

连续 Z 字形布置防屈曲支撑的钢筋混凝土框架结构拟静力试验研究*

曲 哲¹ 每田悠承² 吉敷祥一³ 坂田弘安² 和田 章²
Zhe Qu, Yusuke Maida, Shoichi Kishiki, Hiroyasu Sakata, Akira Wada

1.中国地震局工程力学研究所

2.东京工业大学

3.大阪工业大学

Abstract

A new buckling restrained braced frame system is proposed for reinforced concrete building structures, which is featured by the zigzag configuration of the braces and the corresponding connection details. The connection details tend to separate the vertical and horizontal components of force imposed by the braces to be resisted by independent structural components to make the behavior of the connection easier to estimate and control. The performance of the brace connection details was evaluated through cyclic load testing on 1/2-scale subassemblies of the proposed system, each of which consisted of a reinforced concrete part and a set of buckling restrained braces. To simplify the test control, the specimens were rotated 90° in the test and were loaded by two displacement controlled actuators. The test results show that the normal and the shear resistance of the gusset plate connection are essentially independent of each other. However, the rotation of the gusset plate with respect to the beam-to-column joint may result in non-uniform force distribution of the anchor bolts, the primary resistance for tensile force. At the same time, such rotation may also subject the concrete corbels, the primary shear resistance, to unfavorable tensile force. In addition, it is also confirmed that the buckling restrained braces performed well in the proposed system.

Keywords: buckling restrained brace, reinforced concrete frame, cyclic loading test

1 引言

防屈曲支撑 (BRB) 具有饱满而稳定的滞回耗能特性, 是性能可靠的消能减震构件, 广泛应于减震钢结构。对于钢筋混凝土结构, 将钢支撑与混凝土构件直接相连, 会对混凝土构件局部产生较大的集中力作用。特别是其中的拉力作用, 对混凝土构件非常不利。为使支撑轴力均匀平滑地传递给混凝土构件, 一种常见于抗震加固中的作法是首先将钢支撑框架内嵌在混凝土框架内部或外附在其外侧, 以增大连接部位的面积, 减小力的集中 (如 [1][2])。对于新建建筑, 则可以通过在混凝土梁、柱构件内预埋钢构件, 并将钢支撑节点板与之焊接 (如 [3])。但与其它类型的支撑型耗能构件相比, BRB 往往吨位较大, 因此对

* 本文内容曾发表于以下论文: Qu Z, Kishiki S, Sakata H, Wada A, Maida Y. Subassemblage cyclic loading test of RC frame with buckling restrained braces in zigzag configuration. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 42(7), 2013: 1087-1102.

混凝土构件连接局部也提出更高的要求。

为探索将 BRB 更加巧妙地连接在混凝土结构中的途径,本文试图从整体结构体系的角度,介绍一种新型的“连续防屈曲支撑钢筋混凝土框架结构”。其特点在于一跨内的 BRB 沿结构高度方向连续布置(图 1(a))。相邻楼层的两上 BRB 共用一个节点板。支撑跨不再设置框架梁,而将 BRB 节点板设置在梁柱节点外侧,并通过预应力螺栓和钢筋混凝土(RC)剪力键与 RC 柱相连(图 1(b))。这样一来,含有 BRB 的一跨形成一个由 RC 柱作弦杆, BRB 作腹杆的巨型华伦式桁架。当整体结构在水平地震作用下发生侧向变形时,相邻两个 BRB 往往一个受拉一个受压,二者轴力的水平分量可在一定程度上相互抵消,从而减小连接部位可能受到的水平拉力作用。更重要的是,图 1(b)所示的连接构造将连接部位法向和切向的抵抗机制分离开来,预应力螺栓基本只抵抗法向拉力作用,RC 剪力键则只负责抵抗切向剪力作用,传力明确,简化了连接部位的承载力设计。此外,将节点板设置在节点区外侧,而不占用柱脚的净高,有利于保证 RC 柱的抗震性能。

