

文章编号: 1000-4750(2012)12-0186-10

考虑墙体作用的低层冷弯薄壁型钢 轻型房屋住宅体系弹塑性动力分析

史艳莉^{1,2}, 王文达^{1,2}, 靳 焱²

(1. 兰州理工大学甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室, 甘肃, 兰州 730050; 2. 兰州理工大学土木工程学院, 甘肃, 兰州 730050)

摘 要: 低层冷弯薄壁钢结构住宅体系的抗震性能是进行该类结构推广应用的关键。该文基于 ANSYS 软件建立了该类结构体系的数值模型, 在考虑冷弯薄型钢构件及门窗洞口加强与否、考虑组合墙体作用与否等情况下, 分别进行了设防烈度为 7 度时常遇地震下的静力分析和弹性时程分析和设防烈度分别为 7 度、8 度和 9 度时罕遇地震下的弹塑性时程分析。结果表明: 常遇地震作用时结构弹性层间位移由风荷载控制, 罕遇地震作用下结构弹塑性层间侧移则由地震作用控制; 是否考虑组合墙体及墙面板材料特性对结构承载力、变形及抗震性能影响显著。在设防烈度分别为 7 度、8 度和 9 度时的罕遇地震作用下, 考虑组合墙体时结构最大弹塑性层间位移角可满足现行抗震规范(GB50011-2010)要求, 双面 OSB 墙面板且角柱进行加强时抗震性能最好。该文结果可为进一步进行此类结构体系的抗震性能研究及应用提供参考。

关键词: 冷弯薄壁型钢; 低层轻钢结构; 数值模拟; 抗震性能; 弹性时程分析; 弹塑性动力时程分析

中图分类号: TU392.5

文献标志码: A

doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2011.05.0261

ELASTIC-PLASTIC DYNAMIC ANALYSIS OF COLD-FORMED THIN-WALLED STEEL FRAMING SYSTEM OF LOW-RISE RESIDENTIAL BUILDINGS WITH COMPOSITE WALL

SHI Yan-li^{1,2}, WANG Wen-da^{1,2}, JIN Yao²

(1. Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China;

2. College of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China)

Abstract: The seismic behavior of the cold-formed thin-walled steel framing system of low-rise residential buildings is essential for their wide application. A numerical model was developed to simulate the performance of this type of structures using ANSYS. The steel members and the holes at doors or windows with or without the stiffened ribs, and the frames with or without composite walls were considered. Static and elastic dynamic time history analysis were performed under frequent earthquake based on the design earthquake intensity 7, and elastic-plastic dynamic time history analysis was performed under rare earthquake based on the design earthquake intensity 7, 8 and 9, respectively. It is shown that the elastic story-drift of the structure was determined by the wind loads mainly under the loading combination with frequent earthquake action, and the elastic-plastic story-drift was determined by the loading combination with rare earthquake action. There are significant difference in the bearing capacity, deformation and seismic performance of the structural system with or without the composite walls. The maximum elastic-plastic story-drift of the structures was satisfied with the requirement of the current design code under rare earthquake in general. The type of structural system with OSB composite

收稿日期: 2011-05-01; 修改日期: 2011-08-01

基金项目: 甘肃省高等学校基本科研业务费项目(0904ZTB147); 兰州理工大学科技发展基金项目(201002)

通讯作者: 王文达(1976), 男, 甘肃天水人, 教授, 博士, 从事钢-混凝土组合结构、混合结构和钢结构研究(E-mail: cewangwd@gmail.com).

作者简介: 史艳莉(1977), 女, 河北涿州人, 副教授, 硕士, 从事钢结构和钢-混凝土组合结构研究(E-mail: ceshiyl@163.com);

靳 焱(1984), 男, 甘肃天水人, 工程师, 硕士, 从事钢结构研究与设计(E-mail: cejiny@gmail.com).

wall and stiffened corner columns exhibited excellent seismic behavior. This paper provides reference to further research on seismic performance and practice of this type structures.

Key words: cold-formed thin-walled steel; low-rise light-weight steel structure; numerical simulation; seismic performance; elastic dynamic time history analysis; elastic-plastic dynamic time history analysis

随着国家经济的发展和钢结构住宅产业化的推进,低层冷弯薄壁钢结构房屋体系在国内的应用和研究越来越多^[1]。相比之下,国外尤其北美地区对此类结构体系的研究和应用比较成熟,相关的设计规程和指南也较多,文献[2-4]中均给出了此类结构体系的设计方法,美国钢铁协会在2001年起颁布了《北美冷弯薄壁型钢结构及构件设计规程》,并在2007年颁布了新版本^[5],适用于美国、加拿大和墨西哥。除了设计标准同时还有许多相关的研究成果,如 Hancock 等(2001)^[6]、Yu 等(2010)^[7]、Zhao 等(2005)^[8],这些成果为低层冷弯薄壁型钢结构房屋体系的发展和运用起了推动作用。我国的《冷弯薄壁型钢结构技术规范》^[9]给出了冷弯型钢构件的设计方法,但对此类结构体系的设计并没有具体规定。近年来国内标准如《低层轻型钢结构装配式住宅技术要求》^[10]和《低层冷弯薄壁型钢房屋建筑技术规程》^[11]的颁布必将有力促进这一发展,但总体上国内设计规范对该类体系的设计内容的规定还不系统,尤其对于此类体系的抗震性能的相关规定还缺少详细条文。国内研究者对此类体系的抗震性能进行了相关研究,如刘晶波等(2008)^[12]进行了低层冷弯薄壁型钢结构住宅整体性能分析;刘飞等(2009)^[13]较系统地归纳和综述了低层冷弯薄壁型钢龙骨式住宅结构抗震性能研究进展;史艳莉等(2011)^[14]建立了冷弯薄壁型钢房屋体系整体分析的有限元模型,并进行了弹塑性动力时程分析,模型中只考虑了冷弯薄壁型钢构件的作用;黄智光等(2011)^[15]完成了一个三层足尺模型的振动台试验,结果表明结构在振动过程中表现为局部破坏,墙体骨架基本完好,同时还发现该房屋体系抗侧力的关键在于墙板的蒙皮作用和抗拔件的抗倾覆作用。基于此,有关研究者对冷弯薄壁型钢结构体系中组合墙体的性能进行了研究,如周绪红等(2010)^[16]进行了冷弯薄壁型钢组合墙体抗剪性能的单调加载和往复加载试验研究,对墙面板材料对组合墙体性能的影响进行了深入研究;史艳莉等(2009)^[17]则考虑了门窗开洞时对冷弯薄壁型钢组合墙体的力学性能进行了理论分析。

