

文章编号: 1001-8360(2011)11-0093-06

# 高强螺栓拼接接头传力特性的有限元模拟与试验研究

黄永辉<sup>1</sup>, 王荣辉<sup>2</sup>, 刘长海<sup>2</sup>, 刘小刚<sup>2</sup>

(1. 广州大学 广州大学-淡江大学工程结构灾害与控制联合研究中心, 广东 广州 510006;

2. 华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510640)

**摘 要:** 为研究摩擦型高强螺栓连接接头力学性能与受力状态, 对 2 组试件进行有限元数值模拟分析与试验研究。分析各排螺栓传力比、芯板及拼接板截面应力状态、接触面摩擦应力分布规律。数值模拟结果和试验结果表明: 各排螺栓传力比呈马鞍型分布, 两端大, 中间小; 芯板和拼接板应力沿板横向和纵向均呈波浪形分布; 不同螺栓压力影响区直径均为 2.85 倍栓孔直径左右。试验结果与有限元数值模拟结果吻合良好, 验证了有限元分析的正确性。本文得到的部分经验参数可为该类节点设计验算提供参考。

**关键词:** 摩擦型高强螺栓; 传力特性; 有限元分析; 试验研究

**中图分类号:** TU391 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1001-8360.2011.11.016

## Experimental Study and Finite Element Analysis on Friction High-strength Bolt Connections

HUANG Yong-hui<sup>1</sup>, WANG Rong-hui<sup>2</sup>, LIU Chang-hai<sup>2</sup>, LIU Xiao-gang<sup>2</sup>

(1. Guangzhou University-Tamkang University Joint Research Center for Engineering Structure Disaster Prevention and Control, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China;

2. School of Civil and Transportation Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** In order to study the mechanical behaviors including the load transfer factors of various rows of bolts, stressing state of the sections of core and butt-cover plates and distribution of friction stresses over the contact surface, both finite element analysis (FEA) and experimental study are made with two groups of specimens. FEA and experimental results show as follows: The loads transfer factors of rows of bolts are distributed in the saddle shape, i. e., a falling-off between the two end edge rows; the stresses of core plates and butt-cover plates are distributed laterally and longitudinally in the form of waves; each of the diameters of the pressure effect regions of varied bolts is about 2.85 times of the diameter of the bolt hole. Good agreement between the experimental and FEA results verifies the accuracy of the finite element analysis. Some parameters from experience will be of significant reference for future research and design of such bolt connections.

**Key words:** friction high-strength bolts; mechanical behavior; finite element analysis (FEA); experimental study

摩擦型高强度螺栓连接具有施工简便、可拆换、连接整体性和刚度较好、耐疲劳、不松动、较安全等优点, 是钢桥安装的主要形式之一<sup>[1]</sup>。我国 1958 年成功研制 40 硼钢高强度螺栓, 给施工连接提供方便, 使焊接钢桥在我国开始向大跨度发展<sup>[2]</sup>。九江长江大桥钢梁采用直径 27 mm 高强度螺栓, 预张力为 300 kN<sup>[3]</sup>。

目前国内主要有 3 部关于高强度螺栓摩擦型连接设计计算规范。其中 GB50017—2003《钢结构设计规范》<sup>[4]</sup>和 JGJ 82—91《钢结构高强度螺栓连接的设计、施工及验收规程》<sup>[5]</sup>给出单个高强螺栓抗滑承载力设计值、轴向承载力设计值以及剪力和轴力共同作用下承载力设计值计算公式。TB10002.2—2005《铁路桥梁钢结构设计规范》<sup>[6]</sup>则给出单个高强螺栓容许抗滑承载力计算公式以及当双抗滑面连接螺栓排数超过 6 排或单抗滑面连接螺栓排数超过 4 排时, 第一排螺栓

收稿日期: 2009-04-24; 修回日期: 2009-10-26

基金项目: 广东省交通厅科技项目(2007-15)

