

《混凝土结构设计规范》修订简介(二) ——混凝土结构的安全与抗灾性能

邱小坛¹, 叶列平², 徐有邻¹

(1 中国建筑科学研究院,北京 100013; 2 清华大学土木工程系,北京 100084)

[摘要] 简要介绍了本次《混凝土结构设计规范》修订中对于安全问题的考虑,包括结构在天灾人祸偶然作用下的抗灾性能、结构的整体稳固性、结构设计中的安全层次。修订规范增加了“结构方案”的要求,加强了结构分析的内容,适当增加了构件设计中的安全储备,加强了结构构件的连接构造措施。由于采用高强、高性能材料以及技术进步的成果,在全面提高安全度的条件下,并未引起材料消耗的明显增加。

[关键词] 混凝土结构; 结构安全; 抗灾性能; 整体稳固性

中图分类号: TU318.4 文献标识码: A 文章编号: 1002-848X(2011)03-0118-05

Introduction of revision of Code for design of concrete structure: Safety and calamity resistance performance of concrete structures

Di Xiaotan¹, Ye Liping², Xu Youlin¹

(1 China Academy of Building Research, Beijing 100013, China;

2 Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Security issues considerations in the revision of Code for design of concrete structures are briefly introduced, such as calamity resistance performance of structure under the occasional act of natural and man-made disaster, the structural robustness and safety level in the structure design. With the code revision, structural concept requirement is increased, structural analysis is strengthened, the emergency capacity in the designing component is modestly expanded, the connections-structural measures about structural element are also strengthened. Because of the application of high-strength and high-performance materials and technological advance, the reliability improving has not increased the materials consumption obviously.

Keywords: concrete structure; structural safety; resilience performance; robustness

1 有关结构安全的讨论

1.1 有关结构安全的争鸣

20世纪末,正当各结构设计规范修订之际,陈肇元院士建议:应该大幅度提高我国结构设计的安全度设置水平。由此而引起了学术界和工程界的热烈讨论,全国规模的讨论会就举办了4次,有的刊物还为此出了专集。

赞成者认为:我国结构设计安全水平与国外差距太大,因此历来工程事故频发。从处理事故和造成影响后果的角度,为“节约”反而会造成更大的“浪费”(实际损失)。考虑国力提升和可持续发展的需要,不如一步到位将安全度提升到先进国家的水平,比逐次增加安全度会收到更长远而实际的效益。

反对者则认为:工程实践表明,我国目前的安全水平已经基本可以保证结构的安全,满足大规模基本建设的要求。遵守规范建造的结构都在正常使用,调查所有的安全事故的原因,都是违反规范的结果,而这恰恰证明了现行规范的合理性。

这场近年难得的争鸣收获巨大,尽管没有权威

专家或行政长官拍板定论,也不能用倾向性意见的多少来判断对错,但通过畅所欲言的讨论,所有关心此事的人都深化了对结构安全的认识,从而大大促进了结构学科的发展。通过多次争鸣和讨论,学术界和工程界在一些重要的原则问题上大体达成了一些共识,基本实现了争鸣各方的“双赢”。

1.2 对结构安全的共识

1) 由于国情特殊,我国结构安全水平偏低,虽经历史修订提升,与国际的差距依然存在;2) 在“三正常”(正常设计、正常施工、正常使用)的条件下,现行设计规范基本能够保证建筑的安全;3) 本着“以人为本,安全第一”的宗旨,随着国力提升,宜适当提高结构设计的安全水平;4) 由于各结构设计规范的具体情况不同,应根据各自的条件确定本规范安全度设置水平调整的范围和做法,有关部门不再

作者简介:邱小坛,国家建筑工程质量检测中心总工程师,研究员。

叶列平,教授,博士生导师。

徐有邻,中国建筑科学研究院结构所顾问,博士,研究员。

注:本文由徐有邻执笔。

作限制和规定。

1.3 混凝土结构规范的修订原则

2002 版混凝土结构规范^[1]修订贯彻上述共识,通过提高荷载标准值和混凝土材料分项系数,改进结构承载力计算和构造要求,完善抗震设计,强化施工质量验收等措施,安全度水平提高,用钢量增加约 15%。但通过采用 400MPa 级钢筋和高强混凝土,消化了由于提高安全水平而引起的材耗增加,用钢量实际增加 7% 左右。实践表明:尽管安全事故已明显减少,但执行规范并不能真正保证结构的安全。

