

有黏结预应力框架梁的结构设计

宋晓红, 樊钦鑫

中国航空规划建设发展有限公司, 北京 100120

摘要 结合设计中跨度较大、重荷载、耐久稳定、防腐、防火要求高等特点,对某会展馆楼面结构优化后,选取后张有黏结预应力混凝土结构,使结构具有较好的整体受力性能。从分析模型确立、裂缝控制、承载力验算 3 个宏观方向,详细阐述后张有黏结预应力框架设计中的预应力估算、线形确定、损失估算、次弯矩影响、非预应力筋计算、控制截面讨论等全过程,针对能够反映混凝土框架梁端延性的受压区高度、折算受拉钢筋配筋率、预应力度、非预应力钢筋面积比等几个问题,给出在设计过程中的处理办法及延性目标限值,最后确定合理的张拉施工方案,并对张拉核心区进行验算,达到设计施工的和諧统一,可供类似工程参考。

关键词 延性;预应力混凝土结构;预应力度;次弯矩

中图分类号 TU311

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.20.010

Ductility Design Based on the Bonded Prestressed Concrete Frame Beams

SONG Xiaohong, FAN Qinxin

China Aviation Planning and Construction Development Limited Company, Beijing 100120, China

Abstract Combined with the large span, heavy load, stability, durability, and high requirement for fire prevention and anti-corrosion, the optimized structure should be a post-tensioned bonded prestressed concrete frame structure, and the overall structure has good mechanical properties. Starting from three macro directions of analysis model establishment, the crack control, and bearing capacity calculation, the detail design process for long-span post-tensioned bonded prestressed beams is introduced. Some problems, such as degree of the relative height of equivalent compression zone, partial prestressing ratio, rate of tension reinforcing steel bar, and non-prestressed reinforcement area ratio, are discussed and the treatments are put forward. As indicating in the results, for developing a reasonable tension construction scheme, some construction measures for the core areas of tension are suggested, and the design experience could be referred to similar engineering projects.

Keywords ductility; prestressed concrete structures; partial prestressing ratio; secondary moment

0 引言

近十几年来,中国在应用高效预应力混凝土方面取得了令人瞩目的进展,相继建成了各式各样的预应力混凝土结构房屋,设计理论及计算方法趋于成熟,其简化的等效荷载平衡法、名义拉应力法等房屋建筑中的运用越来越广泛。本文以某会展馆为例,对其进行预应力梁设计。

1 工程概况

某会展馆建筑面积约 3 万 m^2 ,主要供国际展览和大型会议使用,由展览中心和配套建设两部分组成。主体结构的会

展部分包括:一层地下室,战时为六级人防物质库及人员隐蔽,高 4m,地下室结构跨度为 9m×9m;地上部分二层,局部有夹层,层高 11.6m,主要结构跨度为 18m×18m;屋顶采用钢桁架铰接于混凝土柱顶。

根据地质勘察报告显示,场地土类别为 III 类,特征周期为 0.45s。抗震设防烈度为 6 度,设计基本地震加速度值为 0.05g(g 为重力加速度),设计地震分组为第一组。工程场地 50 年超越概率 63%,场地特征周期为 0.40s,水平地震影响系数最大值为 0.058。本工程设计使用年限为 50 年,建筑结构的安全等级为二级,抗震设防分类为乙类,框架抗震等级二级。

