

内填 Y 形偏心钢支撑加固 RC 框架结构设计方法

赵宝成, 王军良, 于安林, 顾 强

(苏州科技学院江苏省结构工程重点实验室 江苏 苏州 215011)

摘要: 随着使用时间的增长, RC 框架结构会出现结构性性能劣化、使用条件改变、抗震设防烈度提高等变化, 结构会存在抗侧刚度不足, 需要对其进行加固补强. Y 形偏心钢支撑抗侧刚度高, 耗能段独立于框架之外, 耗能能力好, 内填 Y 形偏心钢支撑加固 RC 框架结构效果好. 在试验研究的基础上, 提出了基于耗能段与框架梁连接节点承载能力的 Y 形偏心支撑加固 RC 框架的简化设计方法和构造措施. 主要包括: 耗能段与 RC 框架梁连接节点的构造和设计; 耗能段的选取与设计, 耗能段与支撑之间的连接构造; 钢支撑的确定和设计, 钢支撑与梁柱连接节点的构造和设计以及内填 Y 形钢支撑的布置. 提出的简化设计方法可为类似工程的抗震加固提供设计依据.

关键词: RC 框架; Y 形钢支撑; 耗能段; 设计方法

中图分类号: TU398.9 TU317.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2015)06-0799-05

Design method of RC frames filled with Y-eccentrically steel brace

ZHAO Baocheng, WANG Junliang, YU Anlin, GU Qiang

(Suzhou University of science and Technology, Jiangsu Key Laboratory of Structure Engineering, Suzhou 215011, China)

Abstract: As the RC frame structure using time become longer, the performance of RC frame presents degradation and such using conditions would change, as the seismic intensity, leading the RC frame lateral stiffness to deficiency. Because Y-eccentrically steel brace demonstrate excellent energy-dissipation capacity, filling it in RC frame can improve the structure seismic performance. On the basis of the test, the design method of Y-eccentrically steel brace reinforced in RC frames and nodes construction were developed. Construction and design method of link and beam nodes were presented. The selection and design of link, construction of link and brace were given. The design of brace, construction and design of connection of brace and column-beam were developed. Y-eccentrically steel brace were arranged. The specific design method of Y-eccentrically steel brace reinforced in RC frames provide a design basis for similar projects of seismic strengthening

Key words: RC frames; Y-eccentrically steel brace; links; Design method

一些在役的 RC 框架结构, 由于建造时间早, 其水平承载力或抗侧刚度明显存在不足, 一旦遭受强烈地震, 必然导致大量人员伤亡和巨额财产损失. 为提高这些 RC 框架的抗震性能及抗地震倒塌能力, 需对其进行抗震加固. 考虑到 Y 形偏心支撑耗能能力较好, 耗能段独立于框架之外, 内填于 RC 框架后, 可通过耗能段耗能, 从而提高结构的抗震性能. Ghobarah、Elfath^[1] 对内填钢支撑的三层 RC 框架结构进行了抗震性能研究. RC 框架分别内填中心支撑和 Y 形偏心钢支撑, 分析表明同样地震水平作用下内填 Y 形偏心钢支撑的 RC 框架破坏部位主要集中在耗能梁段, 整个结构破坏较小, 相比之下内填钢中心支撑 RC 框架破坏程度较大. Sola、Luis^[2] 研究了 Y 形钢支撑加固 RC 框架结构抗震性能, 并对其与该地区采用剪力墙加固 RC 框架的受力性能加以对比. Mazzolani^[3] 分别应用 Y 形钢支撑、防屈曲支撑以及钢板剪力墙对实际的 RC 框架

进行加固, 试验结果表明 Y 形钢支撑加固 RC 框架是最经济有效的方法.

