

文章编号:1673-9469(2012)04-0028-04

屈曲约束支撑研究进展综述

王凤欣¹, 陈银², 王高峰³, 张玉鹏⁴

(1. 上海大学 土木工程系, 上海 100020; 2. 河北工程大学 土木工程学院, 河北 邯郸 056038; 3. 中交第三公路工程局有限公司 第四工程分公司, 重庆 401120; 4. 中国葛州坝集团股份有限公司 西南分公司, 云南 昆明 650000)

摘要:本文旨在对屈曲约束支撑做一个综合性分析。文章从两方面展开对国内外近几年在屈曲约束支撑方面的研究成果的分析总结。一方面是此种支撑受力机理的研究, 另一方面是新型支撑形式的介绍。同时对于此种支撑形式在一般通用软件的建模做了简要介绍, 并对目前仍不能在国内广泛应用做了原因分析。

关键词:屈曲约束支撑; 滞回曲线; 纤维单元

中图分类号: TU393.3

文献标识码: A

Review on the development of buckling - restrained braced

WANG Feng - xin¹, CHEN Yin², WANG Gao - feng³, ZHANG Yu - peng⁴

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 100020, China; College of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056038, China; 3. The Fourth Engineering Company, Chinese Transportation of Third Road Construction Bureau, Chongqing 406120, China; 4. Gezhouba Southwest Company Limited, Yunnan Kunming 650000, China)

Abstract: This article is aimed at make a comprehensive analysis on the buckling - restrained braced. The paper summarized the research of BRB in recent years both at home and abroad. The stress mechanism of such brace has been studied at first, and then some new forms of such braces are introduced. And modeling in different common software also been given. At last, analyzed reasons of not been able to used widely in our country. All of the work is hoping to make a full understanding of the new form of brace for the engineers.

Key words: buckling - restrained braced; hysteretic curve; fiber unit

屈曲约束支撑是一种新型的无粘结耗能支撑, 支撑的中心是芯材, 芯材被置于一个钢套管内, 然后在套管内灌注混凝土或砂浆或者设置侧向板支撑, 从而克服了传统支撑受压屈曲的缺点。同时由于泊松效应, 芯材在受压情况下会膨胀, 因此在芯材和砂浆之间设有一层无粘结材料或非常狭小的空气层。这种全新的支撑形式滞回曲线饱满, 具有很好的抗震消能能力, 是一种很有应用前景的结构体系。

1 国外研究状况

日本研究者 Wakabayashi^[1] 对屈曲约束支撑体系进行了最初的全面研究。他们发展出一种将钢板放置于钢筋混凝土板内、并在二者之间设置

无粘结层的新体系; 在 Wakabayashi 提出概念的基础上, Kimura K 等人通过对四个足尺试件进行了循环加载试验, 得到如果外套筒的欧拉荷载大于内核构件屈服荷载的 1.9 倍, 支撑便不会发生失稳, 并能体现出良好的滞回性能。1988 年, Fujimot 等人对内核支撑和钢套管间填充砂浆的约束屈曲支撑进行了理论和试验研究, 对各种不同钢套管尺寸进行了试验, 得到了钢套管的刚度和强度设计准则; 2001 年 Koetaka 等人提出四钢管作为约束机构的约束屈曲支撑, 并给出了不发生整体屈曲的截面组成安全系数。

在美国, Clark^[2] 等人为了给美国第一座使用约束屈曲支撑的建筑提供结构设计和施工上的技术支持, 在 1999 年进行了三组大比例的约束屈曲

收稿日期: 2012-05-30

作者简介: 王凤欣(1988-)女, 河北保定市人, 硕士, 从事大跨钢结构方面研究。

支撑试验,试验结果显示支撑的滞回性能非常稳定;Black 还对约束屈曲支撑的整体稳定、内核支撑在高阶模态下的屈曲行为以及塑性扭转屈曲问题进行了理论分析。2005 年 1 月,SEAOC(美国加州结构工程师学会)与 AISC(美国钢结构学会)联合委员会将 2001 年制定的“屈曲约束支撑推荐规定”写入了最新的 AISC(钢结构建筑抗震规定)。

近几年,国外有关屈曲约束支撑的研究仍旧是多方面的。文献[3]对屈曲约束支撑框架结构以及传统的框架支撑结构进行了非线性时程分析,结果表明 BRBF 有更大的耗能能力,但同样指出,其连接点处更容易破坏,因此会用更多的钢材,但是整体分析后,可以认为屈曲支撑框架优于普通框架。文献[4]在理论上进行了研究,第一部分指出支撑施加的轴向力与屈曲波长不服从欧拉公式,第二部分利用肖利理论将分析推广到了线性硬化方面。

