

DOI:10.11918/202105064

大跨装配式混凝土结构横隔板效应分析

李昊^{1,2}, 周威^{1,2}

(1. 结构工程灾变与控制教育部重点实验室(哈尔滨工业大学), 哈尔滨 150090;
2. 土木工程智能防灾减灾工业和信息化部重点实验室(哈尔滨工业大学), 哈尔滨 150090)

摘要: 办公楼等大跨装配式混凝土结构的强震响应很大程度上取决于楼/屋盖的连接结构构件性能、连接节点构造措施、以及由其控制的楼盖横隔板, 应提出大跨装配式混凝土结构楼/屋盖及其连接构件的合理设计方法。基于线性参数化分析, 考虑了9种板-板连接、5种墙-墙连接及3种板-墙/梁连接共135种不同刚度连接组合下模态分析, 评价了节点连接刚度对于结构动力特性及楼盖横隔板效应的影响; 结合水平地震动反应谱分析及弹性时程分析, 分析了不同楼/屋面连接的结构地震响应。分析表明: 刚性节点连接变形控制能力强, 对楼/屋盖刚度和质量均匀性的分布贡献大, 有利促进了横隔板的积极效应; 超柔性连接的楼/屋盖刚度和变形的不均匀性显著, 可出现扭转等非预期变形; 相对于刚性连接, 工程常用半刚性连接下结构侧移较大, 且非刚性连接使得楼层加速度放大明显, 显著影响了楼盖设计的荷载取值。建议大跨装配式混凝土结构构件间采用可有效抵御构件平面内错动、平转动刚度大、有利于实现积极横隔板效应的新型连接。

关键词: 装配式; 大跨度; 楼屋盖隔板; 动力特性; 地震响应; 横隔板效应

中图分类号: TU375

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2022)04-0065-09

Diaphragm effectiveness in large-span precast concrete structures

LI Hao^{1,2}, ZHOU Wei^{1,2}

(1. Key Lab of Structures Dynamic Behavior and Control (Harbin Institute of Technology), Ministry of Education, Harbin 150090, China;
2. Key Lab of Smart Prevention and Mitigation of Civil Engineering Disasters (Harbin Institute of Technology),
Ministry of Industry and Information Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: The seismic performance of large-span precast concrete structures, such as office buildings, largely depends on the performance of the floor/roof connectors, the construction details of connectors, and the resultant diaphragm effectiveness. A reasonable design method for the floor/roof of large-span precast concrete structures as well as their connectors should be proposed. A parametric study based on linear analysis was carried out. A total of 135 modal analyses were performed to evaluate the influence of connector rigidity on the dynamic characteristics and diaphragm actions of the structures, considering nine types of floor-to-floor connections, five types of wall-to-wall connections, and three types of floor-to-wall/beam connections. Response spectrum analysis and elastic time history analysis were conducted under horizontal seismic actions to obtain the structural responses of different floor/roof connectors. Results show that the rigid connectors had remarkable deformation control ability, which contributes greatly to the distribution of floor/roof stiffness and mass uniformity, and promotes diaphragm effectiveness positively; the stiffness and deformation of floor/roof with extremely-flexible connections were significantly uneven, which may cause unexpected deformation such as torsion; the horizontal displacement of the structure with semi-rigid connectors was larger than that with rigid connectors, and non-rigid connectors made the floor acceleration increase obviously, affecting the designed load value of the floor significantly. It is suggested that new types of connectors, which can effectively resist the in-plane dislocation of elements, possess considerable horizontal rotation stiffness, and promote diaphragm effectiveness positively, should be adopted for large-span precast concrete structures.

Keywords: prefabricated; large-span; floor and roof diaphragms; dynamic characteristics; seismic response; diaphragm performance

以预制预应力混凝土双T板(平板)拼装叠合后为楼盖, 以预制预应力混凝土双T板(坡板)为屋

盖结构, 组成水平结构体系; 结合支承水平楼盖体系所需的预制倒T形梁、预制混凝土柱以及预制内外墙组成的围护结构及抗侧结构, 从而形成了内部大空间的大跨装配式混凝土结构体系, 特别适用于内部空旷需求的多层停车楼及办公楼等, 见图1。

定性地, 预制楼盖体系可分为两类: 1) “干式”

收稿日期: 2021-05-14

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51778186)

作者简介: 李昊(1995—), 男, 博士研究生;

周威(1977—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 周威, zhouwei-hit@163.com

楼盖体系 (untopped or pretopped diaphragm)。在“干式”体系中,楼盖只由预制板组成,由预制板和连接件来提供隔板作用;2)“湿式”楼盖体系 (topped diaphragm)。“湿式”体系的做法是在预制板上配置钢筋网片后浇混凝土。美欧等在中、低烈度区倾向于使用干式体系,在高烈度区采用湿式楼盖体系^[1]。

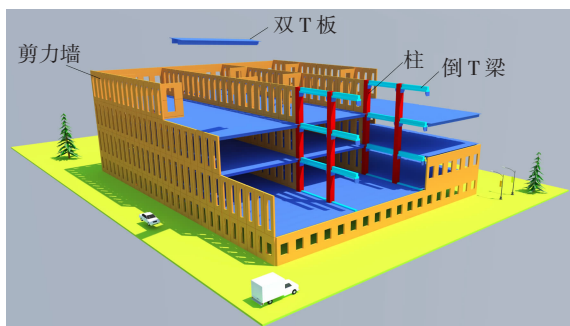


图 1 典型大跨装配式混凝土结构

Fig. 1 Typical large-span precast concrete structure

中国对大跨装配式结构在静载、地震动及其他偶然荷载等作用下的受力性能尚未开展系统研究,尤其是由各类构件拼装形成的大空间结构,以极限侧移、延性性能等表征的整体的抗震能力、地震易损性是进行抗震设计与评价的基础,应特别予以关注;在罕遇地震或极罕遇地震下,大跨楼/屋盖预制板的扰动掉落、落碰坍塌,大跨预制构件间的连接件受力性能影响可能发生的局部错动,直接决定着整体结构的抗连续倒塌性能^[2-4]。

其中,节点连接措施和预制装配式楼盖体系的设计方法尚未在相关标准或设计手册中体现,使得该体系的应用缺少足够的依据。中国现行双 T 板标准图集中,仅要求两端的 4 个板肋支座与支承(圈)梁焊接在一起,而未明确板与板间连接形式和方法。

这种由于预制混凝土楼盖与符合平面内刚度无穷大假设现浇混凝土楼盖间的刚度差异将产生横隔板效应,即装配连接方式不但直接影响了楼盖整体性、降低了楼盖平面刚度,而且减小了楼盖传递地震动的能力及楼盖与竖向结构构件协同工作能力,削弱了结构体系抗震能力,可能导致因层间侧移等地震响应过大或连接失效而导致楼盖落碰倒塌^[5-9]。

