

海洋平台管节点应力分析研究工作展望

陈伯真

(上海交通大学)

提要 本文在我国目前海洋平台管节点研究工作的基础上,提出今后管节点应力分析研究的几点意见,包括对复杂管节点及组合载荷作用下的研究,管节点静强度应从冲剪强度准则转向极限强度准则的研究,弹-塑性分析的研究,以及管节点局部变形的研究等。对上述研究方向的目的、意义及作法等提出了看法。

关键词 海洋平台;管结构;管节点;应力分析

I. 引言

海洋平台管节点是平台结构中的重要构件。我国自70年代末逐步形成了专门从事管节点研究的队伍,基本上解决了简单管节点的应力分析研究问题^[1,2]。1983年国家经委成立了“海上平台管节点研究委员会”(T)COS后,研究工作得到了相互交流与协调。但工作中尚有一些不足之处,表现在:研究的对象主要为简单管节点在简单载荷作用下的情况,对复杂管节点的研究为数较少;所做的管节点试验模型的尺寸较小,在应力分析中比较有效的塑料模型试验还未得到广泛采用;所进行的理论研究大多为院校及研究单位的研究生论文,难免有一定的局限性,研究成果的经济效益还不显著。

本文提出如下几点关于海洋平台管节点应力分析研究的粗浅看法:在目前已有的研究工作基础上对复杂管节点及组合载荷作用下的管节点应力分析作进一步的深入工作;管节点的静强度准则分析要从冲剪强度逐步转到以极限强度为基础的方向;与强度校核有关的管节点弹-塑性分析工作仍应进行;应开始注意管节点局部变形的研究工作。

II. 进一步研究复杂节点与组合载荷情况

目前我国已进行了许多简单管节点的理论分析与试验研究,典型的是受轴力的T形管节点。今后应力分析的重点应放在复杂管节点及组合载荷的情况。值得考虑的课题如下。

1. 简单管节点在组合载荷作用下的应力分析 实际海洋平台管节点所受载荷并非单一的,即既有轴向载荷,又有面内和面外弯曲载荷。因此仅研究单一的载荷工况是不够的。组合载荷的响应在弹性范围内原则上可以用叠加法来进行。但叠加的结果,热点位置发生了变化。为了确定热点位置,常需知道各单独载荷作用下管节点交贯线上各点的应力分布,或不同载荷方向的热点位置与应力集中系数的大小,这就出现了两个问题:一是不同载荷时的应力状

态, 二是交贯线上的应力集中系数分布。这两个问题的研究原则上并不困难, 但要求重点放在K, TK及DT, DTDK等型式的节点上, 因为对这些节点的研究难度较高也有实际意义。对于K及TK节点, 支管上的载荷不能限于目前规范上所规定的“平衡载荷”^[3,4], 而应考虑支管上载荷大小、方向都可能任意的一般情况, 并应为支管间相互影响积累资料, 例如K节点间隙 g 大小的影响, 为今后研究多分支的复杂管节点提供依据。在国外文献中 Gulati^[5]研究了平面内的T, K, TK管节点在不同载荷下的应力集中系数问题, 并提出了T节点交贯线上从冠点到鞍点之间应力集中系数分布的简单关系: 在轴向力时为线性关系, 在面内及面外弯曲时均为正弦函数关系。对于T及Y节点, 在轴向力与面外弯曲时, Dharmavasan等^[6]提出过一个比较复杂的交贯线上应力集中系数分布关系。到目前为止尚未见到其他型式节点与其他载荷下的分析结果, 因此这方面的研究工作还是有益的。我国上海海洋平台工程设计公司^[7]最近提出了用有限元法分析得到的T节点交贯线上应力集中系数分布公式, 并计及了支管与弦管管径比 β 的影响。此外鉴于参数 β 趋近于1时受力情况与应力状态均有所改变, 因此也应注意研究 $\beta=1$ 的情况, 特别对于DT或X型管节点。

2. 复杂管节点的应力分析 实际平台结构中应力集中系数过大的管节点(例如简单T节点)是不能用的。因此能大幅度降低应力集中系数的各种复杂管节点日益受到注意。复杂管节点包括搭接节点, 加筋节点, 灌浆节点, 多分支空间节点和铸钢节点等。铸钢节点的生产在我国尚未提到日程上, 因此除铸钢节点外的上述复杂管节点研究都有实际意义。

