

结构动力弹塑性与倒塌分析 (II)*

——SAP2ABAQUS 接口技术、开发与验证

柳国环^{1,2}, 练继建^{1,2}, 国巍³

(1. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072; 2. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072;
3. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

摘要: 开发并实现了由大型商业软件 SAP2000 导入 ABAQUS 有限元模型的接口程序——SAP2ABAQUS, 明确交代了适用于隐式算法 UMAT 与显式算法 VUMAT 的 inp 数据格式并给出了相应注记。SAP2ABAQUS 接口程序基于 Microsoft VS2008 平台并采用 Visual C# 语言开发而成, 提出并设置界面为导航方式, 可自由选择生成隐式或显式格式的 inp 数据文件, 不仅直接可转换不同截面杆系构件、壳体、组以及约束等信息, 而且可将材料纤维信息直接转化为 inp 文件, 包括难于处理的适用于隐式和显式算法的的钢材纤维、剪力墙配筋率等。可转化型钢构件包括圆形钢管、箱形钢管、工字钢与角钢, 混凝土构件包括钢筋混凝土、圆钢管混凝土、方钢管混凝土、I 字型以及十字形型钢混凝土。采用 SAP2ABAQUS 接口程序, 对几种典型形式的结构模型分别转化, 对比转化前后的模型信息以及模态分析结果, 进一步验证了开发 SAP2ABAQUS 的可行性与准确性。该项工作可极大提高 ABAQUS 前处理的工作效率和模型转化的准确性。

关键词: 有限元; SAP2000; ABAQUS; SAP2ABAQUS; UMAT; VUMAT

中图分类号: TV318

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2014)01-0132-09

0 前言

ABAQUS 是致力于非线性分析的大型通用商业有限元软件, 首要创始人布为布朗大学 David Hibbitt, 另外两位创始人 Bengt karlsson 和 Paul Sorensen 随后加入, 后来 3 位力学专家于 1978 年 2 月成立了 HKS 公司致力于工程分析计算工具的研发, 2002 年改名为 ABAQUS 公司。ABAQUS 核心程序能够分析广泛的线性和非线性问题, 包括静态、动态、模态分析、时域/频域以及多场耦合分析, 而且具有可用于二次开发的材料本构的用户子程序接口 UMAT 和 VUMAT 的开发功能, 前者适用于隐式算法而后者适用于显式算法 (庄茁, 2005)。缺点是: 与 ABAQUS 自身的强大计算能力相比, ABAQUS 前处理的便捷性尚不足以满足需要。例如在前处理方面, 直接采用 ABAQUS 软件建立有限元模型占用工程人员较多时间, 尤其在生成材料 inp 文件方面比较消耗时间 (钟同圣等,

2006)。一个复杂的大跨或超高层建筑, 技术人员可能需要数天甚至更长时间建立模型和修改模型, 而且有限元模型信息未必能够充分反映结构本身。此外, GUI (Graphic User Interaction) 方式建模还容易出现由于有限元模型自身问题导致计算难于收敛甚至不收敛等常见且很耗时才能解决的问题 (毛小东, 2011)。如上所述问题是工程中常见问题, 完全采用 ABAQUS 直接进行有限元模型建立极大可能降低了工程技术人员的工作效率甚至导致结果的不可靠, 进而会影响整体及后续工程进度。

相比之下, 大家熟知的 SAP2000 (下文简称, SAP) 是土木工程领域常用的有限元软件之一, 由美国 CSI (Computer and Structural Incorporate) 公司研发。关于 SAP 更多介绍可参考相关文献 Wilson (2004) 和北京金土木软件技术有限公司 (2006)。与 ABAQUS 相比, 由于 SAP 的主要面向对象领域为土木工程, 因此其前处理的普及性相对更强, 而备受土木工程领域的设计单位青睐。

* 收稿日期: 2013-09-04.

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体科学基金 (51021004)、国家自然科学基金青年基金 (51108466) 和中国博士后科学基金 (2011M500332) 联合资助。

然而, SAP 目前的分析能力与 ABAQUS 相比, 仍存在一定差距, 尤其是在构件和结构体系的高级非线性方面, 例如: 复杂结构动力弹塑性分析、失效与破坏判断以及多场耦合计算等。

本文综合考虑 ABAQUS 和 SAP2000 软件存在的优势, 当需要做大型复杂结构高级非线性分析时, 容易想到一种途径: 若能够将 SAP 中的模型导入 ABAQUS 中则是一种更为便利的方法。这样, 不仅可以充分利用 SAP 软件已建好的模型, 还能够避免 SAP2000 前处理过程中建立模型这一复杂过程, 从而可节约时间、提高工作效率。为此, 本文开发并实现了有限元模型由商业软件 SAP 导入 ABAQUS 软件中的接口程序——SAP2ABAQUS, 并给出了编写流程、单元信息、隐式算法格式、显式算法格式、SAP2ABAQUS 操作流程以及模型验证等相关情况。程序 SAP2ABAQUS 基于 Microsoft VS 开发环境并采用 C#语言编码而成, 界面采用流程导向方式以便于使用者操作。SAP2ABAQUS 不仅直接可转换不同截面杆系构件、壳体、组以及约束等信息, 而且可将材料信息(钢筋与混凝土级别, 构件的纵筋和箍筋以及剪力墙的配筋率)通过界面输入可直接转化为 inp 文件, 通过选择可生成适用于隐式或显式算法的 inp 格式。可转换的型钢形式包括圆钢管、箱型钢、工字钢与角钢等, 混凝土构件包括钢筋混凝土、圆钢管钢管混凝土、方钢管混凝土以及 I 字型和十字形型钢混凝土等。此外, 边界约束条件以及构件分组等信息也可直接转入到 ABAQUS 软件中。最后, 采用本文开发的 SAP2ABAQUS 接口程序, 对一简单模型与一复杂实际工程模型分别转化, 并进一步对转化前后的模型信息以及模态分析结果进行对比。

