

《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB50068—2001)的技术合理性与依据

李明顺 胡德堃 史志华

(中国建筑科学研究院 北京 100013)

[提要] 简要回顾了我国建筑结构可靠性设计的历史沿革,介绍了以概率为基础的极限状态设计方法的基本原则和可靠度水准的设置依据,以及这一设计方法在国际上的发展情况,澄清了一些模糊认识,同时对该方法与日渐兴起的“以性能为基础”的建筑结构设计之间的关系提出了作者的思考。

[关键词] 建筑结构 可靠性 可靠指标 失效概率 校准法

This paper reviews the history for the reliability design of building structures of our country. Basic principles of the probability based limit state design method and reliability levels of building structures are introduced. The development of this method in the world is also mentioned. Some fuzzy view points have been cleared away. Finally, the relationship between probability based method and performance based method has been discussed.

Keywords building structures; reliability; reliability index; probability of failure; calibration method

一、我国建筑结构可靠度设计标准的回顾

建筑结构的可靠度直接关系到房屋建筑使用者的生命财产安全,是历来建筑结构设计标准必须首先面对和需要审慎解决的重大课题。建筑结构可靠度也是一个国家综合性技术经济政策问题,实质是选择一种安全与经济相对最佳的平衡,绝对不是从安全或经济任何单一角度所能解决的。我国在《建筑结构设计统一标准》(GBJ68—84)发布以前虽然没有专门的国家标准,但有关建筑结构可靠度的设计规定在建筑结构荷载规范以及各种材料的结构设计规范中还是明确的,并放在最重要的地位上。

新中国建国初期,我们无条件也没有可能专门开展对建筑结构可靠性设计问题的研究,在当时历史背景下顺理成章地全盘套用前苏联“三系数”极限状态设计方法(“三系数”指超载系数、材料匀质系数、工作条件系数),应当承认该设计方法在当时具有一定的先进性,它首次引进了极限状态的概念,部分地融进了概率概念,该方法也是经济的。“三系数”极限状态设计法在推行中建筑工程质量水准总体是好的,但也曾在我国工业建筑以自重为主的屋盖结构上出现过事故。

20 世纪 70 年代初,原国家建委布置修订各材料结构设计规范。在当时的历史条件下,强调所谓“独立自主、自力更生”,各材料结构设计规范修订组在结构可靠性设计方法上各行其是,如砌体结构规范采用“大老 K”方法,混凝土结构规范采用“中老 K”方法,钢结构规范和木结构规范则采用一串“小老 K”构成的容许应力设计方法,其结果不仅给设计人员带来诸多不便,

也给学校教学带来混乱,社会反响强烈。“文革”结束后,当时的主管部门下达给中国建筑科学研究院一个重点规范课题——“结构安全度与荷载组合”,中国建筑科学研究院会同各材料结构设计规范管理组等近百个单位参加课题研究,旨在解决各材料结构设计规范在结构安全度与荷载组合问题上存在的混乱。大家深知用老观念、老框架、老经验根本无法解决各材料结构安全度设计方法不统一的问题,只有解放思想,借鉴国际上一切有益经验与研究成果才能解决这一问题。

美国土木工程学会结构安全度委员会早在 20 世纪 50 年代就开始研究安全度的定义,得出以概率概念定义安全度方法比较科学的研究结果;加拿大标准协会提出以概率理论编制新的钢结构规范;美国 C. Allin Cornell 教授系统地提出一次二阶矩简化实用概率设计方法;国际标准化组织 ISO 在 20 世纪 80 年代初发布的《结构可靠性总原则》第 1 版,也提出基于概率的极限状态设计方法的国际标准;20 世纪 70 年代初,由欧洲混凝土委员会(CEB)倡议,成立了有欧洲混凝土委员会、欧洲钢结构大会、国际房屋建筑委员会、国际预应力协会、国际桥梁与结构工程协会、国际材料试验实验室联合会等六大国际组织参加的国际“结构安全度联合委员会(JCSS)”,并共同起草了一套“国际统一标准规范”的国际体系文件,其第 1 卷为“各类结构和各种材料的共同统一规则”,所有这些资料、动态、成果对我们很有启发作用,使我们眼界大开。在课题组内,大家经过热烈深入地讨论,取得了以概率理论解决结构安全度和荷载组合问题的共识,并以此作为主攻方向。

