

# 中文摘要

在设计阶段, 管节点最大应力通常通过 S-N 方法来评估海洋平台焊接管节点疲劳寿命。所以应力集中系数的正确确定对平台结构的安全性至关重要。现有经验公式如 Kuang 公式、NORSOK 公式仅适用于简单管节点如 K、X、Y、TX 等形式, 对空间的复杂管节点的应力集中系数的计算未涉及。通常把复杂的管节点的应力集中系数看成是简单管节点应力集中系数的叠加。对本文研究的 KK 型管节点来说, 与相同尺寸的 K 型管节点, 应力集中系数通常要大出许多, 所以传统的计算简单管节点应力集中系数的经验公式并不适合计算复杂管节点应力集中系数, 因此建立复杂管节点应力集中系数参数方程是非常有必要的。

本文在以前对简单管节点研究基础上, 运用软件 ANSYS, 用薄壁壳单元分析建立上千个用在平台结构中的承受轴向力、平面内弯矩和平面外弯矩三种荷载作用的 KK 型节点, 得出的结果数据, 通过不定尺寸的节点几何比例  $\alpha$ 、 $\gamma$ 、 $\xi$ 、 $\beta$ 、 $\tau$  和  $\theta$  建立函数通过回归分析得出一系列新的参数方程。这些参数方程可以用来计算得出 KK 型复杂管节点撑杆和弦杆处围绕交界处的最大应力。

本文并进一步, 通过图、表形式分别分析  $\alpha$ 、 $\gamma$ 、 $\xi$ 、 $\beta$ 、 $\tau$  和  $\theta$  各个参数对 KK 型节点在三种荷载作用下撑杆和弦杆 SCF 的影响, 各个参数对对有限元计算的 KK 型节点与对相同尺寸的 K 型节点经验公式所得撑、弦杆的 SCF 差距的影响。

本文对复杂 KK 型管节点应力集中系数参数方程的研究对以后研究其它复杂节点 SCF 和管节点设计有一定参考价值。

**关键词:** 管节点, 应力集中系数, 有限元, 参数方程

# ABSTRACT

The maximum stress is very important in estimating the fatigue life of offshore T-joints by an S-N approach. Therefore, stress concentration factor (SCF) is crucial for the safety of offshore platforms. The existing empirical formulas such as Kuang formula and NORSOK formula are suitable only to simple tubular joints including K, X, Y and TX etc joints. SCF for complex spatial tubular joints has not been referred in the existing empirical formulas. Instead, SCF for complex tubular joints is usually considered by the method for simple tubular joints. Comparing to the results for simple K joint with the same dimensions, it's shown in this paper that SCF for KK tubular joints is frequently higher, The existing empirical SCF formulas for simple tubular joints are not suitable for complex tubular joints, therefore, it is essential to establish SCF parametric equations for complex KK-joints.

Based on former research on simple tubular joints, thin-shell element analyses have been conducted for thousands of KK joint frequently used in offshore structures. These KK joints are subjected to three kinds of loadings, including axial load, in-plane moment and out-plane moment. By use of regression analysis, the above results are then used to derive a new set of parametric equations, in terms of several non-dimensional geometric ratios  $\alpha$ ,  $\gamma$ ,  $\xi$ ,  $\beta$ ,  $\tau$  and  $\theta$ . These parametric equations could be used directly to calculate the maximum stress around the interface between brace and chord of KK tubular joints.

Further in these paper, separate analyses has been conducted for the influence of  $\alpha$ ,  $\gamma$ ,  $\xi$ ,  $\beta$ ,  $\tau$  and  $\theta$  on brace and chord SCFs in KK joint subjecting to the three kinds of loading and on the difference of SCFs in KK joint and SCFs for K joint from empirical formulas. The results are given through both tables and figures.

The SCF results for KK joint given in this paper could act as a good reference for both further academic studies on SCF of other complex joints and engineering designing works.

**KEY WORDS:** tubular joints, stress concentration factor, finite element method, parametric equation

## 独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果，除了文中特别加以标注和致谢之处外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得天津大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名：付艳霞 签字日期：2007年1月18日

## 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解天津大学有关保留、使用学位论文的规定。特授权天津大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，并采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编以供查阅和借阅。同意学校向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘。

（保密的学位论文在解密后适用本授权说明）

学位论文作者签名：付艳霞

导师签名：于国友

签字日期：2007年1月18日

签字日期：2007年1月18日

## 第一章 绪论

### 1.1 课题背景

许多形式的海洋平台是由焊接在一起的圆管构件组成的各种形式节点(如 K、X、Y、TX 等形式)。圆管结构构件具有高的强重比,在抗拉、抗压、抗弯、抗扭方面,具有卓越的性能。海洋平台的寿命依赖于管节点的结构整体性。

管节点的疲劳破坏主要是由于外界载荷周期性重复作用的结果。例如桩基平台在波浪载荷作用下,尽管在进行整体结构分析时,所求的应力远远低于材料的屈服强度,但在管节点处存在应力集中现象,局部高应力的存在,就有可能在波浪反复作用下,管节点形成微小的疲劳开裂,最后导致节点破坏。

疲劳破坏被认为是影响节点强度降低的最重要的因素之一,由于波浪载荷引起的高水平的循环疲劳破坏,而节点交界焊缝处由于应力集中造成有很低的抗疲劳强度。因此,在海洋平台的使用其间,为保证其结构的整体性,周期性的检测是需要的。

为便于监测、检修、保证平台节点强度,提供准确的断裂力学模型来预知焊接管节点疲劳裂缝产生、增长行为是有必要的。疲劳强度是由局部高应力控制的,因此很好的知道节点应力分布情况,尤其是裂缝产生发展的区域,对发展断裂力学以便预知疲劳寿命是需要的。节点的应力信息如应力集中系数 SCF,应力沿管厚分布(表明弯曲的程度)和应力在相交区域分布是断裂力学方法分析的重要元素。管节点在各杆相交区域应力分布是不均匀的,在一些点出现很高的应力分布,有些比名义应力高出 20 倍,因此这些交界处的高应力对节点的疲劳寿命有很大的影响。

在海洋焊接管节点中,疲劳特性对初始设计也有重要影响,疲劳特性一般通过根据疲劳寿命方法确定的 S-N 曲线来描述,它表示在给定的实际应力循环幅值下,导致破坏所需的循环次数。而应力集中系数决定了实际应力循环幅值。对焊接管节点,应力集中系数和名义应力来计算局部应力的幅值,这就是热点应力幅值(HSS)。HSS 是焊接管节点用 S-N 方法估计疲劳强度的代表应力幅值。在寿命期内,对水下构件的检查因为成本很高,不能检查所有水下构件。所以,检查只有在选择的关键点进行。节点对疲劳破坏的承受能力取决于热点应力幅值,所以正确预测热点应力幅值是很重要的,因此有许多研究是针对着管节点的 SCF

的确定进行的。

还有研究是针对简单节点沿厚度方向和交界处的应力分布展开研究的,为预知焊接管节点疲劳寿命进行断裂力学计算,研究在预期断裂路径上应力的幅值和分布,而不单单针对一个位置的最高应力。

前人的研究都是针对简单的管节点展开研究的,如 K、X、T、Y、TX、TK 等平面简单形式,而实际的平台管节点都是几个简单管节点组成的复杂的空结点形式,传统的如管节点的强度、校核分析是将复杂节点根据受力大小决定由一系列简单管节点所占比例大小不同的一系列简单节点的组合,而应力集中系数值是简单管节点进行强度分析、校核公式的一个重要因素。在形式上由简单节点组合的复杂管节点,由于要比组成它的单个简单管节点复杂的多,应力系数也会高出简单管节点许多,复杂节点 SCF 按简单管节点 SCF 一定比例叠加形式计算得出结果在某种形式上会小多。这对管节点的设计、强度校核是不安全的。所以有必要对复杂的管节点的应力集中系数进行分析,本文正是针对复杂的空间 KK 节点的应力集中系数进行研究的,针对海洋结构中常用的管节点形式,按照参数变化和几何尺寸变化建立上千个节点进行应力集中系数的参数分析。

## 1.2 管节点产生应力集中现象的原因

管节点的分类:部分搭接管节点、完全搭接管节点、间隙管节点。

在这儿有必要再简单介绍一下应力集中现象产生的原因。管节点所以产生应力集中现象,是由几下原因<sup>[1]</sup>:

(1) 从荷载传递情况分析 当撑杆承受轴向拉力时,由于它的轴向刚度较大,而弦杆管壁是柔性的,所以可近似地认为沿撑杆与弦杆交接线上弦杆的位移相等。由于弦杆顶部垂直方向的刚度,所以在冠点处(撑杆与弦杆交接线上相对撑杆末端最近的点)弦杆对撑杆的反作用也小;交接线越向下,弦杆的垂直方向刚度越大,在最深的鞍点处刚度最大,所以在鞍点弦杆对撑杆的反作用力也最大。因此,撑杆加给弦杆的垂直载荷沿交接线的分布是不均匀的。顶部冠点处最小,鞍点处最大。

(2) 从弦杆的横断面的变形分析 当撑杆承受轴向拉力时,弦杆受向上的作用力而变形,由于撑弦杆之间的约束作用,会沿交接线处产生附加应力,对弦杆,鞍点处产生正的附加应力,而冠点处产生负的附加应力,这将使鞍点所受的拉应力加大,而冠点的拉应力减小,甚至由原来的拉应力变为压应力。

(3) 从撑杆的横断面的变形分析 当撑杆承受轴向拉力时,撑杆直径将有缩小的趋势,但受到弦杆的约束,因而撑杆将产生弯曲应力,使撑杆管壁外表面

拉应力加大，撑杆这一局部弯曲作用当然也要影响到弦杆。

(4) 从弦杆管壁变形分析 由于弦杆管壁具有柔性，在撑杆作用下，弦杆管壁沿交接线将有局部弯曲的趋势，所产生的弯曲应力也是很大的。

### 1.3 管节点方面的研究现状

#### 1.3.1 国内对管节点方面的研究现状

国内对管节点的研究一般偏向研究简单管节点的承载力的影响因素和简单管节点的加强。如文献<sup>[2]</sup>研究TX和TT型圆管节点轴向承载力的因素分析，采用有限元软件ANSYS，选用壳单元建模计算，并考虑焊缝的影响，分析了荷载路径、弦管轴向应力对TX型圆管节点轴向承载力的影响，以及弦管长度和边界条件对TT型圆管节点轴向承载力的影响。指出对撑杆同时加载和顺序加载两种荷载路径下TX节点承载力非常接近。弦杆应力对TX节点轴向承载力的影响，当拉应力较小时，对承载力影响很小，当拉应力较高时，承载力降低；弦杆压应力总是降低承载力。文献<sup>[3]</sup>研究加强T型管节点，主要分析指出管节点适合在撑弦管交界处用套管加强，同时评估了套管与管节点的对极限强度的影响。国内对管节点的研究偏向简单管节点，对空间的复杂管节点的研究很少。

#### 1.3.2 国外对管节点方面的研究现状

国外对管节点的研究很多，大多也是围绕简单未加强节点、加强节点的应力集中系数展开的。Kuang<sup>[4]</sup>(1975)公式是基于有限元建立薄壁壳单元得出简单管节点的SCF，开创了对管节点SCF进行有限元大量分析计算的先锋。建立的模型为沿杆件厚度中心的平面模型，并且忽略了焊缝单元。

文献<sup>[5]</sup>通过壳单元建立 330 个X和DT节点得到在六种荷载工况下的SCF参数方程。这些方程能算出撑杆和弦杆在每种载荷下冠趾、冠根、鞍点和热点位置的SCF，并且还得到方程能算出交界处热点的角度位置，这比单纯的研究简单管节点撑弦杆的SCF参数方程又进了一步。该文章指出，对以延长寿命期为出发点考虑的断裂力学的研究，研究在带裂缝工作的节点在寿命期内，沿预期的断裂路径的应力的幅值和分布信息是必要的，而不仅仅只需研究一个位置的最高应力。该文建立SCF参数方程所需有限元数据的有效性确定是通过钢和丙烯酸模型的实验结果和已存在的参数公式的计算值比较得到的。同文献<sup>[5]</sup>出自同一作者的文献<sup>[6]</sup>主要针对Y或T节点得出了SCF参数方程，同文献<sup>[5]</sup>相同，这些方程能算出撑杆

和弦杆在几种载荷下冠趾、冠根、鞍点和热点位置的SCF，从而能得出沿交界的应力分布。文献<sup>[7][8][9]</sup>为Morgan等人研究的K节点在轴向力、平面内弯矩、平面外弯矩下的应力集中系数。

为了加强管节点，内部加强环被运用，内部加强环曾被认为是最有效，所需成本最小的加强海洋结构管节点的方法UEG(1985)<sup>[10]</sup>，它能提供必要的刚度和强度，而不需要构件过量增大厚度，因为结构在使用期内，对内部加强环节点的检测和维护有一定困难，另外，小直径管的运用也限制了内部加强环节点的发展。为此，对位于弦撑杆之间的外部加强板的运用开始，文献<sup>[11]</sup>研究加强板T节点的SCF，研究在轴向压力、轴向拉力、平面内弯矩和平面外弯矩作用下加强板T节点的SCF，通过建立全比例的钢模型，测量撑弦杆交界处应变得到的试验结果，与有限元方法结果比较，来证实有限元模型方法的有效性。并分析了各个参数如 $\tau$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 对加强板T节点对SCF的影响。计算简单间隙管节点SCF的公式也有许多，如包括本文用来和KK节点SCF比较的K节点SCF公式的Kuang公式和NORSOK公式，公式中对各类型的简单管节点在各种荷载形式下的SCF都有描述。

在对简单间隙管节点加强研究的同时，对搭接管节点的研究也一直在进行着，Efthymiou和Durkin<sup>[12]</sup>(1985)对简单部分搭接管节点的应力分布进行了详尽的研究。对指出对受非平衡轴向荷载的搭接K节点，其SCF比平衡轴向荷载的搭接K节点大出五六倍，当仅有一根撑杆受力时，SCF同T/Y节点SCF相当。进一步，Moe<sup>[13]</sup>(1987)对平衡轴向荷载的部分搭接K节点进行应力分析和疲劳测试表明，与Kuang公式的间隙K节点的SCF比较，平衡轴向荷载下的搭接K节点的SCF比Kuang公式的间隙K节点的SCF小，而非平衡轴向荷载下的搭接K节点的SCF比Kuang公式的间隙K节点的SCF要高出很多。Gho<sup>[14]</sup>(2001)研究了完全搭接K节点在轴向荷载下的应力集中系数和应变集中系数，指出最大的应变出现在与搭接撑杆相交附近的直通撑杆上，并且研究指出直通撑杆与搭接撑杆的参数直径比、厚度比对SCF起到很大作用。并将完全搭接K节点与T/Y的SCF比较，驳斥了传统上将完全搭接K节点看成两个T/Y的看法。在此文献是通过建立有限元T/Y模型和T/Y试验模型，比较T/Y有限元模型和试验模型，有限元模型和已有的公式结果，因为差别都很小，以此证明T/Y有限元模型建立的有效性。

在过去的几十年里，对节点模型的建立标准一直有许多人在研究，并且众说不一。2D壳单元和3D块单元通常用来进行管节点的有限元研究，单元类型的选择要看节点的形状和研究的内容。同时必须保证选择的单元在计算的准确性和计算时间方面有很好的折衷。3D块单元能用来模拟整个管节点，用3D块单元能比简单的2D壳单元计算得出的节点交界处应力更准确。对断裂力学的研究，研究焊缝附近和沿构件厚度的应力这些更为详细的应力信息，3D块单元是必要的。

Romeijn<sup>[15]</sup>分析了建立管节点进行有限元SCF计算的几个方面,指出管节点进行有限元SCF计算时,建立 20 个节点固体单元,在考虑焊缝模型的情况下,用于计算SCF的应力应通过插值得到垂直焊趾位置的应力,在未考虑焊缝建模的情况下,应力不能通过虚拟焊趾位置来获得,这样得到的弦杆处的应力偏小。Romeijn分析的建立模型、提取应力的方法一直被认为是进行管节点有限元SCF计算的最准确的方法。在用试验方法进行管节点SCF分析时也大多采用插值获得焊趾位置的应力作为热点应力。在不能模拟焊缝进行有限元分析中,如用薄壁壳单元分析,怎样获得热点应力得到SCF,一直是深入分析研究的目标。Healy和Buitrago<sup>[16]</sup>通过用壳单元建立沿中心平面的二维模型,比较了四种提取应力的方法,指出对复杂的管节点不能将固体焊缝单元模拟出来,将中平面交界处的节点平均应力来计算应力从而得到SCF是最为可靠的办法。这种方法同考虑焊缝的固体模型结果相比较,计算的弦杆处的应力较准确,而撑杆处的应力较保守。文献<sup>[17]</sup>建议用壳单元在未考虑焊缝建模时,不对 $\beta$ 超过 0.8 的管节点进行分析。用 3D块单元进行管节点的应力的参数分析,在计算上用时过长,许多研究是选 2D壳单元研究的,生成 2D壳单元单元网格比较容易,在计算的准确性和计算时间方面有很好的折衷。根据以上的建议,本文的研究采用管体中平面在撑弦杆的交界区域的节点的最大主应力用来计算应力集中系数SCF,在本文的KK节点的SCF分析中,采用节点的 $\beta$ 不大于 0.6。

## 1.4 本文主要研究内容及研究意义

综合前人的研究,在简单的管节点应力集中系数方面研究较多,也比较深入,而对复杂的管节点应力集中系数方面研究较少,本文在以前对简单管节点研究基础上,运用有限元软件 ANSYS,用薄壁壳单元分析建立上千个适用于平台结构中的 KK 型节点,分析其在承受轴向力、平面内弯矩和平面外弯矩三种荷载工况下的撑、弦杆的最大主应力,得出 SCF 的一系列结果数据,通过不定尺寸的节点几何比例  $\alpha$ 、 $\gamma$ 、 $\xi$ 、 $\beta$ 、 $\tau$  和  $\theta$  建立函数通过回归分析得出 KK 型节点撑、弦杆 SCF 的一系列的参数方程。这些参数方程可以用来计算得出 KK 型复杂管节点撑杆和弦杆处围绕交界处的最大应力。

本文并进一步,通过图、表形式分别分析  $\alpha$ 、 $\gamma$ 、 $\xi$ 、 $\beta$ 、 $\tau$  和  $\theta$  各个参数对 KK 型节点在三种荷载工况下撑杆和弦杆 SCF 的影响和各个参数对 KK 型节点与对相同尺寸的经验公式计算的 K 型节点 SCF 差距的影响。本文并计算了在三种荷载作用下的 800 个 K 节点,以此与 KK 节点 SCF 比较,指出它们之间的差距,

从而进一步验证研究复杂 KK 节点的意义。

本文由于要进行上千个 KK 节点的有限元分析，所以在建立模型分析时用到了 ANSYS 批处理操作，建立通过 ANSYS 的命令流，用 APDL(Ansys Parametric Design Language, 参数化设计语言)进行对模型的建立与运算循环操作，从而大大节约时间。从而也为以后研究管节点 SCF 进行大量有限元分析建立模型提供参考模型。

本文对复杂 KK 型管节点应力集中系数参数方程的研究对以后研究其它复杂节点 SCF 和管节点设计有一定参考价值。本文指出用于单 K 节点的经验公式并不适用于 KK 节点，为了估计管节点的疲劳寿命，用 K 节点代替 KK 节点是不安全的。本文通过分析各个参数对 KK 型节点 SCF 与对相同尺寸的经验公式计算的 K 型节点 SCF 差距的影响，从而使我们更加了解参数的变化对 KK 节点用 K 节点来代替时的不安全因素的影响，为管节点的设计、校核提供指导。

## 第二章 KK 型管节点力学模型建立

本章主要介绍 KK 型管节点模型参数选取，KK 型管节点有限元模型的建立，并以 1000 个 KK 节点的 SCF 计算为例，将 ANSYS 中的输入的命令流文件列出。该命令流文件运用 APDL(Ansys Parametric Design Language, 参数化设计语言)，从而能实现对 KK 节点循环建模和计算。

### 2.1 KK 型管节点模型参数选取

#### 2.1.1 KK 型管节点模型及参数符号定义

本文研究的典型的 KK 型复杂管节点由两个完全相同的 K 型管节组成，认为 KK 节点与 K 节点有相同几何尺寸。两个 KK 管节点撑杆平面互相垂直，KK 节点参数符号同 K 节点参数符号，如图 2-1 所示。KK 节点的几何模型如图 2-2 所示。

定义及取值： $d$ ——撑杆直径， $D$ ——弦杆直径， $L$ ——弦杆长度， $t$ ——撑杆壁厚， $T$ ——弦杆壁厚， $g$ ——撑杆在与弦杆相交处的间距， $l$ ——撑杆中心末端到塞板中心的长度  $\beta=d/D$ ， $\alpha=2L/D$ ， $\gamma=D/2T$ ， $\tau=t/T$ ， $\xi=g/D$ 。弹性模量  $E=210\text{GPa}$ ，泊松比  $\nu=0.3$ 。在本研究中，K 节点与 KK 节点的每个撑杆参数相同，即有同样的  $\beta$ 、 $\tau$ 、 $l$ ，两个平面上的撑杆的间距  $g$  相同。

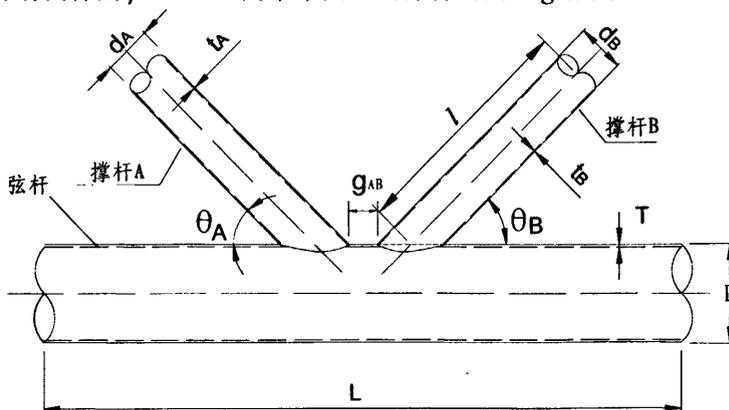


图 2-1 K 型管节点的几何参数符号

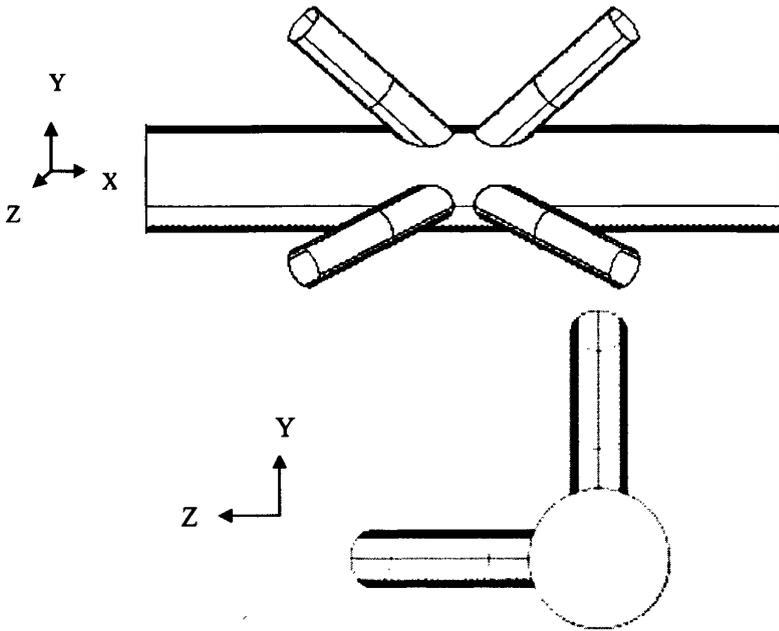


图 2-2 KK 型管节点的几何模型

### 2.1.2 KK 型管节点模型的参数数据

为了得到参数方程，几何节点参数取值范围必须有一定代表性，并且适应规范<sup>[18]</sup>的要求。KK节点在三种荷载作用下建立的SCF参数方程的适用范围

$$9 \leq \alpha \leq 18, 35^\circ \leq \theta \leq 75^\circ, 10 \leq \gamma \leq 30, 50 \text{mm} \leq g, 0 < 50 \text{mm}/D < \zeta \leq 0.5, 0.3 \leq \beta \leq 0.6, 0.4 \leq \tau \leq 0.8$$