收稿日期:2011-04-25;修回日期:2011-06-02

作者简介:宋晓红,高级工程师,研究方向为复杂结构设计,电子信箱:sxhzzmtt@163.com

2 结构选型与整体计算

会展馆展厅一部分框架梁跨度为双向 $18\text{m} \times 18\text{m}$, 另一部分为单方向跨度 27m (图 1)。楼面结构形式根据平面布置和建筑功能可以采用钢梁与混凝土板组合结构、普通混凝土结构、预应力混凝土结构等多种布置方案。此种大柱网结构通常采用钢结构, 其自重轻, 施工方便, 抗震性能好。但是对于本工程考虑到地下一层为人防层, 采用钢骨柱与钢梁连接, 不仅连接构造非常复杂、难以保证施工质量, 而且对于会展馆这种重点设防建筑的防火和舒适度要求较高, 采用钢结构势必增加结构整体造价, 因此从经济性和结构合理性角度考虑, 应采用混凝土结构体系。若采用普通混凝土结构, 大跨度、承受重荷载的梁, 在正常使用条件下, 其挠度和裂缝很难满足要求, 靠增加配筋率和截面尺寸提高抗裂度和刚度会导致结构自重增加, 温度效应和地震作用也随之增大, 而且建筑还要限制层高。所以经方案比较确定预应力混凝土结构方案, 通过初步计算布置的井字次梁刚度和抗裂度较好, 不用施加预应力可以满足正常使用要求, 最终仅对框架梁选用承载力抗震性能更好的后张有黏结部分预应力结构。

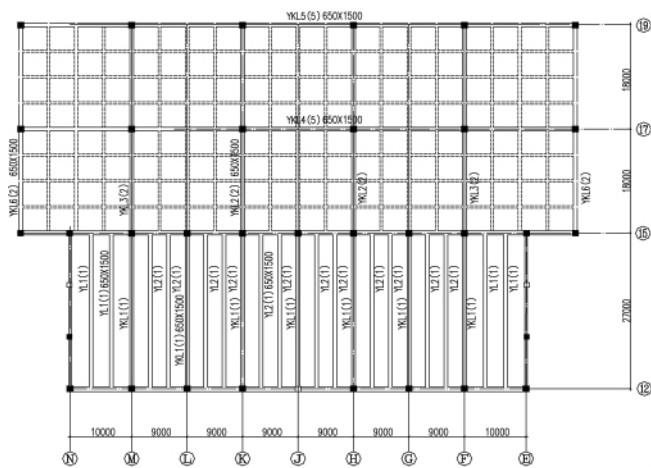


图 1 楼面预应力结构布置

Fig. 1 Floor prestressed structure arrangement

结构整体分析首先采用 SATWE 软件进行弹性分析;然后利用 PREC1 对连续多跨预应力框架梁进行设计,并将等效荷载输入整体模型验算上部结构是否安全;最后根据有限元分析软件 MIDAS 建立会展馆整体模型,真实模拟上下部结构耦合作用,进行多遇地震反应谱分析,同时考虑在恒、活、风荷载、地震作用等多种工况下,对预应力梁进行校核。

3 预应力梁设计

3.1 设计参数及要求

梁柱采用 C40 高强混凝土,预应力筋采用高强低松弛抗拉强度标准值 $f_{pk}=1860\text{N/mm}^2$ 的 $\phi^s 15.2$ 钢绞线,预应力筋张拉控制应力为 $0.7f_{pk}$ 。预应力的用钢量主要由抗裂度决定,因

此,适当放宽裂缝控制条件,可节省钢材、降低造价。确定结构构件的裂缝控制等级为三级,按照荷载效应标准组合并考虑长期作用影响计算时,构件最大裂缝宽度 $\omega_{\max}=0.2\text{mm}$;挠度控制 $f=L/300$, L 取 18.27m 。

楼面荷载取值:展厅部分恒荷载(不考虑楼板自重) 7.0kN/m^2 ,活荷载 5.0kN/m^2 (活荷载准永久值系数 0.5),基本风压取为 0.45kN/m^2 ,温度作用考虑升降温 20°C ,设计中按照 GB 50009—2001《建筑结构荷载规范》^[4]进行上述荷载组合下的结构设计。框架梁选取跨度的 $1/12$ — $1/18$,柱截面满足配筋、轴压比、连接等构造要求,楼板考虑温度效应,经计算,主要结构截面及材料如表 1 所示。

表 1 结构截面及材料

Table 1 Structure section and materials

构件类型	主要尺寸	钢筋等级(主要钢筋直径/mm)
框架柱	1000mm×1000mm 900mm×900mm	HRB400(28,32)
框架梁	650mm×1500mm	HRB400(28,25)
井字次梁	400mm×1200mm	HRB400(25,22)
楼板	厚度 150mm	HRB400(8,10,12)

