

# 《混凝土结构设计规范》修订简介(七) ——混凝土结构的承载能力极限状态计算

朱爱萍, 黄小坤, 徐有邻  
(中国建筑科学研究院, 北京 100013)

[摘要] 阐述了《混凝土结构设计规范》(GB50010—2010)修订中承载能力极限状态计算的相关问题,主要包括受压构件二阶效应( $P-\delta$ )的规定;受剪承载力、受冲切承载力计算公式的调整;补充了复合受力构件承载力及应力设计的相关规定。

[关键词] 承载能力极限状态;二阶效应;受剪承载力;受扭承载力;冲切承载力  
中图分类号: TU318.4 文献标识码: A 文章编号: 1002-848X(2011)08-0140-03

## Introduction of revision of Code for design of concrete structures part VII: Ultimate limit states design of concrete structures

Zhu Aiping, Huang Xiaokun, Xu Youlin  
(China Academy of Building Research, Beijing 100013, China)

**Abstract:** The ultimate limit states design problems in the revision of Code for design of concrete structures (GB50010—2010) were described, mainly including the provisions of the second-order effects, the calculation formulas adjustment of shear capacity and punching shear capacity, the complement of bearing capacity design of reinforced concrete members with multiplex stresses.

**Keywords:** ultimate limit states; second-order effects; shear capacity; torsional capacity; punching shear capacity

### 0 概述

确定结构方案并由结构分析求得内力以后,承载能力极限状态计算的任务是:通过控制截面的内力(包括压、拉、弯、剪、扭、冲切、局压等)进行构件配筋设计。这是结构安全的第三层次。承载力依据钢筋的屈服强度以及混凝土抗压强度设计值进行计算,因此对应的都是以钢筋屈服和混凝土压碎为极限状态标志的“强度”问题。

除了上述以内力形式表达的强度问题以外,以应力形式表达作用效应的构件宜进行应力设计,这也是承载能力计算的形式之一。

承载力计算是混凝土结构理论和设计规范中相对成熟的部分,本次修订基本保持原规范的规定,仅改动了下列内容:调整受压构件的二阶效应( $P-\delta$ 效应)计算;降低箍筋项的受剪承载力;补充拉-扭和拉-弯-剪-扭复合抗力的计算;提高了受冲切承载力;完善了应力设计的内容;并对承载力计算内容的表达和编排作了简化处理:非共性技术问题的内容均纳入附录表达。本文仅就规范的承载力计算以及本次修订改动内容的技术背景进行简要介绍。

### 1 正截面承载力计算

#### 1.1 基本概念

正截面承载力计算是混凝土结构设计的基础。作用于结构的恒载和可变荷载,在水平构件(板、

梁)中引起弯矩,在竖向构件(柱、墙)中引起了偏心的压力或拉力。根据受力状态不同,正截面承载力计算要考虑轴压、小偏压、大偏压、受弯、大偏拉、小偏拉、轴拉几种情况,且不同受力状态的临界点都有明确的物理意义。其中,拉区钢筋屈服的同时压区混凝土达到极限压应变的状态称为平衡配筋状态或界限配筋点;而拉力作用处在截面的内、外时则区分为大、小偏心受拉状态。

正截面承载力计算的基本假定与原规范相同,例如:截面应变保持平面;不考虑混凝土拉应力;混凝土的本构关系及其极限应变(0.002~0.0033);钢筋的理想塑性及其极限应

变(0.001)等。应该指出的是:这些来自试验研究基础上的“假定”,大致反映了受力规律。但由于承载力计算是建立在材料强度设计值的基础上的,已考虑了保证率和材料分项系数。

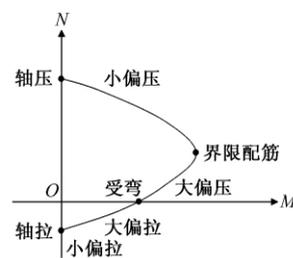


图1 正截面承载力的  
受力类型

作者简介:朱爱萍,工程师;黄小坤,研究员;徐有邻,博士,研究员。  
注:本文由徐有邻执笔。

修订规范还提醒设计者应考虑次内力的影响。例如,结构侧移引起的二阶效应( $P-\Delta$ 效应)已由第 5 章“结构分析”解决;承载力计算只解决受压构件自身挠曲引起的二阶效应( $p-\delta$ 效应)。为此,对考虑附加弯矩的条件、构件的计算长度、控制截面的弯矩设计值、截面附加偏心距、偏心距调节系数、弯矩增大系数等在原规范规定的基础上作了调整。双向受力(受弯、轴力)构件合力偏心引起扭转的影响,也应引起重视。

