

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.02.020

中美建筑结构可靠度体系的对比研究

王圆, 潘英

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: 通过对比美国国家标准局《为美国国家标准 A58 拟定的基于概率的荷载准则》与我国现行可靠度设计标准(GB 50068—2001 和 GB 50153—2008)的有关规定, 分别从可靠度水平的度量指标、可靠度水平的设置原则、影响结构可靠度的不定因素、可靠指标的量值、保证工程可靠度水平的举措等方面对比分析中美两国可靠度体系的异同, 为工程概率安全分析以及国内规范的修订提供参考依据。

关键词: 可靠度; 可靠度指标; 极限状态; 美国规范

中图分类号: TU318

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2015)02-0107-04

Comparative Research on Reliability Design Between Chinese and American Structural Design Specification

WANG Yuan, PAN Ying

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: A comparison of reliability design was studied between <Developments of a probability based load criterion for American national standard A58: building code requirements for minimum design loads in buildings and other structures> and Chinese code for reliability design (GB 50068—2001 and GB 50153—2008). It is analyzed similarities and differences of five aspects, such as the definition of reliability, the principle for reliability set, the influence factor, the measurement for reliability index and the method to ensure the reliability level. The conclusions can be referenced for probabilistic safety analysis (PSA) and structure design specification revising in the future.

Key words: reliability; reliability index; limit stats; American code

随着我国经济的迅速发展, 各行各业都得到了蓬勃的发展, 工程建设行业也迈向了国际市场。国外先进标准的应用往往成为涉外建筑工程标书中的要求。而其与中国土建设计方法在本质上异同却是设计人员普遍关心又迫切想要了解的。中国企业对国外规范的了解程度, 直接影响中国企业的对外竞争力的高低。为了解中美规范的异同, 本文对中美可靠度体系展开对比。美国的最小设计荷载规范(ASCE 7)^[1]前身是 1980 年版的美国国家标准 A58^[2-3](ANSI A58.1—1980 D)。其所推荐的荷载(分项)系数和荷载组合均采用了以概率理论为基础

的结构极限状态设计方法, 综合材料、极限状态、荷载、结构类型等因素, 并在统计数据分析的基础上, 考虑一定的目标可靠度指标而得出。中国的建筑结构可靠度理论是借鉴了国际标准 ISO 2394: 1998《结构可靠度总原则》, 从而采用了与美国标准不一样的极限状态设计模式以及目标可靠度值。本文将结合中国的可靠度国家标准^[4-5], 对中美建筑结构的可靠度进行对比研究。讨论的范围限于对房屋建筑和类似结构的承载力极限状态设计方法。

1 可靠度的度量指标和可靠度水平的设置原则

1.1 可靠度和可靠指标

可靠度, 是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。即结构在规定的设计

收稿日期: 2014-12-01

作者简介: 王圆(1985), 女, 吉林四平人, 工程师, 硕士, 主要从事发电工程电力设计研究工作(e-mail) wangyuan@gedi.com.cn.

使用年限内,且以正常设计、正常施工、正常使用为条件,不考虑人为过失的影响下完成预定功能的概率。美国规范中将可靠度定义为未达到任何极限状态的概率。中美的可靠度均可用可靠指标 β 来表达,见公式(1),并考虑了结构构件的安全等级、失效模式和经济因素等确定。

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_s}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_s^2}} \quad (1)$$

式中: μ_s 、 σ_s ——结构构件作用效应的平均值和标准差; μ_R 、 σ_R ——结构构件抗力的平均值和标准差。

可靠指标的功能主要有:其一,是度量结构构件可靠性大小的尺度;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数据。为此,不同安全等级和失效模式的可靠指标宜适当拉开档次,参照国内外对规定可靠指标的分级,规定安全等级每相差一级,可靠指标取值宜相差0.5。