为检验上述新型结构体系的抗震性能,取图 1(a)红色部位所示的 T 形 RC 梁柱节点和与之相连的两个 BRB 作为子结构,建立 1/2 缩尺模型并进行拟静力试验。

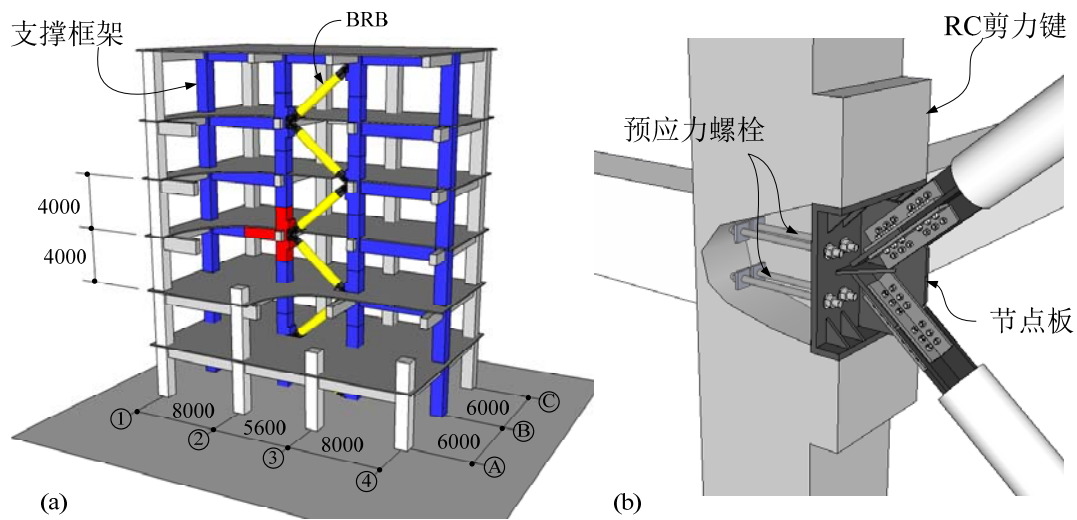


图 1 连续 Z 字形布置防屈曲支撑的钢筋混凝土框架结构示意图: (a) 结构体系; (b) 连接构造

2 子结构拟静力试验

2.1 试件概述

在图 1(b)所示的原型结构中,假设 RC 框架中部楼层梁、柱的反弯点均在跨中或一半层高位置,取出隔离体。其 1/2 缩尺模型如图 2 所示。其中半跨梁长 2m,半层柱高 1m。RC 部分满足日本建筑学会出版的《钢筋混凝土结构计算规程》的相关要求^[4]。其中,柱截面为 450mm 见方,配置 16 根直径 19mm 变形钢筋,总配筋率为 2.3%,箍筋采用直径 6mm 复合箍筋,间距 50mm,配箍率 0.85%。梁截面高 450mm,宽 275mm,上下对称配筋,各配置 6 根直径 19mm 变形钢筋,配筋率 1.6%。箍筋采用直径 6mm 封闭箍筋,梁端 450mm 范围内间距 90mm,其余部分间距 150mm,相应的配筋率分别为 0.52%和 31%。

采用 6 根穿过柱截面中部的无粘结预应力筋为 RC 柱施加约 1000kN 的轴力,轴压比约为 0.1。在 BRB 节点板上下两侧分别设置一个从柱表面突起的钢筋混凝土牛腿作为剪力键。牛腿深 450mm,长度仅为 70mm。牛腿内配置直径 10mm 双层 U 形箍筋,开口端埋置于混凝土柱内。BRB 节点板安装就位后,在牛腿与节点板之间预留的宽约 10mm 的缝隙内灌注高强无收缩砂浆。

在连接部位的法向，采用 8 根直径 17mm 高强预应力螺栓将节点板锚固在梁柱节点侧壁。当整体结构各层变形均匀且相邻楼层的 BRB 均进入屈服时，二者轴力数值相同，符号相反。其传递给节点板的水平分量可以完全抵消。但相关研究表明，防屈曲支撑框架体系中的 BRB 进入屈服后会显著抑制结构体系的一阶振型对应的结构内力，从而使连接节点局部的受力受到较多的二阶甚至三阶振型的影响。在二阶振型下，相邻楼层的 BRB 轴力可能并非数值相同符号相反，而可能出现两个 BRB 同时受拉的情况，从而使节点板承受较大的法向拉力作用。

