

文章编号:1005-0523(2012)03-0074-06

ANSYS 三维模型中 SOLID65 单元的内力提取问题

肖挺松

(华东交通大学土木建筑学院,江西 南昌 330013)

摘要:ANSYS 有限元程序中的 SOLID65 单元是一种适合描述钢筋混凝土结构的三维单元。由于加强材料在本构矩阵中的组结方式,使用该单元建立的钢筋混凝土模型在进行常规内力提取时会发生错误。在分析单元本构矩阵组结的基础上,正确的内力提取方式被提出。通过例题验证了该提取方法的正确性,并和常规方式进行了对比。

关键词:ANSYS; SOLID65 单元; 内力提取; 加强材料

中图分类号: O39

文献标志码: A

1 SOLID65 单元简介和钢筋混凝土截面上的内力提取

ANSYS 有限元程序^[1]中的 SOLID65 单元是一个适合描述带钢筋混凝土三维结构的六面体单元,具有以下功能:① 能够添加 1~3 个方向的加强材料;② 能够模拟混凝土的开裂和压碎;③ 能够对钢筋和混凝土应用非线性本构关系。

在工程应用中,使用 SOLID65 单元模拟钢筋混凝土有 3 种方式:① 整体方式,即钢筋直接由单元的实参数控制输入;② 协调分离方式,该方式中 SOLID65 与 LINK8 等单元联合使用, SOLID65 单元用于模拟混凝土的特性,而 LINK8 单元则用于模拟钢筋^[2-3],两者之间通过共用节点实现连接;③ 分离方式,一般用于模拟钢筋与混凝土之间存在较大滑移的情况,模型中需要添加滑移单元^[4],也可以使用单元的“生死”技术^[5]。从钢筋混凝土模型的特点看,大滑移情况下的破坏性模拟中,分离方式的模型更适合实际的力学特点;在小变形中,由于钢筋与混凝土牢固连接,更适合使用整体方式。

在结构分析的理论研究中,工程人员更习惯于使用构件的内力来进行结构的应力理论计算,但现有的对 SOLID65 单元的应用研究集中在开裂分析^[6]和位移-外力^[7]的模拟上,对如何将模型的有限元结果转换为结构内力的研究尚有不足。本文将讨论以整体方式利用该单元建立三维带钢筋模型后,小变形情况下截面上的内力提取问题。

三维单元建立的有限元模型,被法线方向为 $\mathbf{n} = (n_x, n_y, n_z)$ 的平面截断,如图 1 所示。截面 Ω 上的内力被定义为该截面上应力分布的化简结果。以坐标原点为基点,截面 Ω 上应力的化简结果可以用主矢 $\mathbf{R} = (R_x, R_y, R_z)$ 和主矩 $\mathbf{M}_o = (M_x, M_y, M_z)$ 加以表示,计算公式见方程(1)。

$$R_i = \iint_{\Omega} \sigma_{ni} dA \quad M_i = \iint_{\Omega} (x_j \sigma_{nk} - x_k \sigma_{nj}) dA \quad (1)$$

式中: $(\sigma_{nx}, \sigma_{ny}, \sigma_{nz})$ 表示法线方向为 $\mathbf{n}$ 的截面上单位面积分布力矢量; i, j 和 k 按 x, y 和 z 轮换; σ_{ni} 的计

收稿日期:2012-04-05

基金项目:国家自然科学基金项目(51074076)

作者简介:肖挺松(1975—),男,讲师,硕士,研究方向为结构检测、工程力学。

算公式^[8]为

$$\sigma_{ni} = \sigma_{xi} n_x + \sigma_{yi} n_y + \sigma_{zi} n_z \quad (2)$$

若单元只包含单一材料,三维模型截面上的准确内力可以通过有限元结果结合公式(1)提取得到。SOLID65 钢筋混凝土单元若存在加强钢筋,有限元解和式(1)提取的内力将出现一定的误差。这种误差主要来源于2个方面:① SOLID65 单元的本构矩阵组结方式,下一节将详细介绍;② 常规意义上对带钢筋截面的内力计算方式。

