

[文章编号] 1003-4684(2019)01-0030-04

新型钢管装配式屈曲约束支撑有限元分析

李 红, 肖本林, 吴伟波, 刘 倍

(湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068)

[摘 要] 对现有屈曲约束支撑进行分析和总结, 提出一种新型钢管装配式屈曲约束支撑, 用 ABAQUS 软件对其进行有限元分析, 对比研究其抗震性能与开孔二重圆管屈曲约束支撑及开孔三重圆管屈曲约束支撑的抗震性能, 分析轴向齿轮排数、同轴齿轮大小齿轮直径之比、连接形式对支撑性能的影响。研究表明: 在长度和耗能构件截面面积都相同且达到相同屈服状态条件下, 新型钢管装配式屈曲约束支撑耗能能力最好; 轴向齿轮排数宜大于 2 排; 同轴齿轮大小齿轮直径之比不宜大于 3; 支撑的连接形式宜设计成固接。

[关键词] 屈曲约束支撑; 有限元分析; 耗能能力; 地震作用

[中图分类号] TU352.1

[文献标识码] A

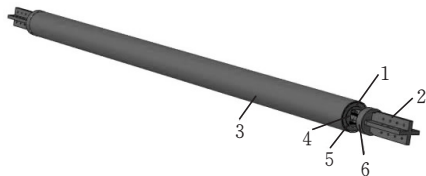
屈曲约束支撑(buckling-restrained brace, 简称 BRB)由外套筒和核心构件组成。BRB 能抵抗结构遭受的侧向力。BRB 受众值烈度地震影响时处于弹性工作状态, 受基本烈度及最大预估烈度地震影响时屈服耗能^[1-3]。BRB 的耗能能力主要受两个因素的影响: BRB 核心消能段的截面积; BRB 核心消能段的材料^[4]。BRB 核心消能段的截面积, 影响着 BRB 构件的刚度, 进而影响布置 BRB 的结构整体刚度, 从而改变了输入结构的地震作用^[5-6], 当 BRB 核心消能段截面积较大时, 容易使结构受力不均, 产生应力集中现象。而且为了使 BRB 能在其他结构构件屈服之前先进入屈服耗能状态, BRB 的核心消能段截面积需控制在合理范围。低屈服强度钢材的耗能能力显著优于普通钢材。但是国内生产低屈服钢材的技术不太成熟, 低屈服强度钢材的价格比较贵, 采购周期较长, 性价比远不及 Q235 作为芯材的 BRB。

增加 BRB 耗能能力时, 核心段截面积受限, 增加 BRB 的刚度容易使结构局部刚度过大, 使结构受力不均, 且提高了输入结构的地震作用; 考虑到低屈服点钢材价格, 本文提出一种新型钢管装配式屈曲约束支撑(steel tube assembled buckling-restrained brace, 简称 TBRB)。在不改变 BRB 总长度和耗能段材料的前提下, 增加了耗能段屈服后的位移, 从而增加了核心构件滞回环的面积, 即增加了 BRB 的耗

能能力。利用 ABAQUS 软件对 TBRB 进行分析, 研究了其耗能能力, 并将其耗能能力与开孔二重钢管屈曲约束支撑(perforated double-steel tube buckling-restrained brace, 简称 DBRB)^[7]和开孔三重钢管屈曲约束支撑(perforated triple-steel tube buckling-restrained brace, 简称 tBRB)^[8]的耗能能力进行了对比分析。

1 新型钢管装配式屈曲约束支撑的构造与特点

新型钢管装配式屈曲约束支撑的主要构件有端部构件、发条、同轴齿轮、轴承、内核心管、外核心管、外约束管, 组装好的 TBRB 见图 1, 剖面图见图 2。采用电弧焊的方式将外约束管一端与端部盖板连接在一起。图 3 为支撑端部示意图, 支撑端部和支撑内核心管通过同轴齿轮两两啮合连接, 外核心管通过轴承固定同轴齿轮, 限制其轴向位移。



