

土建结构工程的安全性与耐久性

陈肇元 主编

311.2-53
4

中国建筑工业出版社

土建结构工程的安全性与耐久性

陈肇元 主编

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

土建结构工程的安全性/陈肇元主编. —北京:
中国建筑工业出版社, 2003
ISBN 7-112-05744-2

I. 土… II. 陈… III. ①土木结构—安全性—研究—
文集②土木结构—耐用性—研究—文集 IV. TU3—53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 021138 号

本书汇集土建结构工程的安全性/耐久性方面的论文 23 篇。这些论文对我国土建工程安全性/耐久性的现状作了比较全面的介绍, 并就存在的问题和解决途径提出了不同的认识和建议, 有比较重要的参考价值。

本书可供土建结构设计、施工、科研人员和大专院校师生阅读, 并可作为结构工程和岩土工程设计人员的继续教育参考材料。

* * *

责任编辑: 蒋协炳

土建结构工程的安全性/耐久性

陈肇元 主编

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

新华书店经销

北京建筑工业印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 12 $\frac{3}{4}$ 字数: 307 千字

2003 年 6 月第一版 2003 年 6 月第一次印刷

印数: 1—2,500 册 定价: 21.00 元

ISBN 7-112-05744-2

TU·5043(11383)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本社网址: <http://www.china-abp.com.cn>

网上书店: <http://www.china-building.com.cn>

前 言

鉴于工程安全性与耐久性对我国当前大规模基础设施工程建设的重要性,中国工程院土木水利建筑学部于2000年7月提出了一个名为“工程结构的安全性及耐久性研究”的咨询项目,旨在联络国内有关专家,就我国土木工程和建筑工程结构的安全性及耐久性现状及其存在问题进行探讨并为政府部门提供技术政策方面的建议。

在两年时间里,项目组先后组织了两次较大规模的工程科技论坛。与会者提交论文或报告101篇。收编在本文集内的报告,大部分选自这两次会议材料,也有由课题组成员提交或约请专家撰写的。报告中反映的作者观点并不就是课题组的共同认识,后者将另行编写总结材料表述。

感谢中国建筑工业出版社为文集的出版提供帮助,希望有更多工程技术人员能从中了解结构安全性与耐久性现状并赋予更大的关切。

编者

2002年12月

* * *

工程结构的安全性及耐久性研究 咨询项目组成员

(按姓氏汉语拼音为序)

陈肇元	范立础	刘建航	刘西拉	钱稼茹
莫庭斌	施仲衡	王梦恕	王元湘	项海帆
徐有邻	张 弥	曾庆元	赵国藩	

本书论文主要作者

邸小坛	中国建筑科学研究院结构所
高小旺	中国建筑科学研究院抗震所
徐有邻	中国建筑科学研究院结构所
陈肇元	清华大学土木系
蒋苑秋	中煤国际工程设计研究总院
张 弥	北方交通大学土木学院
范立础	同济大学桥梁系
黄士元	同济大学材料学院
杨全兵	同济大学混凝土材料国家重点实验室
张 恺	北京市市政设计研究院
包琦玮	北京市市政设计研究院
罗 玲	北京市市政设计研究院
徐学东	济南铁路局工务处
钟志锦	济南铁路局临沂工务段
周 履	中铁大桥局桥梁科学研究院
洪乃丰	冶金建筑研究总院
洪定海	江苏高新技术发展研究所
潘德强	广州四航工程技术研究院
陈蔚凡	天津港湾工程研究所
杜拱辰	中国建筑科学研究院
高大钊	同济大学岩土工程系
张在明	北京勘察设计研究院
赵国藩	大连理工大学土木建筑学院
赵尚传	大连理工大学土木建筑学院
贡金鑫	大连理工大学土木建筑学院
施仲衡	中国地铁咨询工程公司
王元湘	北京城建设计研究院

目 录

我国混凝土建筑结构的耐久性与安全问题	邸小坛 高小旺 徐有邻	1
混凝土建筑结构的可靠性与规范的可靠度设计方法	陈肇元	7
对建筑结构使用年限问题的讨论	蒋莼秋	18
我国铁路隧道结构安全性和耐久性分析	张 弥	23
混凝土桥梁安全性与耐久性	范立础	31
我国寒冷地区混凝土路桥结构的耐久性问题	黄士元 杨全兵	44
北京地区立交桥耐久性调查分析及耐久性设计措施	张 恺 包琦玮 罗 玲等	52
铁路混凝土桥梁耐久性设计及相关标准改进建议	徐学东 钟志锦	59
预应力混凝土桥梁设计中有关安全性与耐久性的若干问题	周 履	64
桥梁结构事故分析——展望设计理论进展	范立础	69
钢筋混凝土基础设施腐蚀与耐久性	洪乃丰	76
盐污染钢筋混凝土结构耐久性现状与确保百年寿命的关键对策	洪定海	84
我国海港工程混凝土结构耐久性现状及对策	潘德强	96
盐渍地区混凝土建筑物的耐久性问题	陈蔚凡	108
结构设计规范的可靠度设计方法质疑	陈肇元 杜拱辰	114
结构设计规范要更好地为市场经济服务	陈肇元	123
岩土工程的安全性与标准化——对岩土工程标准化体系的思考	高大钊	127
对我国现行岩土工程规范的几点看法	张在明	140
亚洲混凝土模式规范的简介和讨论	赵国藩	153
混凝土结构碳化寿命概率模型研究与应用	赵尚传 贡金鑫 赵国藩	157
氯盐环境下混凝土结构耐久性试验研究	赵尚传 贡金鑫 赵国藩	162
混凝土结构的耐久性设计方法	陈肇元	174
关于地铁工程抗震设计的若干问题	施仲衡 王元湘	188

