

新型外包钢筋混凝土钢管防屈曲耗能支撑性能

邓雪松, 杨叶斌, 周云, 陈真, 邹征敏

(广州大学 土木工程学院, 广州 510006)

摘要:研制了一种新型外包钢筋混凝土钢管防屈曲耗能支撑,设计6个新型外包钢筋混凝土钢管防屈曲耗能支撑试件,对其进行轴向循环荷载试验,并对其中的4组试件采用ABAQUS有限元数值模拟分析。研究表明:新型外包钢筋混凝土钢管防屈曲耗能支撑在受拉和受压时都能屈服而不屈曲,支撑的滞回曲线稳定、饱满,具有稳定的承载能力和良好的滞回耗能能力;新型外包钢筋混凝土钢管防屈曲耗能支撑的恢复力模型可采用双线性模型来描述;新型外包钢筋混凝土钢管防屈曲耗能支撑构造合理,耗能机理明确,采用钢筋混凝土约束核心钢管的设计思想是可行的。

关键词:外包钢筋混凝土;防屈曲耗能支撑;循环荷载试验;滞回曲线;骨架曲线

中图分类号:TU352.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2012)01-0021-08

Performance of New-type Steel Tube Buckling-Restrained Brace with Reinforced Concrete Outside

DENG Xue-song, YANG Ye-bin, ZHOU Yun, CHEN Zhen, ZOU Zheng-min

(School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, P. R. China)

Abstract: A New-type Steel Tube Buckling-Restrained Brace with Reinforced Concrete outside (ST-BRB-RC) was introduced in this paper. Six specimens of the ST-BRB-RC were designed and cyclic loading test were carried out to study the hysteretic energy dissipation performance of the six specimens. And then, ABAQUS finite element analysis was used to study the performance of four specimens. The results indicated that the ST-BRB-RC had stable and full hysteretic curve. The bearing capacity of the ST-BRB-RC was stable and the hysteretic behavior was excellent. And the analysis model of ST-BRB-RC could be described by a bilinear model. The construction of the ST-BRB-RC was reasonable, and the energy dissipation mechanism of the ST-BRB-RC was clear. It is proved that the design philosophy of using reinforced concrete for exterior restrained element was available.

Key words: reinforced concrete outside; buckling-restrained brace; cyclic loading test; hysteretic curve; backbone curve

防屈曲耗能支撑由于具有性能稳定、减震效果显著、施工安装方便等特点,从而成为目前研究和应用较多的耗能构件。日本神户地震、美国北岭地震后,其在日本、美国、加拿大和我国台湾地区得到了较好的应用^[1-6]。近年来,防屈曲耗能支撑在中国的应用也越来越多。

钢管作为一类主要的受力构件,在建筑结构、桥梁结构等工程领域有广泛的应用。但其作为受压杆件时易出现屈曲失稳现象,从而导致结构的失稳破坏。将防止钢管发生失稳又可耗能减震的二重钢管防屈曲耗能支撑应用于这些工程结构,可以有效地减轻结构的地震反应,进而防止结构破坏或倒塌。二重

收稿日期:2010-07-13

基金项目:广东省自然科学基金团队项目(8351009101000001);广东省自然科学基金(06021581);广东省科技计划项目(2007B030401010)

作者简介:邓雪松(1967-),女,副教授,主要从事工程抗震和工程减震控制,(E-mail)deng2593@163.com。

钢管防屈曲耗能支撑由日本学者首先提出,加藤基规等人建立了二重钢管防屈曲耗能支撑的滞回性能分析模型,研究了影响支撑核心单元钢管局部屈曲的参数^[7];石井匠等人把二重钢管防屈曲耗能支撑安装在一幢钢筋混凝土建筑物外表面进行加固,并进行了试验研究^[8];Yuji KOETAKA 等人为防止二重钢管防屈曲耗能支撑发生平面外屈曲,对支撑连接段与梁两者间的刚度要求进行了研究^[9];广州大学的钱洪涛^[10]、杨叶斌^[11]、河北工程大学的贾建坡^[12]和内蒙古科技大学的赵根田等^[13]对双管式防屈曲耗能支撑进行了小比例试验和数值模拟,研究表明双管式防屈曲耗能支撑性能稳定,耗能性能良好。

在二重钢管防屈曲耗能支撑的基础上,提出了一种新型的外包钢筋混凝土钢管防屈曲耗能支撑,

并对其进行试验研究和有限元模拟分析。

1 新型外包钢筋混凝土钢管防屈曲耗能支撑的构成与设计

1.1 新型外包钢筋混凝土钢管防屈曲耗能支撑的构成

新型外包钢筋混凝土钢管防屈曲耗能支撑由核心钢管、无粘结材料层、外约束钢筋混凝土三者组合而成。核心钢管与两侧端板采用焊接相连,并在端部设计加劲板以加强端部;无粘结材料层一般采用橡胶、聚乙烯、硅胶等制成,铺设在钢管外表面,提供钢管横向变形所需的空间;外约束钢筋混凝土提供核心钢管受压过程中所需要的整体和局部抗弯刚度,其构成形式如图 1 所示。

