

钢筋混凝土框架结构教学综合楼在地震作用下的响应分析

申 涛

西南林业大学土木工程学院, 云南 昆明

收稿日期: 2026年6月28日; 录用日期: 2026年7月20日; 发布日期: 2026年7月30日

摘 要

本文以某教学综合楼结构设计为基础, 依据建筑施工图纸和规范要求, 计算合适的截面尺寸和荷载参数, 使用YJK软件执行建模和计算。通过YJK软件, 对钢筋混凝土框架结构进行了动力弹塑性时程分析, 深入探讨了其抗震性能, 获取了相关的层位移和层间位移角数据, 充分体现了框架结构的优点, 能满足现实需要。

关键词

框架结构, 荷载分析, 抗震性能, 动力弹塑性时程分析

Response Analysis of a Reinforced Concrete Frame Structure Teaching Complex under Seismic Loads

Tao Shen

College of Civil Engineering, Southwest Forestry University, Kunming Yunnan

Received: June 28, 2026; accepted: July 20, 2026; published: July 30, 2026

Abstract

Based on the structural design of a certain educational complex, this paper calculates appropriate cross-sectional dimensions and load parameters in accordance with architectural construction drawings and code requirements, and uses YJK software to perform modeling and calculations. Using YJK software, a dynamic elastic-plastic time-history analysis was conducted on the reinforced concrete frame structure to thoroughly investigate its seismic performance. Relevant data on story displacements and

inter-story displacement angles were obtained, fully demonstrating the advantages of the frame structure and confirming its ability to meet practical needs.

Keywords

Frame Structure, Load Analysis, Seismic Performance, Dynamic Elastic-Plastic Time-History Analysis

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 研究背景及研究现状

1.1. 研究背景

近年来,随着城市化步伐加快,人们的生活质量得到显著改善,对学习教育更加重视,对学校建筑的要求也在不断提高。在学校,教学综合楼作为学生学习的主要场所,教学综合楼的安全性和稳定性也越来越重要,其安全性直接影响到学生的学习和健康成长。在倒塌的教学综合楼的结构设计中存在一系列的技术问题和人为错误,包括材料选择不当、结构计算错误、施工质量不合格,设计单位越级设计,最主要的原因是倒塌的教学综合楼所采用的结构设计无法承受地震所产生的荷载作用。因此,选择好的结构形式显得尤为重要,只有选择合理的结构设计,才能有效避免建筑不稳定、倒塌等危险事故的发生。

在结构设计中,框架结构作为一种常见的建筑结构形式,它平面布置较灵活,能提供较大的室内空间,具有传力明确、延性较好、方便施工承载力大、结构自重轻、抗震性能好、建造的工业化程度高等优点。采取框架结构设计,能够有效改善因承载力不足、布置不合理等问题导致的不良影响,能够满足现实要求。

1.2. 国内外研究现状

1.2.1. 国外文献综述

框架结构是指由梁和柱刚接而成承重体系的结构,即由梁和柱组成框架结构共同承受使用过程中出现的水平荷载和竖向荷载。钢筋混凝土框架结构是由楼板、梁、柱及基础四种承重构件组成的。由主梁、柱与基础构成平面框架,各平面框架再由连续梁连接起来形成空间结构体系。

由于框架结构在国外发展较早,所以研究相对完善,近年来对于框架结构的研究主要集中在承重抗震体系问题上。

首先, Kemeng Yu (2022) [1]在框架梁的结构设计中,提出在几何形状方面,梁不应太宽;否则,将不利于节点的约束;此外,当梁和墙梁进入非线性范围时,它们的力学性能存在明显差异,因此应限制高宽比和长高比,为了避免梁端部的塑性端箍应加密;在横向钢筋中,为了提高抗剪强度,应将钢筋放置在一定的剪压比范围内,并加密环箍距离,以提高混凝土的延性;为了防止钢筋在接触处屈服和压碎混凝土之前发生滑动,应在弯曲处设置短钢筋以加强锚固。对于框架柱的结构设计,在几何结构中,为了避免损坏,柱净高与截面高的比值应大于4,柱轴压比和剪压比是影响构件延性的重要因素,因此柱截面应受这两个因素的控制。

Akim Bolshakova 和 Zufar Beloviey (2022) [2]考虑地震-土-结构相互作用和建筑物碰撞影响的钢筋混凝土框架结构,研究介绍了具有土结构相互作用的不规则建筑框架在冲击作用下的抗震分析概念,重点研究了在正常荷载和地震荷载作用下,不同类型的区域和土壤类型的地基上钢筋混凝土框架建筑的土