本文通过建立考虑组合墙体作用的冷弯薄壁型钢低层房屋体系的有限元模型,分别进行了弹性及弹塑性时程分析,对比了是否考虑墙面板材料对整体结构抗震性能的影响,有关结果可为进行此类结构体系的抗震性能进一步研究及应用提供参考。

1 结构模型的建立

1.1 几何模型

建立两层冷弯薄壁型钢结构住宅的三维模型进行弹塑性动力时程分析。基本构造参考现行规范^[10-11]结构模型长12m、宽7.2m、层高均为3.6m、屋面坡度为1:3。梁柱间距600mm,外墙龙骨采用C140mm×41.3mm×12.7mm×0.9mm,外墙角柱采用3根C140mm×41.3mm×12.7mm×0.9mm的组合截面,内墙龙骨采用C89mm×41.3mm×12.7mm×0.9mm,内墙角柱采用3根C89mm×41.3mm×12.7mm×0.9mm,一层顶梁采用C305mm×41.3mm×12.7mm×1.44mm,所有屋架上弦杆和下弦杆、檩条均采用单根C89mm×41.3mm×12.7mm×0.9mm。有关模型的其他细节可参考靳焱(2010)^[18]。楼板采用18mm厚OSB结构板,屋面板采用12mm厚OSB结构板,其材料特性如下:弹性模量5250N/mm²,剪切模量1180N/mm²,抗弯强度21.2N/mm²,抗剪强度8.2N/mm²,泊松比0.3。墙面板材为双面石膏板或OSB板,其中钢材、双面石膏板及墙面OSB板的材料特性见表1(周绪红等(2010)^[16])。

表1 材料特性表

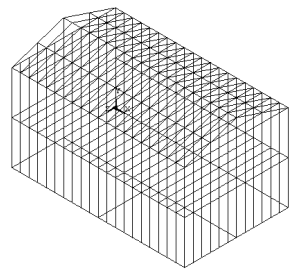
Table 1 The properties of materials

材料	弹性模量/(N/mm ²)	材料强度/(N/mm ²)	泊松比
钢材	2.06×10 ⁵	210	0.30
双面石膏墙板	1124.7	0.66	0.23
双面OSB墙板	3500	7.86	0.30

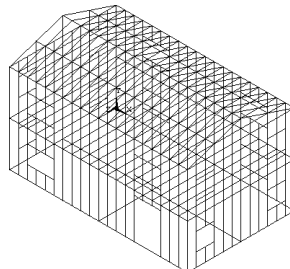
《低层轻型钢结构装备住宅技术要求》^[10]规定墙体开洞尺寸当洞口所在的墙为承重墙时洞口宽度不超过2m,为非承重墙时不超过3m。本文模型的门洞宽度分别为1.8m和1.2m,满足要求。屋架上弦杆下布置短立柱,立柱间隔1.2m。屋架上弦沿着建筑物长度方向设一道贯通檩条。

1.2 有限元模型

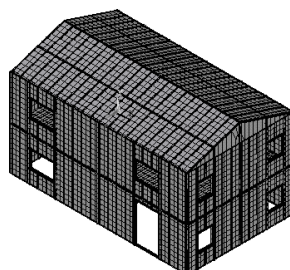
用 ANSYS 软件建立冷弯薄壁型钢结构住宅体系的弹塑性时程分析模型。用 Beam188 梁单元模拟轻钢骨架,采用 Shell181 单元来模拟屋、楼面板材。墙体龙骨柱上、下两端的连接采用铰接形式。外墙角柱构造连接采用刚接;除外墙的角柱外,其余角柱其两端连接方式均采用铰接形式。假定楼板仅作为传力构件而非受力构件考虑,计算中通过设置较小的楼板厚度和较低的楼板刚度实现该计算假定。在进行弹塑性时程分析时,建立了 4 种模型进行计算,其中模型 1 角柱无加强,不考虑墙体开洞和墙体影响;模型 2 考虑角柱加强和墙体开洞,不考虑墙体贡献;模型 3 和模型 4 考虑角柱加强、墙体开洞和墙体贡献,但所用墙体材料不同,模型 3 采用双面石膏板,模型 4 为双面 OSB 板。4 种不同构造的结构的有限元模型分别如图 1 所示。



(a) 模型 1



(b) 模型 2



(c) 模型 3、模型 4

图 1 4 种不同构造结构的有限元模型

Fig.1 The finite element model of four different structural systems

2 模态及静力分析

2.1 模态分析

对所有模型进行了模态分析,得到结构前 5 阶振型和自振周期汇总于表 2。

表 2 结构自振周期 /s
Table 2 The natural period of the structures

阶数	模型 1	模型 2	模型 3	模型 4
1	0.3154	0.2397	0.2267	0.2241
2	0.3151	0.2396	0.2265	0.2238
3	0.3151	0.2396	0.2264	0.2237
4	0.3150	0.2396	0.2263	0.2236
5	0.3150	0.2395	0.2263	0.2236

由表 2 可见:

1) 比较结构的自振周期,模型 4<模型 3<模型 2<模型 1,模型 4 的整体刚度最大,模型 1 最小,可见模型 3 和模型 4 考虑了墙面板的贡献,墙面板对龙骨进行了加强,结构整体刚度有所提高。

2) 模型 1 角柱采用单根 C 型钢,结构整体刚度不足,发生较大变形,周期增加。模型 2 角柱采用加强,虽然进行了局部开洞,但开洞处柱均进行了加强,所以其整体抗侧刚度大于模型 1。