杨禹丞^[4] 试验研究了循环荷载作用下的 2 榀单层单跨 1/3 缩尺 RC 框架内填 Y 形钢支撑结构和 1 榀 RC 框架的滞回性能. 结果表明, RC 框架结构内填 Y 形钢支撑后, 其抗侧刚度比纯框架的抗侧刚度提高较多. 赵宝成等^[5] 进行了耗能段与 RC 框架梁采用不同连接节点形式的 2 榀 1/3 缩尺 Y 形钢支撑 RC 框架的低周反复荷载试验. 结果表明: U 形外包钢的加固方法可靠性高. 薛黎明^[6] 进行了 2 榀单层单跨 1/3 缩尺内填 Y 形钢支撑 RC 框架结构的拟动力试验研究. 结果表明, 外包钢长度对结构耗能能力有影响, 耗能段与框架梁连接节点处需仔细研究确定, 确保耗能段先发生剪切破坏. 赵宝成等^[7] 进行了 3 榀 2 层单跨 1/2 缩尺 Y 形钢支撑加固 RC 框架试件的低周反复荷载试验. 结果表明, Y 形钢支撑承担了结构的大部分水平荷载, 试验中耗能段

与混凝土梁的连接采用外包钢的连接节点没有发生破坏,节点构造合理.邵寅^[8],盛邵山^[9]分别试验研究了耗能段与楼板连接或不连接的情况下,连接节点的滞回性能.

由以往的试验研究可知,RC 框架内填 Y 形偏心钢支撑后抗侧刚度、耗能能力好,Y 形钢支撑与 RC 框架仅三点相连,施工方便,目前对其设计方法研究较少,因而提出内填 Y 形偏心钢支撑加固 RC 框架的设计方法,为设计人员提供设计依据非常必要.已建的 RC 框架梁截面尺寸已经确定,耗能段与框架梁之间连接节点的承载力是制约内填 Y 形偏心钢支撑大小的决定因素,本文提出基于耗能段与框架梁连接节点承载能力的 Y 形偏心钢支撑加固 RC 框架的设计方法和构造措施.

1 耗能段与框架梁连接节点设计

1.1 连接节点构造

文献[4-5]中框架梁分别采用底部加钢板和外包 U 型钢的形式对框架梁进行加固,试验结果表明,框架梁采用底部加钢板进行加固,耗能段还没有发挥作用,混凝土梁与底板相交的部位已发生破坏(图 1),连接节点破坏导致结构耗能不充分. U 型外包钢加固混凝土梁时(图 2),连接节点没有破坏,耗能段充分进入塑性耗能,最终耗能段与支撑连接节点发生破坏(图 3),导致结构失效.采用图 2 形式的外包钢由于下部钢板较长,两端部对混凝土梁挤压比较严重,为了减少底部钢板对混凝土梁的挤压,可采取减少下部钢板的长度,侧面钢板采用梯形截面的办法来解决(图 4).文献[8-9]比较了侧面为梯形的 U 型外包钢分别与楼板连接和不连接两种构造方式对节点滞回性能的影响,试验结果表明, U 型外包钢与楼板连接时,对混凝土梁破坏小,节点的抗震性能好.



图 1 混凝土脱落

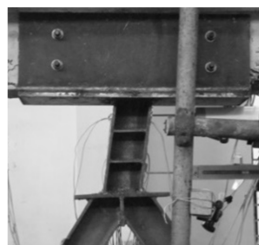


图 2 外包钢节点

Fig.1 Concrete breaking off Fig.2 Steel-encased concrete node

根据文献[4-9]试验结果,本文提出图 5 两种加固节点连接构造方式,外包钢采用对穿螺栓分别与梁和楼板连接,梁、楼板与外包钢之间会存在缝隙,

为了使外包钢板与混凝土之间贴合紧密,在缝隙之间灌注环氧树脂.第 1 种构造方式底板与侧板采用高强螺栓,现场施工方便,第 2 种连接方式底板与侧板之间采用焊接连接,节省材料,节点刚度大.