(1) KK 型节点在轴向荷载下用有限元分析时在参数的变化范围内均匀覆盖，参数按如下数值变化共建立 3000 个 KK 节点模型。

$$\alpha = 12, \theta = 35^\circ, 45^\circ, 55^\circ, 65^\circ, 75^\circ, \gamma = 10, 15, 18.75, 25, 30, \zeta = 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.3, 0.4, \beta = 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, \tau = 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8$$

(2) KK 型节点在平面内弯矩和平面外弯矩作用下用有限元分析时，参数按如下数值变化共建立 4000 个 KK 节点模型。

$$\text{当 } \alpha = 12, \theta = 35^\circ, 45^\circ, 55^\circ, 65^\circ, 75^\circ, \gamma = 10, 15, 18.75, 25, 30, \zeta = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, \beta = 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, \tau = 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8$$

建立 2500 个 KK 节点模型。

$$\text{当 } \alpha = 9, 15, 18, \theta = 35^\circ, 45^\circ, 55^\circ, 65^\circ, 75^\circ, \gamma = 10, 15, 20, 25, 30, \zeta = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, \beta = 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, \tau = 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8$$

建立 1500 个 KK 节点模型。

为节约 CPU 时间,在建立有限元计算时,对相同的节点按连续受三种荷载工况分析,不需要重新建立模型和计算单元刚度矩阵。

如表 2-1、2-2 列出了 KK 型管节点在三种荷载作用下节点的几何尺寸和参数数据。表 2-3 列出了进行与 KK 型管节点比较的 K 型管节点在三种作用下的有限元分析时的节点的几何尺寸和参数数据。

表 2-1 KK 型管节点在平面内弯矩和平面外弯矩作用下的节点的几何尺寸和参数数据

$\alpha=2L/D$	$\gamma=D/2T$	$\xi=g/D$	$\beta=d/D$	$\tau=t/T$	$\theta$	L	D	T	个数
12	10	0.1,0.2,0.3,0.4,0.5	0.3,0.4,0.5,0.6	0.4,0.5,0.6,0.7,0.8	35,45,55,65,75	7.2	1.2	0.06	500
12	15	0.1,0.2,0.3,0.4,0.5	0.3,0.4,0.5,0.6	0.4,0.5,0.6,0.7,0.8	35,45,55,65,75	7.2	1.2	0.04	500
12	18.75	0.1,0.2,0.3,0.4,0.5	0.3,0.4,0.5,0.6	0.4,0.5,0.6,0.7,0.8	35,45,55,65,75	9	1.5	0.04	500
12	25	0.1,0.2,0.3,0.4,0.5	0.3,0.4,0.5,0.6	0.4,0.5,0.6,0.7,0.8	35,45,55,65,75	9	1.5	0.03	500
12	30	0.1,0.2,0.3,0.4,0.5	0.3,0.4,0.5,0.6	0.4,0.5,0.6,0.7,0.8	35,45,55,65,75	9	1.5	0.025	500
9	10	0.3	0.3,0.4,0.5,0.6	0.4,0.5,0.6,0.7,0.8	35,45,55,65,75	4.5	1.0	0.05	100
9	15	0.3	0.3,0.4,0.5,0.6	0.4,0.5,0.6,0.7,0.8	35,45,55,65,75	5.4	1.2	0.04	100
9	20	0.3	0.3,0.4,0.5,0.6	0.4,0.5,0.6,0.7,0.8	35,45,55,65,75	6	1.333	0.033	100
9	25	0.3	0.3,0.4,0.5,0.6	0.4,0.5,0.6,0.7,0.8	35,45,55,65,75	6	1.333	0.0267	100
9	30	0.3	0.3,0.4,0.5,0.6	0.4,0.5,0.6,0.7,0.8	35,45,55,65,75	5.63	1.25	0.0208	100
15	10	0.3	0.3,0.4,0.5,0.6	0.4,0.5,0.6,0.7,0.8	35,45,55,65,75	7.5	1.0	0.05	100
15	15	0.3	0.3,0.4,0.5,0.6	0.4,0.5,0.6,0.7,0.8	35,45,55,65,75	7.5	1.0	0.03	100
15	20	0.3	0.3,0.4,0.5,0.6	0.4,0.5,0.6,0.7,0.8	35,45,55,65,75	9	1.2	0.03	100

$\alpha=2L/D$	$\gamma=D/2T$	$\xi=g/D$	$\beta=d/D$	$\tau=t/T$	$\theta$	$L$	$D$	$T$	个数
15	25	0.3	0.3,0.4,0.5,0.6	0.4,0.5,0.6,0.7,0.8	35,45,55,65,75	9	1.2	0.024	100
15	30	0.3	0.3,0.4,0.5,0.6	0.4,0.5,0.6,0.7,0.8	35,45,55,65,75	11.3	1.5	0.025	100
18	10	0.3	0.3,0.4,0.5,0.6	0.4,0.5,0.6,0.7,0.8	35,45,55,65,75	9	1.00	0.05	100
18	15	0.3	0.3,0.4,0.5,0.6	0.4,0.5,0.6,0.7,0.8	35,45,55,65,75	10.8	1.2	0.04	100
18	20	0.3	0.3,0.4,0.5,0.6	0.4,0.5,0.6,0.7,0.8	35,45,55,65,75	12	1.333	0.033	100
18	25	0.3	0.3,0.4,0.5,0.6	0.4,0.5,0.6,0.7,0.8	35,45,55,65,75	12	1.333	0.0267	100
18	30	0.3	0.3,0.4,0.5,0.6	0.4,0.5,0.6,0.7,0.8	35,45,55,65,75	11.3	1.25	0.0208	100
合计									4000

表 2-2 KK 型管节点在轴向荷载作用下的节点的几何尺寸和参数数据

$\alpha=2L/D$	$\gamma=D/2T$	$\xi=g/D$	$\beta=d/D$	$\tau=t/T$	$\theta$	$L$	$D$	$T$	个数
12	10	0.05,0.1,0.15,0.2,0.3,0.4	0.3,0.4,0.5,0.6	0.4,0.5,0.6,0.7,0.8	35,45,55,65,75	7.2	1.2	0.06	600
12	15	0.05,0.1,0.15,0.2,0.3,0.4	0.3,0.4,0.5,0.6	0.4,0.5,0.6,0.7,0.8	35,45,55,65,75	7.2	1.2	0.04	600
12	18.75	0.05,0.1,0.15,0.2,0.3,0.4	0.3,0.4,0.5,0.6	0.4,0.5,0.6,0.7,0.8	35,45,55,65,75	9	1.5	0.04	600
12	25	0.05,0.1,0.15,0.2,0.3,0.4	0.3,0.4,0.5,0.6	0.4,0.5,0.6,0.7,0.8	35,45,55,65,75	9	1.5	0.03	600
12	30	0.05,0.1,0.15,0.2,0.3,0.4	0.3,0.4,0.5,0.6	0.4,0.5,0.6,0.7,0.8	35,45,55,65,75	9	1.5	0.025	600
合计									3000

表 2-3 进行与 KK 型管节点比较的 K 型管节点在三种作用下的有限元分析时的节点的几何尺寸和参数数据

$a=2L/D$	$\gamma = D/2T$	$\xi = g/D$	$\beta = d/D$	$\tau = t/T$	$\theta$	$L$	$D$	$T$	个数
12	10	0.05,0.1,0.15,0.2,0.3,0.4	0.3,0.4,0.5,0.6	0.4,0.5,0.6,0.7,0.8	35,45,55,65,75	7.2	1.2	0.06	400
12	15	0.05,0.1,0.15,0.2,0.3,0.4	0.3,0.4,0.5,0.6	0.4,0.5,0.6,0.7,0.8	35,45,55,65,75	7.2	1.2	0.04	400
合计									800

## 2.2 建立 KK 型管节点有限元模型

现研究焊接管节点交界处的应力分布的方法有多种,其中有 photoelastic 模型、acrylic 模型、全比例模型和缩小比例的钢模型。因为全比例模型通常能得到比较准确的结果,但是因为所需成本高,一是试验建立需要大空间,另外,还需求大的加载装置使节点破坏和精密测量设备。并且研究参数对节点 SCF 分析时,因为需建立的模型很多,需要上千个节点的模型的建立,试验分析是很难实现的。有限元软件的应用可以对大量节点 SCF 进行分析,本文正是运用有限元 ANSYS 8.0 进行节点 SCF 的分析计算。关于有限元方法的原理在此不再赘述。

### 2.2.1 前处理阶段

#### 单元类型

壳单元通常用来分析管节点应力,通常有比较高的准确性并且计算较简单。壳单元是基于壳理论,当壳尺寸厚度为壳整体尺寸的 1/10 时,用二维理论来近似三维连续体,这同样适合于作为管节点的模型。壳单元分为薄壁壳单元和厚壳单元。薄壁壳单元不传递剪应力,而厚壳单元传递剪应力。壳单元类型的选择受结构对剪力变形重要性的影响,随着壳厚度与壳整体尺寸比例的增加,剪力变形变得更重要。有研究指出用薄壁壳单元和厚壳单元来模拟管节点对计算结果影响不大,因为对平台管节点杆件厚度与直径比很小,换句话说,管壁是薄型的。

用壳单元分析管节点应力的缺点是管节点被模拟为在杆件厚度中心平面处相交的二维圆管,这样焊缝不能被模拟出来,导致热点位置同真正的钢模型不同,尤其对撑杆。这也是有限元分析结果和钢模型试验结果有差别的原因,尤其对撑杆的差别更大一些。但是有文献<sup>5</sup>指出用有限元分析结果同同样忽略焊缝应变测量的丙烯酸模型的差别一般是比较小的,薄壁壳单元在计算管节点应力时提供的结果准确和运算方面很好的折衷。

本文采用 ANSYS 程序,对 KK 节点用弹性 4 节点四边形壳体单元 shell63 进行计算,shell63 具备弯曲和膜的特性,能承受平面内和法线方向的荷载。这个单元在节点上有六个自由度:节点 x, y, z 方向的平动和 x, y, z 方向的旋转。该单元的优点是可处理带厚度的壳体,与采用实体单元相比对几何模型进行离散时,有单元和节点数少而计算精度高的优点,因而能节约计算时间。

### 2.2.2 网格产生

用有限元方法分析的主要一步是网格的生成，尤其是出现几何不连续的区域时，应力在这些区域产生急剧变化，对管节点的交界处就是这样，在撑弦杆交界处几何不连续。这样节点应力梯度是不均匀分布的，围绕交界处应力梯度很大，在远离交界处梯度分布比较均匀。

为了使参数范围能覆盖海洋结构的大多数管节点，必须进行大量有限元分析。在 ANSYS 中，用 APDL(参数化设计语言) 建立的输入文件程序，能自动建立模型并进行网格划分，直接进行分析。如前所述，为了获得准确的计算结果，并避免不必要的计算影响，必须在撑弦杆交界处产生好的较密单元，撑弦杆的末端单元可相对粗糙。

并且，为了获得建立最好刚度方程的条件和计算准确性单元不应该过量拉长和扭曲。本次用到网格划分形式是对整体节点智能网格划分后对撑杆与弦杆的交界线附近细化加密，这样既可以得到较为精确的结果，又能减少单元、节点数，并且能适应覆盖各种不同参数的变化范围。在这个输入文件中，只需用户进行少量在绝对尺寸或非尺寸的几何比参数上的改变。

本文采用全模型进行分析，如图 2-3 为划分网格的全模型。

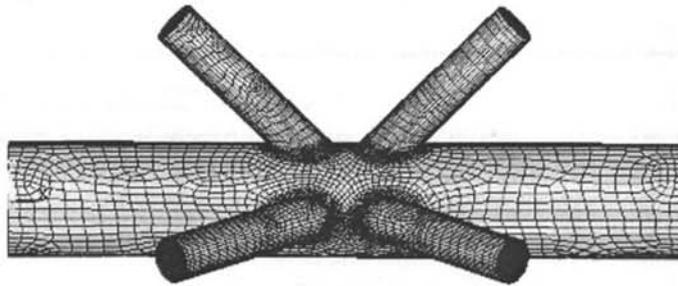


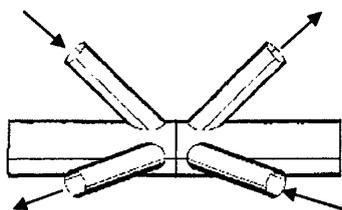
图 2-3 划分网格的全模型( $\alpha=12, \theta=45^\circ, \gamma=10, \xi=0.2, \beta=0.5, \tau=0.4$ )

### 2.2.3 荷载和边界条件

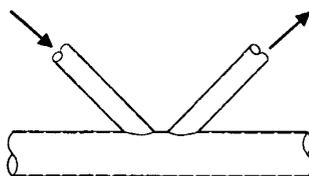
应力集中系数  $SCF = \sigma_{\max} / \sigma_0$ ，本文取  $\sigma_{\max}$  为管体表面节点的最大主应力， $\sigma_0$  为名义应力。在轴向荷载作用下，名义应力为轴向力除以撑杆的横截面积。在弯矩作用下的名义应力为通过简支梁弯曲理论，为弯矩除以抗弯模量。为使后处理简单化，加在撑杆末端的力和弯矩都设为单位名义应力，即名义应力为单位 1 时的轴向力和弯矩，分别为  $2\pi r t$ 、 $\pi r^2 t$ ，这样所得的最大应力即为应力集中系数。图 2-4 为 KK 节点的三种荷载作用方式，图 2-5 为 K 节点的三种荷载作用方式，

正确边界条件可使有限元分析结果接近实的管节点应力分布的各类型管节

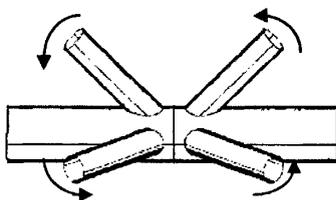
点弦杆两端六个自由度 ( $U_x, U_y, U_z, \theta_x, \theta_y, \theta_z$ ) 全部约束。



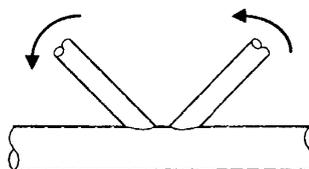
(a) 轴向力作用



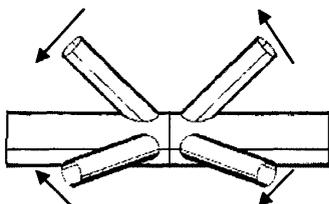
(a) 轴向力作用



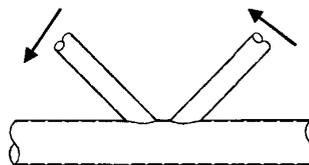
(b) 平面内弯矩



(b) 平面内弯矩



(c) 平面外弯矩



(c) 平面外弯矩

图 2-4 KK 节点的三种荷载作用方式

图 2-5 K 节点的三种荷载作用方式

### 2.2.4 有限单元计算

有限元法计算应力的原理是通过高斯点到所选单元的节点的线性插值得到的,管体中平面在撑弦杆的交界区域的节点的最大主应力用来计算应力集中系数 SCF。因为在输入文件中,直接将单位名义应力的载荷加在撑杆末端,从有限元输出文件中得到的撑弦杆交界区域的最大主应力即为应力集中系数 SCF。

### A 网格的优化选取

在参数研究分析前,为能得到较为准确的撑弦杆的应力集中系数,对网格划分运算结果进行比较分析,优化选取。先对 KK 节点进行整个面的智能网格划分,从 1 到 10 共分为 10 级,1 网格划分最细,10 网格划分最粗糙。再对撑弦杆的交界线进行线再次细化,共分 5 级,1 网格细化最细,5 网格细化最粗糙。共分析比较了五种形式的网格划分的 SCF 计算结果,列在表 2-4。

最终选择整个面的智能网格划分为 3 级,撑弦杆的交界线细化为 2 级的网格划分形式。

表 2-4 KK 节点在五种形式的网格划分下的 SCF 比较分析

( $\alpha=15, \theta=35^\circ, \gamma=25, \xi=0.3, \beta=0.3, \tau=0.4$ )

整个面的智能网格划分级别	撑弦杆交界线 细化级别	撑杆 SCF	弦杆 SCF
平面内弯矩作用			
1	1	3.05	2.08
2	1	3.00	2.06
2	2	3.00	2.06
3	2	2.95	2.05
4	2	2.92	2.05
平面外弯矩作用			
1	1	6.29	5.20
2	1	6.29	5.08
2	2	6.29	5.08
3	2	6.35	5.07
4	2	6.30	5.06

### B 撑杆长度对 SCF 的影响

早期的研究表明对平衡轴向荷载,在每侧的交界处应力是不完全相同的,为了保证弦杆对称两侧的应力完全相同,有必要将撑杆的长度取得长一些。为了节约材料,大多数管节点的试验取的撑杆长度相对较短。海洋平台的大多数管节点都有相对较长的撑杆,因此,有必要对撑杆长度对 SCF 的影响进行一下研究分析。

通常用几何比 $\alpha_B=2l/d$ 来估计撑杆长度对撑弦杆交界处的 SCF,  $l$  是撑杆中心末端到塞板(撑杆与弦杆相交区域上弦杆的部分)中心的长度,如图 2-1 所示。 $d$

是撑杆的直径。对KK管节点在三种荷载作用下，不同 $\alpha_B$ 对撑杆和弦杆的SCF对比列在图 2-5—2-7。从这些图看出，随着 $\alpha_B$ 增大到一关键值，大约为 4，SCF值就趋于稳定了，此时对应的 $l$ 值约为  $0.67L$ 。这也是在SCF参数方程中不存在 $\alpha_B$ 的原因。在 $\alpha_B$ 小于这一关键值时，平面外弯矩作用下SCF的计算结果偏大，轴向力作用下SCF的计算结果偏小，平面内弯矩作用下，这一影响很小，对弦杆SCF的计算结果偏大一点，对撑杆则规律不明显。

这本文的研究中，为了避免撑杆长度对 SCF 的影响，撑杆的长度采用  $8d$ 。取较长撑杆不会增加多少计算量，因为在整体单元网格划分的单元较粗糙，只是在撑弦杆的交界处单元网格细化。

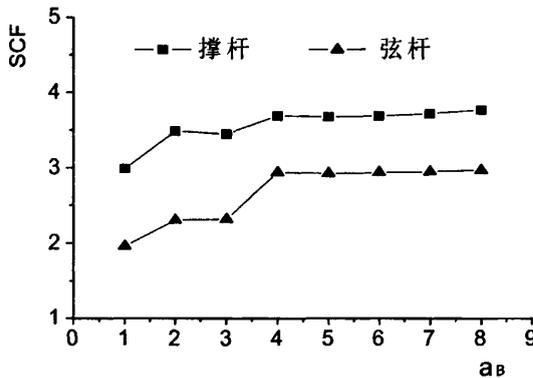


图 2-5 在轴向力作用下， $\alpha_B$ 对撑杆和弦杆SCF的影响  
( $\alpha=12, \theta=45^\circ, \gamma=15, \xi=0.1, \beta=0.5, \tau=0.4$ )

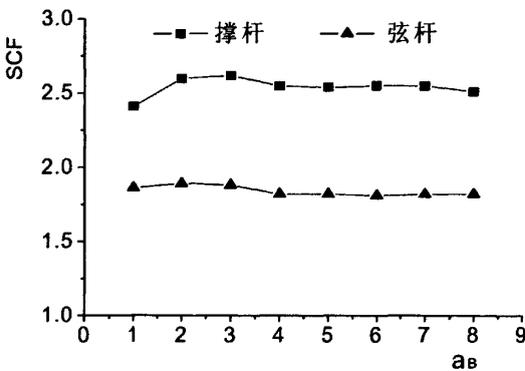


图 2-6 在平面内弯矩作用下， $\alpha_B$ 对撑杆和弦杆SCF的影响  
( $\alpha=12, \theta=45^\circ, \gamma=15, \xi=0.1, \beta=0.5, \tau=0.4$ )

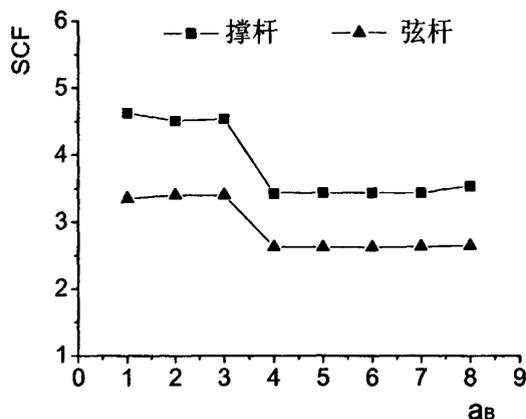


图 2-7 在平面外弯矩作用下,  $\alpha_B$ 对撑杆和弦杆SCF的影响  
( $\alpha=12, \theta=45^\circ, \gamma=15, \xi=0.1, \beta=0.5, \tau=0.4$ )

### 2.3 后处理阶段——建立批处理操作的命令流

在本节中, 按表 2-5 的 1000 个 KK 节点的几何尺寸和参数数据为例, 将输入的命令流文件(.TXT 文件)列出来。

表 2-5 KK 节点的几何尺寸和参数数据

$L$	$D$	$\xi=g/D$	$\theta$	$\beta=d/D$	$\tau$	$\alpha$	$T$	$\gamma$	个数
7.2	1.2	0.1,0.2,0.3,	35,45,55,	0.3,0.4,	0.4,0.5,0.6,	12	0.06	10	500
		0.4,0.5	65,75	0.5,0.6	0.7,0.8		0.04	15	500