2 国内研究状况

2.1 初始研究成果

台北的陈正诚对用低屈服点钢材($f_y = 100\text{MPa}$)制成的屈曲约束支撑恢复力特性进行了研究;台湾的蔡克铨等研究了无粘结材料对屈曲约束支撑滞回反应的影响,同时他还开发了一种双钢管屈曲约束支撑,并对其进行了反复载重及疲劳试验研究,此种支撑可以减少节点尺寸便于现场安装;清华大学的郭彦林教授对屈曲约束支撑进行了有限元分析和整体稳定性能研究,并分析了约束比、内核板件宽度比、初始缺陷、间隙等参数对支撑性能的影响,同时也简单的给出了初步简化设计方法。

2.2 近几年研究的突破

1)理论分析以及简化计算方法的完善。考虑 Bauchinger 效应和应变强化效应影响,文献[5]提出了一种滞回模型,并建立了屈曲约束支撑的弹塑性刚度方程。对这种模型运用积分法、迭代法两种计算方法编制程序模拟绘制了屈曲约束支撑的滞回曲线,并与试验所得曲线进行了对比。在弯曲系数 $r = 0.75 \sim 1$ 时,本文所提计算模型能够准确、有效地模拟出屈曲约束支撑在反复轴向作用力下的滞回关系。

文献[6]对六个防屈曲支撑试件进行了低周

反复荷载试验。研究了防屈曲支撑恢复力的特点,讨论了双线性模型,多线性模型以及 Bouc - Wen 模型在用于计算恢复力 - 变形滞回曲线的可行性及不足。通过考虑力学参数的非对称性、材料塑性硬化等方面的不足,建立了改进的 Bouc - Wen 恢复力计算模型。最后与 UCB 静力反复单调增位移控制加载和地震诱发位移控制加载的试验研究结果进行了对比,表明在恢复力 - 变形滞回曲线、割线刚度及其退化规律、等效粘滞阻尼比等方面吻合较好。

文献[7]针对防屈曲支撑钢框架结构,采用两阶段设计的方法,先利用能力谱法和改进的能力谱法评估结构和构件在地震时所能达到的延性性能,再基于此延性系数计算结构的等效粘滞阻尼和防屈曲支撑的附加阻尼,将二者相加得到结构总的阻尼比,并基于此阻尼比构造需求谱,评估此需求谱与结构能力谱交点对应的结构性能指标,最后通过增加支撑构件和调整支撑的类型或截面的方法完成结构设计,使其满足抗震性能目标的要求。最后结合一栋高层钢框架结构实例说明上述方法适合作为防屈曲钢框架的抗震性能设计方法。本文提出的计算方法符合今后抗震延性设计的趋势,很有借鉴意义。

文献[8]详细介绍了运用屈曲约束支撑进行改进钢框架支撑结构的步骤,同时依照规范要求,给出了在小震、中震、大震不同情况下如何进行设计。文中提到,对于小震的验算,需要考虑是新建工程还是加固工程的区别;中震的验算,手算可采用层间剪切模型,假定防屈曲支撑符合双线性恢复力模型,电算可使用 Bouc - Wen 等非线性恢复力模型建立防屈曲支撑模型;大震验算时,文中指出手算总体结构可假定符合三线性恢复力模型,但计算工作量较大。由于主体结构进入非线性的过程是逐渐进行的,因此,大震验算应以有限元非线性分析为主。但是大震的具体验算没有很清楚的说明。

文献[9]选用了一种简化的方法对罕遇地震荷载作用下的屈曲约束支撑框架结构弹塑性位移进行计算。具体操作是先计算出结构的附加有效阻尼比,然后根据结构的弹性阻尼比和附加有效阻尼比来确定结构的总阻尼比,并推得结构的弹塑性周期。根据《建筑抗震设计规范》,采用底部剪力法或振型分解反应谱法进行结构最大层间位移求解,计算所得到的结果即可认为是罕遇地震

作用下结构的最大弹塑性楼层层间位移。最后运用算例将此简化求解方法与十条地震波的弹塑性时程分析结果平均值进行了对比。此种算法简单,便于手算。

文献[10]综述了屈曲约束支撑体系的设计方法。内容包括屈曲约束支撑布置的几项原则,设计目标的选择,支撑选型的基本流程,计算分析的单元模型,节点和连接的设计要求。刻意给设计者一个很好的指引。但是文中提到的过于宽泛没有深入解释,因此读者想要更好的了解支撑设计计算模型或者各种简化方法,还需借鉴其他文章。

