

DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2015.02.005

# 正交异性钢桥面板结构热点应力有限元分析

狄生奎<sup>1</sup>, 文 铖<sup>1</sup>, 叶肖伟<sup>2</sup>

(1. 兰州理工大学 防震减灾研究所, 甘肃 兰州 730050; 2. 浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310058)

**摘 要:** 以正交异性钢桥面板焊接节点为研究对象, 对焊接节点焊趾处不同的结构热点应力确定方法进行比较分析. 利用有限元软件 ANSYS 分别建立焊接节点的实体单元和壳单元有限元模型, 在焊趾附近区域共划分 7 种网格尺寸, 分别采用直接提取法、表面外推法和结构应力法计算正交异性钢桥面板焊接节点焊趾处的结构热点应力, 比较分析不同方法计算结果的精度及对网格尺寸和单元类型的敏感性. 研究表明, 对于不同网格尺寸和单元类型的有限元模型, 直接提取法和表面外推法获得的结构热点应力离散性较大, 结构应力法计算的结构热点应力具有较好的一致性.

**关键词:** 正交异性钢桥面板; 焊接节点; 结构热点应力; 有限元分析

中图分类号: U 441

文献标志码: A

文章编号: 1008-973X(2015)02-225-07

## Finite element analysis of structural hot-spot stress for orthotropic steel bridge deck

DI Sheng-kui<sup>1</sup>, WEN Cheng<sup>1</sup>, YE Xiao-wei<sup>2</sup>

(1. Institute of Earthquake Protection and Disaster Mitigation, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

**Abstract:** A comparative study was conducted to determine the structural hot-spot stress at the weld toe of the welded joint in the orthotropic steel bridge deck by use of different methods. The finite element models of the welded joint were established by the finite element software ANSYS with the solid element and the shell element, respectively. Seven types of the mesh size were divided adjacent to the weld toe zone. The structural hot-spot stress at the weld toe of the welded joint in the orthotropic steel bridge deck was calculated using the direct extraction method, the surface extrapolation method, and the structural stress method. The results obtained from different methods were compared in respect of the accuracy and the sensitivity with the mesh size and the element type. The achieved results reveal that when the finite element models are constructed by use of different mesh sizes and element types, the structural hot-spot stress calculated by the direct extraction method and the surface extrapolation method has significant discreteness, while the structural hot-spot stress derived from the structural stress method has good consistency.

**Key words:** orthotropic steel bridge deck; welded joints; structural hot-spot stress; finite element analysis

收稿日期: 2013-11-28.

浙江大学学报(工学版)网址: www.journals.zju.edu.cn/eng

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51308493); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20130101120080); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2013QNA4023).

作者简介: 狄生奎(1971—), 男, 教授, 博导, 从事土木工程防灾减灾方面的研究. E-mail: disk@lut.cn

通信联系人: 叶肖伟, 男, 副教授, 博导. E-mail: cexwe@zju.edu.cn

长期以来,焊接构件的应力分析一直受到国内外学者的广泛关注. 各国的设计规范<sup>[1-2]</sup>在对焊接结构进行安全性能评定时,常采用名义应力. 在实际应用中,由于焊接构件几何构造的不连续性且受力复杂,名义应力存在 2 个显著缺点:一方面,它忽略了结构实际的截面尺寸变化,未能考虑焊趾处的应力集中效应;另一方面,名义应力难以明确定义,采用此方法进行结构分析和评估无法保证结果的准确性.

随着有限元技术在焊接构件应力分析中的大量应用,国内外学者提出了考虑结构几何突变引起的局部应力集中效应的结构热点应力方法<sup>[3-6]</sup>. 然而,直接从有限元模型中提取焊趾处的结构热点应力值,在几何不连续处受到网格尺寸的影响,随着网格尺寸的减小,焊趾处的应力结果会逐渐增大<sup>[7]</sup>. 为了避免焊缝几何构造、切口和焊接质量的影响,研究人员将焊接构件的结构热点应力与焊趾附近参考点的局部应力建立起联系<sup>[8]</sup>,发展了基于多个参考点外推理论的结构热点应力确定方法. 国际焊接学会(international institute of welding, IIW)<sup>[9]</sup>推荐在焊趾局部区域应用表面外推法计算焊接构件的结构热点应力,采用距离焊趾  $0.4t$  和  $1.0t$  ( $t$  为构件厚度)或者  $0.5t$  和  $1.5t$  参考点上的表面应力进行线性外推<sup>[10-11]</sup>.

