

# 钢桁梁桥高强螺栓连接的节点板局部受力性能分析

李运生<sup>1,2</sup>, 王慧佳<sup>1,2</sup>, 张彦玲<sup>1,2</sup>

(1. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043;

2. 石家庄铁道大学 道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室, 河北 石家庄 050043)

**摘要:** 针对重载运输过程中出现的既有线钢桁梁桥高强螺栓节点螺栓断裂问题, 以长东黄河桥为工程背景, 采用 ANSYS 软件建立了带螺栓的实际节点板局部有限元模型, 对其在轴力作用下的传力性能进行了研究, 并分析了螺栓缺失所造成的影响。结果表明: 长列高强螺栓接头在轴力作用下各排传力比呈马鞍型分布; 在螺栓连接的计算中应考虑一排内螺栓传力的不均匀性; 螺栓缺失后只对局部范围内的螺栓传力比有影响, 影响最大的是其相邻的两排螺栓, 但若传力比较大的螺栓排缺失数量达到一定程度后, 极易使剩余螺栓所受剪力超过其抗剪承载力而出现剪切破坏。

**关键词:** 高强螺栓; 节点板; 传力比; 钢桁梁

**中图分类号:** TU391 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-0373(2013)03-0001-07

## 0 引言

在我国铁路发展重载运输的过程中, 既有线桥梁出现了一系列病害, 例如横向晃动、支座倾斜、预拱度下降和螺栓折断等。其中, 钢桁梁桥桁架节点在长期重载、振动和疲劳作用下高强螺栓折断严重, 例如新兖线长东黄河大桥每年大约有 1 200 条高强螺栓折断, 对其使用性能造成一定影响, 如图 1 所示。

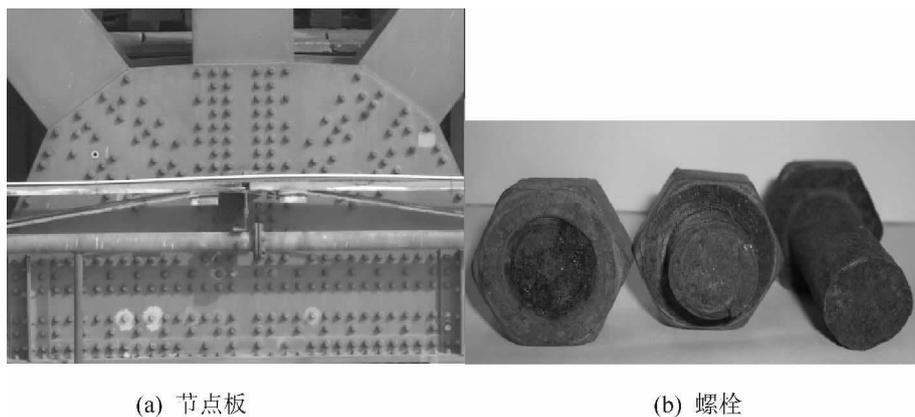


图 1 节点处螺栓破坏图

关于摩擦型高强螺栓连接接头的研究已有部分报道。张晔芝等<sup>[1]</sup>研究了摩擦型高强度螺栓接头的受力机理和极限状态; 王天亮<sup>[2]</sup>对大比例尺模型进行了静载及疲劳试验; 党志杰<sup>[3]</sup>对长列高强螺栓接头的力学性能如应力集中系数、传力比及其承载力特点作了详尽分析; 朱铭等<sup>[4]</sup>采用 ANSYS 软件对钢桁梁中高强螺栓群的受力状态进行了模拟; 张石波等<sup>[5]</sup>重点研究了长列螺栓群各排螺栓的传力比、栓孔应力集中系数、高强螺栓的应力状态以及孔前传力系数等参数的变化规律; 黄永辉等<sup>[6]</sup>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了分

