

一种考虑界面相物性影响的界面单元法

夏 日, 许金泉*

(上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

摘 要:界面是由复杂的界面相简化而成的, 界面破坏实际是界面相材料的破坏。数值计算为了方便, 如经典模型和内聚力模型等, 都把很薄的界面相作无厚度化处理。导致只能考虑界面的面力, 而无法考虑界面相内的应力(平行于界面方向的应力)。使界面失效准则先天性地排除了界面相内部应力的影响, 从界面相材料失效机理的角度来看这是不够严谨的。本文将界面相材料等效为一种弹性连续体, 由界面本构关系推导得到了一种新的界面单元。该单元具有界面参数易确定、对界面相物性可以进行等效描述等优点。通过商用有限元软件 ABAQUS 和用户子程序 UEL 实现了数值分析, 并与直接物理模型的数值模拟结果进行对比, 证明了本方法的简便及准确性。通过对不同界面相厚度结构的进一步分析, 探讨了本文方法的可行范围。

关键词:结合材料; 界面模型; 界面单元; 有限元; 数值模拟

中图分类号: TB33; O341

文献标志码: A

文章编号: 1007-4708(2019)05-0569-07

1 引 言

随着结合材料在工程中的广泛应用, 其界面力学性能受到了更多研究关注。实践证明, 结合材料破坏常发生在界面或界面附近, 该现象促发了大量对界面强度的研究^[1-3], 而这些研究都需基于对界面相真实应力状态的正确表述。微观尺度下, 界面相为富含缺陷且材料非均匀的薄层, 可能包含粘合剂、基体扩散和界面反应形成的新相等成分。界面相物性复杂且边界不明确, 具体考虑其内部的力学性能分布非常困难, 故使用宏观唯象的界面模型^[4,5]来表征其力学行为是切实可行的。目前, 常见于文献的界面模型有经典模型和内聚力模型两种。

经典模型^[6,7]假设两侧基体在无厚度的理想界面上直接结合, 界面两侧的面力与位移连续。该模型构造简单, 广泛应用于界面问题的理论研究^[8,9]。但是, 经典模型在计算界面相的面力响应时会出现较大误差, 且只能描述界面相面力, 不能完全描述界面相应力状态。内聚力模型^[10,11]将界面相的作用近似为连接两侧基体的无长度弹簧, 界面上位移存在跳跃量, 面力连续且与位移跳跃量呈函数关系。通过人为修正模型中的弹簧参数, 总

能得到合理的面力数值结果, 许多数值模拟研究^[12-14]便基于该模型。但该方法同样无法完整描述界面相应力状态, 且难以量化弹簧参数(参数会受应力状态和几何形状影响)。内聚力模型常通过设定损伤规律来模拟界面失效, 其实包含了界面相失效只与面力有关的假定, 而这种假定并未经普遍适用性检验。界面相的真实应力状态如图 1 所示, 传统模型都只考虑了面力部分, 而忽略了平行于界面的应力分量 σ_y 及面力跳跃量。显然这种忽略只有 σ_y 远小于面力分量时才可行, 否则不仅将导致界面失效判据的不准确, 还必然会影响面力计算结果的真实性。

界面相厚度较大时, 可直接离散界面相来进行数值计算, 但实际上, 界面相一般较薄, 直接离散会带来病态单元等困难。因此有必要开发一种可完

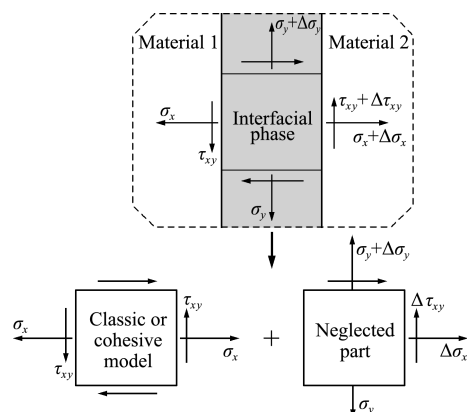


图 1 界面相的应力组成

Fig. 1 Interfacial stress components

收稿日期: 2018-08-10; 修改稿收到日期: 2018-11-26.

基金项目: 国家自然科学基金(11772189)资助项目.

作者简介: 许金泉* (1963-), 男, 教授, 博士生导师

(E-mail: jqxu@sjtu.edu.cn).