采用表面外推法确定焊接构件结构热点应力时,计算结果对有限元网格尺寸和单元类型存在网格敏感性<sup>[12-13]</sup>. 针对此问题 Radaj<sup>[14]</sup>提出结构热点应力既可以通过表面外推的方式获得,也可以通过沿构件厚度方向线性化的方法获得. Dong<sup>[7]</sup>在 Radaj 定义的结构应力的基础上,应用结构力学基本原理采用有限元分析结果计算焊趾处的结构热点应力,提出了网格不敏感结构应力方法,并已纳入美国机械工程师协会(american society of mechanical engineers, ASME)新近修订的规范中. Poutiainen 等<sup>[15]</sup>研究了不同热点应力确定方法的优缺点,对比分析了结构热点应力有限元计算分析结果. Doerk 等<sup>[16]</sup>针对不同焊接构件比较研究了各种结构热点应力确定方法的特点.

本文建立了正交异性钢桥面板焊接节点的实体单元和壳单元有限元模型,分别采用直接提取法、表面外推法和结构应力法计算焊接节点焊趾处的结构热点应力,比较分析了不同方法计算结果的精度及对有限元网格尺寸和单元类型的敏感性.

## 1 结构热点应力计算方法

### 1.1 结构热点应力定义

焊接构件中的焊趾是容易发生破坏的危险点(热点),结构热点应力定义为焊趾处的最大结构应力,它考虑了结构几何形状引起的应力集中效应. 焊趾处沿构件厚度方向的实际应力状态为非线性应力分布,如图 1 所示. 缺口应力  $\sigma_{in}$  由 3 部分组成:膜应力  $\sigma_m$ , 弯曲应力  $\sigma_b$  和非线性应力峰值  $\sigma_{nlp}$ . 其中,主要由焊趾自身缺口效应引起的非线性应力峰值是一组自相平衡力系,因此结构热点应力  $\sigma_s$  定义为焊趾处的膜应力和弯曲应力之和.

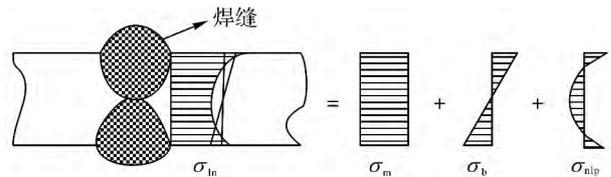


图 1 厚度方向非线性应力分布

Fig. 1 Nonlinear stress distribution through thickness

### 1.2 表面外推法

表面外推法最早被应用于确定管节点的结构热点应力,目前在板结构的焊接构件中也得到广泛应用. 由于焊接构件的焊趾处存在焊缝形状、切口等因素引起的非线性应力峰值影响,表面外推法采用距离焊趾一定距离的参考点的表面应力,通过线性表面外推计算结构热点应力,其中外推点的确定至关重要.

IIW<sup>[9]</sup>将热点分为 3 类,对于  $a$  和  $c$  类型,线性表面外推法如图 2 所示. 推荐了基于 2 个参考点计算结构热点应力的方法,以距离焊趾  $0.5t$  和  $1.5t$  为参考点进行线性表面外推. 在有限元分析中,由于是提取参考点的表面应力进行计算,所以焊趾前网格尺寸划分需考虑上述参考点的位置. 对于应用高阶单元的有限元模型,往往利用距离焊趾  $0.5t$  和  $1.5t$  位置的实体单元表面中心节点或者壳单元中间节点作为参考点,如图 3 所示,对应的表面外推计算公式

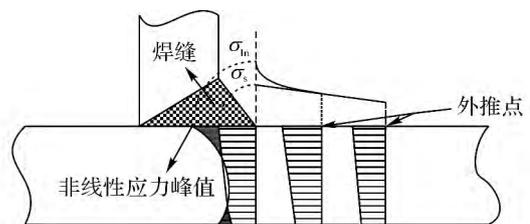


图 2 焊趾处结构热点应力定义

Fig. 2 Definition of structural hot-spot stress at weld toe

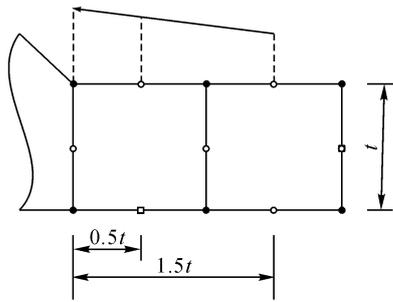


图 3 表面外推法

Fig. 3 Surface extrapolation method

表示为

$$\sigma_s = 1.5\sigma_{0.5t} - 0.5\sigma_{1.5t}. \quad (1)$$

### 1.3 结构应力法

Dong<sup>[7]</sup>综合考虑了表面外推法和沿构件厚度方向的应力分布特点,提出了一种网格不敏感的焊接构件结构热点应力确定方法.此方法利用结构力学的基本原理,将沿厚度方向的应力分布等效转化为焊趾处结构热点应力,具有合理可靠的力学基础.

