

文章编号:1674-599X(2022)03-0048-09

基于子结构法的结构行为一致多尺度建模方法研究

韩艳,戴灿磊,李凯

(长沙理工大学 土木工程学院,湖南 长沙 410114)

摘 要:为建立用于大型结构局部细节处动态应力响应分析的有限元模型,本研究提出了一种基于子结构法的结构行为一致多尺度建模方法。该方法运用子结构法将局部精细化有限元模型处理为超单元,并基于界面虚功平衡原理建立多尺度界面耦合处的位移约束方程,经过迭代计算获得约束方程系数,完成多尺度界面的耦合连接。以三维箱型截面悬臂梁结构为例,构建子结构法的多尺度模型,并与基于刚性区域法的多尺度模型的应力响应进行对比分析。研究结果表明:在静力分析应力场,尤其是在多尺度耦合界面附近的应力场与精细化全壳单元模型吻合良好,但基于刚性区域法的多尺度模型在界面耦合处应力过渡不连续,存在多处应力集中,与精细化全壳单元模型相差较大。此外,该模型的瞬态应力响应也与精细化全壳单元模型吻合良好。该研究成果可为大型结构的局部关键构件的动态应力响应分析提供借鉴。

关键词:应力响应;子结构法;多尺度建模;刚性区域法

中图分类号:TU311

文献标志码:A

Research on consistent multi-scale modeling method of structure behavior based on substructure method

HAN Yan, DAI Canlei, LI Kai

(School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: In order to establish a finite element model for dynamic stress response analysis of large structure at local details, a consistent multi-scale modelling method of structural behaviour based on the substructure method was proposed. The local fine finite element model was treated as super-element by the substructure method, and the displacement constraint equation was established based on the interface virtual work balance principle. The coupling connection of multi-scale interfaces was then completed based on the displacement constraint equation coefficients obtained from iterative calculation. Taking the three-dimensional box section cantilever beam structure as example, the multi-scale modelling was established using substructure method. The stress response was analyzed and compared with the multi-scale model based on the rigid region method. The results show that the static analysis stress field of the proposed method agrees well with the refined whole shell element model, especially the stress field near the multi-scale coupling interface. However, the multi-scale model based on the rigid region method has discontinuous stress transition and stress concentration at the interface coupling, which is different to the refined whole shell element model. In addition, the transient stress response of the method is in good agreement with the refined whole shell element model. The research result can be applied to analyze the dynamic stress response of the local key component of large structure.

Key words: stress response; substructure method; multi-scale modeling; rigid region method

收稿日期:2021-03-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(5167082552)

作者简介:韩艳(1979—),女,长沙理工大学教授,博士。

目前,大型工程结构的有限元模型大多通过单一宏观大尺度单元建成,如桥梁结构有限元分析中常见的“鱼骨梁”模型,即通过梁单元建立桥面系。该类模型无法准确反映结构局部细节部位的真实受力情况,而局部细节部位往往构造复杂、易损伤^[1-3]。因此,局部细节部位处的应力响应情况需重点关注。根据实际结构得到的精细化建模分析,单元与节点数量剧增,建模工作量大,受计算机性能的限制无法完成计算。子模型法是平衡大型结构计算量与准确获取局部关键细节应力响应的有效途径之一。瞿伟廉等人^[4]采用子模型法建立钢桁架桥的多尺度模型,得到了在荷载作用下焊接整体节点处的应力时程。李爱群等人^[5]运用子模型法对悬索桥结构进行有限元模拟,得到了大桥钢箱梁内受力相对复杂的局部区域的应力信息,但该方法属于二次分析,边界条件难以确定。在结构非线性迭代计算中,误差累积导致结果不可靠。因此,在工程中,常采用多点约束法对不同尺度单元之间的界面进行连接,达到共同分析大尺度下整体结构和小尺度下局部构件的目的^[6-7]。陆新征等人^[8-9]提出了基于位移协调的界面连接方法,将节点处的精细模型嵌入宏观框架模型中进行弹塑性时程分析。陈志文等人^[10]利用多点约束法,建立了面向结构损伤的焊接钢桁架的结构行为一致多尺度模型,对结构进行了整体弹性分析和局部弹塑性损伤分析。汪楚清等人^[11]引入约束方程,对局部精细模型和整体宏观模型之间的界面进行有效耦合,建立了输电铁塔的结构行为一致多尺度模型,实现了对输电铁塔整体结构响应和局部应力响应的同步计算。当局部构件的单元划分量很大时,计算量仍是巨大的,几乎无法完成。子结构法具有能大幅度缩减自由度的优势,可提高计算效率。KONG等人^[12]以荆岳长江大桥为工程背景,将主梁钢混结合段划分为多个子结构,对子结构内部采用壳单元建模,将其应用于确定的交通条件下车辆引起的桥梁结构动力响应分析,大大降低了计算量。齐朝晖等人^[13]通过子结构法将细长结构划分为多段,在不损失计算精度的同时大幅降低求解规模,并将其运用于结构的几何非线性分析。因此,子结构法和多尺度界面耦合连接理论的联合应用,可以同时进行高效率计算和精细化应力分析。

本研究以二维矩形截面悬臂梁结构为例。先以壳单元建立局部小尺度精细化模型。再将精细化模型经子结构法化为超单元。然后,基于界面虚功平衡的多点约束方程法,实现超单元与大尺度梁单元在界面处的耦合连接,完成多尺度模型的建立。最后,以常见的三维箱型截面悬臂梁结构为例,建立了一个精细化全壳单元的有限元模型和两个分别基于子结构法与刚性区域法的多尺度有限元模型。通过对比分析3个模型在相同荷载条件下的静力分析与瞬态分析应力响应结果,验证基于子结构法的多尺度有限元模型的可靠性和优越性,分析其是否适用于大型结构的局部细节动态应力响应。

