

文章编号: 1673-9469 (2017) 03-0001-05

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2017.03.001

一字形芯钢管混凝土防屈曲支撑分析研究

杨士萱¹, 史三元¹, 郝科语², 王天龙¹

(1. 河北工程大学土木工程学院, 河北邯郸 056038; 2. 中国建筑一局有限公司深圳分公司, 广东深圳 518000)

摘要: 利用有限元分析软件 ANSYS 对普通支撑和一字形钢管混凝土防屈曲支撑进行模态分析, 通过对比两种支撑的模态云图和振型参数来研究加约束的一字型芯钢混防屈曲支撑的优劣势和临界荷载变化及其失稳的位置。分析一字形钢管混凝土防屈曲支撑的滞回耗能, 防屈曲支撑的摩擦系数和填充混凝土的强度因素。得到以下结论: 一字形芯更容易出现 y 轴方向的弯曲失稳, 框架结构的刚度以及自振周期能够通过安装一字形钢混屈曲支撑而发生明显改变。

关键词: 防屈曲支撑; ANSYS; 屈曲模态分析; 滞回性能;

中图分类号: TU37

文献标志码: A

Analysis of the rectangle section BRB with concrete-filled tubes

YANG Shixuan¹, SHI Sanyuan¹, HAO Keyu², WANG Tianlong¹

(1.School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, P.R.China;

2.China Construction Bureau co. Ltd. Shenzhen branch, Guangdong Shenzhen, 518000, China)

Abstract: The finite element analysis software (ANSYS) is used to carry out the modal analysis of the common brace and buckling restrained brace. The advantages and disadvantages of the two kinds of support modes are compared. On the basis of modal analysis, the buckling mode of the structure is analyzed. The critical load changes and instability position are also studied. The friction coefficient of the buckling restrained brace and the strength of the filled concrete are analyzed. The results show that the bending of the Y axis is easier to occur in one core, and the stiffness and the natural vibration period of the frame structure can be obviously changed by installing a steel shaped hybrid buckling brace.

Key words: buckling-restrained brace; ANSYS; buckling mode analysis; hysteretic performance

防屈曲支撑 (buckling-restrained brace, 简称 BRB) 是一种新型的金属受拉和受压达到屈服的耗能支撑构件。目前, 随着新型材料 (例如 FRP 材料) 的大规模应用, 在防屈曲支撑中也得到应用。20 世纪 90 年代后, 各个国家和地区均相继开始了防屈曲支撑的相关研究分析^[1-4]。近些年来, 针对钢管混凝土式防屈曲支撑的参数、材料等很多方面进行了大量的研究^[5-10]。目前, 对于约束一字型钢管混凝土的防屈曲支撑的抗震性能还鲜有研究, 本文通过利用 ANSYS 有限元软件, 对本结构进行数值模拟。

1 研究方法

利用有限元分析软件 ANSYS 对防屈曲支撑进

行模态分析, 从而得出一字形钢管混凝土式防屈曲支撑和内芯的各项动力特性系数, 然后利用模态分析得到特征值进行屈曲模态分析。

1.1 钢材本构关系

本文模型中的钢材为 Q235 钢, 模拟钢材采用服从 Von Mises 屈服准则以及双线性随动强化材料模型。Q235 钢屈材料属性参数见表 1。

表 1 Q235-A 钢参数

Tab.1 The material property of Q235-A steel

弹性模量 /Pa	泊松比	密度 (kg·m ⁻³)	屈服强度 /MPa	强化强度 /MPa
2.06e11	0.3	7.8e3	235	6 592

收稿日期: 2017-07-03

特约专稿

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51174124); 河北省研究生创新项目(171290080015); 河北省教育厅青年基金资助项目(QN2014070)
作者简介: 杨士萱(1993-), 女, 河北保定人, 硕士, 主要从事钢结构、地下空间工程研究。