1.3.1 实体单元模型 由于存在应力集中现象,焊接构件破坏通常发生在焊趾处,并沿着厚度方向扩展,焊趾处沿构件厚度方向应力呈非线性分布.在实体单元有限元模型中,结构应力法假设该应力分布为单调变化,如图 4(a)所示.

其中,  $\sigma_x(y)$  和  $\tau_{xy}(y)$  为焊趾处沿构件厚度方向的应力分量,相应的静力等效结构应力分布如图 4(b)所示.  $x$  方向正应力分量  $\sigma_x(y)$  简化为 2 部分:膜应力  $\sigma_m$  和弯曲应力  $\sigma_b$ ,  $y$  方向剪应力分量  $\tau_{xy}(y)$  简化为  $\tau_m$ . 通常情况下,正应力分量  $\sigma_x(y)$  对焊接构件破坏起主导作用,因此,结构应力法未考虑纵向应力分量  $\tau_m$  的影响.结构热点应力  $\sigma_s$  定义在焊趾截面  $A$ -

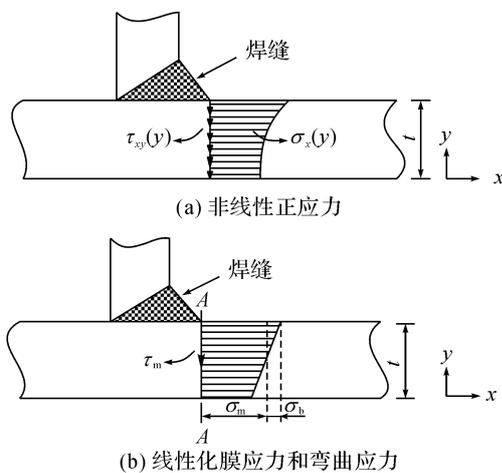


图 4 结构应力简化示意图

Fig. 4 Schematic of simplified structural stress

$A$  上,为膜应力  $\sigma_m$  和弯曲应力  $\sigma_b$  之和,可以表示为

$$\sigma_s = \sigma_m + \sigma_b. \quad (2)$$

应该指出的是,对于有限元应力分析,有限元网格尺寸的变化将影响焊趾附近应力值的奇异性.为了消除应力奇异性,Dong<sup>[7]</sup>指出,对于实体单元有限元模型,结构热点应力通过距离焊趾一定距离  $\delta$  处  $B$ - $B$  截面的应力进行确定( $\delta$  一般取焊趾前一个单元尺寸长度),如图 5 所示.

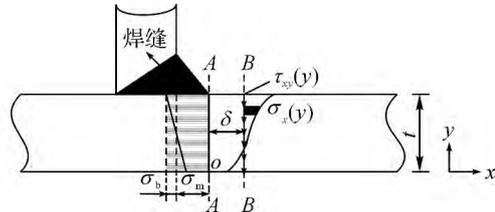


图 5 实体单元模型结构热点应力计算示意图

Fig. 5 Schematic of structural hot-spot stress determination for solid element model

图 5 中,  $A$ - $A$  平面为沿焊趾厚度方向的截面,其中  $B$ - $B$  截面的轴向应力  $\sigma_x(y)$  和剪应力  $\tau_{xy}(y)$  可以从有限元分析中直接获得.当结构处于平衡状态时,根据结构力学理论,结构热点应力分量膜应力  $\sigma_m$  和弯曲应力  $\sigma_b$  满足

$$\sigma_m = \frac{1}{t} \int_0^t \sigma_x(y) dy. \quad (3)$$

$$\frac{t^2}{2} \sigma_m + \frac{t^2}{6} \sigma_b = \int_0^t \sigma_x(y) y dy + \delta \int_0^t \tau_{xy}(y) dy. \quad (4)$$

式(3)为正应力在  $x$  方向上的平衡方程.式(4)表示在  $O$  点的力矩平衡.