为考察连接部位法向拉力作用的影响，设计表 1 所示的 4 种 BRB 布置形式。其中试件 No. 1 上下层 BRB 具有相同的屈服承载力，在拟静力试验中其传递给节点板的法向拉力基本可以相互抵消。与之相比，试件 No.2 和 No.3 中的上下层 BRB 的屈服承载力存在不同程度的级差，从而使节点板受到法向拉力作用。试件 No.4 的 BRB 布置与试件 No.3 相同，但在法向抗力机制上，试件 No.4 中锚固于节点内部的高强螺栓不施加预应力，相应地，采用一个水平撑杆抵抗节点板法向力的作用。

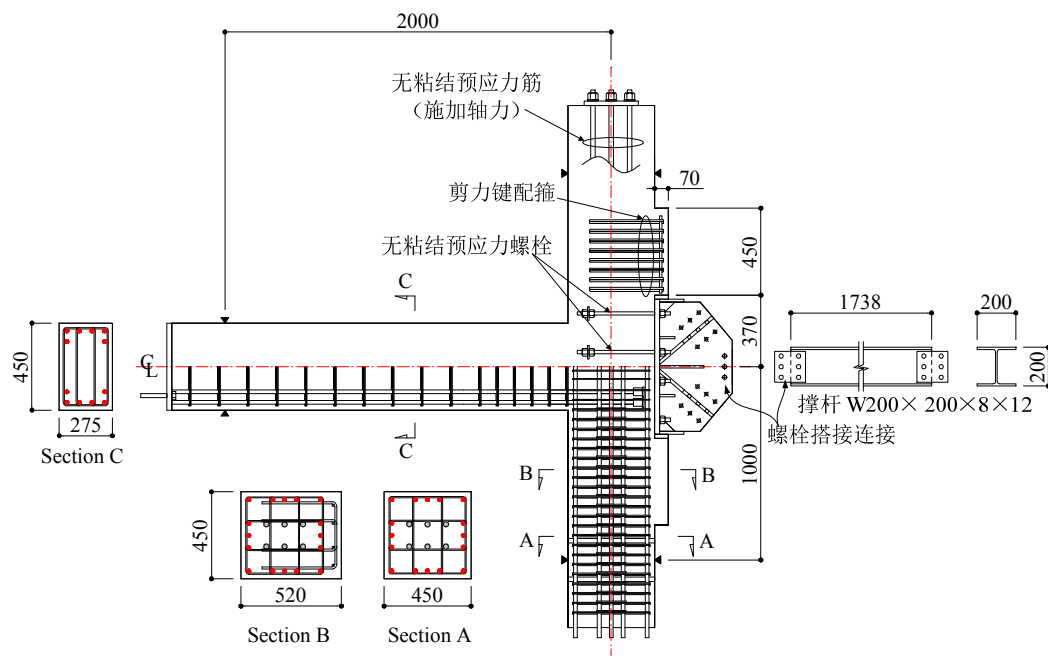


图 2 试件中的 RC 部分以及附加水平撑杆

表 1 试件中 BRB 的布置与节点板的紧固

	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
上层 BRB 的名义屈服承载力 (kN)	750	500	0	0
下层 BRB 的名义屈服承载力 (kN)	750	750	750	750
螺栓设计预应力 P_{0d} (kN)	571.2	571.2	571.2	0
螺栓实际预应力, P_0 (kN)	504.1	515.0	511.5	0
是否包含水平撑杆	否	否	否	是

试验采用新日本制铁公司提供的防屈曲支撑。其芯材塑性段为一字形截面，长度为 1262mm；弹性段为十字形截面。750kN 防屈曲支撑的套管直径 267.4mm，壁厚 6mm；500kN 防屈曲支撑的套管直径为 216.3mm，壁厚 4.5mm。防屈曲支撑与节点板之间采用高强螺栓搭接连接。

