

陈剑波,完海鹰.建筑抗震构件中屈曲约束支撑结构研究新进展[J].地震工程学报,2020,42(5):1289-1302.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.05.1289
CHEN Jianbo,WAN Haiying.Recent Progress in Buckling-Restrained Brace Structures as Seismic Components of Buildings[J].China Earthquake Engineering Journal,2020,42(5):1289-1302.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.05.1289

建筑抗震构件中屈曲约束支撑结构研究新进展

陈剑波¹, 完海鹰²

(1. 南京交通职业技术学院, 江苏 南京 211188; 2. 合肥工业大学, 安徽 合肥 230009)

摘要: 详细介绍了近年来中国学者在屈曲约束支撑研究方面取得的成果,着重讨论了屈曲约束支撑构件(核心单元、约束机构、无黏结构造层)和整体抗震性能以及设计方法的研究现状。结果表明:屈曲约束支撑以其良好的耗能性能具有很好的发展潜力,屈曲约束支撑的适用范围不断拓展,结构形式更趋多样化,设计方法不断优化。

关键词: 建筑抗震构件; 屈曲约束支撑; 研究; 新进展

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2020)05-1289-14

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.05.1289

Recent Progress in Buckling-Restrained Brace Structures as Seismic Components of Buildings

CHEN Jianbo¹, WAN Haiying²

(1. Nanjing Vocational Institute of Transport Technology, Nanjing 211188, Jiangsu, China;

2. Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China)

Abstract: This paper introduces the research results of buckling-restrained braces (BRBs) in recent years in China and focuses on the research status of BRB members (core element, restraint mechanism, cohesionless layer), overall seismic performance, and design methods. Based on the review, the following is concluded: the BRB has a good development potential because of its good energy-dissipation performance; the application scope of the BRB is expanding; the structural forms are becoming more diversified; and the design methods are constantly being optimized.

Keywords: seismic components; buckling-restrained brace; research; new progress

0 引言

根据《建筑消能减震技术规程》(JGJ297-2013),屈曲约束支撑(buckling-restrained brace)是由核心单元、外约束单元等组成,利用核心单元产生弹塑性

滞回变形耗散能量的减震装置。屈曲约束支撑的横向构成分为核心钢支撑、无黏结构造层、屈曲约束机构(约束单元)3个部分,纵向构成指核心钢支撑的组成,分为工作段、过渡段、连接段3个部分。近几年,屈曲约束支撑的科学研究和工程应用成为建筑

收稿日期: 2020-05-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(71704046);江苏高校“青蓝工程”资助项目(2019-2022);2018年度江苏省高等学校自然科学研究面上项目(18KJB560010)

第一作者简介: 陈剑波(1979—),男,广西玉林人,硕士,副教授,研究方向:建筑结构设计、建筑施工。E-mail: chenjianbo198208@163.com。

通信作者: 完海鹰(1960—),男,满族,安徽合肥人,教授,研究领域:混凝土结构、钢结构研究与设计。

消能减震技术的热点,围绕屈曲约束支撑的结构性能和设计方法,屈曲约束支撑的研究取得了丰富的成果。

1 屈曲约束支撑抗震性能研究

1.1 核心单元

核心钢支撑又称芯材或核心受力单元,是屈曲约束支撑中主要受力元件,由特定强度的钢材制成,一般采用低强度钢材。常见的截面形式为H形、十字形、T形、双T形、一字形或管形,分别适用于不同的刚度要求和耗能需求。

1.1.1 H型芯材

杜雷等^[1]研究了无约束段对工字形内芯屈曲约束支撑滞回耗能性能的影响。利用ABAQUS模拟分析拉压不均匀系数 β 、滞回耗能 $\text{MN} \cdot \text{mm}$ 、等效黏滞阻尼系数 ζ 和耗能比 ψ ,结果显示:无约束段长度对BRB构件滞回耗能性能及承载力影响显著。

1.1.2 十字型芯材

杨璐等^[2]提出一种新型软钢LY315芯材的全钢型装配式屈曲约束支撑,外部约束机构由四角钢和高强螺栓拼接而成;芯材由LY315主芯板和两侧副芯板焊接成十字形对称截面,板厚14 mm;无黏接结构层为黏贴在内核LY315钢板上的2 mm厚硅胶。通过拉压往复加载试验,分析了其破坏特征、滞回曲线、等效黏性阻尼比、累积塑性变形能力、疲劳性能。试验结果表明:此种BRB具有良好的耗能性能、塑性变形能力、疲劳性能。

吴京等^[3]提出角钢胶接十字形截面芯材的屈曲约束支撑,芯材为4根用黏钢胶胶接的水刀成型角钢肢背相靠成十字形截面,通过拟静力试验分析滞回曲线、累积塑性变形、拉压不平衡系数、等效黏滞阻尼比 ξ_{eq} ,结果表明:此种BRB具有良好的耗能、塑性、疲劳性能。

1.1.3 一型芯材

周云等^[4]通过低周反复试验研究了一字型钢板装配式屈曲约束支撑(steel-plate assembled buckling restrained braces,简称SPA-BRB)的抗震性能。设计不同构造的SPA-BRB:有无黏结材料;不同约束比;不同核心单元耗能段截面面积。结果表明: ξ_{eq} 曲线呈现两阶段双线性特征,有较强的抗疲劳能力;BRB延性系数 $\mu_{max} > 13$,累积塑性变形 $CPD > 1\ 200$ 。

龚晨等^[5]采用ABAQUS研究一字型装配式开

孔钢板屈曲约束支撑(perforated steel plates buckling restrained brace,PBRB)的核心单元开孔段截面与未开孔区域横截面面积比、开孔段长宽比、孔间区长度与开孔宽度比、开孔数量等参数。建议PBRB的开孔参数:面积比0.3~0.6;长宽比0~10;孔间区长度与开孔宽度比1~1.5。

周云等^[6]研究了PBRB的设计方法和流程,包括:明确目标、确定参数、力学计算和稳定验算、端部构造等4步,并用拟静力试验进行了验证。

田时雨等^[7]在单/双核心钢板装配式屈曲约束支撑(S/DBRB)基础上,提出开孔双核心钢板装配式屈曲约束支撑(Perforated double-core steel plate assembled buckling-restrained brace,简称PD-BRB),用高强螺栓将两个相同的开孔核心板、内外约束板、垫板等连成一体,采用ABAQUS软件对比研究了SBRB、DBRB和PDBRB。

贾良玖等^[8]通过拟静力试验研究了芯材开类椭圆形孔的全钢屈曲约束支撑。该支撑通过螺栓将开孔平板芯材、填充板及盖板连接。结果表明:PBRB具有优良耗能能力,芯材变形为压剪弯组合型,PBRB性能的关键参数是芯材“短柱”长细比,提出了PBRB初始刚度公式。

陈洪剑等^[9]利用ABAQUS研究了一种双屈服点一字形全钢屈曲约束支撑。该种BRB的核心单元由两块一字形低屈服点钢LY100和一块一字形高屈服点钢SN490叠合成,约束机构采用双腹板焊接工字钢,无黏结构造层为薄橡胶。渐增位移循环加载模拟结论:该种BRB充分利用LY100小位移下的屈服耗能和SN4900较高的承载力的优点。

史庆轩等^[10]对一种低屈服点一字型全钢装配式屈曲约束支撑抗震性能进行了试验研究和ABAQUS数值模拟。该种支撑芯材为Q195低屈服点钢,约束构件为Q345T型钢板。结果表明:金属双线性随动硬化有限元模型适用于支撑分析,间厚比(间隙与芯材厚度的比值)的临界值为1 mm,荷载上升随着宽厚比增大趋于平缓,Q195滞回性能优于Q235B。

陈志华等^[11]利用循环往复荷载拟静力试验研究局部低强屈曲约束支撑(local steel strength weakened buckling-restrained brace,简称LSW-BRB)构造。该种支撑内芯采用陶瓷加热器和智能温度控制箱等设备对中间段的区域进行超高温缓慢冷却热处理,热处理区域上下两侧用陶瓷加热器包

裹。结果表明:LSW-BRB 延性及抗低周疲劳性能优良,破坏模式和耗能能力与约束机构强度和刚度有关。

郭亚楠等^[12]利用低周往复加载试验研究了两种新型全钢多段连接屈曲约束支撑(multi-connection buckling restrained brace,简称 MC-BRB)。MC-BRB 核心单元为多段一字形钢芯,约束机构采用 4 个由连接板焊接为一体的钢管。一种 MC-BRB 在钢芯两侧增加竖向板称为内接约束 MC-BRB。另一种称为外接约束 MC-BRB。内接 MC-BRB 抗震性能良好。

李帼昌等^[13]利用 ABAQUS 研究了铝合金内芯装配式屈曲约束支撑(ALB)的抗震性能。ALB 是由高强螺栓连接一字形 A5083 铝合金核心板、槽形约束板、矩形间隙垫板组成。影响因素包括:集中耗能因子 YLR、宽厚比、螺栓间距、核心板与约束板间间隙。

李帼昌等^[14]用 ABAQUS 研究种铝合金开孔一字型内芯屈曲约束支撑(PALB)。得出结论:长条形孔较好,横向开双排孔、开孔率小较好,纵向开孔数 5~9、纵向开孔率 20%~50%较好。