本文作为 ABAQUS 相关系列工作的第 II 部分, 主要涉及关于程序开发与验证, 主要包括:

(1) 开发了 SAP2000 化为 ABAQUS 有限元模型的接口程序 SAP2ABAQUS。

(2) 给出了开发 SAP2ABAQUS 接口程序的主要相关技术细节与主要注记。

(3) 实现了程序 SAP2ABAQUS 导航式的可视化界面, 给出操作步骤与说明。

(4) 验证了 SAP2ABAQUS 转化模型的可行性与准确性。

本文所开发的 SAP2ABAQUS 生成的 inp 数据

文件可直接与第 I 部分(柳国环等, 2014a)中开发子程序配套使用, 第 I 部分的子程序与第 II 部分的 SAP2ABAQUS 接口程序被应用于实际工程中并在第 III 部分中给出(柳国环等, 2014b), 从而得到进一步检验。

1 SAP2ABAQUS 流程图

图 1 给出了编写 SAP2ABAQUS 的框架流程图, 使接口程序 SAP2ABAQUS 代码编写思路明确清晰。如步骤 1 中所提及的, 需要了解和熟悉 SAP 和 MARC 两种软件的基本原理、界面操作以及相应的数据文件, 尤其需要熟悉 ABAQUS 接口 UMAT 与 VUAMT 的区别。该项工作直接影响着后续工作的顺利以及代码编写结果的准确性。

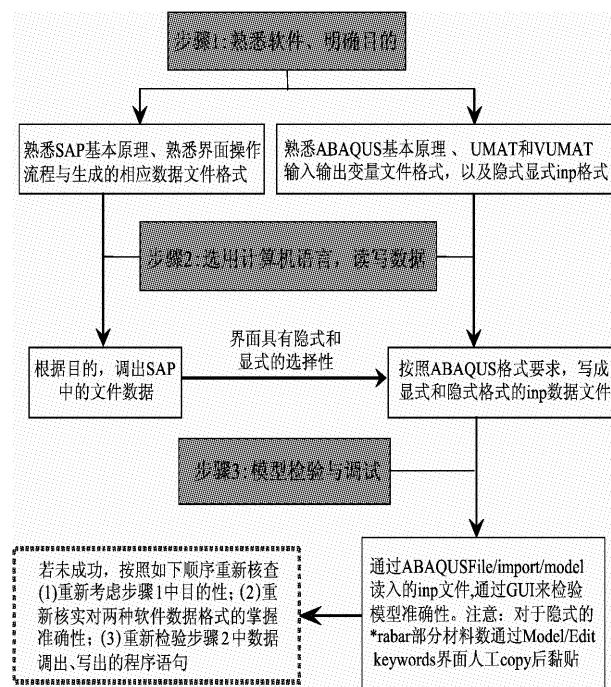


图 1 程序 SAP2MABAQUS 编写流程图

Fig. 1 Compilation Flowchart of interface program SAP2ABAQUS

2 单元的信息对应性与格式表达

两种软件数据之间的转换, 确保各种单元信息及其格式的表达一一对应是关键, 否则会出现信息“错位”, 甚至错误传递现象。局部坐标系的准确转换直接影响构件截面强弱轴的方向与定

位,进而影响整体结构模型的一一对应性。本节对所转化的具有代表性单元所涉及相关内容作介绍。

2.1 杆件单元与局部坐标系

关于杆件转换,涉及到两个关键环节:保持

几何截面与局部坐标系转换前后的一致性。下面以矩形截面为例加以说明,图2为几何截面和局部坐标系。SAP 软件中直接确定如图2a所示的高度(t_3)和宽度(t_2),ABAQUS 中的截面图b需要确定相应的高度 b 和宽度 a 。

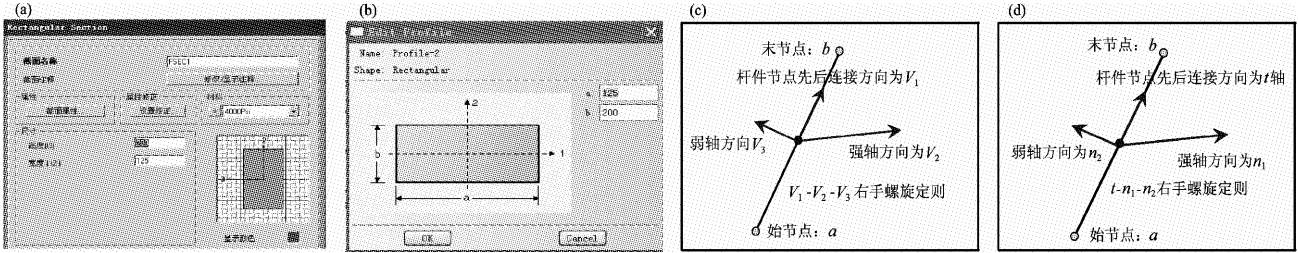


图2 构件的几何截面与局部坐标系

(a) SAP 截面定义; (b) ABAQUS 截面定义; (c) SAP 构件局部坐标; (d) ABAQUS 构件局部坐标

Fig. 2 Geometric section and local coordinate system of frame

(a) definition of SAP section; (b) definition of ABAQUS section; (c) local coordinate of SAP; (d) local coordinate of ABAQUS