1.2 可靠度水平的设置原则

美国结构检验过程要满足下面的设计准则:

$$\phi R_n \geq \sum_{i=1} \gamma_i Q_i \quad (2)$$

式中: R_n ——结构的抗力; Q_i ——荷载效应; ϕ ——抗力系数,反映的是抗力的不定性; r_i ——荷载系数,反映的是荷载效应的变异性。

此极限状态设计方法又称为“荷载系数和抗力系数设计法”(LRFD)。控制可靠度的思路是:对于荷载组合,规范ASCE 7推荐采用的通用荷载系数,能无需调整而可适用于各种不同的结构材料;不同材料规程仅需采用不同的抗力系数 ϕ ,而使得结构达到目标的安全度水准。从而采用统一的荷载组合和荷载系数,又能允许不同材料、不同极限状态、不同构件型式、不同荷载种类之间有不同的可靠度水准。

中国规范GB50068—2001的7.0.1条款指明了结构构件的极限状态设计表达式包含了荷载分项系数、组合值系数、抗力分项系数(材料性能)和结构重要性系数。相应得到荷载的标准值、组合值、频遇值及准永久值。其同样能反映荷载效应和抗力的变异性。

2 影响可靠度的不定因素

GB 50153—2008^[5]的第5章和第6章提到影响结构可靠度的不定因素包括作用的不定,环境影响

的不定,设计基准期等时间参数的不确切取值,材料和岩土的性能变异,几何参数的变异。GB50513—2008的第7章中提到,结构计算模型的不定性应在极限状态方程中采用一个或几个附加基本变量来考虑。附加基本变量的概率分布类型和统计参数,可通过按计算模型的结果与按精确方法的计算结果或实际的观测结果相比较,经统计分析确定,或根据工程经验判断确定。影响结构构件抗力不确定性的因素包括材料性能的不确定性、几何参数的不确定性和计算模式的不确定性^[6]。除此之外,工程质量和最不利荷载效应组合也是影响可靠度指标的因素^[7]。

由美国国家标准局于1981出版的《为美国国家标准A58拟定的基于概率的荷载准则》^[3]指出可靠度指标 β 值变化很大,取决于结构荷载的类型、结构材料的类型、极限状态和结构元件的种类等。

作用可分为直接作用和间接作用,其中,直接作用即荷载,间接作用包括地面运动、基础沉降、材料收缩、温度变化等。环境影响是指能使结构材料随时间逐渐恶化的外界因素,与作用一样,它们也要影响到结构的安全性和适用性。作用按时间的变异可分为:永久作用、可变作用和偶然作用。各种作用的对比详见表1。

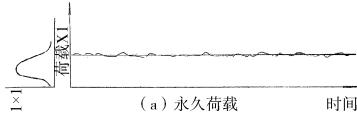
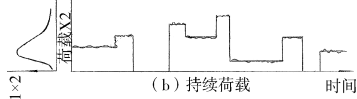
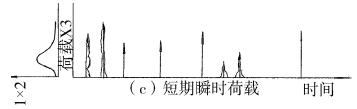
上述的各种影响因素对于设计人员来讲,直接反应在荷载系数的取值当中。一旦确定了荷载系数,实际的设计可靠度可通过适当选择抗力系数 ϕ 来调整。值得注意的是,中美两国在荷载系数的取值上有较大的不同。本文中仅对恒载、活载、风载、雪荷载及地震荷载的组合进行对比分析,详见表2。表2中仅列出部分中国规范中的基本组合,且考虑设计使用年限为50年,其调整系数 $\gamma_L=1.0$ 。

3 中美可靠指标的量值的对比

虽然中美在可靠性设计上采用的基本思想和设计方法是相同的,但具体的取值则各有差异。中国的可靠度在安全等级和破坏类型的条件下,给出了对应的可靠度指标。美国的可靠性设计在针对不同构件,不同材料等方面,其可靠度的取值和失效概率也会有所不同。美国的可靠度指标更加细化。若要继续探讨中美可靠度的具体差异情况,需根据实际情况选择相应的材料规程进行对标。也有学者提出可采用相当安全系数^[8]来对比中美结构的可靠度设置水平。