在此输入文件中 APDL (Ansys Parametric Design Language, 参数化设计语言), 对 KK 节点循环建模、计算 SCF 值。在此输入文件中, 用到 5 个 ‘\*DO, \*ENDDO’ 命令, 分别对  $\xi, \theta, \beta$ , 弦杆厚度  $T$ , 根据  $\tau$  计算的撑杆厚度  $t$  进行 5 次循环。只需按表 2-5 的参数进行改变, 就能完成本文研究的所有 KK 节点在三种荷载下的 SCF 计算。在这里不对 APDL 做太多介绍, 详细了解参见文献<sup>[19],[20],[21]</sup>。

为方便多次进行对 KK 节点的加载和运算输出, 本文用 ‘\*ULIB’ 命令指定一个 MYFILE.TXT 的宏库文件, 该宏库文件放在 ANSYS 工作目录下。该宏库文件可包括多个宏模块。本宏库文件只包括一个 FPOST 宏模块(‘FPOST’, 指定宏模块; ‘EOF 表示文件结束。)通过运行 FPOST 宏模块(‘\*USE, FPOST’) 可实现 KK 管节点三种加载和各个参数及 SCF 的输出。

通过建立 ANSYS 的命令流的批处理文件, 用 APDL 进行对模型的建立与运算循环操作, 大大节约时间。从而也为以后研究管节点 SCF 进行大量有限元分析建立模型提供参考模型。

命令流输入的.TXT 文件见附录 A, 宏库文件 MYFILE.TXT 的内容见附录 B。

## 第三章 通过回归分析得出参数方程

### 3.1 根据参数建立参数方程的拟合函数

用有限元分析结果得出的KK型节点在三种荷载作用下的撑杆和弦杆的应力集中系数SCF等一系列数据,通过数学软件ORIGIN进行多重拟合<sup>[23]</sup>和相关系数分析,从而建立起参数方程。用此方法得出参数方程步骤如下:

1. SCF通过参数 $\tau, \beta, \zeta, \gamma, \theta$ 编公式函数,最终得出 SCF的参数方程的最终形式。
2. a. 轴向荷载作用下,参数方程的拟合函数如下  

$$SCF = P1\tau^{P2}\beta^{P3}\gamma^{P4}\zeta^{P5}\sin^{P6}\theta$$
 b. 平面内弯矩作用下,参数方程的拟合函数如下  
 对撑杆:  $SCF = P1 + P2\tau^{P3}\beta^{P4}\gamma^{(P5+P6\theta)}\sin^{(P7+P8\gamma)}\theta$   
 对弦杆:  $SCF = P1\tau^{P2}\beta^{P3}\gamma^{P4}\sin^{P5}\theta$ 
 c. 平面外弯矩作用下,参数方程的拟合函数如下  

$$SCF = \tau\beta\gamma(P1 + P2\beta^{P3}\sin^{P4}\theta)(P5 + P6(\beta\gamma)^{P7}e^{(P8X)})(P9 + P10\beta^{P11}e^{(P12X)})$$
 其中,  $X = 1 + \zeta\sin\theta/\beta$   
 P1 到 P12 等 12 个参数通过多重拟合得出。
3. 上述简单方程通过其它(如指数)形式调整,通过多次拟合,直到得出相关系数较大的合适方程。

### 3.2 KK 型节点的参数方程的得出

#### 3.2.1 参数方程的拟合质量与有效性判断标准

KK型节点在三种荷载作用下的撑杆和弦杆的SCF的参数方程列在 3.2.2 节,每个方程的拟合质量在表 3-1 中列出,对所有方程相关系数 $R^2$ 均大于 90%, $R^2=100\%$ 代表结果完全拟合。为避免拟合值较低的结果,不管拟合数据结果如何,指定最小SCF为 1.5。

管节点的应力集中系数经验公式通常用于计算管节点的最大应力,并以最大应力通过 S-N 方法评估海洋平台疲劳寿命,所以应力集中系数的正确确定对平台结构的安全性至关重要。对应力集中系数的低估可导致对平台疲劳寿命高估,造

成安全隐患。因此，保证拟合的参数方程结果在很大程度上不低于有限元值是必要的，并且，记录的有限元结果中，将 SCF 值小于 1.5 的改为 1.5 值，保证记录的 SCF 全部大于等于 1.5。对每一个参数方程预测 SCF 值(P)同记录的有限元 SCF 值 (R) 的比值被用来保证其在几何参数的建议范围内拟合准确性。比值 1.0 代表得出完全相同的拟合值，P/R 的均值(mean values)和标准方差(standard Deviation)也列出。P/R 低于 1.0 和 0.8 以下的百分比代表方程预测低值的程度，P/R 大于 1.5 代表预测高值的程度，这些值在表 3-2 中列出，

下面列出了 U.K. Department of Energy [22] 给出的适用 SCF 的参数方程判断标准。

最后，为得出最为合适的参数方程下列判断标准被推荐运用：

1. 如果  $\%[P/R < 1.0] \leq 25\%$  并且  $\%[P/R < 0.8] \leq 5\%$ ，接受参数方程。
  2. 如果  $\%[P/R > 1.5] \geq 50\%$ ，认为该参数方程保守。
  3. 如果  $25\% \leq \%[P/R < 1.0] \leq 30\%$ ，或者  $5\% < \%[P/R < 0.8] \leq 7.5\%$ ，是否接受该参数方程要看实际工程再判断，否则直接拒绝该参数方程太主观判断。
- 运用上述标准将第一次拟合方程改变如乘一数，得最终方程。

表 3-1 所有方程的拟合质量

荷载	撑杆		弦杆	
	R <sup>2</sup> (%)	方程	R <sup>2</sup> (%)	方程
平衡轴向载荷	90.12	A1.1	97.95	A2.1
	95.90	A1.2	96.74	A2.2
平面内弯矩	91.3	B1	94.03	B2
平面外弯矩	99.58	C1.1.1		
	98.5	C1.1.2		
	99.59	C1.2.1	99.44	C2.1
	98.5	C1.2.1	99.54	C2.2

表 3-2 KK 节点的 SCF 参数方程有效性判断

方程	mean	%st dev of equ	%[P/R< 1.0](%)	%[P/R< 0.8](%)	%[P/R> 1.5](%)	节点数
A1.1	1.1	11.6	20.9	0	0.1	2250
A1.2	1.08	13.5	8.93	1.40	0	1500
A2.1	1.1	6.4	5.2	0	0.13	2250
A2.2	1.09	9.59	14.9	0	0.07	1500
B1	1.08	13.6	12.5	0	0	4000
B2	1.08	13.3	9.40	0	0	4000
C1.1.1	1.02	3.75	23.1	0	0	2100
C1.1.2	1.03	5.8	25	0	0	2100
C1.2.1	1.01	3.4	21.5	0	0	600
C1.2.2	1.04	3.99	12.8	0	0	400
C2.1	1.26	24.6	11.10	0	0	3500
C2.2	1.11	4.63	1.20	0	0	1000

### 3.2.2 KK 型节点参数方程

KK 型节点在三种荷载作用下的撑杆和弦杆的 SCF 的参数方程如下, 参数方程的适用范围为  $9 \leq \alpha \leq 18$ ,  $35^\circ \leq \theta \leq 75^\circ$ ,  $10 \leq \gamma \leq 30$ ,  $50\text{mm} \leq g$ ,  $0 < 50\text{mm}/D < \xi \leq 0.5$ ,  $0.3 \leq \beta \leq 0.6$ ,  $0.4 \leq \tau \leq 0.8$ 。

在轴向荷载下

$$\text{A1.1 撑杆 SCF} = 6.38\tau^{0.606}\beta^{0.277}\gamma^{(-0.309)}\xi^{0.154}\sin^{1.368}\theta \quad 0.3 \leq \beta \leq 0.5$$

$$\text{A1.2 撑杆 SCF} = 7.51\tau^{0.73}\beta^{1.22}\gamma^{(-0.502)}\xi^{0.192}\sin^{1.9}\theta \quad 0.5 < \beta \leq 0.6$$

$$\text{A2.1 弦杆 SCF} = 3.79\tau^{1.126}\beta^{0.339}\gamma^{(-0.47)}\xi^{0.121}\sin^{1.266}\theta \quad 0.3 \leq \beta \leq 0.5$$

$$\text{A2.2 弦杆 SCF} = 3.65\tau^{1.16}\beta^{0.748}\gamma^{(-0.589)}\xi^{0.156}\sin^{1.552}\theta \quad 0.5 < \beta \leq 0.6$$

在平面内弯矩作用下

B1 撑杆

$$\text{SCF} = 0.711(1.623 + 0.619\tau^{0.833}\beta^{0.5}\gamma^{(1.127-0.6\beta)}\sin^{(0.349+0.06\gamma)}\theta)^{0.823}e^{(0.693-0.658\xi)}$$

$\xi < 0.3$ , 当  $0.3 \leq \xi \leq 0.5$ , 取  $\xi = 0.3$ , 并乘一系数 1.05

B2 弦杆

$$\text{SCF} = 2.4\tau^{0.958}\beta^{-0.058}\gamma^{0.294}\sin^{0.527}\theta$$

在平面外弯矩作用下, 对撑杆

## C1.1.1

$$\text{SCF}=\tau\beta\gamma(-0.058+0.577\beta^{-0.084}\sin^{1.693}\theta)(3.039+2.644(\beta\gamma)^{0.059}e^{(-1.21X)})$$

$$(1.61-4.564\beta^{3.7}e^{(-0.257X)}) \quad \text{其中, } X=1+\zeta\sin\theta/\beta, \quad 9\leq\alpha<15, 0.4\leq\tau\leq0.6$$

## C1.1.2

$$\text{SCF}=\tau\beta\gamma(-0.064+0.581\beta^{-0.067}\sin^{1.607}\theta)(2.906+1.98(\beta\gamma)^{0.148}e^{(-1.111X)})$$

$$(1.567-4.312\beta^{3.589}e^{(-0.259X)}) \quad \text{其中, } X=1+\zeta\sin\theta/\beta \quad 9\leq\alpha<15, 0.6<\tau\leq0.8$$

## C1.2.1

$$\text{SCF}=\tau\beta\gamma(-0.108+0.691\beta^{0.074}\sin^{1.422}\theta)(3.856+16630.21(\beta\gamma)^{0.098}e^{(-7.829X)})$$

$$(1.6-16.315\beta^{2.161}e^{(-1.453X)}) \quad \text{其中, } X=1+\zeta\sin\theta/\beta \quad 15\leq\alpha\leq18, 0.4\leq\tau\leq0.6$$

## C1.2.2

$$\text{SCF}=\tau\beta\gamma(-0.083+0.649\beta^{0.053}\sin^{1.478}\theta)(3.413+464.6(\beta\gamma)^{0.349}e^{(-6.195X)})$$

$$(1.582-8.37\beta^{2.722}e^{(-0.883X)}) \quad \text{其中, } X=1+\zeta\sin\theta/\beta \quad 15\leq\alpha\leq18, 0.6<\tau\leq0.8$$

在平面外弯矩作用下, 对弦杆

## C2.1

$$\text{SCF}=\tau\beta\gamma(-0.032+0.55\beta^{-0.24}\sin^{1.81}\theta)(2.63+(\beta\gamma)^{0.408}e^{(-1.111X)})(1.45-6.63\beta^{4.25}e^{(-0.21X)})$$

$$\text{其中, } X=1+\zeta\sin\theta/\beta \quad 9\leq\alpha<15$$

## C2.2

$$\text{SCF}=\tau\beta\gamma(-0.001+0.389\beta^{-0.026}\sin^{1.834}\theta)(4.324+0.449(\beta\gamma)^{2.014}e^{(-4.202X)})(1.797-12.194\beta^{3.203}e^{(-0.713X)})$$

$$\text{其中, } X=1+\zeta\sin\theta/\beta \quad 15\leq\alpha\leq18$$

## 第四章 各种方法所得 KK 节点与 K 节点 SCF 的分析比较

本章将进一步通过建立 K 节点的有限元模型计算其 SCF 值，并与相同几何尺寸、相同载荷条件的 KK 节点撑、弦杆的 SCF 有限元值比较，进一步证实其间存在差距。比较 KK 节点在三种荷载作用下参数方程与有限元所得的 SCF 值比较，进一步证明 KK 节点 SCF 参数方程的预测正确性。并比较 KK 节点有限元与 K 节点 NORSOK<sup>[24]</sup>/Kuang<sup>[1]</sup>所得撑、弦杆 SCF 值之间差距。并分析 KK 节点参数方程与 K 节点 NORSOK/Kuang 较保守的公式所得撑、弦杆 SCF 之间的差距。

### 4.1 KK 节点与 K 节点有限元所得 SCF 的分析比较

本节对 800 个 KK 节点与相同几何尺寸的 K 节点在三种荷载作用下有限元所得撑、弦杆的 SCF 进行比较分析，指出它们之间存在差距。KK 节点 SCF 比 K 节点 SCF 在某些情况下会大很多，从而证明了完全将 KK 节点看成两个 K 节点存在不安全性，对 KK 节点 SCF 进行研究还是有必要的。比较的 K、KK 节点几何参数数据见第二章表 2-3。

#### 4.1.1 轴向力作用

图 4-1(a)、4-1 (b)分别为在轴向力作用下，KK 节点与 K 节点撑、弦杆有限元所得 SCF 值之比统计图，相应的分析数据表 4-1 分别列出这一统计的均值、标准差的百分比，25、75、95 对应的百分位数、最小值、最大值和节点数。

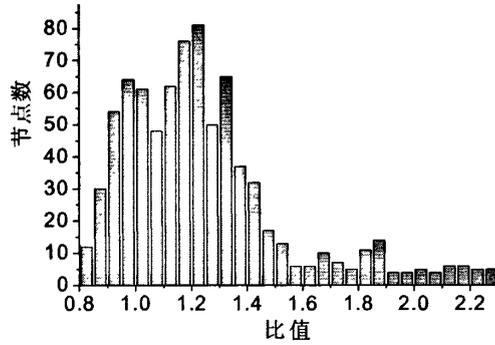
对撑杆  $P_{25}=1.03$ ，表明有 75% 的 KK 节点撑杆 SCF 的有限元值是 K 节点撑杆 SCF 的有限元值的 1.03 倍，最大值为 2.28，说明最大高出 2.28 倍。

对弦杆  $P_{25}=1.07$ ，表明有 75% 的 KK 节点撑杆 SCF 的有限元值是 K 节点撑杆 SCF 的有限元值的 1.07 倍，最大值为 2.19，说明最大高出 2.19 倍。

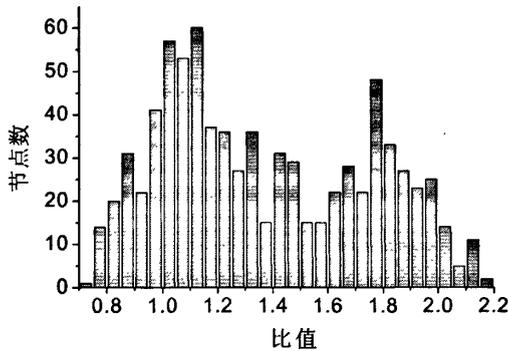
通过比较进一步说明了在轴向力作用下，KK 节点与 K 节点撑、弦杆 SCF 的有限元值之间的差距。

表 4-1 轴向力作用下的 KK 节点与 K 节点有限元所得 SCF 值之比统计

	均值	P25	P75	P95	最小值	最大值	节点数
撑杆	1.25	1.03	1.35	1.89	0.81	2.28	800
弦杆	1.37	1.07	1.72	1.98	0.74	2.19	800



(a) KK 节点有限元与 K 节点有限元撑杆所得 SCF 值之比统计图



(b) KK 节点有限元与 K 节点有限元弦杆所得 SCF 值之比统计图

图 4-1 KK 节点有限元与 K 节点有限元撑、弦杆所得 SCF 值之比统计图

### 4.1.2 平面内弯矩

图 4-2 (a)、4-2 (b) 分别为在平面内弯矩作用下，KK 节点与 K 节点撑、弦杆有限元所得 SCF 值之比统计图。相应的的分析数据表如表 4-2。

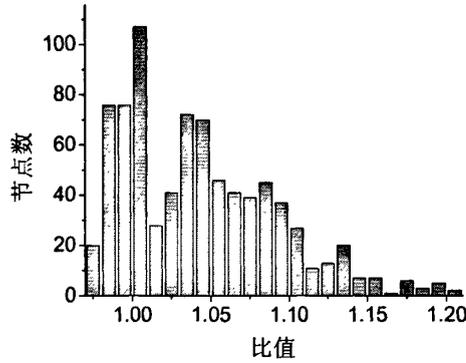
对撑杆  $P25=1$ ，表明有 75% 的 KK 节点撑杆 SCF 的有限元值大于 K 节点撑杆 SCF 的有限元值，最大值为 1.2，说明最大高出 20%。

对弦杆  $P25=1.05$ ，表明有 75% 的 KK 节点弦杆 SCF 的有限元值是 K 节点弦杆 SCF 的有限元值的 1.05 倍，最大值为 1.16，最大高出 16%。

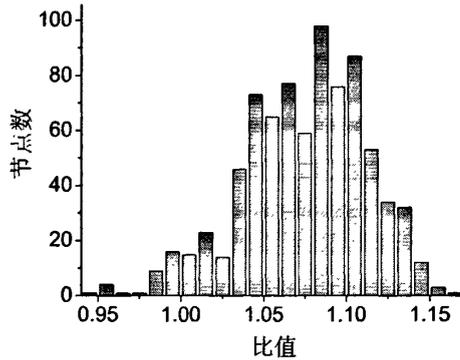
进一步说明了在平面内弯矩作用下，KK 节点与 K 节点撑、弦杆 SCF 的有限元值之间的差距。

表 4-2 平面内弯矩作用下的 KK 节点与 K 节点有限元所得 SCF 值之比统计

	均值	P25	P75	P95	最小值	最大值	节点数
撑杆	1.04	1	1.08	1.14	0.97	1.2	800
弦杆	1.07	1.05	1.1	1.14	0.94	1.16	800



(a) KK 节点有限元与 K 节点有限元撑杆所得 SCF 值之比统计图



(b) KK 节点有限元与 K 节点有限元弦杆所得 SCF 值之比统计图

图 4-2 KK 节点有限元与 K 节点有限元撑、弦杆所得 SCF 值之比统计图

### 4.1.3 平面外弯矩

图 4-3 (a)、4-3 (b)分别为平面外弯矩作用下, KK 节点与 K 节点撑、弦杆有限元所得 SCF 值之比统计图。相应的的分析数据表如表 4-3。

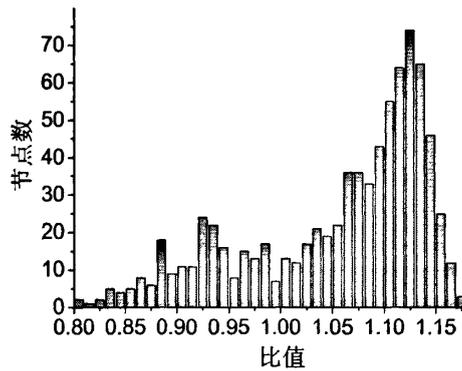
对撑杆 P25=1, 表明有 75% 的 KK 节点撑杆 SCF 的有限元值大于 K 节点撑杆 SCF 的有限元值, 最大值为 1.17, 最大高出 17%。

对弦杆均值为 1, 表明有 50% 的 KK 节点撑杆 SCF 的有限元值大于 K 节点撑杆 SCF 的有限元值, 最大值为 1.55, 最大高出 55%。

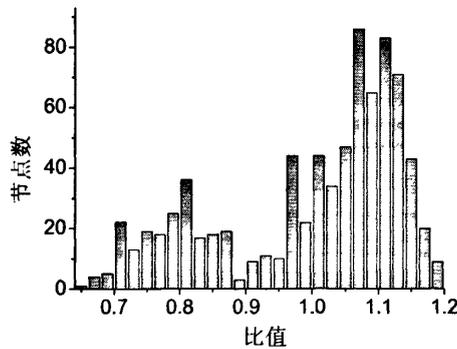
进一步说明了在平面外弯矩作用下，KK 节点与 K 节点撑、弦杆 SCF 的有限元值之间的差距。

表 4-3 平面外弯矩作用下的 KK 节点与 K 节点有限元所得 SCF 值之比统计

	均值	P25	P75	P95	最小值	最大值	节点数
撑杆	1.05	1	1.15	1.17	0.8	1.17	800
弦杆	1	0.89	1.11	1.15	0.66	1.55	799



(a) 平面外弯矩作用下，KK 节点有限元与 K 节点有限元撑杆所得 SCF 值之比统计图



(b) 平面外弯矩作用下，KK 节点有限元与 K 节点有限元弦杆所得 SCF 值之比统计图

图 4-3 平面外弯矩作用下，KK 节点有限元与 K 节点有限元撑、弦杆所得 SCF 值之比统计图

## 4.2 KK 节点参数方程与有限元所得 SCF 值之比分析

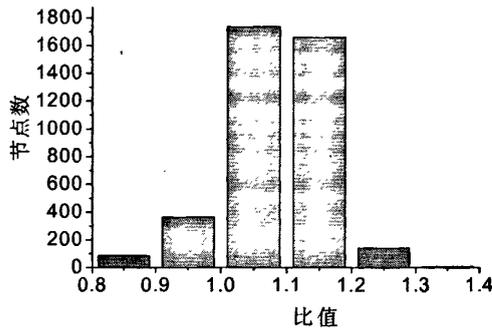
本节进一步比较 KK 节点在三种荷载作用下参数方程与有限元所得撑、弦杆的 SCF 值, 进一步证明 KK 节点 SCF 参数方程的预测正确性。

### 4.2.1 轴向力作用

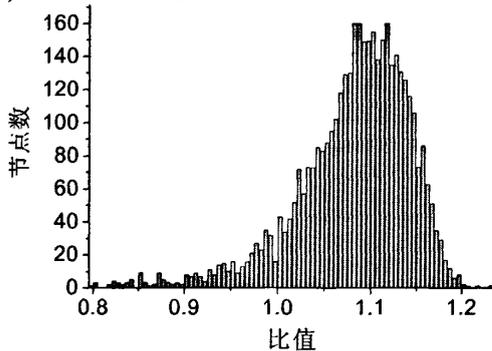
图 4-4(a)、4-4(b)分别为在轴向力作用下, KK 节点参数方程与有限元所得撑、弦杆的 SCF 值之比统计图。相应的分析数据表 4-4, 分别列出这一统计的均值、标准差的百分比, 25、75、95 对应的百分位数、最小值、最大值和节点数。进一步分析了在轴向力作用下, KK 节点 SCF 参数方程与有限元值的拟合程度。

表 4-4 轴向力作用下, KK 节点参数方程与有限元所得 SCF 值之比统计

	均值	标准差 (%)	P25	P75	P95	最小值	最大值	节点数
撑杆	1.10	1.49	1.03	1.18	1.28	0.70	1.46	3000
弦杆	1.11	7.03	1.07	1.15	1.21	0.87	1.34	3000