1.2 建立 ANSYS 模型

构建两个模型:支撑的核心部位为一字芯,长 5 000 mm,宽 400 mm,厚 40 mm 的一字型长方体钢芯,在仅有一字形钢芯时为普通支撑,将此支撑构建为模型 301;在模型 301 的基础上加上外套为长 4 000 mm,内直径为 540 mm,厚为 10 mm 的钢管,一字芯与钢管中间部位填充混凝土,将此模型定义为模型 302 (见图 1)。

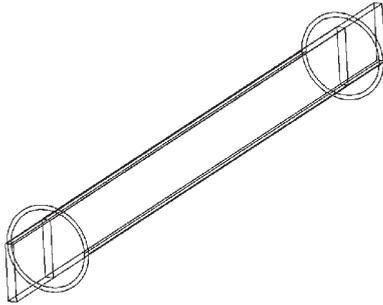


图 1 模型 302 结构图示
Fig.1 The drawing of model 302

1.3 网格的划分

在有限元分析模拟中,网格划分会直接影响模型最后的分析精度及收敛性。划分结果如图 2。

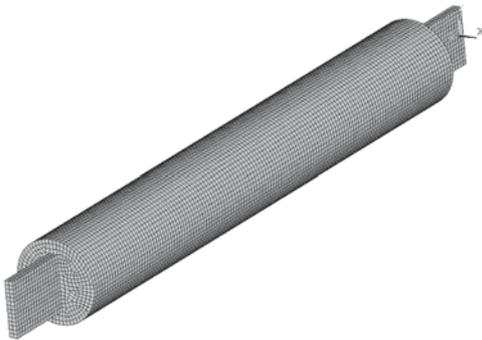


图 2 划分网格结果
Fig.2 The result of mesh generation

1.4 添加接触对

在前处理中添加接触对,对于目标单元设置接触单元为 Target170 号单元,接触面设置为 Contal74 号单元,由于只进行模态分析,因此摩擦系数将不会影响分析结果,将摩擦系数设置为 0。

1.5 添加约束

由于主要研究防屈曲支撑的轴向受力及其性能分析情况,因此这里释放支撑的轴向约束和约束另两个方向的约束。具体为分别对模型 301、302 两端施加 U_x 、 U_y 两个自由度的约束,释放 z 轴方向的自

由度,使得支撑两端只能够在轴向产生位移。

在求解菜单 Solution 下找到 Define Loads 选项,选中 Apply 找到定义位移选项 Displacement 进行对支撑两端的约束。设置约束的方式是选中两端的节点进行点约束。

2 模态结果分析

模态分析(振型分析)通常用来计算求解结构的自振周期、频率和位移等动力学相关特性系数。要分析构件在地震中的作用,首先要进行模型分析,这类分析方法也是最常见的抗震分析方法。同时模态分析得到的结果可以为其在地震响应分析中提供依据,也是响应谱分析和反应谱分析的计算基础。

分别对不加约束的一字形芯和加约束之后的一字形钢混防屈曲支撑进行了分析,分别提取了两个模型前 6 阶段的模态数据,具体分析两个模型各阶段模态和振型参数。

对于一字形芯各阶段模态分析,在只有内芯的情况下,第二阶段一字形芯出现了 x 轴方向的弯曲变形,最大点出现在一字形芯的中间位置,此阶段中间位置容易破坏;在第三阶段时,一字形芯出现了 y 轴方向的变形,最大变形分别在距两个端点的四分之一处,第三阶段的位移要大于第二阶段,说明一字形芯更容易出现 y 轴方向的弯曲失稳;见图 3 和图 4。

由图 5、图 6、图 7 比较分析可以得出,四阶模态出现 x 轴向变形,五、六阶模态出现 y 轴向变形, y 轴向变形幅度要大于 x 轴向位移,说明 y 方向位移依然是弯曲失稳关键因素;另外由图 6 和 7 可以

```
NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =2
FREQ=5.572
USUM (AVG)
RSYS=0
DMX =.046115
SMN =.168E-09
SMX =.046115
```

