第 39 卷	第	6	期
2017 年	12	月	

梁亚雄,付博啸.采用非线性纤维梁单元法的钢管混凝土组合框架动力响应分析[J].地震工程学报,2017,39(6):1105-1110. doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.06.1105

LIANG Yaxiong, FU Boxiao. Dynamic Response Analysis of Composite Frames with Concrete-filled Steel Tubular Columns Based on Non-linear Fiber Beam Element[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(6):1105-1110.doi:10.3969/j.issn. 1000-0844.2017.06.1105

采用非线性纤维梁单元法的钢管混凝土 组合框架动力响应分析◎

梁亚雄1,2, 付博啸1,2

(1.兰州理工大学土木工程学院,甘肃兰州 730050; 2.甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室,甘肃兰州 730050) 摘要:钢管混凝土结构已经广泛应用于我国高层和超高层建筑中,为研究该类结构的抗震性能,分 别采用分离模量法和统一模量法对某 13 层钢管混凝土框架结构进行抗震性能分析,研究不同地震 波作用下组合框架的模态和多遇地震下的弹性动力时程,对比组合框架顶点位移反应、加速度反 应、层间侧移及动力放大系数等。研究结果表明,分离模量法和统一模量法建模方法在分析钢管混 凝土框架抗震动力特性上总体相差不大,但前者可以考虑材料弹塑性,从而对结构弹塑性进行分 析,而后者在弹塑性阶段需要用全曲线表达式,尚需进一步的研究。

关键词:钢管混凝土;组合框架;非线性纤维梁柱单元;动力性能;数值模拟
中图分类号:TU398
文献标志码:A
文章编号:1000-0844(2017)06-1105-06
DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.06.1105

Dynamic Response Analysis of Composite Frames with Concrete-filled Steel Tubular Columns Based on Non-linear Fiber Beam Element

LIANG Yaxiong^{1,2}, FU Boxiao^{1,2}

School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China;
Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province, Lanzhou 730050, Gansu, China)

Abstract: Due to their excellent mechanical performance, such as seismic performance and fire resistance performance, concrete-filled steel tube structures have been widely used in high and super-high building structures. In order to investigate the seismic performance of concrete-filled steel tube structures under the effect of earthquake, this paper developed a finite element model of composite frames with concrete-filled steel tubular columns and steel beams with RC slabs by the separate modulus approach and uniform modulus approach, respectively. By using the ABAQUS software, the two validated calculation models of the separate modulus approach and uniform modulus approach were used in order to perform finite element analysis and elastic dynamic time-history analysis of a 13-story composite frame structure with concrete-filled steel tu-

① 收稿日期:2016-08-24

基金项目:国家自然基金项目(51268038,51368037)

作者简介:梁亚雄(1975-),男,讲师,从事钢结构与钢一混凝土结构抗震性能的教学与研究工作。E-mail:liangyx@lut.cn。

bular columns and steel beams with RC slabs under three different frequent earthquake waves. The top story displacement versus time curves, acceleration time-history responses, story lateral displacement, and the dynamic magnification factors of the frame, were contrasted based on the two models. The results show that the separate modulus approach and uniform modulus approach did not vary much for the dynamic performance analysis of composite frame with concrete-filled steel tubular columns and steel beams with RC slabs under frequent earthquake. However, the separate modulus approach can be used in elastic-plastic analysis, while the uniform modulus approach needs the expression of the stress-strain curve in elastic-plastic analysis, which requires further study.

Key words: concrete-filled steel tube (CFST); composite frame; nonlinear fiber beam-column element; dynamic performance; numerical simulation

0 引言

钢管混凝土结构由于自身良好的受力及抗震性 能,已经广泛应用于高层和超高层建筑中。该类结 构在地震作用下的弹性及弹塑性时程分析方法中, 主要采用纤维梁单元进行建模计算[1-2]。钟善桐[3] 提出将钢管混凝土视为由钢材和混凝土组合而成的 一种材料,称为"统一模量法"。丁阳等[4]采用此方 法对钢管混凝土框架模型进行了拟静力分析。另一 种方法是将钢管混凝土的钢管和核心混凝土分别赋 予各自的材料属性,核心混凝土考虑钢管对其的约 束性能,称为"分离模量法"。不同学者采用此方法 进行了钢管混凝土构件或框架的静力及动力性能分 析,取得了良好的计算效果[5-7]。为进一步对比两种 分析方法在进行钢管混凝土组合框架动力性能分析 中的差异,为有关研究者提供模拟方法选择依据,本 文拟分别采用此两种方法对钢管混凝土框架体系的 动力特性进行数值模拟,并进行多遇地震作用下结 构的弹性动力时程分析,对比两种方法的计算结果。

