

基于流固耦合两相介质动力模型的饱和土体—地下结构体系地震反应研究^①

王相宝, 李 亮, 崔智谋, 吴丽华

(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: 基于 ABAQUS 有限元软件平台, 应用流固耦合两相介质动力模型孔压单元模拟场地饱和土体, 进行了饱和土体—地下结构地震反应的计算研究。结果表明: 在地震输入的最后时刻结构的两侧底角区域应力值最大; 土体的孔隙压力和竖向位移主要集中在结构下方的区域, 结构两侧土体的孔压与竖向位移呈对称分布; 场地土体的竖向位移随深度的增加逐渐减小; 体系最大地震反应出现的时刻对应于输入地震动的最大加速度出现的时刻。表明了流固耦合两相介质动力模型孔压单元在饱和土体—地下结构体系地震反应研究中的有效性。

关键词: 饱和土体—地下结构; 地震反应; 流固耦合两相介质动力模型; 孔压单元

中图分类号: TU435; TU93

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2014)02-0228-05

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2014.02.0228

Study on the Seismic Response of Saturated Soil: Underground Structure Based on Dynamic Model of Fluid-solid Coupling Media

WANG Xiang-bao, LI Liang, CUI Zhi-mou, WU Li-hua

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

Abstract: In China, various transportation facilities have been built on a large scale. Sea-crossing tunnel projects are constructed in many coastal cities, and many underground structures are built on the soft soil foundation in the south region. These are all underground structures on saturated soil, and China lies in the Pacific Ring of Fire, with many cities located in the high-intensity earthquake zone, so the seismic security of underground structures such as tunnels and subway stations is an important subject. The key is to make an accurate calculation of the dynamic response of the underground structure to the earthquake load. The dynamic response of an underground structure in a saturated soil site is very different from that in other types of soil sites. Therefore, the seismic response of underground structure in the saturated soil should be studied with the right calculation model and analyzing method.

At present, one widely used method is numerical simulation and calculation. Depending on the soil calculation model it employs, the analytic method can be classified into three types: the total stress method, simplified effective stress method, and fluid-solid coupling dynamic model method. The fluid-solid coupling model, which takes into account the coupling of fluid-solid dy-

^① 收稿日期: 2013-12-20

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51178011); 国家重点基础研究发展计划 973 计划项目(2011CB013602); 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)

作者简介: 王相宝(1988—), 男, 山东人, 硕士生, 主要从事地下结构抗震研究。E-mail: wang_xiangbao@163.com.

dynamic response, is a theoretically complete calculation model. Therefore, the method based on the fluid-solid coupling dynamic model is theoretically sound and more accurate. In general, the dynamic response of an underground structure in a saturated soil site needs further study. In this paper, the seismic response of an underground structure in saturated soil is studied based on the fluid-solid coupling dynamic model and ABAQUS in order to get a complete view of the characteristics and rules of the seismic response.

We conduct a simulated calculation of the seismic response of an underground structure in saturated soil, with the site soil simulated by the pore pressure element deduced from the fluid-solid coupling dynamic model of fluid-saturated porous media. The example chooses the seismic record of the N—S components of the Ninghe earthquake (magnitude 6.9 aftershock of the Tangshan earthquake) as the seismic input. From the calculation, we obtain the distribution chart of soil pore pressure, vertical displacement of soil-tunnel system, and von Mises stress on the structure. The calculation results illustrate that by the end of the seismic input, the stress distribution is symmetrical. The stress distribution concentrates in the base area of the two sides, and the water pressure mainly distributes in the base and side areas. The pore pressure and vertical displacement of the site soil are maximal in the base area and decrease gradually in the side area. With increase of depth, the vertical displacement of the site soil decreases gradually. The pore pressure and vertical displacement of the site soil distribute symmetrically. The greatest seismic response occurs when the acceleration of the input earthquake wave reaches the maximum. The calculation results also indicate that the pore pressure element deduced from the fluid-solid coupling dynamic model of the fluid-saturated porous model can be employed as an effective calculation model for the study of all types of underground structures in saturated soil sites.

