

# 单层单跨门式刚架结构纵向抗震性能时程分析

冉红东, 焦培培, 苏明周

(西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:**为研究门式刚架结构纵向支撑体系的抗震性能, 采用有限元软件 ANSYS 对《门式刚架轻型房屋钢结构》(02SG518-1)中的 GJ18-1C、GJ24-1C、GJ30-1C、GJ36-1C 四个门式刚架在不同工况纵向地震作用下的性能进行了动力弹塑性时程分析. 分析结果表明: 门式刚架结构的纵向地震作用较小, 即使在罕遇地震阶段, 纵向地震作用引起的结构内力仍较小, 柱顶侧移也远小于规程要求, 表明按现行规程设计的门式刚架完全能满足结构纵向变形要求, 具有优良的纵向抗震性能.

**关键词:**门式刚架; 交叉支撑; 纵向地震; 抗震性能; 时程分析

**中图分类号:** TU328

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2013)03-0336-05

近年来具有造型美观、造价低、布置灵活、施工速度快等优点的轻型门式刚架结构被广泛用于单层工业厂房、超市、展览馆、库房以及各类仓储式建筑. 国内外学者通过算例分析<sup>[1-3]</sup>, 分别讨论了地震作用组合工况对不同形式门式刚架轻型房屋钢结构的影响, 探讨了门式刚架设计过程中地震作用的计算和抗震措施等问题, 但上述研究仅限于门式刚架受横向地震作用的情况. 因此, 本文对轻型门式刚架纵向抗震性能进行研究.

本文采用 ANSYS 对《门式刚架轻型房屋钢结构标准图集》<sup>[4]</sup> (02SG518-1)中的 18 m、24 m、30 m、36 m 跨的单跨门式刚架进行动力时程分析, 得出其在纵向地震作用下的抗震性能, 分析结果表明: 按《门式刚架轻型房屋钢结构技术规程》<sup>[5]</sup>设计的门式刚架完全满足结构纵向变形要求.

## 1 有限元模型的建立(以 18 m 跨为例)

### 1.1 模型材料、尺寸以及单元的确定

门式刚架 GJ18-1C 的钢材采用 Q235B, 屈服强度  $f_y = 235$  MPa, 钢材密度  $\rho = 7\ 850$  kg/m<sup>3</sup>, 泊松比  $\mu = 0.3$ , 弹性模量  $E_1 = 2.06 \times 10^{11}$  N/m<sup>2</sup>, 重力加速度  $g = 9.815$  mm/s<sup>2</sup>. 主要截面尺寸见表 1 和表 2. 纵向长度 36 m, 柱距 6 m, 共有 7 榀门架. 为简化计算, 计算模型中保留与支撑相连的两榀刚架及相应的支撑系统, 把其余 5 榀门架等效为一榀等效刚架. 为保证体系承受的纵向地震作用不变, 该刚架施加其余 5 榀刚架的全部质量. 为避免等效刚架破坏, 将该刚架的材料弹性模量增大 10 倍. 因刚架柱脚为铰接, 这种等效不会对体系纵向抗侧刚度产生影响. 梁、柱选用 Beam189 单元, 柱间支撑、水平支撑选用 link10 单元, 刚性系杆选用 link8 单元.

表 1 门式刚架试件梁柱截面尺寸 /mm

Tab. 1 Section sizes of beams and columns of the portal frame

梁截面尺寸/mm×mm×mm	柱截面尺寸/mm×mm×mm
1— H(820—300)×160×5×6	H(520—250)×170×5×8
2— H(300—432)×160×5×6	
3— H(432—300)×160×5×6	
4— H(300—820)×160×5×6	

表 2 门式刚架试件支撑截面尺寸 /mm

Tab. 2 Section sizes of braces of the portal frame

柱间支撑	水平支撑	刚性系杆
2L50×5	Φ20	Φ120×5

收稿日期: 2012-11-28 修改稿日期: 2013-05-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(E080502); 科技部科研院所专项基金项目(NCSTE-2007-JKZX-258)

作者简介: 冉红东(1977-), 男, 陕西长安人, 副教授, 博士, 主要从事新型钢结构体系抗震研究.

1.2 荷载和抗震设防条件

结构承受的荷载标准值和抗震设防条件见表 3.