对于局部坐标系: SAP 中的局部坐标如图2c图所示,直接根据截面的坐标轴与整体坐标系相对位置确定。局部坐标1轴为杆件两个节点先后连接的方向,局部2轴为强轴(沿2轴绕3轴惯性矩较大)方向,3轴方向符合右手螺旋定则顺序 $V_1 - V_2 - V_3$,相应的数学公式可表示为

$$\vec{V}_3 = \vec{V}_1 \times \vec{V}_2, \quad (1)$$

设 $v_1(x), v_1(y), v_1(z)$ 与 $v_2(x), v_2(y), v_2(z)$ 分别为 \vec{V}_1 和 \vec{V}_2 的方向分量,即

$$\begin{cases} \vec{V}_1 = [v_1(x), v_1(y), v_1(z)] \\ \vec{V}_2 = [v_2(x), v_2(y), v_2(z)] \end{cases} \quad (2)$$

进而通过两个方向可得到第三方向向量,即:

$$\vec{V}_3 = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ v_1(x) & v_1(y) & v_1(z) \\ v_2(x) & v_2(y) & v_2(z) \end{vmatrix} \quad (3)$$

ABAQUS 中,局部1轴(ABAQUS 中为轴向)为杆件两节点的连接方向。这时已知 \vec{V}_1 和式(3)获取到SAP 中模型局部轴向 \vec{V}_3 ,可进一步得到ABAQUS 的强轴向量:

$$\vec{n}_1 = \vec{V}_3 \times \vec{V}_1. \quad (4)$$

$$\vec{n}_1 = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ v_3(x) & v_3(y) & v_3(z) \\ v_1(x) & v_1(y) & v_1(z) \end{vmatrix} \quad (5)$$

综上所述,这时只需要确定SAP 中构件 \vec{V}_1 和 \vec{V}_2 的方向分量即可。杆件的长度 l 可通过杆件定位直接提取其编号,只需计算杆件末节点坐标与始节点坐标的相对差值,即

$$dx = x_b - x_a, dy = y_b - y_a, dz = z_b - z_a. \quad (6)$$

从而 \vec{V}_1 中的各个分量可通过计算余弦值而容易得到:

$$v_1(x) = dx/l, v_1(y) = dy/l, v_1(z) = dz/l. \quad (7)$$

此时,需要同时考虑如下集中可能性:当 $v_1(x) = v_1(y) = v_1(z)$ 时,表明杆件长度太短而被认为是两个重合的节点,需要重新核实模型(通常情况下,该情形不会发生);当 $v_1(x) = v_1(y) = 0$ 且 $v_1(z) > 0$ 时,说明杆件平行于 z 轴且方向与 z 轴正向相同。当 $v_1(x) = v_1(y) = 0$ 且 $v_1(z) < 0$,说明杆件平行于 z 轴,且方向与 z 轴正向相反。除此之外,根据SAP2000 自身相关规定,进一步可以确定 \vec{V}_2 :

$$\vec{V}_2 = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ v_1(x) & v_1(y) & v_1(z) \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}.$$

(8)

式中，(0,0,1) 代表 z 轴正方向的向量。这时，联合式 (3)、(6)、(7) 和 (8) 可以得到 SAP 中构件的 \vec{V}_3 ，再将 \vec{V}_1 和 \vec{V}_3 代入式 (5) 中可得到 ABAQUS 强轴向量 \vec{n}_1 。

2.2 壳单元与钢筋层（可模拟楼板或剪力墙）

采用壳单元可以模拟建筑结构中模拟楼板和剪力墙，该单元的转化需要保证转化前后的单元厚度、节点坐标及其先后连接的一致性。读取 SAP 中 shell 单元的 4 个节点坐标编号和厚度并，同时将剪力墙的配筋信息写成 ABAQUS 的文件格式形式，具体格式如图 3 所示。

2.3 边界条件与分组

SAP 模型中设置的边界条件与单元组名（包括单元）通过 SAP2ABAQUS 直接将赋予相应 ABAQUS 模型，相应 inp 文件格式如图 4 所示。

(a) *Element, type=S4R (关键词, 单元类型) 1,1,4,5,2 2,2,5,6,3 3,4,7,8,5 4,5,8,9,6 (单元编号, 单元节点1-4-5-2顺次链接) 5,7,10,11,8 6,8,11,12,9	(b) *SHELL SECTION, ELSET=ASEC1,material=C30 (关键词, 截面组, 材料) 0.25, 7 (壳厚度, 辛普森积分点) *REBAR LAYER (关键词) Layer1,0.00025,0.1,0.105,SHEARWALL_HRB335,0 (层名, 配筋率/壳厚/0.1, 定义长度, 偏心距, 材料, 角度) Layer2,0.00025,0.1,0.105,SHEARWALL_HRB335,90 Layer3,0.00025,0.1, 0-105,SHEARWALL_HRB335,0 Layer4,0.00025,0.1, 0-105,SHEARWALL_HRB335,90
---	---

图 3 ABAQUS inp 文件中壳单元类型、节点连接与厚度的数据格式

(a) 壳单元类型及节点连接；(b) 壳单元厚度与钢筋层定义

Fig. 3 Data format for element type, nodes connectivity and thickness of shell element in ABAQUS inp data file
(a) element type and nodes connectivity of shell element; (b) define of thickness of shell element and reinforced layer

