

预应力结构中柱子及水平连梁对有效预应力影响的分析

李唐宁 高 顺 吴胜达 秦士洪

(重庆大学土木工程学院 400045)

摘 要: 本文针对实际工程中柱子以及连梁的抗侧刚度对预应力建立的影响, 使用经典力学方法和有限元软件建模分析, 提出实际解决方法, 并提出一般的基于经典结构力学的计算公式。

关键词: 预应力 有效预压力 抗侧刚度 有限元

1. 概述

重庆某超高层建筑整体结构为筒中筒结构, 内部为核心筒, 外部为框筒。框筒柱大部分尺寸为 $800\text{mm}\times 1750\text{mm}$, 其平面布置见图1(局部)。为降低层高, 获得更好的经济性, 采用后张有粘结预应力方案, 层高为 3300mm 。框筒柱在预应力张拉方向尺寸为 800mm , 连梁尺寸为 $800\text{mm}\times 800\text{mm}$, 柱子和连梁的抗侧刚度大; 梁、板整体现浇, 预应力梁张拉跨度为 9900mm , 板厚为 120mm , 计算时取预应力梁为“T”型截面, 梁高为 500mm , 梁宽为 550mm , 翼缘宽度取 $16h_f + b = 2400\text{mm}$ ^[1]。张拉预应力时, 由于张拉端的竖向构件以及水平连梁的侧向约束, 在梁中产生次轴力, 建立在预应力梁中的有效预压力减小, 在设计中应将轴力进行折减。

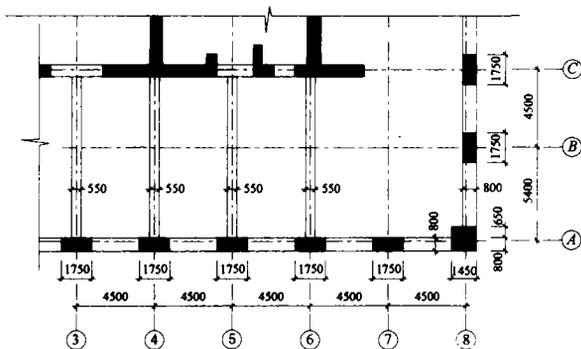


图1 工程局部平面图

2. 柱子抗侧刚度对有效预应力的影响

2.1 结构力学分析

取轴线4, 按单层单跨框架建模(见图2)。在计算时, 结合本工程考虑到预应力钢筋锚固端实

际上是内筒, 抗侧刚度可以认为是无穷大, 故将节点C处约束简化为固端(见图3)。

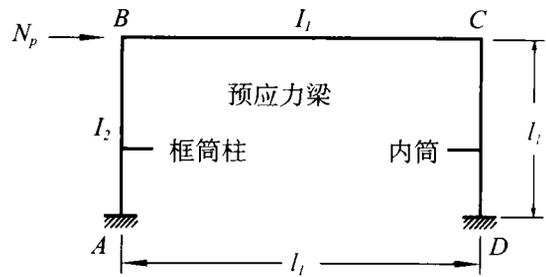


图2

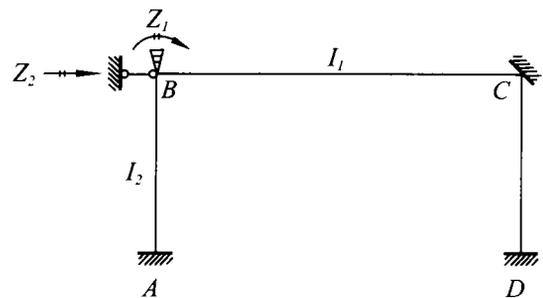


图3

由结构力学位移法可得方程组

$$\begin{cases} (4i_1 + 4i_2) \cdot Z_1 - \frac{6i_2}{l_2} \cdot Z_2 = 0 \\ -\frac{6i_2}{l_2} \cdot Z_1 + \left[\frac{12i_2}{l_2^2} + \frac{E_c A}{l_1} \right] \cdot Z_2 - N_p = 0 \end{cases}$$