钢筋混凝土构件内力的常规处理方式基于如下假设:① 混凝土应力作用面积为整个截面或去除钢筋面积后的截面面积;② 混凝土中的钢筋被设定为单向拉压杆,只提供沿该钢筋方向的拉压力,大小等于 $\sigma^s A_s$, 其中 σ^s 为钢筋的轴向应力;③ 钢筋内力的作用点位于钢筋(当作直线)和该特定截面的交点位置。这种处理方式在力学上和分离方式的 SOLID65 单元模型完全相同,却与整体方式的 SOLID65 单元模型不一致。而且 SOLID65 单元的后处理并不提供钢筋应力和作用点位置,常规提取内力的计算必须通过单元应变计算钢筋应力,并假定作用点在单元截面中心。

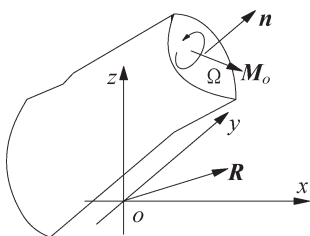


图1 三维模型的截面内力示意图
Fig.1 Internal Force in 3D Model

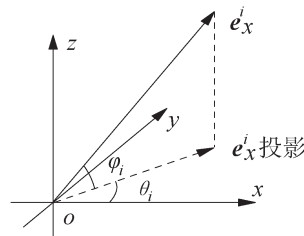


图2 加强材料方向与方位角定义
Fig.2 Rotation Angle of Reinforcement Orientation

2 SOLID65 单元的本构组结方式

SOLID65 单元的原型是一种非协调元^[9],在不涉及材料非线性情况下,混凝土材料的应力应变关系如方程(3)所示

$$\begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{yy} & \sigma_{zz} & \sigma_{xy} & \sigma_{yz} & \sigma_{xz} \end{pmatrix} = \mathbf{D}_c \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{zz} & \gamma_{xy} & \gamma_{yz} & \gamma_{xz} \end{pmatrix}^T \quad (3)$$

单元中的钢筋被视为一维的单向拉压材料,拉压方向被设定为该钢筋的方向 $\mathbf{e}_x^i$, i 表示材料编号。在单元的输入中,第 i 号钢筋的放置方向 $\mathbf{e}_x^i$ 被两个单元实参数 θ_i 和 φ_i 决定。其中 θ_i 为 $\mathbf{e}_x^i$ 在 $x-y$ 平面内的投影和 x 轴之间的夹角, φ_i 为 $\mathbf{e}_x^i$ 与其自身在 $x-y$ 平面内的投影之间的夹角,具体含义如图2所示。

在加强材料的特殊坐标系中,本构矩阵 $\mathbf{D}_{si}^i$ 如方程(4)所示

$$\begin{pmatrix} \sigma_{xx}^i \\ \sigma_{yy}^i \\ \sigma_{zz}^i \\ \sigma_{xy}^i \\ \sigma_{yz}^i \\ \sigma_{xz}^i \end{pmatrix} = \mathbf{D}_{si}^i \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx}^i \\ \varepsilon_{yy}^i \\ \varepsilon_{zz}^i \\ \gamma_{xy}^i \\ \gamma_{yz}^i \\ \gamma_{xz}^i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_r^i & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx}^i \\ \varepsilon_{yy}^i \\ \varepsilon_{zz}^i \\ \gamma_{xy}^i \\ \gamma_{yz}^i \\ \gamma_{xz}^i \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中: E_r^i 为该种加强材料的杨氏模量。

由于加强材料应变是在混凝土材料应变中实现的^[10],经过张量公式转换后,钢筋本构关系中建立在特殊坐标系下的应变列向量与混凝土主体在总体坐标系中得到的单元应变列向量之间存在转换矩阵 $\mathbf{T}$, 如方程(5)所示。

