

# 一种新型销轴支座平面外水平极限承载力的有限元分析

张 瑶<sup>1,2</sup>, 袁 远<sup>3</sup>, 康洪震<sup>1,2</sup>, 赵晓蒙<sup>4</sup>

(1. 唐山学院 土木工程学院, 河北 唐山 063000; 2. 河北省建筑工程与尾矿综合利用重点实验室, 河北 唐山 063000;  
3. 河钢集团矿业公司, 河北 唐山 063000; 4. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 工程中常常忽略销轴支座的平面外受力情况, 可能造成在偶然的、较大的平面外水平荷载作用下耳板的折断. 新型销轴支座中橡胶垫的加入改善了传统销轴支座承受平面外水平荷载作用下受力与变形的不确定性. 文章利用 ABAQUS 软件建立新型支座的有限元模型, 模拟其在平面外水平荷载作用下的力学性能, 通过与现有的试验结果对比, 验证了有限元分析的合理性. 并进一步运用有限元的结果分析得到了支座的屈服机制、荷载传递规律和影响极限承载力的主要因素.

**关键词:** 销轴支座; 有限元; 屈服机制; 荷载传递规律; 极限承载力

中图分类号: TU317<sup>+</sup>.2

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2020)04-0537-05

## Finite element analysis on the horizontal ultimate bearing capacity of the new pinned connection in the out-of-plane direction

ZHANG Yao<sup>1,2</sup>, YUAN Yuan<sup>3</sup>, KANG Hongzhen<sup>1,2</sup>, ZHAO Xiaomeng<sup>4</sup>

(1. School of Civil Engineering, Tangshan University, Hebei Tangshan 063000, China;

2. Hebei Key Laboratory of Building Engineering and Tailings Utilization, Hebei Tangshan 063000, China;

3. HBIS Group Mining Company, Hebei Tangshan 063000, China;

4. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

**Abstract:** The behavior of pinned connection under horizontal force in the out-of-plane direction is often neglected in engineering, causing failure of the lugs under this kind of load. Adding the laminated rubber pad in the new pinned connection improves the uncertainty under the out-of-plane force. Finite element models established by ABAQUS were used to research the horizontal performance of the connection. Results obtained from finite element analysis were compared with those from experiment. The comparison indicated the reasonableness of finite element analysis. The yield mechanism, transformation of the load and important factors that affected the horizontal ultimate bearing capacity of the connection in the out-of-plane direction were revealed through finite element analysis.

**Key words:** pinned connection; finite element; yield mechanism; transformation of the load; ultimate bearing capacity

通过销轴将上下耳板联系起来, 由各部件间的相互接触传递荷载的连接方式为销轴连接. 销轴连接是工程中常用的铰接连接形式, 目前, 销轴支座以其施工方便, 经济合理, 构造简单, 外形美观等特点在建筑结构中得到广泛应用<sup>[1]</sup>. 目前国内外研究多集中于各部件的力学性能与销轴连接的接触问题上: 如苏善跟和许宏亮<sup>[2]</sup>基于舟山桃夭门大桥的工程背景, 探讨了销轴、耳板及其连接件的受力与计算. DUERR<sup>[3]</sup>介绍了销孔接触力的分布特征, 推导了销孔处应力集中系数表达式, 总结了耳板破坏的 4 种主要形式, 推导了不同

破坏形式下极限承载力表达式. 蒋友宝等<sup>[4]</sup>参考 WINKLER 的弹性基础模型, 假定销轴与销孔间的接触传力可通过弹簧实现, 建立了一种新的简化计算模型, 推导出销轴跨中弯矩的设计计算公式. 王帅等<sup>[5]</sup>用有限元模拟的方法对销轴连接各尺寸进行参数分析, 得出销轴的应力分布特点, 在假设耳板与销轴接触应力分别为均匀和抛物线分布的情况下推导出不同的承载力计算公式. 丁大益等<sup>[6]</sup>建立了销轴连接的有限元模型, 通过与单调加载和循环加载的试验结果对比验证了模型的有效性, 利用有限元揭示了连接的应力分布特点.