当时面临的重大难题是收集、实测与分析各种各样的统计数据。在标准规范主管部门的支持下,各材料结构规范管理组织积极努力、分工负责,一方面取得了大量十分宝贵的统计数据,如楼面荷载的实测资料(住宅、办公楼、商店、轻工厂房),风雪荷载的记录,混凝土、钢、冷弯型钢、砌体、木结构材料强度及几何尺寸变异的统计数据等等,另一方面与高等院校统计数学老师结合,学习、掌握统计数学概念,并加以运用,以正确思路指导“结构安全度与荷载组合”的课题研究。首先明确理论与实践的关系,强调实践第一的观点。因为,确保结构安全是结构设计追求的首要目标,而不是理论上说得如何动听所能解决得了的问题。解决这个问题最宝贵的是长期实践获得的可靠经验,于是出现了以概率作为度量结构可靠性的尺度,而尺度大小取值却采用了以实践经验为基础的校准法。至于复杂与简单、精确与简化问题,因标准规范的研究旨在解决广大设计人员的设计实用问题,要求给予最大可能的简化。根据现阶段的研究水平,仍以截面的可靠度为出发点,作为相对比较的尺度,代替尚未进入实用阶段的结构体系可靠度;以随机变量最大值的随机变量模型偏安全地代替随机过程模型。

20 世纪 80 年代以来,借鉴国外先进经验,同时仍以国内实测统计资料为基础,立足国内大规模建设经验,形成了以概率理论为基础的建筑物可靠度设计方法——基于概率的极限状态设计方法,这是原《建筑设计统一标准》(GBJ68—84)的基本特点。该标准自 1984 年发布实施以来,在其指导下,于 20 世纪 80 年代末期相继完成了各材料结构设计规范的修订任务。按这批规范,全国设计建造了 100 亿 m^2 以上的各类建筑,说明上述设计方法是可行的。同时,在该标准的影响和国家工程建设标准主管部门的推动下,这套设计方法从房屋建筑领域扩大到铁路工程、公路工程、港口工程、水利水电工程领域,先后编制并批准发布了《工程结构可靠度设计统一标准》、《港口工程结构可靠度设计统一标准》、《铁路工程结构可靠度设计统一标准》、《水利水电工程结构可靠度设计统一标准》、《公路工程结构可靠度设计统一标准》。如此全方位地实施工程结构可靠度设计统一体系,可以不夸张地说,是我国改革开放政策在工程结构可靠度设计领域取得的重大科技进步。当然也要看到工程结构可靠度是一个复杂的科学技术问题,尚有许多攻关任务有待进一步攻克,有待进一步改进完善。

二、基于概率的极限状态设计方法的基本原则

1. 建筑结构的基本功能要求

建筑结构可靠与否是指其基本功能是否能正常运转

营工作,不能正常运转即为失效。故在论及建筑结构的可靠性之前,要首先界定建筑结构的基本功能要求。《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB50068—2001)要求结构在规定的设计使用年限内应满足下列功能要求:1)在正常施工和正常使用时,能承受可能出现的各种作用;2)在正常使用时具有良好的工作性能;3)在正常维护下具有足够的耐久性能;4)在设计规定的偶然事件发生时及发生后,仍能保持必需的整体稳定性。

2. 功能函数和极限状态方程

对每种功能应建立其功能函数和极限状态方程:

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

式中功能函数 $g(\cdot)$ 是由结构上的各种作用、材料性能、几何参数等基本随机变量 $X_i (i = 1, \dots, n)$ 构成的函数。

按极限状态设计,当符合下列要求时即表示可靠:

$$g(X_1, X_2, \dots, X_n) \geq 0$$

在基本变量的空间内,可以确定结构的可靠区,即 $Z = g(X_1, X_2, \dots, X_n) \geq 0$ 或失效区 $Z < 0$ 。

当功能函数中仅有抗力 R 和作用效应 S 两个综合基本变量且考虑极限状态方程为线性方程的简单情况时,结构极限状态设计应满足的要求可用下式表达:

$$g(S, R) = R - S \geq 0$$

此即“ $R-S$ 模型”,也是实际采用的模型。这是结构可靠或失效的模型问题。

3. 实用简化计算问题

这个问题如不解决,这套基于概率的极限状态设计方法还只能是空中楼阁。上述多变量的功能函数和极限状态方程是 n 维空间上的曲面,计算十分繁复,更何况从严格意义上讲许多基本变量不单是随机变量,而且是以时间为参数的随机过程,比较典型的如风作用。此外,还有基本变量之间是否相互独立,即是否考虑联合分布问题。比较全面考虑以上各种问题的精确方法可称为水准 3 概率极限状态设计方法。经过简化,降为水准 2、水准 1。我国采用的基于概率的极限状态设计方法是将功能函数和极限状态方程按两个综合基本变量考虑,即:

$$\begin{aligned} Z &= g_R(X_1, X_2, \dots, X_m) - g_S(X_{m+1}, X_{m+2}, \dots, X_n) \\ &= R - S \end{aligned}$$

假定 R 和 S 为统计独立时,失效概率为

$$P_f = \iint_{R-S < 0} f_R(r) f_S(s) dr ds$$

式中 $f_R(r)$ 、 $f_S(s)$ 分别为抗力 R 和作用效应 S 的概率密度函数。

为进一步实用简化,《建筑设计统一标准》

(GBJ68—84)采用改进的一次二阶矩验算点法,该方法也称为“考虑基本变量概率分布类型的一次二阶矩方法”。该方法首先由美国人 Cornell 提出,1976 年又经德国拉克维茨(Rackwitz)等改进为验算点法。即当基本变量不按正态分布时,计算失效概率或可靠指标时在极限状态验算点处采用当量为正态分布,并取当量正态分布的平均值和标准差进行计算。这个方法是 JCSS 在《结构统一标准规范的国际体系》(第一卷)附录中推荐采用的方法,其最大特点是失效概率计算可以考虑基本变量不同分布的影响,大大提高了计算的准确性。

很明显,经各种处理后, P_f 只是失效概率的运算值,并不等同于结构构件实际发生的失效概率,而是以实际发生的失效概率为逼近目标的概率运算值,其作用在于可作为各种结构可靠度相互比较的一个尺度。

4. 极限状态方程的数学-力学模型

由于近代科学技术的发展,常用的结构承载力计算已比较成熟,现行规范都有明确的极限状态设计表达式,这是基于概率的极限状态设计的基础,在此基础上需重点解决其可靠性设计问题。

5. 荷载的统计特性

收集基本变量的实测统计资料,求得其统计参数和可以接受的分布假设是推行这套设计方法的关键,也是工作量巨大的工作。在上级标准主管部门的领导、支持和推动下,依靠各材料结构规范管理组和建筑荷载规范管理组及其相关协作单位近百个,按统一要求,分别调查、实测和统计了恒荷载、民用楼面活荷载(办公楼、住宅、商店)、风荷载、雪荷载以及普通型钢、冷弯型钢、混凝土、钢筋、砖砌体、木材等强度变异和几何尺寸变异等基本数据,如楼面活荷载实测实量,从南到北,抽样近 10 万 m^2 ;对风、雪荷载统计了新中国主要城市有记录以来的气象数据;又如混凝土强度统计全国了 10 万个试块的试验结果,历时二年多完成了这项十分艰巨的工作。

此外,对下列随机变量样本进行了分布假设检验,其显著性水平统一取 0.05:1)恒荷载,在全国 6 大区 17 个省、市、自治区实测了 2 667 块大型屋面板、空心板、槽形板、F 形板、平板等钢筋混凝土预制构件的自重,以及 20 000 多 m^2 找平层、垫层、保温层、防水层等约 10 000 个测点的厚度和部分重度;2)办公楼楼面活荷载,抽取 127 个使用单位的 133 幢办公楼,2 201 间办公室,总面积 63 700 m^2 ;3)住宅,全国 10 个城市 566 间住宅,总面积 7 000 m^2 ;4)商店,全国 10 个城市 20 栋百货大楼 214 个销售部、柜台,总面积 25 200 m^2 ;5)风荷载,取全国 18 个省、市、自治区 29 个气象台、站共