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{xx}^i \\ \varepsilon_{yy}^i \\ \varepsilon_{zz}^i \\ \gamma_{xy}^i \\ \gamma_{yz}^i \\ \gamma_{xz}^i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{x1}^{i2} & a_{x2}^{i2} & a_{x3}^{i2} & a_{x1}^i a_{x2}^i & a_{x2}^i a_{x3}^i & a_{x3}^i a_{x1}^i \\ a_{y1}^{i2} & a_{y2}^{i2} & a_{y3}^{i2} & a_{y1}^i a_{y2}^i & a_{y2}^i a_{y3}^i & a_{y3}^i a_{y1}^i \\ a_{z1}^{i2} & a_{z2}^{i2} & a_{z3}^{i2} & a_{z1}^i a_{z2}^i & a_{z2}^i a_{z3}^i & a_{z3}^i a_{z1}^i \\ 2a_{x1}^i a_{y1}^i & 2a_{x2}^i a_{y2}^i & 2a_{x3}^i a_{y3}^i & a_{x2}^i a_{y1}^i + a_{x1}^i a_{y2}^i & a_{x3}^i a_{y2}^i + a_{x2}^i a_{y3}^i & a_{x3}^i a_{y1}^i + a_{x1}^i a_{y3}^i \\ 2a_{y1}^i a_{z1}^i & 2a_{y2}^i a_{z2}^i & 2a_{y3}^i a_{z3}^i & a_{y2}^i a_{z1}^i + a_{y1}^i a_{z2}^i & a_{y3}^i a_{z2}^i + a_{y2}^i a_{z3}^i & a_{y3}^i a_{z1}^i + a_{y1}^i a_{z3}^i \\ 2a_{z1}^i a_{x1}^i & 2a_{z2}^i a_{x2}^i & 2a_{z3}^i a_{x3}^i & a_{x2}^i a_{z1}^i + a_{x1}^i a_{z2}^i & a_{x3}^i a_{z2}^i + a_{x2}^i a_{z3}^i & a_{x3}^i a_{z1}^i + a_{x1}^i a_{z3}^i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中: $(a_{x1}^i \ a_{x2}^i \ a_{x3}^i) = \mathbf{e}_x^i$ 是第 i 号钢筋特殊坐标系基向量的方向余弦。

第 i 种材料在总体坐标中的本构矩阵 $\mathbf{D}_s^i$ 可以写为方程

$$\mathbf{D}_s^i = \mathbf{T}^T \mathbf{D}_{st}^i \mathbf{T} \quad (6)$$

单元的本构矩阵 $\mathbf{D}$ 被写为方程(7)的形式。

$$\mathbf{D} = \left(1 - \sum_{i=1}^3 v_i \right) \mathbf{D}_c + \sum_{i=1}^3 v_i \mathbf{D}_s^i \quad (7)$$

式中: v_i 为第 i 种加强材料在整个单元中所占的体积比。

3 SOLID65 单元中内力的准确提取方法

基于前述的单元组结理论, SOLID65 钢筋混凝土单元的内力提取应遵循以下 3 点。

1) 计算任何方向截面的内力提取时, 截面单元中的混凝土内力必须先按方程(1)进行计算, 然后乘以方程(7)中的比例 $\left(1 - \sum_{i=1}^3 v_i \right)$; 钢筋内力结果则需要乘以比例 v_i 。若两个单元在截面法线方向上配筋相同, 垂直法线方向存在不同配筋时, 即使有限元程序给出相同的混凝土应力解, 两个单元中的混凝土内力数值也不相同。常规方式进行内力提取时出现的错误在于: 计算截面上的混凝土内力时, 垂直截面法线方向上的配筋不予考虑, 考虑到被钢筋占用的面积后, 混凝土内力的计算比例为 1 或 $1 - v_m$, 其中 v_m 为与截面相交的配筋。

出现该差别的原因在于: SOLID65 单元在组结时采用了以体积为权重的方程(7)形成本构矩阵, 因此在内力提取中, 不能按常规的面积比进行应力处理。若只在一个方向上配置钢筋, 且截面垂直于钢筋方向, 常规方式的内力提取不出现误差。