整描述界面相应力状态,且没有网格划分困难的界面数值方法。本文将界面等效成为线弹性连续体薄层来表征界面相的复杂力学性能,推导了等效界面相的界面本构,并通过无厚度化处理得到了对应的界面单元。本方法可描述界面相面力及内部应力,采用的界面参数易于量化并具有明确物理含义。对于更加复杂的界面相,也可等效为非线性连续体,处理过程完全相同。

2 直接物理模型及完备界面模型

以平面问题为例,虽界面相内材料特性并非均匀,但进行力学分析时无须也无法确定界面相内每一点处的材料属性,采用厚度 δ 的等效线弹性薄层来表征界面相材料的作用,如图 2(a)所示。

图 2(a)中界面层的材料属性是现实界面相材料性能的等效值。等效界面层与两侧基体的连接部视为两条满足位移和面力连续条件的经典界面。这时界面相所有的应力分量以及两侧的位移不连续得到全面描述,该模型称为直接物理模型。考虑到界面相厚度较薄时,直接物理模型将难以划分网格,故进而将其无厚度化,得到图 2(b)所示的模型化界面,称之为完备界面模型 CIM(Complete Interface Model)。CIM 中原本位于界面层两侧的点 A 和 B 两点重叠至模型化界面上的一点,为全面描述界面层的力学行为,该点需具有 $u_A, v_A, \sigma_{xA}, \tau_{xyA}$ 以及 $u_B, v_B, \sigma_{xB}, \tau_{xyB}$ 这 8 个变量,且界面相内应力

分量 σ_y 必须可由上述变量决定。由于平面问题只能求解 4 个未知量,因此须提供 4 个额外的变量间关系。

根据线弹性材料本构,有

$$\sigma_x = \frac{G(\kappa+1)}{\kappa-1} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{G(3-\kappa)}{\kappa-1} \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \tau_{xy} = G \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (1)$$

式中 $G=E/(1+2\nu)$, E 为杨氏模量, ν 为泊松比。 κ 是由应力状态决定的材料常数:

$$\kappa = 3 - 4\nu \quad (\text{plane strain})$$

$$\text{or } (3-\nu)/(1+\nu) \quad (\text{plane stress}) \quad (2)$$

考虑界面两侧点 A 和 B, 由于 δ 较小, 则有

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=x_A} &= \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=x_B} \approx \frac{u_B - u_A}{x_B - x_A} = \frac{\Delta u}{\delta} \\ \frac{\partial v}{\partial x} \Big|_{x=x_A} &= \frac{\partial v}{\partial x} \Big|_{x=x_B} \approx \frac{v_B - v_A}{x_B - x_A} = \frac{\Delta v}{\delta} \end{aligned} \quad (3)$$

将式(3)代入式(1)得

$$\begin{aligned} \sigma_{xA} &= k_1 \Delta u + k_{12} \frac{\partial v_A}{\partial y}, \quad \tau_{xyA} = k_2 \Delta v + k_{21} \frac{\partial u_A}{\partial y} \\ \sigma_{xB} &= k_1 \Delta u + k_{12} \frac{\partial (v_A + \Delta v)}{\partial y} = \sigma_{xA} + k_{12} \frac{\partial \Delta v}{\partial y} \\ \tau_{xyB} &= k_2 \Delta v + k_{21} \frac{\partial (u_A + \Delta u)}{\partial y} = \tau_{xyA} + k_{21} \frac{\partial \Delta u}{\partial y} \end{aligned} \quad (4)$$

式中 k_1, k_2, k_{12} 和 k_{21} 分别为组合材料常数的简写形式, 具体如下。

$$k_1 = \frac{G(\kappa+1)}{(\kappa-1)\delta}, \quad k_{12} = \frac{G(3-\kappa)}{\kappa-1}, \quad k_2 = \frac{G}{\delta}, \quad k_{21} = G \quad (5)$$

故而, 可将 k_1, k_2, k_{12} 和 k_{21} 约定为界面常数(实际相互独立的常数只有三个, 即 G, κ 和 δ)。

同理, 在 δ 较小时, 由线弹性本构关系:

$$\sigma_y = \frac{G(\kappa+1)}{\kappa-1} \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{G(3-\kappa)}{\kappa-1} \frac{\partial u}{\partial x} \quad (6)$$

将 $\partial v / \partial y$ 用界面相两侧值的平均表示, 则可得

$$\sigma_y = \frac{k_1 \delta}{2} \left(2 \cdot \frac{\partial v_A}{\partial y} + \frac{\partial \Delta v}{\partial y} \right) + \frac{k_{12}}{\delta} \Delta u \quad (7)$$

