

文章编号: 1000-4750(2015)Suppl-0078-05

钢筋混凝土框架结构中防屈曲支撑 连接节点的损伤控制

曲 哲¹, 吉敷祥一²

(1. 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室中国地震局工程力学研究所, 哈尔滨 150080; 2. 大阪工业大学, 大阪 535-8585, 日本)

摘 要: 为减轻防屈曲支撑节点板与混凝土梁、柱构件之间相互作用对连接性能和框架抗震性能的不利影响, 针对钢筋混凝土框架结构中的防屈曲支撑提出一种非约束节点连接形式, 并通过调整梁端配筋进行局部损伤控制, 最大限度地保证连接性能。拟静力试验结果表明: 建议的连接方法能够成功地转移梁端损伤部位, 有利于提出连接节点的可靠性。

关键词: 防屈曲支撑; 钢筋混凝土框架; 损伤控制; 栓钉; 后张预应力

中图分类号: TU375.4 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2014.05.S009

DAMAGE CONTROL OF CONNECTION JOINT FOR BUCKLING RESTRAINED BRASSED IN RC FRAMES

QU Zhe¹, KISHIKI Shoichi²

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, CEA, Harbin 150080, China;

2. Osaka Institute of Technology, Osaka 535-8585, Japan)

Abstract: An unconstrained gusset connection is proposed for buckling restrained braces in reinforced concrete frame structures in order to eliminate the detrimental frame action because of the interaction between the gusset plate and the adjoining reinforced concrete columns and beams, which may impair both the connection performance and the aseismic performance of the structural system. The local damage control by means of adjusting the longitudinal rebars in concrete beams is also adopted to further ensure the performance of the gusset connection. The results of quasi-static tests show that the proposed damage control scheme is able to relocate the beam end plastic hinge to outside the gusset region and thus protect the connection from being deteriorated.

Key words: buckling restrained brace; reinforced concrete frame; damage control; stud; post-tensioning

防屈曲支撑正在被越来越广泛地应用于我国既有建筑结构的抗震加固和新建建筑的地震防御。与日本、美国等抗震先进国家相比, 我国在将防屈曲支撑应用于钢筋混凝土结构方面进行了更多的工程尝试。然而, 由于混凝土构件具有局部抗拉性能差的特点, 在将钢制防屈曲支撑在混凝土构件相连时, 其连接节点的受力状态较为复杂。国内近年来对此开展了一些有针对性的研究, 提出并通过试

验检验了在钢筋混凝土构件内埋置节点板的连接方式^[1-2]。另一方面, 当将防屈曲支撑的节点板设置于梁、柱节点的一隅而同时与梁端和柱脚相连接时, 框架梁、柱的变形将使节点板处于复杂的应力状态中; 节点板也会对框架梁、柱的变形性能产生影响^[3-4]。为避免这两方面的不利影响, 有学者提出将防屈曲支撑只与梁端相连, 而不与框架柱发生任何接触, 如日本学者提出的采用高强预应力钢

收稿日期: 2014-05-07; 修改日期: 2015-01-05

基金项目: 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费项目(2013B13); 国家自然科学基金项目(51308514); 黑龙江省科学基金项目(E201469)

通讯作者: 曲 哲(1983-), 男, 陕西西安人, 副研究员, 工学博士, 从事建筑减隔震研究(E-mail: quz@iem.ac.cn).

作者简介: 吉敷祥一(1978-), 男, 日本东京人, 副教授, 工学博士, 从事建筑结构抗震研究(E-mail: kishiki@serc.titech.ac.jp).

棒将防屈曲支撑节点板紧固在梁端侧壁的做法如^[5-6]；美国学者针对钢结构提出的“非约束节点板”的做法^[7]。我国《建筑结构消能减震(振)设计》标准图集(09SG610-2)中也包含仅在梁端连接消能器的做法，但仅针对吨位相对较小的黏弹性消能器^[8]。在文献介绍的工程实例中，则将该方法用于采用防屈曲支撑对既有钢筋混凝土框架结构进行的抗震加固^[9]。本文针对仅在梁端连接防屈曲支撑的做法，提出两种不同的连接构造形式，并采用梁端局部损伤控制措施，保证连接部位的性能。

