

引用本文:王四清,陈宇,艾辉军,等.基于性能的既有建筑防屈曲支撑抗震加固设计[J].建筑科学与工程学报,2021,38(2):38-46.
WANG Si-qing, CHEN Yu, AI Hui-jun, et al. Performance-based Seismic Design for Existing Building Reinforced with Bucking Restrained Braces[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2021, 38(2): 38-46.

DOI:10.19815/j.jace.2020.08009

基于性能的既有建筑防屈曲支撑抗震加固设计

王四清¹, 陈宇¹, 艾辉军¹, 唐学武², 邵磊², 毛土明¹

(1. 湖南省建筑设计院有限公司, 湖南长沙 410006; 2. 湖南省地震局, 湖南长沙 410004)

摘要:对于抗震能力低、抗震构造措施普遍不满足现行规范的原非抗震设防区既有建筑,采用消能减震技术加固结构,通过性能化设计方法实现抗震加固目标,可以解决传统加固方法效率低、难以实施等难题。以原非抗震设防区某既有框架结构教学楼加固项目为例,介绍了采用耗能防屈曲支撑提高抗震性能的具体方法和既有建筑基于性能的抗震加固设计流程。结果表明:加固前结构单体中最大的扭转周期比达到了0.96,最大位移比为1.38,加固后扭转周期比控制为0.84,最大位移比为1.20;加固前结构小震下构件承载力基本满足要求,但扭转周期比和抗震构造措施不满足现行规范要求,大震下结构会发生严重破坏甚至倒塌;加固后结构构件承载力能满足7度小震(多遇地震提高1度)要求,小震下防屈曲支撑调整结构抗扭刚度,减小扭转效应,大震下防屈曲支撑屈服耗能,显著提高了结构的抗大震性能;当结构的抗震性能明显提高时,抗震构造措施要求可适当降低。

关键词:既有建筑;抗震加固;屈曲约束支撑;基于性能;弹塑性时程分析

中图分类号: TU375

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2021)02-0038-09

Performance-based Seismic Design for Existing Building Reinforced with Bucking Restrained Braces

WANG Si-qing¹, CHEN Yu¹, AI Hui-jun¹, TANG Xue-wu², SHAO Lei², MAO Tu-ming¹

(1. Hunan Architectural Design Institute Limited Company, Changsha 410006, Hunan, China;

2. Hunan Earthquake Agency, Changsha 410004, Hunan, China)

Abstract: For the existing buildings in the original non seismic fortification area with low seismic capacity and seismic structural measures generally do not meet the current codes, the application of energy dissipation technology to strengthen the structure and the realization of seismic reinforcement targets through performance-based design method can solve the problems such as low efficiency and difficulty in implementation of traditional reinforcement methods. Taking the reinforcement project of an existing frame structure teaching building in the original non-seismic fortification area as an example, the method to improve the seismic performance by using bucking restrained braces and the design flow of performance-based seismic reinforcement for the existing building was introduced. The results show that the maximum torsion period ratio is 0.96 and the maximum displacement ratio is 1.38 before reinforcement, and the maximum torsion period ratio

收稿日期:2020-08-10

基金项目:湖南省重点研发计划项目(2017SK2260)

作者简介:王四清(1965-),男,湖南长沙人,教授级高级工程师,E-mail:AG5678@163.com。

is 0.84 and the maximum displacement ratio is 1.20 after reinforcement. Before reinforcement, the bearing capacity of structural members under small earthquakes basically meets the requirements, but the torsional cycle ratio and seismic structural measures do not meet the requirements of current codes, and the structures under large earthquakes will be seriously damaged or even collapse. After reinforcement, the bearing capacity of the structural members can meet the requirement of 7 degrees small earthquake (increasing one degree in frequent earthquakes). The buckling restrained braces adjusts the torsional stiffness of the structure under small earthquake, which reduces the torsional effect. The yield energy dissipation of the buckling restrained braces under large earthquake significantly improves the anti-major earthquake performance of the structure. When the seismic performance of the structure is obviously improved, the requirements of seismic structural measures can be reduced appropriately.

Key words: existing building; seismic reinforcement; buckling restrained brace; performance-based; dynamic elastic-plastic time history analysis

0 引言

随着《中国地震动参数区划图》(GB 18306—2015)^[1]的实施,湖南的抗震设防要求全面提高,实现了抗震设防全覆盖,新增抗震设防6度区域占到了湖南省面积50%以上。原非抗震区的既有建筑物普遍存在抗震能力偏低,甚至没有任何抗震构造措施的情况。这些区域内重点设防类建筑、生命线工程建筑以及老旧保护性建筑等有提高抗震能力的切实需求^[2-3]。

现行《建筑抗震鉴定标准》(GB 50023—2009)^[4]对抗震鉴定工作起到了重要指导作用,但其基于的设计思想是“小震弹性承载力+抗震延性构造措施”。随着抗震评估和加固设计工作遇到越来越复杂的挑战。如能直接定量评估建筑结构在中震和大震下的抗震性能,包括各构件在中震和大震下的性能状况,则可更准确判断既有建筑是否需要抗震加固及如何更有效地加固结构^[5-7]。因此,急需引入性能化设计理论,更好地评估既有建筑在中震和大震下的抗震性能。

既有结构加固方法很多。传统方案一般基于结构构件加固,对于混凝土结构有:增大截面法、外包钢加固法、粘钢加固法、粘碳纤维加固法等,但这些方法湿作业多,施工影响大,实施困难^[8-9]。防屈曲支撑由内核构件和外围约束体系构成,是一种兼具普通支撑和金属阻尼器双重功能的支撑形式,不仅能调整结构刚度,而且具有优异的滞回性能,为建筑结构抗震设计和抗震加固改造提供了一种新的选择^[10-12]。同时,防屈曲支撑安装方便,一般使用过程中不需要定期检查,维护工作量小,能满足加固工程