从结构体系可靠度的角度出发,文献[11]以最简形式的功能函数描述平面屈曲约束支撑钢框架在静力荷载作用下的体系极限承载力状态,利用对偶变数抽样法与指数多项式近似概率密度法对结构整体抗力的概率密度函数及其统计特征进行了估计。考虑两种基本荷载组合,在对平面屈曲约束支撑钢框架结构整体可靠度评价的基础上,给出了在一定目标可靠度下的基于结构体系极限承载力可靠度的实用设计公式。通过一个具体算例表明,该设计方法既比传统的基于构件可靠度的设计方法经济,又能保证结构体系的可靠度。

文献[12]根据同济大学采用国产低碳钢和低屈服点钢开发研制的 TJI 型与 TJII 型屈曲约束支撑的大量试验结果,应用统计分析,给出了屈曲约束支撑极限承载力计算公式,并对其中的统计参数进行了分析,确定了上述屈曲约束支撑节点连接抗力在栓接和焊接不同情况下的设计原则。最后应用可靠度的相关理论确定了目标可靠度指标为 3.2 时节点连接设计的安全系数。

2) 新型体系介绍。在文献[13]中,汪家铭介绍了 SEAOC - AISC 提出的反复加载试验要求,对于一些学者的实验过程进行了综述,具体阐述了 BRB 各组件性能以及整体性能。同时为了避免框架体系在大震后的残余变形较大,提出了利用双重体系的原理,在 Sabelli 研究模型中加入备用抗弯钢框架。

根据我国空间杆系结构大多采用圆管结构的特点,文献[14]提出圆形套管式的屈曲约束支撑。与典型屈曲约束支撑相比,支撑的接合段为圆管形截面,能够与网架或网壳的节点实现更好的连接,适合于在网架或网壳等大跨结构中使用。运用 ANSYS 软件进行模拟,内核构件的应力 - 应变

关系选为三折线弹 - 塑性随动强化模型,用 SOLID45 单元模拟外套筒及接合段,用 SOLID185 单元模拟内核构件消能段,为了方便建模,并未在模型内核构件与外套筒之间设无粘结涂层或间隙,而是将其接触设置中的摩擦系数近似设置为 0。但是这样一来核心构件在外围套筒的连续弹性支撑下,不易发生局部屈曲,这将提高支撑的屈曲荷载,文章在后来的分析中也提到这一误差来源。最后将有限元结果与实验结果进行对比,并分析了有限元误差产生的原因,这对于以后读者的有限元建模分析是个很好的借鉴。

为了防止竖向放置 BRB 时,在自重荷载作用下约束单元与核心单元发生相对滑动,文献[15]提议在屈服段的中部每边设置一个防滑凸起。与现有 BRB 相比,这种新型 BRB 的优点是:(1)采用普通的 Q235B 钢材作为核心单元的材料,节约成本,降低造价,有利于工程推广使用。(2)采用普通混凝土材料作为填充材料,简化了灌注操作,既可保证填充材料的密实,又便于保持核心单元的相对位置。(3)在核心单元与约束单元之间设置缝隙间隔单元,可有效地解决核心单元受压时横向膨胀受限的问题,既保证了支撑构件具有传统 BRB 的力学性能特征,又解决了现有 BRB 对无粘结材料过度依赖的缺陷。

文献[16]分析了防屈曲支撑刚度、Pall 型阻尼器起滑摩擦力、阻尼器的大小以及防屈曲支撑与水平方向的倾角等因素对体系滞回特性以及支撑内力的影响。结果表明,Pall - BRB 支撑体系比 Pall 型普通支撑体系有更好的耗能性能;同时,起滑摩擦力越大,体系耗能能力越强,支撑越能充分发挥作用。最后提出了这种新型 Pall - BRB 摩擦阻尼支撑体系的设计方法。

文献[17 - 18]首先介绍了屈曲支撑性能标准,通过试验加载方案的改进,给出了屈曲约束支撑建议标准,即将屈曲约束支撑的抗震性能分为两级,这在满足抗震要求的前提下,降低了一般建筑使用屈曲约束支撑的成本。然后介绍了此种形式的支撑设计与构造要求。同时,为了防止约束非屈曲段边缘进入塑性使整个支撑芯板端部在此处发生刚性转动使套筒产生局部鼓出,创造性的提出采用对套筒壁板加肋的方法,即加强了套筒壁板的平面外刚度,使套筒能够很好地对芯板起到约束作用。最后通过实验及与国外的支撑进行综合对比,表明我国自主研发的 TJ 型屈曲约束支

