

隔震支座楼梯框架结构的Pushover分析

王 珺*, 高道来

西南林业大学土木工程学院, 云南 昆明

收稿日期: 2025年10月13日; 录用日期: 2025年11月4日; 发布日期: 2025年11月20日

摘 要

采用SAP2000软件, 分别建立了不设置楼梯, 设置普通楼梯, 以及在楼梯梯板下端设置隔震支座的3种不同形式钢筋混凝土框架结构的有限元分析模型, 通过模态分析研究了不同楼梯形式对钢筋混凝土框架结构周期和振型顺序的影响。通过静力推覆分析(Pushover分析), 研究了地震作用下普通楼梯和隔震支座楼梯两种模型的抗震性能及屈服机制。研究表明: 设置楼梯可以改变框架结构的振型顺序, 在梯段板下方设置隔震支座后, 楼梯的塑性铰发展变得更为缓慢, 楼梯抗震性能得到了明显改善。

关键词

SAP2000, 板式楼梯, Pushover, 抗震分析

Pushover Analysis of the Seismic Isolation Bearing Stair Frame Structure

Jun Wang*, Daolai Gao

School of Civil Engineering, Southwest Forestry University, Kunming Yunnan

Received: October 13, 2025; accepted: November 4, 2025; published: November 20, 2025

Abstract

Employing SAP2000 software, finite element analysis models were developed for three distinct types of reinforced concrete frame structures: without staircases, with conventional staircases, and with seismic isolation bearings installed at the bottom of stair flights. Modal analysis was conducted to investigate the influence of different staircase configurations on the natural periods and mode shape sequences of the reinforced concrete frames. Through static pushover analysis (Pushover analysis), the seismic performance and yield mechanisms of both conventional staircases and those equipped with isolation bearings were examined under seismic actions. The findings indicate that

*第一作者。

文章引用: 王珺, 高道来. 隔震支座楼梯框架结构的 Pushover 分析[J]. 土木工程, 2025, 14(11): 2651-2657.
DOI: 10.12677/hjce.2025.1411284

the presence of staircases alters the mode shape sequence of the frame structure. After installing isolation bearings beneath the stair flights, the development of plastic hinges in the staircase is notably delayed, resulting in a significant improvement in its seismic performance.

Keywords

SAP2000, Plate Stair, Pushover, Seismic Analysis

Copyright © 2025 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. 引言

近年来, 全球地震频发, 多次地震造成重大人员伤亡与经济损失。例如 2025 年缅甸 7.9 级地震死亡超 3000 人, 受伤超 5000 人。2023 年土耳其南部 7.8 级地震土耳其死亡近 5 万人, 损失超 1050 亿美元。2023 年中国甘肃积石山县 6.2 级地震甘肃 100 人遇难、青海 11 人遇难。历次地震造成巨大的人员伤亡及财产损失, 作为多层混凝土框架结构中的竖向通道, 楼梯不仅在日常使用中承担人员流通的功能, 更在地震、火灾等紧急情况起着唯一逃生通道的作用。然而, 多次震害调查表明[1][2], 在钢筋混凝土框架结构中, 楼梯间并未充分发挥其预设的逃生功能, 相反, 楼梯构件往往先于主体结构发生破坏, 严重阻碍了人员及时疏散, 显著加剧了建筑物内部人员的生命安全风险。因此, 楼梯作为垂直交通与疏散的核心部件, 其设计的合理性与科学性对保障整体建筑的疏散效率至关重要[3]-[5]。现行的 GB50011-2010《建筑抗震设计规范》3.6.6.1 条中规定[6]: “利用计算机进行结构抗震分析, 计算中应考虑楼梯构件的影响”。然而在当前的混凝土框架结构设计中, 设计人员通常仅将楼梯构件以承受竖向荷载的方式考虑进整体结构中, 而不考虑楼梯构件对整体结构地震作用的影响与楼梯本身的破坏情况。为消除楼梯构件的斜撑作用、降低其对结构侧向刚度的影响以及更好地保护楼梯, 可在梯段板与休息平台间设置滑动支座, 如图 1(a)所示, 该支座使梯段板在地震中可发生滑移而不传递水平力, 有效减弱斜撑作用, 但罕遇地震下梯段板可能存在翘起脱落风险。为此, 中国建筑西北设计研究院[7]提出了一种新型隔震防倒塌支座, 如图 1(b)所示。