据现有研究结果报道, 搭接节点, 加筋节点及灌浆节点都能有效降低应力集中。其中搭接节点改变了载荷主要通过支管传给弦管的荷重传递情况, 使弦管受力有很大改善。K形搭接节点的应力集中系数比普通K节点的下降40—45%^[8]。这也可从熟知的Kuang的管节点应力集中系数公式看出: K节点的应力集中系数与间隙参数 $\zeta = g/D$ 约为 $\zeta^{0.06}$ 的关系。可见 ζ 越小应力集中系数越小。此外搭接节点的承载能力较大。加之实际平台设计中由于位置的限制不可避免会出现支管搭接情况, 故搭接节点也是实际平台设计的需要。目前关于搭接节点的研究不多, [9]较好研究了这一问题, 但只限于相同支管和受轴向力情形, 并且试验还不够充分。期望最终能对平台规范^[3,4]中K形搭接节点的有关计算规定提出意见与评价。

加筋节点与灌浆节点同样可大大降低应力集中系数。[10]的研究表明, 在弦管中加环筋可降低应力集中系数2/3—4/5。[11]指出灌浆节点比普通节点可降低应力集中系数约50%, 特别在受轴力情况下。这两种管节点在工艺上不复杂, 花费不会太大, 且承载能力都有所提高, 因此有发展前途。目前国内已开始研究加筋节点, 灌浆节点的研究还是空白。

多分支空间节点是平台中实际存在的, 中国科学院力学研究所^[12]开发了这方面的计算程序是有意义的。为了实用方便, 一个途径是根据支管间相互作用的影响来分析这个问题, 即所谓“connection interaction”问题^[5]。此处connection是指多分支节点中可以分离出来考虑的通常简单平面节点, 如T, Y节点等, 因此目前joint与connection已有不同的含义。现在认为, 支管间相互作用包括两个影响: 一是相邻支管提高了节点的刚度, 二是相邻支管上载荷的影响。Wordsworth等^[13]在所提出管节点应力集中系数的基础上提出了一个相邻支管间传递效应的做法, 把K或TK节点中某一个支管 i 处的应力集中系数表达为

$$SCF^{(i)} = (SCF)_y^{(j)} + \sum_j n_{ij} k_{ij} (SCF)_y^{(j)} \quad (1)$$

式中 j 为与 i 相邻的支管号码; 下标 y 表示 y 节点; $n_{ij} = P_j/P_i$, P_j 与 P_i 分别为支管 j 与 i 上的载荷; k_{ij} 称为传递因数。但 [13] 只给出了支管受轴力与面内弯矩时的结果。Gulati 用有限元法做了 K 与 TK 节点的算例, 分析了传递因数, 认为 [13] 的结果有一定的误差。但 [13] 的方法不失为设计中一个较实用的方法, 有必要再作探索。

3. 关于焊缝的研究 在管节点应力分析中不少研究者对焊缝给应力集中系数的影响很有兴趣, 并已作了不少工作, 多采用三维元或等参元等有限元方法。实际管节点存在焊缝, 因此研究有焊缝管节点的应力集中系数有意义。但应注意, 目前按欧洲共同体规定所得的实测热点应力与不计焊缝时所得的理论计算结果是有比较基础的, 并且考虑焊缝计算的应力集中系数仍应理解为几何应力集中系数而非局部应力集中系数, 因为计算所得的结果并不能计及焊缝缺陷等因素。现有研究已表明, 考虑焊缝后热点位置在焊趾, 应力集中系数值比不计焊缝时略小。因此认为研究焊缝的意义在于比较有焊缝时焊趾处的应力与无焊缝时支管与弦管中面交点处的热点应力的差别, 提供计及焊缝与现有不计焊缝的应力集中系数的修正资料, 即对现有应力集中系数公式的再评价。至于企图用理论方法分析焊缝外形等因素并无太大实际意义。Wordsworth 等建议对于 T 与 DT 节点用一个系数 $(1 + l_1/T)^{-1.3}$ 来修正他们提出的应力集中系数公式中弦管的应力集中系数 (此处 l_1 为焊脚长度; T 为弦管壁厚), 是一个较好的研究焊缝效应的形式, 可以借鉴。