我国混凝土建筑结构的耐久性与安全问题

邸小坛 高小旺 徐有邻

一、我国混凝土结构的耐久性和安全问题

我国混凝土结构的耐久性问题十分严重。问题的严重性既体现在认识上又存在于实际。我们认为,只有认识清楚问题才能有效地解决实际存在的问题。

1. 对耐久性问题的认识

仔细推敲欧美国家关于混凝土结构耐久性的解释,可以发现混凝土结构的耐久性是使用极限状态的问题,其主要着眼点是经济合理的使用寿命,而不是构件的承载能力极限状态。对于混凝土结构耐久性极限状态的定义为:结构或构件出现不可接受的外观损伤。也就是说,当结构需要一定量的维修资金时,经济合理的使用寿命结束。

在我国,混凝土结构耐久性的概念过多地与结构的安全性相联系。目前,在国内许多设计、研究和工程技术人员意识中,将耐久性看成是承载能力极限状态的问题,是结构的安全问题,比如去研究钢筋锈蚀程度与构件承载能力下降幅度的关系等。

显然,这两种概念存在很大的差别。这种差别对设计观念有重大的影响。以下举两个实际例子来说明。

香港某集团在购买北京新万寿大厦时委托中国建筑科学研究院对该大厦上部结构的施工质量和耐久性能进行评估,此时大厦的实际使用时间不足10年。显然,该项检测与评估的目的是与委托方预期的投资有关,委托方显然不准备在预计的使用年限内再对结构投资,在保证安全的前提下,要保证装修不出问题。

而广州某港口散装食糖仓库,改为散装化肥中转仓。五年后,该仓库混凝土屋架出现钢筋锈蚀和保护层混凝土剥落现象。使用方耗资进行了防锈和防腐处理。五年后,防腐层剥落,钢筋继续锈蚀。此时使用方向中国建筑科学研究院提出进行耐久性鉴定的要求。

前者的鉴定是要解决经济合理的使用寿命,是混凝土结构的耐久性问题。而后者经济合理的使用寿命已不存在,鉴定工作所要解决的是屋架承载能力、加固、防腐以及处理方案的比较。准确地说,是加固后继续使用在经济上比较合理,还是更换屋面构件或拆除重建更为合算的问题。

如果说前者基本上体现了欧美国家对混凝土结构耐久性问题的观点:经济合理的使用寿命;后者则反映国内部分人士对混凝土结构耐久性的观点:结构安全。两者的做法有明显的区别。

我们建议,混凝土结构耐久性概念,特别是对于设计而言,应该坚持经济合理的使用寿命的观点,不应过多地掺加结构承载能力极限状态的概念。至于混凝土结构出现耐久性能

方面的问题后,其处理应该归为病害治理或延长结构使用寿命的问题。

2. 关于安全问题

混凝土结构耐久性不与结构承载能力极限状态挂钩不是说混凝土结构耐久性与安全性没有关系。

安全的问题可分为使用安全和结构的安全。结构的安全似乎与构件承载能力极限状态的概念多少有些联系。而使用安全范围要广泛的多,至少还应该包括防雷、防火、意外灾害(冲撞、爆炸等)、装饰层脱落、电器、燃气甚至栏杆和扶手的高度和稳定性等。

美国纽约世贸中心受袭倒塌事件,不能不说是该中心在结构安全方面存在问题。这里所说的是结构倒塌的速度过快,人员来不及撤离。这类问题应归为结构安全的问题。这类问题在我国也有,例如在石家庄市发生的爆炸案。同样是人为的爆炸破坏,有的楼是局部受损,损失较小,有的楼则是一塌到底,伤亡惨重。

这类事件表明:结构应该具有抵抗意外灾害的能力,在意外灾害发生后结构不应在短时间产生一塌到底的破坏。我国的建筑结构有抗御地震作用的设计要求,但没有抵抗其他意外灾害的设计要求,不能不说存在着较大的结构安全隐患。

大型意外事故发生的概率较低。但非结构件的脱落事件则经常发生。

北京安华西里某高层住宅楼,21层阳台外抹灰脱落,将地面上的自来水井铸铁井盖砸得粉碎,碎片砸入土内1m多深。沈阳某住宅楼外饰面脱落则造成一死两伤的事故。室内装饰塌落伤人毁物的事情相当之多。

北京航三院20世纪60年代初建成大片住宅。使用三四十年后,雨篷、挑檐和阳台等混凝土构件钢筋大面积锈蚀。剥落的混凝土保护层经常从楼上落下来,部分阳台栏板一推就倒。而航三院委托国家建筑工程质量监督检验中心的鉴定要求是:是否存在安全问题。这类问题说明安全意识的模糊与混乱。而存在航三院这类问题的建筑物在国内不在少数。