修订规范将圆形、环形及任意截面的正截面承载力计算移至附录 E,以求简化。

### 1.2 受弯、轴心受压和偏心受拉构件承载力计算

历经各次规范修订这部分内容基本保持不变, T 形截面、I 形截面、倒 L 形截面等的承载力计算类似,不再赘述。

### 1.3 偏心受压承载力计算

偏压构件的承载力基本方程也基本未改变,但在考虑  $P-\delta$  效应影响时,以偏心距调节系数  $C_m$  和弯矩增大系数  $\eta_{ns}$  的形式直接计算弯矩设计值  $M$ ,例如对矩形截面偏心受压构件的设计公式为:

$$N \leq \alpha_1 f_c b x + f_y' A_s' - \sigma_s A_s - (\sigma_{p0}' - f_{py}') A_p' - \sigma_p A_p$$

$$Ne \leq \alpha_1 f_c b x \left( h_0 - \frac{x}{2} \right) + f_y' A_s' (h_0 - a_s') - (\sigma_{p0}' - f_{py}') A_p' (h_0 - a_p')$$

其中:  $e = e_i + h/2 - a$ ,  $e_i = e_0 + e_a = M/N + e_a$ ,  $M = C_m \eta_{ns} M_2$

偏心受压构件承载力计算的其他内容,包括 I 形、T 形、腹部均匀配筋截面以及双偏压构件等的承载力计算类似,不再赘述。

## 2 受剪承载力计算

### 2.1 剪切的受力特征

混凝土构件中剪应力造成斜向开裂和沿剪切面破坏,故称斜截面承载力。构件的受剪承载力由截面混凝土和横向配筋(箍筋、弯筋)的抗力构成,并受到剪跨比( $\lambda$ )对受剪承载力的影响,因此设计时必须保证截面尺寸和配箍。

剪切破坏是以混凝土破碎为特征的破坏,具有非延性的性质,故应具有较高的安全度,本次修订降低了箍筋抗力项的系数,增大了其安全储备。此外,剪力在构件中与弯矩、轴力等内力共生,在抗力项的计算中也作了反映。

### 2.2 截面验算条件及验算截面

与钢筋的最小配筋率类似,受剪构件的截面尺寸应有一个下限,保证在剪力作用下不会导致过大裂缝,截面验算条件根据腹板的高宽比( $h_w/b$ )而有

所不同,其变化幅度为:

$$V \leq (0.25 \sim 0.20) \beta_c f_c b h_0$$

因剪力沿构件纵向分布的变化,以及截面受剪承载力也有相应的变化,确定受剪承载力计算控制截面的位置也十分必要,规范也作出了相应的规定。

上述两项计算,规范修订未作任何改变,与原规范完全相同。

### 2.3 受剪承载力计算的调整

鉴于受剪承载力的重要性以及传统计算的安全储备相对较低,与国外存在明显的差距。本次修订通过降低箍筋项的抗力系数(由 1.25 改为 1.0),提高了其安全储备。同时混凝土项的抗力系数统一表达为  $\alpha_{cv}$ : 对一般情况  $\alpha_{cv}$  为 0.7; 对集中力与剪跨比有关时  $\alpha_{cv}$  为  $1.75/(\lambda + 1)$ 。弯筋抗剪承载力项仍为  $0.8 f_{yv} A_{sb} \sin \alpha_s + 0.8 f_{py} A_{pb} \sin \alpha_p$ , 与原规范相同。截面配置垂直箍筋时的受剪承载力:

$$V_{cs} = \alpha_{cv} f_t b h_0 + f_{yv} (A_{sv}/s) h_0$$

### 2.4 其他剪力问题

底边倾斜的构件、T 形、I 形、圆形截面、双向受剪柱、剪力墙、洞口连梁、受弯构件的弯-剪承载力、偏心受压及偏心受拉构件的受剪承载力等,基本同原规范,不再赘述。

## 3 扭转承载力计算

### 3.1 扭转受力特征

扭矩引起沿构件表面斜向主拉应力,形成连续螺旋状的斜向裂缝而导致受扭破坏。工程中纯扭构件很少,而多与弯、剪、压(拉)相组合,形成复合受力状态。构件抗扭承载力取决于构件表面配置的纵筋、箍筋以及截面混凝土承担的扭矩。