撑构造合理、滞回曲线饱满、具有良好的耗能能力和低周疲劳性能,为推广应用奠定了基础。

结合上海市恒丰中学教学楼以及山东郯城工程加固的两个实例,文献[18]分析了屈曲约束支撑在加固工程中的一些要点。对于节点的设计计算给出了具体的公式,同时对施工方法以及验收做了简要的介绍。

3 屈曲约束支撑在软件中实现

3.1 小震的计算

由于在小震阶段屈曲约束支撑仍保持弹性,因此它的设计方法与一般的支撑没有区别,不同之处在于以屈曲约束支撑的等效截面面积来定义支撑。因此在一般设计软件中都可以模拟。下面以 PKPM 中的计算过程为例进行说明。

选择截面类型时,建议将截面定义成正方形,截面选择箱形截面。在 SATWE 的分析与设计参数补充定义对话框中各参数与常规结构设计方法相同。释放支撑端部约束。进行屈曲约束支撑设计时无需考虑稳定问题,仅查看构件强度是否满足要求。提取支撑在各荷载组合下的最大内力与支撑设计承载力进行对比,如各荷载组合下最大内力小于支撑设计承载力,则满足要求。

3.2 中震和大震的验算

中震和大震的验算过程是弹塑性分析过程,因此难点是对屈曲支撑本构关系的模拟。下面给出动力弹塑性分析的设计过程。

MIDAS 中实现过程。在 MIDAS 中,可以直接定义矩形截面。仅需定义截面的边长使截面面积与拟采用的屈曲约束支撑等效截面面积相等。将已经定义的截面导入利用纤维单元来模拟屈曲支撑。在纤维单元的类型中选择相应的材料本构关系,在分割时选择数量为 2。定义非弹性铰时铰的特性值可以采用自动计算。然后进行支撑布置。

SAP2000 中实现过程。在 SAP2000 中有两种方法可模拟屈曲约束支撑的性能。

1) 非线性连接单元:采用非线性连接单元模拟屈曲约束支撑,且需要指定其重量、质量、弹性分析时的线刚度。选择双线性滞回模型。

2) 纤维塑性铰:首先定义屈曲约束支撑芯板材料性能,可采用双线性模拟。然后将支撑设为刚性杆件,然后在此刚性杆上设置纤维塑性铰,纤维

塑性铰的面积为屈曲约束支撑的芯板截面面积。

ANSYS 中实现过程。采用 Link10 单元模拟屈曲约束支撑,材料模型选用双线性的弹塑性模型,强化系数为 0.01。采用 Combin39 模拟时候,需要计算出支撑的重量,并将此重量作为节点质量附加至支撑的两端节点。

4 屈曲约束支撑的不足

屈曲约束支撑相比于传统的支撑有很多的优点,但仍有很多不足阻碍了它的进一步的发展,本文总结了以下 2 点。

1) 层位移不能恢复:地震过后,屈曲约束支撑的层移不能自动恢复,这与自复位支撑相比,是其很大的弱点。而且如果偏移过大,虽然支撑保证了结构不倒,但是也会影响结构的继续使用。

2) 专利限制,不利推广:我国建筑抗震设计规范在钢结构一章中给出了屈曲约束支撑立面布置的原则要求,同时指出,屈曲约束支撑如做为耗能部件使用时应该按照位移型阻尼器的相关要求要求进行设计。上述标准规定对推动屈曲约束支撑的工程应用具有重要的意义,但是,上述规定过于简单和宽泛,实际工程的可操作性较差。

5 结语

通过对最近几年有关屈曲约束支撑在国内外进行研究进行综合性的阐述,并对此种支撑形式在一般设计软件中的模拟进行了表述,最后对支撑的不足做了总结。综合全面的展示了屈曲支撑的理论研究以及简化计算及在软件中的实现。

参考文献:

- [1] WAKABAYASHI M, NAKAMURA T, KASHIBARA A, et al. Experimental study of elasto-plastic properties of precast concrete wall panels with built-in insulating braces [J]. Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, 1973: 104121044: 12-20.
- [2] CLARK P, AIKEN I, KASAI K, et al. Design procedures for buildings incorporating hysteretic damping devices [C]. Proceedings, 69th Annual Convention, SEAOC, Sacramento, CA: 1999.
- [3] Gary S Prinz, P E, M ASCE, et al. Seismic performance of buckling-restrained braced frames with eccentric configurations [J]. Journal of Structural Engineering. 8, 2011. 10. 1061(ASCE)ST. 1943-541X. 0000471:56-62.