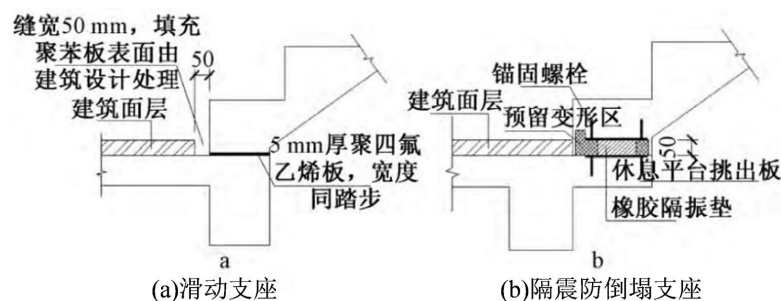


Figure 1. Sliding and seismic isolation anti-collapse support detail drawing
图 1. 滑动、隔震防倒塌支座做法图

本文应用 SAP2000 有限元结构分析软件[8]建立 3 个 6 层钢筋混凝土框架结构, 分别为无楼梯结构 (M1)、普通现浇楼梯结构 (M2)、采用隔震支座楼梯结构 (M3)。通过模态分析研究不同楼梯形式对框架结

构的自振周期和振型顺序的影响。通过静力推覆分析, 对比了罕遇地震作用下 M2、M3 两种模型的塑性铰发展情况, 并研究了采用隔震支座的现浇板式楼梯框架结构的屈服机制。以期望得到梯段板下方设置隔震支座的框架结构对楼梯构件抗震性能的影响。

2. 模型建立

框架结构平面布置如图 3 所示。结构共 6 层, 每层层高均为 3.6 m。抗震设防烈度为 8 度(0.2 g), 设计地震分组为第三组, 场地类别为 II 类($T = 0.45\text{ s}$)。纵向(x 向)为 7 跨, 跨度均为 3.6 m; 横向(y 向)为 3 跨, 跨度分别为 6.9、3.0 和 6.9 m。建筑共 2 部楼梯呈对称布置, 分别位于轴线①、②之间和⑦、⑧之间。

各混凝土构件均采用强度等级为 C30 的混凝土, 受力钢筋采用 HRB400, 箍筋采用 HPB300。构件的截面尺寸分别为: 框架边柱及角柱为 650 mm × 650 mm; 其余框架柱为 600 mm × 600 mm, x 向框架梁为 300 mm × 600 mm; y 向框架梁为 300 mm × 700 mm。楼梯梯柱均为 300 mm × 300 mm; 楼梯梯梁均为 250 mm × 500 mm; 楼板及梯板板厚均为 110 mm。

构件除自重外的恒荷载标准值取值如下: 楼面恒荷载 1.5 kN/m², 楼梯间恒荷载 4 kN/m², 屋面为上人屋面恒荷载 4 kN/m²; 活荷载取值如下: 楼面及屋面活荷载 2 kN/m², 走廊及楼梯间活荷载 3.5 kN/m²。除此之外, 布置了填充墙的框架梁上线荷载有门窗洞口的扣除门窗洞口后取 8 kN/m, 无门窗洞口的取 12 kN/m, 女儿墙 5 kN/m。

采用 SAP 2000 软件建立有限元分析模型, 其中梁和柱均采用杆单元模拟, 为提高计算效率, 采用膜单元模拟屋面板、楼板和楼梯的休息平台板, 梯段板采用壳单元模拟, 为在软件中模拟隔震支座轴向刚度拉压不一致的情况, 隔震支座采用 Rubber Isolator 连接单元与 gap 连接单元并联的方式模拟。结构三维模型图如图 2 所示。

3 种不同布置情况的框架结构定义为: M3 模型为楼梯梯段板下端设置隔震支座的钢筋混凝土框架结构分析模型。M2 模型为设置普通混凝土现浇板式楼梯的钢筋混凝土框架结构分析模型; M1 模型在 M2 模型的基础上取消了楼梯构件, 楼梯构件以荷载的形式作用在主体结构上。

