文章编号:1007-6069(2011)04-0020-07

点接触式防屈曲支撑稳定及延性性能研究

李晓文,孙晓岭,薛 强
(西安建筑科技大学 土木工程学院,陕西 西安 710055)

摘 要:防压曲支撑作为一种新型耗能减震构件,能用于抑制普通支撑的压曲现象,能更多地吸收和耗散地震输入结构的能量,提高框架的抗震性能。目前,常规屈曲约束支撑的芯材和无粘结材料一般采用特殊材料制成,加工制作成本较高,不利于工程推广使用。提出了一种点接触式防屈曲支撑(point-contact buckling-restrained braces,PBRB),由核心钢管、约束套管及之间的垫环构成,各部件均采用普通钢材,且制作工艺简单。基于ABAQUS工作平台,通过改变PBRB的相关参数,对PBRB的稳定及延性性能进行了系统研究。结果表明,所提出的PBRB具有稳定的工作性能和良好的延性;在相同条件下,PBRB的稳定和延性性能与常规屈曲约束支撑相比差别不大;PBRB屈服后承载力基本保持在核心钢管屈服段的屈服荷载 F_y 附近,无强化上升段,降低了对约束单元的要求。

关键词:屈曲约束支撑;点接触;稳定性能;延性性能
中图分类号:TU352.1 文献标志码:A

Study on stability and ductility of point-contact buckling-restrained braces

LI Xiaowen, SUN Xiaoling, XUE Qiang
(School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Compared with conventional braces, the buckling-restrained braces(BRB) has better energy dissipation capacity. In general, the steel core and unbonded agent materials of the existing BRB are usually made of special materials. It makes the application and dissemination of the BRB to become hard. In order to avoid the disadvantages of the existing BRB, a new type of point-contact buckling-restrained braces (PBRB) was invented. PBRB is composed of steel tube core, buckling restraining sleeve and pad ring between them. Its components are made of conventional materials, and it has a simple production process. Using ABAQUS, we analyzed the global stability behavior and ductility performance of PBRB which are influenced by several related parameters. Based on the results of the analysis, the PBRB has stable workability and good ductility. Under the same conditions, there are not obvious differences between the PBRB and the ordinary BRB in the global stability behavior and ductility performance. PBRB's post-yield capacity remained at the yield load F_y of the steel tube core. Because the capacity curve can not increase after yield, we can reduce the requirements for sleeve.

Key words: buckling-restrained braces; point contact; stability behavior; ductility performance

引言

防屈曲支撑(buckling-restrained braces,BRB)作为一种在受拉与受压时均能达到屈服而不发生屈曲失

收稿日期:2010-05-12; 修订日期:2010-08-23
基金项目:国家自然科学基金项目(50878181);陕西省教育厅2008年度自然科学研究项目(08JK336)
作者简介:李晓文(1959-),女,教授。主要从事工程结构抗震理论研究. E-mail: lixwgh@xauat.edu.cn
通讯作者:孙晓岭,男,硕士研究生,主要从事工程结构抗震理论研究. E-mail: sunxiaoling-2008@163.com

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

稳的轴力构件，在国内外得到了较为深入的研究和广泛的工程应用[1-4]。

BRB 具有以下 3 个特点: (1) 由内核与套管组成，两者之间有间隙; (2) 为保证轴压力施加在内核上，套管的长度略小于内核的长度; (3) 内核受压屈曲后将与套管的内壁发生挤压，导致套管中产生弯曲应力，内核与套管各司其职——内核承受压力而套管抵抗弯曲。内核可以是板条或圆管、方管、工字形截面等，套管可以是圆管、方管等，也可以是由双槽钢组成的格构式套管。当内核和套管均为钢管时，又称为双钢管构件[5-6]，如图 1 所示。

