

流固耦合饱和两相介质动力模型在 ABAQUS 中的实现

李 亮, 崔智谋, 康翠兰, 王相宝

(北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124)

摘要: 采用以固相位移和孔压为基本未知量的 $\mathbf{u} - p$ 形式的方程组对于研究饱和土体的地震动力响应问题相对简单。利用通用有限元软件 ABAQUS 所提供的用户自定义单元 (UEL) 接口, 编制相应的接口程序, 开发了基于流固耦合两相介质动力模型的孔压单元。通过算例对所开发单元的正确性进行了验证, 结果表明, 所开发的孔压单元能够对饱和土体的动力响应进行较为准确的计算, 而 ABAQUS 中提供的 CEP4P 孔压单元动力反应计算结果与实际情况有较为明显的差异。

关键词: 饱和两相介质; 流固耦合动力模型; ABAQUS; 用户自定义单元 (UEL)

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2013)S2-0281-05

作者简介: 李 亮(1975-), 男, 山西太谷人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事土动力学理论与数值计算方法等方面的研究与教学工作。E-mail: liliang@bjut.edu.cn。

Fluid-solid coupling dynamic model for fluid-saturated porous media in ABAQUS

LI Liang, CUI Zhi-mou, KANG Cui-lan, WANG Xiang-bao

(The Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering (Beijing University of Technology), Ministry of Education, Beijing 100124, China)

Abstract: It is relatively simple for the calculation to the dynamic response of saturated soils to adopt $\mathbf{u} - p$ equations which regard solid-phase displacement and pore pressure as basic unknowns. The pore pressure element based on the fluid-solid coupling dynamic model is developed using ABAQUS which provides users a interface to define a new element (UEL). The results of a numerical example show that the dynamic response can be calculated accurately using the developed pore pressure element. The calculated results obtained with the CEP4P element provided by ABAQUS are obviously different from the real ones.

Key words: fluid-saturated porous medium; fluid-solid coupling dynamic model; ABAQUS; UEL

0 引言

饱和土在自然界中广泛存在, 其可抽象为饱和两相介质进行研究。饱和土体中波的传播特性及其动力反应的计算分析是土动力学中的重要研究课题之一, 具有较为重要的学术意义。同时, 该问题也具有较为重要的工程背景, 诸如近海与离岸结构的动力反应, 可液化场地上地铁车站等地下结构的地震反应以及中国南方软土地基上由高速交通荷载引起的动力变形等问题均可归结为上述问题进行研究。

进行两相介质动力问题研究的基础是建立描述该问题的正确的力学分析模型。目前, 针对上述问题的各种力学模型中以考虑固相与液相动力相互作用的流固耦合动力模型较为精确, 该模型对应的数学方程以固相位移 \mathbf{u} 和液相压力 p 为基本未知量的 $\mathbf{u} - p$ 形式的波动方程^[1]。该方程为具有矢量未知量与标量未

知量的混合形式的方程, 与全矢量形式的波动方程相比, 该方程未知量数目较少, 并且可以直接求解得到流体压力变量, 因此对于饱和两相介质的动力问题具有较好的适用性。该方程适合于描述地震荷载等低频荷载作用下的动力反应问题。另一方面, 由于两相介质动力问题的复杂性, 大多数问题须采用数值方法进行求解, 而这需要借助一定的计算程序或软件才能得以完成。目前, 以 ABAQUS 为代表的通用商业软件在工程与科学领域得到了广泛的应用。它们具有强大的前后处理功能, 为计算模型的建立与计算结果的分析提供了极大的便利。但作为一种覆盖领域广泛的通

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51178011); 北京市科技新星计划(A类)项目(2008A016); 2011年度北京市属高校人才强教深化计划中青年骨干人才项目(PHR20110808)

收稿日期: 2013-06-07

用计算分析软件, 其针对特定力学问题的适用性有待研究。部分学者基于 ABAQUS 软件平台开展了两相介质动力反应的计算分析。范庆来^[2]在 ABAQUS 的平台上通过二次开发实现了改进的剑桥动力本构模型。刘飞禹^[3]编制了用户子程序并导入 ABAQUS 中, 对软基加筋与不加筋道路在交通荷载作用下的动力响应进行了对比分析, 研究了动荷载作用下软基加筋道路的作用机理。