(a) KK 节点撑杆参数方程与有限元所得 SCF 值之比统计图



(b) KK 节点弦杆参数方程与有限元所得 SCF 值之比统计图

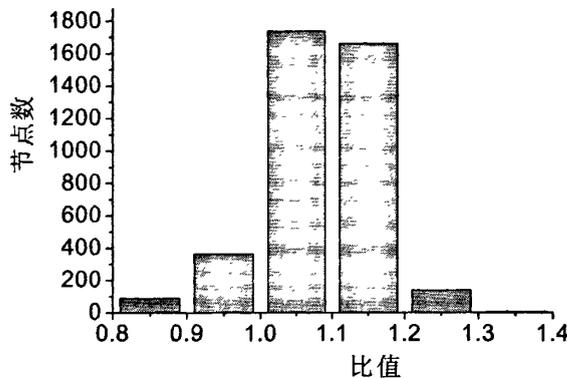
图 4-4 轴向力作用下, KK 节点撑、弦杆参数方程与有限元所得 SCF 值之比统计图

4.2.2 平面内弯矩

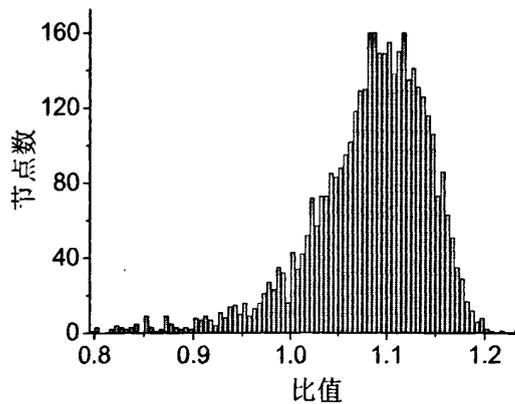
图 4-5 (a)、4-5 (b)分别为平面内弯矩作用下, KK 节点参数方程与有限元所得 SCF 值之比统计图。相应的分析数据如表 4-5 所示。进一步分析了平面内弯矩作用下, KK 节点 SCF 参数方程与有限元值的拟合程度。

表 4-5 平面内弯矩作用下, K 节点参数方程与有限元所得 SCF 值之比统计

	均值	标准差 (%)	P25	P75	P95	最小值	最大值	节点数
撑杆	1.08	13.6	1.04	1.13	1.19	0.80	1.75	4000
弦杆	1.08	6.20	1.05	1.13	1.16	0.80	1.23	4000



(a) KK 节点撑杆参数方程与有限元所得 SCF 值之比统计图



(b) KK 节点弦杆参数方程与有限元所得 SCF 值之比统计图

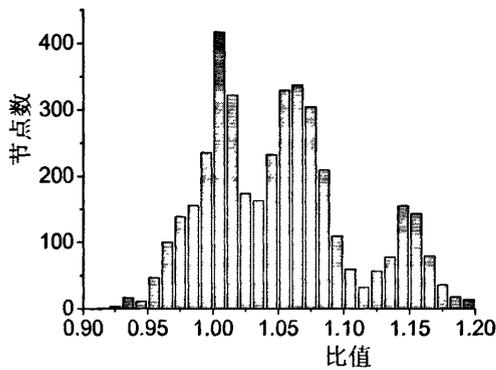
图 4-5 平面内弯矩作用下, KK 节点参数方程与有限元所得 SCF 值之比统计图

### 4.2.3 平面外弯矩

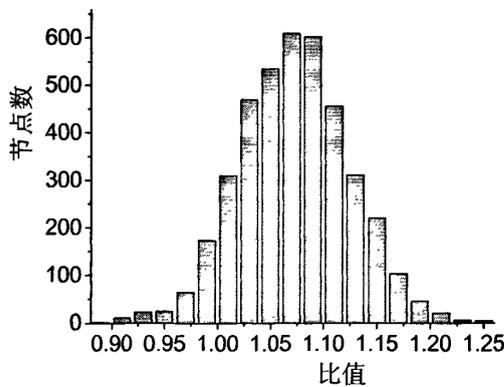
图 4-6 (a)、4-6 (b)分别为在平面外弯矩作用下，KK 节点参数方程与有限元所得撑、弦杆的 SCF 值之比统计图。相应的分析数据如表 4-6 所示。进一步分析了平面外弯矩作用下，KK 节点 SCF 参数方程与有限元值的拟合程度。

表 4-6 平面外弯矩作用下，KK 节点参数方程与有限元所得 SCF 值之比统计

	均值	标准差 (%)	P25	P75	P95	最小值	最大值	节点数
撑杆	1.05	5.67	1.00	1.08	1.15	0.86	1.34	4000
弦杆	1.07	5.87	1.04	1.11	1.16	0.89	1.25	4000



(a) KK 节点撑杆参数方程与有限元所得 SCF 值之比统计图



(b) KK 节点弦杆参数方程与有限元所得 SCF 值之比统计图

图 4-6 在平面外弯矩作用下，KK 节点参数方程与有限元所得 SCF 值之比统计图

### 4.3 KK 节点有限元与 K 节点参数方程所得 SCF 值之比分析

比较 KK 节点有限元与 K 节点 NORSOK/Kuang 所得撑、弦杆 SCF 值之间差距,进一步说明,计算 K 节点 SCF 的经验公式不能完全代替计算 KK 节点 SCF。

#### 4.3.1 轴向力作用

表 4-7 为轴向力作用下, KK 节点有限元与 K 节点 NORSOK/Kuang 所得撑杆 SCF 值之比统计。比较数据可知,对 K 节点撑杆 SCF 的计算, Kuang 比 NORSOK 结果大。图 4-7 为 KK 节点有限元与 K 节点撑杆保守的经验公式 Kuang 的 SCF 之比统计图。KK 节点的撑杆有限元 SCF 值比 Kuang 计算的 K 节点撑杆 SCF 值普遍偏大,由 25、75、95 对应的百分位数可见偏大的程度,  $P_{75}=1.57$ , 表明在统计的数据点中,有 25% 的值大于 1.57, 最大值达到 3.63。在轴向力作用下,计算 K 节点撑杆 SCF 保守的 Kuang 公式已不适合 KK 节点撑杆 SCF 的计算。

表 4-8 为轴向力作用下, KK 节点有限元与 K 节点 NORSOK/Kuang 所得弦杆 SCF 值之比统计。比较数据可知,对 K 节点弦杆 SCF 的计算, NORSOK 比 Kuang 结果大。图 4-8 为 KK 节点有限元与 K 节点弦杆保守的经验公式 NORSOK 的 SCF 之比统计图。KK 节点弦杆有限元 SCF 值比 NORSOK 计算的 K 节点弦杆 SCF 值普遍偏大,有极少数偏小的情况。 $P_{25}=1.04$ , 表明在统计的数据点中,有 75% 的值大于 1.04,  $P_{75}=1.21$  表明有 25% 的值大于 1.21。在轴向力作用下,计算 K 节点弦杆 SCF 保守的 NORSOK 公式已不适合 KK 节点弦杆 SCF 的计算。

比较在轴向力作用下, KK 节点与 K 节点撑弦杆的 SCF 可知,相同几何尺寸的 KK 节点与 K 节点相比,应力集中现象更加严重。对撑杆应力集中系数增加尤其明显。

表 4-7 轴向力作用下, KK 节点有限元与 K 节点 NORSOK/Kuang 公式所得撑杆 SCF 值之比统计

	P25	P75	P95	最小值	最大值	节点数
NORSOK	1.35	1.75	2.43	0.99	3.26	3000
Kuang	0.91	1.57	2.44	0.52	3.63	3000

表 4-8 轴向力作用下, KK 节点有限元与 K 节点 NORSOK/Kuang 公式所得弦杆 SCF 值之比统计

	P25	P75	P95	最小值	最大值	节点数
NORSOK	1.04	1.21	1.45	0.75	2.00	3000
Kuang	1.05	1.35	1.65	0.7	2.1	3000

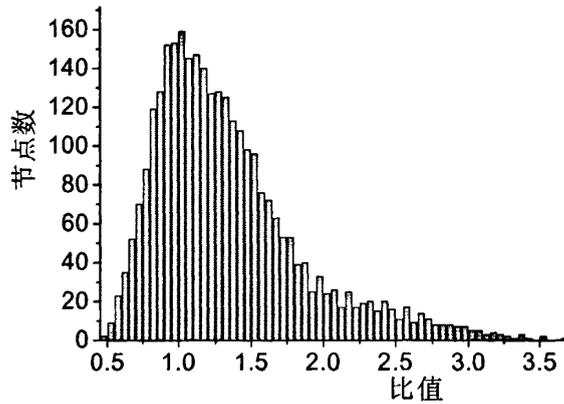


图 4-7 轴向力作用下, KK 节点有限元 K 节点保守的 Kuang 所得撑杆 SCF 值之比统计图

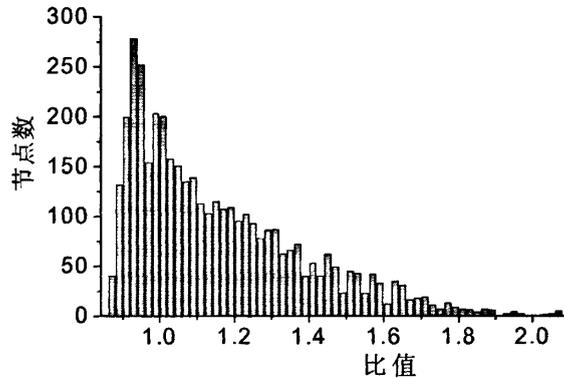


图 4-8 轴向力作用下, KK 节点有限元与 K 节点保守的 NORSOK 所得弦杆 SCF 值之比统计图

### 4.3.2 平面内弯矩

表 4-9 为平面内弯矩作用下, KK 节点有限元与 K 节点 NORSOK/Kuang 所得撑杆 SCF 值之比统计, 比较数据可知, 对 K 节点撑杆 SCF 的计算, NORSOK 比 Kuang 结果大。图 4-9 为 KK 节点有限元与 K 节点撑杆保守的 NORSOK 公式的 SCF 之比统计图。KK 节点的撑杆有限元 SCF 值比 NORSOK 计算的 K 节点撑杆 SCF 值普遍偏大, 由 25、75、95 对应的百分位数可见偏大的程度,  $P_{75}=1.33$ , 表明在统计的数据点中, 有 25% 的值大于 1.33, 最大值达到 1.87。

表 4-10 为平面内弯矩作用下, KK 节点有限元与 K 节点 NORSOK/Kuang 所得弦杆 SCF 值之比统计。比较数据可知, 对 K 节点弦杆 SCF 的计算, NORSOK 比 Kuang 结果大。图 4-10 为 KK 节点有限元与 K 节点弦杆保守的 NORSOK 公

式的 SCF 之比统计图。数据表明, KK 节点弦杆有限元 SCF 值比 NORSOK 计算的 K 节点撑杆 SCF 值普遍偏大, 有极少数偏小的情况。由 25、75、95 对应的百分位数可见偏大的程度,  $P25=0.97$ , 表明在统计的数据点中, 有 75% 的比值大于 0.97,  $P75=1.29$  表明有 25% 的比值大于 1.29。

比较在平面内弯矩作用下, KK 节点与 K 节点撑弦杆的 SCF 可知, 相同几何尺寸的 KK 节点与 K 节点相比, 应力集中现象更加严重。计算 K 节点撑、弦杆 SCF 的保守的 NORSOK 公式已不适合计算 KK 节点。

表 4-9 平面内弯矩作用下, KK 节点有限元值与 K 节点 NORSOK/Kuang 所得撑杆 SCF 值之比统计

	P25	P75	P95	最小值	最大值	节点数
NORSOK	1.07	1.33	1.48	0.65	1.87	4000
Kuang	1.31	1.53	1.77	0.92	2.34	4000

表 4-10 平面内弯矩作用下, KK 节点有限元值与 K 节点 NORSOK/Kuang 所得弦杆 SCF 值之比统计

	P25	P75	P95	最小值	最大值	节点数
NORSOK	0.97	1.29	1.62	0.85	2.07	4000
Kuang	1.68	1.96	2.26	1.51	2.61	4000

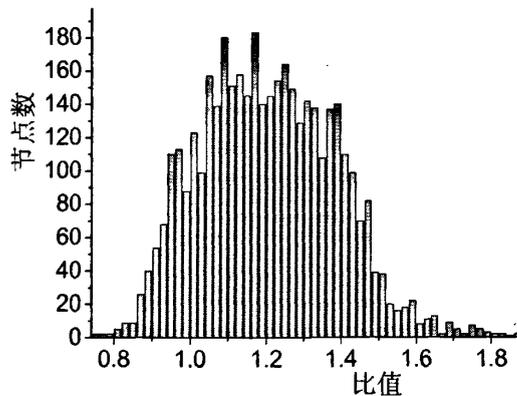


图 4-9 平面内弯矩作用下, KK 节点有限元与 K 节点 NORSOK 所得撑杆 SCF 值之比统计

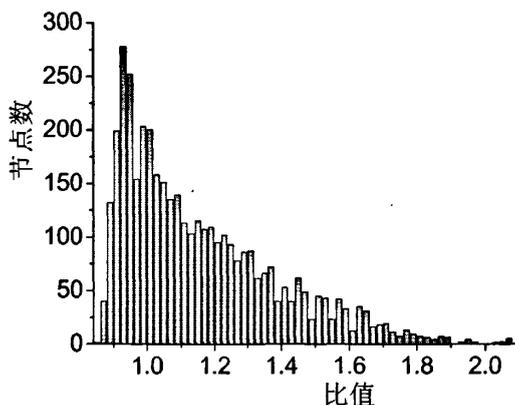


图 4-10 平面内弯矩作用下，KK 节点有限元与 K 节点 NORSOK 所得弦杆 SCF 值之比统计

### 4.3.3 平面外弯矩

因为 Kuang 公式没有给出平面 K 节点两根撑杆受平面外弯矩作用时的 SCF 方程。本小节只是对 KK 节点有限元与 K 节点 NORSOK 所得的 SCF 值比较。

图 4-11 (a)、4-11 (b)为在平面外弯矩作用下，KK 节点有限元与 K 节点撑、弦杆 NORSOK 所得 SCF 值之比统计图。相应的的分析数据如表 4-11。

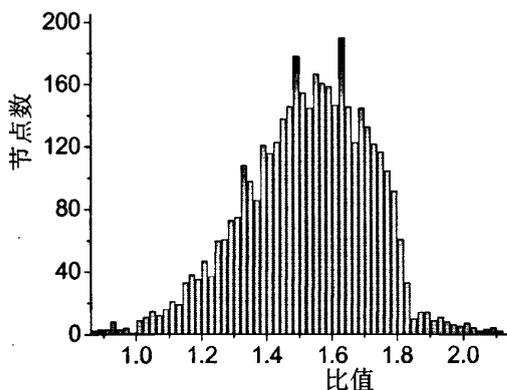
图 4-11 (a)可表明，KK 节点撑杆有限元 SCF 值比 NORSOK 计算的 K 节点撑杆 SCF 值普遍偏大，有极少数偏小的情况。由 25、75、95 对应的百分位数可见偏大的程度， $P_{25}=1.4$ ，表明在统计的 4000 个节点数据中，有 75%的比值大于 1.4。

图 4-11 (b)可表明，KK 节点弦杆有限元 SCF 值比 NORSOK 计算的 K 节点弦杆 SCF 值普遍偏大，有极少数偏小的情况。由 25、75、95 对应的百分位数可见偏大的程度， $P_{25}=1.0$ ，表明在统计的 4000 个节点数据中，有 75%的值大于 1.0， $P_{75}=1.39$ 表明有 25%的比值大于 1.39。

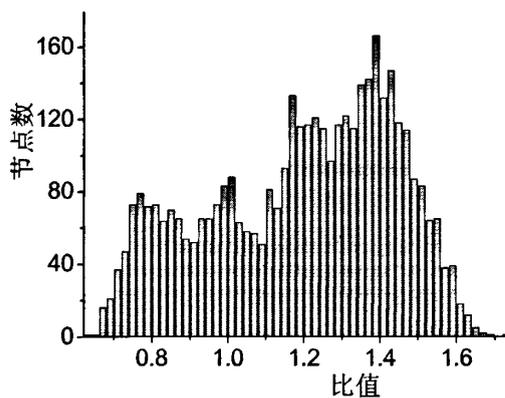
可见，在平面外弯矩作用下，相同几何尺寸的 KK 节点与 K 节点相比，应力集中现象更加严重。对撑杆应力集中系数增加尤其明显。计算 K 节点撑、弦杆 SCF 的 NORSOK 公式已不适合计算 KK 节点。

表 4-11 平面外弯矩作用下, KK 节点有限元与 K 节点 NORSOK 所得撑、弦杆的 SCF 值之比统计

	P25	P75	P95	最小值	最大值	节点数
撑杆	1.4	1.66	1.79	0.87	2.1	4000
弦杆	1.0	1.39	1.53	0.63	1.73	4000



(a) KK 节点有限元与 K 节点 NORSOK 所得撑杆 SCF 值之比统计图



(b) KK 节点有限元与 K 节点 NORSOK 所得弦杆 SCF 值之比统计图

图 4-11 平面外弯矩作用下, KK 节点有限元与 K 节点 NORSOK 所得撑、弦杆 SCF 值之比统计图

#### 4.4 KK 节点参数方程与 K 节点经验公式所得 SCF 值之比分析

本节分析比较 KK 节点参数方程与 K 节点 NORSOK/Kuang 较保守的经验公式所得撑、弦杆 SCF 之间的差距。进一步说明，K 节点 SCF 的经验公式不适合代替 KK 节点参数方程使用。

##### 4.4.1 轴向力作用

图 4-12 (a)、4-12 (b)为在轴向力作用下，KK 节点参数方程与 K 节点保守的经验公式所得撑、弦杆 SCF 值之比统计，表 4-12 为相应的统计数据。

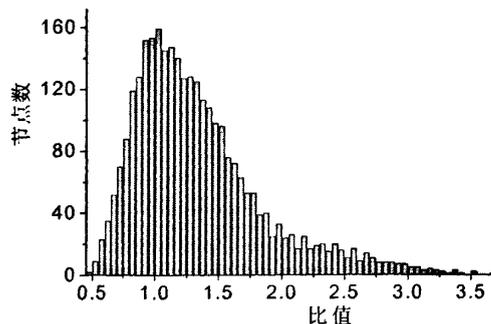
KK 节点撑杆参数方程 SCF 值比 Kuang 计算的 K 节点撑杆 SCF 值普遍偏大，由 25、75、95 对应的百分位数可见偏大的程度， $P75=1.57$ ，表明在统计的数据点中，有 25%的值大于 1.57，最大值达到 3.66。

KK 节点弦杆参数方程 SCF 值比 NORSOK 计算的 K 节点撑杆 SCF 值普遍偏大，有极少数偏小的情况。由 25、75、95 对应的百分位数可见偏大的程度， $P25=1.14$ ，表明在统计的数据点中，有 75%的值大于 1.14 倍， $P75=1.35$  表明有 25%的值大于 1.35 倍。

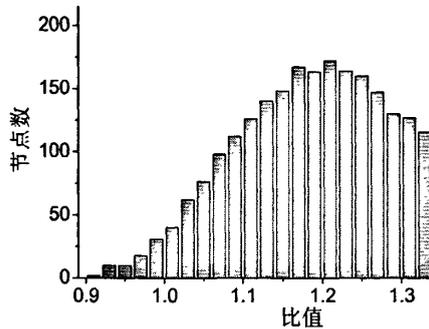
比较在轴向力作用下，KK 节点参数方程比 K 节点保守的经验公式所得撑、弦杆 SCF 值普遍偏大，计算 K 节点 SCF 的经验公式不适合计算 KK 节点的 SCF。

表 4-12 轴向力作用下，KK 节点参数方程与 K 节点保守的经验公式所得撑、弦杆 SCF 值之比统计

		P25	P75	P95	最小值	最大值	节点数
撑杆	KK(参数方程)/K(Kuang)	0.97	1.57	2.44	0.48	3.66	3000
弦杆	KK(参数方程)/K(NORSOK)	1.14	1.35	1.59	0.91	1.94	3000



(a) KK 节点参数方程与 K 节点 Kuang 所得撑杆 SCF 值之比统计图



(b) KK 节点参数方程与 K 节点 NORSOK 所得弦杆 SCF 值之比统计图

图 4-12 轴向力作用下, KK 节点参数方程与 K 节点保守的经验公式所得撑、弦杆 SCF 值之比统计图

#### 4.4.2 平面内弯矩

图 4-13 (a)、4-13 (b)为在平面内弯矩作用下, KK 节点参数方程与 K 节点保守的经验公式所得撑、弦杆 SCF 值之比统计, 表 4-13 为相应的统计数据。

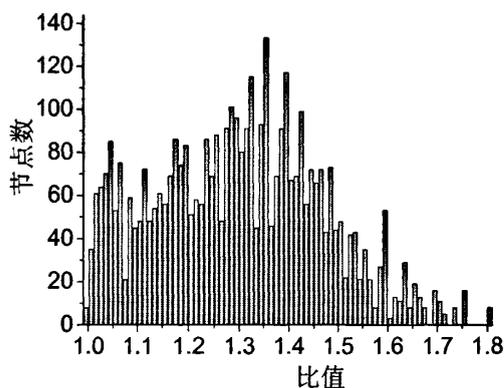
KK 节点的撑杆参数方程 SCF 值比 NORSOK 计算的 K 节点撑杆 SCF 值普遍偏大, 由 25、75、95 对应的百分位数可见偏大的程度,  $P75=1.42$ , 表明在统计的数据点中, 有 25%的数据大于 1.33 倍, 最大值达到 1.87。在平面内弯矩作用下, 计算 K 节点撑杆的 NORSOK 公式已不适合 KK 节点撑杆 SCF 的计算。

KK 节点弦杆参数方程 SCF 值比 NORSOK 计算的 K 节点撑杆 SCF 值普遍偏大, 有极少数偏小的情况。由 25、75、95 对应的百分位数可见偏大的程度,  $P25=1.06$ , 表明在统计的数据点中, 有 75%的比值大于 1.06,  $P75=1.38$  表明有 25%的比值大于 1.38。

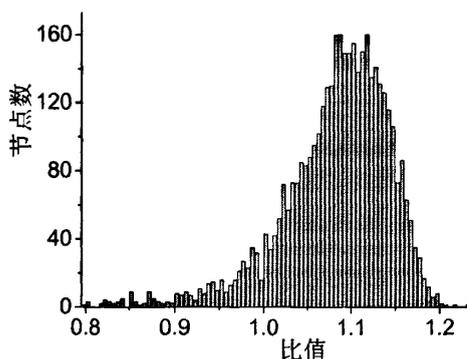
比较在平面内弯矩作用下, KK 节点参数方程与 K 节点保守的 NORSOK 公式所得撑、弦杆的 SCF 可知, 相同几何尺寸的 KK 节点与 K 节点相比, KK 节点参数方程 SCF 值比 NORSOK 计算的 K 节点撑、弦杆的 SCF 值普遍偏大, 对撑杆尤其大出很多。计算 K 节点 SCF 的 NORSOK 公式不适合计算 KK 节点的 SCF。