656 年次的标准风速和风向记录,标准风速取离地面 10m 高度处自动记录 10min 的平均最大风速,由风速换算可得风压 s_0 雪荷载,取有雪的 16 个城市的气象台、站 384 年次的年最大地面雪压资料,同时考虑房屋积雪与地面雪压的差别。

6. 结构可靠度的尺度问题

任何一种科学技术的发展都需要有与之相适应的度量尺度。在建筑结构可靠性设计历史上曾用过安全系数度量结构的可靠度,在采用单一安全系数设计时,砌体规范对偏心受压构件安全系数 K 取 2.3,而混凝土结构规范对偏心受压构件安全系数取 1.55,但可靠指标计算结果,砌体偏压构件 β 为 3.32,而混凝土偏心受压构件 β 为 3.63,其可靠指标反而大于砌体结构,这说明安全系数虽然可以调整安全度的大小,但不能解决各规范之间以及规范内各部分之间的安全一致性问题,更不能作为衡量安全度大小的尺度。在结构构件进入极限状态设计阶段后,安全系数量度的粗糙与模糊越来越显示出其不适应性,结构分析方面的计算机化所带来的优越性被粗糙的、模糊的安全系数所掩盖,如各种可变荷载概率模型化和建筑本身的日益复杂,以及荷载多种组合和最不利组合,都无法用安全系数描述,笼统的安全系数绝对不能用破坏的安全倍数来解释,而要求对安全裕量的大小予以量化。因此这种笼统的安全系数的度量尺度势必会被历史所更新。新修订完成的《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB50068—2001)借鉴 1998 版的国际标准《结构可靠性总原则》(ISO2394:1998)将失效概率作为度量结构可靠性大小的尺度。该标准定义:建筑结构可靠性是建筑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;将建筑结构可靠度定义为建筑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。完成预定功能的概率越大,结构就越可靠,而不能完成预定功能的概率为失效概率,这种概率越小越安全,越大越不安全。采用这种定义较以往习用的定值的安全系数概念更加清晰,更加科学,是在可靠度(包括安全度)领域的一次重大进步。这个定义不是我们自己的杜撰,而是同国际标准接轨的结果。《结构可靠性总原则》(ISO2394:1998)中更加明确了结构可靠性的概率定义。

7. 规范采用的设计表达式

供设计人员直接使用的是将可靠指标转化为分项系数,如对承载能力极限状态设计,规范中实际采用的设计表达式为:

$$\gamma_0(\gamma_G S_{G_k} + \gamma_{Q1} S_{Q1_k} + \sum_{i=2}^n \gamma_{Qi} \psi_{ci} S_{Qi_k}) \leq R(\gamma_R, \gamma_{f_k}, \gamma_{a_k}, \dots)$$

式中: γ_0 为结构重要性系数; $\gamma_G, \gamma_{Q1}, \gamma_{Qi}$ 分别为永久

荷载、第 1 个和第 i 个可变荷载分项系数 S_{G_k} 为永久荷载标准值的效应 $S_{Q_{1k}}$ 为在基本组合中起控制作用的一个可变荷载标准值的效应 $S_{Q_{ik}}$ 第 i 个可变荷载标准值的效应 ψ_{ci} 为第 i 个可变荷载的组合值系数 $R(\cdot)$ 为结构构件的抗力函数 γ_R 为结构构件抗力分项系数 f_k 为材料性能的标准值 a_k 为几何参数的标准值。