Key words: saturated soil-underground structure; seismic response; dynamic model of fluid-solid coupling media; pore pressure element

0 引言

随着我国社会经济的快速发展,各种交通设施大量兴建,许多沿海和沿江城市兴建了多条跨海、越江和水底隧道工程。在我国南方地区,软土地基大量存在,许多地下结构(如地铁车站等)修建在软土地基上。上述结构都属于饱和土体场地上的地下结构。

我国处于环太平洋地震带上,许多城市位于高烈度地震区,地下结构的抗震安全性问题是一个需要深入研究的重要课题。解决该问题的基础是对地下结构在地震荷载作用下的动力反应进行较为准确的计算。饱和土体场地上地下结构的动力反应特性与一般土层中的地下结构具有显著的不同,因此饱和土体—地下结构体系的地震反应研究必须采用特定的计算模型和计算分析方法。

现阶段针对饱和土体—地下结构体系动力反应问题的研究方法中以数值模拟与计算的方法应用最为广泛。根据所采用的土体计算模型,数值模拟与计算方法又可以分为总应力法^[1-3]、简化的有效应力

法^[4-8]和基于流固耦合两相介质动力模型的分析方法(也可称为真正的有效应力法)^[9-11]三类。其中简化的有效应力方法是根据饱和土体中固相的变形,采用一定的孔隙水压力计算模式(通常需要专门假定)确定流体的动力响应,并不是严格意义上的流固耦合分析方法。流固耦合两相介质动力模型考虑了饱和土体中固相和流体动力反应的耦合关系,是一种理论上比较完善的计算模型,因此基于流固耦合两相介质动力模型的方法具有较为坚实的理论基础,是一种比较精确的计算分析方法。总的来说,目前基于流固耦合两相介质动力模型的饱和土层中地下结构动力问题的研究开展得尚不够深入。本文将基于 ABAQUS 有限元软件分析平台,开展基于流固耦合两相介质动力模型的饱和土体—地下结构体系地震反应研究,以获得对饱和土体场地上地下结构地震反应特性和规律的较为全面的认识。

1 流固耦合两相介质动力模型及其实现

1.1 流固耦合两相介质动力模型

流固耦合两相介质动力模型的数学表达形式为 $u-p$ 形式的两相介质动力方程^[12], 该方程以两相介质中固相的位移 u 和液相(孔隙流体)的压力 p 为基本未知量, 其经过有限元空间离散后的表达形式为

$$M\ddot{u} + K_d u - Qp = f_u \quad (1)$$

$$Q^T \ddot{u} + S\dot{p} + Hp = f_p \quad (2)$$

式中 K_d 为排水条件下的刚度矩阵; S 为孔隙流体压缩矩阵; H 为渗透矩阵; Q 为耦合矩阵。

方程(1)和(2)给出了饱和两相介质中固相和液相的动力反应应遵循的数量关系。由其表达式可知, 方程(1)和(2)中都同时含有固相位移 u 和流体压力 p , 因此上述方程组是以固相和液相(孔隙流体)的动力反应相互影响、相互耦合的形式呈现的, 表达的就是流固耦合的饱和两相介质动力模型。

1.2 流固耦合两相介质动力模型在 ABAQUS 中的实现

笔者基于 ABAQUS 有限元软件平台中提供的用户单元子程序(UEL)接口进行二次开发, 编写相应的接口程序, 开发了基于流固耦合两相介质动力模型的孔压单元, 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。

笔者开发的孔压单元适用于二维动力问题的计算与分析, 单元的结点数 4, 每个结点的自由度数目为 3, 分别为水平自由度 u_1 、竖向自由度 u_2 和孔压自由度 p ; 材料参数为 3, 分别为弹性模量 E 、泊松比 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单元的调用计算, 在 ABAQUS 输入文件(.inp)中添加的相应的关键字为, 例如:

```
* User Element, Nodes = 4, Type = U1001,
Properties=3, Coordinates=2
```

(自定义单元类型为 U1001, 有四个节点, 有三个材料参数, 坐标组容量为 2)

```
1,2,8
```

(节点具有 2 个方向位移自由度(自由度编号 1、2)和孔压自由度(自由度编号 8))

```
* Element, type=U1001, Elset=UEL
```

定义自定义单元集合

```
1001,1,2,4,3
```

```
1002,3,4,6,5
```

```
...
```

单元编号, 第一个节点号, 第二个节点号, 第三个节点号, 第四个节点号

```
* Uel Property, Elset=UEL
```

给出用户自定义单元的参数

```
3e8,0.3,0.3
```

(弹性模量, 泊松比, 孔隙比)

