

装配式机械化桥连接器的接触分析与试验研究

刘宇晨,何晓晖,高磊

(解放军理工大学 野战工程学院,南京 210007)

摘要:为研究某装配式机械化桥连接器结构的力学特性,基于 ANSYS 接触分析理论建立了该连接器受力分析的三维有限元模型,并对不同荷载作用下连接器的受力情况进行了数值分析,得到了不同荷载工况下的关键部件的应力分布;通过制作连接器实体模型,进行了不同荷载工况下的试验,得到了连接器关键部件的试验应力值和关键结构的应力随荷载的变化规律;通过仿真结果与试验数据的对比研究,研究表明,连接器仿真的建模和分析策略具有可信性,能够作为连接器的进一步分析的方法,为下一步的分析提供了理论支撑。

关键词:连接器;ANSYS;接触分析;荷载试验

本文引用格式:刘宇晨,何晓晖,高磊. 装配式机械化桥连接器的接触分析与试验研究[J]. 四川兵工学报,2015(9): 85-89.

Citation format:LIU Yu-chen, HE Xiao-hui, GAO Lei. Contact Analysis and Experimental Research on Connector of Prefabricated Mechanized Bridge[J]. Journal of Sichuan Ordnance,2015(9):85-89.

中图分类号:U448

文献标识码:A

文章编号:1006-0707(2015)09-0085-05

Contact Analysis and Experimental Research on Connector of Prefabricated Mechanized Bridge

LIU Yu-chen, HE Xiao-hui, GAO Lei

(College of Field Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract: In order to study mechanical properties of a prefabricated mechanized bridge connector structure, first we built a 3-D finite model of the connector based on ANSYS contact analysis theory, and the numerical analysis of the connector were carried out under different load cases, which provided stress distribution of key parts of connector. Then a solid model was made to conduct experiments under different load cases, which provided experimental stress and the variety law of stress of key parts of connector, and according to the contrast of simulation results and experimental data, the simulation strategy of modeling and analysis of connector is dependable, which can provide methods and theoretical supports of further analysis.

Key words: connector; ANSYS; contact analysis; load experiment

装配式机械化桥是一种能快速架设、撤收,且灵活机动的对接式桥梁,其具有结构简单、能够承受的最大荷载的级别高、互换性好以及地形适应能力强等特点。装配式机械化桥不仅在军事运输、抢险救灾等方面具有重要作用,在平时的交通工程建设保障中也发挥着重要作用。作为一种可快速架设、撤收的特殊桥梁,装配式机械化桥的连接器是制约其性能的关键环节,如何实现不同工况条件下稳定可靠的连接是连接器研究的重点^[1]。本研究以某型装配式机械化桥

的连接器为研究对象,为了研究连接器结构的受力特性,利用 ANSYS 软件对连接器进行了荷载作用下的接触分析,并进行了连接器的模型试验以验证接触分析结果的可靠性。

1 某型装配式机械化桥连接器的结构

某型装配式机械化桥连接器结构包含上部连接器、下部连接器以及左、右2个坡度相同的连接斜面模块,2个连接模

块通过上部和下部连接器实现连接,连接器连接后的整体结构如图 1 所示。上部连接器由连接销和连接杆组成,如图 1 (b) 所示,下部连接器由倒丁字销和 U 型槽组成,U 型槽结构如图 2(a) 所示,倒丁字销结构如图 2(b) 所示。