1 有限元模型

1.1 分离式建模方法

采用分离模量法进行钢管混凝土框架抗震性能 分析时,主要基于纤维梁模型实现,即将构件截面细 分成若干纤维单元,如图1所示。通过对截面不同 积分点赋予不同的材料本构模型,并对截面上材料 积分点进行内力计算,得到整个控制点截面的属 性^[2]。

钢材和混凝土的本构模型分别选取作者自定义 开发的单轴本构模型,其中混凝土考虑钢管的约束 效应,骨架曲线采用韩林海^[1]提出的单轴本构关系; 钢材采用双线性随动强化本构模型,骨架曲线由两部分组成,即弹性段和强化段,强化段的弹性模型取 值为 0.01*E*_s(*E*_s 为钢材的弹性模量),加卸载刚度 采用初始弹性模量,不考虑软化的作用。



图 1 纤维梁单元示意图 Fig.1 The fiber beam element model

为了验证本文所选钢材和混凝土材料本构模型 在大变形和往复荷载作用下结构的计算精度,对韩 林海^[1]进行的钢管混凝土构件在往复荷载作用下的 滞回性能进行了计算(图 2),其具体尺寸信息等参 见文献[1]。可以看出,计算曲线与试验曲线基本上 吻合良好。

1.2 统一式建模方法

统一模量法是将组成钢管混凝土的外包钢管和 核心混凝土视为单一的组合材料构件,在梁截面每 一个积分点上赋予一种组合材料的属性,分析时采 用组合材料的性能指标。本文暂不讨论弹塑性分 析,仅进行多遇地震下弹性分析及动力特性计算,因 此在弹性工作阶段各种截面形式的组合轴压弹性模 量 *E*_{sc}的计算式可表达为^[3]:

$$E_{\rm sc} = f_{\rm sc}^{\rm p} / \varepsilon_{\rm sc}^{\rm p} \tag{1}$$

式中平均比例极限 f_{sc}^{p} 和应变 ε_{sc}^{p} 分别为:

$$f_{\rm sc}^{\rm p} = (0.192 \cdot f_{\rm y}/235 + 0.488) \cdot f_{\rm sc}^{\rm y} \qquad (2)$$

$$\varepsilon_{\rm sc}^{\rm p} = 0.67 \cdot f_{\rm y}/E_{\rm s} \tag{3}$$





Fig.2 Comparison between P- Δ hysteretic curves of FE calculation and tests

其中:组合抗压强度标准值 f^y_{sc}为:

 $f_{sc}^{y} = (1.212 + b \cdot \xi + c \cdot \xi^{2}) \cdot f_{ck}$ (4) 式中:约束效应系数 $\xi = \alpha \cdot f_{y}/f_{ck}, f_{y}$ 和 f_{ck} 分别为 钢管和核心混凝土强度,含钢率 $\alpha = A_{s}/A_{c}, A_{s}$ 和 A_{c} 分别为钢管和核心混凝土的面积;系数 b 和 c 对 于不同的截面取值不同,对于圆形截面:

$$b = 0.175 \ 9 \cdot f_y / 235 + 0.974 \tag{5a}$$

$$c = 0.103 \ 8 \cdot f_{ck}/20 + 0.030 \ 9$$
 (5b)

对于方形和矩形截面:

$$b = 0.131 \cdot f_{\rm w}/235 + 0.724$$
 (6a)

$$c = -0.07 \cdot f_{\rm ck}/20 + 0.026 2$$
 (6b)

2 有限元模型

参照某工程实例,设计了一幢 13 层的方钢管 混凝土柱-钢梁框架结构,底层层高 4.2 m,标准层 层高为 3.3 m。具体参数为:抗震设防烈度为 Ⅲ 度,设计基本地震加速度 0.15g,建筑场地类别为 Ⅲ类,结构中钢材选用 Q235B,钢管内混凝土强度 等级为 C40,屋、楼面板混凝土强度等级为 C30,楼 屋面板结构层厚度为 120 mm,框架模型的结构布 置图如图 3 所示,框架模型各主要构件的具体尺寸 如表 1 所列。