作者简介: 黄永辉(1982—), 男, 湖南株洲人, 助理研究员, 博士。

E-mail: huangyh@gzhu.edu.cn

传力比设计值。以上规范均没有给出连接接头连接板应力计算公式、抗滑面摩擦力分布规律以及各排螺栓传力比。国内外对高强螺栓受力状态已进行一些试验研究<sup>[7-11]</sup>,但采用试验方法研究节点较为简单,时间和经济耗费较大。随着有限元方法的发展,有限元数值模拟方法逐渐成为一种可行研究手段。文献[12]数值模拟 3 个螺栓连接的翼板连接梁柱节点在火灾作用下力学特性;文献[13]通过数值模拟,研究 4 个螺栓对接接头弯曲性能;文献[14]通过显式动力分析数值模拟螺栓连接接头在火灾作用下力学性能。以上研究对象基本是建筑结构常用梁柱节点,与桥梁结构中长列螺栓摩擦型连接接头不同。长列螺栓接头螺栓数量多,摩擦接触面大,各排螺栓受力不均匀,有必要对其传力特性进行细致研究,找出其普遍规律,为设计提供必要参考。本文采用有限元数值模拟与试验研究方法对各排螺栓传力比、芯板及拼接板截面应力状态、接触面摩擦应力分布规律等进行分析,其结论可为桥梁结构高强度螺栓摩擦型拼接接头设计计算提供参考。

### 1 试验过程

#### 1.1 试件描述

本文共设计 2 组试件,采用 Q235 钢板,板面采用钢丝刷清除浮锈,摩擦系数为 0.45;采用 10.9S 级 M16 螺栓,栓孔直径为 17 mm;电阻应变片粘贴在拼接板表面。试件尺寸见图 1。

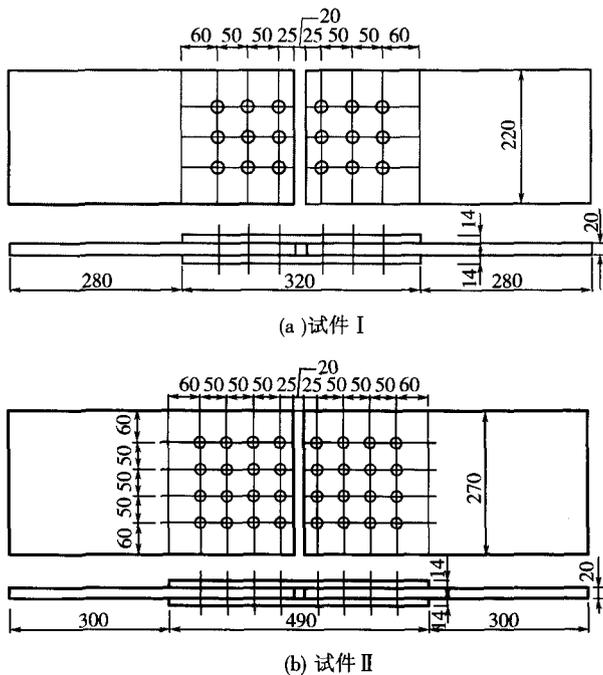


图 1 试件尺寸(单位:mm)

#### 1.2 试件制作

试件按 GB50017—2003《钢结构高强度螺栓连接的设计、施工及验收规范》<sup>[5]</sup>和 GB50221—1995《钢结构工程质量检验评定标准》<sup>[15]</sup>要求制作,应变通过 YJ-33 静态电阻应变仪联机采集。

由于节点板存在客观不平(厚板更加突出),加之螺栓拧紧时板会有压缩变形,在多排螺栓安装时会出现先拧紧螺栓不同程度松弛,试验时需对螺栓预拉力进行精确测量。考虑试件受力对称性,每个试件选取 9 个螺栓进行测量。每个螺栓在螺栓杆上对称地开 2 个浅槽,槽底放置应变片,表面用树脂覆盖加以保护;在螺栓头中部对应位置各开 1 个孔,用于引出导线。通过实测应变片计算螺栓承受预拉力。实测 M16 螺栓预拉力为 78~84 kN,数值模拟时预拉力取 80 kN。