1.3.2 壳单元模型 壳单元模型广泛应用于结构应力分析,壳单元模型和实体单元模型计算方法有所不同,需要运用板壳理论和壳单元有限元方法进行分析.因此,焊趾处局部应力计算应满足有限元模型的板壳理论,而不是式(3)和(4)中膜应力和弯曲应力计算公式<sup>[7]</sup>.

壳单元有限元模型中每个节点有 6 个自由度(3 个平动自由度和 3 个转动自由度),在进行结构应力计算时,需要将总体坐标系  $(x, y, z)$  的应力,通过坐标转换转化到局部坐标系  $(x', y', z')$ ,二维的整体坐标系和局部坐标系如图 6 所示.

对于总体坐标系  $(x, y, z)$ ,单元节点位移矩阵可以表示为

$$\{\boldsymbol{\mu}\}_i = [\mu_{xi}, \mu_{yi}, \mu_{zi}, \theta_{xi}, \theta_{yi}, \theta_{zi}]^T. \quad (5)$$

式中:  $\mu_{xi}$ ,  $\mu_{yi}$ ,  $\mu_{zi}$  和  $\theta_{xi}$ ,  $\theta_{yi}$ ,  $\theta_{zi}$  分别表示节点  $N_i$  在  $x, y, z$  方向上的 3 个平移位移和 3 个转动位移,  $i$  取  $1, 2, \dots, n$ ,  $n$  表示单元上的节点数,根据焊缝焊

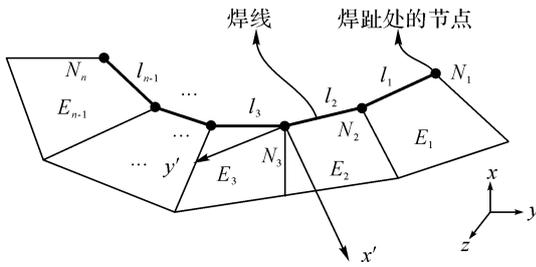


图 6 节点力的坐标系转换

Fig. 6 Coordinate transformation of nodal force

线的网格划分情况确定<sup>[17]</sup>.

单元节点荷载矩阵  $\{F^e\}_i$  可以表示为

$$\{F^e\}_i = [F_{xi}, F_{yi}, F_{zi}, M_{xi}, M_{yi}, M_{zi}]^T. \quad (6)$$

式中:  $F_{xi}$ ,  $F_{yi}$ ,  $F_{zi}$  和  $M_{xi}$ ,  $M_{yi}$ ,  $M_{zi}$  分别表示总体坐标系下的节点力和节点弯矩. 节点荷载  $\{F^e\}$  可以通过下式获得

$$\{F^e\} = \{K^e\} \{\mu\}. \quad (7)$$

式中:  $\{K^e\}$  为单元刚度矩阵, 可以从有限元模型中获得, 而局部坐标系下  $(x', y', z')$  的单元节点荷载  $\{F^e\}$  可以通过式(8)计算得到

$$\{F^e\} = \{T\} \{F^e\}. \quad (8)$$

式中:  $\{T\}$  为坐标转换矩阵. 结构应力法的优势并不是使用了节点力和节点弯矩, 而是基于等效转换将节点力和弯矩转化为线力  $\{f_{xi}\}$  和线力矩  $\{m_{yi}\}$ , 线荷载等于荷载大小与焊趾长度之比. 对于非闭合焊缝, 已知节点力  $\{F^e\}$  及相邻节点距离  $l_j$ ,  $j$  取 1, 2, ...,  $n-1$ , 根据节点力和弯矩做功与线力和线力矩做功相等, 计算得到等效转换矩阵  $L$ , 利用  $L$  进行线荷载等效计算, 将  $x'$  轴方向的节点力转化为该方向单元边上的线力  $f_{xi}$ , 同理, 将  $y'$  轴方向的节点力矩转化为该方向单元边上的线力矩  $m_{yi}$ , 如式(9)~(11)所示.

$$\{f_{xi}\} = \{F_{xi}\}^T L^{-1}. \quad (9)$$

$$\{m_{yi}\} = \{M_{yi}\}^T L^{-1}. \quad (10)$$

$$L = \begin{bmatrix} \frac{l_1}{3} & \frac{l_1}{6} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \frac{l_1}{6} & \frac{l_1+l_2}{3} & \frac{l_2}{6} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \frac{l_2}{6} & \frac{l_2+l_3}{3} & \frac{l_2}{6} & 0 & \vdots \\ 0 & 0 & \ddots & \ddots & \ddots & \frac{l_{n-2}+l_{n-1}}{3} \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & \frac{l_{n-1}}{6} & \frac{l_{n-1}}{3} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

通过以上等效转换, 当结构处于平衡状态时, 焊趾处所受荷载与外荷载达到平衡, 在已知局部坐标

系的线荷载  $f_x$  和线力矩  $m_y$  的情况下, 应用材料力学理论, 通过式(12)计算焊趾处各节点的结构热点应力.