3.2 预应力筋估算

采用裂缝控制的名义拉应力法对预应力筋进行估算。对于控制裂缝宽度为 0.2mm 的梁名义拉应力为 5.1MPa, 当在截面受拉区靠近边缘处有附加非预应力钢筋且配筋率大于 1% 时, 容许名义拉应力可以提高 4.0MPa, 同时考虑构件高度修正系数 0.7, 所以 $\sigma_{\text{ek}} = (5.1 + 4.0) \text{MPa} \times 0.7 = 6.37 \text{MPa}$, 预加力为

$$N_{pe} = \frac{\beta M_K / W - \sigma_{\text{stk,lim}}}{1/A + \frac{e_p}{W}} \quad (1)$$

其中, N_{pe} 为预应力筋的总有效预加力; M_K 为按均布荷载的标准组合计算的弯矩设计值; W 为构件截面受拉边缘的弹性抵抗矩; A 为构件截面面积; $\sigma_{tk,lim}$ 为荷载标准组合下的混凝土拉应力限值; e_p 为预应力筋重心对构件截面重心的偏心距; β 为影响系数。

有黏结预应力钢筋面积为

$$A_p = \frac{N_{pe}}{\sigma_{pe}} \quad (2)$$

其中, σ_{pe} 为预应力筋的有效预应力。考虑次弯矩影响系数 β , 跨中 $\beta=1.2$, 支座 $\beta=0.9$ 。考虑锚具变形和钢筋回缩、孔道摩擦、混凝土收缩徐变、预应力钢筋的应力松弛、结构跨数及支承条件等对预应力损失的影响确定预应力筋有效应力: σ_{pe} 取值单跨 $0.8\sigma_{con}$ 、双跨或三跨内支座 $0.7\sigma_{con}$ 、边跨跨中及边支座 $0.8\sigma_{con}$ 、三跨内跨中 $0.6\sigma_{con}$ 。梁 YK12 预应力筋估算结果如表 2 所示。

3.3 束形确定

合理的预应力筋线型布置的原则应该是张拉预应力筋

表 2 梁 YKL2 预应力筋估算结果
Table 2 Estimation of YKL2 prestress

荷载短期效应/(kN·m)		预应力偏心距/mm		预应力钢筋面
支座	跨中	支座	跨中	积 A_p/mm^2
9055	8423	500	650	5802

产生的等效弯矩与外荷载产生的准永久组合、标准组合弯矩相吻合,同时调整预应力筋转向处的曲率,尽量使线形平缓,减小孔道摩擦损失。作用在框架梁上的主要是均布荷载,且两端与柱子刚性连接,梁端弯矩相对跨中较大,根据其弯矩图的形状确定反弯点位置和预应力线型为正反相切的三段抛物线,如图 2 所示,其中反弯点高度计算公式为: $h_{n1}=h_d+0.70(h-h_d-h_1)$, $h_{n2}=h_d+0.70(h-h_d-h_2)$ 。为获得较大截面抵抗弯矩,对于框架梁的梁端或跨中,预应力筋应靠近受拉边缘布置(预应力筋中心距梁顶或梁底 200—300mm),以便有效提高抗裂性及承载能力。

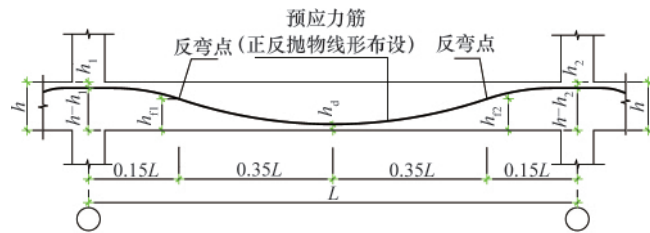
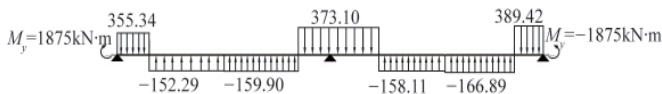