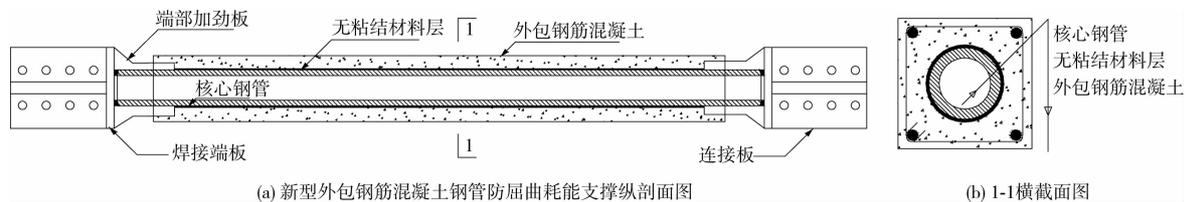


图 1 新型外包钢筋混凝土钢管防屈曲耗能支撑构成图

相比传统的核心单元为“一”字型 and “十”字型防屈曲耗能支撑,新型外包钢筋混凝土钢管防屈曲耗能支撑采用钢管作为核心单元,有利于提高支撑的承载能力和抗弯抗扭性能;相比于二重钢管防屈曲耗能支撑,新型外包钢筋混凝土钢管防屈曲耗能支撑的外约束采用钢筋混凝土,节省了用钢量;相比于二重钢管防屈曲耗能支撑,新型外包钢筋混凝土钢管防屈曲耗能支撑的自重略有增加,但钢筋混凝土的约束形式解决了耗能支撑的防火性能要求。

1.2 试件的设计

根据试验设备的实际尺寸和连接情况,设计的新外包钢管混凝土钢管防屈曲耗能支撑的构造如图 2 所示,具体参数见表 1。共设计 3 组试件(分别为 I-A/B、II-A/B、III-A/B),为避免试件在制作和试验安装时存在误差,导致试验失败,每组制作 2 个尺寸相同的试件,共计 6 个试件。外约束钢筋混凝土的纵筋为 4 ϕ 10,箍筋为 ϕ 6@100(采用焊接连接),端头两端外边包裹长为 400 mm、厚度为 5 mm 的钢板套管,混凝土采用 C30,保护层厚度 30 mm。

表 1 试验用外包钢筋混凝土钢管防屈曲耗能支撑尺寸参数表

| 型号 | 核心钢管 | | 长细比 | 约束比 | 外约束钢筋混凝土 | | 间隙/mm |
|---------|---------------------------------------|-----|-----|-----|------------------|--|-------|
| | 长度 \times 外径 \times 厚度(面积)/mm | 径厚比 | | | 长 \times 宽/mm | | |
| I-A/B | 3 120 \times 68 \times 4 (804) | 17 | 67 | 25 | | | |
| II-A/B | 3 120 \times 50 \times 3 (443) | 17 | 96 | 41 | 220 \times 220 | | 1.5 |
| III-A/B | 3 120 \times 102 \times 4 (1 231) | 26 | 44 | 13 | | | (橡胶层) |

核心钢管的材料特性对新型外包钢筋混凝土钢管防屈曲耗能支撑的滞回耗能能力、承载能力和延性性能有影响,因此在试件设计加工之前进行了核心钢管的材性试验。试验结果显示:钢材的屈服强度为 395 MPa,抗拉强度为 547 MPa,伸长率为 19.0%,弹性模量为 302 000 MPa,因此,试验所用