该项误差的大小与单元中平行于截面方向的配筋率直接相关, 若该方向的配筋率为 2%, 则常规提取的混凝土内力误差也约为 2%。

2) 单元中的混凝土应变分布决定了钢筋提供的内力作用点。在内力提取计算中, 加强钢筋被认为“弥散”在整个单元中, 且在该钢筋的特殊坐标系中, $\mathbf{e}_x^i$ 方向的应变与该位置处的混凝土应变相同。

由于 SOLID65 单元的弥散方式, 准确的钢筋内力作用点位置与截面中心的差别取决于单元截面上应力的变化幅度。以单向线性分布为例, 若单位长度范围内两端的应力大小分别为 σ_l 和 σ_r , 则合力作用点

$$\text{与中点的距离为} \left| \frac{\sigma_r - \sigma_l}{6(\sigma_l + \sigma_r)} \right|。$$

这一项误差在处理受弯模型的钢筋内力时有较大影响, 若受弯模型在厚度方向上单元个数较少, 则以单元中心作为钢筋的内力作用点会造成较大误差。以厚度方向只有 2 个单元的情况为例, 若应力关于中性层反对称, 则常规的内力提取方式在钢筋部分的误差将达到 25%。

该项误差的理论来源是: 单元在积分点上均采用了混合本构矩阵(7)进行计算, 而钢筋计算公式(4)和(5)中的应变是以混凝土材料形函数为基准的。

3) 单元截面上的钢筋内力大小不等于 $\sigma_{xx}^i A_s$ 。准确提取钢筋内力时, 必须按如下顺序: 第一步, 通过单

元应变得到 ϵ_x^i 方向的应变;第二步,按钢筋本构得到钢筋的轴向应力 σ_{xx}^i ,其余分量均为零;第三步,通过应力的坐标转换得到钢筋应力在截面上的应力分量 σ_{ni} 。该分量被最终用于提取钢筋的内力大小。

这种提取方式与常规方法的区别在于第三步,由于张量转换公式与向量转化公式的差别,单元中的钢筋内力大小不等于 $\sigma_{xx}^i A_s$ 。理论上的原因在于:钢筋应力在单元组结过程中被当作应力状态,而常规提取方式仅仅将钢筋应力用于计算钢筋的拉压力。

该项误差取决于 SOLID65 单元中钢筋方向与截面法线方向之间的夹角,当夹角为 0° 时(即钢筋垂直于截面),常规方式提取不造成误差。夹角为 θ 时,常规方式提取的钢筋内力大小与准确值之间的相对误差如图3所示。当 $\theta=30^\circ$ 时,常规方式的提取方法将比准确解偏大15%以上。

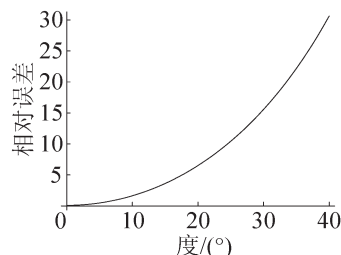


图3 常规方式提取斜钢筋内力的相对误差
Fig.3 Relative error in conventional retrieval of internal force with tilted reinforcing bar

4 例题

例题1。如图4(a)所示,悬臂梁横截面宽度为1 m,高度为2 m,长为20 m,自由端的上下位置受到大小相等、方向相反的外力作用,等效的外力偶大小为 $8.0 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。模型单元的边长为1.0(即单元横截面面积为 $A=1$),钢筋沿3个坐标方向布置,且 $\nu_1=\nu_2=\nu_3=0.1$,钢筋杨氏模量为 $E_s=2 \times 10^{11} \text{ Pa}$ 。

有限元解结果如下:混凝土的应变场沿截面高度方向呈线性变化。截面上下两个单元沿横梁长度方向的应力和应变分别为: $\sigma_{xx}^{\text{top}} = -\sigma_{xx}^{\text{bot}} = 4.299 \times 10^4 \text{ Pa}$, $\epsilon_{xx}^{\text{top}} = -\epsilon_{xx}^{\text{bot}} = 1.495 \times 10^{-6}$ 。

