

邬新邵, 许立军. 一种新型的预制空心墙板连接件抗震性能研究与有限元分析[J]. 华南地震, 2019, 39 (3):95-100. [WU Xinshao, XU Lijun. Application and Finite Element Analysis of a New Type Connector of Extruded Cement Panel and Column[J]. South China journal of seismology, 2019, 39 (3):95-100]

一种新型的预制空心墙板连接件抗震性能研究与有限元分析

邬新邵, 许立军

(湖南五环体育实业发展集团有限公司, 长沙 410000)

摘要: 针对实际工程项目邵阳县五环时代全民健身中心体育馆轻钢结构装配施工过程中的中空挤出成型混凝土外墙板(ECP)与立柱的连接问题, 设计了一种拥有自主知识产权的新型预制空心墙板与立柱连接件, 并应用于该工程项目当中, 该连接件连接方便, 可更换性强, 耐磨损性能好, 针对该种新型连接件进行了设计荷载下的有限元模拟分析, 并考虑了与 ECP 外墙板在风荷载作用下的受力情况。并取一工程实例, 模拟地震荷载作用, 对该墙板连接件的抗震性能做了分析, 为该种连接件今后的工程应用提供了一定的理论参考。

关键词: 预制装配式; 连接件; 有限元; 中空挤出成型板; 地震响应分析

中图分类号: TH212; TH213.3

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662(2019)03-0095-06

DOI: 10.13512/j.hndz.2019.03.014

Application and Finite Element Analysis of a New Type Connector of Extruded Cement Panel and Column

WU Xinshao, XU Lijun

(Hunan Five-Rings Sports Industry Development, Changsha 410000, China)

Abstract: Aiming at the connection between Extruded Cement Panel (ECP) and steel column in light steel structure assembly construction of Shaoyang center gymnasium, a new type of prefabricated ECP and steel column connector with independent intellectual property rights is designed and applied in this project. The connector has the advantages of convenient connection, strong replaceability and good wear resistance. The finite element simulation analysis of the new type of connector under design load is carried out, and the force acting on the joint of wind load and ECP exterior wall plate is considered. At the same time, an engineering example is taken to simulate the seismic load, and the seismic performance of the wall-slab connector is analyzed, which provides a theoretical reference for the future engineering application of the connector.

Keywords: Prefabricated assembly; Connectors; Finite element; Extruded cement panel; Seismic response

收稿日期: 2018-07-19

作者简介: 邬新邵(1967-), 男, 高级工程师, 主要从事建筑结构研究。

E-mail: HNFERSID_tzglb@163.com.

0 前言

随着我国的建筑工业化发展,装配式结构成为新的一种发展趋势^[1-2],在装配式钢框架结构中,结构的外墙多采用外挂墙板与内嵌墙板,传统砖砌墙体由于施工工艺和本身生产等原因会产生成本、人工、施工质量不易保证等问题,不符合墙体工业化的发展趋势,尤为突出不能反复利用、不轻质、不节能、不环保绿色的特点,本文针对湖南邵阳市五环体育中心的施工,设计采用一种新型的 ECP(真空混凝土板)外墙板,该外墙板采用工厂预制相比一般外墙板具有更高的强度和更好的隔声效果。

在装配式外墙板安装的需求下,钢框架装配式结构外墙与立柱的有效方便的连接件的设计是一个重要问题,现有的外墙连接件主要为螺栓与焊接相结合的几种连接形式^[3],然而焊接施工难度大,多次螺栓连接螺栓易松动,施工较复杂,本文为实现该种 ECP 外墙板的外挂连接,设计了一种新型预制空心墙板与立柱的连接结构。

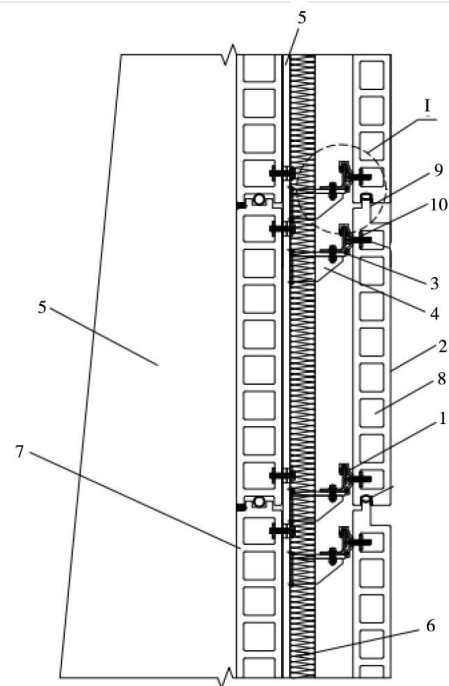
该种新型的连接件,通过转接件与橡胶垫与角钢连接,减少了螺栓的设置,避免了焊接,具有较好的施工便利性与工程可靠性,同时在面临地震荷载时一旦发生损坏,因为该连接件无需焊接,所以具有较好的可替换性。