收稿日期: 2013-05-21

作者简介: 李运生 男 1970 年出生 教授

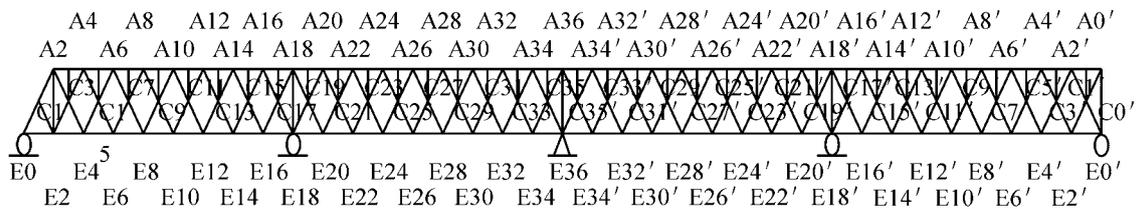
基金项目: 铁道部科技研究开发计划资助项目(2011G016-C)

析; Jeffrey et al<sup>[7]</sup>对钢桁梁桥节点板的极限状态进行了研究和分析; Ozden et al<sup>[8]</sup>通过建立有限元模型对钢桁梁桥分析了杆件及节点的评定系数和安全指标。

以上多数文献采用数值模拟方法或模型试验方法对短列和长列摩擦型高强螺栓连接接头的受力性能进行了研究,但均未讨论螺栓折断病害对实际节点板受力性能的影响,且模型与实际节点板差别较大,实际节点板螺栓数量比较多,螺栓分布不均匀。通过以新兖线长东黄河大桥为工程背景,建立钢桁梁桥高强螺栓节点板的实际有限元模型,研究部分螺栓缺失对其受力的影响,为实际桥梁结构高强度摩擦型拼接接头的病害分析提供参考。

## 1 节点板的有限元模型

长东黄河大桥上行线主跨自东向西为  $9 \times 96$  m 简支钢桁梁 +  $4 \times 108$  m 连续钢桁梁 +  $3 \times 108$  m 连续钢桁梁组成。钢桁梁主桁高 16 m,宽 5.75 m,运营活载为 C80 列车活载,其中  $4 \times 108$  m 连续钢桁梁主桁平面布置见图 2。首先采用 MIDAS 软件建立了该连续钢桁梁的计算模型,在恒载及 C80 活载作用下计算了整体受力性能,得到了各杆件的内力,其中 E18 节点中竖杆、斜杆和下弦杆所受轴力分别为 5 537 kN、3 152 kN、5 084 kN。



