

《混凝土结构设计规范》修订概况(一)

赵基达, 徐有邻

(中国建筑科学研究院, 北京 100013)

摘要 阐述了新版《混凝土结构设计规范》修订的原则, 简介了规范修订的主要内容。包括完善结构设计的内容以提高结构的整体稳固性及抗御灾害的能力, 增加安全裕量; 采用高强高性能材料, 提高资源的利用效率; 完善承载能力及正常使用极限状态的计算方法; 改进结构设计的基本构造要求; 完善各种构件的构造措施; 加强预应力构件设计, 并与抗震设计规范合理分工、协调。介绍了按修订规范进行试设计的效果; 还对规范公布后的配套工作提出了建议。

关键词 混凝土结构; 设计; 规范; 修订

中图分类号: TU318.4 文献标识码: A 文章编号: 1002-848X(2011)02-0132-05

General situations of revision of *Code for design of concrete structures*

Zhao Jida, Xu Youlin

(China Academy of Building Research, Beijing 100013, China)

Abstract: The principles of revision of *Code for design of concrete structures* were introduced. The main revisions were introduced, such as perfecting the content of structural design in order to increase the safety margin, improving the robustness and the abilities to resist disasters of the whole structure, using high-strength and high-performance materials to enhance efficiency of resource utilization, perfecting the calculation of the bearing capacity and the normal using, improving the basic detailing requirements for the structural design and the detailing requirements of various components, strengthening with the prestressed component design, and coordinating with *Code for seismic design of buildings* legitimately. The results and conclusions of test specifications using the revised design were introduced, and some suggestion about the necessary mating work after publication was also described.

Keywords: concrete structure; design; code; revision

由中国建筑科学研究院主持, 会同国内 22 个单位参加修订的新版《混凝土结构设计规范》, 历时三年半将于 2011 年 7 月颁布实施。新规范的修订反映了近年混凝土结构的科研成果和工程经验; 贯彻落实国家“四节一环保”、节能减排与可持续发展的基本国策; 提高了防灾、抗震的设计与构造要求; 加强了与相关规范的协调, 并参考了国际标准的变化。

本次规范的修订原则如下: 适当增加安全储备; 提出结构整体概念设计的要求; 保证结构安全。增加防倒塌设计的原则; 提高抵御灾害的能力。新增既有建筑结构设计的基本原则; 并完善耐久性设计; 保障可持续发展。采用高强高性能材料, 减少资源与原材料的消耗。完善原规范的设计方法、计算公式及构造措施; 促进建筑结构技术进步。

本文简介新规范修订的主要内容, 重点修订问题将以文章连载的形式陆续刊出。

1 完善结构设计内容增加安全裕量

(1) 强调“结构方案”的重要性 原规范偏重截面配筋计算和构件设计, 而完整的设计应包括结构方案、内力分析、截面计算、连接构造四个层次, 对结构安全的影响依次递减。规范修订特地增加“结构

方案”一节, 由“构件计算”扩展到“结构设计”。强调结构选型、体系组构、构件布置、均匀规则、传力途径、冗余约束、缝的分割、连接构造、方便施工、综合功能等要求, 特别强调了结构整体稳固性 (Robustness) 的重要性。

(2) 完善承载能力极限状态计算 对于不同设计状况的承载力计算要求, 原规范的表达式存在一定局限性: 作用效应 (S) 用内力表达不适用于应力设计; 构件抗力 (R) 以强度设计值计算造成受力状态失真; 难以表达偶然作用下的防连续倒塌设计; 难以适应既有结构的设计, 为此作了相应的修改和调整。根据《工程结构可靠性设计统一标准》(GB50153—2008) 的规定, 引入抗力模型不定性系数 γ_{RD} (抗震时 γ_{RE}) 的方式调整抗力计算的结果。

(3) 修改正常使用极限状态验算 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。增补了楼盖舒适度的要求, 以竖向自振频率控制。