1.1.1.4 双 T 形芯材

周鹏等^[15]利用 ABAQUS 研究双室箱形屈曲约束支撑(Double Chamber Box Buckling-Restrained Brace,简称 DCB-BRB)(双 T 形芯材 Q235,方钢管 Q345)的组成参数。得出结论:间隙值不小于内核截面边长 1/250,取值为 1~3 mm;连接段长细比小于 32,宽厚比为 5~28 mm;设置无黏结层(环氧树脂)降低拉压承载力不平衡。

1.1.1.5 钢管芯材

沈小璞等^[16]利用 ABAQUS 对全钢管套管(tube in tube, Tin-T)BRB 进行低周往复循环加载模拟分析。模拟结果表明: Tin-TBRB 的抗震性能指标均优于传统单管支撑,开孔率和内管厚度对 Tin-TBRB 的抗震性能的影响不明显。

王永贵等^[17]利用 ANSYS 对端部加强型双重钢管(End-enhanced Double-steel Tube)BRB 进行研究,核心钢管为一根整钢管,端部内设补强管。对约束钢管约束比、间厚比、内核钢管管径厚比进行了分析。

肖邵文等^[18]采用 ABAQUS 提出了三重钢管屈曲约束支撑(three-tube buckling restrained brace,简称 TTBRB)中屈曲约束套管的设计方法。TT-

BRB 包括中间层的芯材钢管、芯材钢管外侧和内侧的屈曲约束套管。芯材钢管与内外套管之间设置超高分子聚乙烯减摩层。

高庆水等^[19]采用 ABAQUS 研究了环向预应力三重钢管屈曲约束支撑 TTBRB。芯材为低屈服点钢 Q160,内外套管钢为 Q235,与 TREMBLAY 试验结果对比。研究了不同间隙(0 mm, 5 mm)、不同环向预应力(0、-125 MPa、135 MPa)的滞回性能。

1.1.1.6 钢棒芯材

吴志平等^[20]通过足尺低周往复加载试验和 ABAQUS 研究了钢棒屈曲约束支撑(steel bar buckling restrained brace 简称 SBBRB)。SBBRB 的核心单元为 Q235 钢棒,约束机构采用 Q345B 钢管套筒。结果显示:SBBRB 具有较好的延性以及稳定的累积滞回耗能特性;钢套管提高了 SBBRB 受压力极限承载力。

1.2 约束机构

郭彦林等^[21]对四角钢组合约束型承载屈曲约束支撑(four-angle assembled BRB,简称 FABRB)进行了轴压试验和 ABAQUS 模拟研究。结果显示:轴压循环荷载作用下,约束比 ζ 是 FABRB 承载力与骨架曲线的决定因素, ζ 与角钢刚度、螺栓连接强度及其纵向分布间距有关;考虑端部内核附加偏心距使支撑承载力设计的理论公式更可靠。

郭彦林等^[22]运用 ANSYS 对预应力索撑型屈曲约束支撑(pre-tensioned cable stayed BRB,简称 PCS-BRB)进行了分析。PCS-BRB 按横隔分为单/双/多横隔型,按撑杆分为二/三/多撑杆型,撑杆与约束机构的连接有铰接和刚接。结果表明:PCS-BRB 提高约束机构的约束能力,关键因素在于索撑体系的几何参数、主索的初始预张力取值和支撑端部构造设计。

吴继丰等^[23]利用低周往复试验研究螺旋箍筋约束屈曲约束支撑(spiral reinforcement buckling restrained brace,简称 SR-BRB)构造要素。结果表明:SR-BRB 耗能性能良好,能提供不少于 30% 以上的附加阻尼比,且与变形幅值成正比,十字形钢芯截面更适合 SR-BRB。

吕磊等^[24]进行了圆钢管约束屈曲约束支撑(steel pipe constraint buckling restrained brace,简称 SPC-BRB)拟静力试验。结果表明:外约束 SPC-BRB 滞回性能良好,同类型截面构件的承载力和初始割线刚度与核心单元截面面积成正比。

霍林生等^[25]进行了铝管约束屈曲约束支撑(aluminum tubes restrained buckling restrained brace,简称 ATR-BRB)的拉压往复试验研究。ATR-BRB 由 Q235 核心钢管和外约束 7075 铝合金圆管嵌套而成。结果表明:ATR-BRB 耗能效果良好;适用于轻型结构;开孔可使核心钢管提前屈服;间隙宜控制在 1 mm 左右。

丁婷等^[26]通过 ANSYS 研究加劲管约束屈曲约束支撑(stiffening tube BRB,简称 ST-BRB)。ST-BRB 核心单元为 BLY160 一字型芯材,约束为矩形外套钢管内壁焊接横向和纵向加劲管,加劲管内侧与芯材间隙为 1 mm,钢套管和加劲管均为 Q235 钢。结果表明:横向 ST-BRB 的受力性能劣于纵向 ST-BRB;纵向 ST-BRB 具有良好的耗能能力。

朱博莉等^[27]利用反复加载试验和 ANSYS 模拟研究波浪腹板连接双内核屈曲约束支撑(简称 CW-BRB)。CW-BRB 是用单个(SCW)或两个波浪腹板(DCW)连接两个矩形钢管约束一字型内核的分离式屈曲约束支撑。结果表明:随着约束比 ξ 的增大,构件破坏具有三种模式。

蒋海燕等^[28]通过低周反复加载试验研究了碳纤维布增强钢-木屈曲约束支撑(Steel-wood buckling-restrained brace,简称 SW-BRB)的抗震性能。SW-BRB 由用碳纤维布包裹的两块独立的胶合木块包裹核心钢板组成。结果表明:工程设计中可以采用支撑约束比的设计方法和假定核心钢板局部屈曲的碳纤维布间距和层数计算方法。

1.3 组合式屈曲约束支撑

组合理念在减震技术中应用广泛,特别是摩擦阻尼器^[29]。这种理念也非常适合 BRB。

韩强等^[30]用拟静力试验研究内嵌碟簧型自复位屈曲约束支撑(disc spring self-centering BRB,简称 DS-SCBRB),DS-SCBRB 包括两部分:一字型屈曲约束支撑(BRB)和自复位系统(SC)。SC 系统包括内套管、挡块、挡板、组合碟簧、外套管,组合碟簧分两段布置。结果表明,DS-SCBRB 综合了 BRB 和 SCB 的优点。

张会等^[31]利用 Opensees 研究串联双筋自复位屈曲约束支撑(ST-SCBRB)。采用串联两组预应力钢绞线形成自复位系统。串联双筋自复位系统包括内、中、外 3 个套筒和两束预应力钢绞线以及两组锚板。核心板面积、预应力筋面积、初始张拉力是三个

影响因素。

张爱林等^[32]利用 ABAQUS 研究了 H 型钢预应力自复位屈曲约束支撑(H-section steel prestressed SCBRB,简称 HSPS-SCBRB),包括 H 型钢屈曲约束支撑(HBRB)和自复位系统(SC),SC 采用 Q345 钢绞线预应力索锚固于左右端板。

王海深等^[33]利用拟静力试验研究了三套管自复位屈曲约束支撑(three steel tubes SCBRB,简称 TST-SCBRB)的滞回性能,采用 ABAQUS 对支撑滞回性能进行了参数分析,建立了 TST-SCBRB 的刚度和承载力计算公式。

1.4 屈曲约束支撑性能参数

王永贵等^[34]利用拟静力加载试验研究 7 个不同连接方式及构造方式的 BRB 试件滞回性能。连接方式为螺栓和铰接,芯材截面为“十”字形、“T”形及“一”字形,芯材制作方式为端部焊接型及中部切削型,焊接长度为沿芯材纵向全长及仅在工作段。结果表明:滞回性能影响因素为芯材材料、芯材宽厚比、间隙与芯材厚度比值。

陈凌秀等^[35]利用拟合公式和 ANSYS 进行 BRB 参数分析,结果表明:屈服消能时机,BRB 屈服前与 μ_c (BRB 核心段长度与两工作点间总长的比值)和转换段与核心段面积比有关,BRB 屈服后与 μ_c 对应变的影响有关; μ_c 减小,BRB 耗能增大; μ_c 取值为 0.3~0.7。

陈可鹏等^[36]利用等幅/变幅疲劳试验研究 TJ 型 BRB 的低周疲劳性能。应变幅、钢材种类、耗能段截面形式(残余应力)等是影响 TJBRB 低周疲劳性能的主要因素,等幅加载的容许疲劳寿命曲线采用 95%保证率的疲劳寿命曲线,变幅疲劳的 BRB 损伤评估使用 95%保证率的损伤容许因子,罕遇地震作用下 BRB 变幅损伤计算用雨流计数法统计 BRB 的封闭滞回环。

刘玲华等^[37]以一高烈度区 6 层钢筋混凝土框架为例,采用 SAP2000 建立模型,选取屈曲约束支撑的屈服力、屈服位移、初始刚度、屈服后刚度比为参数,进行动力弹塑性分析,对 BRB 的布置位置及其性能参数进行对比分析。

王忠平等^[38]基于双线性模型提出了一种对屈曲约束支撑试验方法和标准化参数识别的数据处理分析方法。采用直接加载测量法进行标准化的屈曲约束支撑试验,按照屈服前和屈服后进行屈曲约束支撑参数识别。

