

文章编号:1673-2049(2007)02-0030-06

# KK型搭接方管节点极限承载力的 非线性有限元分析

武振宇, 丁玉坤

(哈尔滨工业大学 土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

**摘要:**采用有限元分析软件 ANSYS 对 KK 型搭接方管节点进行了弹塑性大挠度分析,研究了方管节点的极限承载力和塑性区扩展过程,揭示了节点的破坏机理和破坏模式,获得了节点的极限承载力和极限承载力随着节点几何参数的变化规律。2 种荷载工况下节点性能的对比分析结果表明,绝大多数节点的极限承载力和几何参数对节点极限承载力的影响规律基本相同。通过多元线性回归,得出了体现主要几何参数影响的节点极限承载力计算公式,将回归公式与有限元计算结果进行了对比分析,验证了公式具有较好的精度,可供工程设计参考应用。

**关键词:**搭接方管节点;KK 型节点;有限元分析;多元线性回归;极限承载力

**中图分类号:** TU392.3

**文献标志码:** A

## Nonlinear Finite Element Analysis of Ultimate Bearing Capacity of Partially Overlapped SHS KK-joints

WU Zhen-yu, DING Yu-kun

(School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, Heilongjiang, China)

**Abstract:** Static behavior of partially overlapped square hollow section (SHS) KK-joints was studied by finite element analysis software ANSYS involved in large deflection elastic-plastic range. The ultimate bearing capacity and the plasticity area spread process of the overlapped KK-joints under loading were investigated and the joint failure mechanisms and failure modes were revealed. The ultimate bearing capacity of the KK-joints and its variation regularity with geometric parameters were obtained. Two loading conditions were taken into account in analysis which revealed that ultimate bearing capacity of joints and the effect of main geometric parameters on joints' static behavior were almost same to most joints. The results show that the strength equation of partially overlapped SHS KK-joints covering the effect of main geometric parameters is developed through the multiple linear regression analysis based on the results of finite element analysis. The equation is founded to provide strength predictions to a very high degree of accuracy by comparing with the results of finite element analysis. It can be used in structural design as a reference.

**Key words:** overlapped SHS joint; KK-joint; finite element analysis; multiple linear regression; ultimate bearing capacity

收稿日期:2007-04-19

基金项目:国家自然科学基金项目(50578055)

作者简介:武振宇(1968-),男,黑龙江海林人,教授,博士生导师,工学博士,博士后,E-mail:wuzhenyu@hit.edu.cn。

## 0 引言

随着空间桁架在建筑结构中的广泛应用,空间 K 型节点(KK 型节点)已成为常用的节点形式之一。KK 型节点可分为间隙节点与搭接节点 2 种形式。与间隙节点相比搭接节点具有较高的静力强度与疲劳强度。在实际工程中,当一点交汇多根杆件或者虽然杆件数量较少但要求较高节点强度时,采用搭接节点将不失为一种行之有效的措施。近年来,各国逐渐开始对空间节点进行研究<sup>[1]</sup>,但相关的研究主要针对圆管间隙节点<sup>[2]</sup>和方管间隙节点<sup>[3-4]</sup>,而关于 KK 型搭接方管节点的研究还很少,这在一定程度上限制了对这种高效节点形式的应用。笔者通过非线性有限元分析,得出了此类节点的极限承载力和失效模式,揭示了特定几何参数下节点强度的变化规律;通过多元回归分析,得到了 KK 型搭接方管节点的强度公式。

## 1 节点计算模型及参数

### 1.1 有限元模型

对 KK 型方管节点进行分析计算时,选取何种计算模型将直接影响到计算结果。经有限元计算并参考相关的文献<sup>[5-7]</sup>,取图 1 所示的计算简图对节点静力性能进行研究。取支杆长度为 6 倍的支杆截面宽度,取弦杆长度为 9 倍的弦杆截面宽度。图 2 为 KK 型节点的有限元分析模型,所用单元为 Shell43。支杆约束、加载端部与弦杆约束端部均采用较厚的刚性端板。