根据现有文献[7-9]，常规 BRB 存在如下问题: (1) BRB 的芯材多采用特殊钢材制成，增加了支撑成本与加工制造的难度，BRB 的无粘结材料既要消除芯材与填充材料之间的摩擦力，又要提供足够的空间容许芯材受压膨胀，造成了 BRB 对无粘结材料的过度依赖; (2) 核心压杆端部受力复杂，容易提前破坏，导致整个构件丧失承载力; (3) 对于双钢管构件，约束套管用钢量大。为有效约束核心压杆，一方面需限制约束套管与核心压杆之间间隙的大小，另一方面需保证核心压杆与约束套管的刚度比。因此，只能通过增加约束套管壁厚实现这一目的; (4) 计算模型复杂。约束套管是有限刚度的，在荷载作用下，将发生弹性变形，从而承受轴向荷载的核心压杆与约束套管的接触段不再是刚性的。这将使轴压杆件发生与刚性约束屈曲所不同的屈曲变形。需要研究柔性线接触的计算模型，以便分析核心压杆与约束套管点接触、线接触时轴压杆件的屈曲变形。

本文提出一种点接触式防屈曲支撑(point - contact buckling - restrained braces，PBRB)，以改善常规 BRB 存在的问题，并通过有限元方法来研究 PBRB 的性能。

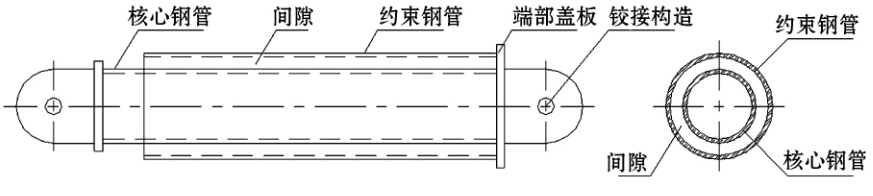


图 1　双钢管构件示意图

Fig. 1　Sketch of double steel - tube buckling - restrained braces

1　点接触式防屈曲支撑的原理与构成

在前期相关研究的基础上，所提出的 PBRB 如图 2 所示。这种基于普通钢材加工而成的 PBRB，除了包括核心钢管、约束套管之外，在核心钢管和约束套管之间还设有垫环。PBRB 的核心钢管为主要受力单元，由屈服段和连接段组成，采用普通 Q235B 无缝钢管; 约束套管采用普通 Q235B 方钢管或双焊缝冷弯方钢管; 核心钢管与约束套管之间设置垫环，垫环类似于钢管内隔板，焊接于约束套管上，采用普通的 Q235B 钢板制成，其厚度和间距根据受力要求设置。

与常规 BRB 相比，这种 PBRB 的优点是: (1) 采用普通的 Q235B 无缝钢管作为核心单元的材料，核心钢管和约束套管之间不需要无粘结材料，节约成本，降低造价，而且制作工艺简单，有利于工程推广应用; (2) 通过垫环的设置控制核心钢管的屈曲模式; (3) 通过调节核心钢管和约束套管之间的间隙控制约束套管的抗弯刚度; (4) 分析计算简便，可假定核心钢管和约束套管间仅发生点接触，且接触点位置已知。

本文所提出的 PBRB 可通过适当增大钢管之间的间隙提高约束套管的约束刚度，能对长细比较大的核心钢管形成有效的约束。针对某工程应用，所研究 PBRB 如图 2 所示，其中核心钢管连接段的截面为 PIPE 299×16，屈服段的截面为 PIPE 299×14，核心钢管总长度为 15m，长细比 $\lambda = 148.7$。为防止核心钢管端部提前破坏，加强连接段的截面的同时减小端部垫环的间距，使约束套管对核心钢管端部形成更强的约束作用。核心钢管与约束套管之间的间距不宜过小，以方便垫环的设置。核心钢管与约束套管之间的间距也不宜过大，由于钢管壁厚不宜太薄，此时约束套管会由于截面尺寸增大而增加用钢量。垫环的设置会影响核心钢管的屈曲模态，本文选用了 21.47 和 32.21 两种节间长细比。根据制造规范，杆件初始挠度的限值为 $L/1000$，但考虑到杆件安装后荷载作用点可能存在偏差，初始挠度取为 $L/500$[9]。表 1 列出了构件的有关参数，钢管和垫环均采用 Q235B 级钢材。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