1 子结构法

子结构法的实质是单元的扩大。每个子结构的自由度包括内部与外部的自由度。子结构自由度和其他单元与子结构相连界面处的节点自由度,以及载荷作用在其上的节点自由度为外部自由度,其余自由度均为内部自由度。子结构在生成过程中,内部自由度被凝聚,只保留外部自由度参与整体计算。因此,子结构的使用可节约计算时间,实现利用有限计算资源求解大规模问题的目的。

局部采用小尺度精细化网格建模,并将其作为子结构。由结构力学矩阵位移法可知,局部模型的运动方程可用矩阵形式写为:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}\mathbf{X} = \mathbf{F} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{M}$ 为质量矩阵; $\mathbf{X}$ 、 $\dot{\mathbf{X}}$ 、 $\ddot{\mathbf{X}}$ 分别为位移向量、速度向量、加速度向量。

将式(1)改写成分块形式为:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{BB} & \mathbf{M}_{BS} \\ \mathbf{M}_{SB} & \mathbf{M}_{SS} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{X}}_B \\ \ddot{\mathbf{X}}_S \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{BB} & \mathbf{C}_{BS} \\ \mathbf{C}_{SB} & \mathbf{C}_{SS} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{X}}_B \\ \dot{\mathbf{X}}_S \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{BB} & \mathbf{K}_{BS} \\ \mathbf{K}_{SB} & \mathbf{K}_{SS} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{X}_B \\ \mathbf{X}_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_B \\ \mathbf{F}_S \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{X}_S$ 、 $\mathbf{X}_B$ 分别为小尺度模拟的局部模型内部节点位移向量和大小尺度界面处局部模型上的节点位移向量; S 为小尺度内部节点; B 为大小尺度界面处上节点。其中,刚度矩阵 $\mathbf{K}$ 、阻尼矩阵 $\mathbf{C}$ 与载荷矩阵 $\mathbf{F}$ 同节点位移向量 $\mathbf{X}$ 写成相应的分块矩阵形式。

按静力缩减的方式,缩减内部自由度,建立式

(3)的静力平衡条件。内部与外部自由度之间的关系式为:

$$\mathbf{K}\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{BB} & \mathbf{K}_{BS} \\ \mathbf{K}_{SB} & \mathbf{K}_{SS} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{X}_B \\ \mathbf{X}_S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{X}_S = -\mathbf{K}_{SS}^{-1} \mathbf{K}_{SB} \mathbf{X}_B \quad (4)$$

将式(4)代入式(2),得到小尺度局部模型,其内部自由度被凝聚,仅剩交界面上节点自由度的运动方程:

$$\mathbf{M}^* \ddot{\mathbf{X}}_B + \mathbf{C}^* \dot{\mathbf{X}}_B + \mathbf{K}^* \mathbf{X}_B = \mathbf{F}^* \quad (5)$$

式中: $\mathbf{M}^*$ 、 $\mathbf{C}^*$ 、 $\mathbf{K}^*$ 、 $\mathbf{F}^*$ 分别为内部自由度被凝聚后的缩减质量矩阵、缩减阻尼矩阵、缩减刚度矩阵和缩减载荷向量; $\dot{\mathbf{X}}_B$ 、 $\ddot{\mathbf{X}}_B$ 分别为缩减的速度矩阵与加速度矩阵。

求解得到交界面上节点位移 $\mathbf{X}_B$ 后,将 $\mathbf{X}_B$ 代入式(4)中,即可获得 $\mathbf{X}_S$ 。

在大型结构有限元建模分析中,采用子结构法,每个子结构被当作一个超单元,这使参与整体计算分析的单元与节点规模极大缩小,显著提高了计算效率。

2 多尺度界面耦合方法

在有限元分析中,约束方程方法通常用于实现多尺度界面的耦合。例如:ANSYS中的刚性区域法^[14]、ABAQUS中的分配耦合方法等约束方程方法。这些方法操作简单,会自动生成多尺度界面耦合所需的约束方程,进而实现多尺度模型的界面耦合。但这些方法在不同尺度的单元界面处采用假设的位移模式时,会导致在界面处节点间建立的约束方程不合理,计算误差较大。例如:ANSYS中刚性区域法假设界面为刚性,即大小尺度单元在界面处的节点运动以刚体位移关系建立约束方程,这对多数结构分析是不合理的,会造成计算精度不高,交界面应力传递不连续和应力集中等问题。因此,基于节点位移协调、节点做功相等理论方法,推导约束方程,建立多尺度界面节点位移约束的条件,但该推导一般是建立在梁的平截面假定条件下。当梁在剪力或扭矩作用下,平截面假定的条件将不再适用,会造成较大的计算误差。因此,本研究运用界面虚功平衡的原理,对界面进行耦合连接,算法具有较高的精度。

2.1 界面耦合方法原理

基于界面虚功平衡的界面耦合方法基本原理,连接平面梁板单元,如图1所示。

不同大小尺度相交界面处节点位移约束条件可以表达为:

$$\mathbf{C}(\mathbf{u}_B, \mathbf{u}_S) = \mathbf{u}_B - \mathbf{C}\mathbf{u}_S \quad (6)$$

式中: $\mathbf{u}_B$ 、 $\mathbf{u}_S$ 分别为不同尺度单元界面处梁单元节点B与板单元节点S的位移向量; $\mathbf{C}$ 为界面耦合约束方程的系数矩阵。