收稿日期: 2019-10-08

修改稿日期: 2020-07-10

基金项目: 河北省自然科学基金资助项目(E2016105062)

第一作者: 张瑶(1989—), 女, 讲师, 主要从事钢结构与混凝土结构分析. E-mail: 18822306283@163.com

颜东煌等<sup>[7]</sup>以佛山东平大桥为例,通过对比实测结果与计算结果,验证了有限元分析的可靠性,并研究了荷载、材料本构关系等因素对销轴连接耳板销孔附近接触力的影响。张滨和孙文波<sup>[8]</sup>利用有限元模型研究摩擦系数、耳板厚度、耳板间隙和销轴直径等参数对接触应力数值与分布规律的影响,提出了基于赫兹接触理论修正的局部接触应力峰值公式及销轴的最大弯曲应力公式。PEDERSEN<sup>[9]</sup>建立了销轴连接的二维模型,着重研究降低接触位置应力峰值的方法。

然而,以往的文献缺乏对于支座平面外水平方向的受力研究。对于销轴支座来说,传统的铰接假设并不适用于支座承受平面外水平荷载的情况,并且设计中往往不考虑平面外受力,导致支座在承受平面外较大水平荷载作用时易发生耳板的折断。文献[10]提出的新型销轴支座在上下耳板间加入了叠层橡胶垫,橡胶垫的加入改善了支座承受平面外水平荷载时受力与变形的不确定性。

文章采用有限元模拟的手段对新型销轴支座的平面外水平极限承载力进行研究。通过与文献[10]的试验结果对比,验证了有限元分析的合理性,并进一步运用有限元的结果分析支座的屈服机制、荷载传递规律<sup>[11]</sup>以及影响支座平面外水平极限承载力的重要因素。

## 1 有限元模型

### 1.1 支座概况<sup>[10]</sup>

支座试件上下盖板尺寸为 500 mm×500 mm,厚 20 mm,支座总高度为 370 mm,其中,上耳板厚度为 16 mm,宽度为 300 mm,上组合耳板间距为 80 mm,下耳板厚度为 20 mm,宽度 400 mm,下耳板间距为 280 mm,加劲肋板厚度均为 12 mm,销孔直径为 78 mm,销轴直径为 75 mm,销轴所用钢材为调质处理的 40Cr,其余部分钢材均选用 Q235,并在传统支座加入聚四氟乙烯-高阻尼橡胶组合弹簧(橡胶垫与耳板间未做任何粘结处理),试件如图 1 所示。

### 1.2 有限元模型

新型支座的分析涉及多对两个部件间的接触,文章运用 ABAQUS 软件对支座建立了 A、B 两个模型。如图 2 所示,两个模型的区别在于叠层橡胶垫的建立,模型 A 是基于橡胶材料试验<sup>[12]</sup>得到的数据,利用 ABAQUS 中的 Yeoh 模型<sup>[13]</sup>模拟橡胶垫中的橡胶,模型 B 是基于压缩试验<sup>[14]</sup>得到的橡

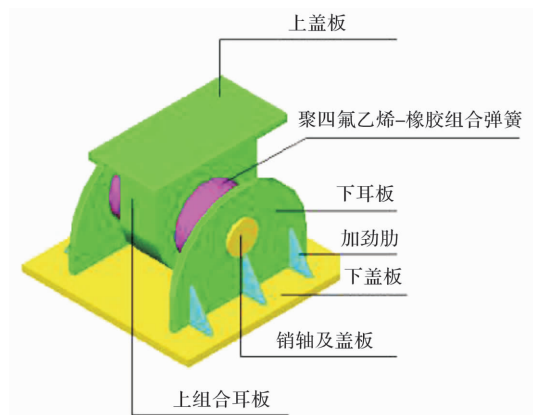


图 1 新型销轴支座三维立体模型

Fig. 1 The three-dimensional model of the new pinned connection

胶垫刚度值,用弹簧模拟橡胶垫整体,为了减小计算代价两模型中都只建立了受压缩作用的橡胶垫,并把上下盖板简化为刚性体。接触对主要在以下部位建立:上、下耳板与销轴接触区,销轴盖板与耳板接触区,上、下耳板与橡胶垫接触区,共建立接触 8 对。考虑到模型涉及接触问题,选择非协调模式单元 C3D8I。设置耳板处销孔的网格尺寸 8 mm,销轴作为主面的网格尺寸为 10 mm,其他部件边缘处设置网格尺寸为 20 mm 或 30 mm。各部件钢材均取近似的双线性模型,即屈服后有线性变化的应变强化。依据材料试验,Q235 的屈服强度标准值为 225 MPa,极限强度标准值为 375 MPa,调质 40Cr 的屈服强度标准值为 700 MPa,极限强度标准值为 880 MPa。

