

# 索支高层结构体系概念设计

曲哲

2005-1-8

**摘要：** 本文受竹子建筑的启发，在框架-核心筒体系与变刚度半主动控制的基础上，构想出一种新型的高层结构体系，即索支高层结构体系。在介绍了该体系的创意与工作原理的同时，简要分析了该体系的性能与可行性。文中只提供了一个总体的构想，许多细节都没有考虑，其中很多细节是非常重要的。这些都有待进一步分析与讨论。

**关键词：** 高层 半主动控制 减振 变刚度

“我和我的建筑都像竹子，再大的风雨，也只是弯弯腰而已。”

这是贝聿铭先生在一次访谈中对自己的建筑品格的表述。虽然他与建筑结构的设计无关，但我们可以从中受到启示：为什么不能把建筑真的做得像竹子一样呢？于是有了下文的探索。

## 一、概念的来源

“框架-核心筒结构”和“半主动控制减振”均是近年来结构工程领域比较活跃的概念。将半主动控制减振原理与框架-核心筒结构形式紧密结合，便是本文索支高层结构体系的主要概念来源。

一方面，当前高层建筑结构体系繁多，性能各异，其中框架-核心筒体系应用比较广泛，高？米的上海金茂大厦、501米高的台北和正在施工的高？米的上海环球金融中心都采用了框架（巨型框架）-核心筒的结构形式。框架-核心筒体系受力性能的主要特点为：核心筒为抗侧力的主体；周边框架为平面框架，没有框筒的空间作用，抗侧力贡献很小。

研究表明，框架-核心筒体系在框架与核心筒之间的内力分配大致有如表 1 所示的比例关系。

表 1：框架-核心筒结构内力分配比较（%）

基底剪力		倾覆力矩	
实腹筒	周边框架	实腹筒	周边框架
80.6	19.4	73.6	26.4

来源：《高层建筑结构设计》<sup>[1]</sup>

这为我们改变周边框架的力学性能提供了空间。

另一方面，主动与半主动控制的减振方法是近年来抗震研究的热点。所谓半主动控制，是指通过伺服控制系统对结构的刚度、阻尼系数进行自动调节，使得结构物的动力参数始终处于最有利的数值范围以内，从而达到消除共振和减小振动的目的。与主动控制相比，它不需要很大的外加能源来驱动控制元件。并且对大、小地震都能发挥很好的减振作用<sup>[2]</sup>。

在半主动控制中，变刚度是比较有代表性的办法之一。现有的变刚度控制是指建筑结构的层间水平刚度或等价弹簧系数在地震过程中可根据实时分析和优化计算结果，启动控制系统进行调整。日本鹿岛公司在 1990 年建成了一座三层试验性建筑，通过改变各层斜撑与梁的连接条件改变层间水平刚度。这种办法可能是有效的。但如果应用于高层建筑，恐怕需要上千个变刚度设备，控制这些设备将是一件非常巨大且复杂的工作。

下面我们试着将框架-核心筒结构体系与变刚度减振原理相结合，以探索一种新型的半主动控制高层结构体系，即索支高层结构体系。

## 二、索支高层结构体系简介

同变刚度的思路一致，我们希望达到这样的效果，在正常使用状态下，高层建筑能够有足够的抗侧刚度来保证建筑空间的舒适度，这时它是一座建筑；一旦遇到地震或强风等严峻的考验，高层建筑能主动的改变自己的刚度，一方面减少地震或风振能量的输入，另一方面将自身的周期调整到比较有利的数值范围，避免发生共振。这时它是一根聪明的竹子。