施工影响小和维护次数少的要求。

1 工程概况

湖南湘潭市某小学教学楼建成于2000年左右,当时其所在区域为非抗震设防区,故其未考虑抗震设计。教学楼主要由3排南北向的建筑(第一教学楼、中部实验楼、第二教学楼)和连接它们的走廊围合而成(图1)。第一教学楼和第二教学楼关于中部实验楼完全对称,主要为教室。中部实验楼则主要为教学试验用房和公共用房。教学楼各单体的平面布置如图2所示。

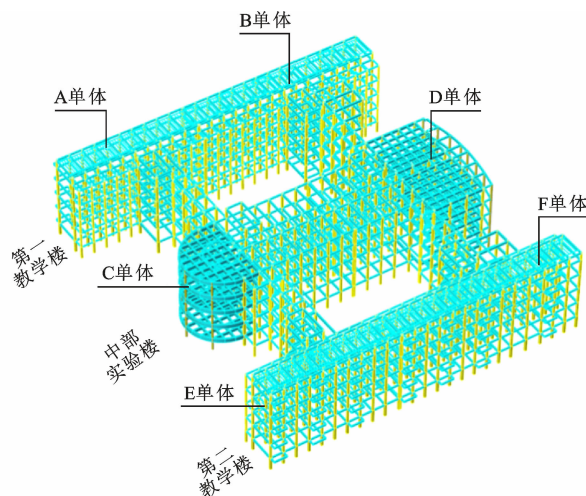


图1 教学楼整体结构

Fig. 1 Whole Structure of Teaching Building

建筑总高20.2 m,底部1层为架空层,层高3.4 m;其余4层均为4.2 m。整个教学楼以变形缝分为A~F六个单体,均为框架结构。柱截面尺寸主要有400 mm×400 mm,300 mm×300 mm,500 mm×500 mm,C单体建筑入口大堂处有圆柱 $\phi 550$;梁截

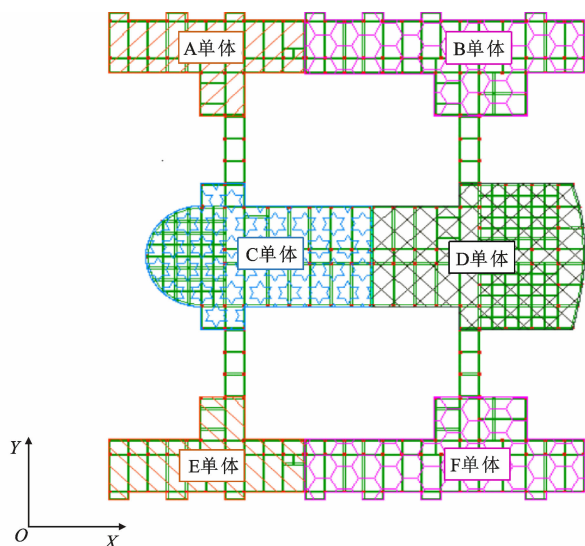


图2 教学楼各单体平面图

Fig. 2 Plane Layout of Each Teaching Building

面尺寸主要有 $250\text{ mm} \times 550\text{ mm}$, $250\text{ mm} \times 400\text{ mm}$, $250\text{ mm} \times 500\text{ mm}$, $250\text{ mm} \times 600\text{ mm}$ 等。楼面主要为 100 mm 和 110 mm 厚现浇钢筋混凝土楼板,局部采用 300 mm 厚空心楼盖。结构柱、梁、楼板的混凝土强度等级均为 C30。

根据《中国地震动参数区划图》(GB 18306—2015),该地区已划分为 6 度设防区,且根据《建筑工程抗震设防分类标准》^[13] 规定,该学校建筑抗震设防类别为重点设防类(乙类),应按 6 度进行地震作用计算,按 7 度(抗震等级三级)采取抗震措施。显然,原教学楼结构已不满足当前的抗震设防需求。

2 抗震鉴定分析

目前教学楼外观质量状况良好,柱、梁、楼板均未发现一般缺陷,地面无明显变形、开裂等情况,未发生地基沉降引起的上部墙体开裂,结构垂直度偏差满足要求;根据现行《建筑抗震鉴定标准》要求,本工程属于 C 类建筑,后续使用年限为 50 年,应按现行《建筑抗震设计规范》(以下简称《抗规》)^[14] 的要求对各单体结构进行抗震鉴定。

鉴定结果表明:①建筑总高 20.2 m ,属于多层建筑;②部分单体平面凹凸不规则,扭转位移比偏大,扭转周期比大于 0.9 ;③结构小震下层间位移角均满足规范限值要求,且有一定富余;④框架柱满足承载力需求,纵筋构造基本满足现行规范要求,部分柱加密区箍筋不满足最小体积配箍率要求,第一、二教学楼的走廊柱截面尺寸偏小,不满足《抗规》对三级框架柱最小尺寸的要求;⑤框架梁截面尺寸满足

抗震要求,部分框架梁纵筋不能满足规范对三级框架梁的构造要求,几乎所有框架梁箍筋直径及间距均不满足《抗规》对三级框架梁的要求,但除部分梁加密区箍筋外,框架梁纵筋和箍筋配置基本能满足四级框架梁的构造要求。

3 加固方案比选

原结构虽能满足小震下的承载力需求,但结构缺少必要的延性构造措施,结构耗能能力不强,在中震及大震作用下易发生脆性破坏而危及生命安全。同时该建筑为小学教学楼,宜在加固设计中留有一定的安全余量,尤其应保证建筑在“破坏性地震”(大震)作用下有足够优秀的抗震性能。

若仅采用外包钢、粘钢或增大截面法等传统加固手段,即使大范围加固梁柱,仍可能难以保障结构在大震下的抗震性能。因此,此类项目适宜采用消能减震加固手段进行抗震加固^[15]。对于本项目,在一定位置设置防屈曲支撑。小震下,它能调整结构抗扭刚度,减小扭转效应,使扭转周期比等满足规范要求;大震下,防屈曲支撑能屈服耗能,消耗输入的地震能量,减小主体结构的地震作用,显著提高结构的抗震性能。

