

# 几种钢吊车梁变截面支座抗疲劳性能的对比较分析

⑩  
77-84

郑廷银

(南京建筑工程学院建筑工程系 210009)

卢铁鹰

(重庆建筑大学建筑工程学院 630045)

TU317.3

**A 摘要** 用有限元法完成了梯形过渡式支座、圆弧过渡式支座及直角突变式支座钢吊车梁在同一条件下的应力、变形分析;由各受试梁的应力场分析,找出了支座应力分布规律的差异和疲劳裂纹敏感区;由各单元高斯积分点的应力值和应力集中系数分布曲线,捕捉到了疲劳裂纹首发点的位置;运用本文建立的“应力集中带宽”和“疲劳裂纹扩展驱动能”的概念,分析了各型支座的疲劳性能,并找出其差别。

**关键词** 钢吊车梁, 变截面支座, 疲劳性能, 应力集中带宽, 裂纹扩展驱动能 **应力试验**

**中图法分类号** TU317.3

在工业厂房中,由于生产工艺条件和经济等方面的要求,常在吊车梁的支座处改变吊车梁的截面。钢吊车梁变截面支座,形式可归纳为:梯形过渡式、圆弧过渡式和直角突变式三种(见图1)。这三种变截面支座在我国的工程实践中都曾采用过。除第一种支座未曾做过疲劳性能的研究外,后两种支座都曾做过不同深度的疲劳性能研究。但是,这些研究成果是在不同测试研究人员、不同荷载、不同几何尺寸、不同材料性能等条件下得出的,因此,可比性较差。为了具有较强的可比性,以便找出钢吊车梁各变截面支座疲劳性能的差异,为工程应用提供必要的理论依据,本文拟在影响钢吊车梁疲劳性能的内、外因条件相同(各名义应力幅、应力比、材料性能及工作环境等)情况下对上述三种变截面支座的疲劳性能进行对比分析。

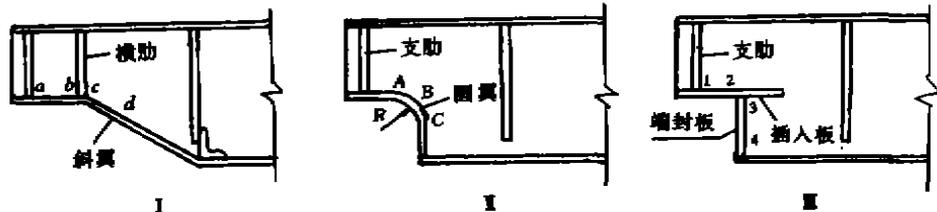


图1 变截面吊车梁端头简图

收稿日期:1995-11-26

郑廷银 男,1955年生,讲师

## 1 有限单元分析

有限元分析以实际吊车梁为基本模型并进行了必要的简化。

由于吊车梁直接承受吊车产生的三个方向的荷载，即竖向荷载、横向水平荷载和纵向水平荷载。其纵向水平荷载沿吊车轨道方向，由吊车梁传给柱间支撑，因此计算时一般不考虑；横向水平荷载主要由吊车梁的上翼缘直接传给制动结构，它对吊车梁的影响较竖向荷载要小，对其下翼缘的影响比上翼缘又要小得多，而支座的变载面处一般靠近下翼缘，因此，为简化计算，计算中只考虑竖向荷载作用在腹板中面的情况而未计入水平荷载的影响。

尽管本文研究的钢吊车梁是由腹板、翼缘板、加劲肋或还有端封板、插入板等板件组成一个空间组合结构，但腹板位于吊车梁的对称面上，厚度远小于其余两个方向的尺寸，且无表面荷载，故腹板可以按平面问题来处理；对于上、下翼缘板、端封板、插入板、加劲肋等板件，为简化计算，作平面变厚度问题处理。考虑到单元连续性条件，我们将变厚度问题归结为平面单元变刚度问题来处理。有限元分析模型见图 2。