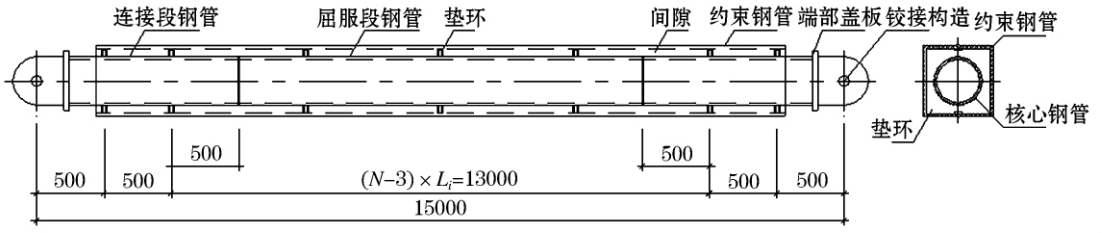


图2 点接触式防屈曲支撑模型尺寸

Fig. 2 Model's dimension of point-contact buckling-restrained braces

表1 不同截面组成的防屈曲支撑

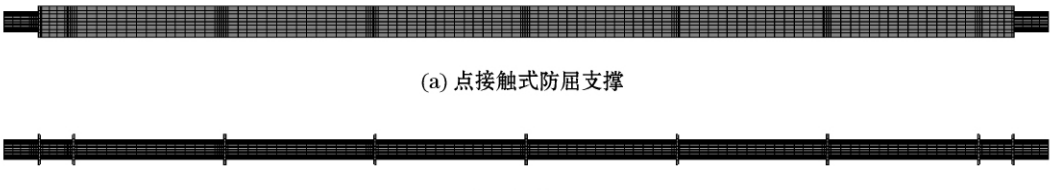
Table 1 Point – contact buckling – restrained braces with different section

构件编号	核心单元 $D/\text{mm}\times t/\text{mm}$	约束单元 $B/\text{mm}\times t/\text{mm}$	垫环数量,N	节间长度,L_i/mm	节间长细比 $\lambda=L_i/i$
PBRB – A1 – A7	299 × 14	400 × (5 ~ 16)	7	3250	32.21
PBRB – B1 – B7	299 × 14	400 × (5 ~ 16)	9	2167	21.47
PBRB – C1 – C7	299 × 14	450 × (5 ~ 16)	7	3250	32.21
PBRB – D1 – D7	299 × 14	450 × (5 ~ 16)	9	2167	21.47

注: 构件编号 PBRB – n 中,PBRB 表示点接触式防屈曲支撑,n 表示约束单元的标号;核心单元 $D\times t$,D 表示钢管外径,t 表示钢管壁厚;约束单元 $B\times t$,B 表示约束方钢管的边长,t 表示外包方钢管壁厚,分别取 $t=5$、6、8、10、12、14、16。

2 点接触式防屈曲支撑有限元模型的建立

采用 ABAQUS 软件对 PBRB 进行有限元分析,有限元模型如图3所示。钢材采用 ABAQUS 软件中提供等向弹塑性模型,满足 vvon Mises 屈服准则,这种模型多用于模拟金属材料的弹塑性性能。用连接给定数据点的 – 系列直线来平滑地逼近金属材料的应力 – 应变关系。该模型采用任意多个点来逼近实际的材料行为,因此,就非常接近真实的材料行为。塑性数据将材料的真实屈服应力定义为真实塑性应变的函数。描述钢材塑性性能的应力 – 应变关系曲线采用5段式二次塑流模型[11],分为弹性段(Oa)、弹塑性段(ab)、塑性段(bc)、强化段(cd)和二次塑流(de)等5个阶段,为了计算方便,取强化段为直线关系,同时达到强度极限时,采用水平塑性段。图4中的点划线和实线分别为钢材实际的和简化的应力 – 应变关系,模型的数学表达式如式(1)。本文有限元模型建立时,钢材弹性模量取 206GPa,弹性阶段泊松比取 0.30。