#### 1.3 测点布置

由于芯板布置应变片较困难,需要在芯板开槽以粘贴应变片,而本次试验需要布置较多应变片,粘贴比较困难,并不能保证成活率。因此,本文在拼接板上布置应变片(见图 2),通过拼接板应力状态反推芯板应力状态,并校核有限元数值模拟结果。

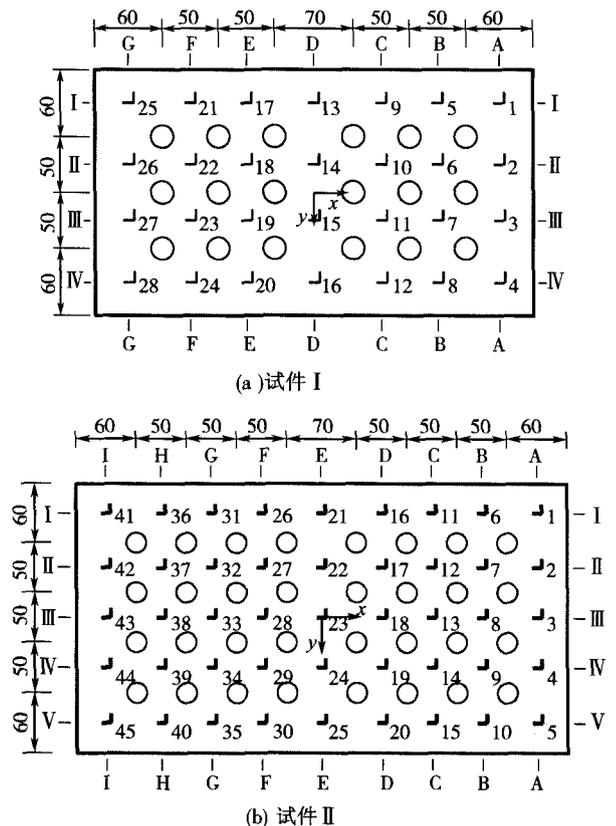


图 2 试件拼接板测点布置(单位:mm)

### 2 有限元模型的建立

采用通用有限元软件 ANSYS 进行模拟计算,连

接板及高强螺栓采用 Solid45 实体单元模拟;拼接板与芯板之间的接触面采用 Conta173 接触单元模拟;高强螺栓预拉力通过预应力单元 Prets179 施加。整体模型和螺栓模型见图 3。采用一端固定,一端施加外力的方式加载。

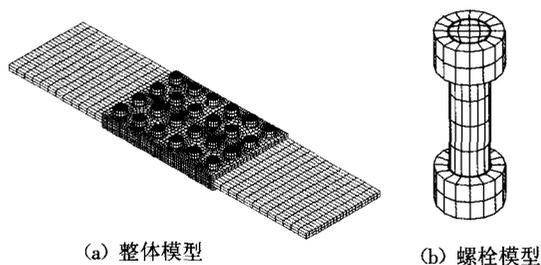


图 3 有限元模型

### 3 试验结果及讨论

#### 3.1 传力比分析

栓接接头在承受外力时,接头中各排螺栓所传递的力是不均匀的,接头第一排和最末一排螺栓传递的力最大,依次向中部递减。每排螺栓所传递的外力与全部螺栓所传递总外力之比称为传力比,若  $N$  排螺栓均匀传力,则每排螺栓传力比为  $1/N$ 。

由于本试验为拼接接头拉伸试验,因此本文主要比较沿拼接板轴向应力试验结果与有限元结果,后文中应力均指轴向应力。由于应力在拼接板横截面上呈波浪形分布,实际布置测点可能处于应力波峰或应力波谷位置,并不能全面反应拼接板应力状态;而有限元法则可以全面直观得到拼接板应力状态。因此本文仅给出各排螺栓传力比有限元计算结果,见表 1~表 2。图 4 为各排螺栓的传力比柱状图。

表 1 试件 I 各排螺栓传力比

荷载 $F/kN$	螺栓排号		
	1	2	3
180	0.470	0.135	0.396
240	0.450	0.141	0.408
300	0.431	0.155	0.415