表1 各种荷载作用的对比

Table 1 Comparative of Different Kinds of Load

分类	特点	模型	样本函数的图像及特点	举例
永久作用	统计规律与时间参数无关, 其随机性表现在空间位置上的差异	随机变量概率模型	 <p>(a) 永久荷载</p> <p>平行于时间轴的一条直线</p>	结构自重
可变作用	统计规律与时间参数有关	随机过程概率模型	 <p>(b) 持续荷载</p> <p>荷载一次出现的持续时间 $\tau < T$, 在设计基准内的时段数 $\gamma = 1$, 且在 T 内至少出现一次, 平均出现次数 $m = pr \geq 1$。</p>	楼面活荷载、风荷载
偶然作用	设计基准期内不一定出现, 而一旦出现其量值很大。	建立符合其特性的概率模型, 如脉冲等。	 <p>(c) 短期瞬时荷载</p>	爆炸、撞击、罕遇地震

注: T ——设计基准期; τ ——荷载一次出现的持续时间; γ ——设计基准期内的时段数。

表2 中美荷载组合系数取值对比

Table 2 Load Factor of ASCE and GB 50009—2012

组合系数	荷载作用				
	D	L	S	W	E
ASCE 7	1.4				
	1.2	1.6	0.5		
	1.2	1.0	1.6		
	1.2		1.6	0.5	
	1.2	1.0	0.5	1.0	
	1.2	1.0	0.2		1.0
	0.9			1.0	
	0.9				1.0
GB 50009—2012	1.35				
	1.2	1.4			
	1.2			1.4	
	1.2	1.4	0.98		
	1.2	1.4		0.84	
	1.2	1.4	0.98	0.84	
	1.2	0.98		1.4	
	1.2		0.98	1.4	
	1.2	0.98	0.98	1.4	
	1.35	0.98			
	1.35		0.98		
	1.35	0.98	0.98		
	1.2/1.0			0.28	1.3
1.2/1.0				1.3	

ASCE 7-10 的表格 C. 1. 3. 1a 针对建筑物的四个分类 (Occupancy Category) 列出了三个破坏类型的可接受的最大年失效概率和可靠度指标。这个工作状态是指不包括地震的其他强度设计下的荷载组合。其中可靠度指标 β 的量值见表 3。

表3 可接受的可靠度指标 β (美国)

Table 3 Acceptable Reliability Index β (ASCE7-10)

承载力极限状态的破坏类型	ASCE7-10 的 Occupancy Category →重要性增加			
	I	II	III	IV
失效不是突然发生, 不导致大范围的破坏	2.5	3.0	3.25	3.5
失效要么是突然发生, 要么是导致了大范围的破坏	3.0	3.5	3.75	4.0
失效是突然发生, 而且导致了大范围的破坏	3.5	4.0	4.25	4.5

另外, 《为美国国家标准 A58 拟定的基于概率的荷载准则》里第 4 节的总结里提到可靠指标随着荷载组合的不同而变化, 对于包括风或地震在内的荷载组合, 可靠指标小于仅包括重力荷载的荷载组合。第 6 节的总结里提到可靠度指标 β 变化很大, 取决于结构荷载的类型、结构材料的类型、极限状态和结构构件的种类。所以荷载规范通过综合考虑荷载组合系数和抗力系数, 使得可靠度指标达到一个较稳定的相对一致的目标值。

对比美国的可靠度水准, 结合中国 GB 50068—

2001 的表格 1.0.8 和表格 3.0.11, 如表 4 指标, 该量值为结构构件承载能力极限状态(不考虑偶然状况)的可靠指标。对于脆性破坏, 重要的建筑, 我国的可靠度指标为 4.2, 而美国的可靠度指标为 4.5, 比中国的略高。且美国规范对于结构的重要性分类较中国规范更细化。

表 4 中国结构构件承载能力极限状态可靠度指标 β

Table 4 Reliability Index β For Ultimate Limit State (GB 50153-2008)