针对岩土工程问题的求解需求, ABAQUS 软件中提供有孔压单元(如 CEP4P), 可以求解流体压力, 但是这种单元的位移变量与流体压力变量之间并不能很好地符合流固耦合两相介质动力模型规定的耦合关系, 因此并不适宜用来进行基于流固耦合动力模型的两相介质动力问题的计算分析。为了实际问题的求解需要, 有必要研发变量之间的耦合关系符合流固耦合动力模型的孔压单元。

本文将基于 ABAQUS 软件平台提供的二次开发接口—用户单元子程序(UEL), 开发基于流固耦合两相介质动力模型的孔压单元, 并将应用该单元得到的计算结果与基于 ABAQUS 软件中的固有孔压单元的计算结果进行对比, 以评估两种单元对特定动力问题的适用性。

1 流固耦合两相介质动力模型及数值解法

Zienkiewicz 建立了以固相位移 \mathbf{u} 和孔隙水压力 p 为基本未知量的 $\mathbf{u}-p$ 形式的饱和两相介质动力方程。这种形式的方程在外荷载频率较低时适用, 经过有限元空间离散后, 此方程的具体表达形式如下:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}_d\mathbf{u} - \mathbf{Q}p = \mathbf{f}_u, \quad (1)$$

$$\mathbf{Q}^T\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{S}\dot{p} + \mathbf{H}p = \mathbf{f}_p, \quad (2)$$

式中, \mathbf{K}_d 为排水条件下的刚度矩阵, \mathbf{S} 为孔隙流体压缩矩阵, \mathbf{H} 为渗透矩阵, \mathbf{Q} 为耦合矩阵。式(1)、(2) 规定了饱和两相介质中固相与液相(孔隙流体)的动力反应应该满足的耦合关系, 是流固耦合两相介质动力模型具体的数学表达形式。

针对上述动力方程的时域逐步计算方法问题, Zienkiewicz 提出了一种高效稳定的方法, 即在式(1)两边同时加上与孔隙流体的压缩模量对应的项 $\mathbf{Q}\mathbf{S}^{-1}\mathbf{Q}^T\mathbf{u}$, 即采用如下的求解方程:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}_{n+1} + (\mathbf{K}_d + \mathbf{Q}\mathbf{S}^{-1}\mathbf{Q}^T)\mathbf{u}_{n+1} = \mathbf{f}_{n+1} + \mathbf{Q}\mathbf{S}^{-1}\mathbf{Q}^T\mathbf{u}_{n+1}^p + \mathbf{Q}p_{n+1}^p, \quad (3)$$

$$\mathbf{Q}^T\dot{\mathbf{u}}_{n+1} + \mathbf{S}\dot{p}_{n+1} + \mathbf{H}p_{n+1} = (\mathbf{f}_p)_{n+1}, \quad (4)$$

式中, p_{n+1}^p 和 \mathbf{u}_{n+1}^p 均是计算时使用的预估值。为简化求解, 采用如下的近似计算公式:

$$\mathbf{K}_u = \mathbf{K}_d + \mathbf{Q}\mathbf{S}^{-1}\mathbf{Q}^T \approx \int \mathbf{B}^T(\mathbf{D}_d + Q_b \mathbf{m} \mathbf{m}^T) \mathbf{B} d\Omega. \quad (5)$$

式中 \mathbf{K}_u 为不排水条件下的刚度矩阵; \mathbf{D}_d 为排水条件下的模量矩阵; \mathbf{B} 为应变-位移变换矩阵;

$\frac{1}{Q_b} = \frac{n}{K_f} + \frac{1-n}{K_s}$, $\mathbf{m}^T = [1, 1, 0]$ (二维问题)。其中, n 为孔隙率, K_f 为孔隙流体的体积模量, K_s 为土颗粒的体积模量。

Zienkiewicz 采用 Newmark 法对式(3)、(4) 进行时间离散, 最后得到无条件稳定的隐—隐式交替算法。该算法的具体计算公式限于篇幅此处省略, 请见于文献[4]。

2 流固耦合两相介质动力模型在 ABAQUS 中的实现

为满足用户开发自定义单元, 求解特定力学问题的需要, ABAQUS 软件平台中的用户单元子程序(UEL)为用户提供了自定义单元二次开发的程序接口, 用户可使用 Fortran 或者 VC 语言编程来实现所要解决的工程和科学问题中所需要的特定单元类型。ABAQUS 主程序调用 UEL 子程序, 在增量步开始时, 通过接口将数据由主程序传递进入 UEL, 将变量值赋予 UEL 的相应变量, 在增量步结束后, 变量将被更新, 并通过 UEL 的接口传入 ABAQUS 主程序。