钢材属高强度。

2 试验加载方案

2.1 试验装置

试验加载装置如图 3 所示。该液压作动器的力量程为 1 013.2 kN,拉力量程为 647.6 kN,作动

器的行程为 ± 254 mm,力传感器安装在作动器上,装如图 4 所示。采用拉线位移传感器测量试件的轴向变形。试件安

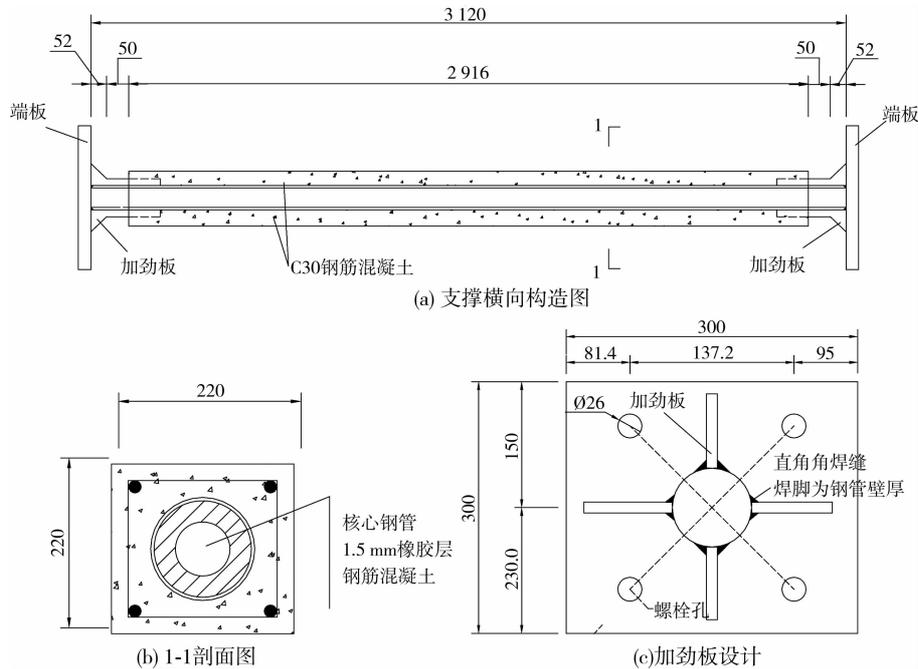


图 2 试验用外包钢筋混凝土钢管防屈曲耗能支撑构造图

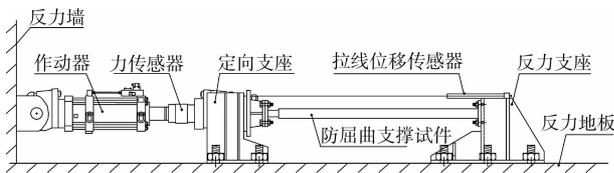


图 3 试验装置立面图



图 4 试件安装图

2.2 加载制度

试验加载制度采用支撑变形幅值逐步增大的位移控制加载,试验加载历程为分别对应于 1/600 (5 mm)、1/300 (10 mm)、1/200 (16 mm)、1/150 (22 mm)、1/100 (32 mm)、1/75 (43 mm)、1/50 (64 mm) 支撑长度,拉伸和压缩往复各 2 次变形^[14]。但是由于反力架会有一定的位移,以及各个装置的配装过程中间隙的存在,经过测试,在每个幅值的基础加上 4 mm,即是将加载历程修正为 1/600 (9 mm)、1/300 (14 mm)、1/200 (20 mm)、1/150 (26 mm)、1/100 (36 mm)、1/75 (47 mm)、1/50 (68 mm) 支撑长度。

3 试验过程与试验现象

试件 I-A 加载至 1/600 时,受压的过程中钢管

和混凝土间产生轻微的摩擦声,支撑一端在靠近加劲板处的混凝土抹灰层局部脱落;加载至 1/300 时,抹灰脱落增多;加载至 1/200 时,支撑另一端混凝土出现细小裂缝,但支撑仍然保持整体稳定,承载力稳定提高;加载至 1/150 时,钢管和混凝土间摩擦声增大,混凝土裂缝进一步加大,但支撑整体仍处于稳定状态,没有出现整体和局部的屈曲现象;加载至 1/100 时,混凝土明显破碎,受拉过程中被拉出,说明混凝土和核心钢管间摩擦力较大;加载至 1/50 时,受压过程中端部约束钢板裂缝裂开,混凝土完全开裂,如图 5(a) 所示,支撑承载力下降,在受拉时,听到一声巨响,钢管被拉断,支撑失效。在试验之后,打开外包的约束钢板,如图 5(b) 所示,可见混凝土完全开裂和核心钢管断裂。图 5(c) 为钢管拉断位置,核心钢管断口粗糙,有局部鼓起屈曲的迹象。

试件 I-B 的试验现象与 I-A 基本一致,试件在加载至 1/100 第 1 圈时,其中一端约束钢板焊缝裂开。在第 2 圈受压过程中,支撑出现了局部屈曲,承载力下降;受拉过程中,突然听到钢管断裂的声音,支撑承载力下降,支撑失效。试验完成后,将开裂的端部约束钢板打开,端部混凝土完全碎裂,如图 6(a) 所示。敲碎混凝土,发现核心钢管的端部被撕裂,如图 6(b) 所示;且撕裂处有局部屈曲现象,如图 6(c) 所示。