作者简介: 赵基达 (1956—), 规范主编, 总工程师, 研究员;
徐有邻 (1943—), 规范副主编, 顾问, 博士, 研究员。

(4)增加防连续倒塌设计原则 为提高结构抵御灾害的能力,防止结构在遭遇偶然作用时的连续倒塌,修订规范提出了结构防连续倒塌概念设计的要求:回避渲泄、障碍防护、冗余约束、备用途径、局部加强、贯通配筋、设缝控制等。给出了防连续倒塌定量设计的局部加强法、拉结构件法(梁、悬索、悬臂的拉结模型)、拆除构件法等原则。提出偶然作用的效应、动力系数、抗力计算(材料强度标准值、材料强化及脆性、几何参数变化的影响)等原则。

(5)增加既有结构设计的基本原则 针对既有建筑改造的迫切需要,提出了既有结构延长年限、安全复核、改变用途、扩建改造、修复加固的原则。设计应依据对既有结构系统检测、评定的结果。对既有结构的复核算,按承载力计算、使用状态验算、构造措施等分别提出不同的要求;也可通过调整使用功能、限制使用年限等满足设计要求。当进行重新设计时,应优化结构方案;既有部分的材料及几何参数可取实测值或按原设计值考虑。构件按二阶段成形的叠合构件进行设计;应考虑承载历史及施工条件的影响;并有可靠的连接构造措施。

(6)完善耐久性设计 混凝土结构耐久性以环境、材料、构造、维护四方面作定性设计。规范按环境条件(正常、干湿、冻融、氯盐、化学)详细划分的类别,更具有可操作性。根据建筑材料的变化调整了混凝土材料的耐久性能要求。给出了特殊构件、不利环境的耐久性施工要求及构造措施。新增加了使用期的维护、管理要求。

(7)补充完善结构分析的内容 完善结构分析基本假定及计算模型的原则。按结构的不同分析模型给出弹性(线性)、塑性内力重分布(调幅限值)、弹塑性(非线性)、塑性极限(塑性铰)等基本计算要求。提出了间接作用-非荷载效应(温差、收缩、徐变等)分析的原则。

(8) $P-\Delta$ 二阶效应计算方法 结构侧移可能引起竖向构件作用效应增大,提出用有限元分析方法计算。在附录中表达了简化的增大系数、刚度折减等计算方法。

2 采用高强高性能材料提高资源利用效率

(1)混凝土性能参数 适当提高了混凝土的最低强度等级,以及各类结构的适用强度等级。完善混凝土的应力-应变本构关系;提供多轴(二、三轴)应力状态下实用的强度包络图及强度调整系数表。补充混凝土的热工参数:比热、导热系数以便进行温度作用验算。

(2)提高钢筋强度等级 淘汰 HPB235 级钢筋,

以 HPB300 级钢筋代换;新增 HRB500 级钢筋;逐步限制 HRB335 级钢筋。增加 1960 级预应力筋;补充中强预应力钢丝及预应力螺纹钢筋。规范的相关条文均贯彻推广高强钢筋的原则:优先使用 400MPa 级钢筋;积极推广 500MPa 级钢筋;取消 235MPa 光圆钢筋;逐步限制、淘汰 335MPa 级钢筋。对设计中不同牌号钢筋(HRB,HRBF,RRB 及 E)的特点提出应用选择的要求。强调横向钢筋强度设计值的取值:限制剪-扭-冲切状态下的钢筋强度的限值 360MPa;但不包括约束配筋。

(3)补充钢筋的综合性能的要求 补充钢筋极限强度的指标。为保证结构与构件的延性,提出钢筋延性性能的要求:最大力下的总伸长率(均匀伸长率)、屈强比、超强比。

(4)并筋(钢筋束)的应用 增补并筋(钢筋束)的配筋方式,以方便设计与施工。并筋按单根等效钢筋计算及构造。根据面积相等的原则换算等效直径:双并筋 1.4、三并筋 1.7。

(5)钢筋代换原则 对设计变更中的受力钢筋,在强调等强代换原则的同时,提出应满足抗震、延性、裂缝、最小配筋、保护层厚度、钢筋间距、锚固、搭接、接头面积百分率等设计要求。