图 2 预应力束形图
Fig. 2 Prestressed constraint graph

而对于单跨 27m 的预应力简支次梁采用两段抛物线型,由于外载作用下端部弯矩为 0,因此预应力筋的中心在端截面尽量居中心处,如果考虑翼缘对刚度增大作用,可以适当靠顶边缘偏移。

3.4 次弯矩计算

多跨预应力连续梁属于超静定结构,需要考虑由于在结构上施加预加力,结构的变形受多余约束限制而产生的反力^[2],包括次弯矩、次剪力、次轴力等,这些次内力一般较大,设计时不容忽视。预加力在超静定梁中产生的次内力与结构刚度及约束条件有关。以梁 YKL2 为例,根据在结构模型中布置的预应力筋线型,由 PREC 按照线弹性结构分析等效荷载,并进行内力分析。图 3 为等效荷载、次弯矩和设计荷载弯矩。



(a) 等效荷载 (单位: kN)
(a) Equivalent load (unit: kN)

306.08 381.30 640.39 468.88 444.94 527.57 748.75 368.88 221.95



(b) 次弯矩 (单位: kN·m)
(b) Secondary moment (unit: kN·m)



(c) 考虑次弯矩后计算弯矩 (单位: kN·m)
(c) Moment calculation after considering
secondary moment (unit: kN·m)

图 3 YKL2 内力图
Fig. 3 Internal forces diagram of YKL2

次弯矩对超静定框架梁端有利,对跨中不利,结合本工程特点支座弯矩大于跨中弯矩,根据支座弯矩估算预应力钢筋是合理的,经计算预应力梁 YKL2 控制截面梁端设计弯矩 $M=8767\text{kN}\cdot\text{m}$,梁端次弯矩 $M_2=445\text{kN}\cdot\text{m}$,跨中设计弯矩 $M=8246\text{kN}\cdot\text{m}$,跨中次弯矩 $M_2=748\text{kN}\cdot\text{m}$,次弯矩与估算的数值比较接近^[3]。

3.5 预应力损失及有效预应力计算

预应力的损失主要在构件施工和使用过程中,张拉应力由于张拉工艺和材料特性等原因不断降低。按照现行 GB 50010—2002《混凝土结构设计规范》^[4]规定,计算得有黏结预应力钢筋的梁 YKL2 的预应力损失结果如表 3 所示。

表 3 预应力损失计算结果 (单位: N/mm^2)
Table 3 Computational results of prestress
loss (unit: N/mm^2)

锚固损失	摩擦损失	松弛损失	收缩徐变损失	总损失
σ_1	σ_2	σ_4	σ_5	
27.1	130.2	32.55	88.96	278.7

梁 YKL2 预应力损失控制在 30%张拉控制应力范围内,与估算的数值比较接近。根据规范公式进行施工阶段抗裂验算,确认所选预应力筋的数量是否合适。假设张拉时混凝土强度达 100%,配置 32 根预应力筋,梁 YKL2 控制截面考虑第一批预应力损失后施工阶段截面应力为:梁的上翼缘 $\sigma_a=4.47\text{N}/\text{mm}^2<2.0f_k$,梁的下翼缘 $\sigma_a=14.5\text{N}/\text{mm}^2<0.8f_k$,满足构件施工阶段抗裂度验算。为避免截面过大造成浪费,在抗裂验算时,截面平均压应力为 $4.15\text{N}/\text{mm}^2$,小于 $5\text{N}/\text{mm}^2$,认为在合理范围内。

3.6 非预应力筋的确定

根据预应力筋估算大约需要配置 41 根钢绞线,考虑梁端弯矩不仅承担本层竖向荷载,还需要承担由上部钢结构竖向和水平荷载、温度效应、地震作用等通过混凝土柱子根据刚度分配给梁端的荷载,在进行梁端设计时考虑梁端延性和梁柱核心区构造需要由非预应力钢筋承担,所以取估算 80%