上述设计表达式中各项指标的取值在有关规范中均有明确规定,不要求设计者计算失效概率和可靠指标。虽然将分项系数理解为分项安全系数也无不可,但在规范编制中如何确定各分项系数取值则要采用概率理论通过可靠指标分析确定。分项系数的取值,根据其 with 目标可靠指标相差为最小的条件确定,即:

$$I = \sum_i \sum_j \left\{ \frac{R_{kij}^* - R_{kij}}{R_{kij}^*} \right\}^2$$

式中 R_{kij}^* 为第 i 种结构构件在第 j 种效应比值下按目标可靠指标确定的结构构件抗力标准值 R_{kij} 为在同样情况下,根据分项系数确定的结构构件抗力标准值, $R_{kij} = \gamma_G S_{G_k} + \gamma_Q S_{Q_k}$ 。

综上所述,可靠度设计方法是制定技术合理又协调一致的结构设计规范的有效途径,在具体应用中已转化为各种材料结构设计规范中的分项系数设计表达式,当设计人员按照规范要求作设计时,就已经从设计上保证了规范对结构可靠度的要求,而无需计算可靠指标 β 。

三、校准法是实用简化的有效途径

如果认为以“完成预定功能的概率”为度量结构可靠性大小的尺度是合理的,那么可靠概率或失效概率取多少为适度则是一个复杂的问题,这个问题应当说已大大超出单纯的技术范畴。在建设部 1999 年 7 月召开的“建筑设计可靠度会议”上,建设部主管工程建设标准规范工作的郑一军副部长指出:“建筑结构可靠度问题首先不是一个怎么修订的问题,而是一个技术政策问题。也就是说,我们要从现在的技术经济水平出发,总结几十年来我们在这个问题上的经验和不足,充分吸取国内外的研究成果,来确定这项技术政策。我们到底在建筑结构设计要考虑多大的安全储备,在建筑结构的稳定性和耐久性上要为我们自己设置一个什么水平的标准,……,一开始就没有简单地把它看成是一个标准修订问题,而是一个牵涉到方方面面的技术政策的大问题。”“建筑结构可靠性水准不是可通过一般计算与所谓的优化或靠领导、专家拍板所能解决得了的问题,这是个关系经济社会的重大问题,标准规范所用的可靠性水准只能是通过总结长期工程实践经验得出并为社会公众接受的安全水准。国外有些

专家企图通过社会调查寻找社会公众可接受的安全可靠水准。当风险率取得很高,或者说失效概率很大,政府就会采取行政措施加以禁止,核电站安全壳的失效概率要保持在 10^{-6} 水准上,如果普通建筑结构的失效概率也要求如此小,则就过于保守了。究竟多少合适,这是一个经验积累的渐进过程,不是通过社会调查所能定量解决的。

在编制原《建筑结构设计统一标准》(GBJ68—84) 时采用了 JCSS 推荐的校准法选定目标可靠指标和失效概率。混凝土结构、钢结构、薄壁冷弯型钢结构、砌体结构、木结构按共同的建筑荷载设计模型和各自材料、几何尺寸统计参数、相同的计算原则,对各自的现行设计规范不同受力状态下构件可靠指标进行计算,得出在 $S_G + S_L$ (办公楼), $S_G + S_L$ (住宅), $S_G + S_W$ 组合下结构可靠指标的平均值。

建设部 1999 年 7 月召开的有 45 位专家参加的“建筑设计可靠度会议”指出:

(1)我国大量的工业与民用建筑实践表明,现行结构设计规范的可靠度指标,在正常设计、正常施工、正常使用条件下可以保证安全且较经济;

(2)当前出现的质量事故与规范规定的设计可靠度指标无关,而是由各种非正常的人为错误、违反规范要求造成的……;

