

王岳, 刘春, 刘晓磊, 等. 波浪作用下海床孔压累积过程离散元数值模拟[J]. 海洋学报, 2021, 43(11): 88–95. doi:10.12284/hyxb2021160
Wang Yue, Liu Chun, Liu Xiaolei, et al. Discrete element numerical simulation of the accumulation process of wave-induced pore water pressure in the seabed[J]. Haiyang Xuebao, 2021, 43(11): 88–95. doi:10.12284/hyxb2021160

波浪作用下海床孔压累积过程离散元数值模拟

王岳¹, 刘春^{1*}, 刘晓磊², 刘辉¹, 李亚沙²

(1. 南京大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 210023; 2. 中国海洋大学 环境科学与工程学院, 山东 青岛 266100)

摘要: 海床土层在波浪的循环荷载作用下会逐渐累积孔压, 降低土层的稳定性, 并威胁海上工程。为了研究孔隙水压力的累积机制, 本文提出离散元孔隙密度流方法, 并改进研发离散元分析软件 MatDEM, 实现了海床沉积物孔压的累积过程模拟。基于现场试验装置及土体力学参数建立离散元模型, 通过对比试验和数值模拟结果发现: 对海床沉积物施加波浪荷载后, 表层土体中产生较高孔压, 并逐渐向深层传递; 在循环波浪荷载作用下, 土颗粒间孔压累积范围逐渐增加; 当孔压累积时间足够长时, 土层中孔压收敛于所施加最大荷载与最小荷载的平均值, 此时若孔压达到初始有效应力, 土体将发生液化, 内部土颗粒成为再悬浮沉积物; 在周期性波浪荷载作用下, 土颗粒液化悬浮后发生移动, 浅层颗粒位移量大, 土体整体表现为圆弧形移动。

关键词: 离散元; 数值模拟; 波浪作用; 孔隙水压力; MatDEM

中图分类号: P731.2; P736.1

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2021)11-0088-08

1 引言

黄河口海床沉积物工程地质特性复杂, 土体以粉质土为主, 易液化。在风暴潮期间, 波浪对土体施加巨大的循环荷载作用, 造成海床土体孔压累积, 并发生一定程度的液化, 进而诱发海床表层出现滑坡、塌陷凹坑等灾害, 直接威胁到海上工程如石油平台、海底管线等构筑物的安全稳定, 最终造成巨大的经济损失^[1]。

黄河口海床沉积物孔压累积问题已成为国内外海洋工程及地质工程领域研究的热点问题。已有大量学者对波浪作用下海床孔压响应机制进行了研究, Anderson 等^[2] 基于波浪水槽实验对冲浪带沙洲上波浪引起的孔压梯度和床位响应进行了观测研究; Niu 等^[3] 在宽波浪水槽中进行了一系列实验, 研究了随机波浪作用下粉质海底的孔压响应; 常方强和贾永刚^[4] 在黄河口海床若干深度处理设孔压探头, 研究黄

河口原状和重塑粉质土在波浪循环荷载作用下的液化特征; 刘晓磊等^[4] 在现代黄河水下三角洲潮间带岸滩进行现场试验, 测定黄河口原状海床沉积物在循环荷载作用不同阶段的孔压响应与强度变化; 张少同等^[5] 研究了黄河现代三角洲沉积物的堆积、固结、液化、侵蚀再悬浮、海床变形滑动及后期改造等一系列动态变化过程; 吕豪杰等^[6] 基于改造的圆筒试验设备, 通过加载装置控制模型土体上方的波压力, 实现了波浪荷载作用下的桩周土体孔压响应模拟; 宋玉鹏等^[7] 在黄河口使用自行研发的孔压监测设备对海底粉土孔压力进行了有效监测。

在试验研究的基础上, 数值模拟是探究海床孔压响应机理的重要方法。例如, 吴雷晔等^[8] 通过与离心模型试验数据的对比, 验证了基于 Biot 固结理论及“交变移动”土体本构模型的数值分析方法对波浪作用下海床液化问题模拟的有效性; 潘冬子等^[9] 结合波

