

# 不同跨宽的外置 K 形支撑钢框架 抗震性能分析

李帼昌,徐 丽,杨志坚,聂金乾

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘 要** 目的 研究外置 K 形支撑在钢结构中的应用,分析外置 K 形支撑的外置跨宽度对结构体系的抗震性能的影响。方法 基于位移的抗震设计方法,建立外置 K 形支撑钢框架结构模型,并进行模态分析、静力弹塑性分析以及动力时程分析,研究不同跨宽的外置 K 形支撑钢框架抗震性能。结果 在小震作用,外置 K 形支撑处于弹性状态,外置跨宽度越大的结构,可以为结构提供更大的侧向刚度,减小结构层位移;在大震作用下,外置支撑先于框架结构构件破坏,消耗地震能量,且破坏处位于主体结构之外,易更换支撑。结论 当外置 K 形支撑跨宽度在 1~1.5 m 内,结构的承载力、刚度和抗震性能随着外置跨宽度的增加而提高。

**关键词** 外置 K 形支撑;抗震性能;Pushover 分析;动力弹塑性分析

中图分类号 TU391

文献标志码 A

## Analysis on Seismic Performance of External K-braced Steel Frames with Different Span Widths

LI Guochang, XU Li, YANG Zhijian, NIE Jinqian

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** This paper mainly studies the application of the external K-brace in the steel structure, and analyzes the influence of the external span width of the external K-brace on the seismic performance of the structure system. Based on the displacement based seismic design method, the external K-brace steel frame structure model was established, and the modal analysis, static elastic-plastic analysis and dynamic time history analysis were carried out to study the seismic resistance of the external K-brace steel frame with different span width seismic performance. Under the frequent earthquake action, the external K-brace support is in elastic state. The larger the width of the external span width is, the greater the lateral stiffness of the structure and the smaller the displacement of the structure layer can be provided. Under the rare earthquake action, the external

收稿日期:2019-12-04

基金项目:国家自然科学基金重点项目(51938009);辽宁省重点研发计划指导计划项目(2017229006);辽宁省攀登学者支持计划专项(2018-0101)

作者简介:李帼昌(1964—),女,教授,博士,主要从事结构抗震等方面研究。

support is prior to the damage of the frame structure, consuming seismic energy, and the damage is located outside the main structure, so it is easy to replace the support. When the width of the external K-brace support span is in the range of 1 – 1.5 m, the bearing capacity, stiffness and seismic performance of the structure increase with the increase of the width of the external span.

**Key words:** external K-brace; seismic performance; pushover analysis; dynamic elastic-plastic analysis

2015 年以来,我国全面加大了对装配式建筑的推广,钢结构占装配式建筑的比例在 10% ~ 20%, 全国已有 30 多个省市出台装配式建筑的政策,并且政府推动相关配套举措,培育钢结构建筑龙头企业和建材供应企业. 因此,对钢结构相关设计理论开展深入研究,更具有价值且具有发展前景.

目前国内钢结构建筑大多为中心支撑 – 钢框架结构,然而,在地震作用下,中心支撑易产生疲劳累计损伤,支撑破坏会导致结构内部框架主体的支撑连接部分发生损伤,更换支撑构件施工工艺复杂. 另外,结构内置中心支撑,也限制内部空间灵活布置. 因此,李幅昌等<sup>[1]</sup>提出了一种外置支撑 – 钢框架结构体系,将支撑布置在结构外部,在保证结构内部正常使用和使用空间的同时,增加结构的侧向刚度和扭转刚度. 另外,可将支撑的外置空间便于建筑外部美观设计,增加居住面积.