综上, 平面界面问题可由 k_1, k_2, k_{12} 和 k_{21} 四个界面常数及 $u_A, v_A, \Delta u$ 和 Δv 四个变量完全表征。由式(4)可知, 界面两侧存在位移及面力跳跃; 界面常数同时受界面本构关系和界面相厚度 δ 的影响; 界面面力同时受位移跳跃量和位移偏导数的贡献, 且法向与切向的位移和应力是耦合相关的。这些交互作用唯有通过本构关系才能正确地定义, 这也是内聚力单元的弹簧常数通常难以确定的内在原因。

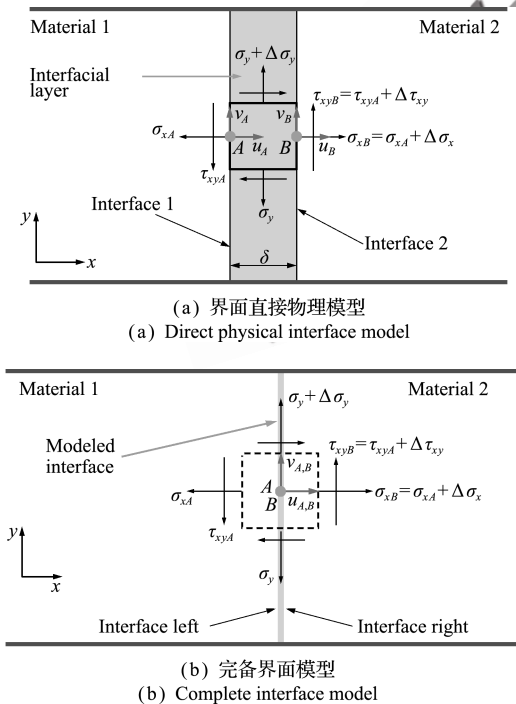


图 2 界面相的简化模型
Fig. 2 Simplified model of interface

3 数值方法

如图2所示,基于完备界面模型的无厚度界面单元需在界面两侧传递不同大小的面力,即

$$\mathbf{p}_A = (\sigma_{xA}, \tau_{xyA})^T, \mathbf{p}_B = -(\sigma_{xB}, \tau_{xyB})^T \quad (8)$$

令界面单元左右侧节点分别为 a, b 和 a_1, b_1 , 采用如下位移模式,

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_a & 0 & N_b & 0 \\ 0 & N_a & 0 & N_b \end{bmatrix} \cdot \mathbf{U}_{\text{In}} \\ \begin{bmatrix} \Delta u \\ \Delta v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_a & 0 & N_b & 0 \\ 0 & N_a & 0 & N_b \end{bmatrix} \cdot \Delta \mathbf{U} \quad (9)$$

式中 $N_a = (1 + \eta)/2$, $N_b = (1 - \eta)/2$

$$\mathbf{U}_{\text{In}} = [u_a \quad v_a \quad u_b \quad v_b]^T$$

$$\Delta \mathbf{U} = [\Delta u_a \quad \Delta v_a \quad \Delta u_b \quad \Delta v_b]^T$$

$$\Delta u_i = u_i - u_i, \Delta v_i = v_i - v_i \quad (i = a, b)$$

由链式法则 $\partial u / \partial y = \partial u / \partial \eta \cdot \partial \eta / \partial y$ 可得

$$\begin{bmatrix} \partial u / \partial y \\ \partial v / \partial y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/L & 0 & -1/L & 0 \\ 0 & 1/L & 0 & -1/L \end{bmatrix} \cdot \mathbf{U}_{\text{In}} \\ \begin{bmatrix} \partial \Delta u / \partial y \\ \partial \Delta v / \partial y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/L & 0 & -1/L & 0 \\ 0 & 1/L & 0 & -1/L \end{bmatrix} \cdot \Delta \mathbf{U} \quad (10)$$

式中 $L = y_a - y_b$. 将式(4,9,10)代入式(8)得

$$\mathbf{p}_A = \mathbf{N}_\Delta \cdot \Delta \mathbf{U} + \mathbf{N}_{\text{In}} \cdot \mathbf{U}_{\text{In}} \\ \mathbf{p}_B = -(\mathbf{N}_\Delta + \mathbf{N}_{\text{In}}) \cdot \Delta \mathbf{U} - \mathbf{N}_{\text{In}} \cdot \mathbf{U}_{\text{In}} \quad (11)$$

式中 $\mathbf{N}_{\text{In}} = \begin{bmatrix} k_{12}/L & 0 & -k_{12}/L & 0 \\ 0 & k_{21}/L & 0 & -k_{21}/L \end{bmatrix}$

$$\mathbf{N}_\Delta = \begin{bmatrix} k_1 N_a & 0 & k_1 N_b & 0 \\ 0 & k_2 N_a & 0 & k_2 N_b \end{bmatrix}$$

