项:

- (1)材料阻尼,如源于材料的弹性或塑性特性。
- (2)连接中的摩擦阻尼。
- (3)非结构构件引起的阻尼。
- (4)几何阻尼。
- (5)岩土材料阻尼。
- (6)空气动力和流体动力阻尼。

对于强烈地震时的动力反应,一般需要考虑循环能量衰减和滞回能量的消失。

7.4 试验辅助设计

7.4.1、7.4.2 试验辅助设计(简称试验设计)是确定结构和结构构件抗力、材料性能、岩土性能以及结构作用和作用效应设计值的一种方法。该方法以试验数据的统计评估为依据,与概率设计和

分项系数设计概念相一致。在下列情况下可采用试验辅助设计：

(1)规范没有规定或超出规范适用范围的情况。

(2)计算参数不能反映工程实际的特定情况。

(3)现有设计方法可能导致不安全或设计结果过于保守的情况。

(4)新型结构(或构件)、新材料的应用或新设计公式的建立。

(5)规范规定的特定情况。

对于新技术、新材料等,在工程应用中应特别慎重,可能还有其他政策和规范要求,也应遵守。

8 分项系数概率极限状态设计方法

8.1 一般规定

8.1.1 本条由原标准第 7.0.1 条和《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153—2008 第 8.1.1 条内容合并而成。尽管概率极限状态设计方法全部更新了结构可靠性的概念与分析方法,但是由于直接采用概率极限状态方法进行设计比较复杂,因此,推荐分项系数极限状态设计为实用方法。这样比较容易和广大设计人员以往长期使用而且熟悉的表达形式一致,设计计算也易于进行。与单一安全系数表达式不同,它是由一组分项系数和设计代表值所组成,反映了由各种原因产生的不定性的影响。各种分项系数均是根据可靠度分析并与规定的目标可靠指标相对应确定的。

概率极限状态设计方法必须以统计数据为基础,考虑到对各类工程结构所具有的统计数据在质与量两个方面都可能有很大差异,在某些领域根本没有统计数据,因而规定当缺乏统计数据时,可以不通过可靠指标 β , 直接按工程经验确定分项系数。

8.1.2 参照原标准第 7.0.2 条作适当的修改而成。分项系数是在分项系数极限状态设计式中,考虑工程结构的设计使用年限、安全级别、设计状况、作用和材料性能的变异性以及计算模式不定性等与目标可靠指标相联系的系数。

分项系数的设置能保证各种水工结构设计的计算可靠指标最佳地逼近目标可靠指标,其误差绝对值的加权平均值也为最小。这些分项系数概念明确,在设计式中作用清楚,使用简便。

基本变量的分项系数是代表值(标准值)与设计值之比,理论上设计值是“设计验算点”处的变量值。但对于不同的结构、不同的作用及组合、不同的材料等,设计验算点也是不同的,因而严格

按验算点确定分项系数是不现实的。根据长期的设计经验,本标准在设计验算点附近选定材料和作用的设计值,据此来计算分项系数。对于每一个材料和作用基本变量的分项系数仅考虑其自身的变异性,这样的分项系数概念比较明确。基本变量的分项系数可由有关方面的专家分别研究确定。由于作用、材料分项系数与结构形式无关,因此本条提出了确定分项系数的第一款和第二款,即:同一种作用,在不同水工结构中宜基本采用相同分项系数值;同一种材料性能,在不同的水工结构中宜采用相同分项系数值。

结构系数为考虑结构计算不定性并与目标可靠指标或目标可靠性(在套改和校准时采用的旧标准要求的安全系数)相联系的系数,这就使设计人员比较容易理解。

8.1.3 结构重要性系数 γ_0 是考虑水利水电工程结构及构件破坏后果的严重性而引入的系数。我国的工程结构,除铁路桥涵结构的安全级别均为Ⅰ级外,其他如房屋建筑结构、公路桥涵结构、港口工程结构均分为三级。以安全级别为Ⅱ级的结构构件取 $\gamma_0 = 1.0$,对于安全级别为Ⅰ级和Ⅲ级的结构构件分别取 1.1 和 0.9。可靠度分析表明,安全级别为Ⅰ级和Ⅲ级的结构构件可靠指标较安全级别为Ⅱ级的结构构件分别增减 0.5 左右,与本标准第 4.3.16 条的规定基本一致。考虑不同投资主体对建筑结构可靠度的要求可能不同,因而允许结构重要性系数 γ_0 分别取不低于 1.1、1.0 和 0.9。

作用分项系数 γ_1 是用来考虑作用对其标准值的不利变异的系数,它没有考虑因施加于结构上的作用换算成结构上的作用效应时的计算不定性。因为这种计算不定性和结构的形式有关,特别是水工结构的多样性和复杂性,使得这些结构上的作用效应计算不定性相差很大,若作用分项系数再考虑这种不定性,就可能造成同一种作用在不同结构上将会有不同的作用分项系数值,使用上也不方便,所以本标准中不考虑作用效应计算不定性的影响。