近几年,国内外学者对中心支撑框架进行了深入研究. D. S. Andrew 等<sup>[2]</sup>对中心支撑框架进行非线性实验,杨兰伟等<sup>[3]</sup>、J. Goggins 等<sup>[4]</sup>、K. A. Sina 等<sup>[5]</sup>、I. Amin 等<sup>[6]</sup>研究中心支撑框架在循环荷载动态作用下的性能及动态屈曲现象. Zuolei 等<sup>[7]</sup>、李玉荣等<sup>[8]</sup>、R. S. Dipti 等<sup>[9]</sup>改进中心支撑的初始缺陷、长细比、非弹性屈曲等参数的优化设计. 刘美子等<sup>[10]</sup>、熊二刚等<sup>[11]</sup>提出了预先选定中心支撑框架的目标侧移和功能屈服机制的设计方法, G. S. Joshua 等<sup>[12]</sup>、H. Seong 等<sup>[13]</sup>、董志骞等<sup>[14]</sup>先后研究了特殊结构不同形式内的中心支撑框架抗震性能. 专家学

者也研究了中心支撑与框架的新型连接形式,刘霞等<sup>[15]</sup>优化了装配式结构中支撑的连接形式, J. Henriques 等<sup>[16]</sup>采用 U 形钢板连接支撑与相邻柱,董龙光等<sup>[17]</sup>研究可替换剪切连接件与框架梁分离的设计. 陈希杰<sup>[18]</sup>对 K 型偏心支撑钢框架结构地震倒塌性能评估,研究远场、近场地震作用的结构地震响应.

目前国内外研究学者对外置支撑 – 钢框架结构体系的研究较少. 基于此,笔者对不同外置跨宽的外置 K 形支撑钢框架进行静力弹塑性分析和动力时程分析,经计算结果对比,钢结构采用外置跨宽度为 1.5 m 的支撑,可以减小地震对结构的影响,外置支撑可以发挥最大作用.

## 1 模型概况及模态分析

在结构设计有限元分析软件 Midas building 中,模拟外置跨宽度为 1 m (WZ-1)、1.2 m (WZ-1.2)、1.5 m (WZ-1.5)、2 m (WZ-2)的外置 K 形支撑钢框架结构,梁柱截面尺寸满足抗震设计规范要求,布置在不同外置跨宽度的支撑杆件,均满足长细比限值规定. 笔者研究的结构体系,仅改变外置跨宽度,其他构件的截面尺寸不变,构件参数见表 1. 外置支撑跨宽度为 1 m 的结构平面图如图 1 所示,在外置支撑钢框架层数 8 层保持不变的同时,改变外置跨宽度进行模拟分析 4 种结构的支撑承担比例平均值,如表 2 所示,随着外置跨宽度的增加,支撑与水平面之间的夹角越小,支撑提供更大的侧向刚度,因此支撑承担的楼层剪力比例越大.

表 1 结构构件截面参数

Table 1 Section sizes of structural members						mm
楼层	外柱长×宽×壁厚	内柱长×宽×壁厚	外梁截面高度× 上下翼缘宽度× 腹板厚度× 翼缘板厚度	内梁截面高度× 上下翼缘宽度× 腹板厚度× 翼缘板厚度	支撑截面高度× 上下翼缘宽度× 腹板厚度× 翼缘板厚度	
1	380×380×8	220×220×6	H300×300×10×15	H300×200×6×9	H150×150×6×8	
2~4	350×350×8	220×220×6	H300×200×4.5×10	H250×150×4.5×9	H120×120×4.5×6	
5~7	300×300×6	200×200×6	H300×200×4.5×10	H250×150×4.5×9	H120×120×4.5×6	
8	220×220×6	180×180×5	H250×150×4.5×9	H250×125×4.5×6	H120×120×4.5×6	

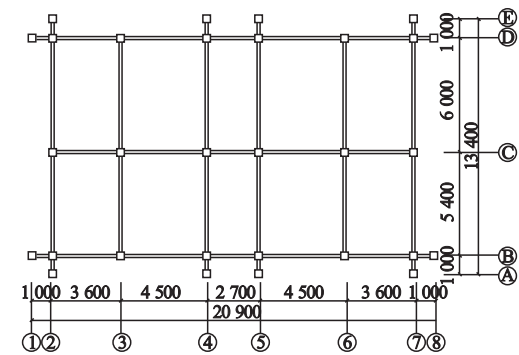


图 1 外置 1 m 建筑结构平面图

Fig. 1 Building structural plan outside 1 meters

表 2 支撑承担楼层剪力比例

Table 2 Shear ratio of supporting bearing floor %			
结构	顶层支撑 承担比例	首层支撑 承担比例	承担比例 平均值
WZ-1	50.1	50.7	49.2
WZ-1.2	53.6	60.4	61.9
WZ-1.5	62.7	64.8	63.1
WZ-2	65.5	70.2	66.6