1 连接节点损伤控制方案

本文研究的两种梁端防屈曲支撑连接节点方案如图 1 所示。二者的共同点在于采用类似于文献[7]提出的“非约束节点板”的做法，防屈曲支撑节点板与混凝土柱之间人为的设置一定的间隙，以保证即使当结构发生较大的侧向变形时，节点板也不会与柱发生接触。两者的区别在于节点板与梁端的连接形式。其一采用贯穿梁高的高强预应力钢棒将节点板底板紧固于混凝土梁表面(图 1(a))；其二则

将节点板延伸预埋于混凝土梁端内部，并预埋段设置栓钉以传递力(图 1(b))。前者既有利于新建建筑，也可用于既有建筑的抗震加固。

对于这种仅将防屈曲支撑与梁端相连的情况，节点板与柱之间的间隙处的梁段处于非常不利的受力状态。当防屈曲支撑受拉时，这一段的梁截面可能同时受到较大的拉力、剪力和弯矩作用，从而使这一部位容易发生不利的脆性破坏。即使不发生破坏，如果梁端损伤集中在这一部位(即在此处出现塑性铰)，会不可避免地对防屈曲支撑连接节点的受力性能产生不利的影响。为此，有必要通过合理的损伤控制手段，消除隐患，减轻不利影响，以提出连接节点的受力性能。

本文采用最为简单直接的调整梁内配筋的方式进行局部损伤控制，即在混凝土梁原有配筋的基础上，一方面增加连接节点部位对应的梁端的纵筋，与此同时适当减少连接节点以外部分的梁纵筋，使带有防屈曲支撑的混凝土梁的受力承载力与纯框架梁相当，同时将梁端预期塑性铰区移至连接节点以外区域，具体调整方案如图 2 所示。

2 试验设计

为检验上述连接节点形式与损伤控制方案的有效性，设计如图 3 所示的包含半跨悬臂梁段和防屈曲支撑节点板的子结构试验。由于采用非约束节点板，混凝土柱对连接节点的受力性能影响可忽略不计，在试验中以刚度更大的地梁代替，并在加载过程中计算防屈曲支撑的目标位移时考虑与梁等高的 450mm×450mm 的钢筋混凝土框架柱的弹性变形。此外，为简化试验加载装置，不采用实际的防屈曲支撑，而是采用一台倾斜安装的力控的作动器模拟防屈曲支撑传递给连接节点的集中轴力，并假设防屈曲支撑具有理想弹塑性的滞回行为。同时，采用两台并联的位移控制的作动器在梁跨中反弯点位置(在试验中即为悬臂梁的自由端)施加剪力，使混凝土梁产生变形。

共设计 5 个试验体。其中 1 号试验体为不含防屈曲支撑的纯框架对比试件。另外 4 个分别采用图 1 所示的两种不同的连接节点形式，对每种连接形式又有调整和不调整梁端配筋两种情况(即有损伤控制和无损伤控制)。梁净高 1800mm，截面为 450mm×275mm，配筋如图 2 所示。防屈曲支撑倾角为 40°，