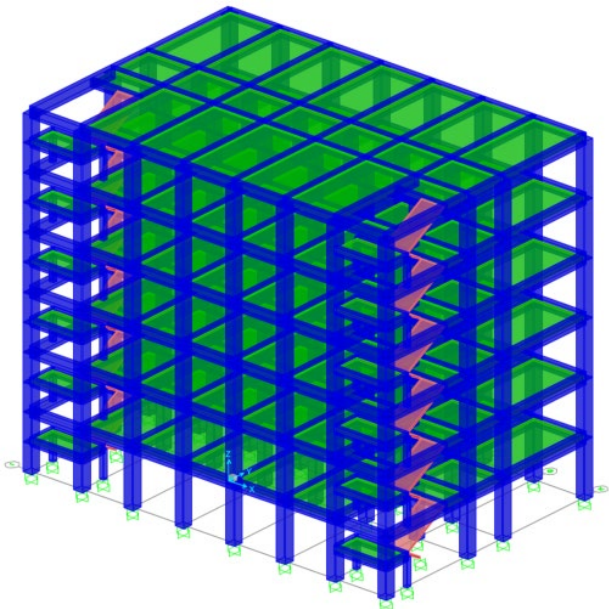


Figure 2. Three-dimensional model diagram
图 2. 三维模型图

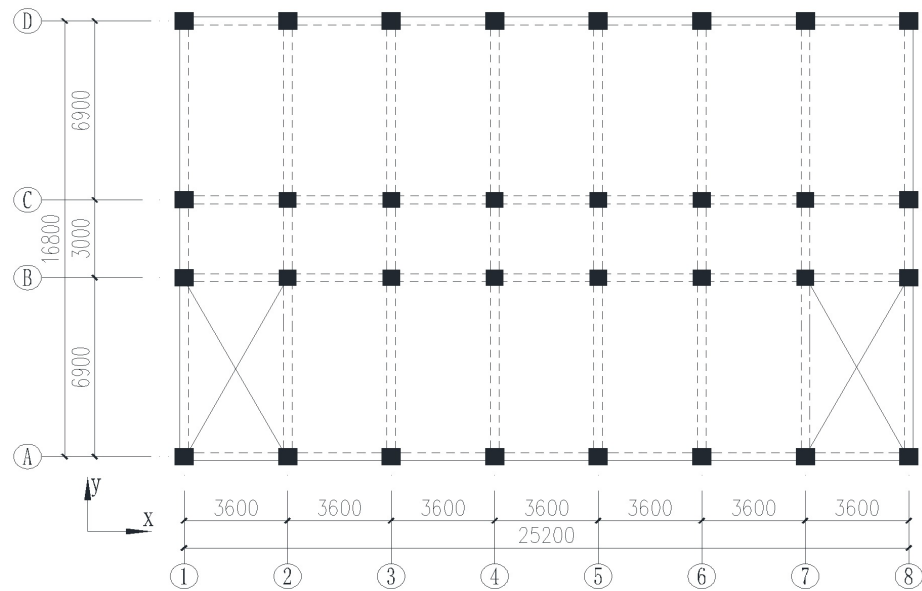


Figure 3. Frame structure floor plan (Unit: mm)
图 3. 框架结构平面布置图(单位: mm)

3. 模态分析结果对比

通过模态分析分别得到了 3 种模型前 3 阶振型的自振周期及质量参与系数, 如表 1 所示。

Table 1. The first three natural vibration periods and mass participation factors of the first three vibration modes of the three models

表 1. 3 种模型前 3 阶振型自振周期及质量参与系数

模型编号	振型阶数	周期/s	质量参与系数					
			U_x	U_y	R_z	SU_x	SU_y	SR_z
M1	1	0.723	0.0	0.811	0.0	0.0	0.811	0.0
	2	0.688	0.818	0.0	0.001	0.818	0.811	0.001
	3	0.647	0.001	0.0	0.815	0.818	0.811	0.816
M2	1	0.66	0.809	0.0	0.005	0.809	0.0	0.005
	2	0.594	0.0	0.816	0.0	0.809	0.816	0.005
	3	0.508	0.005	0.0	0.807	0.814	0.816	0.811
M3	1	0.696	0.0	0.809	0.0	0.0	0.809	0.0
	2	0.666	0.779	0.0	0.036	0.779	0.809	0.036
	3	0.61	0.036	0.0	0.775	0.815	0.809	0.811

