

③

钢吊车

梁

直角式支座

应力: 有限元

25-32

对钢吊车梁直角式突变支座 应力集中系数的研究

卢铁鹰

李辉

TH2101

(建筑工程学院)

①

摘要 用均匀设计试验法对多种不同参数组合的直角式突变直座钢吊车梁进行了有限元分析;找出了该类梁在支座突变处的局部高峰应力点;在给出每种参数组合的应力集中系数后,通过多元非线性回归分析,建立了用该类支座几何参数计算应力集中系数的回归表达式;最后对分析结果误差来源及其影响程度进行了讨论。

关键词 应力集中系数, 钢吊车梁, 直角式突变支座, 几何参数, 有限元

中图分类号 TU318.1

在工业厂房中,常因工艺要求,需变化柱网,使相邻跨度不等的吊车梁的截面高度不相等。为了使相邻吊车梁端部高度相同,或为了减小框架上部柱的长度,往往采用变高度吊车梁。

钢吊车梁直角式突变支座(图1),因其形式简洁,制作方便,适于自动焊接,深受施工单位欢迎。近年来,这种支座形式的钢吊车梁在国内工业厂房中已开始使用。但由于支座截面突变处存在着严重的应力集中,而此处应力集中的严重程度又直接影响吊车梁的疲劳性能。因此,开展对这类钢吊车梁的应力集中系数的研究就显得十分必要。

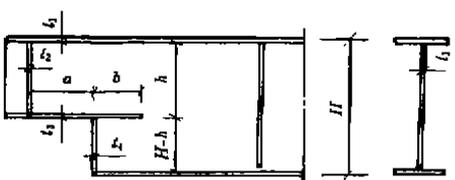


图1 钢吊车梁直角式突变支座

研究表明,当直角式突变支座的构造细节一定且钢材处于弹性阶段时,支座各板件的应力值随吊车梁所受荷载大小而相应改变,但其应力分布的形状不变。即是说:它们的应力集中程度不变。这些研究工作都肯定了钢吊车梁直角式突变支座的应力集中系数只与支座的几何参数有关,但一直未能给出二者间的定量关系。

本文研究工作引入均匀设计试验法,对多种不同参数组合的钢吊车梁进行了有限元分析,求出每种试验方案所对应的各局部高峰应力点的主拉应力值 σ_1 ,用初等弯曲理论计算出这些对应点的主拉应力值 σ' ,则各高峰应力点的应力集中系数 K 表示为:

$$K = \frac{\sigma_1}{\sigma'} \quad (1)$$

通过对试验条件和结果进行回归分析,建立了支座突变处应力集中系数与构成该类支座的

* 收稿日期:1993-11-30.

卢铁鹰,男,1938年生,教授,重庆建筑大学建筑工程学院(630045).

各种几何参数之间的定量关系。这一关系的建立,填补了计算钢吊车梁直角式突变支座应力集中系数的空白,对该类钢吊车梁的设计、疲劳性能的研究和使用提供了依据。

1 钢吊车梁直角式突变支座的几何参数

由图1可见,钢吊车梁直角式突变支座由插入板、端封板、腹板、支承加劲肋和上、下翼缘等板件共同构成。对钢吊车梁直角式突变支座的几何参数作如下描述:

$Q_1 = t_1/t$ ——支座上翼缘厚度 t_1 与腹板厚度 t 的比值;

$Q_2 = t_2/t$ ——支座支承加劲肋厚度 t_2 与腹板厚度 t 的比值;

$Q_3 = t_3/t$ ——支座插入板厚度 t_3 与腹板厚度 t 的比值;

$Q_4 = t_4/t$ ——支座端封板厚度 t_4 与腹板厚度 t 的比值。

经对3个工程中的几十根实际吊车梁的统计结果, $Q_1 \sim Q_4$ 的变化范围均在0.8~3.2以内。

$Q_5 = h/a$ ——支座端部高度 h 与支承点到支座突变点的距离 a 的比值,其统计变动范围为0.8~4.4以内;

$Q_6 = H/h$ ——梁的跨中高度 H 与支座端部高度 h 的比值,其统计变动范围为1.2~3.6;