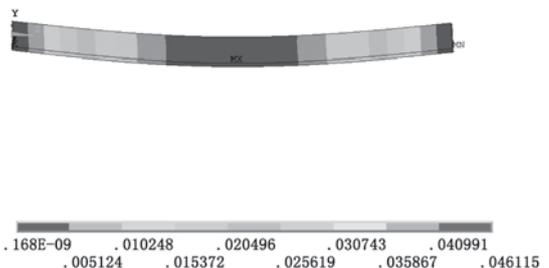


图 3 模型 301 的二阶模态图
Fig.3 The nephogram of 301 in second modal

看出在五、六阶模态时均出现多波段屈曲。

在加约束的一字型芯钢混防屈曲支撑的模态图中不难看出，各模态阶段的位移位置发生了明显的变化，由图 8 可以看出，虽然最大位移位置仍然在中间位置，不过最大变形位置是在一字形芯和混凝土的连接处，一定程度上说明混凝土起到了应有的

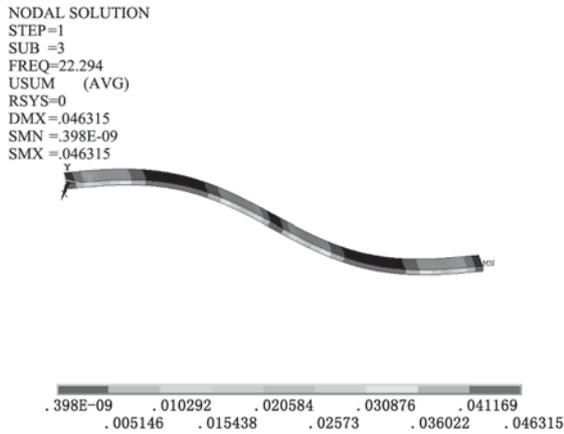


图 4 模型 301 的三阶模态图
Fig.4 The nephogram of 301 in third modal

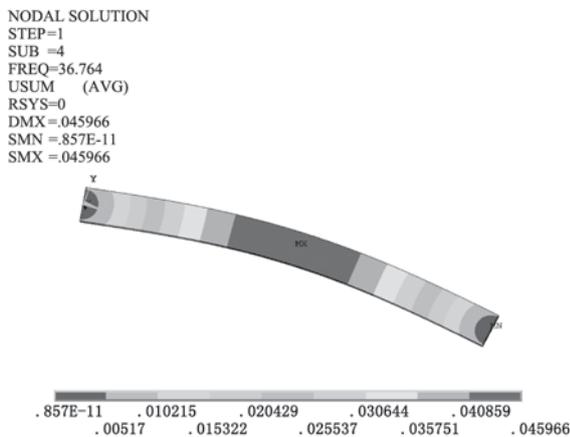


图 5 模型 301 的四阶模态图
Fig.5 The nephogram of 301 in fourth modal

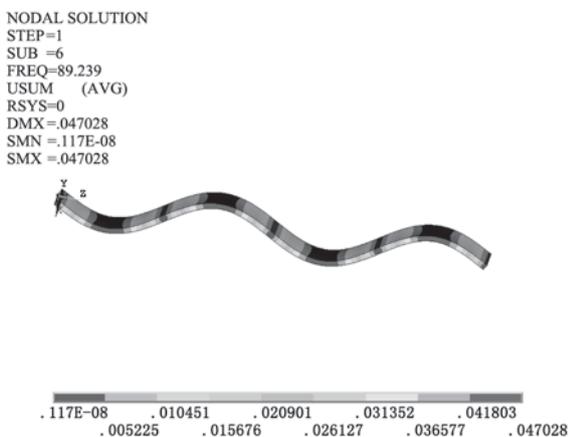


图 6 模型 301 的五阶模态图
Fig.6 The nephogram of 301 in fifth modal

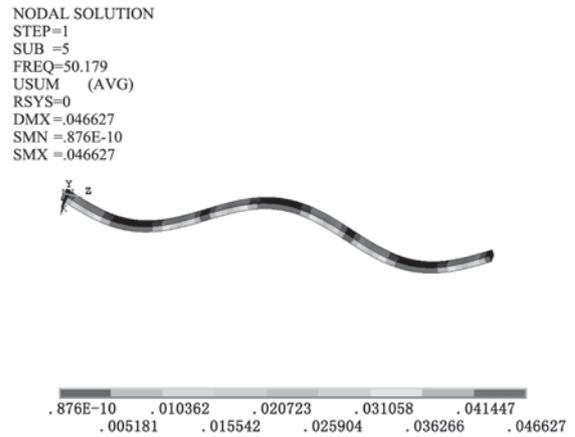


图 7 模型 301 的六阶模态图
Fig.7 The nephogram of 301 in sixth modal

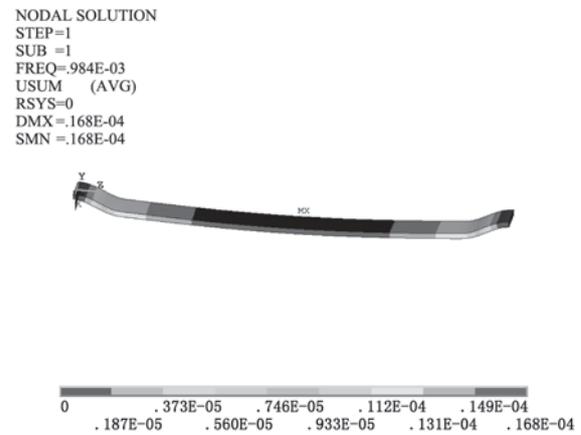


图 8 模型 302 内芯的一阶模态图
Fig.8 The nephogram of 302 inner pipe in first modal

作用，达到了预期目的；相较于无约束的一字形芯而言，模型 302 第一、二阶模态的最大变形均远小于模型 301，最大位移也小于模型 301，符合预期设计要求。通过观察模型 302 最大变形位置不难看出前两阶模态均出现在两端，这是值得注意的，应对两端的连接部位进行加强，防止局部屈曲。