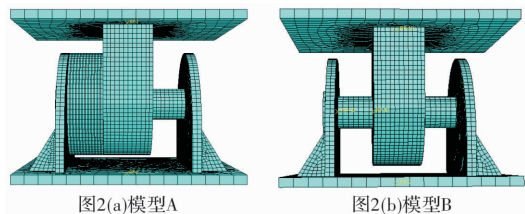


图 2 有限元模型

Fig. 2 Finite element models

### 1.3 加载制度

在模型设计初始阶段,假设支座平面外水平承载力由橡胶垫的抗压承载力控制,依据规范<sup>[15]</sup>取橡胶垫的压应力限值为 10 MPa,则近似取支座的平面外水平承载力为 400 kN。加载过程为:首先竖向加载至 200 kN 并持荷,进行水平方向加载,加载至 130 kN 时,暂停水平加载并持荷,竖向继续加载至 400 kN 并持荷,进行水平加载至 400 kN(如图 3 所示)。

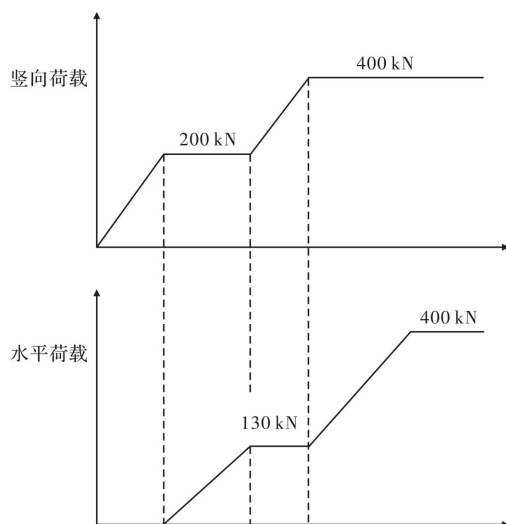


图3 加载制度

Fig. 3 Loading process

## 2 数值模拟与试验结果对比

### 2.1 荷载-位移曲线结果对比

将模型 A、B 的计算结果与文献[10]的试验结果共同绘制于图 4。通过观察曲线可以发现, 竖向荷载 200 kN 且水平荷载为 0~60 kN 时, 支座平面外水平刚度较大, 随着水平荷载增大至 130 kN, 刚度呈现下降趋势。当竖向荷载再次固定在 400 kN, 水平荷载由 130 kN 增大至 200 kN 时, 支座刚度再次提高, 之后随着水平荷载增大, 刚度再次下降。由图 4 还可以看出, 模拟结果与试验结果在水平荷载进入 200 kN 后吻合程度较高, 而在 0~130 kN 时误差较大。出现这种现象的原因主要有: 文献[10]中的试件是通过螺栓固定在工装板上, 再由工装板固定在试验台上, 初始加载阶段螺栓与栓孔间的孔隙会使测得的水平位移值偏大, 致使由试验测得的水平位移大于相同荷载作用下模拟的结果。

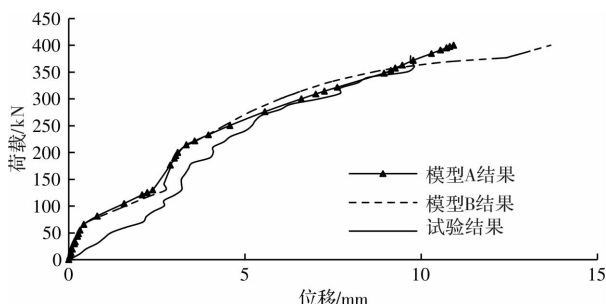


图4 荷载-位移曲线

Fig. 4 Load-displacement curve

对于两种模拟结果而言, 曲线在全过程具有很高的一致性, 说明文章所建立的两模型都能较好地再现支座在平面外水平荷载作用下的力学性能, B 模型的优势在于能够显著地提高计算效率。

### 2.2 部分测点应变结果对比

提取测点 1、4、12(图 5、图 6)的模拟结果与文献[10]中试验结果的应变值进行对比, 如图 7 所示。观察曲线发现(图中 LE33 代表竖向应变, LE11 代表水平应变)各曲线的整体趋势相近, 应变终值相近, 测点 1 的模拟与试验应变值相差一般不超过 25%, 模型 A、B 之间一般不超过 14%; 测点 4 的模拟与试验应变值相差一般不超过 28%, 模型 A、B 之间相差一般不超过 15%; 测点 12 的模拟与试验应变值相差一般不超过 19%, 模型 A、B 之间相差一般不超过 12%; 差值均在可接受范围之内, 进一步验证了有限元分析的合理性。