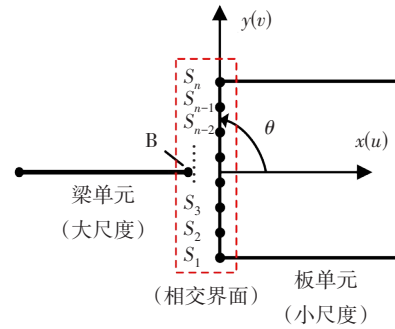


图1 平面梁板连接示意

Fig.1 Schematic diagram of the beam and plate connection

平面梁、板单元存在两者的节点自由度数目及种类不对应的问题。平面梁单元节点有2个平动自由度和1个转动自由度 $\{u_B, v_B, \theta_B\}$,板单元节点则只有2个平动自由度 $\{u_S, v_S\}$ 。界面处不同尺度单元之间的节点位移关系可通过系数矩阵 $\mathbf{J}$ 反映。

对式(6)进行变分,得:

$$\delta \mathbf{u}_B - \mathbf{J} \delta \mathbf{u}_S = 0 \quad (7)$$

式中: $\delta \mathbf{u}_B$ 、 $\delta \mathbf{u}_S$ 分别为不同尺度单元界面处梁单元节点B与板单元节点S的虚位移向量。

界面处两者所做总虚功恒为零的条件为:

$$\delta W_B + \delta W_P = 0 \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \delta W_B &= \delta u_B P + \delta v_B Q + \delta \theta_B M \\ &= \delta \mathbf{u}_B^T \mathbf{F}_B \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \delta W_P &= \int_{A_i} (\sigma_x \delta u_S + \tau_{xy} \delta v_S) dA \\ &= \sum_{j=1}^N \int_{A_i} (\sigma_x N_j \delta u_{sj} + \tau_{xy} N_j \delta v_{sj}) dA \\ &= \delta \mathbf{u}_S^T \mathbf{F}_P \end{aligned} \quad (10)$$

式中: δW_B 、 δW_P 分别为梁、板所做虚功; P 、 Q 、 M 分别为界面处梁单元上的轴力、剪力与弯矩; σ_x 、 τ_{xy} 分别为板单元上的正应力与剪应力, δu_B 、 δv_B 、 $\delta \theta_B$ 分别为梁单元节点在界面处 x 、 y 、 z 方向的连续位移; δu_S 、 δv_S 分别为板单元节点在界面处 x 、 y 方向的连续

位移; $\delta u_s = N_j \delta u_{s,j}$, $\delta v_s = N_j \delta v_{s,j}$, $\delta u_{s,j}$, $\delta v_{s,j}$ 分别为板单元节点在界面处 x 、 y 方向的单元节点虚位移; N_j 为板单元形函数; N 为界面处板单元个数; A_i 为单元 i 在界面上的面积; F_B 、 F_P 分别为界面处梁、板单元的节点力向量。

由式(8)~(10)可得:

$$\delta u_B^T F_B + \delta u_s^T F_P = 0 \quad (11)$$

将式(7)中 $\delta u_B = J \delta u_s$ 代入式(11),可得:

$$\delta u_s^T F_P + \delta u_s^T J^T F_B = 0 \quad (12)$$

式(12)对任意虚位移 δu_s 都成立,可得:

$$F_P = -J^T F_B \quad (13)$$

式(13)反映了平面梁板连接界面处梁、板单元节点力之间的关系。若只考虑梁单元的剪力作用,即 $F_B = [0 \quad Q \quad 0]^T$,则板单元界面上的节点力为:

$$F_P = -QJ_2^T \quad (14)$$

式中: J_2^T 为系数矩阵第二行的转置向量,当 $Q=1$ 时,可看作梁单元上单位集中剪力向界面处板单元各节点力的传递系数。

同理可得, P 、 M 作用下向板单元各节点力的传递系数。当单独考虑某个力在界面处由梁单元向板单元传递时,则可将界面处板单元的节点力向量表达为:

$$F_P = -F_{B,i} J_i^T \quad (15)$$

式中: $F_{B,i}$ ($i = 1, 2, 3$) 分别代表界面处梁单元节点上的剪力、轴力和弯矩; J_i^T 为对应系数矩阵的转置矩阵。

在界面处单位集中力作用下,该传递系数应与界面处板单元各节点的节点力一致。因此,约束方程的系数矩阵 J 可通过界面处约束方程得到。

2.2 界面处约束方程的建立方法

以二维梁板连接模型为例,界面处约束方程的建立过程如图2所示。首先,建立单个小节段模型,其单元类型与建立的多尺度模型界面处网格划分类型保持一致。再将单个小节段模型端面上所有节点的全部自由度定义为主自由度,运用子结构法将其生成超单元,超单元之间通过耦合相同位置节点的方式组装成该节点力计算模型。在节点力计算模型端部形心处,需建立加载节点1与节点2。初次迭代时,加载的节点与端面上的节点通过刚性区域法连接。在节点1与节点2上,分别施加单位集中荷载与固定约束。运用子结构方法提取