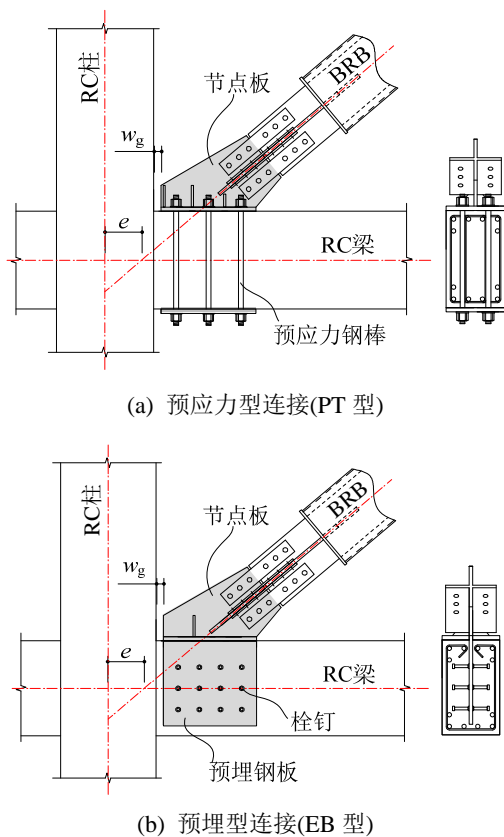


图 1 采用非约束节点板的防屈曲支撑连接节点

Fig.1 Proposed unconstrained gusset connection of buckling restrained braces

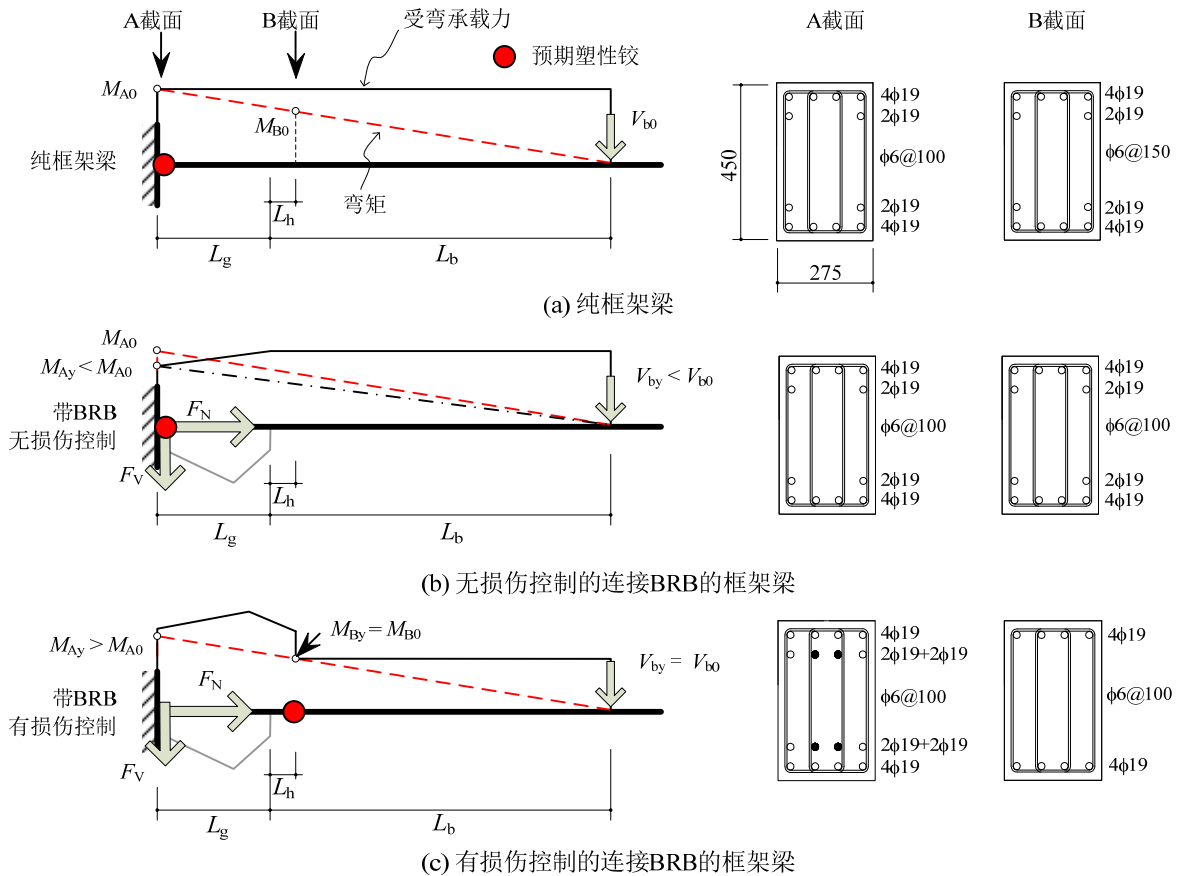


图2 梁端损伤控制概念图及梁端配筋调整方案

Fig.2 Damage control schemes for beam ends and corresponding adjustment of longitudinal rebars