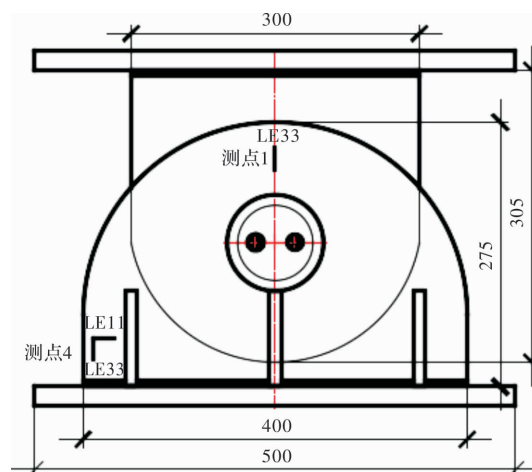


图5 测点 1、4

Fig. 5 Measuring point 1, 4

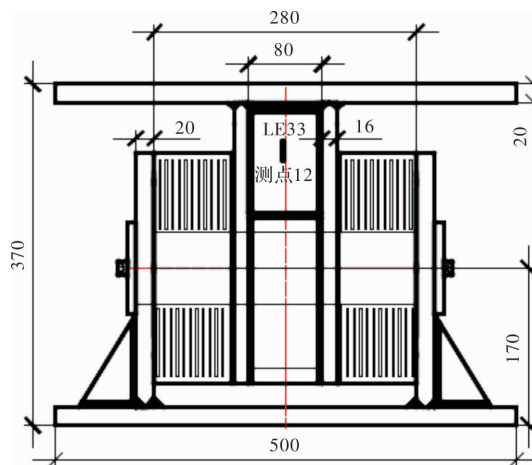


图6 测点 12

Fig. 6 Measuring point 12

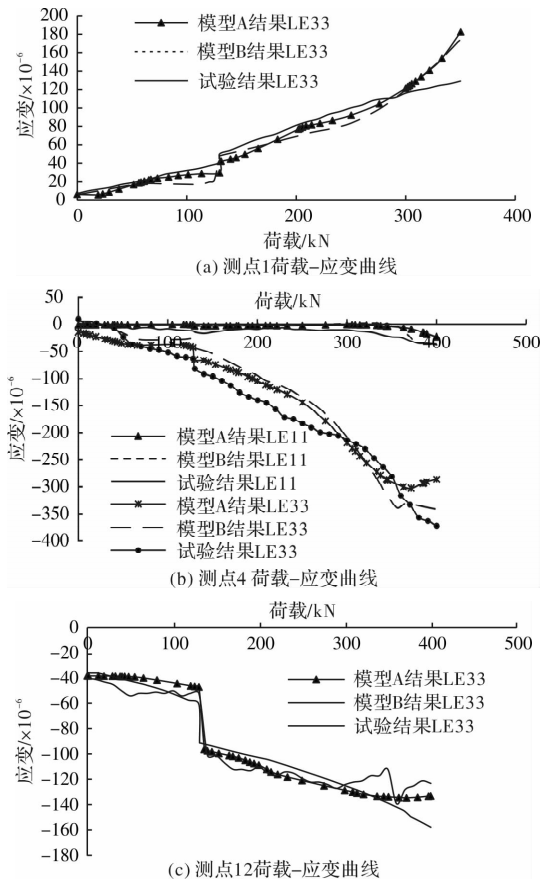


图7 荷载-应变曲线

Fig. 7 Load-strain curve

通过比较支座的荷载-位移曲线,及相应测点的荷载-应变曲线,表明本文的模拟结果和文献[10]的试验结果具有较好的一致性,有限元模型可以较好地再现支座在水平受力时的力学性能。

### 3 有限元分析

#### 3.1 屈服机制与荷载传递规律

支座的塑性发展过程为:首先耳板销孔与销轴接触部位发生塑性变形,接着下耳板加劲肋发生塑性变形,最后耳板根部(下耳板接近下盖板处)屈服。耳板最终状态的塑性变形如图8所示。