表 2 试件 II 各排螺栓传力比

荷载 $F/kN$	螺栓排号			
	1	2	3	4
300	0.415	0.103	0.112	0.371
400	0.403	0.115	0.109	0.373
500	0.392	0.132	0.114	0.362

由表 1、表 2 及图 4 可知:

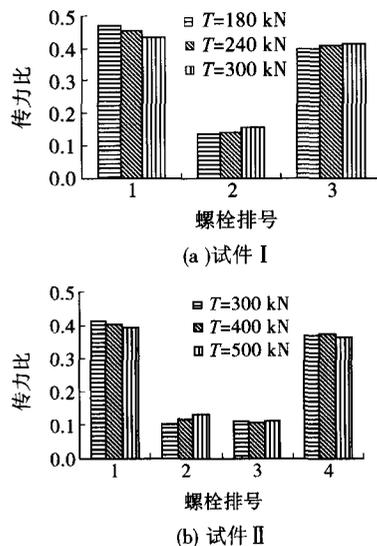


图 4 螺栓传力比

(1) 各排螺栓传力比呈马鞍型分布,拼接接头第一排和最末一排螺栓传递应力最大,中间螺栓传递应力较小;

(2) 不同荷载作用下,各排螺栓传力比不同,拉力越大,各排螺栓传力比越均匀。

#### 3.2 拼接应力沿板轴向分布规律

表 3~表 4 分别为试件 I、II 部分测点实测与计算应力比较。图 5、图 6 分别为试件 I、II 应力实测值和计算值比较曲线,图中横坐标为测点沿板轴向位置。

表 3 试件 I 测点实测应力与计算应力比较 MPa

测点	实测值	计算值	测点	实测值	计算值
1	6.72	0.85	9	31.29	44.75
2	6.51	5.70	10	48.93	58.38
3	7.14	8.05	11	48.09	57.92
4	7.77	0.72	12	31.71	44.19
5	12.18	28.60	13	38.01	51.08
6	32.55	53.04	14	56.70	58.60
7	35.91	52.46	15	59.43	56.81
8	20.16	28.04	16	38.85	51.03

表 4 试件 II 测点实测应力与计算应力比较 MPa

测点	实测值	计算值	测点	实测值	计算值
1	0.21	-0.14	13	61.95	71.96
2	2.73	7.07	14	57.33	67.23
3	1.68	8.78	15	40.95	50.49
4	0.84	7.07	16	54.60	61.72
5	2.10	-0.14	17	58.38	72.99
6	24.28	34.16	18	60.90	71.37
7	46.33	64.55	19	60.90	72.99
8	49.48	66.38	20	52.29	61.72
9	41.71	64.55	21	66.15	69.27
10	23.65	34.16	22	73.71	71.04
11	37.80	50.49	23	60.69	69.79
12	56.91	67.23	24	74.97	71.04

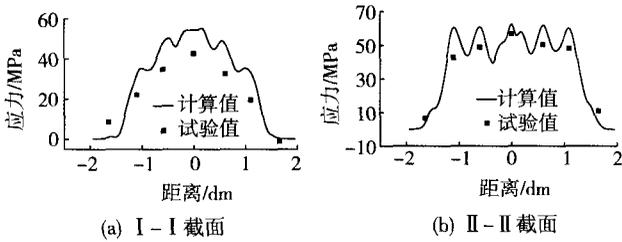


图5 试件I拼接板应力沿板轴向分布图(F=320 kN)

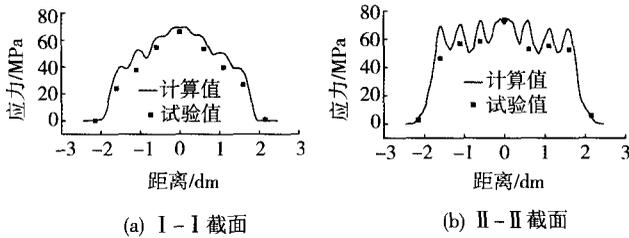


图6 试件II拼接板应力沿板轴向分布(F=500 kN)