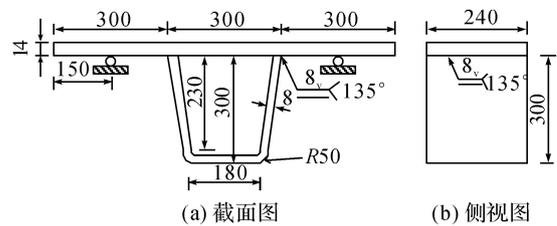
$$\sigma_s = \sigma_m + \sigma_b = \frac{f_{x'}}{t} + \frac{6m_{y'}}{t^2}. \quad (12)$$

式中:  $f_{x'}$  为  $x'$  轴方向的线力;  $m_{y'}$  为  $y'$  轴方向的线力矩.

## 2 算例分析

### 2.1 构件描述

本文以某大型桥梁主跨桥段的正交异性钢桥面板典型焊接节点为研究对象. 焊接节点沿纵肋纵向取 240 mm, 高 300 mm; 面板长  $3 \times 300$  mm, 厚 14 mm; 纵肋下宽 180 mm, 厚 8 mm. 钢材的弹性模量  $E=206$  GPa, 泊松比  $\nu=0.3$ . 在距离焊接节点面板端部 150 mm 处, 左右两端设置铰接支座. 荷载作用于纵肋正上方面板, 静力分析施加的荷载为 10 kN, 作用面积为  $300 \times 240$  mm<sup>2</sup>, 如图 7 所示.



单位: mm

图 7 正交异性钢桥面板焊接节点

Fig. 7 Welded joint in orthotropic steel bridge deck

### 2.2 有限元模型

采用有限元软件 ANSYS 分别建立正交异性钢桥面板焊接节点的实体单元 (Solid) 和壳单元 (Shell) 有限元模型, 采用 3 种方法 (直接提取法、表面外推法和结构应力法) 对焊趾处的结构热点应力进行比较分析. 根据文献<sup>[11,13]</sup>, 采用下列 4 类单元进行有限元建模:

- 1) 实体单元, 20 节点 (20-Solid), 等参缩减积分;
- 2) 实体单元, 8 节点 (8-Solid), 等参完全积分;
- 3) 壳单元, 8 节点 (8-Shell), 等参缩减积分;
- 4) 壳单元, 4 节点 (4-Shell), 等参缩减积分;

需要指出的是, 有限元模型中焊缝的模拟对结构热点应力的计算结果有较大影响. 对于实体单元模型, 通常能够较好地模拟角焊缝, 一般简化为 45° 坡角的焊缝形式. 而壳单元模型是沿构件中性面进

行建模,IIW 推荐了 3 种壳单元焊缝建模方法,分别使用倾斜的壳单元、刚性连接的壳单元以及变厚度的壳单元模拟焊缝.本文采用倾斜的壳单元模拟焊缝,焊缝厚度为  $t\cos\alpha$ ,  $\alpha$  为焊缝倾角,如图 8 所示.如图 9 所示,实体单元模型焊趾附近区域的网格尺寸分别为  $1\text{ mm}\times 1\text{ mm}\times 1\text{ mm}$  至  $28\text{ mm}\times 14\text{ mm}\times 28\text{ mm}$  7 种网格,而壳单元模型分别从  $1\text{ mm}\times 1\text{ mm}$  至  $28\text{ mm}\times 28\text{ mm}$  7 种网格,分别用 I 至 VII 表示.