2 屈曲约束支撑框架结构抗震性能

2.1 屈曲约束支撑框架

冯玉龙等^[39]采用 OpenSees 研究了部分 BRBF 率先屈服后屈曲约束支撑框架(BRBF)的损伤机制。提出基于柱端弯矩比的框架强柱弱梁计算公式,给出了 BRBF 弯矩分布规律,进行了数值模拟验证。结果说明 BRB 屈服后易呈现柱铰机制。

2.2 屈曲约束支撑钢框(桁)架

张国伟等^[40]利用拟静力试验和 OpenSees 研究摇摆屈曲约束支撑钢框架(Rocking Buckling-restrained Braced Steel Frame,简称 RBRBSF)抗震性能。试验模型为一层一跨的两榀 RBRBSF 和两榀 BRBSF。RBRBSF 摇摆柱脚形式不同,一个是在柱底板与地梁连接螺栓杆上设置弹簧,另一个是在前一个基础上增摩擦阻尼器。摇摆柱脚可减轻钢框架损伤风险。

杨晓燕等^[41]利用拟动力试验和拟静力试验研究了底部带屈曲约束支撑的摇摆桁架(hinged truss with BRBs at base,简称 HTBB)的抗震性能。原型结构为五层钢结构,试验模型为下部三层 1 : 3 缩尺模型。摇摆柱脚可减轻钢桁架损伤风险。

林纯等^[42]研究了数值子结构方法在 BRBSF 地震响应分析中的应用。以中日建筑结构技术交流会上高层钢结构核心筒模型为原模型,用耗能型 BRB 替换原模型中位移最大一层中的钢支撑,并作为数值子结构,主结构采用线弹性分析。验证了数值子结构方法的高效性。

周云等^[43]利用拟静力试验研究了开孔钢板装配式屈曲约束支撑钢框架(PBRBSF)的抗震性能。制作了两个相同的单层单跨单斜式 PBRBSF,一个考虑框架平面外变形。结果表明:框架平面外变形 10 mm 对 PBRBSF 平面内抗震性能、BRB 轴向变形影响可以忽略。

杨澄宇等^[44]研究了混合试验方法在自复位屈曲约束支撑钢框架(SC-BRBSF)地震响应分析中的应用。利用 adapter 单元将 OpenSees 中的 master program(数值子结构)和 slave program(试验子结构)耦合构建虚拟混合试验系统。

朱凯铭等^[45]采用峰值层间位移角(peak drift, PD)和残余峰值层间位移角(residual drift, RD)利用联合概率密度函数对 BRBSF 结构进行地震易损性分析;使用 OpenSees 对 BRBSF 结构进行增量动

力分析。结果表明:主余震作用下 BRBSF 结构的抗倒塌能力随着地震作用的增加而降低,BRBSF 结构的 RD 对结构易损性影响比较大。

谢钦等^[46]采用等强和等核心板面积设计抗弯和铰接 SC-BRBSF,采用 OpenSees 进行非线性分析,结果表明:铰接 SC-BRBSF 结构自复位效果更好,等强设计和等核心板面积设计相比:前者结构层加速度和支撑轴力小,后者层间位移角的控制比较好。

张会等^[47]利用 OpenSees 研究预应力钢绞线作为自复位筋材的全钢串联双筋自复位屈曲约束支撑钢框架(All-Steel SCBRBSF,ST-SCBRBSF)结构在双向地震作用下的抗震性能。结果表明:ST-SCBRBSF 最大位移响应小,楼层加速度和剪力增大,支撑承担大部分增加的剪力。

尹丽丹等^[48]运用 SAP2000 分析钢框架结构、BRBSF 和黏弹性复合屈曲约束支撑框架结构(viscous-elastic compound BRBSF,简称 VE-BRBSF)的抗震、抗风性能。结果表明:罕遇地震下 VE-BRBSF 结构呈现更小的基底剪力和顶层加速度,但层间位移角有所增大;在强风作用下,VE-BRBSF 结构顶层加速度、顶层位移及层间位移最小。

王永贵等^[49]利用 SAP2000 研究了抗侧刚度比和支撑布置方式对 BRBSF 抗震性能的影响。结果表明:抗侧刚度比增大,基底剪力和支撑轴力增大,结构层间位移角和顶点水平位移变小;倒 V 型布置抗震性能优良;抗侧刚度对结构抗震性能的影响比支撑布置方式显著。

曹邕生等^[50]使用分析程序 Clap.f 对不同 BRB 水平力分担率 β 的高层 BRBSF 结构抗震性能进行了研究。建议将高层 BRBSF 结构中 BRB 的 β 设计为 30%~40%。

李帼昌等^[51]采用 ABAQUS 对外置 K 形 BRBSF 结构抗震性能进行了研究,结果表明:支撑长细比大于 >110 时,优先采用 BRB;支撑长细比 <80 时,优先采用普通支撑。

2.3 屈曲约束支撑(预制)钢筋混凝土框架(BRB-R/PCF)

宁西占等^[52]研究了在线数值模拟方法在 BRB-RCF 结构中的应用。结果表明:在线数值模拟方法弱化了边界条件,提高了模拟精度;隐性卡尔曼滤波器(UKF)方法具有较高的精度和计算效率。

王静峰等^[53]通过低周反复荷载试验对 3 榀

BRB-PCF 和 1 榀现浇混凝土框架的抗震性能进行了研究。建议选取整体式和暗牛腿式梁柱连接节点方式。

乔金丽等^[54]进行了水平往复加载下 BRB-RCF 抗震性能试验和 ANSYS 研究。试验模型为两跨三层,其中一榀安装“人”字型 BRB。进行了滞回曲线与耗能分析、钢筋与屈曲约束支撑应力分析、混凝土分析。

乔金丽等^[55]进行了屈曲约束支撑钢筋混凝土异形柱框架抗震性能的拟静力试验研究。试验原型为六层异形柱框架结构,试验模型按 1:3 取原结构底部三层两跨平面框架,等肢异形柱。共两榀,其中一榀设置“人”字型 BRB。

李嘉奇等^[56]利用拟静力试验研究了一榀两层三跨 H 型钢锚固型连接节点的人字形屈曲约束支撑混凝土框架(BRBRCF)的抗震性能,利用 ABAQUS 进行模拟分析。轴压比对 BRBCF 影响较小,芯材截面积对框架抗震性能的影响较大。

岳焱超等^[57]通过静力试验和 ANSYS 模型研究了屈曲约束支撑钢筋混凝土框架的弹性层间位移角,提出了基于比较分析法的标记层间位移角概念和计算公式。

白久林等^[58]采用 OpenSEES 研究了近断层脉冲型地震作用下 BRB-RCF 结构的抗震性能。结果表明:近断层脉冲型地震动比非脉冲型地震动对结构产生更大的地震响应,且响应显著集中于速度脉冲时刻;BRB 能提高 RC 框架结构体系的抗震性能。

谢钦等^[59]利用 Perform-3D 有限元软件研究了研究了刚度比 k 对屈曲约束支撑装配式混凝土框架(BRB-PCF)抗震性能的影响。 K 为预制装配式混凝土框架 PCF 与 BRB 的抗侧刚度比。结果表明:屈曲约束支撑装配式混凝土框架的合理刚度比范围为 $k \leq 1.5$ 。

2.4 屈曲约束支撑钢管混凝土框架(concrete-filled steel tubular frames BRB, BRB-CFSTF)

王波等^[60]利用水平低周反复荷载试验研究了单边螺栓端板连接 BRB-CFSTF 的抗震性能。一榀采用方钢管混凝土框架(square CFSTF),一榀采用圆钢管混凝土框架(circular CFSTF)。结果表明:BRB-SCFSTF 的水平承载力和初始抗侧刚度要大,延性和耗能能力要小。

于敬海等^[61]通过拟静力试验和 ABAQUS 研究了方钢管混凝土组合异形柱(SCFST 柱)屈曲约束

支撑框架的抗震性能。结果表明:SCFST 柱屈曲约束支撑框架的抗震性能优良,滞回曲线饱满,骨架曲线为 S 形,强度和刚度退化不显著,BRB 耗能能力强。

刘杨等^[62]采用 OpenSees 软件研究了风与地震耦合作用下 BRB-CFSTF 结构体系的易损性。结果表明:风作用变化与结构的反应和易损性成同向趋势;地震动强度变化与风作用对结构易损性的影响成反向趋势。

2.5 屈曲约束支撑板柱结构(slab-column structure BRB, 简称 BRB-SC)

薛彦涛等^[63]利用拟静力试验和 ABAQUS 研究了人字形 SC-BRB 抗震性能。结果表明:人字形屈曲约束支撑提高了板柱结构的抗震性能。

2.6 屈曲约束支撑框架-核心筒混合结构(Frame-Core Tube BRB, 简称 BRB-FCT)

李帼昌等^[64]采用 Midas Building 进行屈曲约束支撑框架-核心筒混合结构建模,通过模型的反应谱分析和弹塑性分析得出结论:合理布置屈曲约束支撑屈,可以使曲约束支撑能够和框架-核心筒结构良好的协同工作。

2.7 屈曲约束支撑增强胶合木框架(glulam timber frame BRB, 简称 BRB-GTF)

