

# 粘弹性阻尼的钢结构高层建筑非线性静力分析

甘静艳

浙江工业职业技术学院, 浙江 绍兴 312000

**摘要:** 随着我国高层钢结构建筑增多, 对于粘弹性阻尼钢结构建筑的非线性静力分析十分必要。本文基于有限元理论对粘弹性阻尼钢结构高层建筑进行非线性静力分析, 研究结果表明: 在恒轴力荷载作用下, 钢结构框架的应力、应变最大位置在柱脚和梁端, 框架的荷载位移滞回曲线是比较饱满的梭形; 粘弹性阻尼器布置在底部位置的减震效果优于没有布置粘弹性阻尼器的建筑, 且位移和变形较小; 粘弹性阻尼器对高层钢结构的最大剪力和最大位移有明显的抑制作用。

**关键词:** 粘弹性阻尼器; 钢结构高层建筑; 非线性静力分析

**中图分类号:** TU311.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-2324(2016)01-0135-04

## Nonlinear Static Analysis on Steel High-rise Buildings with Viscoelastic Damper

GAN Jing-yan

Zhejiang Industry Polytechnic College, Shaoxing 312000, China

**Abstract:** It is necessary to analyze the nonlinear static of steel high-rise buildings with viscoelastic damper because of emerging more and more high-rise buildings in our country. This paper carried it out with the finite element theory and the results showed that the stress and maxi-strain of steel frame structure located in column foot and beam end under the action of constant axial force load, the load displacement hysteric curve of the frame was the full spindle; the effect of the viscoelastic damper on the bottom position was better than that having not it and the displacement and deformation were smaller. The steel high-rise buildings with viscoelastic dampers significantly inhibited maxi shear force and displacement, it could provide a reference for the design and construction of steel high-rise buildings.

**Keywords:** Viscoelastic damper; steel high-rise buildings; nonlinear static analysis

现在社会城市人口越来越多, 而土地面积并没有增长, 这就给高层建筑的存在提供了条件, 高层建筑在城市中得到广泛应用。由于高层建筑承受较大的荷载, 内部结构复杂, 对建筑质量和建筑施工安全性有较高要求。钢结构住宅在工业化发达是常用的住宅形式, 随着技术的不断高速发展, 再加上钢结构布置灵活性、空间的可变性, 我国高层钢结构住宅越来越多, 很大程度上改变了我国住宅形式单一的状况。我国是地震多发的国家, 对于基于粘弹性阻尼高层钢结构静力非线性分析的研究也要建立完善的理论体系, 并能够正确的进行结构设计和施工。因此对高层钢结构静力非线性分析研究显得尤为重要。

国内外很多学者已经对高层钢结构静力非线性分析进行了深入研究, 薛彦涛, 魏琰<sup>[1]</sup>研究得出结构的对称性的高层钢结构, 平面地震反应问题可取前 4~6 个振型按; 包世华等<sup>[2,3]</sup>研究表明对称双塔楼连体结构具有一致的振型和反对称振型; Popov 等<sup>[4]</sup>试验表明, 高层钢结构承载力受节点脆性破坏的影响较大, 试件设计的节点承载力难以满足设计要求。Tsai<sup>[5]</sup>等人对翼缘焊接和腹板附加螺栓的抗震性能进行了研究; 日本学者 Akiyama H 和 Nakashima M<sup>[6,7]</sup>通过理论分析和试验研究, 分析了箱型截面柱振动台试验研究的影响; 李杰<sup>[8]</sup>采用两种加载模式研究 H-H 型节点的力学性能, 模拟地震荷载作用下节点的塑性应变; 石永久<sup>[9]</sup>、李兆凡<sup>[10]</sup>和陈宏<sup>[11]</sup>等采用足尺试验和有限元方法, 提出新型高层钢结构的节点构造型式, 得出该节点延性较大, 而且施工方便, 是一种值得推荐节点类型。