通过对表 1 的 3 个模型的前三阶自振周期进行对比分析可得出: 当考虑楼梯构件参与框架结构一起作用时, 框架结构的前三阶自振周期均存在明显的减小, 一至三阶自振周期分别减少了 9.8%、13.6%及 21.4%。主要原因在于由于楼梯构件的存在, 在结构中起到了类似“斜撑”的作用, 使得框架结构的刚度有所增加。当在楼梯梯段板下方采用隔震支座时, 相较于无楼梯结构 M1, M3 的前三阶自振周期均存在明显的减小但均不如 M2 减小得多, 这表明采用隔震支座的楼梯构件也使得框架结构的刚度有所加强,

但没有现浇板式楼梯明显,这是由于隔震支座的存在削弱了楼梯构件对于整体结构的“斜撑”作用,减小了楼梯构件与框架结构的相互作用。

对比表 1 的各模型质量参与系数可知,当考虑楼梯构件参与框架结构一起作用时,框架结构的刚度得到提升且结构的振型顺序发生了改变,M1 的一阶振型为 Y 方向平动,而 M2 的一阶振型为 X 方向平动,这表明有无楼梯构件的加入对框架结构的振型顺序以及刚度的影响不容忽视。M3 的一阶振型又变回了 Y 方向平动,这表明相较于 M2 由于隔震支座的存在,削弱了楼梯构件对整体结构刚度的提升,使得一阶振型又回到了 Y 方向平动。低阶振型对结构的地震响应影响更大,故是分析考量的重点。

4. Pushover 分析结果对比

为了研究在楼梯梯段板下方设置隔震支座的框架结构抗震性能及屈服机制,本文对 M2 模型与 M3 模型 Y 方向(平行于楼梯板方向)进行静力推覆(pushover)分析,其中各框架单元指定默认铰属性,框架梁和梯梁均指定 M3 弯矩铰,框架柱和梯柱均指定 PMM 耦合铰,荷载类型选用均布荷载(Accel)。

