

# 楼板隔震TMD结构减隔震性能的分析

刘 辉<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>西南林业大学土木工程学院, 云南 昆明

<sup>2</sup>云南工程建设总承包股份有限公司, 云南 昆明

收稿日期: 2026年1月27日; 录用日期: 2026年2月18日; 发布日期: 2026年2月28日

## 摘 要

本文以一栋10层钢筋混凝土框架结构商业办公综合楼为例, 研究了楼板隔震调谐质量阻尼器(TMD)结构的减震性能。利用SAP2000软件建立了抗震结构与六种不同布置形式的楼板隔震TMD结构有限元模型。通过选取7条地震波(5条天然波和2条人工波)进行罕遇地震下的弹塑性时程分析, 对比了不同方案在基底剪力、层间剪力、层间位移及顶层位移等方面的响应。研究结论表明, 楼板隔震TMD结构能有效延长结构自振周期, 显著降低基底剪力(20%~40%)以及层间剪力和位移(30%~70%), 验证了该体系在强震下的减隔震效果。

## 关键词

楼板隔震, TMD, 模型对比, 弹塑性时程分析

# Analysis of the Seismic Isolation and Energy Dissipation Performance of Floor Slab Isolated TMD Structures

Hui Liu<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>College of Civil Engineering, Southwest Forestry University, Kunming Yunnan

<sup>2</sup>Yunnan Engineering Construction General Contracting Co., Ltd., Kunming Yunnan

Received: January 27, 2026; accepted: February 18, 2026; published: February 28, 2026

## Abstract

This paper investigates the seismic mitigation performance of floor-isolated tuned mass damper (TMD) structures, taking a 10-story reinforced concrete frame commercial-office complex as the case study. Finite element models of the conventional seismic-resistant structure and six floor-isolated

TMD structures with distinct layout configurations were developed using SAP2000 software. Elastic-plastic time-history analyses under rare earthquakes were conducted by selecting seven ground motion records (five natural and two artificial). The responses of different schemes, including base shear, inter-story shear, inter-story drift, and roof displacement, were compared. The findings indicate that floor-isolated TMD structures can effectively extend the natural vibration period of the structure, significantly reduce the base shear (by 20%~40%) as well as inter-story shear and drift (by 30%~70%), thus validating the seismic isolation and energy dissipation efficacy of this system under strong seismic excitations.

## Keywords

Floor Slab Isolation, TMD, Model Comparison, 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. 引言

中国是世界上地震活动最频繁的国家之一，20世纪以来，地震在我国发生的频率近似呈指数趋势上升。地震普遍具有反应时间短、震级高、破坏性大的特点，严重危害了受灾地居民的生命安全，并且给当地社会的经济发展造成了毁灭性打击。随着经济社会的发展，偏远县城也出现越来越多的小高层商业综合体公共建筑，部分建筑还未位于设防烈度较高地区，因此采取有效的减隔震措施进行优化和改善十分必要。但考虑经济性和便捷性，楼板隔震 TMD 结构是一种不错的选择。楼板作为结构中保障人类生产和生活的平台，防止其在地震中发生变形、开裂、倾覆等破坏，保障人员安全和重要设施设备正常工作具有重要意义。

翁大根等[1]设计出滑移隔震楼面。通过工程实例验证具有良好的减震效果且减震装置构造简单、制作安装容易、替换和保养方便、造价低等特点。Ye 和 Kun 等[2]提出增强型惯容双隔离配置方案。雷传章等[3]提出层间隔震与局部浮筑楼板设计方案，研究表明有效延长周期、层间剪力和楼层加速度峰值显著降低，层间隔震与浮筑板设计方案有效提升原结构抗震性能。Hussam Mahmoud 等[4]提出悬浮楼板建筑方案，表明采用中高层建筑可提高建筑的性能。Engle 等[5]引入了一种混合楼板调谐质量减阻器和隔离系统，表明优化设计以及支撑和楼板之间的摩擦可以将结构的响应降低高达 40%。Bin Puthynan 等[5]地板隔震系统(FISs)，表明可以通过这样的方式来减轻支撑 PS 在强震作用下的地震响应，具有与位移相关的响应适应性。Cheng Zhibao 等[6]提出惯性增强浮置楼板结构，研究结果表明不仅可以减小结构与浮置楼盖的相对位移，而且可以减小结构的楼层加速度和层间位移。Fayyadh Nahal Kamil 等[7]提出一种混合橡胶-混凝土楼板隔震方案，可以消除水平和垂直方向振动。Walsh Kenneth K 等[8]提出一种利用新型自适应恢复力 ARF 装置允许设备和地板之间有相当大的相对移动。

洗巧玲[9][10]、曹嘉利等[11]从改变结构体系入手，探索出新的结构减震控制方法，得到楼板的隔震层刚度与主体结构刚度之比宜取 0.5。伍羚[12]建立多层楼板隔震消能体系，研究表明当框架与楼板间的频率比最优，主体结构将获得较好的减震效果。相阳等[13]研究黏弹性减震楼盖(压型钢板组合楼板与 H 型钢梁间设置夹层黏弹性减隔震支座)钢框架的抗震性能，研究结果表明减震楼盖的黏弹性支座引入可观的附加阻尼，框架整体地震响应的楼面加速度、层间侧移得到有效控制，对于多层减震楼盖钢框架，仅在结构上部楼层设置减震楼盖时，其对地震响应的减控效率可与全楼层设置减震楼盖接近。

赵阳等[14]采用复摩擦摆支座的楼面隔震体系,研究表明可以同时保证不同加速度水平地震作用下隔震楼面的隔震效果,是一种较好的隔震配置方案。杨佳慧[15]研究柱端与楼板之间不同连接方式对于结构抗震性能的影响,分析表明放松框架柱的约束可以降低结构的基频,并有效减小结构的加速度响应,不同连接方式的结构的响应受地震波类型的影响显著。潘超[16]提出单自由度惯容减震结构能有效实现地震作用下惯容减震结构位移响应和速度响应的控制,并验证了设计原则和公式的合理性与准确性。裴星洙等[17]提出以带肋楼板的恒载和活荷载换算为子结构的质量、设置在主梁(包括次梁)和带肋楼板之间的橡胶隔震垫的抗侧刚度和阻尼代替子结构的弹簧和阻尼器的一种 TMD 体系,表明在结构上附加该 TMD 形成的消能减震结构具有良好的减震控制效果。选择影响较大的前三阶振型作为减震对象设置子结构时的减震效果好。

鉴于上述学者的研究成果,为研究楼板隔震 TMD 结构在建筑工程中减隔震性能,提升安全性和可靠性以及便于实际工程的应用。本文以一栋小高层商业办公综合楼为例如图 1,利用非线性有限元软件 SAP2000 进行弹塑性时程分析,通过非线性 FNA 法分析楼板加速度、楼层位移,基础剪力、层间位移角等抗震性能参数。探讨不同楼板隔震方案对结构的影响,确定最优的减隔震方案,并分析结构在罕遇地震作用下的动态特性和响应,为后期指导工程实践提供有力支撑。