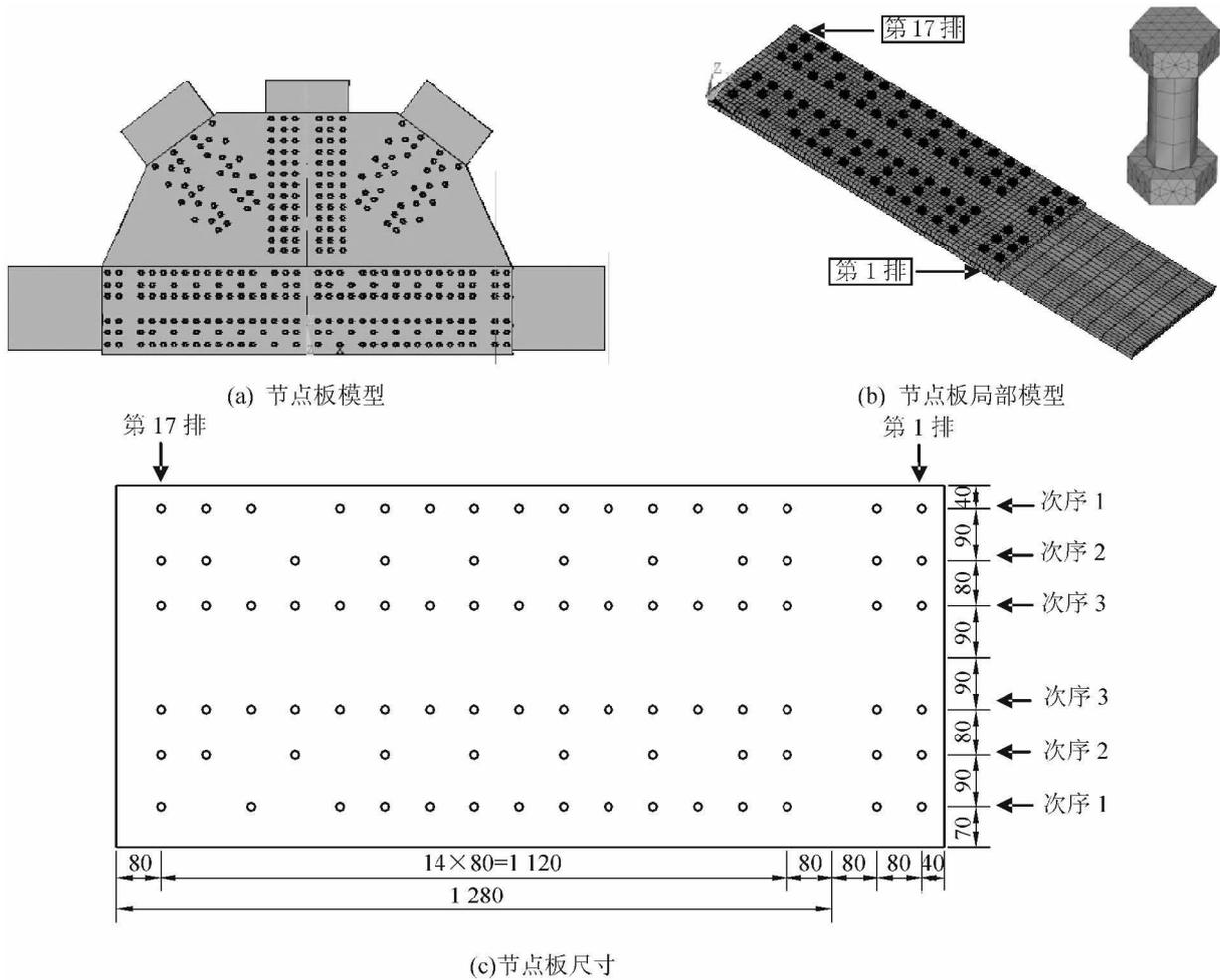


图 3 节点板和螺栓的有限元模型(单位: mm)

$$\beta_i = f_i / F \tag{1}$$

式中,  $f_i = q_{i-1} - q_{i+1}$ 。

对每排螺栓两侧的盖板轴向应力分别进行积分并相减, 可得到各排螺栓的传力, 则设计状态下的各排螺栓的传力比见图 4。由图 4 可知:

(1) 设计状态下, 各排螺栓传力比接近马鞍型分布, 拼接接头第一排和最末一排螺栓传力比最大, 中间螺栓传力比较小, 由两边向中间递减。

(2) 设计状态下, 第 1 排传力比最大, 为 38.52%, 若假设每个螺栓的传力比相同, 则平均每个螺栓传力 6%, 即所受剪力为  $N_v = 2033.62 \times 0.06 = 122.02 \text{ kN}$ 。《钢结构设计规范》GB50017—2003 规定, 单个摩擦型高强螺栓的承载力

$[N_v^b] = 0.9 n_f \mu P$ , 其中,  $n_f$  为传力摩擦面数目,  $\mu$  为摩擦面抗滑移系数(本例中  $\mu = 0.55$ ),  $P$  为一个高强度螺栓的预拉力(本例中  $P = 200 \text{ kN}$ )。则试件单个螺栓的抗剪承载力设计值为  $[N_v^b] = 2 \times 0.9 \times 0.55 \times 200 = 198 \text{ kN}$ 。可见传力比最大的第 1 排螺栓所受的平均剪力满足规范要求。