4. 对研究工作的意见 为使研究成果更好地用于生产实际, 发挥更大的经济效益, 认为仅开发一些计算方法和程序还是不够的。从目前设计需要和今后规范修订来看, 若能进一步提供一些经验公式或表格、曲线还是有用的。以搭接管节点为例, 尽管目前已有所研究, 用有限元计算亦不存在什么问题, 但英国 CIRIA 仍旧建议一个初估搭接节点应力集中系数的方法, 即取非搭接 K 节点公式中的 $\zeta = 0.01$ 来计算搭接节点的应力集中系数, 或把搭接与被搭接的支管近似地当作 Y 节点来计算 (只要选取适当的 α 值), 最后取以上两种结果中之大者来作为估算值。这种粗略估算方法的目的是在设计初期阶段起作用。又如前述的多支管节点中提到的相互支管间的传递效应方法亦是如此。从这个意义上说, 上海交通大学在其提出的半解析法的基础上制订的应力集中系数表格是好的, 它可以比较方便地查出应力集中系数的值, 并有一定的精确度。

5. 模型试验及其他 在模型试验方面, 管节点钢模应尽可能做大一些, 因为目前校核理论计算时认为用大尺度的钢模试验还是最好的。塑料模型由于其材料的弹性模量小, 加力方便, 模型制作也比较方便, 因此在应力分析中有其优点, 特别适用于复杂管节点的模型。对于弦管径厚比 γ 较小的管节点, 用厚壳理论来分析。研究结果最好能给出一个尺度范围, 即在何种 γ 值时考虑厚壳才是必要的, 并应指出对薄壳理论的结果将给出怎样的修正量。因为目前完全排除薄壳理论计算还不可能。

III. 管节点静强度分析的极限强度准则

管节点的静强度分析一般有三个准则, 即最大应力准则、冲剪强度准则及极限强度准则。长期以来美国 API 及 AWS 都采用冲剪强度准则, 我国平台规范亦采用这个准则。1984 年 API15 版明显改动为冲剪强度与极限强度准则并列, 且前者的作用冲剪应力与允许冲剪应力的式子都比过去有所简化。这说明冲剪强度准则的地位已开始下降。冲剪强度准则是根据早年少量管节点试验资料制定的, 用它来反映不同形式节点与不同载荷作用都不够完善。虽然

API为此逐步作了修改,引入了不少修正系数,但冲剪强度的形式限制了它在不同情况下的合理使用,因此被其他更合理的准则所取代是可以预料的。极限强度准则根据极限载荷及安全系数来判断管节点的静强度。在组合载荷下其一般形式为

$$\frac{P}{P_u} + C_1 \left(\frac{M}{M_u} \right)_{IPB}^{\alpha_1} + C_2 \left(\frac{M}{M_u} \right)_{OPB}^{\alpha_2} \leq 1.0 \quad (2)$$

此式称为管节点在组合载荷下的相关公式。式中 P , M 分别为作用的轴向与弯曲载荷; P_u , M_u 分别为轴向与弯曲单独作用时的极限载荷; C_1 , C_2 及 α_1 , α_2 分别为系数与指数。API的最新版本采用了两个这种形式的公式。要确定这个公式首先要确定管节点在单独载荷作用下的 P_u 及 M_u ,还要研究出组合载荷下的相关关系,即定出系数 C_1 , C_2 及指数 α_1 , α_2 。

由于管节点的破坏状态比较复杂,极限状态的定义至今并不完全统一,所以目前虽然已有不少管节点极限载荷的经验公式,如Pan, Yura, Gibstein, Tebbett的等,但结果往往相差较大,因此还有不少工作要做。关于确定相关公式中的系数,国外大都采用试验得出结果再用曲线拟合的方法来定,因此进行组合载荷下的试验是必要的。但要单靠试验来获得各种不同管节点的极限强度准则是十分艰巨的任务,其工作量也许不亚于制定疲劳的 $S-N$ 曲线。因此只要有一定的破坏准则,用理论方法应该也是一条途径,就象板、壳稳定性问题中的相关方程也大都是用理论方法得到的一样。我国船检部门应充分重视这个工作。

