

地震波作用下承压含水层地下水渗流运动规律的研究

梁文宇, 兰双双, 谷洪彪, 乔 鹏, 毛政潭

A study of the law of groundwater seepage movement in a confined aquifer under seismic waves

LIANG Wenyu, LAN Shuangshuang, GU Hongbiao, QIAO Peng, and MAO Zhengtan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202212020>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于流固耦合的强震大型滑坡水力激发效应研究

A study of the pro-water pressure for initiation of a large landslide triggered by a strong earthquake based on fluid-structure coupling
时幸幸, 崔圣华, 裴向军, 朱凌, 杨晴雯 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 102-114

渗流作用下黄土含水率变化特征及对隧道工程的影响

Characteristics of moisture content variation of loess under seepage and its influence on tunnel engineering
张晓宇, 毕焕军, 曹峰, 夏万云 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 41-47

桩埋管参数对渗流下能量桩热-力耦合特性的影响

Effects of the pile buried pipe parameters on the thermal-mechanical coupling characteristics of energy pile under the groundwater seepage
杨卫波, 张来军, 汪峰 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 176-185

“引哈济党”工程对敦煌盆地地下水位影响的数值模拟研究

Numerical simulation studies of the influences of water transferring project from the Haerteng River to the Dang River on groundwater levels in the Dunhuang Basin
何剑波, 李玉山, 胡立堂, 尹政, 胡彦斌 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 34-43

深圳“12.20”渣土场远程流化滑坡动力过程分析

Dynamics process simulation of long run-out catastrophic landfill flowslide on December 20 th, 2015 in Shenzhen, China
高杨, 卫童瑶, 李滨, 贺凯, 刘铮, 王学良 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 129-129

赣江新干航电枢纽左库岸地下水浸没控制效果研究

Research on the control effects of groundwater immersion on the left reservoir bank of Xingan Navigation and Power Junction in Ganjiang River
张宇, 任国澄, 杨蕴, 周志芳, 郭生根, 熊鸿强 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 147-155



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202212020

梁文宇, 兰双双, 谷洪彪, 等. 地震波作用下承压含水层地下水渗流运动规律的研究 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(4): 73-83.
LIANG Wenyu, LAN Shuangshuang, GU Hongbiao, *et al.* A study of the law of groundwater seepage movement in a confined aquifer under seismic waves[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(4): 73-83.

地震波作用下承压含水层地下水渗流运动规律的研究

梁文宇¹, 兰双双¹, 谷洪彪², 乔 鹏¹, 毛政潭¹

(1. 北京工业大学城市建设学部, 北京 100124;

2. 南京工业大学交通工程学院, 江苏 南京 211816)

摘要: 经典的地下水渗流理论是基于水均衡原理建立的, 无法解释天然地震活动等外部荷载引起的井水位变化现象, 也不利于深入认识地下水渗流运动在各种环境地质灾害中的作用。针对这一问题, 基于流固耦合的动力学理论构建了地震波应力驱动承压含水层孔隙压力变化的数学模型, 借助软件 Comsol 实现了对模型的有限元数值求解及影响因素分析, 利用 Cooper 理论反演出井水位的变化特征, 并将结果与强震引起川滇地区井水位的变化特征进行对比。结果表明: 当地震波荷载作用于承压含水层时, 孔隙压力会表现出与地震波同周期的振荡变化特征, 且地震波振幅、频率以及水力坡度对孔隙压力的变化特征影响显著。地震波荷载施加初期, 孔隙压力迅速增大, 随后含水层中的部分水被缓慢排出, 荷载压力逐渐转移到颗粒骨架上, 孔隙压力的变化速率随之变缓并趋于新的平衡。井水位变化特征与孔隙压力密切相关, 其振荡周期与变化形态与孔隙压力一致, 但幅度不同, 总体上表现出振荡上升且趋于稳定的变化特征, 与川滇地区观测到的井水位变化形态基本相同。该成果对于应力作用下地下水渗流运动理论的建立和完善具有宝贵的探索意义, 可以丰富和拓展传统地下水动力学和经典流固耦合理论的研究思路和应用领域。

关键词: 渗流; 孔隙压力; 井水位; 流固耦合; 动力学理论; 数值模拟

中图分类号: P641.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)04-0073-11

A study of the law of groundwater seepage movement in a confined aquifer under seismic waves

LIANG Wenyu¹, LAN Shuangshuang¹, GU Hongbiao², QIAO Peng¹, MAO Zhengtan¹

(1. Faculty of Architecture, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. College of Transportation Engineering, Nanjing Techbology University, Nanjing, Jiangsu 211816, China)

Abstract: The classical groundwater seepage theory was established on the basis of the principle of water equilibrium, which cannot explain the phenomenon of well water level change caused by natural seismic activities and other external loads, and is not conducive to the in-depth understanding of the role of groundwater seepage movement in various environmental geological disasters. To solve this problem, a mathematical model of pore pressure change of a confined aquifer driven by seismic wave stress is constructed based on the fluid-structure coupling dynamic theory. The numerical verification of the model is realized by using the software

收稿日期: 2022-12-11; 修订日期: 2023-01-15

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 北京市自然科学基金面上项目(8222003); 国家自然科学基金青年项目(41807180)

第一作者: 梁文宇(1998-), 男, 硕士研究生, 主要从事水动力学数值模拟研究。E-mail: liangwy@emails.bjut.edu.cn

通讯作者: 兰双双(1982-), 女, 博士, 副教授, 主要从事水动力学数值模拟研究。E-mail: lanshuang@bjut.edu.cn

Comsol. The change characteristics of well water level are inversely performed by using the Cooper theory, and the results are compared with the change characteristics of well water level caused by strong earthquakes in the Sichian-Yunnan region. The influencing factors of seepage movement of a confined aquifer under earthquake are studied by changing the simulation parameters. The results show that when seismic wave loads act on the confined aquifers, pore pressure oscillates in the same period as the seismic waves, and the amplitude, frequency and hydraulic slope of the seismic waves have significant effects on the pore pressure, while the coefficient of permeability and porosity have little effect on the change characteristics. At the initial stage of seismic wave loading, pore pressure increases rapidly, and then part of the water in the aquifer is slowly discharged. The load pressure gradually transfers to the granular framework, and the rate of change of pore pressure slows down and tends to reach a new equilibrium. The variation characteristics of well water level are closely related to pore pressure, and the oscillation period and variation pattern are consistent with pore pressure, but the amplitude is different. Generally, the oscillation rises and tends to be stable, which is basically the same with the variation pattern of well water level observed in the Sichuan-Yunnan region. The results are of valuable exploration significance for the establishment and improvement of groundwater seepage theory under stress, and can enrich and expand the research ideas and application fields of traditional groundwater dynamics and classical fluid-structure coupling theory.

