

文章编号:1673-2049(2013)02-0035-07

带 X 型支撑钢筋混凝土框架结构抗震性能分析

樊海涛,王志鑫,赵黄娟,孙爱伏

(烟台大学 土木工程学院,山东 烟台 264005)

摘要:为了提高钢筋混凝土框架结构抵抗超设防烈度地震的能力,研究了在框架中合理设置支撑对结构抗震性能的影响。以某 8 层框架工程为背景,对 3 种不同的结构方案——无支撑钢筋混凝土框架、带 X 型钢管支撑钢筋混凝土框架和带 X 型钢管理混凝土支撑钢筋混凝土框架结构在强震作用下的受力性能进行了 Pushover 分析。结果表明:在钢筋混凝土框架结构中合理设置支撑可以有效提高结构抗侧刚度,增大结构耗能能力和抗震能力,减小结构顶点侧移和层间侧移;不同材料的支撑起到的抗震效果也不相同,对于本文分析模型,合理设置钢管混凝土支撑起到的抗震效果比设置钢管支撑更加明显。

关键词:钢筋混凝土框架结构;X 型支撑;抗震性能;能力谱法

中图分类号:TU375

文献标志码:A

Analysis of Seismic Performance of RC Frame Structure with X-bracings

FAN Hai-tao, WANG Zhi-xin, ZHAO Huang-juan, SUN Ai-fu

(School of Civil Engineering, Yantai University, Yantai 264005, Shandong, China)

Abstract: In order to improve the seismic performance of reinforced concrete (RC) frame structure under strong earthquake, the influences of rational arranging bracings on the seismic performances were investigated. Analysis models of 8-story RC frame without bracing, with steel tube X-bracings and with concrete-filled steel tube X-bracings were built, and Pushover analysis of mechanical behavior under strong earthquake of these models was carried out. The results show that the rational arranging bracings in RC frame structure can efficiently increase the structural lateral stiffness, energy dissipation capacity and seismic performance, and significantly decrease the top displacement and the story drift of the RC frame structure. The seismic effects for different material bracings are not the same, and to analysis models in the paper, the concrete-filled steel tube bracings can provide more seismic effect than the steel tube bracings for the RC frame.

Key words: RC frame structure; X-bracing; seismic performance; capacity spectrum method

0 引言

近年来,世界各地强震频发,智利的 8.8 级地震、海地的 7.0 级地震、新西兰的 7.8 级地震、日本的 9.0 级地震以及中国的唐山地震、汶川地震等都

造成了巨大的经济损失和人员伤亡。

中国是强震多发国家之一,钢筋混凝土框架结构具有平面布置灵活、施工技术比较成熟的优点,是在中国抗震区广泛使用的一种结构形式;但钢筋混凝土框架抗侧刚度小,水平荷载作用下侧移大,结构

收稿日期:2012-11-07

基金项目:山东省高等学校科技计划项目(J09LE02);国家自然科学基金项目(51208449)

作者简介:樊海涛(1970-),男,河南温县人,副教授,工学博士,E-mail:ytdxfht@163.com。

抗震能力有限,这严重制约了其使用范围。框架剪力墙可以有效提高结构抗侧刚度,减小水平位移,但其结构自重大,施工较为复杂,地基的处理要求高。为此,有学者提出在框架结构中引入钢结构支撑,以达到既提高结构刚度和抗震性能,又不明显增加结构自重,且施工方便的目的。

目前,各国在钢结构框架-支撑体系方面已取得大量研究成果^[1-8],并得到广泛应用,同时普通钢筋混凝土框架的研究和应用也较为深入和成熟^[9-13],但对带支撑钢筋混凝土框架结构的性能研究较少^[13]。陆新征等^[14]进行了利用斜支撑提高异型柱框架结构抗扭性能的研究,陈新孝等^[15]对偏心支撑钢筋混凝土框架进行了试验研究与极限分析,于安林等^[16-17]对带 Y 型钢支撑的钢筋混凝土框架进行了非线性性能和耗能能力的研究,代红军等^[18]对钢筋混凝土-钢管支撑结构进行了地震反应分析计算;Qi 等^[19]对采用侧向 3D 偏心支撑框架的办公楼建筑进行了 Pushover 分析和时程分析研究,Maheri 等^[20-21]对带有 X 型钢支撑和隅撑型钢支撑的延性钢筋混凝土框架及其节点进行了非线性静力试验研究,Youssef 等^[22]对纯钢筋混凝土框架和经过合理方法设计的带支撑的钢筋混凝土框架进行了试验研究。然而这些研究工作主要是针对单榀平面框架展开的,而对空间结构和实际工程的分析较少。