3 完善设计计算方法

(1)应力设计及非线性分析计算 根据非杆系构件、非线性分析承载力状态计算的特点与需要,给出应力设计的内力等效换算方法,以及按混凝土多轴强度准则进行计算的方法。

(2)本构关系及混凝土多轴强度准则 完善用于非线性分析的材料应力-应变本构关系:补充钢筋、预应力筋的本构关系;完善混凝土的拉-压本构关系;补充钢筋-混凝土之间粘结锚固的本构关系。提供混凝土二轴强度包络图及强度调整系数;提供混凝土在三轴应力(约束)状态下的强度图及强度调整系数。

(3)简化正截面承载力计算 正截面的基本计算公式未作变动。为方便设计人员使用,矩形、T形、工形截面计算仍在正文中表达;圆形、环形截面计算及“任意截面”的通用计算公式移到附录。

(4) $P-\Delta$ 二阶效应的计算 受压构件的截面设计基本未改变。完善构件自身受压挠曲弯矩增大的二阶($P-\Delta$)效应计算。

(5)调整斜截面受剪承载力 统一斜截面受剪承载力(一般均布荷载与集中力)的计算公式。混凝土受剪承载力均用剪跨比(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 调整到 1.0,适当提高斜截面受剪承载力的安全储备。

补充剪力墙受剪的截面控制条件以及受剪承载力的计算。

(6) 复合受力状态计算 为解决复合受力构件设计的需要(如地震时框架的边、角柱有可能受拉),补充在拉、弯、剪、扭复合受力状态下矩形柱的承载力计算。

(7) 受冲切承载力计算 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,对承载力计算公式作了适当放松。计算公式中双向预应力影响项的系数由 0.15 调整为 0.25。发掘了受冲切承载力抗力裕量,提高了冲切承载力的计算值。

(8) 调整裂缝宽度-挠度的验算 裂缝宽度计算公式的形式保持不变,系数取值适当调整。公式中钢筋混凝土构件受力特征系数由 2.1 改为 1.9;预应力混凝土构件由 1.7 改为 1.5。计算的裂缝宽度值减小,解决了采用高强钢筋受裂缝宽度制约的问题。钢筋混凝土构件改准永久荷载组合后,长期刚度计算公式作相应修改。对预应力混凝土构件控制反拱和挠度的数值,作出了规定。

4 改进基本构造要求

(1) 适当放宽伸缩缝最大间距控制 伸缩缝最大间距控制用词由“宜”改为“可”。强调施工措施的作用:包括跳仓法、后浇带、加强养护等。提出设计措施:施加预应力、增加构造配筋等。增补“控制缝”引导无害开裂及对控制伸缩缝间距的作用(引导开裂、调整间距、消除影响的配套措施)。

(2) 调整钢筋保护层厚度 强调耐久性环境类别对保护层厚度的影响,保护层厚度从最外层钢筋(箍筋、构造筋等)算起。简化构件类型(杆、面)及混凝土强度的影响。一般情况下保护层厚度稍增;恶劣环境下大幅度增加。根据工程实践,提出了减小保护层厚度的技术措施。当采用厚保护层时,配置网片(防剥落、控制裂缝宽度等)的构造措施。

(3) 控制钢筋的锚固长度 规范钢筋锚固长度的概念,给出控制锚固长度的因素:钢筋外形、混凝土强度、握裹层厚度、约束配筋、受力配筋裕量、锚头局压(侧压)等。根据锚固条件,给出锚固长度修正系数及连乘原则。提出筋端锚头形式(弯钩及机械锚固)的要求及锚固长度修正系数。降低锚固长度的下限值(0.7 改为 0.6)。

(4) 钢筋连接设计 强调钢筋连接接头保证传力性能的基本要求:内力(强度)、变形模量(割线)、恢复性能(残余挠度、裂缝)、延性(破坏形态)、施工质量(稳定性)等。搭接、机械连接、焊接的适用范围及相应配筋构造要求:各种连接形式的连接长度、接头面积百分率、配箍直径与间距等。降低搭接长

度下限值。

(5) 最小配筋率调整 专指纵向受力钢筋最小配筋率,构造配筋率另行规定。受拉钢筋的双控原则(配筋特征值及绝对值,鼓励使用高强钢筋)。考虑工程实践及设计的延续性,适当降低板类构件的最小配筋率。根据抗震设计的要求,对受压构件的全截面配筋率稍有提高(由 335 级钢筋为基转为 400 级钢筋,增加 0.05)。