该体育馆位于湖南邵阳县,地理位置上临近我国的华南地区,近年来郑萍等针对我国华南地区 2000 年以来的地震活动做分析研究^[4]。近几十年来,由于全球地震期间和之后观测到的破坏,人们对非结构部件抗震性能的关注有所增加。事实上,非结构构件的破坏会严重影响建筑物的功能,并对地震造成的总经济损失有很大的影响并导致伤亡。另一个关键问题是,这种损伤也可能发生在低地震强度下,对于低地震强度而言,结构元件应保持在弹性域内^[5]。本文在对该墙板与立柱连接件的静力分析的同时对该墙板与立柱连接件的抗震性能做了分析。

1 一种新型的预制空心墙板与立柱的连接件

基于邵阳县五环时代全民健身中心体育馆的 ECP 外墙板的连接问题,本文设计了一种新型连接件并应用于该工程项目中。该连接件是由湖南五环体育实业集团有限公司所设计的一种新型的

预制空心墙板与立柱的连接件,包括钢柱、空心墙板、连接钢板、角钢连接件和弓形连接件,空心墙板沿长度方向设置有多通孔,空心墙板的一个面上连接有多个弓形连接件,连接钢板与钢柱固接,角钢连接件与连接钢板连接,空心墙板通过弓形连接件与角钢连接件的卡扣而沿长度方向固定在相邻的两个钢柱上。如图 1 所示。



1:连接件;2:ECP 墙板;3:角钢连接件;4:连接钢板;5:钢柱;6:保温棉层;7:ECP 吸音板;8:通孔;9:定位孔;10:条状板

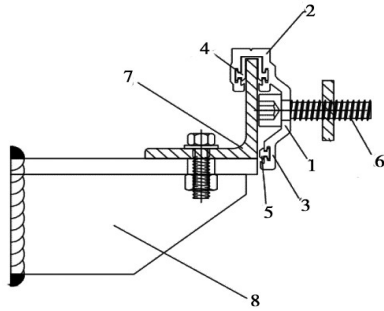
图 1 连接件施工图样例

Fig.1 The connector construction examples

在本文的连接件设计中,弓形连接件包括位于中间的凹陷部和位于凹陷部两端的卡扣部 12 和抵靠部,角钢连接件的一端卡在卡扣部的卡槽内,凹陷部内插接有螺栓,抵靠部延伸至连接钢板的下侧。为了更好的保证空心墙板安装后的稳定性,卡槽内设置有橡胶块,抵靠部靠近连接钢板侧设置有阻尼元件,该阻尼元件可以为弹簧元件或者橡胶元件,如图 2 所示。

1.1 邵阳县五环时代全民健身中心体育馆空心墙板与立柱连接件的工程应用状况分析

邵阳县五环时代全民健身中心体育馆采用轻钢结构装配式结构,该项目位于邵阳县政府所在地塘渡口镇的开元大道与政德路交汇处西南角,项目用地北为政德路,西为友谊路商业步行街,南为永泰路,东隔施工路与生态公园相连。



1:转接件凹陷部;2:转接件卡口部;3:转接件抵靠部;
4:橡胶垫块;5:阻尼元件(橡胶元件或弹簧元件);
6:螺栓;7:角钢;8:M6 普通螺栓

图 2 连接件细部详图

Fig.2 The details of the connector

该项目应用了本文设计的一种新型的预制空心墙板与立柱的连接件,如图 2 中所示。该新型连接件主要四部分构成,其一为图 2 中编号 6 为抗剪螺栓,本工程中采用内六角头螺栓,选型为 M8 普通螺栓;其二为图 2 中编号为 1~3 所示的转接件;其三为图 2 中编号 7 所示的角钢;其四为连接伸臂段的基座,如图 2 中编号 8 所示,螺栓选型为 M6 普通螺栓。