结构相互作用分析。混凝土框架结构下土体有三种线性弹性和各向同性模型,如固定基底。采用有限元软件 SAP 2000 对钢筋混凝土框架不规则结构进行时程分析。在此基础上,通过与三种模型的比较,得出土-结构相互作用的影响是横向位移、固有频率、层间位移和基底剪力的增加,而固有周期的减少。

Messaoudi Abdelghaffar 等(2022) [3]通过在钢筋混凝土框架结构中使用砌体填充框架可以大大提高周围框架的刚度和强度。尽管包括阿尔及利亚在内的许多国家都放弃了填充墙的结构贡献,但这种 RC 框架的横向荷载行为与没有填充墙的框架不同。本文提到在关注开口的影响以及改变砌体面板分布对钢筋混凝土框架结构整体性能的影响。为此,进行了 pushover 分析,以评估填充 RC 的抗震性能和性能,并研究与承载力曲线、层间位移和能量相关的结果。结果表明,开口和砌体板分布的变化可以显著改变结构在增强强度和能量吸收方面的整体性能。

这些先进的理论展示了国外混凝土框架结构在抗震方面的多样性和创新性,混凝土框架结构具有优秀的耐久性、抗震能力和施工效率,可以满足大跨度、多功能的教学空间需求。

1.2.2. 国内文献综述

赵志强(2022) [4]在建筑框架结构设计问题及要点中提到,混凝土框架结构包括梁和柱,在建筑工程中发挥了重要的作用,其中梁使用混凝土与钢筋材料来制作,在连接中使用刚性连接等方式。该结构可抵抗水平荷载及竖向荷载,保证了结构的稳定性。当框架结构的构件面积比较小,难以满足承载力要求。在建筑层数增加的条件下,水平位移会变小,墙体难以承担相应的负荷,这种情况下会使其性能减弱,不适合用于高层建筑结构设计中。

许宏丽(2022) [5]在分析建筑框架结构设计存在问题及对策中提到,框架结构中的梁柱等构件能够促使设计向着标准化的方向发展和前进,进而加快施工的进度。运用现浇混凝土框架技术,还可以满足建筑结构的刚性需求,让建筑物空间结构变得更加科学与合理。

李世颖(2019) [6]在钢筋混凝土框架结构抗震设计方法的合理性分析中提到,钢筋混凝土框架结构的抗震设计思路与抗震设计原理,是与钢筋混凝土框架结构的物理性能紧密相关的,这种结构在不同的张力与收缩力的作用下表现出的延展性能有很大的差别,框架结构中的梁柱结构比较容易通过设计构造升级获得更好的延展性能,同时,框架结构设计中的建筑轴压比、塑性变形能力、塑性耗能能力、斜压、剪压、斜拉型剪切破坏,都会对框架结构的实际延展性能产生较大的影响。

这些充分展示了国内对混凝土框架结构设计的多样性。混凝土框架结构在国内的教学综合楼设计中得到广泛应用,提供了稳定的支撑和良好的结构性能,满足了学院教学、研究和办公等多功能需求。

抗震设计是结构设计中非常重要的一个方面,框架结构作为常见的建筑结构形式,在抗震设计中也占据了重要地位。综述中介绍了国内外影响框架结构抗震的因素以及一些常用的框架结构抗震设计方法,如静力弹性分析方法、动力弹性分析方法、时程分析方法等,这些方法能够评估框架结构在地震作用下的响应。

虽然说我国相比国外对于框架结构抗震设计的研究发展较晚,但是近年来关于结构设计的研究激增,我国就结构抗震设计方向展开了研究,研究成果丰硕。由于框架结构是作为竖向承重和抗侧力结构,因此这些研究多集中于荷载计算以及调配方法的研究,工程中最常用分层法来计算在竖向荷载作用下框架结构的内力,用反弯点法即 D 值法来计算水平荷载作用下框架结构的内力。

2. 项目概况

总建筑面积为 1410.16 m²,结构设计使用年限为 50 年。建筑楼层为四层,楼层高度为 3.6 m,建筑总高度: 14.85 m,室内外高差-0.450 m。根据《建筑工程抗震设防分类标准》(GB 50223-2008) [7]、《建筑抗震设计规范》(GB 50011-2010) [8],该结构属重点设防类,抗震等级为二级抗震,设防烈度为 7 度,

