

浅析大学图书馆的结构设计

高琴贤

中国城市建设研究院有限公司，北京 100120

[摘要] 某大学图书馆建筑总高度为34.2米，建筑面积45084.89平方米。主体结构为框架—抗震墙结构，中厅大空间为钢桁架结构，基础形式为筏板基础。从结构三层起悬挑长度为1.95米，三层以上悬挑长度逐层增加，顶层最大悬挑长度为6.75米。对大悬挑，采用了两个结构方案，方案一采用每层悬挑梁上设置柱，方案二，从二层起设置一通长的斜柱子；另外本项目建筑平面长宽均为87.9米，由于建筑立面效果的要求，不允许设置伸缩缝，属于超长结构，本文从结构计算、结构设计和结构温度效应控制等方面进行了论述，并采取了结构优化措施与方案。

[关键词] 结构优化措施；斜柱子；大悬挑

随着社会经济的发展和人们生活水平的提高，对建筑结构设计也提出了更高的要求。发展先进计算理论，加强计算机的应用，加快新型高强、轻质、环保建材的研究与应用，使建筑结构设计更加安全、适用、可靠、经济是当务之急。在实际工作中，由于种种原因，结构设计人员容易在砌体结构设计、屋面梁与配筋、楼层平面刚度计算及原则、构造箍筋等环节出现失误。

1 项目简况

该图书馆建筑总高度为34.7米，建筑面积45074.87m²。地上37151.64 m²，地下7923.23 m²，地下一层，地上七层；效果图如图一。



图一 图书馆效果图

2 主体结构设计与分析

本工程外形复杂，从三层以上结构层层外挑，且外挑长度逐层递增，到顶层外挑长度达6.75米；结构专业前期与建筑专业紧密配合，选定合理方案，在保证结构安全的前提下，最大限度实现建筑的各项功能以及外立面效果。

该图书馆设计使用年限为五十年，本项目主体安全等级—(二级)，基础的设计等级—(甲级)，结构的抗震设防烈度—(七度)，地震加速度—(0.10g)，设计地震分组—(第一组)。结构形式(框架—抗震墙结构)，抗震设防类别(重点设防类)，抗震墙抗震等级(一级)，框架抗震等级(二级)^[1]。

采用CABR《PKPM》程序进行计算分析，并采用北京迈达斯技术有限公司开发的MIDAS/GEN Ver6.6.0进行验证校核。

2.1 主要结构构件材料要求

钢材：钢筋采用HRB400和HPB300级；型钢采用国产Q345BQ及235B钢；

混凝土强度等级：a) 柱：-1~3层为C45，4~5层为C40，5层以上为C35；

b) 剪力墙：-1~3层：C35，4层以上：C30。c) 梁板：-1~3层：C30，4层以上：C25。

③墙砌体材料：本工程外围护墙及内填充墙均采用轻质陶粒空心砌块。

2.2 结构方案比较

为达到建筑立面效果，结构三层以上采用层层悬挑，采取两个方案对比；
方案一，如下图 2 所示

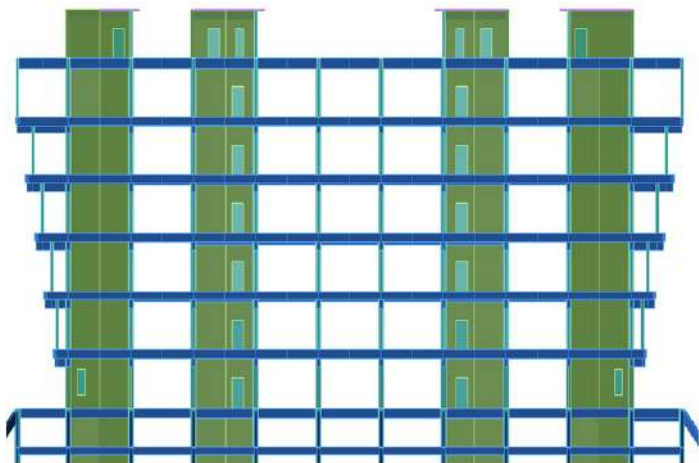


图 2 方案一结构计算简图

此方案结构悬挑部分，采用每层悬挑梁上设置直立柱，用柱支撑上层梁，以此类推；中间每层悬挑梁大小均为 400×1200，直立柱大小为 400×400；整体计算结果如表一；