3) 双面 OSB 板其各项指标均优于双面石膏板,其对整体结构的约束能力也较双面石膏板强。故模型 4 刚度大于模型 3 的刚度。

2.2 静力分析

按承载能力极限状态下各种荷载组合进行 4 种模型的静力分析,以比较 4 种模型承载能力的差别。计算时荷载取值按照现行荷载规范,场地类别为类,基本风压 0.45kN/m^2 ,地震作用按 7 度多遇地震(加速度为 $0.035g$)考虑。考虑三种荷载效应组合,其中工况 S1 仅考虑静力荷载、S2 为静力荷载和风荷载组合、S3 为静力荷载和水平方向地震作用组合。文中水平方向为 x 方向、 z 方向。

2.3 承载力对比

对 4 种模型进行了承载能力极限状态下各种荷载组合的内力分析,典型构件最大内力(轴向压力)的计算结果见表 3。从表 3 可知模型 4(双面 OSB 板)各杆件内力较其他模型更安全,显然墙面板的贡献是模型 4 的杆件内力最小,而模型 1(角柱不加强)各杆件内力最不利,在 S2(z -方向风荷载荷载)组合下,内墙角柱和内墙龙骨内力均超过了承载力设计值。

表 3 典型构件最大内力比较

Table 3 Comparison with the maximum axial force of typical members

构件 模型	外墙角柱/kN				外墙龙骨柱/kN				内墙角柱/kN				内墙龙骨柱/kN			
	模型 1	模型 2	模型 3	模型 4	模型 1	模型 2	模型 3	模型 4	模型 1	模型 2	模型 3	模型 4	模型 1	模型 2	模型 3	模型 4
S1	-16.58	-10.18	-8.84	-7.56	-16.58	-9.63	-7.83	-6.93	-10.98	-8.55	-6.81	-5.77	-10.98	-7.48	-5.80	-6.67
S2(x+风)	-26.79	-20.37	-19.86	-19.37	-26.79	-19.98	-18.32	-17.27	-19.79	-19.22	-18.09	-15.19	-19.79	-18.86	-17.15	-13.11
S2(x-风)	-25.44	-17.77	-19.32	-19.65	-25.44	-15.62	-14.81	-17.15	-18.33	-17.93	-16.47	-15.05	-18.33	-16.61	-14.42	-12.95
S2(z+风)	-26.03	-19.33	-18.49	-13.38	-25.67	-15.79	-14.35	-10.37	-19.87	-14.66	-10.21	-13.69	-19.87	-14.35	-11.34	-10.69
S2(z-风)	-27.31	-19.98	-18.74	-13.67	-27.31	-19.47	-18.53	-10.39	-20.16	-16.78	-14.39	-15.22	-20.16	-14.32	-10.25	-13.40
S3(x地震)	-22.43	-18.34	-16.52	-13.21	-23.56	-17.99	-15.74	-11.43	-19.32	-17.38	-14.67	-13.66	-19.09	-18.12	-14.33	-13.19
S3(z地震)	-23.11	-19.04	-15.97	-13.09	-24.37	-18.72	-16.01	-11.29	-19.48	-18.11	-15.12	-13.38	-19.66	-18.67	-15.49	-12.95
承载力 设计值	-30	-90	-90	-90	-30	-30	-30	-30	-20	-60	-60	-60	-20	-20	-20	-20

通过 4 种模型内力分析比较可以看出：

- 1) 角柱采用单根 C 型钢是不合理的，必须采用组合截面形式，以提高其承载能力。
- 2) 模型 2 虽然墙体开洞，但在开洞处，柱体进行了加强，其承载能力较模型 1 有所提高。
- 3) 墙面板在一定程度上能够提高柱的承载能力，但提高幅度有限。模型 4(双面 OSB 板)较模型 3(双面石膏板)各杆件内力数值更小。

2.4 最大位移比较

同样进行上述 3 种荷载组合工况下四种模型结构的最大位移进行分析和对比。《低层冷弯薄壁型钢房屋建筑技术规程》^[11]中规定水平风荷载作用

下，墙体立柱垂直于墙面的横向弯曲变形与立柱长度之比不得大于 1/250。表 4 给出了 4 种模型在 3 种荷载组合下结构的最大位移值。荷载组合 S3 由于没有考虑竖向地震作用，所以结构 y 方向的计算结果与其它荷载组合的结果相比可以忽略不计。模型 1 水平最大位移发生在荷载组合 S2 下(z-方向风荷载)。该模型弹性层间位移角为 $\Delta/L=12.72/3600=1/283<[\Delta/L]=1/250$ ，基本满足要求；模型 2 最大侧移出现在荷载组合 S2(z-方向风荷载)时，最大侧移 7.86mm，其弹性层间位移角为 $\Delta/L=7.86/3600=1/458<[\Delta/L]=1/250$ ，满足要求。模型 3 和模型 4 的弹性层间位移也满足要求。

表 4 最大侧移对比

Table 4 Comparison with the maximum drift

工况组合	模型 1			模型 2			模型 3			模型 4		
	UX/mm	UY/mm	UZ/mm	UX/mm	UY/mm	UZ/mm	UX/mm	UY/mm	UZ/mm	UX/mm	UY/mm	UZ/mm
S1	1.31	-15.81	-1.49	0.96	-13.74	-0.99	0.29	-12.87	-0.42	0.24	-6.36	-0.23
S2(x+风)	2.47	-6.74	-2.58	1.65	-5.62	-1.74	1.22	-3.10	-1.58	1.10	-2.28	-0.74
S2(x-风)	-1.52	-4.98	0.54	-0.83	-3.78	0.41	-0.94	-1.38	0.54	-0.85	-2.37	0.73
S2(z+风)	1.17	-7.53	-9.47	0.77	-5.49	-7.86	0.39	-5.59	-5.38	0.32	-4.85	-0.30
S2(z-风)	-1.23	-7.86	12.72	-0.79	-5.81	7.64	-0.38	-5.61	5.98	-0.31	-4.91	3.37
S3(x地震)	0.99	-	-4.32	0.72	-	-2.12	0.32	-	-1.63	0.28	-	-1.18
S3(z地震)	-0.83	-	3.79	-0.67	-	1.56	-0.31	-	1.12	-0.17	-	1.27