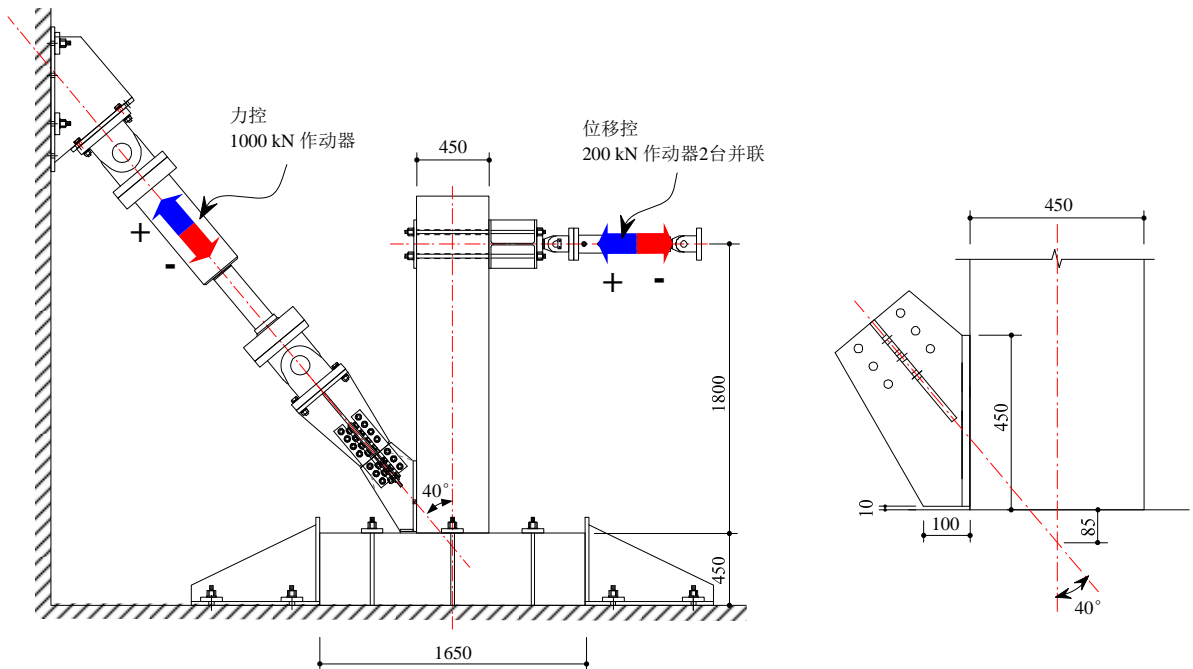


图3 试验体与加载装置

Fig.3 Specimens and test setup

节点板与混凝土柱(在试验中即为地梁)表面的间隙为10mm。假想的防屈曲支撑极限承载力为500kN。对于采用如图1(a)所示的预应力钢棒连接(PT型)的

试件(2号试验体无损控制,4号试验体有损伤控制),采用6根直径21mm的高强钢棒施加合计1500kN的预紧力。对于采用如图1(b)所示的预埋板

连接(EB 型)的试件(3 号试验体无损伤控制, 5 号试验体有损伤控制), 预埋板上均匀设置两面共 24 根直径 16mm 名义屈服强度 235MPa 的栓钉。各个试件的混凝土圆柱体强度平均值约为 70MPa。

试验采用拟静力循环加载。层间位移角幅值从 1/400 逐渐增大至 1/200, 1/100 和 1/50。其中, 在 1/400 和 1/200 下各加载 2 圈, 而在 1/100 和 1/50 下仅各加载 1 圈。在完成 1/50 的加载循环后, 将试验体沿正方向单调推覆, 直到作动器行程用尽。最终各个试验体对应的最大层间位移角均超过 1/20。

3 试验现象

图 4 给出了只包含纯框架梁的 1 号试验体和采用 PT 型连接的 2 号和 4 号试验体的梁剪力-梁转角曲线。其中梁转角为图 3 所示的水平作动器加载点处的水平位移与加载点至地梁表面距离(即 1.8m)之比。作为比较, 图中同时给了采用 Response 2000 计算得到的梁截面的荷载-位移骨架线^[10]。可见, 受纯弯作用的 1 号试验体的试验结果与计算结果吻

