

偶数层平台连接双塔住宅结构地震响应特征分析

陆芳, 李慧峰*, 桑健航, 马殿磨

西南林业大学土木工程学院, 云南 昆明

收稿日期: 2026年5月25日; 录用日期: 2026年6月17日; 发布日期: 2026年6月26日

摘要

本文以某22层钢筋混凝土框架-剪力墙住宅结构为研究对象, 采用盈建科软件建立单塔独立模型和偶数层平台连接双塔整体模型, 对两种模型的自振周期、楼层位移、层间位移角及内力响应进行对比分析。计算结果显示: 双塔平台连接模型第一周期为1.4075 s, 略大于单塔模型的1.3980 s; X向顶部位移较单塔模型增加约7.5%, Y向顶部位移较单塔模型减小约1.4%; X向和Y向最大层间位移角分别为1/1212和1/1079, 均满足弹性层间位移角限值1/800的要求。双塔模型基底剪力较单塔模型明显增大, Y向框架柱倾覆力矩占比由0.9%提高至7.8%, 说明平台连接对框架-剪力墙协同工作性能具有一定影响。分析表明, 偶数层平台连接会改变双塔住宅结构的地震响应特征, 设计中应重点关注平台楼层及其相邻楼层的变形和内力变化。

关键词

偶数层平台, 双塔住宅结构, 地震响应

Analysis of Seismic Response Characteristics of Twin-Tower Residential Structure with Even-Floor Connecting Platforms

Fang Lu, Huifeng Li*, Jianhang Sang, Dianmo Ma

College of Civil Engineering, Southwest Forestry University, Kunming Yunnan

Received: May 25, 2026; accepted: June 17, 2026; published: June 26, 2026

*通讯作者

文章引用: 陆芳, 李慧峰, 桑健航, 马殿磨. 偶数层平台连接双塔住宅结构地震响应特征分析[J]. 土木工程, 2026, 15(6): 110-119. DOI: 10.12677/hjce.2026.156161

Abstract

This paper takes a 22-story reinforced concrete frame-shear wall residential structure as the research object. A single-tower model and a twin-tower overall model with even-floor connecting platforms are established using YJK software, and their natural vibration periods, floor displacements, inter-story drift ratios, and internal force responses are compared. The results show that the first period of the twin-tower model is 1.4075 s, slightly larger than 1.3980 s of the single-tower model. The top displacement of the twin-tower model increases by about 7.5% in the X direction and decreases by about 1.4% in the Y direction compared with the single-tower model. The maximum inter-story drift ratios in the X and Y directions are 1/1212 and 1/1079, respectively, both satisfying the elastic drift limit of 1/800. The base shear of the twin-tower model is significantly larger than that of the single-tower model, and the Y-direction overturning moment ratio carried by frame columns increases from 0.9% to 7.8%, indicating that the connecting platforms have a certain influence on the cooperative behavior of the frame-shear wall system. The analysis indicates that even-floor connecting platforms can alter the seismic response characteristics of twin-tower residential structures, and the deformation and internal force variations of platform floors and their adjacent stories should be carefully considered in design.

Keywords

Even-Floor Platform, Twin-Tower Residential Structure, Seismic Response

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

随着高层住宅建筑形式的不断发展,双塔住宅结构和连体结构在工程实践中的应用逐渐增多。连接平台或连廊除了承担交通联系、空间过渡及公共活动等建筑功能外,还会改变两侧塔楼之间的约束关系,进而影响结构整体刚度、质量分布和地震作用传递路径。已有研究表明,连体结构因设置连接体,塔楼之间会产生一定耦联作用,结构动力特性、层间位移角、层间剪力以及连接部位内力等指标均可能随之改变[1]。因此,分析连接平台对双塔结构地震响应的影响,对类似工程的抗震设计具有一定实际意义。

连接方式、连接刚度及连接构件布置形式,是影响连体结构抗震性能的重要因素。李泽雨等对无连廊模型和不同连廊连接方式模型进行了对比分析,认为连廊连接方式会影响结构模态、最大层间位移角、最大层间剪力及连接处内力分布[1]。王鑫等针对平台式连体不规则结构开展研究,指出其层间位移角、基底剪力等地震响应指标受结构布置和减震措施影响较为明显[2]。蔡正等对非对称双塔连体结构进行混合消能减震分析,认为连接体的设置会使结构受力状态更加复杂,连体部位及其相邻楼层应作为抗震设计中的重点区域[3]。这些研究从连接方式、连接刚度和减震措施等方面揭示了连体结构的地震响应特征,为相关结构的抗震设计提供了参考。