4 基于性能的抗震加固设计

4.1 性能化设计思想

设置防屈曲支撑后,主体钢筋混凝土框架的抗震等级仍应按框架结构确定,对于支撑框架,其抗震等级还需提高一级^[16]。按此思路,即使设置了防屈曲支撑,结构的抗震性能得到了提高,结构仍需要大范围加固因构造措施不足的框架梁柱。

根据性能设计原理,承载力和延性构造是可以互补的。《抗规》规定,对于满足性能 3 要求的结构,当构件的承载力高于多遇地震提高 1 度的要求时,构件的抗震构造措施可按降低 1 度的规定采用。《建筑消能减震加固技术规程》^[17] 规定,采用消能减震技术进行加固设计时,可根据大震下楼层弹塑性位移角确定相应的构造措施,当大震下最大层间位移角为 $2.0\Delta_{ue} \sim 4.0\Delta_{ue}$ (Δ_{ue} 为弹性层间位移角)时, B、C 类钢筋混凝土结构房屋的构造措施可按常规设计的有关规定降低 1 度且不低于 6 度采用;钢筋混凝土柱箍筋加密区最小配箍特征值也可根据大震下楼层弹塑性位移角确定。

因此,着眼于结构的整体抗震性能,基于结构小震承载力有富余,大震下耗能支撑能显著提高抗震

性能的实际情况。本项目通过确定加固后结构在小震和大震下较高的综合抗震性能来降低构件层次的抗震构造措施要求。采用上述加固思路,不仅可以显著提高结构的抗震性能,也可以避免因构造措施不足而需要大范围加固结构的问题。

4.2 抗震性能目标

根据上述分析,当加固后结构满足《抗规》性能 3 要求,大震下楼层最大弹塑性层间位移角不超过 1/150,且小震下构件承载力满足 7 度小震(多遇地震提高 1 度)要求时,主体结构的抗震等级可按 6 度确定为四级。此时,主体结构除少部分框架梁纵筋不足、少部分框架梁加密区箍筋间距不满足四级构造要求外,其余均满足要求。子结构构件按重要构件设计,与支撑相连的框架梁柱抗震等级取为三级,且满足大震屈服承载力。对于不满足上述性能要求的结构梁柱在安装防屈曲支撑时同步进行加固。梁柱构件的加固主要采用外包钢、粘钢等传统加固方法。

结构加固后进行抗震性能评估的具体指标要求见表 1。

4.3 防屈曲支撑的布置

根据确定的加固设计思路和目标,参考建筑功能布局,遵循“均匀、分散、对称”的布置原则,在各单体外围和中间布置防屈曲支撑。各单体底层屈曲约束支撑框架部分承受的地震倾覆力矩占结构总地震

表 1 加固后结构抗震性能指标

Tab. 1 Seismic Performance Evaluation Indexes of Reinforced Structures

抗震烈度水准	小震	大震
层间位移角限值	1/550	1/150
子结构构件	无损坏	轻度损坏
主体结构关键竖向构件	弹性	抗弯不屈服,抗剪不屈服
消能支撑与子结构连接	无损坏	无损坏
	弹性	弹性
主体结构普通竖向构件	无损坏	部分构件中度损坏
	弹性	满足抗剪截面控制条件
主体结构框架梁	无损坏	中度损坏,部分比较严重损坏
	弹性	可弯曲屈服
屈曲约束支撑	弹性	核心单元中度屈服,约束单元无损坏

注:加固后构件小震承载力均按 7 度计算。
倾覆力矩的 20%~50%,属于采用适量屈曲约束支撑的框架^[18]。

防屈曲支撑参数见表 2,平面布置见图 3,部分立面布置图见图 4,支撑与既有梁柱节点的连接方式见图 5。

4.4 地震作用

本工程既有建筑分类属于 C 类,不需要调整地震作用^[19-20]。设防烈度为 6 度,设计地震分组为第一组,场地类别为Ⅱ类。综合考虑场地类别、频谱特性、有效峰值、持续时间、统计特性等方面选取 1 组

表 2 防屈曲支撑参数

Tab. 2 Parameters of BRBs

构件编号	类型	芯材型号	轴线长度/mm	等效面积/mm ²	屈服力/kN	极限承载力/kN	外观尺寸	布置标高范围/m
B1-1	耗能型	Q235	4 738	1 502	300	552	150 mm×150 mm	−3.4~0.0
B1-2	耗能型	Q235	4 880	1 502	300	552	150 mm×150 mm	−3.4~0.0
B1-3	耗能型	Q235	5 250	1 405	300	552	150 mm×150 mm	−3.4~0.0
B1-4	耗能型	Q235	5 404	1 405	300	552	150 mm×150 mm	−3.4~0.0
B1-5	耗能型	Q235	5 800	1 405	300	552	150 mm×150 mm	0.0~16.8
B2-1	耗能型	Q235	4 738	2 503	500	920	180 mm×180 mm	−3.4~0.0
B2-2	耗能型	Q235	4 952	2 503	500	920	180 mm×180 mm	−3.4~0.0
B2-3	耗能型	Q235	5 250	2 350	500	920	180 mm×180 mm	−3.4~0.0
B2-4	耗能型	Q235	5 341	2 350	500	920	180 mm×180 mm	0.0~16.8
B2-5	耗能型	Q235	5 435	2 350	500	920	180 mm×180 mm	0.0~16.8
B2-6	耗能型	Q235	5 467	2 350	500	920	180 mm×180 mm	0.0~16.8
B2-7	耗能型	Q235	5 532	2 350	500	920	180 mm×180 mm	0.0~4.2
B2-8	耗能型	Q235	5 800	2 350	500	920	180 mm×180 mm	0.0~16.8
B2-9	耗能型	Q235	5 940	2 350	500	920	180 mm×180 mm	0.0~16.8
B2-10	耗能型	Q235	6 155	2 350	500	920	180 mm×180 mm	0.0~8.4
B3-1	耗能型	Q235	5 404	3 310	700	1 288	200 mm×200 mm	−3.4~0.0
B3-2	耗能型	Q235	5 940	3 310	700	1 288	200 mm×200 mm	0.0~16.8