Figure 1. Business and office block  
图 1. 商业办公综合楼

## 2. 结构建模

### 2.1. 项目概况

该结构依据《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)(2016 年版)[18]、《建筑工程抗震设防分类标准》(GB50223-2008)[19]、《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ3-2010)[20]。构建 10 层钢筋混凝土框架结构模型,总高度 35.7 m,1~3 层高为 4.2 m,边长 42 m 的正方形;4~10 层高为 3.3 m,边长 30 m 的正方形。抗震设防类别为乙类,设防烈度 8 度,设计基本地震加速度值为 0.20 g,场地类别 II 类,地震设计分组第二组,特征周期  $T_g$  为 0.4s,周期折减系数 0.85,阻尼比为 0.05。1~3 层柱尺寸为 1000×1000 mm,梁尺寸为 800×400 mm。4~10 层柱尺寸为 800×800 mm,梁尺寸为 700×350 mm。柱、梁混凝土强度等级均为 C40,钢筋材料纵筋为 HRB400,箍筋为 HRB400。普通楼板厚度为 120mm,隔震楼板厚度为 200 mm。楼板混凝土强度等级均为 C30。依据《建筑结构荷载规范》(GB50009-2012)[21]面恒荷载取 3.0 kN/m<sup>2</sup>,活荷载取 2.0 kN/m<sup>2</sup>,框架梁上的线荷载填充墙均取 10 kN/m,女儿墙取 5 kN/m。

## 2.2. 模型建立

本研究利用有限元软件 SAP2000, 基于材料和结构几何条件以及各部件接触链接特性, 为了简化模型并便于结构分析, 基础边界条件被简化为固定约束, 以模拟基础对上部结构的刚性支撑。结构模型中的梁、柱构件用框架单元(Frame 单元)模拟, 楼板用薄壳单元(Shell)模拟, 隔震支座用 Rubber Isolator 连接单元模拟。梁和柱的节点设计为刚性节点, 能够有效传递弯矩和力。在柱端定义了 P-M2-M3 铰, 以反映轴向力与弯矩的相互作用; 框架梁则使用 M3 铰进行模拟, 从而构建了一个完整的结构数值分析模型, 抗震结构模型如图 2 所示。

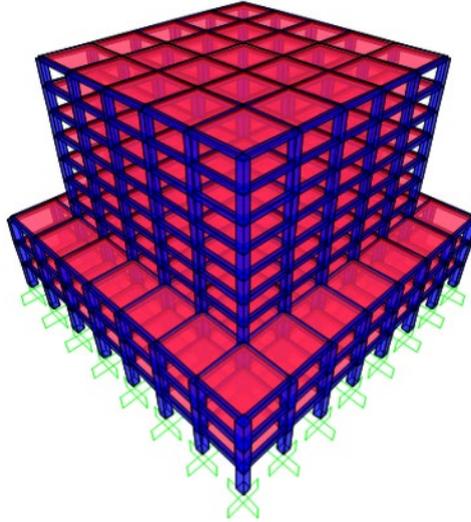


Figure 2. Three-dimensional model diagram  
图 2. 三维模型图

## 2.3. 楼板隔震支座布置方案

在 SAP2000 楼板隔震结构模型中, 选用 LNR300 作为隔震支座, 具体橡胶隔震支座产品规格参数详见表 1。顶层楼板隔震 TMD 结构支座布置在框柱上, 其余层楼板隔震 TMD 结构布置在框架梁上。

Table 1. Rubber seismic isolation bearing product specifications  
表 1. 橡胶隔震支座产品规格参数

| 型号     | 有效直径(mm) | 橡胶总厚度(mm) | 等效刚度(KN/m) | 竖向刚度(KN/mm) |
|--------|----------|-----------|------------|-------------|
| LNR300 | 300      | 56        | 490        | 1000        |

## 2.4. 地震波的选择

根据《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)(2016 年版) [18]规定, 采用时程分析法时, 应按建筑场地类别和设计地震分组选用实际强震记录和人工模拟的加速度时程曲线, 其中实际强震记录的数量不应少于总数的 2/3, 拟建项目区域地震设防烈度 8 度, 设计基本地震加速度值为 0.20 g, 场地类别 II 类。

从太平洋地震工程研究中心(PEER)数据库中筛选出多条具有代表性的自然波, 并通过 GM-Tools 软件进行处理, 本工程实际选取了 5 条天然地震波和 2 条人工波, 地震波编号为 TR1-TR5 和 RG1-RG2,

详见表 2。将七条波进行归一化处理，峰值加速度调整至  $200 \text{ cm/s}^2$ ，地震波反应谱曲线见图 3。在进行罕遇地震下弹性时程分析时，再将地震波加速度峰值调整至  $400 \text{ cm/s}^2$ 。以 X 方向对结构输入地震动进行数值模拟。

Table 2. Seismic wave information

表 2. 地震波信息

| Seismic numbering | Earthquake name     | Year | Vs30 (m/s) | Station name       | Magnitude |
|-------------------|---------------------|------|------------|--------------------|-----------|
| TR1               | Chi-Chi             | 1999 | 497.53     | CHY019             | 7.62      |
| TR2               | Norcia_Italy        | 1979 | 401.34     | Bevagna            | 5.9       |
| TR3               | Bam_Iran            | 2003 | 504.85     | Baft               | 6.6       |
| TR4               | Iwate_Japan         | 2008 | 507.56     | FKSH02             | 6.9       |
| TR5               | Loma Prieta         | 1989 | 425.3      | Palo Alto-SLAC Lab | 6.93      |
| RG1               | Artificial Record-1 | -    | -          | -                  | -         |
| RG2               | Artificial Record-2 | -    | -          | -                  | -         |