收稿日期: 2020-12-02; 修订日期: 2021-02-09。

基金项目: 国家自然科学基金(4197218, 41761134089); 青岛海洋科学与技术国家实验室开放基金(QNLM2016ORP0110)。

作者简介: 王岳(1996—), 女, 辽宁省大连市人, 主要从事岩土体数值模拟研究。E-mail: mfl929029@smail.nju.edu.cn

* 通信作者: 刘春, 男, 副教授, 主要从事计算工程地质研究和教学工作。E-mail: chunliu@nju.edu.cn

浪槽模型试验研究的结果,提出了一种粉质海床在波浪作用下超静孔压增长的有限差分数值分析方法,并揭示了粉质海床孔压发展的机理;刘涛等^[10]采用有限差分法,对波浪作用下孔压响应进行了数值计算,发现海床中由波浪引起的超孔压随深度分布不均匀,存在极值点,并且孔压响应存在滞后效应;周援衡等^[11]采用 Biot 固结理论分析了海床沙层对波浪荷载的响应,用有限元数值模拟法得到沙床中孔压分布,数值计算结果与实测结果吻合良好。

前人对波浪作用下海床沉积物孔压响应问题开展了大量的试验研究,并采用有限差分法、有限元法等数值方法,较好地模拟了孔压的累积过程。但是这些方法难以模拟岩土体的离散性以及孔压累积造成的土体破坏和灾害效应。本文基于非连续的离散元法和多孔介质孔隙网络模型,提出离散元孔隙密度流方法,实现渗流和流固耦合模拟。基于现场试验装置和数据,建立了相应的离散元数值模型,对波浪作用下海床孔压累积过程进行了模拟分析,探究了孔压累积规律和机理。并进一步模拟了周期性波浪荷载作用下土颗粒液化悬浮过程。

2 离散元法基本原理

在离散元法中,岩土体模型由一系列遵循牛顿运动定律的颗粒堆积组成(图 1)。颗粒间通过弹簧力相互作用,两颗粒间的法向力(F_n)由下式给出^[12]:

$$F_n = \begin{cases} K_n X_n & X_n < X_b, \text{完整连接,} \\ K_n X_n & X_n < 0, \text{断裂连接,} \\ 0 & X_n \geq X_b, \text{断裂连接.} \end{cases} \quad (1a)$$

$$F_n = \begin{cases} K_n X_n & X_n < 0, \text{断裂连接,} \\ 0 & X_n \geq X_b, \text{断裂连接.} \end{cases} \quad (1b)$$

$$F_n = \begin{cases} 0 & X_n \geq X_b, \text{断裂连接.} \end{cases} \quad (1c)$$

式中, K_n 为法向刚度; X_n 为法向相对位移; X_b 为断裂位移。初始时,颗粒与其相邻颗粒相互连接,受拉力

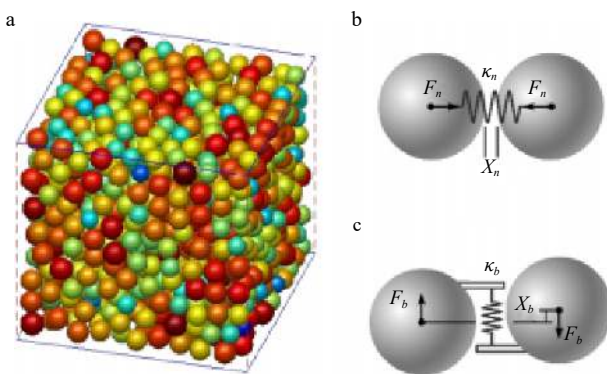


图 1 离散颗粒堆积模型(a)、颗粒间法向弹簧力(b)和颗粒间切向弹簧力(c)

Fig. 1 Packing model of discrete element (a), normal spring force between particles (b), and shear spring force between particles (c)

或压力作用(式(1a),拉力为正)。当两颗粒之间的 X_n 超过断裂位移时,弹簧断裂,颗粒间拉力消失(式(1c)),仅存在压力作用(式(1b))。

颗粒间通过切向弹簧来模拟剪切变形和切向力,剪切弹簧的切向力(F_s)通过下式决定:

$$F_s = K_s X_s, \quad (2)$$

式中, K_s 为切向刚度; X_s 为切向相对位移。对于完整的颗粒连接,其最大切向力(F_{smax})由摩尔库伦准则确定:

$$F_{smax} = F_{s0} - \mu_p F_n, \quad (3)$$

式中, F_{s0} 为颗粒内部的抗剪力; μ_p 为摩擦系数。当颗粒受切向外力超过式(3)中的 F_{smax} 时,颗粒间连接断裂,单元连接允许的最大切向力 F'_{smax} 为

$$F'_{smax} = -\mu_p F_n. \quad (4)$$

当外力超过最大摩擦力时,两相邻颗粒开始滑动,滑动摩擦力等于 F'_{smax} 。

在数值模拟中,单元所受合力为弹簧力、阻尼力和重力等的矢量和。假定在非常小的时间步内,单元的速度和加速度不变,基于时间步迭代算法和牛顿运动方程实现离散单元的动态模拟^[12]。