楼盖横隔板效应具体表现在两个方面,一是联系竖向构件形成整体结构体系,二是传递水平荷载至相应竖向构件。事实上,装配式楼盖的平面刚度在很大程度上由板缝之间的连接构件决定,往往远小于传统现浇混凝土结构,地震动产生显著平面内变形,大跨装配式楼盖横隔板效应很可能得不到充分的发挥^[10-11]。而由各国标准可知,即使在楼盖设

计方法较为成熟的美国、新西兰等国家,也仅仅是将楼盖设计荷载乘上一个放大系数,这可能会低估楼盖实际受力及变形情况,可能造成结构抗震能力低于设计需求。因此,应定性和定量评价连接件对其楼盖平面内刚度的影响及其在水平地震作用下的变形,进而确定相应连接件刚度对整体结构周期、振型的影响,获得层间侧移等响应,提出装配式楼盖横隔板效应的分析方法。

1 结构分析模型

某大跨装配式混凝土结构办公建筑,地上 3 层,短向为 3 跨;纵向长 80 m,横向长 54 m,层高 4.5 m,竖向结构体系采用由周边预制剪力墙与内部预制框架-剪力墙结构体系;通过沿短向布置标志跨度为 18.0 m 的预制预应力混凝土双 T 板形成大跨楼/屋盖结构。所有的 3 种连接件(板-板连接、墙-墙连接、板-墙/梁连接)间距均为 1.5 m。抗震设防烈度为 VIII 度,II 类场地。结构的平面/立面构件及连接布置见图 2。

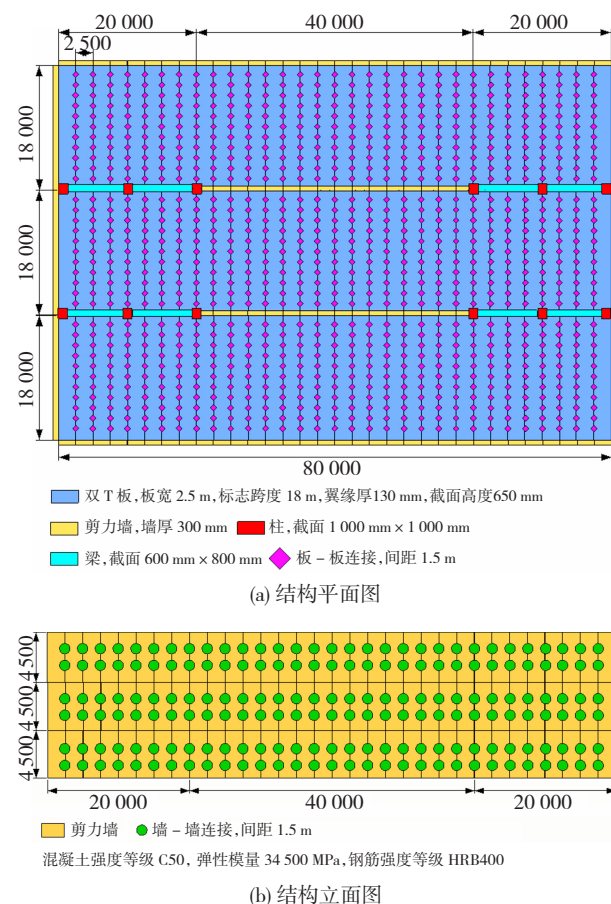


图 2 装配式混凝土结构简图

Fig. 2 Schematic diagram of precast concrete structure

图 3 展示了 ETABS 结构有限元分析模型。楼盖与梁/墙、墙与墙,以及楼盖之间均采用长度为 20 mm 的连接单元(link)进行连接,以模拟实际工程

中采用的分布式连接件;连接单元的轴向刚度设置为 10^4 kN/m,符合工程中常用连接件的拉压刚度,而连接单元的剪切刚度——即连接单元顺板缝方向的刚度,则根据连接件的不同形式采用多种参数,以分析连接件剪切刚度的变化对大跨装配式结构地震响应的影响。

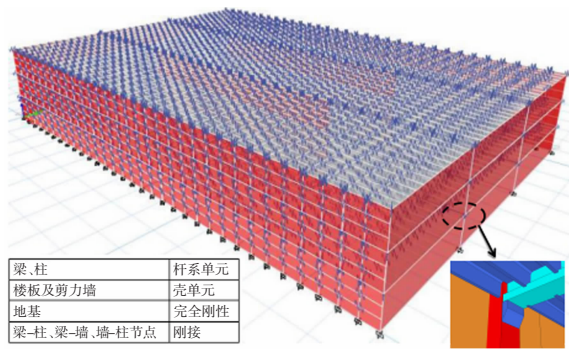


图 3 ETABS 模型

Fig. 3 ETABS model

2 典型大跨装配式混凝土结构地震响应分析

针对典型大跨装配式混凝土结构进行模态分析及地震响应分析,聚焦 3 种连接:板-板连接;墙-墙连接;板-墙/梁连接。通过调整连接构件由超柔性逐步过渡为全刚性,获得楼盖及其相关结构的性态。首先,通过模态分析获得不同刚度组合的自振周期,定量考察连接刚度对结构刚度及楼盖横隔板效应,并对比振型;其次,进行 VIII 度常遇地震作用下结构地震响应,获得节点刚度-结构最大水平位移关系曲线,验证工程常用典型节点连接件变形控制能力;最后,提出新型连接方式的横隔板效应的实现建议。

2.1 动力特性分析

通过考虑不同刚度的连接单元及其组合,获得对象结构的自振周期及相关振型。连接单元剪切刚度值的选取考虑了柔性连接到刚性连接的各种情况,具体为:

1) 板-板连接。剪切刚度 K_{r-p} 取 1 (几乎没有连接)、 10 、 10^2 、 10^3 (如角钢连接)^[12]、 10^4 (工程中常用的盖板式及发卡式连接刚度多为此数量级,见图 4)、 10^5 (如销栓连接)^[13]、 10^6 (如矩形焊块连接)^[14]、 10^8 、 10^{10} (完全刚性连接,如钢筋焊接)。

2) 墙-墙连接。剪切刚度 K_{p-p} 取 1 、 10^2 、 10^4 、 10^6 、 10^{10} 。

3) 板-墙/梁连接。剪切刚度 K_{r-p} 取 1 、 10^4 、 10^{10} ,刚度单位均为 kN/m。

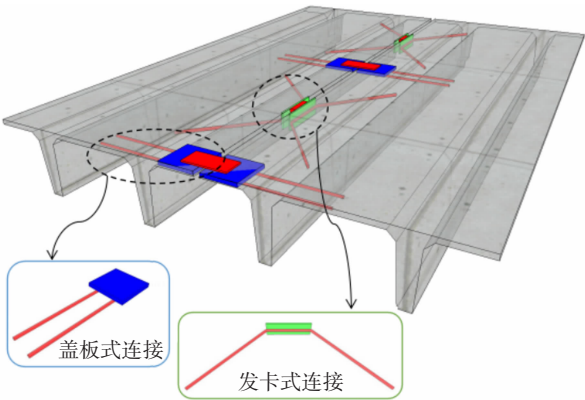


图 4 典型连接件

Fig. 4 Typical connectors

结合所有连接刚度取值的组合情况,开展了 $9 \times 5 \times 3 = 135$ 种模态分析,图 5 展示了连接刚度对结构基本自振周期的影响趋势,图 6 则展示了结构主要振型。