Keywords: seepage; pore pressure; well water level; fluid-structure coupling; theory of dynamics; numerical simulation

经典的地下水渗流理论假定含水层所受总应力不发生改变,其是建立在水均衡原理基础上的单纯水动力学过程,对地下水资源开发利用^[1-2]、水污染预测与治理^[3-4]等方面都具有重要的意义。随着交叉学科的发展,该理论无法解释地震活动、地铁荷载、地表荷载(建筑物、地表水体等)等外部荷载引起的水位变化现象。在这些问题中,含水层与外界一般不存在水量交换,多孔介质需视为可变形体,其具体过程为:应力荷载导致多孔介质发生变形,造成含水层内部孔隙压力发生变化;孔隙压力变化将驱动地下水在含水层与井孔之间发生瞬时水量交换,导致井水位发生变化,同时孔压的调整过程反过来也会引起有效应力的改变,影响多孔介质变形。可见,天然地震活动作用下的地下水渗流运动是水动力学和岩土力学相互作用的复杂过程,是流固耦合作用的结果。

1923年太沙基有效应力原理的建立奠定了流固耦合的理论基础,随后学者们不断对其理论进行完善和深化,并建立了描述小变形的饱和多孔介质水力学理论^[5-8]。在解析解的发展过程中 Zienkiewics 等^[9]建立了结合中心差和单边差的显-隐式交替格式算法; Simon 等^[10]针对饱和土的一维问题,提出了线性内插的方法处理 2 节点单元; Huang 等^[11]基于孔压修正法

提出了一种无条件稳定的隐-隐式算法,为解决动荷载作用下的流固耦合问题提供了坚实的理论参考。随着计算机仿真技术的提升,数值算法也得到不断发展,赵成刚等^[12]利用解耦技术,建立了流体饱和两相多孔介质动力反应分析显式有限元法;刘宝等^[13]借助 Comsol 有限元软件,模拟分析了饱和多孔介质的不同动力耦合形式;杨贝贝等^[14]借助 Comsol 有限元软件建立了饱和动力问题的有限元分析模型。值得注意的是,前人研究主要的关注点是岩土体的变形,而细致地刻画含水层内部地下水渗流运动规律的研究较少。Darcy 于 1856 年通过长期试验得出了水在饱和多孔介质中的渗透定律,奠定了地下水运动理论的基础。随后 Dupuit 在 Darcy 定律的基础上研究了一维稳定流动和向水井的二维稳定运动,Theis 提出了地下水向承压水井的非稳定流公式^[15]。同时,水文地质学者 Cooper 等^[16]、Roeloffs 等^[17]、Doan 等^[18]、Hsieh 等^[19]和 Wang^[20]和 Wang 等^[21]将应力或应变变量引入经典的地下水运动控制方程,推导出简谐波孔压、气压和引潮力等外荷载作用下井水位变化的解析解,并用于解释天然地震活动引起井水位的变化现象,但这些模型未考虑含水层水头变化对介质变形的反作用,没有达到细致地刻画地下水渗流场与应力场完全耦合过程

的目的。

鉴于上述, 本文拟以川滇地区封闭性良好的承压含水层系统为概化的模拟对象, 基于流固耦合动力学理论和数值模拟的方法, 重点研究地震波荷载作用下含水层内部孔隙压力变化控制方程的建立及求解, 探讨地震波引起地下水在含水层内部及其在观测井与含水层之间的渗流运动规律及影响因素, 揭示地震波对承压层孔隙压力及井水位变化的影响, 旨在解释地震动态荷载引起井水位变化的多样性和复杂性, 为进一步深化井孔-含水层系统对地震活动响应机制提供参考, 同时拓展传统地下水动力学和经典流固耦合理论的研究思路和应用领域, 深化认识渗流在流、固、热、化等多场耦合作用中的地位 and 意义, 对预防和减少地面沉降、水电工程大坝失稳、矿井事故及边坡失稳等灾害的发生提供参考依据。

$$\begin{cases} \mu \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} \right) + (\lambda + \mu) \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial x \partial z} \right) - \frac{\partial p}{\partial x} = \rho_m \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} \\ \mu \left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right) + (\lambda + \mu) \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial z} = \rho_m \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} \\ \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial u_z}{\partial z} \right) - \frac{k_f}{\mu_f} \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \right) - \rho_f \frac{k_f}{\mu_f} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} \right) \right] = -\frac{n}{E_f} \frac{\partial p}{\partial t} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \lambda = \frac{Ev}{(1+\nu)(1-2\nu)} \\ \mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \\ \rho_m = (1-n)\rho_s + n\rho_f \end{cases} \quad (2)$$

式中: u ——介质骨架位移/m;

p ——孔隙压力/Pa;

ρ_m ——多孔介质密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$);

ρ_s ——固相密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$);

ρ_f ——液相密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$);

μ ——固相骨架材料的剪切弹性模量/MPa;

λ ——Lame 常数;

E_f ——流体压缩模量/MPa;

μ_f ——黏滞系数/($\text{Pa} \cdot \text{s}$);

k_f ——渗透率/ m^2 ;

E ——杨氏模量/MPa;

ν ——泊松比。

1.2 数值求解方法

由于饱和多孔介质动力响应问题的复杂性, 很难用解析方法对描述该问题的二阶偏微分方程组进行求解, 故本次利用模拟软件 Comsol Multiphysics 进行有限元数值求解, 并通过经典的二维饱和多孔介质动

1 流固耦合动力学方程的建立与求解

1.1 理论方程的建立

地震波荷载驱动承压含水层渗流运动是动荷载作用下流固耦合共同作用的结果, 其理论基础是多孔介质动力学理论。假设岩土颗粒是不可压缩的, 孔隙水是可压缩的、有黏性的; 岩土骨架是均质各向同性的弹性多孔介质, 变形符合广义胡克定律; 渗流符合 Darcy 定律; 应力连续条件符合太沙基有效应力原理; 温度的影响忽略不计。规定应力方向以拉为正、压为负, 含水层体积应变以膨胀为正、压缩为负, 孔隙压力增加为正、减少为负。当不考虑重力场的影响时, 基于质量守恒定律、达西定律、有效应力原理、胡克定律、动量守恒定律, 推导出二维条件下以介质骨架位移 u 和孔隙压力 p 为变量的控制方程^[22]:

力响应的解析解验证数值求解方法的合理性和可行性。但由于该软件自带物理模块无法解决流固耦合动力学方程的求解, 需利用软件提供的偏微分方程 (PDE) 模块进行二次开发实现数值求解。Comsol 软件的 PDE 模块提供了 3 种形式定义偏微分方程: 系数形式、一般形式以及弱形式。由于弱形式 PDE 应用范围最广, 解决能力最强, 尤其在求解空间和时间混合偏导时, 结果最为精确, 故本次采用 PDE 弱形式进行求解。软件中弱形式采用虚位移原理对偏微分方程的表达式进行描述, 其内置的通用求解形式如下:

$$\int_{\Omega} weak ds = 0 \quad (3)$$

式中: $weak$ ——求解区域中的弱表达式;