随着有限元技术的进步, 数值仿真开始逐渐应用到高层钢结构静力非线性分析研究中, 在进行建模分析中, 由于其本身材料的非线性以及结构的复杂性的问题, 都要采用半经验半理论的方法进行简化处理。本文在分析粘弹性阻尼减震原理的基础上, 对钢框架结构进行有限元分析, 并通过分析一栋高层钢结构静力非线性, 得出粘性阻尼在高层钢结构中有效实践措施。

## 1 粘弹性阻尼减震原理

### 1.1 耗能机理

收稿日期: 2015-04-13

修回日期: 2015-05-22

作者简介: 甘静艳(1986-),女,广西省贵港市人,壮族,硕士,助教,主要研究方向为结构工程. E-mail:yuiti0853@sina.com

数字优先出版: 2016-01-25 <http://www.cnki.net>

粘弹性阻尼器由粘弹性材料和约束钢板所组成，粘弹性材料兼有粘性和弹性双重效果，在拉力作用下，粘弹性阻尼器中钢板与中间钢板形成相对运动而耗散能量，VEM 承担其耗能。其中材料的分子链在拉伸作用下产生相对滑移，当外力去掉后，被拉伸的分子链恢复到原来的位置并释放外力。

### 1.2 力学性能

$$K_{d1} = \frac{n_v G_1 A_v}{h_v}, \quad K_{d2} = \frac{n_v G_2 A_v}{h_v}, \quad \eta = \frac{G_2}{G_1} = \frac{K_{d2}}{K_{d1}} \frac{n_v G_2 A_v}{h_v}, \quad E_d = \pi r_0^2 G_2 V$$

其中  $G_1$ 、 $G_2$  分别为粘弹性材料剪切储能模量以及耗损模量； $A_v$ 、 $n_v$ 、 $h_v$  分别为粘弹性材料层的面积、粘弹性材料的层数和粘弹性材料层的厚度； $r_0$  为粘弹性阻尼器的剪切应变幅值。试验表明，粘弹性阻尼器具有具有较高的消能能力和特性稳定性，能够经历多次重复加载和卸载，滞回曲线为椭圆；粘弹性阻尼器灵敏度较高、安装简单方便和经久耐用的特点。

### 1.3 计算模型

粘弹性阻尼器的计算模型主要有 Kelvin-Voigt 模型<sup>[12]</sup>、标准线性固体模型<sup>[13]</sup>和等效标准固体模型<sup>[14]</sup>。前两种模型能够很好地反映粘弹性阻尼器的蠕变和松弛现象，但不能反映温度和频率对粘弹性阻尼器耗能性能的影响，而等效标准固体模型不仅充分体现前两者的优点，而且弥补了不足，是目前较为理想的计算模型。

## 2 有限元分析

在高层钢结构工程中，力学和物理问题可以简化为给定边界条件下求解其控制方程问题，解决方法包括：一是引入简化假设，求其近似解；二是采用数值模拟方法求解。数值模拟技术借助计算机技术求解工程要求的近似解。有限元法是工程技术中的最常用的数值模拟方法。

### 2.1 结构非线性分析

有限元分析考虑了材料大变形，属于工程中的非线性问题，在高层建筑结构中引起结构非线性的因素主要有几何非线性、材料的非线性和状态非线性三种。

### 2.2 试件建模

根据钢框架结构的层高和截面参数，本试件的框架梁为工字型截面，首层层高 3.15 m，二层层高 2.85 m，柱距 5 m。按轴压比和翼缘宽厚比的不同设计 10 个试件。采用 Solid92 实体单元，该单元的每个节点有 3 个自由度，支持几何非线性，材料取 Q235-B，定义非线性模型进行钢材的本构关系的模拟，弹性模量为： $E=2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ ，泊松比为 0.3，屈服强度为： $f_y=235 \text{ N/mm}^2$ ，极限强度为： $f_u=370 \text{ N/mm}^2$  其应力应变关系曲线，材料非线性遵循 Von-Mises 准则，图 1 为实体有限单元模型。