(a) *Nset nset=BC_restraint, instance=PART -1,generate 1,1 4,4 7,7 10,10 *Boundary (关键词) BC_restraint,1,6 (节点组名, 1-6个自由度约束)	(b) *Element, type=S4R 1,1,4,5,2 2,2,5,6,3 (单元编号, 节点2-5-6-3顺次链接) 3,4,7,8,5 4,5,8,9,6 *ELSET, elset=ASEC1 (单元组关键词, 组名) 1,2,3 (组中的单元编号)
--	--

图 4 ABAQUS inp 文件中边界条件与单元组数据格式

(a) 边界条件赋予；(b) 单元组赋予

Fig. 4 Data format for boundary condition and element set in ABAQUS inp data file
(a) boundary condition endowed with ABAQUS model; (b) element set endowed with ABAQUS model

3 隐/显式算法纤维处理方法

对应于隐式和显式算法的 inp 文件数据也不完全相同，不仅钢纤维部分需要区别处理，而且通过 ABAQUS 读入 inp 文件进一步生成有限元模型步骤也不同。

3.1 隐式 inp 文件格式与处理方法

对应于隐式算法的 inp 文件，其中钢纤维的关

键词用 * rebar，同时需要写出各个纤维的面积与几何坐标。直接生成的隐式 inp 文件首先需要通过 File/import/model 读入 inp 文件（这时 * TRANSVERSE SHEAR STIFFNESS 与 * rebar 之后的钢纤维数据尚未被读取，这属于 ABAQUS 当前固有存在的问题），然后再需要通过 Model/edit keywords 编辑该 inp 文件，将 * TRANSVERSE SHEAR STIFFNESS 和 * rebar 之后的文件数据 copy 到相应位置。通过如上处理，隐式 inp 文件数据被读入至 ABAQUS 中而

形成有限元模型。在此说明,对于考率压弯延性破坏的构件一般可以不考虑剪切影响,剪切刚度关键词 * TRANSVERSE SHEAR STIFFNESS 之后数据需要被设置一个比较大的量值。

3.2 显式 inp 文件格式与处理方法

对应于显式算法的 inp 文件,其中不允许出现 * rebar,因此需要采用几何位置和面积相同的型钢作等效处理。这样处理不仅可以避开 * rebar 的限制,而且可以通过 File/import/model 直接将生成的适用于显式算法的该部分 inp 文件数据输入而直接生成有限元模型。

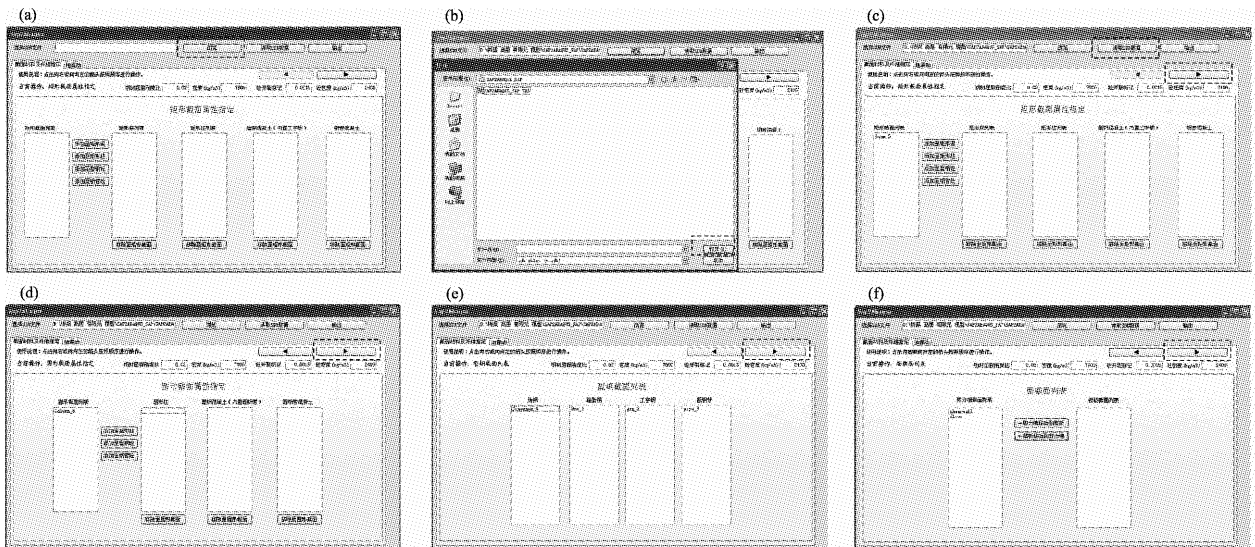
4 SAP2ABAQUS 开发与界面

4.1 界面导航与操作

为了确保转化后的 ABAQUS 有限元模型信息准确,首先需要核实模型数据转化之前的 SAP 模型信息,否则会影响转化结果与计算结果。转化界面采用导航方式。可转化杆系构件形式包括圆钢管、箱型钢、工字钢与角钢等,混凝土构件包括钢筋混凝土、圆钢管钢管混凝土、方钢管混凝土以及内置 I 字型和十字形型钢混凝土等,局部坐标系连同截面同时转化为 inp 文件。壳单元节点与厚度直接转化为 inp 格式。此外,该接口可以将 SAP 中 group 命名及其归属的节点或单元直接转给 ABAQUS 中的 NSET 或 ESET。

SAP2ABAQUS 程序操作主界面如图 5a 所示。点击浏览,如图 5b 所示找到 SAP2000 的 SDB 格式文件硬盘地址,选定该文件并点击“打开”按钮。