Ω ——求解区域;

s ——积分变量。

针对动荷载作用下流固耦合方程 u - p 形式的特征, 首先推导出响应动力耦合控制方程的有限元弱形式, 从而获取 u - p 方程组的数值解。对式 (1)~(3) 乘以虚位移 δ_u 和虚孔隙压力 δ_p , 再利用 Green-Gauss 公式对方程进行分部积分, 得到 u - p 方程组的弱形式如下:

$$\begin{cases}
-\int_{\Omega} \left[\mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z} \right) + (\lambda + \mu) \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \right] \left(\frac{\partial \delta u_x}{\partial x} + \frac{\partial \delta u_z}{\partial z} \right) ds + \int_{\Gamma} \left[\mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z} \right) + (\lambda + \mu) \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \right] \delta u_x dl + \\
\int_{\Omega} p \left(\frac{\partial \delta u_x}{\partial x} + \frac{\partial \delta u_z}{\partial z} \right) ds - \int_{\Gamma} p \delta u_x dl - \int_{\Omega} \rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} ds = 0 \\
-\int_{\Omega} \left[\mu \left(\frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) + (\lambda + \mu) \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \right] \left(\frac{\partial \delta u_x}{\partial x} + \frac{\partial \delta u_z}{\partial z} \right) ds + \\
\int_{\Gamma} \left[\mu \left(\frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) + (\lambda + \mu) \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \right] \delta u_z dl + \int_{\Omega} p \left(\frac{\partial \delta u_x}{\partial x} + \frac{\partial \delta u_z}{\partial z} \right) ds - \int_{\Gamma} p \delta u_z dl - \int_{\Omega} \rho \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} ds = 0 \\
\int_{\Omega} \left[\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \right] \delta p ds + \int_{\Omega} \frac{k_f}{\mu_f} \left(\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial z} \right) \left(\frac{\partial \delta p}{\partial x} + \frac{\partial \delta p}{\partial z} \right) ds - \\
\int_{\Gamma} \frac{k_f}{\mu_f} \left(\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial z} \right) \delta p dl - \int_{\Omega} \rho_f \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} \right) \right] \delta p ds + \int_{\Omega} \frac{n}{E_f} \frac{\partial p}{\partial t} \delta p ds = 0
\end{cases} \quad (4)$$

1.3 数值解的验证

Xu 等^[23]在 Huang 等^[24]和 Zienkiewics 等^[25]的基础上提出了双显式算法,并给出了简单二维不可压缩饱和和多孔介质动力响应的解析解。本文利用此解析解与数值解进行对比,从而达到验证数值方法的目的。算例模型如图 1 所示,具体描述如下:建立一个 30 m ×

30 m 的二维含水层模型如图 1(a)所示,含水层均质且各向同性,上部为自由透水边界且施加荷载 $q(t) = 1.0 + 0.5 \sin(2t)$ kPa 的循环荷载,底部为固定不透水边界 ($u_x = u_z = 0$),两侧只能发生纵向位移 ($u_x = 0$)且为不透水边界。孔隙位移和压力初始值均为 0 ($u_x = u_z = 0, p = 0$),模型参数见表 1。

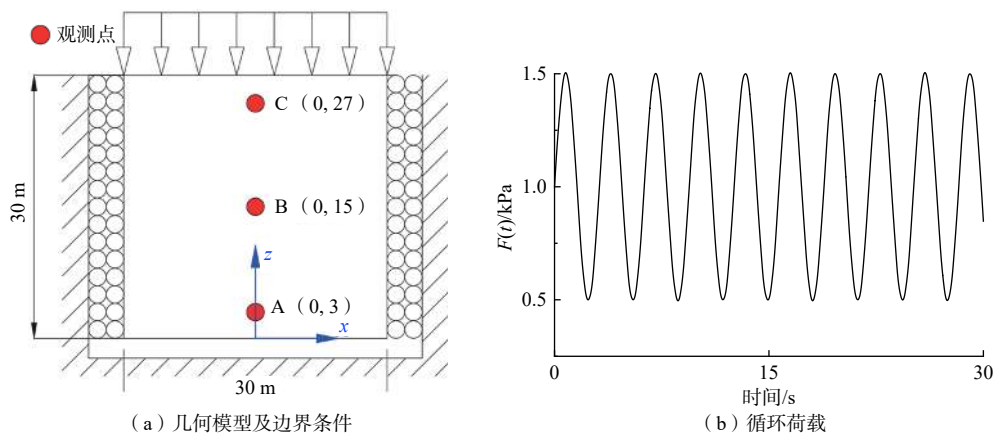


图 1 循环荷载作用下二维算例的物理模型

Fig. 1 Physical model of a 2D example under cyclic load

表 1 二维算例的含水层参数

Table 1 Aquifer model parameters for a 2D example

参数	数值
剪切模量/MPa	65
渗透系数/(m·s ⁻¹)	0.001
液体密度/(kg·m ⁻³)	1 000
泊松比	0.3
孔隙度	0.3
Biot系数	1
固体密度/(kg·m ⁻³)	2 650
重力加速度/(m·s ⁻²)	9.8

本次模拟采用自由三角网格进行剖分,计算时间为 30 s,计算步长为 0.1 s。分别取 A(0, 3)、B(0, 15)、

C(0, 27)3 点为计算点,将其孔隙压力及垂向位移的模拟值与文献 [23] 的解析解进行对比(图 2)。结果表明: A、B、C3 点的孔隙压力变化与颗粒的垂向位移皆呈现出初期迅速增大,随后缓慢下降且趋于新平衡的变化特征;且 u 和 p 的数值解与文献 [23] 的解析解在数值和趋势上基本一致,表明利用数值方法求解方程 u - p 方程组具有可行性。

2 地震波引起井水位变化的实例分析

中国的川滇地区地处地中海—喜马拉雅地震带,地震活动频率高,且地震地下流体观测网密度大,对地震响应敏感的观测井数量较多,故选取该区华蓥山

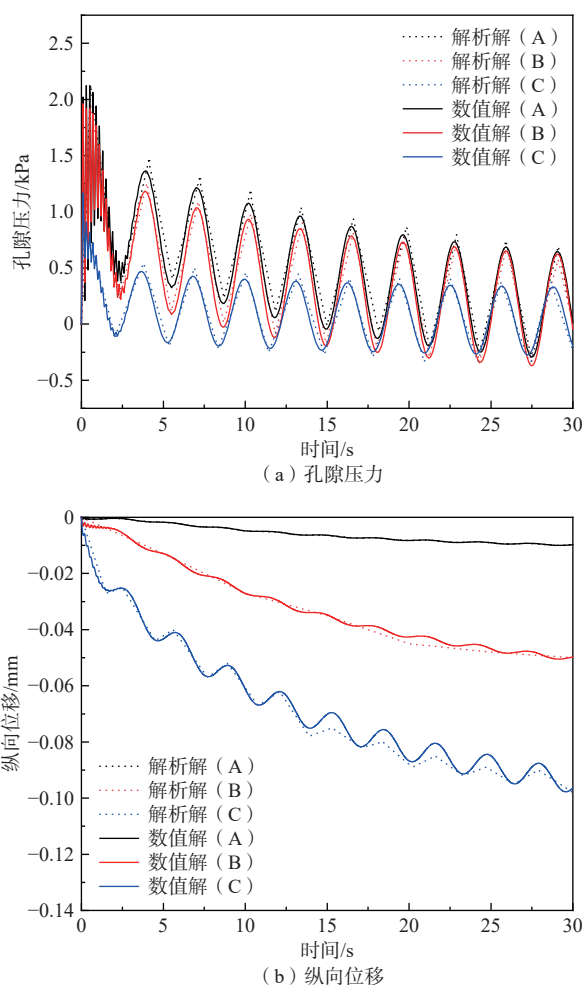


图2 A、B、C 孔隙压力和纵向位移随时间变化模拟结果与解析解的对比

Fig. 2 Comparison between simulation results and analytical expression of pressure and longitudinal displacement changes with time of point A, B and C

断裂带附近北碚井(BB)、荣昌井(RC)、南溪井(NX)和巴南井(BN)为研究对象(图3),以2010年 $M_s8.0$ 级智利地震、2011年 $M_s9.0$ 级日本地震、2012年 $M_s7.4$ 级日本地震和2012年 $M_s8.6$ 级苏门答腊地震为震例,分析井水位对地震活动的响应特征。根据《重庆市地震监测志》^[26]可知,观测井的主要观测层位岩性为侏罗系中统沙溪庙组长石砂岩,厚度几十米不等,为承压井。井水位观测数据来自于中国地震前兆监测台网,由LN-3A型水位仪观测,采样频率为1次/min。