比较 4 种模型的侧移，可见：

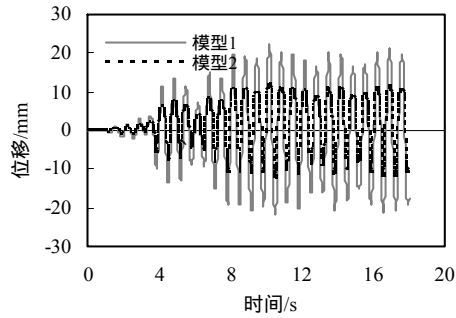
- 1) 模型 1 侧移最大，模型 4 最小。模型 1>模型 2>模型 3>模型 4，模型 1 和模型 2 均未考虑墙体，但后者角柱进行了加强，在一定程度上约束了结构发生过大侧移，可见在开洞处采用加强截面柱和墙体采用墙面板均可有效减小结构侧移。
- 2) 模型 3、模型 4 均考虑了墙面板作用，可见墙面板对结构不仅只起到围护作用，而且为钢立柱提供了侧向支撑，对结构整体刚度有贡献，减小了结构侧移。模型 3 侧移大于模型 4，表明双面 OSB 板比双面石膏板对结构整体刚度贡献更大。

3 常遇地震作用下结构反应

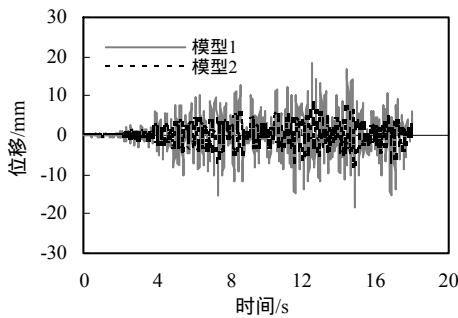
3.1 结构位移的比较

对前述 4 种模型进行了 7 度常遇地震作用下(PGA=0.035g)的动力时程分析，计算时输入了典型的地震波。图 2 所示为四种结构模型在 TAFT 地震波作用下的位移时程曲线比较，其余地震波输入后的总体规律类似。从图 2(a)和图 2(b)可见，模型 2 对角柱加强后的结构位移比模型 1 均有所减小，角柱加强后结构抵抗变形的能力增强，可见角柱加强有利于结构的抗震性能。从图 2(c)和图 2(d)可见墙面板采用双面 OSB 板时的模型 4 的变形小于采用

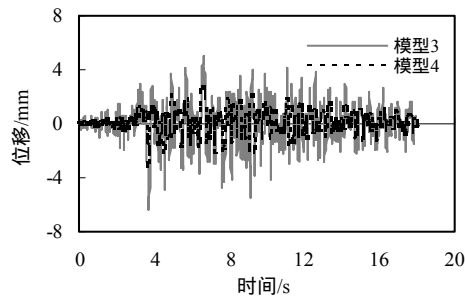
双面石膏板的模型 2, 可见墙面材料对该体系的抗震性能有明显影响, 这与黄智光等(2011)^[15]完成足尺振动台试验结果一致。表 5 列出了 4 种模型在 TAFT 波(0.035g)作用下结构最大顶点位移, 综合比较可见模型 4 的顶点位移最小, 其抗震性能最优, 实际工程中可优先考虑采用这种结构形式。



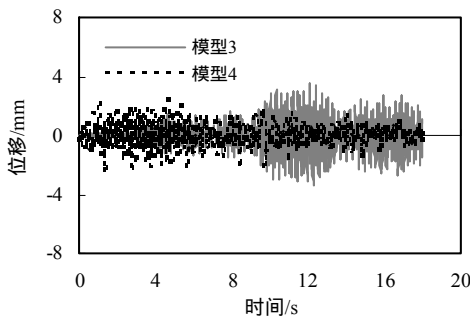
(a) 模型 1、模型 2(x 方向)



(b) 模型 1、模型 2(z 方向)



(c) 模型 3、模型 4(x 方向)



(d) 模型 3、模型 4(z 方向)

图 2 TAFT 波作用下位移时程曲线对比(PGA=0.035g)

Fig.2 Comparison of displacement time history curves under TAFT earthquake wave (PGA=0.035g)

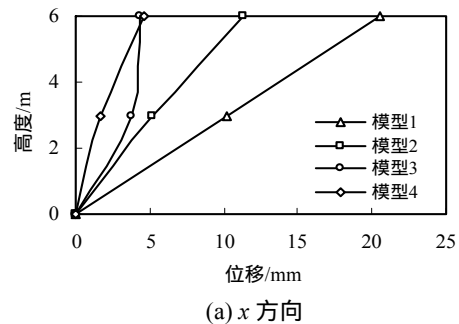
表 5 结构顶点最大位移对比

Table 5 Comparison with the maximum drift of the structures

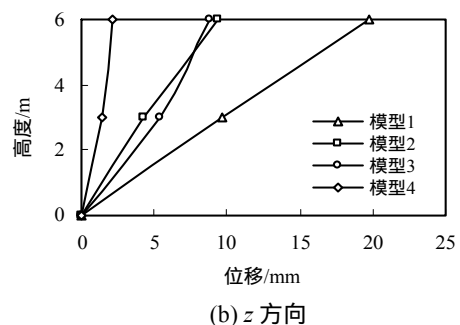
地震波	加速度峰值/g	方向	模型 1/ mm	模型 2/ mm	模型 3/ mm	模型 4/ mm
TAFT 波	0.035	x	22.01	12.37	6.31	3.19
		z	18.26	8.42	3.49	2.57

3.2 结构层间位移

图 3 所示为 4 种结构模型在 7 度常遇地震作用下(PGA=0.035g)输入 TAFT 地震波的最大层间位移比较。由于《低层冷弯薄壁型钢房屋建筑技术规范》^[11]中对考虑抗震时的侧移限值并未给出, 暂依据《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)^[19]中对于多高层钢结构弹性层间位移限值对本文低层轻钢房屋结构体系的弹性层间位移进行判别。可见模型 1~模型 4 在 7 度多遇(0.035g)下的最大弹性层间位移角分别为 1/152、1/263、1/345 和 1/667。可见模型 1 不符合抗震规范关于多高层钢结构楼层内最大弹性层间位移角应小于 1/250 的规定, 模型 2 的弹性层间位移角也很接近于限值。模型 3 和模型 4 均满足规范的要求。因此模型 1 和模型 2 变形较大, 不适宜在工程实践中应用。



(a) x 方向



(b) z 方向

图 3 TAFT 波作用下层间位移对比(PGA=0.035g)

