

连廊连接方式对不等高双塔连体结构抗震性能的影响

李泽雨¹, 王向英^{1,*}, 王立峰², 席涛¹, 王振超¹

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525; 2. 青岛方硕建筑科技有限公司, 青岛 266100)

摘要:为研究连廊与塔楼连接方式对大跨度连廊不等高双塔连体结构抗震性能的影响,以某工程为原型,以无连廊和采用摩擦摆支座、双向弹簧支座、固定铰支座与刚性支座 5 种连接工况模型为研究对象,基于 ETABS 软件输入 7 条地震波进行三向地震作用下的时程分析,系统考察了各模型在模态、最大层间位移角、最大层间剪力及连接处内力等方面的差异。结果表明连接方式对连廊布置在顶层塔楼的地震响应产生的影响更大,与无连廊模型相比,采用摩擦摆支座或双向弹簧支座的弱连接方式可有效地减小 2 座塔楼的地震响应;与采用固定铰支座或刚性支座的强连接方式相比,弱连接方式能有效降低连接处构件的内力。

关键词:抗震性能;连体结构;连接方式

中图分类号: TU973⁺. 3; TU311. 3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4602(2026)01-0045-08

DOI: 10. 3969/j. issn. 1673-4602. 2026. 01. 006

Influence of corridor connection method on seismic performance of unequal-height interconnected towers

LI Zeyu¹, WANG Xiangying^{1,*}, WANG Lifeng², XI Tao¹, WANG Zhenchao¹

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China;

2. Qingdao Fangshuo Construction Technology Co., Ltd., Qingdao 266100, China)

Abstract: To investigate the impact of connection modes between the corridor and the tower on the seismic performance of large-span corridor structures with unequal-height twin towers, based on a certain project, this study takes five types of connection models as research objects: one without a corridor, and four with corridors connected using friction pendulum bearings, bidirectional spring bearings, hinge bearings and rigid bearings, respectively. Using ETABS, time-history analyses were conducted under three-dimensional seismic action inputting seven seismic waves. The differences among the models in terms of modal results, the maximum inter-story displacement angle, the maximum inter-story shear force and internal forces at the connections were systematically investigated. The results show that the connection mode has a greater impact on the seismic response of the corridor arranged on the top floor tower. Compared to the model without a corridor, the weak connection method using friction pendulum bearings or bidirectional spring bearings can effectively reduce the

收稿日期: 2025-01-15

基金项目: 国家自然科学基金(52178488; 52408340)

作者简介: 李泽雨(2000—), 男, 河北肃宁人。硕士, 研究方向为结构工程。E-mail: lzy13131783107@163.com。

* 通信作者: 王向英(1972—), 男, 黑龙江呼兰人。博士, 副教授, 主要从事结构减振及试验技术方面的研究。

E-mail: wangxiangying_qut@163.com。

seismic response of the two towers. In contrast to strong connection method of using hinge bearings or rigid bearings, the weak connection method can effectively lower the internal forces in the connecting components.

Key words: seismic performance; connected structure; connection type

与独栋塔楼相比,连体结构受力性能复杂,对结构分析和设计要求更高^[1]。缪志伟等^[2]、黄坤耀等^[3]探究了连接位置和连体刚度对双塔连体结构地震响应的影响。庞迎波^[4]、CHEN等^[5]、MAKITA等^[6]研究了连接处阻尼器对连体结构消能减震的影响。WEI等^[7]为双塔连体结构开发了一种新型柔性连接技术。卞朝东等^[8]建立了某双塔连体结构在水平地震作用下的动力方程。MENG等^[9]基于简化模型分析了不等高塔楼刚度比和质量比对整体结构动力特性的影响。李虎林等^[10]对“门”形教学楼连体结构进行了弹塑性分析,并提出了加强措施。谭光宇等^[11]对单塔楼和对称双塔连体结构进行了对比分析。孔慧等^[12]对钢管混凝土框架-钢筋混凝土核心筒结构体系的不等高双塔高位连体结构进行了大震弹塑性时程分析。徐自国等^[13]对北京当代 MOMA 工程中环形超大规模复杂连体结构进行了考虑隔震支座非线性性质的地震响应分析,发现采用隔震支座减弱了连接体对主体结构的影响。YUAN等^[14]研究了连接体位置对三塔连体结构动力响应的影响,发现地震激励的位置变化对结构塔楼的位移时程和最大位移影响不大,但对加速度时程和最大加速度值的影响明显。