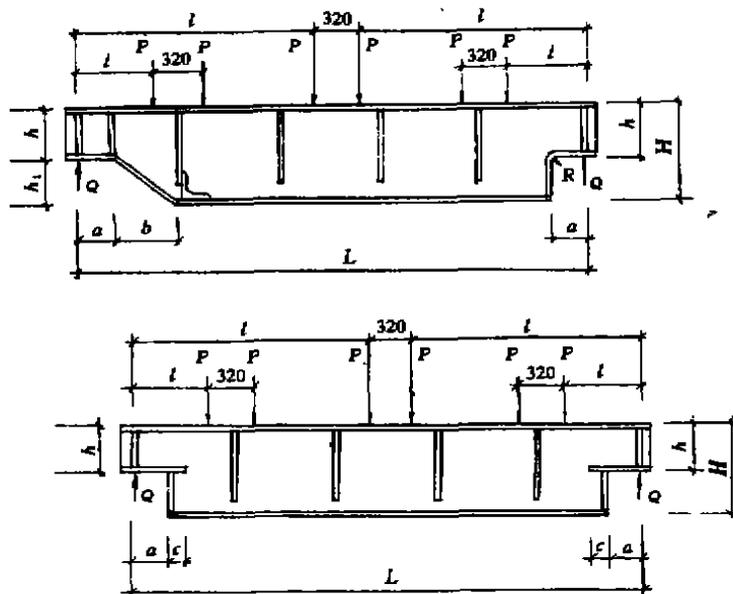


图 2 有限元分析模型

为了更全面地了解变截面支座的疲劳性能，采用三角形单元和平面四边形八节点等参元分别对 18 种支座的钢吊车梁进行分析。计算中的材料按各向同性线弹性模型处理。计算参数见表 1。

表1 计算参数

梁号	$h$ (mm)	$a$ (mm)	$b$ (mm)	$r$ (mm)	$R$ (mm)	$C$ (mm)	$P$ (kN)	$Q$ (mm)	$H$ (mm)	$L$ (mm)	$E$ (MPa)	$\mu$
SL-1	240	100	800	60	50	100	80.8	161.6	600	4500	205800	0.3
SL-2	240	150	750	60	100	500	94.4	188.8				
SL-3	300	100	800	60	50	2080	101.33	101.33				
SL-4	300	240	660	60	100	2080	100	100				
SL-5	360	100	800	60	50	710	52.8	105.6				
SL-6	360	360	540	60	100	480	64.1	128.2				

注:表中 $Q$ 为支座反力; $E$ 为钢材弹性模量; $\mu$ 为泊松比。

## 2 应力状态的对比分析

通过对18种不同细部构造的钢吊车梁进行有限元分析,并驱动彩色绘图机绘制出各受试梁的应力等值线图后,对各应力等值线图进行对比分析发现:尽管各梁的荷载作用位置及大小不同,各支座细部构造各异(见表1),但是各梁对应的各应力等值线图的分布规律是极为相似的,即梁跨中部分应力等值线分布呈一定规律性,且无应力集中;在梁端支承处及其附近区域、荷载作用点附近区域和各截面改变处及其附近区域均呈复杂受力状态,存在不同程度的应力集中;各型支座的截面改变处的应力集中区域均处于受拉状态,该区域即为疲劳裂纹敏感区(各型支座的疲劳裂纹敏感区分别见图3、图4、图5)。

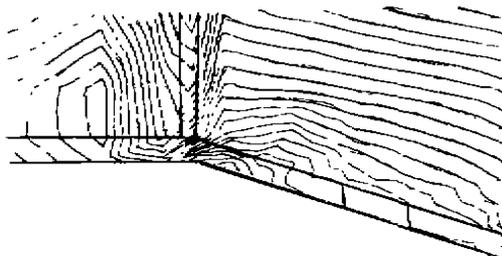


图3 I型支座疲劳裂纹敏感区

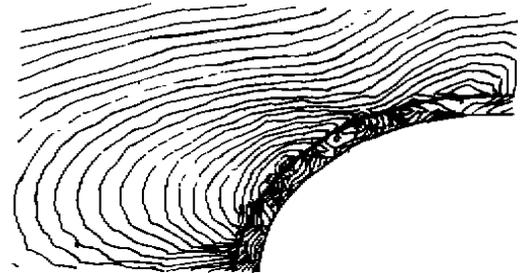


图4 II型支座疲劳裂纹敏感区

由图易见, I型支座的疲劳裂纹敏感区位于斜翼缘上弯折点(即图1(a)中的c点)及其附近区域; II型支座疲劳裂纹敏感区位于整个圆弧翼缘及其附近腹板区域; III型支座则位于端封板与插入板的焊缝位置及其附近腹板区域。