后处理给出的混凝土应力处于单元中心位置,按线性分布计算,且考虑到三向体积加权,混凝土部分产生的弯矩为 $\left[(\sigma_{xx}^{\text{top}} A) \frac{4}{3} l \right] (1 - \sum \nu_i)$,其中 A 表示单元截面面积, l 为单元边长。弥散的钢筋应变和混凝土相同,上下两个单元的钢筋内力作用点在 $z = \pm \frac{2}{3} l$ 处,弥散钢筋产生的弯矩为 $\left\{ \left[(E_s \epsilon_{xx}^{\text{top}}) A \right] \times \frac{4}{3} l \right\} \nu_i$ 。具体验算如下

$$M_{in} = \left[(\sigma_{xx}^{\text{top}} A) \times \frac{4}{3} l \right] \left(1 - \sum \nu_i \right) + \left\{ \left[(E_s \epsilon_{xx}^{\text{top}}) A \right] \times \frac{4}{3} l \right\} \nu_i$$

$$= \left[(4.299 \times 10^4 \times 1) \times (4/3) \times 1 \right] (1 - 0.3) + \left\{ \left[(2 \times 10^{11} \times 1.495 \times 10^{-6}) \times 1 \right] \times (4/3) \times 1 \right\} \times 0.1 = 7.999 \times 10^4$$

该结果与外力偶大小相等,提取结果正确。常规方式的计算中,混凝土部分的面积比例为1或0.9,钢筋作用点被设定在 $z = \pm l/2$ 处,计算如下

$$M_{in} = \left[(\sigma_{xx}^{\text{top}} A) \frac{4}{3} l \right] 0.9 + \left[(E_s \epsilon_{xx}^{\text{top}}) l \right] (\nu_i A)$$

$$= \left[(4.299 \times 10^4 \times 1) \times (4/3) \times 1 \right] \times 0.9 + 2 \times 10^{11} \times 1.495 \times 10^{-6} \times 1 \times 1 \times 0.1 = 8.149 \times 10^4$$

例题2。如图4(b)所示,沿 x 方向的拉压杆,横截面是边长为1 m的正方形,顶部受到 $8 \times 10^5 \text{ N}$ 的拉力。模型单元的边长为1.0(即单元横截面面积为 $A=1$),3根钢筋的设定如下:第一根钢筋体积比

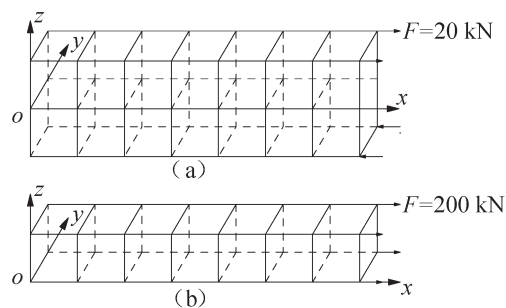


图4 例题1和例题2示意图
Fig.4 Sketch of example 1 and 2

$v_1=0.15$, 方位角为 $\theta=0^\circ$, $\varphi=30^\circ$; 第二根钢筋体积比 $v_2=0.1$, 方位角为 $\theta=90^\circ$, $\varphi=0^\circ$; 第三根钢筋体积比 $v_3=0.05$, 方位角为 $\theta=90^\circ$, $\varphi=90^\circ$ 。钢筋杨氏模量为 $E_s=2 \times 10^{11}$ Pa。

有限元计算结果如下:混凝土应力和应变为

$$\begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 7.969 \times 10^5 \\ 1.304 \times 10^5 \\ 25966 \\ 0 \\ 0 \\ -1.998 \times 10^5 \end{pmatrix} \text{ Pa}, \quad \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.941 \times 10^{-5} \\ -4.565 \times 10^{-6} \\ -9.891 \times 10^{-6} \\ 0 \\ 0 \\ -2.037 \times 10^{-5} \end{pmatrix}。$$

任取一个单元进行分析,提取 x 方向的截面内力,准确值为 $8 \times 10^5 \mathbf{i}$ 。由方位角定义可知,3根钢筋的方向向量分别是 $\begin{pmatrix} e_x^1 \\ e_x^2 \\ e_x^3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.866\mathbf{i} + 0.5\mathbf{k} \\ 1.0\mathbf{j} \\ 1.0\mathbf{k} \end{pmatrix}$ 。