配置 32 根预应力筋,剩下 20%由非预应力筋承担。

在确定普通钢筋用量方面还需要考虑预应力度指标,为保证梁端截面具有足够的延性,应配置一定数量的非预应力筋^[9],采用混合配筋方式,这就需要控制梁端截面的预应力强度比 λ 。预应力强度比的选择主要取决于抗裂要求与抗震构造要求。从抗裂要求来看,预应力强度比较大较好;从抗震构造要求来看,预应力强度比不宜过大。如果预应力强度比过低,非预应力筋增加比例过大,造成梁端截面负弯矩承载力过强,则截面最大配筋率和强柱弱梁的要求不易满足。根据 JGJ 140—2004《预应力混凝土结构抗震设计规程》^[9]对于二级框架梁的相关要求,梁端截面普通钢筋应符合以下要求:

$$\lambda \leq 0.75$$

$$\lambda = \frac{f_{py} A_p h_p}{f_y A_s h_s} \quad (3)$$

其中, f_{py} 为预应力筋的抗拉强度设计值; f_y 为普通钢筋的抗拉强度设计值; A_p 为受拉区预应力筋截面面积; A_s 为受拉区非预应力钢筋截面面积; h_p 为纵向受拉预应力筋合力点至梁截面受压边缘的有效距离; h_s 为纵向受拉非预应力钢筋合力点至梁截面受压边缘的有效距离。

预应力混凝土框架梁端截面底面面积 A'_s 和顶面纵向非预应力钢筋截面面积 A_s 应满足

$$\frac{A'_s}{A_s} = \frac{0.5}{1-\lambda} \quad (4)$$

根据以上要求,并经截面强度计算后,确定的预应力、非预应力钢筋面积如表 4 所示。

表 4 梁 YKL2 预应力、非预应力筋面积
Table 4 Area of prestress and non-prestress
of steel bar YKL2

	面积/mm ²			预应力强度比
	梁上部钢筋	梁下部钢筋	预应力钢筋	
支座	12320	9856	4448	0.57
跨中	3696	9856	4448	0.62

根据表中的预应力和非预应力钢筋面积,对控制截面进行裂缝和挠度计算,按照荷载效应标准组合,并考虑长期作用影响的控制截面处裂缝最大宽度 $\omega_{\max}=0.191\text{mm}<\omega_{\lim}$,受弯构件正常使用极限状态下,挠度可以依据构件的刚度采用结构力学方法计算。首先计算短期内构件的弹性挠度,再利用得出的弹性挠度乘以构件弹性刚度与长期刚度的比值得出长期挠度,考虑 0.1%预起拱和等效荷载下梁的反拱值后框架梁短期最大挠度 19.4mm (L/928),长期荷载下最大挠度 44.6mm (L/403),满足规范要求。

4 施工方案及构造措施

4.1 施工方案

后张法有黏结预应力施工要求较高,梁内预应力筋孔道

采用预埋镀锌金属波纹管,以减小预应力筋与孔道壁之间的摩擦损失。为减少预应力筋的松弛损失采用超张拉:张拉程序 $0 \rightarrow 1.05\sigma_{\text{con}}$ (持荷 2min) $\rightarrow 1.0\sigma_{\text{con}}$ 。应考虑尽可能减少张拉端数量,同时还要避免两个方向预应力筋在同一部位张拉,张拉梁跨不宜过长,采取对多跨连续梁实施分段两端张拉。张拉时应分批、分阶段对称张拉,先批张拉的预应力筋采用复拉的办法补足应力值。对于预应力张拉应采用应力应变双重控制的方法,以应力控制为主,用应变(伸长值)进行校核。在进行张拉前,应计算理论伸长值 $\pm 6\%$ 范围,应停止张拉,待找出原因后方可继续张拉。同时控制预应力构件施工的平均预压应力,梁中应控制在 $3 \sim 7\text{N/mm}^2$ 。

后张法预应力筋张拉完毕后,孔道必须灌注水泥浆或砂浆,在预应力孔道两端及峰顶处设置排气孔(兼泌水孔用),孔道灌浆强度等级 M40,灌浆应一次完成,缓慢均匀进行,不能中途停顿,喷嘴不能离开灌浆孔,以免空气进入孔道形成气泡,为使灌浆饱满,待排气孔排出浓浆后将排气孔封闭,整个孔道灌满后再封闭灌浆孔。灌浆主要起两个作用:(1) 保护预应力筋免遭锈蚀,保证结构耐久性;(2) 使预应力筋通过灰浆与周围混凝土结成整体,增加锚固的可靠性,提高构件的抗裂性和承载能力,实现黏结作用。