### 3.2 截面验算及构造配筋条件

与受剪构件类似,剪-扭构件的截面尺寸及混凝土强度也应有一个下限,与剪-扭内力、截面尺寸及受扭塑性抵抗矩有关。根据截面的宽厚比( $h_w/b$  或  $h_w/t_w$ ) 不同而有所不同:

$$\frac{V}{bh_0} + \frac{T}{0.8W_t} \leq (0.25 \sim 0.20) \beta_c f_c$$

同样,考虑预压应力或受压构件轴向压力的有利影响,与原规范完全相同,满足下列条件时可以不作受剪-扭承载力计算而仅按构造配筋:

$$\frac{V}{bh_0} + \frac{T}{W_t} \leq 0.7f_t + 0.05 \frac{N_{p0}}{bh_0}$$

或

$$\frac{V}{bh_0} + \frac{T}{W_t} \leq 0.7f_t + 0.07 \frac{N}{bh_0}$$

### 3.3 受扭承载力计算

矩形截面纯扭承载力计算未作改变,与原规范完全相同:

$$T \leq 0.35f_t W_t + 1.2\sqrt{\zeta}f_{yv} \frac{A_{stl}A_{cor}}{s}$$

式中受扭纵筋与箍筋的配筋强度比为  $\zeta = \frac{f_y A_{stl} s}{f_{yv} A_{stl} u_{cor}}$ 。

其余 T 形、I 形、箱形截面的受扭承载力可由其腹板、翼缘的受扭承载力组合而成。规范修订未作改变,与原规范相同,不再赘述。

### 3.4 受扭构件的复合抗力

扭曲的特点是以复合受力的形式出现,例如:剪力-扭矩共同作用,弯矩-剪力-扭矩共同作用,轴压-弯矩-剪力-扭矩共同作用,或拉力-弯矩-剪力-扭矩共同作用。其中拉-扭作用梁和拉-弯-剪-扭作用柱是本次修订新增的,在水平荷载作用下的框架梁及边、角柱有可能产生拉力,从而处于拉扭或拉-弯-剪-扭的受力状态。规范修订增补了与其相应的承载力计算方法。

## 4 冲切承载力计算

### 4.1 冲切受力特征

冲切承载力由沿 45°冲切面上的混凝土承载力和穿越冲切面配筋(箍筋、弯筋)承载力的投影构成。我国传统设计中冲切承载力的安全度高于各国的水平。本次规范修订通过调整计算公式中的系数,适当降低了不必要的安全储备。

### 4.2 冲切承载力计算

不配置箍筋或弯起钢筋的受冲切承载力取决于沿冲切计算截面面积( $u_m h_0$ )上的混凝土受冲切承载力,当有预压应力时,尚应考虑其对受冲切承载力的提高作用。受近旁开孔影响时,应对计算截面周长  $u_m$  作相应的折减。本次修订根据试验结果和国外规范的经验,将预压应力项的抗力系数进行了提高,由 0.15 提高至 0.25,其受冲切承载力设计表达式为:

$$F_l \leq (0.7\beta_h f_t + 0.25\sigma_{pc,m}) \eta u_m h_0$$

配置受冲切钢筋(箍筋、弯起筋)的受冲切承载力设计表达式为:

$$F_l \leq (0.5f_t + 0.25\sigma_{pc,m}) \eta u_m h_0 + 0.8f_{yv} A_{svu} + 0.8f_y A_{sbu} \sin\alpha$$