2 偶然作用下结构的抗灾性能

2.1 自然灾害造成的偶然作用难以避免(天灾)

一般条件下正常设计的结构基本能够保证安全;但真正的“三正常”很难实现,例如降雪造成的屋面坍塌,阵风造成围护结构的毁损等。近年我国长江洪水、浙闽台风、湘黔冰灾、汶川和玉树地震、舟曲泥石流……都造成了房倒屋塌、伤亡惨重的后果。救灾和重建的付出,远比提高结构安全水平的代价要大得多。今后气候变异引起灾害的常态化,完全有可能因各种形式的“天灾”使结构遭受非规范所能控制的意外偶然作用,结构的安全性堪忧。

2.2 人为过失引起的隐患不可忽视(人祸一)

管理不善造成的人为过失:设计疏忽、施工失控、粗暴使用的“三不正常”现象在我国并不少见。特别我国建筑业是传统的粗放型行业,大量流动性的民工涌入施工队伍,技术工人非常缺乏,施工质量难以保证,造成结构安全的隐患不可忽视。

2.3 诚信缺失造成的后患无穷(人祸二)

市场经济以后追逐利润的各种不道德行为滋生,如低价竞标、压低设计用钢量、施工偷工减料等,最近又出现“瘦身钢筋”的现象。变形钢筋的基圆面积率(受力面积与计算截面积之比)约 0.94,钢厂又按产品标准允许生产自重 -7% 以内的钢筋,施工规范冷拉调直允许伸长 1% ~ 4%,由此借口还要靠冷拉“瘦身”20% 以上,更有在“抽筋师”指导下于浇筑混凝土前抽减受力钢筋的不法行为!层出不穷的各类牺牲安全的做法,使标准规范难于应付。本来是用于指导正常技术行为的规范,现在倒有退化为“打假标准”的趋势。“诚信缺失”的现象如不坚决制止而形成建设行业的潜规则,则造成的结构安全隐患将对今后房屋的安全造成致命威胁。对我国现阶段此类特有的危险现象,设计者应有清醒的认识。

2.4 面对恐怖袭击的威胁(人祸三)

曾有专门研究表明:打击结构的死穴(薄弱部位),以很小的能量足以摧毁一座巨大的建筑。例

如,单层工业厂房的屋架下弦杆断裂,则由于连杆的拉结作用,足以使屋盖整体下坠而摧毁整座车间。“9·11 事件”已给世人敲响了警钟。恐怖袭击可以纵火、撞击、爆炸等方式打击结构的任何部位,以智能型打击指导下的自杀性破坏,其后果将不堪设想,这也成为现代结构不得不面对的现实问题。

2.5 偶然作用下结构防倒塌的意义

结构难免遭受天灾人祸引起的偶然作用,从而可能引起结构倒塌的严重后果,这又非常规设计所能防范。因此今后结构学科的发展将涉及“防灾性能研究”的新领域,这属于更深层次的安全问题。而落实于实际工程应用,则为《结构防连续倒塌设计规范》。“9·11 事件”以后,世界各国在这方面的研究迅速发展,我国同样也展开了相应的工作。

3 结构的安全层次和防连续倒塌设计

3.1 结构的安全层次

结构设计中的安全控制分为四个层次:结构方案、内力分析、截面计算、连接构造,其对结构安全的影响依次递降。传统设计规范的缺陷是过分强调“截面计算”的作用,而忽视更重要的“结构方案”和“内力分析”对安全的影响,对“连接构造”的轻视也往往造成整体性差而容易发生结构解体事故。“结构设计规范”往往成了“构件计算手册”,而真正对安全有决定性影响的本质问题反而被忽视了。