1—外核心管; 2—端部固接; 3—外约束管;
4—内核心管; 5—发条; 6—端部盖板

图 1 TBRB 三维模型

[收稿日期] 2018-03-07

[第一作者] 李 红(1991—), 男, 湖北仙桃人, 湖北工业大学硕士研究生, 研究方向为结构工程

[通信作者] 肖本林(1962—), 男, 湖南安乡人, 湖北工业大学教授, 研究方向为土木工程与建筑学

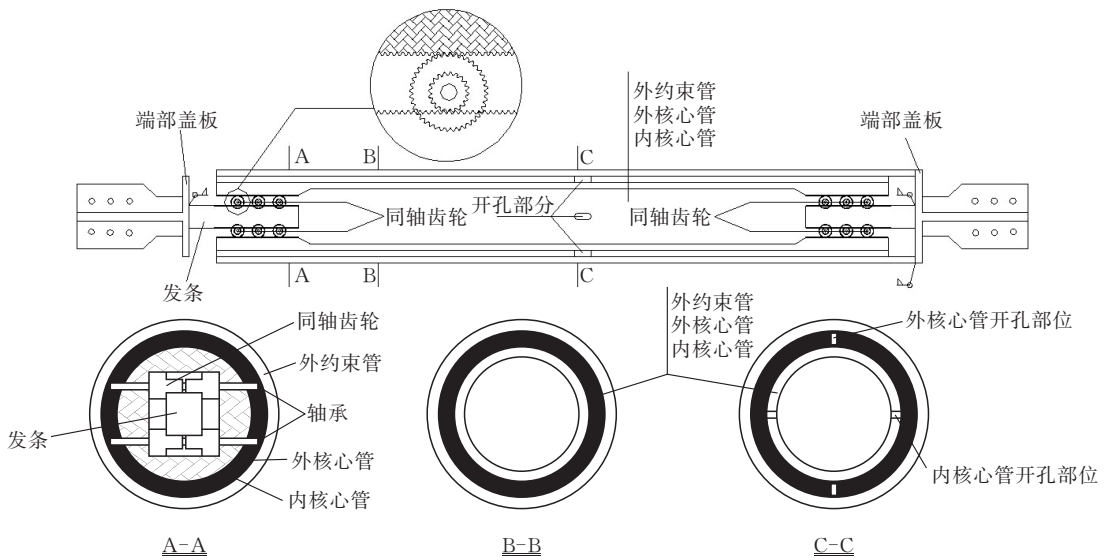


图 2 TBRB 截面

2 模型设计

1) 设计了 TBRB-2、开孔二重钢管屈曲约束支撑(DBRB)、开孔三重钢管屈曲约束支撑(tBRB)共三根支撑,用于研究 TBRB 的抗震性能,这三根支撑的核心管截面形式、管上开孔形式和大小、管的屈服长度均相同。

2) 为了考察支撑端部不同齿轮排数对支撑耗能能力的影响,共设计了 TBRB-1~4 共 4 个构件,其具体设计参数见表 1,其中各构件的同轴齿轮型号一致。

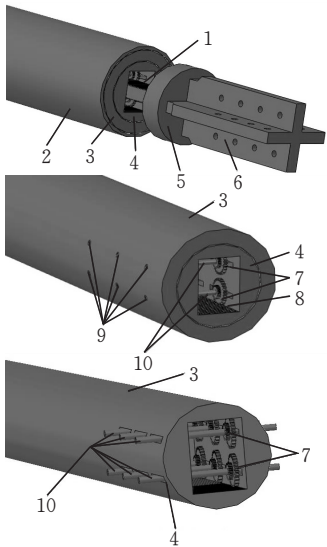
3) 设计了 TBRB-4~7 共 4 个构件,用于研究同轴齿轮上大、小齿轮直径之比对 TBRB 耗能能力的影响,具体设计参数见表 1,其中各构件轴向齿轮排数控制为 3。

