

薄壁截面槽钢的应力分布及弯心特性研究

李春福 张颖

北京工业大学 机电学院 000114 班

指导教师 张亦良

摘要 本文研究了开口薄壁杆件槽钢在不同加载方式下的应力分布及其弯心位置，综合地应用电测法与计算机知识。其中，确定最大载荷利用 ANSYS 软件来完成，测试过程由电测法完成。槽钢在约束扭转的情况下，利用电测法，并借助有限元分析确定其弯心位置，再与理论结果进行比较。在发生平面弯曲的情况下，通过电测法测得其腹板和翼缘中的正应力变化规律。

关键字：电测法；有限元分析；槽钢

一、引言

槽钢是工程中应用最广泛的型钢之一。在大型钢结构中，用途更加广泛。铁科院世界第一的火车冲击试验桥梁中就以槽钢和角钢作为它的基本结构。见图 1、图 2。

由于槽钢属于开口薄壁截面杆件，不适于承受扭转。当杆件受横力弯曲时，若加载点位置不在弯心处，则杆件除了承受弯曲外，还会带来扭转。就杆件横截面的应力状态而言，从强度观点出发，是极为不利的。

对于圆截面的扭转应力问题，已经有较完整的理论解，经弹性力学证明是精确解。但是，对于矩型截面或开口薄壁截面杆的扭转问题，材料力学的知识告诉我们，目前还没有理论解，只能靠数值解。对于开口薄壁杆件受扭转这类问题的研究，是从 Timoshenko 教授在 1905 年对工字形梁的约束扭转开始的，至今已近一百年。这个问题就更加复杂一些，在我们材料力学的学习中，还没有涉及到。

本文主要是通过电测法测得槽钢在不同加载方式下的应力分布。共粘贴了 14 个应变片，其中有 2 个三向应变花。加载选择了几种不同方式，分别在两个主轴平面内进行，为对称平面加载及非对称面加载。在非对称面加载时，又选择了多个不同位置，以考察其载荷作用在形心及弯心等处对应力状态的不同影响。同时设计了通过不同桥路正确测量弯心



图 1 火车动态实验桥



图 2 槽钢在大型屋顶钢结构中的应用

位置的实验方案，实验证明该方法是切实可行的。由于试件长度的限制，测试截面不能视为自由扭转，这就带来了较为复杂的理论计算问题。为了正确设计加载方案，我们学习使用了 ANSYS 软件，进行了计算，为我们的方案设计提供了技术支持。

二、实验方案设计

考虑到槽钢的对称性及受力变形特点，应变片布置选择 14 片。在槽钢翼缘选择布置两个纵向片及一个三向应变花，主要是考虑翼缘的应力分布及弯心位置。在槽钢腹板布置三组应变片，其中一组为应变花，主要测量腹板应力分布及主应力大小。