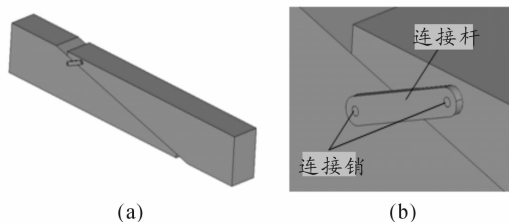


图 1 连接器整体结构

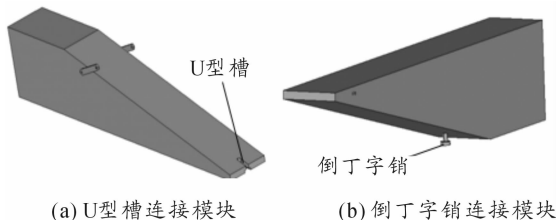


图 2 连接器 2 个连接斜面模块结构

当 2 个连接模块对接时,连接杆约束住两端的连接销,倒丁字销插入 U 型槽中,两斜面相互接触,共同承担作用在连接器上部的压力荷载,连接器两端采用简支约束。由于连接器主要通过面与面的接触来承担荷载,其中连接杆是通过销孔面与连接销面接触来产生约束,倒丁字销与 U 型槽是通过销表面与槽面接触来传递力,两斜面也是通过面与面之间接触摩擦承担一部分荷载作用。

因此,利用通用有限元软件 ANSYS 的接触分析功能来模拟连接器之间的连接,并研究连接器各部分结构在静荷载作用下的受力可靠性与力学性能。

2 基于 ANSYS 的连接器接触分析

2.1 接触分析理论基础

ANSYS 支持 3 种接触方式:点-点接触、点-面接触和面-面接触。因此,在求解问题之前,先要确定接触区域(包括可能发生接触的区域),在接触表面上设置相应的接触单元,建立可能存在的接触对。由于连接器主要接触对为面与面的接触,故这里主要介绍面-面接触分析理论^[2]。

1) 接触单元的确定

对于面对面的接触单元选择,首先要确定接触物体之间哪个表面是接触面,那么另外一个表面就是目标面,接触面和目标面就构成了一个接触对,构成接触对的接触单元和目标单元通过共享实常数组联系起来,因此,不同的接触对需要对应不同的实常数组,即使实常数没有变化也必须定义不同的组号。一般情况下,分别使用 TARGE 170 或 TARGE 169 来模拟三维刚性目标面,使用 CONTA 171、CONTA 172、

CONTA 173、CONTA 174 来模拟柔性接触面。接触对的选择原则一般为:① 若凸面可能与凹面或平面接触,则平面或凹面应当为目标面;② 若 2 个面的网格疏密不同,网格较密的面应设置为接触面,网格较粗的面设置为目标面;③ 若一个面比另一个面刚,则较柔的面应为接触面,而较刚的面为目标面;④ 若高阶和低阶单元位于不同的面,则高阶为接触面,低阶为目标面;⑤ 若一个面比另一个面大很多,则较大的面应为目标面。

2) 面-面接触单元的特性

面-面接触单元相比节点接触单元有很多优点,包括与低次和高次单元均兼容、计算过程中发生大滑动和摩擦的大变形时也有效、可以计算壳厚度的改变以及梁的厚度、计算时能够采用半自动接触刚度、对刚性面的控制可以利用“控制节点”的方式实现等。

3) 面-面接触的主要分析步骤

模型的建立及网格划分。对分析模型结构进行简化并建立有限元分析模型,设置单元的类型、实常数和材料特性等初始条件,采用恰当的单元对分析模型进行网格划分;

识别和建立接触对。由于几何模型和潜在变形的多样性,有时一个接触面的同一区域可能和多个目标面发生接触,所以要确定接触区域的大小,并且使用多组覆盖层接触单元定义多个接触对,每个接触对有不同的实常数号。

设置实常数和单元关键字。ANSYS 使用实常数和几个单元关键字来控制面-面接触单元的接触行为,包括:KNN(法向接触刚度因子)、FTLON(最大穿透范围)、ICONT(初始靠近因子)、PINB(Pinball 区域)、PMIN/PMAX(初始穿透允许范围)等。太大的接触刚度有时会造成问题不收敛^[3]。