$Q_7 = a/b$ ——支承点到支座突变点的距离 a 与插入板插入腹板的长度 b 之比值,其统计变化范围为0.2~2.6之间。

2 用均匀设计试验法安排试验方案

均匀设计试验法是从全面试验点中挑出部份试验点,这些试验点在试验范围内充分均衡分散,使其能反映体系的主要特征;因均匀设计试验结果没有整齐可比性,故所得的试验结果用逐步回归法就能够求出最优化的条件。

用均匀设计试验法设计直角式突变支座钢吊车梁有限元分析方案,需综合考虑因素数、水平数、试验次数、部份因数可能有二次项存在以及试验费用等因素,对7因素试验,若不考虑二次项存在则只需7次试验,我们考虑有部份因素存在二次项,共安排了13次试验,达到了预期的研究目的。用均匀设计试验法所设计的直角式突变直座钢吊车梁的试验方案见表1。

3 有限元分析

3.1 有限元分析模型

钢吊车梁直角式突变支座是由腹板、翼缘、端封板、插入板及加劲肋组成的一个空间组合结构,要得到解析解是困难的。经过对组成突变支座的各板件的受力、变形分析,可以看出这种吊车梁的主要结构特点是腹板位于

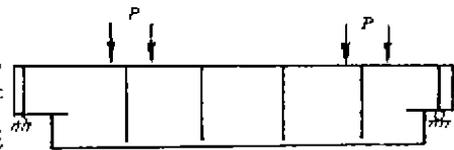


图2 有限元分析模型

对称面上,其厚度远小于其余两个方向的尺寸,且无表面荷载,故腹板可认为是弹性力学平面问题。对于上、下翼缘、端封板、插入板、加劲肋等构件,为简化计算的需要,作平面变厚度

问题进行处理,考虑单元连续性条件,可将变厚度问题归结为平面单元变刚度问题予以处理。经上述简化后的有限元分析模型如图2所示。

表1 试验条件与应力集中系数表

试件号	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	Q_6	Q_7	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6
1	0.8	1.0	1.8	2.2	3.2	3.0	2.4	2.7	3.5	1.9	2.82	3.57	1.92
2	1.0	1.4	3.0	1.2	2.0	2.4	2.2	3.0	3.4	3.2	3.00	3.49	3.11
3	1.2	1.8	1.6	2.8	0.8	1.8	2.0	2.3	2.8	2.0	2.35	2.71	2.07
4	1.4	2.2	2.8	1.8	3.5	1.2	1.8	1.8	2.6	2.5	1.72	2.57	2.56
5	1.6	2.6	1.4	0.8	2.3	3.2	1.6	2.7	2.8	1.9	2.66	2.83	1.92
6	1.8	3.0	2.6	2.4	1.1	2.6	1.4	2.5	2.7	2.2	2.44	2.62	2.11
7	2.0	0.8	1.2	1.4	3.8	2.0	1.2	2.9	3.2	2.0	2.84	3.12	1.92
8	2.2	1.2	2.4	3.0	2.6	1.4	1.0	2.4	2.7	2.1	2.36	2.73	2.11
9	2.4	1.6	1.0	2.0	1.4	3.4	0.8	2.5	2.9	1.4	2.42	2.87	1.49
10	2.6	2.0	2.2	1.0	4.1	2.8	0.6	2	2.8	1.9	2.05	2.71	1.96
11	2.8	2.4	0.8	2.6	2.9	2.2	0.4	1.5	1.9	1.1	1.50	1.99	0.92
12	3.0	2.8	2.0	1.6	1.7	1.6	0.2	1.9	2.0	2.1	2.02	2.07	2.11
13	3.2	3.2	3.2	3.2	4.4	3.6	2.6	1.1	1.9	1.6	1.10	1.9	1.60

3.2 有限元分析结果

按表1所给定的试验条件,每一种试验重复一次,共对13根结构完全对称的钢吊车梁进行有限元分析,求得梁上支座部位的应力分布情况如图3所示。

通过对应力分布特征的分析,可知钢吊车梁突变支座处应力集中最严重部位为图4中的A、B、C三点,此三点对应的应力集中系数谁高谁低,主要取决于构成该支座的几何参数,而与荷载大小无关。