槽钢整体应变片布置见图 3。

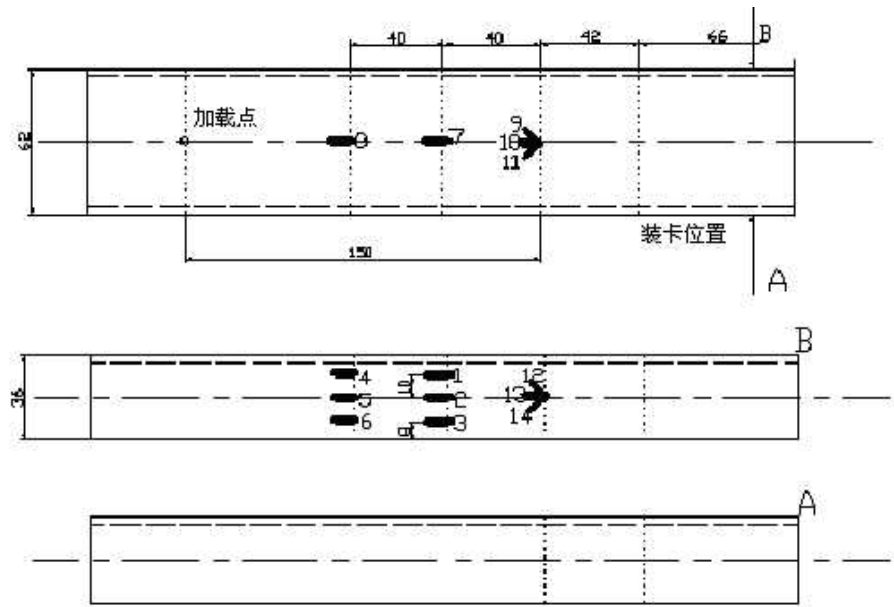


图 3 . 槽钢应变片布置图

三、实验测试结果及讨论分析

3.1 在槽钢对称面内加载

第一种加载方式为在槽钢对称面内加载（最不利的受力状态）。如图 4 所示。

对 63 号槽钢进行加载，槽钢产生平面弯曲，在弹性范围内，其上部正应力分布应是呈线性关系的，理论值计算可由公式^[1] $\sigma = \frac{M \cdot y}{I_y}$ 导出：

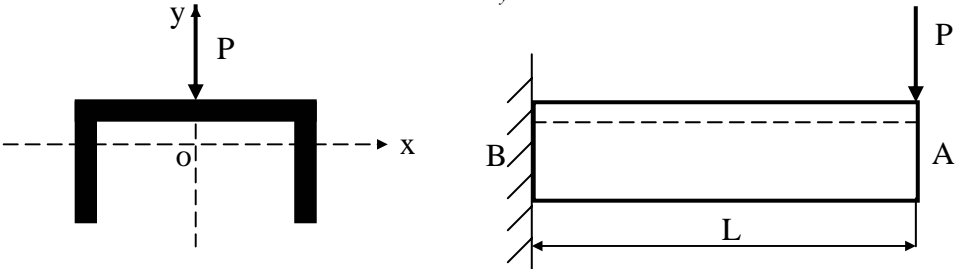


图 4 第一种加载方式示意图

$M_{\max}=Pl$ ($l=234\text{mm}$) , $\sigma_{\max} = \frac{P \cdot l \cdot y}{I_y}$ 如图 5 (左) 所示。

对于槽钢的翼缘，在此方式加载时，其正应力分布也是遵循线性关系的。其分布如图 5 (右) 所示。

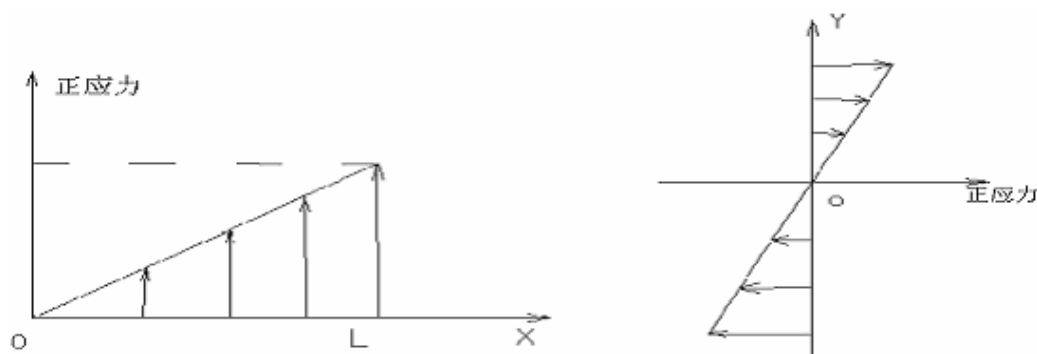


图 5 第一种加载方式下槽钢腹板和翼缘的正应力分布

使用 1—8 号应变片来完成此项实验，实验中采用四分之一桥。

实验前先用 ANSYS 软件进行分析，确定加载方案。当载荷为 1.5kN 左右时，经有限元分析，试件插入端的最大应力为 250MPa 左右，如图 6 示。所以，为保证试件不被破坏，选取 800N 为最大载荷。