注:防屈曲支撑屈服后刚度为初始刚度的 5%。

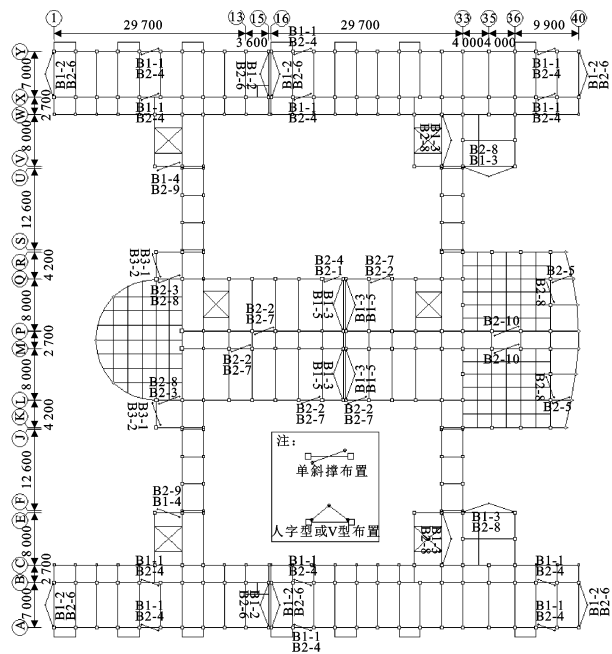


图 3 防屈曲支撑平面布置图(单位:mm)

Fig. 3 Plane Layout of BRBs (Unit:mm)

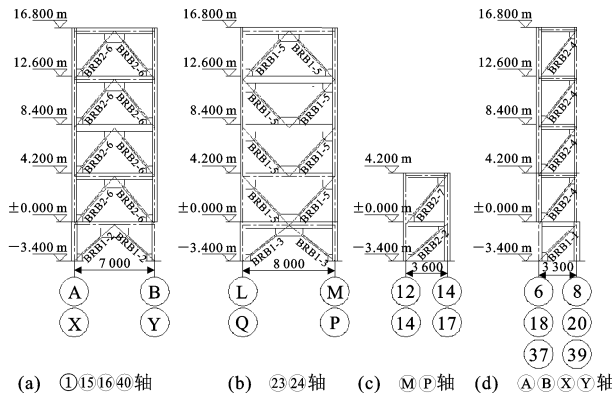


图 4 部分防屈曲支撑立面布置图(单位:mm)

Fig. 4 Elevation Layout of Some BRBs (Unit:mm)

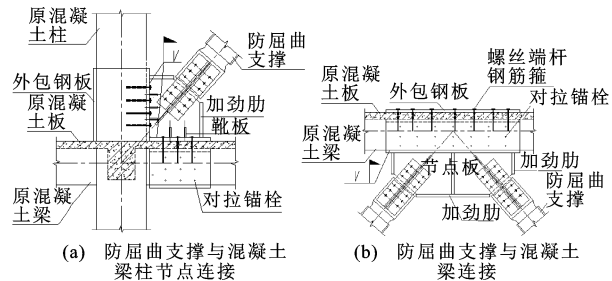
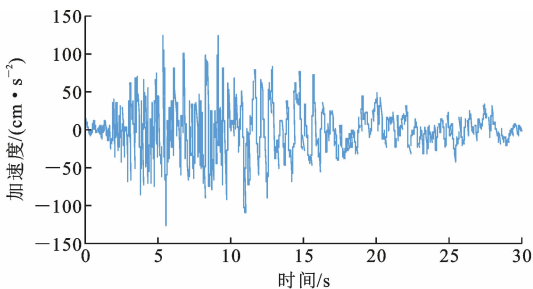


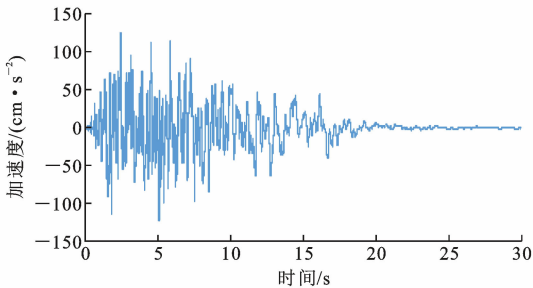
图 5 防屈曲约束支撑与既有结构连接节点

Fig. 5 Connection Joints of BRB and Existing Structure

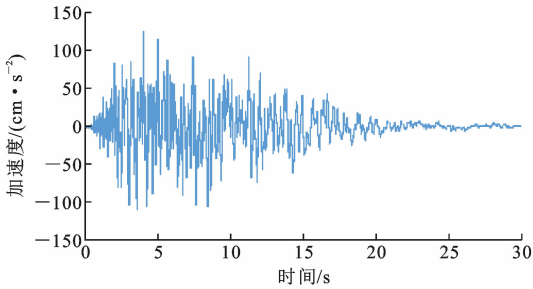
人工波(S01)、2组天然波(S02,S03),其加速度曲线如图6所示。大震时程分析采用三向地震波(X,Y,Z向峰值加速度之比为1:0.85:0.65)输入,持续时间30s。大震考虑了50年超越概率为3%(主方向地震波有效峰值 $125\text{ cm}\cdot\text{s}^{-2}$)和50年超越概率