2.2 试验加载

受到实验条件限制，为简化加载装置和加载控制，将试件旋转 90 度，采用图 3 所示的装置进行加载。试验时，采用位移控制的作动器在柱端沿柱轴线方向施加水平力，使 BRB 产生拉、压变形；同时采用另一个位移控制的作动器在梁端垂直于梁轴线方向施加水平力，同时约束柱端的竖向变形，使 RC 部位产生变形。由此产生的试件变形与实际结构基本相同。

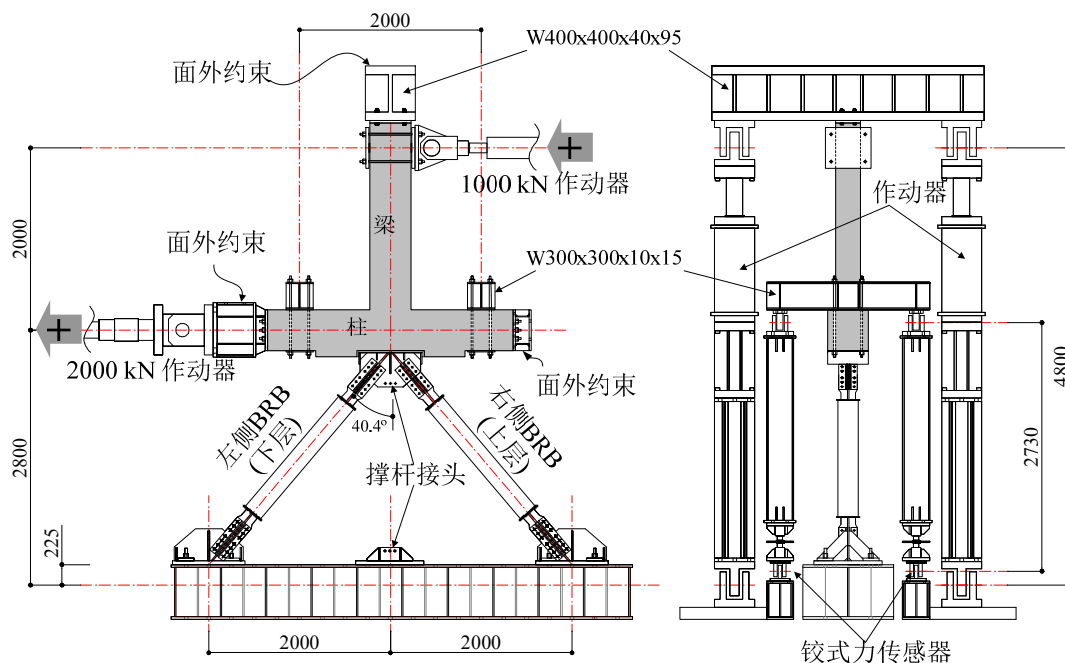


图 3 加载装置

3 试验结果

3.1 RC 部分和 BRB 的受力性能

试件中 RC 部分在试验正向加载中的力平衡如图 4 所示。由于上下两层 BRB 的轴力作用线相交于 RC 柱表面，因此其切向合力（图 4 中的 V_{GP} ）相对于 RC 梁柱节点中心有附加弯矩作用，有助于约束梁柱节点的转动，提高 RC 部分的抗侧承载力。因此，可将 RC 部分的抗侧承载力分解为 RC 梁剪力 (V_b) 与节点板剪力 (V_{GP}) 两部分的贡献，如图 5 所示。可见，虽然 V_{GP} 的力臂较小，但其提供的抗侧承载力可达总抗侧承载力的 1/3 以上。