3.2 结构的整体稳固性

吸取大量工程事故的教训,近年对结构整体稳固性的研究受到重视。Robustness(也有译作鲁棒性)原意为“皮实”、“经折腾”的意思,这是决定结构安全最重要的性能。对事故和灾后倒塌和未倒塌结构的调查分析表明:结构抗灾和防倒塌的能力主要就取决于其整体稳固性。关于结构整体稳固性的具体含义将在后面阐述。

3.3 结构的防连续倒塌的概念设计

本次规范修订特地增加了“防连续倒塌设计原则”一节,条文虽只有三条,但却包含了非常丰富的内容。一般结构防倒塌的概念设计应考虑选址回避、作用渲泄、障碍防护、冗余约束、备用传力途径、加强关键部位、采用延性材料、连续贯通配筋、设缝控制倒塌范围、建立躲避待援的安全区等。实践表明:这些定性的设计概念对保证结构安全是很有效的。

3.4 防连续倒塌定量设计的原则

对容易受到袭击的更重要结构,应进行防连续倒塌的定量设计。本次修订只给出了下列定量设计方法的原则:1)局部加强法,直接考虑偶然作用,提高关键-重要构件的安全储备和变形能力;2)拉结构

件法,局部竖向构件失效后,剩余部分按连续贯通配筋的梁、悬索、悬臂拉结模型继续承载而不致于发生连续倒塌(图1);3)去除构件法,按一定规则去除主要受力构件,验算剩余部分的抗力,或进行结构倒塌全过程分析,以确定结构抗连续倒塌的潜力。由于内容较多,具体计算方法拟另编程序加以解决。

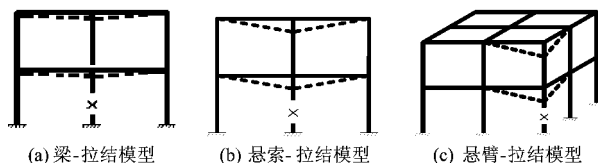


图1 结构防倒塌的拉结模型

4 强调结构方案的重要性

4.1 单列章节予以强调

本次规范修订在基本设计规定中增加了“结构方案”一节,力求使规范由单纯的“构件计算”过渡到整体的“结构设计”。修订规范强调了设计中整体稳固性的重要性,并提出了若干在混凝土结构概念设计中需落实的要求。

4.2 结构方案的内容

首先应考虑合理的结构选型、体系组构、构件布置。结构的平、立面形状应方正、规则;质量和刚度的分布应均匀、连续;结构体系中的传力途径应简捷、明确;竖向构件应垂直、贯通;宜采用超静定结构;重要-关键的受力部位应有冗余约束;并宜增加备用的传力途径;结构宜适当分缝以避免因局部破坏而引起连续倒塌。当然结构还应配合建筑满足使用功能,并考虑节省材料、方便施工以及节能环保的综合要求。这些看似简单的概念,真正落实并不容易,方案对结构安全能起决定性作用,设计者应特别重视。

4.3 合理结构方案的要诀

混凝土结构的合理结构方案,可归纳为64字的基本原则:四要:方正规矩、传力直接、冗余约束、备用途径;四忌:头重脚轻、奇形怪状、间接传力、材料脆性;四强:强脚柔腰、强柱弱梁、强墙轻板、强化边角;四宜:连接可靠、围箍约束、空心楼盖、以柔克刚。

5 重视结构分析的作用

5.1 结构分析的重要性

荷载作用于结构体系并在其中引起内力(效应)而定量化计算这种效应则是结构分析的内容。截面配筋和构件设计都是在此分析所提供内力的基础上进行的。因此斤斤计较于截面设计(误差不过百分之几),不如更专注于结构分析(误差可能达到百分之几十),否则就真正是本末倒置了。

5.2 基本假定和计算模型的讨论

实际工程结构千变万化,应该抓住主要矛盾,通过基本假定将其简化为计算简图,才能按理想化模型进行力学分析,以求得作用的效应(内力、变形等)这是结构分析的基础。但计算简图与工程结构受力情况可能会有很大差异,对实际工程结构进行的原位加载试验发现:许多传统的基本假定和计算简图与实际受力状态并不相符,计算结果大可存疑。