(a) 人工波S01



(b) 天然波S02



(c) 天然波S03

图 6 大震下的地震波曲线(仅列出主方向加速度)

Fig. 6 Seismic Wave Curves Under Large Earthquake
(Only Principal Acceleration Waves Are Listed)

为2%(主方向地震波有效峰值 $180\text{ cm}\cdot\text{s}^{-2}$)2种情况。

4.5 既有结构非线性模型

纤维束模型模拟梁、柱等一维构件,分层壳模型模拟楼板、剪力墙等二维构件建立结构有限元模型,同时考虑材料非线性和几何非线性,采用显示积分方法进行动力计算,直接模拟结构在地震力作用下的非线性反应,是目前结构非线性地震反应分析领域较为完善的方法^[21]。既有结构非线性模型中的材料强度和配筋信息应根据原有设计资料和结构检测结果确定^[22]。本工程结构非线性分析模型采用SAUSAGE软件构建并计算,如图7所示。

综上,既有结构基于性能的抗震加固设计流程如图8所示。

5 计算结果分析

5.1 小震计算

加固前结构,A(E),B(F)单体扭转周期比均达

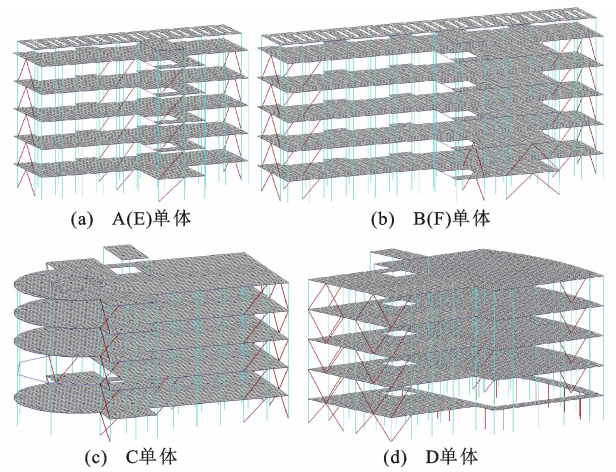


图 7 教学楼各单体加固后的非线性模型

Fig.7 Non-linear Models of Each Teaching Building

After Reinforcement

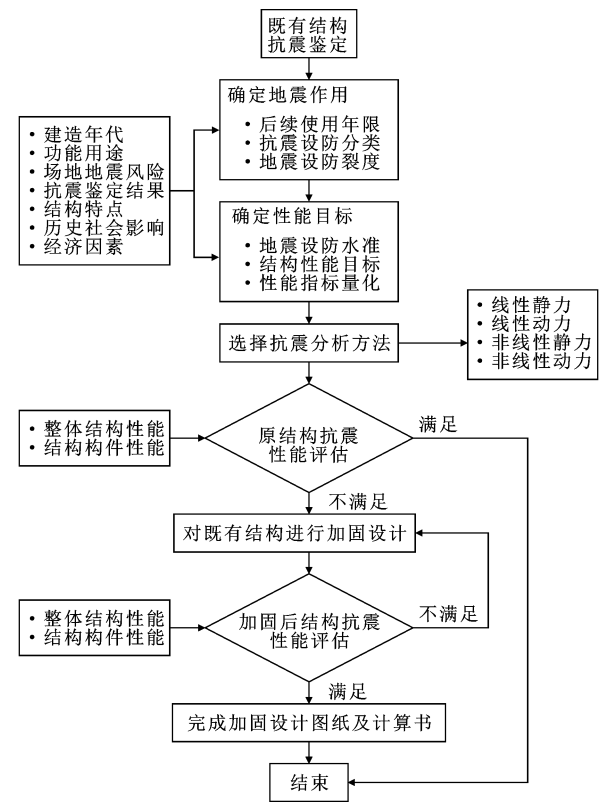


图 8 基于性能的既有建筑抗震评估流程图

Fig.8 Flow Chart of Seismic Assessment of Existing Buildings Based on Performance

到了 0.96,最大位移比为 1.38,扭转效应明显;各单体 X 向最大地震位移角为 1/1 293,Y 向最大地震位移角为 1/1 315;各单体构件基本满足 6 度小震承载力需求。加固后结构,各单体的最大扭转周期比为 0.84,最大位移比为 1.20;各单体 X 向最大地震位移角为 1/2 167,Y 向最大地震位移角为 1/1 983;各单体构件满足 7 度小震承载力需求。其中 B(F)

单体加固前后的部分小震计算结果见表 3。

表 3 B(F)单体加固前后小震结果对比

Tab.3 Results Comparison of B (F) Buildings Before and After Reinforcement

阶段	加固前	加固后
结构体系	框架结构	采用适量屈曲约束支撑的框架
X 向周期/s	1.22	0.94
Y 向周期/s	1.20	0.89
扭转周期/s	1.17	0.69
总质量/t	4 718	4 736
X 向位移角	1/1 600	1/2 174
Y 向位移角	1/1 649	1/2 293
X 向位移比	1.04	1.05
Y 向位移比	1.31	1.20
X 向基底剪力/kN	676	848(587)
Y 向基底剪力/kN	686	887(607)
* X 向基底剪力/kN		1 697(1 174)
* Y 向基底剪力/kN		1 775(1 215)
首层柱轴压比	0.61	0.61

注:标注 * 的结果为 7 度小震作用下的计算结果;括号内数值为框架部分分担的剪力值。

5.2 大震性能评估

5.2.1 结构层次性能分析

加固前和加固后结构在大震下的整体指标如表 4、5 所示。

表 4 加固前结构大震性能整体指标

Tab.4 Seismic Performance Overall Indexes of Buildings Before Reinforcement

指标	单体 A(E)	单体 B(F)	单体 C	单体 D
最大顶点				
位移/m				
$P_{50}=3\%$	0.099	0.087	0.091	0.103
$P_{50}=2\%$	0.158	0.155	1.294 *	0.141
最大层间				
位移角				
$P_{50}=3\%$	1/123	1/140	1/119	1/111
$P_{50}=2\%$	1/69	1/64	1/3 *	1/66
弹塑性附加				
阻尼比/%				
$P_{50}=3\%$	1.1	1.2	1.6	1.1
$P_{50}=2\%$	2.1	2.6	4 900.0 *	3.5