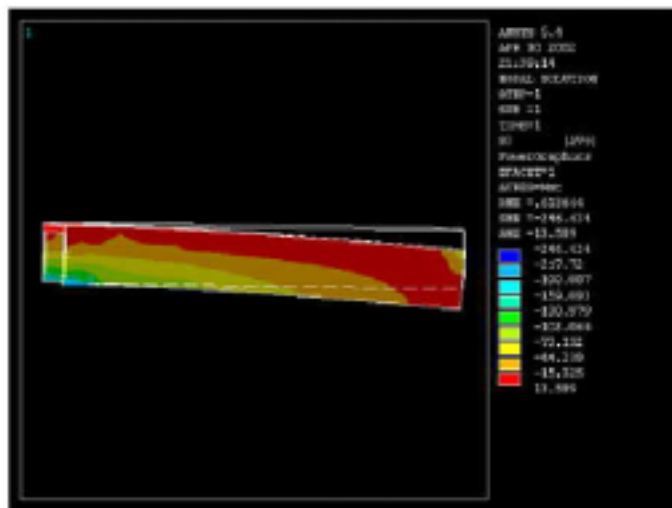


图 6 有限元分析结果

实验测试结果见表 1。

表一 各应变片读数																
	1 号		2 号		3 号		4 号		5 号		6 号		7 号		8 号	
	数值	差值	数值	差值	数值	差值	数值	差值	数值	差值	数值	差值	数值	差值	数值	差值
100N	0		0		0		0		0		0		0		0	
200N	7	7	-9	-9	-20	-20	1	1	-6	-6	-15	-15	14	14	8	8
300N	10	3	-18	-9	-41	-21	6	5	-12	-6	-32	-17	25	11	18	10
400N	18	8	-26	-8	-63	-22	9	3	-19	-7	-50	-18	38	13	26	8
500N	24	6	-34	-8	-86	-23	14	5	-25	-6	-68	-18	51	13	36	10
600N	32	8	-42	-8	-107	-21	19	5	-30	-5	-85	-17	64	13	44	8
700N	38	6	-50	-8	-129	-22	23	4	-37	-7	-103	-18	77	13	53	9
800N	46	8	-58	-8	-152	-23	27	4	-43	-6	-120	-17	91	14	61	8
均值		6.57		-8.29		-21.7		3.86		-6.14		-17.1		13		8.71