当前,双塔连体结构的研究多聚焦于连廊跨度较小、连接方式简单的情况,而针对大跨度及采用复杂连接方式的结构研究则较为有限。本文以某大跨度且斜向布置连廊不等高双塔连体结构为原型,利用 ETABS 建立该结构有限元模型,进行模态分析和地震激励下动态特征分析,研究不同连接方式对结构抗震性能的影响,为此类的连体结构抗震设计提供参考。

1 工程概况

某工程主体为 2 座框架结构塔楼,首层平面布置相同,长 66.1 m、宽 18.3 m。T1 塔楼高 28.2 m,为 6 层;T2 塔楼高 45.0 m,为 10 层。由于建筑功能需要,在 4、5 层设有大跨度空中连廊,连廊采用钢结构桁架,跨度为 69.0 m,结构整体布置如图 1 所示。2 座塔楼在 4 层底部安装摩擦摆支座与连廊底部边缘连接,根据《建筑摩擦摆隔震支座》(GB/T 37358—2019)^[15]第 4.2 条,摩擦摆支座参数如表 1 所示。为防止连廊倾覆坠落,在连廊中间层增加碟形弹簧,与塔楼 5 层底部相连,碟形弹簧的刚度为 3000 kN/m。

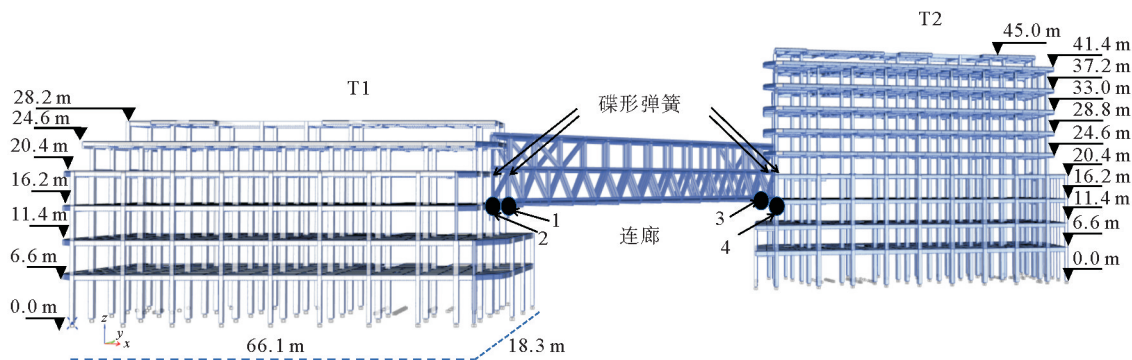


图 1 连体结构布置

表 1 摩擦摆支座参数

支座编号	连廊重力荷载 P_0/kN	设计承载力 P/kN	屈服位移 d_y/mm	初始刚度 $k_p/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	屈服后刚度 $k_c/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	等效刚度 $k_{\text{eff}}/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$
1	3 276	6 000	2.5	96 000	1 973	3 173
2	1 947	4 000	2.5	64 000	1 315	2 115
3	2 034	4 000	2.5	64 000	1 315	2 115
4	3 376	6 000	2.5	96 000	1 973	3 173

2 模型建立

为了研究大跨度斜向布置连廊与塔楼的连接方式对连体结构模态特征及地震响应的影响,设计了 5 种模型:无连廊模型、摩擦摆模型、双向弹簧模型、铰接模型和刚接模型。无连廊模型不布置连廊,仅在支座位置施加连廊重力荷载 P_0 ;而其他 4 种模型则在连接处采用不同类型的支座,包括摩擦摆支座、双向弹簧支座、固定铰支座和刚性支座,其中摩擦摆支座和双向弹簧支座属于弱连接方式,固定铰支座和刚性支座则属于强连接方式。依据摩擦摆支座等效刚度 k_{eff} 和《建筑钢结构球型支座》(GB/T 32836—2016)^[16] 第 4.6 条,采用双向弹簧支座时,将支座编号 1 和 4 的弹性刚度定为 3500 kN/m,支座编号 2 和 3 的弹性刚度定为 2500 kN/m。