此时,返回了如图 5c 所示的主界面同时界面现了 SDB 文件所在的地址,然后点击“读取 SDB 数据”将 SAP 中模型信息读入到 SAP2ABAQUS 界面中,通过导航键如图 5c 至 5f 所示,进一步对不同界面的钢混构件(钢筋混凝土、型钢混凝土、方形钢管混凝土、工字形以及十字形型钢混凝土),型钢以及壳单元(剪力墙或楼板)分类。继续点击图 5f 中的导航键,可以顺次看到如图 5g 至 5j 所示型钢的截面信息与定义界面。继续点击图 5j 中的导航键,可以顺次看到如图 5k ~ 5n 所示的钢混构件、型钢混凝土构件以及钢管混凝土构件的界面信息与纤维定义界面,该界面直接关系到生成 inp 文件中隐式算法对应的纤维数据或显式算法对应的等效型钢位置和面积,相应界面构件形式与图 5c 和 5d 中预先分类相对应。继续点击图 5n 中的导航键,可以顺次看到如图 5o 和 5p 中楼板和剪力墙的信息与定义截面,主要涉及到配筋率。这时,可以直接点击图 5p 中的“地震动”按钮,选择场地类别及其相应的地震波,可直接设置系数进行调幅,后续生成的数据包括已设置的地震波数据。输出 inp 文件之前,需要选择图 5q 中的“显式算法”或“隐式算法”、质量和刚度阻尼系数以及模态分析所需要设置的最小周期(代码程序直接计算为 ABAQUS 所需要的频率量值)。从而生成所需要格式的 inp 文件数据。这时点击图 5q “输出”生成 inp 文件,保存地址根据需要而定,当数据生成成功后会显示图 5r 中所示的动态“成功导出文件”的文本框,若在输出前检查之前已设置的数据可以直接图 5q 中返