其他步骤还包括施加边界条件、定义求解和载荷步选项、求解、结果提取与分析等。

2.2 连接器有限元模型的建立

利用实体单元 SOLID186 对连接器进行建模,连接器材料为高强钢 WELDOX960($[\sigma] = 768 \text{ MPa}$, $[\tau] = 490 \text{ MPa}$),密度为 $7\ 850 \text{ kg/m}^3$,弹性模量为 210 GPa ,忽略结构接触面之间的间隙,利用 APDL 语言建立的几何模型,并对模型进行网格划分,自由划分单元网格后的连接器有限元模型如图 3 所示,单元总数为 291 690 个,节点数为 405 623 个。

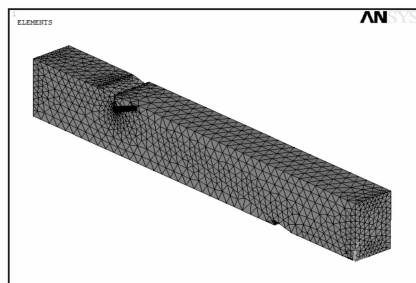


图 3 连接器有限元模型

由于有限元模型采用实体单元建模,故当划分网格较细时,单元的数量会大幅度增加,因此需要选择合适的划分密

度,为了减少计算资源的消耗,划分模型网格时采用局部细化法,即连接杆和连接销轴、“倒丁字”销和 U 型槽等关键连接部位的网格划分更细密,细化后的连接杆模型和“倒丁字”销模型如图 4(a)、4(b)所示。

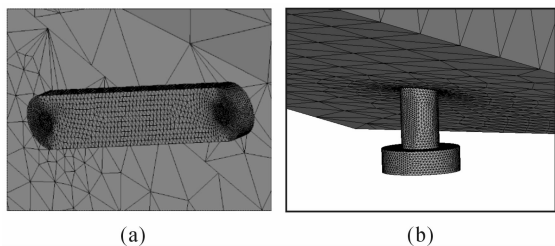


图 4 连接板和“倒丁字”销细化模型

2.3 静荷载作用下的连接器受力分析

1) 接触对和初始条件的设置。

根据上述的接触面设置原则,可以判断出连接器有 4 对接触面,分别为:“倒丁字”销与 U 型槽之间的接触面、连接杆与上销轴之间的接触面、连接杆与下销轴之间的接触面以及上斜面与下斜面之间的接触面^[4]。分别选定目标面和接触面,根据选择原则接触面分别为:“倒丁字”销面、上销轴面、下销轴面和上斜面。

在设置接触对时,通过 ESURF 命令选择目标面上的节点生成三维目标单元 TARGE170,选择接触面上的节点生成相应的三维接触单元 CONTA174。最后生成的接触对如图 5 所示。

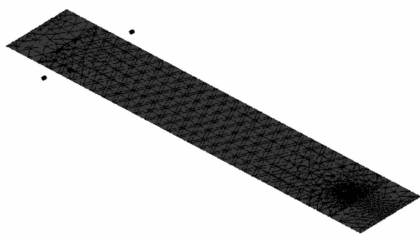


图 5 连接器模型的接触对

2) 约束条件和荷载条件的确定。

研究荷载作用下的连接器的受力特性,连接器应处于简支工况,在 ANSYS 中,通过约束相应节点的自由度来模拟简支工况^[5-8],对于建立的连接器简化有限元模型,通过约束一端底边上的全部节点的 UX、UY、UZ 3 个方向的自由度,约束另一端底边上的全部节点的 UY、UZ 2 个方向的自由度来模拟简支工况,设定重力加速度为 9.8 m/s^2 。