(6) 特厚板类构件的最小配筋率 特厚板类构件配筋受最小配筋率控制,配筋量随板厚增加不合理。基础筏板最小配筋率降低为 0.15%。受弯的特厚板类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。

5 完善各种构件的构造设计

(1) 改进板的构造配筋 适当加大板的最小厚度限制。对非受力板边、角区的板面构造配筋给出了统一的构造要求,包括钢筋直径、间距、长度等。规定了现浇板在考虑间接作用(温度、混凝土收缩)时的构造配筋措施,包括双层配筋、构造配筋率、构造钢筋的直径、间距、锚固等要求。完善薄弱部位(瓶颈、洞口、凹角等)板的构造配筋措施,包括加大板厚、配置防裂配筋、钢筋的锚固要求等。

(2) 板柱结构的构造要求 补充板柱节点中柱柱帽、托板的长度范围、厚度等构造要求。给出板柱节点冲剪承载力计算原则及配筋构造要求。补充对自由板端部封边钢筋的构造要求(钢筋弯下、U 形封边插筋等)。

(3) 梁中控制裂缝的构造配筋 高截面梁腹部防裂(由于混凝土收缩与温度作用引起的裂缝)腰筋的构造要求。厚保护层梁中网片钢筋的配筋构造措施:直径、间距、范围、配筋百分率、绝缘要求等。

(4) 梁柱节点配筋构造 简化梁柱节点的配筋构造要求:引入钢筋机械锚头以减短、简化梁中纵筋在节点中的锚固配置要求;框架中间节点(或支座)下部纵筋取消弯折锚固的形式,改在节点外部连接。

(5) 混凝土墙的设计 为适应多层或低层混凝土墙体结构工程应用的需要,最小墙厚限制由“不应”改“不宜”;低层混凝土墙体的最小配筋率降低为 0.15%。

(6) 补充完善叠合构件设计 叠合式受弯构件名称改为水平叠合构件,设计内容移至附录。对二次成形的预制(或既有)墙、柱,按二阶段成形的竖向叠合构件设计。考虑实际工况,预制(或既有)及后浇部分的材料参数分别取值,并根据具体条件进行折减。提出后浇层及叠合面连接构造的要求。

(7) 完善装配整体式结构设计 强调装配整体

式结构的整体设计原则,以及保证整体传力的连接构造措施。对于预制构件,应验算在脱模起吊、运输码放、安装就位等不同阶段的工况,并考虑相应的动力系数。分别给出了装配式框架梁-柱、楼盖、墙体、非承重构件的连接构造要求。反映技术进步,增补机械连接、浆锚接头等的新连接方式的应用。

(8)预埋件、连接件的设计 预埋件设计不变,强调禁止使用冷加工钢筋。推荐内埋式吊装件及配套的专用吊具。预埋件、吊装件承载力验算与构造要求与原规范基本一致。提出锚固区域的局部验算要求。

6 加强预应力设计及抗震设计协调

(1)加强预应力构件设计 预应力混凝土结构采用高强高性能材料,具有截面小、自重轻、配筋少、挠度小、抗裂性能好、恢复性能强、连续配筋防倒塌等优点,在大跨度、大柱网楼盖及无梁楼盖中具有应用前景。为加强预应力混凝土结构的推广应用,修订规范将预应力单列章节作集中表述。根据近年商品混凝土收缩、徐变增大的特点,调整了混凝土收缩-徐变的预应力损失计算。补充新材料(塑料波纹管等)、新工艺预应力损失的计算。

(2)增补无粘结预应力的内容 纳入无粘结预应力设计的原则;提出板柱结构双向无粘结预应力板的设计要求与配套构造措施。

(3)完善预应力的配筋构造 完善各种预应力锚固端的局压-防裂的配筋构造要求。当预应力筋在凹面内侧布置时,提出抗崩裂U形插筋的构造措施。提出预应力外露金属件(锚具)的耐久性防护要求。