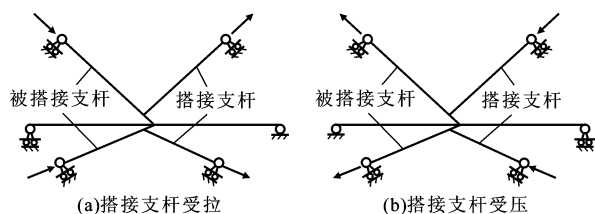


图 1 KK 型节点加载及约束条件

Fig. 1 Loading and Constrains Conditions of KK-joints

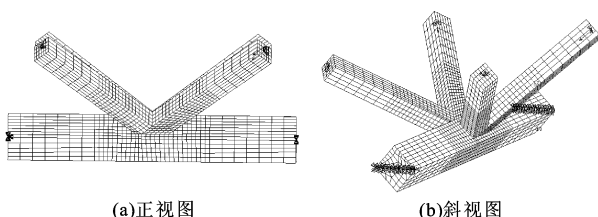


图 2 KK 型节点的有限元分析模型

Fig. 2 Finite Element Analysis Model of KK-joints

### 1.2 主要几何参数

KK 型搭接节点的几何构形如图 3 所示。影响 KK 型搭接节点静力性能的主要几何参数为:支弦杆壁厚之比  $\tau_i, \tau_i = t_i/t_0, i=1,2$ ; 搭接率  $O_v, O_v = (q/p) \times 100\%$ ; 支杆与弦杆的宽度比  $\beta_i$ ; 支杆与弦杆间夹角  $\theta_i, i=1,2$ ; 弦杆宽厚比  $\gamma, \gamma = b_0/t_0$ ; 腹杆平面间夹角  $\varphi$ 。在保持以上参数不变的情况下,通过变化弦杆截面宽度对节点性能的影响进行了研究。

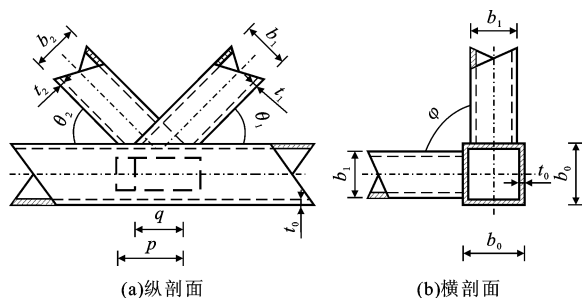


图 3 KK 型节点试件参数

Fig. 3 Parameters of KK-joint Specimen

## 2 典型节点分析

表 1 为节点主要几何参数对节点极限承载力的影响,其中失效模式 CB 为弦杆壁面局部进入塑性而弯曲, BMF 为受压支杆沿自身中部弯曲的破坏, CLB 为弦杆壁面的局部屈曲, BLB 为受压支杆局部屈曲。选取表 1 中节点 16 与节点 33,对这 2 个节点的静力性能进行了详细分析。图 4(a)为节点 16 达到极限承载力时节点的变形及应力分布。从图 4(a)可以看出,节点 16 受力后支杆与弦杆交汇处的应力集中比较明显,随着外力的不断增大(大约为节点极限承载力  $P_{u, kk}$  的 40%),在拉压支杆根部和拉压支杆腹板搭接处出现了屈服,弦杆壁面尚未进入屈服状态。当外力达到约节点极限承载力的 80% 时,在靠近拉压杆搭接处的压杆根部翼缘已有相当部分进入塑性,而拉压支杆根部翼缘中部依然处于弹性阶段,整个节点中各杆件壁面尚未目测到大的变形。当外力达到极值时,受压支杆翼缘在靠近拉压支杆搭接处出现了明显的局部凹曲变形,此时塑性区已占据了杆件交汇区域的大部分弦杆壁面。拉压支杆搭接部位的塑性区进一步扩展,进而产生节点失效。

图 4(b)为节点 33 达到极限承载力时节点的变形及应力分布。从图 4(b)可以看出,当节点处于弹性阶段时,拉压支杆根部转角部位出现了明显的应力集中。当节点受力达到约节点极限承载力的