按体积加权得到的 x 方向截面混凝土内力 $\mathbf{R}_c = (\sigma_{xx}\mathbf{i} + \sigma_{xy}\mathbf{j} + \sigma_{xz}\mathbf{k})A(1 - \sum v_i)$, 结果如下

$$\mathbf{R}_c = [(7.969\mathbf{i} + 0\mathbf{j} - 1.998\mathbf{k}) \times 10^5] \times 1 \times (1 - 0.3) = (5.578\mathbf{i} - 1.399\mathbf{k}) \times 10^5$$

从钢筋的分布方向可知,只有第一根钢筋的应力场在 x 方向截面上有非零分量。由方程(5)可得第一根钢筋在 e_x^1 方向上的正应变 ε_{xx}^1 计算如下

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx}^1 &= (a_{x1}^{1^2} \ a_{x2}^{1^2} \ a_{x3}^{1^2} \ a_{x1}^1 a_{x2}^1 \ a_{x2}^1 a_{x3}^1 \ a_{x3}^1 a_{x1}^1) \cdot (\varepsilon_{xx} \ \varepsilon_{yy} \ \varepsilon_{zz} \ \gamma_{xy} \ \gamma_{yz} \ \gamma_{xz}) \\ &= \left(\frac{3}{4} \ 0 \ \frac{1}{4} \ 0 \ 0 \ \frac{\sqrt{3}}{4} \right) \cdot (29.41 \ -4.565 \ -9.891 \ 0 \ 0 \ -20.37) \times 10^{-6} = 1.076 \times 10^{-5} \end{aligned}$$

该钢筋应力在 e_x^1 方向上的正应力分量为 $\sigma_{xx}^1 = E_s \varepsilon_{xx}^1 = 2.152 \times 10^6$ Pa, 其余应力分量均为 0。转换回总体坐标后,该钢筋应力在截面上的分量为

$$\begin{pmatrix} \sigma_{xx}^s \\ \sigma_{xy}^s \\ \sigma_{xz}^s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{x1}^{1^2} \\ a_{x1}^1 a_{x2}^1 \\ a_{x1}^1 a_{x3}^1 \end{pmatrix} \sigma_{xx}^1 = \begin{pmatrix} 0.75 \\ 0 \\ 0.433 \end{pmatrix} \times 2.152 \times 10^6 = \begin{pmatrix} 16.14 \\ 0 \\ 9.318 \end{pmatrix} \times 10^5 \text{ Pa}$$

钢筋提供的单元内力 $\mathbf{R}_s = [(\sigma_{xx}^s \mathbf{i} + \sigma_{xy}^s \mathbf{j} + \sigma_{xz}^s \mathbf{k})A]v_i$, 计算如下

$$\mathbf{R}_s = [(16.14\mathbf{i} + 0\mathbf{j} + 9.318\mathbf{k}) \times 10^5] \times 1 \times 0.15 = (2.421\mathbf{i} + 1.398\mathbf{k}) \times 10^5$$

钢筋与混凝土在 x 方向的内力之和为截面内力,提取值为

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_c + \mathbf{R}_s = (5.578\mathbf{i} - 1.399\mathbf{k}) \times 10^5 + (2.421\mathbf{i} + 1.398\mathbf{k}) \times 10^5 = (7.999\mathbf{i} - 0.001\mathbf{k}) \times 10^5$$

结果与理论值相符。若采用常规计算方法,提取出的混凝土内力和钢筋内力分别为

$$\mathbf{R}_c = (\sigma_{xx}\mathbf{i} + \sigma_{xy}\mathbf{j} + \sigma_{xz}\mathbf{k})A(1 - v_i) = (6.774\mathbf{i} - 1.698\mathbf{k}) \times 10^5$$

$$\mathbf{R}_s = [\sigma_{xx}^1(v_i A)]e_x^1 = [2.152 \times 10^6 \times (0.15 \times 1)](0.866\mathbf{i} + 0.5\mathbf{k}) = (2.795\mathbf{i} + 1.614\mathbf{k}) \times 10^6$$