由表3、表4和图5、图6可知：

(1) 拼接板应力沿板轴向呈波浪形分布，在螺栓中心连线上应力较小，而在螺栓间应力较大。拼接板应力由两端向中部呈阶梯状增加。由此可见，芯板内力是通过各排螺栓逐渐传递到拼接板上的。

(2) 拼接板各测点应力试验值和计算值吻合较好，虽有一定误差，但趋势一致，且基本都是试验值小于计算值。

(3) 应力计算值与试验值误差产生原因为：拼接板应力计算值沿板轴向波动较大；而实际应变片是有一定长度的，实测应力是应变片长度范围内应力平均值。因此应力比螺栓间应力峰值更小。

### 3.3 拼接板应力沿栓孔间横截面分布规律

图7、图8分别为试件I、II应力实测值和计算值比较曲线，其中横坐标为测点在板横向位置。限于篇幅，只列出B、C截面的应力分布规律，其它截面类似。

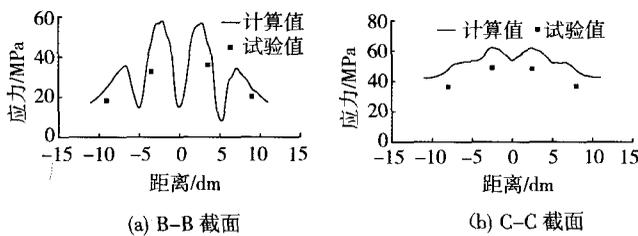


图7 试件I拼接板应力沿板横向分布(F=320 kN)

由图7、图8可知：

(1) 拼接板在两排螺栓之间应力沿板横向呈波浪形分布，在螺栓连线上应力较小，而在螺栓行间应力较大。

(2) 拼接板各测点应力试验值和计算值大部分吻合较好，趋势一致。总体而言，计算值均大于试验值。

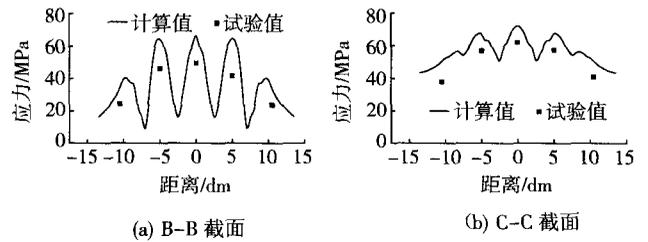


图8 试件II拼接板应力沿板横向分布(F=500 kN)

误差产生原因同3.2节。

(3) 有限元计算结果与试验结果吻合良好，为准确判断螺栓连接构件各元件受力状态提供可能。

### 3.4 芯板应力沿栓孔间横截面分布规律

由拼接板应力有限元计算结果与实测结果比较可知：二者大部分吻合较好，规律一致，证明了有限元数值模拟结果的正确性。因此，虽然芯板没有布置应变测点，可通过数值模拟结果得到其应力分布规律，见图9~图10。

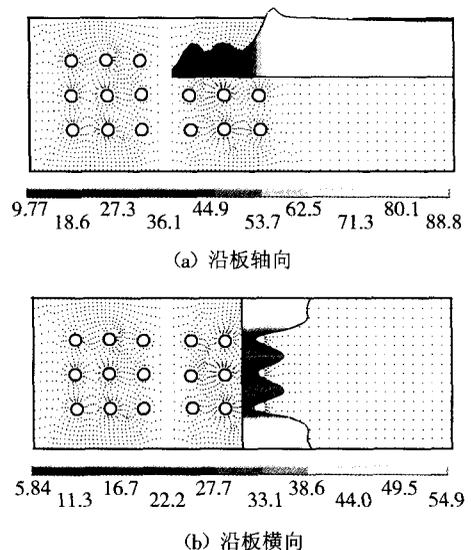


图9 试件I芯板应力分布云图(单位:MPa)