一小节段模型界面上的节点信息。组装模型的超单元个数需适量,不能太少,避免应边界条件带来的影响,太多则影响计算效率。

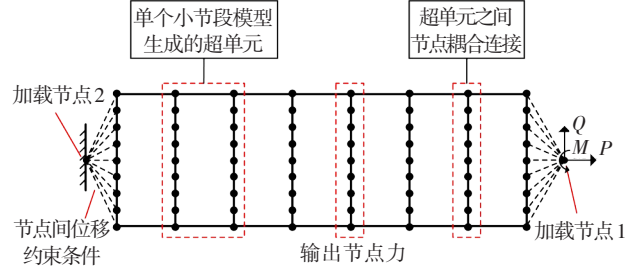


图2 节点力计算模型

Fig.2 Nodal force calculation model

在模型加载节点1上,施加单位集中荷载计算后,超单元中主自由度的节点位移与节点力都可以在超单元的使用部分被输出。获得节点力后,通过式(15)推导约束方程。为使推导出的约束方程更精确,需对其进行多次迭代计算,直至满足收敛要求。约束方程系数的多次迭代计算的具体流程如图3所示。该约束方程能获取梁与壳连接、梁与实体连接之间的界面耦合系数。

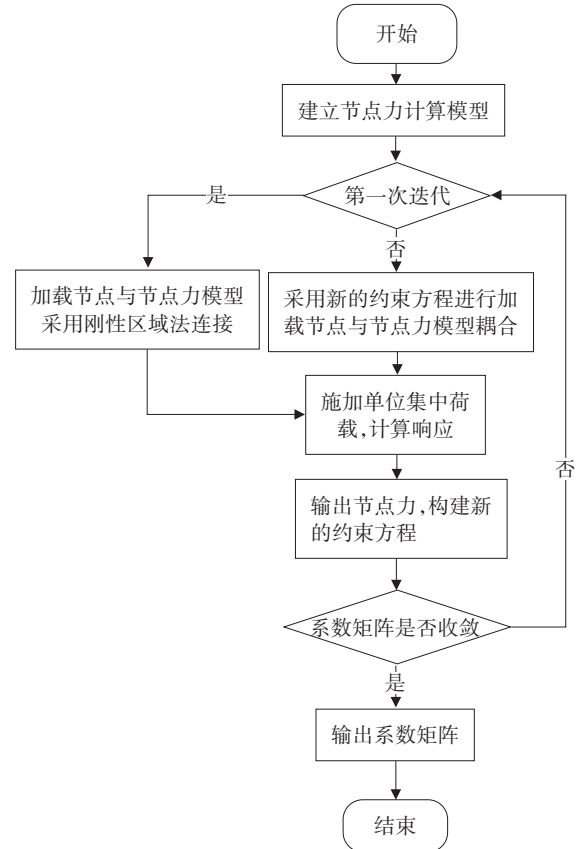


图3 约束方程迭代流程

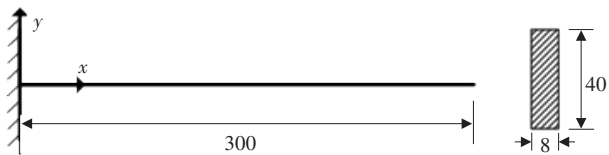
Fig.3 Iterative process of constraint equation

3 多种模型对比分析

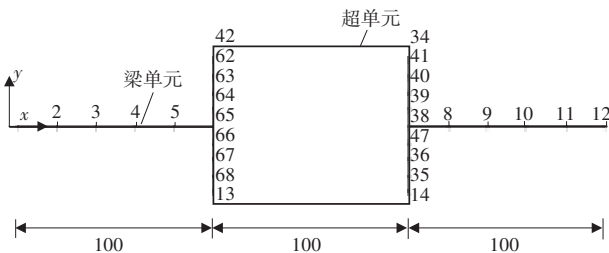
本研究以二维矩形悬臂梁结构作为平面梁板连接模型,阐述了基于子结构法的结构行为一致多尺度模型的建立方法,并以板单元模型的计算结果作为参考解,将两者进行对比分析。再针对工程结构中常见的多尺度界面连接类型——三维梁壳连接,设计了1个箱型截面悬臂梁结构。基于该工程结构,建立了1个精细化全壳单元有限元模型、1个基于子结构法与1个基于刚性区域法的多尺度有限元模型,并对比分析这3个模型在相同荷载条件下的静力分析与瞬态应力分析响应结果。

3.1 平面梁板连接模型

矩形截面悬臂梁结构如图4(a)所示。梁300 mm(长)×8 mm(宽)×40 mm(高),左端为固定约束,在右端施加荷载。材料为各向同性线弹性材料, $E=2\times 10^5\text{ N/mm}^2$, $\nu=0.3$ 。中间100 mm段采用 PLANE82 单元精细建模,再运用子结构法生成超单元,最后利用界面耦合方法将其嵌入至两边采用 BEAM3 单元建立的模型中,两者共同参与计算。基于子结构法的多尺度模型如图4(b)所示。选取交界面处 PLANE82 单元上的节点自由度作为主自由度。超单元内部节点编号如图4(c)所示。采用 PLANE82 单元精细模拟整个结构作为参考解,与基于子结构法的多尺度模型相比较。



(a) 矩形悬臂梁模型



(b) 基于子结构法的多尺度模型

42	61	60	59	58	57	56	55	54	53	52	51	50	49	48	47	46	45	44	43	34
62		78		88		98		108		118		128		138		148		158		41
63	71	77	81	87	91	97	101	107	111	117	121	127	131	137	141	147	151	157	161	40
64		76		86		96		106		116		126		136		146		156		39
65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150	155	160	38
66		74		84		94		104		114		124		134		144		154		37
67	69	73	79	83	89	93	99	103	109	113	119	123	129	133	139	143	149	153	159	36
68		72		82		92		102		112		122		132		142		152		35
13	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	14