表 4-13 平面内弯矩作用下，KK 节点参数方程与 K 节点保守的 NORSOK 公式所得撑、弦杆 SCF 值之比统计

	P25	P75	P95	最小值	最大值	节点数
撑杆	1.17	1.42	1.59	0.99	1.80	4000
弦杆	1.06	1.38	1.70	0.90	2.34	4000



(a) KK 节点参数方程与 K 节点 NORSOK 所得撑杆 SCF 值之比统计图



(b) KK 节点参数方程与 K 节点 NORSOK 所得弦杆 SCF 值之比统计图

图 4-13 在平面内弯矩作用下，KK 节点参数方程与 K 节点保守的 NORSOK 公式所得撑、弦杆 SCF 值之比统计图

#### 4.4.3 平面外弯矩

图 4-14 (a)、4-14 (b)为在平面外弯矩作用下，KK 节点参数方程与 K 节点 NORSOK 公式所得撑、弦杆 SCF 值之比统计，表 4-14 为相应的统计数据。

KK 节点撑杆参数方程 SCF 值比 NORSOK 计算的 K 节点撑杆 SCF 值普遍

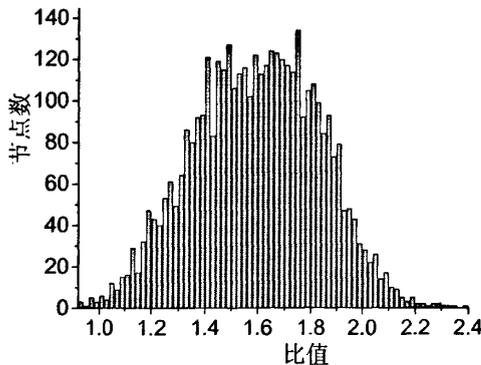
偏大，有极少数偏小的情况。由 25、75、95 对应的百分位数可见偏大的程度， $P_{25}=1.42$ ，表明在统计的 4000 个节点数据中，有 75% 的比值大于 1.42。最大值为 2.38，表明 KK 节点参数方程的撑杆 SCF 值比 K 节点 NORSOK 的撑杆 SCF 值最大大出 138%。

KK 节点弦杆参数方程 SCF 值比 NORSOK 计算的 K 节点撑杆 SCF 值普遍偏大，有极少数偏小的情况。由 25、75、95 对应的百分位数可见偏大的程度， $P_{25}=1.05$ ，表明在统计的 4000 个节点数据中，有 75% 的 KK 节点参数方程的弦杆 SCF 值比 K 节点 NORSOK 的弦杆 SCF 值大 5%， $P_{75}=1.39$ ，表明 25% KK 节点参数方程的弦杆 SCF 值比 K 节点 NORSOK 的弦杆 SCF 值大 39%，最大值为 1.75，表明 KK 节点参数方程的弦杆 SCF 值比 K 节点 NORSOK 的弦杆 SCF 值最大大出 75%。

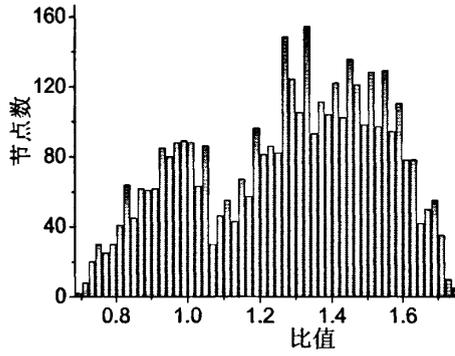
比较在平面外弯矩作用下，KK 节点参数方程与 K 节点的 NORSOK 公式所得撑、弦杆的 SCF 可知，相同几何尺寸的 KK 节点与 K 节点相比，KK 节点参数方程 SCF 值比 NORSOK 计算的 K 节点撑、弦杆的 SCF 值普遍偏大明显，计算 K 节点 SCF 的 NORSOK 公式不适合计算 KK 节点的 SCF。

表 4-14 平面外弯矩作用下，KK 节点参数方程与 K 节点 NORSOK 公式所得撑、弦杆 SCF 值之比统计

	P25	P75	P95	最小值	最大值	节点数
撑杆	1.42	1.77	1.96	0.92	2.38	4000
弦杆	1.05	1.48	1.64	0.70	1.75	4000



(a) KK 节点参数方程与 K 节点 NORSOK 所得撑杆 SCF 值之比统计图



(b) KK 节点参数方程与 K 节点 NORSOK 所得弦杆 SCF 值之比统计图  
图 4-14 在平面外弯矩作用下, KK 节点参数方程与 K 节点 NORSOK  
公式所得撑、弦杆 SCF 值之比统计图

## 第五章 参数对 KK 节点 SCF 的影响分析

本章分析 KK 节点 SCF 随参数变化的规律，并与参数对 K 节点 SCF 的影响比较，指出 KK 节点 SCF 比 K 节点 SCF 增大的主要因素，从而了解 K 节点经验公式在哪种情况下更不适用于 KK 节点，为节点的设计与校核提供指导。

### 5.1 $\tau$ 的变化对 KK 节点 SCF 值的影响

#### 5.1.1 轴向力作用

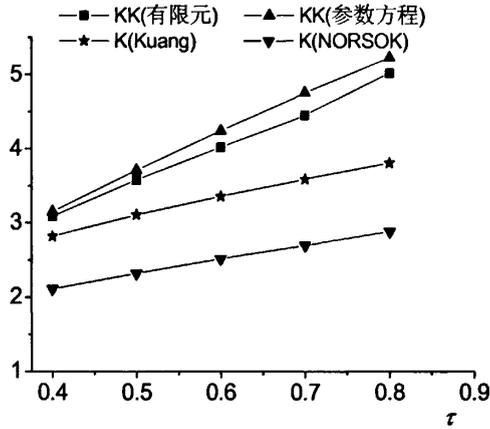
图 5-1、5-2 为不同方法所得 K 节点和 KK 节点在轴向荷载作用下撑、弦杆 SCF 随  $\tau$  的变化。

(1) KK 管节点同 K 管节点一样，撑、弦杆的 SCF 值随  $\tau$  的增加而增大。

(2) 有限元法所得 KK 管节点撑杆的 SCF 值与 K 管节点计算撑杆值较大的 Kuang 结果相比，对比图 5-1，当  $\beta$  较小时，Kuang 值较大，当  $\beta$  较大时，KK 节点中撑杆 SCF 值比保守的 Kuang 结果还大，且  $\tau$  的增加将导致此差距增大，用计算 K 节点撑杆的 Kuang 公式计算 KK 节点偏于不安全。

(3) 对比图 5-2，KK 节点的弦杆 SCF 值当  $\beta$  较大时，比保守的 NORSOK 结果还大，且  $\tau$  的增加将导致此差距增大。用计算 K 节点弦杆的 NORSOK 公式计算 KK 节点偏于不安全。

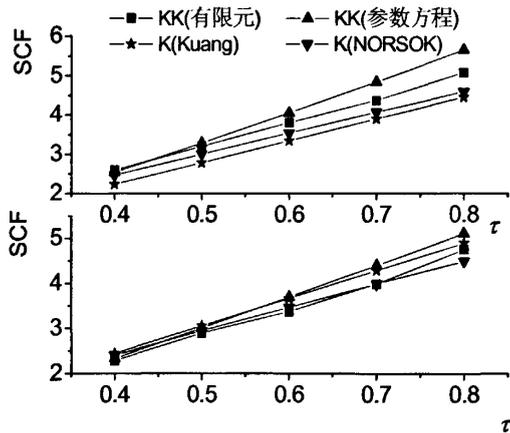
$\tau$  的增加，即撑弦管的厚度比增加，对比，K 节点与 KK 节点的 SCF 值，KK 节点应力集中现象更加明显，尤其对有较大  $\beta$  的节点，撑杆的直径相对增加，使这一影响更加明显。



上(a)  $\alpha=12 \theta=35^\circ \gamma=30 \zeta=0.05 \beta=0.6$

下(b)  $\alpha=12 \theta=35^\circ \gamma=30 \zeta=0.05 \beta=0.4$

图 5-1 不同方法所得 K 节点和 KK 节点在轴向荷载作用下撑杆 SCF 随  $\tau$  的变化



上(a)  $\alpha=12 \theta=35^\circ \gamma=30 \zeta=0.05 \beta=0.6$

下(b)  $\alpha=12 \theta=35^\circ \gamma=30 \zeta=0.05 \beta=0.4$

图 5-2 不同方法所得 K 节点和 KK 节点在轴向荷载作用下弦杆 SCF 随  $\tau$  的变化

### 5.1.2 平面内弯矩

图 5-3 、5-4 为不同方法所得 K 节点和 KK 节点在平面内弯矩作用下撑、弦杆 SCF 随  $\tau$  的变化。

- (1) KK 管节点同 K 管节点一样，撑、弦杆的 SCF 值随  $\tau$  的增加而增大。
- (2) 有限元法所得 KK 管节点撑杆的 SCF 值与 K 管节点计算撑杆值较大的

NORSOK 结果相比, 增大的差距随  $\tau$  的增加而增大, 如图 5-3 所示。用计算 K 节点撑杆 SCF 的 NORSOK 公式计算 KK 节点撑杆 SCF 偏于不安全。

(3) 有限元法所得 KK 管节点弦杆的 SCF 值与 K 管节点计算弦杆值较大的 NORSOK 结果相比, 增大的差距随  $\tau$  的增加将增大, 如图 5-4 所示。用计算 K 节点弦杆 SCF 的 NORSOK 公式计算 KK 节点弦杆 SCF 偏于不安全。

$\tau$  的增加, 即撑弦杆的厚度比增加, KK 节点比 K 节点应力集中现象更加明显。

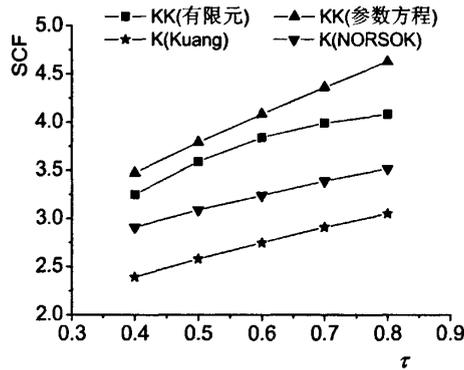


图 5-3 不同方法所得 K 节点和 KK 节点在平面内弯矩作用下撑杆 SCF 随  $\tau$  的变化( $\alpha=12^\circ \theta=45^\circ \gamma=25 \xi=0.2 \beta=0.3$ )

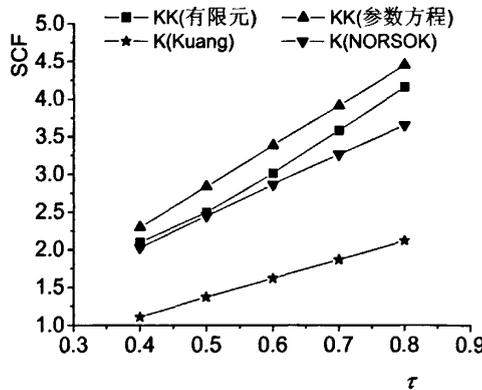


图 5-4 不同方法所得 K 节点和 KK 节点在平面内弯矩作用下弦杆 SCF 随  $\tau$  的变化( $\alpha=12^\circ \theta=45^\circ \gamma=25 \xi=0.2 \beta=0.3$ )

### 5.1.3 平面外弯矩

图 5-5、5-6 分别为不同方法所得 K 节点和 KK 节点在平面外弯矩作用下撑、弦杆 SCF 随  $\tau$  的变化。

- (1) KK 管节点同 K 管节点一样，撑、弦杆的 SCF 值随  $\tau$  的增加而增大。
- (2) 有限元法所得 KK 管节点撑、弦杆的 SCF 值与 K 管节点 NORSOK 结果相比，可知，随  $\tau$  的增加，KK 管节点与 K 管节点撑、弦杆的 SCF 增加的差距加大。

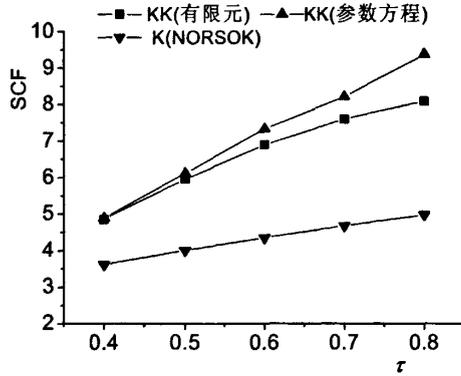


图 5-5 不同方法所得 K 节点和 KK 节点在平面外弯矩作用下撑杆 SCF 随  $\tau$  的变化( $\alpha = 12, \theta = 45^\circ, \gamma = 25, \xi = 0.3, \beta = 0.4$ )

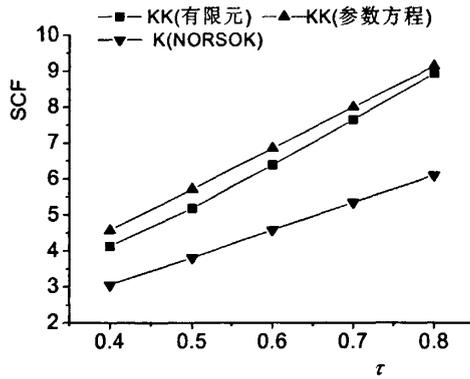


图 5-6 不同方法所得 K 节点和 KK 节点在平面外弯矩作用下弦杆 SCF 随  $\tau$  的变化( $\alpha = 12, \theta = 45^\circ, \gamma = 25, \xi = 0.3, \beta = 0.4$ )

## 5.2 $\beta$ 的变化对 KK 节点 SCF 值的影响

### 5.2.1 轴向力作用

图 5-7、5-8 为不同方法所得 K 节点和 KK 节点在轴向荷载作用下撑、弦杆 SCF 随  $\beta$  的变化。

(1) 同 K 节点撑、弦杆保守的经验公式所得 SCF 值随  $\beta$  的变化不同, KK 管节点有限元所得撑、弦杆的 SCF 值在  $\beta$  小于 0.5 时随  $\beta$  增加一直增大。而随  $\beta$  从 0.5 变化到 0.6, SCF 值有下降趋势。KK 管节点撑、弦杆的 SCF 在  $\beta$  在 0.5—0.6 之间时, SCF 达到最大值。

(2) 从图 5-7 看出, 对比有限元法所得 KK 管节点撑杆的 SCF 值与 K 管节点计算撑杆保守的 Kuang 结果相比, 可知, 随  $\beta$  一直增加, KK 管节点与 K 管节点撑杆的 SCF 增加的差距加大。 $\beta$  较大时, KK 节点撑杆 SCF 值比计算 K 节点撑杆保守的 Kuang 值大。

(3) 从图 5-8 看出, 对比有限元法所得 KK 管节点弦杆的 SCF 值与 K 管节点 NORSOK 结果相比, 可知, 随  $\beta$  增加到 0.5, KK 管节点与 K 管节点弦杆的 SCF 增加的差距一直在加大。而  $\beta$  从 0.5 到 0.6, 差距开始减少。 $\beta$  较大时, KK 节点弦杆 SCF 值比计算 K 节点弦杆保守的 NORSOK 值大。

较大的  $\beta$  值将导致 KK 节点撑杆、弦杆 SCF 值比 Kuang 和 NORSOK 两种方法计算的 K 节点撑杆、弦杆 SCF 值均大, 用计算 K 节点 SCF 的保守的经验公式不能代替 KK 节点计算 SCF。

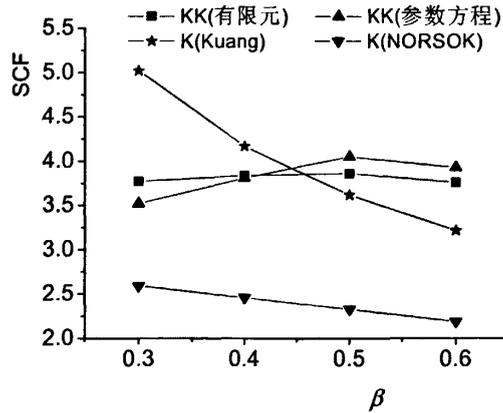


图 5-7 不同方法所得 K 节点和 KK 节点在轴向荷载作用下撑杆 SCF 随  $\beta$  的变化  
( $\alpha=12$   $\theta=45^\circ$   $\gamma=10$   $\zeta=0.15$   $\tau=0.5$ )

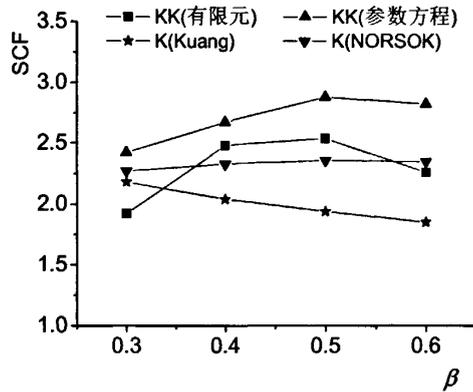


图 5-8 不同方法所得 K 节点和 KK 节点在轴向荷载作用下弦杆 SCF 随  $\beta$  的变化 ( $\alpha=12$   $\theta=45^\circ$   $\gamma=10$   $\zeta=0.15$   $\tau=0.5$ )

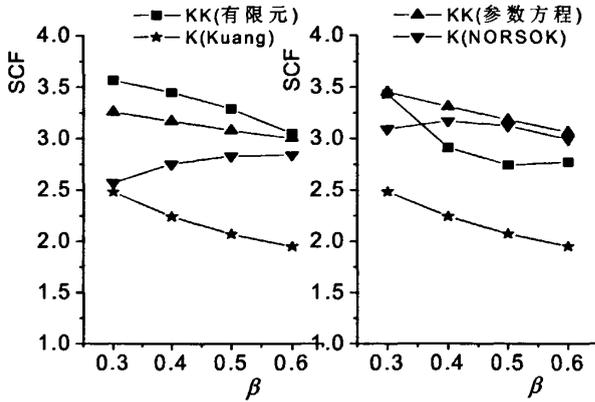
### 5.2.2 平面内弯矩

图 5-9、5-10 为不同方法所得 K 节点和 KK 节点在平面内弯矩作用下撑、弦杆 SCF 随  $\beta$  的变化。

(1) 同保守的 NORSOK 计算的 K 节点的撑、弦杆 SCF 随  $\beta$  的变化不同, KK 管节点有限元所得撑弦杆 SCF 值随  $\beta$  的增加值有所降低。相对撑杆, KK 节点弦杆的 SCF 值随  $\beta$  的增加降低较小。

(2) 随  $\beta$  的增加, 在  $\beta \leq 0.5$  时, KK 管节点撑、弦杆的 SCF 有限元值与 K 管节点的保守的 NORSOK 值之间增加的差距减少, 如图 5-9 (a) 所示。对个别节点, 随  $\beta$  的增加, KK 管节点撑杆的 SCF 有限元值与 K 管节点的保守的 NORSOK 值之间增加的差距先减少后增加, 如图 5-9 (b) 所示。

较小的  $\gamma$  值将导致 KK 节点撑杆 SCF 值比 Kuang 和 NORSOK 两种方法计算的 K 节点撑杆 SCF 值均大, 用计算 K 节点 SCF 的保守的经验公式不能代替 KK 节点计算 SCF。



左(a)  $\alpha=9, \theta=35^\circ, \gamma=10, \xi=0.3, \tau=0.6$

右(b)  $\alpha=9, \theta=35^\circ, \gamma=25, \xi=0.3, \tau=0.6$

图 5-9 不同方法所得 K 节点和 KK 节点在平面内弯矩作用下撑杆 SCF 随  $\beta$  的变化

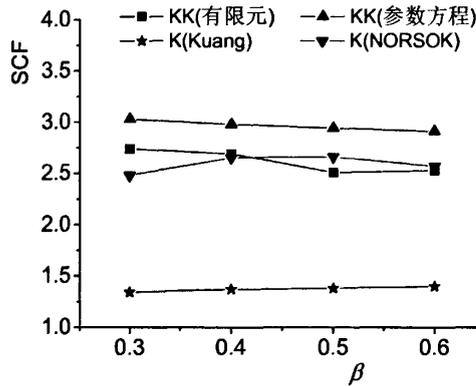


图 5-10 不同方法所得 K 节点和 KK 节点在平面内弯矩作用下弦杆 SCF 随  $\beta$  的变化 ( $\alpha=9, \theta=35^\circ, \gamma=25, \xi=0.3, \tau=0.6$ )

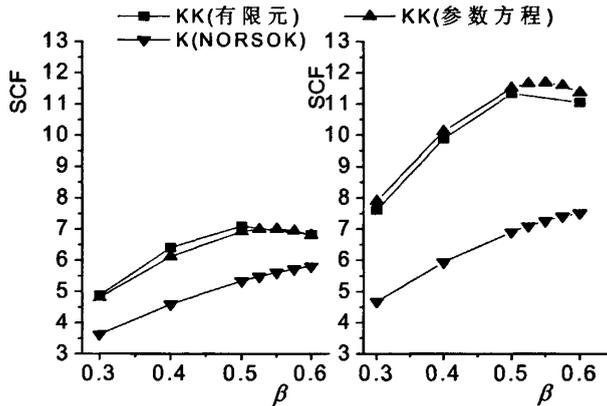
### 5.2.3 平面外弯矩

图 5-11、5-12 为不同方法所得 K 节点和 KK 节点在平面外弯矩作用下撑、弦杆 SCF 随  $\beta$  的变化。

(1) 同 K 节点撑、弦杆保守的经验公式所得 SCF 值随  $\beta$  的变化不同，KK 管节点有限元所得撑、弦杆的 SCF 值在  $\beta$  小于 0.5 时随  $\beta$  增加一直增大。而随  $\beta$  从 0.5 变化到 0.6，SCF 值有下降趋势。KK 管节点撑、弦杆的 SCF 在  $\beta$  在 0.5—0.6 之间时，SCF 达到最大值。

(2) 有限元法所得 KK 管节点撑、弦杆的 SCF 值与 K 管节点 NORSOK 结果相比, 可知, 随  $\beta$  增加到 0.5, KK 管节点与 K 管节点撑、弦杆的 SCF 增加的差距一直加大, 而  $\beta$  从 0.5 增加到 0.6, KK 管节点与 K 管节点撑、弦杆的 SCF 增加的差距有减小趋势。可以说, KK 管节点撑、弦杆的 SCF 与 K 管节点撑、弦杆的 NORSOK 的 SCF 值在  $\beta$  在 0.5—0.6 之间时, 差距达到最大值。

从图 5-11 看出, 当  $\tau$  较大时, KK 节点中撑杆 SCF 值与 K 节点的 NORSOK 撑杆 SCF 值相比, 其增加的差距随  $\beta$  的增加增大明显。