表 1 主要参数对 KK 型节点极限承载力的影响

Tab. 1 Effect of Main Parameters on Ultimate Bearing Capacity of KK-joints

节点 编号	$O_v/\%$	$\beta_i$	$t_0/\text{mm}$	$\tau_i$	$\theta_i/(^{\circ})$	$P_{u, \text{kk}}/\text{kN}$	失效模式	节点 编号	$O_v/\%$	$\beta_i$	$t_0/\text{mm}$	$\tau_i$	$\theta_i/(^{\circ})$	$P_{u, \text{kk}}/\text{kN}$	失效模式
1	25	0.4	4.0	0.500	45	94.66	CB,BMF	48	50	0.6	6.0	0.500	45	245.79	BLB,CB
2	25	0.4	4.0	0.750	45	128.36	CB,BMF	49	50	0.6	10.0	0.500	45	413.29	CB,BMF
3	25	0.4	4.0	1.000	45	149.80	CLB	50	40	0.6	4.0	0.750	45	157.13	CLB
4	50	0.4	4.0	0.500	45	98.26	CB,BMF	51	65	0.6	4.0	0.750	45	163.55	CLB
5	50	0.4	4.0	0.750	45	134.44	CB,BMF	52	90	0.6	4.0	0.750	45	170.93	CLB
6	50	0.4	4.0	1.000	45	153.62	CLB	53	50	0.6	4.0	0.750	30	146.27	CLB
7	80	0.4	4.0	0.500	45	109.84	BLB	54	50	0.6	4.0	0.750	60	189.79	BLB,CB
8	80	0.4	4.0	0.750	45	147.65	CB,BMF	55	50	0.6	4.0	0.750	75	201.94	BLB,CB
9	80	0.4	4.0	1.000	45	164.36	CLB	56	50	0.6	4.0	0.500	30	134.92	CLB
10	25	0.6	4.0	0.500	45	130.76	BLB,CB	57	50	0.6	4.0	0.500	60	124.56	BLB
11	25	0.6	4.0	0.750	45	156.46	CLB	58	50	0.8	4.0	0.750	30	162.93	CLB
12	25	0.6	4.0	1.000	45	167.72	CLB	59	50	0.8	4.0	0.750	60	226.46	CLB
13	50	0.6	4.0	0.500	45	136.12	BLB,CB	60	50	0.4	4.0	0.500	30	104.01	CB,BMF
14	50	0.6	4.0	0.750	45	161.37	CLB	61	50	0.4	4.0	0.500	60	96.16	BLB
15	50	0.6	4.0	1.000	45	172.12	CLB	62	50	0.6	3.0	0.750	45	94.25	CLB
16	80	0.6	4.0	0.500	45	146.44	BLB,CB	63	50	0.6	6.0	0.750	45	363.40	CLB
17	80	0.6	4.0	0.750	45	168.18	CLB	64	50	0.6	8.0	0.750	45	632.40	CLB
18	80	0.6	4.0	1.000	45	178.43	CLB	65	50	0.6	12.0	0.750	45	1 458.00	CLB
19	25	0.8	4.0	0.500	45	168.23	CLB	66	25	0.4	4.0	0.500	45	95.80	CB,BMF
20	25	0.8	8.0	0.500	45	421.74	CLB	67	25	0.4	4.0	0.750	45	129.29	CB,BMF
21	25	0.8	2.5	0.750	45	101.51	CLB	68	25	0.4	4.0	1.000	45	143.45	CLB
22	25	0.8	4.0	0.750	45	187.77	CLB	69	50	0.4	4.0	0.500	45	104.19	CB,BMF
23	25	0.8	8.0	0.750	45	478.05	CLB	70	50	0.4	4.0	0.750	45	137.97	CB,CLB
24	25	0.8	2.5	1.000	45	105.47	CLB	71	50	0.4	4.0	1.000	45	151.01	CB,CLB
25	25	0.8	4.0	1.000	45	199.33	CLB	72	80	0.4	4.0	0.500	45	102.76	CB,BMF
26	25	0.8	8.0	1.000	45	539.34	CLB	73	80	0.4	4.0	0.750	45	144.78	CLB
27	50	0.8	4.0	0.500	45	169.27	CLB	74	80	0.4	4.0	1.000	45	156.41	CLB
28	50	0.8	8.0	0.500	45	412.46	CLB	75	25	0.6	4.0	0.500	45	137.65	BLB,CB
29	50	0.8	2.5	0.750	45	103.77	CLB	76	25	0.6	4.0	0.750	45	155.33	CLB
30	50	0.8	4.0	0.750	45	184.07	CLB	77	25	0.6	4.0	1.000	45	164.54	CLB
31	50	0.8	8.0	0.750	45	457.14	CLB	78	50	0.6	4.0	0.500	45	140.73	CB,CLB
32	50	0.8	2.5	1.000	45	108.75	CLB	79	50	0.6	4.0	0.750	45	158.65	CLB
33	50	0.8	4.0	1.000	45	198.00	CLB	80	50	0.6	4.0	1.000	45	168.86	CB,CLB
34	50	0.8	8.0	1.000	45	502.65	CLB	81	80	0.6	4.0	0.500	45	138.95	BLB,CB
35	80	0.8	4.0	0.500	45	164.78	CLB	82	80	0.6	4.0	0.750	45	161.62	CLB
36	80	0.8	8.0	0.500	45	412.69	CLB	83	80	0.6	4.0	1.000	45	169.34	CLB
37	80	0.8	2.5	0.750	45	103.54	CLB	84	50	0.8	4.0	0.500	45	164.61	CLB
38	80	0.8	4.0	0.750	45	187.15	CLB	85	50	0.8	2.5	0.750	45	98.44	CLB
39	80	0.8	8.0	0.750	45	456.13	CLB	86	50	0.8	4.0	0.750	45	180.71	CLB
40	80	0.8	2.5	1.000	45	107.81	CLB	87	50	0.8	8.0	0.750	45	439.53	CLB
41	80	0.8	4.0	1.000	45	200.28	CLB	88	50	0.8	4.0	1.000	45	190.69	CLB
42	80	0.8	8.0	1.000	45	501.53	CLB	89	50	0.6	6.0	0.500	45	242.19	CLB
43	50	0.6	4.0	0.625	45	152.18	CLB	90	50	0.6	10.0	0.500	45	404.85	CB,BMF
44	50	0.6	4.0	0.875	45	167.60	CLB	91	50	0.9	4.0	0.750	45	198.33	CLB
45	50	0.5	4.0	0.750	45	149.98	CLB	92	50	0.6	4.0	0.750	30	142.76	CLB
46	50	0.7	4.0	0.750	45	173.00	CLB	93	50	0.6	4.0	0.750	60	195.79	CLB
47	50	0.9	4.0	0.750	45	199.96	CLB								