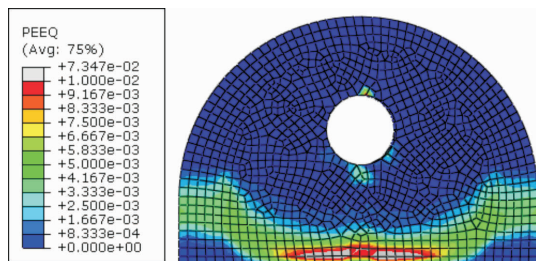


图8 耳板最终塑性变形区

Fig. 8 Final plastic deformation zone of ear plate

在荷载作用下,由于销轴与销孔之间存在空隙,两者接触面积很小,开始接触时存在应力集

中点,故在竖向荷载达到 90 kN 左右时,上下耳板的销孔处开始出现屈服,同时由于销轴材料的屈服强度远远大于耳板材料,在相同接触应力作用下,销轴仍处于弹性,销孔处塑性变形区域在竖向与水平荷载的共同作用下不断变大;位于销孔下的加劲肋端部受销孔屈服后变形较大的影响在水平荷载达到 100 kN 左右时屈服;下耳板根部受到沿耳板平面外方向的弯矩,随着水平荷载的继续增大,弯矩值不断增大,使得耳板根部最终大面积屈服。

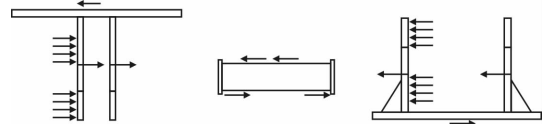


图9 各部件受力简图

Fig. 9 Force diagram of each component

分析支座各组成部分在水平荷载达到 200 kN 以前的受力状态如图9所示。销轴受到上下耳板的摩擦力处于平衡状态;上下耳板受到水平外力、摩擦力、橡胶垫压力作用,其中,摩擦力与橡胶垫水平压力方向相同,其和与水平外力等值反向。当水平外力大于耳板与销轴间的最大静摩擦力时,耳板与销轴出现滑移,橡胶垫开始受到压缩。随着荷载不断增大,水平位移也随之增大,致使销轴盖板逐渐和下耳板接触并产生接触力,其中,右侧盖板和耳板的接触力显著大于左侧,使得销轴与下耳板间的摩擦力减小甚至改变方向,但不影响上组合耳板的受力。销轴最终在摩擦力和接触力的作用下保持平衡,销轴以下部分在水平外力、摩擦力、橡胶垫压力、接触力作用下处于平衡状态。

#### 3.2 承载力分析

支座在竖向力为 200 kN 作用下,水平方向的荷载-位移曲线在初始加载阶段变形小刚度大,此阶段的位移主要来自于耳板的平面外变形,之后刚度降低的主要原因是销轴与耳板产生滑移,橡胶垫开始受到压缩,橡胶的特点决定其自身变形较大,支座刚度明显降低。竖向力增大到 400 kN,最大静摩擦力受到压力增大的影响得以提高。在水平荷载增大到 200 kN 的过程中,橡胶垫的压缩变形基本不变,其受到的压力也保持不变,销孔与销轴间的摩擦力在静力平衡条件下逐渐增大。待摩擦力达到最大静摩擦力,橡胶垫压缩变形增大,支座刚度下降,荷载-位移曲线呈现与竖向力 200 kN 作用时相同的特点。耳板根部较大范围的

屈服产生在 300 kN 左右,曲线在这一点没有明显的变化,说明根部屈服造成的位移增大相比橡胶垫的压缩变形较小,对支座的水平刚度影响并不大。最终,橡胶垫受到压力 260 kN,压缩变形显著,耳板的平面外变形较为明显,支座的水平变形更多的来源于橡胶垫的压缩。以上分析表明支座的平面外水平极限承载力判断准则主要考虑以下三种情况:

(1)橡胶到达极限压应力时支座的承载力,称为准则一;

(2)支座受到结构体系、层高、所在位置等因素的影响需要满足的水平变形限制,称为准则二;