式中抗力项的系数均有所提高(0.35 改 0.5, 0.15 改 0.25),安全储备减小。

与受剪构件类似,冲切构件的截面尺寸也应有一个下限控制条件:

$$F_l \leq 1.2f_t \eta u_m h_0$$

### 4.3 受冲切构件的设计

实际工程中需考虑受冲切承载力验算的构件,

如阶形柱基、板柱节点或局部荷载作用处的楼板等,板柱节点计算截面上不平衡弯矩通过等代集中反力进行计算(附录 F)与原规范保持相同,不再赘述。

## 5 局部受压承载力计算

### 5.1 局部受压的受力特征

当很大的集中力作用于构件局部表面时,单位面积上混凝土受压发生局部凹陷-劈裂破坏,这就是局部受压的承载力问题。局部受压应力的扩散以及周边混凝土和横向钢筋的围箍约束作用,使局部受压下的混凝土处于三轴受压的应力状态,从而大大提高了其抗力。而局部受压抗力的提高,与周边底面积有关,由于有效约束的需要,底面积的取用具有“同心对称”的特点。

实际工程中的局部受压问题多发生在预应力构件的端部锚固区以及巨大集中荷载作用处。本次规范修订对局部受压问题基本维持了原规范的规定。

### 5.2 局部受压承载力计算

局部受压承载力远大于混凝土强度,而与受压净面积及相应同心对称底面积之比有关:

$$F_l \leq 1.35\beta_c \beta_l f_c A_{ln}$$

式中:局压强度提高系数为  $\beta_l = \sqrt{A_b/A_l}$ ;  $A_l$  为局部受压面积;  $A_b$  为局部受压计算底面积;  $A_{ln}$  为混凝土局部受压净面积。

### 5.3 约束配箍及约束混凝土的抗力

采用配筋对局部受压的混凝土进行围箍约束,同样能够起到提高局压承载力的作用。

$$F_l \leq 0.9(\beta_c \beta_l f_c + 2\alpha\rho_v \beta_{cor} f_{yv}) A_{ln}$$

体积配筋率对网片钢筋为  $\rho_v$ ,仍保持原规范的规定,但对  $\beta_{cor}$  的取值作了调整,即当  $A_{cor}$  不大于  $A_l$  的 1.25 倍时,应取  $\beta_{cor} = 1.0$ 。

应该强调的是,间接配筋的强度  $f_{yv}$  不受 360MPa 的限制,这就可利用强度更高的钢筋进行有效约束,从而为提高局部受压承载力创造了条件。

## 6 承载力极限状态的其他问题

### 6.1 素混凝土构件设计

本次规范修订对素混凝土构件设计未作任何修改,故仍按原规范执行。只是应注意素混凝土构件并不完全等于无筋混凝土构件,只是小于最小配筋率而不考虑钢筋的承载力而已。为避免间接作用引起的裂缝和其他不利影响,配置一定的构造配筋是必须的。

### 6.2 疲劳验算

建筑结构中考虑疲劳验算的构件主要是吊车梁。本次规范修订根据已有的试验成果补充、完善

(下转第 7 页)

中采用梁、柱钢筋带锚固板的部分搭接方案时,梁的上部钢筋伸入节点外侧柱筋的内缘后 90° 向下弯折,至梁底标高处截断,钢筋的端部均应设置锚固板;柱中梁宽度以内的钢筋伸至节点顶部后向梁端方向弯折,由梁底标高处算起的弯折总搭接长度不小于  $1.3 l_{aE}$ ,且该部分柱筋应至少伸至梁柱交接处方可截断;梁宽度范围以外的柱筋应伸至节点顶部,钢筋的端部设置锚固板;弯折搭接柱筋的截面面积应不少于总外侧柱筋截面面积的 50%。

(3) 本次完成的 8 个顶层端节点试件,梁、柱的正弯矩钢筋在节点内均采用带锚板的锚固方式,与梁筋采用 90° 弯折锚固的试件相比,其承载力的退化更为平缓。当试件反向加载(梁端正弯矩作用)承载力下降到峰值承载力的 85% 时,钢筋从节点内的滑出量比同条件梁筋采用 90° 弯折锚固的试件要小;当梁筋采用 500MPa 钢筋时,钢筋在节点内使用锚固板锚固且水平段长度不小于  $0.4 l_{aE}$  的规定能满足钢筋对抗震锚固的受力性能要求。