强震引起井水位的变化特征见图4。2010年智利地震导致井水位变化以振荡为主,幅度较小,见图4(a)。2011年日本地震发生时井水位变化以振荡为主,北碚、南溪、巴南井水位同时伴随有明显的阶升,阶升幅度较大,为5~12 cm,见图4(b)。2012年日本地震导致北碚、荣昌和南溪井水位出现振荡现象,变化幅

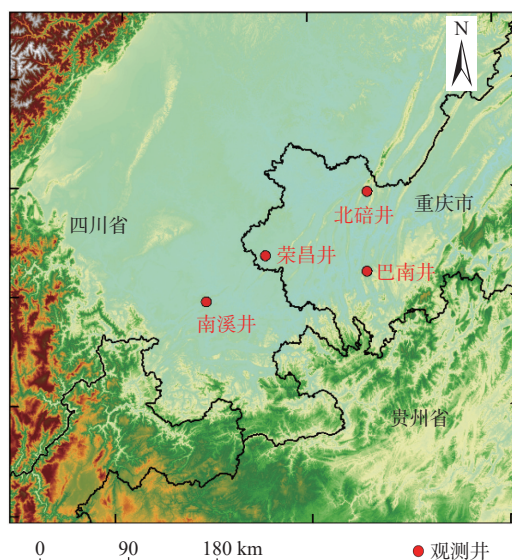


图3 观测井的地理位置

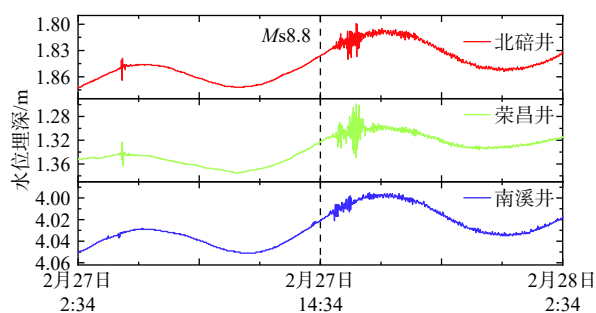
Fig. 3 Geographic map of the water level observation well

度较小,最大也不超过2.7 cm,且几分钟内水位皆恢复到震前正常状态,见图4(c)。2012年苏门答腊地震引起的井水位变化以振荡为主,北碚、南溪井伴随有3.2、4.2 cm的阶升,巴南井伴随有6.2 cm的阶降,阶变幅度较小,见图4(d)。可见4次远场强震引起井水位变化均以振荡为主,2011年日本地震和2012年苏门答腊地震发生时北碚井、南溪井和巴南井水位发生振荡的同时还伴随有阶变响应,其变化幅度为3.2~12.5 cm。

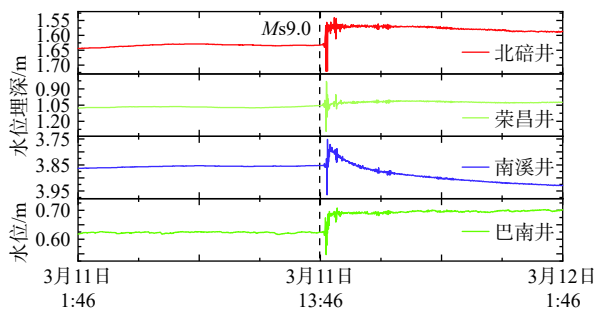
3 地震波驱动承压水渗流的数值模拟

3.1 计算模型的建立

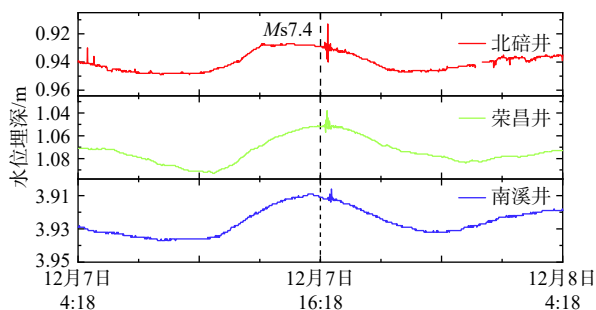
为了减少野外场地条件的复杂性及影响因素的多样性给计算结果带来的影响,本次假设含水层水平分布、均质、各向同性,固体颗粒变形为弹性小变形。研究区含水层主要岩性为长石砂岩,厚度几十米不等,且考虑实际地震流体观测井大部分处于承压含水层,故本次模拟对象为渗流条件下的承压含水层,含水层剖面可概化为50 m×100 m的矩形区域(图5),地下水流为二维稳定流运动。模型顶部和底部均为不透水边界($\frac{\partial p}{\partial n} = 0$),左右两侧为定水头边界($h=0.3$ m),根据《重庆市地震监测志》^[26]可知该区水力梯度范围为1/1 000~5/1 000,故将水力坡度概化为3/1 000。为了更直观地反映孔隙压力的变化情况,本次模拟不考虑重力场的影响。在地震发生的过程中会产生横波、纵波和面波(主要为Rayleigh波)。Cooper等^[16]



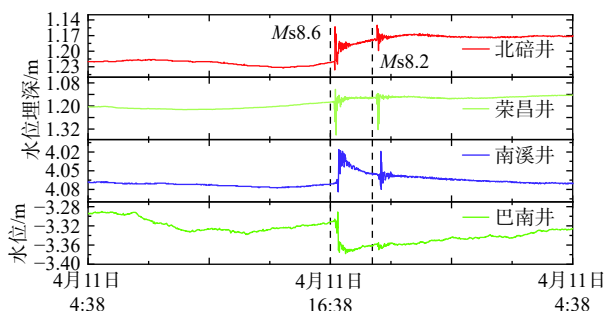
(a) 2010年智利



(b) 2011年日本



(c) 2012年日本



(d) 2012年苏门答腊

图 4 地震活动引起井水位的变化曲线

Fig. 4 Changes in well water level caused by seismic activities

认为远场地震作用下瑞利波是造成含水层发生体积变形的主要因素, Rayleigh 波是在地表传播的面波, 故在顶部施加量化的动态荷载^[26] $f(t) = 1000 + 500\sin(2\pi \times 0.1t)$ Pa, 左右两侧边界受限只发生纵向位移 ($u_x = 0$), 初始位移为 0 ($u_x = u_z = 0$), 初始孔隙压力为 0 Pa, 分别选取点 A(0, 10), B(0, 25), C(0, 40) 作为计算点。含水层水文地质参数及固体介质力学参数见表 1。

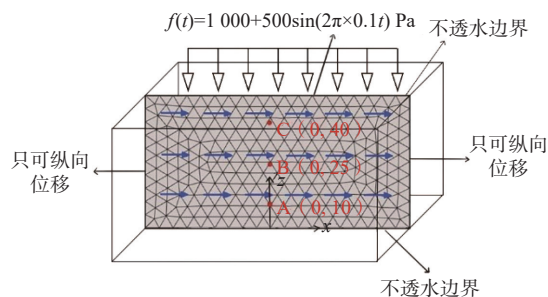


图 5 含水层物理模型的概化及空间网格剖分

Fig. 5 Generalization and spatial grid subdivision of the physical model of an aquifer