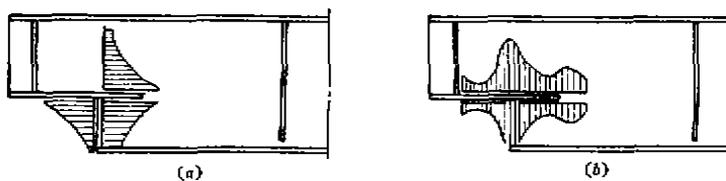


图3 突变支座处的应力分布

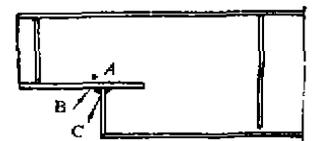


图4 应力集中最严重部位

3.3 本文中有关应力集中系数的含义

若设图4中局部高峰应力点A、B、C三点按有限元分析的最大主拉应力分别为 σ_{1a} 、 σ_{1b} 和 σ_{1c} ;按初等弯曲理论可计算出A点的主拉应力为 σ'_{1a} ,为减轻工程设计中的计算工作量,本文研究B、C两点的应力集中系数时,直接用 σ_{1b} 、 σ_{1c} 和 σ'_{1a} 相比而得出的,具体计算公式为

$$K_s = \sigma_{1s} / \sigma'_{1a} \quad (2)$$

$$K_a = \sigma_{1a}/\sigma'_{1a} \quad (3)$$

$$K_b = \sigma_{1b}/\sigma'_{1b} \quad (4)$$

上述式中, K_a, K_b, K_c 分别为 A, B, C 三点的应力集中系数。

由于在材料处于弹性阶段时, 直角式突变支座的应力集中系数与吊车梁所受荷载大小基本无关, 而与构成支座的各几何参数有关, 故应力集中系数 K_a, K_b, K_c 均可表示为

$$K = f(Q_i) \quad (i = 1, 2, \dots, 7) \quad (5)$$

式中 f ——待定函数。

将按(2), (3), (4)式计算出的应力集中系数分别填入表1相应栏目, 构造一张完整的试验条件与结果值表, 以作回归分析的基本依据。

4 应力集中系数的回归表达式

对表1所列数据, 用逐步回归分析方法, 不断调整各因素的二次项, 取保证率为95%, 直至所回归的应力集中系数计算式十分显著为止。

4.1 A点应力集中系数 K_a 的回归计算式

$$K_a = 7.1692 - 0.4718Q_1 - 2.1993Q_2 + 0.09615Q_3 - 1.1014Q_4 \\ - 0.2179Q_5 + 0.1538Q_6 - 0.3372Q_7 + 0.4623Q_1^2 + 0.2189Q_1^3 \quad (6)$$

作回归分析显著性检验

$$F = 21.67 > F_{0.05}(9, 3) = 8.81$$

可见: K_a 与各因素 Q_i 之间的表达式(6)是显著的。

4.2 B点应力集中系数 K_b 的回归计算式

$$K_b = 4.5403 - 0.4423Q_1 - 0.94996Q_2 + 0.1730Q_3 - 0.1154Q_4 \\ - 0.03846Q_5 + 0.22398Q_6 - 0.1923Q_7 + 0.1385Q_1^2 + 0.005656Q_1^3 \quad (7)$$

作回归分析显著性检验

$$F = 18.3 > F_{0.05}(9, 3) = 8.81$$

可见: K_b 与各因素 Q_i 之间的表达式(7)是显著的。

4.3 C点的应力集中系数的回归计算式为

$$K_c = 3.1413 + 0.03415Q_1 - 0.2115Q_2 + 0.201415Q_3 - 0.40135Q_4 \\ - 0.17949Q_5 - 0.23077Q_6 + 0.188Q_7 + 0.07351Q_1^2 \\ + 0.0044Q_1^3 \quad (8)$$

作回归分析显著性检验

$$F = 30.7 > F_{0.05}(9, 3) = 8.8$$

可见: K_c 与各因素 Q_i 之间的表达式(8)是显著的。

依表1所给定的条件, 用(6), (7), (8)三式计算出的 A, B, C 三点的应力集中系数 K'_a, K'_b 和 K'_c 已列入表1相应栏目。比较 K_a 和 K'_a, K_b 和 K'_b, K_c 和 K'_c 可见, 由(6), (7), (8)三式计算出的 A, B, C 三点的应力集中系数与按式(2), (3), (4)式的计算结果之间是相当吻合的。