4) 为了考察支撑端部与结构物的不同连接形式对支撑抗震性能的影响,分别设计了 2 个构件: TBRB-4 采用固接;TBRB-8 采用铰接。

3 有限元模型的建立

3.1 单元的选择与材料的本构

采用 ABAQUS/Standard 通用分析模块进行数值模拟,按照表 1^[8]设定的参数,分别建立各个构件的三维立体模型。本文 TBRB 接触关系复杂,ABAQUS 分析很难收敛,且本文分析的主要目的是验证 TBRB 的耗能能力,并研究其主要设计参数对 TBRB 耗能能力的影响。为了降低分析难度并节约时间,TBRB 的发条、轴承和同轴齿轮采用离散刚体建模,其他构件均采用三维实体单元建模,构件的模拟均使用 C3D8R 单元。采用 Q235 级钢材,钢材的本构模型采用双线性随动强化模型,屈服强度



1—发条与同轴齿轮啮合面;2—外约束管;3—外核心管;
4—内核心管;5—端部盖板;6—端部固接;7—同轴齿轮;
8—同轴内核心管啮合面;9—外核心管上轴承固定孔;10—轴承

图 3 TBRB 端部详图

图 4 为 TBRB 的简图,当结构受到侧向力作用,TBRB 两端产生轴向相对位移时,支撑端部构件通过发条带动内核心管的移动,通过同轴齿轮放大大内核心管端部的位移,在支撑端部产生相同位移的情况下,相比传统的屈曲约束支撑,TBRB 通过齿轮放大了屈服耗能段屈服后滞回耗能的位移,即增加了 TBRB 滞回环的面积,使 TBRB 在地震作用下能吸收和消耗更多的地震能量。

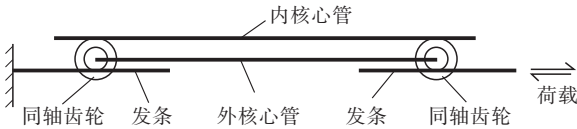


图 4 TBRB 构造简图

$f_y = 235$ MPa,弹性模量 $E_s = 2.06 \times 10^5$ MPa,切线模量 $E_t = 0.02E_s$,泊松比 $\nu = 0.3$ 。

3.2 接触定义

TBRB 外约束管和端部盖板焊接部位定义为绑定约束。其他构件之间设置接触对,接触对由主面和从面构成,本文均选凸面为主面,凹面为从面,其

他接触对中,选刚体表面为主面,另一个接触面为从面,接触属性中的接触面法向作用采用“硬接触”,选用有限滑移摩擦公式,接触面的切向作用采用 Frictionless。因为钢管之间设有间隙,所以不考虑各构件之间的摩擦作用,摩擦系数默认为零。

表 1 试件参数表

试件	外约束管/cm	外核心管/cm	内核心管/cm	支撑端部轴向齿轮		连接形式	核心管中部轴向开孔排数/个	各管之间间隙/cm
	$L_r \times B_r \times T_r$ (长×直径×厚)	$L_w \times B_w \times T_w$ (长×直径×厚)	$L_n \times B_n \times T_n$ (长×直径×厚)	排数	大齿轮直径/ 小齿轮直径			
TBRB-1	800×19.75×0.5	800×19.05×0.7	800×16.8×0.75	2	2	固接	1	0.1
TBRB-2	800×19.75×0.5	800×19.05×0.7	800×16.8×0.75	3	2	固接	1	0.1
TBRB-3	800×19.75×0.5	800×19.05×0.7	800×16.8×0.75	4	2	固接	1	0.1
TBRB-4	800×19.75×0.5	800×19.05×0.7	800×16.8×0.75	5	2	固接	1	0.1
DBRB	800×19.75×0.5	800×19.05×0.7	—	3	—	固接	1	0.1
tBRB	800×19.75×0.5	800×19.05×0.7	800×16.8×0.75	3	—	固接	1	0.1
TBRB-5	800×19.75×0.5	800×19.05×0.7	800×16.8×0.75	3	1.5	固接	1	0.1
TBRB-6	800×19.75×0.5	800×19.05×0.7	800×16.8×0.75	3	2.5	固接	1	0.1
TBRB-7	800×19.75×0.5	800×19.05×0.7	800×16.8×0.75	3	3	固接	1	0.1
TBRB-8	800×19.75×0.5	800×19.05×0.7	800×16.8×0.75	3	2	铰接	1	0.1