本文流固耦合两相介质动力模型孔压单元相应的程序开发以及算例验证工作的具体情况请见文献[13]。

2 饱和土体—地下结构体系地震反应研究

基于 ABAQUS 有限元软件平台, 对饱和土体—地下结构体系的地震反应进行模拟计算。算例为饱和土体场地上的某地下结构, 高 8 m, 宽 11 m, 顶板、底板厚 0.6 m, 其截面形状如图 1 所示。顶板埋深为 2.7 m。场地水平计算宽度取为 73 m, 计算深度取为 25 m。建立的有限元计算模型如图 2 所示。采用流固耦合两相介质动力模型孔压单元模拟场地饱和土体, 地下结构采用实体单元进行模拟, 其密度取为 2 500 kg/m³, 泊松比为 0.167, 弹性模量为 26.48 GPa。在土体与结构接触界面处定义接触面来考虑二者之间的相互作用。由于土体和结构的刚度相差很大, 故采用刚体—柔体接触类型, 定义结构面为主接触面(目标面), 土体面为从接触面(接触面)。选取地下结构底板中点处的单元 a 及场地土体中距结构底板深度 4 m 处的节点 b 作为代表性单元与节点来研究体系的地震反应。

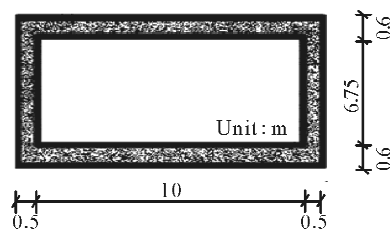


图 1 地下结构横截面尺寸

Fig. 1 Transverse dimensions of the underground structure

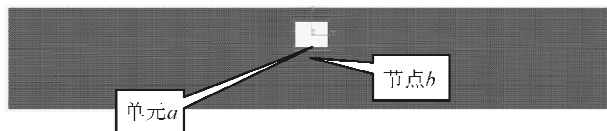


图 2 饱和土体—地下结构动力相互作用有限元计算模型

Fig. 2 Dynamic interaction finite element calculation model of the saturated soil-underground structure

本算例选取天津宁河地震南北方向分量的地震记录作为地震输入, 其加速度时程如图 3 所示。计算得到的地震输入最后时刻场地土体的孔隙水压力

与竖向位移分布如图4所示,场地土体中节点 b 的竖向位移时程如图5所示;该时刻地下结构的应力分布如图6所示,结构上单元 a 的应力时程如图7所示。

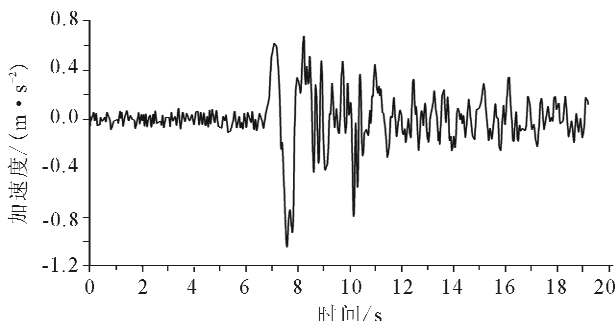


图3 输入地震加速度时程

Fig. 3 The acceleration time history of the input earthquake

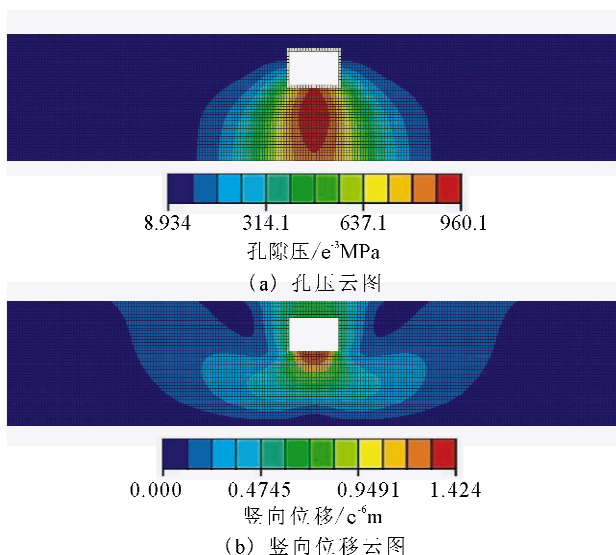


图4 地震输入最后时刻的孔压云图和竖向位移云图

Fig. 4 The distribution chart of pore-pressure of soil and vertical displacement of the soil-tunnel system by the end of the input earthquake wave