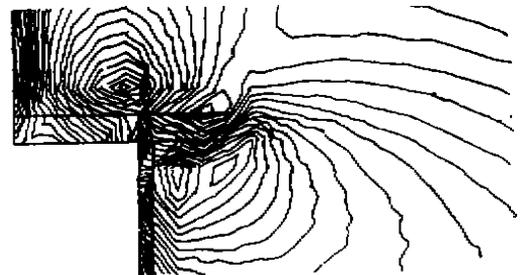


图5 III型支座疲劳裂纹敏感区

### 3 应力集中程度的对比分析

通过上面的分析,已经确定了各型支座的应力集中区域,即疲劳裂纹敏感区。但是各型支座的疲劳裂纹到底首发于何点,其疲劳性能的差异如何,必须通过应力集中程度的对比分析才能确定。为了寻找共同依据,以便使研究结果能反映本次研究以外的荷载状况,我们对能反映应力集中程度的两参数,即无量纲的应力集中系数(表峰值)和应力集中带宽(表区域)进行量化分析。

应力集中系数由下式计算:

$$k_i = \frac{\sigma_i}{\sigma_{0i}} \quad (1)$$

式中

$k_i$ ——应力集中系数;

$\sigma_i$ ——由有限元法计算而得的疲劳裂纹敏感区的最大主应力;