吴亚杰等^[65]通过水平低周反复荷载试验研究了 BRB-GTF 的抗侧性能。结果表明:屈曲约束支撑增强木框架在增强木框架的抗侧刚度、最大抗侧承载力侧向力、延性系数和总耗能方面优势明显。

2.8 BRB 框架节点

宋永丰等^[66]设计了一种屈曲约束支撑与混凝土框架连接的 T 型钢锚固型连接节点,建立两榀 1:3 两层三跨 RCF 模型,其中一榀设置 BRB,利用 ABAQUS 建立数值模型。结果表明:新型 T 型钢锚固型连接节点能有效提高 BRB 的抗震性能。

赵俊贤等^[67]提出了一种滑移连接节点板(节点板与梁柱之间设置低摩擦材料)形式,减弱节点板与钢框架梁柱之间的开合效应。采用拟静力试验和 ABAQUS 进行了分析,结果表明:滑移连接节点显著提高了 RC-BRBF 的抗震性能。

高祥等^[68]对一个 T 型钢锚固型节点的 BRB-RCF 进行了 OpenSees 模拟和拟静力试验,BRB 倒 V 型布置。利用 OpenSEES 和 ABAQUS 分析一个中间跨布置人字形支撑 BRB-RCF 拟,结果表明:考虑节点效应的支撑框架能够提高模拟精度和真实反

映结构的地震反应。

钟根全等^[69]利用平面内拟静力试验分析了 5 种钢筋混凝土框架在双向地震作用下的抗震性能,结果表明:框架平面外变形减小 BRB-RCF 平面内初始水平刚度和承载力,增大 BRB 和节点板平面外变形量;节点板面外刚度提高增加了框架节点平面外作用力;BRB 面外刚度增加减小了自身平面外变形和对框架平面外作用力。

王静峰等^[70]利用水平低周往复荷载试验研究 BRBSF 连接节点板的抗震性能。节点试件分别采用销轴、螺栓、焊接和混合连接。结果表明:两端销轴连接提高框架极限承载力、改善平面外稳定性,耗能能力最好,两端螺栓连接提供较大抗侧刚度、耗能能力差。

侯和涛等^[71]利用往复加载试验研究了具有柔性梁柱节点的 BRB-PCF 的抗震性能。该干式柔性节点包括混凝土柱内预埋钢梁、混凝土梁端预埋钢板和连接板。结果表明:节点刚度及承载力受混凝土楼板影响很大;螺栓孔形式影响节点破坏模式;节点变形能力良好。

郝贵强等^[72]采用 ABAQUS 研究滑移连接节点板(节点板与梁柱之间设置低摩擦材料)抗震性能。结果表明:滑移连接节点显著提高 RC-BRB 的抗震性能。

朱江等^[73]利用 ABAQUS 研究了 BRB-RCF 一种节点(钢板和焊接在钢板上的栓钉)的抗震性能。结果表明:轴压比对节点的性能基本无影响;节点弹性和弹塑性的关键因素为梁柱线刚度比;梁配筋率对节点承载力、变形性能和破坏形式影响显著。

马传政等^[74]利用 ABAQUS 研究了屈曲约束支撑-方钢管高强混凝土柱-H 型钢梁结构中梁端翼缘削弱型节点的抗震性能。结果表明:BRB 的屈服承载力和极限承载力以及节点的承载能力不受梁端翼缘削弱的影

3 设计方法

白久林等^[75]提出了基于能量平衡的 BRB-RCF 结构抗震塑性设计方法。

潘毅等^[76]提出了基于剪力比的 BRB-RCF 抗震设计方法。

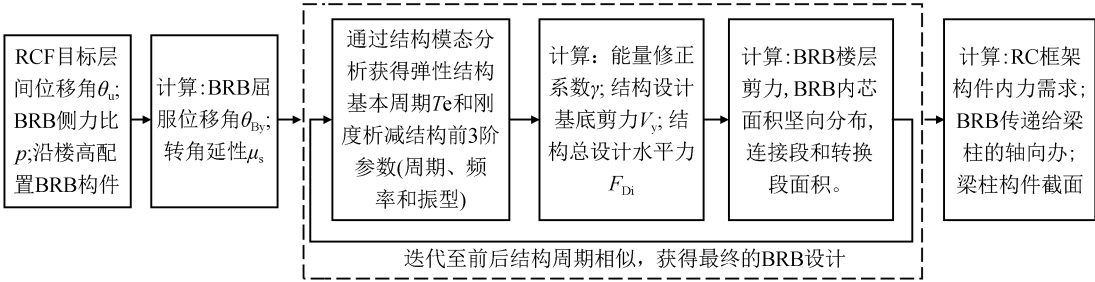


图 1 基于能量平衡的 BRB-RCF 结构抗震塑性设计方法

Fig.1 Seismic plastic design method for BRB-RCF structures based on energy balance

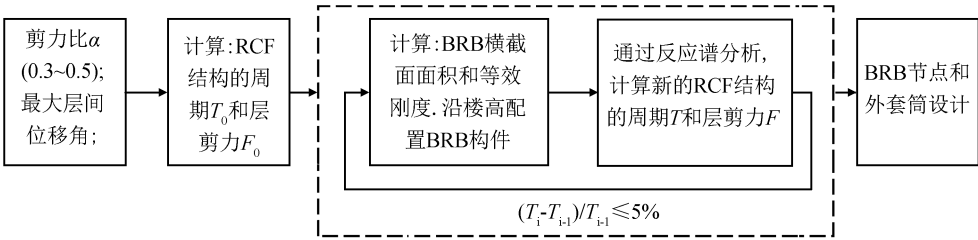


图 2 基于剪力比的 BRB-RCF 抗震设计方法

Fig.2 Seismic design method of BRB-RCF based on shear ratio

王宏伟等^[77]提出了基于抗侧刚度比的 BRB-SF 住宅设计方法。抗侧刚度比 K 为 BRB 初始水平抗侧刚度 K_D 与该层纯框架结构初始水平抗侧刚度 K_F 的比值。该方法分为固定抗侧刚度比和可变抗侧刚度比。其步骤为:钢框架初步设计→纯框架结

构的层间位移角最大值 θ 计算→抗侧刚度比 K 选取→屈曲约束支撑芯板面积→验算屈曲约束支撑钢框架抗震抗风性能→设计外围约束单元和约束机制→罕遇地震下的结构验算。

王宏伟等^[78]研究了变抗侧刚度比方法的 BRB-

CFSTF 优化设计与抗震性能分析。设计优化程序:利用结构的刚度矩阵和质量矩阵进行模态分析→获得结构各阶固有频率及相应固有振型→利用振型组合计算结构层间地震剪力和结构层间位移角。

刘忠华等^[79]研究了基于位移的屈曲约束支撑混凝土框架抗震设计方法,根据利用线性侧移曲线求得的结构屈服基底剪力设计屈曲约束支撑,在罕遇地震下设计结构,以多遇地震结果验算,对设计结果进行 Pushover 分析和动力时程分析。

张家广等^[80]提出屈曲约束支撑加固钢筋混凝土框架(Reinforced Concrete Frames Retrofitted BRB,简称 BRB-RCFR)设计方法:①校核小震下既有 RCF 结构构件的承载力和结构弹性层间变形,满足要求时进行第⑦步;②确定 RCF 各层层间承载力最薄弱柱并在小震下重新设计;③计算总需求 BRB 侧向刚度 k_b ;④校核 BRB-RCFR 柱承载力,不满足则回到第②步;⑤对 BRB-RCFR 弹性层间变形进行验算,不满足则增大 BRB 侧向刚度回到第③步;⑥计算 BRB 屈服侧向位移 u_{by} 和 RCF 层间屈服位移 u_{fy} ,得到参数 C_u 校核;⑦以预测的 BRB-RCFR 各层层间变形能力作为弹塑性层间变形角限值 $[\theta]$;⑧当薄弱层弹塑性层间变形角需求 $\theta \leq [\theta]$ 时,进行⑨;当 $\theta > [\theta]$ 时,增大 BRB 侧向刚度回到第③步;⑨设计 BRB。

刘璐等^[81]对自复位屈曲约束支撑框架结构(SCBRBF)考虑三线性恢复力模型的等强度位移比 C_R 计算公式(即 C_R - R - T 关系)提出了 3 种改进公式。

许国山等^[82]提出了考虑 RC-BRBF 结构中 BRB 对相连柱附加变轴力影响的 RCF 柱设计方法。该方法首先通过等价轴压比指标获得 RC 柱设计轴压比限值;然后通过体系延性水平获得柱位移延性指标。

李小龙等^[83]根据“刚度补偿”思路提出利用结构上部填充墙消除底层结构薄弱层的屈曲约束支撑设计方法,利用 Sap2000 对一个 9 层框架结构对比分析了考虑填充墙影响和有无设置屈曲约束支撑的差别。

赵昕等^[84]提出了一种黏滞阻尼器(VD)与屈曲约束支撑(BRB)混合减振系统设计方法。多遇地震作用下 VD 附加阻尼比→多遇地震 VD 系统设计→结构设防地震分析→VD 设防地震附加阻尼比