将应变值反映在图中，可表示为：

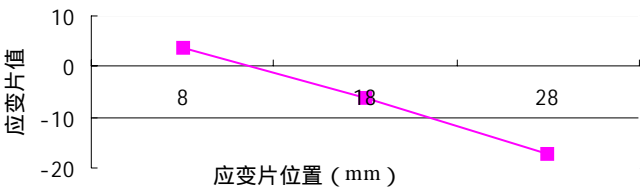


图7 1-3号应变片位置与应变值

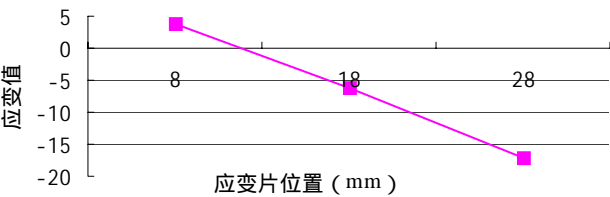


图8 4-6号应变片位置与应变值曲线

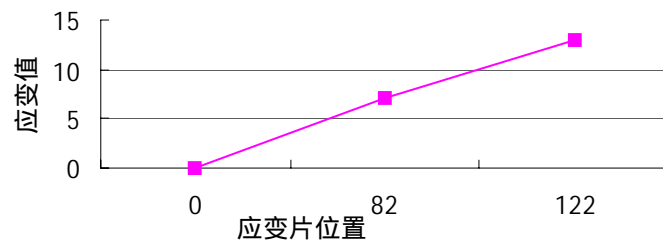


图9 7、8号应变片位置与应变值曲线

对于槽钢腹板上的应力，由于装卡位置的应力无法用应变片测得，故设装卡位置的应力值为零。

通过以上的实验和计算，可以得出结论：以图示第一种方式加载，槽钢腹板以及翼缘的应力是沿线形变化的。

3.2 在槽钢非对称面内加载：

非对称面内加载如图 10 所示。

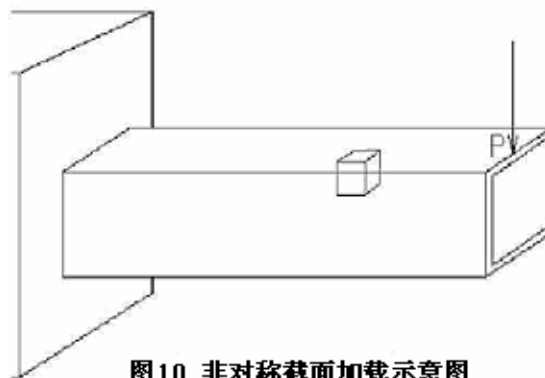


图10 非对称截面加载示意图

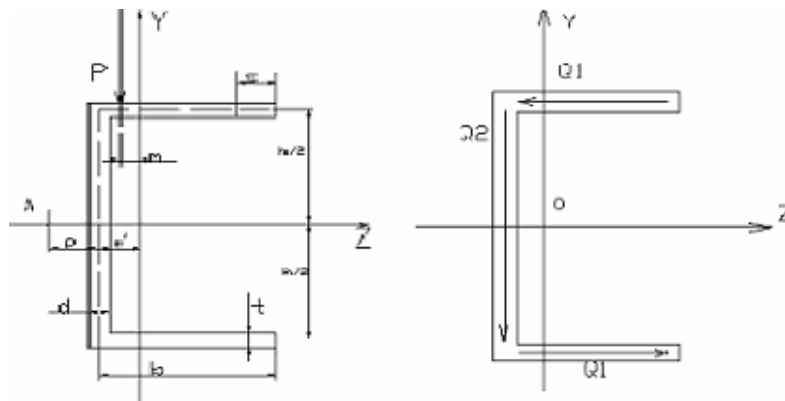


图11 截面几何尺寸

理论分析如下：

其中上翼缘合力

$$Q_1 = \int_A \tau_1 d_A = \int_0^b \frac{Q \cdot s \cdot h}{2I_z} t ds = \frac{Q \cdot h \cdot t \cdot b^2}{4I_z}$$

腹板上的合力

$$Q_2 = \int_A \tau_2 d_A = \frac{Q}{I_z} \left(\frac{b \cdot t \cdot h^2}{2} + \frac{d \cdot h^3}{12} \right)$$