$\sigma_{0i}$ ——按材料力学方法计算而得的与  $\sigma_i$  相应点位的最大主应力。

为便于对比分析,我们绘出了图 1 中所示截面的各梁各支座的疲劳裂纹敏感区的应力集中系数曲线如图 6~图 11。

由各支座的应力集中系数分布图发现: I、III型支座的应力集中系数曲线基本呈正态分

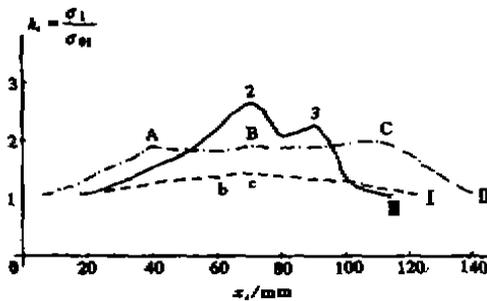


图 6 SL-1 中各支座的  $k_i$  分布

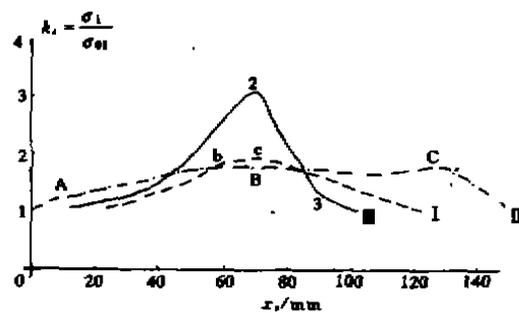


图 7 SL-2 中各支座的  $k_i$  分布

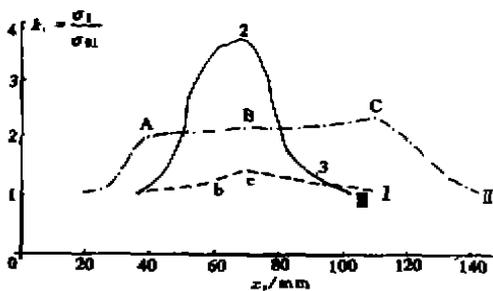


图 8 SL-3 中各支座  $k_i$  分布

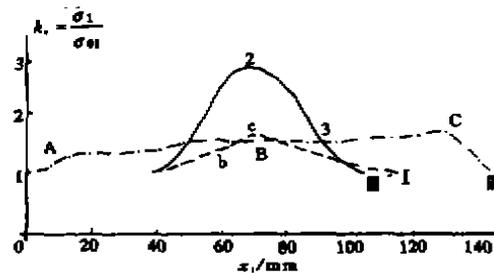
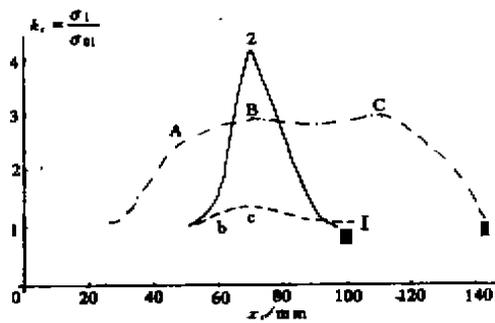
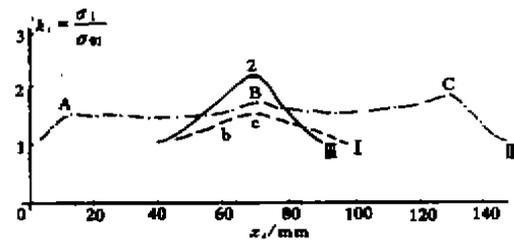


图 9 SL-4 中各支座的  $k_i$  分布

图 10 SL-5 中各支座的  $k_t$  分布图 11 SL-6 中各支座的  $k_t$  分布

布,其顶点即为高峰应力点,亦即疲劳裂纹首发点。对于 I 型支座,该点位于弯折处翼缘与腹板的焊缝位置,对于 III 型支座,该点位于支座下翼缘与插入板交界处的腹板焊缝位置(即图 1 中的 2 点)或插入板与端封板的焊缝位置(图 1 中的 3 点)。两支座的  $k_t$  曲线差别在于 I 型支座的峰值小,曲线变化比较平缓,即梯度较小,而 III 型支座则相反, $k_t$  分布曲线的峰值大,曲线变化陡,即梯度大。两者的应力集中带宽较接近;对于 II 型支座,曲线两端梯度较大,中间段 AC 几乎接近水平直线,即梯度非常之小。该曲线的中间段 AC 恰好对应于 II 型支座的整个圆弧,这说明沿整个圆弧翼缘与圆弧腹板的焊缝位置有多处应力集中,且峰值应力接近,这种现象表明,在连续反复荷载作用下,沿整个圆弧焊缝可能有多处裂纹产生。当然,该曲线也有最大值,见图中 C 点,该点对应于圆弧起始点处翼缘与腹板的连接焊缝位置,该点很可能成为这类支座的疲劳裂纹首发点。

为便于后面的分析,我们定义:在疲劳裂纹敏感区中,某一截面的应力集中系数大于 1 所对应的长度称为应力集中带宽。

分析表 2 发现:各梁中应力集中系数的大小基本依 III 型、II 型、I 型支座的次序递减,其最大值 III 型为 4.31(位于 SL-5 号梁),II 型为 2.86(位于 SL-5 号梁),I 型为 1.80(位于 SL-2 号梁);其最小值则为 III 型 2.19(位于 SL-6 号梁),II 型 1.71(位于 SL-4 号梁),I 型 1.31(位于 SL-5 号梁)。由于结构的应力集中系数主要反映结构的开裂寿命,即应力集中系数大者,开裂寿命短,反之,开裂寿命长<sup>[6]</sup>,因此,由上述比较结果可知,在相同内外因条件下各型支座的开裂寿命按 III 型、II 型、I 型的次序递增。

应力集中带宽是结构细部构造的量化表示,它反映其细部构造变化对结构疲劳性能的影响<sup>[6]</sup>。根据应力集中带宽的定义可知,应力集中带宽越大,在疲劳裂纹敏感区中可能产生疲劳裂纹的范围越大或数量越多,在连续反复荷载作用下,较多的疲劳裂纹就有可能很快发展为贯通的宏观裂缝(特别是在应力梯度较小的疲劳裂纹敏感区更是如此),可能导致结构的抗疲劳性能差,反之,抗疲劳性能好。分析表 2 发现,各梁中应力集中带宽的大小均依 II 型、I 型、III 型支座的次序递减,即抗疲劳性能按该次序递增。抗疲劳性能最好的各型支座的带宽为:III 型 45 mm(位于 SL-5 号梁)I 型 50 mm(位于 SL-5 号梁);II 型 110 mm(位于 SL-3 号梁)。