3.3 加载制度与边界条件

采用控制轴向位移的加载方式进行数值分析。加载采用变形幅值不断增大的位移控制循环加载,位移幅值分别为 $l/300$ (26.7 mm)、 $l/200$ (40 mm)、 $l/150$ (53.3 mm)、 $l/100$ (80 mm), l 为支撑长度。采用三角波逐级加载,每级加载两圈。

4 有限元结果分析

4.1 TBRB 耗能能力对比

TBRB-2、DBRB 和 tBRB 三根支撑进行有限元分析得到的滞回曲线如图 5 所示。

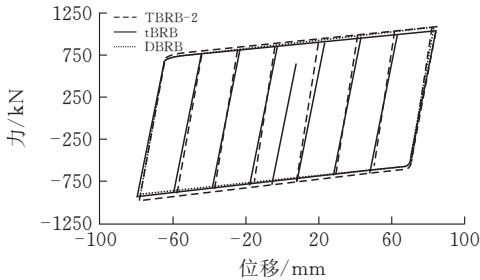


图 5 TBRB-2、tBRB 和 DDBRB 的滞回曲线

由图 5 可知,新型钢管装配式屈曲约束支撑滞回曲线稳定、饱满,滞回能力较好;TBRB-2 最外围滞回环面积明显比 DDBRB 和 tBRB 的最外围滞回环面积要大,即 TBRB-2 耗能能力最好;TBRB-2 的轴力绝对值位于 736 kN 左右时,支撑外核心管进入

屈服阶段,在图 5 的滞回曲线上留下一个拐点,象征着支撑从弹性工作状态进入了屈服耗能工作状态,说明 TBRB-2 能实现两阶段耗能。

4.2 轴向齿轮排数的影响

TBRB-1、TBRB-2、TBRB-3 和 TBRB-4 的滞回曲线见图 6,由图可知,齿轮个数沿支撑端部轴向排数为 2 时,支撑发生了整体失稳,当支撑端部轴向齿轮排数大于 2 时,支撑的滞回曲线模拟数值几乎相等,即此时改变支撑轴向齿轮排数,对支撑滞回性能影响很小,因此,支撑端部沿轴向齿轮排数宜大于 2。

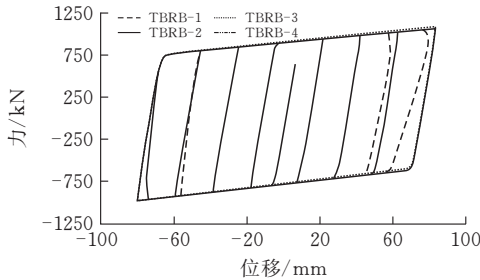


图 6 TBRB-1、TBRB-2、TBRB-3 和 TBRB-4 滞回曲线

4.3 同轴齿轮上大、小齿轮直径之比影响分析

TBRB-4、TBRB-5、TBRB-6、TBRB-7 的滞回曲线见图 7。

由图 7 可知,支撑滞回曲线的饱满程度和同轴齿轮上大、小齿轮直径之比成正比。即大、小齿轮直

径之比越大,支撑的耗能性能越好。当齿轮直径的比值达到 3 时,由图 7 可知,支撑发生了屈曲,极大地降低了支撑的刚度,导致支撑的耗能性能大幅下降。

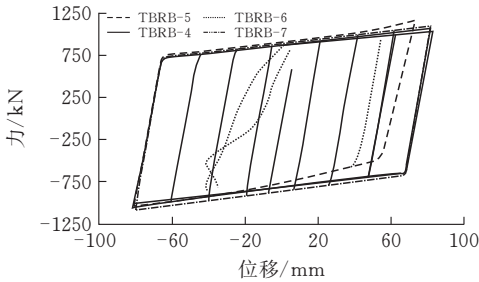


图 7 TBRB-4、TBRB-5、TBRB-6 和 TBRB-7 滞回曲线

TBRB-4、TBRB-5、TBRB-6、TBRB-7 的承载力如图 8 所示。由图 8 可知,在支撑端部相对位移一定时,增加支撑齿轮直径的比值,支撑的轴力增大。当支撑齿轮直径的比达到 3 时,支撑失稳破坏,支撑的轴力迅速降低。