由此得到的内力常规提取结果为 $(9.967\mathbf{i} - 0.084\mathbf{k}) \times 10^6$ 。

5 结论

由于材料本构矩阵的组结特点,SOLID65 钢筋混凝土单元并没有在后处理中给出自带钢筋的应力和作用点。由于与该单元的组结理论不一致,采用常规的钢筋混凝土截面内力提取方式无法从该单元的有限元结果中得到准确的截面内力。在本文的两道例题计算中,常规方式提取出的内力误差为 +1.9% 和 +19.6%,但混凝土部分的内力误差达到 +28.6% 和 +21.4%,钢筋部分的内力误差为 -25.0%

和 +15.4%。

总体上看,常规方式下 SOLID65 钢筋混凝土单元的内力提取误差基本与截面的纵向体积配筋率相当,并不会对理论研究产生较大影响;但当出现以下情况时,常规提取方式的内力会进一步增大,并可能会影响到理论研究:

- 1) 内力以弯矩为主,且受弯截面高度方向上单元个数很少,建议至少划分 5 个单元。
- 2) 单元中的钢筋方向与单元截面的法线方向存在较大的夹角,建议不大于 20° 。
- 3) 单元划分过细,导致单个单元内的配筋率过大,建议体积配筋率在单个单元内不大于 10%。

采用本文所述的方式提取内力时,需要考虑体积加权、钢筋弥散和钢筋应力转换。由于新的提取方式和单元本构的组结方式一致,可以保证 SOLID65 单元在小变形情况下准确提取出模型结果中的内力数值。在非线性计算中,由于混凝土开裂,本构关系在计算过程中进一步发生变化,且结果与各积分点相关,该方法失效。

参考文献:

- [1] SAEED M. 有限元分析:ANSYS 理论与应用[M]. 3 版. 中国电子工业出版社,2003.
- [2] FANNING P. Nonlinear model of reinforced and post-tensioned concrete beam[J]. Electronic Journal of Structure Engineering, 2001(2):111-119.
- [3] XIAO R Y, O' FLAHERTY T. Finite-element analysis of tested concrete connections[J]. Computers and Structures, 2000, 78(1-3), 247-255.
- [4] 薛建阳,杨勇,赵鸿铁. 型钢混凝土柱粘结滑移性能及 ANSYS 数值模拟方法研究[J]. 建筑钢结构进展, 2006, 8(5):9-16.
- [5] 石永久,王元清,陈宏,等. 钢-混凝土组合扁梁受力性能的有限元分析[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(4):417-420.
- [6] 邹仕鑫. 基于 Solid65 有限单元的鄱家冲水库渡槽应力分析[J]. 水利建设与管理, 2011, 31(8):51-53.
- [7] 吴秋兰,童谷生,刘勇胜, BFRP 约束钢筋混凝土方柱轴压过程的有限元分析[J]. 华东交通大学学报, 2011, 28(2):70-73.
- [8] 徐芝纶. 弹性力学简明教程[M]. 北京:高等教育出版社,2002.
- [9] TAYLOR R L, BERESFORD P J, WILSON E L. A non-conforming element for stress analysis[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1976, 10(6):1211-1219.
- [10] SCHNOBRICH W C, SUIDAN M. Finite element analysis of reinforced concrete[C]//ASCE Journal of the Structural Division, 1973:2109-2122

Internal Force Retrieval from FEM Model Built with ANSYS SOLID65 Elements

Xiao Tingsong

(School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: ANSYS Solid65 element is a 3D concrete element with or without reinforcing bars. Due to its constitutive matrix formula, conventional way to retrieve internal force from model built with this element may cause incorrect results. In order to get the right internal force, necessary modifications are proposed based upon element theory. Errors caused by conventional retrieval are shown by test examples.

Key words: ANSYS; Solid65 element; internal force retrieval; reinforcing bars