为了研究不同力荷载下的连接器受力变化情况,将荷载条件设定为作用在连接器中间点的集中力荷载,荷载值为 1 t、2 t、3 t、4 t、5 t 5 种工况。

3) 连接器受力分析。

对于不同荷载作用下的分析,仅需改变荷载的大小即可,其他分析条件如接触对的选择、约束条件的设置、力作用

的位置、计算求解的方法等均是相同的。因此,在这里仅对 5 t 荷载作用下连接器的受力特性进行分析,其他工况与 5 t 工况类似。

对于 5 t 荷载作用的工况,由于主要研究对象是连接板结构和倒丁字销结构,因此,提取连接杆的应力分布云图如图 6 所示,倒丁字销的应力分布云图如图 7 所示,由图 6 可以看出连接板与连接销的接触销孔是应力集中的部位,最大应力值为 112.208 MPa ,两根连接杆都承受拉力,靠近销孔处的等效应力值均为 25.943 MPa 。由图 7 可以看出倒丁字销的圆台与连接轴的交界处是应力集中的部位,最大应力值为 104.855 MPa ,连接轴靠近圆台处的应力值为 90.624 MPa 。

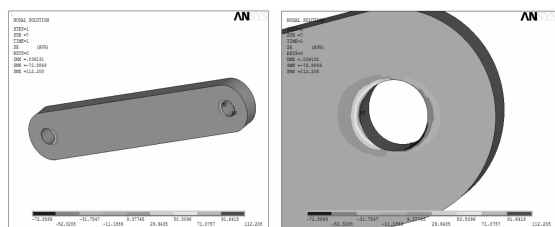


图 6 5 t 荷载作用下连接杆的应力分布云图

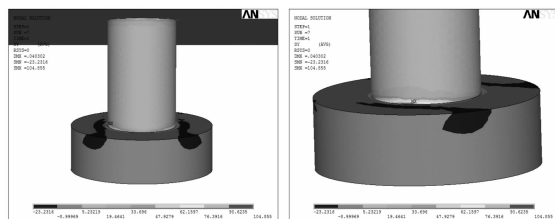


图 7 5 t 荷载作用下的倒丁字销应力分布云图

其他 4 种工况的分析过程与应力分布与 5 t 作用工况基本相同或类似,故在此不再赘述。为了便于与模型试验数据的对比,每一种荷载工况下均提取连接杆靠近销孔处的应力值、倒丁字销连接轴靠近圆台处的应力值,并将各工况下各关键连接件的应力值汇总,如表 1 所示。

表 1 连机器接触分析结果汇总

| 应力值/MPa | 荷载值/t | | | | |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 连接杆 | 0.635 | 1.821 | 12.890 | 18.405 | 25.943 |
| 倒丁字销 | 19.850 | 42.776 | 61.337 | 81.230 | 90.624 |

3 连接器的模型试验

为验证连接器接触分析结果的可信性,采用连接器的实际尺寸制作了模型并进行荷载试验,试验约束条件为简支约束,简支端点的跨度为 2 m,上部连接杆中心与下部倒丁字销中心之间的距离为 862 mm。

3.1 试验仪器选择及布置

试验采用了 DH3818 静态应变测试仪来对重要部位的应力应变进行测量,该应变测试仪集数据采集箱、微型计算

机及支持软、硬件构成。可自动手动、准确、可靠、快速进行静态应变测量,配接合适的应变式传感器,还可对压力、扭矩、位移、温度等物理量进行测量。

试验主要需要测量的是连接杆与倒丁字销的应力值,故通过应力传感器将输出数据转换为应力值,在上述仿真分析得到了连接杆和倒丁字销关键位置的应力值,在静载试验中通过在相应位置粘贴应变片来测得不同工况下的应力值大小,应变片在连接杆上的布置位置如图8所示,应变片在倒丁字销上的布置位置如图9所示。