本算例的抗震设防类别为乙类,抗震设防烈度为 7 度,设计基本加速度为 0.20 g,特征周期为 0.35 s,设计地震分组为第一组,场地类别为 II 类,基本风压为 0.35 kPa,地面粗糙度 B 类. 钢材均采用二折线的本构模型,柱采用轴力弯矩耦合铰(P-M-M),梁采用弯矩铰(M 铰),支撑采用轴力铰(P 铰).

钢材选用 Q345 级钢材,柱子选用箱型柱,梁为工字型梁,首层层高为 4 m,标准层层高为 3 m. 楼面恒荷载取 5.0 kPa,活荷载取 2.0 kPa,屋面恒荷载取 5.0 kPa,活荷载取 0.5 kPa. 外墙

荷载取 4.5 kPa,内墙荷载取 3 kPa.

图 2 为自振周期对比图. 经计算 8 层外置支撑钢框架,分别计算得出 4 种结构的周期比,WZ-2 为 0.652,WZ-1.5 为 0.686,WZ-1.2 为 0.724,WZ-1 为 0.747. 外置跨宽度的增加,使周期比减小,扭转效应减小,结构整体刚度越大. 但是 WZ-2 结构,以扭转为主的第三振型,出现的时间较早,不利于结构的整体抗震.

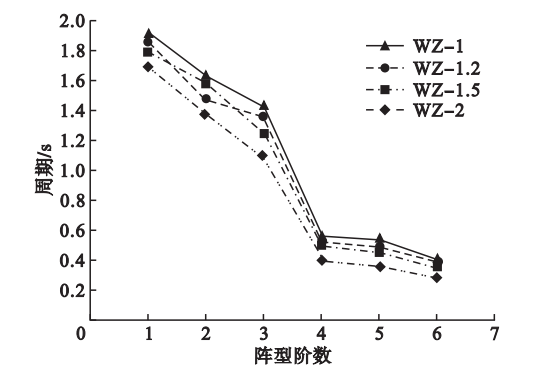


图 2 自振周期对比图

Fig. 2 Comparison diagram of natural vibration periods

2 静力弹塑性分析

2.1 Pushover 分析结果

用振型侧向力分布侧力模式,对不同外置跨宽度的外置 K 形支撑-钢框架进行 Pushover 模拟分析,能力曲线及性能点如图 3 所示. 相同的顶点位移,外置跨宽度越大,基底剪力越小,说明支撑跨的增加,使结构的整体抗震性能提高,减小结构对地震作用的响应.

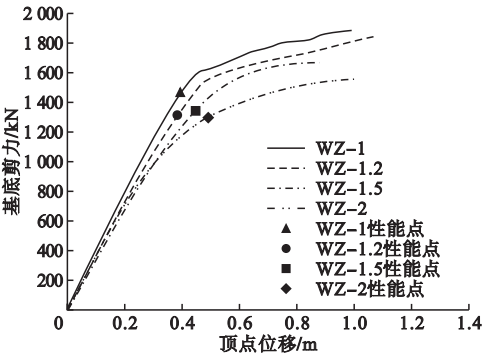


图3 能力曲线

Fig. 3 Capability curves

8层外置跨宽度不同的层剪力对比情况如图4所示。X方向布置支撑数量多,且框架柱间距比Y方向柱间距小,对比Y方向的首层层剪力可知,外置跨宽度的增加会使结构的层剪力减小,使支撑提供的结构侧向刚度更大,更能充分发挥支撑作用。