该连接件连接了该体育馆外柱与预制空心墙板,其实物图与现场施工图如图 3 所示,该空心墙板与立柱连接工法完全采用工厂预制,现场安装。



(a)现场施工图



(b)连接件细部图

图 3 工程应用示意图

Fig.3 Engineering application sketch of the connector and wall

1.2 连接件受力特性分析

该连接件根据实际的施工尺寸与设计形式,可以分析其四个主要部分的受力特性如下:

针对抗剪螺栓,主要起到直接承受外部荷载的作用,在实际的施工过程中,抗剪螺栓插入外墙的预留孔中,由螺母固定位置,在此情况下,该螺栓主要收到外墙直接作用的剪力荷载。

针对转接件,其主要承受抗剪螺栓传来的外荷载,主要承受剪力,其受剪最薄弱面位于顶端,其中的螺孔部位因为直接承受螺栓传来的剪力,且由于形状因素,易造成应力集中,所以此处为一处薄弱环节,该部分顶部凹槽中的橡胶垫与底部凹槽中的橡胶阻尼元件有一定的缓冲作用,且有助于力的均匀传递。

针对角钢部分,主要承受转接件经由橡胶垫传来的弯矩与压力,因为角钢刚度相对较大,且形状规整,所以一般不会成为连接件的薄弱部位。

针对悬臂基座部分,角钢将外部力通过基座上的螺栓传递而来,螺栓为向上的拉力,而角钢的角部同时也会对该基座作用向下的压力,悬臂部分因为由腹板存在,刚度较大,一般变形较小,在做分析时一般不作为薄弱部分进行考虑。

2 连接件有限元建模

2.1 分析对象

本文分析的该新型连接件模型尺寸按照章节 1.1 中所示工程实例中采用的尺寸,取其中一个连接件为例,建立的有限元模型。为了合理简化分析,理想化了有限元模型,在模型建立的时候忽略了一些在模型中不需要精确计算的部分。

2.2 有限元模型的建立

该连接段的有限元模型按照图 2 与章节 1.1 中的四部分建立,如图 4 所示。

本文建立的有限元模型包括钢螺栓,钢制转接件与橡胶垫,角钢,伸臂钢构件四部分,均采用实体单元 C3D8R 构建。而对于橡胶这种不可压缩材料,本文采用杂交单元 C3D8RH 构建。网格划分会影响有限元计算的收敛速度,因为该组合连接件形状复杂,较细网格的压力项收敛速度缓慢,可以通过选择缩减积分的方法进行缓解,整个模型共计 175 608 个单元,230 401 个节点。

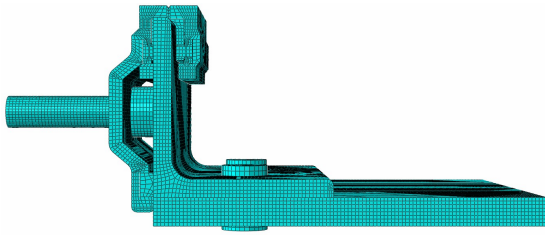


图4 连接件整体有限元模型

Fig.4 The finite element model of the connector

2.3 边界条件和加载方式

本文所建立的有限元模型伸臂部分的钢板因为下腹板刚度相对较大,所以针对此有限元模型,其伸臂部分的钢板视为固结在腹板上,该有限元模型中的螺栓连接接触面如下定义:被联接板之间、联接板与螺栓杆之间、螺母螺帽与被联接板之间均设为 Contact 连接,最大程度地模拟螺栓联接的力学行为和应力分布。

为了模拟实际工程中的连接件受力状况,在抗剪螺栓上作用一面荷载,采用邵阳五环体育馆实际工程项目计算书中的计算荷载,在螺栓相应位置建立参考点,并令参考点与螺栓和墙板接触面进行耦合,对耦合后的参考点施加荷载,等同于荷载施加在螺栓相应位置。

2.4 材料特性

模型中钢制连接件和角钢为 Q345E 钢材,屈服强度为 345 MPa、弹性模量为 209 000 MPa;抗剪螺栓为 Q345E 钢材,屈服强度为 400 MPa、弹性模量为 200 000 MPa;转接件中的橡胶垫采用超弹性橡胶本构模型,该模型基于 Polynomial(多项式)方程^[9-10],其模型如式 1 所示。

$$W = \sum_{i+j=1}^N C_{ij} (\bar{I}_1^2 - 3)^i (\bar{I}_2^2 - 3)^j + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J_{el} - 1)^{2i} \quad (1)$$