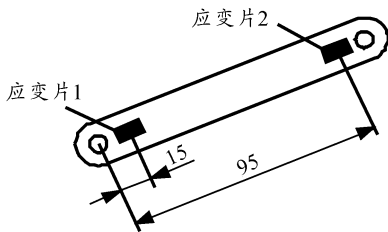


图8 连接杆上的应变片布置位置

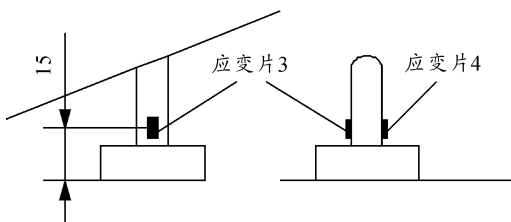


图9 倒丁字销上的应变片布置位置

3.2 加载方式与荷载条件

对于静载的施加一般分为2种加载方式:通过在加载点放置相应质量的重物和通过专用的加力架(即千斤顶)进行不同工况的加载,本实验采用专用的加力架来对模型进行加载,加载位置为连接器的中点处,加载方式如图10所示。



图10 静载试验的加载方式

在试验过程中,千斤顶缓慢地加载至特定荷载值,以去除试验梁之间的间隙,从而尽可能地避免由于冲击使连接器结构发生振动、残余应变和变形而影响试验结果的准确性,当荷载施加至稳定状态时,再采集相应数据,单组数据分多次采集,计算分析时取平均值,以确保数据的准确性。

3.3 模型试验结果汇总

分别进行连接器5种荷载工况的荷载试验,并记录相应

的数据,试验的数据汇总如表2所示。

表2 连接器模型试验结果汇总

| 应力值/MPa | 荷载值/t | | | | |
|------------|-------|-----|----|----|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| σ_1 | -1 | 1.2 | 15 | 17 | 23 |
| σ_2 | -2 | 1 | 13 | 16 | 21 |
| σ_3 | 66 | 32 | 50 | 83 | 100 |
| σ_4 | -21 | 37 | 52 | 85 | 101 |

表1中, σ_1 、 σ_2 、 σ_3 、 σ_4 分别代表应变片1~4的应力测量结果。

由表2可以看出,随着荷载的增大,各部位的应力值也相应增大,当荷载为1t时,连接杆和倒丁字销上的应力均出现了负值,这表明连接杆和倒丁字销发生受压现象,连接杆承受压力是由于将连接器模型简化为连接杆后两端都是销孔连接,使结构能够承受压力作用;倒丁字销上测得的应力值一侧为正,另一侧为负,表明倒丁字销在荷载施加过程中有侧弯的趋势,导致连接销轴一侧受拉、另一侧受压。

4 仿真与试验结果对比分析

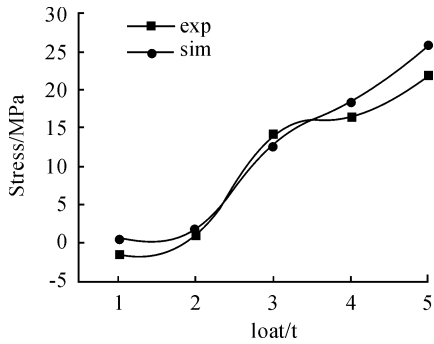
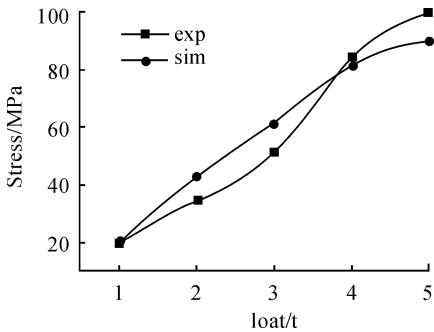
由于在试验中出现了负的应力,为与仿真结果进行对比,将所有试验测得应力值的平均值汇总后,如表3所示,将试验测得的应力平均值与仿真分析得到的应力值进行对比,并计算误差, σ_a 为连接杆的应力平均值, σ_b 为倒丁字销的应力平均值。表3中, σ'_a 、 σ'_b 分别为 σ_a 、 σ_b 对应的仿真应力值。