我们举上面这些例子主要想说明这样一些问题:(1)安全问题不仅是构件极限承载能力的问题;(2)不要轻视耐久性这类混凝土结构的“皮肤病”;(3)结构应该具有抵抗意外灾害的能力。

3. 我国混凝土结构的耐久性状况

我国混凝土结构的耐久性问题十分严重,已经不仅影响经济合理的使用寿命,而且许多结构的安全受到威胁。这也是为什么许多人将耐久性问题与结构安全挂钩的客观原因。

山西省阳泉市猫脑山自来水厂蓄水池倒塌事故,是钢材锈蚀造成的典型倒塌事例。该水池绕丝预应力钢丝因锈蚀崩断,水池侧板倒伏,4000m³的水顺山坡而下,致使山下39人死亡。

20世纪60年代末,我国西南地区使用的单槽瓦屋面,自施工完毕就有钢筋锈蚀出现,并不时有屋面板塌落事故。最后不得不全面更换。仅贵阳重型机械厂就有数万平米的屋面进行了更换。

建设部于20世纪80年代组织进行了国内建筑混凝土结构耐久性状况的调查,调查结论为:大多数工业建筑物在使用25~30年以后即需要大修。处于有害介质环境中的建筑物使用寿命仅15~20年。民用建筑及公共建筑使用和维护条件较好,可以维持50年以上不发生耐久性问题。但其室外构件(如阳台、雨罩、挑檐等)一般使用寿命只有30~40年。

在此期间,水电部水工混凝土耐久性调查组对全国32座大型混凝土坝进行了调查,结

论为:全部被查坝体存在裂缝和渗漏溶蚀破坏现象。

江苏省水利所对华东 84 座沿海混凝土挡潮闸进行了调查,钢筋严重锈蚀需要维修或大修的为 71 座。其中有些挡潮闸胸墙、启闭桥大梁钢筋已经锈断。

上述调研所描述的状态,有些已经不仅是耐久性的问题,不是“皮肤病”了。

近期这类问题也没有改善。深圳、黄骅等一些沿海城市的一些混凝土建筑中掺加海砂,使用 10~20 年就拆除,或不断维修。

我国近年现浇混凝土结构增多,混凝土的泵送,复振等施工工艺的发展,水泥强度等级的提高,使混凝土成分有了很大的变化。粉剂掺量增加,粗骨料比例减少且粒径变小,使混凝土体积稳定性较差,收缩加大。此外,这类混凝土有快硬,高强,水化热大的特点,混凝土散热后的温度收缩较大。现浇混凝土结构的超静定约束使上述收缩引起的约束应力大大增加。因此,近年现浇混凝土结构的裂缝问题比较普遍,已成为影响混凝土结构质量的严重消极因素。

二、混凝土结构的耐久性问题

混凝土结构的耐久性问题可分成钢材和混凝土两大类。钢材问题主要指钢筋的锈蚀。混凝土问题可分成环境作用和碱骨料反应下的损伤。环境作用可分成冻融、化学物质侵蚀、生物和机械物理作用等。

混凝土结构耐久性问题具有以下三个特点:

(1) 多数损伤发展的速度较慢,往往需要若干年甚至几十年的时间,这就是称为耐久性问题的原因。

(2) 一般是多种因素共同影响的结果。如北方的海洋混凝土工程,有混凝土碳化钢筋锈蚀,也有氯离子侵蚀和冻融损伤,还有海水冲击和海砂磨损,当然还有化学物质侵蚀和生物侵蚀等问题。

(3) 大多数损伤是由构件表面开始的,所以有人称耐久性问题是混凝土结构的“皮肤病”。

1. 钢筋锈蚀

钢筋锈蚀是混凝土结构最常见和最大量的耐久性问题。

新成型混凝土的孔隙溶液中含有氢氧化钙,pH 值较高,呈碱性。在这种溶液中,钢筋因表面可形成钝化膜而处于钝化状态。处于钝化状态的钢筋不会锈蚀。

在下列三种情况下钢筋表面的钝化膜可遭到破坏:混凝土碳化(中性化)、混凝土遭受氯污染和环境中缺氧。当钝化膜遭到破坏,钢筋则具备锈蚀的条件。

二氧化碳、二氧化硫等气体及其他酸性物质可通过混凝土的孔隙进入混凝土的内部,与混凝土孔隙溶液中的氢氧化钙发生化学反应,使孔隙溶液的 pH 值降低,钢筋出现脱钝现象。

氯污染可分成内掺型和外侵型。内掺型是指混凝土成型时使用了含氯的原材料,如海砂、海水或含氯的外加剂等。外侵型是指环境中的氯离子通过构件表面侵入到硬化的混凝土内部,达到钢筋表面。游离的氯离子使钢筋表面的钝化膜破坏。

有资料表明:钝化膜保持完好需要相当于 $0.2 \sim 0.3 \text{mA/m}^2$ 的氧流量。如果氧流量低

于此值,钝化膜厚度会逐步减小直至完全消失。

除了上述几种情况外,杂散电流会加速钢筋的锈蚀速度。因为钢筋的锈蚀过程本身就是一个电化学过程,在杂散电流的影响下,钢筋的电位发生变化,钢筋锈蚀速度加快。电线杆、绝缘不好的与直流或交流电有接触的构件中可看到这种现象。