注: P_{50} 为地震 50 年超越概率;标注 * 的结果为时程分析散发的工况结果,表明结构已经发生影响计算收敛的很大变形,即结构发生了倒塌。

从表 4 可以看出,加固前各单体在 50 年超越概率 3%的地震下层间位移角尚满足限值要求,结构整体的塑性发展程度也不是很大,结构弹塑性附加阻尼比最大为 1.6%;在超越概率 2%的地震下,单体 C 在部分地震工况下会因为发生影响计算收敛的很大变形而计算中止,表明结构此时已经发生了倒塌,其余各单体的最大层间位移角也接近限值要求,各单体结构弹塑性附加阻尼比也增加明显。

表 5 加固后结构大震性能整体指标

Tab. 5 Seismic Performance Overall Indexes of Buildings After Reinforcement

指标		单体 A(E)	单体 B(F)	单体 C	单体 D
最大顶点位移/m	$P_{50}=3\%$	0.062	0.067	0.072	0.055
	$P_{50}=2\%$	0.097	0.097	0.084	0.079
最大层间位移角	$P_{50}=3\%$	1/211	1/210	1/174	1/209
	$P_{50}=2\%$	1/157	1/154	1/152	1/151
结构弹塑性附加阻尼比/%	$P_{50}=3\%$	0.3	0.3	0.5	0.3
加阻尼比/%	$P_{50}=2\%$	0.4	0.4	0.5	0.3
耗能支撑等	$P_{50}=3\%$	1.1	1.2	1.2	1.0
效阻尼比/%	$P_{50}=2\%$	2.4	2.3	2.1	1.9

从表 5 可以看出:加固后各单体在 50 年超越概率 3%和 50 年超越概率 2%的地震作用下最大层间位移角均小于 1/150,满足性能目标要求;耗能防屈曲支撑充当了结构的第一道防线,有效地保护了主体结构,在 50 年超越概率 3%的地震作用下,结构弹塑性附加阻尼比仅约 0.3%,而耗能防屈曲支撑屈服耗能,提供了约 1.2%的阻尼比;当地震作用从 50 年超越概率 3%的地震增大到超越概率 2%的地震时,耗能防屈曲支撑通过进一步屈服耗能,提供了约 2.2%的附加阻尼比,而结构弹塑性附加阻尼比基本没有增大。

耗能防屈曲支撑的保护作用从结构的楼层剪力曲线上也可以看出。图 9、图 10 分别为 50 年超越概率 3%的大震和超越概率 2%的大震作用下,单体 B(F)的典型楼层剪力分布。50 年超越概率 3%的大震下,B(F)单体加固前弹塑性模型与弹性模型基底剪力的比值约为 0.59,加固后该比值为 0.81;超越概率 2%的大震下,B(F)单体加固前弹塑性模型与弹性模型基底剪力的比值约为 0.46,加固后该比值为 0.77。加固后结构的钢筋混凝土损伤控制得更小,其刚度退化程度也更小。

5.2.2 构件层次性能分析

图 11、12 分别为加固前和加固后单体 C 的典型框架在大震地震波作用下的损坏性能水平。

加固前单体在 50 年超越概率 3%的地震下,关键竖向构件达到了重度损坏,而同时框架梁则多为轻度损坏,显然原结构构件的屈服顺序不合理。50 年超越概率 2%的地震下,原结构的关键竖向构件已经普遍严重损坏,濒临发生整体倒塌或已经发生倒塌。

加固后单体在 50 年超越概率 3%和 50 年超越概率 2%的地震下,防屈曲支撑屈服耗能,使钢筋混凝土构件的损伤大幅减小,加固后的子结构构件和

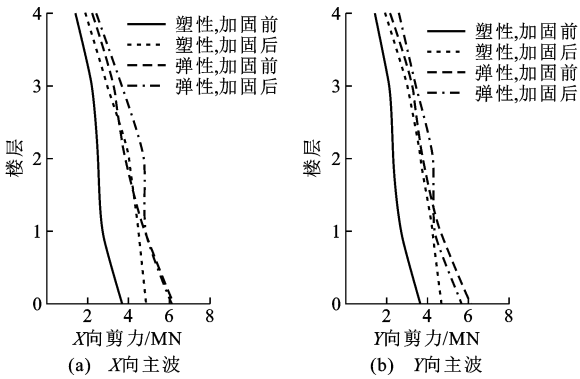


图 9 50 年超越概率 3%大震下单体 B(F)楼层剪力
Fig. 9 Story Shearing Force of B (F) Under Severe Earthquake with Exceedance Probabilities of 3% in 50 Years

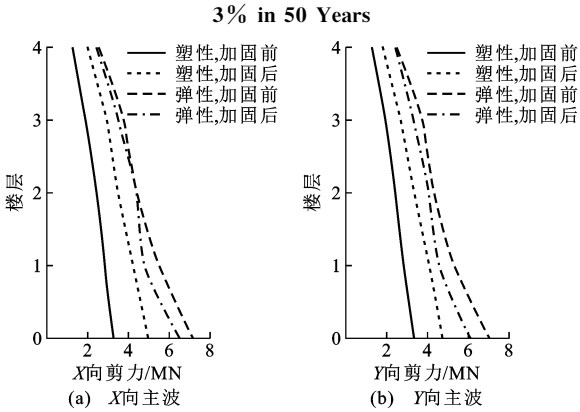


图 10 50 年超越概率 2%大震下单体 B(F)楼层剪力
Fig. 10 Story Shearing Force of B (F) Under Severe Earthquake with Exceedance Probabilities of 2% in 50 Years