求得

$$Z_2 = \frac{1}{\frac{E_c A}{l_1} + \left[\frac{12i_2}{l_2^2} - \frac{9i_2^2}{l_2^2} \cdot \frac{1}{i_1 + i_2} \right]} \cdot N_p$$

预应力梁中有效预压力 $N_{pb} = \frac{E_c A}{l_1} \cdot Z_2$ ，化简可得

$$N_{pb} = \frac{Al_2^3}{Al_2^3 + \left[12I_2l_1 - \frac{9I_2^2l_1^2}{I_1l_2 + I_2l_1} \right]} \cdot N_p \quad (1)$$

将数据 $l_1 = 9900\text{ mm}$ 、 $l_2 = 3300\text{ mm}$ 、 $I_1 = 1.043 \times 10^{10}\text{ mm}^2$ 、 $I_2 = 7.467 \times 10^{10}\text{ mm}^2$ 、 $A = 4.97 \times 10^5\text{ mm}^2$ 、 $E_c = 3.25 \times 10^4\text{ N} \cdot \text{mm}^2$ 代入上式，得梁中有效预压力 $N_{pb} = 0.876N_p$ 。可见在本例中，由于梁柱线刚度之比 $\alpha = i_1/i_2 = 0.047$ 很小，故竖向构件对于有效预压力的影响是明显的。

将上式进一步化简可得

$$N_{pb} = \frac{Al_2^3}{Al_2^3 + 3I_2l_1 \cdot \left[1 + \frac{3I_1l_2}{I_1l_2 + I_2l_1} \right]} \cdot N_p \quad (2)$$

很明显：当 A 、 I_1 不变， I_2 增大时， N_{pb} 减小；当 A 、 I_2 不变， I_1 增大时， N_{pb} 减小；当 I_1 、 I_2 都不变， A 增大时， N_{pb} 增大。

故提高有效预压应力的途径有三：其一，减小梁截面惯性矩 I_1 ；其二，减小柱子截面惯性矩 I_2 ；其三，增大梁截面面积 A 。对于本工程来说减低梁截面惯性矩减小梁高，会降低预应力筋的矢高，降低预应力的有效性，不可行。而增大梁截面面积则要增大梁高，层高增大，不经济。所以只有减小柱子截面惯性矩是切实可行的方法。具体措施是：施工阶段将框筒柱在梁柱节点一定高度范围内开槽，减小框筒柱抗弯刚度，使其在张拉时有较充足的侧向位移，从而在预应力梁中建立更多的有效预压力。预应力张拉后，再用混凝土回填开槽部分，恢复其抗弯刚度，回填所用混凝土强度等级高于柱子所用混凝土强度等级。

2.2 有限元软件分析

建模仍然为平面单层单跨框架，分别按柱子不开槽以及柱子开槽 100 mm 、 200 mm 、 300 mm 、 400 mm ，开槽高度 800 mm 、 1000 mm 、 1200 mm ，

计算结果见表1。

表1 不同柱子开槽高度、深度时梁中的有效预压力 (单位 N_p)

开槽高度 (mm)	开槽深度 (mm)	不开槽	100	200	300	400
		0.882	0.908	0.912	0.933	0.955
800			0.912	0.917	0.938	0.960
1000			0.915	0.920	0.942	0.963
1200						

可以看出，有限元软件结果 $N_{pb} = 0.882N_p$ 与结构力学的结果 $N_{pb} = 0.876N_p$ 差别不大，公式(1)能够满足计算精度要求。