在索支高层结构体系中，原来框架-核心筒体系中的周边框架被预应力索取代，索从上到下贯通结构全高，并在底部与基础相连。

索底与基础相连的部分安装有变刚度设备，它可以通过调节预应力索的刚度来改变整个结构的刚度。其假想图如图 1、2 所示。

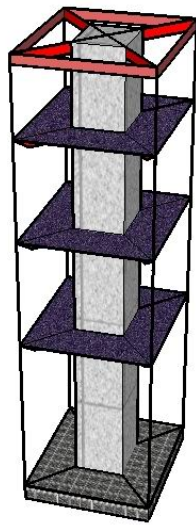


图 1: 索支高层结构体系示意图

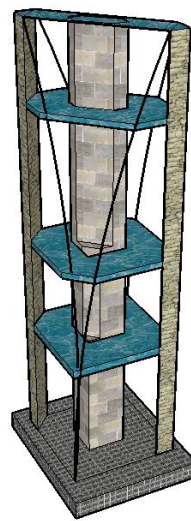


图 2: 将索支高层结构体系应用到上海环球金融中

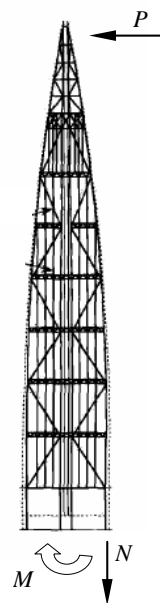
## 三、体系力学性能

在索支高层结构体系中，核心筒几乎要抵抗全面的侧力，这显然增加了它的负担，但从上文的数据我们知道，这种增加大约只有 20%左右，甚至更少些。除此之外，核心筒还不得不承担全部的竖向荷载，而这在高层建筑中未必不是好事。

在抗倾覆方面，预应力索可以帮上很大的忙。下面我们通过对上海环球金融中心的草算检验索支体系的可行性。

上海环球金融中强风作用下最大倾覆力矩约为  $2.7 \times 10^7 \text{kN} \cdot \text{m}^{[3]}$ ，假设其中 30%的倾覆力矩（这已经是相当高的比例了）需要由周边的索体系来承担，每次有两根拉索参与工作，则每根拉索需要承担的倾覆力矩  $M = 4 \times 10^6 \text{kN} \cdot \text{m}$ 。

上海金融中心的高宽比约为 6，底面宽约 80m，则基础对索的拉力的作用点距底面中心约 40m，从而得到每根预应力拉索需承担的拉力



$$N = \frac{M}{D} = \frac{4.0 \times 10^6 \text{ kN} \cdot \text{m}}{40\text{m}} = 1.0 \times 10^5 \text{ kN}$$

采用 1860 级的钢绞线,  $f_{py}=1320\text{MPa}$ , 则所需要拉索束的直径可估算如下:

$$A = \frac{N}{f_y} = \frac{1.0 \times 10^5 \text{ kN}}{1320\text{MPa}} = 0.076\text{m}^2$$

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 0.076}{\pi}} = 0.31(\text{m})$$

对于高近 500 米的上海金融中心来说, 这种小的截面是很能令人满意的。但应用高强度钢绞线的一个副作用是过大的变形。接近屈服时钢索的变形

$$\Delta = L \cdot \varepsilon = 500\text{m} \times \frac{f_{py}}{E_s} = 500\text{m} \times \frac{1320}{1.95 \times 10^5} = 3.4\text{m}$$

其中 L 为预应力索大概的长度。3.4 米的变形对于任何结构都不是一个小数字。不过在施加预应力时可以事先张紧其中的一大部分。这么大的变形空间也正好方便实施变刚度控制。

当地震等灾害来临时, 地震观测设备把地震信息输入控制计算机, 计算机通过计算分析出结构的适宜刚度, 向索脚处的变刚度设备发出指令, 变刚度设备通过适当地张紧或放松预应力拉索, 主动改变结构的刚度, 达到减振的目的。在具体实施中定会遇到成堆的棘手问题, 都有待工程技术人员与研究人员在应用中不断探索以解决。

#### 四、参考文献

- [1]方鄂华等: 高层建筑结构设计, 中国建筑工业出版社, 2003 年, 北京
- [2]周锡元、吴育才: 工程抗震的新发展, 清华大学出版社, 2002 年, 北京
- [3]徐朔明、任咏芳: 上海环球金融中心结构设计简析. 建筑钢结构进展, Vol. 5 No. 4, 2003