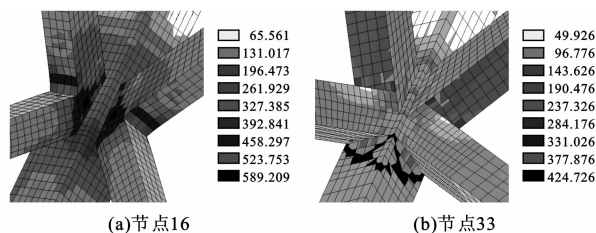


图 4 节点应力分布及变形(单位:MPa)  
Fig. 4 Stress Distribution and Deformation  
of Joints(Unit:MPa)

40%时,拉压支杆根部转角部位最早进入屈服状态,此时最大应力位于拉压支杆根部转角部位。节点进入塑性后,塑性区由支杆转角部位向弦杆壁面扩展;当节点受力达到节点极限承载力的70%时,2个受拉支杆根部之间及受拉支杆根部以外的弦杆壁面进入塑性,此时最大应力位于受压支杆根部转角处的弦杆壁面上。当节点达到极限承载力时,受拉支杆根部以外的弦杆壁面出现了局部的凹曲变形,在每个腹杆平面内,塑性区由弦杆翼缘向腹板发展,此时最大应力位于拉杆根部转角处。图5为节点16、节点33的荷载-位移曲线,其中位移为受压支杆根部翼缘中点沿弦杆壁面初始法线方向相对于弦杆壁面的位移,荷载为压杆所受的轴力。就失效模式来讲,节点16主要为受压支杆局部屈曲(BLB),节点33为弦杆壁面的局部屈曲(CLB)。