### 2.1.2 摩擦应力及压应力云图

摩擦型高强度螺栓连接依靠盖板和芯板之间的摩擦力来传递剪力, 设计状态下节点板的盖板和芯板之间的挤压应力和摩擦应力云图如图 5 所示。

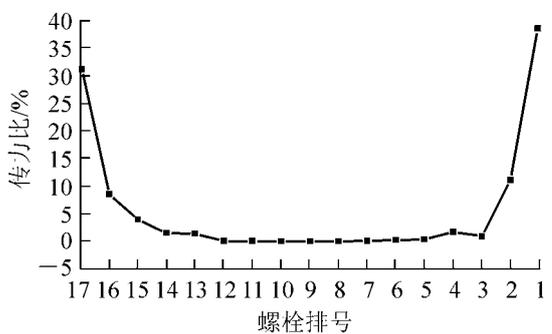


图 4 设计状态下的各排螺栓的传力比

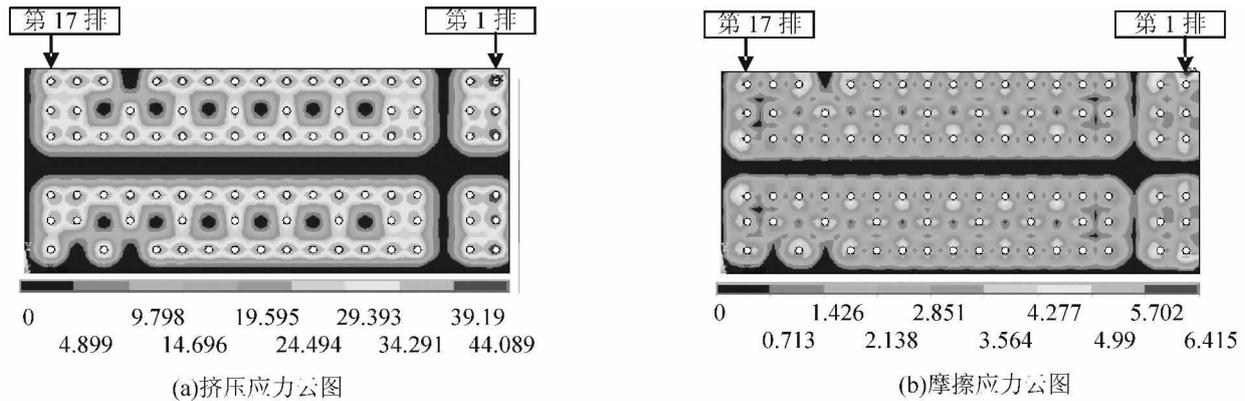


图 5 设计状态下盖板和芯板之间的挤压应力及摩擦应力云图(单位: MPa)

摩擦力在两板之间分布不均匀,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,如图 5 所示。由图 5 可知:

(1) 在轴心荷载  $F$  作用下,挤压应力在两板之间分布不均匀,仅分布在栓孔周围,并呈环状由栓孔向周围递减至零,第一排螺栓处两板之间挤压应力最大;在同一排各列螺栓之间挤压应力分布也不均匀,由于第 3 列螺栓与第 4 列螺栓之间列间距较大,使上三列螺栓与下三列螺栓之间挤压应力没有重叠,成为两个各自独立的传力体。

(2) 摩擦应力与挤压应力的分布规律相同,也是在两板之间分布不均匀,仅分布在栓孔周围,并呈环状由栓孔向周围递减,且明显看出第 1 排和最末排螺栓在两板之间摩擦应力较大,其它排应力较小。

(3) 在现行规范中,都假设同一排螺栓内各螺栓受力均匀,按该排螺栓的传力比除以这一排螺栓的个数得到每个螺栓的受力,但由图 5 可知,在各列螺栓之间,摩擦应力的分布也不均匀,这说明一排之内单个螺栓的受力会大于该排螺栓的平均值,只按平均值进行计算可能会偏于不安全。