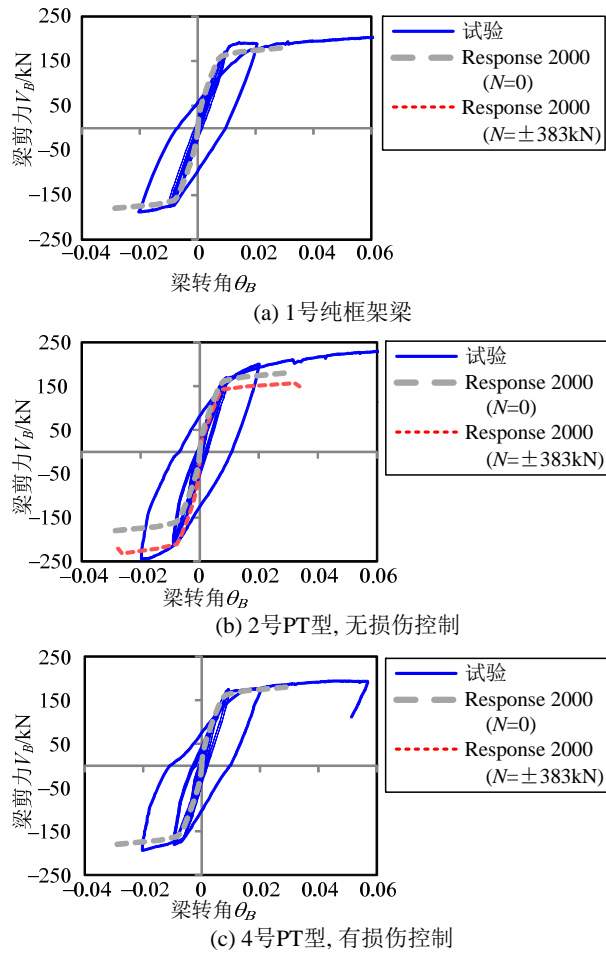
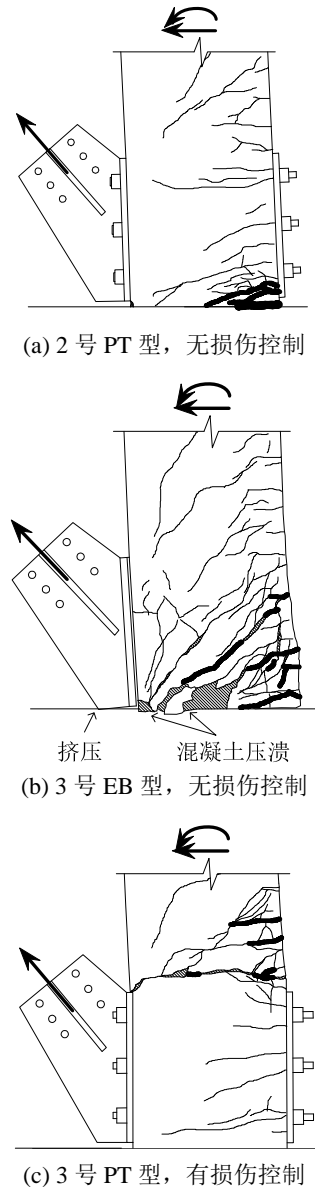


图 4 梁剪力-梁转角曲线

Fig.4 Beam shear versus chord rotation curves

合良好。对于 2 号试验体, 由于预期塑性铰部位受到 BRB 节点板施加的轴压力或轴拉力作用, 理论受弯承载力会相应地提高或降低。试验结果对此也有一定地反映。但在梁端截面受拉时, 其受弯承载力并未如预期的出现大幅的下降。与之相比, 采用损伤控制的 4 号试验体的梁剪力-转角曲线不受 BRB 轴力的影响, 与纯框架梁基本一致。

图 5 给出了含有防屈曲支撑的试验体在加载至 1/20 层间位移角时的破损情况。对于未调整梁端配筋(即未做损伤控制)的 2 号和 3 号试验体, 在正向加载下均在梁根部, 即梁与柱相接处发生集中损伤, 形成塑性铰区。由于同时受到节点板传递的集中拉力和剪力的作用, 这一区域的损伤比较集中。对于采用预应力钢棒连接的 2 号试验体, 节点板下方区域由于受到较大的预压力, 裂缝扩展受到抑



(c) 3 号 PT 型, 有损伤控制

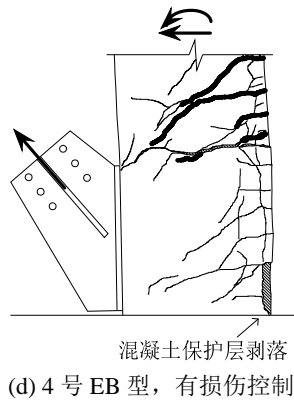


图5 含防屈曲支撑连接节点试件在 1/20 层间位移角下的破坏情况

Fig.5 Observed damage of beam ends with BRB gusset plates under 1/20 inter-story drift ratio