关键竖向构件始终保持在轻度损坏以下,满足性能水准要求。图 13 为耗能防屈曲支撑的典型滞回曲线,多数耗能防屈曲支撑大震下的滞回曲线饱满,很好地起到了第一道抗震防线的作用。

6 结 语

(1)本文原非抗震设防区教学楼虽有一定的抗震承载力,能满足 6 度小震要求,但抗震构造措施普遍不足,缺乏延性设计,大震下耗能能力不强,已不能满足当前的抗震设防要求。

(2)采用防屈曲支撑加固,小震下减小了教学楼结构的扭转效应。加固前,单体中最大的扭转周期比达到了 0.96,最大位移比为 1.38;加固后,单体中最大的扭转周期比控制为 0.84,最大位移比为 1.20。

(3)大震下,防屈曲支撑屈服耗能,很好地起到了第一道抗震防线的作用。加固前各单体在大震下塑性发展明显,关键竖向构件普遍损坏严重。加固后钢筋混凝土损伤控制的很小,各单体关键竖向构

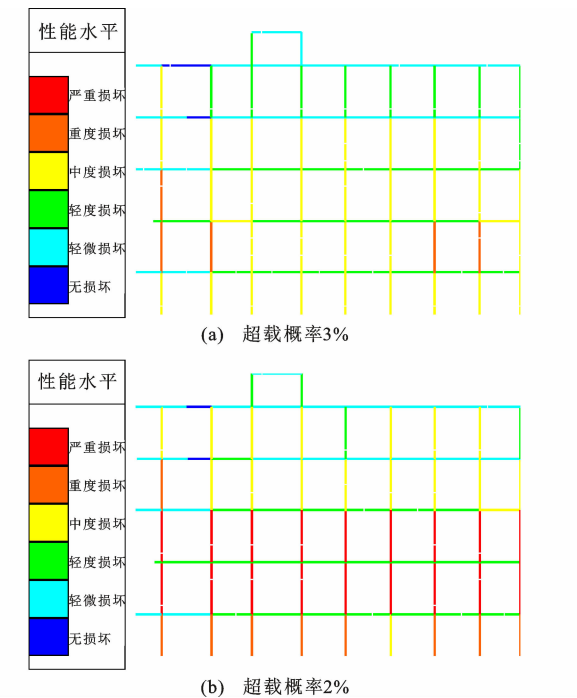


图 11 加固前单体 C 大震下构件损坏性能水平
Fig. 11 Component Performance of Building C Under
Sever Earthquake Before Reinforcement

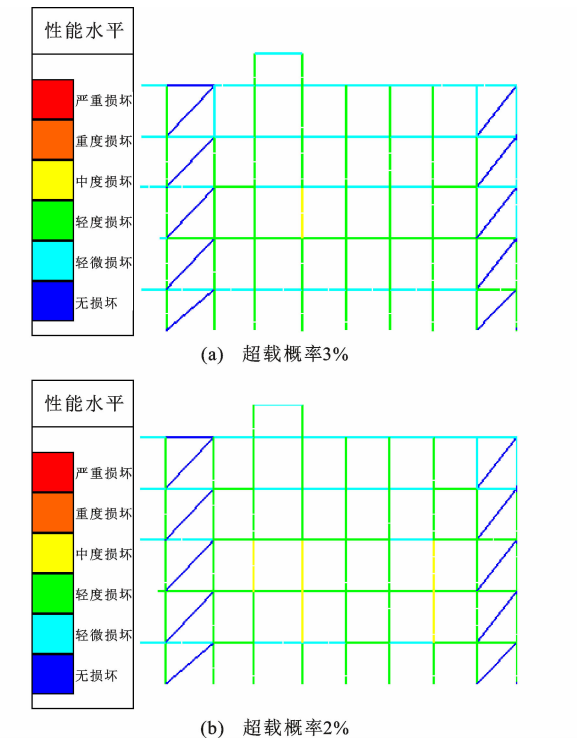


图 12 加固后单体 C 大震下构件损坏性能水平
Fig. 12 Component Performance of Building C Under
Sever Earthquake After Reinforcement

件始终保持在轻度损坏以下。

(4) 基于性能化设计原理,教学楼加固后满足性能 3 要求,小震下构件承载力满足 7 度小震,大震下

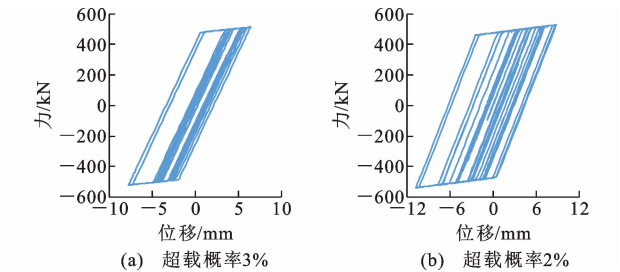


图 13 大震下防屈曲支撑典型滞回曲线
Fig. 13 Typical Hysteresis Curves of BRB Under
Sever Earthquake

层间位移角小于 $1/150$,教学楼主体结构的抗震等级可由三级降低为四级,抗震构造措施要求大幅降低,避免大范围加固梁柱。

参考文献: References:

[1] GB 18306—2015,中国地震动参数区划图[S].
GB 18306—2015,Seismic Ground Motion Parameters Zonation Map of China[S].

[2] 张亚男.既有建筑抗震加固需求与设防对策研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
ZHANG Ya-nan. Research on Seismic Reinforcement Demands and Fortification Strategies for Existing Buildings[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2014.

[3] 薛彦涛.设防烈度调整后既有建筑抗震加固对策与方法[J].城市与减灾,2016(3):54-58.
XUE Yan-tao. Countermeasures and Methods for Seismic Strengthening of Existing Buildings After Fortification Intensity Adjustment[J]. City and Disaster Reduction,2016(3):54-58.