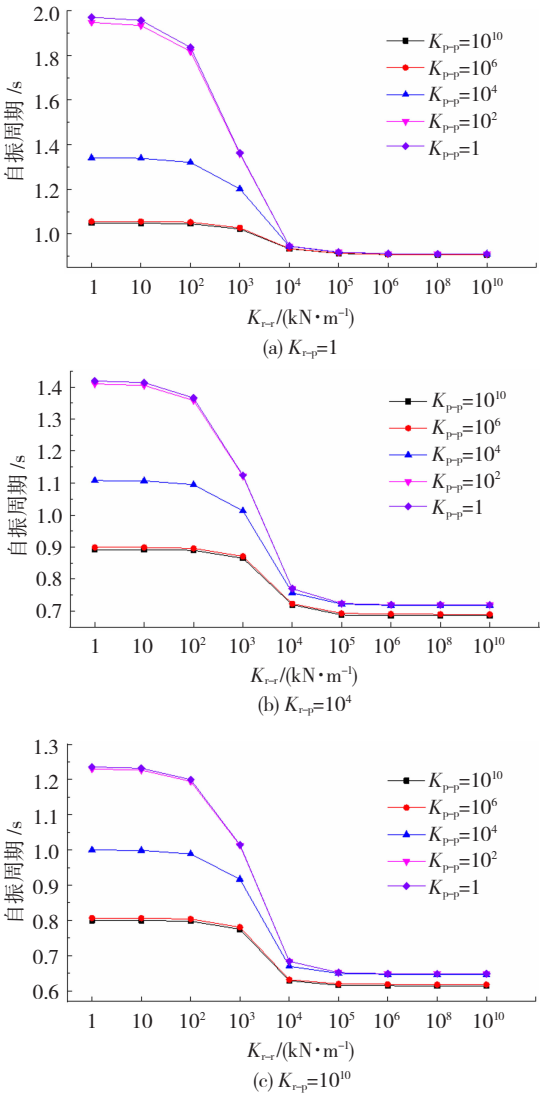


图 5 结构自振周期

Fig. 5 Natural vibration period of structure

通过分析可知,结构各构件间连接节点刚度值显著影响结构自振周期。总体上,无论是板-板连

接、板-墙/梁连接,还是墙-墙连接,当连接刚度较小(小于 10^2 kN/m)时,结构基本周期均处于较高水平,最大可接近 2 s,远高于现浇混凝土剪力墙结构基本周期,不符合中国相关规范规定;而当连接构件刚度较大(超过 10^4 kN/m)时,继续提高连接刚度对减小结构基本周期也无明显作用。因此,在确定装配式结构构件连接时,需合理计算分析连接刚度上限。

图 6 所示为 3 种典型节点刚度(1 、 10^4 、 10^{10} kN/m)下结构主要振型。对于第一振型,结构均表现为顺板缝方向的平动,但设置有较小刚度连接的楼盖会发生更为显著的平面内变形;第二及第三振型则表现为不同程度的扭转效应,根据连接构件刚度不同,高阶振型对结构动力特性影响程度也有着明显区别,振型质量参与系数见表 1。

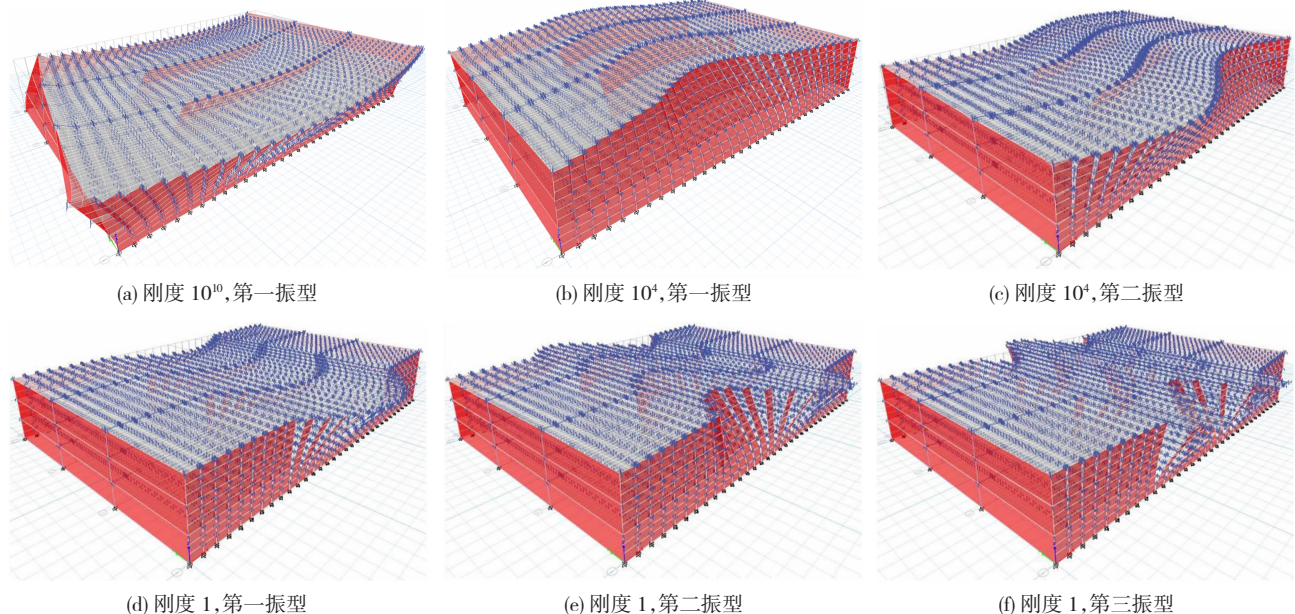


图 6 结构主要振型

Fig. 6 Main vibration modes of structure

表 1 顺板缝方向振型质量参与系数

Tab. 1 Mass participation coefficient of vibration mode

振型	连接刚度/(kN·m ⁻¹)			现浇结构
	10^{10}	10^4	1	
第一振型	6.13×10^{-1}	4.86×10^{-1}	2.57×10^{-1}	7.85×10^{-1}
第二振型	6.36×10^{-7}	0	0	4.95×10^{-2}
第三振型	1.39×10^{-1}	0	4.02×10^{-2}	1.97×10^{-2}
第四振型	9.40×10^{-7}	6.83×10^{-2}	0	0
第五振型	4.30×10^{-2}	1.36×10^{-1}	2.82×10^{-2}	8.28×10^{-2}
第六振型	1.06×10^{-1}	4.97×10^{-2}	1.05×10^{-1}	0
第七振型	0	0	0	0
第八振型	0	0	2.45×10^{-1}	0
第九振型	1.24×10^{-2}	7.75×10^{-2}	0	1.75×10^{-1}
第十振型	0	0	0	0
第十一振型	2.50×10^{-6}	9.99×10^{-2}	1.66×10^{-1}	1.88×10^{-1}
第十二振型	5.75×10^{-2}	0	0	0
Σ	9.71×10^{-1}	9.17×10^{-1}	8.42×10^{-1}	9.73×10^{-1}