(4)与抗震规范的分工协调原则 与《建筑抗震设计规范》进行分工、协调:有关抗震等级、不同结构形式的限制高度、地震效应等涉及结构抗震宏观控制的内容不再列入本规范;同时强化和补充构件的抗震设计计算以及抗震配筋构造措施的要求。

(5)抗震钢筋 专用抗震钢筋带后缀“-E”表达,并明确界定抗震钢筋的应用范围。抗震钢筋的应用范围稍有扩大;包括三级抗震的框架、斜撑杆。为保证抗震钢筋的延性要求,增加最大力下总伸长率9%的要求。

(6)抗震柱设计 根据震害调查分析结果,适当提高各级(包括四级)框架抗震性能的要求。全面贯彻强柱弱梁、强剪弱弯的抗震设计原则,框架柱的弯矩、剪力设计值的增强系数稍有增加。增加四级轴压比限值的要求,其余各级轴压比限值同时稍有加严。对节点核心区受剪承载力计算扩大到三级抗震等级。增加地震双向受剪的配套要求:包括截

面控制、受剪承载力计算等。

(7)框架柱箍筋 框架柱箍筋对柱的抗震性能具有重要的围箍-约束作用;规范鼓励采用焊接封闭箍筋、连续螺旋箍筋和连续复合矩形螺旋箍筋,以有效提高框架柱的抗震性能。为提高加密区箍筋的约束作用,规范对加密区箍筋体积配箍率采用抗拉强度设计值计算,充分发挥高强钢筋用作约束箍筋时的强度,适当减少配箍量。

(8)连梁的配筋形式与构造要求 补充筒体-剪力墙的洞口、连梁、小跨高比梁的配套设计。采用交叉斜筋或对角暗柱的配筋形式,提高连梁的抗震性能,并补充其受剪承载力的计算公式以及相应的配筋构造规定。

(9)板柱节点抗震设计 新增板柱节点抗震设计一节。为了保证抗震性能,提出结合设置周边框架,并且适当布置剪力墙的原则。不平衡弯矩的等效集中反力按照附录计算。给出板柱节点的冲切承载力计算(包括销钉的抗剪作用)与板柱节点的配筋构造要求。

7 试设计效果

中国建筑科学研究院 PKPM 软件工程部派人参加了规范的修订,并全程跟进对 PKPM 程序进行修改。规范送审前主编单位又根据送审稿及相应的设计程序,组织七个单位对已完成的十个典型的实际工程(结构形式为框架结构、框架-剪力墙结构、框架-筒体结构、多层框架厂房、剪力墙结构、单层排架结构厂房、板柱结构)进行了试设计。试设计结果归纳总结如下:

(1)增加 500MPa 级高强钢筋,淘汰 235MPa 级钢筋并用 300MPa 级钢筋代换后,结构减少配筋的效果显著,但对不同设计项目差异很大,总体平均减少 10%~15%。

(2)受裂缝宽度制约而不得不调整配筋的情况明显减少,对不同类型结构分别降低了 10%~40%,由此纵筋用量减小约 10%。

(3)与原规范相比,内力较大的梁在采用活荷载准永久组合,以及裂缝计算公式的系数调整以后,高强钢筋已基本不受裂缝宽度验算控制。由于钢筋发挥了高强作用,可节省配筋约 10%~15%。

(4)框架柱箍筋加密区的箍筋在采用体积配箍验算时,采用高强钢筋的抗拉强度设计值效果明显,可省钢约 20%,但带来高强箍筋的加工问题。

(5)在斜截面承载力计算中,由于箍筋的计算抗剪承载力系数降低,箍筋的用钢量稍有增加。此外由于钢筋保护层厚度加大,其用钢量也稍有增加。但两者均不明显,根据不同情况,增幅约在 1%~

2% 到 4% ~ 5% 之间。

(6) 高强钢筋带来锚固、搭接长度增加等问题,采用已较成熟的机械锚固与机械连接、焊接等措施,并未明显引起用钢量的增加。但在推广过程中,必须加强各种高强钢筋机械锚固、机械连接、焊接连接的技术控制及质量保证。