不过,现有研究多集中于顶层连廊、不等高塔楼、复杂高层连体结构或消能减震体系,对于普通住宅结构中多层重复设置连接平台的双塔结构,讨论仍相对有限。与单一连廊连接不同,偶数层连续平台会在多个楼层形成重复连接约束,其对结构侧向变形、平台层及相邻楼层变形协调、内力分配变化等方面的影响具有一定特殊性。基于此,本文选取某22层钢筋混凝土框架-剪力墙双塔住宅结构为对象,通

过建立单塔独立模型与偶数层平台连接双塔整体模型进行对比,分析多层平台重复约束对结构动力特性、侧向变形及内力分配的影响,并结合计算结果提出平台构件布置、连接节点加强及抗震墙设置等设计建议,为类似平台连接双塔住宅结构的抗震分析与结构优化提供参考。

2. 工程概况与模型建立

本文选取某 22 层钢筋混凝土住宅结构作为研究对象,如图 1 所示,该结构采用框架-剪力墙结构体系,地下室为 1 层。工程抗震设防烈度为 8 度,设计基本地震加速度取 $0.20g$,设计地震分组为第三组,场地类别为 II 类,特征周期为 $0.45s$,结构阻尼比取 0.05 。相关抗震设计参数按《建筑抗震设计标准》确定,结构整体控制指标则按《高层建筑混凝土结构技术规程》执行[4][5]。

为了分析偶数层连接平台对双塔住宅结构地震响应的影响,本文利用盈建科建筑结构设计软件建立了两个计算模型,一个为单塔独立模型,另一个为偶数层平台连接双塔整体模型。地震作用计算采用振型分解反应谱法。单塔独立模型主要用来反映单个塔楼在独立工作状态下的地震响应,双塔平台连接模型则用来分析两塔通过平台连接并形成整体协同体系后的地震响应。两个模型采用相同的材料参数、设防参数和计算方法,这样可以使后续对比结果更具有可比性。

在双塔整体模型中,如图 2 所示,偶数层连接平台布置在第 2、4、6、8、10、12、14、16、18、20 层。平台跨度结合建筑功能和平面布置确定,结构形式采用钢筋混凝土梁板体系,并与两侧塔楼主体结构刚性连接。地震作用下,连接平台会承担两塔之间的水平力传递和变形协调作用,因此其布置位置可能会影响平台楼层及相邻楼层的层间位移角和构件内力。已有研究认为,连廊与塔楼之间的连接方式会影响双塔连体结构的地震响应[1]。基于此,本文主要分析偶数层刚性平台连接条件下双塔整体模型的地震响应特征。