(下转第 36 页)

4 结语

从哈尼族、傣族的生态审美意识可以看出,人对待自然的态度反映出了他应付环境的能力和生活方式,这种态度不是静态的,它随着自然和人自身的发展而发生变化。正是有了哈尼族、傣族的生态审美意识,才会有当地生物的多样性、当地生态的可持续性这些景观生态学上的表现。传统经验所蕴含的科学精神,造就了哈尼族、傣族朴素的生态审美意识,从景观生态学的角度来讲,正是经验中这种对生态的科学性的存在,才使哈尼族、傣族聚居地景观生态一直维持着稳定的状态。生态审美意识的形成和维系要靠教育和感染等“内塑”或“内化”途径来实现。所以对哈尼族傣族生态审美意识的研究结合景观生态区域的划分、景观空间格局变化的研究以及景观生态干扰的研究,都将成为多样性保护的基础研究。

参考文献:

[1] 袁爱莉. 源于自然审美的哈尼族服饰生态文化[J].

云南民族大学学报,2011,28(03):56-59.

- [2] 刀国栋. 傣族历史文化漫谈[M]. 北京:民族出版社,1996.
- [3] 金少萍. 生态和社会环境视阈下傣族民族工艺[J]. 中南民族大学学报,2010,30(02):75-78.
- [4] 杨志明. 论傣族的生态审美意识[J]. 云南师范大学学报,2000,32(06):47-49.
- [5] 赵龙,范钦蓉,李哲琳,等. 生态自然观指导下的景观规划与设计研究[J]. 价值工程,2011(30):64-65.
- [6] EATON, MARCIA MUELDER. The Beauty that Requires Health[J]. Joan Iverson Nassauer(ed), Placing Nature: Culture and Landscape Ecology, 1997: 85-106.
- [7] PAUL H. GOBSTER. An Ecological Aesthetic for Forest Landscape Management[J]. Landscape Journal, 1999,18(1): 54-64.
- [8] 查尔斯 W·哈里斯,尼古拉斯 T·丹尼斯(美)著,袁道平译. 当代景观建筑标准手册(下)[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.

(责任编辑 刘存英)

(上接第31页)

- [4] FRANCESCO GENNA, PIERO GELFI. Analysis of the lateral thrust in bolted steel buckling-restrained braces[J]. Journal of Structural Engineering. 2, 2012. 10. 1061(ASCE)ST. 1943-541X. 0000564;113-125.
- [5] 李国强,胡宝琳. 屈曲约束支撑滞回曲线模型和刚度方程的建立[J]. 地震工程与工程振动,2007,27(2):26-31.
- [6] 高向宇,张慧,杜海燕,等. 防屈曲支撑恢复力的特点及计算模型研究[J]. 工程力学,2011,28(6):19-28.
- [7] 贾明明,吕大刚,张素梅,等. 防屈曲支撑钢框架基于延性的抗震性能设计[J]. 工程力学,2010,27(增刊):201-206.
- [8] 高向宇,张腾龙,黄海涛,等. 用防屈曲支撑改进钢框架-支撑结构抗震性能的设计方法[J]. 北京工业大学学报,2010,36(9):1206-1214.
- [9] 胡宝琳,姚文娟,李国强. 罕遇地震荷载作用下屈曲约束支撑框架结构弹塑性位移的简化计算方法[J]. 振动与冲击,2011,30(2):144-148.
- [10] 罗开海. 屈曲约束支撑体系设计方法[J]. 建筑结构,2011,41(11):98-102.
- [11] 李国强,郭小康. 基于极限承载力平面屈曲约束支撑

钢框架整体可靠度设计[J]. 建筑结构,2011,41,(8):68-71.

- [12] 李国强,郭小康. 基于可靠度理论的屈曲约束支撑节点连接设计原则[J]. 建筑结构,2010,40(3):65-67.
- [13] 汪家铭,中岛正爱. 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.
- [14] 王秀丽,陈明. 一种适用于杆系结构的屈曲约束支撑的有限元分析[J]. 兰州理工大学学报,2007,33(3):124-127.
- [15] 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.
- [16] 张纪刚,欧进萍. 新型 Pall- BRB 摩擦阻尼支撑体系设计方法[J]. 大连理工大学学报,2011,51(4):587-592.
- [17] 李国强,胡宝琳,孙飞飞,等. 国产 TJI 型屈曲约束支撑的研制与试验[J]. 同济大学学报,2011,39(5):631-636.
- [18] 李国强,宫海,张杨,等. TJ 型屈曲约束支撑在加固工程中关键技术研究[J]. 建筑结构,2010,40:135-138.

(责任编辑 刘存英)