按 2.1.1 节相同的方法取出各排中每个螺栓的实际传力比,可以得到各螺栓的传力比在该排中的分布规律,其中几个典型的分布图形见图 6。可以看出,一排之内各螺栓的传力并非均匀,第 1、17 排传力比较大,且靠近中间的螺栓传力较大,向两端依次减小;第 2 排靠近中间的螺栓传力比较大,呈折线形分布;中间 6 个螺栓的和 4 个螺栓的各排分布图形分别和第 10、第 13 排相似,均是靠近中间的较大,边缘较小且较均匀。

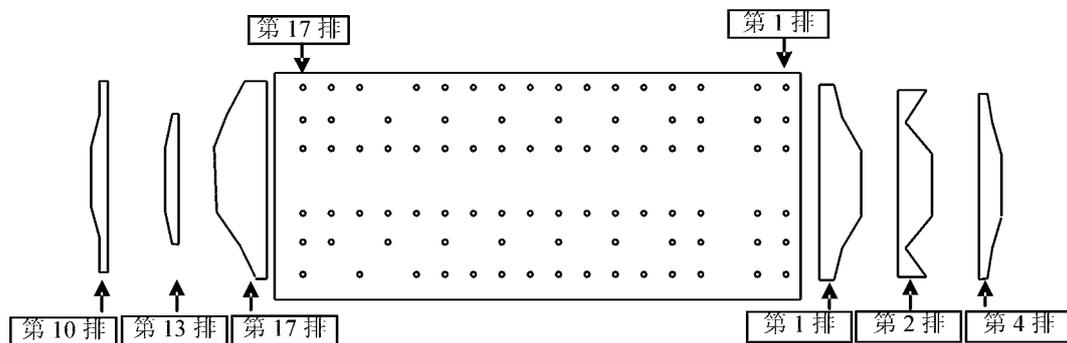


图 6 设计状态下个别螺栓排单个螺栓的传力比

将各排螺栓中的最大传力比与所在排单个螺栓的平均传力比的比值定义为传力不均匀系数(绝对值),得到各排螺栓的传力不均匀系数如表 1 所示。计算得各排螺栓中单个螺栓所受的最大剪力也示于表 1。由表 1 可知,第 1 排螺栓的传力不均匀系数为 1.65,即其螺栓所受最大剪力为  $N_v = 101.18 \times 1.65 = 167.77$  kN,已经非常接近其抗剪承载力,因此在螺栓连接的计算中,尚应考虑一排内螺栓传力的不均匀性。

表 1 各排螺栓传力的不均匀系数及最大剪力

螺栓排号	不均匀系数	各排中最大剪力/kN	螺栓排号	不均匀系数	各排中最大剪力/kN
1	1.65	195.03	10	13.38	2.78
2	2.57	92.56	11	6.19	3.69
3	2.39	38.64	12	6.78	5.70
4	13.45	85.56	13	26.10	67.02
5	0.74	6.35	14	0.21	3.28
6	14.09	3.98	15	1.48	8.46
7	4.53	2.47	16	0.92	70.51
8	0.30	0.06	17	0.78	100.12
9	0.45	0.14			

2.2 螺栓缺失状态下

2.2.1 传力比

考虑传力比较大的螺栓排有螺栓缺失, 比较螺栓缺失后各排螺栓传力比的变化。本文选取传力比较大的第 1 排螺栓, 按第 1 节所述的按次序分别缺失 2 个、4 个和 6 个螺栓后, 对节点板进行受力分析, 计算结果如图 7 所示。图 8 为第 1 排螺栓缺失后第 1、2、17 排螺栓的传力比变化图, 计算值见表 2。