表 3 结构荷载表

Tab. 3 Structural load table /kN · m<sup>-2</sup>

屋面 恒荷载	墙面 恒荷载	活 荷载	雪 荷载	风 荷载	抗震设防目标
0.25	0.2	0.5	0.4	0.45	8 度 ( 0. 2g ), III 类场地土,地震分 组第一组

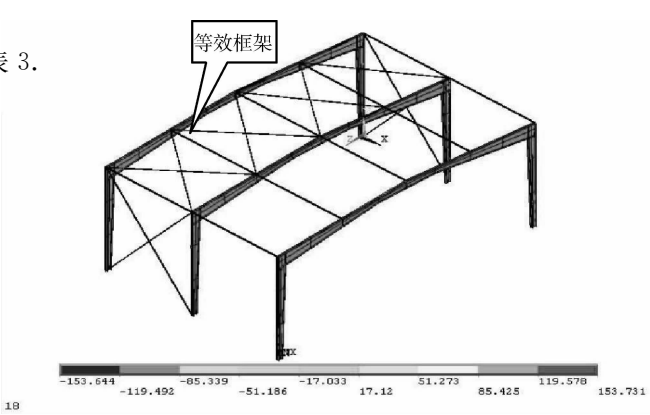


图 1 18m 跨刚架模型

Fig . 1 Structural model with span of 18m

2 设计模型计算条件与试验验证  
(以 18 m 跨为例)

2.1 设计计算条件

本结构为《门式刚架轻型房屋钢结构》标准图集(02SG518-1)中 GJ18-1C 刚架. 结构抗震设防烈度为 8 度,III 类场地土,设计地震分组为 I 组<sup>[7]</sup>. 结构柱距为 6 m,檐口高度为 6.9 m,斜梁坡度为 1 : 15,柱脚铰接,钢材为 Q235B 级钢.

2.2 试验验证

本文所用有限元模型先加横向地震波,所得檐口最大位移计算值与门式刚架结构抗震性能研究的振动台试验所得的试验结果<sup>[6]</sup>对比见表 4.

表 4 檐口最大位移计算值和实测值的比较

Tab. 4 Comparison of calculated value with measured value of eave maximum displacement

烈度	加速度峰值	计算最大位移 $U_1$ /mm	侧移角	实测最大位移 $U_2$ /mm	侧移角	$\frac{U_2}{U_1} / \%$
7 度多遇	350	4.042 0	0.001 757	2.198 8	0.000 956	54
8 度多遇	700	8.145 2	0.003 541	4.565 4	0.001 985	56
7 度基本	1 000	13.143 5	0.005 711	8.428 9	0.003 665	64
9 度多遇	1 400	16.542 9	0.007 193	12.124 7	0.005 272	73
8 度基本	2 000	23.872 4	0.010 379	18.934 5	0.008 232	79
7 度罕遇	2 200	26.642 8	0.011 584	21.854 6	0.009 502	82
8 度罕遇	4 000	48.657 2	0.021 155	51.841 9	0.022 540	107
9 度罕遇	6 200	73.623 8	0.032 010	65.918 6	0.028 660	90

由表 4 可以看出,计算值和实测值大部分误差在 30%以内. 该结构在 7 度多遇,8 度多遇和 7 度基本的小震作用时计算值和实测值吻合较差. 分析原因应是实际结构中柱脚转动刚度的影响. 在加速度峰值较小时,实际结构柱脚接近于刚接,而有限元模型则为完全铰接,由此产生误差. 再者实际结构比有限元模型结构刚度大,因此得出的放大系数也较有限元模型大,而位移较模型小. 在 8 度罕遇(9 度多遇)、9 度罕遇大震作用下计算值和实测值的误差在 20%以内,最小误差为 3%,吻合较好.

上述研究表明有限元计算结果基本与试验结果吻合,在此基础上进一步研究门式刚架结构在纵向地震波作用下的地震反应.

3 18 m、24 m、30 m、36 m 跨刚架结构动力时程分析

利用 ANSYS 瞬态求解器求解刚架在 El-Centro 波、Taft 波和人工波三种地震波,7 度多遇、基本,8 度多遇、基本、罕遇,9 度基本、罕遇 7 种工况下的反应,详细分析了该结构的纵向地震作用.