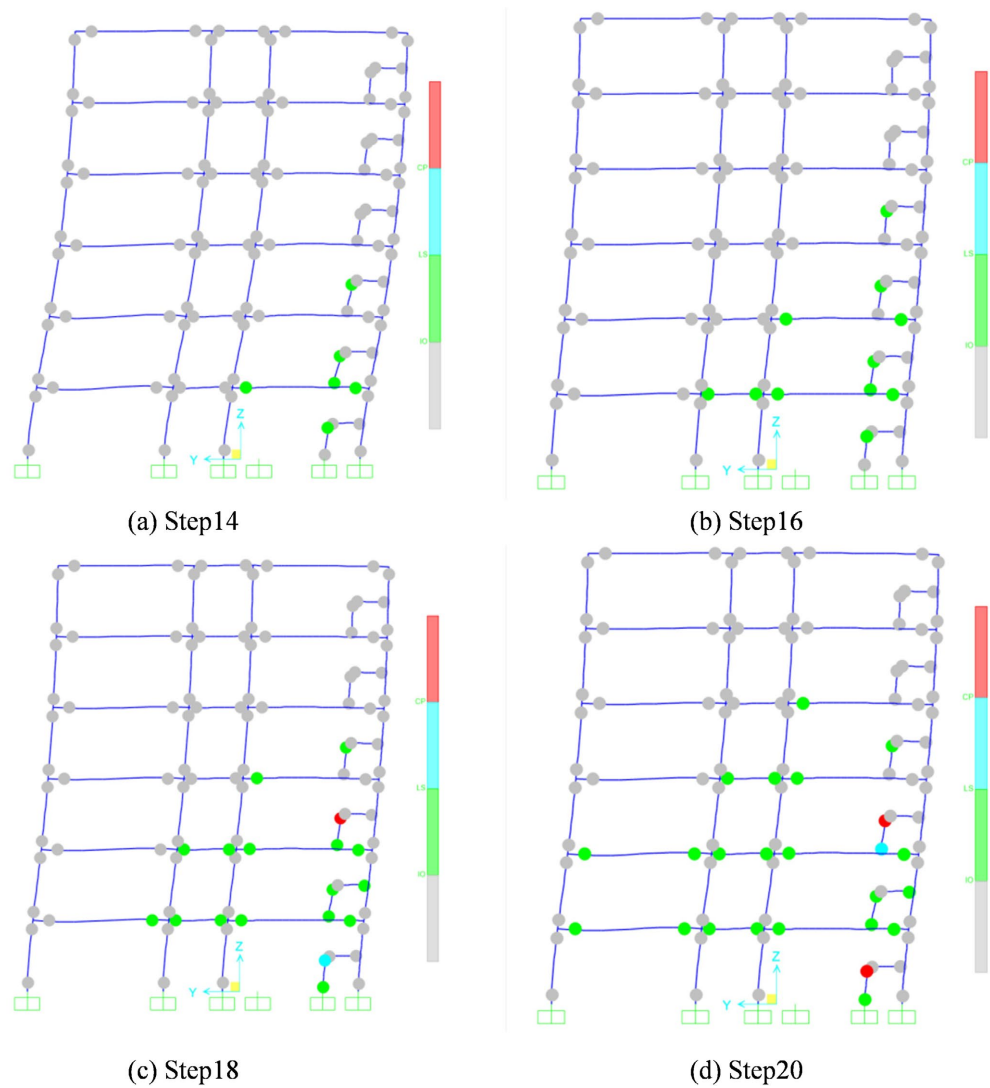


Figure 4. The hinge-out condition of the first axis frame of the M2 model
图 4. M2 模型第①轴线框架出铰情况