例如周边有梁支承的现浇混凝土板,通常都作为周边嵌固板而按塑性铰线-链板模型计算内力(图2(a))。而图2(b)所示的板,由于板周边支承梁的约束扭转破坏,从而引起了板中内力的转移,受力模型有了很大的改变:板的支座弯矩减小,而跨中弯矩及范围大大增加。图2(c)所示的板,为避免边梁约束扭转的影响而在板外增加了悬臂。但由于梁在跨中首先屈服,结果形成了十字形的链板破坏形态。上述这些对实际结构的原位加载试验说明:得之于实验室试验的许多传统计算模型并不准确,应根据实际结构的受力-支承情况,考虑结构体系中构件之间协调变形的相互影响,作更符合实际情况的判断。美国规范已作渐次改进,对梁-板设计按一体化构件考虑进行计算,可资参考。

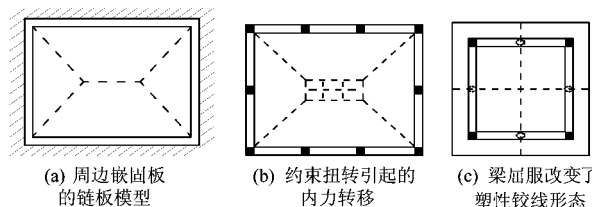


图2 周边嵌固板的计算简图及实际受力-破坏模型

5.3 混凝土结构的分析方法

本次修订丰富了结构分析的内容,归纳总结了以下结构分析方法的原则。

(1)弹性分析方法:这是所有分析方法的基础,多用于杆系及平面构件的内力分析。适用于承载能力极限状态的计算以及正常使用极限状态的验算。

(2)塑性内力重分布分析方法:这是以弹性分析为基础,考虑某些截面理想塑性而以调整相应内力值(调幅)而作简化计算的方法。适用于连续板、连续梁等结构的承载力设计。

(3)弹塑性分析方法:基于非线性本构关系为基础进行分析。由于均以代表值表达材料参数,且效应多以应力形式出现,为保证结构安全,必要时设计应考虑抗力的调整。

(4)塑性极限分析方法:超静定结构体系中,局部区域屈服后依靠冗余约束仍能承载。可以理想的

塑性铰线为模型进行内力分析,用于结构构件的承载力计算。但结构材料须有较大的延性,且能满足正常使用极限状态(变形、裂缝等)的要求。

(5) 试验分析方法:有些复杂结构的内力分布规律无法计算,只能以试验量测求得。而弹塑性分析以本构曲线计算时,往往以实测确定控制点的数值而建立本构模型。对混凝土这种离散度很大的结构材料,试验分析往往是解决工程问题有效的方法。

(6) 间接作用分析方法:近年由于混凝土收缩、温差、徐变、强迫位移等非荷载作用而引起的效应(裂缝问题等)引起了各界的关注,几乎成了影响社会安定的重大民生问题。本次修订新增“间接作用分析”一节,给出了考虑的原则。由于影响间接作用效应的不确定因素太多,目前只能以定性方法和构造措施加以控制。这个问题还须与间接作用(荷载)规范共同作长期的努力,才能逐步得到解决。

5.4 结构分析中的具体问题

本次修订还提出若干在结构分析中应注意的问题:现浇梁板中梁边板体作为翼缘参与梁截面受力的影响;非对称结构在重力作用下侧移引起竖向构件的二阶 $P-\Delta$ 效应的影响……修订规范分别给出了简化计算的方法。还有些更复杂的规律,如二阶效应引起的结构扭转问题,则尚待进一步研究解决。

6 构件计算中的若干问题

6.1 构件设计的修订原则

构件设计包括配筋计算、截面验算等内容,这是混凝土结构理论和设计规范中最成熟的部分。各种方法、各本规范的计算结果相差无几。本次修订未作大改动,仅作局部补充完善。

6.2 承载力极限状态的补充完善

原规范构件承载力可靠度的表述方式存在缺陷:作用效应以内力形式表达,不适用于应力设计及多轴强度准则;抗力以材料强度设计值计算造成受力状态失真(例如受弯计算中压区的实际高度 x 就因材料分项系数 1.4 的影响,相差了 40% 以上);还难以适应偶然作用下防连续倒塌设计及既有结构的再设计。为此,本次修订作了认真的补充和完善。