ABAQUS 用户单元子程序主要包括以下 4 部分:
①ABAQUS 约定的子程序题名说明: SUBROUTINE UEL(RHS, AMATRX, ..., PERIOD)。
②ABAQUS 定义的参数声明。
③用户自定义的局部变量声明。
④根据用户自身需求所定义的程序代码段。

本文利用 ABAQUS 软件平台中提供的用户单元子程序(UEL)接口, 编写程序, 开发了基于流固耦合两相介质动力模型的孔压单元。该单元的位移与流体压力变量符合式(1)、(2) 所给出的耦合关系。所开发的孔压单元是针对二维动力问题, 单元的结点数为 4, 结点自由度为 3, 分别为水平自由度 u_1 和竖向自由度 u_2 以及孔压自由度 p ; 材料参数为 3, 分别为弹性模量 E , 泊松比为 ν , 孔隙比 n 。通过在 ABAQUS 输入文件(.inp)中添加相应的关键字实现主程序对该模块的调用计算, 从而拓展了它的适用性和应用空间。在 ABAQUS 输入文件(.inp)中相应的关键字为

```
*User Element, Nodes=4, Type=U1001,
Properties=3, Coordinates=2, VARIABLES=64
*Element, type=U1001, Elset=UEL
*Uel Property, Elset=UEL
```

此外, 由于 ABAQUS 用户单元子程序也必须包含动力反应求解的时间积分算法, 故本文还进行了相

应算法的程序实现, 将 Zienkiewicz 在文献[4]建立的隐-显式交替解法编写入所开发单元的程序中。

3 算例

算例的计算模型为受持续荷载作用的饱和土柱, 边界条件如图 1 所示, 底边为固定且不透水边界, 上表面为自由透水边界, 即孔压为零; 左右边界只有竖向位移且不发生横向渗流。材料参数取值如下: 土体弹性模量 $E=3.0 \times 10^4 \text{ MPa}$, 泊松比 $\nu=0.2$, 密度 $\rho=2.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 孔隙水的体积模量 $K_f=100 \text{ kPa}$, 土颗粒体积模量 $K_s=100 \text{ GPa}$, 孔隙率 $n=0.3$, 渗透系数 $k=0.001 \text{ m/s}$ 。土柱的横向尺寸取为 3 m, 竖向尺寸取为 30 m, 采用平面 4 节点单元对土柱进行离散, 单元尺寸为 3 m \times 3 m, 共划分得到 10 个单元, 计算模型的有限元网格划分如图 1 所示, 初始孔压取为 1.0 Pa。土柱承受的动力荷载的时程如图 2 所示。计算时间步长 Δt 取 0.025 s, 计算持时取为 30 s。

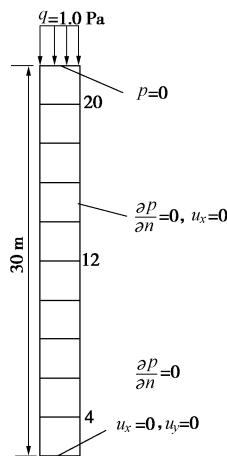


图 1 饱和土柱计算模型

Fig. 1 Computational model of saturated soil column

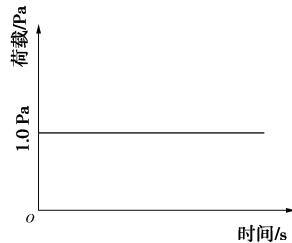


图 2 动力荷载时程

Fig. 2 Time history of dynamic load

文献[4]中给出了上述计算模型中饱和土柱动力反应的标准计算结果, 可作为考核各种计算分析模型与计算方法正确性的依据。将应用本文开发的基于流固耦合两相介质动力模型的孔压单元得到的饱和土柱动力反应的计算结果与文献[4]中的相应结果进行比

较, 以验证本文开发单元的正确性。应用本文单元与文献[4]中给出的饱和土柱孔压与竖向位移计算结果的对比分别如图 3, 4 所示。由图中结果可见二者符合良好, 从而验证了本文开发的基于流固耦合两相介质动力模型的孔压单元的正确性。