(3)受橡胶垫压力作用的下耳板为受力最大的构件,下耳板的根部全面屈服时支座的承载力,称为准则三。

对支座进行设计时,应同时考虑这三种准则,并取三种情况得到的承载力中的最小值作为支座的极限承载力。

### 3.3 主要影响因素分析

综合以上的分析,确定橡胶垫刚度与摩擦作用为影响极限承载力的主要因素。在试验得到橡胶垫的刚度值为 31.0 kN/mm 的基础上,分别乘以系数 1.2、1.0、0.8、0.6 利用模型 B 预测支座的荷载位移曲线如图 10 所示。准则一、三均属于强度准则,做平行于横轴的直线可发现规律,橡胶垫刚度越大,支座承载力越高(位移小即承载力高);准则二属于变形准则,做平行于纵轴的直线可发现规律,橡胶垫刚度越大,承载力越高。接触面间摩擦系数分别取 0.2、0.25、0.3、0.35 时,利用模型 B 预测支座的荷载位移曲线如图 11 所示,分别作平行于纵横轴的直线可发现规律:摩擦力越大支座的承载力越高。

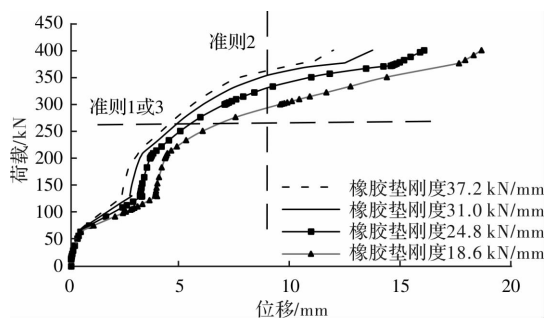


图 10 不同橡胶垫刚度的荷载位移曲线

Fig. 10 Load-displacement curves of different rubber pad stiffness

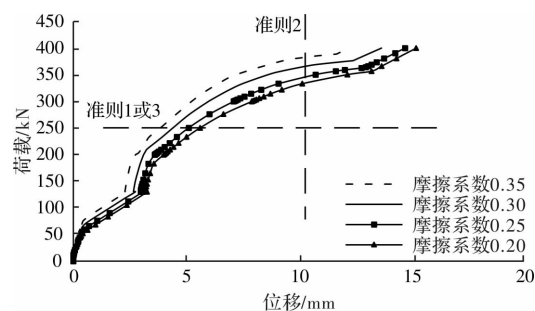


图 11 不同摩擦系数的荷载位移曲线

Fig. 11 Load-displacement curves of different coefficients of friction

## 4 结论

通过对新型销轴支座进行有限元建模分析,并与文献[10]中试验结果对比,得出如下结论:

(1)对比有限元与文献[10]的试验结果,验证了有限元分析的可行性,表明了本文建立的有限元模型可以较好地再现支座在平面外水平荷载作用下的力学性能,支座在平面外水平荷载作用下具有足够的承载能力与较强的变形能力。

(2)通过有限元对支座承受平面外水平荷载作用下的力学性能做进一步分析,得到了支座的屈服机制,荷载传递规律以及影响支座承载力的主要因素。

## 参考文献 References

- [1] LIANG Y B, LI D S, PARVASI S M, et al. Load monitoring of pin-connected structures using piezoelectric impedance measurement[J]. Smart Materials and Structures, 2016,25(10):105011.
- [2] 苏善跟,许宏亮. 斜拉桥销铰连接锚固形式初探[J]. 中国铁道科学, 2003,24(1):94-98.  
SU Shangen, XU Hongliang. Cable-stayed bridge pinned-hinge connection anchorage[J]. China Railway Science, 2003,24(1):94-98.
- [3] DUERR D. Pinned connection strength and behavior [J]. Journal of Structural Engineering, 2006, 132 (2):182-194
- [4] 蒋友宝,冯健,孟少平. 销接节点考虑接触特性的设计讨论[J]. 公路交通科技, 2006,23(9):76-80.  
JIANG Youbao, FENG Jian, MENG Shaoping. Discussion of pin-connected joints design considering contact[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006,23(9):76-80.