→设防地震 BRB 系统设计→主体结构优化。采用 SAP2000 进行了模拟分析。

陈凌秀等^[85]利用解析法建立 BRB 焊接连接节点板刚度计算公式,然后根据框架层间位移与 BRB 轴向变形几何关系,推导出 BRB 核心段应变公式,利用足尺 BRB 框架拟静力试验和框架实体 ANSYS 有限元分析来验证公式的准确性。

张晓亮等^[86]提出了 BRB 抗火设计步骤:根据屈服承载力 N_b 和 BRB 构件长度 L 计算 BRB 内芯截面面积 A 和套管最小截面尺寸;根据套管最小刚度确定钢套管外径宽度 h_1 和内径宽度 h_2 ;实际套管宽度为计算宽度 h_1 的 α 倍;芯材外缘与套筒内壁距离 c_1 的验算。

4 结语

(1) 屈曲约束支撑的芯材朝着超长度、低屈服、自复位的发展方向;外围约束机构朝着装配式化、预应力化、多样式化的方向发展;对于火灾下屈曲约束支撑抗震性能研究开始重视。

(2) 屈曲约束支撑的试验技术、数值模拟和分析方法取得了进一步发展,为屈曲约束支撑的破坏机理研究及优化设计提供了有效的工作条件,推动了不同环境条件下各种屈曲约束支撑的研究进展。不断克服没有成熟的统一数学表达式的研究弱点^[87]。

(3) 屈曲约束支撑的设计方法在原有的基础上,有了一定的思路突破和方法优化,新的设计方法不断涌现,并得到试验验证和工程应用,使得屈曲约束支撑的适用范围不断得到扩展。

参考文献(References)

- [1] 杜雷,陈忠,周若如,等.无约束段对工字形内芯防屈曲支撑滞回耗能性能的影响[J].建筑科学与工程学报,2017,34(1):105-112.
DU Lei, CHEN Zhong, ZHOU Mingru, et al. Influence of Unconstrained Segments on Hysteretic Energy Dissipation Performance of Buckling-restrained Braces with H-section Core [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2017, 34(1):105-112.
- [2] 杨璐,卫璇,施刚,等.LY315 钢屈曲约束支撑耗能性能试验研究[J].工程力学,2019,36(1):200-206.
YANG Lu, WEI Xuan, SHI Gang, et al. Experiment on Energy Dissipation Performance of LY315STEEL Buckling-restrained Braces[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(1):200-206.

- [3] 吴京,洪曼,郭立行.角钢拼接十字形无焊核心的高性能屈曲约束支撑试验研究[J].东南大学学报(自然科学版),2017,47(4):743-750.
- WU Jing, HONG Man, GUO Lihang. Experimental Study on High-performance Welding-free Cruciform-shaped Buckling-restrained Braces with Angle Steel Splicing Core[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2017, 47(4): 743-750.
- [4] 周云,钟根全,陈清祥,等.不同构造钢板装配式屈曲约束支撑性能试验研究[J].土木工程学报,2017,50(12):9-17.
- ZHOU Yun, ZHONG Genquan, CHEN QMGXIANG, et al. Experimental Study on Hysteretic Performance of Steel-plate Assembled Buckling-restrained Braces with Different Constructional Details[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(12): 9-17.
- [5] 龚晨,周云,钟根全,等.开孔参数对装配式开孔钢板屈曲约束支撑性能影响研究[J].建筑结构学报,2018,39(S2):328-335.
- GONG Chen, ZHOU Yun, ZHONG Genquan, et al. Performance of Perforated Steel-plate Assembled Buckling-restrained Brace with Different Perforated Parameters[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(S2): 328-335.
- [6] 周云,龚晨,钟根全,等.开孔钢板装配式屈曲约束支撑设计方法研究[J].土木工程学报,2019,52(12):57-65.
- ZHOU Yun, GONG Chen, ZHONG Genquan, et al. Study on Design Method of Perforated Steel-plate Assembled Buckling-restrained Brace[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(12): 57-65.
- [7] 田时雨,邓雪松,周云,等.开孔双核心钢板装配式屈曲约束支撑性能分析研究[J].建筑科学,2019,35(7):8-13.
- TIAN Shiyu, DENG Xuesong, ZHOU Yun, et al. Analysis Study on Performance of Perforated Double-core Steel Plate Assembled Buckling-restrained Brace[J]. Building Science, 2019, 35(7): 8-13.
- [8] 贾良玖,董洋.受压弯剪型开孔芯材屈曲约束支撑试验[J].湖南大学学报(自然科学版),2019,46(3):66-73.
- JIA Liangjiu, DONG Yang. Experiments on Perforated Buckling Restrained Braces with Bending-shear Deformation under Compression[J]. Journal of Hunan University (Natural Science), 2019, 46(3): 66-73.
- [9] 陈洪剑,王曙光,瞿雨舟,等.双屈服点一字形全钢防屈曲支撑数值模拟分析[J].钢结构,2017,32(2):15-20.
- CHEN Hongjian, WANG Shugang, QU Yuzhou, et al. Numerical Simulation Analysis of Buckling-restrained Brace with Two Yield Points Flat Panel Steel Core[J]. Steel Construction, 2017, 32(2): 15-20.
- [10] 史庆轩,陈坤,田园.全钢装配式屈曲约束支撑有限元分析及试验对比[J].钢结构,2017,32(2):1-6.
- SHI Qingxuan, CHEN Kun, TIAN Yuan. Finite Element Analysis and Experiment Comparison of All-steel Assembled Buckling-restrained Brace[J]. Steel Construction, 2017, 32(2): 1-6.
- [11] 陈志华,黄培华,余玉洁.局部低强防屈曲支撑耗能性能试验研究[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2017,50(B07):59-67.
- CHEN Zhihua, HUANG Peihua, YU Yujie. Energy Dissipation Performance of Local Steel Strength Weakened Buckling-Restrained Brace[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2017, 50(B07): 59-67.
- [12] 郭亚楠,高向宇,凌利改,等.多段连接防屈曲支撑设计及试验研究[J].钢结构,2017,32(7):6-11.
- GUO Yanan GAO Xiangyu LING Ligai WU Shuang. Design and Experimental Study of the Multi-connection Buckling Restrained Brace[J]. Steel Construction, 2017, 32(7): 6-11.
- [13] 李桐昌,张洪恩,杨志坚,等.铝合金内芯装配式屈曲约束支撑有限元分析[J].建筑科学与工程学报,2019,36(2):56-63.
- LI Guochang, ZHANG Hongen, YANG Zhijian, et al. Finite Element Analysis of Aluminum Alloy Core Assembled Buckling-restrained Braces[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2019, 36(2): 56-63.
- [14] 李桐昌,张洪恩,杨志坚,等.核心单元开孔对新型铝合金内芯屈曲约束支撑性能影响分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2019,35(3):402-410.
- LI Guochang, ZHANG Hong'en, YANG Zhijian, et al. Analysis on Performance of New Aluminum Alloy Core Buckling-Restrained Braces under Different Hole Fraction of Core Plate[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2019, 35(3): 402-410.
- [15] 王鹏,范存新,龚恺恺.双室箱形防屈曲支撑构造参数对支撑性能的影响分析[J].工程抗震与加固改造,2018,40(5):88-95.
- ZHOU Peng, FAN Cunxin, GONG Yikai. Influence Analysis of Structural Parameters of the Double Chamber Box Buckling-Restrained Brace on Support Performance[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2018, 40(5): 88-95.
- [16] 沈小璞,胡元超.全钢 Tin-T 防屈曲支撑抗震性能研究[J].建筑钢结构进展,2019,21(4):28-36,85.
- SHEN Xiaopu, HU Yuanchao. Seismic Performance of All-Steel Tin-T Buckling Restrained Brace[J]. Progress in Steel Building Structures, 2019, 21(4): 28-36, 85.
- [17] 王永贵,宋红弟.端部加强型双重钢管屈曲约束支撑影响因素研究[J].地震工程学报,2017,39(6):1142-1149.
- WANG Yonggui, SONG Hongdi. Influencing Factors on End enhanced Double steel Tube Buckling Restrained Braces[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(6): 1142-1149.
- [18] 肖邵文,孙强,胡险峰,等.三重钢管防屈曲支撑中防屈曲套管设计方法研究[J].建筑钢结构进展,2019,21(6):50-61.
- WANG Haishen, PAN Peng, NIE Xin, et al. Hysteretic Behavior of Self-centering Buckling Restrained Braces Using Three Steel Tubes[J]. Progress in Steel Building Structures, 2019, 21(6): 50-61.