本文中笔者以某 8 层钢筋混凝土框架工程为背景,采用能力谱法研究了无支撑钢筋混凝土框架、带 X 型钢管中心支撑钢筋混凝土框架和带 X 型钢管混凝土中心支撑钢筋混凝土框架在强震作用下的非线性受力性能与破坏形态,分析了支撑对强震作用下结构抗震性能的影响。

1 ATC-40 中能力谱法的基本原理

美国规范 ATC-40 中能力谱法的基本思想是建立 2 条相同基准的谱线:一条是由荷载-位移曲线转化成的能力谱线,另一条是由加速度反应谱转化成的需求谱线,把 2 条谱线绘制在同一坐标系中,2 条谱线的交点为性能点,通过性能点的位置,结合 Pushover 分析得出的结构底部剪力-位移曲线,综合判断结构的抗震性能。具体分析步骤如下:

(1)确定侧向荷载作用下结构的荷载-位移曲线

建立结构计算模型后,计算结构构件的实际承载力,包括构件截面开裂弯矩和正截面实际受弯承载力等,并估计构件的弹性、开裂和屈服后的刚度,然后用 Pushover 方法分析结构层间侧向刚度和层

间位移角,最终确定结构的荷载-位移曲线。

(2)将荷载-位移曲线转换为能力谱

采用式(1)将荷载-位移曲线上各点 (V_i, Δ_i) ,转换为能力谱相应点 S_{ai} 和 S_{di} ,即

$$\left. \begin{aligned} S_{ai} &= \frac{V_i/G}{\alpha_1} \\ S_{di} &= \frac{\Delta_i}{\gamma_1 X_{1, \text{roof}}} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: S_{ai} 为谱加速度; S_{di} 为谱位移; V_i 为底部剪力; Δ_i 为顶点位移; G 为质量; α_1 为第一振型质量参与系数; γ_1 为第一振型振型参与系数; $X_{1, \text{roof}}$ 为第一振型顶点振幅。

(3)建立地震需求谱

将标准的加速度反应谱转换为地震需求谱模式。在强震作用下,结构达到非线性状态时,结构物的固有粘滞阻尼和滞回阻尼将导致结构在振动过程中产生消能作用,因此必须考虑结构非线性性能对地震需求的折减作用。

(4)确定性能点

将能力谱线和某水准地震需求谱线绘制在同一坐标系中,2 条谱线的交点称为性能点,性能点对应的位移为等效单自由度体系在该地震作用下的谱位移。将性能点谱位移按照式(1)反算转换为原结构的顶点位移,根据该位移在原结构荷载-位移曲线的位置,结合 Pushover 分析结果,可确定结构在该地震作用下的塑性铰分布、构件截面曲率、顶点侧移及层间位移角等,最后综合分析结构的抗震能力。若 2 条谱线没有交点,说明结构的抗震能力不足,需要重新设计。

2 带支撑的框架结构抗震性能分析

2.1 工程概况

某 8 层钢筋混凝土框架结构,首层层高 5.1 m,其余各层层高 3.9 m,总高度 32.4 m,柱网尺寸为 6.0 m×8.7 m,结构平面布置和支撑布置如图 1 所示。楼面可变荷载标准值为 4 kPa;屋面可变荷载标准值为 2 kPa;抗震设防烈度为 7 度(0.1g, g 为重力加速度),设计地震分组为一组,Ⅱ类场地(场地特征周期 $T_g=0.35$ s,计算罕遇地震时 $T_g=0.4$ s)。按 7 度设防进行设计,然后采用能力谱法分析结构在 7,8,9 度罕遇地震作用下的抗震性能。