Fig.3 Comparison of story-drift curves under TAFT earthquake wave (PGA=0.035g)

3.3 结构加速度反应

图 4 所示为 4 种模型在 TAFT 波(0.035g)作用下的加速度放大系数, 即输出加速度与输入加速度之比。可见, 对于绝大多数工况而言, 随着高度的增加,

加速度反应呈增大趋势。同一测点 z 方向的加速度反应大于 x 方向,这与结构在 z 方向的刚度较弱有关。

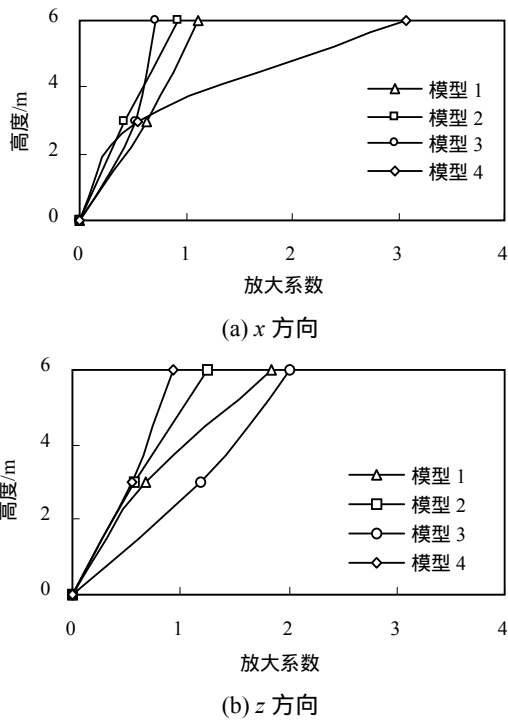


图 4 TAFT 波作用下结构加速度放大系数(PGA=0.035g)
Fig.4 Comparison of magnification coefficient of acceleration of structures under TAFT earthquake wave (PGA=0.035g)

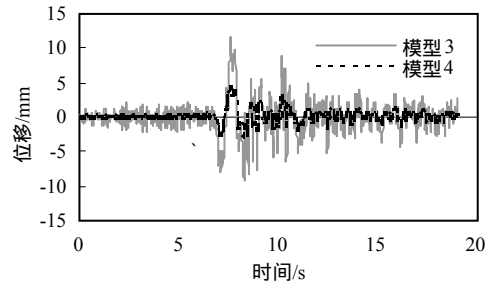
4 罕遇地震作用下结构反应

为对比不同模型在罕遇地震作用下结构的反应,选取了天津波及 TAFT 波分别进行了 7 度、8 度和 9 度罕遇地震下的动力时程分析,其对应的加速度峰值分别为 0.22g、0.40g 和 0.62g。分析时取结构顶点为观测点。由前述弹性分析可知,不考虑墙体时的模型 1 和模型 2 的弹性层间位移不能满足规范要求,故仅对模型 3 和模型 4 进行罕遇地震下的弹塑性分析。

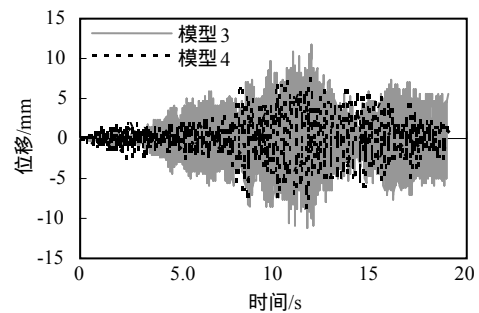
4.1 结构顶点位移反应

图 5~图 7 为墙面板分别采用双面石膏板及双面 OSB 板时的结构模型 3 和模型 4 分别在 7 度、8 度和 9 度罕遇地震作用下的位移时程曲线,输入地震波选择了天津波和 TAFT 波。可见随着地震加速度的增加,模型顶点位移也随着增大。相同地震加速度下,天津波的位移反应比 TAFT 波作用下的位移反应更为剧烈,同时模型 3 的位移反应也比模型 4 剧烈,总体上模型 4 的位移反应小于模型 3 的位移。表明在罕遇地震作用下维护墙体材料对结构的变

形影响明显。同时反映出,在 TAFT 波作用下,模型 4 在 z 方向的位移时程反应比模型减小很多。两个模型在 7 度、8 度和 9 度罕遇地震作用下的结构模型顶点最大位移汇总于表 6。