由合力矩定理得： $Q_1 \cdot h = Q_2 \cdot e$

$$\therefore e = \frac{Q_1 \cdot h}{Q_2} = \frac{b^2 \cdot h^2 \cdot t}{4I_z}$$

即 e 为槽钢弯心至腹板中线的距离。

将 Q_1 、 Q_2 向形心 O 简化 则 ^[2] $e - e' = \frac{Q_1 \cdot h}{Q_2}$

当加载方向平行于形心主惯性轴，且不过弯心，则槽钢将发生平面弯曲和扭转；当加载方向既平行于形心主惯性轴，又过弯心时，槽钢只发生平面弯曲。

取单元体进行分析：

在上侧：

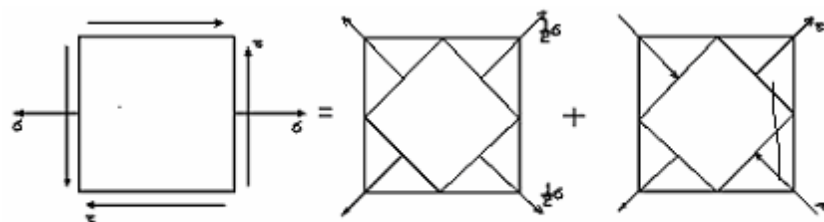


图12 单元体分析示意图

在 45° 方向上， $\sigma_{45} = \frac{1}{2} \sigma + \tau$

在 -45° 方向上， $\sigma_{-45} = \frac{1}{2} \sigma - \tau$

在下侧：

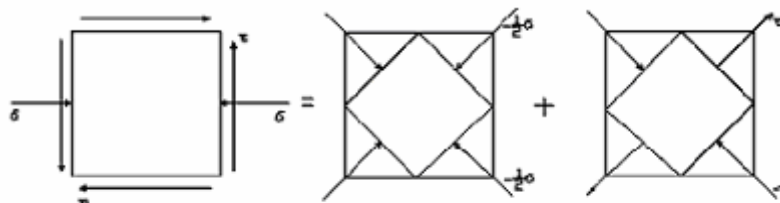


图13 单元体分析示意图

在 45° 方向上， $\sigma_{45} = -\frac{1}{2} \sigma + \tau$

在 -45° 方向上， $\sigma_{-45} = -\frac{1}{2} \sigma - \tau$

实验中，采用半桥接线法，测扭转时剪应变

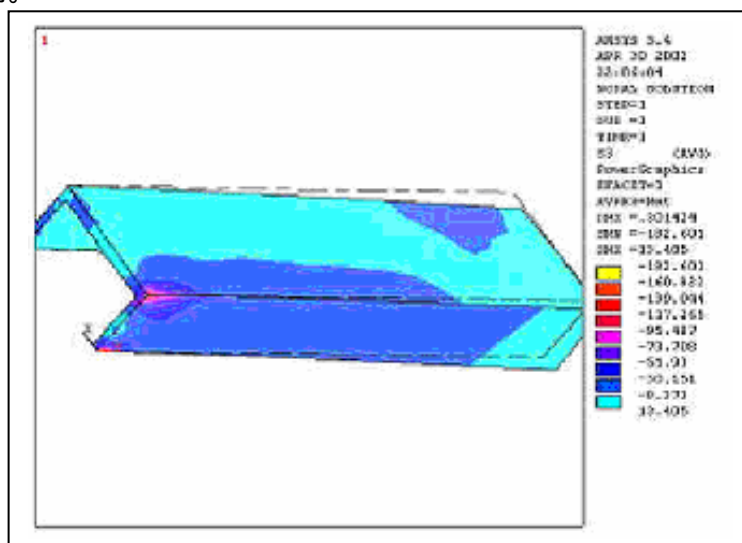
$$\varepsilon_{ds} = \varepsilon_{45} - \varepsilon_{-45} = 2\varepsilon_\tau$$

由广义虎克定律，可得 $\varepsilon_{\tau} = \frac{1+\mu}{E} \tau$

$$\tau = \frac{\varepsilon_{ds} \cdot E}{2(1+\mu)}$$

因此，为测得槽钢弯心，可以改变载荷作用的位置。当应变仪读数为零，即剪应力为零时，作用点即为弯心位置。

利用 ANSYS 软件进行分析：当载荷为 1300N，力作用在槽钢边缘处时，经第四理论校合发现，插入端的应力已经达到 182MPa 左右，如图 12 所示。所以，选取 800N 作为我们加载的最大载荷。



当加载于槽钢外侧，距槽钢腹板 10mm 处所得的数据如表 2 所示：（由于应变片和应变仪的灵敏系数不同，经过换算实际的读数 $K_{\text{实}} = 2.12K_{ds}$

表二 半桥接法所测的应变片读数

	9、11 号		12、14 号	
	数值	差值	数值	差值
100N	0		0	
200N	-48	-48	45	45
300N	-88	-40	87	42
400N	-127	-39	130	43
500N	-156	-29	174	44
600N	-191	-35	215	41
700N	-218	-27	249	34
800N	-246	-28	277	28
平均值		-35.14		39.57
实际平均值		-17.57		19.78

假设 $E=200\text{GPa}$ $\mu=0.3$

$$\sigma_1 = \frac{\varepsilon_{\text{实}} E}{2(1 + \mu)} = \frac{19.78 \times 200 \times 10^{-3}}{2(1 + 0.3)} = 1.52 \text{MPa}$$

$$\sigma_2 = \frac{\varepsilon_{\text{实}} E}{2(1 + \mu)} = \frac{-17.57 \times 200 \times 10^{-3}}{2(1 + 0.3)} = -1.35 \text{MPa}$$

注：此处 σ_1 为 12、14 应变片组成的半桥法所测得，且位于翼缘处。可以看出，此时应力 σ_1 很小，可以认为：槽钢的弯心就在所测位置附近，距加载点 10mm 左右。经过理论计算得出：槽钢的实际弯心在距槽钢腹板 9mm 处。所以，实际结果与理论结果很接近。而