2.2 分析模型

分析模型采用 3 种不同的结构方案。方案 M1 为无支撑普通钢筋混凝土框架结构,柱的截面尺寸均为 650 mm×650 mm,横向框架梁的截面尺寸为

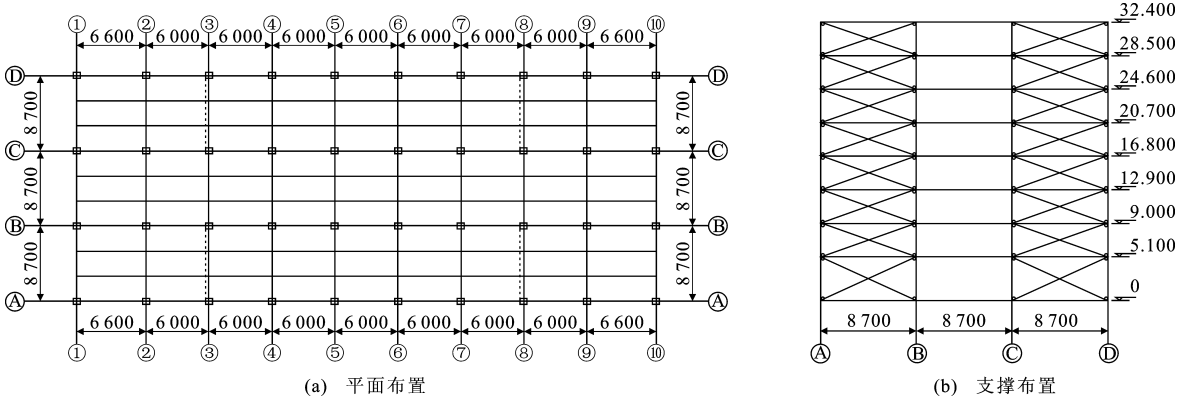


图 1 结构平面及支撑布置(单位:mm)

Fig.1 Structural Plane and Bracing Arrangement (Unit:mm)

300 mm×800 mm,纵向框架梁的截面尺寸为 300 mm×600 mm,次梁的截面尺寸为 250 mm×500 mm,板厚为 120 mm,混凝土强度等级均为 C30。方案 M2 为带 X 型钢管中心支撑钢筋混凝土框架结构,在图 1(a)中的虚线位置布置竖向连续 X 型钢管中心支撑,支撑采用直径 150 mm、壁厚 6 mm 的 Q235 钢管,支撑形式如图 1(b)所示,其余结构参数同方案 M1。方案 M3 为带 X 型钢管混凝土中心支撑钢筋混凝土框架结构,在方案 M3 的钢管支撑内填充 C30 混凝土。

进行空间结构非线性分析时,采用膜单元模拟水平楼板,空间杆单元模拟梁、柱和支撑,支撑两端与框架以铰连接。

2.3 基于 ATC-40 的能力谱分析

2.3.1 塑性铰设置

为了分析结构的非线性性能,需要在构件上设置塑性铰,参考美国规范 FEMA-273 和 ATC-40 中的规定,在梁两端设置弯矩铰和剪力铰,在柱两端设置压弯铰,支撑中设置轴力铰,塑性铰骨架曲线如图 2 所示。

图 2 中,点 A 位于原点;点 B(B′)代表屈服点,变形超过点 B(B′)后塑性铰开始出现,点 C(C′)代表构件的极限承载力,点 D(D′)代表构件的残余强度,点 E(E′)代表构件的破坏;IO(立即使用)、LS(生命安全)、CP(防止倒塌)均为结构的性能标志点; V_y 为屈服剪力, M_y 为屈服弯矩,基于实配钢筋计算,否则基于最小配筋计算; Δ_y 为与 V_y 对应的剪切变形, θ_y 为与 M_y 对应的转角变形。

2.3.2 侧向加载模式

分析中,采用“重力+倒三角形侧向加载”的加载模式分析横向支撑对结构抗震性能的影响,按照中国现行的《建筑抗震设计规范》(GB 50011—

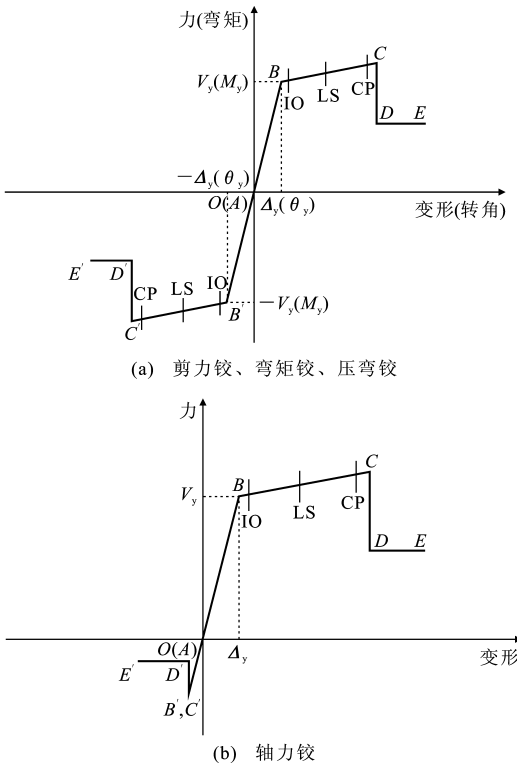


图 2 塑性铰骨架曲线

Fig.2 Skeleton Curves of Plastic Hinge

2010)[23],7,8,9 度罕遇地震的水平地震影响系数最大值分别为 0.5,0.9,1.4,根据中国抗震相关系数调整 ATC-40 中的地震影响系数 C_A , C_V 见表 1。