3. 连梁抗侧刚度对有效预压力的影响

3.1 结构力学分析

在本例中连梁对有效预压力的影响只存在于轴线⑥的梁中 (见图4)，考虑到本例轴线⑧处角柱的尺寸较大，故将节点C处约束简化为固端 (见图5)。

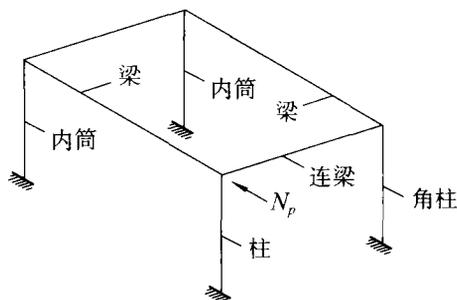


图4

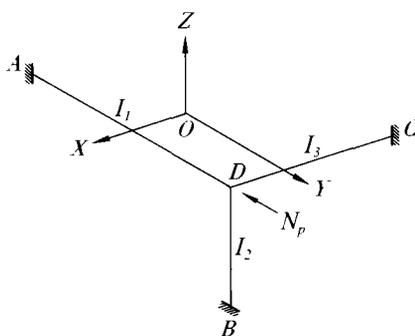


图5

为简化计算，节点D的自由度个数取为3，计算时忽略节点D在平面XOZ的转角，忽略节点D在X轴和Z轴方向的线位移。(见图6、图7)

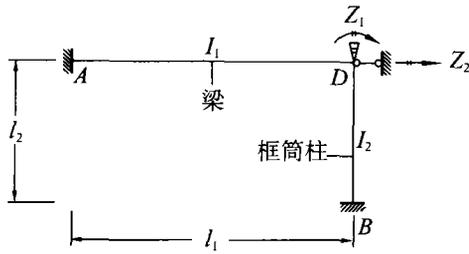


图6

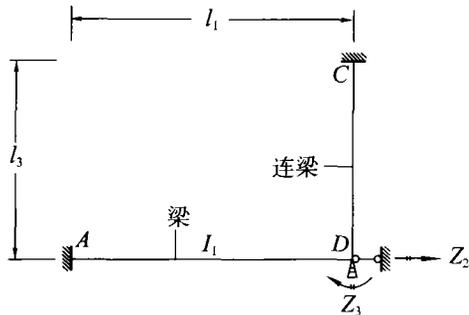


图7

由结构力学位移法可得方程组

$$\begin{cases} (4i_1'+4i_2) \cdot Z_1 - \frac{6i_2}{l_2} \cdot Z_2 + 0 \cdot Z_3 = 0 \\ -\frac{6i_2}{l_2} \cdot Z_1 + \left[\frac{12i_2}{l_2^2} + \frac{E_c A}{l_1} + \frac{12i_3}{l_3^2} \right] \cdot Z_2 - \frac{6i_3}{l_3} \cdot Z_3 - N_p = 0 \\ 0 \cdot Z_1 - \frac{6i_3}{l_3} \cdot Z_2 + (4i_1''+4i_3) \cdot Z_3 = 0 \end{cases}$$

求得

$$Z_2 = \frac{1}{\frac{E_c A}{l_1} + \left[\frac{12i_2}{l_2^2} - \frac{9i_2^2}{l_2^2} \cdot \frac{1}{i_1'+i_2} \right] + \left[\frac{12i_3}{l_3^2} - \frac{9i_3^2}{l_3^2} \cdot \frac{1}{i_1''+i_3} \right]} \cdot N_p \quad (2)$$

预应力梁中有效预压力 $N_{pb} = \frac{E_c A}{l_1} \cdot Z_2$ ，将实际工程数据代入(2)式可得 $N_{pb} = 0.882 N_p$ 。

表2 不同连梁、柱子截面时梁中的有效预压力(单位Np)

连梁尺寸 \ 外框柱尺寸	无连梁	600x600	600x800	800x800	800x1000
400x1000	0.981	0.957(1.485)	0.950(1.980)	0.922(4.699)	0.912(5.867)
600x1500	0.945	0.920(0.293)	0.915(0.391)	0.881(0.927)	0.867(1.159)
800x1750	0.882	0.859(0.106)	0.850(0.142)	0.821(0.335)	0.807(0.419)

注：括号内数字为连梁与柱子线刚度之比 $\alpha = i_3/i_2$

3.2有限元软件分析

建模为空间单层单跨，将内筒和边柱刚度按无限大考虑。由有限元软件计算的结果分别为 $N_{pb} = 0.821 N_p$ 。在预应力梁尺寸不变酌情况下，连梁与柱子抗弯刚度对有效预压力的影响由有限元软件的计算结果见表2。

由表中结果可以看出：当柱子截面不变时， $\alpha = i_3/i_2$ 增大， N_{pb} 减小；当连梁截面不变时， $\alpha = i_3/i_2$ 增大， N_{pb} 增大。