除了锈蚀问题外,钢筋的还有氢脆、应力腐蚀、疲劳、低温脆断等问题。

2. 混凝土冻融损伤

关于混凝土冻融损伤的机理有多种理论。但总的来说,在环境温度下降和升高的作用下,混凝土孔隙中的溶液冻结与融化会使混凝土产生冻融损伤。这种损伤是混凝土微观结构损伤的逐渐积累造成的宏观损伤。损伤的前期是混凝土强度降低,弹性模量降低,接着是混凝土由表及里的剥落。

当混凝土孔隙溶液中含有一定量的氯离子时,混凝土的冻融损伤速度加快,一般称之为“盐冻”。

3. 化学物质的侵蚀

化学物质的侵蚀是混凝土结构耐久性中最为复杂的问题。但归纳起来,化学物质的侵蚀可分成酸侵蚀、碱侵蚀和硫酸盐侵蚀三大类。

酸性物质对混凝土中的水泥水化物有侵蚀作用,使其中的氢氧化钙变成可溶性的钙盐,使混凝土丧失强度。典型的酸性物质侵蚀的损伤特征为:混凝土呈黄色,水泥水化物剥落,粗骨料外露或剥落。

固体的碱对混凝土的侵蚀作用较小,而熔融状的碱或碱的浓溶液对水泥的水化物有侵蚀作用。其侵蚀作用主要有化学侵蚀和结晶侵蚀。化学侵蚀是碱溶液与水泥水化物之间产生化学反应,生成胶结力不强且易为碱液浸析的产物。结晶侵蚀是进入混凝土孔隙的碱溶液形成具有膨胀力的结晶体,使混凝土被胀裂并逐渐剥落。

化学侵蚀最广泛的形式是硫酸盐侵蚀。硫酸盐一般是指硫酸钠和硫酸镁等。硫酸盐溶液与水泥水化物中的氢氧化钙及水化铝酸钙发生化学反应,生成石膏和硫铝酸钙,产生体积膨胀,使混凝土被胀裂并逐渐剥落。

4. 碱—骨料反应

碱—骨料反应是指水泥水化过程中释放出来的碱金属与骨料中的碱活性成分发生化学反应。反应形式主要有两种:碱—硅酸反应和碱—碳酸盐反应。

碱—硅酸反应是指碱性溶液与骨料中的硅酸类物质发生反应,形成凝胶体。这种凝胶体是组分不定的透明的碱—硅混合物,会与混凝土中的氢氧化钙及其他水泥水化物中的钙离子反应生成一种白色不透明的钙硅或碱—钙—硅混合物。这种混合物吸水后体积膨胀,使周围的水泥石受到较大的应力而产生裂缝。

碱—碳酸盐反应是水泥水化物中的碱与骨料中的碳酸盐发生反应。骨料中的陶土矿和结晶状岩石的存在会影响这些反应的速度。

5. 其他损伤

除了上述问题外,混凝土还存在机械物理损伤、大气侵蚀、生物侵蚀、溶蚀等问题。

机械物理损伤包括磨损、空蚀、冲撞等。

一般建筑的混凝土地面和楼梯可出现磨损,更为典型的是混凝土路面和机场跑道,含泥砂量较大的水流也会磨损混凝土。

沿混凝土表面高速流动的气体或水流会产生负压区,在负压区的混凝土会产生空蚀损伤,损伤的特征是成片的混凝土受拉破坏。

在工业建筑中和道桥上经常出现冲撞损伤。

大气侵蚀作用除了酸雨、空气污染的损伤外,长期的雨水冲淋和风沙影响也会造成混凝土的损伤。

长期浸泡在流动的水中的混凝土,其氢氧化钙等有效成分会被水溶解并带走,使混凝土的强度减低,随后产生破坏。

生物损伤常见于海洋环境和城市排污工程。

三、《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002) 中的耐久性设计简介

新修编的混凝土结构设计规范对结构的耐久性设计进行了规定,主要有:(1)规定了设计使用年限;(2)对使用环境进行了分类;(3)对结构混凝土进行了规定;(4)对构造要求进行了规定。第(4)部分的内容分散在各章节中,在原有条文的基础上考虑耐久性要求作了必要的修正。例如,混凝土的保护层厚度,其取值不仅有耐久性要求,还要考虑混凝土对钢筋的握裹力及有效高度对截面抗力的影响,这些内容主要在“构造”及“构件”各章中,以配筋构造措施的形式表达。

影响混凝土结构耐久性的最重要因素是结构所处的环境,根据我国的统计调查并参考国外标准规范,将使用环境分为五类。环境类别的划分方法与欧洲的模式规范(MC—90)基本相同。