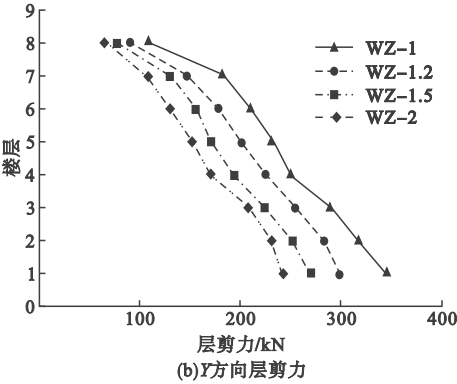
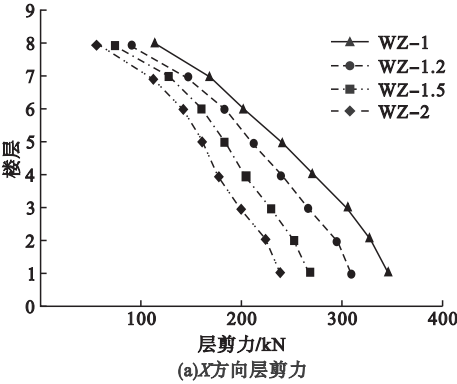


图4 层剪力对比图

Fig. 4 Shear chart contrast diagrams

在常遇地震作用下,4种结构的层间位移角均满足抗震设计规范规定的多、高层钢结构弹性层间位移角1/250的限值要求<sup>[19]</sup>。

层间位移角对比如图5所示,4种结构在X方向和Y方向,结构底部变形大于上部结构的变形且沿高度变化均匀。在X方向,4种结构的层间位移角差别不大,在Y方向,WZ-1的刚度较小,层间位移角较大,布置在外置跨的支撑未能提供较大侧向支撑作用。

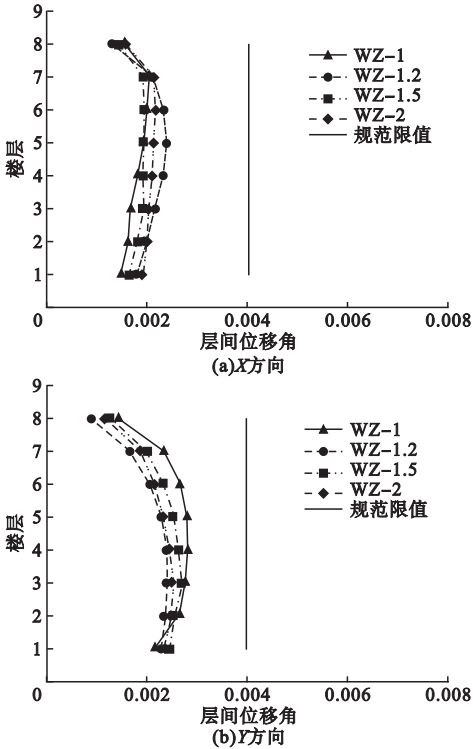


图5 层间位移角对比图

Fig. 5 Interlaminar displacement angle contrast diagrams

2.2 性能点处结果分析

4种不同外置跨宽度结构的性能点处,基底剪力、顶点位移及最大层间位移角的对比结果见表3.4种结构的最大层间位移角满足规范要求的基础上,结构刚度随着支撑跨宽度增加而增加,使结构的顶点位移减小。

图6为性能点处的层剪力对比。从图中可以看出,外置支撑跨度宽度增加,使支撑更好的发挥耗能作用,增大建筑结构的抗侧刚度,但外置跨宽度为1.5m的层剪力减小量更大,相比较外置跨宽度为2m的钢框架结构,更能够使外置支撑发挥更好作用。

表3 性能点处结果

Table 3 The information department of the performance points

结构	基底剪力/kN		顶点位移/m		最大层间位移角	
	X 方向	Y 方向	X 方向	Y 方向	X 方向	Y 方向
WZ-1	426.34	406.57	0.044 54	0.046 96	1/126	1/112
WZ-1.2	436.67	414.61	0.040 8	0.049 88	1/120	1/105
WZ-1.5	377.61	362.18	0.036 03	0.033 78	1/132	1/124
WZ-2	361.33	352.67	0.033 97	0.035 35	1/117	1/103