(1) 应力设计:二、三维结构可由应力区域积分为内力后按常规设计;若按多轴强度准则设计,因采用材料参数的特征值计算,所得的抗力应适当调整。

(2) 防连续倒塌设计:防倒塌设计应取钢筋的极限强度(而非屈服强度);设计中材料强度应取标准值;还应考虑动力作用引起的材料强化、脆性以及倒塌引起的几何参数变化等。

(3) 既有结构设计:材料强度对既有部分取实

测值,对后加部分取设计值,并应考虑既有结构的承载历史及实际施工条件(支顶)对内力分配的影响。

6.3 承载力计算方法的改进

本次修订承载力计算部分并无大的变化,只进行了少量改进,并适当增加了必要的安全储备。

(1) 材料分项系数调整:原规范热轧钢筋的材料分项系数为 1.1,本次对新增的高强 500MPa 级钢筋提高为 1.15。随着高强钢筋的推广应用,将普遍提高混凝土结构的安全储备。

(2) 受压构件二阶效应:考虑结构侧移及构件自身挠曲引起二阶效应对受压构件的不利影响,以弯矩增大系数等的形式表达,计算方法作适当调整。

(3) 提高受剪承载力安全储备:传统斜截面受剪承载力计算与国外规范比较,安全度明显不足。修订后混凝土受剪承载力项统一用剪跨比 λ 计算表达,以反映斜截面的受剪特性;箍筋抗力项系数由 1.25 调到 1.0,较大幅度地提高了斜截面受剪承载力的安全储备。

(4) 复合受力状态的承载力计算:在地震或其他横向荷载下,框架的边、角柱有可能遭受拉力作用。为解决复合受力构件设计的需要,补充了在拉、弯、剪、扭复合受力状态下矩形柱的承载力计算方法。

(5) 受冲切承载力计算的调整:根据试验研究结果、工程经验及与国外规范相关内容的比较,我国规范中受冲切承载力计算的安全裕量过大。故本次修订对其承载力计算公式作了适当放松。冲切承载力计算公式中双向预应力影响项的系数由 0.15 调整为 0.25,发掘抗力的潜力,提高了冲切承载力的计算值。这是规范修订中唯一降低安全度的个例,有利于板柱结构的受冲切承载力设计。

6.4 使用状态验算的调整

(1) 使用状态的调整原则:我国承载力计算的安全度低于世界水平,而使用状态却明显过于严厉。例如国外采用准永久荷载计算,裂缝宽度限值多为 0.4mm,且相同条件下计算的效应值均小于我国的计算公式。因而造成了往往以使用状态控制配筋的尴尬局面,严重影响了高强钢筋的应用。故本次规范修订在不影响安全度的情况下普遍作了放松。

(2) 减小荷载效应:根据工程调查分析并参考国外规范,在正常使用极限状态验算中,钢筋混凝土构件的楼面活荷载取荷载效应准永久组合;预应力混凝土构件仍按荷载效应标准组合进行验算。这样不仅更接近工程实际条件,而且大大放松了对于裂缝宽度和挠度的限制。

(3) 调整裂缝宽度的计算:裂缝宽度计算公式

的形式保持不变,仅对系数取值作适当调整:公式中钢筋混凝土构件的受力特征系数由 2.1 改为 1.9,预应力混凝土构件的由 1.7 改为 1.5。计算的裂缝宽度值减小,基本解决了采用高强钢筋受裂缝宽度制约的问题。

(4)调整刚度-挠度的验算:钢筋混凝土构件挠度改为准永久荷载组合验算后,长期刚度计算公式作了相应修改。对预应力混凝土构件控制反拱和挠度的数值,也作出了限制规定。

(5)增补舒适度要求:提高建筑使用的功能,增加了楼盖舒适度的要求,以竖向自振频率控制设计限值。

7 混凝土结构的连接构造措施

构造连接问题在设计中容易被忽视,往往造成安全隐患,本次修订作了适当加严。

7.1 加大钢筋的保护层厚度

考虑耐久性而加大了钢筋外混凝土保护层的厚度;恶劣环境下保护层的厚度大幅度增加,同时提出了根据情况控制保护层厚度的技术措施。这间接保障了结构的长久安全。

7.2 保证受力钢筋的锚固性能

高强钢筋引起锚固过长的问题急待解决。本次修订根据锚固条件给出了锚固长度修正系数及其连乘原则,利用有利的锚固条件(厚保护层、配筋裕量等)缩短锚固长度;同时纳入筋端锚头(弯钩及机械锚固)的技术要求及修正系数;降低了锚固长度的下限值。在基本不增加锚固长度的条件下保证了受力钢筋的锚固性能和结构的安全。