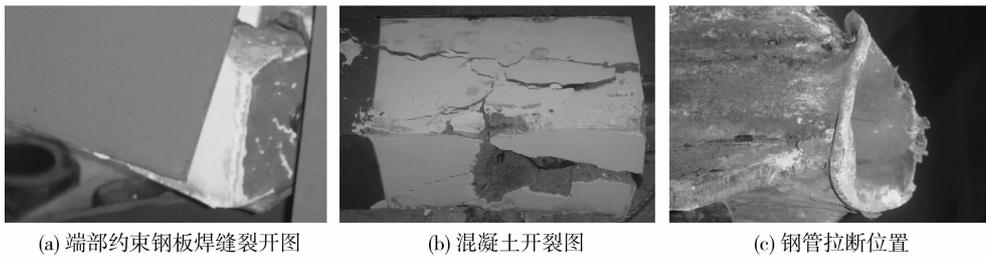


图 5 试件 I-A 试验过程破坏图

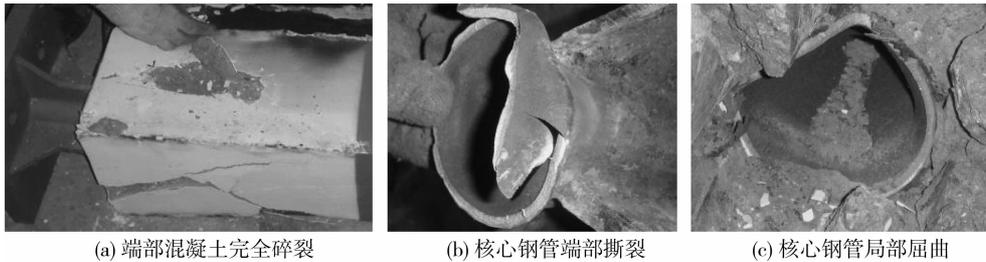


图 6 试件 I-B 试验过程破坏图

前 2 个试件均为端部混凝土破坏及约束钢板焊缝裂开,为了降低端部破坏对支撑的整体性能的影响,对试件 II-A 的端部约束钢板焊缝进行了补焊处理。

II-A 在加载至 $1/600$ 时,受压过程中能够听到核心钢管和混凝土间轻微的摩擦声,支撑一端在靠近加劲板处的混凝土抹灰层局部脱落;加载至 $1/300$ 时,抹灰脱落增多,端部混凝土没有出现裂缝,随着位移的增大,力平稳增加;加载至 $1/200$ 时,抹灰层脱落端的混凝土开裂,支撑整体稳定,承载力稳定提高;加载至 $1/150$ 时,原本开裂的混凝土裂缝明显增大,另一端的混凝土也出现微裂缝;加载至 $1/100$ 时,混凝土严重开裂,如图 7(a)所示,但约束钢板焊缝没有开裂,说明试验前的补焊发挥了其应有的效

果,支撑整体承载力稳步提高;加载至 $1/75$ 时,在第 1 圈受压过程中,右端的钢板的焊缝开裂。在受压时,理论上外包的钢筋混凝土是可以滑动的,但是由于采用的无粘结材料橡胶的摩擦系数比想象要大,于是出现了外包钢筋混凝土随着核心钢管的压缩而移动,最后与加劲板发生碰撞,端部混凝土被压碎和外包钢板的焊缝开裂如图 7(b)所示。进入第 2 圈时,随着位移的增大,支撑的承载力突然出现下降,随后逐步增长。在受拉时,左端的混凝土开裂严重,混凝土被拉裂随后被拉出,突然听到一声巨响,核心钢管被拉断,支撑失效。取出核心钢管的端部,如图 7(c)所示,核心钢管先被压鼓,后被拉断,再被压扁。

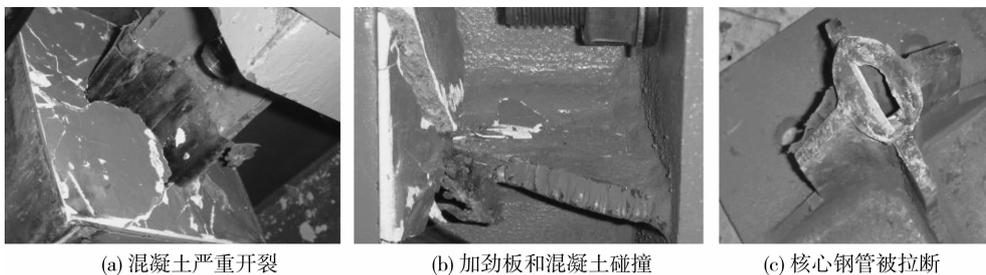


图 7 试件 II-A 试验过程破坏图

试件 II-A 外包钢套管的焊缝处仍然发生了破坏,表明对焊缝进行补焊加强没有避免焊缝破坏,因此在试件 II-B 和 III-A/B 端部约束钢板的棱角上焊接角钢进行加固,如图 8 所示。试件 II-B 加载至 $1/100$ 时,由于加固角钢,混凝土的开裂没有 II-A 明显;加载至 $1/75$ 时,支撑的承载力仍稳定增加,进入该幅值下第二圈滞回加载时,支撑的承载力有一定程度的下降。受拉过程中,混凝土严重开裂,出现一

声巨响,核心钢管被拉断,支撑失效。



图 8 采用角钢加固后的端部约束钢板

由于实验室作动器的出力吨位的限制,试件 III-

A/B 的加载历程改为 1/600 (9 mm)、1/300 S(14 mm)、1/200 (20 mm, 拉为 14 mm)、1/150 (26 mm, 拉为 14 mm)、1/100 (36 mm, 拉为 14 mm)、1/75(47 mm, 拉为 14 mm)、1/50(68 mm, 拉为 14 mm), 每个幅值加载 2 圈。