对于设计使用年限为 50 年处于一类、二类和三类环境中的结构混凝土,提出了水灰比、混凝土强度等级、水泥用量、氯离子含量、骨料及碱含量、抗冻和抗渗性能的要求。控制水灰比、水泥用量和强度等级是为了减少混凝土凝固以后多余水逸出产生的毛细孔道和空隙,减小渗透性和保证混凝土的密实性。规定水泥用量的最小值,并不是最佳配合比的数值。事实上,水泥用量太大引起收缩和水化热过大会产生裂缝,也不一定是好事。当混凝土中加入掺和料或能提高耐久性的外加剂时,可适当降低水泥的用量。但预应力结构水泥用量不应少于 $300\text{kg}/\text{m}^3$ 。氯离子含量按水泥总重量的百分率计算。对预应力构件的混凝土,氯离子含量不得超过 0.06%。这实际上是控制预应力混凝土拌和物中不得掺入氯化物,考虑到混凝土水泥、骨料和水中多少含有些自然状态的氯离子,故未规定限值为零。对于碱含量的限制,仅限于第二 a、二 b 和三级环境,主要考虑有水的作用。对于正常室内环境,由于基本排除了水的影响,故可不作限制。此外,如使用非碱活性的骨料时,可以不对混凝土的碱含量进行限制。

耐久性调查表明,使用 70~80 年的室内正常的混凝土结构即使碳化深度已超过保护层厚度,由于没有水,钢筋也能不锈蚀而维持正常抗力。因此,对一类环境等级中的结构,采取规范规定的措施后使用 100 年是可以保证的。

规范没有对混凝土结构的耐久性设计方法采用极限状态方法,这是由于条件还不成熟,对于影响混凝土结构耐久性的各种因素及规律研究还欠深入,难以达到进行定量设计的程度。规范采用了宏观控制的方法,即根据环境类别和设计使用年限对结构混凝土提出相应

的限制和要求。这种方法概念清楚、设计简单。虽还不能定量地界定准确的设计使用年限,但能保证在正常使用和维护的条件下在规定的设计使用年限内混凝土结构应有的使用功能。

此外,还有目前规范尚无法包含的内容——正确的使用和混凝土结构的维护。重要的是避免水的影响,使混凝土结构处于干燥状态,其次是消除有害介质的侵袭,采用各种方法(抹面、涂层等)减少混凝土的渗透性,使水和介质难以入侵。建筑物的使用单位不应随便改变结构的用途和任意对结构进行改造(如开孔、凿洞等);要定期检查并及时维修,避免耐久性缺陷发展。应尽快通过立法建立有关的法规并制定有关的标准规范,加强对结构正常使用管理。

混凝土建筑结构的安全性与规范的可靠度设计方法

陈肇元

一、结构安全性

结构安全性是结构在各种作用下防止破坏、倒塌的能力。这些作用主要有一般荷载、灾害荷载和环境作用。安全性是结构设计最主要的追求目标,其中应至少包括结构构件承载能力的安全性、结构的整体牢固性和结构在环境作用下与耐久性相联系的安全性。

1. 结构构件承载能力的安全程度

在结构设计中,习惯上用结构构件的安全系数(现行混凝土结构设计规范中用可靠指标或分项系数)作为安全性的一种度量,表示设计赋予结构防止承载力失效的安全度。以下,先对设计安全系数的演变作一简要回顾。

在建国初期和建国前,我国建筑结构设计采用容许应力设计方法,要求结构构件截面按弹性阶段工作产生的材料最大应力,不超出材料的允许应力,这里的安全系数是材料的标准强度与允许应力的比值。在早期的容许应力方法中,一般以材料的平均强度作为标准值。1952年,东北人民政府工业部参照苏联1949年规范颁布了《建筑结构设计暂行规程》,采用破损阶段设计方法,要求结构构件内力用总安全系数 K 放大以后,不超过构件截面在破损阶段(考虑塑性工作)下按材料强度标准值算出的承载力,破损阶段设计方法也以材料强度的平均值作为标准值,国内当时多按这一规程设计。1955年建筑工程部正式颁布采用破损阶段设计方法的《钢筋混凝土结构设计暂行规范》(规结6—55),也是参照苏联1949年规范,但将东北人民政府暂行规程中提高了的安全系数降回到与苏联规范一致的水平,并且提高了钢材的标准强度。

1955年苏联颁布了以三系数(作为材料强度安全系数的匀质系数、作为荷载安全系数的超载系数以及工作条件系数)为特点的多安全系数极限状态设计方法新规范,在材料强度标准值上开始引入了概率统计方法,取强度标准值为平均值减去3倍标准差,我国约从1956年起就按照这一苏联规范设计,虽然要到1966年建筑工程部才正式颁布了与苏联三系数极限状态设计方法规范相同的新规范BJG 21—66。1974年,规范TJ 10—74颁布,采用了以多安全系数分析、但简化为单一安全系数表达的极限状态设计方法,材料强度标准值改为平均值减1.64倍标准差(保证率95%)。

1989年,现行规范GBJ 10—89颁布,摒弃了半概率、半经验的多安全系数极限状态设计方法,在国际上率先采用了以近似概率为基础的极限状态设计方法,其中结构的安全度用可靠指标 β 表示,但在设计公式的形式上仍采取与多安全系数相似的材料强度分项系数和荷载分项系数来表达。需要指出的是,多安全系数方法中的材料强度安全系数和荷载安全系

数,与可靠度方法中的材料分项系数和荷载分项系数的含义并不等同。比如:材料强度安全系数是个半经验、半统计并以经验为主的参数,它主要考虑材料强度的变异性以及与材料强度有关的截面承载力计算精度等因素,与荷载及内力的变异性无关;而材料分项系数可按公式计算,不仅与可靠指标 β 、材料强度变异性有关,而且与荷载的变异性也发生关系。