3.2 计算结果与讨论

采用 $u-p$ 方程组描述地震波荷载驱动承压含水层渗流问题, 基于方程的弱形式(4), 借助软件 Comsol 的 PDE 模块, 计算时间为 200 s, 步长设置为 0.1 s, 采用自由三角网络剖分方式进行有限元数值求解。由于本次模拟不考虑重力场的影响, 故计算求得的孔隙压力变化值均为地震波荷载引起的。图 6 计算结果表明: A、B、C 点处孔隙压力均表现为振荡上升, 振动周期为 10 s, 与地震波周期一致, 孔隙压力最大值为 1.85 kPa, 随后缓慢下降并最终趋于稳定; 3 点中 C 点孔隙压力振幅最大, 为 0.76 kPa, 其次是 B 点, A 点值最小, 为 0.18 kPa。A、B、C 点所处含水层中的位置不同, 3 点孔隙压力随时间的变化形态也有所不同, C 点距离荷载边界最近, 受到地震波荷载影响最明显, 在模拟初期其孔隙压力增量最大, 同理, A 点处孔隙压力变幅最小。

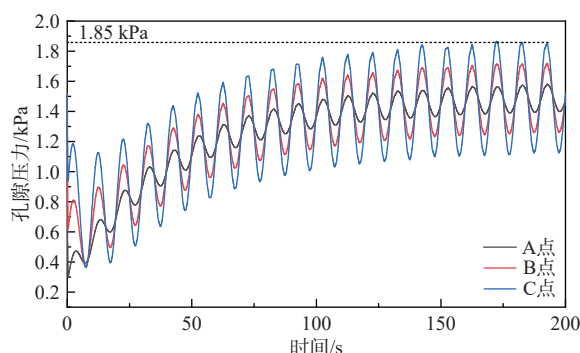


图 6 地震波作用下承压含水层中孔隙压力的变化

Fig. 6 Changes in pore pressure in pressurized aquifers under seismic wave

地震波荷载施加初期, 由于孔隙水不能及时排出, 荷载压力造成孔隙压力迅速增大, 产生超静水孔隙压力。随后在水头差作用下地下水由孔隙中缓慢排出, 荷载压力逐渐转移到颗粒骨架上, 颗粒骨架受力压缩, 孔隙体积随之变小, 含水层仅发生体积变形,

其结构没有或只有轻微的破坏,此时孔隙压力变化速率随之变缓并趋于稳定。由孔隙压力的变化可知,整个模拟期外加荷载的强度并未超过含水层临界动力强度,含水层的变形一直以弹性小变形为主。

Duncan-Chang 模型^[27]是基于 Kondner 三轴应力-应变关系曲线建立的非线性本构模型,可以用来解释单调加载和循环加载三轴试验所得到的数据 $(\sigma_1-\sigma_3)-\varepsilon$ 的变化规律。如图 7 所示,当循环加载时,加载后卸载到原应力状态,介质变形一般不会恢复到原来的应变状态。可见每次应力循环都有可恢复的弹性应变和不可恢复的塑性应变。故当模拟含水层受到周期性地震波作用时,A、B、C3 点孔隙压力呈现规律性的周期波动变化特征,且含水层在发生弹性体积应变的同时也产生了不可恢复的变形,使含水层在地震波荷载作用下达到新的平衡。

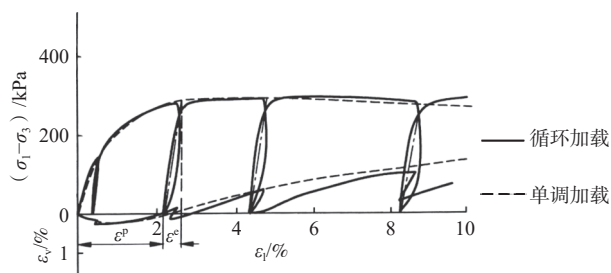


图 7 单调加载与循环加载三轴试验应变-应力变化对比曲线^[27]

Fig. 7 Comparison of strain-stress changes in triaxial tests under monotonic and cyclic loading^[27]

注: ε_e 为弹性应变, ε_p 为塑性应变, $(\sigma_1-\sigma_3)$ 为主应力增量, ε_x 为轴应变, ε_v 为体应变。

4 孔隙压力的影响因素分析

地震波引起井水位变化形态复杂多样,会受到震源特征、含水层水文地质条件、井孔所处构造条件及井自身结构等多种因素的影响。由于影响因素多,地下水对地震波作用下渗流运动的响应机制十分复杂。故本次通过改变含水层特征参数和水力条件(如渗透系数、孔隙度、水力坡度)、地震波特征(如振幅与频率)讨论不同因素对 $u-p$ 耦合结果的影响,分析不同因素对地震波引起承压含水层内部孔隙压力变化的影响。

4.1 地震波振幅对孔隙压力的影响

地震波振幅是影响井水位变化的重要因素,地震波振幅通常为 $10^2 \sim 10^6$ Pa^[26],故将地震波振幅的工况分别设计为 $P=250, 500, 1\,000$ Pa,地震波的最大峰值分别为 750, 1 500, 3 000 Pa。以点 B(0, 25)为例,计算

并对比 3 种工况下孔隙压力的变化特征。图 8 显示,孔隙压力皆呈现振荡增大并趋于稳定的变化趋势;当地震波振幅增大时,孔隙压力的振荡频率及最终稳定值几乎相同,但振荡振幅发生了明显的变化。当 $P=250$ Pa 时,孔隙压力的振幅为 0.24 kPa,最大孔隙压力值为 1.60 kPa;当地震波振幅增大到 $P=1\,000$ Pa 时,孔隙压力振幅相应地增加到 0.92 kPa,最大孔隙压力值为 1.96 kPa,可见孔隙压力振幅和孔隙压力的变幅都会随着地震波荷载振幅的增大而增大。地震波振幅增大含水层受力变形程度也相应增大,土骨架被挤压发生体积变形,导致孔隙压力振幅和最大变幅随之增大。

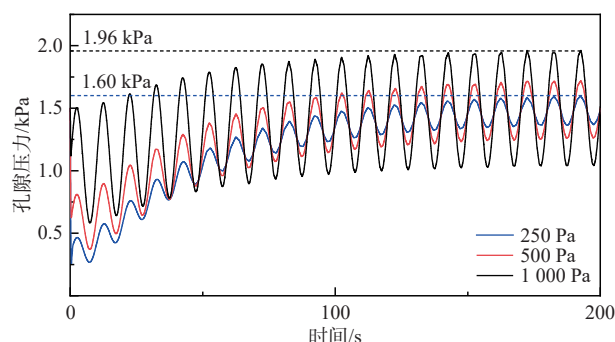


图 8 不同地震波振幅作用下孔隙压力的变化曲线

Fig. 8 Changes in pore pressure under different seismic wave amplitudes

4.2 地震波频率对孔隙压力的影响

Cooper 等^[16]认为远场地震波的频率一般介于 $1/100 \sim 1/10$ Hz 之间,故本次地震波荷载频率的设计工况分别为 $f=1/10, 1/30, 1/50, 1/60$ Hz,计算并对比 4 种工况下 A(0, 10)、B(0, 25)和 C(0, 40)3 点处孔隙压力变化特征。图 9 显示,孔隙压力皆呈现振荡增大并趋于稳定的变化趋势;当地震波频率从 $1/60$ Hz 增