3 离散元孔隙密度流法

基于传统的岩体孔隙网络模型^[13],本文提出了离散元孔隙密度流法来实现岩土体流固耦合的高效计算,这种方法的基本步骤为:(1)利用离散元堆积颗粒建立孔隙流体域(图 2b);(2)通过孔隙流体密度和温度来确定孔压,在孔隙间采用类似于达西定律的方法计算渗流;(3)将孔压作用于固体颗粒,实现流固耦合模拟。

如图 2a 所示,经过离散元计算获得离散元堆积颗粒后,根据颗粒间的接触关系,通过连接相邻颗粒的中心点,在堆积模型中剖分出一系列相互连通的流体域。建立以孔隙流体域单元为节点,孔喉通道相连接的孔隙流体域(图 2b),最后得到颗粒-孔隙系数(图 2c)。

数值模拟假定孔隙均为饱和状态,孔隙流体压力 P 可以由孔隙流体密度 ρ 和温度 T 来确定^[14]:

$$P = f(\rho, T). \quad (5)$$

根据已知的饱和水蒸气压、温度、密度数据拟合得到水温为 20℃ 时,孔隙流体压力与孔隙流体密度的关系^[15]为

$$P = 2.1668(\rho - 999.75) \times 10^6. \quad (6)$$

如图 3 所示,当两相邻孔隙间存在压力差时,流体将通过二者间的孔喉通道发生渗流,其渗流量可通过类似达西定律的方法来计算。本文中,在单位时间



图2 离散元堆积颗粒(a)、孔隙流体域(b)和颗粒-孔隙系统(c)

Fig. 2 Discrete element stacked particles (a), pore fluid domain (b), and particle and pore system (c)

内通过孔喉的流量(q)定义为

$$q = kA \times dP/l, \quad (7)$$

式中, k 为孔喉的渗透系数; A 为孔喉通道面积; dP 为孔喉间压力差; l 为孔喉长度。两颗粒半径分别为 R_1 、 R_2 ; 两颗粒中心的距离为 L ; 孔喉长度 l 定义为

$$l = \min(R_1, R_2). \quad (8)$$

对于二维问题, 单位宽度孔喉通道面积可用孔喉的直径(d_w)表示。由于二维颗粒堆积通常会封闭孔喉, 从而使孔喉直径为 0, 导致无法发生渗流。因此, 在进行二维模型渗流计算时, 需要给每个单元定义较小的渗流作用半径(R_w), 默认取单元半径的 0.975 倍, 从而保证一定的孔喉直径, 并使流体能够通过孔喉运移。孔喉直径(d_w)定义为