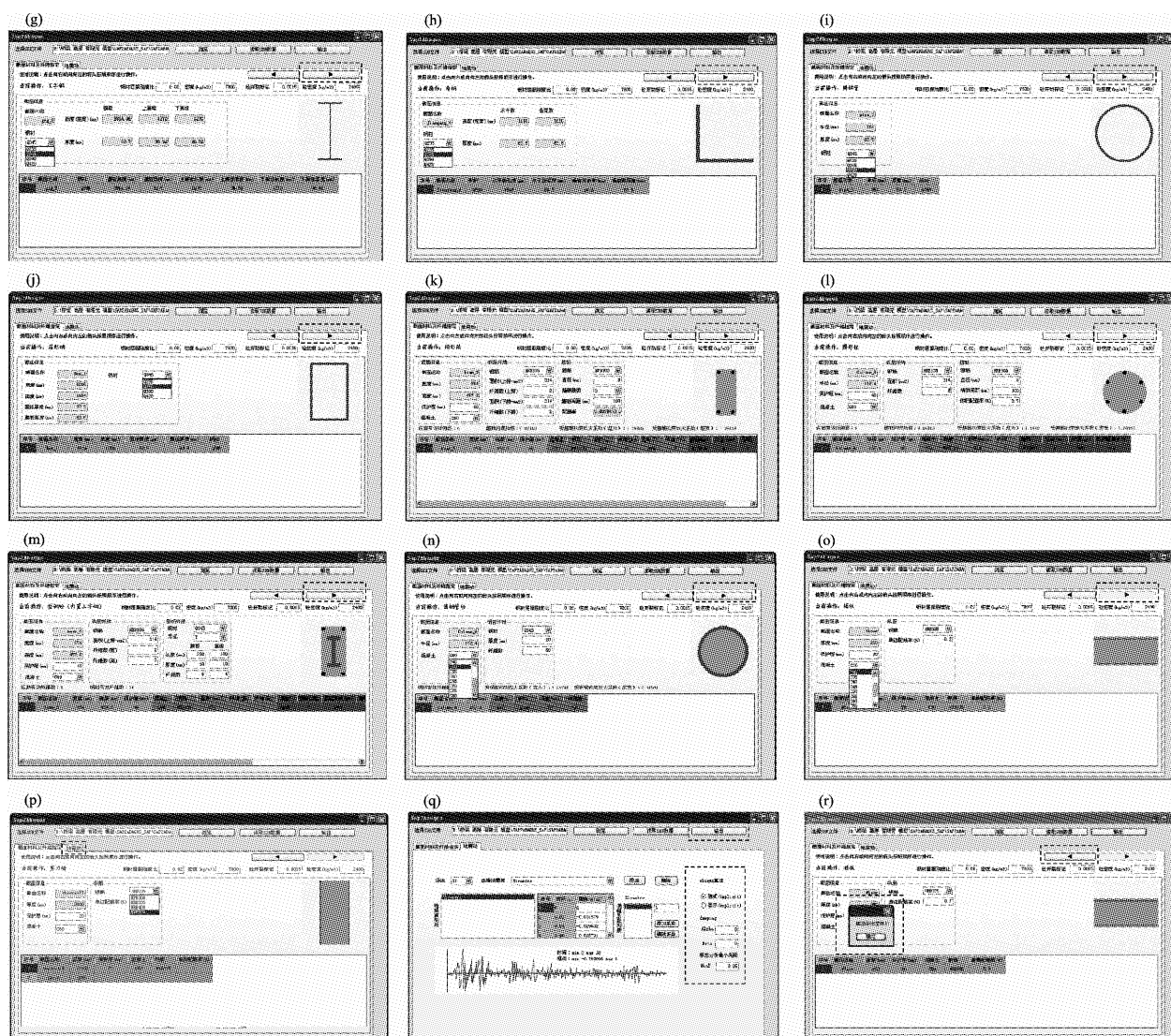


图5 SAP2ABAQUS 导航式操作界面

(a) SAP2ABAQUS 主界面; (b) 寻找并选定 SDB 文件; (c) 数据读入待分类; (d) 数据读入待分类; (e) 型钢数据读入已被分类; (f) 壳界面数据读入待分类; (g) 工字钢截面信息显示与定义; (h) 角钢截面信息显示与定义; (i) 圆钢管截面信息显示与定义; (j) 箱型钢截面信息显示与定义; (k) 矩形梁截面信息显示与定义; (l) 圆形柱截面信息显示与定义; (m) I 字型钢混凝土截面信息显示与定义; (n) 圆形钢管混凝土截面信息显示与定义; (o) 楼板信息显示与定义; (p) 剪力墙信息显示与定义; (q) 地震动选择与输出设置; (r) 成功导出文件显示

Fig. 5 Operation interface with navigation mode for program SAP2ABAQUS

- (a) main interface of SAP2ABAQUS; (b) find and select the SDB file; (c) data input for classification; (d) data input for classification; (e) section reinforced data input and has been classified; (f) shell interface data input for classification; (g) information display and definition of joist steel section; (h) information display and definition of angel steel section; (i) information display and definition of circular steel tube section; (j) information display and definition of box-type; steel section; (k) information display and definition of rectangular beam section; (l) information display and definition of circular; column section; (m) information display and definition of I font steel-concrete; (n) information and definition of concrete filled circular steel tube section; (o) information display and definition of floor; (p) information display and definition of shear wall; (q) select and output set of earthquake motion; (r) display of export file successfully

回导航键。这里, 对于钢管混凝土约束效应的相关理论参考陈肇元等 (1992), Legeron 和 Paultre (2003) 及韩林海 (2007) 文献。

4.2 SAP2ABAQUS 使用记

使用 SAP2ABAQUS 注意如下几个事项:

- (1) SAP 版本为 14.2.2 以上版本且确保软件

本身使用正常。

(2) 使用电脑上成功安装了 Microsoft. net framework 并保证正常使用。

(3) 转化模型前 SAP 模型所保存的单位建议调整为国际标准单位 (N-m-C) 并关闭 SAP 程序, 以便于转化后在 ABAQUS 查阅参数。

5 模型验证

本节以 4 个模型为例, 从不同层面说明模型通过 SAP2ABAQUS 由 SAP 转入到 ABAQUS 中的准确性和普适性。图 6 和图 7 为一简单模型, 图 6 对比工程结构中常用的几种构件转化前后一致性, 图 7 检验了改变型钢局部坐标系的模型转化前后的一致性。针对框架、剪力墙和输电塔架模型, 图 8 ~ 10 分别给出了转化前后模型与模态的对比图。针对柔性索模型, 图 11 分别给出了悬链线索模型转化前后的模型及其模态对比图。通过图示对比表明了转化前后的模型与模态分析结果的一致性, 从而验证了 SAP2ABAQUS 的转化模型的可靠性与普适性。

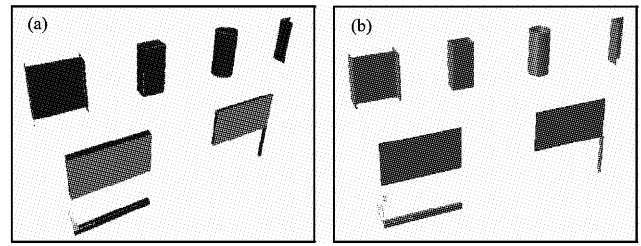


图 6 局部坐标缺省情形下转化前后模型对比
(a) SAP 模型; (b) ABAQUS 模型

Fig. 6 Comparison between SAP and ABAQUS FEM models in local coordinate default condition

(a) SAP model; (b) ABAQUS model

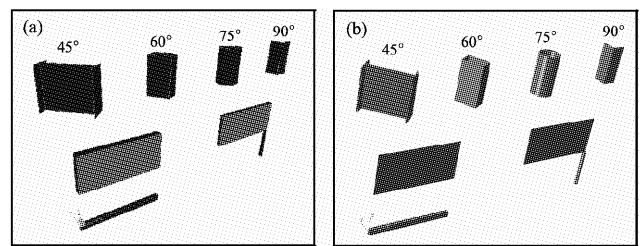


图 7 型钢局部坐标变化情形下转化前后模型对比
(a) SAP 模型; (b) ABAQUS 模型

Fig. 7 Comparison between SAP and ABAQUS FEM models in section reinforced local coordinate changing condition