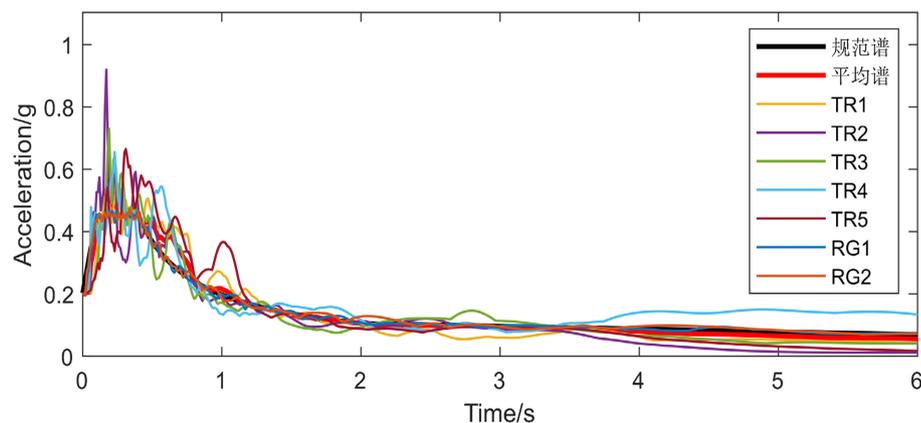


Figure 3. Seismic wave response spectrum curve

图 3. 地震波反应谱曲线

### 3. 结构地震响应研究

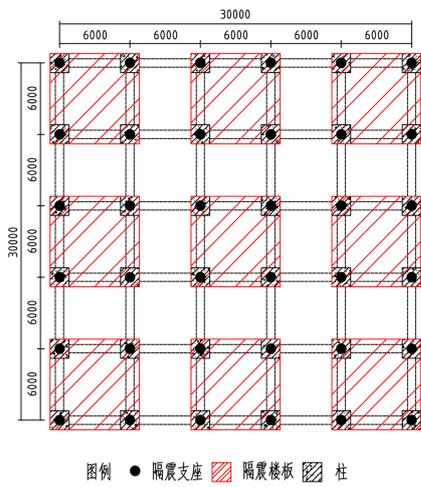
#### 3.1. 结构隔震层设置方案

结合本次拟建的商业办公综合楼的结构特性以及场地条件，在保障结构安全下考虑节约造价成本问题，设计出楼板隔震 TMD 结构六个方案，分为两大类。顶层隔震楼板 TMD 结构布置，只在顶层设置楼板隔震层且支座放在柱上，按照楼板块数、排列方式的不同设计出三个方案置详见图 4。

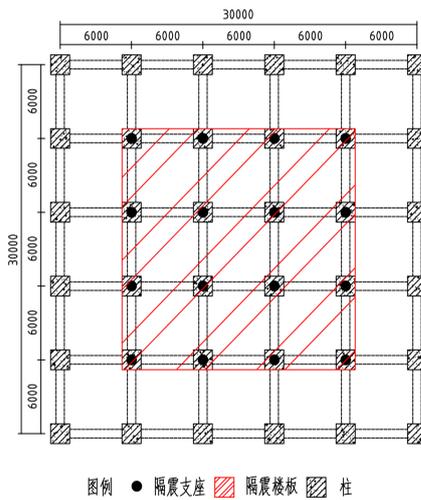
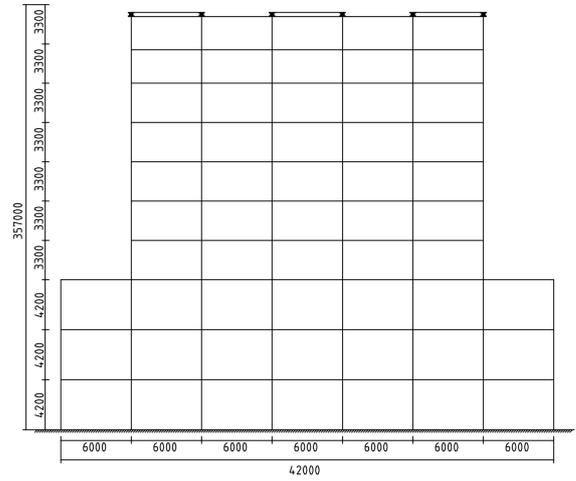
多层隔震楼板 TMD 结构布置，在顶层和其他层设置楼板隔震层且顶层支座放在柱上，顶层均已方案二布置，其余层支座放在梁上，隔震层每层均取 9 块在建筑中心且相邻的楼板，具体布置方案详见图 5。

#### 3.2. 结构模态分析

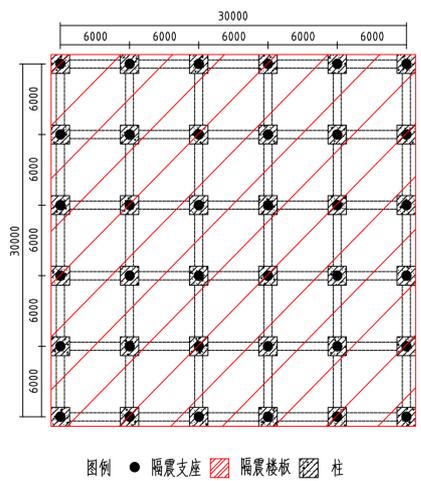
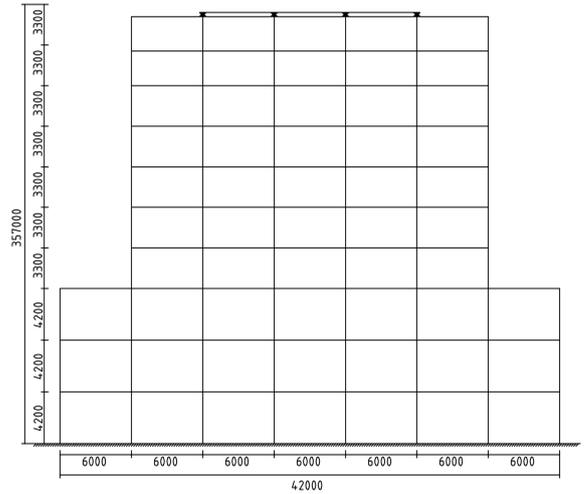
通过 SAP2000 有限元软件对抗震结构、隔震 TMD 结构使用 Ritz 向量法对模型的周期和质量参与系数等参数进行计算，选取各结构前三阶振型模态分析结果如表 3 所示。



(a) 隔震结构(方案一)



(b) 隔震结构(方案二)



(c) 隔震结构(方案三)

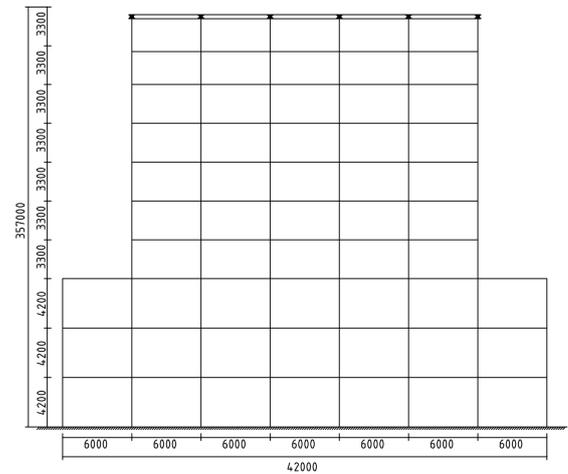
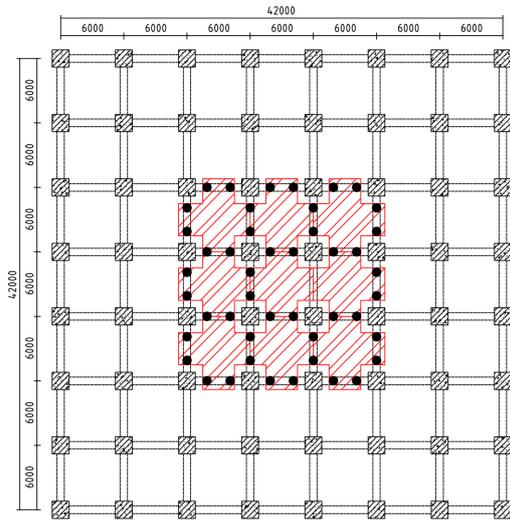
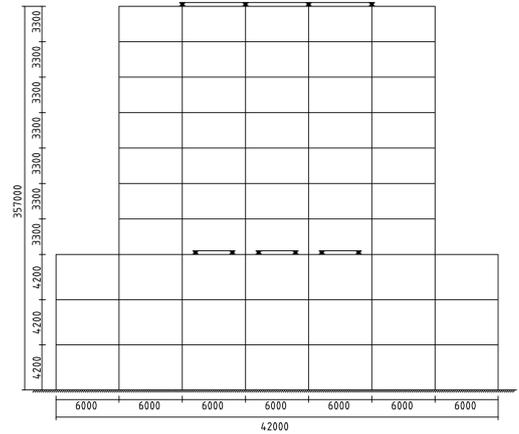