采用 ETABS 软件建模,其中梁和柱使用 Frame(框架)单元,楼板采用 Membrane(膜)单元,摩擦摆支座采用 Friction Isolator 单元(ETABS 模拟摩擦摆的专用单元),双向弹簧支座、固定铰支座和刚性支座采用 Linear(线性)单元,碟形弹簧采用 Gap(间隔)单元。同时采用 YJK 软件建模,对比分析结果,以验证模型准确性。YJK 软件建模时,连体结构的梁和柱采用框架单元,楼板建模采用弹性膜单元。连接处支座的模拟采用 YJK 软件中的两点约束模块:摩擦摆支座采用摩擦摆类型,双向弹簧支座、固定铰支座和刚性支座采用线性类型,碟形弹簧采用间隔类型。详细建模单元信息如表 2 所示。两种软件中模型的主体钢筋混凝土结构的阻尼比取 5%,连廊的钢结构取 1%,在模型楼板上布置恒荷载和活荷载,结构恒荷载和活荷载系数分别为 1.0 和 0.5。

表 2 建模单元

单元名称	单元作用	单元特点
框架单元 (Frame)	模拟梁、柱和支撑等。	三维线性单元,具有 12 个自由度,选择性释放某些自由度,可模拟不同种类杆件。
膜单元 (Membrane)	模拟楼板、厂房顶面。	只具有平面内刚度,仅能承受平面内的力和法向弯矩;可传递水平荷载(如地震、风荷载),将均布线荷载传递至周边框架。
线性单元 (Linear)	模拟构件间的连接,如刚接、铰接等,也可以模拟刚性杆。	可固定或释放单个方向的自由度分量,可传递力、弯矩,或仅允许特定方向的位移。
间隔单元 (Gap)	模拟接触行为,处理结构中的间隙或接触问题,模拟碟形弹簧只能受压的特性。	间隙未闭合时,单元法向刚度极小,不影响结构的自由运动;间隙闭合时,单元法向刚度显著增大,阻止间隔的两个单元面相互穿透。

3 模型对比验证

分别对 ETABS 和 YJK 软件建立的刚接模型进行抗震设防烈度为 7 度、设计基本地震加速度为 0.1g 的多遇地震下振型分解反应谱分析。考虑双向地震作用,主方向 X 与次方向 Y 之比为 1:0.85,《建筑抗震设计标准》(GB/T 50011—2010)^[17] 第 5.2.2 条要求结构扭转振型较明显且振型间存在较强的耦联时,应当采用完全平方根法(CQC 法)进行振型组合。ETABS 和 YJK 刚接模型反应谱分析都采用 CQC 法,两种软件分析结果如表 3 所示,模型前 3 阶振型如图 2 所示。分析发现,ETABS 和 YJK 两种软件刚接模型的质量和周期相差在 6% 以内,同阶振型中关键振动区域比较吻合;基底最大剪力、首层最大倾覆弯矩等指标相差均小于 10%。两种软件的反应谱法分析结果接近,验证了连体结构模型的准确性。

表3 ETABS和YJK刚接模型反应谱分析结果

分析参数	软件名称		差距
	ETABS	YJK	
计算振型数	52	52	0%
第一平动周期/s	1.032(X向)	1.087(X向)	5.3%
第二平动周期/s	0.829(Y向)	0.861(Y向)	3.9%
第一扭转周期/s	0.723	0.759	5.0%
周期比	0.701	0.698	0.4%
结构总质量/t	45 612.3	46 658.9	2.3%
有效质量系数	93.7%(X向)	94.5%(X向)	0.8%
	92.7%(Y向)	93.2%(Y向)	0.6%
基底最大剪力/kN	67 696.5(X向)	71 374.0(X向)	5.4%
	62 013.3(Y向)	66 285.9(Y向)	6.9%
首层最大倾覆弯矩/(kN·m)	1 594 432.0(X向)	1 738 173.9(X向)	9.0%
	1 622 537.3(Y向)	1 749 742.6(Y向)	7.8%