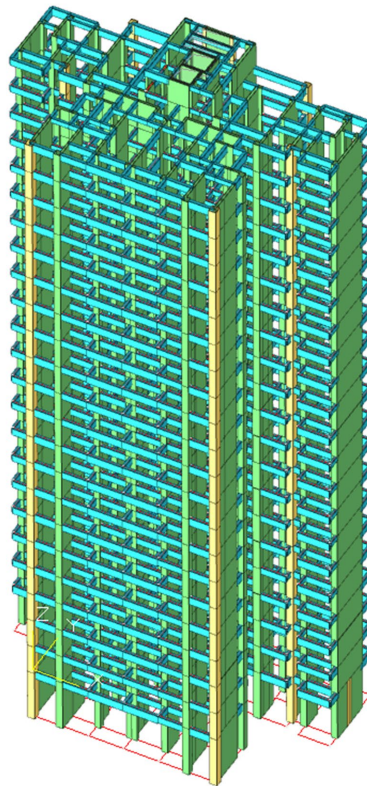


Figure 1. 3D diagram of the standalone single-tower model
图 1. 单塔独立模型三维图

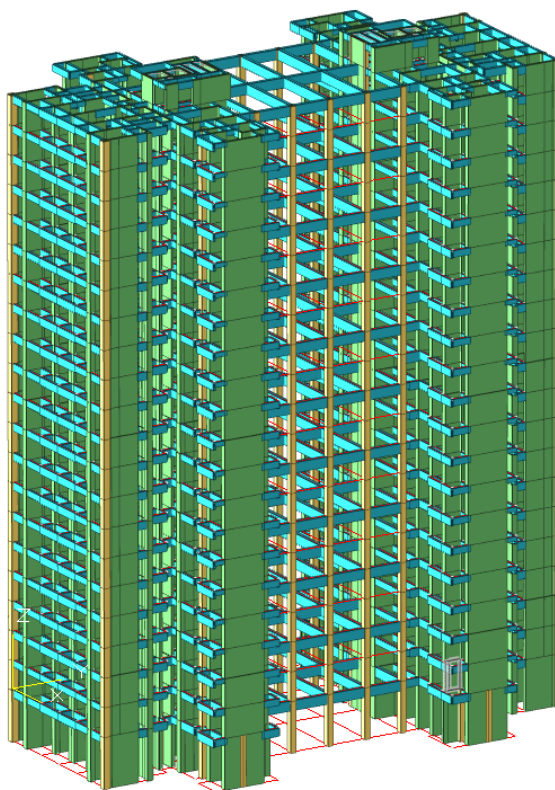


Figure 2. 3D model of the independent twin towers
图 2. 双塔独立模型三维图

3. 动力特性分析

结构模态分析结果见表 1。单塔模型的第一周期为 1.3980 s，对应振型主要为 Y 向平动；第二周期为 1.1814 s，对应振型主要为 X 向平动；第三周期为 1.1485 s，主要表现为扭转振型。该模型 X 向有效质量系数为 91.51%，Y 向有效质量系数为 90.31%，两个方向均超过 90%，说明所取振型能够满足结构地震反应分析要求。按照《高层建筑混凝土结构技术规程》的相关规定，结构各振型参与质量之和不应小于总质量的 90%，A 级高度高层建筑扭转周期比不宜大于 0.9 [5]。

双塔平台连接模型的第一周期为 1.4075 s，第一振型同样以 Y 向平动为主；第二周期为 1.2394 s，主要表现为 X 向平动；第三周期为 1.1814 s，表现为扭转振型。该模型 X 向和 Y 向有效质量系数分别为 91.03% 和 91.01%，均达到 90% 以上。其扭转周期比为 0.839，小于 A 级高度高层建筑 0.9 的限值，说明双塔平台连接模型的周期比和振型参与质量均满足规范要求。

Table 1. Comparison of modal analysis results

表 1. 模态分析结果对比

| 模型 | 第一周期/s | 第一振型 | 第二周期/s | 第二振型 | 第三周期/s | 第三振型 | 扭转周期比 |
|----------|--------|-------|--------|-------|--------|------|-------|
| 单塔独立模型 | 1.3980 | Y 向平动 | 1.1814 | X 向平动 | 1.1485 | 扭转 | 0.821 |
| 双塔平台连接模型 | 1.4075 | Y 向平动 | 1.2394 | X 向平动 | 1.1814 | 扭转 | 0.839 |

从表 1 可以看出，单塔模型和双塔平台连接模型的前两阶振型均为 Y 向平动和 X 向平动。也就是说，设置偶数层连接平台后，结构的主要振动方向没有发生明显改变。对比周期数值可知，双塔平台连

接模型的第一周期由单塔模型的 1.3980 s 增至 1.4075 s，第二周期由 1.1814 s 增至 1.2394 s，周期数值均有一定增加，说明平台连接后结构整体质量和刚度分布发生了变化，结构动力特性也随之受到影响。

从增幅来看，第一周期约增加 0.7%，第二周期约增加 4.9%，第二周期变化更加明显。这一结果表明，连接平台对 X 向动力特性的影响相对更大，可能与双塔整体质量增加以及连接平台在 X 向的连系刚度相对有限有关。总体来看，偶数层平台连接后，双塔整体模型仍以平动振型为主，扭转周期比也满足规范要求，结构动力特性处于合理范围内。

4. 地震响应分析

4.1. 楼层位移响应

X 向楼层位移对比曲线见图 3。从图 3 可以看出，两种模型的 X 向楼层位移均随着楼层高度增加而增大，最大位移都出现在结构顶部，整体变形形式符合高层框架 - 剪力墙结构常见的弯曲型变形特征。单塔模型 X 向顶部最大位移为 45.49 mm，双塔平台连接模型为 48.90 mm，双塔模型比单塔模型约增加 7.5%。这一结果说明，在 X 向地震作用下，平台连接模型的顶部位移反而有所增大。