表 1 ATC-40 中的地震影响系数

Tab.1 Earthquake Affecting Coefficients in ATC-40		
地震烈度	C_A	C_V
7 度罕遇地震	0.20	0.20
8 度罕遇地震	0.36	0.36
9 度罕遇地震	0.56	0.56

2.3.3 结果分析与性能评价

(1)结构抗震能力分析

图 3 为通过 Pushover 分析得到各模型的能力

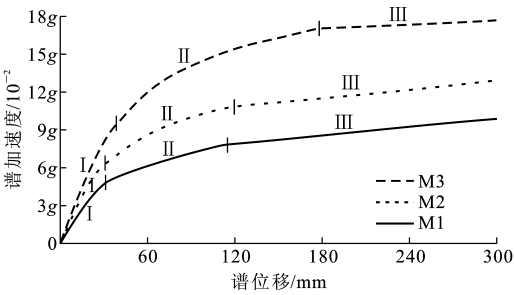
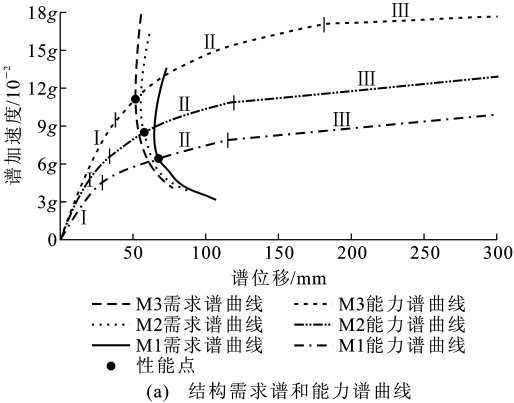


图 3 结构能力谱曲线
Fig. 3 Capacity Spectrum Curves of Structure

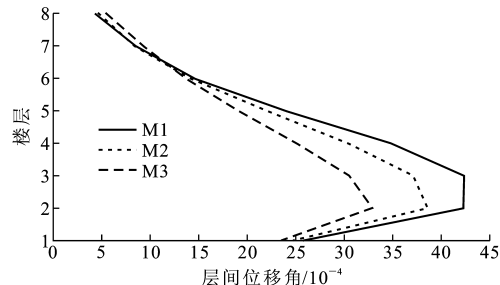
谱曲线。从图 3 可以看出：①结构的能力谱曲线近似为三段折线，第Ⅰ阶段结构处于弹性阶段，第Ⅱ阶段结构开始出现塑性铰，结构位移快速增加，第Ⅲ阶段是塑性铰向极限承载力方向发展阶段；②M2 的抗震性能和耗能能力高于 M1，而 M3 的抗震性能和耗能能力又高于 M2，说明支撑的性能对结构抗震能力有重要影响。

(2) 7 度罕遇地震作用下结构抗震性能评价

图 4 为 7 度罕遇地震作用下结构的抗震性能。从图 4 可以看出：①各模型的性能点处于能力谱曲线的第Ⅱ阶段，说明结构还有较强的继续承载能力；②M3 的抗震性能优于 M2，两者均优于 M1，并且各模型层间位移角满足现行规范层间位移角限制为 1/50 的规定。



(a) 结构需求谱和能力谱曲线



(b) 性能点处的层间位移角

图 4 7 度罕遇地震作用下结构的抗震性能
Fig. 4 Seismic Performances of Structure Under Rare Earthquake in Zones of Seismic Intensity 7

图 5 为 7 度罕遇地震作用下结构在性能点处的塑性铰分布。从图 5 可以看出：①性能点处各模型均是梁端先出现塑性铰，框架柱上未出现塑性铰，符合“强柱弱梁”的设计理念；②各模型的梁端塑性铰均处于 IO 的能力水平之内，这表明此时框架梁、柱无严重破坏，而受压支撑部分塑性铰进入了极限状态，说明受压支撑将首先进入破坏状态。