式 1 中, W 为应变能, C_{ij} 与 D_i 为温度有关的参数, \bar{I}_1^2 , \bar{I}_2^2 分别为第一、第二偏应变不变量, J_{el} 为橡胶在变形前与变形后的体积比,初始剪切模量 $\mu_0 = 2(C_{01} + C_{10})$, $k_0 = \frac{1}{D_1}$ 。上述模型参数根据试验测试获得,取橡胶试样在通用材料试验机上进行单轴拉伸与压缩试验。橡胶部分有限元模型的建立可参考文献^[11]。钢材泊松比为 0.3,橡胶泊松比为 0.475。钢材采用 Mises 应力破坏准则,并参考实际工程项目的要求进行确定。

在该计算模型中,结合抗剪螺栓与基座连接螺栓的材料特性设置是根据实际工程中采用的两种螺栓型号 M8 和 M6 的 4.8 级普通螺栓的材性选取。

表 1 连接件部件材料性能

Table 1 Numerical model parameters

	弹性模量/ (GPa)	屈服强度/ (MPa)	泊松比
抗剪螺栓	209	400	0.3
转接件	209	345	0.3
连接角钢	209	345	0.3
基座螺栓	209	400	0.3
悬臂基座	209	345	0.3

3 静力分析

分析过程中,钢材的破坏准则采用 Mises 准则判断材料是否失效。连接段的分析分为弹塑性分析。

3.1 连接件受力有限元模拟结果分析

在设计墙体荷载 600 N 作用下,该连接件的有限元分析结果如下所示,图 5 所示的是该连接件 Mises 应力云图。为更清晰地表达计算模拟结果,应力云图取一半结构作为示例,各部件应力的最大值均小于相应材料的屈服强度。因此,在最不利外荷载组合作用下,钢制部件处于弹性阶段,且富余较多。

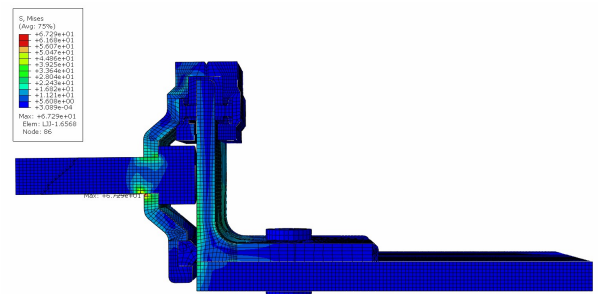


图5 连接件 Mises 应力的弹性分析云图(单位:MPa)

Fig.5 The elastic analysis about Mises stress of the connector (unit: MPa)

由以上分析结果应力云图显示,该连接件最大 Mises 应力部位在抗剪螺栓与转接件的接触部位,该部位因为抗剪螺栓直接传递给转接件的外部荷载,且转接件此处孔洞的形状因素,易造成应力集中,较小的接触面积,导致其 Mises 应力最大。

对于抗剪螺栓,其 Mises 应力最大处在其与转接件接触的位置;对于角钢部分,其 Mises 应力最大的位置位于角钢与转接件连接的一边,位于该角肢截面增大处之上的部位;对于悬臂基座,其

Mises 应力最大部位位于与角钢转角处接触的边缘。

从上图中可看出, 由于该连接件的设计, 导致其位于抗剪螺栓与转接件上的 Mises 应力远远大于其他部位的 Mises 应力, 所以抗剪螺栓与转接件连接处即为受力最薄弱位置。

3.2 考虑风荷载作用下连接件的有限元模拟结果分析

因为该连接件直接连接建筑的外墙板且墙板的面积较大, 所以在实际应用过程中也应考虑风荷载对其的影响, 全球每年由于风灾造成了大量损失, 本文同时对风荷载与剪切荷载共同作用下的连接件最不利受力状况进行了分析, 风荷载采用规范设计值, 其荷载组合为竖向力 600N, 作用于螺栓上, 水平力 57N, 作用于转接件上, 在该受力条件下, 连接件的应力云图如图 6。