张拉灌浆完毕后须严格做好封端工作,具体步骤为:(1) 采用机械方法切除预应力筋多余长度,锚具夹片外露预筋长度不小于 30mm,切除时严禁采用电弧切断;(2) 孔道灌浆后,将张拉端及其周围清理干净;(3) 采用 C45 细石混凝土封锚。

4.2 构造措施

预应力筋的锚固采用中国建筑科学研究院建筑结构研究所研制的 QM 预应力锚固体系,分别采用可同时锚固 7 束和 8 束夹片式张拉端锚具和挤压式锚固端锚具,在设计中严格控制锚具的回缩值,降低锚具变形和预应力筋内缩造成的预应力损失。考虑到所有内部梁柱节点核心区张拉封锚端要尽量避开核心区,采用梁柱外侧宽加腋内凹式张拉端构造(图 4),对于在梁外侧和边柱的锚固采用外凸式构造,这种节点虽然施工方便、保证预应力后浇区内不会打断梁或柱纵筋,但是锚头外露影响建筑立面,应结合工程特点采用。

预应力框架梁在节点核心区要考虑预应力筋孔道交叉、相互作用的影响。因此,在设计过程中,正交两个方向的预应力曲线布置采用不同的矢高,当预应力筋与普通钢筋或其他管线位置有冲突时,应当首先保证预应力筋位置准确,保证波纹管可顺利通过,梁柱纵筋尽量采用大直径钢筋,尽量增加钢筋间距,方便施工。同时应该按照设计图纸要求设置固定支架以保证预应力筋的曲线定位形成光滑抛物线,预应力梁中每隔 1m 设置一个支撑,张拉之前不得拆除该梁支撑。对张拉核心区进行验算,满足局部承压等构造要求,梁柱节点的锚固区按规范要求验算局部受压承载力。预应力筋保护层厚度不小于 80mm,封锚及预留张拉洞口的混凝土强度等级比该处构件高一级。