$$d_w = L - (R_{w1} + R_{w2}), \quad (9)$$

式中, R_{w1} 和 R_{w2} 分别为单元 1 和单元 2 的渗流作用半径。

以上计算中, 流体在孔隙间压差驱动下运移, 实现了渗流模拟, 进一步实现流固耦合作用, 将流体压

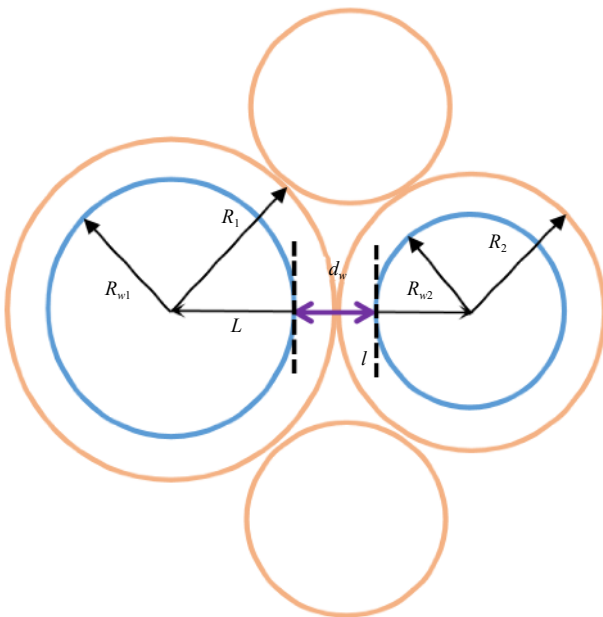


图3 颗粒微观渗流示意图

Fig. 3 Schematic diagram of particle microscopic seepage

力作用在单元上, 并获得流体对单元的合力。通过常规离散元法计算单元运动, 实现流体对固体的作用。同时, 当单元运动后, 孔隙的体积变化, 需计算孔隙密度, 并根据公式(5)获得孔隙新的压力, 从而实现固体对流体的作用。最后, 根据单元坐标划分新的网格, 并更新网格中的流体属性, 再返回到渗流计算。

4 离散元建模与数值模拟

4.1 建模与赋材料

本文依据常方强和贾永刚^[1]在黄河三角洲现行的清水沟流路南部的潮间带上开展的现场试验, 实现了波浪作用下海床孔压累积过程的离散元建模与数值模拟。现场试验装置主要包括加载系统和孔压监测系统, 加载系统采用自制活塞式压水方式, 主要由圆柱形铁桶、活塞和手柄组成; 孔压监测系统由孔压探头、多通道数据采集系统、通讯电缆和计算机组成。

根据现场试验装置, 利用 MatDEM 进行建模^[16]。第一步先建立长、高为 0.5 m×1 m 的模型箱, 向模型箱内随机添加平均半径为 0.005 m 的颗粒, 总颗粒数为 5 629, 颗粒经过重力沉积和压实作用, 最终形成颗粒堆积模型(图 4)。

第二步再给模型赋材料, 根据现场试验^[1]及经验得到海洋土体宏观力学性质(表 1), 基于宏微观转换公式^[12]和 MatDEM 自动训练模块, 软件自动训练得到符合宏观要求的离散元材料, 具体离散元微观力学参数见表 2。

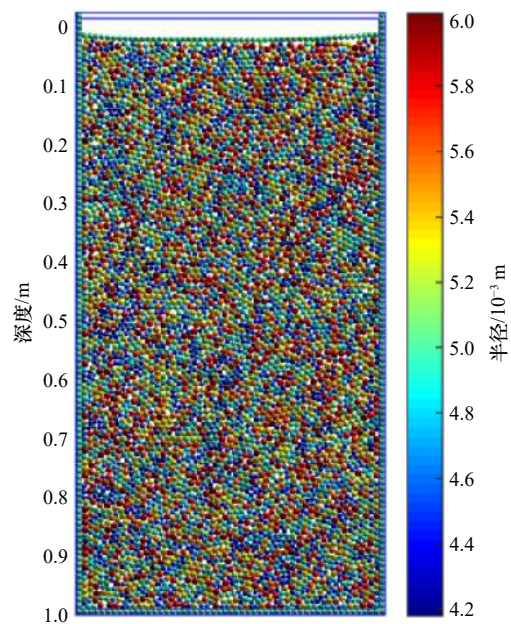


图4 颗粒堆积模型

Fig. 4 Particle accumulation model

表1 海洋土体宏观力学性质

Table 1 Macro mechanical properties of ocean soil

力学性质	测试值
杨氏模量 E/MPa	5.00
泊松比 ν	0.14
抗拉强度 T_u/kPa	1.00
抗压强度 C_u/kPa	10
内摩擦系数 μ_i	0.5

表2 离散元微观力学参数

Table 2 Micro mechanical parameters of the discrete element

力学参数	平均值
法向刚度 $K_n/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	123
切向刚度 $K_s/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	48.7
断裂位移 X_b/m	1.40×10^{-6}
抗剪力 F_{s0}/N	0.898
摩擦系数 μ_p	0.121

第三步将模型箱上部 0.2 m 范围内的颗粒筛选出并删除,建立海床表面的流体域。根据土体渗透率确定微观渗透系数,并计算出模拟海床沉积物渗透系数 K 为 1.32×10^{-5} cm/s,数值在现场试验测得的数据范围内。