表3 试验与仿真应力值的对比

| σ_a / MPa | σ'_a / MPa | 误差/ % | σ_b / MPa | σ'_b / MPa | 误差/ % |
|---------------------|----------------------|----------|---------------------|----------------------|----------|
| -1.5 | 0.635 | 57.6 | 19.5 | 19.850 | 1.8 |
| 1.1 | 1.821 | 65.5 | 34.5 | 42.776 | 24 |
| 14 | 12.890 | 7.9 | 51 | 61.337 | 20.3 |
| 16.5 | 18.405 | 11.5 | 84 | 81.230 | 3.3 |
| 22 | 25.943 | 17.9 | 100.5 | 90.624 | 9.8 |

图11、图12分别给出了 σ_a 和 σ'_a 、 σ'_b 和 σ_b 随荷载的变化曲线。

由表3可以看出,2组数据在静荷载值较小时,仿真值与试验值之间的误差较大,一方面是由于荷载较小时,各部分的应力值本身就很小,加上由于试验误差和实际模型中缝隙的存在,导致试验值会有一定波动;当荷载值逐渐增大时,仿真值与实验值之间的误差呈变小的趋势,2组数据后3种工况的对比误差均小于30%,最小误差达到0.6%,这是符合工程要求的。

图 11 σ_a 和 σ'_a 的对比曲线图 12 σ'_b 和 σ_b 的对比曲线

由图 11、图 12 可以看出,试验值与仿真值的整体变化趋势一致,两者之间的差值总体上来说在可接受范围之内,能够满足工程需求。由图 11 的试验值曲线可以看出当荷载从 1 t 增大到 2 t 的过程中,连接杆上的应力缓慢增长,而当荷载增大到 3 t 时,连接杆的应力大幅度增加,而当荷载进一步增大时,应力增长又趋于平缓,表明当作用在连接器上的荷载为 2~3 t 之间存在一个临界值,使连接器的受力状态发生变化;同样,由图 12 的试验值可以看出,倒丁字销在 2~3 t 之间的应力增长速率变缓随后又增快。由连接器的结构特征可以分析推断出现这种现象是由于连接斜面之间发生了相对滑动,导致连接杆和倒丁字销的接触状态发生变化,而引起应力的变化,随着荷载的增大接触状态趋于稳定,应力值变化规律也趋于稳定。

5 结束语

综上所述,通过试验与仿真结果的对比得到了连接器关键部位在不同荷载条件下的受力特性和关键结构的应力变化规律,表明了连接器的接触分析结果是可靠的,有限元模型的建模策略是正确的,能够为连接器结构的进一步分析如动力学分析提供基础。且连接器的结构是稳定可靠的,能够承受规定范围内的荷载,该连接器的结构能为大型装备连接机构的改进提供参考,连接器有限元模型的建模策略和接触分析的方法具有一定参考价值。

参考文献:

- [1] 余澜,李润培,舒志. 移动式海上基地连接器研究现状与发展[J]. 海洋工程,2003,21(1):60-66.
- [2] 王新敏,李义强,许宏伟. ANSYS 结构分析单元与应用[M]. 北京:人民交通出版社,2012.
- [3] 李妍. 基于 ANSYS 软件的接触问题分析及在工程中的应用[D]. 吉林:吉林大学,2004.
- [4] Yeh M K, Fang L B. Contact analysis and experiment of delaminated cantilever composite beam[J]. Composites: Part B, 1999(30):407-414.
- [5] 王增山,虞伟建,王开福. 基于 ANSYS 的机翼接头强度分析及优化设计[J]. 机械设计与制造,2009(7):47-49.
- [6] 兆文忠,蔡培培,王剑. 接触非线性分析及对车下吊装联接结构螺栓可靠性的校验[J]. 大连交通大学学报,2012(6):6-9.
- [7] 赵卫平. 基于 ANSYS 接触分析的粘贴-滑移数值模拟[J]. 建筑科学与工程学报,2011,28(2):44-51.
- [8] 李珊珊,韩丽俊,梁义维. 基于 ANSYS 的斜齿轮接触应力有限元分析[J]. 机械工程与自动化,2009(4):23-24.

(责任编辑 唐定国)