1) 当连接刚度为 10^{10} kN/m 时,振型表现为非常均匀的平面内变形,质量及刚度分布均匀,楼盖具有良好的横隔板效应;中国规范规定^[15],参与计算的各振型质量参与系数之和不得小于 90%,以通过控制有效振型质量参与系数大小来决定所取振型数

是否足够。由表 1,结构前十二阶振型质量参与系数为 0.97,但按照通常的设计方法,即取前三阶振型进行结构设计,其振型质量参与系数仅为 0.75,显著低于现浇混凝土结构(约 0.85)。

2) 当连接刚度为 10^4 kN/m 时,由于连接构件变形明显高于墙板构件自身变形,第一振型呈现出平面内不均匀性,跨中变形要高于两端,构件间刚度不均匀;前三阶振型的质量参与系数较小,仅为 0.49,结构扭转效应则明显增强,表明楼盖横隔板效应在逐渐减弱。

3) 当连接刚度为 1 kN/m 时,其前三阶振型呈现出更明显的平面内不均匀性,前十二阶振型质量参与系数为 0.84,前三阶系数仅为 0.3,楼盖横隔板效应几乎完全丧失,应在分析时考虑更多高阶振型,结构常规设计方法所规定的刚性楼盖假定、楼盖传力模式及楼盖剪力分配等均无法适用,结构动力特性在很大程度上由高阶振型所决定,强地震动下,楼盖可能会受到附加水平力,导致设计结果的不确定性。

2.2 反应谱分析

为考虑结构动力特性与地震动特性之间的动力关系,结合中国规范给出的 VIII 度常遇地震设计反应谱^[15],通过反应谱法,对具有不同连接构件刚度

的装配式结构进行了地震动响应计算,地震动为顺板缝方向,采用 CQC 振型组合方法以考虑振型间相关作用。所得节点连接刚度-结构侧移最大值关系曲线见图 7。

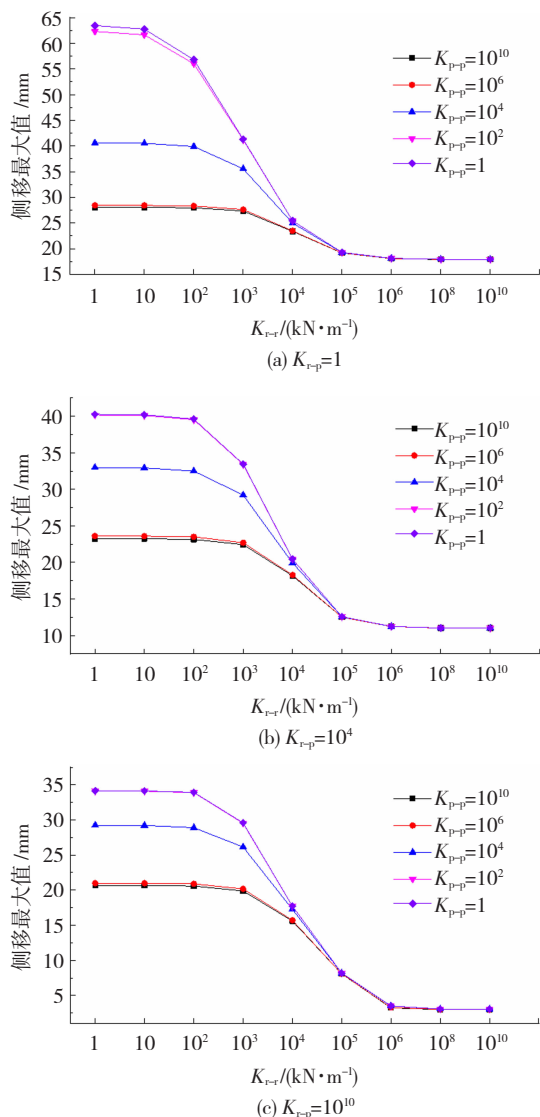


图 7 VIII 度常遇地震作用下结构侧移最大值

Fig. 7 Maximum horizontal displacement of structure under eight degree frequent earthquake action

分析可知,连接件的刚度对地震动下结构层间侧移影响显著。

1) 总体来看,其影响规律与结构自振周期相似,当连接件刚度较小(小于 10^2 kN/m)时,对结构侧移影响不大,结构抗震能力均较弱。采用超柔性连接件的大跨装配式混凝土结构的性能水平远低于规范要求,即不满足框架-剪力墙结构在常遇地震下的最大弹性层间位移角不高于 $1/800$ 的要求,楼盖自身平面内变形明显高于与之相连抗侧构件,地震动在相邻楼盖间几乎不能传递,楼盖横隔板效应较弱,应在设计中极力避免。

2) 当连接件刚度超过 10^2 kN/m 后,其刚度的

提高对结构抗震性能的提升有着明显的作用,结构层间侧移最大值迅速减小;当连接件刚度增加到一定值后,其对结构抗侧能力的提升作用逐渐降低;需要指出,当采用抗剪刚度为 $10^4 \sim 10^6$ kN/m 的连接件时,结构的自振周期已基本不再变化,而层间侧移值却仍在大幅降低,这表明,若使装配式楼盖隔板效应及抗推刚度等性能接近现浇楼盖,应采用具有更高刚度的连接构件。

3) 对比结构不同构件连接节点对结构抗震性能影响后,发现与楼盖相关连接件的重要程度明显高于墙-墙连接件:即使墙-墙连接件的刚度取值较小,但只要采用刚度足够大的板-板连接及板-墙/梁连接件,结构抗侧能力最终可达到理想状态;而若板-板连接或板-墙/梁连接件的刚度取值较小,则无论其余连接件的刚度如何取值,结构的层间侧移始终不低于 $1/800$,不满足要求。说明除应重视竖向构件的抗侧能力外,也不应忽视楼盖作用及影响。

3 弹性时程分析

为使输入地震波的特性与建筑场地类别和设计地震分组相符合,且与结构振动特性相关,弹性时程分析选用了 El Centro 波、Taft 波、Superstition 波、Ferndale 波、Lan 波及 RH1TG035 波等 6 条具有代表性的实际地震记录,进行单向输入计算。地震作用方向为顺板缝方向,图 8 为调幅后的地震波加速度时程曲线和阻尼比为 5% 时 6 条地震波的弹性加速度反应谱与中国规范反应谱,同时图 8(b) 中也给出了不同刚度连接件的结构基本周期对应的加速度反应谱值,其中刚性连接结构指结构连接件抗剪刚度为 10^{10} kN/m,半刚性连接结构指连接件抗剪刚度为 10^4 kN/m,超柔性连接结构指连接件抗剪刚度为 1 kN/m。