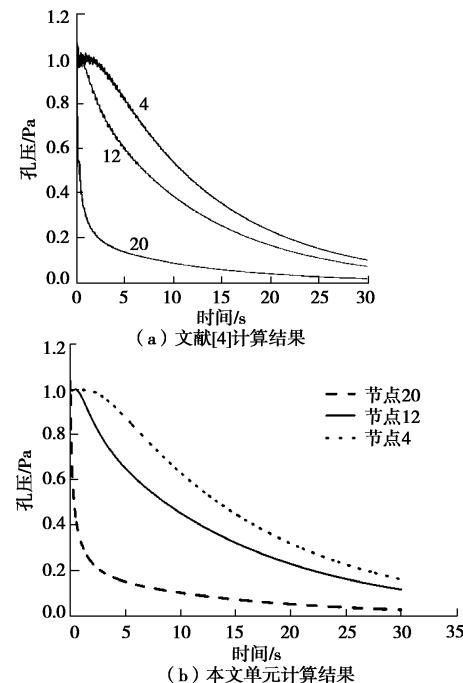


图 3 饱和土柱孔压计算结果比较

Fig. 3 Comparison of pore pressures of saturated soil column

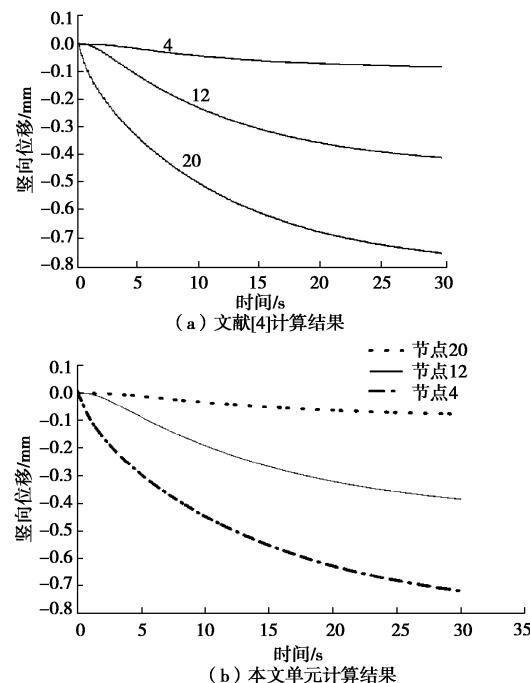


图 4 饱和土柱竖向位移计算结果比较

Fig. 4 Comparison of vertical displacements of saturated soil column

为了对本文开发的基于流固耦合两相介质动力模型的孔压单元与 ABAQUS 软件中提供的 CEP4P 孔压单元的计算效能进行对比, 分别应用两种单元计算饱和土柱的动力反应, 并将计算结果进行对比。饱和土柱计算模型中节点 4, 12 和 20 的孔压与竖向位移计算结果的对比如图 5~7 所示。由各图中计算结果的对比可知, 本文单元与 ABAQUS 中 CEP4P 单元的计算结果有较为显著的差异, 基于 CEP4P 单元的孔压与位移计算结果均明显小于基于本文单元的相应计算结果。本文单元是基于理论上较为精确和完善的流固耦合两相介质动力模型而建立开发的, 应该能对饱和土体的动力反应进行比较准确的模拟与计算。而 ABAQUS 软件中提供的 CEP4P 孔压单元在准确模拟饱和土体动力反应方面具有一定的局限性, 其计算结果与真实情况有一定差异。