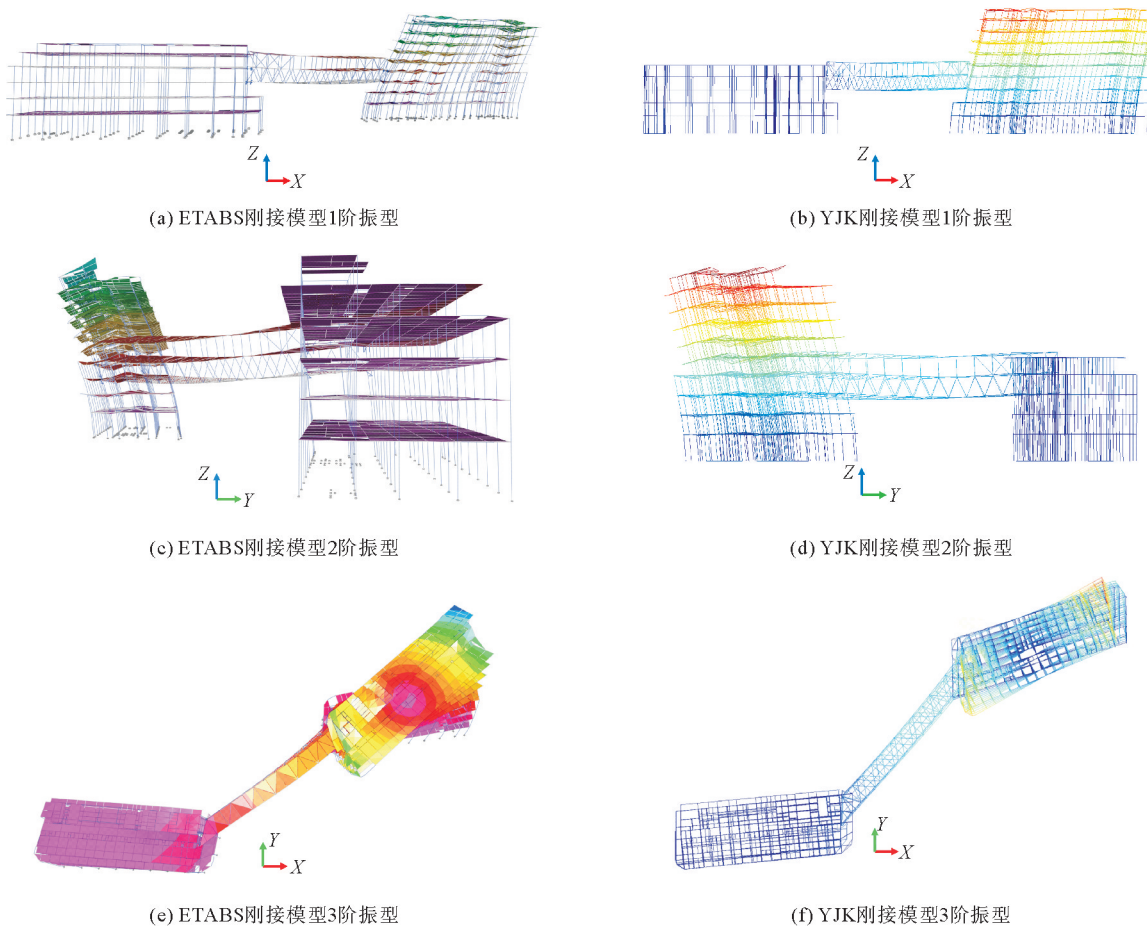


图2 ETABS和YJK刚接模型前3阶振型

4 模态结果分析

不同连接工况的模型前9阶振型周期如表4所示,为连廊及2座塔楼的一阶X、Y向平动及绕Z向扭转振型周期。对比不同模型周期结果得到以下结论:

1) 当连接方式一致时,ETABS 与 YJK 建立的模型在各阶周期的模拟结果均表现出较好的一致性,计算误差整体控制在 5%以内,进一步验证了连体结构有限元模型的准确性。

2) 采用弱连接方式的摩擦摆模型和双向弹簧模型,1—3 阶为连廊的一阶 X、Y 向平动和扭转振型;4—9 阶则为 2 座塔楼的一阶 X、Y 向平动和扭转振型。与无连廊模型单塔的一阶 X、Y 向平动和扭转振型周期(1—6 阶)对比发现,采用弱连接方式的模型周期(4—9 阶)有所降低。这是由于连廊的斜向布置,在连廊和支座的影响下,塔楼的振动都将受到另一个塔楼的影响,这种帮扶作用使 2 座塔楼平动和扭转刚度都有所提升。摩擦摆模型和双向弹簧模型各阶振型中关键振动区域较为吻合。因为参照《建筑钢结构球型支座》(GB/T 32836—2016)选择双向弹簧支座的刚度比摩擦摆支座的等效刚度略大,所以双向弹簧模型比摩擦摆模型各阶振型周期有所降低。

3) 采用强连接方式的铰接模型和刚接模型,各阶振型中关键振动区域较为吻合。前 6 阶为 2 座塔楼的一阶 X、Y 向平动和扭转振型,且塔楼任一方向振动均会引起另一座塔楼局部的振动。由于连廊为大跨度钢结构,相较于 2 座塔楼,各方向刚度明显较小,即使支座采用强连接方式,模型的振型也没有出现 2 座塔楼由于连廊而一起振动的情况。刚性支座比固定铰支座约束更强,所以刚接模型比铰接模型各阶振型周期有所降低。