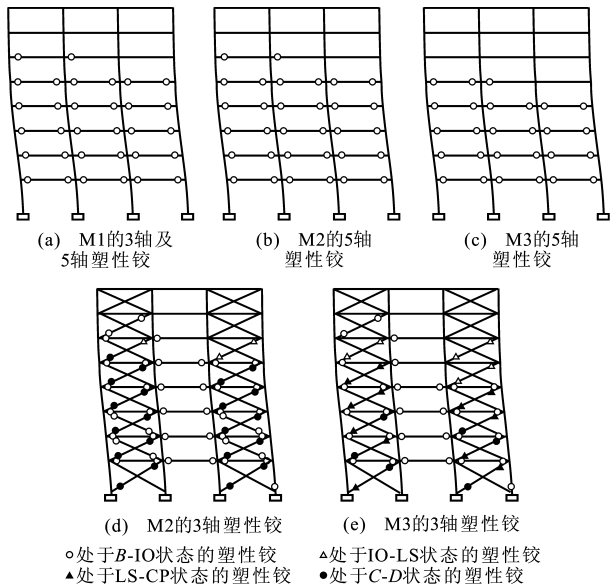
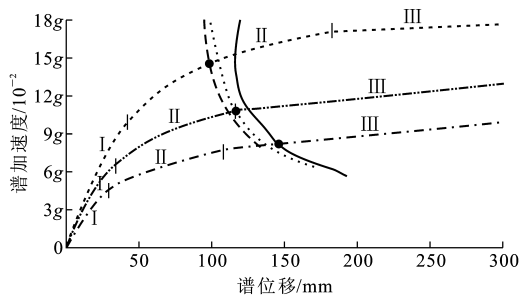


图 5 7 度罕遇地震作用下结构在性能点处的塑性铰分布
Fig. 5 Plastic Hinge Distributions of Structure at Performance Point Under Rare Earthquake in Zones of Seismic Intensity 7

(3) 8 度罕遇地震作用下结构抗震性能评价

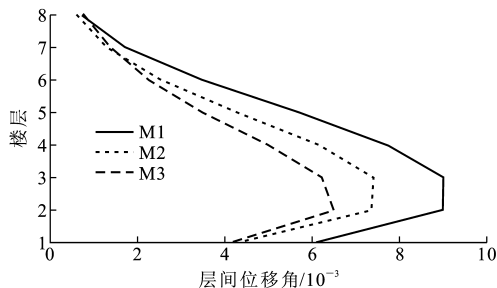
图 6 为 8 度罕遇地震作用下结构的抗震性能。从图 6 可以看出：①M1 的性能点已经进入能力谱曲线的第Ⅲ阶段，说明结构已经开始向极限承载力发展，即将丧失抗震能力，M2 的性能点处于能力谱曲线第Ⅱ阶段和第Ⅲ阶段的分界点，M3 的性能点仍处于能力谱曲线的第Ⅱ阶段，说明增加支撑能够提高结构抵抗地震的能力；②M3 的抗震性能优于 M2，两者均优于 M1，各模型层间位移角满足现行规范 1/50 的规定。

图 7 为 8 度罕遇地震作用下结构在性能点处的塑性铰分布。从图 7 可以看出：①3 个模型底层柱端均开始出现塑性铰，但出现程度不同，M1 底层柱底端均出现塑性铰，且 M1 的梁端塑性铰部分进入 LS 阶段，说明 M1 即将达到其抗震能力的极限；M2 底层 3 个柱端出现塑性铰，而 M3 仅在底层边柱出现塑性铰，M2, M3 梁端塑性铰仍处于 IO 阶段；②支撑的破坏比框架梁、柱的严重，说明支撑起到了第 1 道设防的效果，消耗了地震能量，保护了主体



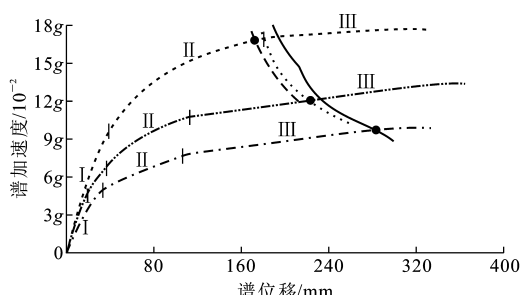
--- M3需求谱曲线 --- M3能力谱曲线
... M2需求谱曲线 --- M2能力谱曲线
— M1需求谱曲线 --- M1能力谱曲线
● 性能点

(a) 结构需求谱和能力谱曲线



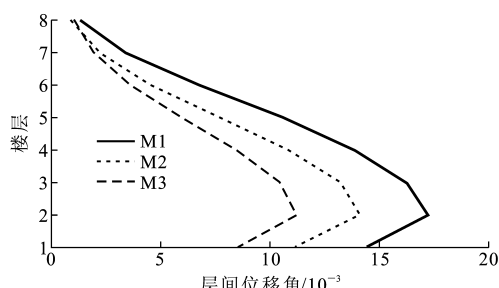
(b) 性能点处的层间位移角

图 6 8 度罕遇地震作用下结构的抗震性能
Fig. 6 Seismic Performances of Structure Under Rare Earthquake in Zones of Seismic Intensity 8