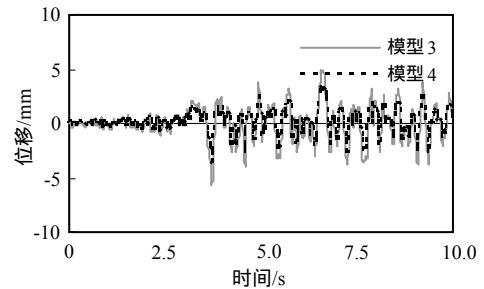


(a) x 方向

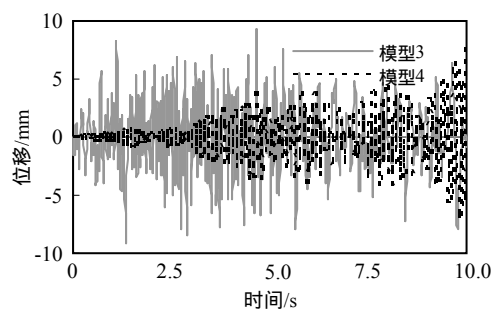


(b) z 方向

(1) 天津波



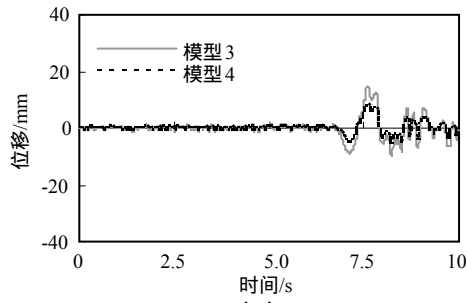
(a) x 方向



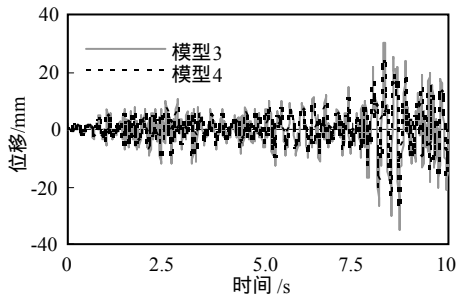
(b) z 方向

(2) TAFT 波

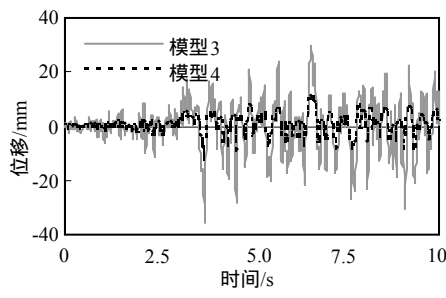
图 5 7 度罕遇地震下结构位移时程曲线(PGA=0.22g)
Fig.5 Comparison of the displacement time history curves of structures under 7 degree rare earthquake (PGA=0.22g)



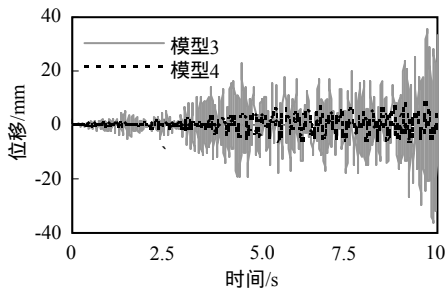
(a) x 方向



(b) z 方向
(1) 天津波



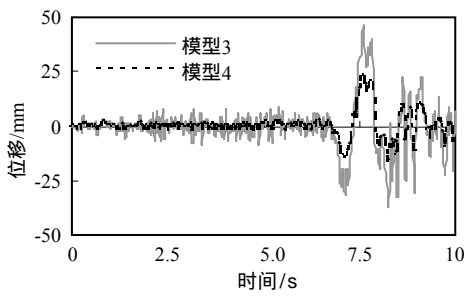
(a) x 方向



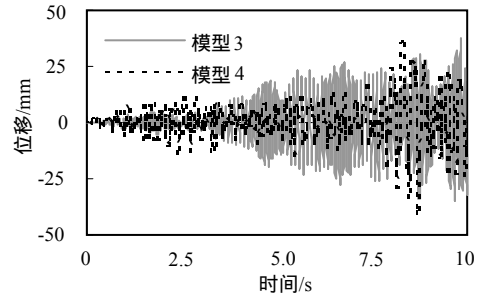
(b) z 方向
(2) TAFT 波

图 6 8 度罕遇地震下结构位移时程曲线(PGA=0.4g)

Fig.6 Comparison of the displacement time history curves of structures under 8 degree rare earthquake (PGA=0.4g)

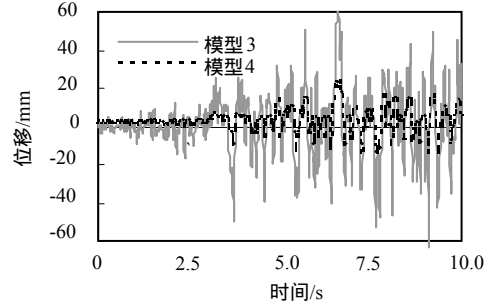


(a) x 方向

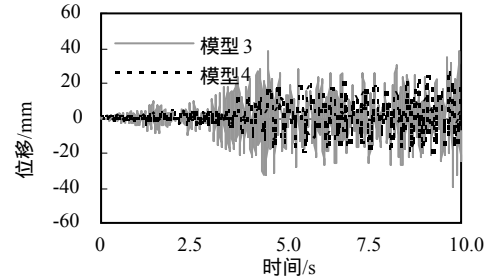


(b) z 方向

(1) 天津波



(a) x 方向



(b) z 方向

(2) TAFT 波

图 7 9 度罕遇地震下结构位移时程曲线(PGA=0.62g)

Fig.7 Comparison of the displacement time history curves of structures under 9 degree rare earthquake (PGA=0.62g)

表 6 结构顶点最大位移

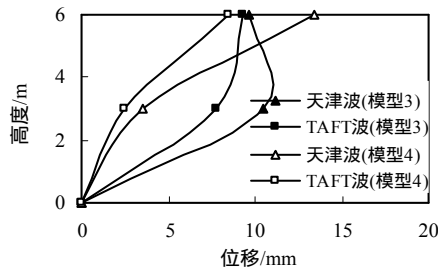
Table 6 Comparison with the maximum drift of the structures

地震波	峰值加速度	方向	模型 3	模型 4
天津波	0.22g	x	11.54	4.52
		z	11.75	-8.97
	0.4g	x	14.89	8.27
		z	-34.98	-26.91
0.62g	x	46.18	23.53	
	z	37.86	-26.91	
TAFT 波	0.22g	x	-10.57	-3.83
		z	9.24	7.88
	0.4g	x	-35.95	-12.82
		z	-35.37	9.01
	0.62g	x	-66.63	23.29
		z	-53.05	27.04

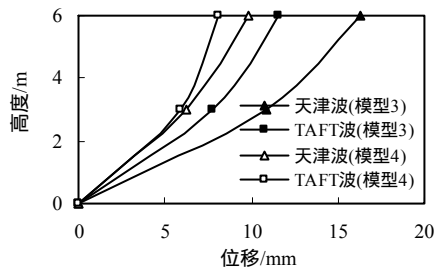
4.2 结构弹塑性层间位移

图 8 所示为模型 3 和模型 4 分别在 7 度、8 度、

9 度罕遇地震作用下结构最大弹塑性层间位移,表7 汇总了相应的最大弹塑性层间位移角。

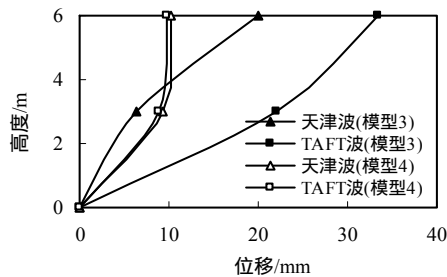


(a) x 方向

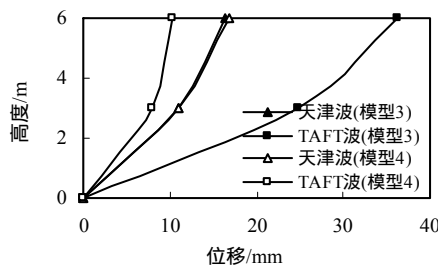


(b) z 方向

(1) 7 度罕遇(PGA=0.22g)