7.3 确保钢筋连接接头的传力性能

钢筋连接接头是会削弱钢筋的传力性能,内力(强度)、变形(割线模量)、恢复性能(残余挠度-裂缝)、延性(破坏形态)、施工质量(稳定性)等均不如整体钢筋,对搭接、机械连接、焊接都不例外。修订规范再次强调:接头设在内力较小处;同跨中少设接头;限制接头面积百分率;接头范围内相应的配筋构造措施。目的是消除某些广告式宣传的误导,提醒设计者正确处理钢筋连接问题,确保钢筋连接接头的传力性能和结构的安全。

7.4 受力钢筋最小配筋率的调整

钢筋最小配筋率与经济、技术发展水平有关,设计规范历次修订均有提高。受拉钢筋的最小配筋率由双控原则(配筋特征值及绝对值)确定,鼓励使用高强钢筋。而受压构件的全截面配筋稍有提高,由 335MPa 级为基础转为由 400MPa 级控制,全面提高了 0.05%。同时考虑工程实践及设计的延续性,适当降低了板类构件的最小配筋率;还对特厚受弯构

件按截面的临界高度及相应的最小配筋率计算实际配筋数量。目的是在保证结构安全的条件下,减少了不必要的盲目配筋。

7.5 改进板的配筋构造措施

为安全及耐久性计,本次修订加严了板的最小厚度及对悬臂板的限制。对非受力板边、角区的板面防裂构造配筋给出了统一的构造要求。完善了薄弱部位(瓶颈、洞口、凹角等)板的构造配筋措施。补充了板柱节点中柱帽、托板的构造要求以及对自由板端部封边钢筋的构造要求。这些构造措施都直接或间接地增加了构件的安全保障。

7.6 加强各类构件的配筋构造

采用钢筋端部的焊接锚板及螺栓锚头以减短、简化梁中纵筋在梁柱节点中的锚固要求;框架中间节点纵筋锚固改在节点外部连接;补充完善叠合构件(包括竖向叠合构件)的设计;改进装配整体式结构以及预埋件、连接件的设计方法以及连接构造措施……这些基于技术进步和工程经验所确定的构造措施,对于实现构件的可靠受力和结构安全起到了保障作用。

7.7 加强与预应力设计及抗震设计的协调

除以上各层次保障结构安全的改进以外,本次修订还特别注意在预应力设计及抗震设计两个领域中的安全问题。前者主要反映近年来预应力技术的进步;后者则吸取近年来震害的教训,明显增加了结构抗震的安全储备。鉴于篇幅不再赘述。

8 结语

本着“以人为本,安全第一”的宗旨,规范修订继续提高结构设计安全度,主要结论如下:1)考虑结构的抗灾性能,引入偶然作用以及结构防连续倒塌设计的理念;2)强调整体稳固性(Robustness)的重要性,增加“结构方案”,完善“结构分析”的内容;3)补充完善应力设计、多轴强度准则等方法并以抗力调整确保安全;4)调整构件的计算方法,提高斜截面受剪、复合受力状态等的承载力计算的安全性;5)加强钢筋锚固、连接、最小配筋率等的构造措施,保证构件的可靠受力及结构安全;6)改进构件构造及与相关预应力设计、抗震设计的协调,全面确保混凝土结构的安全;7)通过采用高强钢筋、依托机械锚固-连接等技术进步,消化安全度提高引起的材料耗;8)试设计表明,采用高强-高性能材料和新技术,提高安全度后,用钢量并未增加。

参 考 文 献

- [1] GB50010—2011 混凝土结构设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.