承载力极限状态的破坏类型	次要的建筑	一般的建筑	重要的建筑
延性破坏	$\beta=2.7$	$\beta=3.2$	$\beta=3.7$
脆性破坏	$\beta=3.2$	$\beta=3.7$	$\beta=4.2$

我国规范中还给出了正常使用极限状态的可靠度指标: 按可逆程度, 可靠度指标取值为: 0 ~ 1.5。对可逆的正常使用极限状态, 其可靠指标取为 0, 对不可逆的正常使用极限状态, 其可靠指标取为 1.5。值得注意的是, 这里“0”意味着达到正常极限状态的概率可为“0”。

对于钢结构, 美国规范通过仔细地校核了许多设计情况的可靠度指标以后, 在选择目标可靠度上, 可以确认为表 5 所列的有代表性的数值。中国规范的可靠度指标详见表 6^[6]。从表 5、表 6 可见, 可靠度水准与荷载组合密切相关, 选用的最不利荷载组合不同, 其可靠度指标的取值是不同的。恒载 + 活荷载组合的可靠度指标高于恒载 + 风荷载的可靠度指标。美国规范的钢结构可靠度指标略小于我国规范中可靠度指标的取值。

表 5 可靠度指标 (A58)

Table 5 Reliability Index β (A58)

承载力极限状态的荷载组合	目标可靠度指标
恒载、活荷载	$\beta=3.0$
恒载、雪荷载	$\beta=3.0$
恒载、活荷载、风荷载	$\beta=2.5$
恒载、活荷载、地震荷载	$\beta=1.75$

表 6 可靠度指标 (中国)

Table 6 Reliability Index β (Chinese)

承载力极限状态的荷载组合	目标可靠度指标
恒载、活荷载	$\beta=3.67$
恒载、雪荷载	$\beta=3.54$
恒载、风荷载	$\beta=2.91$

4 结论

综上所述, 中美建筑结构可靠度设计的异同有以下几点:

1) 中美的荷载系数和荷载组合均基于概率极限状态设计方法; 参照国内外对规定可靠度指标的分级, 规定安全等级每相差一级, 可靠度指标取值宜相差 0.5。

2) 为使结构达到预期的安全水平, 采用不同的荷载组合和荷载系数。美国规范中采用抗力系数和荷载系数, 中国规范中还将荷载系数分为分项系数、组合值系数、频遇值系数及准永久值系数等, 其同样能反映荷载效应和抗力的变异性。

3) 影响可靠度的因素包括作用的不定, 环境影响的不定, 设计基准期等时间参数的不确切取值, 材料和岩土的性能变异, 几何参数的变异等。中美两国在荷载系数的取值上有较大的不同。

4) 中国的目标可靠度指标的变化范围是 2.7 ~ 4.2。美国的的目标可靠度指标的变化范围是 2.5 ~ 4.5。美国的可靠度取值分类更细化。

5) 恒载 + 活荷载组合的可靠度指标高于恒载 + 风荷载的可靠度指标。美国规范的钢结构可靠度指标略小于我国规范中可靠度指标的取值。

参考文献:

- [1] ASCE/SEI 7-10, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures [S]. American Society of Civil Engineer, 2010.
- [2] American national standard A58-1980: Building Code Requirements for Minimum Design Loads in Buildings and Other Structures [M].
- [3] 美国国家标准局. 美国国家标准 A58 拟定的基于概率的荷载准则 [M]. 陈定外, 邵卓民译. 中国建筑科学研究院结构研究所, 1981.
- [4] GB 50068—2001, 建筑结构可靠度设计统一标准 [S].
- [5] GB 50153—2008, 工程结构可靠性设计统一标准 [S].
- [6] 贡金鑫, 魏巍巍. 工程结构可靠性设计原理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [7] 欧进萍, 侯钢领. 建筑结构设计可靠度的影响因素与比较研究 [J]. 建筑科学. 1999, 15(5): 51-54.
- [8] 李健祥, 侯建国. 中美混凝土结构设计规范安全度设置水平的比较研究 [J]. 武汉大学学报(工学版). 2008(41): 69-72.

(责任编辑 林希平)