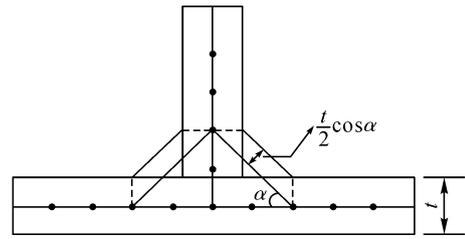


图 8 壳单元角焊缝建模

Fig. 8 Modeling of fillet weld in shell element

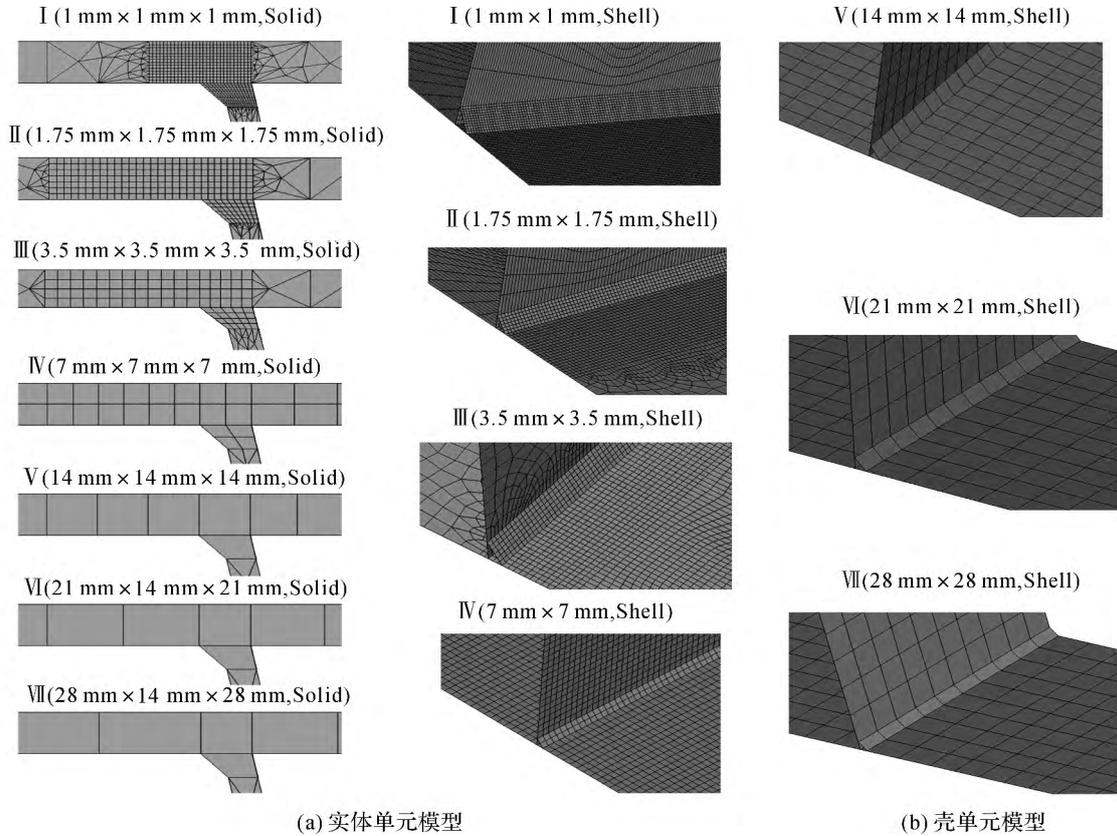


图 9 焊趾处单元网格划分

Fig. 9 Division of element mesh at weld toe

### 3 结果分析及讨论

为了研究不同网格尺寸和单元类型对结构热点应力计算结果的影响,分别采用直接提取法、表面外推法和结构应力法计算焊趾处的结构热点应力,比较分析不同方法计算结果的精度及对有限元网格尺寸和单元类型的敏感性.本文选取了 4 种有限元单元类型并划分 7 类网格尺寸进行结构热点应力计算,计算结果如表 1 所示.从表中可以看出,表面外推法在计算过程中具有一定的局限性,当网格尺寸较大时无法计算,表格中相应位置未列出计算结果.例如,8 节点实体单元(8-Solid),焊趾前的网格尺寸

不能超过  $1.0t(14\text{mm})$ . 4 节点壳单元(4-Shell)没有中间节点,焊趾前的网格尺寸长度不能达到  $1.0t^{[11]}$ .

对同一种方法不同网格尺寸和单元类型进行比较分析可知,直接提取法的计算结果在实体单元(20-Solid, 8-Solid)和壳单元(8-Shell, 4-Shell)有限元模型中受网格尺寸变化的影响较大,网格尺寸越小,计算结果越大,结果不稳定,无法获得可信的热点应力值,如图 10 所示.因此,当采用直接提取法计算正交异性钢桥面板焊接节点的结构热点应力时,受有限元单元类型和网格尺寸的影响较大,对于如何划分网格尺寸和选取何种单元类型进行计算,较难抉择.