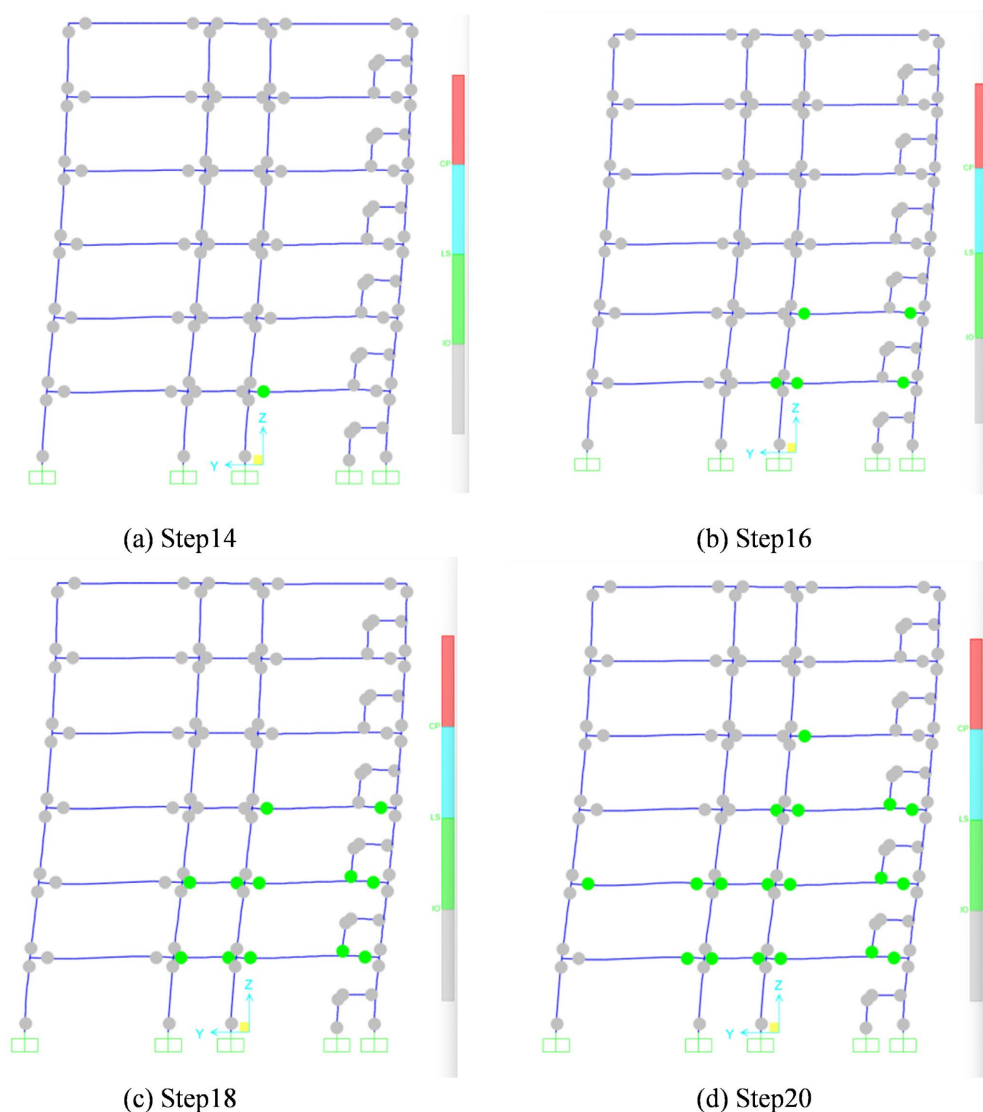


Figure 5. The hinge condition of the first axis frame of the M3 model

图 5. M3 模型第①轴线框架出铰情况

通过静力推覆分析,得到了模型 M2 和模型 M3 的塑性铰变化过程,图 4 至图 5 为 M2 模型和 M3 模型第①轴线框架塑性铰发展过程的 Step14、Step16、Step18 和 Step20。从图 4 中可以得到, M2 模型在 Step14 时,一层靠近楼梯一端的框架梁以及一二三层楼梯梯柱的塑性铰先进入 IO-LS 状态,随着推覆过程的进行,与楼梯相连的周围框架梁的塑性铰也逐渐进入 IO-LS 状态,然后逐渐向远离楼梯一端的框架梁以及上部楼层的框架梁扩展,在 Step18 时,第三层楼梯梯柱的塑性铰已经进入 CP-C 阶段,第二层的梯梁进入了 IO-LS 状态,而第一层楼梯梯柱的塑性铰进入了 LS-CP 状态。

从图 5 可以看出, M3 模型在 Step14 时,一层远离楼梯一端的框架梁的塑性铰先进入 IO-LS 状态,随后逐渐向外扩展,塑性铰的发展方式与 M1 模型相似,但直到 Step20 时,梯柱的塑性铰状态均还没达到 LS-CP 状态,而梯梁的塑性铰还没进入 IO-LS 状态。

综上,模型 M2 和模型 M3 的塑性铰发展过程相似,但 M3 模型的梯梁、框架梁和梯柱塑性铰状态的发展变化都要晚于 M2 模型。这说明楼梯梯段板下方设置隔震支座可以有效减缓楼梯构件特别是梯柱的

塑性铰的发展, 从而很好地保护楼梯使得楼梯晚于整体框架结构失效, 满足预期的抗震设防要求。

5. 结论

1) 楼梯构件的存在, 可以改变框架结构的刚度从而改变振型顺序。在楼梯梯段板下端设置隔震支座弱化了楼梯构件与框架结构的相互作用, 可以改变现浇楼梯框架结构的振型顺序。

2) 在楼梯梯段板下方设置隔震支座可以有效减缓楼梯构件塑性铰的发展和变化, 从而对楼梯构件起到保护作用。

参考文献

- [1] 蒋欢军, 王斌, 吕西林. 钢筋混凝土框架结构楼梯震害分析与设计建议[J]. 振动与冲击, 2013, 32(3): 22-28.
- [2] 冯远, 刘兰花, 易勇, 等. 多层钢筋混凝土框架柱震害调查分析与启示[J]. 土木工程学报, 2010, 43(10): 63-72.
- [3] 王振报, 温苏皖. 基于河北工程大学建筑馆的楼梯疏散能力仿真分析[J]. 湖南城市学院学报(自然科学版), 2021, 30(2): 22-26.
- [4] 邱新生, 晏方, 冯卫, 等. 楼梯设置橡胶支座框架结构抗震性能研究[J]. 湖南城市学院学报(自然科学版), 2024, 33(1): 11-15.
- [5] 邱新生, 晏方, 彭军, 等. 不同楼梯形式对框架结构抗震性能的影响研究[J]. 湖南城市学院学报(自然科学版), 2025, 34(2): 21-25.
- [6] 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]. 2016 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [7] 刘源, 辛力, 曾凡生, 等. 楼梯间减震防倒塌支座设计与探讨[J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(6): 66-73.
- [8] 北京金土木软件技术有限公司, 中国建筑标准设计研究院. SAP 2000 中文版使用指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006: 229-264.