表 4 不同模型振型周期

s

振型	无连廊模型		摩擦摆模型		双向弹簧模型		铰接模型		刚接模型	
	ETABS	YJK	ETABS	YJK	ETABS	YJK	ETABS	YJK	ETABS	YJK
1	1.043	1.098	1.980	1.998	1.971	1.983	1.034	1.089	1.032	1.087
2	0.856	0.881	1.410	1.414	1.369	1.372	0.832	0.863	0.829	0.861
3	0.740	0.772	1.124	1.132	1.078	1.103	0.726	0.760	0.723	0.759
4	0.518	0.545	1.039	1.092	1.036	1.090	0.529	0.538	0.511	0.533
5	0.416	0.455	0.844	0.875	0.834	0.869	0.466	0.476	0.445	0.459
6	0.348	0.387	0.731	0.768	0.727	0.761	0.391	0.408	0.380	0.399
7	0.300	0.308	0.499	0.539	0.469	0.529	0.340	0.346	0.329	0.335
8	0.236	0.244	0.400	0.446	0.390	0.424	0.312	0.327	0.302	0.310
9	0.229	0.229	0.337	0.374	0.325	0.344	0.298	0.311	0.288	0.292

5 不同连接方式结构时程分析

5.1 地震动选取

本工程结构设计工作年限为 50 年,抗震设防类别为乙类,设防烈度为 7 度,设计基本地震加速度值为 0.1g,场地类别为 II 类,特征周期为 0.35 s。参照模态结果中 2 座塔楼一阶 X、Y 向平动和绕 Z 向扭转振型周期,选取 5 组天然波及 2 组人工波共 7 组地震加速度时程,利用 ETABS 软件对无连廊模型、摩擦摆模型、双向弹簧模型、铰接模型和刚接模型进行设防地震下的弹性时程分析。每个工况主、次和竖向(即 X、Y 和 Z 向)峰值加速度比为 1:0.85:0.65,主方向分量的峰值加速度为 100 cm/s²,地震波信息如表 5 所示。由图 3 可知,7 条地震波平均反应谱与规范反应谱相差不大于 20%(周期处于

表 5 地震加速度时程信息

编号	名称	间隔/s	持续时间/s
N01	ElMayor-Cucapah, Mexico	0.005	58.62
N02	Chuetsu-oki, Japan	0.010	59.15
N03	Chi-Chi, Taiwan NO_1325, China	0.005	47.15
N04	Iwate, Japan	0.010	55.78
N05	Chi-Chi, Taiwan NO_3164, China	0.005	48.76
N06	人工波 1	0.020	30.02
N07	人工波 2	0.020	30.02

0.3~2.1 s), 所选地震波符合《建筑抗震设计标准》(GB/T 50011—2010)^[17]第 5.1.2 条及条文说明要求。

5.2 塔楼最大层间位移角分析

设防地震作用下连体结构的 2 座塔楼在 7 组地震动下的最大层间位移角平均值如图 4 所示, 分析发现:

1) 由于工程设计原因, 2 座塔楼顶层刚度明显下降, 导致它们顶部的最大层间位移角出现变大的情况。

2) 采用弱连接方式的摩擦摆模型和双向弹簧模型, 最大层间位移角普遍小于无连廊模型。这是因为采用弱连接方式时, 连廊在塔楼间产生的帮扶作用使得 2 座塔楼的最大层间位移角均减小。

3) 采用强连接方式的铰接模型和刚接模型, T1 塔楼 Y 向的最大层间位移角小于采用弱连接方式的模型, T2 塔楼规律正好相反。这是因为强连接方式下连廊对 2 座塔楼的耦联作用强于弱连接方式, 导致不同连接方式下 2 座塔楼的刚度分布不同。

4) 在连接层附近, 采用强连接方式的模型 X 向最大层间位移角变化趋势与采用弱连接方式的模型存在显著差异, 而 Y 向的变化趋势则较为接近。这是因为 2 座塔楼的 Y 向刚度大于 X 向, 连廊连接方式的改变对塔楼刚度较弱的 X 向最大层间位移角造成的影响更大。

5) 不同连接方式对 T1 塔楼最大层间位移角的影响大于 T2 塔楼, 这是因为 T1 塔楼比 T2 塔楼的连廊布置位置更靠近顶层, 连廊更容易对 T1 塔楼产生影响。