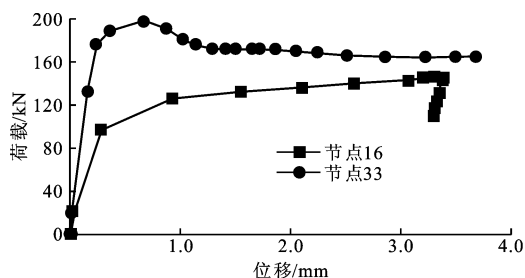


图 5 节点荷载-位移关系

Fig. 5 Relation of Load and Displacement of Joints

### 3 主要参数分析

表1中所有的KK型节点腹杆平面之间的夹角均为 $\varphi=90^\circ$ ,对表1中节点1~65进行计算时采用图1(a)所示的计算简图,其余28个节点66~93采用图1(b)所示的计算简图。由表1可知,对于同一个节点,2种计算简图下的计算结果相差较小(除个别节点)。

由以上2种计算简图计算所得各主要参数对节点静力性能的影响规律基本一致。各节点主要参数对节点静力性能的影响表现为以下6个方面。

(1)搭接率 $O_v$ 。当 $\tau_i=0.5$ 且 $\beta_i=0.4$ 或 $\beta_i=0.6$ 时,节点的强度随搭接率的增加而提高,节点以支杆失效为主。当 $\beta_i=0.8$ 时,节点的强度并没有随着搭接率的增加而提高(图6),由表1中可知此时节点以弦杆表面局部屈曲失效为主。这就使2支杆相搭接部分的多少对节点承载性能的影响非常小。

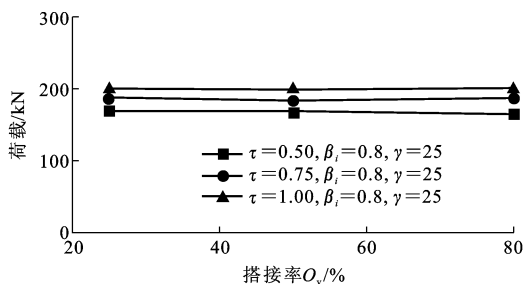


图 6  $O_v$  对 KK 型节点强度的影响

Fig. 6 Effect of  $O_v$  on KK-joints Strength

(2)弦杆宽厚比 $\gamma$ 。图7为节点强度随 $\gamma$ 的变化规律。随着 $\gamma$ 增加,节点的强度和刚度都有所降低,这是因为 $\gamma$ 较大的节点,弦杆壁面刚度较弱且壁面单位宽度的塑性抵抗矩降低,使弦杆壁面变形增大,同时弦杆壁面先行进入塑性的可能性增大。

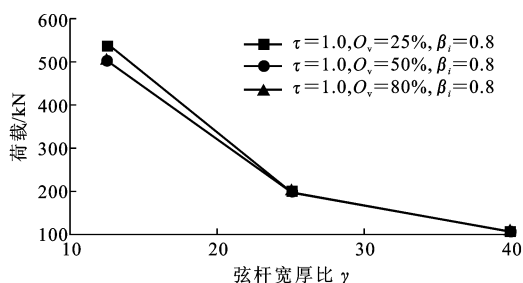


图 7  $\gamma$  对 KK 型节点强度的影响

Fig. 7 Effect of  $\gamma$  on KK-joints Strength

(3)支杆与弦杆的宽度比 $\beta_i$ 。由图8可以看出,随着 $\beta_i$ 的增加,节点的强度均有所提高。这是因为在其他参数保持不变时, $\beta_i$ 的增加使支杆连接在弦杆壁面上的有效受力面积增加,在相同的应力水平下,节点强度得以提高。节点强度随 $\beta_i$ 的增加而提高的幅度随着支杆与弦杆厚度比 $\tau_i$ 的增加而减缓。从表1可知,随着 $\beta_i$ 的增加(尤其是 $\tau_i$ 较大时),节点主要发生弦杆局部屈曲的失效,支杆的强度得不到充分发挥,但随着 $\beta_i$ 的增加,节点强度也有所提高,这是因为 $\beta_i$ 的增加而导致弦杆腹板更多地参与受力,即 $\beta_i$ 较大时弦杆的强度能够更大限度地得以发挥,故而节点强度还能有所提高。