材料性能分项系数 γ_m 是用来考虑试件材料或岩、土试件性能对其标准值的不利变异,是从材料试件的试验统计资料出发,考虑试件材料性能本身的变异性,反映试件材料性能变异的系数。和作用分项系数一样,没有考虑试件材料性能换算成结构中材料性能的不定性,也没有考虑计算结构抗力时的计算不定性。因此,只要材料相同,在不同的结构中也完全可以采用相同的材料性能分项系数。

设计状况系数 ψ 是用来考虑在不同的设计状况下可以有不同的可靠度水平的系数。

结构系数 γ_d 是在分项系数极限状态设计式中用来考虑作用效应计算和抗力计算不定性以及作用、材料性能分项系数不能完全考虑的其他各种变异性的系数。不同的水工结构或同一结构在不同受力状态下,它们的抗力计算不定性和作用效应计算不定性是不同的,有时差别较大。因此,为了保证各种水工结构在相同的设计状况下有相同的可靠度,需要对不同结构采用不同的结构系数。这个系数应由各专门规范在可靠度分析后加以确定。

作用分项系数、材料性能分项系数及其标准值共同包含了一部分安全储备,对应于规定的目标可靠指标的其余安全储备,由结构系数承担。通过结构系数将分项系数极限状态设计与概率极限状态设计联系在一起。

8.2 承载能力极限状态设计

8.2.1 根据一般水工建筑物或结构构件承载能力极限状态大体分为三种不同性质的状态,设计时应采用不同的设计表达方式以及与之相应的分项系数。

8.2.2~8.2.6 这些条文是参照《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153-2008 对原标准第 7.0.4 条的修改和补充。另外,为了叙述的方便,将承载能力极限状态的设计表达式分层次展开,形式与原标准略有不同。

在 8.2.2 条中,增加了结构或其中一部分作为刚体失去静力平衡的承载能力极限状态的设计表达式和地基的破坏或过度变形的承载能力极限状态设计的内容。关于地基的破坏或过度变形的承载能力极限状态设计,本标准明确可采用分项系数法,也可以采用容许应力法,这种包容性是因为在这一方面统计资料还不够充分用来进行统计分析。

本次修订时,参照《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153—2008,将 $S_d(\cdot)$ 改称为“作用组合的效应设计值函数”,并增加说明“当作用与作用效应按线性关系考虑时”的计算表达式,这样在理论上更为合理。同时,在设计表达式中,增加了预应力这一作用。

在考虑偶然组合时,一般可变作用采用标准值。但对某些与偶然作用同时出现的可变作用标准值也可适当折减。例如在校核洪水时,挡水坝计算波浪高度的风速值可比正常蓄水位时的风速值小。

8.2.7 在偶然作用下,有时结构的抗力会受到偶然作用的影响而改变,这在各专业设计规范中均应明确规定。例如,材料的瞬时强度较慢速加载为高。

8.3 正常使用极限状态设计

8.3.1 本条是对原标准第 7.0.5 条的修改。主要修改如下:

(1)原标准规定结构或结构构件的正常使用极限状态设计分别按作用效应的短期组合和长期组合的设计表达式计算,且在作用效应的长期组合中的可变作用标准值应乘以小于 1.0 的长期组合系数 ρ 。由于在本标准第 4.3.5 条条文说明所说的原因,本次修订时改为“按作用的标准组合或标准组合并考虑长期作用的影响”,不再区分作用效应的短期组合和长期组合。

(2)在作用中增加了预应力作用 P 。

(3)在设计表达式的右边直接给出正常使用极限状态的功能限制值,不再出现结构系数。

8.4 分项系数确定

8.4.2 各类水工结构设计时,为达到规定的目标可靠度指标,在相应的结构设计规范中规定了设计状况系数 ψ ,如《水工混凝土结构设计规范》DL/T 5057、《水电站压力钢管设计规范》DL/T 5141—2001、《混凝土重力坝设计规范》DL 5108 等。

8.4.3 作用的设计值一般宜在设计验算点附近选用。设计验算点是满足结构或结构构件极限状态方程与结构失效概率相对应的一组基本变量值。若在设计验算点附近选用有困难时,可参考以往经验分别选定为其概率分布的某一分位值,例如选 0.99865 的分位值(所谓的“ 3σ ”原则)。

8.4.4 计算材料性能分项系数值时,若在设计验算点附近选用有困难时,可参考以往经验选定其概率分布的某一分位值。例如,钢筋强度的设计值可采用 $\mu_m - 2\sigma_m$ 。

9 可靠性管理

9.0.1~9.0.6 参照《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153—2008 有关条文设置。结构达到规定的可靠性水平是有条件的,结构可靠度是在“正常设计、正常施工、正常使用”条件下结构完成预定功能的概率,本节从实际情况出发,对可靠性管理作出了具有可操作性的规定。水工结构的设计应符合《水工建筑物荷载设计规范》DL 5077、《水工建筑物抗震设计规范》DL 5073 等现行规程规范的规定。

S/N:1580242·213



9 158024 221305 >



统一书号: 1580242·213

定 价: 24.00元