表一 方案一整体计算指标汇总

指标项		汇总信息
总质量(t)		69086.75
质量比		1.33 < [1.5] (5 层 1 塔)
最小刚度比 1	X 向	1.00 >= [1.00] (9 层 1 塔)
	Y 向	1.00 >= [1.00] (9 层 1 塔)
最小刚度比 2	X 向	1.00 > [1.00] (9 层 1 塔)
	Y 向	1.00 > [1.00] (9 层 1 塔)
最小楼层受剪承载力比值	X 向	0.81 > [0.80] (2 层 1 塔)
	Y 向	0.82 > [0.80] (2 层 1 塔)
结构自振周期(s)		T1 = 0.8774(X)
		T3 = 0.8765(Y)
		T5 = 0.7744(T)
有效质量参与系数	X 向	92.35% > [90%]
	Y 向	92.35% > [90%]
最小剪重比	X 向	2.55% > [1.60%] (1 层 1 塔)
	Y 向	2.65% > [1.60%] (1 层 1 塔)
最大层间位移角	X 向	1/2466 < [1/800] (6 层 1 塔)
	Y 向	1/2664 < [1/800] (6 层 1 塔)
最大位移比	X 向	1.15 < [1.50] (7 层 1 塔)
	Y 向	1.13 < [1.50] (7 层 1 塔)
最大层间位移比	X 向	1.14 < [1.20] (7 层 1 塔)
	Y 向	1.11 < [1.20] (7 层 1 塔)

方案二，如下图 3 所示

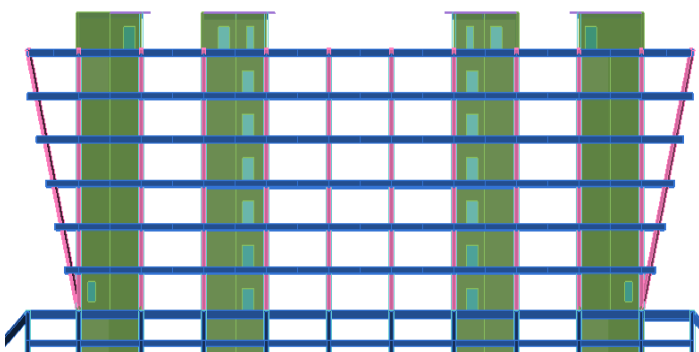


图 3 方案二结构计算简图

此方案悬挑部分采用通长斜框架柱，支撑每层梁，斜框架柱大小为 500×500；

每层悬挑梁为 400×700；整体计算结果如表二：
表二 方案二整体计算指标汇总

指标项 [Ⓔ]		汇总信息 [Ⓔ]
总质量(t) [Ⓔ]		68489.77 [Ⓔ]
质量比 [Ⓔ]		1.34 < [1.5] (5 层 1 塔) [Ⓔ]
最小刚度比 1 [Ⓔ]	X 向 [Ⓔ]	1.00 ≥ [1.00] (9 层 1 塔) [Ⓔ]
	Y 向 [Ⓔ]	1.00 ≥ [1.00] (9 层 1 塔) [Ⓔ]
最小刚度比 2 [Ⓔ]	X 向 [Ⓔ]	1.00 > [1.00] (9 层 1 塔) [Ⓔ]
	Y 向 [Ⓔ]	1.00 > [1.00] (9 层 1 塔) [Ⓔ]
楼层受剪承载力比值（最小） [Ⓔ]	X 向 [Ⓔ]	0.87 > [0.80] (3 层 1 塔) [Ⓔ]
	Y 向 [Ⓔ]	0.85 > [0.80] (3 层 1 塔) [Ⓔ]
结构自振周期(s) [Ⓔ]		T1 = 0.8730(X) [Ⓔ]
		T3 = 0.8739(Y) [Ⓔ]
		T5 = 0.7718(T) [Ⓔ]
有效质量参与系数 [Ⓔ]	X 向 [Ⓔ]	94.68% > [90%] [Ⓔ]
	Y 向 [Ⓔ]	95.69% > [90%] [Ⓔ]
最小剪重比 [Ⓔ]	X 向 [Ⓔ]	2.95% > [1.60%] (2 层 1 塔) [Ⓔ]
	Y 向 [Ⓔ]	2.91% > [1.60%] (2 层 1 塔) [Ⓔ]
最大层间位移角 [Ⓔ]	X 向 [Ⓔ]	1/2432 < [1/800] (5 层 1 塔) [Ⓔ]
	Y 向 [Ⓔ]	1/2543 < [1/800] (5 层 1 塔) [Ⓔ]
最大位移比 [Ⓔ]	X 向 [Ⓔ]	1.02 < [1.50] (8 层 1 塔) [Ⓔ]
	Y 向 [Ⓔ]	1.05 < [1.50] (3 层 1 塔) [Ⓔ]
最大层间位移比 [Ⓔ]	X 向 [Ⓔ]	1.06 < [1.20] (4 层 1 塔) [Ⓔ]
	Y 向 [Ⓔ]	1.05 < [1.20] (3 层 1 塔) [Ⓔ]