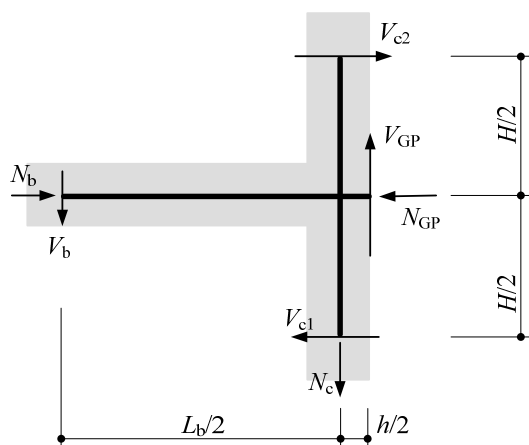


图 4 正向加载时 RC 部分的力平衡

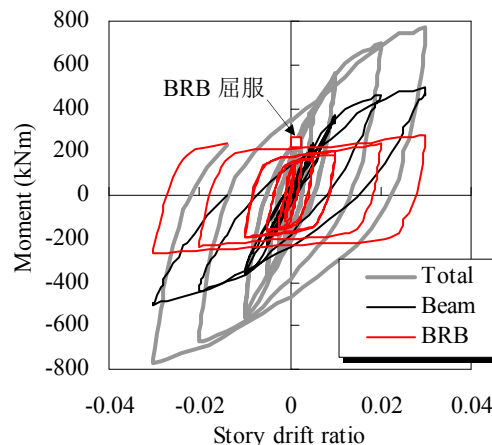


图 5. 试件 No.2 的 RC 部分抗侧承载力的组成

由图 5 还可以看出, BRB 在较小的层间位移角下即进入塑性。4 个试件中 BRB 屈服时对应的层间位移角在 1/500 至 1/600 之间。而 RC 梁纵筋屈服则发生在层间位移角约为 1/100 时。这意味着即使对于钢筋混凝土框架, BRB 仍可以在 RC 部分出现明确损伤之前充分发生其滞回耗能能力。

图 6 给出了各个试件中的 BRB 在子结构试验中的轴向力-变形关系。可见, 所有 BRB 均表现出预期的稳定的滞回行为。图 6 (c) 比较了相同的 BRB 在上述子结构试验和轴向拉压的构件试验中的滞回曲线(图中虚线)。二者基本相当。这说明在本文介绍的连续支撑框架结构体系中, BRB 的工作性能在宏观上没有受到不利的影响。对试验结果更加细致的分析表明, 在连续支撑框架中 BRB 端部的转角与传统人字支撑框架中支撑端部的转角大小相当^[5], BRB 能够正常发挥其工作性能。