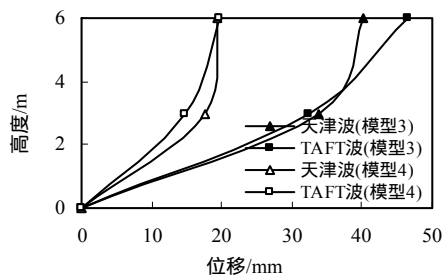


(a) x 方向

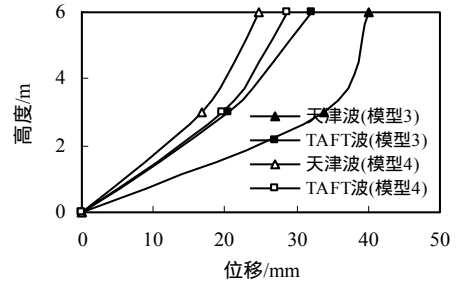


(b) z 方向

(2) 8 度罕遇(PGA=0.4g)



(a) x 方向



(b) z 方向

(3) 9 度罕遇(PGA=0.62g)

图 8 罕遇地震作用下结构弹塑性层间位移

Fig.8 Comparison with the elastic-plastic story-drift of the structures under rare earthquakes

表 7 结构最大弹塑性层间位移角

Table 7 Comparison with the maximum elastic-plastic story-drift of the structures

地震波	峰值加速度	方向	模型 3		模型 4	
			一层	二层	一层	二层
天津波	0.22g	x	0.0034	0.0032	0.0012	0.0045
		z	0.0036	0.0054	0.0021	0.0033
	0.4g	x	0.0021	0.0066	0.0031	0.0034
		z	0.0036	0.0054	0.0036	0.0056
0.62g	x	0.011	0.013	0.0059	0.0064	
	z	0.011	0.013	0.0056	0.0082	
TAFT 波	0.22g	x	0.0026	0.0031	0.0008	0.0028
		z	0.0026	0.0038	0.0019	0.0027
	0.4g	x	0.0074	0.0112	0.0029	0.0033
		z	0.0083	0.0121	0.0026	0.0034
	0.62g	x	0.011	0.016	0.0049	0.0065
		z	0.0068	0.011	0.0066	0.0095

从表 7 及图 8 可见：

1) 绝大多数工况下随着高度的增加,位移反应呈增大趋势,且模型结构以剪切变形为主。

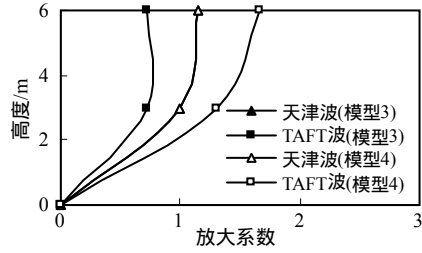
2) 随烈度的增大结构的位移反应也随之增大,且 z 方向的位移增大幅度明显大于 x 方向。

3) 模型最大弹塑性层间位移角,符合《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)^[19]中对于多高层钢结构弹塑性层间位移限值 1/50 的规定,表明模型 3 和模型 4 满足现行抗震规范要求,也说明考虑墙面板的作用时低层冷弯薄壁型钢结构住宅具有良好的抗震性能。

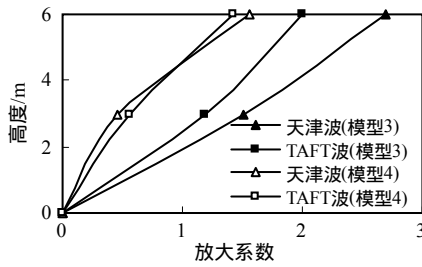
4.3 结构加速度反应

图 9 给出了模型 3 和模型 4 分别在 7 度、8 度及 9 度罕遇地震作用下,结构在双向地震波作用下的最大加速度放大系数变化曲线。可见:绝大多数工况下随着高度的增加,加速度反应呈增大趋势,同一测点 z 方向的加速度反应大于 x 方向,且天津

波的表现尤为明显，这与结构在 z 方向的刚度较弱有关。

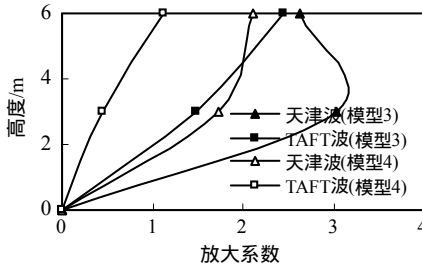


(a) x 方向

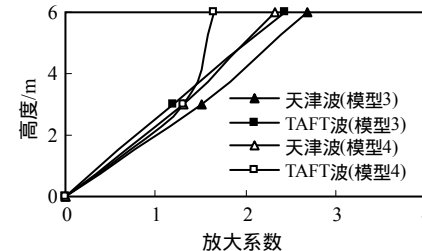


(b) z 方向

(1) 7 度罕遇(PGA=0.22g)

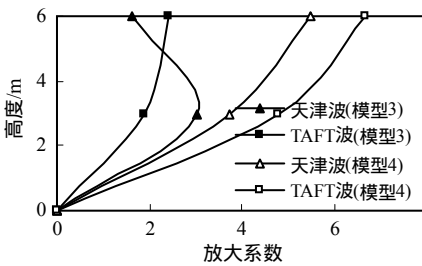


(a) x 方向

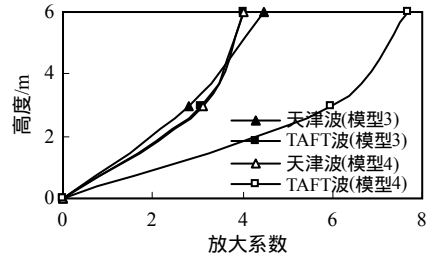


(b) z 方向

(2) 8 度罕遇(PGA=0.4g)



(a) x 方向



(b) z 方向

(3) 9 度罕遇(PGA=0.62g)