左 (a)  $\alpha=12, \theta=45^\circ, \gamma=25, \zeta=0.3, \tau=0.4$

右 (b)  $\alpha=12, \theta=45^\circ, \gamma=25, \zeta=0.3, \tau=0.7$

图 5-11 不同方法所得 K 节点和 KK 节点在平面外弯矩作用下撑杆 SCF 随  $\beta$  的变化

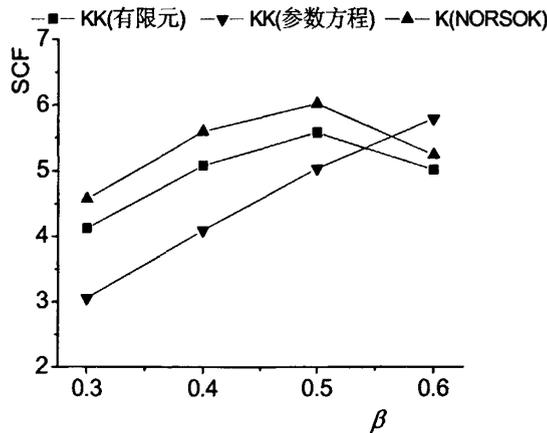


图 5-12 不同方法所得 K 节点和 KK 节点在平面外弯矩作用下弦杆 SCF 随  $\beta$  的变化( $\alpha=12, \theta=45^\circ, \gamma=25, \zeta=0.3, \tau=0.4$ )

### 5.3 $\zeta$ 的变化对 KK 节点 SCF 值的影响

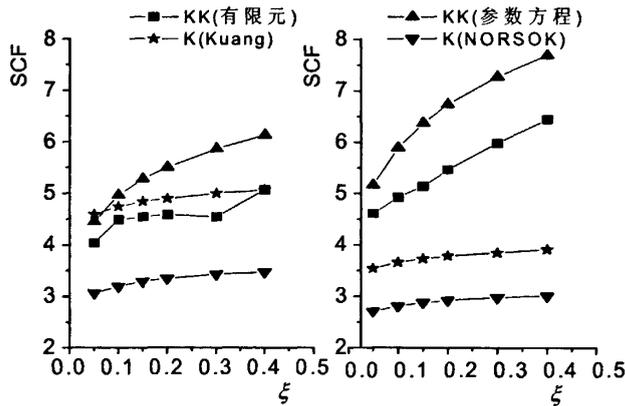
#### 5.3.1 轴向力作用

图 5-13、5-14 分别为不同方法所得 K 节点和 KK 节点在轴向力作用下撑、弦杆 SCF 随  $\zeta$  的变化。

(1) KK 管节点同 K 管节点一样，撑、弦杆的 SCF 值随  $\zeta$  的增加而增大。

(2) 从图 5-13 看出，对比有限元法所得 KK 管节点撑杆的 SCF 值与 K 管节点计算撑杆保守的 Kuang 结果，KK 管节点同 K 管节点撑杆的 SCF 值随  $\zeta$  的增加而差距加大。对比图 5-13 左右两图中两组不同  $\beta$  的节点，进一步说明  $\beta$  较大时，KK 节点撑杆的 SCF 值大于 K 节点撑杆保守的 Kuang 结果。

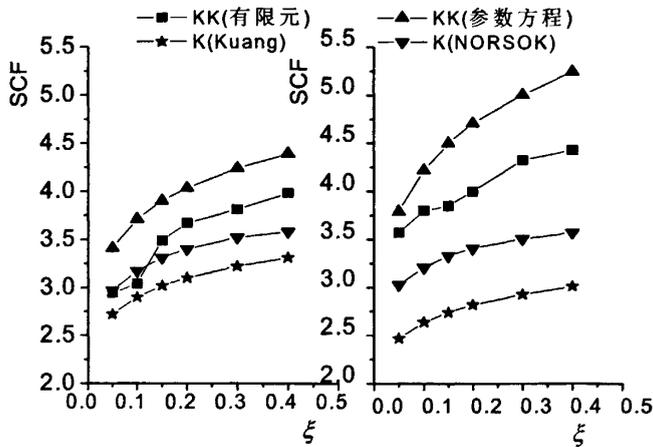
(3) 从图 5-14 看出，对比有限元法所得 KK 管节点弦杆的 SCF 值与 K 管节点 NORSOK 结果，KK 管节点同 K 管节点弦杆的 SCF 值随  $\zeta$  的增加而差距加大。对比图 5-14 左右两图中两组不同  $\beta$  的节点，进一步说明  $\beta$  较大时，KK 节点弦杆的 SCF 值大于 K 节点弦杆保守的 NORSOK 结果。



左(a)  $\alpha=12 \theta=55^\circ \gamma=15 \beta=0.4 \tau=0.5$

右(b)  $\alpha=12 \theta=55^\circ \gamma=15 \beta=0.6 \tau=0.5$

图 5-13 不同方法所得 K 节点和 KK 节点在轴向荷载作用下撑杆 SCF 随  $\zeta$  的变化



左(a)  $\alpha=12 \theta=55^\circ \gamma=15 \beta=0.4 \tau=0.5$

右(b)  $\alpha=12 \theta=55^\circ \gamma=15 \beta=0.6 \tau=0.5$

图 5-14 不同方法所得 K 节点和 KK 节点在轴向荷载作用下弦杆 SCF 随  $\xi$  的变化

### 5.3.2 平面内弯矩

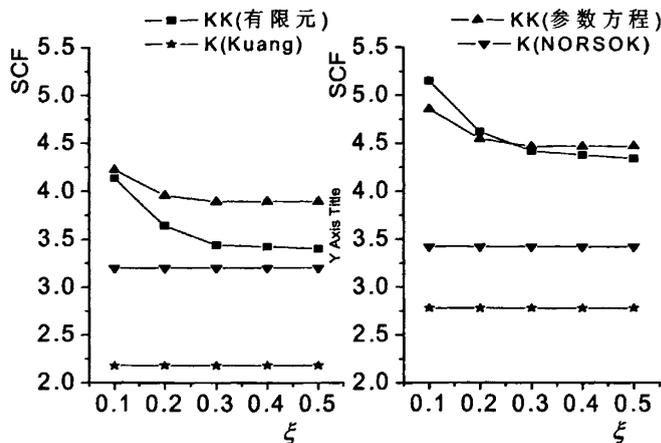
图 5-15、5-16 分别为不同方法所得 K 节点和 KK 节点在平面内弯矩作用下撑、弦杆 SCF 随  $\xi$  的变化。

(1) KK 管节点的撑、弦杆的 SCF 值随  $\xi$  的增加而减小，到  $\xi$  为 0.3 时趋于稳定。而 NORSOK 和 Kuang 计算的 K 节点撑、弦杆的 SCF 值随  $\xi$  的增加而不变。

(2) 从图 5-15 看出，对比有限元法所得 KK 管节点撑杆的 SCF 值与 K 管节点计算撑杆保守的 NORSOK 结果，KK 管节点同 K 管节点撑杆的 SCF 值随  $\xi$  的增加而差距减小，对比图 5-15 左右两图中两组不同  $\beta$  的节点，进一步说明  $\beta$  增大时，KK 节点同 K 节点撑杆的 SCF 值一样有降低趋势。

(3) 从图 5-16 看出，对比有限元法所得 KK 管节点弦杆的 SCF 值与 K 管节点计算弦杆保守的 NORSOK 结果，KK 管节点同 K 管节点弦杆的 SCF 值随  $\xi$  的增加而差距减小，有些对  $\xi$  较大的节点 NORSOK 计算的 K 管节弦杆的 SCF 值比 KK 管节点弦杆的 SCF 值大。

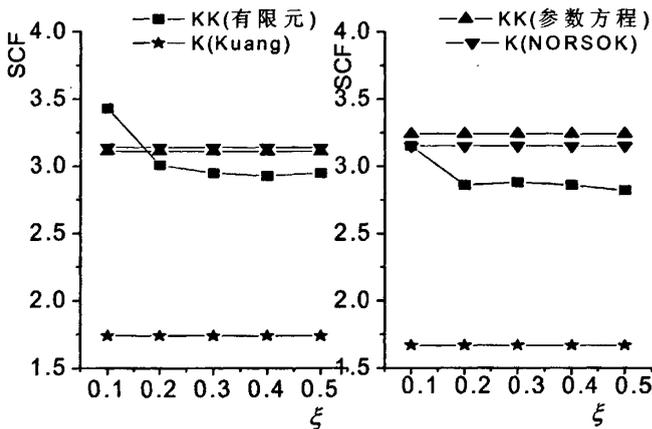
当  $\xi$  较小时，撑杆的相互影响导致 KK 节点撑、弦杆的 SCF 较大，当  $\xi$  增大 0.3 时，即在同一平面内撑杆的间距相对增大时，撑杆的相互影响降低导致撑、弦杆的 SCF 减小，当  $\xi$  大于 0.3 时，撑、弦杆的 SCF 的值趋于稳定。



左(a)  $\alpha=12 \theta=55^\circ \gamma=30 \beta=0.6 \tau=0.5$

右(b)  $\alpha=12 \theta=55^\circ \gamma=30 \beta=0.3 \tau=0.5$

图 5-15 不同方法所得 K 节点和 KK 节点在平面内弯矩作用下撑杆 SCF 随  $\xi$  的变化



左(a)  $\alpha=12 \theta=55^\circ \gamma=30 \beta=0.6 \tau=0.5$

右(b)  $\alpha=12 \theta=55^\circ \gamma=30 \beta=0.3 \tau=0.5$

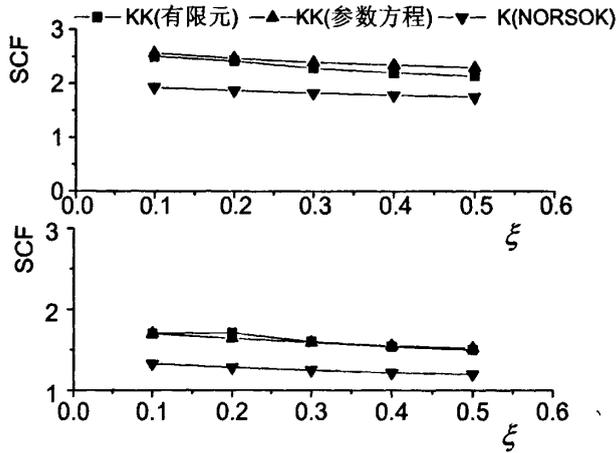
图 5-16 不同方法所得 K 节点和 KK 节点在平面内弯矩作用下弦杆 SCF 随  $\xi$  的变化

### 5.3.3 平面外弯矩

图 5-17、5-18 分别为不同方法所得 K 节点和 KK 节点在平面外弯矩作用下撑、弦杆 SCF 随  $\xi$  的变化。

(1) KK 管节点同 K 管节点一样，撑、弦杆的 SCF 值随  $\zeta$  的增加而有较小趋势的减小。

(2) 随着  $\zeta$  的不断增大，KK 节点有限元与 K 节点 NORSOK 的撑、弦杆 SCF 相比，其增加的差距有减小的趋势。整个看来， $\zeta$  的增加对这一差距的影响相对较小。



上 (a)  $\alpha=12 \theta=35^\circ \gamma=15 \beta=0.3 \tau=0.5$

下 (b)  $\alpha=12 \theta=35^\circ \gamma=10 \beta=0.3 \tau=0.5$

图 5-17 不同方法所得 K 节点和 KK 节点在平面外弯矩作用下撑杆 SCF 随  $\zeta$  的变化

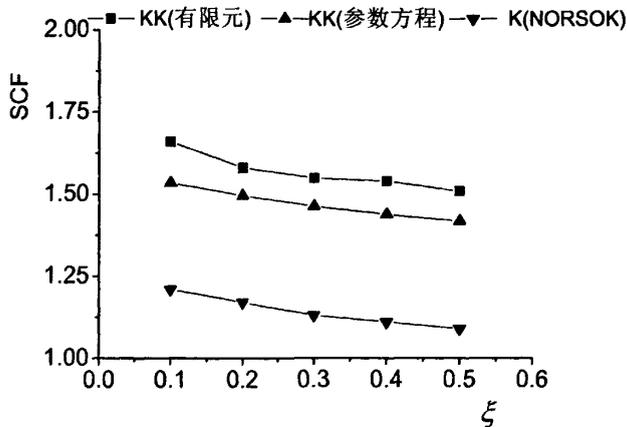


图 5-18 不同方法所得 K 节点和 KK 节点在平面外弯矩作用下弦杆 SCF 随  $\zeta$  的变化 ( $\alpha=12 \theta=35^\circ \gamma=10 \beta=0.3 \tau=0.5$ )

### 5.4 $\gamma$ 的变化对 KK 节点 SCF 值的影响

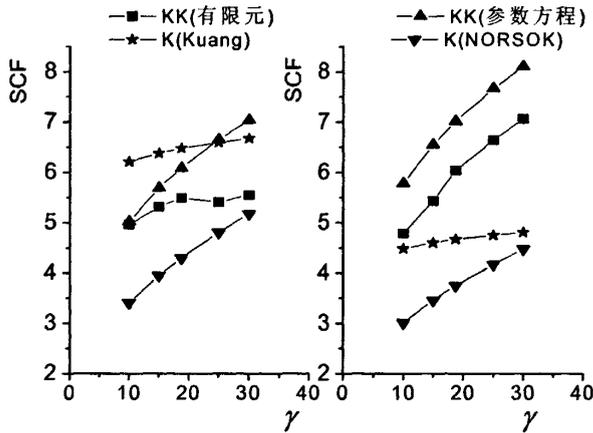
#### 5.4.1 轴向力作用

图 5-19、5-20 为不同方法所得 K 节点和 KK 节点在轴向荷载作用下撑杆 SCF 随  $\gamma$  的变化。

(1) KK 管节点同 K 管节点一样，撑、弦杆的 SCF 值随  $\gamma$  的增加而增大。对比 5-19 两图，对  $\beta$  较大的节点，KK 节点撑杆的 SCF 随  $\gamma$  而增大更明显。

(2) 对撑杆的 SCF， $\beta$  和  $\gamma$  较大时，KK 管节点有限元值明显比与 K 管节点 Kuang 值大，随  $\gamma$  的增加，增大的差距明显加大。当  $\beta$  和  $\gamma$  较大时，用 K 节点撑杆的 Kuang 经验公式计算 KK 节点撑杆 SCF 偏不安全。

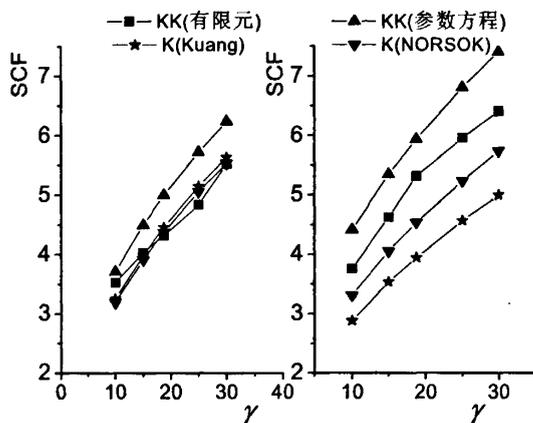
(3) 对弦杆的 SCF， $\beta$  和  $\gamma$  较大时，KK 管节点有限元值明显比与 K 管节点 NORSOK 值大，随  $\gamma$  的增加，增大的差距明显加大。当  $\beta$  和  $\gamma$  较大时，用 K 节点弦杆的 NORSOK 经验公式计算 KK 节点弦杆 SCF 偏不安全。



左(a)  $\alpha=12 \theta=55^\circ \zeta=0.2 \beta=0.3 \tau=0.6$

右(b)  $\alpha=12 \theta=55^\circ \zeta=0.2 \beta=0.5 \tau=0.6$

图 5-19 不同方法所得 K 节点和 KK 节点在轴向荷载作用下撑杆 SCF 随  $\gamma$  的变化



左(a)  $\alpha=12 \theta=55^\circ \zeta=0.2 \beta=0.3 \tau=0.6$

右(b)  $\alpha=12 \theta=55^\circ \zeta=0.2 \beta=0.5 \tau=0.6$

图 5-20 不同方法所得 K 节点和 KK 节点在轴向荷载作用下弦杆 SCF 随  $\gamma$  的变化

### 5.4.2 平面内弯矩

图 5-21、5-22 为不同方法所得 K 节点和 KK 节点在平面内弯矩作用下撑、弦杆 SCF 随  $\gamma$  的变化。

(1) 对撑杆、弦杆，KK 节点有限元同 K 节点保守的 NORSOK 值一样，SCF 随  $\gamma$  增加一直增加。

(2) 相对于 K 节点保守的 NORSOK 的 SCF 值，KK 节点有限元的撑、弦杆的 SCF 尽管有些值大，因为随  $\gamma$  增加，增大较慢，增加的差距有减小趋势。对弦杆而言，对  $\gamma$  较大的有些节点，KK 节点弦杆的 SCF 值比 NORSOK 计算的 K 节弦杆的 SCF 值还小。

对  $\gamma$  较大的 KK 节点，用 K 节点撑、弦杆的 NORSOK 经验公式计算 KK 节点撑、弦杆 SCF 偏不安全。

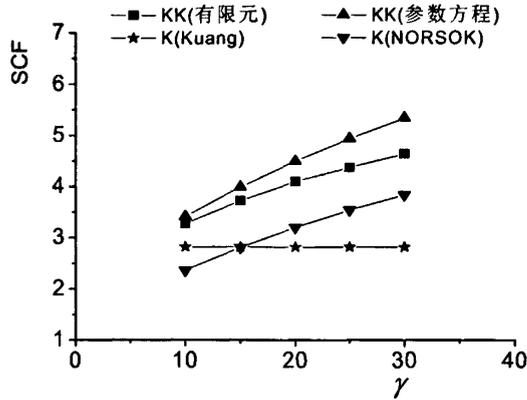


图 5-21 不同方法所得 K 节点和 KK 节点在平面内弯矩作用下撑杆 SCF 随  $\gamma$  的变化( $\alpha=9^\circ \theta=65^\circ \xi=0.3 \beta=0.4 \tau=0.6$ )

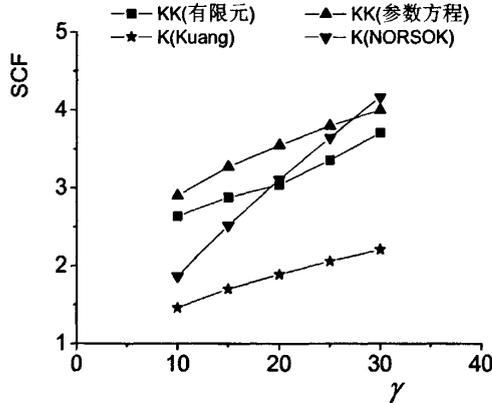


图 5-22 不同方法所得 K 节点和 KK 节点在平面内弯矩作用下弦杆 SCF 随  $\gamma$  的变化( $\alpha=9^\circ \theta=65^\circ \xi=0.3 \beta=0.4 \tau=0.6$ )

### 5.4.3 平面外弯矩

图 5-23、5-24 为不同方法所得 K 节点和 KK 节点在平面外弯矩作用下撑、弦杆 SCF 随  $\gamma$  的变化。

(1) KK 管节点同 K 管节点一样，撑、弦杆的 SCF 值随  $\gamma$  的增加而增大。

(2) 随  $\gamma$  的增加，KK 管节点与 K 管节点撑、弦杆的 SCF 增加的差距加大。并且 KK 节点与 K 节点相比，其撑杆的 SCF 的增加程度明显大于弦杆的 SCF 增加程度。所以  $\gamma$  的增加对 KK 节点撑杆 SCF 的影响更大。

对  $\gamma$  较大的 KK 节点，用 K 节点撑、弦杆的 NORSOK 经验公式计算 KK 节点撑、弦杆 SCF 偏不安全。

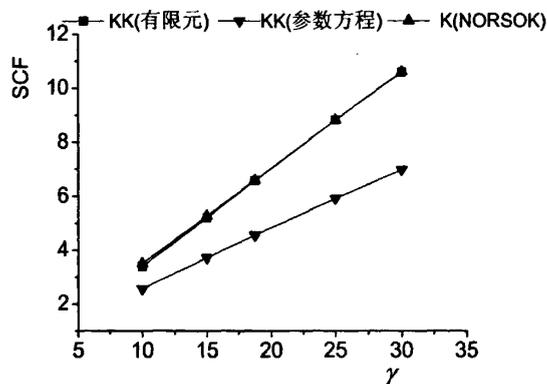


图 5-23 不同方法所得 K 节点和 KK 节点在平面外弯矩作用下撑杆 SCF 随  $\gamma$  的变化( $\alpha=12^\circ \theta=45^\circ \xi=0.3 \beta=0.5 \tau=0.5$ )

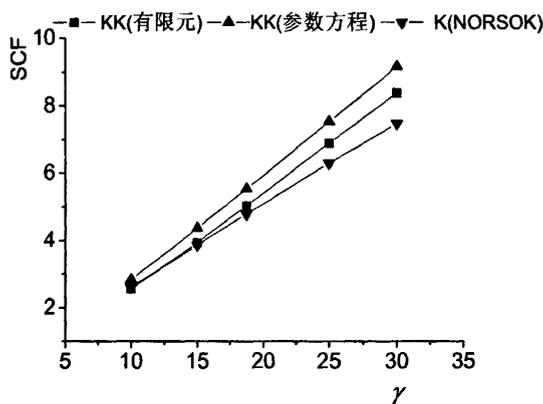


图 5-24 不同方法所得 K 节点和 KK 节点在平面外弯矩作用下弦杆 SCF 随  $\gamma$  的变化( $\alpha=12^\circ \theta=45^\circ \xi=0.3 \beta=0.5 \tau=0.5$ )

## 5.5 $\theta$ 的变化对 KK 节点 SCF 值的影响

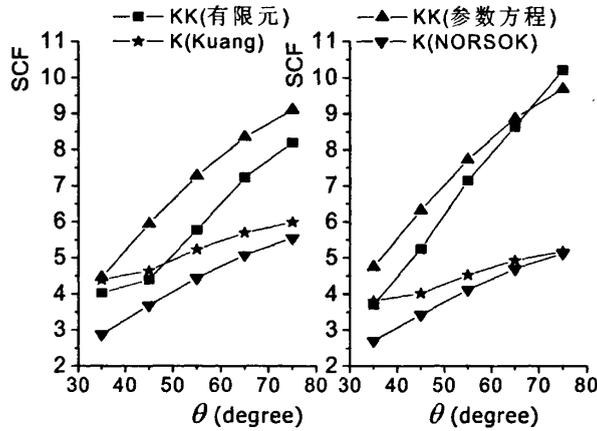
### 5.5.1 轴向力作用

图 5-25、5-26 为不同方法所得 K 节点和 KK 节点在轴向荷载作用下撑、弦杆 SCF 随  $\theta$  的变化。

- (1) KK 管节点同 K 管节点一样，撑、弦杆的 SCF 值随  $\theta$  的增加而增大。
- (2) 除有些  $\theta$  较小和  $\beta$  较小的节点外，KK 节点有限元所得撑、弦杆的 SCF