IV. 管节点的弹-塑性分析

管节点有较高的应力集中,因此受载后热点附近的材料将进入塑性状态,为此必须进行弹-塑性分析。事实上管节点的弹性分析只能用来确定应力集中系数,不可能用它来了解节点的真实应力场。管节点强度校核中的最大应力准则所以未被采用的原因之一也在于此。另一方面,高强度钢及钢筋混凝土等材料通常在较低载荷下就呈现材料的非线性现象,只有弹-塑性分析才能获得更正确的结果。由于问题的复杂性,这方面工作国内外都做得不多。我们首先可在现有基础上更广泛和深入地进行各种形式及各种载荷下的管节点弹-塑性分析。其次要结合前述静强度的极限强度准则用弹-塑性分析方法来研究各种管节点的极限载荷以及组合载荷下的极限状态,必要时还应计及结构的几何非线性影响。

管节点的弹-塑性研究对节点的疲劳分析也有意义。疲劳分析的 $S-N$ 曲线中 S 是应力范围或应变范围,并要求在低周的高应力区采用应变范围,因为在此区中材料已进入弹-塑性阶段。为此需要有按弹-塑性分析得到的载荷与应变间的真实关系。不然的话,若用弹性分析的载荷与应变关系必然会高估了管节点的疲劳寿命。

V. 管节点的局部变形

过去往往只关心节点的应力集中,对节点的变形不感兴趣,原因是对管节点本身的强度校核及疲劳分析来说节点的变形并不重要。另一个原因是过去较长时间内在平台整体分析中大都认为各组成构件(梁单元)在相交处为刚性连接。然而后来发现刚性连接假定将带来一定的误差,这影响平台中各构件名义应力的大小,进一步又影响管节点的载荷。因此计及节点的柔性无论对平台总体分析还是对管节点本身的强度和疲劳分析都是有意义的。

[14]较早提到管节点的局部变形问题,指出在平台总体分析中计及节点柔度一般将使计算的名义应力减小。但首先考虑管节点柔性来进行平台分析的看法还是Bouwkamp^[15]。他分析了一个平台实例,不过将三维的空间平台结构简化为二维的平面结构。目前关于计及管

节点柔性对平台的影响虽还没有完全统一的认识,但可归纳出以下一些结论性的意见:管节点的柔性对海洋平台的性能分析是重要的,与常规刚性节点的分析相比,它明显改变了构件的名义应力分布;计及管节点柔性后并非所有构件都降低应力,一般来说原来受力大的构件应力将减小,原来受力小的构件应力将增大,即效果是各构件应力的重新分配;考虑了管节点柔性后将明显增大平台的变形;将影响平台的振动周期与模态。

因此对平台来说,为了获得更精确的也可能是更节约的分析和设计,考虑管节点的柔性是必要的。API^[3]的规定已指出,平台结构分析应考虑由于管节点柔性及非弹性松弛引起的构件中的二次弯矩的减额。DNV^[16]平台构件的屈曲一节亦强调在整体分析时需计及管节点局部柔性的影响。Tebbett^[11]提出平台分析的五种计算模式,其中有三种模式都考虑管节点的柔性。

管节点柔性目前有两种定义。一是柔性因数(flexibility factor),它是管节点位移与力的关系式中的一个系数。例如对受轴力的节点,局部变形 δ 与载荷 P 间的关系为

$$\delta = k(Pd/A_d E) \quad (3)$$

式中 A_d , d 为支管的截面积及直径, E 为弹性模量, k 即柔性因数。另一是节点局部柔度(LJF),即单位载荷下管节点的局部变形。对于受轴向载荷的节点,有

$$LJF = \delta/P \quad (4)$$

对于受弯曲载荷的节点,若 M 为弯矩, φ 为相应的转角,则有

$$LJF = \varphi/M \quad (5)$$

对于多分支管节点,由于各支管间的相互作用,有LJF矩阵

$$\begin{pmatrix} \delta_1 \\ \varphi_{i1} \\ \varphi_{01} \\ \delta_2 \\ \varphi_{i2} \\ \varphi_{02} \\ \vdots \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & c_3 & \cdots \\ c_4 & c_5 & \cdots & \cdots \\ c_6 & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \end{bmatrix} \begin{pmatrix} P_1 \\ M_{i1} \\ M_{01} \\ P_2 \\ M_{i2} \\ M_{02} \\ \vdots \end{pmatrix} \quad (6)$$