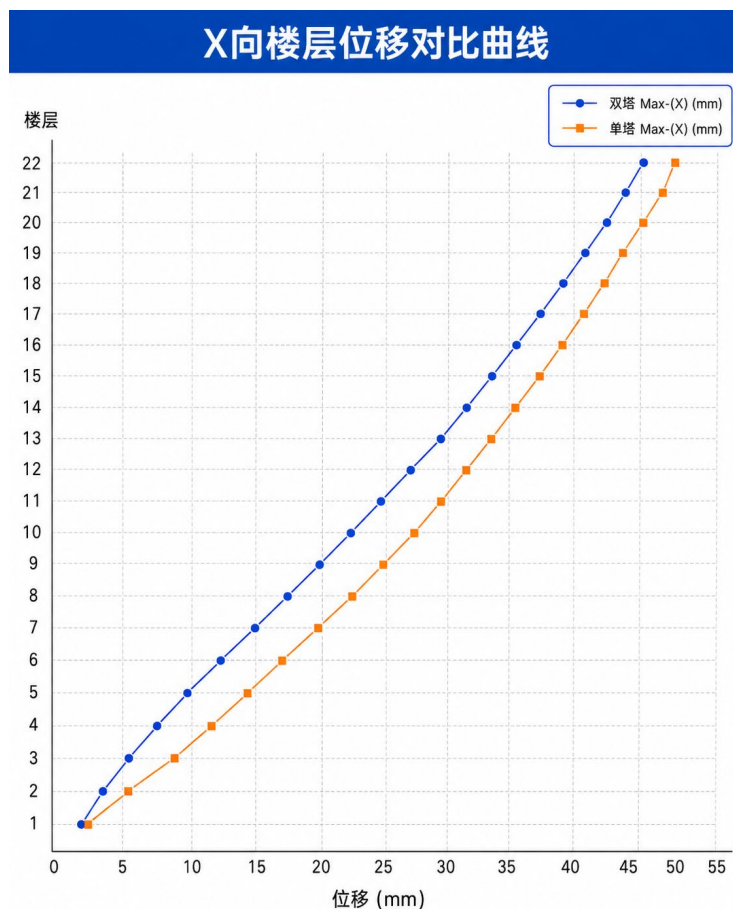


Figure 3. Comparison curve of X-direction floor displacement

图 3. X 向楼层位移对比曲线

产生这种情况的原因，可能与双塔整体模型质量增加有关。模型质量增大后，结构所受地震作用也会相应提高；同时，连接平台在 X 向能够提供的附加刚度有限，不能完全抵消质量增加带来的影响，所

以 X 向楼层位移出现了一定增大。由此可以看出，偶数层平台连接对 X 向整体侧向变形的控制效果并不明显。

Y 向楼层位移对比曲线见图 4。从图 4 可以看出，两种模型的 Y 向楼层位移也随楼层高度增加而增大，顶部楼层位移最大。与 X 向相比，Y 向楼层位移的整体数值更大，表明该结构在 Y 向地震作用下的侧向变形更为明显。单塔模型 Y 向顶部最大位移为 59.76 mm，双塔平台连接模型为 58.94 mm，双塔模型较单塔模型减小约 1.4%。

从计算结果看，平台连接后 Y 向顶部位移略有降低，说明连接平台对该方向的整体侧向变形具有一定控制作用，但改善幅度较小。综合 X 向和 Y 向位移结果可以看出，偶数层平台连接对结构侧向变形的影响具有一定方向差异。平台连接一方面增加了结构整体质量和地震作用，另一方面也增强了两塔之间的变形协调能力，因此其作用并不表现为单纯的位移减小。后续设计中，应结合不同方向的位移响应特点，进一步关注平台连接区域及其相邻楼层的刚度协调和构件内力变化。