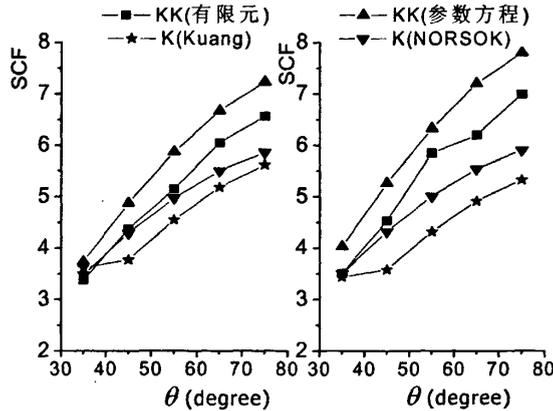
值普遍比 K 节点的经验公式所得 SCF 值大, 并且随  $\theta$  的增加, 增加的差距加大。

对  $\theta$  较大的 KK 节点, 用 K 节点撑、弦杆的保守的经验公式计算 KK 节点撑、弦杆 SCF 偏不安全。



左(a)  $\alpha=12 \gamma=30 \zeta=0.3 \beta=0.4 \tau=0.5$  右(b)  $\alpha=12 \gamma=30 \zeta=0.3 \beta=0.5 \tau=0.5$

图 5-25 不同方法所得 K 节点和 KK 节点在轴向荷载作用下  
撑杆 SCF 随  $\theta$  的变化



左(a)  $\alpha=12 \gamma=30 \zeta=0.3 \beta=0.4 \tau=0.5$  右(b)  $\alpha=12 \gamma=30 \zeta=0.3 \beta=0.5 \tau=0.5$

图 5-26 不同方法所得 K 节点和 KK 节点在轴向荷载作用下  
弦杆 SCF 随  $\theta$  的变化

### 5.5.2 平面内弯矩

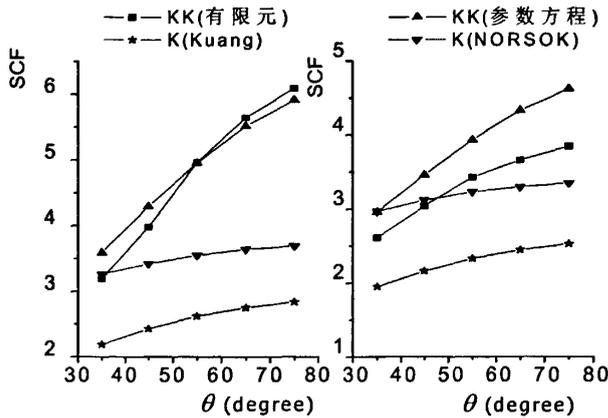
图 5-27、5-28 为不同方法所得 K 节点和 KK 节点在平面内弯矩作用下撑、弦杆 SCF 随  $\theta$  的变化。

(1) KK 管节点同 K 管节点一样, 撑、弦杆的 SCF 值随  $\theta$  的增加而增大。

(2) 对  $\tau$  较小、 $\theta$  较小的节点, NORSOK 计算的 K 管节撑杆的 SCF 值比 KK 管节点撑杆的 SCF 值。对  $\tau$  较大的节点, 随  $\theta$  的增加, KK 管节点撑杆的 SCF 与 K 管节点撑杆 SCF 保守的 NORSOK 的值增加的差距明显增大。

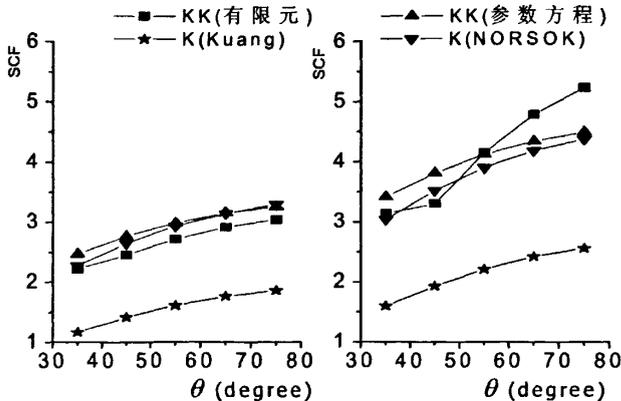
(3) 对  $\tau$  较小、 $\theta$  较小的节点, NORSOK 计算的 K 管节弦杆的 SCF 值比 KK 管节点弦杆的 SCF 值。对  $\tau$  较大的节点, 随  $\theta$  的增加, KK 管节点弦杆的 SCF 与 K 管节点弦杆 SCF 保守的 NORSOK 的值增加的差距明显增大。

对  $\theta$  较大的 KK 节点, 用 K 节点撑、弦杆的保守的经验公式计算 KK 节点撑、弦杆 SCF 偏不安全。



左(a)  $\alpha=9 \gamma=25 \zeta=0.1 \beta=0.5 \tau=0.7$  右(b)  $\alpha=9 \gamma=25 \zeta=0.1 \beta=0.5 \tau=0.5$

图 5-27 不同方法所得 K 节点和 KK 节点在平面内弯矩作用下撑杆 SCF 随  $\theta$  的变化



左(a)  $\alpha=9 \gamma=25 \zeta=0.1 \beta=0.5 \tau=0.5$  右(b)  $\alpha=9 \gamma=25 \zeta=0.1 \beta=0.5 \tau=0.7$

图 5-28 不同方法所得 K 节点和 KK 节点在平面内弯矩作用下弦杆 SCF 随  $\theta$  的变化

### 5.5.3 平面外弯矩

图 5-29、5-30 为不同方法所得 K 节点和 KK 节点在平面外弯矩作用下撑、弦杆 SCF 随  $\theta$  的变化。

- (1) KK 管节点同 K 管节点一样，撑、弦杆的 SCF 值随  $\theta$  的增加而增大。
  - (2) 随  $\theta$  的增加，KK 管节点与 K 管节点撑、弦杆的 SCF 增加的差距加大。
- 对  $\theta$  较大的 KK 节点，用 K 节点撑、弦杆的保守的经验公式计算 KK 节点撑、弦杆 SCF 偏不安全。

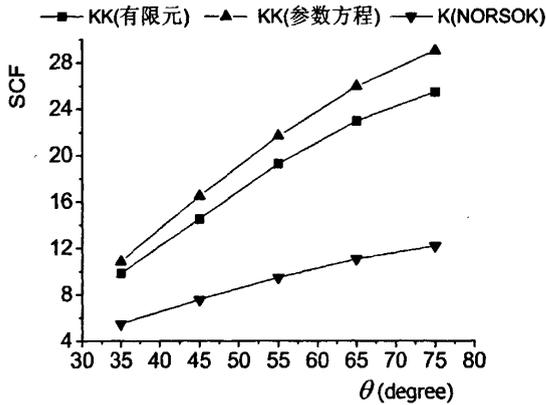


图 5-29 不同方法所得 K 节点和 KK 节点在平面外弯矩作用下撑杆 SCF 随  $\theta$  的变化( $\alpha=9 \gamma=30 \zeta=0.3 \beta=0.5 \tau=0.8$ )

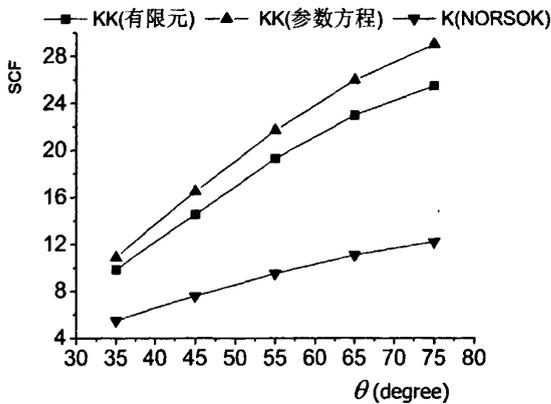


图 5-30 不同方法所得 K 节点和 KK 节点在平面外弯矩作用下弦杆 SCF 随  $\theta$  的变化( $\alpha=9 \gamma=30 \zeta=0.3 \beta=0.5 \tau=0.8$ )

### 5.6 $\alpha$ 的变化对 KK 节点 SCF 值的影响

#### 5.6.1 轴向力作用

图 5-31、5-32 为不同方法所得 K 节点和 KK 节点在轴向荷载作用下撑、弦杆 SCF 随  $\alpha$  的变化。

(1) KK 管节点撑、弦杆的有限元 SCF 值随  $\alpha$  的增加而减小。同 K 管节点保守的经验公式撑、弦杆的 SCF 值随  $\alpha$  的增加而不改变不同。

(2) 随着  $\alpha$  的增加, KK 节点撑、弦杆的有限元 SCF 值与 K 管节点保守的经验公式所得的撑、弦杆的 SCF 值相比, 增加的差距减小。

在此 KK 节点 SCF 参数方程拟合中, 未考虑  $\alpha$  的影响, 只对  $\alpha=12$  节点拟合。从图 5-31、5-32 看出, 相对有限元值, 参数方程值相对保守。对  $\alpha$  较小的 KK 节点, 用 K 节点撑、弦杆的保守的经验公式计算 KK 节点撑、弦杆 SCF 偏不安全。

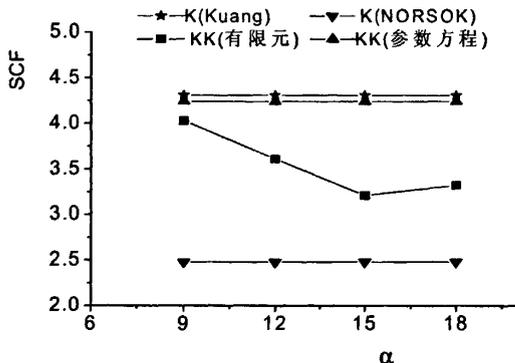


图 5-31 不同方法所得 K 节点和 KK 节点在轴向荷载作用下撑杆 SCF 随  $\alpha$  的变化( $\theta=45^\circ \gamma=10 \xi=0.3 \beta=0.4 \tau=0.5$ )

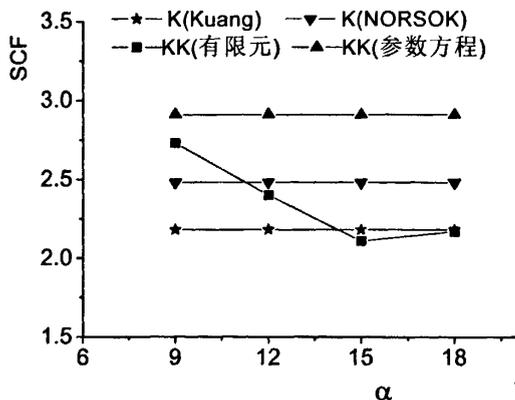


图 5-32 不同方法所得 K 节点和 KK 节点在轴向荷载作用下弦杆 SCF 随  $\alpha$  的变化( $\theta=45^\circ \gamma=10 \xi=0.3 \beta=0.4 \tau=0.5$ )

### 5.6.2 平面内弯矩

图 5-33、5-34 为不同方法所得 K 节点和 KK 节点在平面内弯矩作用下撑、弦杆 SCF 随  $\alpha$  的变化。

(1) KK 管节点同 K 管节点一样，撑、弦杆的 SCF 值受  $\alpha$  的影响很小，随  $\alpha$  的增加，SCF 值几乎不变。

(2) 如图 5-33、5-34 所示的一组节点，KK 管节点撑杆的 SCF 明显大于 K 管节点撑杆 SCF 保守的 NORSOK 的值。随着  $\alpha$  的增加，KK 节点撑、弦杆的有限元 SCF 值与 K 管节点保守的经验公式所得的撑、弦杆的 SCF 值相比，增加的差距不变。

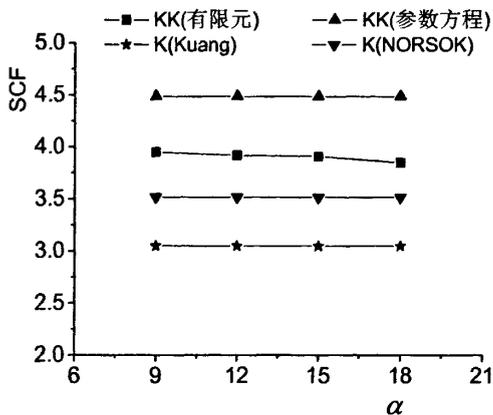


图 5-33 不同方法所得 K 节点和 KK 节点在平面内弯矩作用下撑杆 SCF 随  $\alpha$  的变化。 ( $\theta=45^\circ, \gamma=25, \xi=0.3, \beta=0.3, \tau=0.8$ )

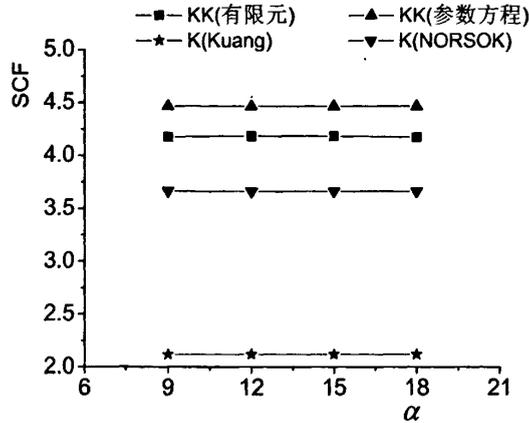


图 5-34 不同方法所得 K 节点和 KK 节点在平面内弯矩作用下弦杆 SCF 随  $\alpha$  的变化( $\theta = 45^\circ, \gamma = 25, \xi = 0.3, \beta = 0.3, \tau = 0.8$ )

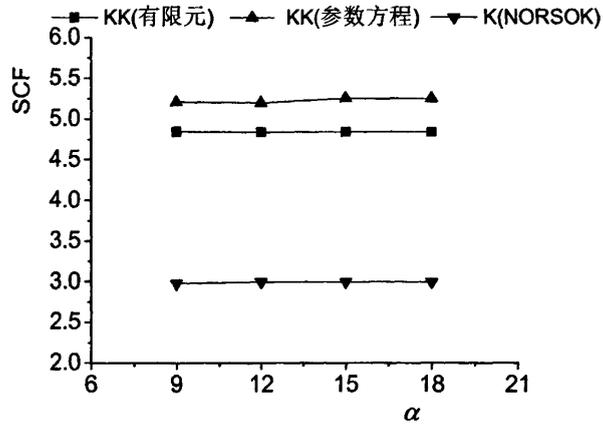
### 5.6.3 平面外弯矩

图 5-35、5-36 为不同方法所得 K 节点和 KK 节点在平面外弯矩作用下撑、弦杆 SCF 随  $\alpha$  的变化。

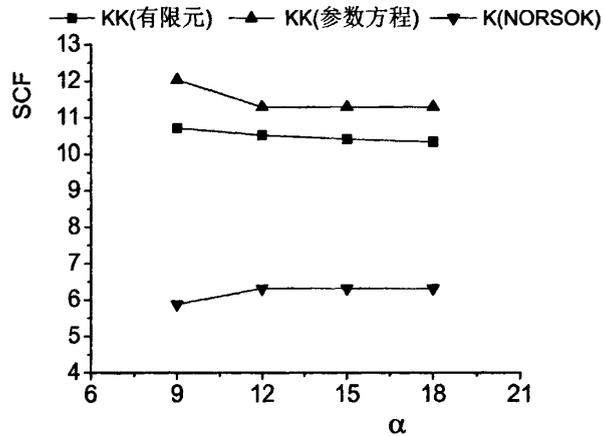
(1) KK 管节点有限元 SCF 值同 K 管节点 NORSOK 的 SCF 值一样，撑、弦杆的 SCF 值随  $\alpha$  的增加，变化不明显。图 5-35(a) 与 5-36(b) 比较，不管对 K 节点还是对 KK 节点，当  $\tau$  较大时，短弦杆的影响较明显，对 K 节点存在  $\alpha < 12$  时，SCF 值较小，当  $\alpha \geq 12$  时即弦杆长度  $L \geq 24D$  时，K 节点的撑杆的 SCF 趋于稳定。这也是对大多数简单管节点 SCF 参数方程的研究不考虑  $\alpha$  的原因。对 KK 节点，当  $\alpha$  较小、 $\tau$  较大时，撑杆的 SCF 有增加的趋势，这与 K 节点变化相反。当  $\alpha \geq 15$  时，KK 节点的撑、弦杆的 SCF 基本不再改变。这在参数公式中，有所体现。

(2) 除当  $\alpha$  较小、 $\tau$  较大时，KK 节点撑杆的有限元 SCF 值与 K 管节点保守的经验公式所得的撑杆的 SCF 值相比，随着  $\alpha$  的增加，增加的差距有小幅度的减小外；在其余情况下，差距不变。KK 节点弦杆的有限元 SCF 值与 K 管节点保守的经验公式所得的弦杆的 SCF 值相比，随着  $\alpha$  的增加，差距不变。

对  $\alpha$  较小和  $\tau$  较大的 KK 节点，用 K 节点撑杆的保守的经验公式计算 KK 节点撑杆 SCF 偏不安全。



(a)  $\theta = 75^\circ, \gamma = 10, \xi = 0.3, \beta = 0.3, \tau = 0.6$



(b)  $\theta = 75^\circ, \gamma = 10, \xi = 0.3, \beta = 0.3, \tau = 0.8$

图 5-35 不同方法所得 K 节点和 KK 节点在平面外弯矩作用下撑杆 SCF 随  $\alpha$  的变化。

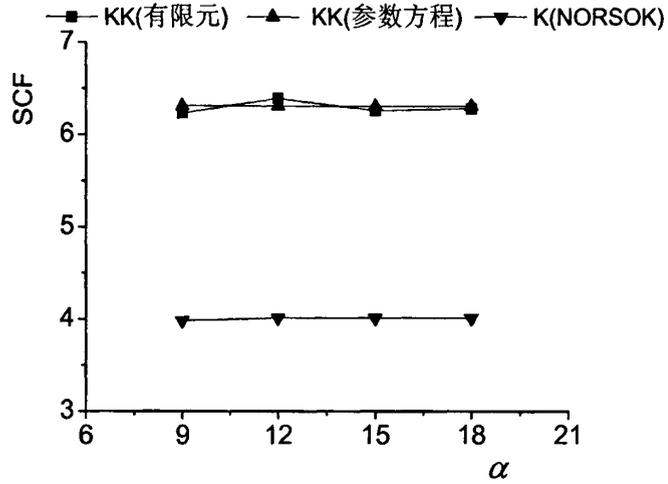


图 5-36 不同方法所得 K 节点和 KK 节点在平面外弯矩作用下弦杆 SCF 随  $\alpha$  的变化。(  $\theta = 75^\circ, \gamma = 10, \xi = 0.3, \beta = 0.3, \tau = 0.8$  )

## 第六章 结论与展望

### 6.1 研究结论

总结分析  $\alpha$ 、 $\gamma$ 、 $\xi$ 、 $\beta$ 、 $\tau$  和  $\theta$  各个参数对在三种荷载作用下的有限元方法所得 KK 管节点 SCF 的影响如下:

(1) 轴向力作用  $\tau$ 、 $\xi$ 、 $\gamma$  或  $\theta$  的增加均将导致 KK 节点撑、弦杆 SCF 值增大;  $\beta \leq 0.5$  时,  $\beta$  的增加将导致 KK 节点撑、弦杆 SCF 值增大,  $\beta$  从 0.5 增加到 0.6, SCF 值有减小趋势, 在 0.5—0.6 之间的某个值取得最大值; KK 管节点撑、弦杆的有限元 SCF 值随  $\alpha$  的增加而减小,  $\alpha$  大于 15 时, 趋于稳定。

(2) 平面内弯矩  $\tau$ 、 $\gamma$  或  $\theta$  的增加均将导致 KK 节点撑、弦杆 SCF 值增大;  $\beta \leq 0.5$  时,  $\beta$  的增加将导致 KK 节点撑、弦杆 SCF 值有减小趋势, 影响相对较小; 随  $\xi$  增大, KK 节点撑、弦杆 SCF 值减小, 当  $\xi$  增大到 0.3 时, SCF 值趋于稳定; KK 节点撑、弦杆 SCF 值变化与  $\alpha$  无关。

(3) 平面外弯矩  $\tau$ 、 $\gamma$  或  $\theta$  的增加均将导致 KK 节点撑、弦杆的 SCF 值增大; 在  $\beta$  小于 0.5 时, KK 管节点同 K 管节点一样, 撑、弦杆的 SCF 值随  $\beta$  的增加而增大。而  $\beta$  从 0.5 增加到 0.6, KK 管节点撑、弦杆的 SCF 值有减小趋势; 随着  $\xi$  的增加, 撑、弦杆的 SCF 值有减小趋势; 在 KK 管节点撑、弦杆的 SCF 在  $\alpha$  大于 15 时, 趋于稳定。

总结分析  $\alpha$ 、 $\gamma$ 、 $\xi$ 、 $\beta$ 、 $\tau$  和  $\theta$  各个参数对在三种荷载作用下的有限元方法所得 KK 管节点 SCF 与 K 管节点保守的经验公式所得 SCF 差距的影响如下:

(1) 轴向力作用  $\tau$ 、 $\beta$ 、 $\xi$ 、 $\gamma$  或  $\theta$  的增加,  $\alpha$  的减小, 都将导致 KK 节点有限元与 K 节点保守经验公式所得撑、弦杆 SCF 值之间的增加的差距加大。

(2) 平面内弯矩  $\tau$ 、 $\theta$  的增加,  $\beta$ 、 $\gamma$  的减小, 当  $\xi$  小于 0.3 时, 随  $\xi$  的减小, 都将导致 KK 节点有限元与 K 节点保守经验公式所得撑、弦杆 SCF 值之间的增加的差距加大。

(3) 平面外弯矩  $\tau$ 、 $\theta$ 、 $\gamma$ 、 $\beta$  的增加, 将导致 KK 节点有限元与 K 节点保守经验公式所得撑、弦杆 SCF 值之间的增加的差距加大。随  $\xi$  的增加, 其增加的差距有减小的趋势。整个看来,  $\xi$  的增加对这一差距的影响相对较小;  $\alpha$  小于 15 时, 随  $\alpha$  的减小, 也将导致撑杆 SCF 值之间的增加的差距加大, 而弦杆 SCF 值之间的差距不受  $\alpha$  影响。

当实际 KK 管节点 SCF 与保守的 K 管节点经验公式 SCF 值之间的差距较大时,用 K 节点保守的经验公式计算 KK 节点撑、弦杆 SCF 更不安全。

## 6.2 后续工作建议

由于时间等各方面的限制,对本文的 KK 节点 SCF 的研究未考虑焊缝,希望在以后的研究能进一步考虑焊缝。本文只是对 KK 节点的 SCF 进行分析,得出其在三种荷载作用下的 SCF 参数方程。并希望未来的研究能在各种型式的复杂节点的 SCF 中进行。