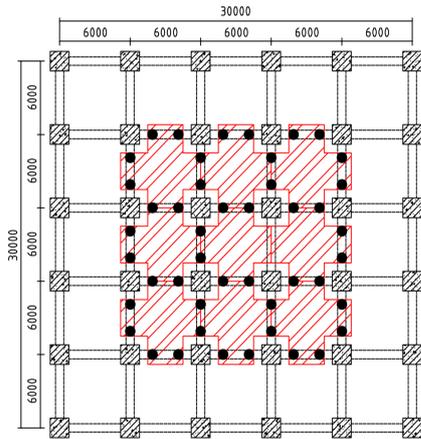
Figure 4. Top-level seismic isolation floor TMD structure layout  
图 4. 顶层隔震楼板 TMD 结构布置图



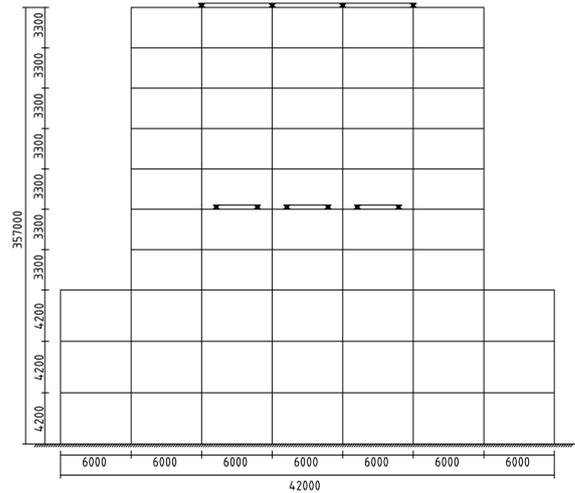
图例 ● 隔震支座 ▨ 隔震楼板 ▩ 柱



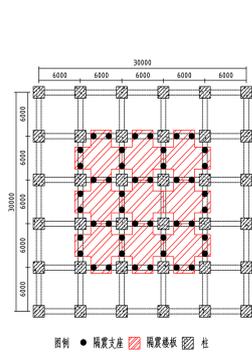
(a) 隔震结构(方案四)



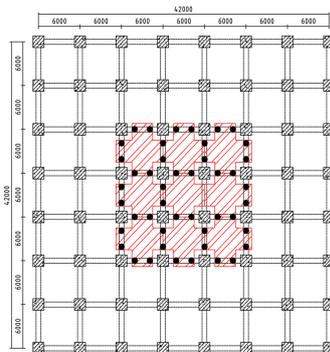
图例 ● 隔震支座 ▨ 隔震楼板 ▩ 柱



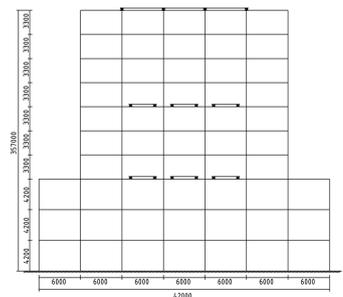
(b) 隔震结构(方案五)



图例 ● 隔震支座 ▨ 隔震楼板 ▩ 柱



图例 ● 隔震支座 ▨ 隔震楼板 ▩ 柱



(c) 隔震结构(方案六)

Figure 5. Layout of TMD (Torsional Mass Damper) structure for multi-story seismic isolation floor  
图 5. 多层隔震楼板 TMD 结构布置图

**Table 3.** Structure period and mass participation coefficient  
**表 3.** 结构周期和振型质量参与系数

| 结构方案             | 振型阶数 | 周期/s  | 振型质量参与系数/% |       |       |
|------------------|------|-------|------------|-------|-------|
|                  |      |       | $U_x$      | $U_y$ | $U_z$ |
| 抗震结构             | 1    | 0.975 | 23.85      | 38.95 | 0     |
|                  | 2    | 0.975 | 38.95      | 23.85 | 0     |
|                  | 3    | 0.819 | 0          | 0     | 0     |
| 楼板隔震 TMD 结构(方案一) | 1    | 1.024 | 18.90      | 33.33 | 0     |
|                  | 2    | 1.024 | 33.33      | 18.90 | 0     |
|                  | 3    | 0.921 | 0          | 0     | 0     |
| 楼板隔震 TMD 结构(方案二) | 1    | 1.273 | 31.77      | 82.96 | 0     |
|                  | 2    | 1.273 | 82.96      | 31.77 | 0     |
|                  | 3    | 1.065 | 0          | 0     | 0     |
| 楼板隔震 TMD 结构(方案三) | 1    | 1.450 | 13.90      | 15.77 | 0     |
|                  | 2    | 1.450 | 15.77      | 13.90 | 0     |
|                  | 3    | 1.263 | 0          | 0     | 0     |
| 楼板隔震 TMD 结构(方案四) | 1    | 1.273 | 11.27      | 0.282 | 0     |
|                  | 2    | 1.273 | 0.282      | 11.27 | 0     |
|                  | 3    | 1.065 | 0          | 0     | 0     |
| 楼板隔震 TMD 结构(方案五) | 1    | 1.273 | 50.85      | 6.71  | 0     |
|                  | 2    | 1.273 | 6.71       | 50.85 | 0     |
|                  | 3    | 1.065 | 0          | 0     | 0     |
| 楼板隔震 TMD 结构(方案六) | 1    | 1.273 | 7.23       | 4.61  | 0     |
|                  | 2    | 1.273 | 4.61       | 7.23  | 0     |
|                  | 3    | 1.065 | 0          | 0     | 0     |

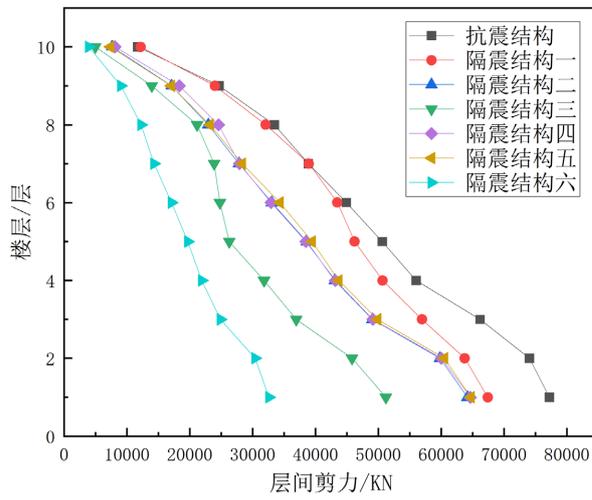
由表 3 可知结构在  $x$ 、 $y$  方向具有对称性，振型呈现双向耦合特征。楼板隔震 TMD 结构在一定程度上延长结构自振周期和控制振动效果，有效提升了结构抗震性能，但需注意长周期可能带来的风荷载或地震共振风险。通过抗震结构与楼板隔震 TMD 结构方案一、二、三对比，发现在延长结构自振周期方面与楼板的质量和布置形式有很大关系。其中楼板隔震 TMD 布置在建筑中心集中放置且质量越大效果更理想，与抗震结构相比，楼板隔震 TMD 结构方案三自振周期平均增加约 0.4 s，集中布置隔震楼板 TMD 结构能有效减少隔震支座的数量。