乙类建筑，基本地震加速度为 0.10 g，分组为第 3 组，设计特征周期 $T_g=0.45\text{ s}$ ，场地类型为中软土，场地类别为Ⅱ类。

3. 框架结构的柱梁板尺寸确定

根据《混凝土结构设计规范》(GB 50010-2010) [9]，框架柱应根据建筑功能和结构要求进行合理布置，以满足空间使用和荷载传递的需要，从而确保整体结构的稳定性和承载能力。结合本项目的实际情况，选取截面尺寸为：400 × 400 (mm)、400 × 500 (mm)、500 × 600 (mm)三种类型。

梁的布置应有利于增强结构的整体稳定性，通过合理设置梁的位置和间距，确保结构在承受荷载时不易发生失稳或倒塌。结合本项目的实际情况，梁截面尺寸为： $b \times h = 250\text{ mm} \times 500\text{ mm}$ 、 $b \times h = 250\text{ mm} \times 600\text{ mm}$ 、 $b \times h = 250\text{ mm} \times 400\text{ mm}$ 三种类型。

楼面板和屋面板均按双向板进行计算，楼面板厚度 $h = 100\text{ mm}$ ，屋面板厚度 $h = 120\text{ mm}$ 。

4. 地震分析

在本次钢筋混凝土框架结构设计中，采用动力弹塑性时程分析法对整个结构在地震荷载作用下进行分析，以确定其抗震性能和安全性。分析结果可用于对结构进行必要的设计改进和优化，提高结构的整体抗震能力。同时，还需要考虑地震设计规范和标准的要求，以确保结构符合相关的安全性能要求。

4.1. 动力弹塑性时程分析地震波选择

本文根据结构自振周期和现场地质情况，选取三组罕遇地震作用下的地震波利用 YJK 软件进行动力弹塑性分析，其中包含一组人工波、两组天然波。

地震波特征如下图 1~3 所示。

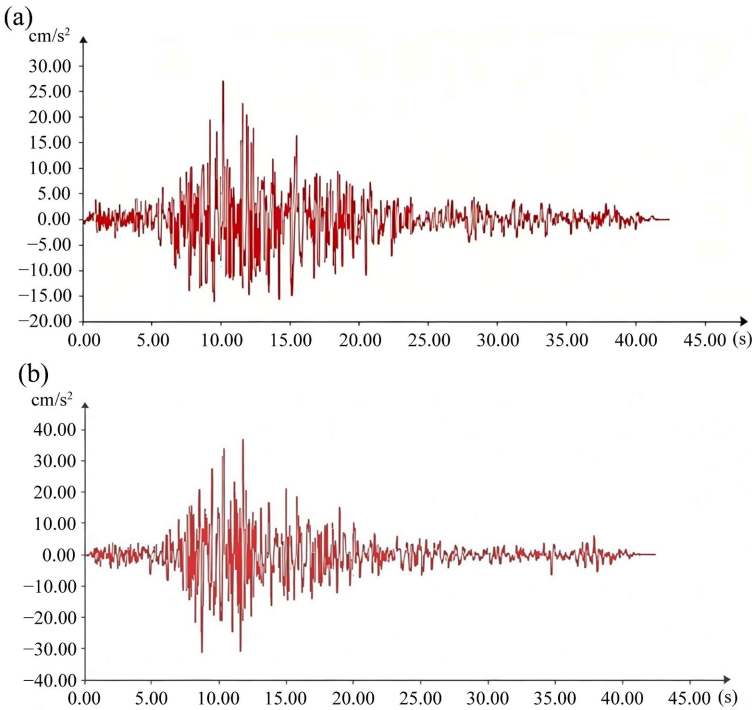


Figure 1. Natural wave San Fernando_NO_52, $T_g(0.45)$ seismic wave data
图 1. 天然波 San Fernando_NO_52, $T_g(0.45)$ 地震波数据