(4)支杆与弦杆壁厚比 $\tau_i$ 。当 $\beta_i=0.4$ 时,随着 $\tau_i$ 的增加,节点强度增幅有所减缓,失效模式从支杆

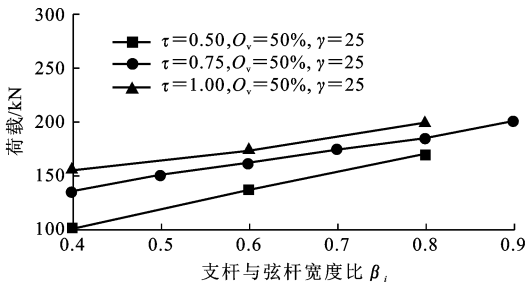


图 8  $\beta_i$  对 KK 型节点强度的影响

Fig. 8 Effect of  $\beta_i$  on KK-joints Strength

破坏(节点 7、8)转变为弦杆壁面局部屈曲(节点 9),如图 9 所示。当  $\beta_i=0.6$  时,随着  $\tau_i$  的增加,节点的强度随着  $\tau_i$  的增加而有所减缓;当  $\tau_i$  由 0.5 增至 0.75 时,失效模式由受压支杆局部屈曲转变为弦杆局部屈曲;当  $\beta_i=0.8$  时,节点的失效模式几乎均为弦杆局部屈曲。

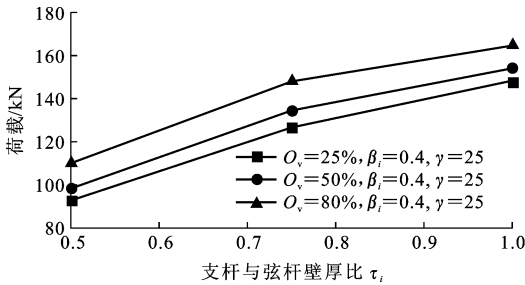


图 9  $\tau_i$  对 KK 型节点强度的影响

Fig. 9 Effect of  $\tau_i$  on KK-joints Strength

(5) 支杆与弦杆之间的夹角  $\theta_i$ 。图 10 为节点强度随参数  $\theta_i$  的变化规律。对于空间节点,当  $\tau_i$  较大时, $\theta_i$  的影响则较为显著,即随着  $\theta_i$  的增加,空间节点的强度得到提高。原因是当  $\theta_i$  较小时( $\theta_i=30^\circ$  与  $\theta_i=45^\circ$ ),2 支杆的竖向分力在搭接范围内抵消的能力较小,而 2 支杆的水平分力对弦杆壁面的作用则大为增强,对应的节点多数发生弦杆局部屈曲失效;而当  $\theta_i$  较大时( $\theta_i=60^\circ$  与  $\theta_i=75^\circ$ ),2 支杆的竖向分力在搭接范围内大部分得以抵消,同时 2 支杆的水平分力对弦杆壁面的作用大为减少,对应的节点多数发生受压支杆局部屈曲失效。就这 2 种失效模式而言,后者节点中的支杆效率较前者高,故节点强度得以提高。

(6) 尺寸效应。为了便于参数分析研究,除节点 65~65 外,节点的弦杆宽度均取 100 mm。为了了解节点的尺寸效应,保持其他参数不变而仅改变弦杆的宽度,节点 62~65 的弦杆宽度分别为 75、150、200、300 mm,结合节点 14,节点强度随弦杆宽度变化呈幂函数的形式。采用 100 mm 的弦杆宽度为基

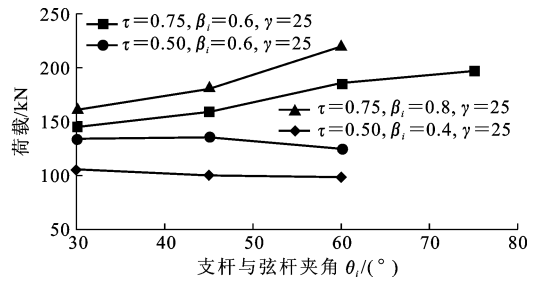


图 10  $\theta_i$  对 KK 型节点强度的影响

Fig. 10 Effect of  $\theta_i$  on KK-joints Strength

准,以  $b_0/100$  为横坐标,节点强度为纵坐标,经 Excel 进行置信度 95% 的多元线性回归分析后得出:节点强度近似为弦杆宽度  $b_0$  的二次函数。如果定义节点强度与节点弦杆宽度平方之比为  $P_{u,kk}/b_0^2$ ,则弦杆宽度对  $P_{u,kk}/b_0^2$  几乎无影响,如图 11 所示。