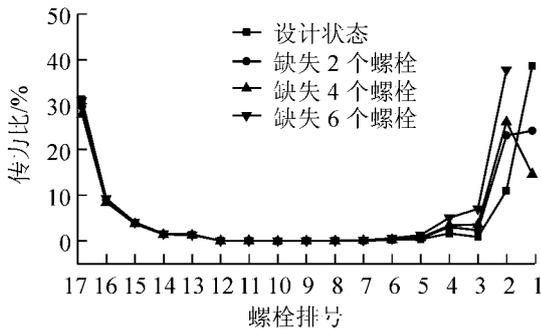


图 7 缺失螺栓状态下各排螺栓的传力比

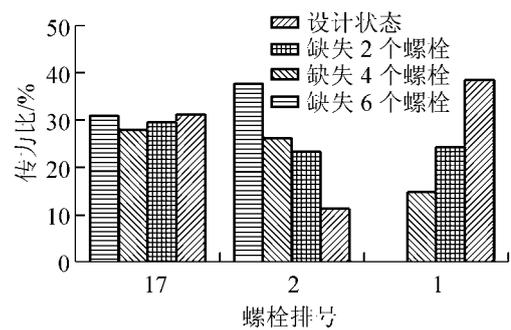


图 8 缺失螺栓状态下第 1、2、17 排螺栓的传力比

表 2 几种工况下各排螺栓的传力比和变化率对比

螺栓排号	设计状态 传力比	缺失 2 个螺栓		缺失 4 个螺栓		缺失 6 个螺栓	
		传力比	变化率	传力比	变化率	传力比	变化率
1	38.52	24.29	-14.23	14.77	-23.75	—	—
2	11.14	23.25	12.11	26.22	15.08	37.7	26.56
3	0.941	2.347	1.406	3.716	2.775	7.118	6.177
4	1.687	3.129	1.442	3.507	1.820	5.133	3.446
5	0.409	0.6112	0.2022	0.774	0.365	1.322	0.913
6	0.262	0.288	0.026	0.352	0.090	0.576	0.314
7	0.097	0.129	0.032	0.151	0.054	0.232	0.135
8	0.051	0.064	0.013	0.072	0.021	0.103	0.052
9	0.051	0.056	0.005	0.058	0.007	0.07	0.019
10	0.049	0.049	0	0.048	-0.001	0.053	0.004
11	0.088	0.089	0.001	0.083	-0.005	0.089	0.001
12	0.069	0.067	-0.002	0.058	-0.011	0.061	-0.008
13	1.430	1.422	-0.008	1.333	-0.097	1.461	0.031
14	1.552	1.58	0.028	1.481	-0.071	1.624	0.072
15	3.970	4.027	0.057	3.793	-0.177	4.165	0.195
16	8.568	9.011	0.443	8.512	-0.056	9.38	0.812
17	31.159	29.59	-1.569	27.96	-3.199	30.91	-0.249

注: 变化率是指各缺失工况下的传力比与设计状态下传力比比较后的变化率, 正号表示增加, 负号表示减小。

由图 7、图 8 和表 2 可知:

(1) 缺失 2 个螺栓时, 各排螺栓的传力比变化不大, 第 1 排剩余 4 个螺栓平均每个传力比达到 6.1%, 此时  $N_p = 2\,033.62 \times 0.061 = 124.05 \text{ kN}$ , 是设计状态的 1.02 倍; 缺失 4 个螺栓时, 第 1 排剩余 2 个螺栓平均每个传力比达到 7.45%, 此时  $N_p = 2\,033.62 \times 0.0745 = 151.5 \text{ kN}$ , 是设计状态的 1.24 倍; 缺失 6 个

螺栓时,第2排螺栓平均每个传力比由设计状态的1.91%增加到6.28%,此时 $N_v = 2\ 033.62 \times 0.0628 = 127.71\text{ kN}$ ,是设计状态的3.3倍。

(2) 随着第1排螺栓缺失数量的增加,第2、3、4排和最后一排螺栓的传力比有所增加,其余各排螺栓的传力比变化都不明显,说明螺栓缺失所只对局部范围内的螺栓有影响。

以上现象说明,虽然螺栓缺失对传力比只产生局部影响,但若传力比较大的螺栓排由于长期振动等原因出现病害而缺失,数量达到一定程度后,会使剩余螺栓传力比增大,再考虑一排螺栓内的传力不均匀系数,则极易超过其抗剪承载力而出现剪切破坏,导致逐渐向剩余螺栓卸载而出现类似多米诺效应的依次破坏。