图 9 罕遇地震作用下结构加速度放大系数

Fig.9 Comparison of magnification coefficient of acceleration of structures under rare earthquakes

5 结论

本文进行了是否考虑墙面板贡献的低层冷弯薄壁型钢结构房屋体系的静力分析、弹性及弹塑性时程分析，基于本文分析，可得到以下结论：

(1) 静力分析结果表明，冷弯薄壁型钢低层轻钢房屋体系角柱构件受力较大，应加强处理；开洞位置处不加强处理时结构变形较大；考虑墙面板作用时，构件承担的内力会有效地减小。

(2) 弹性时程分析表明，当不考虑墙面板承载时，即使采用了角柱加强等构造，地震作用下结构弹性层间位移可能接近限值，因此实际工程中应考虑采用合理的墙面板并考虑其承载力贡献。

(3) 静力分析、弹性及弹塑性时程分析表明，墙面板材料会影响结构的承载力和变形性能，相比之下，在设防烈度分别为 7 度、8 度和 9 度时的罕遇地震作用下，模型最大弹塑性层间位移角可满足现行抗震规范要求，墙面板为双面 OSB 板且角柱进行加强的模型其力学性能和抗震性能最好。

参考文献：

[1] 周绪红, 石宇, 周天华, 等. 低层冷弯薄壁型钢结构住宅体系[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(2): 1-14. Zhou Xuhong, Shi Yu, Zhou Tianhua, et al. Cold-formed steel framing system of low-rise residential buildings [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(2): 1-14. (in Chinese)

[2] North American Steel Framing Alliance (NASFA). Prescriptive method for residential cold-formed steel framing [S]. Washington, DC: North American Steel Framing Alliance, 2000.

[3] Partnership for Advanced Technology in Housing (PATH). Residential structural design guide: A state-of-the-art review and application of engineering information for light-frame homes, apartments, and town houses

- (2000 Ed) [S]. Washington, DC: U.S. Department of Housing and Urban Development Office of Policy Development and Research, 2000.
- [4] Partnership for Advanced Technology in Housing (PATH). Prescriptive method for connecting cold-formed steel framing to insulating concrete form walls in residential construction [S]. Washington, DC: U.S. Department of Housing and Urban Development Office of Policy Development and Research, 2003.
- [5] American Iron and Steel Institute (AISI). North American specification for the design of cold-formed steel structural members [S]. Washington, DC: American Iron and Steel Institute, 2007.
- [6] Hancock Gregory J, Murray Thomas M, Ellifritt Duane S. Cold-formed steel structures to the AISI specification [M]. New York & Basel: Marcel Dekker Inc., 2001: 375 391.
- [7] Yu Weiwen, LaBoube Roger A. Cold-formed steel design [M]. 4th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2010: 47 95.
- [8] Zhao Xiaoling, Wilkinson Tim, Hancock Gregory J. Cold-formed tubular members and connections-structural behaviour and design [M]. London: Elsevier Science Publisher, 2005: 35 116.
- [9] GB50018-2002, 冷弯薄壁型钢结构技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2002.
GB50018-2002, Technical code of cold-formed thin-walled steel structures [S]. Beijing: China Planning Press, 2002. (in Chinese)
- [10] JG/T182-2005, 低层轻型钢结构装配式住宅技术要求 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
JG/T182-2005, Technical requirements for low-rise assembled residential buildings with lightweight steel framing [S]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2005. (in Chinese)
- [11] JGJ227-2011, 低层冷弯薄壁型钢房屋建筑技术规程 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
JGJ227-2011, Technical specification for low-rise cold-formed thin-walled steel buildings [S]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2011. (in Chinese)
- [12] 刘晶波, 陈鸣, 刘祥庆, 等. 低层冷弯薄壁型钢结构住宅整体性能分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2008, 25(4): 6 12.
Liu Jingbo, Chen Ming, Liu Xiangqing, et al. Integral behavior analysis of cold-formed thin-walled steel framing system of low-rise residential buildings [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2008, 25(4): 6 12. (in Chinese)
- [13] 刘飞, 李元齐, 沈祖炎. 低层冷弯薄壁型钢龙骨式住宅结构抗震性能研究进展[J]. 结构工程师, 2009, 25(4): 138 144.
Liu Fei, Li Yuanqi, Shen Zuyan. Research advances on seismic behavior of low-rise cold-formed thin-walled light-gauge steel residential structures [J]. Structural Engineers, 2009, 25(4): 138 144. (in Chinese)
- [14] 史艳莉, 靳焱, 王文达, 张鹏鹏. 低层冷弯薄壁型钢结构住宅体系抗震性能研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2011, 33(5): 13 20.
Shi Yanli, Jin Yao, Wang Wenda, Zhang Pengpeng. Research on seismic behavior of cold-formed thin-walled steel framing system of low-rise residential buildings [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2011, 33(5): 13 20. (in Chinese)
- [15] 黄智光, 苏明周, 何保康, 等. 冷弯薄壁型钢三层房屋振动台试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(2): 72 81.
Huang Zhiguang, Su Mingzhou, He Baokang, et al. Shaking table test on seismic behaviors of three-story cold-formed thin-walled steel residential buildings [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(2): 72 81. (in Chinese)
- [16] 周绪红, 石宇, 周天华, 于正宁. 冷弯薄壁型钢组合墙体抗剪性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(5): 38 44.
Zhou Xuhong, Shi Yu, Zhou Tianhua, Yu Zhengning. Experimental study of the shear resistance of cold-formed steel stud walls [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(5): 38 44. (in Chinese)
- [17] 史艳莉, 靳焱, 王文达. 开洞对冷弯型钢组合墙体力学性能的影响分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(增刊 2): 121 124.
Shi Yanli, Jin Yao, Wang Wenda. Analysis on mechanical performance of cold-formed steel stud composite walls with holes [J]. Journal of Harbin Institute University, 2009, 41(Sup2): 121 124. (in Chinese)
- [18] 靳焱. 低层冷弯薄壁型钢结构体系力学性能研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2010.
Jin Yao. Research on mechanical performance of cold-formed steel framing system of low-rise residential buildings [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2010. (in Chinese)
- [19] GB50011-2010, 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
GB50011-2010, Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2010. (in Chinese)