### 3.3. 罕遇地震下结构响应分析

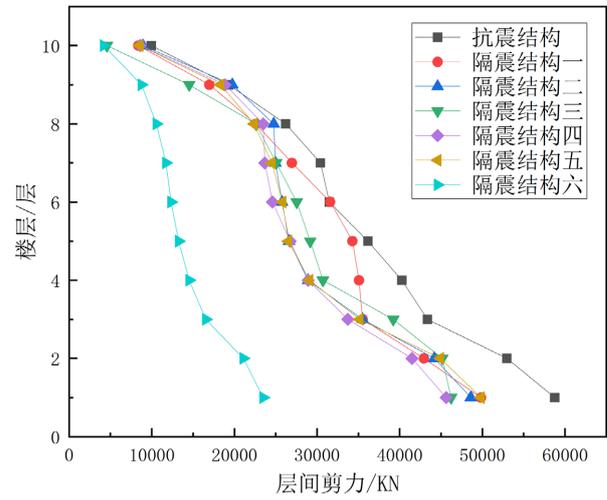
#### 3.3.1. 层间剪力

(1) 如图 6 在所有地震波作用下，抗震结构与隔震结构的层间剪力均呈现“底层大、向上逐层减小”的基本趋势，符合结构地震响应的一般规律。各隔震方案一至六的层间剪力普遍小于抗震结构，尤其在

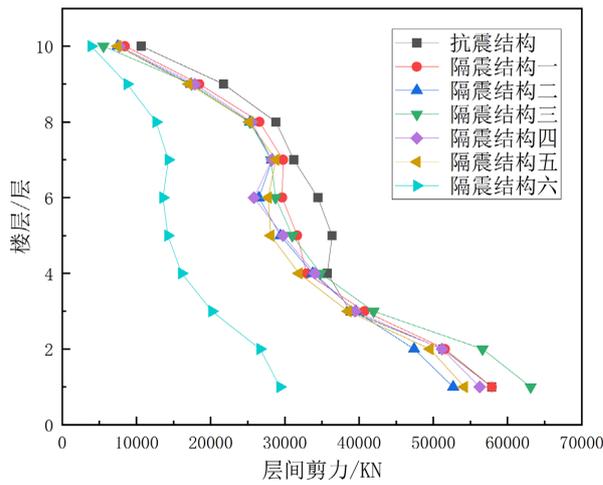
底层(1~3层)差异显著。例如, TR1波作用下, 抗震结构底层剪力约 80,000 kN, 而隔震结构一底层剪力降至约 35000 kN, 降幅达 56%, 表明楼板隔震 TMD 结构有效降低了下部结构的水平地震作用。



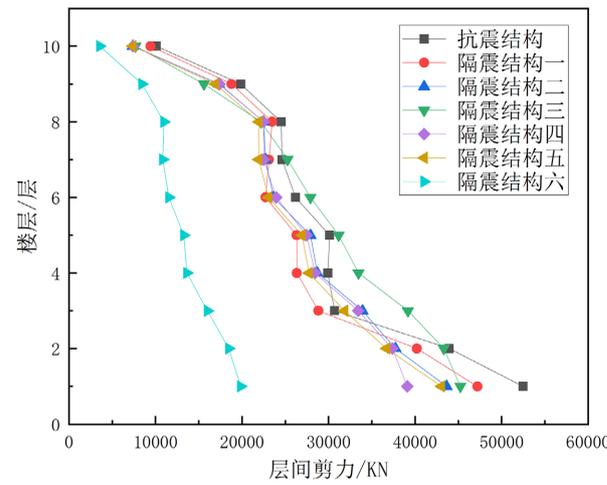
(a) TR1 波



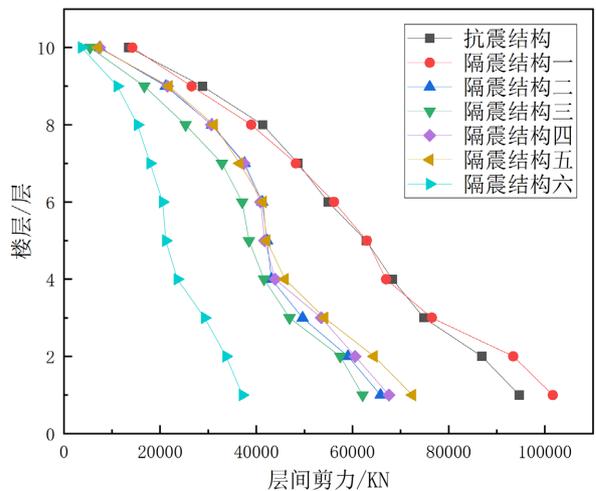
(b) TR2 波



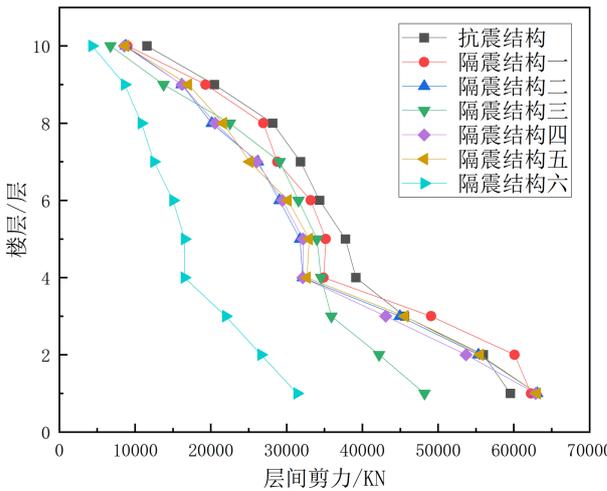
(c) TR3 波



(d) TR4 波



(e) TR5 波



(f) RG1 波

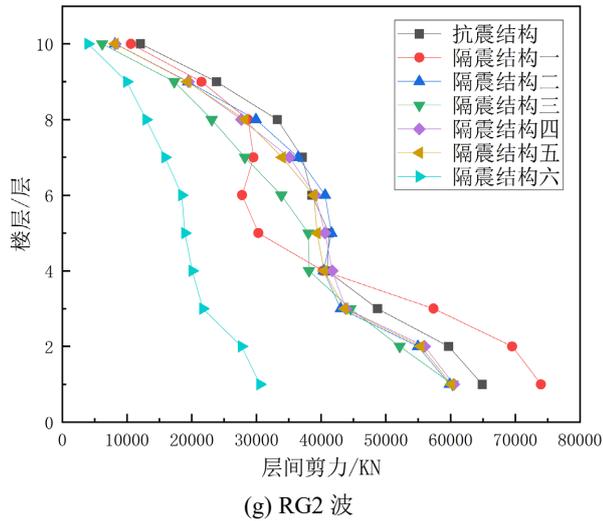


Figure 6. Shear force diagram between structural layers under various seismic waves  
图 6. 各地震波作用下各结构层间剪力图