已知面力等效节点载荷的形式如下,

$$\mathbf{R}_i = \begin{bmatrix} R_{ix} \\ R_{iy} \end{bmatrix} = t \int_{-1}^1 N_i \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \frac{\partial y}{\partial \eta} d\eta \quad (i = a, b) \quad (12)$$

式中 t 为面外方向尺寸(平面问题 $t=1$). 则可得界面两侧由界面单元作用引起的等效节点载荷为

$$\mathbf{R}_{\text{InA}} = [R_{ax} \ R_{ay} \ R_{bx} \ R_{by}]^T = \mathbf{G} \cdot \mathbf{U}_{\text{In}} + \mathbf{H} \cdot \Delta \mathbf{U} \\ \mathbf{R}_{\text{InB}} = [R_{ax} \ R_{ay} \ R_{bx} \ R_{by}]^T = -\mathbf{G} \cdot \mathbf{U}_{\text{In}} - (\mathbf{G} + \mathbf{H}) \cdot \Delta \mathbf{U} \quad (13)$$

$\Delta \mathbf{U}$ 改写为 $\mathbf{U}_{\text{In}_1} - \mathbf{U}_{\text{In}}$, 并入系统平衡方程得

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{11} & \mathbf{K}_{1\text{In}} & \mathbf{O} & \mathbf{O} \\ \mathbf{K}_{\text{In}1} & \mathbf{K}_{\text{InIn}} - \mathbf{G} + \mathbf{H} & -\mathbf{H} & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & -\mathbf{H} & \mathbf{K}_{\text{In}_1\text{In}_1} + \mathbf{G} + \mathbf{H} & \mathbf{K}_{\text{In}_12} \\ \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{K}_{2\text{In}_1} & \mathbf{K}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_1 \\ \mathbf{U}_{\text{In}} \\ \mathbf{U}_{\text{In}_1} \\ \mathbf{U}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_1 \\ \mathbf{O} \\ \mathbf{O} \\ \mathbf{R}_2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中 下标 1,2,In 和 In₁ 分别表示界面左右侧的材料 1 和 2,以及无厚度界面单元左右两侧的节点。

完备界面模型的数值实现步骤如上。本文默认界面平行于 y 轴,如需分析曲线界面,则对等效载荷列阵进行坐标转换即可。式(14)得到了无厚度界面单元对总体刚度阵的贡献,考虑节点编号顺序进行反演即可得到单个界面单元的刚度阵,可进一步利用 ABAQUS 的用户子程序 UEL 编程求解。

4 有限元模拟分析

采用经典模型、直接物理模型及完备界面模型进行模拟分析,通过对比数值结果论证本方法的准确性。直接物理模型仅对界面相材料作均匀化等效处理,无其他简化,可认为是符合现实界面材料行为的精确模型,故作为参考基准。由于界面相很薄,直接物理模型须对界面相及其附近细分以避免病态单元。内聚力模型弹簧参数难以确定且不能获得 σ_y , 故不纳入对比。分析结构为图3所示梁,梁高和厚都为 2 mm,界面相厚度为 5 μm ,载荷 $P=10\text{ N}$ 。有限元建模采用对称处理,取右侧 1/2 进行分析,对称面上约束条件为禁止 x 方向位移及面外方向转动,支座处约束 x 和 y 方向位移。

计算采用平面应变单元 CPE4。经典模型和完备界面模型的网格划分相同,对界面端局部加密,最小网格尺寸约为 1 μm ,偏离端部网格尺寸渐变至 100 μm ,单元总数约为 5000。完备界面模型在界面处另附加了一层无厚度界面单元。直接物理模型需对界面相整体及其附近进行加密,界面端处网格尺寸约为 1 μm 。界面相内单元数约为 1800,偏离端部网格尺寸渐变至 2.5 μm 。基体内网格数约为 30000,偏离端部网格尺寸渐变至 100 μm 。图4为4.1节中硬界面算例完备界面模型的正应力云图及各计算模型在下表面界面端处的网格划分示意。

由于 ABAQUS 给出的不是异种材料结合面上的面力,而是两侧单元内积分点上的应力值,经典模型须采用插值法来近似得到界面面力值。虽然有限元中并非满足面力连续,而是等效节点力连续,但在网格尺寸较小时这种近似也可以接受。在