比较这两个方案，第二个方案柱子刚度整体连贯及整体刚度均匀，且方案二悬挑梁尺寸比方案一小了很多，增加了建筑使用净高，避免形成肥梁胖柱；整体计算指标上看，方案二的最大位移比和最大层间位移比均小于方案一，相比之下方案二结构体系更趋于合理，经综合分析最终实施选择了方案二。

3 超长结构与施工问题：

3.1 本项目南北长约87.90m，东西宽约87.90m，双向均为超长结构。

根据当地气象环境，一般选取 30 年一遇月平均最高气温和月平均最低气温。初始温度选取后浇带合拢时室外空气温度为准。

根据气象局及《建筑结构荷载规范》(GB50009-2012) 提供的资料，初定项目所在地区的月平均最高气温为 25℃，月平均最低温度 -9℃，混凝土收缩当量温差 11℃（考虑后浇带等措施后折减系数采用 0.4），后浇带合拢温度约为 8℃，计算取为 8℃。

3.2 软件计算

温度取值为：降温为 -21.4℃（-9-8-11×0.4=-21.4℃），升温为 6℃（25-8-11=6℃）。根据《建筑结构荷载规范》(GB50009-2012) 要求，温度效应分项系数取值为 1.4，组合值系数为 0.6。同时考虑到徐变对内力的影响，取徐变折减系数为 0.4^[2]。

3.3 计算条件：

本工程采用 PMSAP（2010 版）分析温度荷载对梁、板、柱的影响。

计算模型：导入 PMCAD 模型

计算温差：+6℃ / -21.4℃

以下为温度荷载的输入参数：

温度荷载参数

砼构件温度效应折减系数

0.4

温荷综合组合系数(填写组合值系数与分项系数的乘积)

0.96

砼弹性模量折减系数

1

温度场类型

☒ 连续

☐ 间断

温荷1

☒ 温度

☐ 预应力

☐ 砼收缩

温荷2

☒ 温度

☐ 预应力

☐ 砼收缩

温度效应风组合值系数

0

温度效应地震组合值系数

0

3.4 计算结果及分析：

(1) 楼板计算结果：

板面温度应力为 2.0MPa 左右,采用附加构造通长钢筋抵抗温度应力作用。取 1m 板带计算如下:

$$A_s + A_s' = \frac{2.0 \times 100 \times 0.4 \times 1000}{360} = 222 \text{mm}^2$$

$A_s = A_s' = 222 \text{mm}^2$,为板底板顶所需附加构造通长钢筋。

(2) 梁计算结果

由于屋面梁需考虑裂缝,经比较其配筋均为裂缝控制配筋。

因温度作用使多跨度梁产生较大轴力,梁最大的轴力达 840kN。通过计算采用 N8 C 20 的腰筋。

$$A_s = \frac{N}{f_y} = \frac{840 \times 1000}{360} = 2333 \text{mm}^2$$

(3) 柱计算结果

柱 PMSAP 计算配筋与 SATWE 计算配筋相比,基本相同,可见温度作用对框架柱配筋不起控制作用。

3.5 地下室结构使用阶段的分析计算

本工程在地下室设置两个后浇带,后浇带宽 800mm,间距 30m 左右。后浇带浇灌完成后,整个地下室成为一体,地下室平均设计温差为 6~15℃左右,室内及室外土中的温度变化是比较恒定,在地下室使用期间,室内钢筋混凝土构件在温度不变情况下,线性膨胀几乎为常数。在该阶段由温度作用在工程上的伸缩变形就成了主要因素。但它的影响是有限的,通过以下计算可以得到证明,按地下室最高温差 15℃计算:

$$\Delta L = \alpha \times t \times L = 1 \times 10^{-5} \times 15 \times 87.9 = 0.0132 \text{m}$$