(c) 超单元内部节点编号

图4 矩形悬臂梁模型(单位:mm)

Fig.4 Cantilever with rectangular cross-section (unit:mm)

基于子结构法的多尺度模型,在左侧不同大小尺度单元界面处节点间的位移约束方程系数见表1。表中的CE1、CE2和CE3分别表示界面处梁单元节点的 x 方向位移、 y 方向位移以及绕 z 轴的转角位移向板单元节点位移的传递系数。在两模型右端施加 y 方向的集中剪力 $F=9\,000\text{ N}$,计算结构响应。取两模型中间100 mm段的 Mises 应力和剪应力进行对比分析,结果如图5~6所示。从图5~6可以发现,静力分析下基于子结构法的多尺度模型与精细化板单元模型的 Mises 应力场与剪应力场吻合度很高,二者误差很小。其中,两模型的最大 Mises 应力值分别为843.761、843.755 Pa,最大剪应力分别为43.946、43.945 Pa。

表1 位移约束方程系数

Table 1 The coefficient of the displacement constraint equation

节点编号	CE1	CE2	CE3
6(梁节点)	1.000 00	1.000 00	1.000 00
42	0.041 67	0.002 60	0.006 25
62	0.166 67	0.104 17	0.018 75
63	0.083 33	0.098 96	0.006 25
64	0.166 67	0.229 17	0.006 25
65	0.083 33	0.130 21	0.000 00
66	0.166 67	0.229 17	-0.006 25
67	0.083 33	0.098 96	-0.006 25
68	0.166 67	0.104 17	-0.018 75
13	0.041 67	0.002 60	-0.006 25

3.2 三维梁壳连接模型对比

箱型截面悬臂梁结构如图7(a)、7(b)所示,材料弹性模量 $E=2\times 10^5\text{ N/mm}^2$,泊松比取为0.3,依次建立3个有限元模型,如图7(c)~7(e)所示。其中,A模型是精细化全壳单元模型,B模型是基于子

结构法的多尺度模型,C模型是基于刚性区域法的多尺度模型。3个模型中梁单元部分均为 beam188 建模,壳单元部分均为 shell63 建模。以A模型计算结果为参考解,选取悬臂梁模型的中间 300 mm 段计算结果与其他模型的相比较。

在模型右端,分别施加剪力 $F_y=1\ 000\ \text{N}$, 扭矩 $M_x=1\ 000\ \text{N}\cdot\text{M}$ 计算结构响应。各种模型的计算结果见表2,比较了单元数量、最大变形、Mises 的应力值和交界处的应力过渡情况。节点提取的 Mises 应力值如图8所示。各模型的 Mises 应力云图如图9~10所示。

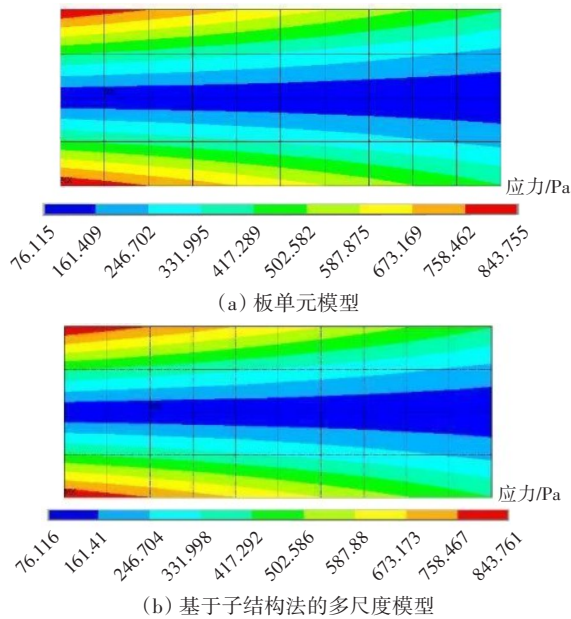


图5 两种模型 Mises 应力分布

Fig.5 Mises stress distribution of the two models

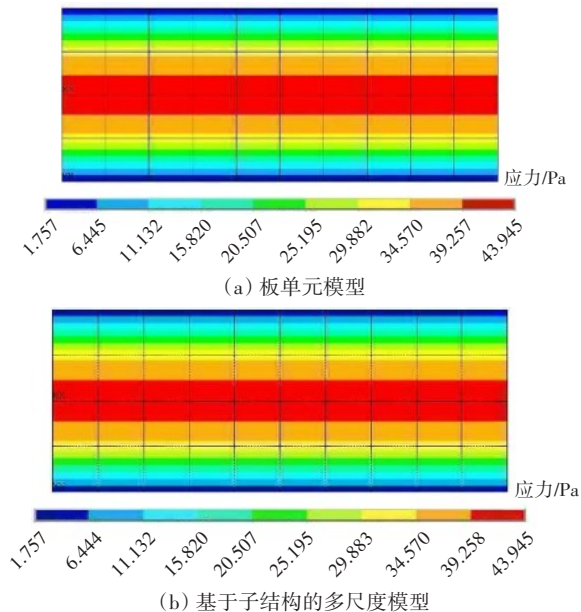


图6 两种模型剪应力分布

Fig.6 Shear stress distribution of the two models

由表2可知,基于子结构法的多尺度模型B,计算所需的有限单元数量远小于精细化全壳单元模型A的和多尺度模型C的。3种模型在剪力 F_y 与扭矩 M_x 作用下的最大变形量基本一致。基于子结构法的多尺度模型B在节点1处的应力计算结果与精细化全壳单元模型A的计算结果基本一致,相对误差仅为0.5%,但采用刚性区域法的多尺度模型C在节点1处的应力计算结果的相对误差为18.0%。3种模型在节点2、节点3处计算得到的 Mises 应力结果相同。表明:对于该结构,采用两种多尺度建模方法计算,所得的远离界面处的节点应力值是可信的。从图9~10中又可以看出,基于子结构法的多尺度模型B在交界面上应力过渡优越,其应力场与精细化全壳单元模型A的一致。但采用刚性区域法的多尺度模型C在交界面附近存在应力集中现象,应力响应误差很大,所以不能采用。这表明:基于子结构法的多尺度建模方法,具有极大降低自由度、计算精度高的特点,适用于大型结构的局部细节动态应力响应分析。