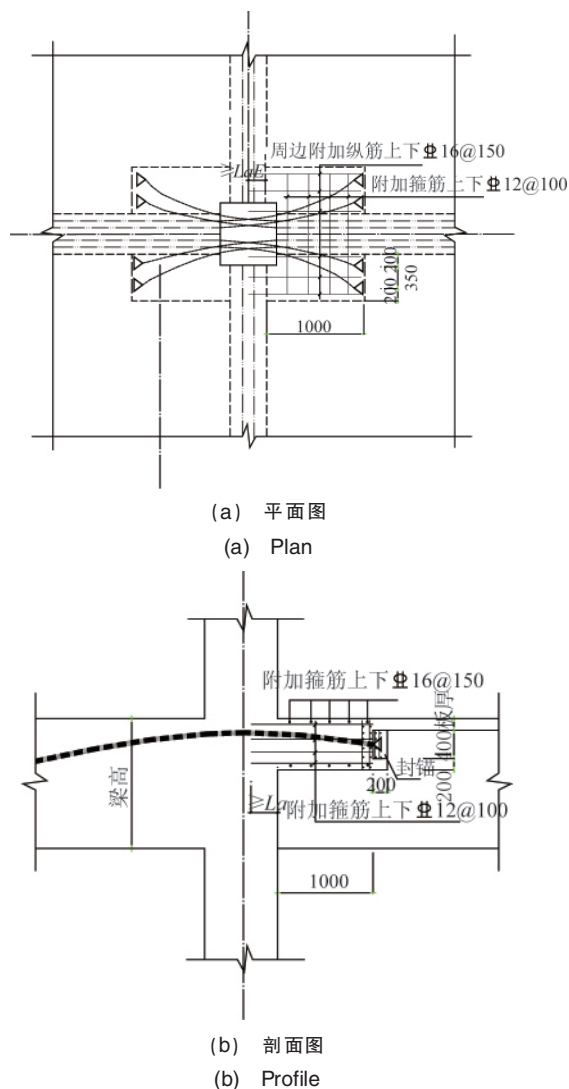


图 4 梁柱外侧张拉端构造图

Fig. 4 Tectonic details of beam-column lateral tension end

5 截面延性探讨

应用预应力的机制是利用钢筋的高强度、通过张拉预应力筋,将钢筋预拉应力转化为混凝土压应力,从而提高混凝土构件的抗裂性能和刚度,因此混凝土构件中的预应力钢筋在受力前已处于高应力状态,相应的变形能力已经丧失很多,达到极限变形或钢筋拉断时已无多少延性变形的余量,再加上预压应力提高的抗裂和刚度,很容易在变形、裂缝不大的情况下发生脆性破坏,总体而言,预应力框架结构耗能不如普通框架结构。因此为提高预应力结构的延性提出以下改善措施^[7]。

(1) 改善预应力结构的延性,首先必须配置延性较好的非预应力钢筋,形成耗能能力较好的部分预应力混凝土结构。但是要保证混凝土的延性耗能能力,截面还要有较大转角(弯曲变形能力),即控制截面的相对受压区高度,避免受压区混凝土破碎而导致非延性破坏,所以对于二、三级框架,

梁端受压区高度小于 $0.35H_0$,在计算受压区时,梁端需考虑受压钢筋的作用,梁跨中需计入受弯翼缘板的作用,使截面受压宽度增大。

(2) 箍筋将改善预应力构件的延性,防止地震循环作用下纵向钢筋屈服及核心区混凝土破坏。通常在计算预应力梁端部时,受拉钢筋配筋率易大于 2.0%,根据规范箍筋直径增大 2mm,目的是对梁塑性铰区的混凝土和纵向受压钢筋提供约束,防止其在保护层混凝土剥落后过早压屈,保证梁端具有足够的塑性铰转动能力。所以预应力梁箍筋的设计在满足受剪承载能力的前提下,宜选取相对普通梁中箍筋直径更大的钢筋。

(3) 为保证框架梁有必要的延性,还应该对配筋率进行限制,在低配筋率截面破坏前,各个最大弯矩控制截面处会形成塑性铰,截面变形很大。而对于超筋截面,因为混凝土截面过小,而单纯依靠增加配筋提高抗力会降低延性,钢筋未屈服即发生混凝土压屈破碎的非延性破坏。所以现行 GB 50010—2002《混凝土结构设计规范》^[4]对梁端纵向受拉钢筋的折算配筋率规定不应大于 2.5%,但是在受压区高度满足要求的情况下,考虑受压钢筋的有利作用,规范的要求就显得过严,可以适当放松至 3.0%。如果还是不能满足要求,可以考虑梁端竖向加腋(图 5),加腋长度至预应力线型反弯点位置,此时预应力筋位于中轴附近,这样既解决配筋率问题,又减小受压区高度增强了延性能力^[6]。

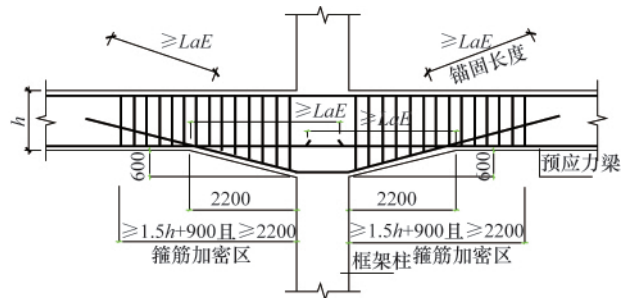


图 5 梁柱外侧张拉端构造详图

Fig. 5 Tectonic details of beam-column lateral tension end

对于梁跨中,规范并没有给出配筋率的要求,只要满足受压区高度,理论上可以无限制增加纵向受拉和受压钢筋,导致梁延性会越来越差,结果是混凝土先压碎退出工作,最终趋于全钢结构,显然会造成浪费,经济性较差。实际上为了保证有一定安全度,大部分框架梁的跨中(考虑楼板作为梁的翼缘)配筋率都小于 2.5%。总的来说,太高的配筋率仍是设计中不希望。