## 附录 A

命令流输入的.TXT 文件如下:

```

/BATCH                                !进入批处理操作
!1.开始阶段, 设定参数和部分循环
!1)设定参数
PI=4*ATAN(1)
*DIM,TA,,2
*VFILL,TA(1,1),DATA,0.06,0.04         !为表 2-5 中的 T
*DIM,NSIGMA,,6
*VFILL,NSIGMA(1,1),DATA, 0.1, 0.2,0.3,0.4,0.5     !为表 2-5 中的  $\xi$ 
L=7.2                                    !为表 2-5 中的 L
DA=1.2                                   ! 为表 2-5 中的 D
ALPHA=2*L/DA
!第一次循环
*DO,mmm,1,5                             !按  $\xi$  循环(5 次)
SIGMA=NSIGMA(MMM)
G=NSIGMA(MMM)*DA                       ! G 为表 2-5 中的 g
!第二次循环
*DO,I,1,5                               !按角度  $\theta$  循环(5 次)
THETA=25+10*I                          ! THETA 按表 2-5 角度的  $\theta$  计算
!第三次循环
*do,j,1,4                                !按  $\beta$  循环(4 次)
BETA=0.2+J*0.1                          ! BETA 按表 2-5 的  $\beta$  计算
DB=BETA*DA                              ! DB 为表 2-5 的 d
!2.前处理阶段
/PREP7
!2.1 设定材料属性
ET,1,SHELL63                            !设定单元类型为 SHELL63
MP,EX,1,2.1E11                          !设定材料 1 的弹性模量为  $2.1 \times 10^{11}$  Pa
MP,PRXY,1,0.3                          ! 设定材料 1 的泊松比为 0.3

```

```

MPCOPY,,1,2          !将材料 1 的弹性模量和泊松比属性复制给材料 2
! 2.2 建立模型，附属性
K,1
K,2,L
L,1,2
*AFUN,DEG           !将 ANSYS 默认的弧度变为角度
CTG=1/TAN(THETA)
CSC=1/SIN(THETA)
KKPP=0.5*L+DA/2*CTG-CSC*DB/2-G/2
K,3,KKPP           ! KKPPP=3 的定位=L/2+R*CTGθ-CSCθ*R- g/2
KWPAVE,3
WPROTA,90-THETA
CSWPLA,11
L34=8*DB+DA/2/SIN(THETA)      !L34=4 d+R/sinθ
K,4,,L34
L,3,4
WPCSYS,0
CSYS,0
WPCSYS,0
WPOFFS,0.5*L
CSWPLA,12
LSYMM,X,2
LWPLAN,-1,3,0
CSWPLA,13
CSYS,0
WPCSYS,0
WPROTA,,45
CSWPLA,16
WPCSYS,0
LSYMM,Z,2
LSYMM,Z,3
LWPLAN,-1,5,0
CSWPLA,15
LWPLAN,-1,4,0

```

CSWPLA,14  
CSYS,0  
CSYS,0  
LGEN,2,1,,,,DA/2  
CSYS,11  
WPCSYS,0  
LGEN,2,2,,,DB/2  
DSYS,0  
CSYS,13  
WPCSYS,0  
LGEN,2,3,,,DB/2  
CSYS,14  
WPCSYS,0  
LGEN,2,4,,,DB/2  
CSYS,15  
WPCSYS,0  
LGEN,2,5,,,DB/2  
AROTAT,6,,,,,1,2  
AROTAT,7,,,,,3,4  
AOVLAP,ALL  
CSYS,11  
ASEL,S,LOC,X,-0.4\*DB,0.4\*DB  
ASEL,R,LOC,Z,-0.4\*DB,0.4\*DB  
CSYS,0  
ASEL,R,LOC,Y,-0.4\*DA,0.4\*DA  
ADELE,ALL  
ALLSEL  
AROTAT,8,,,,,5,6  
AOVLP,ALL  
CSYS,13  
ASEL,S,LOC,X,-0.4\*DB,0.4\*DB  
ASEL,R,LOC,Y,-0.4\*DB,0.4\*DB  
CSYS,0  
ASEL,R,LOC,Y,-0.4\*DA,0.4\*DA

```

ADELE,ALL
ALLSEL
AROTAT,9,,,,,7,8
AOVLP,ALL
CSYS,14
ASEL,S,LOC,X,-0.4*DB,0.4*DB
ASEL,R,LOC,Y,-0.4*DB,0.4*DB
CSYS,0
ASEL,R,LOC,Z,-0.4*DA,0.4*DA
ADELE,ALL
ALLSEL,ALL
AROTAT,10,,,,,9,10
AOVLAP,ALL
CSYS,15
ASEL,S,LOC,X,-0.4*DB,0.4*DB
ASEL,R,LOC,Y,-0.4*DB,0.4*DB
CSYS,0
ASEL,R,LOC,Z,-0.4*DA,0.4*DA
ADELE,ALL
ALLSEL
AGLUE,ALL
NUMCMP,ALL
!组元面,选择撑杆上接近撑弦杆交界的区域,目的是撑杆末端因为加力时导致的
!应力相对较大,如果按整个撑杆取最大应力会导致错误。
CSYS,11
ASEL,S,LOC,X,-DB/2,DB/2
ASEL,R,LOC,Z,-DB/2,DB/2
WPCSYS,0
!参数 LLL 设定,前面已设定参数 CTG=1/TAN(THETA), CSC=1/SIN(THETA)
LLL=DB+DA/2*CSC+DB/2*CTG           !将 LLL 设为  $d+R*\csc\theta+r*\ctg\theta$ 
WPOFFS,,LLL
WPROTA,,90
ASBW,ALL
ASEL,U,LOC,Y,LLL,L34

```

```
CM,AB1,AREA
ALLSEL
CSYS,13
ASEL,S,LOC,X,-DB/2,DB/2
ASEL,R,LOC,Y,-DB/2,DB/2
WPCSYS,0
WPOFFS,,,LLL
ASBW,ALL
ASEL,U,LOC,Z,LLL,L34
CM,AB2,AREA
CSYS,14
ASEL,S,LOC,X,-DB/2,DB/2
ASEL,R,LOC,Y,-DB/2,DB/2
WPCSYS,0
WPOFFS,,,LLL
ASBW,ALL
ASEL,U,LOC,Z,LLL,L34
CM,AB3,AREA
CSYS,15
ASEL,S,LOC,X,-DB/2,DB/2
ASEL,R,LOC,Y,-DB/2,DB/2
WPCSYS,0
WPOFFS,,,LLL
ASBW,ALL
ASEL,U,LOC,Z,LLL,L34
CM,AB4,AREA
CMGRP,ABRACE,AB1,AB2,AB3,AB4
ALLSEL
AGLUE,ALL
NUMCMP,ALL                                     !模型到此建立完毕
!第四次循环
*do,ii,1,2                                     ! 按弦杆厚度改变 T 循环(2 次)
/PREP7
RDELE,ALL                                     ! 设定实常数,在每次循环前将实常数删除
```

R,1,TA(II)

R,2,0.4\*TA(II)

R,3,0.5\*TA(II)

R,4,0.6\*TA(II)

R,5,0.7\*TA(II)

R,6,0.8\*TA(II)

TB=0.4\*TA(II)

NTA=TA(II)

GAMA=DA/2/TA(II)

TAO=TB/TA(II)

CSYS,0

ASEL,S,LOC,Z,-DA/2,DA/2

ASEL,R,LOC,Y,-DA/2,DA/2

AATT,1,1,1

ASEL,INVE

AATT,2,2,1

!2.3 划分网格

ALLSEL

FDELE,ALL

DDELE,ALL

ACLEAR,ALL

SMRTSIZE,3

!将整体单元智能网格划分水平设为 3

ALLSEL,ALL

AMESH,ALL

ASEL,S,REAL,,1

LSLA,S

ASEL,INVE

LSLA,R

LREFINE,ALL,,,2

!撑弦杆处交界线细化水平设为 2

ALLSEL

CMSEL,S,ABRACE,AREA

!选择撑杆上取应力的面

ESLA,S

!选择撑杆上取应力的单元

ESEL,U,REAL,,1

CM,AB,ELEM

```

ASEL,S,REAL,,1
ESLA
CM,AC,ELEM
/PREP7
!3.计算及后处理阶段
/SOLU
CSYS,0
NSEL,S,LOC,X,0
NSEL,A,LOC,X,L
D,ALL,ALL                                !将弦杆末端全部约束
!在 ANSYS 工作目录下建立可包括多个宏模块 MYFILE.TXT 的宏库文件，为
!计算阶段模型加力及后处理，输出各个参数及 SCF 的输出。
*ULIB,MYFILE,TEXT                        !指定 MYFILE.TXT 的宏库文件
*USE,FPOST !运行名字为 FPOST 的宏模块，实现三种荷载工况的运算及输出
!第五次循环
!循环改变撑杆厚度,重新计算及再次输出
*DO,K,1,4                                  ! 根据  $\tau$ , 循环改变撑杆厚度  $t$ 
/PREP7
ESEL,S,REAL,,K+1
EMODIF,ALL,REAL,K+2
FINISH
/SOLU
TB=(0.4+K*0.1)*TA(II)
TAO=TB/TA(II)                             !TB 改变，再定义一下参数 TAO
*USE,FPOST      !再运行 FPOST 宏模块，实现三种荷载工况的运算及输出
*ENDDO          !按弦杆厚度改变的循环结束
*ENDDO          !按撑杆厚度改变的循环结束
PARSAV,ALL     !保留参数，在 ANSYS 工作目录下以默认的文件名.parm 保存
/CLEAR,NOSTART !经过改变撑弦杆改变厚度的两次循环结束，清空模型。
PARRES        !恢复默认的参数文件
*ENDDO        ! 按  $\beta$  循环结束
PARSAV,ALL
/CLEAR,NOSTART
PARRES

```

```
*ENDDO                                     !按角度  $\theta$  循环结束
PARSAV,ALL
/CLEAR,NOSTART
PARRES
*ENDDO                                     ! 按  $\zeta$  循环结束
FINISH
```

## 附录 B

宏库文件 MYFILE.TXT 的内容如下:

```

FPOST                                     !指定宏模块名
!1.加力,并输入载荷文件
!选择加力的节点
/PREP7
ALLSEL
CSYS,11
NSEL,S,LOC,Y,L34
NROTAT,ALL
*GET,NODESHU,NODE,0,COUNT
*SET,IL11N,NODE(DB/2,L34,0)             !设定平面内弯距作用下加拉力的节点
*SET,IY11N,NODE(-DB/2,L34,0)          !设定平面内弯距作用下加压力的节点
*SET,OL11N,NODE(0,L34,DB/2)          !设定平面外弯距作用下加拉力的节点
*SET,OY11N,NODE(0,L34,-DB/2)         !设定平面外弯距作用下加压力的节点
CSYS,13
NSEL,S,LOC,Z,L34
NROTAT,ALL
*SET,IY13N,NODE(-DB/2,0,L34)          !设定平面内弯距作用下加压力的节点
*SET,IL13N,NODE(DB/2,0,L34)          !设定平面内弯距作用下加拉力的节点
*SET,OL13N,NODE(0,-DB/2,L34)         !设定平面外弯距作用下加拉力的节点
*SET,OY13N,NODE(0,DB/2,L34)          !设定平面外弯距作用下加压力的节点
CSYS,14
NSEL,S,LOC,Z,L34
NROTAT,ALL
*SET,IL14N,NODE(-DB/2,0,L34)          !设定平面内弯距作用下加拉力的节点
*SET,IY14N,NODE(DB/2,0,L34)          !设定平面内弯距作用下加压力的节点
*SET,OL14N,NODE(0,-DB/2,L34)         !设定平面外弯距作用下加拉力的节点
*SET,OY14N,NODE(0,DB/2,L34)          !设定平面外弯距作用下加压力的节点
CSYS,15

```

```

NSEL,S,LOC,Z,L34
NROTAT,ALL
*SET,IY15N,NODE(DB/2,0,L34)           !设定平面内弯距作用下加压力的节点
*SET,IL15N,NODE(-DB/2,0,L34)        !设定平面内弯距作用下加拉力的节点
*SET,OL15N,NODE(0,-DB/2,L34)       !设定平面外弯距作用下加拉力的节点
*SET,OY15N,NODE(0,DB/2,L34)        !设定平面外弯距作用下加压力的节点
FINISH
!1.1 加轴向力,并写入载荷文件 10
/SOLU
FORCE=2*PI*DB/2*TB/NODESHU
CSYS,11
NSEL,S,LOC,Y,L34
F,ALL,FY,-FORCE
CSYS,13
NSEL,S,LOC,Z,L34
F,ALL,FZ,FORCE
CSYS,14
NSEL,S,LOC,Z,L34
F,ALL,FZ,FORCE
CSYS,15
NSEL,S,LOC,Z,L34
F,ALL,FZ,-FORCE
ALLSEL
!写入载荷步文件 10,存放在 ANSYS 工作目录下 JOBNAME.S10
LSWRITE,10
FDEL,ALL
!1.2 施加平面内弯矩, 并写入载荷文件 11
MOMENT=PI/2*DB/2*TB
ALLSEL
F,IL11N,FY,MOMENT
F,IY11N,FY,-MOMENT
F,IL13N,FZ,MOMENT
F,IY13N,FZ,-MOMENT
F,IL14N,FZ,MOMENT

```

```
F,IY14N,FZ,-MOMENT
F,IL15N,FZ,MOMENT
F,IY15N,FZ,-MOMENT
ALLSEL
!写入载荷步文件 11,存放在 ANSYS 工作目录下 JOBNAME.S11
LSWRITE,11
!1.3 施加平面外弯矩, 并写入载荷文件 12
ALLSEL
FDEL,ALL
F,OL11N,FY,MOMENT
F,OY11N,FY,-MOMENT
F,OL13N,FZ,MOMENT
F,OY13N,FZ,-MOMENT
F,OL14N,FZ,MOMENT
F,OY14N,FZ,-MOMENT
F,OL15N,FZ,MOMENT
F,OY15N,FZ,-MOMENT
ALLSEL
!写入载荷步文件 12 存放在 ANSYS 工作目录下 JOBNAME.S12
LSWRITE,12
!2.读入三种荷载工况的载荷文件, 运算并后处理
!2.1 读入轴向力作用下载荷步文件 10, 将撑、弦杆的 SCF 值赋给参数
! AXIALB、AXIALC
ALLSEL
/SOLU
FDEL,ALL
LSREAD,10
ALLSEL
SOLVE
FINISH
/POST1
CMSEL,S,AB,ELEM
PLNSOL,S,1
*GET,AXIALB1,PLNSOL,0,MAX
```

```
PLNSOL,S,3
*GET,AXIALB3,PLNSOL,0,MIN
*IF,AXIALB1,GE,ABS(AXIALB3),THEN
AXIALBMAX=AXIALB1
*ELSE
AXIALBMAX=ABS(AXIALB3)
*ENDIF
AXIALB=AXIALBMAX
CMSEL,S,AC,ELEM
PLNSOL,S,1
*GET,AXIALC1,PLNSOL,0,MAX
PLNSOL,S,3
*GET,AXIALC3,PLNSOL,0,MIN
*IF,AXIALC1,GE,ABS(AXIALC3),THEN
AXIALCMAX=AXIALC1
*ELSE
AXIALCMAX=ABS(AXIALC3)
*ENDIF
AXIALC=AXIALCMAX
FINISH
!2.2 读入平面内弯矩作用下载荷步文件 11，将撑、弦杆的 SCF 值赋给参数
!IB、IC
ALLSEL
/SOLU
FDEL,ALL
LSREAD,11
ALLSEL
SOLVE
FINISH
/POST1
CMSEL,S,AB,ELEM
PLNSOL,S,1
*GET,IB1,PLNSOL,0,MAX
PLNSOL,S,3
```

```
*GET,IB3,PLNSOL,0,MIN
*IF,IB1,GE,ABS(IB3),THEN
IBMAX=IB1
*ELSE
IBMAX=ABS(IB3)
*ENDIF
IB=IBMAX
CMSEL,S,AC,ELEM
PLNSOL,S,1
*GET,IC1,PLNSOL,0,MAX
PLNSOL,S,3
*GET,IC3,PLNSOL,0,MIN
*IF,IC1,GE,ABS(IC3),THEN
ICMAX=IC1
*ELSE
ICMAX=ABS(IC3)
*ENDIF
IC=ICMAX
FINISH
12.3 读入平面外弯矩作用下载荷步文件 12，将撑、弦杆的 SCF 值赋给参数
!OB、OC
ALLSEL
/SOLU
FDEL,ALL
LSREAD,12
ALLSEL
SOLVE
FINISH
/POST1
CMSEL,S,AB,ELEM
PLNSOL,S,1
*GET,OB1,PLNSOL,0,MAX
PLNSOL,S,3
*GET,OB3,PLNSOL,0,MIN
```

```
*IF,OB1,GE,ABS(OB3),THEN
OBMAX=OB1
*ELSE
OBMAX=ABS(OB3)
*ENDIF
OB=OBMAX
CMSEL,S,AC,ELEM
PLNSOL,S,1
*GET,OC1,PLNSOL,0,MAX
PLNSOL,S,3
*GET,OC3,PLNSOL,0,MIN
*IF,OC1,GE,ABS(OC3),THEN
OCMAX=OC1
*ELSE
OCMAX=ABS(OC3)
*ENDIF
OC=OCMAX
FINISH
!3.将各参数及 SCF 输出
*CFOPEN,,,,APPEND
/COM,
*VWRITE,ALPHA,GAMA,SIGMA,THETA,BETA,TAO,L,DA,NTA,DB,TB
(1X,' ALPHA=',F10.3,' GAMA=',F10.3,' SIGMA=',F10.3,' THETA=',F10.3,'BETA
=',F10.3,' TAO=',F10.3,' L= ',F10.3,' DA= ',F10.3,' TA= ',F10.3,'DB =',F10.3,' TB=
',F10.3,)
*VWRITE,1000*FORCE,KKPP,1000*MOMENT,OB,OC,IB,IC,AXIALB,AXIALC
(1X,' FORCE= ',F10.3,' KKPP= ',F10.3,' MOMENT= ',F10.3,'OB= ',F10.3,'OC=
',F10.3,'IB= ',F10.3,'IC =',F10.3,'AXIALB= ',F10.3,'AXIALC=',F10.3)
/COM,
FINISH
!模块 FPOST 文件结束
/EOF
```

## 参考文献

- [1]任贵永编, 海洋活动式平台, 天津大学出版社, 1989
- [2]石永久, 祝磊, 王元清, TX型和TT型圆管节点轴向承载力的影响因素, 空间结构, 2005, 11(1)
- [3]冯琦, 谭家华, 套管加强T型管节点在平面外弯矩下的极限强度分析, 海洋工程, 2006, 24(2)
- [4]Kuang, J.G., Potvin, A.B., Leick, R.D. Stress concentration in tubular joints. Offshore Technological Conf., OTC2202, Houston, 1975, 593-612.
- [5]Chang, E., Dover, W.D. Stress concentration factor parametric equations for tubular X and DT joints. Int. J. Fatigue, 1996, 18 (6): 363-387.
- [6] Chang, E., Dover, W.D. Prediction of stress distributions along the intersection of tubular Y and T-joints. Int. J. Fatigue, 1999, 21: 361-381.
- [7] Morgan, M.R., Lee, M.M.K. Prediction of Stress Concentrations and Degrees of Bending in Axially Loaded Tubular K-Joints. J. Construct. Steel Res., 1998, 45(1): 67-97.
- [8]Morgan, M.R., Lee, M.M.K. Stress concentration factors in tubular K-joints under in-plane moment loading. ASCE Journal of Structural Engineering, 1998, 124 (4): 382-390.
- [9]Morgan, M.R., Lee, M.M.K. Parametric equations for distributions of stress concentration factors in tubular K-joints under out-plane moment loading. Int.J.Fatigue, 1998, 20 (6): 449-461.
- [10]Underground Engineering Group (UEG). Design of tubular joints for offshore structures, UEG, London, 1985, 1.
- [11]Fung, T.C., Soh, C.K. Stress Concentration Factors of Doubler Plate Reinforced Tubular T Joints. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(11).
- [12]Efthymiou, M., Durkin, S. Stress concentration in T/Y and gap/overlap K-joints. Behavior of offshore structures, Amsterdam, The Netherlands, 1985, 429-440.
- [13]Moe, Einar, T. Stress analysis and fatigue tests on overlapped K-joints. Proc., Steel in Marine Structures, Amsterdam, The Netherlands, 1987, 395-404.
- [14]Gho, W.M. Structural behavior of completely overlap tubular joints. PhD thesis, Nanyang Technological Univ, Singapore, 2001.

- [15]Romeijn, A., Puthli, R.S., Wardenier, J. Guidelines on the numerical determination of stress concentration factors of tubular joints. Proc.5th Int.Symposium on Tubular Structures, Nottingham, U.K., 1993, 625-639.
- [16]Healy, B.E., Buitrago, J. Extrapolation procedures for determining SCFs in mid-surface tubular joints models. Proc. 6th. Int. Symposium on Tubular Structure, Melbourne, Australia, 1994, 651-659.
- [17]Dijkstra, OD. Comparison of strain distribution in three X joints determined by strain gauge measurements and finite element calculations. Paper TS6.2, Steel in Marine Structures, Paris, October, 1981.
- [18]浅海固定平台建造与检验规范, 中国船级社, 2004 年
- [19]ANSYS 8.0, ANSYS Help, APDL Programme's Guide.
- [20]邢静忠, 王永岗, 陈晓霞等编著, ANSYS 分析实例与应用教程, 机械工业出版社, 2004 年
- [21] 龚曙光, 谢桂兰编著, ANSYS 操作命令与参数化编程, 机械工业出版社, 2003 年
- [22]Department of Energy, Draft background to new fatigue design guidance for steel joints and connections in offshore structures. Department of Energy, 1995.
- [23]Origin handbook, Fitting with Mutiple Independence Variables.
- [24]NORSOK standard Design of Steel Structures, 1998.

## 发表论文和科研情况说明

### 发表的论文:

- [1] 于国友, 付艳霞等. KK 型复杂管节点应力集中系数问题研究, 中国海洋平台已录用.

## 致 谢

本论文的工作是在我的导师于国友教授的悉心指导下完成的,于教授严谨的治学态度和科学的工作方法给了我极大的帮助和影响。在此衷心感谢两年多年于教授对我的关心和指导。

在实验室工作及撰写论文期间,姬广令、刘志良、罗晓建、王风云、丁宁、张湘月、李秀峰等同学对我论文的研究工作给予了热情帮助,陈楠楠、李宁、侯凤林、连怡贞、孔晖、王静莎等舍友给了我精神上和学习上的支持,让我在天大的生活更加值得回忆,在此向他们表达我的感激之情。

另外也感谢家人,尤其是我的父母,我的姨妈,他们在经济上的支持我能够在学校专心完成我的学业。