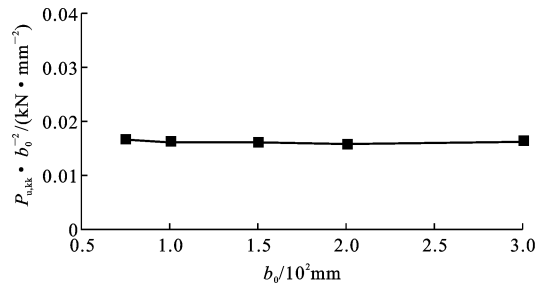


图 11  $b_0$  对  $P_{u,kk} \cdot b_0^{-2}$  的影响

Fig. 11 Effect of  $b_0$  on  $P_{u,kk} \cdot b_0^{-2}$

## 4 参数回归

由有限元计算分析发现:对于参数  $O_v$ ,其对节点强度的影响呈指数函数的形式;参数  $\beta_i$ 、 $\gamma$ 、 $\tau_i$  对节点强度的影响均呈幂函数的形式;对于参数  $\theta_i$  ( $\theta_1 = \theta_2$ ),其对空间节点的影响呈指数函数的形式;尺寸效应对  $P_{u,kk}$  的影响也呈幂函数的形式,但对  $P_{u,kk}/b_0^2$  几乎无影响。如果定义  $f = P_{u,kk}/(f_y b_0^2)$ ,则各参数对  $f$  的影响可以表示为

$$f = a \beta_i^c \gamma^d \tau_i^g e^{b O_v + h \theta_i} \quad (1)$$

式中: $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $g$ 、 $h$  为待定常数,考虑节点 1~93,通过 Excel 进行置信度为 95% 的多元线性回归,得到

$$\frac{P_{u,kk}}{f_y b_0^2} = 2.954 \beta_i^{0.527} \gamma^{-1.274} \tau_i^{0.406} e^{0.084 O_v + 0.005 8 \theta_i} \quad (2)$$

式(2)通过各项检验,其适用范围同样为支弦杆均为方钢管的 KK 型搭接节点,且参数的适用范围为: $0.9 \geq \beta_i \geq 0.4$ ;  $1.0 \geq \tau_1 = \tau_2 \geq 0.5$ ;  $30^\circ \leq \theta_1 = \theta_2 \leq 75^\circ$ ;  $10 \leq \gamma \leq 40$ ;  $25\% \leq O_v \leq 90\%$ ;  $75 \text{ mm} \leq b_0 \leq 300 \text{ mm}$ ;  $\varphi = 90^\circ$ 。

选取 4 个节点(不包含在表 1 中)的有限元分析

结果与式(2)计算结果进行了比较,见表 2。

多元线性回归式(2)中的计算结果与表 1 中的有限元计算结果的比较见图 12。由图 12 可以看出,多元线性回归式(2)能够较好地体现本文中有限元的计算结果。

表 2 有限元分析结果与式(2)计算结果比较

Tab.2 Comparison Between Results of Finite Element Analysis and Formula Two

节点 编号	$O_v/\%$	$\beta_i$	$t_0/\text{mm}$	$\tau_i$	$\theta_i/(\text{^\circ})$	失效 模式	$\varphi/(\text{^\circ})$	$P_{u, \text{kk}}/\text{kN}$	
								有限元	式(2)
KK1	50	0.5	4.0	1.000	45	CLB	90	162.2	158.6
KK2	50	0.5	4.0	0.500	45	BLB	90	119.9	119.7
KK3	50	0.8	4.0	0.625	45	CLB	90	173.5	167.8
KK4	50	0.4	4.0	0.625	45	CB, BMF	90	116.9	116.5