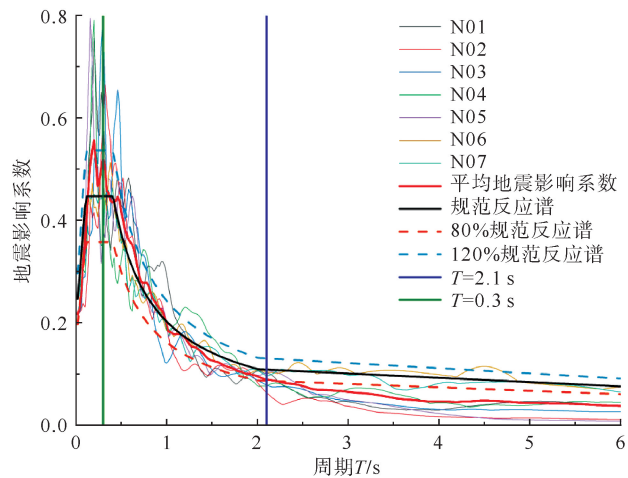


图 3 各地震波反应谱与规范反应谱对比

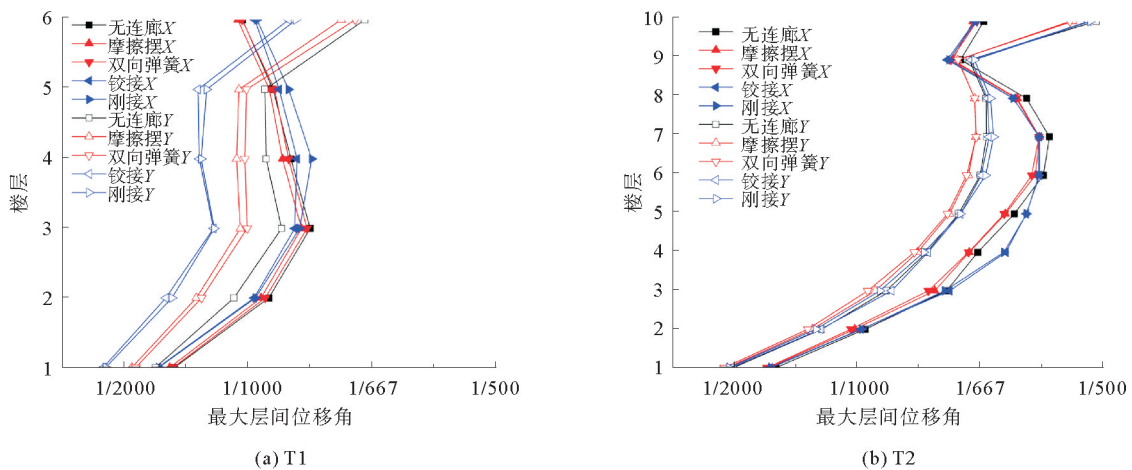


图 4 塔楼最大层间位移角平均值

5.3 塔楼最大层间剪力分析

设防地震作用下连体结构的 2 座塔楼在 7 组地震动下的最大层间剪力平均值如图 5 所示, 分析发现:

1) 与无连廊模型相比, 采用弱连接方式的摩擦摆模型和双向弹簧模型各方向最大层间剪力有一定降低。

2) 与采用弱连接方式的模型相比, 采用强连接方式的铰接模型和刚接模型 T1 塔楼 Y 方向最大层间剪力降低, T2 塔楼规律正好相反。这说明强连接方式更容易改变 2 座塔楼的刚度分布, 进而对最大层间剪力造成更大影响。

3) 在连接层附近,采用强连接方式的模型塔楼的 X 向最大层间剪力变化趋势与采用弱连接方式的模型存在显著差异,而 Y 向的变化趋势则较为接近。说明连廊连接方式的改变对塔楼刚度较弱的 X 向最大层间剪力造成的影响更大。

4) 采用弱连接方式时,与双向弹簧模型相比,摩擦摆模型中 2 座塔楼 X、Y 向最大层间剪力均有所减小。采用强连接方式时,与刚接模型相比,铰接模型中 2 座塔楼 X 向最大层间剪力均有所减小,Y 向最大层间剪力值近似。说明采用相同种类连接方式下,支座约束越弱,2 座塔楼的最大层间剪力普遍越小。

5) 不同连接方式对 T1 塔楼最大层间剪力的影响大于 T2 塔楼,这是因为 T1 塔楼比 T2 塔楼的连廊布置位置更靠近顶层,连廊更容易对 T1 塔楼产生影响。