(a) SAP model; (b) ABAQUS model

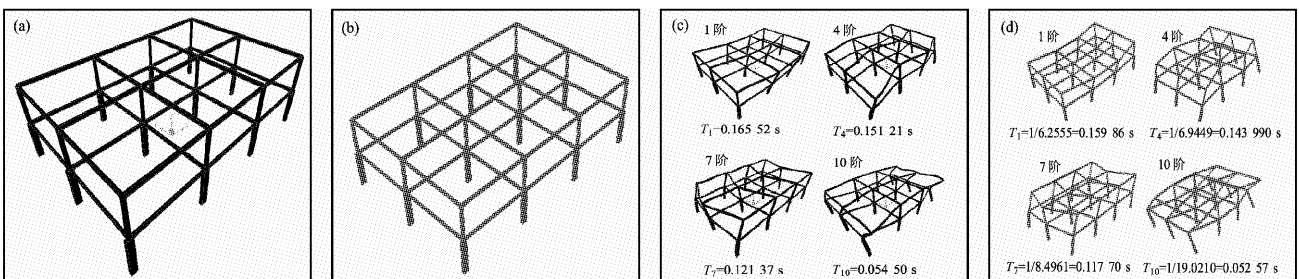


图 8 构件转换前后模型与模态对比

(a) SAP 模型; (b) ABAQUS 模型; (c) SAP 模态; (d) ABAQUS 模态

Fig. 8 Comparison of FEM model and modal results between SAP and ABAQUS frames

(a) SAP model; (b) ABAQUS model; (c) SAP mode; (d) ABAQUS mode

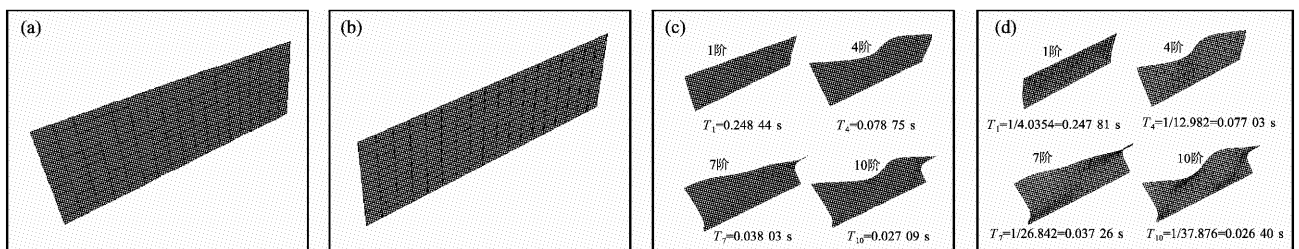


图 9 壳体转换前后模型与模态对比

(a) SAP 模型; (b) ABAQUS 模型; (c) SAP 模态; (d) ABAQUS 模态

Fig. 9 Comparison of FEM model and modal results between SAP and ABAQUS shells

(a) SAP model; (b) ABAQUS model; (c) SAP mode; (d) ABAQUS mode

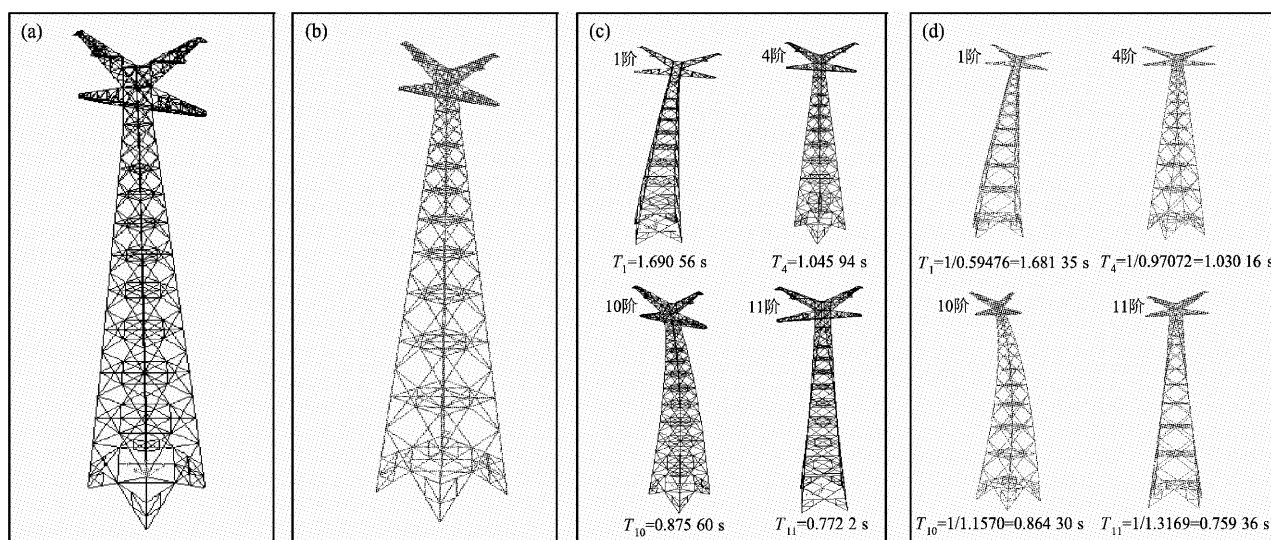


图 10 输电塔模型转换前后模型与模态对比

(a) SAP 模型; (b) ABAQUS 模型; (c) SAP 模态; (d) ABAQUS 模态

Fig. 10 Comparison of FEM model and modal results between SAP and ABAQUS transmission tower