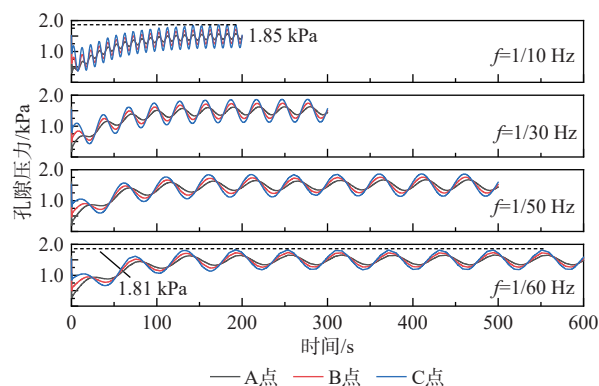


图 9 不同地震波频率作用下孔隙压力的变化曲线

Fig. 9 Changes in pore pressure under different seismic wave frequencies

大到 1/10 Hz 时, 孔隙压力的振动频率发生了明显的变化, 始终与模拟地震波荷载一致; 随着地震波频率的增大观测点 C 点的孔隙压力的最大值由 1.81 kPa 增加到 1.85 kPa, 在孔隙压力值变化不明显, 且孔隙压力达到平衡状态所需的时间也基本一致。随着振动频率的增大, 含水层受力及岩土颗粒发生垂直位移的频率和幅度增大, 导致岩土颗粒被压密的程度增大, 孔隙压力不断累积无法消散, 导致孔隙压力发生一定程度的增大。

4.3 渗透系数对孔隙压力的影响

u - p 形式偏微分方程适用于渗透系数较小的情况^[8, 10], 孔隙水和固相骨架之间的相对位移比较小, 产生的惯性耦合效应比较弱, 可以认为渗透系数(K)小于 10^{-3} m/s 时, 惯性耦合效应可以忽略。遵循 u - p 方程的适用条件, 并考虑研究区含水层岩性以砂岩为主, 分别研究 $K=1.0 \times 10^{-3}$, 5.0×10^{-4} , 1.0×10^{-4} , 5.0×10^{-5} m/s 4 种工况^[28]下 A(0, 10)、B(0, 25)、C(0, 40)3 点处孔隙压力随时间的变化情况, 如图 10 所示。结果显示, 孔隙压力皆呈现振荡增大并趋于稳定的变化趋势; 距离顶部荷载的 C 点孔隙压力最大, A 点的孔隙压力最小。在渗透系数由 5×10^{-5} m/s 增加到 1.0×10^{-3} m/s 时, 当孔隙压力振荡达到稳定状态时, 2 种工况下孔隙压力的最大值改变不大, 分别为 1.88, 1.86 kPa, 所需时间分别约为 1 200, 132 s (由于 $K=1.0 \times 10^{-4}$, 5.0×10^{-5} m/s 2 个模拟结果到达平衡所需的时间过长, 考虑到图片的清晰程度, 这 2 个工况只展示到 600 s)。可见渗透系数的变化对孔隙压力的平衡变幅影响不大。但渗透系数大时, 孔隙压力在较短时间内骤增, 且达到平衡所需时间短。根据达西定律可知, 水头差为定值时, 渗流速度会随着渗透系数的增大而变大, 在相同条件

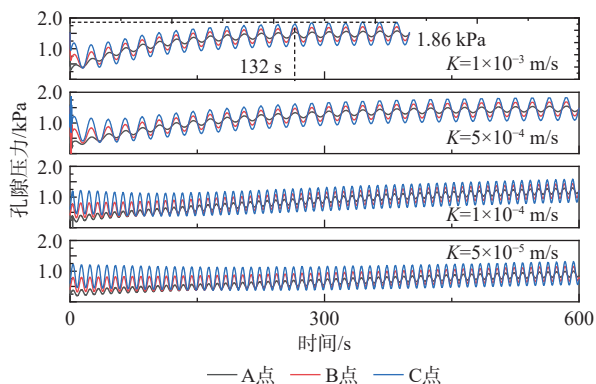


图 10 不同渗透系数条件下孔隙压力的变化曲线

Fig. 10 Changes in pore pressure under different hydraulic conductivities

下地下水在含水层中运动所受阻阻力减小, 故孔隙压力骤升且达到平衡状态所需要的时间变短。

4.4 孔隙度对孔隙压力的影响

鉴于研究区含水层主要岩性为砂岩, 本次分别探究孔隙度 $n=0.1, 0.2, 0.3, 0.4$ 工况^[28]下 B 点孔隙压力随时间的变化情况。图 11 计算结果显示, 孔隙压力呈现振荡增大并趋于稳定的变化趋势, 当孔隙度由 0.1 增大到 0.4 时, 观测点 B 点的最大孔隙压力值由 1.72 kPa 下降为 1.70 kPa; 振幅由 0.464 kPa 下降为 0.446 kPa。表明孔隙度变化对孔隙压力的变化幅度存在一定影响, 但是影响很小。不同孔隙度下孔隙压力振荡的振幅以及频率基本一致, 孔隙压力的响应时间也基本一致, 当 n 从 0.1 增大到 0.4 时, 孔隙压力到达平衡所需的时间均为 142 s。可见, 孔隙度对于孔隙压力的变幅、振荡频率以及到达平衡所需的时间影响很小。

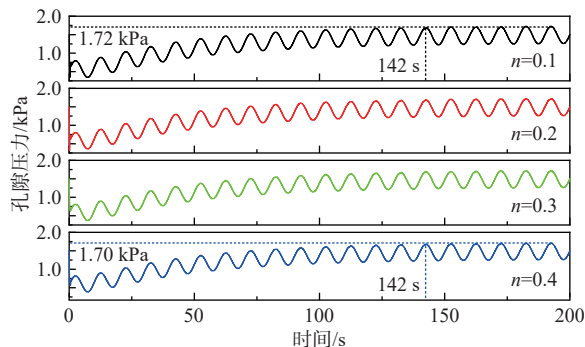


图 11 不同孔隙度条件下孔隙压力的变化曲线

Fig. 11 Changes in pore pressure under different porosity conditions

4.5 水力坡度对孔隙压力的影响

渗流条件中需要考虑一个重要的影响因素就是水力坡度(J)。根据《重庆市地震监测志》^[26]及文献^[29]可知该区水力梯度范围为 1/1 000 ~ 5/1 000, 故本次水力坡度工况设计为 $J=1/1\ 000, 2/1\ 000, 3/1\ 000$, 分别计算并分析 3 种工况下 A、B、C3 点的孔隙压力的变化特征。图 12 显示, 当水力坡度为 3/1 000 时, 3 点孔隙压力皆呈现振荡增大并趋于稳定的变化特征, 最终稳定在 1.85 kPa 附近。随着水力坡度的减小, 孔隙压力变化幅度也随之变小, 当水力坡度为 1/1 000 时, 孔隙压力最终稳定在 0.88 kPa 附近。这是由于当水力坡度增大, 承压含水层中地下水的渗流速度和流量也会随之增大, 最后导致孔隙压力的增大。值得注意的是, 水力坡度的不同, A、B、C3 点孔隙压力随时间的变化形态也有所不同, 尤其当水力坡度为 2/1 000, 1/1 000