(a) 点接触式防屈支撑

(b) 核心钢管及垫环

图3 有限元分析模型

Fig. 3 Finite element model

$$\sigma_s=\begin{cases}E_s\varepsilon_s & \varepsilon_s\leqslant\varepsilon_e\\ -A\varepsilon_s^2+B\varepsilon_s+C & \varepsilon_e<\varepsilon_s\leqslant\varepsilon_{e1}\\ f_y & \varepsilon_{e1}<\varepsilon_s\leqslant\varepsilon_{e2}\\ f_y\left[1+0.6\dfrac{\varepsilon_s-\varepsilon_{e2}}{\varepsilon_{e3}-\varepsilon_{e2}}\right]\\ 1.6f_y & \varepsilon_s\leqslant\varepsilon_{e3}\end{cases}\tag{1}$$

式中 $\varepsilon_e=0.8f_y/E_s$;$\varepsilon_{e1}=1.5\varepsilon_e$;$\varepsilon_{e2}=10\varepsilon_{e1}$;$\varepsilon_{e3}=100\varepsilon_{e1}$

$A=0.2f_y/(\varepsilon_{e1}-\varepsilon_e)^2$;$B=2A\varepsilon_{e1}$;$C=0.8f_y+A\varepsilon_e^2-B\varepsilon_e$。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

钢管采用四节点完全积分格式的壳单元(S4) ，为满足一定的计算精度，在壳单元厚度方向采用 9 个积分点的 Simpson 积分。垫环采用八节点完全积分格式的三维实体单元(C3D8) ，以方便建立核心钢管与垫环之间的接触关系。钢管周向网格单元的个数为 32 个，沿管长的网格单元尺寸为 100mm。为了较为精确地研究接触点处的受力情况，对该部分进行了网格加密，沿管长的网格单元尺寸为 30mm。核心钢管与约束钢管和垫环之间设有接触对，接触对由主面(master surface) 和从面(slave surface) 构成，本文选约束钢管和垫环内表面为主面，核心钢管外表面为从面。接触属性中的接触面法向作用采用默认的硬接触(hard contact) ，假设钢材与钢材之间无摩擦，接触面的摩擦系数为零，即无摩擦。

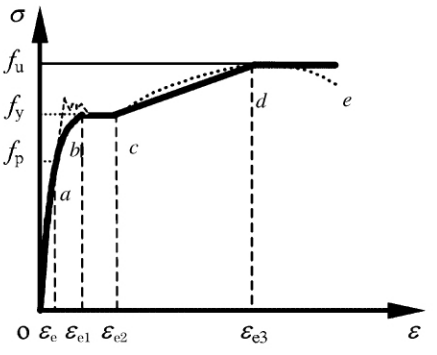


图 4　钢材应力 - 应变关系

Fig. 4　Stress - strain curve of steel

本文仅进行构件的单向位移加载，研究垫环及约束套管对核心钢管受力性能的影响。为更好地模拟构件端部的受力情况，在核心钢管加载点处设参考点，核心钢管端部与参考点间采用刚体约束，边界条件和荷载均加载参考点上。采用 ABAQUS/Standard 通用分析模块进行分析。