由于应力集中系数和应力集中带宽分别反映了应力峰值的程度和应力集中区域的程度,显然,若两者的最大值或最小值在同一支座出现,无疑该支座的疲劳性能最差或最好。这样的话,我们就可极方便地对各支座疲劳性能进行对比分析,并找出其差异。然而,经上述单参数分析发现,除 I 型支座的最小应力集中系数和最小应力集中带宽在同一支座外,II、III 型支座

的最小应力集中系数和最小应力集中带宽均不在同一支座内,无法对各型支座的疲劳性能进行对比分析,找出其差异,对此,必须考虑两者的综合效应。

表 2 各梁支座最大应力集中系数及带宽

梁号	支座类型	应力集中系数	应力集中带宽	梁号	支座类型	应力集中系数	应力集中带宽
SL-1	I	1.39	105	SL-2	I	1.80	100
	II	1.88	135		II	1.76	150
	III	2.63	100		III	3.07	90
SL-3	I	1.41	70	SL-4	I	1.66	70
	II	2.31	110		II	1.71	145
	III	3.68	65		III	2.82	65
SL-5	I	1.31	50	SL-6	I	1.52	55
	II	2.86	120		II	1.83	150
	III	4.31	45		III	2.19	47

注:表中应力集中带宽的单位为 mm。

#### 4 抗疲劳性能对比分析

根据断裂力学理论,疲劳裂纹扩展驱动力即为应力强度因子,而应力强度因子的大小则取决于结构的几何形状函数和裂纹尖端应力<sup>[5]</sup>。在我们所讨论的问题中,应力集中带宽实际上是几何形状函数的一种量化表示;应力集中系数则是主应力在更广意义上的一种表征,因此,可将应力集中系数视为一广义力。这表明应力集中系数和应力集中带宽即为影响裂纹扩展的两因素。

文献[4]根据流变断裂力学原理,应用内部体力场论研究了裂纹扩展力,并指出,在裂纹扩展过程中尽管存在流变与耗散现象,但总能量不变。在我们所讨论的问题中,这种总能量是疲劳裂纹驱动力的“源泉”。因此,为便于讨论,我们定义:这种积蓄在疲劳裂纹敏感区的能给予疲劳裂纹驱动力的潜在能量为疲劳裂纹扩展驱动能。

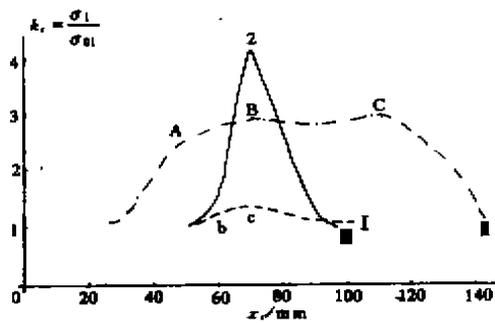
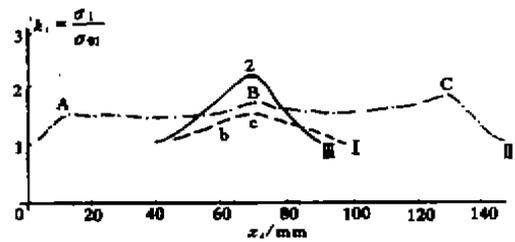
经分析发现,此能量与应力集中系数曲线所围成的面积  $S$  在数值上有较好的相似关系,故可用  $S$  来度量此疲劳裂纹扩展驱动能  $U_i$ 。则有