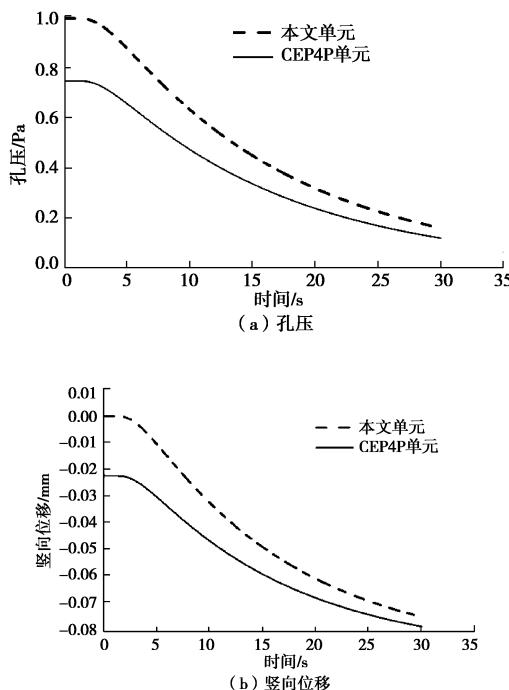


图 5 节点 4 计算结果对比

Fig. 5 Comparison of calculated results of node 4

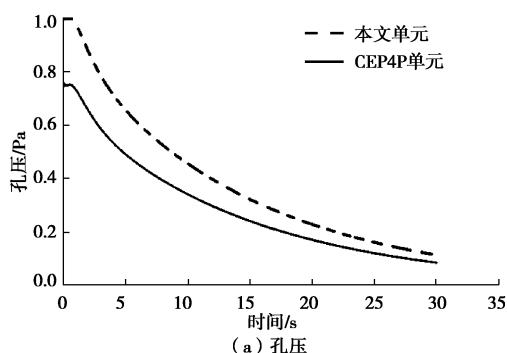


图 6 节点 12 计算结果对比

Fig. 6 Comparison of calculated results of node 12

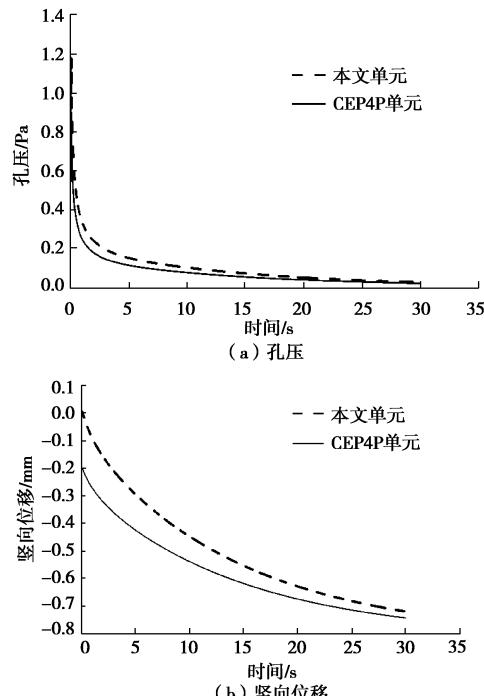


图 7 节点 20 计算结果对比

Fig. 7 Comparison of calculated results of node 20

4 结语

本文基于 ABAQUS 软件平台的用户二次开发接口—用户单元子程序 (UEL), 开发了基于流固耦合两相介质动力模型的孔压单元, 以应用于饱和两相介质动力问题的数值模拟研究, 从而完成了流固耦合两相介质动力模型在 ABAQUS 软件平台中的实现。通过将本文开发单元的计算结果与标准计算结果进行对比, 对本文开发单元的正确性进行了验证。将应用本文单元与 ABAQUS 中 CEP4P 孔压单元的计算结果进行了对比, 结果表明: 本文开发的基于流固耦合两相介质动力模型的孔压单元得到的计算结果与实际情况较为接近, 应用该单元能够对饱和两相介质的动力反应进行较为准确的模拟计算。而应用 ABAQUS 中提供的 CEP4P 孔压单元的动力反应计算结果与实际情

况有较为明显的差异, 其在饱和两相介质动力反应的精确模拟方面存在一定的局限性。

参考文献:

- [1] ZIENKIEWICZ O C, CHANG C T, BETTESS P. Drained, undrained, consolidating and dynamic behaviour assumptions in soils[J]. *Géotechnique*, 1980, **30**(4): 385 - 395.
- [2] 范庆来. 软土地基上深埋式大圆筒结构稳定性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006. (FAN Qing-lai. Study on stability of deeply embedded large-diameter cylindrical structure in soft ground[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006. (in Chinese))
- [3] 刘飞禹. 交通荷载作用下软土地基特性及加筋道路动力响应研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007. (LIU Fei-yu. Study on dynamic performance of soft clay and dynamic response of reinforced pavements under traffic loading[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007. (in Chinese))
- [4] ZIENKIEWICZ O C, PAUL D K, CHAN A H C. Unconditionally stable staggered solution procedure for soil-pore fluid interaction problems[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1988, **26**(5): 1039 - 1055.

(本文责编 胡海霞)