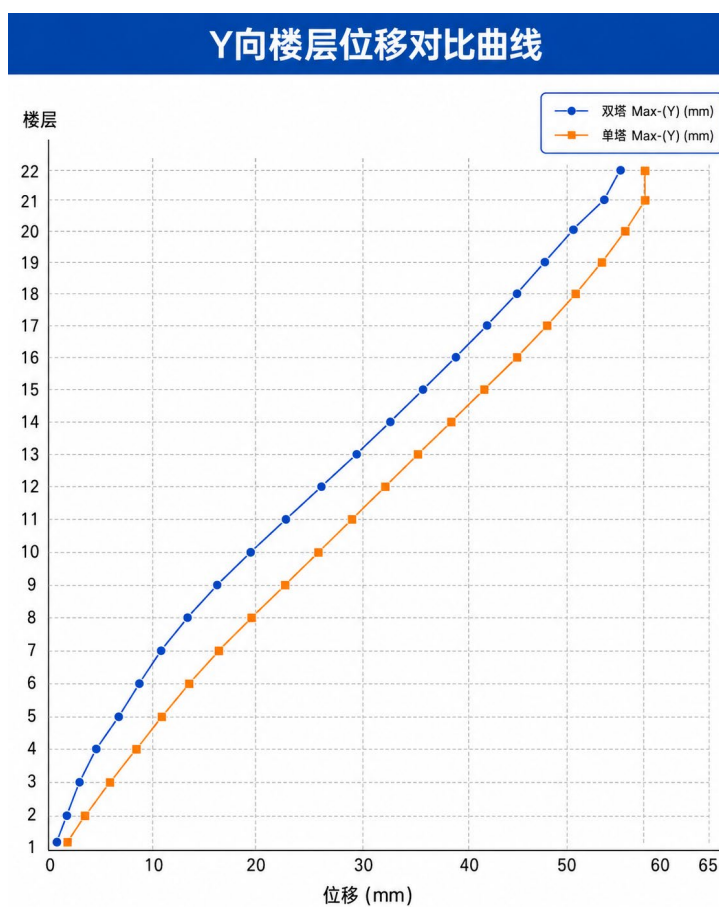


Figure 4. Comparison curve of Y-direction floor displacement

图 4. Y 向楼层位移对比曲线

4.2. 层间位移角响应

X 向地震作用下的层间位移角对比曲线见图 5。从图 5 可以看出，两种模型的 X 向层间位移角沿结构高度方向均表现出先增大、后减小的变化规律，最大值均出现在第 7 层。单塔模型 X 向最大层间位移角为 1/1295，双塔平台连接模型为 1/1212。对于分数形式表示的层间位移角，分母越小，实际位移角越

大，因此双塔平台连接模型的 X 向层间位移角更大，说明该模型在 X 向局部楼层变形方面相对不利。

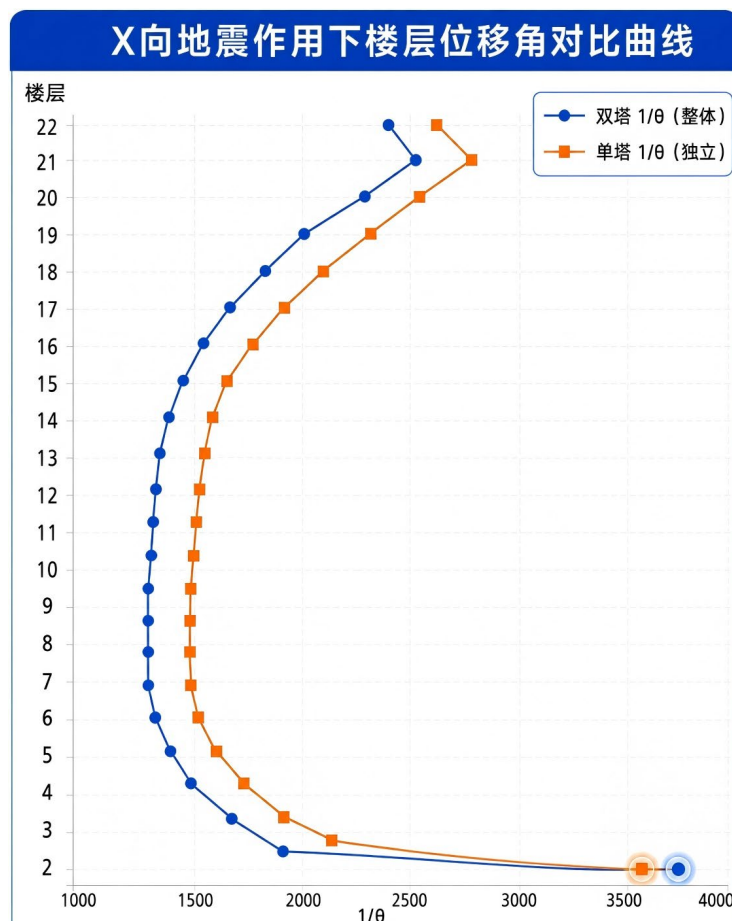


Figure 5. Comparative curve of interlayer displacement angles under X-direction seismic forces
图 5. X 向地震作用下层间位移角对比曲线