由图4给出的计算结果可知,在地震输入的最后时刻,场地饱和土体中的孔隙水压力主要分布在结构下方区域及该区域两侧,结构下方区域孔隙水压力值最大,该区域两侧孔压值逐渐减小;结构下方区域的土体竖向位移值最大,该区域两侧土体竖向位移随着深度增加逐渐减小。结构两侧土体的孔压与竖向位移呈对称分布。

由图6可知,地震输入的最后时刻地下结构的应力呈对称分布,在两侧底角区域产生较大的应力集中。由图5和图7可知,在体系地震反应过程中,

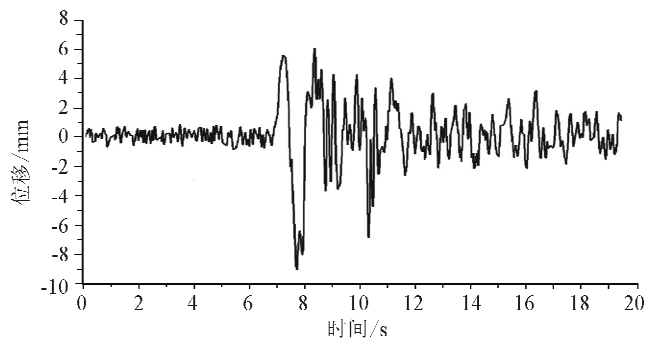


图5 节点 b 竖向位移时程

Fig. 5 Time history of vertical displacement at node b

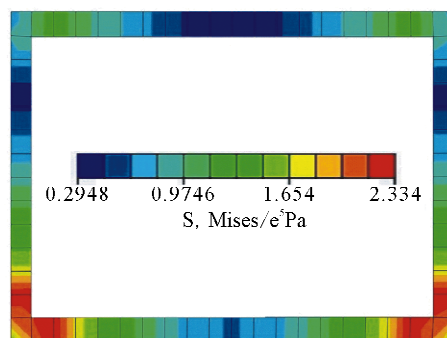


图6 地震输入最后时刻地下结构 Mises 应力云图

Fig. 6 Distribution chart of Mises stress of the structure by the end of the input earthquake wave

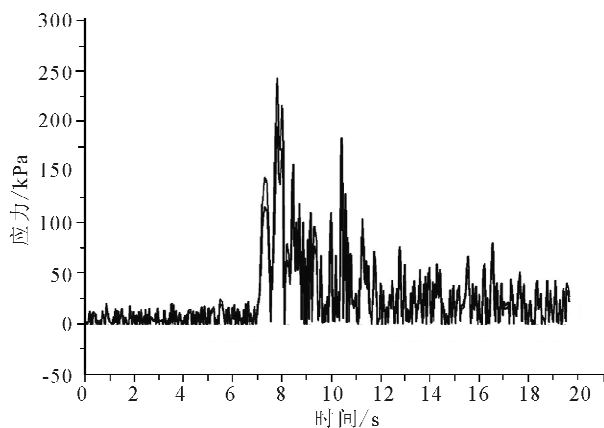


图7 单元 a 应力时程

Fig. 7 Time history of the stress at element a

节点 b 的最大竖向位移约为9 mm,单元 a 的 Mises 应力的最大值约为240 kPa,它们出现的时刻均对应于输入地震动的最大加速度出现的时刻。

3 结论

本文基于 ABAQUS 有限元软件平台,应用自行研发的流固耦合两相介质动力模型孔压单元模拟场地饱和土体,进行了饱和土体场地上地下结构地震反应的计算研究。通过对计算结果的分析得到以

下主要结论:

(1) 在地震输入的最后时刻,结构的两侧底角区域应力值最大;土体的孔隙压力和竖向位移主要集中在结构下方的区域,结构两侧的孔压与土体的竖向位移呈对称分布;场地土体的竖向位移随深度的增加逐渐减小。

(2) 体系最大地震反应出现的时刻对应于输入地震动的最大加速度出现的时刻。

本文的计算工作同时表明,笔者通过二次开发建立的流固耦合两相介质动力模型孔压单元能够对饱和土体—地下结构体系的地震反应进行较为准确的模拟和计算,可作为一种有效的计算模型应用于饱和土体场地上各种地下结构的地震反应的计算与研究之中。

参考文献(References)