由图9~图10可知：

(1) 芯板应力沿板轴向呈波浪形分布，在螺栓中心连线上应力较大，而螺栓间应力较小。这与拼接板应力沿板轴向分布规律相反。

(2) 芯板在两排螺栓之间应力沿板横向呈波浪形分布，在螺栓连线上应力较小而在螺栓行间较大，这与拼接板应力沿板横向分布规律一致。

### 3.5 接触面的摩擦力分布规律

对于摩擦型高强度螺栓连接，摩擦力在芯板和拼接板之间分布不均匀，仅分布在栓孔周围。这是由于高强度螺栓预拉力作用在钢板上，栓孔旁接触面所受压力最大，接触压应力呈环状由栓孔向周围递减至零，见图11。图12为试件I摩擦应力计算云图。由图11

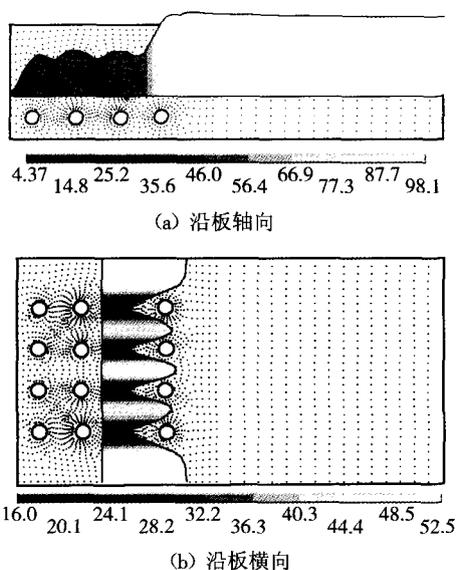


图 10 试件 II 芯板应力分布云图(单位: MPa)

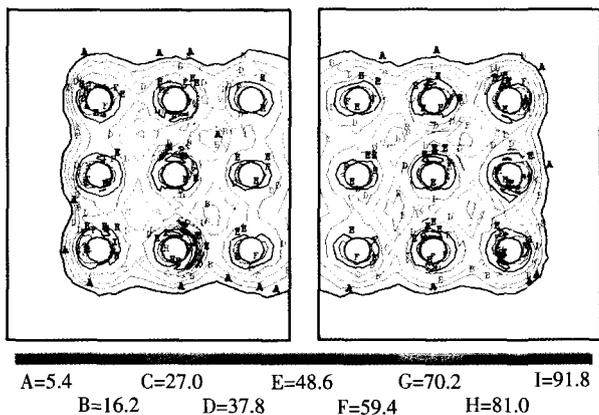


图 11 试件 I 接触压应力云图(单位: MPa)

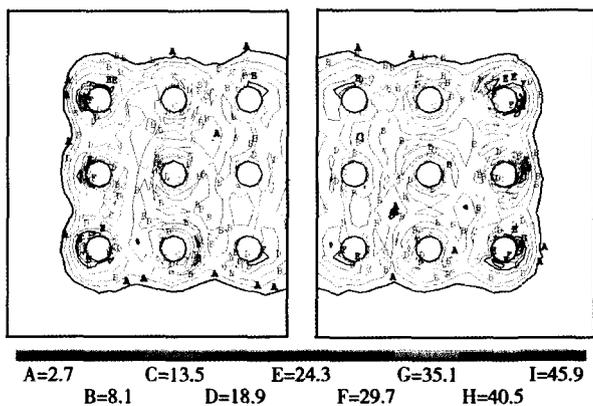


图 12 试件 I 摩擦应力云图(单位: MPa)

可以看出:在**高强螺栓**预拉力作用下,拼接板和芯板并不是整个接触面都有接触压应力,而是有一定范围的。该区域呈圆环状,称为压力影响区。由表 5 可知:螺栓类型和栓孔直径相同时,压力影响区范围基本相同,其直径与栓孔直径比均为 2.85 左右。当压力影响区直径大于螺栓之间行距或列距时,不同螺栓压力影响区

互相重叠,形成整片压力影响区。

表 5 压力影响区大小比较

	栓孔直径 $D_1/\text{mm}$	螺栓行距 $/\text{mm}$	螺栓列距 $/\text{mm}$	压力影响区 直径 $D_2/\text{mm}$	$D_2/D_1$
试件 I	17	50	50	48.25	2.84
试件 II	17	50	50	48.66	2.86