(3)现行规范结构设计可靠度设定水平反映了我国几十年的实践经验,但随着国家经济发展和我国综合国力提高,专家们认为有必要对结构设计可靠度做适当调整。

会议对《建筑结构设计统一标准》修订组提出的可靠度调整方案进行讨论并提出了宝贵意见。新修订的《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB 50068—2001)和《建筑结构荷载规范》对建筑结构可靠度设计做出了以下主要调整:1)楼面活载标准值由 1.5kN/m^2 提高为 2.0kN/m^2 2)风、雪荷载标准值由“30 年一遇”提高为“50 年一遇”,但城市风沿高度变化的梯度风压,因城市建筑高度和密度加大,增加了 D 类地面粗糙度,使梯度风有所减小 3)在承载力能力极限状态设计时,基本组合中增加了一类永久荷载起控制作用的组合,此时永久荷载分项系数由 1.2 改为 1.35 4)改变遇风组合规则,凡是两个及以上可变荷载都存在组合问题,过去只遇风才组合是不合理的 5)材料分项系数由各材料结构规范规定,混凝土结构将混凝土材料分项系数由 1.35 提高为 1.4,取消了弯曲抗压强度 f_{cm} ,改用轴心抗压强度 f_c ,将 HRB400 级钢筋列为主导钢筋品种,砌体的材料分项系数按砌筑质量分别给予调整,同时取消了 75 号砖。

以混凝土结构构件为例,经以上调整,结构构件可靠指标约提高 0.6,可靠概率相当于提高了一个数量级。钢筋用量增加了 10%~20%。

综上所述,从制订标准规范角度看,校准法是目前实用简化的有效途径。

四、基于概率、基于性能的极限状态设计方法是国际结构可靠度设计的主要发展方向

1. 可靠性理论在国外编制设计规范中应用概况

(1)加拿大 20 世纪 70 年代,加拿大建筑结构规范转到极限状态设计,在国际上率先采用可靠指标 β 度量结构可靠度。加拿大对荷载、荷载组合、钢结构、钢筋混凝土结构在可靠度方面作了深入的分析工作。对荷载组合的分析表明,加拿大原规范在不同的荷载组合下,可靠指标分散性较大。对钢结构的分析表明,不同长细比的钢柱, β 分散性较大。对混凝土结构的分析表明,薄板、配筋率高的梁和配筋率低的梁, β 分散性较大。加拿大改进结构可靠度的目的是要使结构可靠度的分散性尽量缩小。

极限状态设计表达式为:

$$\alpha_D D + \gamma \phi [\alpha_L L + \alpha_W W + \alpha_T T] \leq R$$

式中:恒载系数 α_D 取 1.25,有利时取 0.85;活载、风载、温度作用系数 $\alpha_L, \alpha_W, \alpha_T$ 分别取 1.5, 1.5, 1.25;重要性系数 γ 不应小于 1.0,但当不易发生人员伤亡或其它严重后果时不应小于 0.8;组合系数 ϕ 当 L, W, T 只一个时取 1.0,二个时取 0.7,三个时取 0.6;抗力计算式中,问题由各种材料的结构规范解决。

(2)美国 上世纪 80 年代,美国国家标准局出了一本专刊 National Bureau of Standards Special Publication 577,名为美国国家标准 A58 以概率为基础的荷载准则的发展(A58 为当时美国荷载规范),由 Ellingwood 等四人署名,分别代表规范标准、钢结构、钢筋混凝土结构、可靠性理论四个方面。

该专刊分析了荷载和材料大量的统计数据,以此为基础,全面分析了当时美国规范的规定,得出的结论是美国的可靠指标 $\beta = 3.0$ (在重力荷载作用下)。以 $\beta = 3.0$ 为目标,优选荷载系数,得出 $1.2D + 1.6L$,考虑到 L/D 过小时,上述组合还不足以保证安全,因而增加了 $1.4D$,即 $1.2D + 1.6L$ 与 $1.4D$ 相比,谁大就按谁控制设计。

该专刊出版后的美国荷载规范,其荷载组合就用 $1.4D, 1.2D + 1.6L$ 等等。随后,美国钢结构规范也接受了美国荷载规范中所用的荷载组合及荷载系数,因此,美国钢结构是用了以概率理论为基础的设计方法(按容许应力设计者除外)。美国混凝土结构规范仍采用基于经验的 $1.4D + 1.7L$,且一直沿用到今天,但