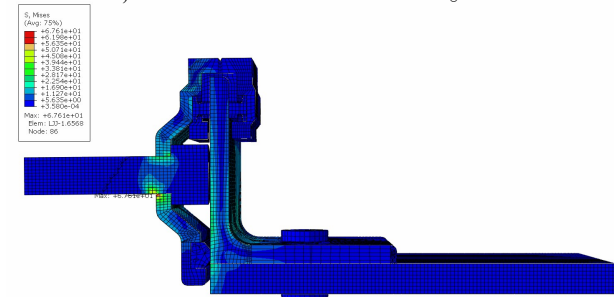


图 6 连接件 Mises 应力的弹性分析云图(单位:MPa)

Fig.6 The elastic analysis about Mises stress of the connector

由以上分析结果应力云图显示, 该连接件在风荷载作用下, 其受力最薄弱位置仍在抗剪螺栓与转接件连接处, 各个部件的最大 Mises 应力分布情况与不计风荷载的情况下大致相同, 但是在较小的风荷载作用下, 一定程度上减少了角钢与悬臂基座上的最大 Mises 应力, 主要原因是风荷载经过转接件传力, 抵消了少部分外墙荷载传到角钢和基座上的弯矩, 使得其最大 Mises 应力减小, 当风荷载较小时, 其对抗剪螺栓受力状况影响不大, 较少的增加了转接件部分的最大 Mises 应力, 此时风荷载一定程度上有利于连接件受力。进一步的分析可以得知, 在较大风荷载的作用下, 其转接件上的 Mises 应力都会随之增加, 风荷载对抗剪螺栓的受力情况影响较小, 此时风荷载对结构受力是不利的。

4 地震荷载下墙板连接件的有限元模拟结果及分析

4.1 地震动输入

针对该算例, 本文选用的模拟地震波是经典

的 El-Centro 波, 选用的地震峰值加速度为 0.3 g, 峰值出现在第 2.1 s, 地震作用方向为墙板—立柱方向。因为峰值加速度出现较早, 为简化计算, 本文取前 10 s 地震波时程进行分析, 其输入的地震波时程曲线如图 7 所示。

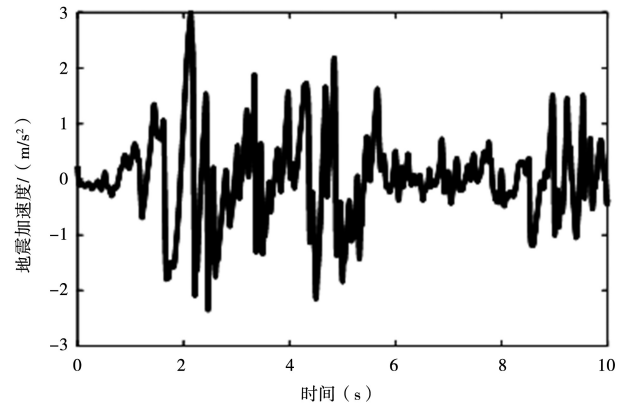


图 7 El-Centro 地震波时程曲线

Fig.7 The time history curve of El-Centro seismic wave

4.2 地震时程分析

针对该体育馆算例, 本文通过工程项目设计计算书中的结构形式以及受自重荷载情况, 将该结构等效为单自由度体系, 通过 Newmark-β 法计算其顶部加速度, 结合该加速度与真空挤压混凝土外墙板的质量, 计算出作用于该墙板与柱间的连接件的承受地震作用的荷载时程。

该荷载作用于连接件上, 为简化计算在有限元时程分析中当等效外激励方向为由墙板至立柱方向时, 该外激励作用于转接件上(如图 2 中的构件), 当等效外激励方向为由立柱向墙板方向时, 该外激励作用于螺栓上, 由螺栓传力至转接件上。经过时程分析, 可得该连接件应力最大时刻为 $t=4.7$ s 时, 其 Mises 应力分布如图 8 所示。

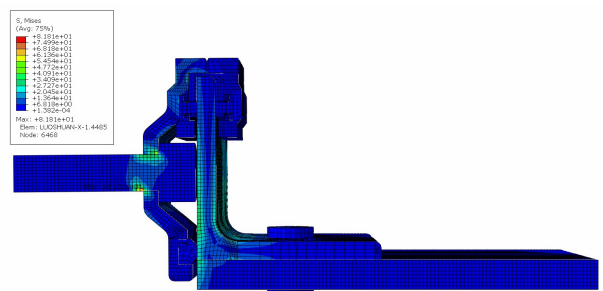


图 8 连接件 Mises 应力的弹性分析云图(单位:MPa)