(7) 内力较小的构件,由于受到最小配筋率及构造措施的控制而确定配筋量,采用高强钢筋的实际效果并不明显。

(8) 采取适当的结构体系布置以及相应的构造措施以后,板柱结构可以满足抗震设计的要求,但用钢量明显增加,约 10% ~ 15% 左右。

(9) 修订规范与原规范相比,混凝土用量无明显变化,在钢筋强度等级不变的条件下,钢筋用量稍有波动,但基本持平。

(10) 根据试设计的结果可以预测:在未来的混凝土结构中,300MPa 级钢筋可作为辅助配筋;400MPa 级钢筋将成为主力钢筋;500MPa 级钢筋也将作为受力主筋得到广泛应用。

试设计结论:本次修订规范的工程适用性较好,在适当提高安全储备、抗灾能力、耐久性能的情况下,通过技术进步和采用高强材料等措施,结构的整体安全性得到了进一步保证,并有效实现了“四节一环保”的目标。

8 结语

在新修订的 2011 版规范公布以后,主编单位将会同各参编单位组织力量渐次开展规范的后续配套

工作。将对设计人员宣讲修订后的新规范:以期刊连载的形式简介修订规范的主要内容;编写规范培训教材;考虑编制设计手册(计算、构造)及设计计算实例;协助编制设计程序(软件)。对规范修订中曾经考虑,但因相对不成熟而未纳入的许多新的研究成果与设计方法,考虑以设计指南、技术导则、推荐标准等形式推出,作为规范的延伸和补充。有关高校将在新编写的教科书中反映学科发展、技术进步与规范修订的内容。

还将组织有关科研人员总结近年围绕规范修订的研究成果,汇编成《钢筋混凝土结构科研报告集(四)》,并根据修订规范中亟待解决的问题提出混凝土结构规范科研课题的建议,为下次修订提供试验研究的基础。

三十多年以来,规范修订组织过六批科研课题,成果汇编成三册科研报告集,对引导混凝土结构学科发展和完善结构设计理论起到了积极作用。本次修订后,将继续此项工作。此外,还将通过讲课答疑、技术咨询、工程问题处理、调查检测、回答来信等途径,积累规范实施后的各种具体问题,从实用的角度编写混凝土结构设计问题讨论集。在当前市场经济条件下,开展上述工作极其艰难,但因其巨大的社会效益,将尽力而为之。

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.

新一期“土木工程院士、专家系列讲座”2010 年 12 月 30 日在南京成功举办

2010 年 12 月 30 日上午,由中国土木工程学会和中国工程院土木、水利与建筑工程学部主办,江苏省住房和城乡建设厅与江苏省土木建筑学会承办的新一期“土木工程院士、专家系列讲座”在南京举办。本次讲座邀请了中国工程院周丰峻院士、邹德慈院士主讲,中国土木工程学会张雁秘书长主持。

周丰峻院士做了题为《大跨度洞室与大跨度网架结构以及地铁公共安全技术发展》的学术报告。他应用大量工程实例,介绍了当前国际国内在地下工程建设与地下空间利用方面的最新趋势,重点讲述了我国地下隧道工程与水电核电工程建设中的关键技术,鼓励广大技术人员要敢于创新,勇于创新,但不能盲目创新,将创新与基础理论研究相结合,推动防护工程领域技术进步。

邹德慈院士做了题为《路网、交通与城市规划》

的报告,他用翔实的数据和图片,系统论述了近几年城市化与可持续发展、城市生态环境规范和城市设计等前沿性课题,提出了现代城市规划的理论观点,为到场的土木工程科技工作者上了很好的一课。

江苏省住房和城乡建设厅周岚厅长、张泉副厅长、顾小平副厅长等出席本次讲座,并与来自江苏省建科院、江苏省规划院、江苏省土木建筑学会、部分在宁设计院、高校的 200 多位土木机械科技工作者一起聆听了两位院士的报告。

“土木工程院士、专家系列讲座”由中国土木工程学会、中国工程院土木水利与建筑工程学部主办,围绕土木工程相关主题邀请土木工程行业院士、知名专家主讲,介绍院士、专家最新成果和土木工程领域最新动态。

本讲座为公益性活动,完全免费。