5 几何参数的变化对应力集中系数的影响

钢吊车梁直角式突变支座 A, B, C 三点的应力集中系数的回归计算式(6),(7),(8)中各项系数 b_i 表示该因素在其他因素不变的情况下, Q_i 每变化一个单位引起应力集中系数变化的大小, b_i 的绝对值越大, 该因素越重要。但回归系数与因数的单位有关, 不能直接进行比较, 必须化成标准回归系数 b_i^* 来衡量。标准回归系数 b_i^* 由下式计算

$$b_i^* = b_i \sqrt{I_{ii}/I_{rr}} \quad (9)$$

式中 I_{ii} ——正则方程系数

I_{rr} ——总变差平方和。

由(9)式计算出 K_a 的标准化系数为

$$\begin{aligned} b_1^* &= -0.65 & b_2^* &= -3.04 & b_3^* &= 0.133 \\ b_4^* &= -1.52 & b_5^* &= -0.45 & b_6^* &= 0.21 \\ b_7^* &= -0.466 & b_8^* &= 2.59 & b_9^* &= 1.22 \end{aligned}$$

可见, 对 A 点应力集中系数影响最大的是 Q_2, Q_3^2, Q_4 和 Q_9^2 项, 其次是 Q_1, Q_7, Q_5, Q_6 和 Q_8 项。

由(9)式计算出 K_b 的标准化系数为

$$\begin{aligned} b_1^* &= -0.664 & b_2^* &= -1.426 & b_3^* &= 0.2598 \\ b_4^* &= -0.1732 & b_5^* &= -0.0866 & b_6^* &= 0.3368 \\ b_7^* &= -0.2887 & b_8^* &= 0.843 & b_9^* &= 0.0411 \end{aligned}$$

可见, 对 B 点应力集中系数而言, 各因素的重要性顺序依次为 $Q_2, Q_3^2, Q_4, Q_6, Q_7, Q_5, Q_8$ 和 Q_9 。

由(9)式计算出 K_c 的标准化系数为

$$\begin{aligned} b_1^* &= -0.0507 & b_2^* &= -0.3143 & b_3^* &= 0.299 \\ b_4^* &= -0.5963 & b_5^* &= -0.400 & b_6^* &= -0.3429 \\ b_7^* &= -0.2793 & b_8^* &= 0.4429 & b_9^* &= 0.02653 \end{aligned}$$

可见, 对 C 点应力集中系数而言, 各因素的重要性顺序依次为 $Q_4, Q_1^2, Q_5, Q_6, Q_2, Q_3, Q_7, Q_1$ 和 Q_9 。

5.1 因素 Q_1 对 A, B, C 三点应力集中系数的影响

由(6),(7),(8)三式可见, Q_1 对 K_a, K_b 和 K_c 的影响均为线性关系; 在假定其他因素恒定且为0的情况下, Q_1 对 K_a, K_b 和 K_c 的影响如图5所示。

5.2 Q_2 对 K_a, K_b 和 K_c 的影响

直角式支座突变处 A, B 两点的应力集中系数 K_a, K_b 即与该支座加劲肋厚度 t_2 与腹板厚度 t 的比值 Q_2 的一次项有关, 又与 Q_2 的二次项有关; C 点的应力集中系数 K_c 则只与 Q_2 的一次项有关。假定在其他因素不变且均为0的条件下, K_a, K_b, K_c 与 Q_2 的关系如图6所示。

5.3 Q_3 对 K_a, K_b 和 K_c 的影响

K_a, K_b 和 K_c 与直角式突变支座插入板厚度和腹板厚度 t 的比值 Q_3 之间存在较好的相关

性。由(6)式和(7)式见： K_a 和 K_b 与 Q_3 之间呈线性关系，由(8)式可见： K_c 与 Q_3 之间既有一次项，也有二次项。假定在其他因素不变且为0的条件下， K_a 、 K_b 和 K_c 与 Q_3 的关系如图7所示。