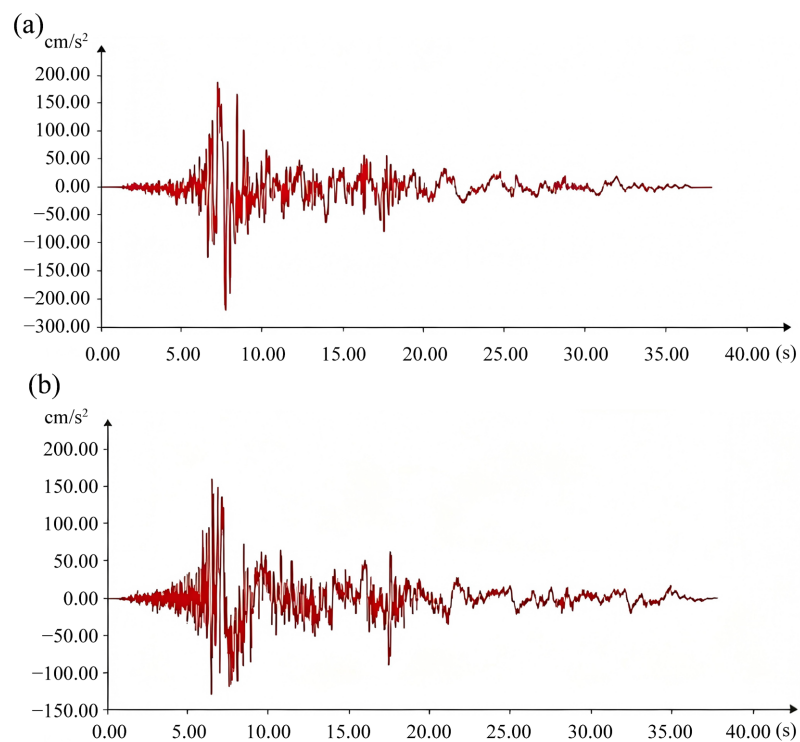


Figure 2. Natural wave Imperial Valley-06_161, Tg (0.45) seismic wave data

图 2. 天然波 Imperial Valley-06_161, Tg (0.45)地震波数据

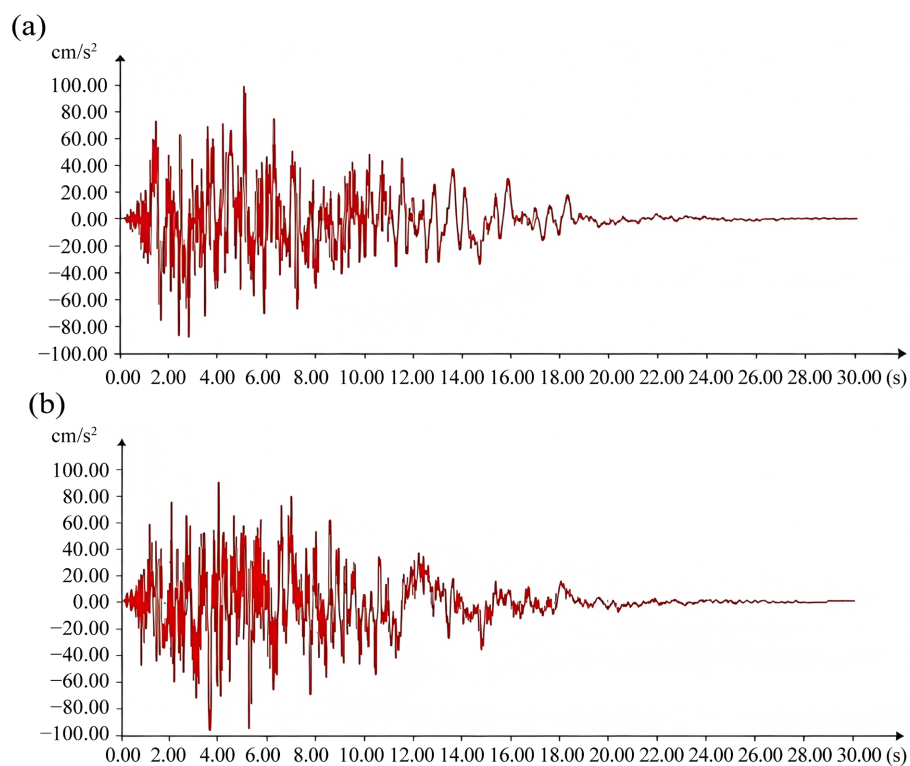


Figure 3. Artificial wave ArtWave-RH1TGO45, Tg (0.45) seismic wave data

图 3. 人工波 ArtWave-RH1TGO45, Tg (0.45)地震波数据

所选的三条地震波计算参数如表 1 所示。

Table 1. Seismic wave calculation parameters
表 1. 地震波计算参数

地震波	主方向峰值加速度 (cm/s ²)	次方向峰值加速度 (cm/s ²)	有效起止时间段(s)	时间步长(s)
San Fernando_NO_52, Tg (0.45)	27.0586	37.1203	0.9~37.8	0.01
Imperial Valley-06_161, Tg (0.45)	219.751	160.112	4.6~24.7	0.005
ArtWave-RH1TGO45, Tg (0.45)	100	100	0.7~18.3	0.02