4.2 数值模拟计算

现场试验利用人工操作活塞施加水压循环荷载以模拟波浪荷载,循环荷载控制在 0~4 kPa,加载周期为 6.67 s,循环加载 40 次,观察孔压累积规律。同样地,在数值模拟中,对海床流体域施加 0~4 kPa 循环荷载,模拟波峰、波谷的作用。模拟设定时间步为 6.67×10^{-4} s,每个周期迭代计算 10 000 次,实现加载周期 6.67 s。循环加载 40 次,模拟现实时间 266.8 s,其时间段与现场试验分析时间段一致。

现场试验分别将孔压探头埋设在深度为 5 cm、8 cm、12 cm、20 cm 和 30 cm 处,因此在离散元模型内选取土体深度为 0.05 m、0.08 m、0.12 m、0.20 m、0.30 m、0.40 m 和 0.5 m 的位置,对应于现场试验,记录不同深度土体孔隙水压力,并进一步用于绘制孔压分布图和孔压累积过程图。

5 模拟结果与分析

5.1 单周期波浪荷载下的孔压变化特征

图 5 显示了施加荷载 1 个周期内,不同深度土体孔隙水压力随时间变化曲线。图中黑色实线代表数

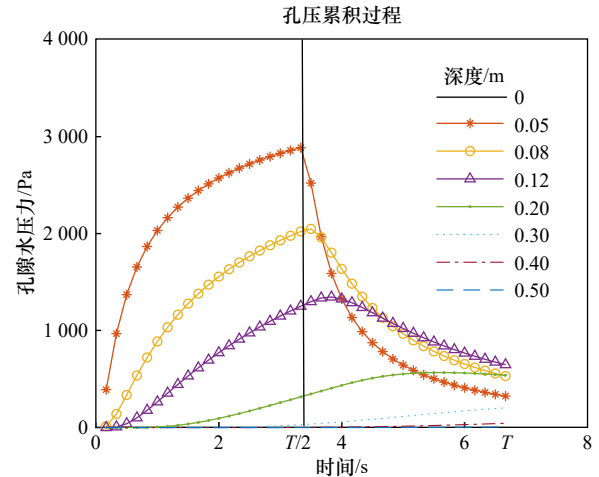


图5 单周期荷载下孔隙水压力变化趋势

Fig. 5 Trend of pore water pressure under single-cycle loading

值模拟时,施加于海床表面流体域上即深度为 0 处用来模拟波浪作用的荷载,增加循环次数可模拟正弦荷载作用。

前 $T/2$ 时间内施加最大荷载 4 kPa,在荷载作用下,各深度土体颗粒间逐渐产生孔隙水压力。深度为 0.05 m 时土体最先产生孔压,由于波浪直接作用于表层土体,而水下土体处于完全饱和状态,当受到荷载作用时,表层土颗粒间的水最先受到挤压,并且不能及时排出,从而导致表层土体最先产生孔压。在渗流作用下,孔压逐渐向深层传递,由于渗流需要一定的时间,因此土体深度越大,渗流时间所需越长,所以,土体孔压增大速率随深度增加而降低。

后 $T/2$ 时间内施加最小荷载 0 kPa,观察到深度为 0.05 m 时土体颗粒间孔压急剧减小,紧接着深度为 0.08 m、0.12 m 的土体颗粒间孔压开始陆续减小,且深度越大,减小越缓慢。施加荷载 1 个周期内,深度大于 0.2 m 的土体,孔压一直缓慢上升,因为土体深度越大,颗粒间孔压受荷载变化影响需要的时间越长,在 6.67 s 周期内表现不明显。

施加荷载 1 个周期后,观察到深度为 0.12 m 的土体颗粒间孔压最大,表层土体颗粒与波浪直接接触,受荷载作用最明显,在 0 kPa 荷载作用时孔压减小速率快;荷载减小对深层土体产生影响所需的时间更长,并且上层土体颗粒间孔压减小过程中仍然发生渗流作用,因此深层土体颗粒间孔压减小速率相对较慢。

5.2 循环波浪荷载下的孔压累积过程

为了解周期循环波浪荷载的作用,将施加荷载次数设为 40 次。图 6 显示了施加荷载第 1 个、第 10 个、第 20 个和第 40 个周期后,数值模型中的孔压分布情