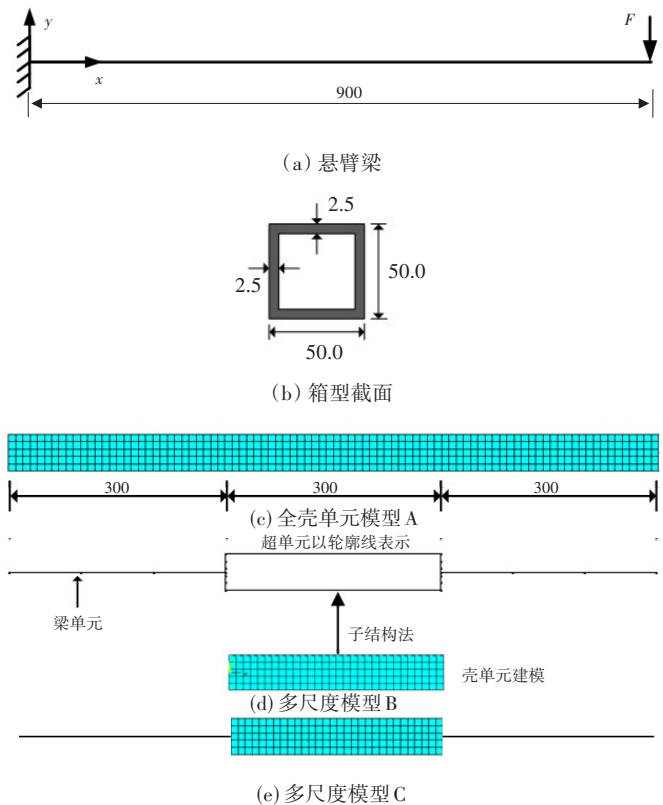


图7 箱型截面悬臂梁模型(单位:cm)

Fig.7 Model of box section cantilever beam (unit:cm)

表 2 三维梁壳连接模型计算结果
Table 2 Calculation result of the 3D beam-shell connection model

模型	单元数量/个	最大变形/mm		F_y 作用下 Mises 应力/MPa			M_x 作用下 Mises 应力/kPa			交界处 应力过渡
		F_y 作用	M_x 作用	节点 1	节点 2	节点 3	节点 1	节点 2	节点 3	
A	1 801	0.559	0.083	0.734	0.677	0.566	0.107	0.107	0.152	优
B	7	0.559	0.083	0.738	0.677	0.566	0.107	0.107	0.152	优
C	606	0.558	0.083	0.866	0.673	0.566	0.112	0.107	0.152	应力集中

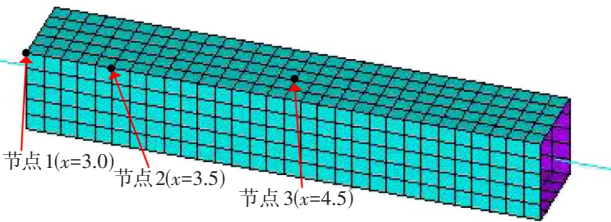
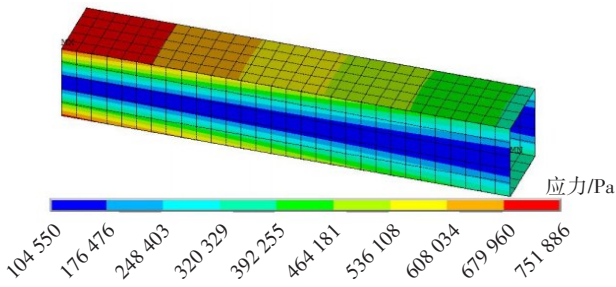
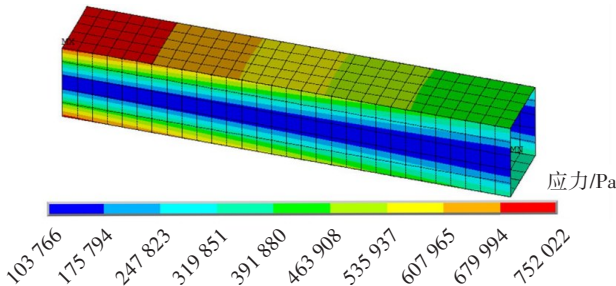