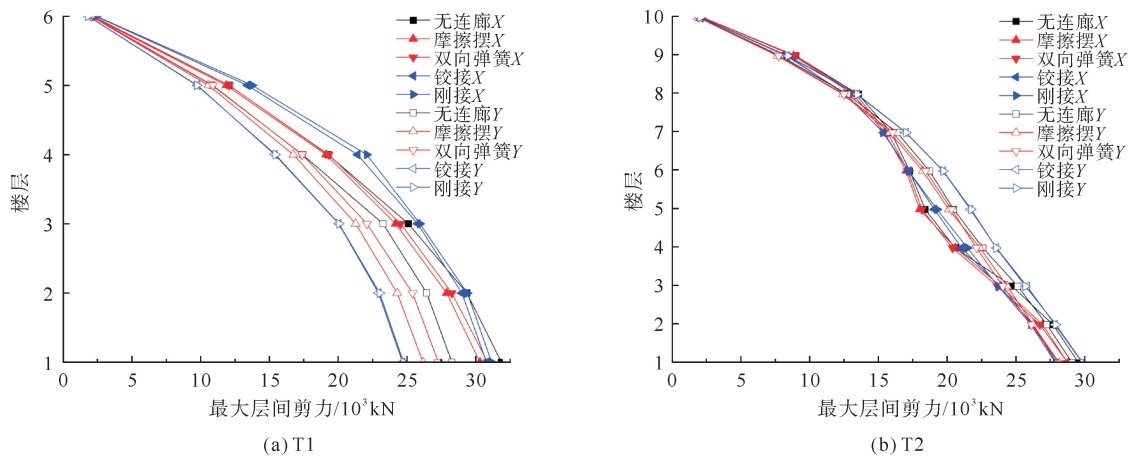


图 5 塔楼最大层间剪力平均值

5.4 连接处内力分析

文献研究表明连体结构的薄弱部位处于连廊与塔楼连接处的预埋锚固端^[18],据此提取本工程的薄弱部位,即安装支座的连接处,该处构件在 7 条地震波下不同方向的最大受力如表 6 所示。分析发现采用弱连接方式比强连接方式的模型,连接处构件受到的水平力平均减小了 94.4%,竖向力平均减小了 38.6%,说明支座采取弱连接方式可以明显改善工程薄弱部位受力状态。

表 6 不同连接方式下连接处内力对比

kN

支座编号	水平向力				竖向力			
	摩擦摆	双向弹簧	铰接	刚接	摩擦摆	双向弹簧	铰接	刚接
1	303.1	550.0	4884.7	6480.2	4195.0	4365.6	7726.5	6341.2
2	339.7	395.1	7753.1	8050.5	2656.0	2598.4	4845.4	5081.1
3	328.4	430.9	5953.4	8866.2	2518.7	2655.1	4723.0	3878.7
4	497.3	593.0	9724.3	9482.4	4417.4	4645.1	6483.3	6571.1
平均值	367.1	492.3	7078.9	8219.8	3446.8	3566.1	5944.5	5468.0

6 结论

为探究连廊连接方式对不等高双塔连体结构的影响,本文设计了无连廊、采用摩擦摆支座或双向弹簧支座的弱连接方式、采用固定铰支座或刚性支座的强连接方式,共 5 种连接工况模型,进行了模态分析和地震激励下动态特征分析,得到以下结论:

1) 弱连接方式下,由于连廊斜向布置,连体结构塔楼任一方向的振动都将受到另一个塔楼的影响,这种帮扶作用有利于降低塔楼各阶周期。强连接方式下,模型塔楼任一方向振动均会引起另一座塔楼局部

的振动。采用相同种类连接方式下,2种模型各阶振型中关键振动区域较为吻合,且结构振型周期随支座约束的增强而降低。

2) 与无连廊模型相比,在采用弱连接方式的模型中2座塔楼的最大层间位移角和剪力均减小;在采用强连接方式的模型中,由于不等高的2座塔楼受到连廊作用效果不同,连廊布置在顶部的T1塔楼Y向最大层间位移角和剪力均减小,连廊布置在中部的T2塔楼Y向最大层间位移角和剪力均增大。采用相同种类连接方式下,支座约束越弱,2座塔楼的最大层间剪力普遍越小。