时尤为明显。随着水力坡度减小为 $J=1/1\ 000$ 时, 离荷载边界最近的 C 点处孔隙压力的初始变幅最大, 随后孔隙水压力整体表现为下降的变化趋势, 直至达到新的平衡。该结果也表明, 当含水层水力梯度很小时, 孔隙压力的变化形态可能与观测点的埋深有关, 不同深度的观测点可能表现为振荡上升或振荡下降或仅为振荡, 这或许是井水位变化形态多样性的原因。

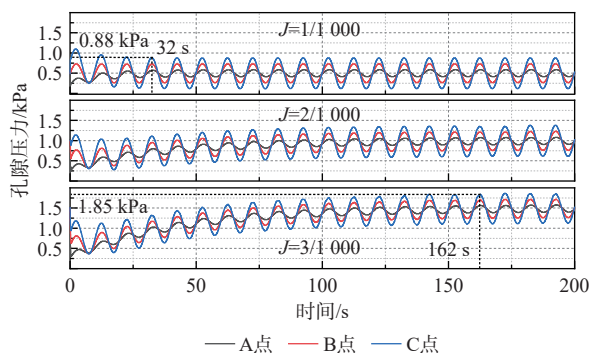


图 12 不同水力坡度条件下孔隙压力的变化曲线

Fig. 12 Changes in pore pressure under different hydraulic gradient conditions

5 孔隙压力扰动下井水位变化的讨论

地震波对地下水渗流运动的影响主要分为 2 大过程: 首先当承压含水层受到地震波作用时, 其内部孔隙压力会产生图 6 及图 8—12 中振荡并上升的变化特征; 随后在水头差作用下, 地下水在含水层和井水位之间发生流动, 从而将地震波对含水层渗流运动的影响通过井水位表现出来。可见承压井水位可以看作一个压力计, 其可以反映含水层内部孔隙压力的变化, 由此 Cooper 等^[16]建立了井水位对谐波振荡的孔隙压力响应模型, 提出井水位对含水层内部孔隙压力响应的放大系数 A 与井内水柱有效高度 (He)、井半径 (r_w)、含水层水力参数 (导水系数 T 和储水系数 S) 密切相关, 具体关系为:

$$A = \left[\left(1 - \frac{\pi r_w^2}{Tt} Kei\omega\alpha_w - \frac{4\pi^2 He}{t^2 g} \right)^2 + \left(\frac{\pi m_w^2}{Tt} Ker\omega\alpha_w \right)^2 \right]^{-1/2} \quad (5)$$

$$A = \rho g x_0 / p_0 \quad (6)$$

式中: A ——放大系数;

t ——地震波周期/s;

Kei ——开尔文函数虚部;

Ker ——开尔文函数实部;

ω ——地震波角频率/ s^{-1} ;

g ——重力加速度/ $(m \cdot s^{-2})$;

x_0 ——水位波动幅度/m;

p_0 ——孔压波动幅度/Pa。

由此可知, 当放大系数 A 和孔隙压力已知时, 可以通过式 (6) 计算井水位对孔隙压力的响应特征, 从而可进一步验证本次地震波作用下承压含水层地下水渗流运动数值模拟的准确性。

根据该区观测井钻孔资料可知, 含水层岩性主要为 20~80 m 厚度的侏罗系中统沙溪庙组浅灰白色长石砂岩, 故建立如图 13 所示的观测井-承压含水层系统的物理模型, 从而反映井水位对谐波振荡孔隙压力的响应。承压含水层均质、各向同性, 隔水顶、底板水平分布, 以观测井底部为原点, 垂向上为 z 方向, 径向为 r 方向建立柱坐标系。当含水层在半径为 r 的边界上受到周期性孔隙压力扰动作用时, 地下水会在含水层与观测井之间发生渗流, 导致井水位发生变化。根据观测井钻孔资料, 取含水层 $d=50$ m, $r_w=75$ mm, $T=0.05$ m²/s, $S=8.0 \times 10^{-4}$, $He=80$ m, 利用式 (5) 可得该井水位对孔隙压力的放大系数 $A=0.449$ 。根据地震波作用下孔隙压力的数值解 (图 6), 可得到井水位随时间变化的计算结果, 如图 14 所示。井水位的变化形态与孔隙压力相似, 主要表现出振荡上升且最终趋于稳定的变化特征, 其振动周期与孔隙压力一致, 振幅约 2.0 cm, 井水位最大上升幅度为 6.1 cm。在地震波引起井水位变化的实例分析中, 2011 年日本地震和 2012 年苏门答腊地震中井水位的响应幅度较为明显, 2011 年日本地震时北碚井、南溪井和巴南井水位产生振荡阶升变化, 变幅为 5~12 cm; 2012 年苏门答腊地震中北碚井、南溪井的井水位产生 3.2, 4.2 cm 的振荡

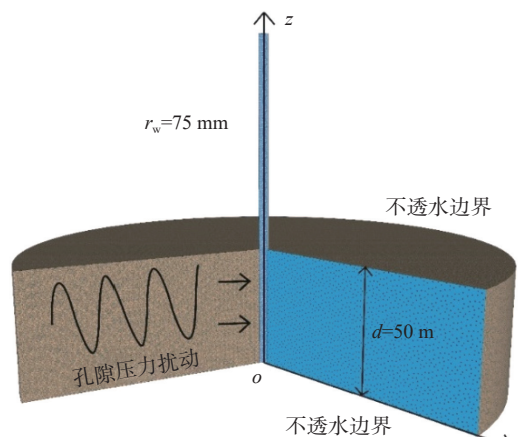


图 13 观测井-承压含水层系统物理模型

Fig. 13 Physical model of the observation well - confined aquifer system

阶升变化,与上述计算结果的阶变振荡变化特征基本吻合。值得注意的是,井水位的观测采样频率为 1 次/min,而数值计算时间步长为 0.1 s,且由于野外水文地质条件的复杂性及地震波荷载量化的差异性,井水位的具体计算值与实测值会存在着一定的误差。

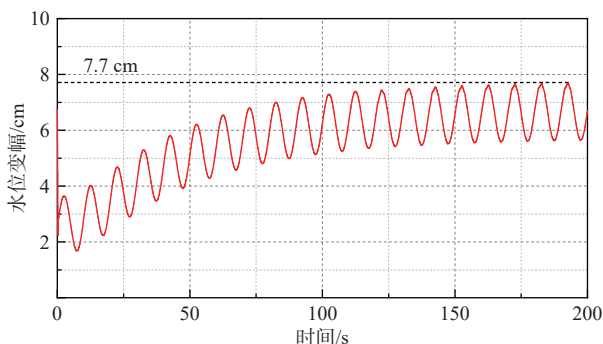


图 14 计算井水位随时间变化曲线

Fig. 14 Variation of well water level with time

6 结论

(1)利用软件 Comsol 的 PDE 弱形式求解二维条件下循环荷载驱动含水层孔隙压力的变化,其数值解与解析解在数值和趋势上基本一致,表明利用该方法在解决地震波引起含水层内部孔隙压力的变化具有可行性。

(2)当地震波作用于承压含水层时,孔隙压力和井水位皆会表现出与地震波同周期的振荡并上升的变化特征,与强震引起川滇地区井水位的变化形态基本吻合,表明该方法可以较好地反映地震波对含水层内部孔隙压力及井水位变化的影响,对于揭示地震波引起地下水在含水层内部及其在观测井与含水层之间的渗流运动规律具有宝贵的探索意义。

(3)地震波的振幅、频率以及水力坡度是影响孔隙压力变化的主要因素,其中水力坡度会导致不同深度孔隙压力表现为振荡上升或振荡下降或仅为振荡的变化形态,这或许是井水位变化形态多样性的一种原因。