(2) 不同地震波作用下的最大层间剪力差异明显。例如，TR5 波作用下抗震结构底层剪力约 90,000 kN，而 RG2 波作用下约 60,000 kN，说明地震波的频谱特性(如频率成分、峰值加速度)对结构响应有显著影响。部分地震波(如 TR3 波、RG1 波)在中上部楼层(5~8 层)出现剪力局部增大现象(如隔震结构四在 TR3 波 8 层剪力略高于相邻楼层)，可能因地震波频谱与结构中上部自振周期接近，引发局部共振效应。

(3) 抗震结构各楼层剪力均高于隔震结构，且底层剪力占比最大(约占总剪力的 60%~80%)，设计中需重点加强底部构件的抗剪承载力。隔震结构剪力沿高度分布更均匀，中上部楼层剪力占比相对提高(较抗震结构增加 10%~15%)，需注意隔震层以上结构的层间刚度匹配，避免局部薄弱层。

### 3.3.2. 基底剪力

(1) 隔震技术的减震效率。如图 7 隔震结构基底剪力较抗震结构降低 20%~40%，验证了隔震装置通过隔离上部结构惯性力向基础传递的有效性，尤其在强震波(如 TR5 波)作用下，隔震结构基底剪力仍能控制在 60,000~70,000 kN，显著低于抗震结构的 85,000 kN。

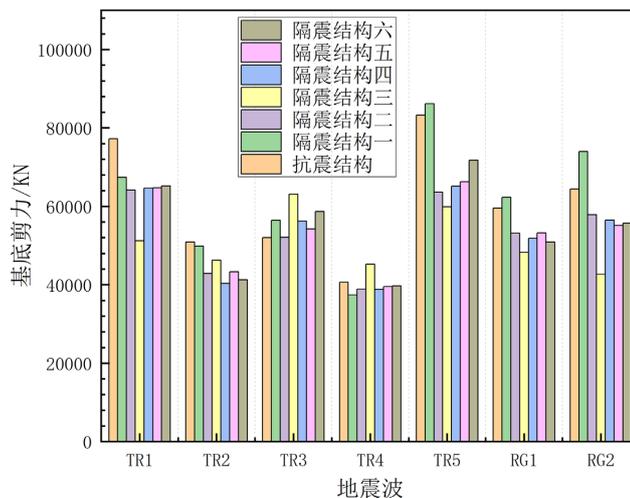


Figure 7. Shear force diagrams of the structural base under various seismic waves  
图 7. 各地震波作用下各结构基底剪力图

(2) 地震波频谱与基底剪力的关联性。如图 7 基底剪力最大值出现在 TR5 波，可能因其频谱特性与结构基本周期接近，引发整体共振效应；而 TR4 波频谱能量分布与结构周期差异较大，导致基底剪力最小，说明地震波与结构动力特性的匹配程度是影响基底剪力的核心因素。

### 3.3.3. 顶层隔震楼板位移

根据图 8 所示同一地震波作用下，不同隔震结构的顶层位移存在差异，这表明隔震装置的刚度、阻尼特性或布置方式不同，会导致顶层位移的差异，部分隔震结构(如隔震结构三、六)在多数地震波下表现出更优的位移控制效果。

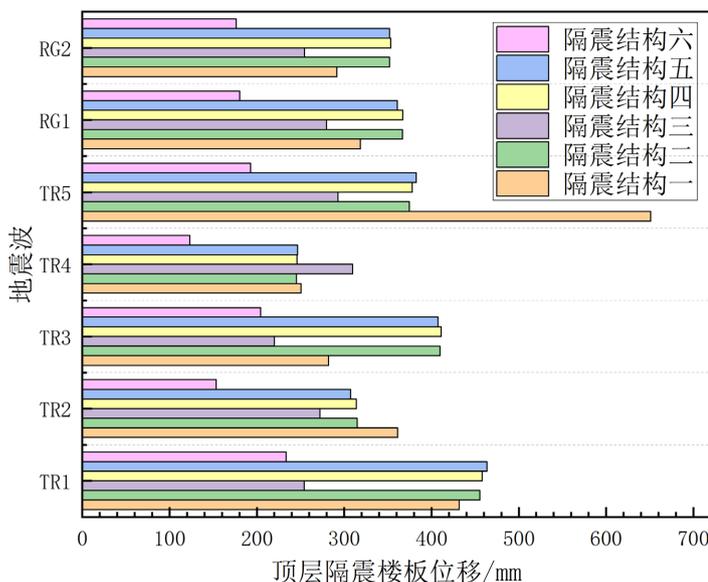


Figure 8. Displacement diagram of each structural top floor

图 8. 地震波作用下各结构顶层隔震楼板位移图

隔震结构三和隔震结构六在多数地震波下位移最小(如 TR4 波中均 $\leq 250$  mm, RG1 波中 $\leq 200$  mm), 推测其楼板隔震装置可能设置更合理或更优的刚度匹配, 能够更有效耗散地震能量, 从而降低顶层楼板的绝对位移。

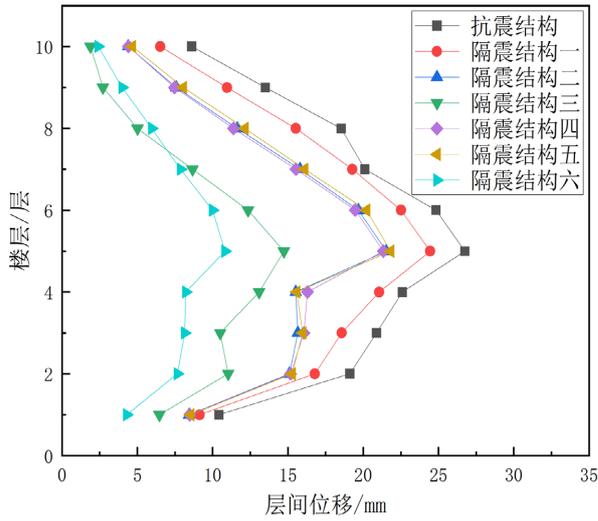
### 3.3.4. 层间位移

(1) 如图 9 楼板隔震 TMD 结构的位移控制效率。如图 7 结构层间位移较抗震结构降低 30%~70%，尤其在 TR5 波作用下，隔震结构最大层间位移控制在 20 mm 以内，远低于抗震结构的 35 mm，验证了隔震装置通过延长结构周期、耗散地震能量以减小层间变形的有效性。