Fig.3 Frame stucture and finite element model

表1 组合框架模	型构件尺寸
----------	-------

Table 1	e 1 Component size of the composite frame model					
层数(n)	构件	柱含钢率				
1~3	柱	$\Box - 500 \times 16$	0.141			
	主(次)梁	$500\!\times\!200\!\times\!11\!\times\!17$				
4~8	柱	$\Box - 450 \times 14$	0.137			
	主(次)梁	$450\!\times\!200\!\times\!9\!\times\!14$				
9~13	柱	$\Box - 400 \times 12$	0.132			
	主(次)梁	$400\!\times\!200\!\times\!9\!\times\!14$				

3 地震波的选择

综合考虑场地条件、地震波的频谱特性、地震波 的幅值特性以及地震波持时等因素,选择3条常用 地震波作为输入地震动,分别是 Taft 波(W-E)、El-Centro 波(N-S)和唐山波(W-E)(图 4)。输入的地 震波方向与结构短边方向平行(结构弱方向),每条 波的持续时间为 15 s。按照《建筑抗震设计规范》 (GB50011-2010)^[8]的规定:"WE度(0.15g)时进行多 遇地震下的弹性时程分析所采用的最大峰值加速度 为 55 gal",对实际地震波进行调幅处理。分析时的 最大时间增量步长取为各种地震波加速度时程曲线 上的时间间隔:El-Centro 波(N-S)和 Taft 波(W-E) 为 0.02 s,唐山波(W-E)为 0.01 s。

4 分析结果

4.1 结构位移反应分析

结构顶层顶点位移时程曲线如图 5 所示。同一 条地震波,采用分离式和统一式建模方式计算出的 顶层的位移时程曲线形状总体上差别不大。

图 6 为最大层间位移包络图。唐山波作用下结构最大层间位移发生在第 10 层且为负方向,采用统 一模量理论计算时,最大层间位移为 5.96 mm,层间 位移角为1/554;采用分离模量计算时二者分别为



Fig.5 Displacement time history curves of top floor under the excitation of three seismic waves

4.31 mm 及 1/766。El-Centro 波(N-S)作用下结构的 最大层间位移发生在第 9 层且为正方向,采用统一模 量计算时,最大层间位移为5.63 mm,层间位移角为 1/586;采用分离模量计算时二者分别为 4.52 mm 及 1/730。Taft 波(N-S)作用下结构的最大层间位移发 生在第 11 层,采用统一模量计算时最大层间位移发 生在正向,为 4.33 mm,层间位移角为 1/762;采用分 离模量计算时最大层间位移发生在负向,为 4.58 mm,层间位移角为 1/721。不同地震波作用下结构 的弹性层间位移角均小于 1/400 的规范规定^[9]。





4.2 加速度反应

图 7 为顶点加速度时程曲线。El-Centro 波作 用下结构顶点加速度峰值出现最早,出现在 2.69 s; Taft 波次之,出现在 8.22 s;唐山波作用下最晚,出 现在 9.67 s。El-Centro 波和唐山波激励下采用分 离模和统一模量计算出的顶点加速度最大值出现时 刻相同;Taft 波激励下采用两种理论计算出的顶点 加速度最大值出现的时刻并不相同,分离模量出现 在 8.22 s,统一模量出现在 7.25 s。

图 8 为各楼层动力放大系数(加速度放大系数) 包络图。不同地震波作用下楼层动力放大系数包络 图形状不同,但大致呈现 C+S 型,即:6 层以下呈现





Fig.7 Relative acceleration time history curves of top floor





C型,6层以上呈现S型。动力放大系数随结构楼 层高度的变化相对缓慢,表明结构抗侧刚度沿竖向 分布比较均匀。与楼层层间位移表现出的规律相 似,三种地震波作用下,两种模量理论计算出的楼 层最大动力放大系数曲线形状大致相同。框架的 最大动力放大系数出现在结构的顶层,Taft 波激励 下结构动力放大系数最大,唐山波次之,El-Centro 激励下最小;在钢管混凝土结构的顶层,鞭梢效应 明显。

5 结论

(1)采用统一模量计算的位移反应略大于分离 模量的计算结果,两种建模方式计算得到的结构弹 性层间位移角均可满足相关规范的规定。

(2)采用两种不同建模方式进行计算时,结构 加速度反应比较接近。不同地震波作用下楼层动力 放大系数包络图形状不同,但大致呈现C+S型。

(3)分离模量法可以考虑材料弹塑性而应用于 结构弹塑性分析,而统一模量法在弹塑性阶段需要 用全曲线表达式,尚需进行必要的研究。

参考文献(References)

[1] 韩林海.钢管混凝土结构——理论与实践[M].第二版.北京:科学出版社,2007.
HAN Linhai. Concrete Filled Steel Tubular Structures——

Theory and Practice [M].2nd Ed.Beijing: China Science Press, 2007.