从楼层位置看，第 7 层并不是直接设置连接平台的楼层，但连接平台布置在第 6 层和第 8 层等偶数层，第 7 层正好位于相邻连接楼层之间，可能会受到平台刚度变化和变形协调作用的影响，从而出现一定的局部变形集中。虽然双塔平台连接模型的 X 向最大层间位移角略大于单塔模型，但其数值仍小于框架-剪力墙结构弹性层间位移角限值 $1/800$ ，满足规范要求[4] [5]。

Y 向地震作用下的层间位移角对比曲线见图 6。从图 6 可以看出，两种模型的 Y 向层间位移角在底部楼层较小，随着楼层升高逐渐增大，并在结构中部楼层附近达到最大值。单塔模型 Y 向最大层间位移角为 $1/1041$ ，双塔平台连接模型为 $1/1079$ ，二者均小于 $1/800$ 的规范限值，满足弹性层间位移角要求。相比之下，双塔平台连接模型的 Y 向最大层间位移角略小，说明平台连接后 Y 向层间变形得到了一定控制。

从最大层间位移角出现位置来看，X 向最大值位于第 7 层，该层处于第 6 层和第 8 层连接平台之间，说明连续平台连接可能使平台层与相邻非平台层之间产生局部刚度差异和变形协调问题。Y 向最大层间位移角出现在第 12 层，接近中部平台连接区域，也反映出平台布置对结构中部楼层变形分布具有一定影响。因此，偶数层平台连接双塔结构除应满足整体层间位移角限值外，还应重点关注平台层及其上下相邻楼层的局部变形、内力传递以及连接构件受力变化。

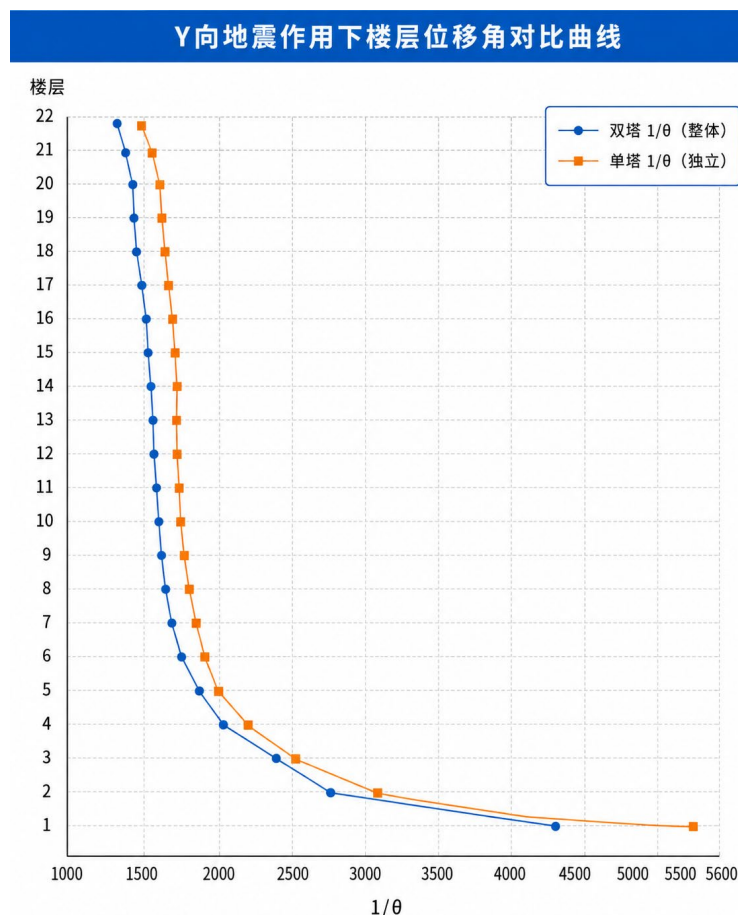


Figure 6. Comparative curve of interlayer displacement angles under Y-direction seismic forces
图 6. Y 向地震作用下层间位移角对比曲线