- [1] 刘品波,李彬,谷音.地铁盾构隧道地震反应分析[J].清华大学学报:自然科学版,2005,45(6):757-760.
LIU Jing-bo, Li Bin, Gu Yin. Seismic Response Analysis of Shielded Subway Tunnels[J]. Journal of Tsinghua University: Science & Technology edition, 2005, 45(6): 757-760. (in Chinese)
- [2] 庄海洋,陈国兴.软弱地基浅埋地铁区间隧洞的地震反应分析[J].岩石力学与工程学报,2005,24(14):2506-2512.
ZHANG Hai-yang, CHEN Guo-xing. Earthquake Response of Shallow Subway Tunnels in Soft foundation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(14): 2506-2512. (in Chinese)
- [3] 庄海洋,陈国兴.双洞单轨地铁区间隧道非线性地震反应分析[J].地震工程与工程振动,2006,26(2):131-137.
ZHANG Hai-yang, Chen Guo-xing. Analysis of Nonlinear Earthquake Response of Metro Double-tunnels[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 26(2): 131-137. (in Chinese)
- [4] 汪明武,李丽.液化场地浅埋钢筋混凝土结构物变形及动土压力分析[J].岩石力学与工程学报,2008,27(增刊2):3374-3380.
WANG Ming-wu, LI Li. Analysis of Deformations of Shallow-buried Reinforced Concrete Structures and Dynamic Earth Pressures in Liquefiable Soils[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(Supp. 2): 3374-3380. (in Chinese)
- [5] 余芳涛.饱和黄土隧道动力响应及稳定性变化机理研究[D].西安:西安理工大学,2008.
SHE Fang-tao. Analysis of Dynamic Response and Stability Characteristic Mechanism of Subway Tunneling in Saturated Loess[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2008. (in Chinese)
- [6] 张长泰,张玉芳.饱和砂土中的地铁圆形衬砌隧道地震响应分析[J].铁道工程学报,2008,(1):76-80.
ZHANG Chang-tai, Zhang Yu-fang. Analysis of Seismic Response to the Metro Tunnel in Saturated Sand-soil Area[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2008(1): 76-80. (in Chinese)
- [7] 李季,王国波,孙明,等.某人防地震响应分析与抗震性能评价[J].西北地震学报,2011,33(3):271-274.
LI Ji, WANG Guo-bo, SUN Ming, et al. Seismic Response Analysis on a Civil Air Defense Engineering and Evaluation on Its Earthquake Resistant Capability[J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 33(3): 271-274. (in Chinese)
- [8] 单华廷,李立云,杜修力.地下结构地震反应分析中材料非线性的影响[J].西北地震学报,2011,33(增刊):360-365.
SHAN Hua-ting, LI Liyun, Du Xiu-li. Effect of the Material Nonlinear Property on Seismic Response Analysis of Underground Structure[J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 33(Supp.): 360-365. (in Chinese)
- [9] 刘华北,宋二祥.可液化土中地铁结构的地震响应[J].岩土力学,2005,26(3):381-386.
LIU Hua-bei, SONG Er-xiang. Earthquake Induced Liquefaction Response of Subway Structure in Liquefiable Soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(3): 381-386. (in Chinese)
- [10] Huabei Liu, Erxiang Song. Seismic Response of Large Underground Structures in Liquefiable Soils Subjected to Horizontal and Vertical-earthquake Excitations [J]. Computers and Geotechnics, 2005, 32(4): 223-244.
- [11] 刘光磊,宋二祥,刘华北.可液化地层中地铁隧道地震响应数值模拟及其试验验证[J].岩土工程学报,2007,29(12):1815-1822.
LIU Guang-lei, SONG Er-xiang, LIU Hua-bei. Numerical Modeling of Subway Tunnels in Liquefiable Soil Under Earthquakes and Verification by Centrifuge Tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(12): 1815-1822. (in Chinese)
- [12] Zienkiewicz O C, Chang C T, Bettess P. Drained, Undrained, Consolidating and Dynamic Behaviour Assumptions in Sils[J]. Geotechnique, 1980, 30(4): 385-395.
- [13] 李亮,崔智谋,康翠兰,等.流固耦合饱和两相介质动力模型在ABAQUS中的实现[J].岩土工程学报,2013,35(增刊2):281-285.
LI Liang, CUI Zhi-mou, KANG Cui-lan, et al. The Fluid-solid Coupling Dynamic Model for Fluid-saturated Porous Media in Abaqus[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(Supp. 2): 281-285. (in Chinese)