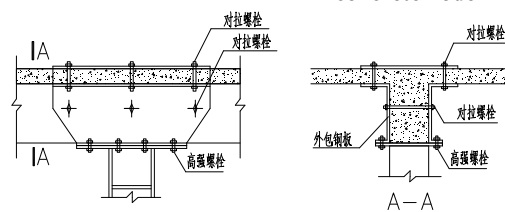


图 3 耗能段断裂

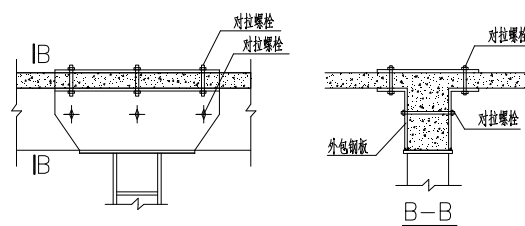


图 4 梯形外包钢节点

Fig.3 Failure of link beam Fig.4 Trapezoidal steel-encased concrete node



(a) 节点构造 1



(b) 节点构造 2

图 5 加固节点构造

Fig.5 Construction of the reinforce node

1.2 连接节点承载力计算

已建 RC 框架结构框架梁具有相应的截面尺寸,根据现有框架梁的截面尺寸和混凝土标号,确定外包钢大小、螺栓的布置及混凝土的局压承载力,加固的连接节点承载力与现有梁截面尺寸相关,加固节点的承载力成为设计内填 Y 形偏心钢支撑的制约因素.采用内填 Y 形偏心钢支撑加固 RC 框架时,首先需要确定耗能段与混凝土梁连接节点的承载力,根据连接节点承载力的大小设计内填 Y 形偏心钢支撑的截面尺寸.

RC 框架内填 Y 形钢支撑,耗能段主要承受剪力,为了简化计算,假定每个螺栓只承受水平方向的剪力,考虑到弯矩和各个螺栓分配的力不均匀的影响,对计算得到的剪力乘以 0.85 的折减系数.加固节点承受剪力的能力由螺栓和混凝土局压最小值确定,螺栓群的抗剪承载力由(1)计算,螺栓对混凝土梁的局压承载力^[10]由(4)计算,加固节点的承载力由(5)计算.

$$V_b = n_b N_{vb}^b + n_f N_{vf}^b \quad (1)$$

$$N_{vb}^b = n_{vb} (\pi d^2 / 4) f_v^b \quad (2)$$

$$N_{vf}^b = n_{vf} (\pi d^2 / 4) f_v^b \quad (3)$$

式中: n_b 、 n_f 分别为与混凝土梁和楼板相连的螺栓个数; N_{vb}^b 、 N_{vf}^b 分别为与混凝土梁和楼板相连1个螺栓的抗剪承载力; n_{vb} 、 n_{vf} 为螺栓受剪面数目, 分别取2和1; d 螺栓直径; f_v^b 螺栓抗剪强度设计值。

$$V_l = 1.35 \beta_c \beta_l f_c A_{ln} \quad (4)$$

式中: β_c 为混凝土强度影响系数, 当混凝土强度不超过 C50 混凝土时, β_c 取 1.0, 当混凝土强度等级为 C80 时, β_c 取 0.8, 其间按线性内插法确定; β_l 混凝土局部受压时强度提高系数, 取 1.0; f_c 为混凝土轴心抗压强度设计值; A_{ln} 为混凝土梁上螺栓孔壁受压面积, $A_{ln} = n_b b_b d + n_l b_f d$, b_b 为混凝土梁的宽度, b_f 为楼板厚度。

$$V = 0.85 \min(V_b, V_l) \quad (5)$$

底板与侧板之间的螺栓或焊接连接按文献[11]给出的公式进行计算。

2 内填Y形钢支撑设计

2.1 耗能段截面选取

2.1.1 耗能段腹板尺寸的确定

耗能段承担的剪力根据耗能段与框架梁连接节点的承载能力进行确定。为保证地震作用下耗能段与梁的连接节点不发生破坏, 设计耗能段截面时, 对耗能段与框架梁连接节点的抗剪承载力 V 进行折减, 参考《建筑抗震设计规范》, 建议 8 度设防烈度及以下时, 折减系数取 0.7, 9 度时取 0.65。折减后的抗剪承载能力即为耗能段所承担塑性剪力设计值 V_p , 假定耗能段的剪力由耗能段的腹板承担, 按文献[12]规定的耗能段腹板高厚比限值, 确定腹板的厚度和宽度。

2.1.2 耗能段长度的确定

耗能段分为剪切屈服型和弯曲屈服型, 剪切屈服型耗能段耗能性能优于弯曲屈服型, 在水平荷载的作用下, 剪切屈服型耗能段形成剪切塑性铰。由于钢支撑组成的三角形桁架的侧向刚度远大于柱的侧向刚度, 则 RC 框架内填 Y 形偏心钢支撑的塑性机构如图 6 所示。图中 θ 代表框架的层间侧移角, e 为耗能段的长度。耗能段的转动能力用参数 γ (耗能段的转角) 表示, 由图中几何关系可得:

$$e = (h/\gamma)\theta \quad (6)$$

上式中 h 为结构的层高。设耗能段的极限转动能力为 γ_p , 根据文献[2]的研究成果, γ_p 可取为 0.1rad。式(6)中参数 γ 可由 γ_p 代替, θ 由 θ_p 代替, θ_p 为《建筑抗震设计规范》中多、高层钢结构弹塑性层间侧移角限值, 式(6)采用式(7)表达, 其中 e_l 为所需耗能段的最小长度。

$$e_l = (h/\gamma_p)\theta_p \quad (7)$$

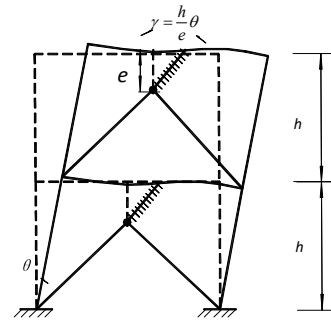


图6 RC框架内填Y形支撑的塑性机构
Fig.6 RC frames filled with Y-steel
bracing plastic mechanism

2.1.3 耗能段翼缘尺寸的确定

剪切屈服型耗能段的长度根据公式(8)确定, 式中 M_p 为耗能段的塑性抗弯承载力, V_p 为耗能段的塑性抗剪承载力。

$$e \leq (1.6 \times M_p) / V_p \quad (8)$$

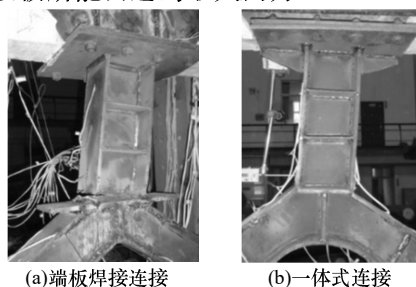
当耗能段的长度以及腹板的尺寸确定以后, 通过式(8)得到耗能段承担的塑性弯矩, 根据塑性弯矩可以确定耗能段翼缘的尺寸。

2.1.4 耗能段与支撑连接节点的构造

文献[4-7]试验结果表明, 耗能段采用端板与支撑连接时, 耗能段与端板之间应力集中, 容易发生撕裂破坏(图 7a), 结构耗能能力有限, 文献[7]YBRCF-3 试件采用“一体式”节点形式, 避免了应力集中处焊缝容易脆性破坏的弊端(图 7b), 转移了焊缝位置, 较为合理可靠。试验中试件主要通过 Y 形偏心钢支撑的耗能段耗散能量, 试件耗能能力好。

为了便于耗能段安装及震后耗能梁段的修复与更换, 本文提出两种连接构造形式, 耗能段及支撑连接部位仍然采用“一体式”连接形式, 耗能梁段与支撑之间的翼缘采用对接焊缝, 腹板采用拼接板和螺栓(图 8a); 耗能梁段与支撑之间翼缘和腹板的连接全部采用拼接板和高强螺栓(图 8b)。支撑在受力过程中应保证不发生强度破坏和失稳, 连接节点的设计采用等强设计, 即断开截面处翼缘和腹板

相应的拼接材料和连接件所能传递的力不应低于翼缘和腹板所能传递的最大内力。

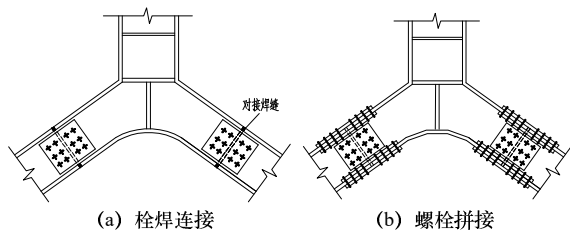


(a)端板焊接连接

(b)一体式连接

图7 耗能段与支撑连接

Fig.7 Link and brace connection



(a)栓焊连接

(b)螺栓拼接

图8 连接构造

Fig.8 Connection construction

2.2 钢支撑截面选取

Y形钢支撑在受力的过程中始终保持弹性,在水平荷载作用下,钢支撑的受力简图如图9所示,由耗能段承担的塑性剪力 V_p 可以计算得到钢支撑的轴力,为了确保Y形钢支撑在耗能段进入塑性耗能后不发生屈曲,钢支撑的轴力设计值不应小于耗能段达到极限承载力时钢支撑的轴力。支撑在地震作用下不进入塑性,每一个钢支撑的设计轴力可按式(9)计算,按支撑构件设计截面^[12]。