表 1 不同方法  $\sigma_s$  计算结果  
Tab. 1 Calculated results by different methods

方法类型	单元类型	$\sigma_s/\text{MPa}$						
		I	II	III	IV	V	VI	VII
直接提取法	20-Solid	213.870	179.290	144.810	118.980	103.630	102.570	101.440
	8-Solid	177.840	151.560	126.430	107.081	96.138	92.999	90.011
	8-Shell	115.531	111.590	103.462	99.780	97.570	94.860	93.445
	4-Shell	102.170	101.830	101.020	99.464	96.331	93.334	93.305
表面外推法	20-Solid	100.963	101.018	100.288	101.618	102.406	—	—
	8-Solid	100.618	100.793	102.530	107.081	—	—	—
	8-Shell	102.379	102.378	102.378	102.368	102.438	—	—
	4-Shell	102.322	102.339	102.330	102.396	—	—	—
结构应力法	20-Solid	102.703	102.710	102.707	102.805	102.687	102.600	102.722
	8-Solid	102.171	102.179	102.714	102.708	102.651	102.528	102.414
	8-Shell	102.694	102.694	102.696	102.699	102.720	102.770	102.827
	4-Shell	102.633	102.638	102.621	102.675	102.675	102.808	102.763

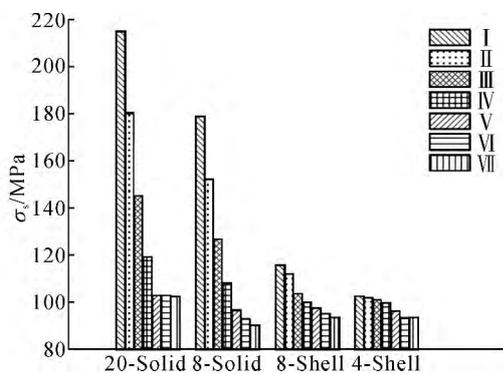


图 10 直接提取法计算结果

Fig. 10 Calculated results by direct extraction method

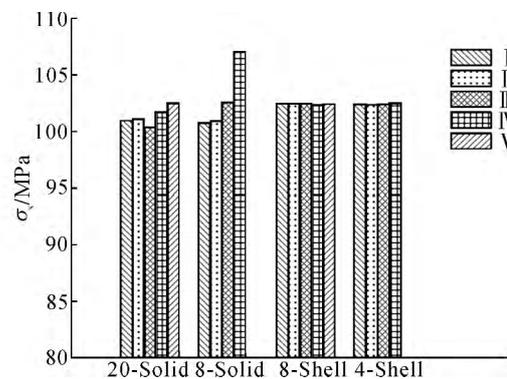


图 11 表面外推法计算结果

Fig. 11 Calculated results by surface extrapolation method

如图 11 所示为采用表面外推法进行结构热点应力计算的结果,从图中可以看出,实体单元(20-Solid, 8-Solid)有限元模型以距离焊趾  $0.5t$  和  $1.5t$  为参考点进行表面外推获得的计算结果具有一定的离散性;壳单元(8-Shell, 4-Shell)有限元模型的计算结果受网格尺寸的影响较小,这是因为基于有限元计算焊接节点焊趾处的结构热点应力,必须排除非线性应力峰值的影响,如图 1 所示,壳单元模型应力状态已假定沿构件厚度方向为线性变化<sup>[9]</sup>. 因此,当采用表面外推法计算正交异性钢桥面板焊接节点的结构热点应力时,网格尺寸和单元类型对实体单元有限元模型的计算结果影响较大,而不同网格尺寸对壳单元有限元模型的计算结果影响相对较小.