3.1 楼层位移分析

由图 9 结构层间侧移角包络可知,在 VIII 度多遇地震作用下,刚性连接结构层间侧移最大值明显小于半刚性或超柔性连接结构,表明在大跨度装配式结构中刚性连接效果要显著优于半刚性或超柔性连接;在多数情况下,半刚性连接结构的层间侧移最大值要小于超柔性连接结构;然而,在 Superstition 波或 Ferndale 波作用下,半刚性连接结构位移反而大于超柔性连接结构,这表明楼盖柔性会改变传统的荷载分配模式及传力途径,可能会导致预料之外的效应。此外,采用超柔性连接的结构层间侧移最大值均不满足弹性层间位移角限值要求。这里需要指出,在 El Centro 波与 Ferndale 波的作用下,半刚性连接结构层间侧移最大值也不满足规范要求。

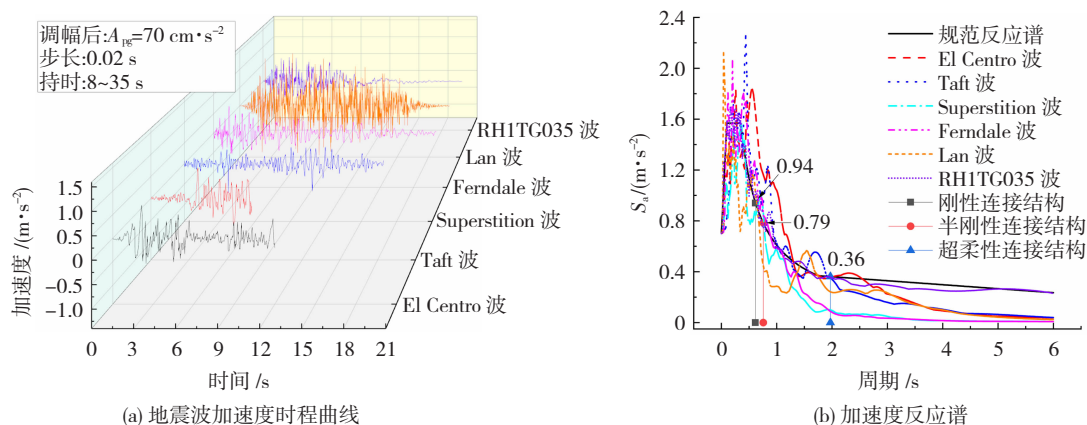


图 8 地震波加速度时程曲线

Fig. 8 Time history curve of ground motion acceleration

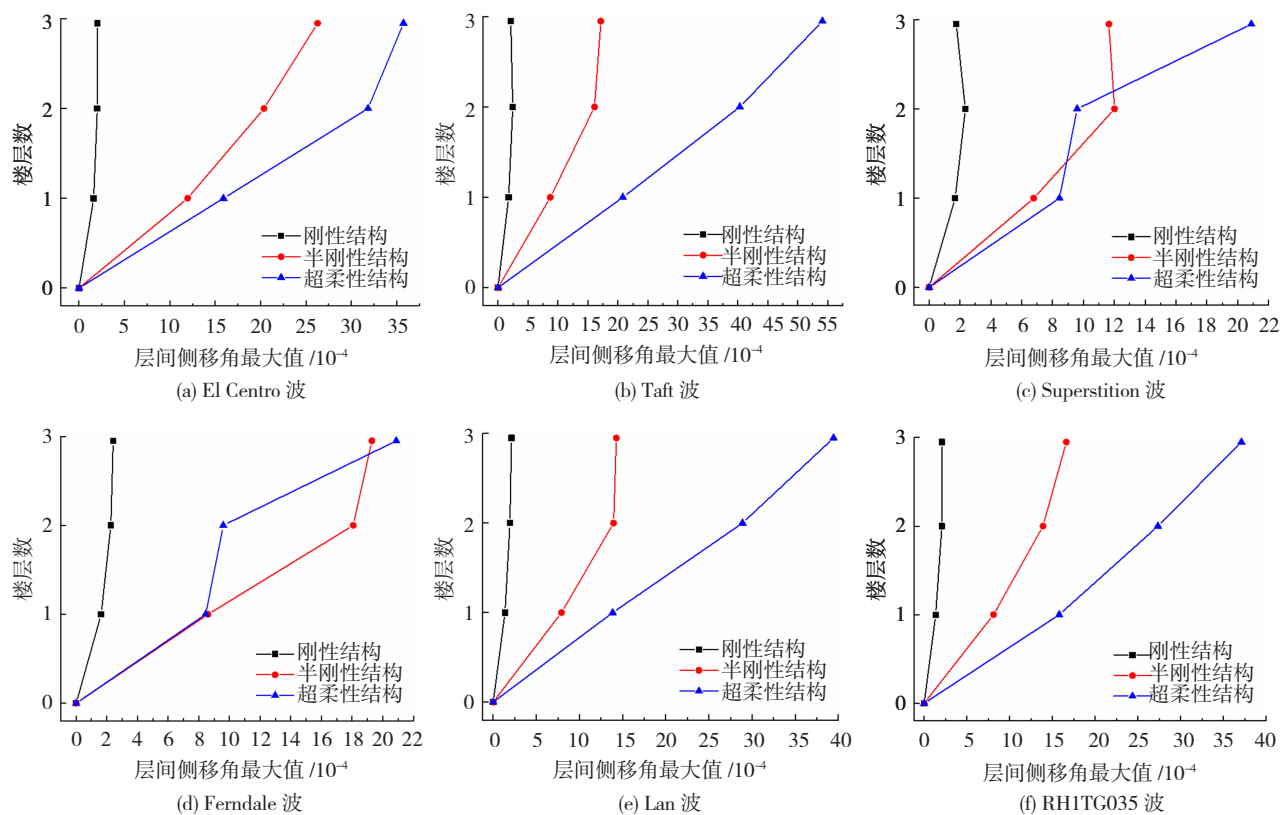


图 9 层间侧移角最大值

Fig. 9 Maximum inter-story displacement angle

3.2 倾覆力矩及层剪力分析

在多遇地震下,经时程分析的结构倾覆力矩及层间剪力见图 10~11。在不同的地震动下,结构层间剪力由底层到顶层逐渐减小,变化趋势相近,不同地震波之间存在一定离散性。El Centro 波在半刚性连接结构上部引起的地震反应明显较大,反映了相同峰值下频谱特性差异的影响。