如果将上述方法都近似换算成破损阶段方法中的总安全系数 K 进行比较,则GBJ 10—89规范的换算总安全系数,对受弯构件平均要比1955年规范(规结6—55)降低约15%,受压构件降低约10%。与1952年东北人民政府规程相比,分别降低约25%和20%。对恒载占总荷载大部的构件如屋面梁板,安全系数降幅最大。这里没有与允许应力设计方法相比,因为后者过于保守。

安全系数或可靠指标被看成是结构安全度的标志,但实际上只能代表结构安全性的一个方面或一个部分,尤其是可靠度设计方法中的可靠指标更是如此。即使仅以构件承载力的安全程度而言,还必须与荷载标准值和材料强度标准值的取值大小以及构件承载力与内力分析计算的保守程度合在一起考虑。安全系数是与荷载的标准值和材料强度的标准值联系在一起的。以办公室楼面活载为例,我国设计采用的荷载标准值在1958年前用苏联规范规定的2 kPa,大跃进时颁布的荷载规范(规结—1—58)降为1.5 kPa并维持这一数值至今(最新颁布的规范才又改回到2 kPa)。如与20世纪50年代中期的规结6—55相比,由于安全系数和荷载标准值一起下降,办公室楼层构件的安全贮备平均降低幅度约达30%。如果单纯比较活载的荷载安全系数,英国和美国所采用的多安全系数方法中分别为1.6和1.7,与我国规范中的活载分项系数1.4相差不算太大。可是考虑到荷载标准值的取值以后,如办公室楼层活载标准值在法、德、俄等国规范中为2 kPa,加、美、南非2.4 kPa,英2.5 kPa,日2.9 kPa,澳3 kPa,意大利3.4 kPa,加上荷载系数的差别,则在办公室活载的设计计算值上,我国只有英、美的53%和51%,其安全储备就大相径庭了。

安全贮备还与规范规定的构件承载力计算公式与荷载效应(内力)分析方法的保守程度有关。比如我国GBJ 10—89规范将最常用的压弯构件的混凝土压弯强度取成轴心抗压强度的1.1倍,并且不考虑轴压构件的偶然偏心作用,而国外规范则一般取压弯强度与轴心抗压强度相等,且均考虑偶然偏心不可避免,这样又额外降低此类构件的安全贮备。内力分析方法的精度和保守程度可对安全性产生重大影响,以砖墙承重的混合结构内力分析计算图形为例,我国规范引用苏联规范的规定,视楼层梁与墙体相交的节点为铰接,不考虑墙体对梁的嵌固作用,即对梁是简支,对砖墙则只需考虑梁的反力对墙体的偏心作用。实际情况是墙体嵌固有可能引起较大的节点弯矩,具体取决于梁端节点的不同构造方法和梁与墙之间的相对刚度。20世纪60年代,北京曾发生过一起单跨五层混合结构教学楼的整体倒塌事故^[1],原因虽然综合,但主要问题出在这一工程的梁端构造起到刚节点的完全嵌固作用,加上梁的刚度和跨度很大,窗间墙高而窄,使墙体受到的实际最大弯矩竟达到按规范计算图形得到的反力偏心弯矩的8~10倍,超过了墙体承载力。

2. 结构的整体牢固性和构造要求

结构的整体牢固性(robustness)^[2]或整体性(integrity),是指结构不致发生与其原因不相称的严重破坏后果的能力,要求局部破坏不致引起大范围的连续倒塌。一个结构应能在灾害荷载的偶然作用或各种不测事件作用下,尽可能将破坏局限在较小程度。结构的这种能力主要依靠合理的结构方案与布置,构件之间的可靠连接,以及必要的构造措施来解决,

使结构具有足够的延性和冗余度。结构的许多安全事故特别是灾难性事故,往往在于结构缺乏整体牢固性,在于结构方案布置和构造方法上的不当。为了加强整体性,一般需要多用些钢材。我国过去建造的房子之所以缺乏整体性,与当时缺乏钢材的实际情况不无关系。

不同的结构类型在整体性上有重大差别。即使同样满足构件承载力的安全度要求,砖混结构的安全性在总体上仍很难与现浇钢筋混凝土结构和钢结构比拟。唐山地震中砖房的大量倒塌就是很好的例子。上面提到的混合结构教学楼的整体倒塌,还与这一结构选型与布置不当有关。没有构造柱和横隔墙的单跨砖混结构整体性是很差的,尤其在跨度和层高较大的情况,不管是哪种原因一旦损害了局部承重墙体,就有可能导致连续倒塌破坏。与此形成鲜明对照的是北京有一幢三层混合结构办公楼,由于设计笔误的人为差错,将支于外墙和内纵墙上的大梁跨中最大计算弯矩少算了一个数量级,于是按构造配置跨中钢筋,仅及所需钢筋面积的 $1/3$ 。按规范方法校核,大梁即使在自重作用下已经超出极限状态。经过实际调研,发现结构仍可安全使用。主要原因是梁端插入砖墙的箍固作用,使实际形成的跨中弯矩减少到按规范简支图形计算值的一半左右,其它的有利因素还有:楼板有额外的抹面层增加了梁的计算高度,以及梁的变形挠曲使本应作用于梁上的一部分楼面荷载向砖墙转移。出现如此严重的人为错误竟能过关,实归功于结构布局合理,有众多层高不大的较强横墙和内纵墙。