4.2. 模型显示

模型显示支持单线图、拉伸图两种显示方式(见图 4、图 5)，并支持结构配筋结果查看(见图 6)。

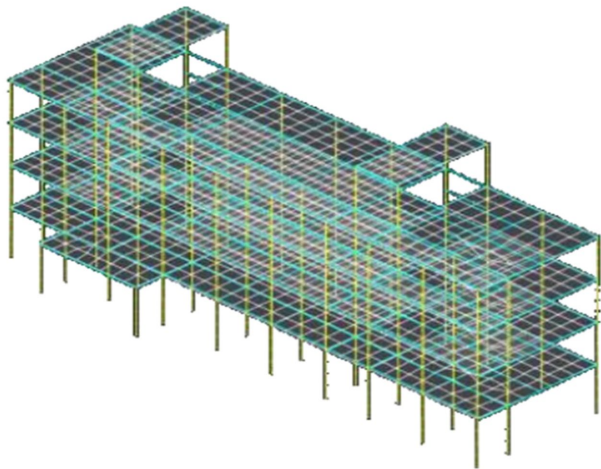


Figure 4. Single-line diagram
图 4. 单线图

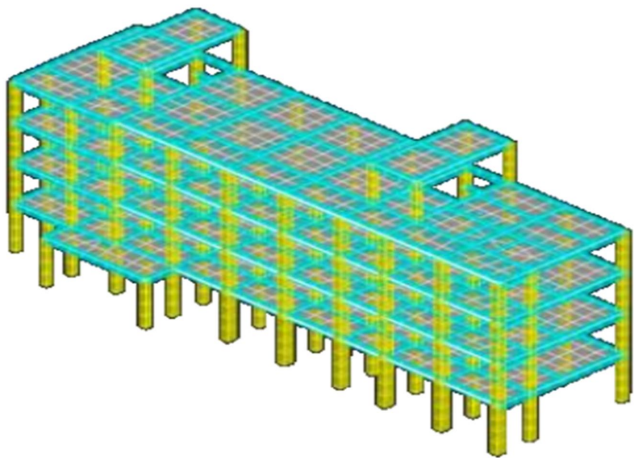


Figure 5. Tensile test diagram
图 5. 拉伸图

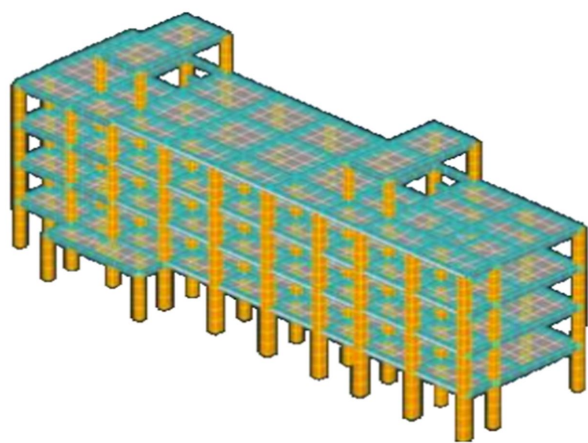


Figure 6. Reinforcement drawing
图 6. 钢筋图

4.3. 振型图对比结果

YJK-A 模型和 YJK-EP 模型计算的前 3 阶振型模态对比如图 7 所示。

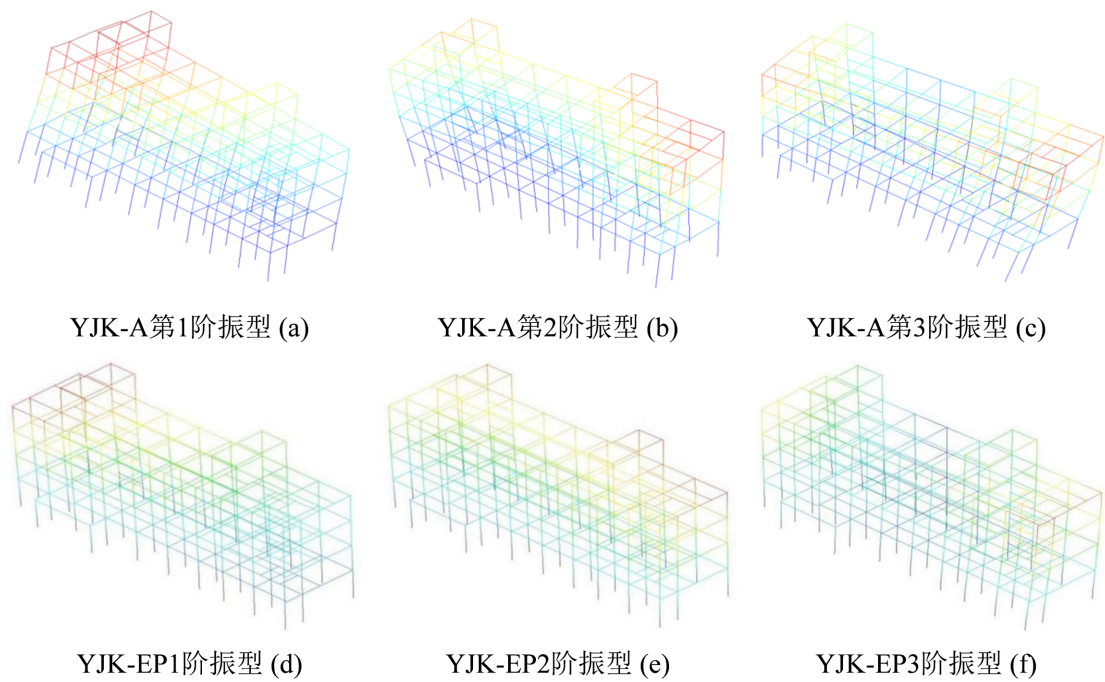


Figure 7. Comparison of the first three modal shapes calculated by the YJK-A and YJK-EP models
图 7. YJK-A 模型和 YJK-EP 模型计算的前 3 阶振型模态对比

从对比图中可以看出，不仅两模型的周期值接近，前三阶模态形状(平动与扭转成分)也基本相同。第一振型均为水平 X 向为主，第二振型均为水平 Y 向为主，第三振型均为扭转为主。