由图 9 可见，支撑的第二阶段是扭转位移，最大变形处依然在混凝土与一字形芯的连接处，说明此处是模型 302 的薄弱处，在以后的设计研究中应该注意加强，防止两端局部屈曲。

由图 10 模型 302 第三阶模态图可以看出，此时的最大位移点为模型的中间位置，不过位移变形量远小于模型 301，混凝土和外套管起到了非常大的作用，达到预期目标。

由图 11、图 12 可以看出模型 302 内芯的第四、五阶模态的最大位移点均出现在内芯和混凝土的连接处。相对于模型 301 来说，变形位置出现变化，位移幅度也远远小于模型 301。

3 屈曲模态分析

屈曲模态分析是在模态分析的基础上进行的,对比301和302模型发现,约束方式和模态分析一致,一端固接,一端释放z方向自由度;加载方式为在释放自由度端加载负向单位载荷力。

由图13可以看出,模型301在一阶屈曲模态时最大位移点为中间位置,说明构件容易出现失稳情况;在二阶屈曲模态时最大位移点各为距两端点的1/3处,此后的几阶模态均为多波段屈曲。模型301变形尺寸过大,不利用构件的耗能分析。

屈曲模态分析可以计算出构件失稳时的临界荷

NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =2
FREQ=.00116
USUM (AVG)
RSYS=0
DMX=.136E-04
SMN =.136E-04

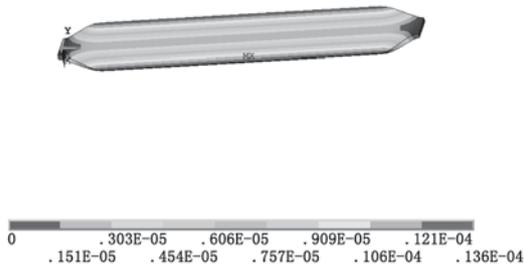


图9 模型302内芯的二阶模态图
Fig.9 The nephogram of 302 inner pipe in second modal

NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =5
FREQ=.005371
USUM (AVG)
RSYS=0
DMX=.282E-04
SMN =.282E-04