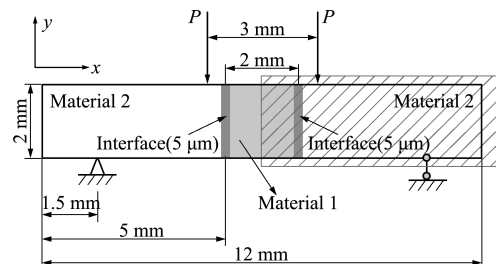


图3 分析结构

Fig.3 Analysis structure

处理直接物理模型和完备界面模型时,可以将界面相两侧节点的位移值代入式(4)来直接得到界面应力:

$$\begin{aligned}\sigma_{xA} &= k_1 \Delta u_i + \frac{k_{12}}{2} \left(\frac{v_{i+1} - v_i}{y_{i+1} - y_i} + \frac{v_i - v_{i-1}}{y_i - y_{i-1}} \right) \\ \tau_{xyA} &= k_2 \Delta v_i + \frac{k_{21}}{2} \left(\frac{u_{i+1} - u_i}{y_{i+1} - y_i} + \frac{u_i - u_{i-1}}{y_i - y_{i-1}} \right) \\ \sigma_{xB} &= \sigma_{xA} + \frac{k_{12}}{2} \left(\frac{\Delta v_{i+1} - \Delta v_i}{y_{i+1} - y_i} + \frac{\Delta v_i - \Delta v_{i-1}}{y_i - y_{i-1}} \right) \\ \tau_{xyB} &= \tau_{xyA} + \frac{k_{21}}{2} \left(\frac{\Delta u_{i+1} - \Delta u_i}{y_{i+1} - y_i} + \frac{\Delta u_i - \Delta u_{i-1}}{y_i - y_{i-1}} \right) \quad (15a) \\ \sigma_y &= \frac{k_{12}}{\delta} \Delta u_i + \frac{k_1}{2} \delta \left[\frac{v_{i+1} - v_i}{y_{i+1} - y_i} + \frac{v_i - v_{i-1}}{y_i - y_{i-1}} + \right. \\ &\quad \left. \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta v_{i+1} - \Delta v_i}{y_{i+1} - y_i} + \frac{\Delta v_i - \Delta v_{i-1}}{y_i - y_{i-1}} \right) \right] \quad (15b)\end{aligned}$$

4.1 软/硬界面的应力响应

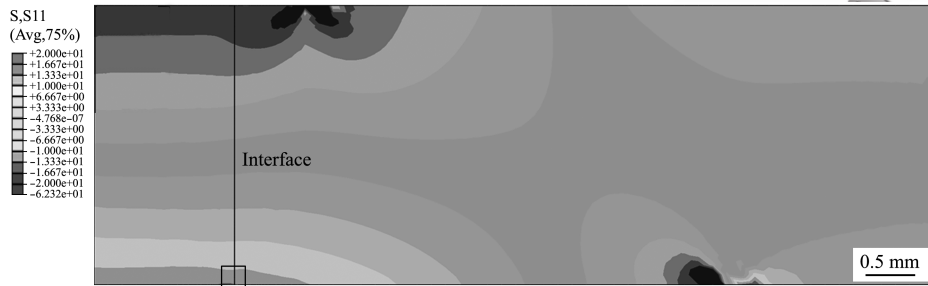
对结构分别考虑两种材料构成,一是界面相与两侧材料弹性模量差别较小的硬界面结构,具体参数列入表1。其中界面常数通过式(5)计算得到。

图5的纵轴为界面相各应力分量,横轴为数据点与梁底面的高度。表2为图5应力曲线上特征

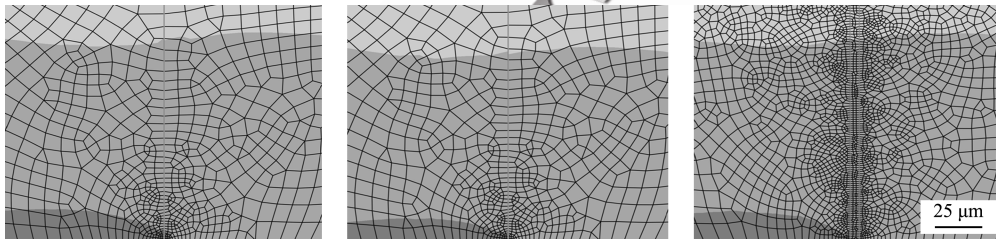
表1 硬界面结构材料常数

Tab. 1 Material properties of hard interface structure

	Material 1	Material 2	Interphase
E/GPa	35	12.6	4.4
ν	0.29	0.26	0.24
Interface parameter	$k_1/\text{GPa} \cdot \text{mm}^{-1}$	$k_2/\text{GPa} \cdot \text{mm}^{-1}$	k_{12}/GPa k_{21}/GPa
	1037.2	354.8	1.64 1.77