试件Ⅲ-A 加载至 1/600 时, 受压过程中, 核心钢管和混凝土间产生轻微的摩擦声, 支撑一端靠近加劲板的混凝土抹灰层局部脱落, 另一端混凝土出现微小的裂缝; 加载至 1/300 时, 抹灰脱落增多, 一端开始出现裂缝; 加载至 1/200 时, 支撑一端混凝土开裂, 但承载力仍稳定提高; 加载至 1/150 时, 支撑两端的混凝土裂缝明显增大; 加载至 1/100 时, 核心钢管和混凝土间产生较大的摩擦声, 混凝土开裂, 第 2 圈受拉过程中, 突然出现一声巨响, 核心钢管被拉断, 支撑承载力下降, 支撑失效。从图 9 可以看出, 核心钢管的断口非常平滑, 钢管没有发生明显的外凸和内凹的现象, 钢管发生了脆性断裂破坏。

试件Ⅲ-B 加载至 1/100 时, 核心钢管和混凝土间产生较大摩擦声, 混凝土开裂, 该幅值加载结束时, 两端混凝土开裂严重; 加载至 1/75 时, 受压过程中支撑整体稳定, 承载力稳定提高, 受拉过程中, 核心钢管被拉断, 支撑的承载力下降, 支撑失效, 如图 10 所示。且由图可知, 钢管发生了脆性断裂破坏。

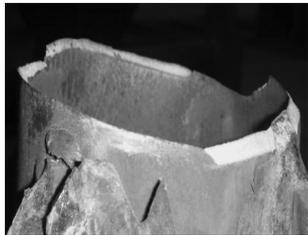


图 9 试件Ⅲ-A 加载至 1/150 时核心钢管断裂图



图 10 试件Ⅲ-B 加载至 1/150 时核心钢管断裂图

图 11、图 12 和图 13 分别给出了试件 I-A/B、II-A/B 和 III-A/B 的滞回曲线。其中图 13(a) 为 1/150、1/100 时的滞回曲线。

4 结果分析

4.1 新型外包钢筋混凝土钢管防屈曲耗能支撑滞回性能分析

从图 11 至图 13 中可以看出, 各试件的滞回曲线饱满、稳定, 但存在一定程度的拉压差, 其原因为

采用的 1.5 mm 厚橡胶层在加载位移过大时, 变形能力不够, 核心钢管在受压过程中与外包的钢筋混凝土之间产生较大的摩擦力, 导致支撑的受压承载力大于受拉承载力, 这与试验受压加载过程中出现摩擦声响的试验现象基本吻合。因此, 实际使用中应进行相关的性能试验以确保其脱层效果或采用其他更优良的无粘结材料。