5. 内力响应及关键指标分析

5.1. 基底剪力与剪重比

为进一步评价结构抗震性能，将两种模型的层间位移角、剪重比、扭转周期比和有效质量系数等指标汇总如表 2 所示。

Table 2. Comparison of key seismic performance indicators

表 2. 关键抗震指标对比

| 抗震指标 | 双塔平台连接模型 | 单塔独立模型 | 规范限值 | 判断 |
|------------|----------|--------|-------|----|
| X 向最大层间位移角 | 1/1212 | 1/1295 | 1/800 | 满足 |
| Y 向最大层间位移角 | 1/1079 | 1/1041 | 1/800 | 满足 |
| X 向剪重比 | 6.87% | 7.11% | 3.20% | 满足 |
| Y 向剪重比 | 6.12% | 6.07% | 3.20% | 满足 |
| 扭转周期比 | 0.839 | 0.821 | 0.9 | 满足 |
| X 向有效质量系数 | 91.03% | 91.51% | 90% | 满足 |
| Y 向有效质量系数 | 91.01% | 90.31% | 90% | 满足 |

注：扭转周期比限值按 A 级高度高层建筑要求取 0.9；剪重比限值按 8 度、0.20 g 设防取 3.20%。

表 2 汇总了两种模型的主要抗震指标。从表中数据可以看出, 双塔平台连接模型和单塔独立模型在最大层间位移角、剪重比、扭转周期比以及有效质量系数等方面均满足规范限值要求。其中, 双塔模型 X 向最大层间位移角略大于单塔模型, 而 Y 向最大层间位移角略小于单塔模型, 说明平台连接对 X、Y 两个方向的地震响应影响并不完全相同。进一步比较双塔模型的两个方向可知, Y 向最大层间位移角为 1/1079, 比 X 向的 1/1212 更接近 1/800 的限值, 因此 Y 向可作为该结构抗震变形控制方向。

两种模型基底剪力和剪重比对比见表 3。

Table 3. Comparison of the base shear force and the shear-to-weight ratio

表 3. 基底剪力和剪重比对比

| 模型 | X 向基底剪力/kN | Y 向基底剪力/kN | X 向剪重比 | Y 向剪重比 |
|----------|------------|------------|--------|--------|
| 单塔独立模型 | 16817.4 | 14351.4 | 7.11% | 6.07% |
| 双塔平台连接模型 | 36764.8 | 32759.2 | 6.87% | 6.12% |

表 3 给出了两种模型的基底剪力和剪重比结果。可以看出, 双塔平台连接模型在 X 向和 Y 向的基底剪力均明显大于单塔模型, 主要原因是双塔整体模型的结构质量更大, 参与地震作用的构件数量也更多, 地震作用总量随之增加。

从剪重比结果来看, 双塔模型 X 向剪重比为 6.87%, 略低于单塔模型的 7.11%; Y 向剪重比为 6.12%, 略高于单塔模型的 6.07%。总体上, 两种模型在 X、Y 两个方向的剪重比均大于 3.20% 的规范限值, 满足最小地震剪力要求[4] [5]。

5.2. 倾覆力矩与平台局部响应

从框架柱倾覆力矩分担情况来看, 单塔模型底层 Y 向框架柱倾覆力矩占比为 0.9%, 而双塔平台连接模型提高到 7.8%。这一变化说明, 平台连接后两塔之间的空间协同作用有所加强, 框架柱参与整体抗倾覆的程度提高了, 框架 - 剪力墙结构的协同工作性能也得到一定改善。

框架柱倾覆力矩占比的提高, 也反映出连接平台对框架 - 剪力墙结构的受力分配产生了影响。因此, 在实际设计中, 不能只验算整体位移和层间位移角, 还需要关注连接平台附近框架梁、平台板、墙柱节点以及框架柱的内力变化, 防止连接部位出现局部受力集中。

偶数层连接平台在地震作用下会承担两塔之间的水平力传递和变形协调作用, 连体梁、平台板以及平台与塔楼相连的节点都有可能产生较大内力。已有研究表明, 不同连廊连接方式会影响双塔连体结构的层间位移角、层间剪力和连接处构件内力, 弱连接方式与固定铰支座或刚性支座等强连接方式相比, 能够降低连接处构件内力[6]。本文采用的是偶数层刚性平台连接模型, 因此更应对平台梁板、连接节点及相邻楼层构件内力进行重点验算。