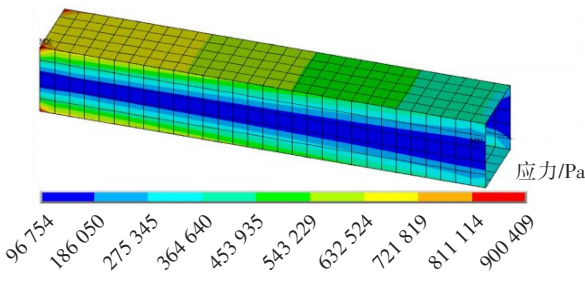
图 8 节点位置
Fig.8 Locations of the nodes



(a) 全壳单元模型 A



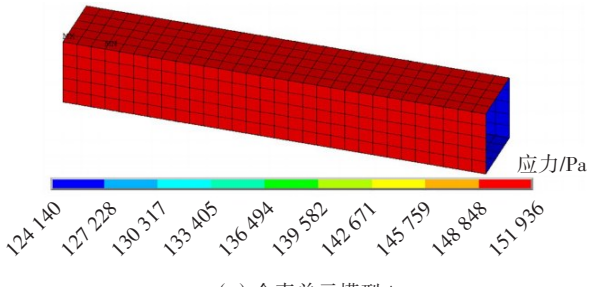
(b) 多尺度模型 B



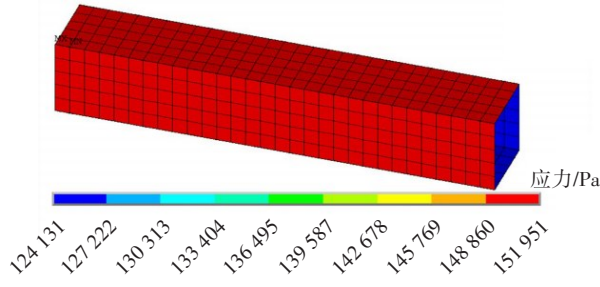
(c) 多尺度模型 C

图 9 剪应力作用下各模型 Mises 应力云图

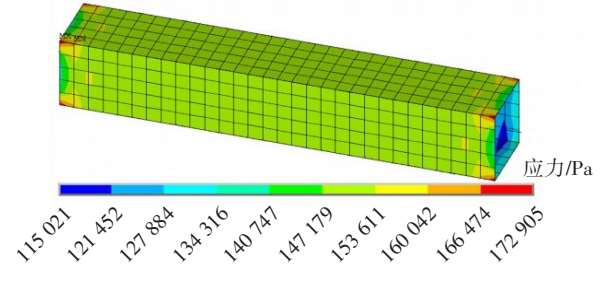
Fig.9 Mises stress nephogram of each model under shear stress



(a) 全壳单元模型 A



(b) 多尺度模型 B



(c) 多尺度模型 C

图 10 扭矩作用下各模型 Mises 应力云图

Fig.10 Mises stress nephogram of each model under torque

进一步验证基于子结构法的多尺度模型适用于结构的瞬态应力响应分析,以精细化全壳单元模型解为参考解。在两模型右端,分别施加 $F_y=10+\sin(\pi \times t)$ 和 $M_x=10+\sin(\pi \times t)$ 的简谐荷载,计算时间 10.00 s,时间步长 0.05 s。节点 3 的 Mises 应力时程对比如图 11~12 所示。由计算结果可知:在 F_y 作用

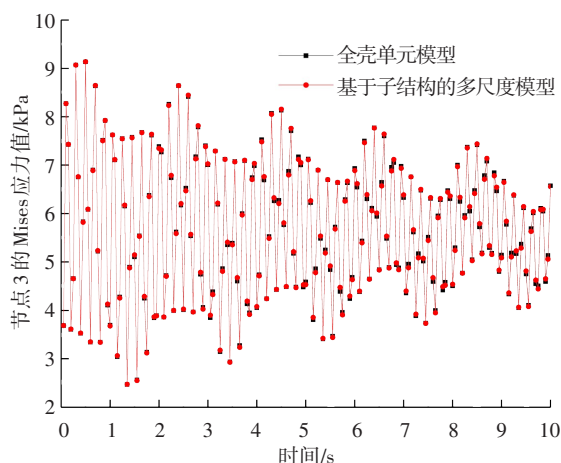


图 11 剪应力作用下节点 3 的 Mises 应力时程

Fig.11 Mises stress time history of the node 3 under shear stress

4 结论

本研究提出基于子结构法的结构行为一致多尺度建模方法,以二维矩形截面悬臂梁结构和三维箱型截面悬臂梁为例,详细阐述了该建模方法的过程,并对比分析了该法所建立的多尺度模型、精细化全壳单元有限元模型和基于刚性区域法多尺度有限元模型的应力响应结果,得到结论为:

1) 基于子结构法的结构行为一致多尺度建模方法,可以极大降低有限元计算模型的自由度,从而大幅度提高计算效率。同时,静力分析和瞬态分析的应力响应结果与全结构精细化模型的误差小。该模型计算精度高,适用于大型结构的局部细节应力响应分析。

2) 在相同荷载条件下,精细化全壳单元有限元模型的最大变形和 2 个分别基于子结构法与基于刚性区域法的多尺度有限元模型的最大变形一致。其中,2 个多尺度有限元模型在远离交界面处的节点应力值均可信。但对于基于刚性区域法的多尺度有限元模型的应力,应用于参考区域却难以界定。

3) 相较传统基于刚性区域法建立的多尺度模

下 5.70 s 时,节点 3 的 Mises 应力最大相对误差为 1.89%;在 M_x 作用下 5.55 s 时,节点 3 的 Mises 应力最大相对误差为 0.52%。显然,动态应力响应误差在工程的接受范围内。因此,基于子结构法的多尺度有限元模型,适用于大型结构的瞬态应力响应分析,且计算精度高。