4.4. 楼层最大响应

楼层最大响应从位移、剪力和位移角三个方面进行体现，如下图 8~10 所示。

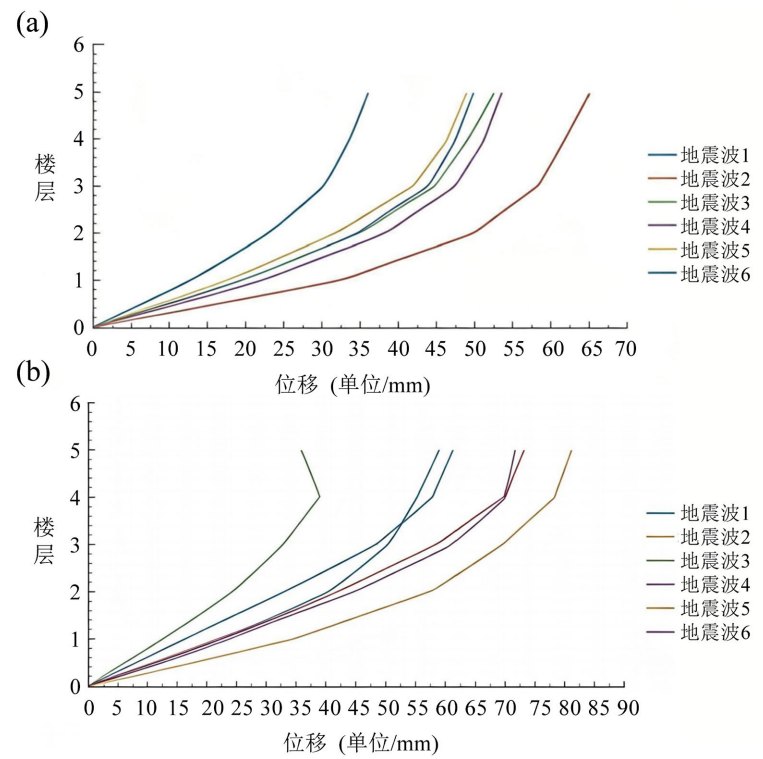


Figure 8. Maximum floor displacement curve
图 8. 最大楼层位移曲线

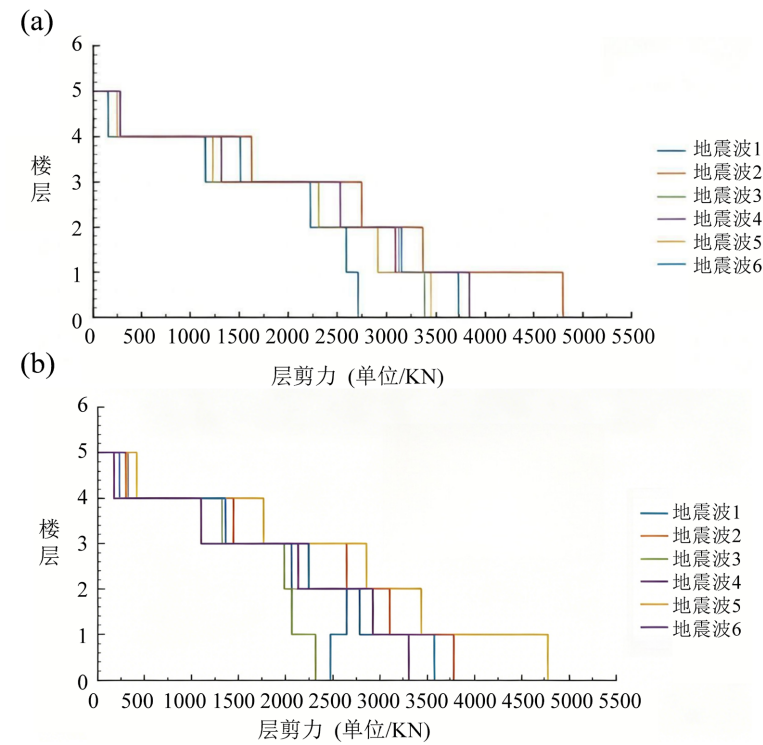


Figure 9. Maximum floor shear curve
图 9. 最大楼层剪力曲线

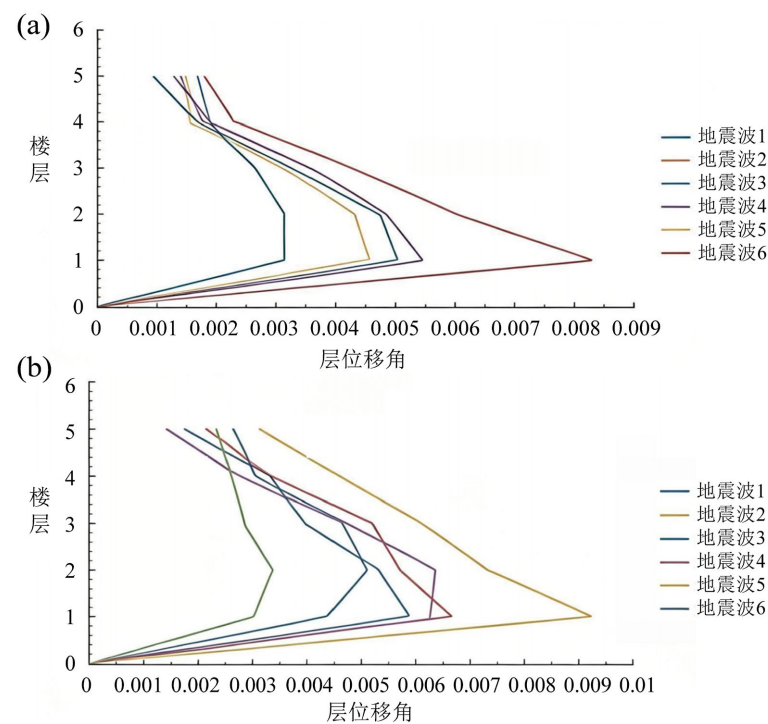


Figure 10. Curve of maximum floor displacement angle
图 10. 最大楼层位移角曲线

上述图中看出：

- ① 弹塑性位移普遍大于弹性位移，说明结构都可能已进入了不同程度的非线性；