Fig.8 The elastic analysis about Mises stress of the connector

由图 8 可以看出在承受该地震荷载的情况下,该连接件的最大应力位置发生于螺栓与连接件的接触位置,其主要原因是该种工况下该处的外力组合最为不利。

对于抗剪螺栓,其 Mises 应力最大处在其与转接件接触的位置,且由于地震作用,与转接件接触部位全截面应力增加;对于转接件部分,由于地震作用,所受应力有所增加,主要集中在螺孔处;对于角钢部分,其 Mises 应力最大的位置位于角钢与转接件连接的一边,位于该角肢截面增大处之上的部位,由于地震的往复作用,角钢所受应力大幅增加;对于悬臂基座,其 Mises 应力最大部位位于与角钢转角处接触的边缘且较静力状态下有了一定程度的增加。

从上图中可看出,由于该连接件的设计,导致其位于抗剪螺栓与转接件上的 Mises 应力远远大于其他部位的 Mises 应力,所以抗剪螺栓与转接件连接处即为受力最薄弱位置。

5 结语

本文针对真空挤压混凝土外墙板,设计了一种新型的钢制连接件并将其应用于邵阳县五环体育馆的建设实践当中,该连接件避免了焊接,并采用转接件的形式,在转接件上设计了橡胶垫缓冲部件于阻尼元件,能够有效的保证外墙板安装连接的稳定性,有较强的实际工程应用价值。

(1)针对该连接件的四个主要构成部分进行了有限元分析,有限元分析结果显示该连接件的最大应力部位发生在抗剪螺栓与转接件的接触面上,最不利位置发生在该处的主要原因是转接件孔洞形状发生应力集中。

(2)针对实际工程中可能遇到的风荷载与墙板剪力一起作用于该连接件的组合作用情况下进行了有限元受力分析,在该种荷载组合作用下,分析结果表明,该种连接件的应力最大位置仍然发生在抗剪螺栓与转接件接触面上,风荷载对该连接件受力状况造成的主要影响为在小风荷载作用

下会减少基座与转接件上的最大 Mises 应力,此时风荷载一定程度上是有利荷载,若风荷载超出设计值进一步增大,转接件上的 Mises 应力会随之增加,此时风荷载为不利荷载。

(3)针对工程可能遇到的地震,对连接件进行了地震作用时程分析。分析结果表明,在在 8 度多遇地震作用下,本文所设计的连接件各部件均在弹性范围内,满足设计要求。连接件的最大应力位置发生于螺栓与连接件的接触位置,为所设计连接件的较易替换部件,面临地震荷载时一旦发生损坏,可以便于维修,说明了本设计的合理性。

参考文献:

- [1] 蒋勤俭.国内外装配式混凝土建筑发展综述[J].建筑技术,2010,41(12):1074-1077.
- [2] 齐宝库,张阳.装配式建筑发展瓶颈与对策研究[J].沈阳建筑大学学报(社会科学版),2015,17(02):156-159.
- [3] 陈可茹.基于建筑工业化的混凝土外墙挂板设计[D].成都:西南交通大学,2018.
- [4] 郑萍,张慧,沈繁奎.2000年以来华南 $M_t \geq 5$ 级地震前的地震活动特征[J].华南地震,2018,38(01):101-107.
- [5] Sara Brandolese, Laura Fiorin, Roberto Scotta. Seismic demand and capacity assessment of suspended ceiling systems[J]. Engineering Structures, 2019,193(15): 219-237.
- [6] 庄茁.基于 ABAQUS 的有限元分析和应用[M].北京:清华大学出版社,2009.
- [7] Klaus-Jurgen Bathe. Finite Element Procedures[M]. New Jersey: Prentice Hall, 1996.
- [8] 刘瑞昌,刘祥斌,宋年秀,等.螺栓连接有限元模拟方法的应用研究[J].制造业自动化,2013,6(23):5-7.
- [9] 陈莲.橡胶隔振器有限元分析与试验研究[D].上海:上海交通大学,2003.
- [10] 陈莲,周海亭.计算橡胶隔振器静态特性的数值分析方法[J].振动与冲击,2005,24(3):120-123.
- [11] 王利荣,吕振华,Ichiro H. 橡胶隔振器有限元建模技术及静态弹性特性分析[J].汽车工程,2002,24(6):480-485.