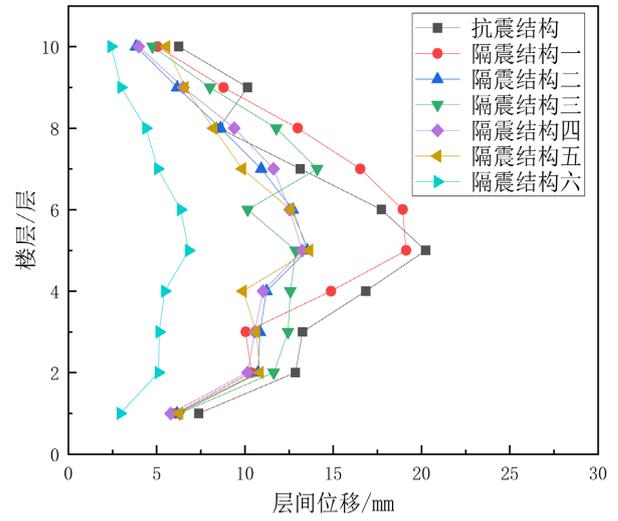
(2) 楼层位置与位移响应的关联性。底层 1~3 层是层间位移的薄弱区域，所有结构类型在底层的位移值均为各楼层最大，且抗震结构与隔震结构的差异最显著(差值可达 15~20 mm)；中高层 4~10 层位移差异逐渐缩小，表明隔震技术对底层变形的控制效果尤为突出。

(3) 地震波频谱与位移幅值的匹配性。高频成分丰富的地震波(如 TR5 波)易引发结构底层共振，导致层间位移激增；而低频波(如 TR4 波)频谱能量分布均匀，结构各楼层位移响应更平缓，说明地震波的频率特性与结构楼层刚度分布的匹配程度是影响层间位移的核心因素。

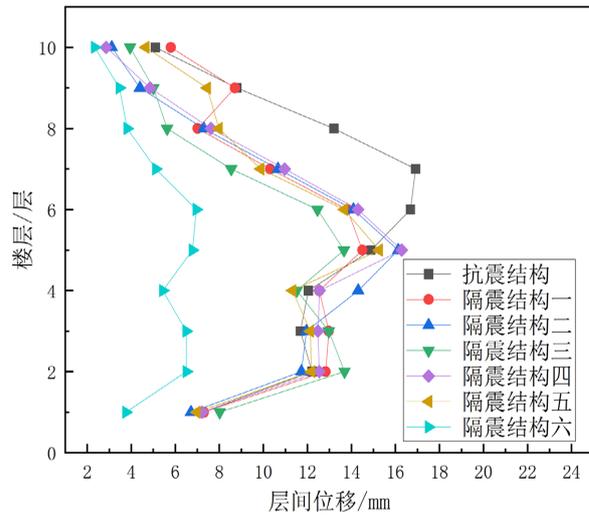
(4) 隔震方案的稳定性。六种隔震结构在相同地震波下的层间位移曲线趋势一致，同一楼层的位移值波动范围较小( $\leq 5$  mm)，表明不同隔震方案对层间变形的控制效果具有良好的一致性。



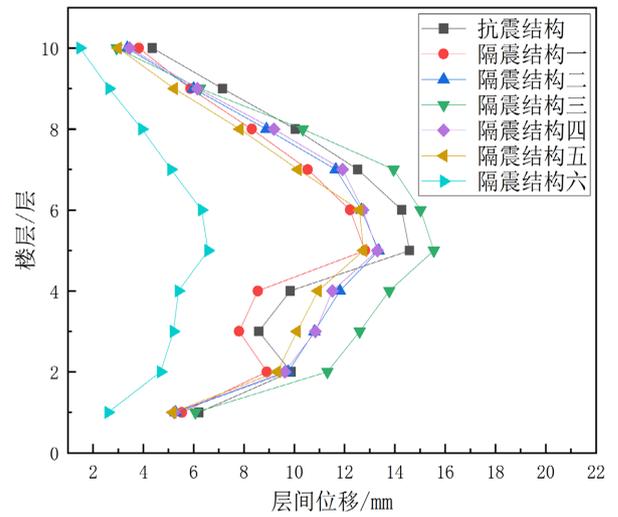
(a) TR1 波



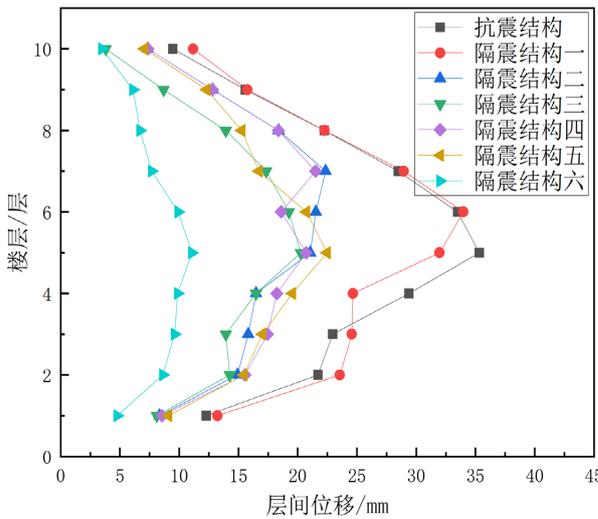
(b) TR2 波



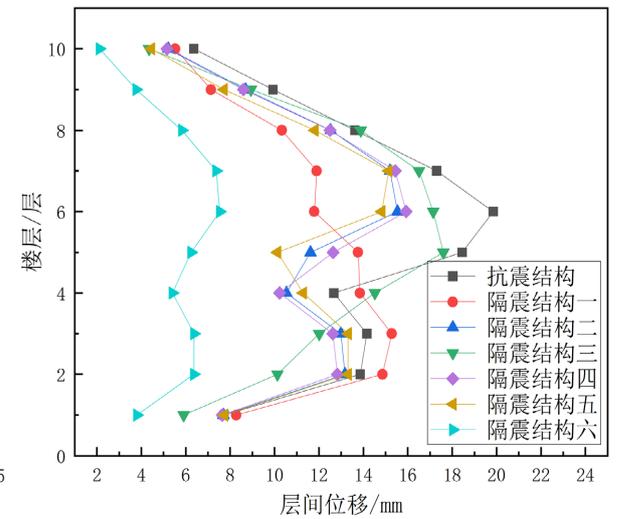
(c) TR3 波



(d) TR4 波



(e) TR5 波



(f) RG1 波

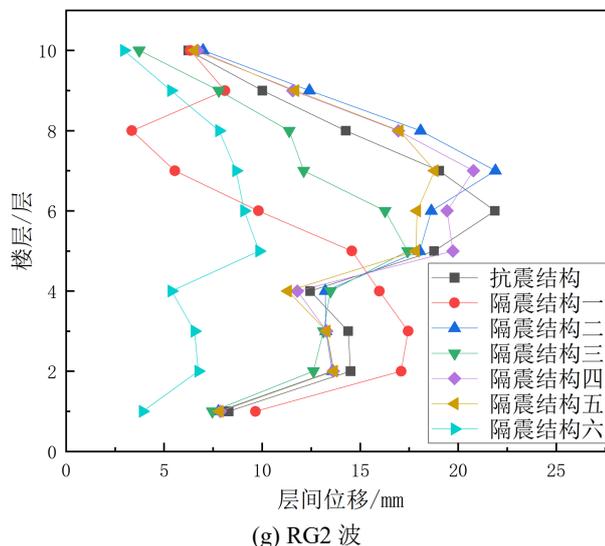


Figure 9. Displacement between structural layers under different seismic waves  
图 9. 各地震波作用下各结构层间位移图