- ② 大震弹塑性基底剪力明显小于弹性基底剪力，中震弹塑性基底剪力与弹性基底剪力比较接近；
- ③ 弹塑性位移角普遍大于弹性位移角，说明都已进入了非线性，但程度有些不同。

4.5. 反应谱规范谱对比

反应谱规范谱对比模块包含平均谱对比、多波谱对比、反应谱曲线数据三个选项，可进行反应谱图形及具体数据的查看，可据此判断地震波满足规范要求。

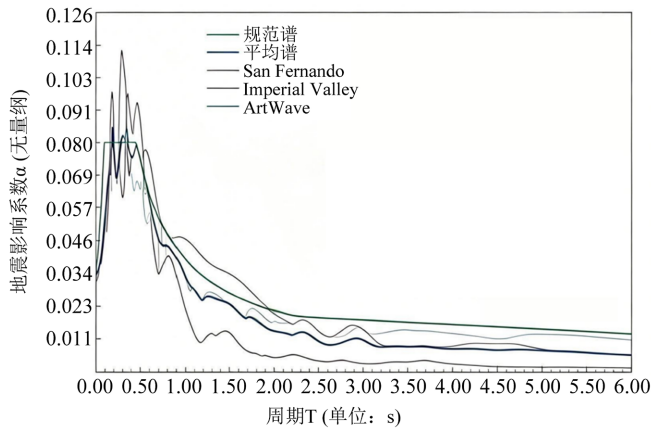


Figure 11. Comparison of reaction spectra and standard spectra
图 11. 反应谱与规范谱对比图

各组地震波的反应谱、平均反应谱及与规范谱的对比结果如图 11 所示。从图中可以看出，各主要周期上平均反应谱与规范谱相差最大值满足小于 20%的“统计意义相符”规定。