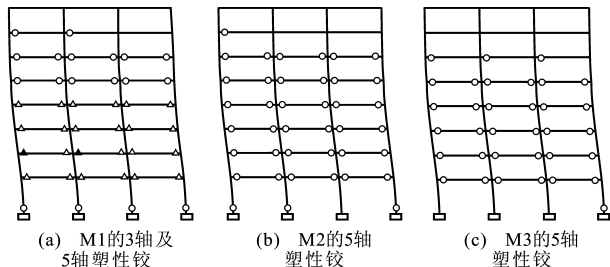
--- M3需求谱曲线 --- M3能力谱曲线
... M2需求谱曲线 --- M2能力谱曲线
— M1需求谱曲线 --- M1能力谱曲线
● 性能点

(a) 结构需求谱和能力谱曲线



(b) 性能点处的层间位移角

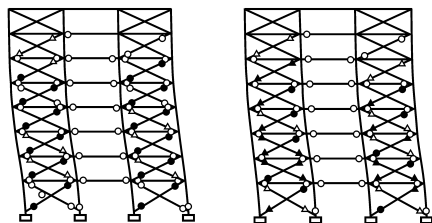
图 8 9 度罕遇地震作用下结构的抗震性能
Fig. 8 Seismic Performances of Structure Under Rare Earthquake in Zones of Seismic Intensity 9



(a) M1的3轴及5轴塑性铰

(b) M2的5轴塑性铰

(c) M3的5轴塑性铰



(d) M2的3轴塑性铰

(e) M3的3轴塑性铰

○处于B-IO状态的塑性铰 △处于IO-LS状态的塑性铰
▲处于LS-CP状态的塑性铰 ●处于C-D状态的塑性铰

图 7 8 度罕遇地震作用下结构在性能点处的塑性铰分布
Fig. 7 Plastic Hinge Distributions of Structure at Performance Point Under Rare Earthquake in Zones of Seismic Intensity 8

结构。

II 阶段和第 III 阶段的临界点,说明 M3 的抗震性能优于 M1,M2;②M1 的最大层间位移角接近 1/50, M2 的最大层间位移角为 1/70, M3 的最大层间位移角为 1/90,说明 M1 接近破坏,而 M2,M3 还有一定抗震能力。

图 9 为 9 度罕遇地震作用下结构在性能点处的塑性铰分布。从图 9 可以看出:①各模型底层柱底端均出现塑性铰,但塑性铰的发展状态不同,带支撑的框架底层柱塑性铰出现的较晚,破坏程度也较小;②M1 由于没有支撑的保护,第 1~4 层框架梁端均出现严重破坏,而 M2,M3 由于支撑的保护作用,框架梁、柱端部破坏明显减轻,这有利于降低结构震后的修复费用;③比较 M2,M3 塑性铰的分布和破坏情况发现, M3 中框架梁、柱的破坏比 M2 轻,但是支撑的破坏比 M2 严重,这与 M3 采用钢骨混凝土支撑的刚度大、分担地震能量多有直接关系,说明支撑的性能对结构的抗震能力有直接影响,支撑刚度加大有利于保护主体框架结构,但是由于吸收地震能量过大,容易提前破坏。

3 结 语

(4)9 度罕遇地震作用下结构抗震性能评价
图 8 为在 9 度罕遇地震作用下结构的抗震性能。从图 8 可以看出:①M1,M2 的性能点已经进入能力谱曲线的第 III 阶段,而 M3 的性能点接近第