(下转第 571 页)



- 城市设计,2016(4):56-65.
- YE Yu, ZHUANG Yu. The raising of quantutative morphological tools in urban morphology[J]. Urban Design, 2016(4):56-65.
- [9] 周垠,李果. 15分钟步行圈生活便利指数评价与区县比较——以成都市中心城区为例[J]. 上海城市规划, 2018(5):78-82.
- ZHOU Yin, LI Guo. Evalution and district comparison of life convenience index in 15-minute walking circle: A case of Chengdu central city[J]. Shanghai Urban Planning Review, 2018(5):78-82.
- [10] 芦原义信. 外部空间设计[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1985.
- AWARA Yoshinobu. External space design[M]. Beijing: China Construction Industry Press, 1985.
- [11] HILLIER B, HANSON J. The social logic of space [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1984.
- [12] 范科红,李阳兵,冯永丽. 基于GIS的重庆市道路密度的空间分异[J]. 地理科学, 2011, 31(3):365-371.
- FAN Kehong, LI Yangbing, FENG Yongli. Spatial distribution of road density in Chongqing based on GIS [J]. Scientia Geographica Sinica, 2011, 31(3): 365-371.
- [13] PONT M B, HAUPT P. Spacematrix: Space, density and urban form[M]. Rotterdam: Nai Publishers, 2010.
- [14] Van den Hoek J. The MXI (Mixed-use Index) as planning tool for new towns in the 21st century[M]//Provoost M. New towns for the 21st century: The planned vs. the unplanned city. Amsterdam: SUN Architecture, 2009.
- [15] 何晓群,刘文卿. 北京:应用回归分析[M]. 北京:中国人民大学出版社, 2019.
- HE Xiaoqun, LIU Wenqing. Beijing: Applied regression analysis [M]. Beijing: China Renmin University Press, 2019.

(编辑 沈 波)

(上接第541页)

- [5] 王帅,赵宪忠,陈以一. 销轴受力性能分析与设计[J]. 建筑结构, 2009, 39(6):77-81.
- WANG Shuai, ZHAO Xianzhong, CHEN Yiyi. Mechanical behavior and design equation for pins connected plates[J]. Building Structure, 2009, 39(6):77-81.
- [6] DING D Y, WANG M, WANG YQ, et al. Experimental and analytical investigations on a large floor truss pinned connection[J]. Advances in Structural Engineering, 2017, 20(7):1007-1023.
- [7] 颜东煌,刘雪锋,田仲初,等. 销轴连接结构的接触应力分析[J]. 工程力学, 2008, 25(1):229-240.
- YAN Donghuang, LIU Xuefeng, TIAN Zhongchu, et al. Contact stress analysis of pinned connection[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(1):229-240.
- [8] 张滨,孙文波. 基于赫兹理论的销轴连接修正设计方法研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(S1):410-417.
- ZHANG Bin, SUN Wenbo. Modified design method of pinned connection based on Hertz theory[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(S1):410-417.
- [9] PEDERSEN N L. Stress concentration and optimal design of pinned connections[J]. Journal of Strain Analysis for Engineering Design. 2019, 54(2):95-104.
- [10] 张瑶. 新型销轴支座的极限承载力与滞回性能研究[D]. 天津:河北工业大学, 2015.
- ZHANG Yao. The study on the ultimate bearing capacity and hysteretic behavior of the new pin bearing [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2015.
- [11] 田稳苓,张瑶,邢超,等. 新型销轴支座竖向极限承载力研究[J]. 建筑结构, 2015, 45(3):68-72.
- TIAN Wenling, ZHANG Yao, XING Chao, et al. Study on vertical ultimate bearing capacity of a new pin bearing[J]. Building Structure, 2015, 45(3):68-72.
- [12] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 硫化橡胶短时间静压缩试验方法:HG/T3843-2008[S]. 北京:中国质检出版社, 2008.
- NDRC. Vulcanized rubber-Test method for short time static compression: HG/T3843-2008 [S]. Beijing: Quality Inspection of China Press, 2008.
- [13] 龚科家,危银涛. 叶进雄. 填充橡胶超弹性本构参数试验与应用[J]. 工程力学, 2009, 26(6):193-198.
- GONG Kejia, WEI Yintao, YE Jinxiong. Constitutive parametric experiment of tire rubber hyperelastic laws with application. [J]. Engineering Mechanic, 2009, 26(6):193-198.
- [14] 中国国家标准化管理委员会. 橡胶支座. 第1部分:隔震橡胶支座试验方法:GB/T 20688.1-2007[S]. 北京:中国标准出版社, 2007.
- SAC. Rubber bearing. Part 1: Seismic-protection isolators test methods: GB/T 20688.1-2007[S]. Beijing: China Standards Press, 2007.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范:GB 50011-2010 [S], 北京:中国建筑工业出版社, 2016.
- MOHURD. Code for seismic design of buildings: GB 50011-2010 [S], Beijing: China Building Industry Press, 2016.

(编辑 沈 波)