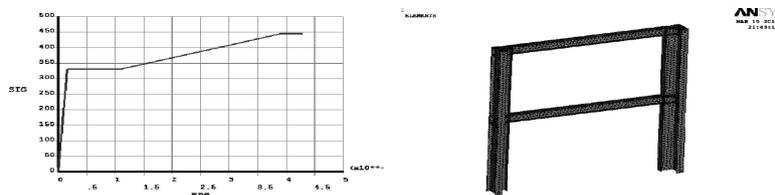
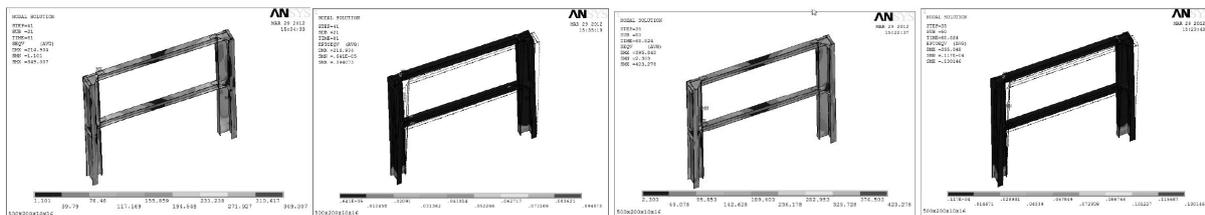


图 1 钢材的应力应变曲线以及结构有限元模型  
Fig.1 The stress-strain curves of steel and the finite element model of structure

## 3 结果与分析



(a)轴压比 0.2 Axial compress ratio 0.2 (b)轴压比 0.4 Axial compress ratio 0.4  
图 2 不同轴压比的应力及应变变形云图

Fig.2 The deformation of stress and strain under the different axial compress ratios

由应力云图（图 2）可知，轴压比不同两个构件均发生塑性变形，梁上、下翼缘处的应力较大，柱脚是柱的较大的应力位置，在实际工程中这些位置都会出现应力集中，应力分布较为复杂，塑性区域的发展来看，柱脚处先进入塑性，然后梁柱节点屈服，整个过程塑性区域扩大，承载能力提高，直到该结构发生破坏。高层钢框架的塑性区，首先发生在柱脚的 10 cm~30 cm 高度结位置，然后随着加载，逐步向内和向上发展。随着轴压比的增加，框架的屈曲变形量逐渐增大。

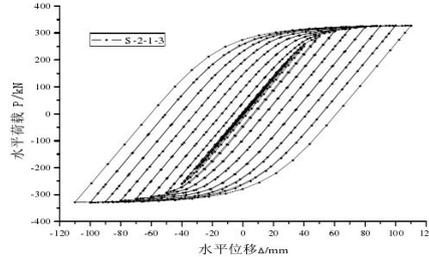


图 3 有限非线性分析钢框架的滞回曲线

Fig.3 the hysteric curves of steel frame with finite nonlinear analysis

由图 3 可知，钢框架构件的滞回曲线是较为饱满的梭形，这表明钢框架柱的塑性变形能力较强，能够吸收地震能量，正反加载时滞回曲线的对称性较好，钢构件的正、负刚度相同。

### 3.1 粘弹性阻尼高层钢结构静力非线性

3.1.1 模型建立 某高层钢结构结构为钢框架—支撑体系，总共层数为 25 层，其中地下二层，地下每一层高度都是 4 m，上部楼层的层高均为 3.6 m，建筑中的高度为 92 m，抗震设防烈度为 8 度，建筑场地类别为 II 类场地，设计地震加速度为 0.30 g。

为了对高层钢结构静力非线性抗震性能分析，采用以下几种方案：一、采用没有加任何阻尼器的高层钢结构；二、在底部楼层内部加粘弹性阻尼器；三、在楼层中部位置设置粘弹性阻尼器；四、在底部楼层内部和中部布置粘弹性阻尼器。