由于野外水文地质条件的复杂性及地震波荷载量化的差异性,导致井水位模拟值与实际观测值存在一定的误差,今后的研究会进一步细化物理模型及各种因素的影响,提高精度,深化和丰富地下水渗流理论的研究成果。

参考文献 (References):

[1] 王金生,王澎,刘文臣,等.划分地下水源地保护区的

数值模拟方法[J]. 水文地质工程地质, 2004, 31(4): 83 - 86. [WANG Jinsheng, WANG Peng, LIU Wenchen, et al. Numerical simulation method for delineating protection zones of groundwater wellfields[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2004, 31(4): 83 - 86. (in Chinese with English abstract)]

[2] 贺国平,周东,杨忠山,等.北京市平原区地下水资源开采现状及评价[J]. 水文地质工程地质, 2005, 32(2): 45 - 48. [HE Guoping, ZHOU Dong, YANG Zhongshan, et al. Current status and evaluation of groundwater resources exploitation in the plain area of Beijing[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2005, 32(2): 45 - 48. (in Chinese with English abstract)]

[3] 刘鑫,左锐,王金生,等.地下水波动带三氮迁移转化过程研究进展[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(2): 27 - 36. [LIU Xin, ZUO Rui, WANG Jinsheng, et al. Advances in researches on ammonia, nitrite and nitrate on migration and transformation in the groundwater level fluctuation zone[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(2): 27 - 36. (in Chinese with English abstract)]

[4] 于勇,翟远征,郭永丽,等.基于不确定性的地下水污染风险评价研究进展[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(1): 115 - 123. [YU Yong, ZHAI Yuanzheng, GUO Yongli, et al. Risk assessment of groundwater pollution based on uncertainty[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(1): 115 - 123. (in Chinese with English abstract)]

[5] TRUESDELL C, TOUPIN R. Handbuch der Physik: The classical field theories-constitutive equations [M]. Berlin: Springer, 1960.

[6] TRUESDELL C. Sulle basi della termomeccanica[J]. Rend Lincei, 1957, 22(8): 33 - 38.

[7] ZIENKIEWICZ O C, SHIOMI T. Dynamic behaviour of saturated porous media: The generalized Biot formulation and its numerical solution[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1984, 8(1): 71 - 96.

[8] ZIENKIEWICZ O C, CHANG C T, BETTES P. Drained, undrained, consolidating and dynamic behaviour assumptions in soils[J]. Géotechnique, 1980, 30(4): 385 - 395.

[9] ZIENKIEWICZ O C, LEUNG K H, HINTON E, et al. Liquefaction and permanent deformation under dynamic conditions: Numerical solution and constitutive relations [J]. Soil Mechanics-Transient and Cyclic Loads: Constitutive Relations and Numerical Treatment, 1982: 71 - 104.

- [10] SIMON B R, ZIENKIEWICZ O C, PAUL D K. An analytical solution for the transient response of saturated porous elastic solids[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1984, 8(4): 381 – 398.
- [11] HUANG Maosong, YUE Zhongqi, THAM L G, et al. On the stable finite element procedures for dynamic problems of saturated porous media[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2004, 61(9): 1421 – 1450.
- [12] 赵成刚, 王进廷, 史培新, 等. 流体饱和两相多孔介质动力反应分析的显式有限元法[J]. *岩土工程学报*, 2001, 23(2): 178 – 182. [ZHAO Chenggang, WANG Jinting, SHI Peixin, et al. Dynamic analysis of fluid-saturated porous media by using explicit finite element method[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2001, 23(2): 178 – 182. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 刘宝, 苏谦, 刘亭, 等. 饱和和多孔介质不同动力耦合形式数值分析[J]. *振动与冲击*, 2017, 36(9): 146 – 152. [LIU Bao, SU Qian, LIU Ting, et al. Numerical simulation for different dynamic coupling forms of saturated porous media[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(9): 146 – 152. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 杨贝贝, 李伟华, 赵成刚, 等. 基于Comsol的饱和多孔介质动力方程的数值模拟及应用[J]. *地震工程学报*, 2017, 39(2): 321 – 328. [YANG Beibei, LI Weihua, ZHAO Chenggang, et al. Numerical simulation and application of dynamic equations of saturated porous media based on COMSOL[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2017, 39(2): 321 – 328. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 薛禹群. 地下水水力学[M]. 2版. 北京: 地质出版社, 1997: 1 – 10. [XUE Yuqun. *Groundwater hydraulics* [M]. 2nd ed. Beijing: Geological Publishing House, 1997: 1 – 10. (in Chinese)]
- [16] COOPER H H Jr, BREDEHOEFT J D, PAPADOPULOS I S, et al. The response of well-aquifer systems to seismic waves[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1965, 70(16): 3915 – 3926.
- [17] ROELOFFS E, QUILTY E, SCHOLTZ C H. Case 21 water level and strain changes preceding and following the August 4, 1985 Kettleman Hills, California, earthquake[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 1997, 149(1): 21 – 60.
- [18] DOAN M L, BRODSKY E E. Tidal analysis of water level in continental boreholes A tutorial Version 2.2[D]. University of California, 2006.
- [19] HSIEH P A, BREDEHOEFT J D, FARR J M. Determination of aquifer transmissivity from earth tide analysis[J]. *Water Resources Research*, 1987, 23(10): 1824 – 1832.
- [20] WANG Chiyuen. Tidal response of groundwater in a leaky aquifer application to Oklahoma[J]. *Water Resources Research*, 2018, 54(10): 8019 – 8033.
- [21] ZHU Aiyu, WANG Chiyuen. Response of leaky aquifers to earth tides: Interpreted with numerical simulation[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 581: 124458.
- [22] 刘洋. 土动力学基本原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2019. [LIU Yang. *Fundamentals of soil dynamics* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2019. (in Chinese)]
- [23] XU Chengshun, FENG Chaoqun, SONG Jia, et al. A novel completely explicit algorithm to solve dynamic $u-p$ equations of saturated soil[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2021, 141: 106452.
- [24] HUANG Maosong, WU Shiming, ZIENKIEWICZ O C. Incompressible or nearly incompressible soil dynamic behaviour: A new staggered algorithm to circumvent restrictions of mixed formulation[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2001, 21(2): 169 – 179.
- [25] ZIENKIEWICZ O, LEUNG K, HINTON E, et al. Liquefaction and permanent deformation under dynamic conditions: Numerical solution and constitutive relations [J]. *Soil Mechanics-Transient and Cyclic Loads: Constitutive Relations and Numerical Treatment*, 1982: 71 – 104.
- [26] 重庆市地震局. 重庆市地震监测志[M]. 北京: 地震出版社, 2011. [Chongqing Earthquake Agency. *Chongqing earthquake monitoring records* [M]. Beijing: Seismological Press, 2011. (in Chinese)]
- [27] XING Yixuan, LIU Quan, HU Rui, et al. A general numerical model for water level response to harmonic disturbances in aquifers considering wellbore effects[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 609: 127678.
- [28] KONDRER R L. Hyperbolic stress-strain response: Cohesive soils[J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1963, 89(1): 115 – 143.
- [29] LIN C H, LEE V W, TRIFUNAC M D. The reflection of plane waves in a poroelastic half-space saturated with inviscid fluid[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2005, 25(3): 205 – 223.