根据上面的定义,用理论方法或实验研究来确定 k 或LJF都不困难。只要注意到公式中的变形都是指“局部”的,不应包括构件的变形在内,例如在测量轴向受力节点的挠度时,必需在其中扣除弦管作为梁一样的弯曲挠度。

目前关于各种管节点的LJF的资料相当缺乏,仅有的资料是DNV^[16]给出了两个T节点在面内及面外弯曲时的转动柔度公式及Fessler^[17]通过塑料模型试验得到的T、Y节点在轴力与面内、面外弯曲时的LJF公式。我国应及时开展研究,为平台结构分析提供资料,最终达到合理设计的目的,并望做出象应力集中系数那样的LJF的公式或表格。这个工作完全可结合应力分析的研究同时进行。现有研究表明,LJF主要取决于 γ ,并与其他几何参数 β , θ , g 等有关。还发现LJF与SCF间存在着一定的联系,因此进一步寻求管节点应力集中系数与柔性之间的关系也将是有益的。

VI. 结束语

我国海洋平台结构包括管节点的研究在不到10年间已取得不少成果,有些已达到国际水

平。随着我国海上石油开发事业的需要,急需在技术上更加提高。海洋平台管节点的科学研究是这方面的一个重要项目,应在现有基础上密切结合生产实际,继续不断地进行深入的研究工作,并注意将研究成果变为生产力,以期在海上石油开发高潮中作出更大的贡献。

参 考 文 献

- 1 陈铁云,近海钻井平台管状接头应力分析的进展.力学进展,15,4(1985年)
- 2 陈伯真,我国海洋平台管节点应力分析的研究工作.第3届全国近海工程学术会议(1986年4月)
- 3 API RP2A(1982), (1984)
- 4 中华人民共和国船检局.海上固定平台入级与建造规范(1983)
- 5 Gulati KC, et al. An analytical study of stress concentration effects in multibrace joints under combined loading. OTC 4407 (1982)
- 6 Dharmavasan S, Dover WD. Stress analysis techniques for offshore structures, Proc. OMAE (1984)
- 7 马和武等. T型管结点在支管荷重作用下管径比对交贯线上应力分布的影响.第3届全国近海工程学术会议(1986年4月)
- 8 Fessler H, et al. Elastic stress due to axial loading of tubular joints with overlap. BOSS, Paper 18 (1979)
- 9 陈铁云,陈毓旻.海洋平台K型搭接管接头的应力分析与实验研究.第5届近海力学与极区工程学术会议(OMAE)(1986)
- 10 陈伯真,高俊华.海洋平台中具有环筋加强的管接头应力分析.上海交通大学90周年校庆学术会论文(1986)
- 11 Tebbett E. The reappraisal of steel jacket structures allowing for composite action of grouted piles. OTC 4194 (1982)
- 12 梁乃刚,陈其业.非平面多分支复杂管节点有限元分析的先进方法.第1次中国钢结构协会海洋钢结构专业协会学术会议(1985)
- 13 Wordsworth AC, Smedley GP. Stress concentration at unstiffened tubular joints. EOSRS, Cambridge UK, Paper 31 (1978)
- 14 Rodabaugh EC. Review of data relevant to the design of tubular joints for use in fixed offshore platforms. WRC 256 (1980)
- 15 Bouwkamp JG, et al. Effect of joint flexibility on the response of offshore structures. OTC 3901 (1980)
- 16 DNV Rules (1977), Reprinted with corrections (1981)
- 17 Fessler, H, Spooner H. Experimental determination of stiffness of tubular joints. Symp. on Integrity of Offshore Structures, Glasgow, Paper 28 (1981)

THE PROSPECTS ON THE STRESS ANALYSIS OF TUBULAR JOINTS FOR OFFSHORE PLATFORMS

Chen Bo-zhen

(Shanghai Jiao Tong University)

Abstract On the basis of the current achievements of stress analysis of tubular joints in China, further studies in this field are recommended in this paper, which include the stress analysis of different kinds of complex joints under combined loadings, the study of ultimate strength of tubular joints to be used as a more reasonable static strength criterion than the conventional punching shear criterion, the elasto-plastic behaviour of tubular joints and the study of local deformation as well as the flexibility of tubular joints.

Keywords offshore platforms; tubular structures; tubular joints; stress analysis