这种情况很快将改变。美国 ACI318 委员会主席在国际混凝土 2001 年 6 月号上发表文章:从 ACI318—99 改变到 ACI318—02,表明 2002 年即将出版的 ACI318 在正文中将抛弃沿用多年的 $1.4D + 1.7L$,改用美国荷载规范规定的荷载组合及荷载系数。

(3)国际组织及欧洲规范 20 世纪 80 年代初,国际标准化组织 ISO 发布国际标准 ISO 2394《结构可靠性总原则》第 1 版,提出了基于概率的极限状态设计方法,最新版 ISO 2394:1998 更加清楚明确地肯定了基于概率的极限状态设计方法和以可靠指标 β 作为衡量可靠度的尺度。

20 世纪 70 年代末,JCSS 出了一本结构统一标准规范的国际体系第一卷,对各类结构和各种材料的共同统一规则进行了规定,其中提出了使用与失效概率 P_f 一一对应的可靠指标 β 来度量结构可靠度。

欧洲共同体委员会发起建立了一套设计房屋建筑和土木工程的协调一致的技术规则,后将此项工作交给欧洲标准化委员会。现在出版的欧洲规范都还是预规范,待成员国试用一段时间后再修订成正式规范。

Eurocode 1 设计基础,列出了分项系数设计表达式

$$1.35 G_k + 1.5 Q_{k1} + \sum_{i>1} 1.5 \psi_{0i} Q_{ki} \leq R$$

在该规范中同时引出了承载能力极限状态的目标可靠指标 $\beta = 3.8$ 。欧洲规范将永久荷载系数定为 1.35,可变荷载系数定为 1.5,又定出目标可靠指标为 3.8,因而这个目标可靠指标主要用于 Eurocode 2~9 各个结构设计规范的承载力计算,即确定各种材料系数(材料强度标准值与设计值之比)等,目的是使各种材料的各种结构有一个共同的目标可靠指标,但这并不是说按这一套欧洲规范设计出的结构都能自动地满足 $\beta = 3.8$ 的要求。这一套欧洲规范并不是完全从目标可靠指标定出来的,有很大的经验成分。欧洲规范强调指出,虽然可靠指标 β 与失效概率 P_f 有一一对应关系,但是 $\beta = 3.8$ 是一个概念上的数字,其主要用于发展一套协调的设计规则,而不是用于给出结构真实的失效发生率。

中国的目标可靠指标为 $\beta = 3.2$ (延性),3.7(脆性)。这决不是说美国安全度最低,欧洲最高,中国居中。初步分析表明,我国在可靠度计算中所考虑的因素与欧美不完全相同,同时在荷载的调查统计中对荷载值的处理也与欧美存在差异,而这些都对可靠指标的计算有较大影响,因此不能简单地用各国目标可靠指标的大小来衡量其可靠度水平。

(4)德国 据 2001 年出版的德国混凝土年鉴刊载,经过六年的工作,最新的德国荷载规范 DIN 1055(草案)和混凝土设计规范 DIN 1045(草案)已经屏弃

了其原来采用的单一安全系数的设计方法,而采用以可靠度概念为基础、以分项系数表达的设计方法,并以可靠指标 β 作为衡量可靠度的尺度,其中各项荷载系数、材料系数与欧洲规范相一致;在承载能力极限状态和正常使用极限状态设计中采用的各种荷载组合也与国际标准和欧洲规范一致,其中住宅、办公楼、商店等的组合值系数、频遇值系数及准永久值系数与欧洲规范也相同。

2. 以“性能为基础”的设计规范是今后发展的方向——亚太经合组织部分国家墨尔本、筑波、新加坡会议情况

20世纪90年代中后期,亚太经合组织部分主要国家在墨尔本、筑波、新加坡三次会议上主要讨论结构设计规范协调发展的方向问题,与会代表介绍各自国家规范的情况后,一致认为中国结构规范体系最接近ISO 2394《结构可靠性总原则》。会议内容简述如下:

(1)澳大利亚 澳大利亚结构规范是在可靠性原则的基础上发展的,它与ISO 2394《结构可靠性总原则》在极限状态设计原理、基本变量、不定性模型、以概率理论为基础的设计规则等方面是一致的。