(4) 在受力后期,由于钢筋与混凝土粘结退化后更多的钢筋力由锚固板承担,为保证节点区锚固板部位混凝土的破损导致锚固板的受力环境劣化情况下钢筋受压时的锚固性能,建议钢筋锚固板外端距节点外侧边应留有一定的距离,建议不小于 50mm。

(上接第 142 页)

了混凝土在受压、受拉、受拉-压作用下的疲劳强度修正系数。

另外,大量的试验资料表明,只要混凝土不开裂,钢筋就不会发生疲劳破坏,即不裂不疲。而一级裂缝控制等级的预应力混凝土构件(即全预应力混凝土构件)不仅不开裂,而且混凝土截面不出现拉应力,所以更不会出现钢筋疲劳破坏,所以可不进行疲劳验算。本次修订增加规定“一级裂缝控制等级的预应力混凝土构件的钢筋可不进行疲劳验算。”

### 6.3 应力设计方法

大体积混凝土结构和体形复杂的结构,与传统以内力形式进行的承载计算不同,分析的效应以应力场的形式表示,此时的应力设计可采用两种形式:

(1) 等代内力法:将主应力按区域积分而成为单向内力;受拉钢筋的配筋量可根据主拉应力的合力进行计算,但一般不考虑混凝土的抗拉设计强度;其余区域按构造配筋。

(2) 按多轴强度准则验算:对二、三维结构或约束混凝土,当压应力较大时可利用多轴强度准则发掘混凝土抗力的潜力。按附录 C.4 的规定,求得的

### 参 考 文 献

- [1] GB50010—2002 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [2] MEGGET L M. The seismic design and performance of reinforced concrete beam-column knee joints in buildings [J]. Earthquake Spectra, 2003, 19(4): 863-895.
- [3] WALLACE J W, MCCONNELL S W, GUPTA P, et al. Use of headed reinforcement in beam-column joints subjected to earthquake loads [J]. ACI Structural Journal, 1998, 95(5): 590-606.
- [4] LEE HUNGJEN, YU SIYING. Cyclic response of exterior beam-column joints with different anchorage methods [J]. ACI Structural Journal, 2009, 106(3): 329-339.
- [5] 中国建筑科学研究院建筑结构研究所, 天津大学建筑工程学院. 带锚固板钢筋机械锚固性能研究 [R]. 天津: 天津大学, 2006.
- [6] 陈堃. 配置 500MPa 纵筋采用带锚固板梁内搭接方案的框架顶层端节点抗震性能研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2009.
- [7] 彭辉. 配置 500MPa 纵筋采用带锚固板柱内搭接方案的框架顶层端节点抗震性能研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2009.
- [8] 中国建筑科学研究院建筑结构研究所, 重庆大学土木工程学院. 配置 500MPa 级纵筋的混凝土框架结构非线性动力反应分析 [R]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- [9] 冯长征. 配有 500MPa 级钢筋的框架顶层端节点抗震性能试验研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2007.

主应力值不得超过相应的强度代表值:

$$|\sigma_i| \leq |f_i| \quad (i = 1, 2, 3)$$

抗压强度最大可达 3 倍,因此约束混凝土具有巨大的开发潜力。

### 6.4 其他构件的承载力计算

混凝土结构中的其他构件,如深受弯构件、叠合式构件、预制-装配式结构、牛腿、预埋件、连接件等,规范修订未作改变,由于其特殊的受力形态,规范将这些构件的承载力计算移到第 9 章或附录中,与其构造要求一并表达。

### 7 结 语

本次规范修订基本保留了原规范的承载力极限状态计算内容,仅作了以下少量改动:修改受压构件二阶效应的计算方法,本章只解决构件自身挠曲所引起的  $P-\delta$  效应;补充了处于拉-扭和拉-弯-剪-扭复合受力状态构件的承载力计算,填补了规范的空白;降低了箍筋项受剪承载力的取值,适当提高配置箍筋构件受剪承载力公式的安全储备;提高了配置抗冲切钢筋构件的受冲切承载力的取值,适当降低了安全储备;补充、完善了以应力设计形式表达的承载力计算方法。