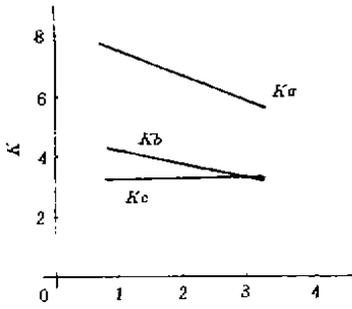


图5 Q_1 对 K 的影响

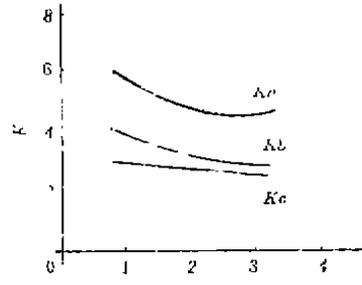


图6 Q_2 对 K 的影响

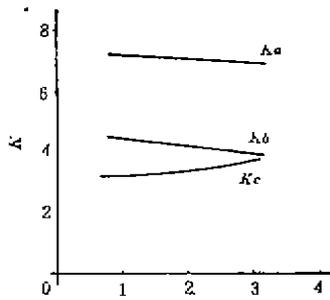


图7 Q_3 对 K 的影响

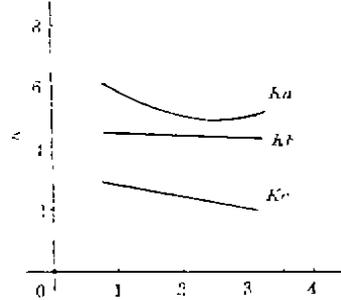


图8 Q_4 对 K 的影响

5.4 Q_4 对 K_a 、 K_b 和 K_c 的影响

为考虑A、B、C三点应力集中系数 K_a 、 K_b 、 K_c 与直角式突变直座端封板厚度 t_1 与腹板厚度 t 的比值 Q_4 之间的关系，在(6)、(7)、(8)式中，假定除 Q_4 之外的其他各因素保持不变且均为0，则 K_a 、 K_b 、 K_c 与 Q_4 的关系如图8所示。

前述5.1~5.4节主要分析了构成直角式突变支座的各板件几何参数对A、B、C三点的应力集中系数的影响；以下则主要讨论构成变截面支座的结构参数对应力集中系数的影响。

5.5 Q_5 对 K_a 、 K_b 和 K_c 的影响

支座端部高度与支承点到支座突变点的距离的比值 Q_5 ，是构成变截面支座的主要结构参数之一。由(6)、(7)、(8)三式可见：A、B、C三点的应力集中系数 K_a 、 K_b 、 K_c 与 Q_5 之间只存在线性关系。在其他因素不变且为0的情况下， K_a 、 K_b 、 K_c 与 Q_5 的关系如图9所示。

5.6 应力集中系数 K_a 、 K_b 和 K_c 与 Q_6 之间的关系

梁的跨中高度 H 与支座端部高度 h 的比值 Q_6 也是构成变截面支座的主要结构参数；由(6)和(8)式可见： Q_6 与 K_a 、 K_c 之间呈线性关系；由(7)式可见： Q_6 与 K_b 之间既有一次项，又有二次项。在假定其他因素不变且为0的情况下， K_a 、 K_b 、 K_c 与 Q_6 的关系如图10所示。

5.7 K_a 、 K_b 、 K_c 与 Q_7 的关系

因素 Q_7 反映支承点到支座突变点的距离 a 与插入板插入腹板的长度 b 的比值。由(6)、(7)、(8)三式可见： K_a 、 K_b 、 K_c 与 Q_7 之间均呈线性关系，如图11所示。