20 世纪 90 年代,辽宁发生过一起燃气爆炸引起 5 层砖混房屋的整体连续倒塌事故^[3]。楼房结构为单向混凝土预制楼板、横墙承重,按 7 度抗震设防。爆炸压力来自相连的平房,通过门厅进入了楼房底层并破坏相迎的一道横墙,使上部墙体与楼板失去支承坠落,并象多米诺骨牌似的依次发展。即使墙体不先破坏,向上作用的压力也能破坏预制楼板使楼板下坠,一样能带动墙体的连续倒塌。要完全消除燃气爆炸对砖混房屋的破坏需要付出的经济代价过大,但是设计应该防止结构出现大范围连续倒塌的可能。如果这一结构有必要的钢筋混凝土构造柱,在预制板楼层中设有必要的现浇带,支于墙体的预制板端部有拉筋与邻跨相互连接防止坠落,就不至于出现整楼的彻底倒塌。这些措施都与安全系数无关,但对结构安全性至关重要。

1968 年英国伦敦 Ronan Point 公寓内发生一起煤气爆炸,使这幢 22 层高的装配式钢筋混凝土大板结构的一个局部角区从上到下出现连续倒塌。伦敦地区的房屋在二战期间遭受轰炸毁损严重,战后推广应用了建造速度快且较为经济的预制装配式大板房屋,墙板和楼板全部预制,每块大小与房间尺寸相同。Ronan Point 公寓各预制板之间的节点仅有齿槽灌浆相连而无钢筋联接。在舆论促使下,英国国内数以百计的类似高层公寓都被认为不安全而被相继拆除。这一事故引起了国际工程界对结构整体牢固性要求的普遍重视并开展了广泛的讨论,由此确立了结构设计的又一重要原则,即结构内发生一处破坏不应造成整体的连续倒塌。为吸取这一教训,各国的设计规范几乎都作了相应的修订。

在 Ronan Point 的连续倒塌事件之后,英国规范为加强结构整体性提出了如下要求:
(a) 结构能够承受作用在每层楼板位置上的假想水平荷载,其大小等于该楼层与其上下楼层之间各一半高度上的所有竖向荷载的 1.5% ; (b) 所有结构都必须设置水平拉结筋,包括与柱、墙相连的房屋周边拉结筋和内部拉结筋; (c) 对于 5 层以上的房屋,其中的关键构件应能承受从各个方向作用于其承载面积上的大小为 34kN/m^2 的均布荷载; (d) 对于 5 层以上房屋中的非关键竖向构件,如将其移去应不致造成超出局部范围的损害,因而通常情况下还

需设置附加的竖向拉结筋加以保证。这样的要求主要是针对装配式结构和砖混结构的。对于抗震设防的现浇钢筋混凝土框架或剪力墙房屋,一般都有较好的整体性。34kPa的假想荷载是参考燃气爆炸压力提出的,但并非专指燃气爆炸,为的是防止各种原因造成的连续倒塌,但是这一苛刻要求似乎并没有得到全面贯彻。以后,有关设计条例又提出:如房屋内并无发生燃气爆炸的可能,或者安装的是瓶装天然气而不是管道煤气,则可将34kPa折减一半为17kPa。欧洲规范Euro-code也有引入某种假想荷载作为增强结构整体性的考虑。但是其它各国规范迄今都还只是提出一些原则规定,主要从构造上采取相应措施。

拿Ronan Point事件的倒塌程度和伤亡后果与国内有过的连续倒塌事故相比,未免有小巫见大巫之感。不过前者经过深刻总结,从中引出设计思想上的重大进展,而我们则往往捂住盖子不了了之,而事故教训本应是结构发展的重要推动力。

适当的构造措施是结构安全性的必要保证。规范构造措施中的一个重要内容是最小配筋率,文献[1]中已对此有过一些探讨。这里想补充说明的是,我国规范中某些过低的最小配筋率并不是从一开始就有的。在1957年前按破损阶段方法设计的东北人民政府规范、苏联HnTy—3—49规范和我国规结6—55规范中,受弯构件的最小配筋率要比后来的规范高1倍以上。如果配筋率过低,截面的屈服抗弯能力就有可能低于截面拉区混凝土的开裂弯矩,这样当构件受力后拉区混凝土首先开裂时,所有的变形就会集中在开裂截面上,导致开裂截面的钢筋颈缩并断裂。因此受弯构件的最小配筋率必须满足截面屈服抗弯能力大于开裂弯矩的要求,并据此确定最小配筋率。最小配筋率与混凝土抗拉强度对钢筋屈服强度的比值 f_t/f_y 成正比,而且试验表明,如果屈服弯矩超出开裂弯矩的数值有限,那么即使满足上述要求,构件的延性仍然很差,原因是较低配筋下只能出现个别的既宽又深的大裂缝。在破损阶段设计方法中,混凝土和钢筋材料的抗拉强度都以平均值为依据,而在极限状态方法中二者的强度则以低于平均值的某一分位值即标准强度为依据,这是造成最小配筋率差异的原因之一。以标准强度作为确定最小配筋率的依据显然是不对的,因为这里需要保证的是开裂弯矩不能小于屈服弯矩,所以与开裂有关的混凝土抗拉强度应该采用大于平均值的某一分位值强度才合适。