3.3 楼层加速度分析

地震动楼层水平加速度响应为楼盖抗震设计、楼盖结构连接节点的设计及非结构构件以及结构中固定装置设备等的设计依据。在 6 种地震波作用

下,结构的楼层最大加速度及加速度放大系数(各楼层最大加速度与地面输入最大加速度的比值)见图 12~13。

由图 12~13 可知,采用不同刚度连接件结构的加速度存在较大差异,其中刚性连接结构楼层加速度总体较小,而半刚性或超柔性连接结构的楼层加速度则明显偏大;且楼层加速度均大于输入加速度时程曲线的峰值(70 cm/s^2)。结构加速度放大系数随楼层高度的增加而增加,一般可达 3~4,最大可超过 6,在确定楼盖水平设计荷载时应考虑这一差异性。

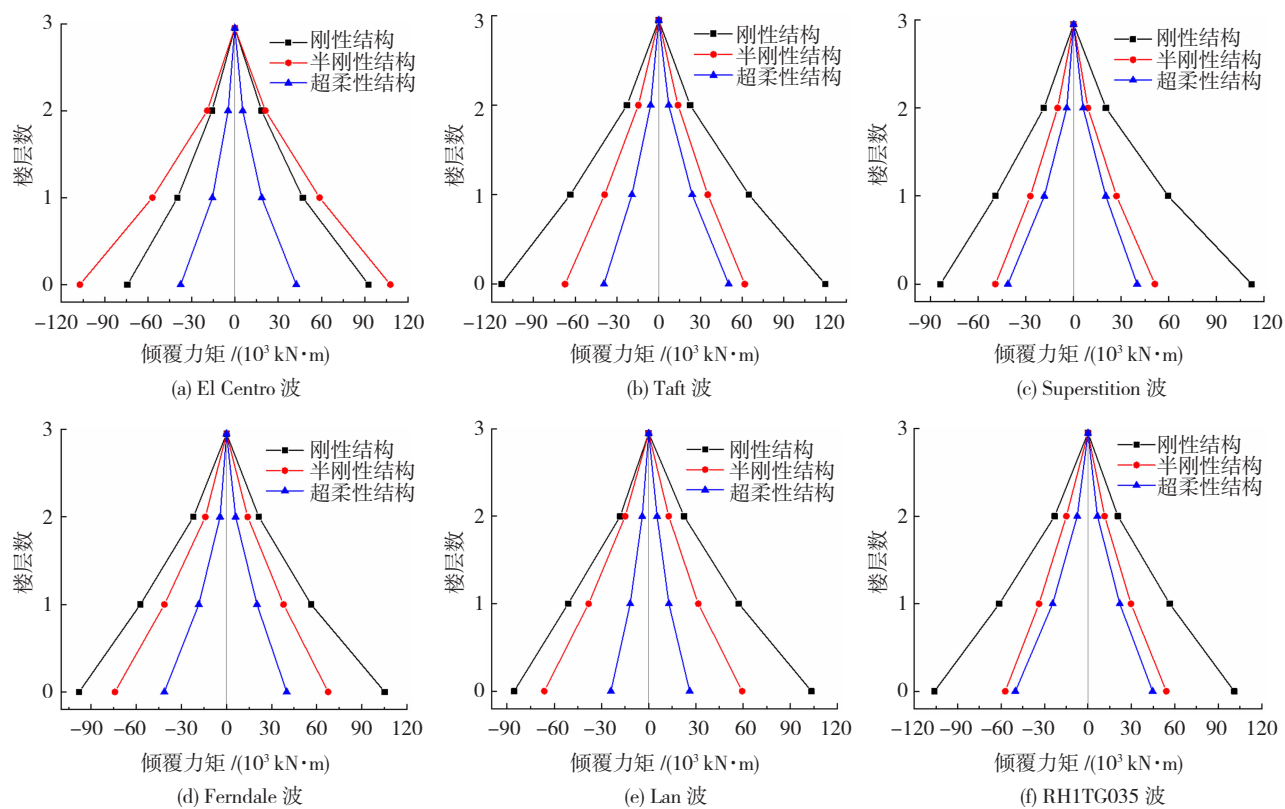


图 10 倾覆力矩

Fig. 10 Overturning moment

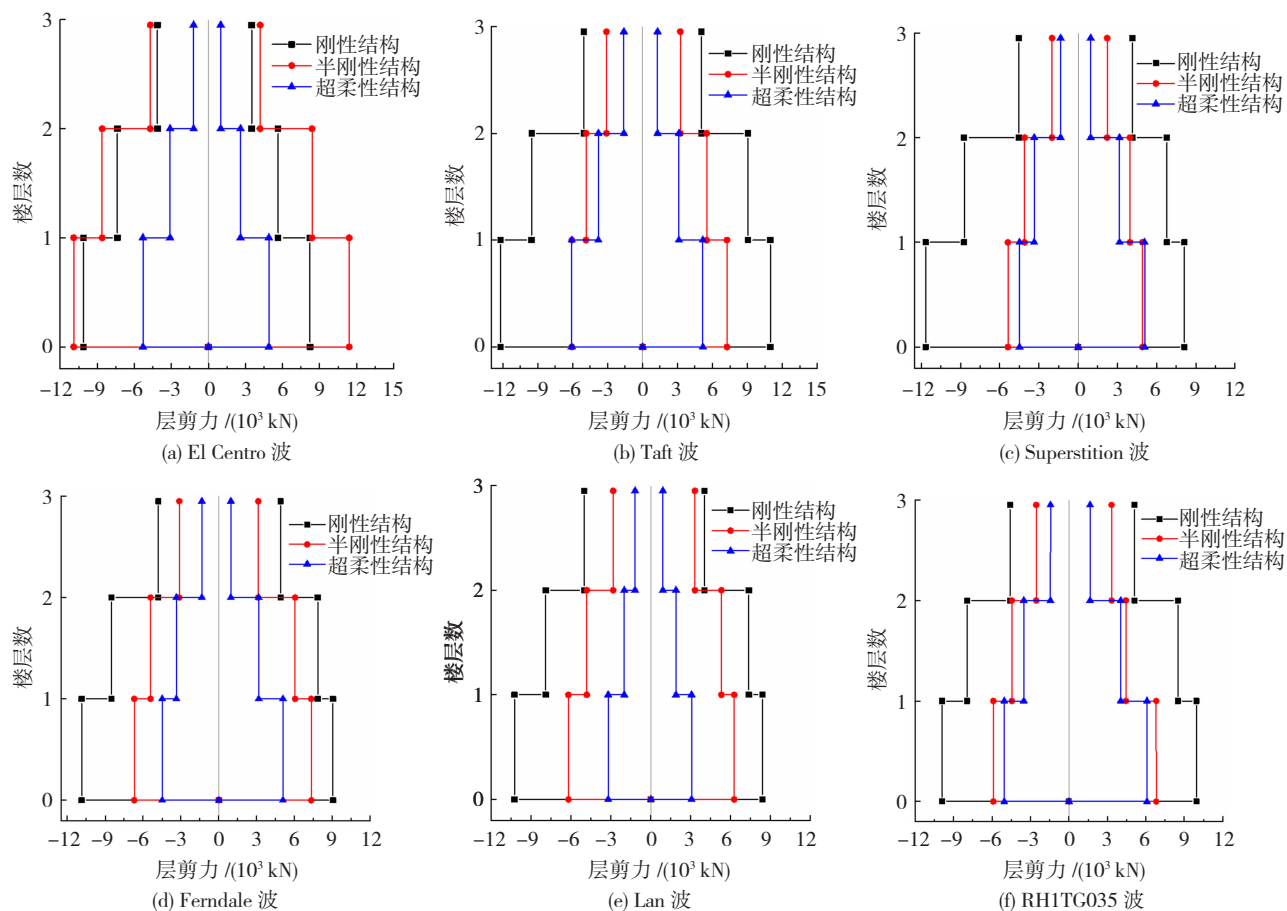


图 11 层剪力

Fig. 11 Shear force of each layer

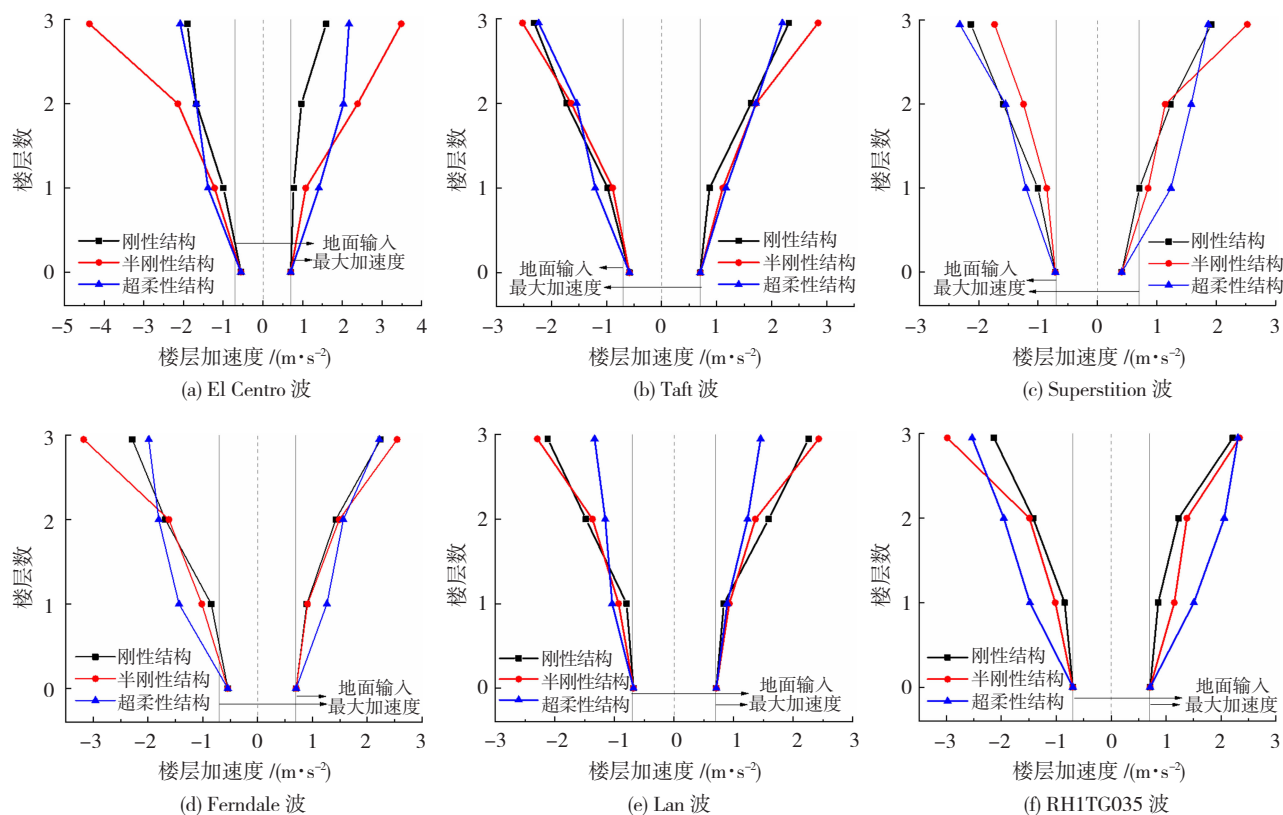


图 12 楼层最大加速度

Fig. 12 Maximum acceleration of each floor

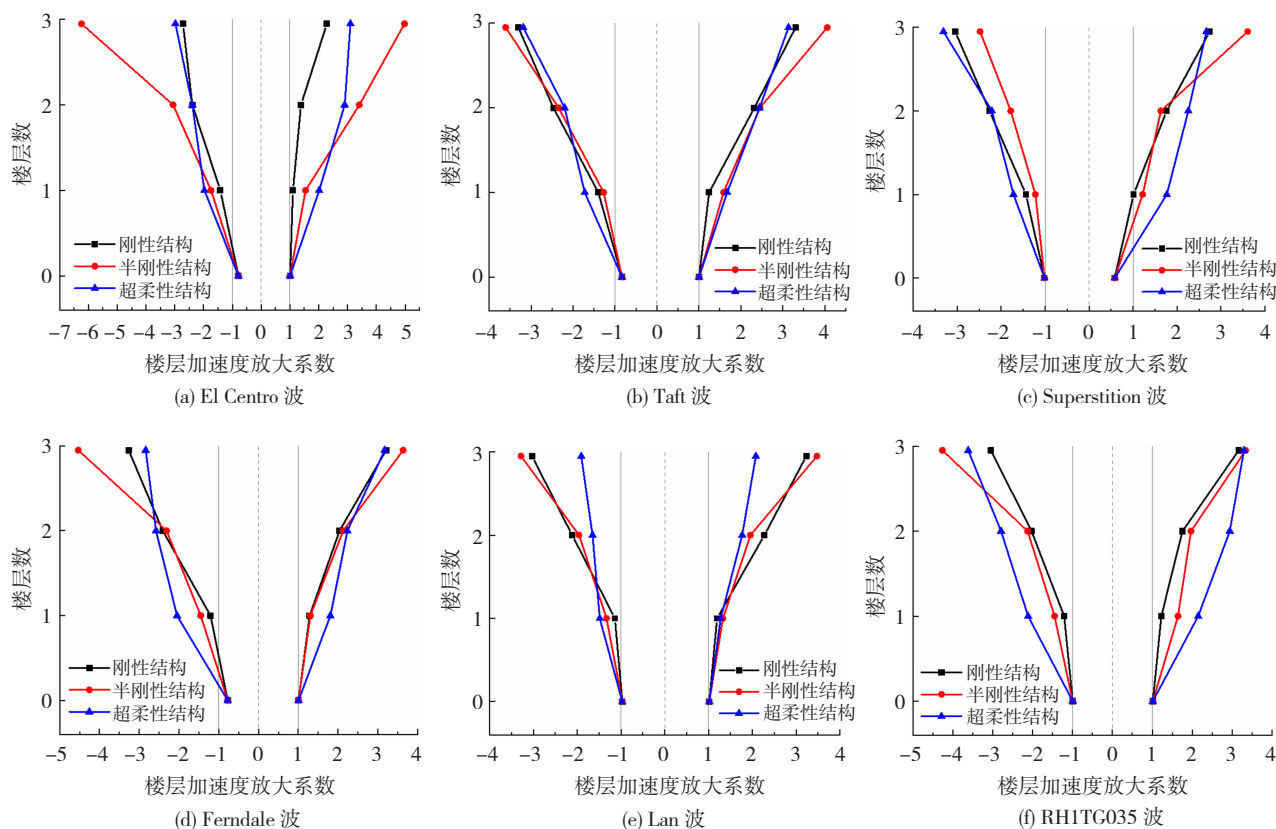


图 13 楼层加速度放大系数

Fig. 13 Acceleration amplification factor of each floor

综上,评估装配式大跨度混凝土结构中采用的板-板连接构件性能。对于常用的盖板式或发卡式

连接,其水平抗剪刚度至多仅 $20\,000\text{ kN/m}^{[16]}$,显然不能满足结构的抗震需求,应提高其刚度以优化结

构的动力特性,改善抗震能力,保证楼盖横隔板效应的积极作用。

建议,对于大跨装配式混凝土结构的各类构件间的连接,尤其是楼盖连接,应采用有利于实现积极横隔板效应的方式予以构造^[17],具有足够平转动刚度的合理构造措施才能使其有效抵御构件间平面内错动。

4 结 论

预制构件间的连接性能对楼盖横隔板效应的有效性及大跨装配式混凝土结构强震下响应具有控制行为:

1) 采用刚性构件连接,尤其是与楼盖相关连接,可明显提高预制结构质量和刚度分布均匀性,促进楼盖横隔板积极效应。

2) 若采用超柔性连接件,可导致大跨结构的连接系统形成非静定体系,造成结构内外部构件间较大刚度差异,可能发生结构构件扭转等非预期变形,且难以有效承担地震作用并增大层间侧移。

3) 积极横隔板效应下结构构件之间质量和刚度的均匀分布,使结构在地震动等水平作用平面内变形均匀性强。

4) 相同幅值的地震波下,刚性连接结构抗震性能最好,工程常用半刚性连接结构侧移过大,非刚性连接可导致楼层加速度明显放大,显著影响楼盖设计用荷载取值。

参考文献

- [1] 庞瑞,梁书亨,朱筱俊. 国外预制混凝土双T板楼盖体系的研究[J]. 工业建筑,2011,41(3):122
- PANG Rui, LIANG Shuting, ZHU Xiaojun. State-of-the-art of overseas research of precast double-tee floors [J]. Industrial Construction, 2011, 41(3):122. DOI: 10.13204/j. gyjz2011.03.016
- [2] MITCHELL D, DEVALL R H, SAATCIOGLU M, et al. Damage to concrete structures due to the 1994 Northridge earthquake [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1995, 22(2): 361. DOI: 10.1139/195-047