(a) 正应力云图
(a) Normal stress nephogram



(b) 经典模型 (b) Classic model (c) 完备界面模型 (c) Complete interface model (d) 直接物理模型 (d) Direct physical model

图4 云图示例及界面端附近网格划分

Fig. 4 Nephogram sample and mesh generation near interface end

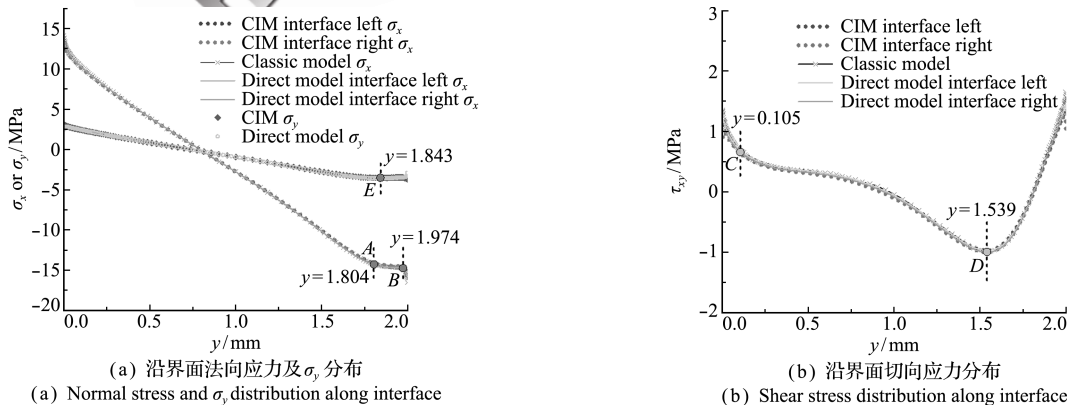


图5 硬界面数值分析结果

Fig. 5 Numerical results of hard interface

表 2 特征点处应力数值
Tab. 2 Stress value on feature points

Node&.height/mm	Stress type/MPa	CIM left	CIM right	Classic model	Direct model left	Direct model right
A	1.804 σ_x	-14.12	-14.09	-14.27	-14.32	-14.28
B	1.974 σ_x	-14.67	-14.60	-14.79	-14.89	-14.82
C	0.105 τ_{xy}	0.68	0.65	0.67	0.69	0.65
D	1.539 τ_{xy}	-0.97	-1.00	-0.99	-0.97	-1.00
E	1.843 σ_y	-3.5343		-3.5579		

点处的应力数值。可见对较薄硬界面,界面两侧的应力跳跃量很小,经典模型和 CIM 的面力结果都与直接物理模型符合良好。结合图像及表中数据可见,CIM 能表征界面相两侧的面力跳跃量,也能准确地表述 σ_y ,这是经典模型无法做到的。此外,图 5 显示 CIM 在正应力数值上存在约 1.5% 的误差。须强调的是,界面端部存在应力奇异性,任何数值方法都须结合理论进行二次处理才可得到端部应力的准确解。

当界面相弹性模量较两侧材料小很多时,即对于软界面结构,经典模型还会呈现另一个问题。采用表 3 的材料组合,数值结果如图 6 所示。

可见对软界面,经典模型不能准确描述切应力分量,而 CIM 的各应力分量结果仍体现出良好的准确性。对比图 5(a)和图 6(a),软界面结构中 σ_y 更大,甚至可达到和面力相同的数量级。这意味着考虑软界面的破坏问题时, σ_y 的作用更加不可忽略,必须通过 CIM 或直接物理模型分析得到其数值,并将其纳入界面破坏评价体系。

4.2 界面层厚度的影响

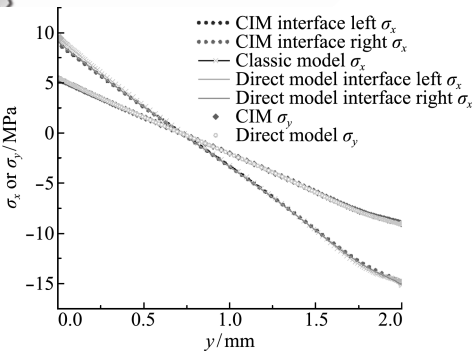
第 2 节的模型推导中存在式(3)所示的近似,即认为界面层较薄时界面层内厚度方向上位移的偏导数为一常量。为明确界面相厚度 δ 对误差的影响,采用硬界面材料参数,将 δ 增加至 50 μm 及 100 μm 后进行分析,得到数值结果如图 7 所示。