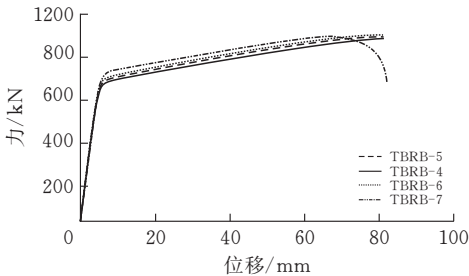


图 8 TBRB-4、TBRB-5、TBRB-6 和 TBRB-7 的位移和轴力

4.4 连接形式的影响

控制支撑齿轮型号和支撑端部轴向齿轮排数时,支撑端部与结构物的连接形式分别采用铰接和固接连接时,支撑滞回曲线模拟结果如图 9 所示。由图 9 可知,当支撑的端部采用铰接连接时,在较大位移的作用下,支撑容易发生失稳破坏,导致支撑失去滞回耗能能力,当支撑端部采用固接时,支撑的滞回曲线稳定、饱满,支撑的抗震性能较好。由此可知,支撑端部宜采用固接连接。

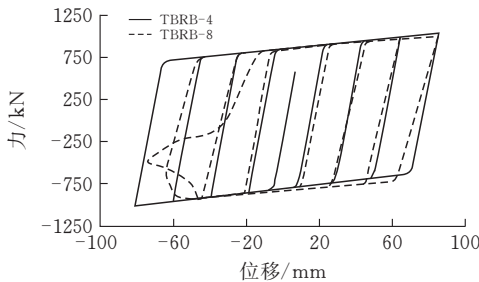


图 9 TBRB-4、TBRB-8 的滞回曲线

5 结论

- 1) 新型钢管装配式屈曲约束支撑滞回曲线规则饱满,具有稳定的耗能能力。
- 2) 可以通过调节 TBRB 内、外核心的截面面积相对大小,使 TBRB 在不同烈度的地震作用下,分阶段屈服。
- 3) 相同长度的 TBRB、DBRB 和 tBRB 耗能核心的材料和截面面积相等时,TBRB 的耗能能力最好。
- 4) TBRB 端部齿轮排数宜大于 3 排。
- 5) TBRB 中同轴齿轮大、小齿轮直径之比增大时,支撑的耗能能力随之增大,比值增大到 3 时,支撑易发生整体失稳,建议同轴齿轮大小齿轮直径之比小于 3。
- 6) TBRB 端部宜采用固接连接。

[参 考 文 献]

[1] 胡宝琳,李国强,孙飞飞. 屈曲约束支撑体系的研究现状及其国内外应用[J]. 四川建筑科学研究,2007(4): 9-13.

[2] 谢伟,余绍锋. 屈曲约束支撑研究进展及发展趋势[J]. 钢结构,2015,30(12):8-12.

[3] 谢强,赵亮. 屈曲约束支撑的研究进展及其应用[J]. 钢结构,2006(1):46-48.

[4] 万泽青,刘平. 低屈服点钢在结构耗能减震中的应用[J]. 钢结构,2010,25(2):35-38.

[5] 陈斯聪,周云. BRB+VD 消能减震结构体系分析研究[J]. 建筑结构,2016,46(11):85-90.

[6] 邓雪松,杨叶斌,陈真,周云,邹征敏. 二重钢管防屈曲耗能支撑的有限元分析[J]. 地震工程与工程振动, 2011,31(6):96-101.

[7] 陈真,褚洪民,邓雪松,周云. 开孔三重钢管防屈曲耗能支撑有限元分析[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2010,49(3):140-145.

[8] 李红. 新型钢管装配式屈曲约束支撑的抗震性能研究[D]. 武汉:湖北工业大学,2018

(下转第 51 页)