$$U_i = \int_{x_i}^{x_e} f(x) dx \quad (2)$$

式中

- $f(x)$ ——应力集中系数;
- $x_i$ ——应力集中带宽的起点;
- $x_e$ ——应力集中带宽的终点。

由上述分析可知,疲劳裂纹扩展驱动能反映了应力集中系数和应力集中带宽的综合效应,

图 10 SL-5 中各支座的  $k_t$  分布图 11 SL-6 中各支座的  $k_t$  分布

布,其顶点即为高峰应力点,亦即疲劳裂纹首发点。对于 I 型支座,该点位于弯折处翼缘与腹板的焊缝位置,对于 III 型支座,该点位于支座下翼缘与插入板交界处的腹板焊缝位置(即图 1 中的 2 点)或插入板与端封板的焊缝位置(图 1 中的 3 点)。两支座的  $k_t$  曲线差别在于 I 型支座的峰值小,曲线变化比较平缓,即梯度较小,而 III 型支座则相反, $k_t$  分布曲线的峰值大,曲线变化陡,即梯度大。两者的应力集中带宽较接近;对于 II 型支座,曲线两端梯度较大,中间段 AC 几乎接近水平直线,即梯度非常之小。该曲线的中间段 AC 恰好对应于 II 型支座的整个圆弧,这说明沿整个圆弧翼缘与圆弧腹板的焊缝位置有多处应力集中,且峰值应力接近,这种现象表明,在连续反复荷载作用下,沿整个圆弧焊缝可能有多处裂纹产生。当然,该曲线也有最大值,见图中 C 点,该点对应于圆弧起始点处翼缘与腹板的连接焊缝位置,该点很可能成为这类支座的疲劳裂纹首发点。

为便于后面的分析,我们定义:在疲劳裂纹敏感区中,某一截面的应力集中系数大于 1 所对应的长度称为应力集中带宽。

分析表 2 发现:各梁中应力集中系数的大小基本依 III 型、II 型、I 型支座的次序递减,其最大值 III 型为 4.31(位于 SL-5 号梁),II 型为 2.86(位于 SL-5 号梁),I 型为 1.80(位于 SL-2 号梁);其最小值则为 III 型 2.19(位于 SL-6 号梁),II 型 1.71(位于 SL-4 号梁),I 型 1.31(位于 SL-5 号梁)。由于结构的应力集中系数主要反映结构的开裂寿命,即应力集中系数大者,开裂寿命短,反之,开裂寿命长<sup>[6]</sup>,因此,由上述比较结果可知,在相同内外因条件下各型支座的开裂寿命按 III 型、II 型、I 型的次序递增。

应力集中带宽是结构细部构造的量化表示,它反映其细部构造变化对结构疲劳性能的影响<sup>[6]</sup>。根据应力集中带宽的定义可知,应力集中带宽越大,在疲劳裂纹敏感区中可能产生疲劳裂纹的范围越大或数量越多,在连续反复荷载作用下,较多的疲劳裂纹就有可能很快发展为贯通的宏观裂缝(特别是在应力梯度较小的疲劳裂纹敏感区更是如此),可能导致结构的抗疲劳性能差,反之,抗疲劳性能好。分析表 2 发现,各梁中应力集中带宽的大小均依 II 型、I 型、III 型支座的次序递减,即抗疲劳性能按该次序递增。抗疲劳性能最好的各型支座的带宽为:III 型 45 mm(位于 SL-5 号梁) I 型 50 mm(位于 SL-5 号梁);II 型 110 mm(位于 SL-3 号梁)。

由于应力集中系数和应力集中带宽分别反映了应力峰值的程度和应力集中区域的程度,显然,若两者的最大值或最小值在同一支座出现,无疑该支座的疲劳性能最差或最好。这样的话,我们就可极方便地对各支座疲劳性能进行对比分析,并找出其差异。然而,经上述单参数分析发现,除 I 型支座的最小应力集中系数和最小应力集中带宽在同一支座外,II、III 型支座

## Contrastive Analysis of the Fatigue Property for Variable Section Abutment in Steel Crane Beam

*Zheng Tingyin*

(Dept. of Civil Engineering, Nanjing Architectural and Engineering Institute)

*Lu Tieying*

(Faculty of Civil Engineering, Chongqing Jianzhu University)

**Abstract** This paper gives successful analysis of the stresses and strains for the abutment of steel crane beam by using the finite element method, in which the abutments are of the transition of polygonal line, arc and right angle. Then differences of the stress distribution rules and the sensitive regions of fatigue crack have been found by analyzing the stress field in the beams tested. The first appeared point of fatigue crack is caught from the distribution charts of stress concentration factor. The fatigue property of three kinds of abutments is studied by a new theory of 'driving energy for fatigue crack expanding' proposed in this paper, and the differences of the fatigue property have been found.

**Key Words** steel crane beam, variable section abutment, fatigue property, width of the stress concentration belt, driving energy for the fatigue crack expanding