3. 耐久性

耐久性在结构设计中往往与安全性并列,并归属另一范畴。习惯上以荷载作用下的承载力强度设计为安全性设计,而耐久性设计则以非荷载的环境侵蚀作用为对象,专门考虑材料劣化过程的影响。因钢筋锈蚀等耐久性问题导致结构承载力受损从而造成耐久性安全事故的现象已变得越来越普遍^[4]。不久以前,人们才觉悟到混凝土在一些环境下并不象原来设想的那样耐久。今天的混凝土与几十年前相比,强度是提高了,可是耐久性差了。毛病出在水泥的活性不断提高,混凝土的单方水泥用量也随着混凝土强度等级增加,再加上快速施工、追求早强、养护不足,愈早强的混凝土,后期性能愈差。解决混凝土耐久性问题最为经济有效的办法,是采用较低水胶比且有矿物掺和料的高性能混凝土。对混凝土保护层厚度的要求也应提高。结构耐久性的不确定因素更为复杂和难以量化,施工养护与环境变化等与耐久性极为密切的影响因素很难用概率统计方法表达,所以结构的耐久性设计更需要依靠经验的途径。

4. 结构安全事故的原因及人为差错

上面提到了结构设计中与安全性有关的主要方面,即除了安全系数(或可靠指标)、荷载

作用标准值、材料强度标准值等可以量化的数据外,还有作用效应(内力)分析计算方法和结构抗力(截面承载力)分析计算方法的保守程度;此外,对安全程度的完整判断必须将整体牢固性和耐久性也包括进去。这些方面的设计缺陷或不足均可成为结构安全事故的重要原因,但在众多安全事故原因中,设计、施工和使用过程中的人为差错最为主要。

人为差错不可避免,它的发生概率和程度与人员的素质、技术条件、工作条件、工作环境等众多因素有关。人为差错与一般所说的误差不存在本质上的界限^[5],通常认为,一切与标准(规范、规程、技术要求或条例)不符的偏差即可理解为人为差错,而在规定的允许误差之内的则不属于人为差错,但是这样的认定有个前提,即标准本身必须是合理的。标准是人定的,难免会有不合适的地方;随着情况变化,原来的规定也会过时。纠正人为差错的主要途径是依靠质量控制和检查,如果差错和事故累禁不止,更有必要反思各种标准所提出的要求是否适当、有无脱离实际的地方。

除人为恶意错误外,结构的重大安全事故较少由单一原因造成,多由于几种因素凑合,如施工过程中出现或大或小错误或缺陷,设计不当,或许再加上规范设置的安全水准偏低,终于酿成大祸。

5. 如何合理设定结构的安全水准^{[6]~[8]}

多大的安全程度才算安全,这不是一个单纯技术问题。说到底,合理的安全水准乃是结构承担的风险损失与社会(或业主)所能提供的经济实力(或投入)之间寻求平衡的结果。我国过去长期处于短缺型计划经济年代,国家包揽了向全社会提供建筑物的职责,钱不够,料不够,在这种困难情况下,我国规范的低安全度是完全合理的,满足了更多人的住房要求,而且确实经受了实际考验,说是巨大成就也不为过。但这绝不是没有风险后果。事实并不是有的文件所认为的“至今尚未发现一例因设计规范安全设定不当而发生承载能力失效的实例”,如果规范的安全设置水准适当高一些,有的事故是有可能避免的。承载力安全设置水准愈高,所付出经济代价愈大,但能使失效概率进一步降低的幅度则愈来愈低,所以安全设置水准过高了也不见得会有显效,但是我国规范的安全设置水准未必已到这个高度。同在我国,为什么铁路工程结构几乎不曾有过倒塌事故,而建筑结构事故却长期屡禁不绝?除了铁路部门施工管理严格外,与铁路工程结构规范的安全系数比建筑结构大许多不无关系。我国建筑结构设计规范的安全系数远没有达到国际通用标准那样,已经几乎可以消除因承载力安全系数不足造成的倒塌,以至于实际发生的倒塌事故已几乎全为意外的偶然作用或意想不到的错误所致。

问题的焦点不在于偏低的安全设置水准本身,低水准是短缺型经济年代的产物,规范作为上层建筑不得不采用低水准,即使为此付出少量代价,从总体看依然是合理的。

问题在于我们现在已经进入了社会主义市场经济体制下的大规模基础设施建设的新时期,这些设施要使用几十年、上百年,如果坍了或要经常大修,所带来的损失已远非过去所能比拟,而为了提高结构安全性所需要的付出在整个建筑物造价中的比例已经降到了很小的程度,在有的建筑物中已到了微不足道的地步。

建筑物带有商品的属性。建筑物的安全性要求与安全设置水准应该考虑业主和使用者的要求和利益。规范要考虑市场经济的现实。安全性是建筑物最重要的质量标志,低安全水准决不是先进的表现。建筑物在几十年、上百年使用期内受到的外界作用并不是那么容易想象的,我们应该深刻吸取邢台、唐山大地震前当地仅按6度设防的教训。如果将结构设