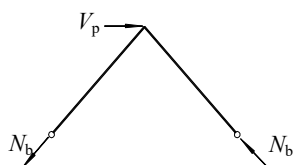


图9 支撑受力简图

Fig.9 Force diagram of brace

$$N_b = \frac{1}{2\cos\alpha} \eta V_p \quad (9)$$

式中: α 为支撑与水平面的夹角, η 为内力增大系数,根据文献[12],在8度设防烈度及以下时不应小于1.4,9度时不应小于1.5。

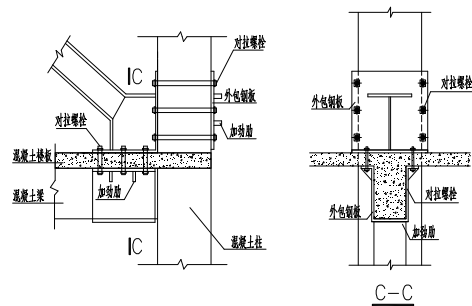
初选Y形钢支撑的截面后,对内填Y形钢支撑加固RC框架结构进行有限元计算,根据计算内力校核钢支撑及耗能段的截面及连接节点的承载能力。

3 支撑与框架连接节点设计

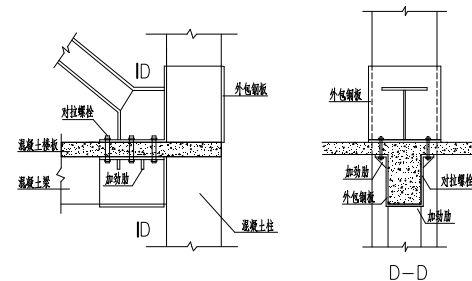
3.1 连接节点构造

为了避免植筋造成框架梁柱截面的削弱,钢支

撑与框架梁柱的连接节点采用图10两种形式,文献[7]采用图10a的连接方式,混凝土梁由钢板外包,由对拉螺栓连接钢柱的外包钢板,节点连接性能较好,混凝土框架节点域破坏较小。为了增加连接的刚度,本文同时提出图10b的连接方式,柱采用钢板整体包裹,并在钢板与梁柱之间的缝隙灌填环氧树脂嵌实。



(a)节点构造1



(b)节点构造2

图10 支撑与梁柱连接节点

Fig.10 Brace-beam and column nodes

3.2 连接节点计算

连接节点主要承受钢支撑传来的力,把钢支撑传来的轴力分解为竖直方向和水平方向,分别由(10)式和(11)式计算。根据连接节点的受力特点,假定竖直方向的力全部由与梁相连的螺栓承担,水平方向的力全部由与框架柱相连的螺栓承担。一个螺栓承担的拉力由式(12)计算,由总的承载力即可计算所需要螺栓的数量。支撑与节点板之间的焊缝连接按文献[11]的方法计算。

$$F_v = N_b \sin\alpha \quad (10)$$

$$F_h = N_b \cos\alpha \quad (11)$$

$$N_t^b = (\pi d_e^2 / 4) f_t^b \quad (12)$$

4 Y形偏心钢支撑布置

采用设计软件计算原RC框架层间侧移比和抗侧刚度,根据刚度不足对其进行补强。将已确定的Y形钢支撑内填RC框架内,结构平面布置时,Y形钢支撑要规则、对称,使结构的刚度中心与质量中心一致,在同一楼层,各榀内填Y形钢支撑的变形相同,各榀Y形钢支撑承担的水平荷载一致,方

便设计和施工。

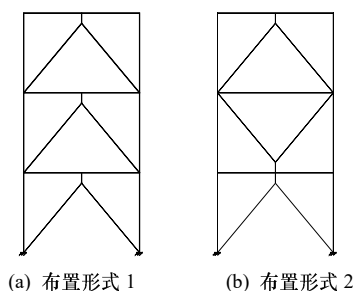


图 11 Y 形钢支撑布置形式

Fig.11 Brace-beam and column nodes

Y 形钢支撑在 1 榀框架内的竖向布置应注意刚度均匀连续,避免刚度突变或内填 Y 形钢支撑不连续。竖向布置中可采用图 11 两种布置方式,图 11b 布置方式加固的节点较少,对原结构损伤少,施工便捷。应用本文提出的设计方法,设计了内填 Y 形钢支撑加固 RC 框架结构的计算模型^[13],并进行了有限元分析,分析结果表明,本文提出的设计方法简单实用。