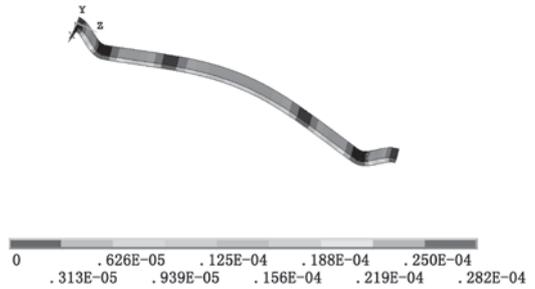


图12 模型302内芯的五阶模态图
Fig.12 The nephogram of 302 inner pipe in fifth modal

NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =3
FREQ=.001952
USUM (AVG)
RSYS=0
DMX=.197E-04
SMN =.197E-04

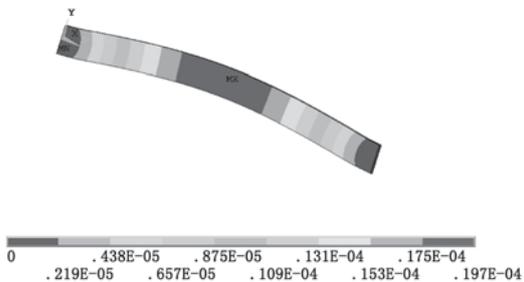
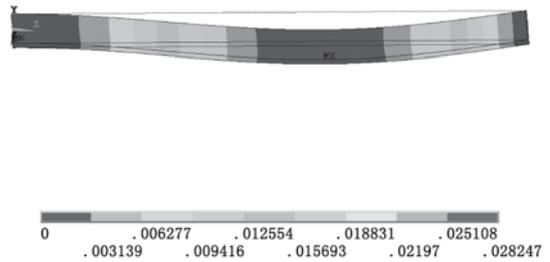


图10 模型302内芯的三阶模态图
Fig.10 The nephogram of 302 inner pipe in third modal

NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =1
FREQ=.122E+07
USUM (AVG)
RSYS=0
DMX=.028247
SMN =.028247



(a) 一阶屈曲模态图

NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =4
FREQ=.002108
USUM (AVG)
RSYS=0
DMX=.237E-04
SMN =.237E-04

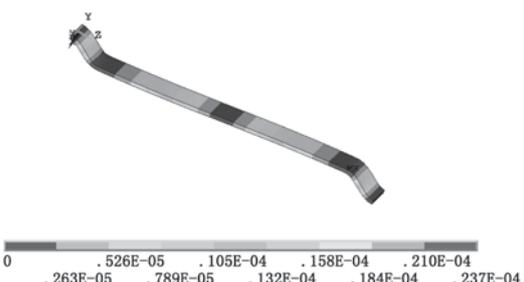
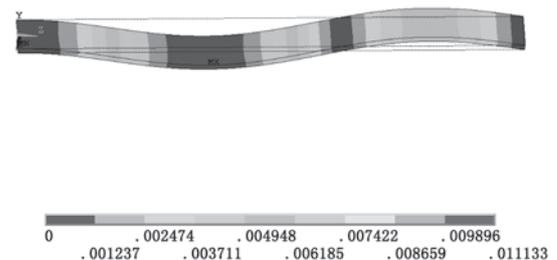


图11 模型302内芯的四阶模态图
Fig.11 The nephogram of 302 inner pipe in fourth modal

NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =2
FREQ=.360E+07
USUM (AVG)
RSYS=0
DMX=.011133
SMN =.011133