(a) SAP model; (b) ABAQUS model; (c) SAP mode; (d) ABAQUS mode

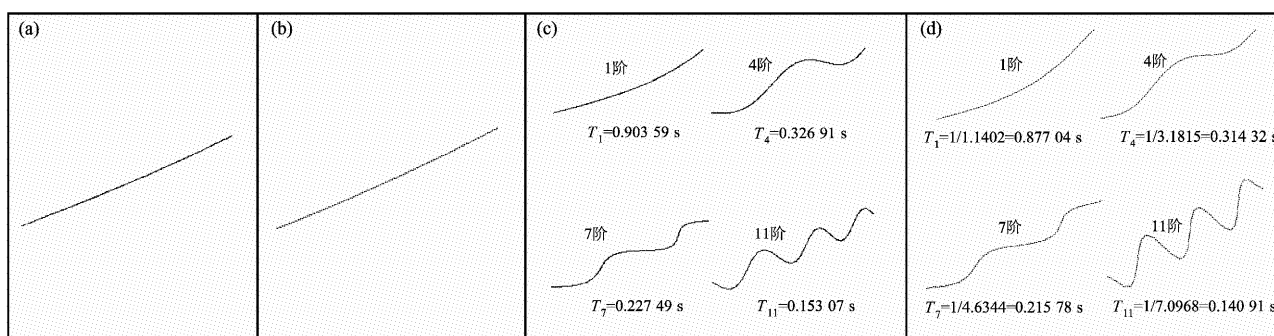


图 11 索模型转换前后模型与模态对比

(a) SAP 模型; (b) ABAQUS 模型; (c) SAP 模态; (d) ABAQUS 模态

Fig. 11 Comparison of FEM model and modal results between SAP and ABAQUS cable

(a) SAP model; (b) ABAQUS model; (c) SAP mode; (d) ABAQUS mode

6 结语

本文作为系列工作的第 II 部分工作，针对有效提高 ABAQUS 程序有限元模型前处理的工作效率和准确性，做了如下几项工作：

(1) 给出 SAP2000 与 ABAQUS 程序数据格式的技术细节与相关标记。

(2) 开发并实现了可视化程序接口——SAP2ABAQUS，功能包括：导航式界面；直接选择和定义纤维；自由选择生成隐式和显式数据格式；转化内容丰富（包括钢筋层的楼板与剪力墙、钢

筋混凝土、圆钢管混凝土、方钢管混凝土、I 字形以及十字形型钢混凝土）；钢管混凝土考虑了钢管得约束效应；自动转化分组并定义约束条件。

(3) 给出了 SAP2ABAQUS 导航式可视化界面的操作流程、使用步骤及与相关标记。

(4) 通过四种模型转化前后对比，验证了采用本文 SAP2ABAQUS 转化模型信息的可行性与准确性。

本文所开发的 SAP2ABAQUS 生成的 inp 数据文件可直接与第 I 部分中开发子程序配套使用，与第 I 部分子程序的工程中应用在第 III 部分给出（柳国环等，2014a, b），SAP2ABAQUS 的便利性与准确性将得到进一步检验。

参考文献:

- 北京金土木软件技术有限公司. 2006. SAP2000 中文版使用指南[K]. 北京:人民交通出版社.
- 陈肇元,朱金铨,吴佩刚. 1992. 高强混凝土及其应用[M]. 北京:清华大学出版社.
- 韩林海. 2007. 钢管混凝土结构:理论与实践(第二版)[M]. 北京:科学出版社.
- 柳国环,练继建,国巍. 2014a. 结构动力弹塑性和倒塌分析(I):滞回关系改进、ABAQUS 子程序开发与验证[J]. 地震研究,37(1):123-131.
- 柳国环,练继建,孙雪艳. 2014b. 结构动力弹塑性和倒塌分析(III):地震差动作用下输电塔一线体系的弹塑性及倒塌分析[J]. 地震研究,37(1):141-150.
- 毛小东. 2011. 基于 ABAQUS 的结构模型接口程序开发及其结构抗震分析应用[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学.
- 钟同圣,卫丰,王鸷,等. 2006. Python 语言和 ABAQUS 前处理二次开发[J]. 郑州大学学报(理学版),45(01):60-64.
- 庄茁. 2005. ABAQUS 非线性有限元分析与实例[M]. 北京:科学出版社.
- Legeron F, Paultre P. 2003. Uniaxial confinement model for normal and high-strength concrete columns[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 129(2):241-252.
- Wilson E L. 2004. Static and dynamic analysis of structures: a physical approach with emphasis on earthquake engineering[M]. Berkley, California: Computer and Structures, Inc.

Elasto-plasticity and Collapse Analysis for Large-span and High-rise Structure (II)

——Technology, Development and Verification of SAP2ABAQUS Interface

LIU Guo-huan^{1,2}, LIAN Ji-jian^{1,2}, GUO Wei³

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

(2. State Key Laboratory Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

(3. School of Civil Engineering and Architecture, Central South University, Changsha 410075, Hunan, China)

Abstract

An interface program named SAP2ABAQUS for converting commercial software SAP2000 into ABAQUS finite element model is developed and implemented. While, the inp file format respectively suitable to implicit UMAT and explicit VUMAT algorithms is briefly introduced and the corresponding notes are given as well. The interface program SAP2ABAQUS which is developed based on the development platform of Microsoft VS2008 and coded by using Visual C# programming language could propose and set interface for navigate mode. The user can freely choose to generate an implicit or explicit inp data file. Through using SAP2ABAQUS, not only the rigid frame member of different section, shell, group and restraint information etc. and the material fiber information but also the steel fibers and reinforcement ratio of shear wall which are difficult to handle and could apply to implicit and explicit algorithms can be transformed into inp file directly. The convertible steel member includes circular steel pipe, box shape steel pipe, joist shape steel and angle steel, and the concrete member includes reinforced concrete, concrete-filled circular steel tube concrete, "I" shaped concrete and cross shape steel reinforced concrete. At last, several typical finite element models are respectively transformed from SAP2000 to ABAQUS using the SAP2ABAQUS interface program, and then are compared. From the comparison of model information before and after the transformation and their corresponding modal analysis results, it shows the feasibility and accuracy of the developed program SAP2ABAQUS. The work can greatly increase the efficiency of ABAQUS preprocessing and the accuracy of the model transform.

Key words: finite element; SAP2000; ABAQUS; SAP2ABAQUS; UMAT; VUMAT