- [19] 高庆水,田河,杨毅,等.环向预应力三重钢管防屈曲支撑受力性能研究[J].建筑钢结构进展,2019,21(1):51-60.
GAO Qingshui, TIAN He, YANG Yi, et al. Study on Mechanical Behavior of Three-Tube Buckling Restrained Brace with Circumferential Pre-stress in Core Tube[J]. Progress in Steel Building Structures, 2019, 21(1): 51-60.
- [20] 吴志平,胡大柱,陈欣宇,等.钢管防屈曲支撑受力性能研究[J].建筑结构学报,2020,41(3):163-171.
WU Zhiping, HU Dazhu, CHEN Xinyu, et al. Mechanical Behavior of Steel Bar Buckling Restrained Braces[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(3): 163-171.
- [21] 郭彦林,王小安,朱博莉,等.四角钢组合约束型防屈曲支撑的轴压试验研究[J].土木工程学报,2017,50(4):1-12, 115.
GUO Yanlin, WANG Xiaolan, ZHU Boli, et al. Experimental Study on a Four-angle Assembled Buckling-restrained Brace Subjected to Axial Compressive Load[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(4): 1-12, 115.
- [22] 郭彦林,符鹏鹏,胡正平.预应力索撑型防屈曲支撑在某工程中的应用研究[J].建筑结构,2017,47(8):1-6.
GUO Yanlin, FU pengpeng, HU Zhengping. Application Study on Pre-tensioned Cable Stayed Buckling-restrained Brace in an Engineering[J]. Building Structure, 2017, 47(8): 1-6.
- [23] 吴继丰,陈鹏,张国伟,等.螺旋箍筋约束防屈曲支撑设计方法及滞回性能研究[J].工业建筑,2017,47(3):31-36.
WU Jifeng, CHEN Peng, ZHANG Guowei, et al. Research on Design Method and Hysteretic Behavior of Buckling Restrained Brace Confined with Spiral Reinforcement[J]. Industrial Construction, 2017, 47(3): 31-36.
- [24] 吕磊,陈剑.圆钢管约束型防屈曲支撑抗震性能试验[J].四川建筑科学研究,2017,43(6):72-78.
LYU Lei, CHEN Jian. Experimental Study on Seismic Performance of Buckling restrained Brace with Circular Steel Pipe Constraint[J]. Building Science Research of Sichuan, 2017, 43(6): 72-78.
- [25] 霍林生,何泉,李宏男.铝管约束轻型防屈曲支撑的实验研究[J].地震工程与工程振动,2020,40(1):49-56.
HUO Linsheng, HE Xiao, LI Hongnan. Experimental Study on Lightweight Buckling Restrained Braces (BRB) with Aluminum Tubes[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2020, 40(1): 49-56.
- [26] 丁婷,黄镇.新型加劲防屈曲支撑有限元分析[J].建筑结构,2017,47(增刊1):652-657.
Ding Ting, Huang Zhen. Building Structure, 2017, 47(Suppl1): 652-657.
- [26] 丁婷,黄镇.新型加劲防屈曲支撑有限元分析[J].建筑结构,2017,47(增刊1):652-657.
DING Ting, HUANG Zhen. Finite Element Analysis of Innovative Stiffeners Buckling Restrained Braces [J]. Building Structure, 2017, 47(Suppl1): 652-657.
- [27] 朱博莉,郭彦林,袁野.波浪腹板连接的双核防屈曲支撑承载力及滞回性能研究[J].土木工程学报,2018,51(2):40-53, 61.
ZHU BOLL GUO YANLIR T YUAN YE. Load-carrying Capacity and Hysteretic Performance of Corrugated Web Connected BRB[J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(2): 40-53, 61.
- [28] 蒋海燕,宋晓滨,顾祥林,等.碳纤维布增强钢-木屈曲约束支撑低周反复加载试验研究[J].建筑结构学报,2020, :1-7.
JIANG Haiyan, SONG Xiaobin, GU Xianglin, et al. Cyclic Quasi-static Loading Tests on Steel-timber Buckling-restrained Braces Strengthened with CFRP Sheets [J]. Journal of Building Structures, 2020, 1-7.
- [29] 陈耀,袁波,王旭,等.摩擦阻尼器和 TMD 共同作用下的钢框架的减震分析[J].贵州大学学报(自然科学版),2017,34(2):103-108.
CHEN Yao, YUAN Bo, WANG Xu, et al. Vibration Reduction Analysis of the Steel Frame under the Action of Friction Dampers and TMD[J]. Journal of Guizhou University (Natural Sciences), 2017, 34(2): 103-108.
- [30] 韩强,贾振雷,王晓强,等.内嵌碟簧型自复位防屈曲支撑性能试验及其恢复力模型研究[J].工程力学,2018,35(6):144-150, 190.
HAN Qiang, JIA Zhen-lei, WANG Xiao-qiang, et al. Behavior Test and Restoring Force Model of Disc-spring Self-centering Buckling-restrained Braces[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(6): 144-150, 190.
- [31] 张会,曾鹏,王春林.串联双筋自复位屈曲约束支撑参数分析[J].建筑技术,2017,48(5):552-555.
ZHANG Hui, ZENG Peng, WANG ChunLin. Parameter Study on a Self-centering Buckling-restrained Brace with Double Tendons in Series[J]. Architecture Technology, 2017, 48(5): 552-555.
- [32] 张爱林,封晓龙,刘学春.H 型钢芯自复位防屈曲支撑抗震性能研究[J].工业建筑,2017,47(3):25-30, 69.
ZHANG Ailin, FENG Xiaolong, LIU Xuechun. Seismic Behaviors of Novel H-section Steel Pre-stressed Self-centering Buckling-restrained Braces[J]. Industrial Construction, 2017, 47(3): 25-30, 69.
- [33] 王海深,潘鹏,聂鑫,等.三套管自复位屈曲约束支撑滞回性能研究[J].工程力学,2017,34(11):59-65.
WANG Haishen, PAN Peng, NIE Xin, et al. Hysteretic Behavior of Self-centering Buckling Restrained Braces Using Three Steel Tubes[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(11): 59-65.
- [34] 王永贵,刘丹卉,高向宇.屈曲约束支撑滞回性能的影响因素[J].土木与环境工程学报(中英文),2019(2):60-69.
WANG Yonggui, LIU Danhui, GAO Xiangyu. Influencing Factors of Buckling-restrained Brace Hysteretic Performance [J]. Journal of Civil, Architectural & Environment Engineering, 2019(2): 60-69.
- [35] 陈凌秀,祁皑.屈曲约束支撑核心构件几何参数对支撑受力性

能影响分析[J].福州大学学报(自然科学版),2019,47(6):812-818.

CHEN Lingxiu, QI Ai. Effects of Geometrical Parameters of the Core Segment on Mechanical Performance of the Buckling-restrained Braces[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2019, 47(6): 812-818.

[36] 陈可鹏,李国强,刘玉姝,等.屈曲约束支撑低周疲劳性能及罕遇地震下的累积损伤评估[J].建筑钢结构进展,2017,19(1):43-50,84.

CHEN Kepeng, LI Guoqiang, LIU Yushu, et al. Low-Cycle Fatigue Performance of Buckling Restrained Braces and Assessment of Cumulative Damage under Severe Earthquakes [J]. Progress in Steel Building Structures, 2017, 19(1): 43-50, 84.

[37] 刘玲华,高乐,王颖蛟,等.防屈曲支撑在高烈度区钢筋混凝土框架中的优化设计[J].结构工程师,2019,35(6):1-7.

LIU Linghu, GAO Le, WANG Yingjiao, et al. Optimal Design of Buckling-Restrained Braces in Reinforced Concrete Frame at High Seismic Hazard Zone [J]. Structural Engineers, 2019, 35(6): 1-7.

[38] 王忠平,肖世勇,潘应飞.基于双线性模型的屈曲约束支撑试验方法和标准化参数识别研究[J].建筑结构,2019,49(S1):494-497.

WANG Zhongping, XIAO Shiyong, PAN Yingfei. Research on Test Method and Standardized Parameter Recognition of Buckling Restrained Brace Based on Bilinear Model [J]. Building Structure, 2019, 49(S1): 494-497.

[39] 冯玉龙,吴京,孙迅,等.支撑屈服后屈曲约束支撑框架损伤集中效应分析[J].土木工程学报,2019,52(6):45-54.

FENG Yulong, WU Jing, CHONG Xun, et al. Damage Concentration Effect Analysis of Buckling-restrained Braced Frames after Yielding of the Braces [J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(6): 45-54.

[40] 张国伟,孙祚帅,赵紫薇,等.基于 OpenSees 摇摆防屈曲支撑钢框架抗震性能分析[J].工程抗震与加固改造,2019,41(2):20-24.

ZHANG Guowei, SUN Zuoshuai, ZHAO Ziwei, et al. Seismic Performance Analysis of Rocking Buckling-restrained Braced Steel Frame Based on OpenSees [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2019, 41(2): 20-24.

[41] 杨晓燕,冯玉龙,吴京,等.底部带屈曲约束支撑的摇摆桁架抗震性能试验研究[J].东南大学学报(自然科学版),2018,48(2):303-309.

YANG Xiaoyan, FENG Yulong, WU Jing, et al. Experimental Study on Seismic Performance of Hinged Truss with Buckling-restrained Braces at Base [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2018, 48(2): 303-309.

[42] 林纯,古泉.基于数值子结构方法的防屈曲支撑高层钢结构地震动力分析[J].结构工程师,2018,34(A01):9-14.

LIN Chun, GU Quan. Seismic Response Analysis of Tall Steel Buildings Equipped with Buckling-restrained Braces Based on Numerical Substructure Method [J]. Structural Engineers, 2018, 34(A01): 9-14.

[43] 周云,龚晨,陈清祥,等.开孔钢板装配式屈曲约束支撑减震性能试验研究[J].建筑结构学报,2016,37(8):101-107.