制, 损伤主要集中在预留缝隙对应的狭窄的梁端内。对于采用预埋板连接形式的 3 号试验体, 这一区域发生了非常严重的混凝土压溃现象, 并导致预埋节点板向柱侧靠近并在较大的层间位移角下与柱表面发生挤压。

相比之下, 本文采用的调整配筋的损伤控制方法成功地将梁端塑性铰区移至连接节点外侧, 即远离梁柱节点处, 如图 4(c)、图 4(d)所示, 而防屈曲支撑连接节点对应的梁端的损伤则相对而言非常轻微, 基本保持弹性。这有利于最大限度地保证连接节点的刚度和连接性能, 减小因连接节点发生变形而减小防屈曲支撑的有效变形。

4 结论

本文通过含有防屈曲支撑节点板的半跨悬臂钢筋混凝土梁的拟静力试验, 检验了采用非约束节点板进行连接的防屈曲支撑钢筋混凝土框架结构的局部受力和损伤特性, 同时检验了通过调整配筋以转移梁端损伤部位的局部损伤控制效果。试验结果表明, 采用局部损伤控制的非约束节点连接形式能够达到预期的效果。

参考文献:

- [1] 顾炉忠, 高向宇, 徐建伟, 等. 防屈曲支撑混凝土框架结构抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(7): 101—111.
Gu Luzhong, Gao Xiangyu, Xu Jianwei, et al. Research on seismic performance of BRB concrete frames [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(7): 101—111. (in Chinese)
- [2] 李国强, 郭小康, 孙飞飞, 等. 屈曲约束支撑混凝土锚

固节点力学性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(3): 89—95.

Li Guoqiang, Guo Xiaokang, Sun Feifei, et al. Experimental study of anchorage connection for buckling restrained braces [J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(3): 89—95. (in Chinese)

- [3] Kisiki S, Yamada S, Wada A. Experimental evaluation of structural behavior of gusset plate connection in BRB frame system [C]// Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, 2008.
- [4] Chou C C, Liu J H, Pham D H. Steel buckling-restrained braced frames with single and dual corner gusset connections: seismic tests and analyses [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2012, 41: 1137—1156.
- [5] Ishimura M, Sadasue K, Miyauchi Y, et al. Seismic performance evaluation for retrofitting steel brace of existing RC school buildings with low-strength concrete [C]// Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering. Lisbon, International Association of Earthquake Engineering, 2012. Paper No. 0412.
- [6] 小川雄一郎, 磯田和彦, 北村佳久, 神野靖夫. RC 造建物に鋼材系制震ダンパーを組み込んだハイブリッド架構の構造性能に関する研究[C]// 日本建築学会大会学術講演梗概集, 東京: 日本建築学会, 2004: 1227—1230.
Ogawa Y, Isoda K, Kitamura Y, et al. Experimental study on the structural properties of high strength reinforced concrete frames with brace dampers [C]// Proceedings of the Summaries of Technical Papers of AIJ Annual Meeting, Tokyo: Architectural Institute of Japan, 2004: 1227—1230. (in Japanese)
- [7] Berman JW, Bruneau M. Cyclic testing of a buckling restrained braced frame with unconstrained gusset connections [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2009, 135(12): 1499—1510.
- [8] 09SG610-2, 建筑结构消能减震(振)设计[S]. 北京: 中国建筑标准设计研究院, 2009.
09SG610-2, Passive control design of building structures [S]. Beijing: China Institute of Building Standard Design & Research, 2009. (in Chinese)
- [9] 高杰, 薛彦涛, 王磊. 屈曲约束支撑(JY-SD 型)在抗震加固中的应用[J]. 土木工程与管理学报, 2011, 28(3): 339—343.
Gao Jie, Xue Yantao, Wang Lei. Application of JY-SD-type Buckling restrained braces (BRB/UBB) in seismic strengthening [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2011, 28(3): 339—343. (in Chinese)
- [10] Bentz E C. Sectional analysis of reinforced concrete [D]. Toronto: University of Toronto, 2000.