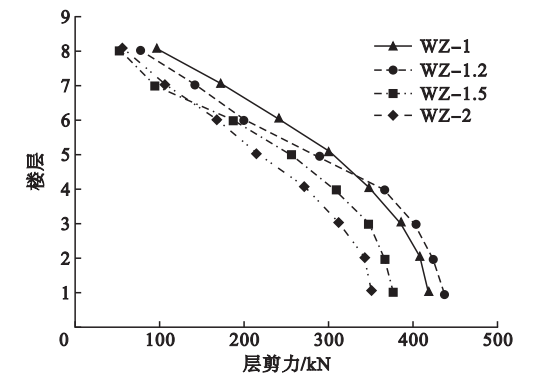


图6 性能点处层剪力对比

**Fig. 6** The shear performance points contrast diagram

不同性能点处层间位移角变化如图7所示。从图中可以看出,在罕遇地震作用下,外置跨宽度不同的4种结构均满足建筑抗震设计规范<sup>[20]</sup>中规定的多、高层钢结构弹塑性层间位移角1/50的限值要求。4种方案在性能点处层间位移角对比表明,结构外置跨宽度越大,支撑作用越大,结构的整体稳定性越好。

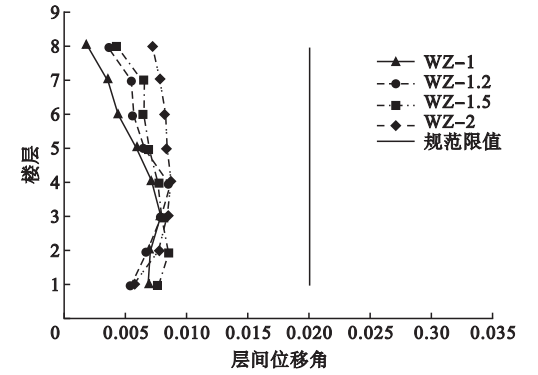


图7 性能点处层间位移角对比

**Fig. 7** Interlayer displacement angle at performance points contrast diagram

3 动力时程分析

3.1 地震波选取

根据建筑抗震规范要求,将本算例的基本信息输入到太平洋地震工程研究中心(PEER)的地面运动数据库中,选取4条地震波,地震波基本信息见表4。图8为设计反应谱及笔者选取地震动的反应谱对比,地震动的有效持续时间为35 s。

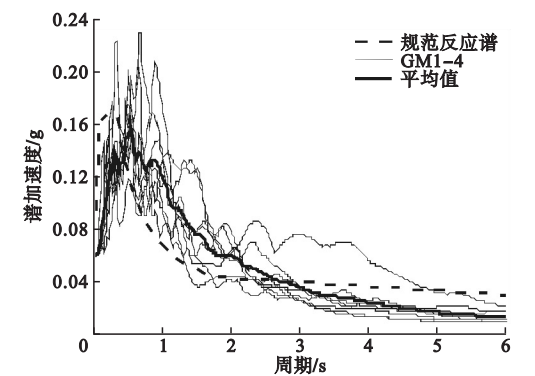


图8 地震反应谱结果对比

**Fig. 8** Comparison of seismic response spectrum results

3.2 结构整体层次分析

根据 GM1 (Imperial Valley-02) 的地震动,计算层剪力对比结果如图9所示。从图中可以看出,外置支撑跨宽度为2 m 的结构在1层至3层层剪力较大,在动力时程分析时,外置跨过大会导致结构中下部的支撑抗侧刚度效果不佳。因此在地震动动力时程作用时,外置跨宽度在1~1.5 m 内增大,可有效减小结构的层剪力。

表 4 地震波信息

Table 4 Seismic information

地震波	年份	名称	地震台	震级	断层源距 $R_{jb}/\text{km}$
GM1	1940	Imperial Valley-02	El Centro Array #9	6.95	6.09
GM2	1952	Kern County	LA-Hollywood Stor FF	7.36	114.62
GM3	1952	Kern County	Pasadena-CIT Athenaeum	7.36	122.65
GM4	1952	Kern County	Santa Barbara Courthouse	7.36	81.3