#### 4 结论

通过有限元数值模拟计算和试验研究,对**高强螺栓**连接构件传力特性进行分析,得到以下结论:

(1) 各排螺栓所传递的力并不均匀,其传力比呈马鞍型分布,第一排和最末一排螺栓传递轴力最大,依次向中部螺栓递减。

(2) 拼接板应力沿板轴向呈波浪形分布,大小相间,在螺栓中心连线上应力较小,而在螺栓间应力较大;芯板应力沿板轴向也呈波浪形分布,但大小规律相反。

(3) 拼接板栓孔间截面应力沿板横向呈波浪形分布,大小相间,在螺栓连线上应力较小,而在螺栓行间应力较大;芯板栓孔间截面应力沿板横向分布规律与拼接板相同。

(4) 数值模拟结果表明:不同螺栓压力影响区直径均为栓孔直径的 2.85 倍左右。

(5) 有限元计算结果和试验结果吻合良好,说明采用有限元实体单元对**高强度螺栓**拼接接头数值模拟方法可行,并能得到其直观受力状态。

#### 参考文献:

- [1] 王伯琴,陈录如,陈先峰. 高强度螺栓连接[M]. 北京:冶金工业出版社,1991.
- [2] 潘际炎. 栓焊钢桥的研究[M]. 北京:中国铁道出版社,1983.
- [3] 党志杰,文武松. 大跨度钢桥理论和试验研究成果概要[J]. 桥梁建设,1999,29(4):69-72.  
DANG Zhi-jie, WEN Wu-song. Findings of Theories and Test Studies of Long-span Steel Bridges[J]. Bridge Construction, 1999, 29(4): 69-72.
- [4] 中华人民共和国建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB50017—2003 钢结构设计规范[S]. 北京:中国计划出版社,2003.
- [5] 中华人民共和国建设部. JGJ 82—91 钢结构**高强度螺栓**连接的设计、施工及验收规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社,1993.
- [6] 中华人民共和国铁道部. TB10002. 2—2005 桥梁钢结构设计规范[S]. 北京:中国铁道出版社,2005.
- [7] 李启才,顾强,苏明周,等. 摩擦型**高强螺栓**连接性能的试

验研究[J]. 西安科技大学学报, 2003, 23(3): 322-324, 327.

LI Qi-cai, GU Qiang, SU Ming-zhou, et al. Experiment of High-strength Bolted Connection Behavior[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2003, 23(3): 322-324, 327.

[8] 郭寓岷, 刘广立, 贺贤娟. 中厚板高强度螺栓连接性能试验研究[J]. 钢结构, 1997, 12(3): 43-48.

GUO Yu-min, LIU Guang-li, HE Xian-juan. Experimental Research on Connecting Behavior of High Strength Bolt for Medium Thick Plate[J]. Steel Construction, 1997, 12(3): 43-48.

[9] PUTHLI R, FLEISCHER O. Investigations on Bolted Connections for High Strength Steel Members[J]. Journal of Constructional Steel Research 2001, 57(3): 313-326.

[10] Girão Coelho A M, Bijlaard F S K, Simões da Silva Luis. Experimental Assessment of the Ductility of Extended End Plate Connections[J]. Engineering Structures, 2004, 26(9): 1185-1206.

[11] PILUSO V, RIZZANO G. Experimental Analysis and Modelling of Bolted T-stubs under Cyclic Loads[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2008, 64(6): 655-669.

[12] SARRAJ M, BURGESS I W, DAVISON J B, et al. Finite Element Modeling of Steel Fin Plate Connections in Fire [J]. Fire Safety Journal, 2007, 42(6-7): 408-415.

[13] DING K, DHANASEKAR M. Flexural Behaviour of Bonded-bolted Butt Joints due to Bolt Looseness[J]. Advances in Engineering Software, 2007, 38(8-9): 598-606.

[14] YU H X, BURGESS I W, DAVISON J B, et al. Numerical Simulation of Bolted Steel Connections in Fire Using Explicit Dynamic Analysis[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2008, 64(5): 515-525.