综合楼层位移、层间位移角、剪重比和倾覆力矩分配结果可以看出, 偶数层连接平台使双塔结构形成整体协同工作体系, 同时也改变了结构地震响应特征。平台连接对 Y 向楼层位移和层间位移角具有一定控制作用, 但 X 向楼层位移和层间位移角有所增大, 说明平台对不同方向侧向变形的影响并不一致。由于平台层及其相邻楼层可能存在刚度突变、变形集中和内力集中的风险, 后续有必要结合平台结构形式和构件布置进行进一步优化。

5.3. 平台连接结构优化建议

结合前述分析, 双塔平台连接模型虽然整体抗震指标满足规范要求, 但 X 向顶部位移和最大层间位移角较单塔模型有所增大, 且最大层间位移角出现在相邻平台层之间, 说明平台连接区域及其上下楼层

仍有进一步优化的必要。

在平台结构形式方面,本文模型采用钢筋混凝土梁板平台并与两侧塔楼刚性连接,整体性较好,但平台梁板和连接节点在地震作用下可能承担较大内力。对于跨度较大或两塔变形差异明显的工程,可结合建筑功能和抗震要求,对钢筋混凝土平台、钢结构平台或钢-混凝土组合平台等形式进行比选,以兼顾结构自重、连接刚度和构件延性[7][8]。

在构件布置方面,平台主梁、边梁、楼板及连接节点应具有可靠的承载力和延性。对于层间位移角较大的平台相邻楼层,可适当加强平台梁板截面和节点构造,优化平台与主体结构之间的传力路径,减少局部刚度突变引起的变形集中。

此外,可根据结构变形控制需求适当调整抗震墙布置。计算结果显示,双塔平台连接后X向变形相对不利,可在平台连接区域附近、塔楼端部或核心筒周边适当增设抗震墙,以提高X向抗侧刚度。但抗震墙设置应注意结构平面规则性,避免局部刚度过大导致扭转效应增大。综上,偶数层平台连接双塔住宅结构的优化可从平台结构选型、平台梁板及节点加强、抗震墙布置调整等方面展开,以改善结构整体变形协调能力和局部构件受力性能。

6. 结论

通过对单塔独立模型与偶数层平台连接双塔整体模型进行对比分析可知,平台连接后结构周期、位移响应及内力分配均发生一定变化,但扭转周期比、有效质量系数和层间位移角等整体抗震指标均满足规范要求,说明本文模型在弹性地震作用下整体抗震性能基本满足设计要求。平台连接对结构侧向变形的影响具有一定方向差异,其中X向顶部位移和最大层间位移角有所增大,表明平台连接对该方向变形控制效果有限;Y向顶部位移和最大层间位移角略有减小,说明平台连接对两塔变形协调具有一定作用。由于X向最大层间位移角出现在相邻平台层之间,工程设计中应重点关注平台层及其上下相邻楼层的局部变形、平台梁板和连接节点内力变化。对于X向变形相对不利或平台连接部位内力较大的情况,可从平台结构形式比选、平台梁板及连接节点加强、构件布置优化和抗震墙布置调整等方面进行改进;必要时可结合建筑平面和结构受力特点,在平台连接区域附近、塔楼端部或核心筒周边适当增设抗震墙,以提高结构抗侧刚度,但应避免局部刚度突变和扭转效应增大。本文主要基于反应谱法和整体响应指标进行分析,后续可进一步结合平台节点精细化分析、关键构件内力包络及施工顺序影响等问题开展深入研究。

参考文献

- [1] 李泽雨,王向英,王立峰,等. 连廊连接方式对不等高双塔连体结构抗震性能的影响[J]. 青岛理工大学学报, 2026, 47(1): 45-52, 125.
- [2] 王鑫,李慧峰,戴必辉,等. 阻尼器布置方式对平台式连体不规则结构减震影响研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2024, 46(2): 24-32, 67.
- [3] 蔡正,潘文,周强,等. 基于混合消能减震技术非对称双塔连体结构抗震性能研究[J]. 振动与冲击, 2024, 43(6): 288-300.
- [4] 王鑫,李慧峰,都来盼. 基于设置粘滞阻尼器的钢筋混凝土框架结构耗能减震分析[J]. 建筑技术开发, 2022, 49(21): 7-9.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 50011-2010 建筑抗震设计标准(2024年版)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2024.
- [6] 徐培福,肖从真,王翠坤,等. 复杂高层建筑结构设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [7] 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: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 50010-2010 混凝土结构设计标准(2024年版)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2024.