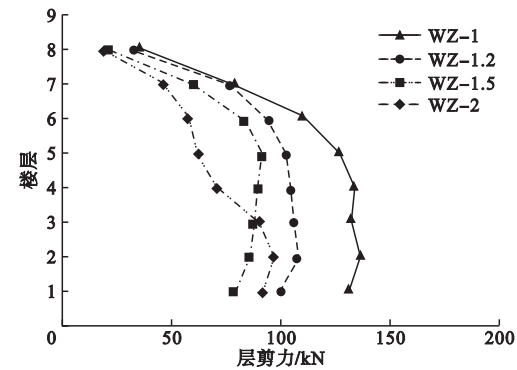


图 9 层剪力对比曲线

Fig. 9 Shear force contrast diagram

图 10 为楼面加速度对比结果,可以看出,4 种结构在顶层的楼面加速度较大,表 5 为顶层楼面加速度和底层楼面加速度的对比。外置跨宽度的增加,支撑提供的侧向刚度也会增大。

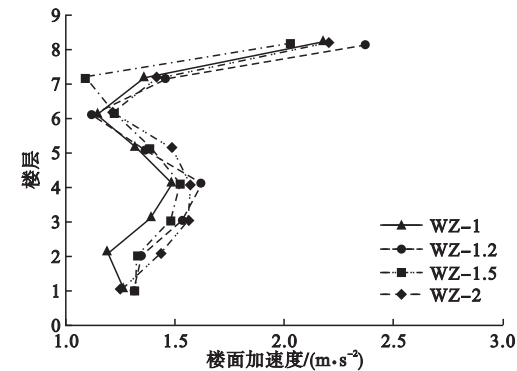


图 10 楼面加速度对比曲线

Fig. 10 Floor acceleration contrast diagram

结构位移对比结果见图 11。由图可知,结构整体的位移主要呈弯曲型变形,自下而上位移增加。对比 4 种不同外置跨宽度的结构,随着外置跨宽度的增大,顶层正向层位移有所减小,说明外置跨宽度增加,可增大结构

的抗侧刚度,减小顶层位移,防止结构产生过大变形而影响结构的正常使用。

表 5 楼面加速度对比

Table 5 Comparison of floor acceleration  $\text{m/s}^2$

结构	顶层楼面加速度	底层楼面加速度
WZ-1	2.179 1	1.255 1
WZ-1.2	2.363 9	1.298 9
WZ-1.5	2.022 9	1.298 8
WZ-2	2.202 1	1.256 0

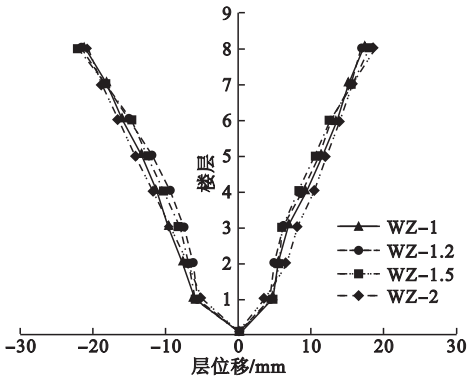


图 11 层位移对比曲线

Fig. 11 Displacement contrast diagram

3.3 结构时程分析

在 GM1 地震波作用下,4 种结构的最大基底剪力对比、最大顶点位移、顶层加速度对比结果见表 6。基底剪力时程曲线如图 12 所示,可以看出最大基底剪力出现在 6s 左右。对比不同外置跨宽度结果可以看出,随着外置跨宽度的增加,最大基底剪力也增加,结构刚度变大。



表 6 动力时程结果对比

Table 6 Comparison of dynamic time history results

结构	最大基底剪力/kN	时间/s	最大顶点位移/m	时间/s	顶层加速度/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ )	时间/s
WZ-1	147.356	5.48	0.208	5.68	1.11	7.02
WZ-1.2	152.39	6.04	0.186	5.76	1.21	7.08
WZ-1.5	163.92	5.54	0.154	7.74	1.29	6.98
WZ-2	172.96	6.28	0.129	9.22	1.35	7.98

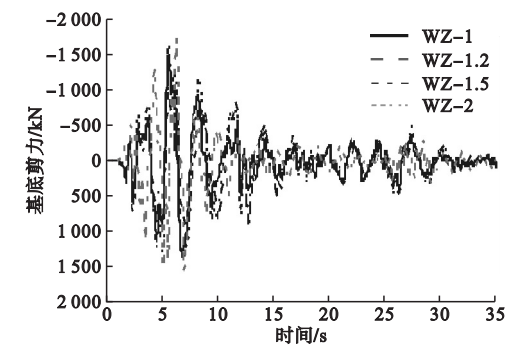


图 12 基底剪力时程曲线

Fig. 12 Base shear time history curves

顶点位移时程曲线如图 13 所示,从图中可以看出,在地震波作用下,WZ-1 顶点位移最大,随着外置跨宽度的增加,支撑提供的抗侧刚度大,结构刚度较好.