### 3.1 El-Centro 波作用下结构动力时程分析(以 18 m 为例)

(1) 门式刚架在 El-Centro 波多遇工况下柱顶纵向位移时程曲线如图 2 所示。

由图 3 可以看出,刚架在 8 度罕遇时,最大应力发生在节点域外侧梁的下翼缘上,未达到屈服强度。由图 4 可以看出刚架在 9 度罕遇时,最大应力也未达到屈服强度,可见刚架结构在纵向地震波作用下的变形和应力都很小,可以保证结构的安全性。

由上图可以看出,在 El-Centro 波作用下,结构柱顶最大位移在各工况下都是出现在第 4.26 s 左右,并且随着输入加速度峰值的增大,结构位移曲线峰值也逐渐增大。

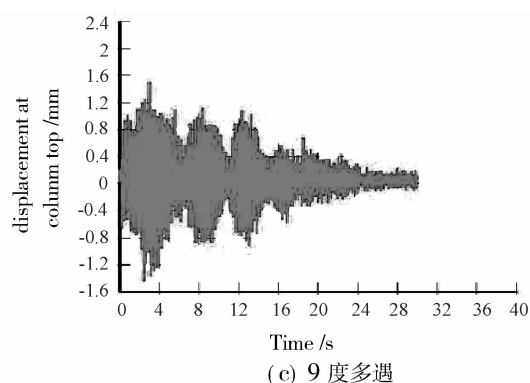
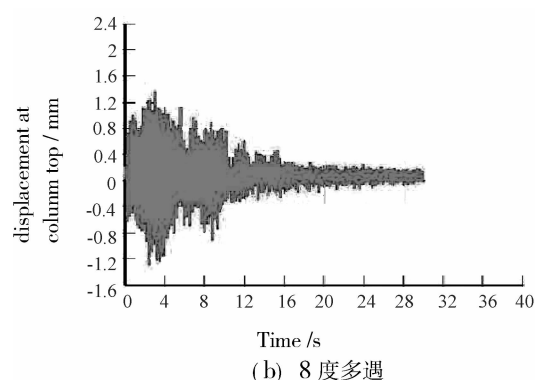
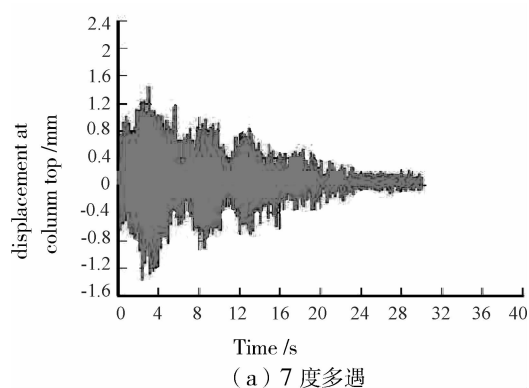


图 2 柱顶位移时程曲线

Fig. 2 time-history curves of the displacement at column top

(2) 结构应力与受力分析。结构应力图如下所示:

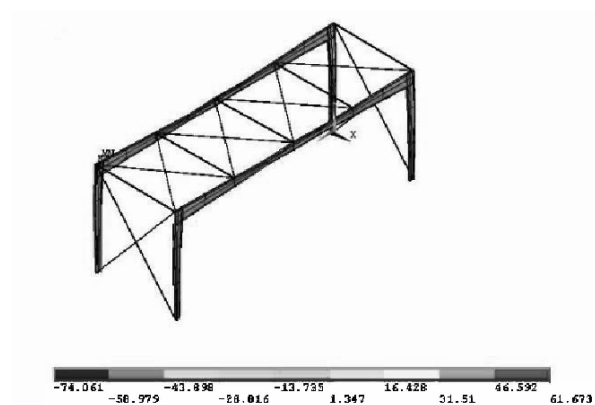


图 3 8 度罕遇时 Von-mises 应力图

Fig. 3 Von-mises stress in 8 degree rare earthquake

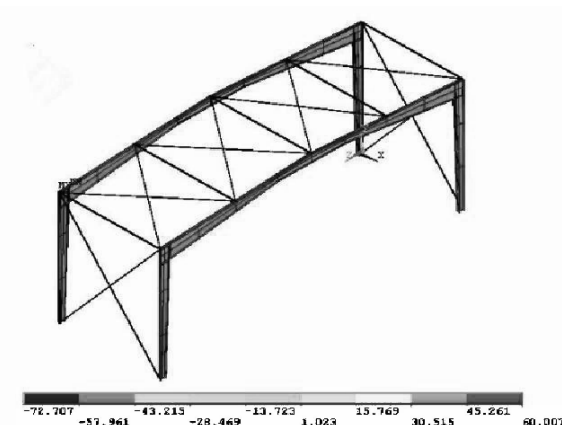


图 4 9 度罕遇时 Von-mises 应力图

Fig. 4 Von-mises stress in 8 degree rare earthquake

### 3.2 不同跨度门式刚架结构在三种不同纵向地震波作用下柱顶位移及侧移角

各跨度门式刚架在纵向地震波作用下的柱顶位移及侧移角见表 5 和图 5。由表 5 可以看出:18 m、24 m、30 m、36 m 跨度的门式刚架结构在各地震波各种工况的纵向地震波作用下,柱顶位移都很小,满足《门式刚架轻型房屋钢结构技术规程》(CECS102:2002)的要求(1/60)。