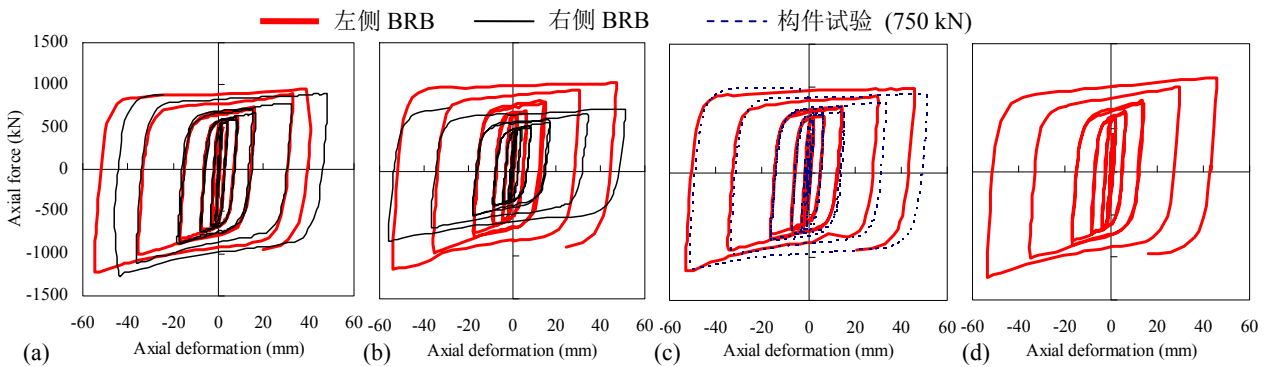


图 6 BRB 的滞回曲线: (a) No.1, (b) No.2, (c) No.3, (d) No.4

3.2 连接节点

连接节点局部的变形是影响 BRB 工作性能和混凝土构件局部损伤的关键。BRB 节点板在负向加载过程中的力平衡如图 7 所示。上层 BRB 给节点板施加集中压力, 下层 BRB 给节点板施加集中拉力。对于试件 No.3 和 No.4, 仅有下层 BRB, 即在图 7 中只有 $F_{BRB,L}$, 而 $F_{BRB,U}$ 为零。这里 BRB 传递给节点板的轴力可分解为一个切向的剪力和一个法向的拉力。其中, 切向剪力主要由下层 RC 牛腿抵抗。与此同时, 节点板底板受预应力螺栓的预压力作用, 与混凝土构件表面存在明显的摩擦作用, 也参与平衡节点板受到切向剪力。

在节点板的法向, BRB 轴力的法向分量由预应力螺栓的轴力平衡。同时, 节点板与牛腿顶面之间存在一定的摩擦作用, 也参与抵抗 BRB 轴力的法向分量。这样的力平衡体系下, 节点板还存在弯矩平衡, 可能使节点板发生转动。这一点通过各个螺栓的变形分布可以看出。

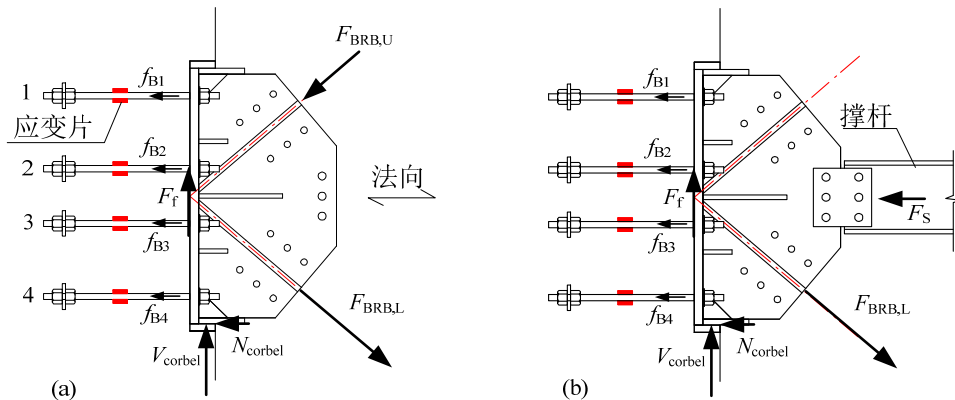


图 7 负向加载时节点板的力平衡以及螺栓变形的量测: (a) No.2, (b) No.4.

图 8 比较了 4 个试件的节点板各排螺栓变形的分布与发展。对于上下层 BRB 的屈服承载力级差较小的试件 No.1 和 No.2, 各排螺栓的变形比较均匀。但对于只有下层 BRB 的试件 No.3 和 No.4, 可以通过各排螺栓变形的分布清楚地看到节点板的顺时针转动。这意味着各排螺栓受力并不均匀。在负向加载时, 上排螺栓受力明显大于下排螺栓。这为螺栓的设计提出了新的问题。在设计时应予以重视。另一方面, RC 牛腿顶面的摩擦力可能使牛腿受拉, 不利于牛腿抗剪受力。在设计时也应考虑。