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} = 0.15 \times 10^{-3}$$

由于混凝土的极限应变在正常条件下可达 $1 \sim 1.5 \times 10^{-4}$,混凝土内配置有钢筋后能提高混凝土的极限拉应变,则不考虑钢筋混凝土的徐变影响的极限拉应变 ϵ_{pa}

$$\epsilon_{pa} = 0.5 \times f_t \times \left(1 + \frac{\rho}{d}\right) \times 10^{-5} = 0.5 \times 1.57 \times \left(1 + \frac{0.6}{1.8}\right) \times 10^{-5} = 0.105 \times 10^{-3}$$

式中: f_t —混凝土轴心抗拉强度设计值, ρ —钢筋配筋率, d —直径;

当考虑混凝土在温度应力的长期作用,发生徐变变形,则总极限应变为:

$$\epsilon_p = 2 \epsilon_{pa} = 2 \times 0.105 \times 10^{-3} = 0.21 \times 10^{-3}$$

$$\text{即 } \epsilon = 0.15 \times 10^{-3} < \epsilon_p = 0.21 \times 10^{-3}$$

由此可见,使用阶段由温度引起的基础底板伸长变形不会造成基础底板开裂。

3.6 结构构造措施

(1) 设后浇带:后浇带对减少施工阶段混凝土收缩的影响非常关键。在正常条件下,后浇带合适间距 30~45m。后浇带相邻构件浇筑不少于 45 天后进行闭合,同时应严格控制封闭后浇带时的温度。

(2) 配置构造温度筋。现浇板上层,附加配双向通长温度筋。混凝土板板顶铁钢筋的配筋率 ≥ 0.0015 。通长设置的梁中也配置通长的抗扭腰筋。如果遇到有混凝土楼板板孔洞的情况,需要按照标准图集对楼板开洞的地方附加钢筋保证构造措施。

(3) 主体结构封顶,采取适当保温隔热措施。如屋面选择保温隔热材料,填充墙体选择聚苯板作为外墙保温材料等^[3]。

3.7 施工措施

3.7.1 混凝土技术要求

(1) 纯水泥用量不小于 260kg/m³,但不得大于 280kg/m³。

(2) 严格控制坍落度,特别是泵送抗渗混凝土入泵坍落度应控制在 120~160mm 之内。

(3) 严格控制水胶比,水胶比不应大于 0.45。

3.7.2 施工保障措施

(1) 混凝土结构开裂主要是温度降低引起的;温度升高对混凝土结构的影响不大。超长结构混凝土浇筑的时机以气温较低的气候为好。在高温天气,采用降低原材料温度、减少运输混凝土时吸收外界热量等方法;夏季应安排在早、晚或夜间施工,避免高温入模和钢筋胀曲情况发生^[4]。

(2) 在混凝土施工中,混凝土面层浇筑完毕,在混凝土初凝前完成二次抹压。

(3) 施工现在浇筑后浇带时温度宜低于两侧混凝土浇筑时的温度。在条件允许的情况下,后浇带应在低温时封闭。后浇带浇筑完毕后亦须加强养护。

(4) 在超长结构混凝土施工中,采用留后浇带或跳仓法施工是防止和控制混凝土裂缝的主要措施之一,跳仓浇筑间隔时间不宜少于 7d^[5]。

4 结语

在立面复杂的结构中,不要草率决定单一结构方案,须采取多个结构方案相互比较,以得到切实合理的结构方案;结构体系的优化和设计过程的精益求精,使结构既能满足建筑的使用功能及平立面要求^[6],又能使结构整体受力合理,安全可靠。宏观上,结构周期、位移值符合要求,微观上每一构件受力和配筋合理,最终有利于降低工程造价。通过本工程实例,笔者认为结构选型,概念设计是关键,只有这样,才能使结构设计达到合理性、安全可靠、经济

性的统一；在结构设计中^[7]，应充分理解建筑师的设计思想，合理利用建筑自身的形态和空间，使建筑与结构融为一体，采用多种空间结构体系，最大限度地实现建筑与结构的完美结合。

[参考文献]

- [1] JGJ3-2010, 高层建筑混凝土结构技术规程
- [2] GB 50009-2012, 建筑结构荷载规范
- [3] GB 50010-2010, 混凝土结构设计规范
- [4] 纪荣洋. 王文可. 潘可明《建筑结构设计经验探讨》[J]. 低温建筑技术. 2011, (9).
- [5] 莫雪辉《深度探讨如何提高建筑结构设计水平》[J]. 科技资讯. 2009, (28).
- [6] 董晓明. 建筑结构设计的原则及其问题研究 [J]. 科技资讯. 2010(23)
- [7] 徐磊. 高层建筑结构抗震设计问题研究 [J]. 科技致富向导. 2010(23)