由图 5 可以看出,无论是 El-Centro 波、Taft 波还是人工波 36 m 跨的柱顶侧移都是最大 30 m 跨次

之,18 m、24 m 跨较上面两跨来说相对较小,可见随着跨度的增大柱顶侧移随着增大。

表 5 柱顶位移/mm 及柱顶侧移角  
Tab. 5 Top of the displacement /mm and the top's lateral angle

跨度	地震波		7 度多遇	8 度多遇	7 度基本	9 度多遇	8 度基本	8 度罕遇	9 度罕遇
18	El-Centro 波	柱顶最大位移/mm	1.308	1.37	1.428	1.496	1.515	1.595	1.794
		柱顶侧移角度	1/527 5	1/503 6	1/483 2	1/461 2	1/455 4	1/432 6	1/384 6
	Taft 波	柱顶最大位移/mm	1.550	1.516	1.711	1.932	2.012	2.584	3.009
		柱顶侧移角度	1/446 2	1/455 1	1/403 3	1/357 1	1/342 9	1/267 0	1/229 3
	人工波	柱顶最大位移/mm	1.289	1.287	1.281	1.285	1.269	1.247	1.298
		柱顶侧移角度	1/535 3	1/536 1	1/538 6	1/537 0	1/543 7	1/553 3	1/531 6
24	El-Centro 波	柱顶最大位移/mm	2.495	2.486	2.498	2.453	2.5	2.412	2.384
		柱顶侧移角度	1/276 6	1/277 6	1/276 2	1/281 3	1/276 0	1/286 1	1/289 4
	Taft 波	柱顶最大位移/mm	2.425	2.391	2.366	2.306	2.227	2.27	2.641
		柱顶侧移角度	1/284 5	1/288 6	1/291 6	1/299 2	1/309 8	1/304 0	1/261 3
	人工波	柱顶最大位移/mm	2.512	2.525	2.532	2.541	2.554	2.595	2.641
		柱顶侧移角度	1/274 7	1/273 3	1/272 5	1/271 5	1/270 2	1/265 9	1/261 3
30	El-Centro 波	柱顶最大位移/mm	3.471	3.457	3.445	3.429	3.407	3.349	3.254
		柱顶侧移角度	1/242 0	1/243 0	1/243 8	1/245 0	1/246 6	1/250 8	1/258 1
	Taft 波	柱顶最大位移/mm	3.386	3.28	3.149	2.979	2.728	2.907	3.574
		柱顶侧移角度	1/248 1	1/256 1	1/266 8	1/282 0	1/307 9	1/289 0	1/235 0
	人工波	柱顶最大位移/mm	3.493	3.402	3.509	3.518	3.533	3.576	3.625
		柱顶侧移角度	1/240 5	1/246 9	1/239 4	1/238 8	1/237 8	1/234 9	1/231 7
36	El-Centro 波	柱顶最大位移/mm	4.052	4.035	4.03	4.021	4.018	4.026	4.024
		柱顶侧移角度	1/207 3	1/208 2	1/208 4	1/208 9	1/209 1	1/208 6	1/208 7
	Taft 波	柱顶最大位移/mm	4.227	4.13	4.109	3.958	3.827	4.148	4.507
		柱顶侧移角度	1/198 7	1/203 4	1/204 4	1/212 2	1/219 5	1/202 5	1/186 4
	人工波	柱顶最大位移/mm	4.083	4.099	4.114	4.136	4.161	4.228	4.322
		柱顶侧移角度	1/205 7	1/204 9	1/204 2	1/203 1	1/201 9	1/198 7	1/194 4