可见 CIM 与直接物理模型数值结果的差距随 δ 增加而增加。以法向应力为例,50 μm 及 100 μm 下 CIM 的最大误差分别达到了 10% 及 23%,而在前文 5 μm 算例中该值仅为 1.5%(以上误差是基于将直接物理模型的数值结果认定为精确解)。图 7 还可明显观察到界面两侧在 δ 较大时存在显著切应力跳跃量,而基于面力连续假定的经典模型和内聚力模型必然无法体现这种跳跃,故也不能得到准确模拟结果。实际上,对于较厚界面相,只有直接物理模型能全面准确地描述其力学行为,且随

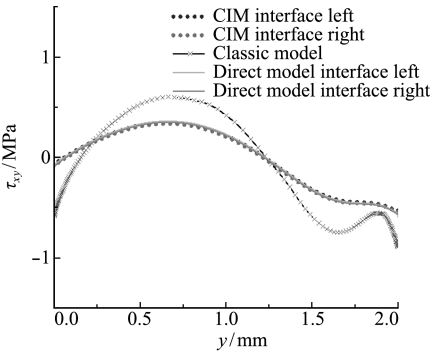
厚度增加,有限元建模的困难大大降低,此时也无需采用其他模型对问题进行简化。结合以上算例,当界面相厚度尺寸与长度尺寸之比 $\delta/L < 2.5\%$ 时,可认为界面相较薄。工程实际中,界面相厚度基本在数十到数百微米之间,由此可见绝大多数工程结构的界面问题都可以通过本模型来进行模拟计算。

表 3 软界面结构材料常数
Tab. 3 Material properties of soft interface structure

	Material 1	Material 2	Interphase	
E/GPa	210	304	2.9	
ν	0.3	0.27	0.38	
Interface parameter	$k_1/\text{GPa} \cdot \text{mm}^{-1}$	$k_2/\text{GPa} \cdot \text{mm}^{-1}$	k_{12}/GPa	k_{21}/GPa
	1085.7	210.1	3.33	1.05



(a) 沿界面法向应力及 σ_y 分布
(a) Normal stress and σ_y distribution along interface



(b) 沿界面切向应力分布
(b) Shear stress distribution along interface

图 6 软界面数值分析结果
Fig. 6 Numerical results of soft interface

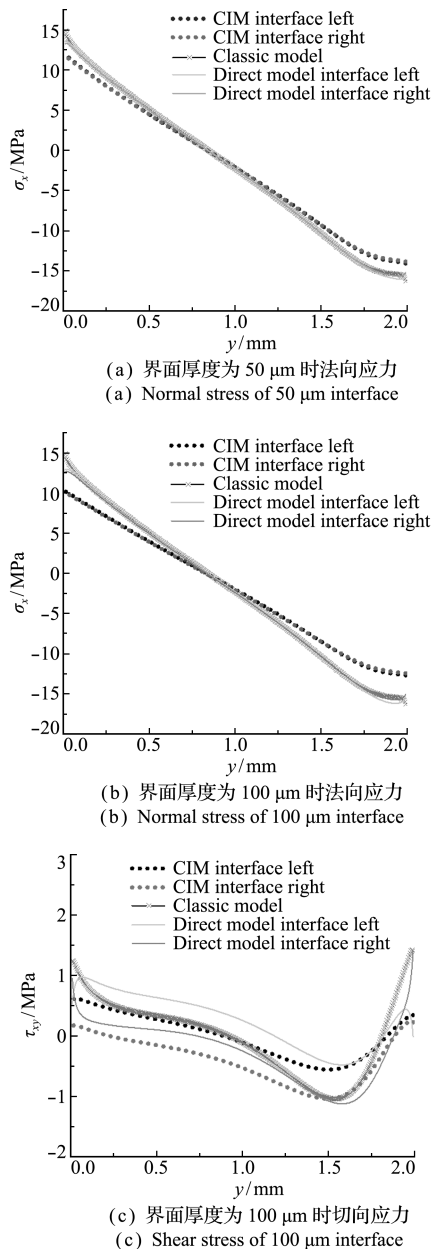


图7 不同界面厚度的数值结果

Fig. 7 Numerical results of different interface thicknesses

5 结 论

基于界面相的等效线弹性材料本构,本文提出了一种新的界面模型和相应数值方法,使用的参数简单明确,并可以完整地描述界面相的应力状态。主要结论如下。

(1) 界面单元虽在数值模型中为无厚度,但其微小厚度实际上可在数值方法的格式中考考虑。对不同厚度的界面相,只需改变厚度参数设定即可分别进行计算。

(2) 本界面单元法使用等效连续体来分析界面相的应力状态,相比使用弹簧近似,对应力状态的描述更全面和精确。

(3) 数值分析结果说明了本方法的适用性,对软硬界面结构都可得到准确的数值结果。当界面相厚度尺寸与界面长度尺寸之比 $\delta/L < 2.5\%$ 时,计算误差小于 10%。