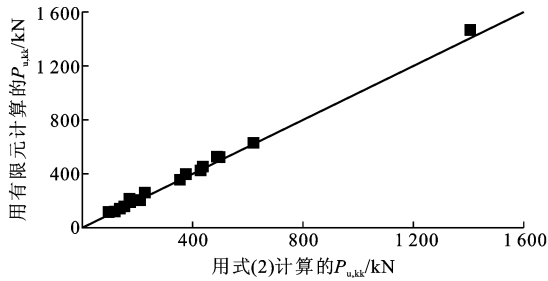


图 12 计算结果比较

Fig. 12 Comparison of Calculation Results

考虑到实际应用,对于 KK 型节点强度,建议  $P_{u, \text{kk}}$  取式(2)计算结果与空间 KK 型节点支杆的屈服荷载中的较小值。

5 结 语

(1)搭接 KK 型节点的主要失效模式包括受压支杆的局部屈曲,弦杆连接壁面于拉杆根部以外的局部屈曲,弦杆壁面因局部进入塑性区而弯曲,以及伴随着受压支杆整体沿杆件自身中部弯曲破坏与以上几种失效模式并行发生的情况,且节点发生何种失效模式与几何参数的取值直接相关。

(2)几何参数  $O_v$ 、 $\gamma$ 、 $\beta_i$ 、 $\tau_i$  对 KK 型节点的强度有显著的影响,而对于支杆与弦杆夹角  $\theta_i$  ( $\theta_1 = \theta_2$ ),当  $\tau_i$  较小时对节点强度影响较小,当  $\tau_i$  较大时对节点强度影响较大。

(3)对绝大多数节点,被搭接支杆受压与搭接支杆受压 2 种荷载工况下 KK 型方管节点的静力性能差别较小,且主要参数对 2 种荷载工况下节点性能的影响规律基本一致。经多元回归分析得出了各主要参数影响的 KK 型节点强度公式,结合有限元计算结果对回归公式进行了验证,结果表明,该公式具

有较好的精度,可以很好地预估 KK 型搭接方管节点的极限承载力,并可供工程设计参考应用。

(4)随着腹杆平面间夹角  $\varphi$  的减小, KK 型节点的强度得到提高;当腹杆平面由较小的正偏移转向负偏移时,节点强度得到提高。当夹角  $\varphi$  较小且腹杆平面发生较大的正偏移时,节点的强度较腹杆平面无偏移的节点强度高。

参考文献:

References:

[1] DOMINIQUE B, RICHARD G R. Triangular Truss Joints Using Rectangular Tubes[J]. J Struct Engrg., 1988, 114(2): 408-424.

[2] LEE M M K, WILMSHURST S R. Numerical Modeling of CHS Joints with Multiplanar Double-K Configuration[J]. Journal of Constructional Steel Research, 1995, 32(1): 281-301.

[3] 武振宇,张壮南,丁玉坤,等. K 型、KK 型间隙方钢管节点静力工作性能的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(2): 32-38.

WU Zhen-yu, ZHANG Zhuang-nan, DING Yu-kun, et al. Experimental Research on the Static Behavior of Square Hollow Section Gapped K- and KK-joints[J]. Journal of Building Structures, 2004, 25(2): 32-38.

[4] 张壮南,武振宇,丁玉坤,等. 弦杆轴力作用下 K 型、KK 型间隙方钢管节点静力工作性能的试验研究[J]. 土木工程学报, 2005, 25(2): 32-38.

ZHANG Zhuang-nan, WU Zhen-yu, DING Yu-kun, et al. An Experimental Research on the Static Behavior of Gapped SHS K- and KK-joints Under Axial Load[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 25(2): 32-38.

[5] DAVIES G, KELLY R, CROCKETT P. Effect of Angle on the Strength of Overlapped RHS K- and X-joints[C]//FARKAS J, JARMAI K. Tubular Structures VII. Rotterdam: Balkema, 1996: 78-84.

[6] 丁玉坤,武振宇,张华山,等. K 型、KK 型搭接方管节点的试验研究[J]. 土木工程学报, 2005, 25(2): 25-31.

DING Yu-kun, WU Zhen-yu, ZHANG Hua-shan, et al. An Experimental Study on Partially Overlapped SHS K- and KK-joints[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 25(2): 25-31.

[7] 丁玉坤. 直接焊接 K 型、KK 型搭接方管节点的静力性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2004.

DING Yu-kun. Research on the Static Behavior of Directly Welded Overlapped SHS K- and KK-joints[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2004.