3　计算结果分析

3.1　稳定承载力分析

当约束套管对核心钢管约束作用的大小一定时，防屈曲支撑的受力性能不依赖于外围约束单元的形状[12]。因此，通过考虑核心钢管屈服段长度范围内约束套管对核心钢管的约束作用，并基于约束系数研究防屈曲支撑的整体稳定性能。定义约束系数为:

$$\lambda = P_E / F_y \tag{2}$$

式中 $P_E = \pi^2 EI/l^2$ 为约束套管的弹性屈曲荷载; $F_y = Af_y$ 为核心钢管屈服段的屈服荷载。

基于位移控制得到在轴向压力作用下，构件轴向荷载 - 轴向应变全过程曲线，并得到构件的最大抗压承载力 P_{cu}。支撑几何参数和承载力参数见表 2，图 5 为不同参数构件的轴向荷载 - 轴向应变全过程曲线。

由于核心单元与约束单元之间缝隙较大，增加了约束单元的回转半径，约束系数 λ 相应较大。PBRB 受力过程中，各垫环同时对核心单元形成约束作用，直接强迫核心单元在约束最小的节间发生高阶局部屈曲，改善了常规 BRB 支撑从低阶屈曲到高阶屈曲的受力过程，即使约束系数 $\lambda < 1.0$，核心单元亦能达到全截面屈服。

核心单元达到全截面屈服后，在约束最小的节间发生局部屈曲，承载力略有下降($< 10\%$) 。当约束系数 $\lambda < 1.3$ 时，约束单元不能有效约束核心单元侧向变形的发展，发生整体屈曲破坏，如图 6(a) ; 当约束系数 $\lambda > 1.3$ 时，核心单元局部屈曲的侧向变形受到约束单元管壁的约束，促使相邻节间的核心单元继续发生局部屈曲，此过程不断重复，直到发生与节间数目相同的($N-3$) 阶屈曲，如图 6(b) 。

PBRB 强制核心单元直接发生特定形式的高阶屈曲，屈曲所引起的承载力下降与钢材强化所引起的承载力提高基本相当，支撑屈服后承载力基本保持在核心钢管屈服段的屈服荷载 F_y 附近，无强化上升段，降低了对约束单元的要求。PBRB 屈服后承载力维持不变，有利于降低结构刚度，减小地震作用，保护主受力构件不受破坏，符合“保险丝”构件的要求。

PBRB 节间长度对支撑的最大抗压承载力 P_{cu} 的影响不大，但当节间长细比较大，核心单元各节间陆续屈曲时，荷载位移曲线产生明显的波动现象; 当节间长细比较小时，荷载过渡平滑。建议节间长细比不宜大于 20，以保证 PBRB 屈服后承载力的稳定性。

3.2　延性性能分析

延性系数是反应防屈曲支撑构件极限变形能力的指标，对于荷载位移关系曲线没有下降段的构件可由最大应变与屈服应变的比值计算得到，对于荷载位移关系曲线有下降段的构件，极限应变取曲线下降段对应于 0. 85 倍最大承载力的应变值。当 $\lambda = 0.815$ 时，支撑的延性系数约为 2.9; 当约束系数 λ 增大，即 $\lambda = 1.277$ 时，延性系数约为 4.5，$\lambda > 1.3$ 时，支撑不发生整体屈曲，延性系数均大于 6。