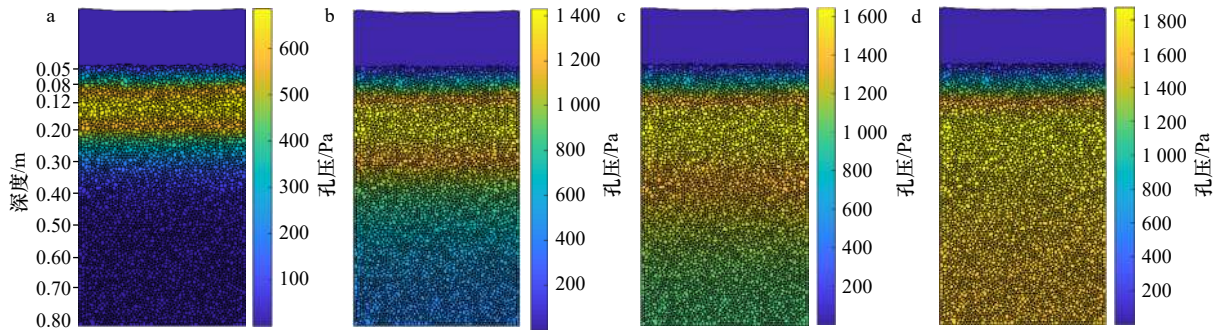


图 6 荷载循环 1 次(a)、10 次(b)、20 次(c)、40 次(d)孔压分布
Fig. 6 Pore pressure distribution of load cycle 1 (a), 10 (b), 20 (c), 40 (d) times

况,其分别对应于 6.67 s、66.7 s、133.4 s 和 266.8 s 4 个时刻。从图中可以看出,随着荷载循环次数增加,孔压累积范围逐渐变宽,孔压最大区域稳定在土体深度 0.20 m 上下。加载 40 个周期后,深度大于 0.30 m 土体孔压基本稳定在 1.5 kPa。

图 7 为不同深度土体在荷载循环 40 个周期内,孔压随时间的累积曲线。从图中可以看出,深度从 0.05 m 到 0.30 m 处的孔压均呈现出“边振荡,边累积”的趋势,振荡幅值随着深度的增加而减小。随着孔压累积时间延长,各个深度土体孔压都累积增加^[7],增加速率逐渐降低。

将孔压累积过程曲线进行拟合,可得到不同土体深度处孔压 P 与时间 t 之间的函数关系。

土体深度为 0.05 m 时:

$$P = 1.335 \sin(0.942t - 0.6579) + 1.725t^{0.02056}, \quad (10)$$

土体深度为 0.12 m 时:

$$P = 0.4222 \sin(0.9422t - 1.809) + 0.8785t^{0.144}, \quad (11)$$

土体深度为 0.2 m 时:

$$P = 0.1139 \sin(0.9421t + 3.157) + 0.457t^{0.258}, \quad (12)$$

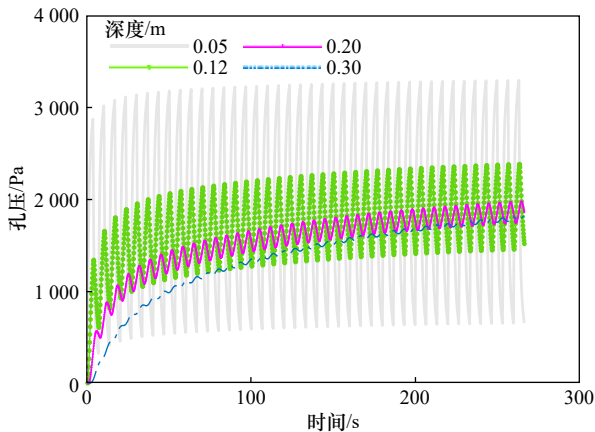


图 7 循环荷载 40 次孔压累积
Fig. 7 Pore water pressure accumulation process under cyclic loading 40 times

土体深度为 0.3 m 时:

$$P = -0.02229 \sin(0.942t - 1.544) + 0.2036t^{0.3977}, \quad (13)$$

以上公式可归纳为

$$P = A \sin(\omega t + \phi) + Bt^\alpha, \quad (14)$$

式中, A 为振幅; w 为角速度; ϕ 为初相; B 为系数; α 为指数。

可以看到,孔压累积过程曲线为正弦函数与幂函数的叠加。正弦波的周期与加载周期基本吻合,正弦波振幅 A 、系数 B 和土体深度呈负相关,幂函数指数 α 和土体深度呈正相关。