- [3] ANDERSON H, HARE J, WENTZ R. Investigation into the performance of statistics house in the 14 November 2016 Kaikōura earthquake[Z]. Wellington: Ministry of Business, Innovation and Employment, 2017
- [4] SAVOIA M, BURATTI N, VINCENZI L. Damage and collapses in industrial precast buildings after the 2012 Emilia earthquake[J]. Engineering Structures, 2017, 137: 163. DOI: 10.1016/j. engstruct. 2017.01.059
- [5] LEE J D, YOON J K, KANG T H K. Combined half precast concrete slab and post-tensioned slab topping system for basement parking structures [J]. Journal of Structural Integrity and Maintenance, 2016, 1(1): 2. DOI: 10.1080/24705314.2016.1153281
- [6] FLEISCHMAN R B, FARROW K T. Seismic design recommendations for precast concrete diaphragms in long floor span construction[J]. PCI Journal, 2003, 48(6): 47
- [7] LEE H J, KUCHMA D A. Seismic response of parking structure with precast concrete diaphragms[J]. PCI Journal, 2008, 53(2): 72
- [8] FLEISCHMAN R B, FARROW K T. Seismic response of perimeter lateral-system structures with highly flexible diaphragms [J]. Earthquake Spectra, 2002, 18(2): 252. DOI: 10.1193/1.1490547
- [9] DAL LAGO B, FERRARA L. Efficacy of roof-to-beam mechanical connections on the diaphragm behaviour of precast decks with spaced roof elements [J]. Engineering Structures, 2018, 176: 682. DOI: 10.1016/j. engstruct. 2018.09.027
- [10] 庞瑞,李倩倩,王璐,等. 分布式连接全装配 RC 楼盖建筑结构动力特性与地震响应分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2019, 41(4): 65
- PANG Rui, LI Qianqian, WANG Lu, et al. Analysis of dynamic characteristic and seismic response for discrete connected new-type precast RC diaphragm structure [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2019, 41(4): 65. DOI: 10.16226/j. issn. 1002-8412.2019.04.009