换句话说，即是当预应力梁截面不变时，柱子和连梁惯性矩的增大都会使 N_{pb} 减小。在通常情况下，梁、板整体现浇，可把梁在水平面内的截面惯性矩 I_1 视为无穷大，则 N_{pb} 可以化简为

$$N_{pb} = \frac{1}{\frac{E_c A}{l_1} + \left[\frac{12i_2}{l_2^2} - \frac{9i_2^2}{l_2^2} \cdot \frac{1}{i_1'+i_2} \right] + \frac{12i_3}{l_3^2}} \cdot \frac{E_c A}{l_1} \cdot N_p \quad (3)$$

比较(2)式和(3)式，可以看出： i_3 对 N_{pb} 的影响要大于 i_2 对 N_{pb} 的影响，即是说相同抗弯刚度的连梁和柱子对有效预压力的影响，连梁要大于柱子。

4. 结语

需要指出的是，上述所有建模分析均未考虑上下相邻张拉层、左右相邻张拉跨对本层、本跨梁有效预压应力的影响。实际工程中，预应力张拉是多层、多跨分批张拉，因此本层、本跨梁张拉预压力时都会对上下相邻层、左右相邻跨梁中

的有效预压力产生影响。这些影响主要表现在：预应力张拉时，会在本层、本跨的预应力梁中产生轴向压缩，同时也会引起相邻层、相邻跨在张拉方向的变形。其一，这种协调变形会减少在本层、本跨梁中建立起来的有效预压力，起不利作用；其二，协调变形也会在相邻层、相邻跨的梁中建立小部分的预压力，起有利作用；其三，对于已张拉预应力的梁，相邻层、相邻跨张拉引起的协调变形从性质上说类似于锚具内缩损失，会降低预应力筋的有效应力，减小综合弯矩，起不利作用。综合来看：第一、第二个影响在中间层可以相互抵消，而第三个影响在数值上很小，完全可以忽略不计。

故一般而言，柱子及水平连梁的抗侧刚度对

有效预压力的影响可只考虑张拉底层、张拉顶层以及与四角柱相邻的张拉跨。公式(1)、(2)与有限元软件结果比较，差别不大，可以作为一般预应力筒中筒结构有效预压力的计算公式。

本工程为提高梁中有效预压力，在梁端节点处距梁顶、梁底上下各250mm共1000mm高度范围内将柱子开槽，开槽深度为300mm，降低其抗弯刚度，并且在计算中为保守起见，将轴力按75%进行折减。

参考文献

- [1] AC318-99, ACI318 Building Code and Commentary
 [2] 王燕华 郑毅敏 熊学玉 蔡跃. 侧向约束对次轴力的影响及抗裂验算公式计算建议. 工业建筑增刊.

(上接第18页)

主桁由槽钢拼装而成，为方便组装和拆卸采用螺栓连接。桁架长28米，高6米，悬臂端长10米共4片。

模板梁系由纵梁、横梁及箱梁底模组成。纵梁10根工字钢I27a，割开后焊成高42cm、长10m的花格梁，并在两翼板上加焊8毫米厚钢板，横梁为工字钢I20a，长10米。

悬吊系统。前后悬吊螺杆 $\phi 42\text{mm}$ ，把吊篮底盘重量（即模板梁系及混凝土重）传至主桁架上。为调节浇混凝土引起桁架下挠，在每根悬挂螺杆上端各设10~15吨千斤顶两台。

桁架移动时用千斤顶将挂篮顶起滑排下放 $\phi 25$ 滚杆向前移动，滚杆下铺道木，可见行走部位详图。

每套挂篮材料用量见表1。

表1 每套挂篮材料用量

种类	规格(mm)	数量(t)	种类	规格(mm)	数量(t)
2 字 钢	I 45a	0.627	钢 板	$\delta 20$	0.939
	I 27a	5.564		$\delta 14$	1.088
	槽 钢	□ 16		5.034	$\delta 12$
$\delta 8$					1.130
	□ 10	4.716	螺 栓	M 24	0.321
角 钢	L 75x75x8	2.292		M 16	0.034
圆 钢	$\phi 42$	0.692	合 计		25.466

(未完，待续)