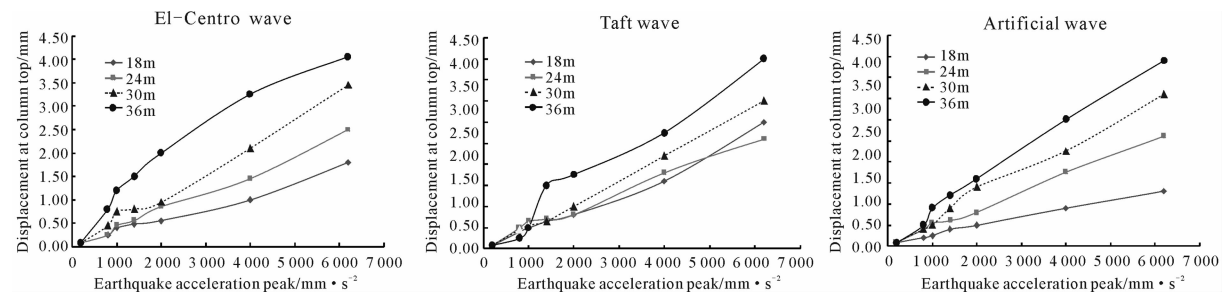


图 5 三种波作用下结构柱顶侧移

Fig. 5 Structural sidesway under three kinds of wave action

4 结 论

通过对《门式刚架轻型房屋钢结构标准图集》(02SG518-1)中 GJ18-1C、GJ24-1C、GJ30-1C、GJ36-1C 的单层单跨门式刚架的纵向地震作用分析,可以得到以下主要结论:

(1)《门式刚架轻型房屋钢结构标准图集》(02SG518-1)中 GJ18-1C、GJ24-1C、GJ30-1C、GJ36-1C 刚架在 El-Centro 波、Taft 波和人工波的分别作用下,从 7 度多遇到 8 度罕遇,从其应力云图可以看出,结构并未发生破坏,而在 9 度罕遇时,结构局部应力达到了钢材的屈服强度,在柱间支撑的支撑上节点域

发生了局部屈曲,结构的刚度逐渐降低,结构发生破坏。

(2)轻型门式刚架结构纵向地震作用下位移较小,即使在罕遇地震阶段,柱顶侧移仍远小于规范要求,表明按现行规程设计的门式刚架完全能满足结构纵向变形要求。

## 参考文献 References

- [1] 申林,胡天兵,蔡益燕. 门式刚架结构抗震分析[J]. 建筑结构, 2002, 32(12): 35-38.  
SHEN Lin, HU Tian-bing, CAI Yi-yan. Anti-seismic Analysis to Gate-type Rigid-framed Structure[J]. Construction Structure, 2002, 32(12): 35-38.
- [2] KARAMANOS S, SPYROS A. Karamanos. Earthquake Effects on Low-Rise Steel Buildings in High Seismicity Areas: a Designer's View[J]. J. Construct, Steel Res. 1997, 44(12): 115-128.
- [3] 林功丁. 门式刚架风荷载与地震作用的探讨[J]. 工业建筑, 2004, 34(9): 28-32.  
LIN Gong-ding. Discussion of Gate-type Rigid-framed Wind Load and Earthquake Action [J]. Industrial Construction, 2004, 34(9): 28-32.
- [4] 02SG518-1 门式刚架轻型房屋钢结构标准图集[M]. 北京:中国计划出版社, 2009: 166.  
02SG518-1 Atlas of Gate-type Rigid-framed Light House Steel-frame Standard[M]. Beijing: China Plan Press, 2009: 166.
- [5] 中国工程建设标准化协会标准. CECS102: 2002 门式刚架轻型房屋钢结构技术规程[S]. 北京:中国计划出版社, 2003.  
Chinese Construction Standardization Association Standard. CECS102: 2002 Technical Regulations of Gate-type Rigid-framed Light House Steel-frame Standard[S]. Beijing: China Plan Press, 2003.
- [6] 王乾. 单层单跨门式刚架轻型钢结构房屋抗震性能振动台试验[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2008.  
WANG Qian. one-story single-span portal frame structure light steel structure housing seismic performance vibration table test[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2008.
- [7] GB 50011-2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑业出版社, 2010.  
GB50011-2010 Code for seismic design of buildings[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2010.

# The longitudinal seismic time history analysis of one-story single-span portal frame structure

RAN Hong-dong, SU Ming-zhou, JIAO Pei-pei

(School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** In order to study the longitudinal seismic behavior of one-story single-span portal frame structure, a finite element analysis of portal frame structure was performed to simulate the overall elasto-plastic time-history process with FEM program ANSYS. The type of portal frame included GJ18-1C, GJ24-1C, GJ30-1C, GJ36-1C, in portal frame light steel structure housing atlas (02SG518-1), respectively. The study reveals that the longitudinal seismic effect of portal frame structure was small, and even at rare earthquake stage, the maximum displacement at the top of column is far less than required by the code, and the portal frame designed according to the current regulations can satisfy vertical deformation requirements.

**Key words:** portal frame; cross braces; longitudinal seismic; seismic performance; time history analysis