#### 3.1.2 非线性分析

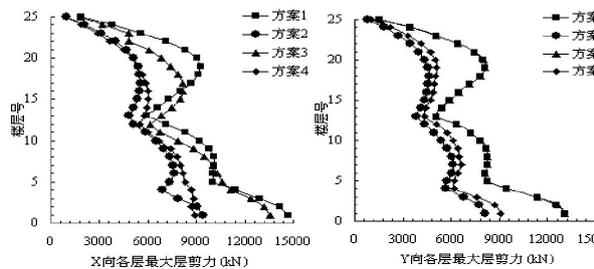


图 4 高层钢结构楼层的最大层剪力

Fig.4 Maximum floor shear of steel high-rise structure

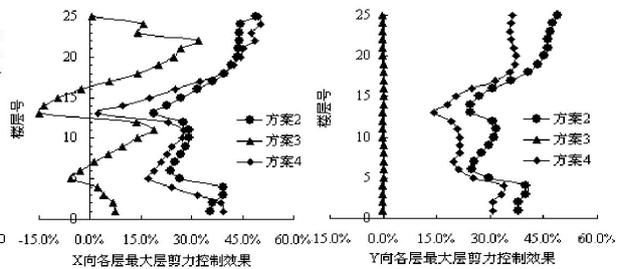


图 5 高层钢结构楼层最大层剪力控制效果

Fig.5 Control effect of maximum floor shear of steel high-rise structure

由图 4 中可以看出 X 向、Y 向的最大在底层位置，图 5 中通过加设粘性阻尼器之后，方案 2 的 X 方向向层剪力最大值为 49.0%，Y 向的层剪力最大值为 48.9%；方案 3 d 的 X 向剪力最大值为 32.1%，Y 方向剪力最大值 0.0%；方案 4X 方向剪力最大值为 50.3%，Y 向剪力最大值为 37.2%。方案 2 和方案 4 减震效果的减震效果较好，从结果相比较可以看出，方案 2 的减震效果更好。这表明在高层钢结构中布置阻尼器对可以达到较好的减震效果，结构的抗震性能得到较大提高。

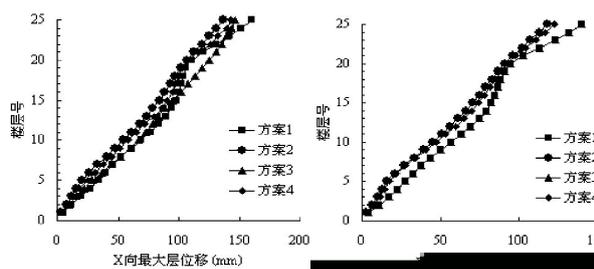


图 6 结构各层最大位移

Fig.6 The maximum displacement in every structure

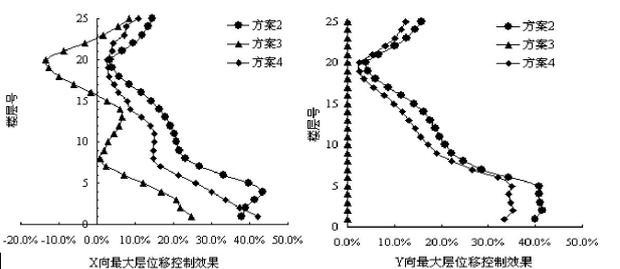


图 7 结构各层最大层位移控制效果

Fig.7 The control effect of maxi floor displacement in every structure

由图 6 可知楼层的屋顶位置是最大位移发生的地方, 方案 2 和方案 4 的最大位置层位移比方案 1 要小, 比较方案 3 和方案 1 的层位移, 顶层和中下层的 X 向的在粘性阻尼器的作用下的层位移减小, Y 向无明显变化。图 7 为高层钢结构位移控制效果图, 方案 2 和 4 在在底部几层的位置控制效果较好, 方案 2 对 X、Y 两个方向的控制效果都较好, 且 X 向第 4 层最大为 43.5%, Y 向第 2 层最大为 41.44%, 这表明粘性阻尼器布置在底层对下部结构的控制效果较为明显, 方案 3 的方向的 X 控制效果是在上层和中下层, 第 1 层最好的控制效果为 24.8%; 方案 4 控制效果在 X 方向第 1 层的最大为 42.1%, Y 向第 5 层最大为 35%。