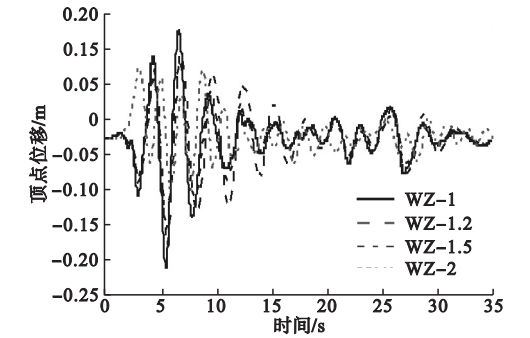


图 13 顶点位移时程曲线

Fig. 13 Vertex displacement time history curves

顶层加速度时程曲线如图 14 所示,K 形支撑安装在不同外置跨宽度内,支撑发挥的作用效果不同,外置跨宽度增加,可增加结构侧向刚度;外置跨宽度在 1~2 m 内增加,可增大结构顶点加速度.在设计外置跨宽度时,满足结构刚度、保证结构延性的同时,使支撑作用最大化,因此外

置 K 形支撑钢框架结构,外置跨宽度建议选取 1.5 m.

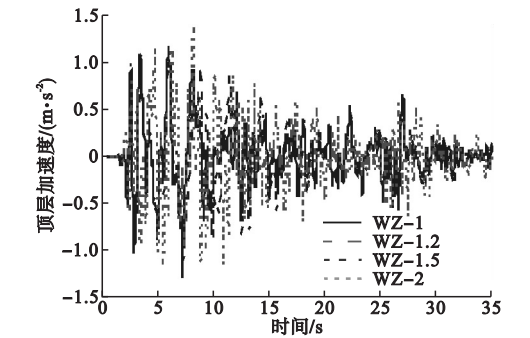


图 14 顶层加速度时程曲线

Fig. 14 Top acceleration time history curves

4 结 论

(1)笔者研究的外置 K 形支撑-钢框架结构体系,在小震作用,外置 K 形支撑处于弹性状态,外置跨宽度为较大的结构(WZ-1.5、WZ-2),其抗震性能优于外置跨宽度较小的结构(WZ-1、WZ-1.2);在大震作用下,外置支撑先于框架结构构件破坏,消耗地震能量.

(2)通过动力时程分析,从结构整体层次分析和结构时程分析的结果可知,外置支撑跨宽度为 2 m 的结构虽结构刚度增大,但在地震动作用下,外置支撑钢框架体系地震响应大,不利于结构整体抗震.外置跨宽度为 1.5 m 的结构与其他不同外置跨宽度结构比较,对地震响应明显改善,可以减小地震对结构的影响.