[2] 陆新征,叶列平,缪志伟.建筑抗震弹塑性分析——原理、模型 与在 ABAQUS, MSC. MARC 和 SAP2000 上的实践[M].北 京:中国建筑工业出版社,2009.

LU Xinzheng, YE Lieping, MIAO Zhiwei, Elasto-plastic Analysis of Building Against Earthquake——Theory, Model and Implementation on ABAQUS, MSC. MARC and SAP2000[M]. Beijing:China Architecture & Building Press, 2009, 262-271.

[3] 钟善桐.钢管混凝土结构[M].第三版.北京:清华大学出版社, 2003.

ZHONG Shantong. The Concrete-filled Steel Tubular Structures[M].3rd Ed.Beijing: Tsinghua University Press, 2003.

 [4] 丁阳,许成祥,戴学新,等.钢管混凝土框架结构抗震性能的非 线性有限元分析[J].建筑结构,2004,34(1):7-10.
DING Yang, XU Chengxiang, DAI Xuexin, et al. Nonlinear Finite Element Analysis on the Seismic Behavior of Concrete-Filled Steel Tubular Frame[J]. Building Structure, 2004, 34 (1):7-10. [5] 郑晓伟,苏明周,石鲁,等.直接基于位移设计的高强钢组合 K 形偏心支撑钢框架的抗震性能研究[J].地震工程学报,2016, 38(5):678-684.

ZHENG Xiaowei, SU Mingzhou, SHI Lu, et al. Seismic Behavior of High Strength Steel Composite K-type Eccentrically Braced Frames with Direct Displacement-based Design Method[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2016, 38(5); 678-684.

[6] 陆婷婷,梁兴文.高强钢筋高延性纤维增强混凝土框架结构的 屈服机制和抗震性能[J].地震工程学报,2016,38(2):166-175. LU Tingting,LIANG Xingwen.Yielding Mechanism and Seismic Performance of Frame Structure with High-Strength Bars and High-Ductile Fiber-Reinforced Concrete[J].China Earthquake Engineering Journal, 2016, 38(2):166-175.

- [7] LI W, HAN L H. Seismic Performance of CFST Column to Steel Beam Joint with RC Slab: Joint Model[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 73:66-79.
- [8] 建筑抗震设计规范:GB50011-2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010

Code for Seismic Design of Buildings: GB50011-2010[S]. Beijing:China Architecture & Building Press, 2010.

[9] 钢管混凝土结构技术规程:DB62/T25-3041-2009[S].2009.
Technical Specification for Concrete-filled Steel Tubular Structure:DB62/T25-3041-2009[S].2009.

• 简讯 •

我刊编委会主任张建民和编委孔宪京 当选中国工程院院士

2017年11月27日,中国工程院2017年院士增选名单公布,67名工程科技专家当选为新院士,我刊编委会主任、清华大学土木水利学院张建民教授和编委会委员、大连理工大学孔宪京教授光荣当选为中国工程院院士。

张建民,1960年生,博士,清华大学教授、博士生导师、土木水利学院院长。先后获西安理工大学岩土工 程博士学位和东京工业大学结构工程博士学位。张建民教授长期从事土动力学及岩土抗震工程领域的教研 工作,在土动力学若干基本理论以及结构与土体系统的动力分析、抗震设计和测试技术诸方面取得新成果, 发表 SCI和 EI 期刊收录论文 220余篇,参编设计标准及指南 6部,获准和公开国家发明专利 25项,2009年 获国家科技进步二等奖、2013年获国家技术发明一等奖。

孔宪京,1952年生,博士,大连理工大学教授、博士生导师。1980年7月毕业于大连工学院(现大连理工 大学)水利系,先后获硕士、博士学位。孔宪京教授长期以来结合我国水利和核电工程建设在土石坝原、模型 的动力试验技术、信号测试与处理技术、筑坝材料的变形与强度特性、高土石坝和核电厂构筑物数值分析与 抗震设计理论及安全评价方法等方面进行了系统、深入的研究。

《地震工程学报》编辑部