## 4 结论

本文针对国内外对基于粘弹性阻尼高层钢结构静力非线性研究尚处于初级阶段的基础上, 提出了钢结构体系非线性分析需要解决的问题, 然后以一个框架钢结构和高层钢结构为研究对象, 采取有限元理论和理论分析方法, 对高层钢结构静力非线性进行了研究, 得出了以下主要的结论:

(1) 钢结构框架受恒轴力荷载作用下, 应力、应变最大位置在柱脚和梁端, 该位置较易出现局部屈曲, 非线性有限元分析所得到框架的荷载位移滞回曲线是比较饱满的梭形, 表明该结构具有比较好的延性和耗能能力。

(2) 在粘弹性阻尼器的作用下, 不同布置方案的阻尼效果不同, 其中布置在底部位置的减震效果更好, 相对较没有布置粘弹性阻尼器的建筑, 位移和变形要小的多, 这表明高层钢结构中布置阻尼器对可以达到较好的减震效果, 结构的抗震性能得到较大提高。

(3) 通过工程实例分析, 粘弹性阻尼器对高层钢结构的最大层剪力和最大层位移有明显的抑制作用, 顶层位移能够得到有效的控制, 高层建筑的底部和中部布置阻尼器都能减小 X、Y 向的地震反应, 粘弹性阻尼器在高层建筑中具有重要的意义, 本文的结果能为高层钢结构的设计和施工提供参考。

## 参考文献

- [1] 薛彦涛,魏 珺.底部整体裙房上部多塔结构地震反应分析[J].建筑结构学报,1989(6):21-29
- [2] 包世华,王建东.大底盘多塔楼连体结构的振动计算和动力特性[J].建筑结构,1997(6):40-44
- [3] 包世华,王建东.大底盘多塔楼连体结构的受力分析[J].建筑结构,1996(11):7-13
- [4] Bjorhovde R, Colson A, Brozzetti J. Classification system for beam-to-column connections[J]. Journal of Structural Engineering, 2014,116(11):3059-3076
- [5] Junichi S, Chiaki M, Makoto Y. Effect of collapse modes on earthquake resistant properties for steel frames[C]. Acapulco Mexico: Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, 1996:79
- [6] Nakashima M, Minami T, Mitani I. Moment redistribution caused by beam fracture in steel moment frames[J]. Journal of Structural Engineering, 2000,126(1):137-144
- [7] Nakashima M, Roeder CW, Maruoka Y. Steel moment frames for earthquake in United States and Japan[J]. Journal of Structural Engineering, 2000,126(8):861-868
- [8] 李 杰.地震循环荷载下钢结构梁柱焊接节点耗能及损伤行为的研究[D].天津:天津大学,2002
- [9] 石永久,李兆凡,陈 宏,等.高层钢框架新型梁柱节点抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2002,23(3):2-7
- [10] 李兆凡,石永久,陈 宏,等.改进型钢结构梁柱节点非线性有限元分析[J].建筑结构,2002,32(9):15-18
- [11] 陈 宏,石永久,王元清,等.钢框架梁柱节点受力性能的非线性分析[J].工业建筑,2001,31(5):56-58
- [12] 于国荣.粘弹性阻尼器的计算模型模拟分析[J].山西建筑,2008,34(13):28-29
- [13] 盖 波,李 刚.粘弹性阻尼器的计算模型分析研究[J].山西建筑,2008,34(27):110-112
- [14] 徐赵东,周 云,周福霖.粘弹性阻尼器三种计算模型的对比与分析[J].华南建设学院西院学报,1999,7(2):1-7