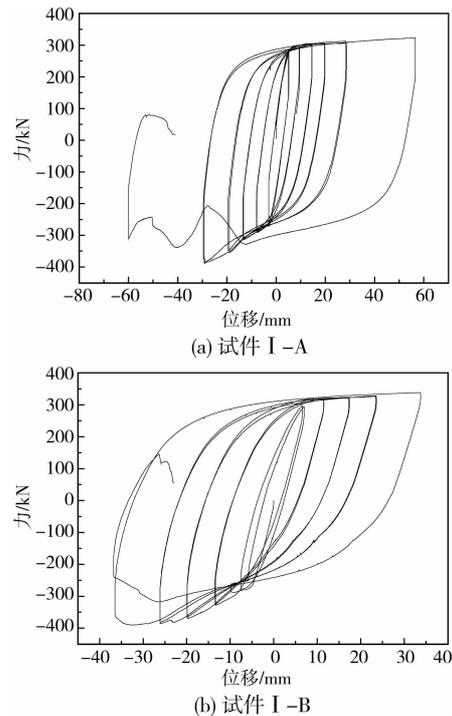


图 11 试件 I-A/B 的滞回曲线

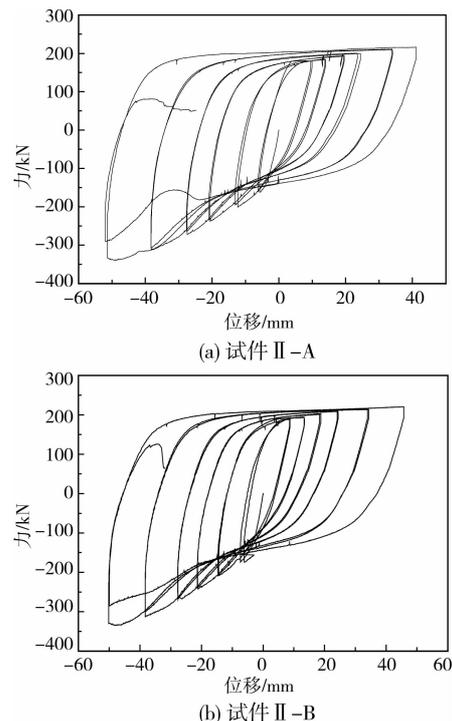


图 12 试件 II-A/B 的滞回曲线

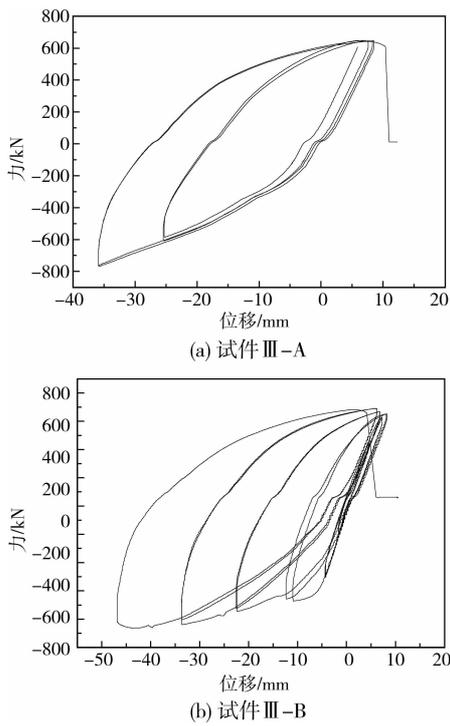


图 13 试件 III-A/B 的滞回曲线

防屈曲耗能支撑的抗压强度调整系数 β 和抗拉强度调整系数 ω 是衡量支撑性能的 2 个重要的参数,其具体定义见文献[14]。取加载值为 1/150、1/100和 1/75 时的压力和拉力的比值,如表 2 所示。由表可知, β 值基本在文献[14]规定的限值之内,说明在小位移下,新型外包钢筋混凝土钢管防屈曲耗能支撑采用橡胶层作为无粘结层及其厚度值是合适的。但是试件 II-A/B 在大位移加载(1/50)时,最大轴向压力远远超过了轴向拉力, β 值超出了限值,其原因为橡胶层在加载位移过大时,变形能力不够,核心钢管与混凝土之间产生的摩擦力较大,从而导致抗压调整系数 β 变大; ω 值在 1.21~1.26 之间,表明支撑内核构件钢材发生了较大的应变强化,新型外包钢筋混凝土钢管防屈曲耗能支撑能充分发挥钢材的强度。

表 2 试件的抗压强度调整系数 β 和抗拉强度调整系数 ω

| 型号 | 位移 | | | ω |
|------|---------------|---------------|--------------|----------|
| | $\beta-1/150$ | $\beta-1/100$ | $\beta-1/75$ | |
| I-A | 1.17 | 1.26 | — | — |
| I-B | 1.14 | 1.15 | — | 1.21 |
| II-A | 1.19 | 1.23 | 1.46 | 1.24 |
| II-B | 1.14 | 1.25 | 1.40 | 1.26 |

新型外包钢筋混凝土钢管防屈曲耗能支撑的滞回曲线饱满稳定,具有优良的耗能减震效果,抗压

强度调整系数和抗拉强度调整系数在规定的限值范围之内,表明该新型外包钢筋混凝土钢管防屈曲耗能支撑的设计思想是可行的。

4.2 骨架曲线与恢复力模型

图 14 和图 15 是试件 I-A/B 和 II-A/B 的轴力与轴向变形的骨架曲线。受拉与受压过程中,试件 I-A 和 I-B 第 2 刚度存在一定程度的分离,其原因为试件 I-B 的端部焊缝进行了加固,因此屈服后的承载能力高于试件 I-A;试件 II-A 和 II-B 的骨架曲线基本吻合,其原因为皆采用了角钢加固焊缝,且发挥了期望中的效果。

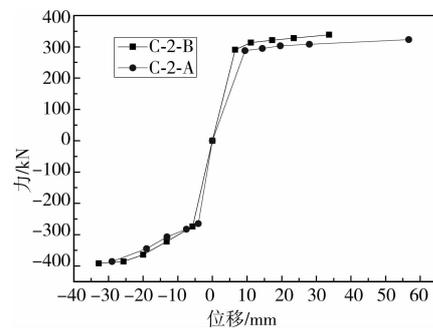


图 14 试件 I-A/B 骨架曲线

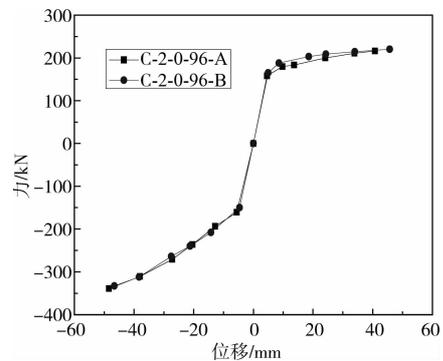


图 15 试件 II-A/B 骨架曲线

试件 I-A/B 和 II-A/B 受拉阶段的第 2 刚度均小于受压阶段的第 2 刚度,其原因仍是无粘结材料层在加载位移过大时,其变形能力不够,导致支撑在受压过程中核心钢管和外约束混凝土之间存在较大的摩擦力,使得轴向压力增大。