(3)改变外置 K 形支撑钢框架体系的外置跨宽度,通过综合对比静力弹塑性分析和动力时程分析结果表明,外置跨宽度在

1~1.5 m内增加,可以增加结构整体抗震性能,并可以充分发挥K形支撑的作用。

## 参考文献

- [1] 李幅昌,张国忠,邱增美.外置支撑钢框架结构:201621379191.8[P].2016-12-15.  
(LI Guochang, ZHANG Guozhong, QIU Zengmei. External braced steel frames: 201621379191.8[P].2016-12-15.)
- [2] ANDREW D S, CHARLES W R, DAWN E L, et al. Nonlinear modeling of concentrically braced frames[J]. Journal of constructional steel research, 2019, 157: 103-120.
- [3] 杨兰伟,熊二刚,李田.基于OpenSees的中心支撑钢框架结构静力弹塑性分析[J].钢结构,2018,33(3):39-45.  
(YANG Lanwei, XIONG Ergang, LI Tian. Pushover analysis for a concentrically braced steel frame structure based on OpenSees[J]. Steel construction, 2018, 33(3): 39-45.)
- [4] GOGGINS J, BRODERICK B M, ELGHAZOU LI A Y, et al. Shake table testing of concentrically braced steel structures with realistic connection details subjected to earthquakes[J]. Structures, 2018, 13: 102-118.
- [5] SINA K A, CEM T, MILAD B. Dynamic buckling of braces in concentrically braced frames[J]. Earthquake engineering & structural, 2018, 47(3): 613-633.
- [6] AMIN I, ALI A, MOHAMAD N. Evaluation of cyclic behaviour of special concentrically braced frames with built-up diagonal braces[J]. Structural engineering, 2018, 20(1): 1-16.
- [7] ZUOLEI D, YAOPENG L, SIULAI C. A practical analytical model for special concentrically braced frames[J]. Journal of constructional steel research, 2019, 155: 219-232.
- [8] 李玉荣,蔡康峰,唐月.中心支撑-框架钢结构设计与研究[J].工业建筑,2010,40(11): 116-130.  
(LI Yurong, CAI Kangfeng, TANG Yue. Study and new design method for chevron-braced steel frames[J]. Industrial construction, 2010, 40(11): 116-130.)
- [9] DIPTI R S, ANKIT P. Seismic behavior of concentrically braced frames designed using direct displacement based method[J]. Steel structures, 2019, 19: 96-109.
- [10] 刘美子,顾强.基于能量设计的K型偏心支撑钢框架抗震倒塌富余度[J].苏州科技大学学报(工程技术版),2018,31(1):1-7.  
(LIU Meizi, GU Qiang. Redundancy of seismic collapse of K-type eccentrically braced steel frames based on energy design[J]. Journal of Suzhou university of science and technology (engineering and technology), 2018, 31(1): 1-7.)
- [11] 熊二刚,张倩.中心支撑钢框架结构基于性能的塑性抗震设计[J].振动与冲击,2013,32(19):32-38.  
(XIONG Ergang, ZHANG Qian. Performance-based plastic design method for steel concentrically braced frames[J]. Journal of vibration and shock, 2013, 32(19): 32-38.)
- [12] JOSHUA G S, LARRY A F, ERIC M H. Seismic performance assessment of low-ductility concentrically braced frames[J]. Journal of structural engineering, 2019, 145(4): 04019016
- [13] SEONG H, DIMITRIOS G L. Earthquake-induced collapse risk and loss assessment of steel concentrically braced frames[J]. Engineering materials, 2018, 763: 90-97.
- [14] 董志骞,李钢,李宏男.多层中心支撑钢框架结构抗震性能简化评估方法[J].建筑结构学报,2018,39(5):1-9.  
(DONG Zhiqian, LI Gang, LI Hongnan. A simplified method for seismic performance evaluation of MDOF steel concentrically braced frames[J]. Journal of building structures, 2018, 39(5): 1-9.)
- [15] 刘霞.钢框架-支撑体系中装配式支撑连接方式对刚架抗侧刚度的影响分析[D].济南:山东建筑大学,2016.  
(LIU Xia. Analysis on the influence of the assembly braces connection mode on the lateral stiffness of the steel frame-braced system[D]. Ji'nan: Shandong Jianzhu University, 2016.)
- [16] HENRIQUES J, CALADO L, CASTIGLIONI C, DEGE H. Dissipative connections with U-shaped steel plate for braces of concentrically braced frames[J]. Bulletin of earthquake engineering, 2019, 17(11): 6203-6237.
- [17] 董龙光.带可替换剪切连接件的防屈曲偏心支撑钢框架动力弹塑性分析[D].兰州:兰州理工大学,2019.  
(DONG Longguang. Dynamic elastoplastic analysis of eccentrically buckling restrained braced steel frames with replaceable shear links[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2019.)
- [18] 陈希杰.远场地震下K型偏心支撑钢框架基于能量的性能设计方法[D].苏州:苏州科技学院,2016.  
(CHEN Xijie. Energy-based seismic design method of K-type steel eccentrically braced frame under far field earthquake[D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2016.)
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑抗震设计规范:GB50011—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.  
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for seismic design of buildings: GB50011—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.)  
(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)