(b) 二阶屈曲模态图

图13 模型302屈曲模态图
Fig.13 The nephogram of model 302 buckling mode

载, 本次施加的为单位载荷, 因此屈曲分析一阶模态为构件的临界载荷。由表 2 和表 3 可以看出, 一字芯的临界载荷为 $12.207E+05$, 而添加约束后的防屈曲支撑临界载荷为 $14.747E+06$, 承载力提高了 12.08 倍, 说明约束起到非常大的作用, 使得支撑的失稳性大大降低, 临界载荷有了非常大的提升。不仅如此, 在前六阶屈曲模态的振型中, 模型 302 的性能均比模型 301 的有大幅度提升, 说明防屈曲支撑确实具有非常大的优势。

表 2 一字芯模型 301 各模态频率参数

Tab.2 The each modal frequency parameters of model 301

	时间 / 频率	载荷步	分步	累计步数
1	12.207E+05	1	1	1
2	36.047E+05	1	2	2
3	71.904E+05	1	3	3
4	119.62E+05	1	4	4
5	179.35E+05	1	5	5
6	250.74E+05	1	6	6

表 3 防屈曲支撑模型 302 各模态频率参数

Tab.3 The each modal frequency parameters of BRB 302

	时间 / 频率	载荷步	分步	累计步数
1	14.747E+06	1	1	1
2	52.683E+06	1	2	2
3	115.76E+06	1	3	3
4	160.76E+06	1	4	4
5	190.70E+06	1	5	5
6	211.23E+06	1	6	6

4 结论

1) 对于一字形芯各阶级模态分析, 在只有内芯的情况下, 第二阶段一字形芯出现了 x 轴方向的弯曲变形, 最大点出现在一字形芯的中间位置, 此阶段中间位置容易破坏; 在第三阶段时, 一字形芯出现了 y 轴方向的变形, 最大变形分别在距两个端点的四分之一处, 第三阶段的位移要大于第二阶段, 说明一字形芯更容易出现 y 轴方向的弯曲失稳。

2) 在加约束的一字型芯钢混防屈曲支撑模态图中, 最大变形位置在一字形芯和混凝土的连接处, 说明混凝土起到了应有的作用, 达到了预期目的。

3) 一字形芯的防屈曲支撑比普通支撑的周期小,

频率大, 说明构件的刚度得到了很大提升, 增加了很大的强度。

4) 加约束的一字型芯钢混防屈曲支撑的临界载荷提高了 12.08 倍, 使得支撑失稳性大大降低, 临界载荷有了非常大的提升。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] MATSUI R, TAKEUCHI T, HAJJAR J F, et al. Local buckling restraint condition for core plates in buckling restrained braces[C]//14th world conference on earthquake engineering, 2008.
- [3] 赵俊贤, 吴 斌, 梅 洋, 等. 防屈曲支撑的研究现状及关键理论问题 [J]. 防灾减灾工程学报, 2010, 30(S1): 93-100.
- [4] 叶列平, 冯 鹏. FRP 在工程结构中的应用与发展 [J]. 土木工程学报, 2006, 39(3): 24-36.
- [5] HAGINOYA M, NAGAO T, TAGUCHI T, et al. 22506 Studies on Buckling-Restrained Bracing using Triple Steel Tubes : Part 1: Outline of Triple Steel Tube Member and Static Cyclic Loading Tests[C] //Architectural Institute of Japan, 2005: 1011-1012.
- [6] MATSUMOTO T, NISHIHARA H, SUZUKI H, et al. Experimental Study of Multi-story Precast Concrete Shear Wall : Part4 Case of shear failure type tests[C]//Summaries of Technical Papers of Meeting Architectural Institute of Japan. C-2, Structures Iv, Reinforced Concrete Structures Prestressed Concrete Structures Masonry Wall Structures. Architectural Institute of Japan, 1998: 895-896.
- [7] 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.
- [8] 李 妍, 吴 斌, 王倩颖, 等. 防屈曲钢支撑阻尼器的试验研究 [J]. 土木工程学报, 2006, 39(7): 9-14.
- [9] 梅 洋. 新型组合钢管混凝土式防屈曲支撑 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [10] 吴 昊. 约束比对钢管混凝土防屈曲支撑滞回性能的影响研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.