4.6. 地震时正常使用验算

地震时正常使用验算包括对结构进行楼面水平加速度验算及变形验算，并给出文本结果，如表 2、表 3 所示。

Table 2. Report on the verification of floor-level horizontal acceleration
表 2. 楼面水平加速度验算报告

塔号	层号	X 向加速度(g)	Y 向加速度(g)	合加速度(g)
1	1	0.280815	0.307285	0.327356
	2	0.314131	0.389635	0.392372
	3	0.264352	0.292924	0.309384
	4	0.314388	0.356843	0.365591
	5	0.601745	0.79477	0.79481
		X 向加速度最大值: 1 塔 1 层, 0.601745		
		Y 向加速度最大值: 1 塔 1 层, 0.79477		
		合加速度最大值: 1 塔 1 层, 0.79481		

注：所有工况楼层质心最大绝对加速度(各角度工况及合加速度) $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 。

Table 3. Deformation verification report
表 3. 变形验算报告

塔号	层号	层间最大位移角(rad)
1	1	1/108
	2	1/136
	3	1/163
	4	1/219
	5	1/320
		最大值: 1 塔, 1 层, 1/108 rad

注：楼层变形验算指标：楼层最大位移角(包络值)。

由楼面水平加速度验算报告及变形验算结果显示，其符合相关规范要求。

5. 结论

通过对该钢筋混凝土框架结构教学综合楼进行地震响应分析，可以得到以下几点结论：

- 1) 结构强度和稳定性：通过动力弹塑性时程分析和计算，可以得出混凝土框架结构的强度和稳定性满足设计要求，它能满足承载能力和抗震要求。
- 2) 构件设计和尺寸：在结构方案和结构荷载确定后，对柱、梁和楼板等截面尺寸进行了估算，经过 YJK 软件分析验算后，根据相应的控制因素限值进行构件截面尺寸修正，验算结果表面有 98.80%的柱梁均无损坏，仅有 1.20%的柱梁受到轻微损坏，达到了设计要求。

3) 从动力弹塑性时程分析损伤图中可以看出, 顶层柱底损伤最为严重, 其次是中间各层梁损伤较为严重, 第 1 层柱底也出现了明显损伤, 中间楼层少数柱子也出现了比较明显的损伤。这说明我们所设计的柱梁钢筋拉伤较为严重, 应该进一步采用高强度钢筋和预应力钢筋以及使用强度等级更高的混凝土。

总之, 混凝土框架结构设计的结论应该根据具体情况和研究所得出的数据进行评估, 以确保结构的安全性、经济性和可行性。在此次响应分析中, 也有不足之处, 例如: 没有深入进行抗震性能不足的分析, 没有对混凝土材料的质量、钢筋的加工及施工工艺等方面进行调查和分析, 探讨其对结构性能和耐久性的影响。

参考文献

- [1] Yu, K. (2022) Research on Seismic Design Method for Reinforced Concrete Frame Structure. *Wireless Communications and Mobile Computing*, **2022**, Article ID: 7851648. <https://doi.org/10.1155/2022/7851648>
- [2] Bolshakova, A. and Beloviev, Z. (2022) Study on Geometrically Irregular Reinforced Concrete Frame Structures Considering the Effect of Seismic Soil Structure Interaction and Building Collision. *Journal of Progress in Civil Engineering*, **4**, 1-7.
- [3] Messaoudi, A., Chebili, R., Mohamed, H. and Rodrigues, H. (2022) Influence of Masonry Infill Wall Position and Openings in the Seismic Response of Reinforced Concrete Frames. *Applied Sciences*, **12**, Article 9477. <https://doi.org/10.3390/app12199477>
- [4] 赵志强. 建筑框架结构设计问题及要点[J]. 砖瓦, 2022(3): 87-90.
- [5] 许宏丽. 分析建筑框架结构设计存在问题及对策[J]. 中国建筑装饰装修, 2022(3): 119-120.
- [6] 李世颖. 钢筋混凝土框架结构抗震设计方法的合理性分析[J]. 江西建材, 2019(2): 64-65.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑工程抗震设防分类标准: GB 50223-2008 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范: GB 50011-2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010-2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.