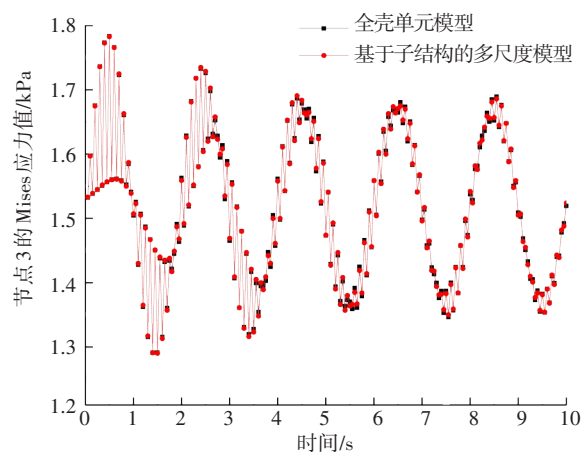


图 12 扭矩作用下节点 3 的 Mises 应力时程

Fig.12 Mises stress time history of the node 3 under torque
型,基于子结构法的多尺度模型在界面处应力传递优越,无应力集中现象,在界面处的应力结果具有参考性,避免了大多数多尺度建模中交界面处应力集中需建立应力过渡区的问题。

参考文献(References):

- [1] HAN Y, LI K, CAI C S, et al. Fatigue reliability assessment of long-span steel-truss suspension bridges under the combined action of random traffic and wind loads[J]. Journal of Bridge Engineering, 2020, 25(3): 1-30.
- [2] 李行, 潘军, 唐雪松. 考虑车轮横向分布的钢桥面板顶板-U肋连接处疲劳损伤分析[J]. 公路与汽运, 2020 (1): 106-109, 138. (LI Hang, PAN Jun, TANG Xuesong. Fatigue damage analysis of the joint of top plate and U rib steel bridge panel considering the lateral distribution of wheels[J]. Highways & Automotive Applications, 2020(1): 106-109, 138.(in Chinese))
- [3] 宋秀华, 肖新辉, 鲁乃唯. 基于疲劳损伤的中、小跨径桥梁限载取值研究[J]. 交通科学与工程, 2019, 35 (2): 58-63. (SONG Xiuhua, XIAO Xinhui, LU Naiwei. Study on vehicle load limit of medium and small span bridges based on fatigue damage [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2019, 35(2): 58-63. (in Chinese))
- [4] 瞿伟廉, 何杰, 王文利. 基于子模型法的钢桁桥整体节

- 点动力响应分析[J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(3): 95-100. (QU Weilian, HE Jie, WANG Wenli. Dynamic stress analysis of monolithic joint of steel truss bridge based on submodel method [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 29(3): 95-100. (in Chinese))
- [5] 李爱群, 王浩. 子模型法在超大跨悬索桥钢箱梁应力分析中的应用[J]. 工程力学, 2007, 24(2): 80-84. (LI Aiqun, WANG Hao. Stress analysis on steel box girders of super-long-span suspension bridges with submodel method [J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(2): 80-84. (in Chinese))
- [6] 王开宇. 基于多点约束的多尺度建模方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016. (WANG Kaiyu. Research of multi-scale modeling method based on mutlti-point constraints [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016. (in Chinese))
- [7] 张可. 基于多点约束方程的多尺度建模方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019. (ZHANG Ke. Study on multi-scale modeling method based on multi-point constrained equation [D]. Chongqing: Chongqing University, 2019. (in Chinese))
- [8] 陆新征, 林旭川, 叶列平. 多尺度有限元建模方法及其应用[J]. 华中科技大学学报(城市科学版), 2008, 25(4): 76-80. (LU Xinzheng, LIN Xuchuan, YE Lieping. Multiscale finite element modeling and its application in structural analysis [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Urban Science Edition), 2008, 25(4): 76-80. (in Chinese))
- [9] 林旭川, 陆新征, 叶列平. 钢-混凝土混合框架结构多尺度分析及其建模方法[J]. 计算力学学报, 2010, 27(3): 469-475, 495. (LIN Xuchuan, LU Xinzheng, YE Lieping. Multi-scale finite element modeling and its application in the analysis of a steel-concrete hybrid frame [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2010, 27(3): 469-475, 495. (in Chinese))
- [10] 陈志文, 李兆霞, 卫志勇. 土木结构损伤多尺度并发计算方法及其应用[J]. 工程力学, 2012, 29(10): 205-210. (CHEN Zhiwen, LI Zhaoxia, WEI Zhiyong. Concurrent multi-scale computational method for damage analyses of civil structures [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(10): 205-210. (in Chinese))
- [11] 汪楚清, 王虎长, 李亮, 等. 大跨越输电钢管塔结构多尺度有限元分析[J]. 工程力学, 2013, 30(7): 147-152, 166. (WANG Chuqing, WANG Huchang, LI Liang, et al. Multi-scale finite element analysis of steel tube tower for large crossing transmission lines [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(7): 147-152, 166. (in Chinese))
- [12] KONG X, WU D J, CAI C S, et al. New strategy of substructure method to model long-span hybrid cable-stayed bridges under vehicle-induced vibration [J]. Engineering Structures, 2012, 34: 421-435.
- [13] 齐朝晖, 孔宪超, 方慧青. 细长结构几何非线性分析的子结构方法[J]. 计算力学学报, 2013, 30(6): 757-762. (QI Zhaohui, KONG Xianchao, FANG Huiqing. Substructure methods in geometric nonlinear analysis of slender structures [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2013, 30(6): 757-762. (in Chinese))
- [14] 王新敏. ANSYS工程结构数值分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007: 390-395. (WANG Xinmin. Numerical analysis of ANSYS engineering structure [M]. Beijing: China Communications Press, 2007: 390-395. (in Chinese))
- (责任编辑: 罗容; 校对: 李脉 欧兆虎; 英文编辑: 陈璐)