根据式(3)、(4)和(12),结构应力法计算得到的 4 种单元类型和 7 种不同网格尺寸结构热点应力结果基本保持一致,如图 12 所示. 因此,在有限元应力

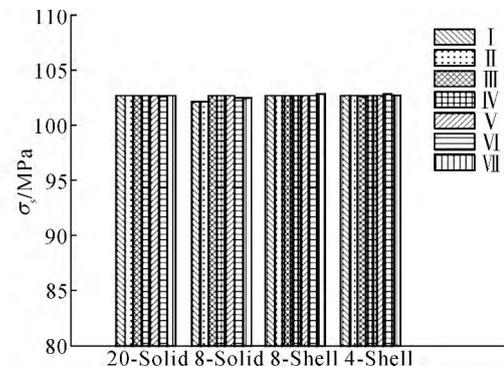


图 12 结构应力法计算结果

Fig. 12 Calculated results by structural stress method

分析过程中,基于结构力学基本原理将焊趾附近区域的应力状态进行等效转换,以平衡方程求解焊趾处的结构热点应力的结构应力法,解决了正交异性

钢桥面板焊接节点在焊趾处的结构热点应力对有限元单元类型和网格尺寸敏感的问题。

#### 4 结 语

本文利用有限元软件 ANSYS 对正交异性钢桥面板焊接节点进行结构热点应力分析,通过建立典型焊接节点的实体单元和壳单元有限元模型,分别采用直接提取法、表面外推法和结构应力法计算焊趾处的结构热点应力,比较分析了不同方法计算结果的精度及对有限元网格尺寸和单元类型的敏感性。研究表明,不同网格尺寸和单元类型对直接提取法和表面外推法进行结构热点应力计算均有较大影响,且表面外推法在网格尺寸划分方面具有一定的局限性。而采用结构应力法能够有效地解决有限元结构热点应力分析中的网格尺寸和单元类型敏感问题,可以比较精确地确定正交异性钢桥面板焊接节点的结构热点应力。

#### 参考文献 (References):

- [1] BSI. BS5400. steel, concrete and composite bridges, part 10: code of practice for fatigue [S]. London: British Standards Institution, 1980.
- [2] AASHTO. Guide specifications for fatigue evaluation of existing steel bridges [S]. Washington DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 1990.
- [3] ATZORI B, MENEGHETTI G. Fatigue strength of fillet welded structural steels; finite elements, strain gauges and reality [J]. *International Journal of Fatigue*, 2001, 23(8): 713-721.
- [4] TAYLOR D, BARRETT N, LUCANO G. Some new methods for predicting fatigue in welded joints [J]. *International Journal of Fatigue*, 2002, 24(5): 509-518.
- [5] DNV-RP-C206. Fatigue methodology of offshore ships [S]. Norway: Det Norske Veritas, 2006.
- [6] AYGUL M, AL-EMRANI M, URUSHADZE S. Modelling and fatigue life assessment of orthotropic bridge deck details using FEM [J]. *International Journal of Fatigue*, 2012, 40(1): 129-142.
- [7] DONG P. A structural stress definition and numerical implementation for fatigue analysis of welded joints [J]. *International Journal of Fatigue*, 2001, 23 (10): 865-876.
- [8] SONSINO C M, RADAJ D, BRANDT U, et al. Fatigue assessment of welded joints in AlMg 4.5 Mn aluminium alloy(AA5083) by local approaches [J]. *International Journal of Fatigue*, 1999, 21(9): 985-999.
- [9] IIW. Fatigue analysis of welded components-designer's guide to the structural hot-spot stress approach [S]. Cambridge: International Institute of Welding, 2006.
- [10] VAN WINGERDE A M, JEFFREY A P, WARDENIER J. Criteria for the fatigue assessment of hollow structural section connections [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 1995, 35(1): 71-115.
- [11] TVEITEN B W, BERGE S, WANG X Z. Fatigue assessment of aluminum ship details by hotspot stress approach [J]. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2013, 135(4): 1-10.
- [12] DONG P, HONG J K, OSAGE D A, et al. Master S-N curve approach for fatigue evaluation of welded components [R]. New York: Welding Research Council, 2002.
- [13] FRICKE W. Recommended hot-spot analysis procedure for structural details of ships and FPSOs based on round-robin FE analyses [J]. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 2002, 12(1): 40-47.
- [14] RADAJ D. Review of fatigue strength assessment of non-weld and welded structures based on local parameters [J]. *International Journal of Fatigue*, 1996, 18 (3): 153-170.
- [15] POUTIAINEN I, TANSKANEN P, MARQUIS G. Finite element methods for structural hot spot stress determination-a comparison of procedures [J]. *International Journal of Fatigue*, 2004, 26(11): 1147-1157.
- [16] DOERK O, FRICKE C, WEISSENBORN C. Comparison of different calculation methods for structural stresses at welded joints [J]. *International Journal of Fatigue*, 2003, 25(5): 359-369.
- [17] DONG P, HONG J K. Fatigue of tubular joints: hot spot stress method revisited [J]. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2012, 134(3): 1-12.