### 2.2.2 摩擦应力分布规律

螺栓缺失后的摩擦应力云图和压应力云图见图9所示。由图9可知:

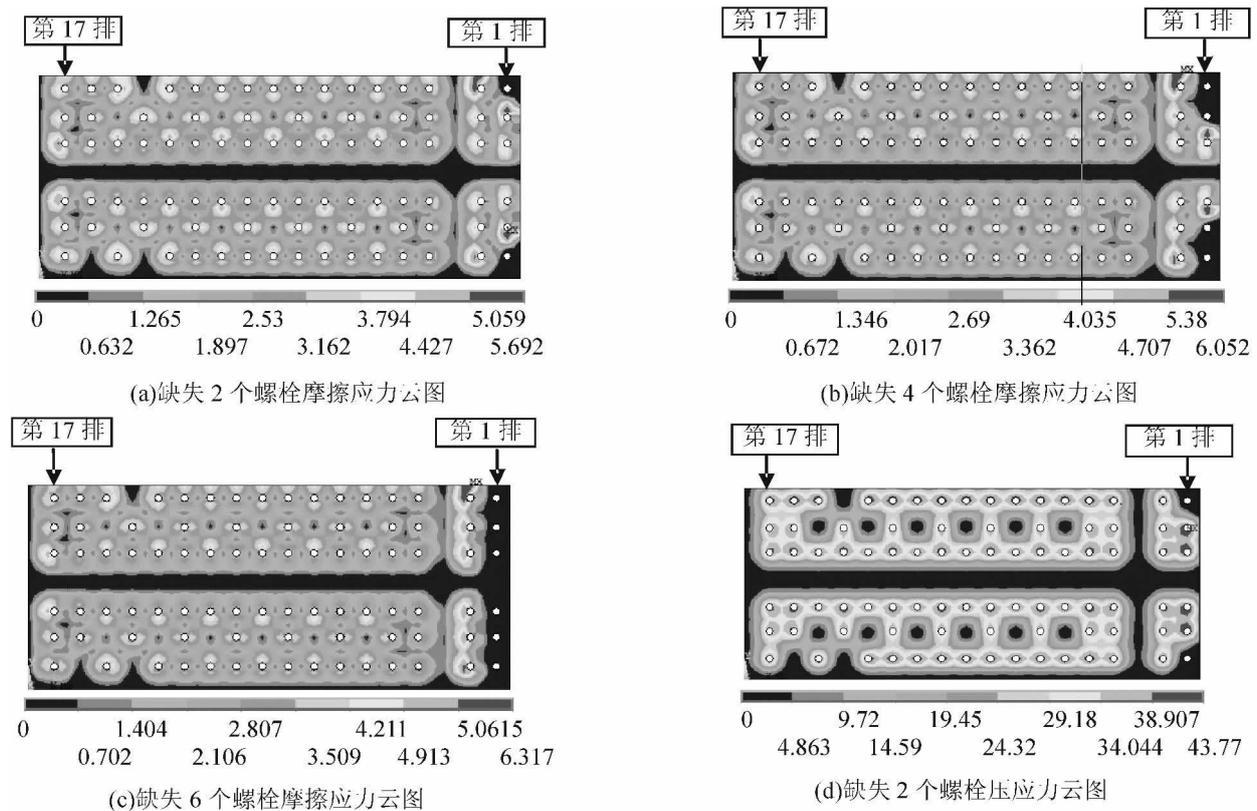


图9 缺失螺栓状态下摩擦应力和压应力云图(单位:MPa)

(1) 当第1排有螺栓缺失时,缺失处的摩擦应力减小为0。

(2) 与缺失螺栓相邻处的摩擦应力增大,也就是本排和相邻排螺栓的摩擦应力都有所增加,说明螺栓的缺失造成螺栓连接处传力机理发生变化,剩余螺栓处的摩擦力增大,此外最后一排处摩擦应力也稍有增加,其它位置处的摩擦应力基本未受影响,其余与各排螺栓沿轴向的传力比规律相同。