- [11] DAL LAGO B, BIANCHI S, BIONDINI F. Diaphragm effectiveness of precast concrete structures with cladding panels under seismic action[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2019, 17(1): 473. DOI: 10.1007/s10518-018-0452-3
- [12] DAL LAGO B, TONIOLO G, FELICETTI R, et al. End support connection of precast roof elements by bolted steel angles [J]. Structural Concrete, 2017, 18(5): 761. DOI: 10.1002/suco.201600218
- [13] PSYCHARIS I N, MOUZAKIS H P. Shear resistance of pinned connections of precast members to monotonic and cyclic loading[J]. Engineering Structures, 2012, 41: 424. DOI: 10.1016/j. engstruct. 2012.03.051
- [14] SCHULTZ A E, TADROS M K, HUO X, et al. Seismic resistance of vertical joints in precast shear walls [C]//FIP'94 XII Congress May 29 - June 2. Washington DC: [s. n.], 1994, 1: 23
- [15] 建筑抗震设计规范:GB 50011—2010 [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010
- Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010
- [16] 周威,张文龙. 装配式停车楼结构预应力混凝土双T板弯曲性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(12): 67
- ZHOU Wei, ZHANG Wenlong. Tests on flexural behavior of double-tee beams in precast parking structures [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(12): 67. DOI: 10.14006/j. jzjgxb. 2018.12.008
- [17] 李昊. 装配式停车楼双T板楼盖连接性能试验与分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2020
- LI Hao. Experimental study on flange connectors of double-tees in precast parking structures [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020. DOI: 10.27061/d.cnki. ghgdu. 2020.000477

(编辑 赵丽莹)