[15] 国家技术监督局, 中华人民共和国建设部. GB 50221—1995 钢结构工程质量检验评定标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1995.

(责任编辑 崔立秋)

### 詹天佑科学技术发展基金会简介

**詹天佑科学技术发展基金会:**詹天佑科学技术发展基金会是经铁道部同意, 报民政部审定, 国务院领导批准, 于 2005 年 12 月 17 日在北京正式成立。2008 年荣获民政部全国性基金会评估 AAA 级。2010 年荣获“全国先进社会组织”光荣称号, 是全国性基金会中唯一的科技类基金会, 也是铁路系统唯一获此殊荣的社团组织。

詹天佑科学技术发展基金会是在中国科学技术发展基金会原詹天佑铁道科技发展基金的基础上, 按国家新颁布的《基金会管理条例》的要求设立的。基金会是从事社会公益性活动的非营利民间组织, 独立社团法人。基金会实行双重管理, 业务主管单位为铁道部, 登记管理机关为民政部。

**宗旨与任务:**缅怀詹天佑先生对发展中国铁路事业做出的突出功绩, 继承和弘扬他爱国、创新、自力更生、艰苦奋斗的精神, 支持和资助科技活动, 表彰奖励有突出贡献的科技人员, 促进中国铁路科技事业的繁荣和优秀人才的成长, 为和谐铁路建设做出贡献。

充分利用国内外各种渠道募集资金, 面向社会设立行业性的铁道科学技术奖, 表彰奖励在科学研究、技术创新与开发、科技成果推广应用、实现高新技术产业化、科学技术普及等方面取得成果和做出贡献的铁路优秀科技人员, 促进铁路科技人才队伍的建设; 资助重大科技活动, 与国内外科技团体建立友好与合作关系, 为企事业单位和团体设立专项奖励基金。

**詹天佑铁道科学技术奖:**自 1993 年设立詹天佑铁道科学技术奖以来, 每两年举办一届, 至 2011 年已成功地举办了十届奖励活动, 共 1165 名科技人员获奖, 其中获专项基金奖的人员 612 名。詹天佑铁道科学技术奖是首批经国家科学技术奖励工作办公室审查批准予以登记的奖项, 已成为国家科学技术奖励

活动的重要、有益补充, 也是铁路科技领域有重大影响的奖项, 受到了广大铁道科技工作者的欢迎, 对促进铁路科技进步和优秀人才成长发挥了积极作用。2010 年在全国清理规范评比达标表彰工作中, 经中共中央、国务院同意, 詹天佑铁道科学技术奖是确定的保留项目。

该奖项现设大奖、成就奖、贡献奖、青年奖、专项基金奖, 金额: 大奖 6 万元/人、成就奖 2 万元/人、贡献奖 1 万元/人、青年奖 0.8 万元/人。

**发展与活动:**自 1992 年詹天佑铁道科技发展基金设立以来, 积极争取铁道部和社会各方面的关怀与支持, 各项工作不断发展。多年来, 重点做好詹天佑铁道科学技术奖的评审工作, 资助重点科技活动 30 多项, 相继举办了詹天佑先生诞辰 135 周年和 145 周年纪念活动, 协办“詹天佑业绩”巡回展, 铁路青少年夏令营, 资助《中国科学技术专家传略》交通卷、铁道卷以及《铁道学报》、《铁道知识》的出版, 组织编辑出版《詹天佑研究文集》、《詹天佑》画册、《詹天佑文集》、《获奖者业绩》, 在有关高校设立“詹天佑班”等。开展的各项活动均取得了较好的成效, 为实施“尊重劳动、尊重知识、尊重人才、尊重创造”的方针, 促进物质文明和精神文明建设, 推动铁路系统的改革与发展发挥了积极作用。

詹天佑科学技术发展基金会将继续坚持以邓小平理论和“三个代表”重要思想为指导, 全面贯彻落实科学发展观, 进一步增强推进铁路科技事业发展的责任感, 开创工作新局面, 在促进科技创新和实施人才强路战略、加快人才成长方面发挥更大的作用, 为实现铁路又好又快发展做出更大的贡献。

詹天佑基金会秘书处