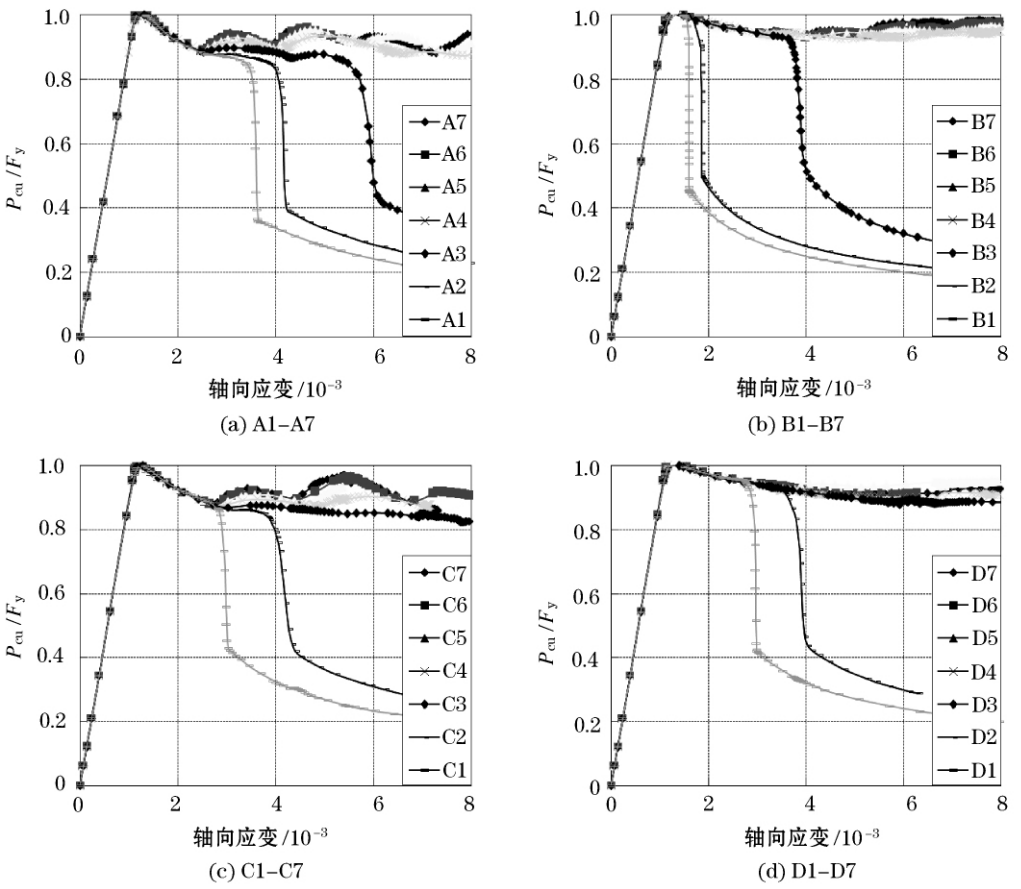
© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 2 不同截面组成的防屈曲支撑及其极限承载力

Table 2 Point-contact buckling-restrained braces with different sections and their ultimate bearing capacities

构件	核心单元		约束单元		防屈曲支撑	
编号	D/mm × t/mm	F_y/kN	B/mm × t/mm	P_E	λ	P_{cu}/F_y
PBRB – A1/B1	299 × 14	2945.7	400 × 5	2399.8	0.815	1.001/1.007
PBRB – A2/B2	299 × 14	2945.7	400 × 6	2858.2	0.970	1.001/1.005
PBRB – A3/B3	299 × 14	2945.7	400 × 8	3761.8	1.277	1.001/1.008
PBRB – A4/B4	299 × 14	2945.7	400 × 10	4597.5	1.561	1.001/1.008
PBRB – A5/B5	299 × 14	2945.7	400 × 12	5331.8	1.810	1.001/1.006
PBRB – A6/B6	299 × 14	2945.7	400 × 14	6065.0	2.059	1.001/1.008
PBRB – A7/B7	299 × 14	2945.7	400 × 16	6755.4	2.293	1.001/1.008
PBRB – C1/D1	299 × 14	2945.7	450 × 5	3431.3	1.165	1.004/1.007
PBRB – C2/D2	299 × 14	2945.7	450 × 6	4090.1	1.388	1.004/1.007
PBRB – C3/D3	299 × 14	2945.7	450 × 8	5409.6	1.836	1.004/1.007
PBRB – C4/D4	299 × 14	2945.7	450 × 10	6628.8	2.250	1.004/1.008
PBRB – C5/D5	299 × 14	2945.7	450 × 12	7719.2	2.620	1.004/1.007
PBRB – C6/D6	299 × 14	2945.7	450 × 14	8807.5	2.990	1.005/1.008
PBRB – C7/D7	299 × 14	2945.7	450 × 16	9841.1	3.341	1.005/1.007