ZHOU Yun, GONG Chen, CHEN Qingxiang, et al. Experimental Study on Seismic Performance of Perforated Steel-plate Assembled Buckling-restrained Brace [J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(8): 101-107.

[44] 杨澄宇,马原驰,蔡雪松.自复位防屈曲支撑框架结构混合试验研究[J].结构工程师,2019,35(3):51-56.

YANG Chengyu, MA Yuanchi, CAI Xuesong. Hybrid Simulation of Frame Structure with Self-centering Buckling-restrained Braces [J]. Structural Engineers, 2019, 35(3): 51-56.

[45] 朱凯铭,郭玉荣.主余震序列作用下屈曲约束支撑框架易损性分析[J].结构工程师,2019,35(6):109-115.

ZHU Kaiming, GUO Yurong. Collapse Fragility Analysis of the Buckling-Restrained Braced Frame Subjected to Main-shock-Aftershock Sequences [J]. Structural Engineers, 2019, 35(6): 109-115.

[46] 谢钦,周臻,王维影,等.两种设计原则下自定心屈曲约束支撑框架的抗震性能分析[J].振动与冲击,2017,36(3):125-131.

XIE Qin, ZHOU Zhen, WANG Weiying, et al. Aseismic Performance Analysis for Braced Frame Systems With self-centering Buckling-restrained Braces with Two Different Design Criteria [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(3): 125-131.

[47] 张会,曾鹏,王春林.双向地震作用下自复位屈曲约束支撑框架性能研究[J].工业建筑,2019,49(6):163-166,191.

ZHANG Hui, ZENG Peng, WANG Chunlin. Performance Study of Self-centering Buckling-restrained Brace Frame under Bidirectional Seismic Action [J]. Industrial Construction, 2019, 49(6): 163-166, 191.

[48] 尹丽丹,马宁.黏弹性复合防屈曲支撑钢框架结构抗震抗风性能分析[J].自然灾害学报,2019,28(1):16-23.

YIN Lidan, MA Ning. Analysis of Seismic and Wind-resistant Performance of Viscous-elastic Buckling-restrained Braced Frame [J]. Journal of Natural Disasters, 2019, 28(1): 16-23.

[49] 王永贵,宋红弟.屈曲约束支撑钢框架结构影响因素的静力弹塑性分析[J].地震工程学报,2018,40(3):421-431.

WANG Yonggui, SONG Hongdi. Static Elastoplastic Analysis (Pushover Analysis) of the Factors Influencing Buckling-restrained Braced Steel Frame Structures [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(3): 421-431.

[50] 曹卫生,包恩和.BRB水平力分担率对高层屈曲约束支撑钢框架抗震性能影响研究[J].地震工程与工程振动,2019,39(3):195-204.

CAO Yongsheng, BAO Enhe. Influence of BRB Horizontal Force Sharing Rate on Seismic Behavior of High-rise Buckling Restrained Braced Steel Frames [J]. Earthquake Engineering

- and Engineering Dynamics, 2019, 39(3): 195-204.
- [51] 李幅昌, 田飞, 杨志坚, 等. 外置 K 形屈曲约束支撑与普通支撑钢框架受力性能对比分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2020, 36(2): 193-201.
- LI Guochang, TIAN Fei, YANG Zhijian, et al. Analysis on Mechanical Behaviors of K-type External Buckling Restrained Braced and Ordinary Concentrically Braced Steel Frame[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2020, 36(2): 193-201.
- [52] 宁西占, 吴斌, 谭启阳, 等. 在线数值模拟方法在防屈曲支撑-钢筋混凝土框架结构中的应用[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(10): 86-92.
- NING Xizhan, WU Bin, TAN Qiyang, et al. Application of Online Numerical Simulation Method in BRB-RC Frame Structure[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(10): 86-92.
- [53] 王静峰, 王新乐, 李贝贝, 等. 屈曲约束支撑装配式混凝土框架结构抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2018, 51(12): 72-80.
- WANG Jingfeng, WANG Xinle, LI Beibei, et al. Experimental Studies on Seismic Performance of Prefabricated Concrete Frame Structures with Buckling-restrained Braces[J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(12): 72-80.
- [54] 乔金丽, 丁冬, 李会云, 等. 反复荷载下屈曲约束支撑混凝土框架结构抗震性能研究[J]. 河北农业大学学报, 2017, 40(5): 101-107, 114.
- QIAO Jinli, DING Dong, LI Huiyun, et al. Analysis of Seismic Behavior of RC Frame Structure with Buckling-restrained Braces under Cyclic Load[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2017, 40(5): 101-107, 114.
- [55] 乔金丽, 丁冬, 任泽民, 等. 防屈曲约束支撑对异形柱框架结构抗震性能增强作用的试验研究[J]. 建筑结构, 2019, 49(16): 112-119.
- QIAO Jinli, DING Dong, REN Zemin, et al. Experimental Research of BRBs' Enhancement Effect on Seismic Performance of Special-shaped Column Frame Structure[J]. Building Structure, 2019, 49(16): 112-119.
- [56] 李嘉奇, 李幅昌, 宋永丰, 等. 轴压比及芯材截面积对屈曲约束支撑-混凝土框架抗震性能影响的研究[J]. 工业建筑, 2017, 47(3): 1-6.
- LI Jiaqi, LI Guochang, SONG Yongfeng, et al. Study of Effect of Axial Compression Ratio and Steel Core Cross-section Area on Aseismic Behaviour of Buckling Restrained Brace-concrete Frame[J]. Industrial Construction, 2017, 47(3): 1-6.
- [57] 岳焱超, 卢晓明, 王雁. 含屈曲约束支撑钢筋混凝土框架的弹性层间位移角限值研究[J]. 建筑结构, 2019, 49(13): 106-113.
- YUE Yanchao, LU Xiaoming, WANG Yan. Research of Limit of Elastic Inter-story Drift Ratio for RC Frame with Buckling Restrained Braces[J]. Building Structure, 2019, 49(13): 106-113.
- [58] 白久林, 程峰, 金双双, 等. 近断层脉冲型地震作用下防屈曲支撑-钢筋混凝土框架结构的抗震性能[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(增刊 1): 103-110.
- BAI Jiulin, CHENG Feng, JIN Shuangshuang, et al. Seismic Performance of RC Frame Structures with Buckling-restrained Brace Subjected to Near-fault Pulse-like Ground Motions[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(Suppl 1): 103-110.
- [59] 谢钦, 沈榕. 刚度比对屈曲约束支撑装配式混凝土框架双重体系抗震性能的影响[J]. 工业建筑, 2020, 50(1): 28-33.
- XIE Qin, SHEN Rong. Effect of Stiffness Ratio on the Seismic Behavior of Brb-prefabricated Concrete Frame Dual System[J]. Industrial Construction, 2020, 50(1): 28-33.
- [60] 王波, 王静峰, 孙政, 等. 屈曲约束支撑装配式钢管混凝土组合框架抗震性能研究[J]. 土木工程学报, 2018, 51(6): 14-22.
- WANG Bo, WANG Jingfeng, SUN Zheng, et al. Experimental Study on Seismic Behavior of Assembly CFST Composite Frames with Buckling Restrained Braces[J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(6): 14-22.
- [61] 于敬海, 郑达辉, 胡相宜, 等. 方钢管混凝土组合异形柱防屈曲支撑框架抗震性能试验[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2018, 51(增刊 1): 135-142.
- YU Jinghai, ZHENG Dahui, HU Xiangyi, et al. Experiment on Seismic Performance of Buckling-Restrained Braced Frame Composed of Special-Shaped Concrete-Filled Square Steel Tube Columns[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2018, 51(Suppl 1): 135-142.
- [62] 刘杨, 李宏男, 李超, 等. 风与地震耦合作用下钢管混凝土框架-防屈曲支撑结构体系易损性研究[J]. 土木工程学报, 2019, 52(2): 56-65.
- LIU Yang, LI Hongnan, LI Chao, et al. The Study on the Vulnerability of the Concrete Filled Steel Tubular Frame with Buckling-restrained Braces Structure under the Coupling of wind and Earthquake[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(2): 56-65.
- [63] 薛彦涛, 牛向阳, 王璐. 板柱-人字形屈曲约束支撑抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(5): 45-51.
- XUE Yantao, NIU Xiangyang, WANG Lu. Experimental Research on Seismic Behavior of RC Slab-column Frame Strengthened by Chevron Buckling Restrained Braces[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(5): 45-51.
- [64] 李幅昌, 王柄捷, 杨志坚, 等. 屈曲约束支撑框架-核心筒混合结构抗震性能[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2018, 34(4): 605-613.
- LI Guochang, WANG Bingjie, YANG Zhijian, et al. Seismic Performance Analysis of a Hybrid Frame-Core Tube Structure with Buckling-Restrained Brace[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2018, 34(4): 605-613.
- [65] 吴亚杰, 宋晓滨, 蒋海燕, 等. 屈曲约束支撑增强胶合木框架抗侧性能试验研究[J/OL]. 建筑结构学报: 1-9[2020-08-15]. ht-