3) 在连接层附近,在采用强连接方式的模型中2座塔楼的X向最大层间位移角和剪力变化趋势与采用弱连接方式的模型存在显著差异,而Y向的变化趋势则较为接近。连廊连接方式的改变对2座塔楼刚度较弱的X向最大层间位移角和剪力造成的影响更大。

4) 相比强连接方式,采用弱连接方式的模型连接处构件在地震下的水平向和竖向力有不同程度的降低。

参考文献(References):

- [1] 吴宏磊,丁洁民,刘博. 连体结构受力性能分析与工程实践[J]. 建筑结构,2022,52(14):7-16.
WU Honglei,DING Jiemin,LIU Bo. Mechanical behavior analysis and engineering practice of conjoined structure[J]. Building Structure,2022,52(14):7-16.
- [2] 缪志伟,马栋梁,张志强,等. 含摩擦摆高位连体结构抗震性能数值分析研究[J]. 建筑结构,2021,51(24):109-116.
MIAO Zhiwei,MA Dongliang,ZHANG Zhiqiang,et al. Numerical analysis research on seismic performance of high-position connected structure with friction pendulum[J]. Building Structure,2021,51(24):109-116.
- [3] 黄坤耀,孙炳楠,楼文娟. 连体刚度对双塔连体高层建筑地震响应的影响[J]. 建筑结构学报,2001(3):21-26.
HUANG Kunyao,SUN Bingnan,LOU Wenjuan. Influence of the connection stiffness on seismic response of the double-tower connected tall buildings[J]. Journal of Building Structures,2001(3):21-26.
- [4] 庞迎波. 粘滞液体阻尼器用于非对称双塔连体结构的消能减震分析[J]. 四川建筑科学研究,2010,36(4):162-166.
PANG Yingbo. Energy dissipation and vibration reduction of the nonsymmetric two-tower-connected structure with viscous fluid dampers[J]. Sichuan Building Science,2010,36(4):162-166.
- [5] CHEN X W,HAN X L. Research summary on long-span connected tall building structure with viscous dampers[J]. Structural Design of Tall and Special Buildings,2010,19(4):439-456.
- [6] MAKITA K,CHRISTENSON R E,SETO K,et al. Optimal design strategy of connected control method for two dynamically similar structures[J]. Journal of Engineering Mechanics,2007,133:1247-1257.
- [7] WEI G,CUO L L,ZHAI Z P,et al. Seismic performance assessment of a super high-rise twin-tower structure connected with rotational friction negative stiffness damper and lead rubber bearing[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2022,152(1):1-19.
- [8] 卞朝东,李爱群,娄宇,等. 高层连体结构振型及其参与系数的分析[J]. 建筑科学,2002,18(4):20-24.
BIAN Chaodong,LI Aiqun,LOU Yu,et al. Analysis of vibration modes and participating coefficients for high-rise connecting structures[J]. Building Science,2002,18(4):20-24.
- [9] MENG F T,RUAN X Q,ZHAO J F,et al. Analysis of horizontal vibration characteristics of unequal height twin towers of rigid connected structure[J]. Journal of Building Engineering,2022,50:104146.
- [10] 李虎林,李长征,朱水荣. 安徽合肥技师学院主教学楼连体结构设计[J]. 建筑结构,2025,55(3):89-94.
LI Hulin,LI Changzheng,ZHU Shuirong. Connecting structural design on main building of Anhui Hefei Technician College[J]. Building Structure,2025,55(3):89-94.
- [11] 谭光宇,沈蒲生. 地震作用下对称双塔连体结构受力性能研究[J]. 科学技术与工程,2006(16):2492-2494.
TAN Guangyu,SHEN Pusheng. Study on the mechanical characteristics of symmetrical two-tower connecting structures subjected to seismic action[J]. Science Technology and Engineering,2006(16):2492-2494.
- [12] 孔慧,毛彦喆,石海丽,等. 西安某不等高双塔连体结构设计[J]. 建筑科学,2023,39(11):152-158.
KONG Hui,MAO Yanzhe,SHI Haili,et al. Structure design of an unequal-height double-tower connected structure in Xi'an[J]. Building Science,2023,39(11):152-158.
- [13] 徐自国,肖从真,廖宇飏,等. 北京当代 MOMA 隔震连体结构的整体分析[J]. 土木工程学报,2008,41(3):53-57.
XU Ziguó,XIAO Congzhen,LIAO Yubiao,et al. Analysis of the seismic-isolated connected structures for MOMA[J]. China Civil Engineering Journal,2008,41(3):53-57.

(下转第 125 页)