注: 构件编号 PBRB – n **中,**PBRB **表示点接触式防屈曲支撑,**n **表示约束单元的标号; 核心单元** $D \times t$**,**D **表示钢管外径,**t **表示钢管壁厚; 约束单元** $B \times t$**,**B **表示约束方钢管的边长,**t **表示外包方钢管壁厚。**

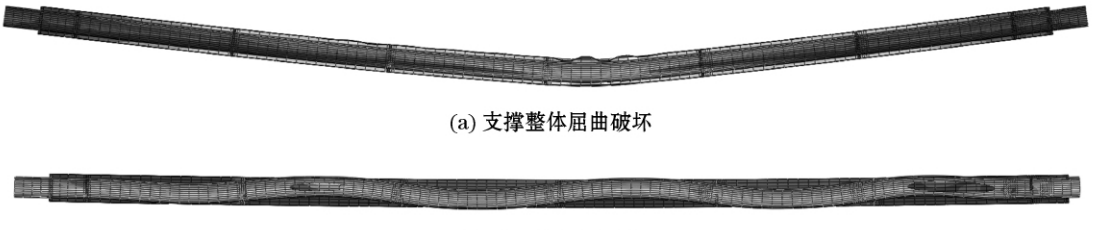


(a) A1–A7 (b) B1–B7

(c) C1–C7 (d) D1–D7

图 5 支撑荷载位移曲线

Fig. 5 Load – displacement curves of braces



(a) 支撑整体屈曲破坏

(b) 支撑高阶屈破坏

图 6 支撑破坏形式

Fig. 6 Failure mode of braces

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

若支撑的约束系数过小，支撑会在较小的应变时发生整体屈曲，支撑的承载力开始下降，延性能力也大大降低; 随着约束系数的增大，支撑的变形能力提高，延性系数增加; 当约束系数大于某一数值($\lambda > 1.3$) 后，可保证支撑在设计变形范围内不发生屈曲，延性达到设计最大延性。考虑到构件加工制作和设计安装过程中的误差和留有一定安全冗余度，建议约束系数限值取为 2.0。

与常规 BRB 相比，PBRB 具有更好的变形能力。一方面，PBRB 通过核心单元屈服段的轴向屈服应变获得变形能力; 另一方面，钢管之间的空隙为核心单元提供了相对较大的有限横向变形空间，且核心单元在每个节间均可发生横向变形，大大提高了 PBRB 的变形能力。

4　结论

根据对 PBRB 的有限元分析可以得出以下结论:

(1) 基于常见的普通材料，提出一种新型 PBRB。与常规 BRB 相比，新型 PBRB 具有取材广泛、加工制造简单及成本低廉等优势。

(2) 由于 PBRB 核心单元与约束单元之间缝隙较大，增大了约束单元的回转半径，约束系数 λ 相应较大。PBRB 受力过程中，各垫环同时对核心单元形成约束作用，约束系数 $\lambda < 1.0$ 时，核心单元亦能达到全截面屈服。

(3) PBRB 核心单元局部屈曲所引起的承载力下降与钢材强化所引起的承载力提高大体相当，支撑屈服后承载力基本保持在核心钢管屈服段的屈服荷载 F_y 附近，无强化上升段，降低了对约束单元的要求，符合“保险丝”构件的要求。

(4) 约束系数 $\lambda > 1.3$ 时，约束单元能有效约束核心单元侧向变形，PBRB 不发生整体屈曲，延性系数大于 6。与常规 BRB 相比，PBRB 具有更好的变形能力。

参考文献

[1] 汪家铭，中岛正爱，陆烨(译) . 屈曲约束支撑体系的应用与研究进展(Ⅰ) [J] . 建筑钢结构进展，2005，7(1) : 1 – 12.
UANG Chia – ming，NAKASHIMA Masayoshi，LU Ye(Translate) . The Practice and Research Development of Buckling – restrained braced frames (Ⅰ) [J] . Progress in Steel Building Structures，2005，7(1) : 1 – 12.