5 结语

在已有试验的基础上,结合现有研究成果,提出了基于耗能段与框架梁连接节点承载能力的内填 Y 形偏心钢支撑加固现有 RC 框架的设计方法。

(1) 给出了耗能段与框架梁之间的合理连接构造及连接节点的简化计算公式。

(2) 分析了内填 Y 形钢支撑 RC 框架的塑性机构,确定了耗能段截面尺寸的选取方法,提出了耗能段与支撑之间的连接节点构造形式。

(3) 确定了钢支撑截面选取方法及钢支撑的内力放大系数。

(4) 提出了支撑与框架梁柱之间的连接构造及连接点的承载力计算方法。

(5) 给出了内填 Y 形钢支撑平面布置原则及竖向布置方式。本文提出的设计方法为 Y 形偏心钢支撑加固 RC 框架结构的设计提供了参考。

参考文献 References

- [1] GHOBARAH A, ELFATH H abou. Rehabilitation of reinforced concrete frame using eccentric steel bracing[J]. Engineering Structures, 2001, 23(9):745-755.
- [2] GONZALEZ Sola, LUIS. Retrofitting of RC structures on gravity columns using inverted-y steel bracing[D]. Puerto Rico: University of Puerto Rico, Mayaguez, 2007
- [3] MAZZOLANI F M. Innovative metal systems for seismic upgrading of RC structures[J]. Journal of Constructional Steel Research 2008, 64(10): 882-895.
- [4] 杨禹丞, 于安林, 赵宝成. 循环荷载作用下 RC 框架内填 Y 型钢支撑结构的试验研究[J]. 苏州科技学院学报:

工程技术版, 2010, 23(2): 41-45.

YANG Yucheng, YU Anlin, ZHAO Baocheng. Experimental study on reinforced concrete frames with Y-eccentrically brace under cyclic loading[J]. Journal of Suzhou University of Science and Technology: Engineering and Technology, 2010, 23(2):41-45.

- [5] 赵宝成, 于安林, 蒋思成, 王军良. Y 形偏心钢支撑 RC 框架结构滞回性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2013, 33(1): 47-53.
ZHAO Baocheng, Yu Anlin, Jiang Sicheng, Wang Junliang. Experimental investigation of Y-eccentrically steel braced RC frames energy-dissipation[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, 33(1): 47-53
- [6] 薛黎明. 内填 Y 形偏心钢支撑混凝土框架拟动力试验研究[D]. 苏州: 苏州科技学院, 2011.
XUE Liming. The pseudo-dynamic testing and research of RC frames strengthened with Y-eccentrically brace [D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2011.
- [7] 赵宝成, 于安林, 王军良, 等. 内填 Y 形钢支撑加固多层钢筋混凝土框架结构滞回性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(8): 107-118.
ZHAO Baocheng, YU Anlin, WANG Junliang, et al. Experimental investigation of RC frames filled with Y-steel bracing hysteretic behavior[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(8): 107-118.
- [8] 盛邵山. Y 型钢支撑耗能段与 RC 框架梁连接节点的滞回性能研究[D]. 苏州: 苏州科技学院, 2012.
SHENG Shaoshan. The investigation of the hysteretic behavior on the Y-eccentrically brace Link Beam-RC Frame Beam Joint [D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2012.
- [9] 邵寅. Y 型钢支撑耗能段与带楼板 RC 框架梁连接节点的滞回性能研究[D]. 苏州: 苏州科技学院, 2012.
SHAO Yin. Behavior study on the joint of Y-eccentrically steel braced link beam and beam with floor of RC frames [D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2012.
- [10] GBJ50010-2010. 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.
GBJ50017-2003. Code for design of steel structures[S]. Beijing: China Plan Press, 2003.
- [11] GBJ50017-2003. 钢结构设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2003.
GBJ50017-2003, Code for design of steel structures[S]. Beijing: China Plan Press, 2003.
- [12] GB50011-2010. 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
GB50011-2010. Code for seismic design of buildings[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2010.
- [13] 王军良. Y 型钢支撑加固多层 RC 框架试验研究与非线性分析 [D]. 苏州: 苏州科技学院, 2012.
WANG Junliang. The experimental investigation and nonlinear analysis of multistory RC frames retrofitting with steel braces [D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2012.

(编辑 吴海西)