[4] GB 50023—2009,建筑抗震鉴定标准[S].
GB 50023—2009,Standard for Seismic Appraisal of Buildings[S].

[5] 雷拓,钱江,刘伯权.既有钢筋混凝土框架结构基于性能的抗震评估[J].工程抗震与加固改造,2013,35(3):113-120.
LEI Tuo, QIAN Jiang, LIU Bo-quan. Performance-based Seismic Evaluation of Existing RC Frame Structures[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting,2013,35(3):113-120.

[6] 张宇,李宏男,李钢.既有钢筋混凝土结构抗震设防目标与性能评估[J].建筑结构学报,2013,34(7):29-39.
ZHANG Yu, LI Hong-nan, LI Gang. Seismic Performance Objectives and Evaluation of Existing Reinforced Concrete Structures[J]. Journal of Building

- Structures, 2013, 34(7): 29-39.
- [7] 李英民, 刘建伟, 周自强. 基于性能的抗震加固方法在框架结构中的应用[J]. 建筑结构, 2012, 42(7): 88-92.
- LI Ying-min, LIU Jian-wei, ZHOU Zi-qiang. Application of Performance-based Seismic Retrofit for a Frame Building[J]. Building Structure, 2012, 42(7): 88-92.
- [8] 张 瀑, 田中礼治, 鲁兆红, 等. 多层混凝土结构的抗震加固方法与实例[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- ZHANG Pu, TANAKA Reiji, LU Zhao-hong, et al. Seismic Strengthening Methods and Examples of Multi-storey Concrete Structures[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [9] 湘 2017G901, 既有民用建筑抗震加固: 混凝土结构[S].
- Hunan 2017G901, Seismic Strengthening of Existing Civil Buildings: Concrete Structures[S].
- [10] 王秀丽, 李 涛, 金建民, 等. 高烈度区新型钢筋砼框架的抗震性能[J]. 兰州理工大学学报, 2009(2): 105-109.
- WANG Xiu-li, LI Tao, JIN Jian-min, et al. Aseismatic Behavior of New RC Frames for High Seismic-intensity Regions[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2009(2): 105-109.
- [11] 胡宝琳, 李国强, 孙飞飞. 屈曲约束支撑体系的研究现状及其国内外应用[J]. 四川建筑科学研究, 2007, 33(4): 9-13.
- HU Bao-lin, LI Guo-qiang, SUN Fei-fei. The Current Research and Application of Home and Abroad of Bucking-restrained Brace[J]. Sichuan Building Science, 2007, 33(4): 9-13.
- [12] 高 鹏, 叶献国, 徐 勤. 某小学教学楼的屈曲约束支撑抗震加固设计[J]. 工业建筑, 2013, 43(3): 129-132, 78.
- GAO Peng, YE Xian-guo, XU Qin. Design of BRBS in Seismic Retrofitting of the Classroom Building in a Primary School[J]. Industrial Construction, 2013, 43(3): 129-132, 78.
- [13] GB 50223—2008, 建筑工程抗震设防分类标准[S].
- GB 50223—2008, Standard for Classification of Seismic Protection of Building Constructions[S].
- [14] GB 50011—2010, 建筑抗震设计规范[S].
- GB 50011—2010, Code for Seismic Design of Buildings[S].
- [15] 周力强, 王玉山, 廖 欢. 既有结构的性能化消能减震加固分析[J]. 石河子大学学报: 自然科学版, 2019, 37(3): 310-316.
- ZHOU Li-qiang, WANG Yu-shan, LIAO Huan. Analysis of Seismic Performance Design in Existing Structure Reinforced with Energy Dissipation[J]. Journal of Shihezi University: Natural Science, 2019, 37(3): 310-316.
- [16] 同济大学多高层钢结构及钢结构抗火研究室, 上海蓝科钢结构技术开发有限责任公司. TJ 屈曲约束支撑设计手册[M]. 4 版. 上海: 同济大学出版社, 2012.
- Tongji University Research Group for Muti-storey and Tall Steel Buildings and Fire-resistance of Steel Structures, Shanghai Lanke Steel Structure Technology Co., Ltd. Design Manual for TJ Bucking Restrained Brace[M]. 4th ed. Shanghai: Tongji University Press, 2012.
- [17] T/CECS 547—2018, 建筑消能减震加固技术规程[S].
- T/CECS 547—2018, Technical Specification for Seismic Energy Dissipation of Strengthening Structure[S].
- [18] DB 34/T 5069—2017, 屈曲约束支撑结构技术规程[S].
- DB 34/T 5069—2017, Technical Specification for Buckling-restrained Brace Structures[S].
- [19] 孙 彬, 牛荻涛, 董振平. 在役结构抗震评估地震作用取值研究[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2003, 35(4): 312-316.
- SUN Bin, NIU Di-tao, DONG Zhen-ping. Research on Earthquake Action for Seismic Assessment of Existing Structures[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2003, 35(4): 312-316.
- [20] 白雪霜, 程绍革. 现有建筑抗震鉴定地震动参数取值研究[J]. 建筑科学, 2014, 30(5): 1-5.
- BAI Xue-shuang, CHENG Shao-ge. Study on the Ground Motion Parameters for Seismic Appraisal of Available Buildings[J]. Building Science, 2014, 30(5): 1-5.
- [21] 张 谨, 杨律磊. 动力弹塑性分析在结构设计中的理解与应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- ZHANG Jin, YANG Lv-lei. Comprehension and Application of Dynamic Elasto-plastic Analysis on Structural Design[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.
- [22] 孟建国. 基于全寿命设计的钢筋混凝土结构安全度研究与应用[D]. 南京: 东南大学, 2016.
- MENG Jian-guo. Reinforced Concrete Structure Reliability Research and Application Based on Life-cycle Design[D]. Nanjing: Southeast University, 2016.