[2] 汪家铭，中岛正爱，陆烨. 屈曲约束支撑体系的应用与研究进展(Ⅱ) [J] . 建筑钢结构进展，2005，7(2) : 1 – 11.
UANG Chia – ming，NAKASHIMA Masayoshi，LU Ye(Translate) . The Practice and Research Development of Buckling – restrained braced frames (Ⅱ) [J] . Progress in Steel Building Structures，2005，7(2) : 1 – 11.

[3] 周云. 防屈曲耗能支撑结构设计与应用 [M] . 北京: 中国建筑工业出版社，2007: 12 – 15.
ZHOU Yun. Design & Application of Structure with Buckling – restrained Brace [M] . Beijing: China Architecture & Building Press，2007: 12 – 15.

[4] 袁钰，吴京. 屈曲约束支撑框架 Pushover 分析的加载模式研究 [J] . 世界地震工程，2010，26(2) : 207 – 211.
YUAN Yu，WU Jing. Research on the lateral load pattern of Pushover analysis for a buckling restrained braced frame [J] . World Earthquake Engineering，2010，26(2) : 207 – 211.

[5] Kalyanaraman，V. ，Sridhara，B. N. ，Mahalevan，K. Sleeved column system [A] . Proceedings，SSRC Task Group Meetings and Task Force Sessions [C]: Lehigh University，Bethlehem，PA，1994.

[6] Prasad，B. Experimental investigation of sleeved column [A] . Proceedings，33rd Structural Dynamics and Materials Conference [C]: American Institute of Aeronautics and Astronautics，Dallas，1992.

[7] 罗开海，孔祥雄，程绍革. 一种新型屈曲约束支撑的研制与试验研究 [J] . 建筑结构，2010，40(10) : 1 – 6.
Luo Kaihai，Kong Xiangxiong，Cheng Shaoge. Invention and experimental study on a new type of buckling – restrained brace. Building Structure，2010，40(10) : 1 – 6.

[8] 贾明明，张素梅，吕大刚. 防屈曲支撑稳定及延性性能分析 [J] . 建筑结构学报，2010，S(2) : 76 – 81.
JIA Mingming，ZHANG Sumei，Lu Dagang. Stability behavior and ductility performance analysis of buckling – restrained braces [J] . Journal of Building Structures，2010，S(2) : 76 – 81.

[9] 申波，邓长根. 双钢管构件由点接触到线接触的连续过渡 [J] . 工程力学，2007，24(2) : 154 – 160.
SHEN Bo，DENG Chang – gen. Continuous transition from point contact to line contact between the axially compressed inner core and the flexible sleeve in a Sleeved Column [J] . Engineering Mechanics，2007，24(2) : 154 – 160.

[10] 陈绍蕃. 钢结构设计原理 [M] . 第三版. 北京: 科学出版社，2005.
CHEN Shaofan. Principles of Steel Structure Design(3nd Edition) [M] . Beijing: Science Press，2005.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[11] 韩林海. 钢管混凝土结构:理论与实践 [M]. 北京:科学出版社,2004.
HAN Linhai. Concrete – Filled Steel Tube Structure: Theory and Practice [M]. Beijing: Science Press,2004.
[12] 刘建彬. 防屈曲支撑及防屈曲支撑钢框架设计理论研究 [D]. 北京:清华大学,2005.
LIU Jianbin. Research on the Design Theory of Buckling – Restrained Braces and Buckling – Restrained Braced Frames [D]. Beijing: Tsinghua University,2005.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net