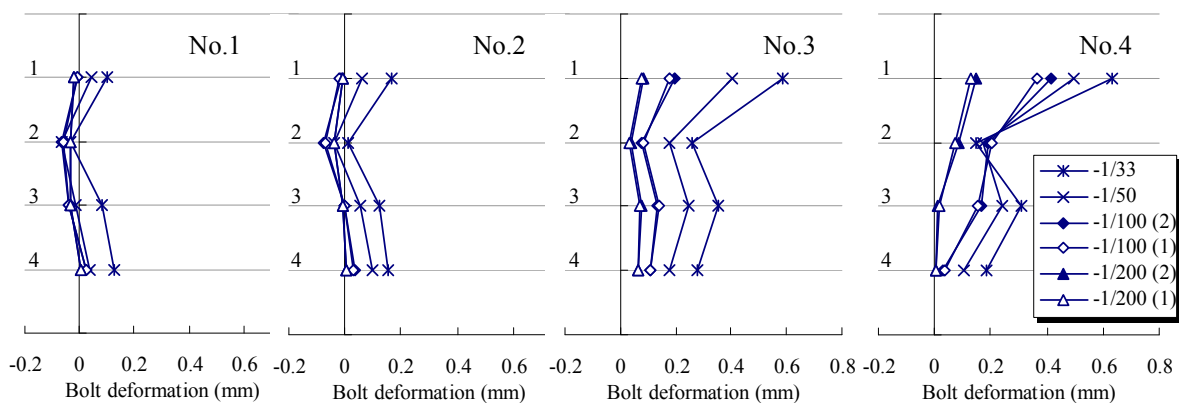


图 8 螺栓轴向变形

通过对比试件 No.3 和 No.4 的节点板的法向变形, 可看出螺栓的预应力和水平撑杆在限制节点板法向变形方面的作用 (图 9)。对于为螺栓施加预应力的试件 No.3, 在节点板底板与混凝土表面分离之前, 连接节点法向刚度较大, 可有效抑制法向变形。螺栓未施加预应力的试件 No.4 中的水平撑杆也对抑制法向变形有一定作用。图 9 (b) 比较了 1/33 层间位移角下有撑杆和无撑杆两种情况下节点板的法向变形。无撑杆时的变形明显大于有撑杆的情况。

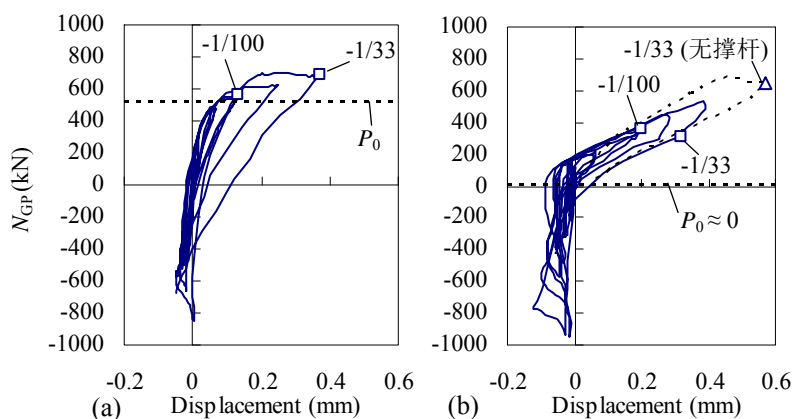


图 9 柱表面节点板法向力-位移关系: (a) No.3, (b) No.4.

4 结论

连续防屈曲支撑钢筋混凝土框架试图从整体结构体系层次改善钢支撑与混凝土构件的连接性能。拟静力试验结果表明, 在该结构体系中防屈曲支撑可以正常发挥其滞回耗能能力, 钢-混凝土连接部位的局部损伤轻微, 能够保证连接性能。同时, 通过试验也发现一些问题, 包括螺栓受力不均, 牛腿可能受拉等。

参考文献

- [1] Kukita S, Haginoya M, Miyagawa K, et al. Experimental study on seismic retrofit for existing R/C building by using CHS bracing. Summaries of technical papers of AIJ annual meeting, 2000, C-2: 377-382 (in Japanese).
- [2] Brown AP, Aiken ID, Jafarzadeh FJ. Buckling restrained braces provide the key to the seismic retrofit of the Wallace F. Bennett Federal Building [J]. Modern Steel Construction, Aug, 2001.
- [3] 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, 32(7), 2011: 101-111.
- [4] AIJ. Standard for structural calculation of reinforced concrete structures [S]. Architectural Institute of Japan, 2010 (in Japanese).
- [5] Qu Z, Kishiki S, Sakata H, et al. Subassemblage cyclic loading test of RC frame with buckling restrained braces in zigzag configuration [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 42(7), 2013: 1087-1102.