### 3.4. 楼板隔离对框架梁的影响

(1) 有效翼缘宽度减小与抗弯性能退化。楼板与梁协同工作时形成组合 T 形截面，显著提升抗弯刚度和承载力(现浇楼盖中框架梁惯性矩可放大至矩形截面的 2 倍，边框架为 1.5 倍)。隔离后，有效翼缘宽度消失，截面惯性矩回归纯矩形值( $I = I_0$ )，抗弯承载力大幅降低。例如，新增框架梁的底部配筋量因 T 形截面优势可减少约 42%，隔离后需按矩形截面重新设计，配筋需求显著增加，直接影响结构经济性与安全性。

(2) 内力重分布及次生效应。隔离破坏楼板与梁的协同机制，引发内力重分布弯矩转移，支座负弯矩增加 10%~30%，跨中正弯矩减小，导致梁端应力集中，加剧裂缝风险。强柱弱梁机制削弱，楼板钢筋原可分担梁端 15%~25% 的负弯矩承载力，隔离后该贡献消失，降低梁端实际受弯能力，可能逆转“强柱弱梁”的抗震设计目标，增加柱端塑性铰形成概率。

(3) 节点区局部应力集中。内力重分配导致梁柱节点区应力路径改变，翼缘与腹板连接处易产生应力集中。焊缝或螺栓孔周边局部应力峰值升高，可能诱发疲劳损伤或脆性断裂，需通过精细化有限元分析验证节点安全性。

(4) 长期变形与裂缝控制挑战。截面刚度降低导致长期荷载下挠度增大，可能超出规范限值(如  $L/250$ )。同时，梁端弯矩增大使裂缝宽度扩展，影响耐久性。例如，隔离后裂缝宽度增量需通过增加纵向配筋或采用预应力技术控制，否则加速混凝土碳化与钢筋锈蚀。

## 4. 结论

为保障建筑结构的安全，实现减隔震目标同时节约成本。对楼板隔震 TMD 结构的不同方案的减隔震性能进行研究，将抗震结构、楼板隔震 TMD 结构在罕遇地震作用下的地震响应进行了比较，得出主要结论如下：

(1) 隔震结构六方案在延长结构自振周期、控制层间剪力、位移以及减少顶层隔震楼板位移等方面表现出更好的效果。

(2) 以楼板作为 TMD 结构实现减震目标，要考虑放置在顶层，能在延长周期方面具有更好的效果，

多块楼板设置应尽量放在结构中心且对称放置, 这样能更好地达到减震效果。

(3) 楼板隔震 TMD 技术通过延长周期、优化布置(集中质量)和耗散能量, 显著降低结构地震响应剪力、位移, 但需关注地震波频谱匹配性及局部共振风险, 楼板隔震 TMD 设计与隔震装置参数优化是关键控制因素。

(4) 楼板隔离对框架梁的影响是系统性的, 需从截面属性、内力分配、节点强化及耐久性四维度综合评估, 确保抗震性能与使用功能。

## 参考文献

- [1] 翁大根, 蒋通, 施卫星, 等. 隔震楼面设计研究[J]. 地震工程与工程振动, 2002(1): 92-100.
- [2] Ye, K. and Nyangi, P. (2021) Enhancing the Seismic Performance of Dual-Isolated Structure with Optimal Supplemental Inerters. *Bulletin of Earthquake Engineering*, **21**, 1651-1684. <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01279-7>
- [3] 雷传章. 带浮筑楼板层间隔震结构设计及抗震性能分析[J]. 广东土木与建筑, 2022, 29(6): 52-55.
- [4] Mahmoud, H. and Chulahwat, A. (2015) Response of Building Systems with Suspended Floor Slabs under Dynamic Excitations. *Engineering Structures*, **104**, 155-173. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.09.027>
- [5] Engle, T., Mahmoud, H. and Chulahwat, A. (2015) Hybrid Tuned Mass Damper and Isolation Floor Slab System Optimized for Vibration Control. *Journal of Earthquake Engineering*, **19**, 1197-1221. <https://doi.org/10.1080/13632469.2015.1037406>
- [6] Cheng, Z., Ma, H., Shi, Z. and Jia, G. (2022) An Inerter Enhanced Floating Floor Structure for Seismic Hazard Mitigation. *Journal of Building Engineering*, **52**, Article 104353. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104353>
- [7] Fayyadh, N.K. and Hejazi, F. (2022) Hybrid Rubber-Concrete Isolation Slab System with Various Shape Factors for Structures Subjected to Horizontal and Vertical Vibrations. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, **32**, e1995. <https://doi.org/10.1002/tal.1995>
- [8] Walsh, K.K., Marin-Artieda, C. and McElroy, K. (2024) Adaptive Passive Seismic Isolation System for Mitigating the Acceleration Response of Floor-Mounted Equipment. *Journal of Structural Engineering*, **150**. <https://doi.org/10.1061/jsendh.steng-12688>
- [9] 洗巧玲, 刘建安, 周福霖. 楼板隔震消能结构体系[J]. 地震工程与工程振动, 2007(4): 147-151.
- [10] 洗巧玲, 刘建安, 周福霖. 楼板隔震消能结构的振动台试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2008(3): 145-151.
- [11] 曹嘉利, 洗巧玲, 蔡荫. 楼板隔震消能结构体系的参数优化[J]. 广州大学学报(自然科学版) 2012, 11(3): 54-58.
- [12] 伍羚. 多层楼板隔震消能结构体系参数的优化[J]. 知识经济, 2010(13): 106-107.
- [13] 相阳, 杨熙玲, 李国强. 黏弹性减震楼盖与传统楼盖钢框架抗震性能对比研究[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(11): 36-45+57.
- [14] 赵阳, 翁大根, 任晓崧, 等. 复摩擦摆支座应用于楼面隔震研究[J]. 结构工程师, 2012, 28(1): 73-81.
- [15] 杨佳慧, 郑年文, 操雪倩, 等. 柱端与楼板不同连接方式对结构地震响应的影响研究[J]. 城市建筑, 2020, 17(3): 162-167+170.
- [16] 潘超, 姜明月, 张瑞甫, 等. 惯容减震系统的速度最小化设计原理[J/OL]. 振动工程学报, 1-10. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1349.TB.20240801.1550.002>, 2024-12-06.
- [17] 裴星洙, 孙健杰. 以带肋楼板为质量块形式的 TMD 设计方法研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(16): 166-175+194.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50009-2012 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ 3-2010 高层建筑混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑出版社, 2010.
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50011-2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑出版社, 2010.
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50223-2008 建筑工程抗震设防分类标准[S]. 北京: 中国建筑出版社, 2008.