参考文献 (References):

- [1] Yang L, Thomason J L. Development and application of micromechanical techniques for characterising interfacial shear strength in fibre-thermoplastic composites[J]. *Polymer Testing*, 2012, **31**(7): 895-903.
- [2] Qi G C, Du S Y, Zhang B M, et al. Evaluation of carbon fiber/epoxy interfacial strength in transverse fiber bundle composite: Experiment and multiscale failure modeling[J]. *Composites Science and Technology*, 2014, **105**(10): 1-8.
- [3] Ben S D, Zhao J H, Zhang Y C, et al. The interface strength and debonding for composite structures: Review and recent developments [J]. *Composite Structures*, 2015, **129**(1): 8-26.
- [4] Rizzoni R, Dumont S, Lebon F, et al. Higher order model for soft and hard elastic interfaces[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2014, **51**(23-24): 4137-4148.
- [5] Lebon F, Rizzoni R. Asymptotic analysis of a thin interface: The case involving similar rigidity[J]. *International Journal of Engineering Science*, 2010, **48**(5): 473-486.
- [6] Dunders J. Boundary condition at interface[J]. *Micromechanics and Inhomogeneous*, Springer, 1990, 109-114.
- [7] Benveniste Y. A general interface model for a three-dimensional curved thin anisotropic interphase between two anisotropic media[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2006, **54**(4): 708-734.
- [8] Xu J Q, Mutoh Y. A normal force on the free surface of a coated material[J]. *Journal of Elasticity*, 2003, **73**(1-3): 147-164.
- [9] Rice J R. Elastic fracture mechanics concepts for interfacial cracks[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1988, **55**(1): 98-103.
- [10] Valoroso N, Sessa S, Lepore M, et al. Identification of mode-I cohesive parameters for bonded interfaces based on DCB test [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2013, **104**: 56-79.
- [11] Özdemir I, Brekelmans W A M, Geers M G D. A thermo-mechanical cohesive zone model[J]. *Computational Mechanics*, 2010, **46**(5): 735-745.

- [12] 王 亮,白瑞祥,雷振坤,等. 压电复合材料粘接界面断裂有限元模拟[J]. 计算力学学报,2012,**29**(4): 517-521. (WANG Liang, BAI Rui-xiang, LEI Zhen-kun, et al. FEM simulation of adhesive interface fracture in piezoelectric composite[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2012, **29**(4): 517-521. (in Chinese))
- [13] 赵 鹏,石广玉. 层合板界面层的弹簧界面元等效刚度计算模型[J]. 计算力学学报,2011,**28**(s1): 131-135,146. (ZHAO Peng, SHI Guang-yu. An accurate model for the stiffness evaluation of spring interface elements used for the interfacial layers of laminated plates[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2011, **28**(s1): 131-135, 146. (in Chinese))
- [14] Rabinovitch O. An extended high order cohesive interface approach to the debonding analysis of FRP strengthened beams [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2014, **81**: 1-16.

An interfacial element method based on the effect of interfacial phase

XIA Ri, XU Jin-quan *

(School of Naval architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: An interface is simplified from a complex interfacial phase, and interface failure is actually the failure of an interphase. For convenience of numerical analysis, classic model and cohesive zone model take a thin interphase as a zero-thickness interface. As a result, only surface force at an interphase is considered, but inner stress within an interphase is neglected. This would lead to an inherent absence of influence of inner stress in an interface failure criterion, which is imprecise from the view point of interphase material failure. By assuming interfacial phase as an equivalent elastic continuum, a new interfacial element which can give an equivalent description of interface mechanical properties is derived from interface constitutive relation in this paper, and the relevant parameters are convenient to quantize. Numerical simulation is performed with commercial FEM software ABAQUS and user subroutine UEL, which agrees well with numerical results of direct physical model. By several further analyses of structures with different interfacial phase thicknesses, applicability of this method is discussed.

Key words: bonding material; interface model; interfacial element; Finite Element Method; numerical simulation

引用本文/Cite this paper:

夏 日,许金泉. 一种考虑界面相物性影响的界面单元法[J]. 计算力学学报,2019,**36**(5):569-575.

XIA Ri, XU Jin-quan. An interfacial element method based on the effect of interfacial phase[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2019, **36**(5): 569-575.