(3) 缺失处压应力减小为0,该排剩余螺栓处压应力增加,其它位置处的压应力基本没有变化。

## 3 结语

建立了带螺栓的实际节点板的局部有限元模型,对不同螺栓断裂缺失的工况进行受力分析。主要的结论如下:

(1) 长列高强螺栓接头在轴力作用下各排传力比接近马鞍型分布,第一排和最末一排螺栓传力比最大,中间螺栓传力比较小,由两边向中间递减。

(2) 在一排内各螺栓之间,盖板与芯板之间的摩擦应力分布不均匀,各螺栓的传力比差异较大,在螺

栓连接的计算中,应考虑一排内螺栓传力的不均匀性。

(3) 螺栓缺失后对其相邻的两排螺栓影响较大,对其余各排螺栓的传力比影响不明显,说明螺栓缺失所只对局部范围内的螺栓有影响。但若传力比较大的螺栓排缺失数量达到一定程度后,极易使剩余螺栓传力比超过其抗剪承载力而出现剪切破坏。

## 参 考 文 献

- [1]张晔芝,侯文崎,叶梅新.摩擦型高强度螺栓长接头螺栓传力比研究[J].长沙铁道学院学报,2000,18(4):6-10.
- [2]王天亮.钢桁梁整体节点试验研究[J].桥梁建设,1999(4):32-40.
- [3]党志杰.摩擦型长列高强度螺栓接头研究[J].桥梁建设,1993(1):52-57.
- [4]朱铭,王荣辉,黄永辉.钢桁桥长列高强螺栓群优选布置的有限元分析[J].长安大学学报,2009,29(4):59-62.
- [5]张石波,王荣辉,黄永辉,等.长列高强螺栓接头传力特性的有限元数值模拟[J].土木建筑与环境工程,2010,32(6):74-79.
- [6]黄永辉,王荣辉,刘长海,等.高强螺栓拼接接头传力特性的有限元模拟与试验研究[J].铁道学报,2011,33(11):93-98.
- [7]Jeffrey W Berman, Boshuan Wang et al. Rapid Assessment of Gusset Plate Safety in Steel Truss Bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2012, 17(2): 221-231.
- [8]Ozden Caglayan, Kadir Ozakgul, Ovunc Tezer. Assessment of existing steel railway bridges[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 69: 54-63.
- [9]党志杰.摩擦型长列高强度螺栓接头研究[J].桥梁建设,1993(1):52-57.

## Analysis on Local Mechanical Properties of High Strength Bolt Gusset Joints in Steel Trussed Girder Bridges

Li Yunsheng<sup>1,2</sup>, Wang Huijia<sup>1,2</sup>, Zhang Yanling<sup>1,2</sup>

(1 School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2 Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety Control of Ministry of Education, Shijiazhuang 050043, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of bolts missing of the frictional high strength bolted gusset joints in existing steel trussed girder bridges under overload transportation, the local finite element model of an actual gusset plate with bolts is built by software ANSYS, the transfer performance under axial load is studied and the influence of bolts missing is analyzed based on Changdong Yellow River Bridge. The results are as follows: The regularities of load transfer factors of the high strength bolt friction grip long joint under axial load is of saddle type distribution, while the uneven arrangement of the bolts in actual gusset plate leads to the mutations of load transfer factors in individual locations; In the calculation of bolted connections, the inhomogeneity of load transfer within a row should be considered; The bolt missing only has an impact on load transfer factors in the local scope, and the most affected are the adjacent two rows, but if the number of missing bolts in rows with large load transfer factors reaches a certain degree, it is easy to make the rest of the bolts subject to shear over capacity and cause shear failure.

**Key words:** high strength bolts; gusset joint; load transfer factors; steel trussed girder

(责任编辑 刘宪福)