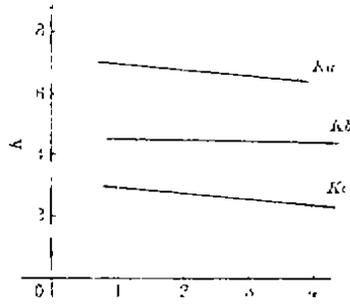


图9 Q_5 对 K 的影响

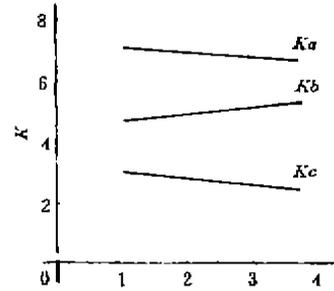


图10 Q_6 对 K 的影响

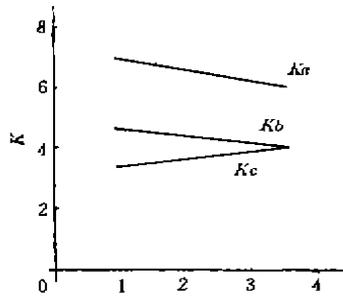


图11 Q_7 对 K 的关系

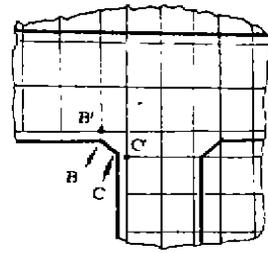


图12 位置误差

6 误差分析

由有限元分析试验所得的结果经回归分析后得出的直角式突变支座局部高峰应力点的应力集中系数 K_a, K_b, K_c 的计算式(6), (7), (8)所求出的 A, B, C 三点的应力集中系数与真实情况下的应力集中系数之间存在误差。这些误差的主要来源是：

6.1 有限元分析误差

由于平面四边形八节点等参元的应力值是单元内各高斯积分点的值，平面三角形单元的应力值是单元内各点的应力平均值，二者之间的差异是显见的。由于本文研究工作采用平面四边形八节点等参元，求解精度高，由分析方法所产生的误差已降至较低水平。直角式突变支座钢吊车梁是由翼缘、腹板、加劲肋、插入板和端封板共同构成的一个空间结构体系；本文分析将所有对称于腹板的各板件视为平面变厚度转化为变刚度问题处理，在理论上是可行的，但与实际情况并不相等，由此会带来一定误差；但由于实际上很难精确地求解诸如插入板与端封板连接焊缝处的应力分布特征，用上述方法计算出这些位置上的平均应力值，进而研究其平均应力集中系数是有实际意义的。

6.2 有限元分析点不重合所带来的位置误差

如图12所示，有限元分析得出的是 B' 点的应力值，而实际代表的是表层纤维 B 的应力值，严格地讲，用有限元分析得出的 B' 点应力值需外推至 B 点。本文研究工作认为， B' 点和 B 点是非常接近的，由这两点不重合所带来的误差是有限的。

6.3 回归分析误差

由表1所给出的试验条件与应力集中系数表，回归分析出应力集中系数的计算式(6)，

(7),(8)时,会带来一定误差,但这些误差因在回归方程中引入部份高次项而得到显著改善。

以上分析说明,由应力集中系数的回归计算式(6),(7),(8)三式所计算的 A, B, C 三点的应力集中系数 K_A, K_B 和 K_C 是能够反映这些点的应力集中程度的。

7 结束语

本文较为详细地分析了直角式突变支座钢吊车梁局部高峰应力部位 A, B, C 三点的应力集中系数的回归计算式的求解方法;讨论了构成直角式突变支座的几何参数变化对应力集中系数的影响;分析了由应力集中系数回归计算式所计算的应力集中系数的误差来源,以及这些误差的影响程度。

本文研究工作首次将均匀设计法引入多因素多水平的钢吊车梁直角式突变支座受力分析的试验方案设计,极大地减少了试件数量和试验工作量,取得显著效果。

(本文由李辉执笔)

参 考 文 献

- 1 姚玉茂. 钢吊车梁直角式突变支座板件尺寸优化. 重庆建筑工程学院硕士论文. 1993. 7
- 2 李辉. 用计算机模拟钢吊车梁疲劳试验研究. 重庆建筑工程学院硕士论文. 1993. 7
- 3 M. 阿弗里耳著. 非线性规划(下册). 上海科技出版社
- 4 方开泰. 均匀设计. 应用数学学报, 第3卷, 第4期

(编辑:徐维森)

RESEACHES OF STRESS CONCENTRATION PARAMETER ON THE STEEL CRANE BEAM WITH RIGHT ANGLE SUDDEN CHANGE HEIGHT NEAR SUPPORTS

Lu Tieying Li Hui

(Faculty of Civil Engineering)

ABSTRACT Using the method of homogenous testing design, this paper analyses a steel crane beam with right angle sudden change height near supports of different geometry parameters by the finite elements. The part of height stress point and the stress concentration parameter in the beam are found. After analysing more element nonlinear regression, the relationship between stress concentration parameter and geometry parameter is established. This paper also discusses both source of analysing result error and effect.

KEY WORDS stress concentration parameter, steel crane beam, right angle sudden change height near supports, geometry parameter, finite element