(4) 预应力受弯构件设计中关键的因素是预应力度度的控制问题。对预应力度选择要全面考虑使用阶段和抗震阶段两方面的要求。使用阶段为满足裂缝要求,势必增大预应力度,从抗震角度,为保证延性必须配置一定数量的非预应力钢筋,以致预应力度值不宜过大。所以在确立好合理截面的基

基础上,采用中等预应力强度比(0.5—0.7)的梁可以有效地改善抗裂性能和保持一定延性。同时考虑地震的随机性,保证在强震下梁端可能出现反向弯矩时,梁仍具有一定的承载能力,对梁端上下非预应力钢筋比例有严格要求, A'_s/A_s 与预应力度、框架等级等有关,而且预应力梁端上下非预应力钢筋面积的比值较普通梁的要求更高些,一般不小于0.8。

6 结论

(1) 本文针对会展馆结构特点,经过多种结构方案比较,最终采用后张有黏结预应力结构,施加预应力控制挠度、裂缝的同时,承载力由预应力和非预应力钢筋共同承担,通过预应力度和受压区高度等措施保证延性。

(2) 在进行合理简化的条件下,将预应力构件从整体结构中分离出来单独设计,根据实际情况合理确定荷载,采用裂缝控制的名义拉应力法对预应力筋进行估算,并根据计算次弯矩、预应力损失、有效应力,使预应力钢筋和非预应力钢筋用量控制在合理的水平,同时在设计中还要注意制定合理的施工张拉方案,关注节点的细部构造要求。

(3) 截面延性控制是预应力结构设计的关键所在,针对改善预应力结构的延性提出了一些合理措施。

参考文献 (References)

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50009—2001 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB 50009—2001 load code for the design of

- building structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002.
- [2] 熊学玉, 张彩红, 吴学淑. 约束(侧向)对预应力结构设计影响的研究[J]. 建筑结构, 2006, 36(11): 88-90.
Xiong Xueyu, Zhang Caihong, Wu Xueshu. *Building Structure*, 2006, 36 (11): 88-90.
- [3] 熊学玉. 预应力结构原理与设计 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
Xiong Xueyu. *Prestressed structure principle and design* [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50010—2002 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB 50010—2002 code for design of concrete structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002.
- [5] 范重, 王大庆, 唐杰, 等. 唐山国际会展中心超长跨度预应力结构设计[J]. 建筑结构, 2006, 36(1): 56-63.
Fan Zhong, Wang Daqing, Tang Jie, et al. *Building Structure*, 2006, 36 (1): 56-63.
- [6] 中国建筑科学研究院. JGJ 140—2004 预应力混凝土结构抗震设计规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
China Academy of Building Research. JGJ 140—2004 Specification for seismic design of prestressed concrete structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004.
- [7] 简斌, 白绍良, 王正霖. 后张有粘结预应力连续梁的分析原理[J]. 工程力学, 2000, 17(5): 94-101.
Jian Bing, Bai Shaoliang, Wang Zhenglin. *Engineering mechanics*, 2000, 17(5): 94-101.

(责任编辑 刘志远)

·学术动态·



“中国宇航学会深空探测技术专业委员会 第八届学术年会”征文

中国宇航学会拟于2011年10月中、下旬在上海召开中国宇航学会深空探测技术专业委员会第八届学术年会。本次年会主题为“我国探月工程、火星与小行星探测关系技术”。

征文范围:深空探测发展趋势与关键技术;深空探测科学目标与有效载荷;行星着陆探测技术;小天体探测任务方案与关键技术;火星(金星)探测任务方案与关键技术;载人深空探测技术;国外深空探测计划与国际合作。

联系电话:021-64822963;传真:021-61131894;电子信箱:shahas63295054@126.com。

征文截稿日期:2011年8月20日。

会议网址: <http://www.shsyhcxh.cn>。