(2)日本 日本建筑学会出版的房屋建筑的荷载,其中列出了二套设计方法:定值设计法和概率设计法。在概率设计法中,荷载系数是目标可靠指标的函数,但据日本代表的介绍,最大困难是如何确定日本的目标可靠指标,日本是在向这方面发展,但并未完成。

(3)以性能为基础”与“以概率为基础” 1997年底在筑波召开的会议,主题就是沿太平洋地区国家以性能为基础的设计,以“性能为基础”的设计规范是今后发展的方向。

“以性能为基础”的设计可概括为:1)按房屋建筑的用途和业主要求确定性能要求,即建立目标性能;2)选用合适的设计方法以满足目标性能;3)对每项性能进行评定,以判断设计出的房屋建筑是否满足目标性能。

将所有性能按承载能力和正常使用极限状态分类,承载能力极限状态会导致人生命损失或财产损失;正常使用极限状态对人生命及房屋建筑的影响较小,例如:美观上(如褪色)、功能上(如外墙的透潮湿)、心理上(如建筑物出现较大裂缝引起恐惧感)、生理上(如建筑物摇晃引起恶心)。

目标性能是用风险率表达的,显然,可靠度分析在评定性能上起主要角色。在美国和加拿大设计规范中,一些主要的可靠度分析研究工作已经做了。应用安全指标来表示风险率比应用失效概率来表示风险率更好。

五、结论

“以概率为基础”的极限状态设计方法的进一步发展是基于概率的“以性能为基础”的设计,这是因为:1)目标性能和性能评定都是以与失效概率一一对应的可靠指标予以量化的,性能的评价不是绝对的(结构绝对不破坏,梁挠度绝对不大于 $L/200$ 等,它们都是随机事件);2)以概率为基础的设计用极限状态设计法,以性能为基础的设计用的也是极限状态设计法,决不是另一套(如容许应力设计法等)。一个国家以概率为基础的设计发展好了,就为以性能为基础的设计打下了稳固的基础。反之,如果一个国家的设计是以定值为基础的,想不考虑可靠度问题而直接进行以性能为基础的设计,那是不现实的。

另一方面,“以性能为基础”的设计又不同于“以概率为基础”的设计,前者强调“目标性能”和最后达到的性能应该是全面的、清晰的,重点放在性能上,而认为计算方法是可选择的,只要能达到目标性能就行。这对于不重视目标性能,而把计算方法规定死了的做法,无疑又是一大改进,保证了结构应具有的性能。

我国在以性能为基础的极限状态设计方面实际上已迈出了坚定的步伐,今后的发展不是去取消以概率为基础的设计,回到定值设计,而是应继续前进,对结构的性能提出全面的、清晰的要求与量化,并通过设计予以满足。

参 考 文 献

1. 建筑结构设计统一标准(GBJ68—84).北京:中国建筑工业出版社,1985.
2. 建筑结构可靠度设计统一标准(GB50068—2001).北京:中国建筑工业出版社,2001.
3. 建筑结构设计可靠度会议纪要.建筑科学,1999(5).
4. 国际标准.结构可靠性总原则(ISO 2394:1998).工程建设标准化,1999(3).
5. 国际标准草案.结构混凝土性能与评定要求(ISO TC71, SC4).建筑科学,1999(5).
6. Development of a Probability Based Load Criterion for American National Standard A58.美国国家标准局专刊 577号,1980.6.
7. Eurocode 1. Basis of Design and Actions on Structures,欧洲标准化委员会,布鲁塞尔,1994.
8. ISO 2394. General principles on reliability for structures,瑞士,1998.
9. 李明顺,胡德堃.对我国建筑结构设计可靠度设定水平的分析与改进意见.见:工程安全及耐久性.中国土木工程学会第九届年会论文集.杭州,2000.
10. 李明顺.建筑结构可靠度设计统一标准(报批稿)的主要特色.建筑科学,2000(6).
11. 李明顺,胡德堃,史志华.我国建筑结构可靠度设计标准的技术合理性与依据.见:土建结构工程的安全性及耐久性.清华大学,2001.