(1)按现行规范 7 度设防要求设计的钢筋混凝土框架结构可以有效抵抗 7 度罕遇地震的作用,但

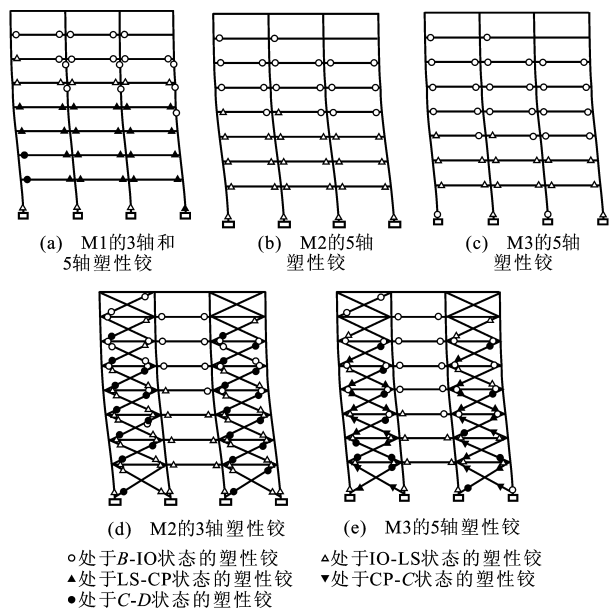


图9 9度罕遇地震作用下结构在性能点处的塑性铰分布

Fig. 9 Plastic Hinge Distributions of Structure at Performance Point Under Rare Earthquake in Zones of Seismic Intensity 9

是在更高烈度罕遇地震作用下,会发生较为严重的破坏。

(2)钢筋混凝土框架中合理设置支撑可以在不明显提高造价或增大结构自重的情况下,有效提高结构抗震能力,在本文分析中设置钢管支撑可以有效抵抗8度罕遇地震,设置钢管混凝土支撑可以有效抵抗9度罕遇地震。

(3)支撑的性能对整体结构抗震能力有直接影响,增大支撑刚度有利于保护主体结构,但是过大的支撑刚度容易造成支撑过早破坏,因此合理选择支撑形式和支撑刚度是此类结构设计的关键。

(4)本文是对钢筋混凝土支撑框架抗震性能的初步分析,各国对这种新型结构体系的研究还处于起步阶段,研究成果较少,很多问题还有待进一步地深入研究和探讨。

参考文献:

References:

[1] 钱稼茹,陈茂盛,张天申. 偏心支撑钢框架在水平力作用下的试验研究和极限分析[J]. 建筑结构,1993,23(4):3-9.
QIAN Jia-ru, CHEN Mao-sheng, ZHANG Tian-shen. Experimental Study and Limit Analysis on RC Frames with Eccentric Braces Under the Effect of Horizontal Force[J]. Building Structure, 1993, 23(4): 3-9.

[2] 陈红英,童根树. 弯曲型支撑框架的弹性稳定分析[J]. 土木工程学报,2001,34(6):17-22.
CHEN Hong-ying, TONG Gen-shu. Elastic Stability of Frames with Bending-type Bracing System[J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(6): 17-22.

[3] 童根树,季 渊. 多高层框架-弯剪型支撑结构的稳定性研究[J]. 土木工程学报,2005,38(5):28-33.
TONG Gen-shu, JI Yuan. Stability of Multistorey Frames Braced by Timoshenko Vertical Cantilevers[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(5): 28-33.

[4] 申永康,邵建华,王正中. 偏心支撑钢框架塑性极限承载力分析[J]. 建筑科学,2007,23(7):1-3.
SHEN Yong-kang, SHAO Jian-hua, WANG Zheng-zhong. Analysis of Plastic Ultimate Load-bearing Capacity for Eccentric Brace Steel Frame[J]. Building Science, 2007, 23(7): 1-3.

[5] 黄 怡,王元清,石永久. 框架-支撑钢结构抗震性能的有限元分析[J]. 四川建筑科学研究,2005,31(6):140-143.
HUANG Yi, WANG Yuan-qing, SHI Yong-jiu. Finite Element Analysis on Seismic Properties of Steel Braced Frame Structure[J]. Sichuan Building Science, 2005, 31(6): 140-143.

[6] 郭秉山,庄晓勇,闫月梅. K型偏心支撑钢框架支撑的设计研究[J]. 西安科技大学学报,2007,27(1):30-34.
GUO Bing-shan, ZHUANG Xiao-yong, Yan Yue-mei. Brace Design of K Shape Eccentrically Braced Steel Frames[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2007, 27(1): 30-34.

[7] 闫月梅,郭秉山. Y型偏心支撑钢框架受力性能有限元分析[J]. 西安科技大学学报,2009,29(2):154-158, 164.
YAN Yue-mei, GUO Bing-shan. Performance of Y Shape Eccentrically Braced Steel Frames Under Cyclic Load[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2009, 29(2): 154-158, 164.

[8] 高山,魏 民,徐 嫒. 支撑钢框架中关键柱破坏后结构抗倒塌性能分析[J]. 建筑科学与工程学报,2013,30(1):66-73.
GAO Shan, WEI Min, XU Man. Performance Analysis of Structural Resist Progressive Collapse of Braced Steel Frames After Destruction of Key Column[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2013, 30(1): 66-73.