总体上,2 组试件的骨架曲线可以分为 2 阶段,第 1 阶段为弹性阶段,第 2 阶段为塑性阶段,第 2 刚度(塑性刚度)在第 1 刚度(弹性刚度)的 2.2%~5%之间。新型外包钢筋混凝土钢管防屈曲耗能支撑的恢复力模型可用如图 16 所示的双线性模型来描述。

4.3 破坏特征及基本原因

试验过程中,各个试件的破坏特征均是在受拉加载过程中核心钢管被拉断,新型外包钢筋混凝土

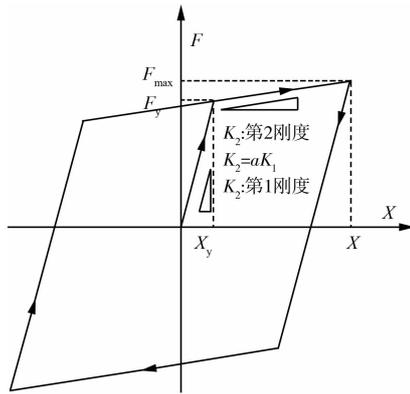


图 16 双线性恢复力模型

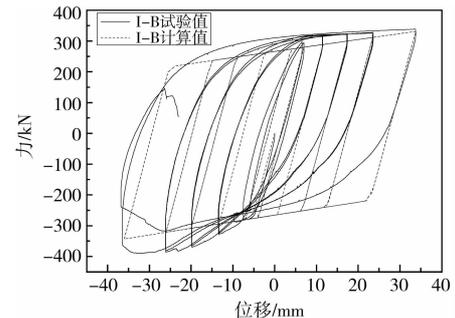
钢管防屈曲耗能支撑的具体失效过程为:首先核心钢管挤压外包钢筋混凝土的端部开裂,然后开裂的混凝土块挤压端部的钢板焊缝断裂,最后在受拉过程中核心钢管被拉断。破坏模式主要分为 2 类:一是核心钢管在端部发生局部屈曲后被拉断,如试件 I-A/B 和 II-A/B;二是核心钢管在受拉阶段直接被拉断,如试件 III-A/B。

产生这种破坏的主要原因是:1)核心钢管钢材为高强钢,且钢材的伸长率偏小、弹性模量偏高,核心钢管延性低;2)橡胶层硬度过大,变形能力较差,脱层效果不理想,不能提供足够的空间以满足核心钢管受压膨胀所需的变形,导致核心钢管承受的轴力增加;3)外包钢筋混凝土端部的约束不足,造成端部混凝土在加载后期被压碎。

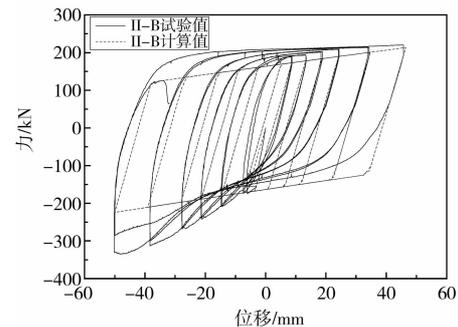
4.4 有限元分析与试验结果对比

为了对比新型外包钢筋混凝土钢管防屈曲耗能支撑的试验结果和数值模拟结果,采用 ABAQUS 对 I-B 和 II-B 进行有限元模拟分析。钢材采用 8 节点六面体线性减缩积分单元(C3D8R),该单元适合弹塑性分析和接触分析钢材的本构模型^[15],材料模型采用双线性随动强化模型,弹性模量 E 取为 3.02×10^5 MPa,泊松比 ν 为 0.3,第 2 塑性模量 E' 为 $2.5\%E$;钢筋骨架采用 Embedded 嵌固到混凝土中,采用桁架单元(T3D2),弹性模量 E_s 取为 2.1×10^5 MPa,泊松比 ν 为 0.3,第 2 塑性模量 E_s' 为 $2.0\%E_s$;外包混凝土采用 8 节点六面体线性减缩积分单元(C3D8R),材料模型定义为线弹性体,不考虑其塑性,弹性模量 E_c 取为 3.00×10^4 MPa,泊松比 ν 为 0.3。核心钢管与约束混凝土之间设接触对,接触对由主面和从面构成,本文选凸面为主面,凹面为从面,从面的网格比主面的网格密。接触属性中的接触面法向作用采用默认的“硬接触”,切向作用采用默认值。

图 16 给出了试验和数值计算所得的试件滞回曲线对比情况。由图可知,试验与模拟的滞回曲线总体吻合较好。受拉刚度基本一致,而受压刚度稍有分离,并且试验中的最大压力比模拟的大,引起差别的原因是试件模拟过程中不考虑切向的摩擦作用,支撑的拉压力平衡。在相同位移幅值下,试验中核心钢管承受的压力比模拟的大,导致试验与模拟的受压刚度曲线分离。



(a) 试件 I-B



(b) 试件 II-B

图 17 试验和计算滞回曲线对比

5 结论与建议

对新型外包钢筋混凝土钢管防屈曲耗能支撑进行了试验研究和有限元模拟分析,得到以下结论:

1)新型外包钢筋混凝土钢管防屈曲耗能支撑构造合理,外约束形式采用钢筋混凝土的设计思路是可行的。

2)新型外包钢筋混凝土钢管防屈曲耗能支撑滞回曲线饱满,耗能性能优良。

3)新型外包钢筋混凝土钢管防屈曲耗能支撑承载特性稳定,但存在一定程度的拉压差。

4)新型外包钢筋混凝土钢管防屈曲耗能支撑的恢复力模型简化为双线性模型。

针对新型外包钢筋混凝土钢管防屈曲耗能支撑试验现象及其分析结果,建议:

1)应对端部钢筋混凝土箍筋进行加密或对加厚端部约束钢板,防止端部提前破坏。

2)应对无粘结材料的脱层能力进行测试,以确保其脱层效果。

3)应选用低屈服点钢材,如 Q235,并进行材性试验,确保核心钢管具有足够的延性性能。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] XIE Q. State-of-the-art of buckling-restrained braces in Asia[J]. Journal of Construction Steel Research, 2005, 61(6):727-748.
- [3] 汪家铭, 中岛正爱, 陆焯. 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. WANG CHIAMING, NAKASHIMA M ASAYOSHI, LU YE. The practice and research development of buckling-restrained braced frames (I) [J]. Progress in Steel Building Structures, 2005, 7(1):1-12.
- [4] JUAN ANDRES OVIEDO A, MITSUMASA MIDORIKAWA. Optimum strength ratio of buckling-restrained braces as hysteretic energy dissipation devices installed in R/C frames [C]//The 14th World Conference on Earthquake Engineering, October 12-17, 2008, Beijing, China.
- [5] Mario D'Aniello, Gaetano delia corte, Federico M MAZZOLANI. Experimental tests of a real building seismically retrofitted by special buckling-restrained braces[J]. AIP Conference Proceedings, 2008, 1020(1):1513-1520.
- [6] TAKEUCHI T, HAJJAR J F, MATSUI R, et al. Local buckling restraint condition for core plates in buckling restrained braces[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2010 (66): 139-149.
- [7] 加藤基規, 葛西昭, 等. 二重鋼管型座屈拘束ブレースの繰り返し弾塑性挙動[C]//構造工学論文集, 50, 2004:103-112.
- [8] 石井匠, 藤澤一善, 清水孝憲, 等. 二重鋼管ブレースを用いた既存 RC 構造物の制振補強構法[J]. JFE 技報, 2005, 12:66-72.
- [9] YUJI KOETAKA, TOMOHIRO KINOSHITA, KAZUO INOUE, et al. Criteria of buckling-restrained braces to prevent out-of-plane buckling [C]// The 14th World Conference on Earthquake Engineering, October 12-17, 2008, Beijing, China.
- [10] 钱洪涛. 新型防屈曲耗能支撑性能研究及其在钢结构中的应用研究[D]. 广州: 广州大学, 2008.
- [11] 杨叶斌, 邓雪松, 钱洪涛, 等. 二重钢管防屈曲支撑的性能研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2010, 32(2):75-80. YANG YE-BIN, DENG XUE-SONG, QIAN HONG-TAO, et al. Study on the performance of double-steel tube buckling-restrained brace [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2010, 32 (2):75-80.
- [12] 贾建坡. 双管式屈曲约束支撑力学性能的试验研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2008.
- [13] 赵根田. 双套管防屈曲支撑的抗震性能的实验研究[J]. 内蒙古科技大学学报, 2009, 28(3):233-237. ZHAO GEN-TIAN. Research on the antiseismic behavior of the sleeved colum of buckling-restrained brace [J]. Journal of Inner Mongolia University of Science and Technology, 2009, 28 (3):233-237.
- [14] American Institute of Steel Construction (AISC). Seismic Provisions for Structural Steel Buildings [S]. Chicago: AISC, 2005.
- [15] 石亦平, 周玉蓉. ABAQUS 有限元分析实例详解[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006:51-58.

(编辑 胡 玲)

(上接第 11 页)

- [11] 高光发, 李永池, 罗文超, 等. 集团装药爆炸下新型结构的削波性能[J]. 土木工程与环境工程, 2011, 33(3):57-62. GAO GUANG-FA, LI YONG-CHI, LUO WEN-CHAO, et al. Clipping performance of advanced structure under explosion of mass ammunition [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2011, 33(3):57-62.
- [12] 高光发, 李永池, 赵凯, 等. 柱壳结构的屏蔽效应及对应力波的削弱作用[J]. 振动与冲击, 2011, 30(12):195-200. GAO GUANG-FA, LI YONG-CHI, ZHAO KAI, et al. Screening and attenuation effects on stress waves of cylindrical shell in defense layer [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(12):195-200.
- [13] HOLMQUIST T J, JOHNSON G R, COOK H W. A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates, and high pressures [C]//Proceedings of 14th International Symposium on Ballistics, Que., Canada, 1993: 591-600.

(编辑 胡英奎)