σ_2 为 9、11 应变片组成，位于腹板处，还有弯曲剪应力的共同作用，问题更为复杂。总体看，剪应力数值较小。

四、结束语

本文对槽钢的研究主要通过两种加载方式：第一种情况是槽钢发生平面弯曲，在这种加载方式下，经过实验，得到槽钢的腹板和翼缘中的正应力是沿线形变化的；对于第二种加载方式，我们主要是改变载荷作用位置，以找到剪应力为零的那一点，此点即为槽钢的弯心位置。经过实验我们测的其弯心在距离腹板中线约 10mm 左右，与理论计算的 9mm 很接近。

参 考 文 献

- 1 郑承沛，姚希梦，钱民刚 编。材料力学。北京工业大学出版社 1998。
- 2 范钦珊 主编 薛克宗，王波 编辑。工程力学教程（ ）。高等教育出版社 1998；198-200 页。

实 验 总 结

这次的综合大实验中，我们选择了槽钢弯曲问题的实验研究。由于这个实验是最新开发并由我们首次完成的，实验设备不是很完善、试件也靠我们自己去寻找，实验中亦有极多的问题，而从理论上又不是很完备，这一切对我们而言，都是一次挑战。

我们主要有以下几方面的收获：

- （1）由于我们所做的实验需要 63 号槽钢，而实验室和校工厂均没有这种试件，所以我们不得不到处去找，而最后终于在钢材批发市场的废钢里找到。在寻找槽钢的过程中，增加了我们与社会，与不同人群的接触，使我们懂得了如何在社会中与人交往，或请求帮助。
- （2）通过对实验的设计，以及加载方案的确定，还使我们学会了如何使用 ANSYS 来解决工程中的问题。
- （3）使我们对材料力学有了更充分的认识，我们所学到的这一点材料力学的知识，在工程中几乎解决不了什么问题。再者，也使我们对材料力学目前发展到了什么样的程度有了一定的了解，而且也遇到了一些目前材料力学方面所没有解决的问题。同时也增加了我们对材料力学实验的兴趣，以前还没有一个实验让我们整天都在实验室里，整天都想着实验。
- （4）对于本组实验比较遗憾的地方是在做实验二时，第 11、13 号应变片由于实验仪器的原因，未能使用。

(5) 通过本次实验,我们还学会了如何改变 DH3819 应变测试仪的桥路,即如何由 $\frac{1}{4}$ 桥转变为 $\frac{1}{2}$ 桥,如何由 $\frac{1}{2}$ 桥转变为 $\frac{1}{4}$ 桥,从中我们更清楚的了解了应变测试仪的内部结构。

(6) 本次实验突破了以往实验的模式,不是按照教师一步一步地指导,而是通过自己的思考独立完成的。在实验的过程中我深深地体会到:整个实验其实就是一个不断发现问题,解决问题的过程。即使实验前考虑得再清楚,实验中还是会遇到很多问题。拿我们组来说,开始我们想通过剪应力的大小来求扭矩,但后来发现,现在还没有一个完整的公式可以直接由扭转剪应力求得扭矩的大小。经过和老师的讨论,只得改变以前的思路,从另一个角度来确定弯心的位置。所以说,这样做实验更能锻炼学生的能力。

教师评语

李春福、张颖同学所选择的“薄壁截面槽钢的应力分布及弯心特性研究”实验是在大型设备上完成,该实验的方式在国内属首次,也是我校 211 实验室重点建设项目之一,为最新开出的实验。由于试验设备刚刚装配,还没有现成资料可参考。从实验设备、试件加工、仪器调试到实验准备、方案等都靠他们自己摸索完成,困难是可以想象的。可以说他们的实验直接参与了实验室的建设工作。

就实验内容选择看,开口薄壁截面的槽钢是工程中常用的型材,由于其截面特点,当其使用不当时极易发生失效,因此研究其受力特性十分重要。本实验用电测方法研究了弯曲中心和平面弯曲、非平面弯曲情况的应力分布,还学习进行了有限元计算方法,得到了对工程有益的结论。

尽管对于实验后的论文写作还有些欠缺,实验过程也显得有些粗糙,有些理论分析还不够深入,知识面不够宽,但是该实验的完成花费了大量心血,并具有一定的创新性。对于大二的本科生而言,该实验及论文的完成对于他们的工程素质及实践能力培养方面无疑是一种有益尝试。