[9] 吴 涛,刘伯权,邢国华,等. RC框架变梁变柱中节点抗裂性能试验[J]. 长安大学学报:自然科学版,2009,

- 29(4):77-81.
- WU Tao, LIU Bo-quan, XING Guo-hua, et al. Crack Resistance Test of Interior Joints with Abrupt Reduction in Beam and Column Section in Reinforced Concrete Frame[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(4):77-81.
- [10] 张国军, 刘伯权, 白国良. 钢筋混凝土框架柱在高轴压比下的抗震性能试验[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2002, 22(6):53-57.
- ZHANG Guo-jun, LIU Bo-quan, BAI Guo-liang. Experimental Study on Aseismic Behavior of RC Frame Columns with High Axial Compression Ratio [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2002, 22(6):53-57.
- [11] 潘元, 邢国华, 吴涛, 等. 梁高不等的混凝土中柱节点抗震性能[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2010, 30(4):60-64.
- PAN Yuan, XING Guo-hua, WU Tao, et al. Failure Mechanism and Seismic Behavior of Interior Joints with Different Depth Beams[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010, 30(4):60-64.
- [12] 郭猛, 刘佩, 姚谦峰. 翼缘框架柱框架结构的动力特性[J]. 建筑科学与工程学报, 2009, 26(2):57-62.
- GUO Meng, LIU Pei, YAO Qian-feng. Dynamic Characteristics of Flange Frame Column Structure [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2009, 26(2):57-62.
- [13] 沈祖炎, 黄奎生, 陈以一, 等. 大型火电厂主厂房钢支撑-框架结构振动台试验模型[J]. 建筑科学与工程学报, 2006, 23(4):1-5.
- SHEN Zu-yan, HUANG Kui-sheng, CHEN Yi-yi, et al. Shaking Table Test Model with Steel Braced-frame Structure About Main Plant of Large Thermal Power Plant[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, 23(4):1-5.
- [14] 陆新征, 江见鲸. 利用斜支撑提高异型柱框架结构抗扭性能的研究[J]. 工业建筑, 2002, 32(6):39-41, 67.
- LU Xin-zheng, JIANG Jian-jing. Studies on Improving the Torsion Resistance Ability of Special Shape Column Frames Using Inclined Supports[J]. Industrial Construction, 2002, 32(6):39-41, 67.
- [15] 陈新孝, 牛荻涛, 石建光, 等. 偏心支撑钢筋混凝土框架的试验研究与极限分析[J]. 工业建筑, 2003, 33(3):35-38.
- CHEN Xin-xiao, NIU Di-tao, SHI Jian-guang, et al. Experimental Study and Limit Analysis on Reinforced Concrete Frames with Eccentric Braces[J]. Industrial Construction, 2003, 33(3):35-38.
- [16] 顾伟良. Y型钢支撑加固结构钢筋混凝土框架的非线性分析[D]. 苏州: 苏州科技学院, 2010.
- GU Wei-liang. Nonlinear Finite Element Analysis of RC Frames with Y-eccentrically Brace[D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2010.
- [17] 赵宝建. 内填Y型钢支撑的高层钢筋混凝土框架非线性时程分析[D]. 苏州: 苏州科技学院, 2011.
- ZHAO Bao-jian. Nonlinear Time History Analysis of High-rise RC Frames with Y-eccentrically Brace[D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2011.
- [18] 代红军, 祁皑. 钢筋混凝土框架-钢管支撑结构地震反应计算分析[J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2009, 37(6):889-894.
- DAI Hong-jun, QI Ai. Analysis on Performance of Reinforced Concrete Frame Structure with Steel-bracing Based on ETABS[J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science Edition, 2009, 37(6):889-894.
- [19] QI X, CHANG K L, TSAI K C. Seismic Design of Eccentrically Braced Space Frame[J]. Journal of Structural Engineering, 1997, 123(8):977-985.
- [20] MAHERI M R, KOUSARI R, RAZAZAN M. Push-over Tests on Steel X-braced and Knee-braced RC Frames[J]. Engineering Structures, 2003, 25(13):1697-1705.
- [21] MAHERI M R, HADJIPOUR A. Experimental Investigation and Design of Steel Brace Connection to RC frame[J]. Engineering Structures, 2003, 25(13):1707-1714.
- [22] YOUSSEF M A, GHAFARZADEH H, NEHDI M. Seismic Performance of RC Frames with Concentric Internal Steel Bracing [J]. Engineering Structures, 2007, 29(7):1561-1568.
- [23] GB 50011—2010, 建筑抗震设计规范[S].
- GB 50011—2010, Code for Seismic Design of Buildings[S].