- tps://doi.org/10.14006/j.jzjgxb.2019.
- WU Yajie, SONG Xiaobin, JIANG Haiyan, et al. Experimental Study on Lateral Performance of Glulam Timber Frames with Buckling-restrained Bracings [J/OL]. Journal of Building Structures, 1-9[2020-08-15]. https://doi.org/10.14006.
- [66] 宋永丰, 李幅昌, 杨志坚, 等. 采用新型节点的屈曲约束支撑混凝土框架有限元分析[J]. 工业建筑, 2017, 47(3): 12-17.
- SONG Yongfeng, LI Guochang, YANG Zhijian, et al. Finite Element Analysis of Concrete Frame with Buckling Restrained Braces Using a New Type of Joint[J]. Industrial Construction, 2017, 47(3): 12-17.
- [67] 赵俊贤, 于海潮, 潘毅, 等. 基于滑移连接的防屈曲支撑钢框架节点抗震性能研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(2): 117-127.
- ZHAO Junxian, YU Haichao, PAN Yi, et al. Seismic Performance of Sliding Gusset Connections in Buckling-restrained Braced Steel Frame[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(2): 117-127.
- [68] 高祥, 李幅昌, 王纪元, 等. 基于节点性能的屈曲约束支撑混凝土框架抗震性能分析[J]. 工业建筑, 2017, 47(3): 7-11, 17.
- GAO Xiang, LI Guochang, WANG Jiyuan, et al. Aseismic Performance of Buckling Restrained Brace Concrete Frame Based on the Performance of the Brace Joint[J]. Industrial Construction, 2017, 47(3): 7-11, 17.
- [69] 钟根全, 周云, 龚晨, 等. 耦合框架平面外变形钢板装配式屈曲约束支撑钢筋混凝土框架抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2019, 52(7): 81-89, 99.
- ZHONG Genquan, ZHOU Yun, GONG Chen, et al. Experimental Study on Seismic Performance of Steel-plate Assembled Buckling-restrained Braced RC Frame with Out-of-plane Deformation [J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(7): 81-89, 99.
- [70] 王静峰, 高翔, 李贝贝, 等. 屈曲约束支撑与钢框架节点板连接的抗震性能试验与分析研究[J]. 土木工程学报, 2019, 52(8): 40-48.
- WANG Jingfeng, GAO Xiang, LI Beibei, et al. Experimental Studies on Seismic Performance of Prefabricated Concrete Frame Structures with Buckling-restrained Braces [J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(8): 40-48.
- [71] 侯和涛, 朱文灿, 曲哲, 等. 屈曲约束支撑钢筋混凝土框架结构干式柔性梁柱节点的试验研究[J]. 工程力学, 2018, 35(6): 151-161.
- HOU Hetao, ZHU Wencan, QU Zhe, et al. Experimental Study on Dry Flexible Beam-column Joint in Buckling Restrained Braced Reinforced Concrete Frame Structures [J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(6): 151-161.
- [72] 郝贵强, 石晓娜, 齐建伟, 等. 防屈曲支撑钢筋混凝土框架滑移连接节点抗震性能分析[J]. 建筑结构, 2019, 49(S1): 441-446.
- HAO Guiqiang, SHI Xiaona, QI Jianwei, et al. Seismic Performance of Sliding Gusset Connections in Buckling-restrained Braced Reinforced Concrete Frame [J]. Building Structure, 2019, 49(S1): 441-446.
- [73] 朱江, 李幅昌. 屈曲约束支撑-混凝土框架边节点受力性能分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2017, 37(1): 134-139.
- ZHU Jiang, LI Guochang. Performance Analysis of Beam-column Exterior Joint of Buckling Restrained Brace Reinforced Concrete Frame [J]. Journal of Disaster Prevent and Mitigation Eng, 2017, 37(1): 134-139.
- [74] 马传政, 李幅昌, 闫煦. 屈曲约束支撑方钢管高强混凝土框架节点的有限元分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2017, 33(2): 214-225.
- MACHuanzheng, LI Guochang, YAN Xu. Nonlinear FEA on Connections of Steel Beam to High-strength Concrete Filled Square Steel Tubular Column in BRBF [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2017, 33(2): 214-225.
- [75] 白久林, 金双双, 欧进萍. 防屈曲支撑-钢筋混凝土框架结构基于能量平衡的抗震塑性设计[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(1): 125-134.
- BAI Jiulin, JIN Shuangshuang, OU Jinping. Seismic Plastic Design of Buckling-restrained braced-RC Frame Structures Based on Energy Balance [J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(1): 125-134.
- [76] 潘毅, 阎勋章, 易路行, 等. 基于剪力比的防屈曲支撑-RC 框架抗震设计方法研究[J]. 工程力学, 2018, 35(3): 96-105.
- PAN Yi, YAN Xunzhang, YI Luxing, et al. Study on the Seismic Design of Buckling-restrained Braced-reinforced Concrete Frame Structures Based on Shear Force Ratios [J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(3): 96-105.
- [77] 王宏伟, 苑清山, 叶达伟, 等. 基于抗侧刚度比的防屈曲支撑钢框架住宅设计及分析[J]. 钢结构, 2017, 32(2): 72-76, 53.
- WANG Hongwei, YUAN Qingshan, YE Dawei, et al. Design and Analysis of Buckling Restrained Braced Steel Frame Residence Based on Lateral Stiffness Ratio [J]. Steel Construction, 2017, 32(2): 72-76, 53.
- [78] 王宏伟, 叶达伟, 任凤鸣, 等. 防屈曲支撑组合框架优化设计与抗震性能分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2018, 34(5): 829-837.
- WANG Hongwei, YE Dawei, REN Fengming, et al. Optimization Design and Seismic Performance Analysis of Buckling Restrained Brace Composite Frame [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University Natural Science, 2018, 34(5): 829-837.
- [79] 刘忠华, 李幅昌, 杨志坚, 等. 基于位移的屈曲约束支撑混凝土框架结构抗震设计方法[J]. 工业建筑, 2017, 47(3): 18-24.
- LIU Zhonghua, LI Guochang, YANG Zhijian, et al. Displacement-based Aseismic Design Method for Buckling-restrained Braced Rc Frames [J]. Industrial Construction, 2017, 47(3): 18-24.
- [80] 张家广, 吴斌, 赵俊贤. 防屈曲支撑加固钢筋混凝土框架的实用设计方法[J]. 工程力学, 2018, 35(3): 151-158.
- ZHANG Jiaguang, WU Bin, ZHAO Junxian. A Practical Design Method of Reinforced Concrete Frames Retrofitted with

- Buckling-restrained Braces[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(3): 151-158.
- [81] 刘璐, 刘越. 改进的三线性自复位防屈曲支撑结构非线性位移比[J]. 土木工程学报, 2018, 51(1): 80-84.
- LIU Lu, LIU Yue. Improved Nonlinear Displacement Ratio of Self-centering Buckling-restrained Bracing Structure Considering Trilinear Hysteresis Behavior[J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(1): 80-84.
- [82] 许国山, 徐小童, 王贞. 考虑防屈曲支撑影响的钢筋混凝土框架柱设计方法[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(3): 105-115.
- XU Guoshan, XU Xiaotong, WANG Zhen. Design Method for Columns in Reinforced-concrete Frames with Buckling-restrained Braces[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(3): 105-115.
- [83] 李小龙, 王泽军, 冯曼, 等. 考虑填充墙作用的消除底部薄弱层的防屈曲支撑简化设计方法[J]. 世界地震工程, 2017, 33(1): 237-243.
- LI Xiaolong, WANG Zejun, FENG Man, et al. Simplified Design Method of Buckling Restraining Brace to Eliminate Weak Layer of Bottom Considering Effect of Infill Walls[J]. World Earthquake Engineering, 2017, 33(1): 237-243.
- [84] 赵昕, 杜冰洁, 李浩. 超高层建筑黏滞阻尼器及屈曲约束支撑混合减振结构系统集成优化设计[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(3): 25-35.
- ZHAO Xin, DU Bingjie, LI Hao. Integrated Optimization Design of Hybrid Vibration Damping Structure System of Vis-cous Damper and Buckling Restrained Brace for Super High-rise Buildings[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(3): 25-35.
- [85] 陈凌秀, 祁皑, 蔡储旺, 等. 考虑节点板刚度的屈曲约束支撑核心段应变的理论及试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2019, 46(11): 43-49.
- CHEN Lingxiu, QI Ai, CAI Chuwang, et al. Theoretical and Experimental Investigation on Core Steel Strain of Buckling-restrained Braces Considering Stiffness of BRB-gusset Plate[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2019, 46(11): 43-49.
- [86] 张晓亮, 王培军, 肖邵文. 火灾下防屈曲支撑最小填充层厚度简化计算方法[J]. 建筑钢结构进展, 2018, 20(1): 58-63, 99.
- ZHANG Xiaoliang, WANG Peijun, XIAO Shaowen. Simplified Calculation Method for Minimum Infill Layer Thickness of Buckling-Restrained Braces Exposed to Fire[J]. Progress in Steel Building Structures, 2018, 20(1): 58-63, 99.
- [87] 屠义新, 袁波, 易金刚. 新型剪切型全装配式防屈曲耗能支撑的耗能性能分析[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2016, 33(6): 77-82.
- TU Yixin, YUAN Bo, YI Jinggang. Energy Dissipation Capability Analysis of New Shear-type of Whole Assemble Buckling-restrained Brace[J]. Journal of Guizhou University (Natural Sciences), 2016, 33(6): 77-82.