表 3 显示了采用数值模拟与现场试验两种方法得到不同深度土体孔压累积 266.7 s 时的数据对比,此时孔压数据都基本达到稳定。结果显示,数值模拟与现场试验孔压数据接近;累积时间 266.7 s 后,两者孔压都缓慢上升,呈现出良好的相关性。分析存在细小误差的原因为:数值模拟基于平面应变假设,建立的离散元模型相对均质,而现场试验海床土体较为复杂,可能存在分层,并且其渗透性、密实度等会随深度和孔压的变化而发生变化,因此孔压向深层传递过程会有所差异。导致 0.12 m 深度误差较大的原因可能是现场试验数据采用人工加载、人工读数,存在偶然误差。

继续增加施加荷载次数,当孔压累积时间足够长时(500 s 以上)可以发现 0.20 m 深度的土体孔压最终

表 3 数值模拟与现场试验孔压数据对比

Table 3 Data comparison of pore pressure between numerical simulation and field test		
深度/m	现场孔压/kPa	模拟孔压/kPa
0.05	0.585	0.652
0.12	0.799	1.513
0.20	1.890	1.858
0.30	1.635	1.814

收敛于所施加最大荷载与最小荷载的平均值(2 kPa)。现场试验测得土体重度为 19.8 kN/m³, 则土体浮重度 r' 为 10 kN/m³, 当施加荷载为 0 kPa 时, 0.20 m 深度土体的初始有效应力 $\sigma' = r' \times h$, 结果为 2 kN/m²。传统土体力学以初始有效应力作为判断海床液化的临界值^[18], 在离散元法中同样适用, 此时土体孔压将达到初始有效应力, 土体开始发生液化, 液化一方面会降低海床表层沉积物的抗侵蚀性; 另一方面, 在海床内部垂向渗流的驱动下, 内部部分细粒沉积物会被“泵送”运输至海床表面, 进而进入上覆水体成为再悬浮沉积物^[5]。

6 海床沉积物液化悬浮模拟

张少同等^[5]分析了黄河三角洲沉积物的侵蚀再悬浮过程, 波浪循环荷载作用不仅可以导致海床沉积物发生孔压累积、液化破坏、强度弱化甚至丧失, 还为沉积物再悬浮提供剪切力, 微弱的近底剪切力就能够将强度弱化或完全液化的海底沉积物侵蚀再悬浮。

以上数值模拟研究表明, 在波浪循环荷载作用下, 海床沉积物内部孔隙水压力发生累积, 并逐渐达到液化标准, 进而土体颗粒发生液化悬浮。为了进一步分析土体发生液化后的情况, 开展了波浪周期性荷载作用下, 海床沉积物液化悬浮过程的模拟。

6.1 建模与加载

模拟过程中离散元建模方法同 4.1 节, 为了更接近海床实际情况, 设置模型箱长、高为 1 m × 0.5 m, 随机添加平均半径为 0.01 m 的颗粒, 总颗粒数为 1 579。加载方式与之前不同, 在海床流体域左侧施加 4 kPa 荷载, 相当于实际波高 0.80 m 的作用效果^[4], 线性递减到 0 kPa 模拟波浪剪切作用。根据 5.2 节模拟结果, 在土体 0.20 m 深度处施加 2 kPa 荷载, 用来模拟已累积孔压对后续土体孔压累积以及颗粒移动的影响。模拟设定时间步为 1×10^{-3} s, 每个周期迭代计算 10 000 次, 模拟真实世界 10 s, 得到土体孔压分布和颗粒位移场。

6.2 模拟结果分析

从图 8 中可以看出, 在波浪剪切作用和已累积孔压共同作用下左侧表层土体内积累的孔压较大, 为 3.5 kPa 左右, 右侧较小, 为 0.5 kPa 左右, 深层土体内孔压累积大小介于两者之间。

图 9 为数值模拟 10 s 后土体颗粒位移场, 可以观察到深度在 0~0.30 m 范围内土体颗粒发生剪切位移, 结合图 8 孔压分布可以发现, 0~0.30 m 土体内孔压累积超过 2 kPa, 达到液化标准, 土体发生液化, 在

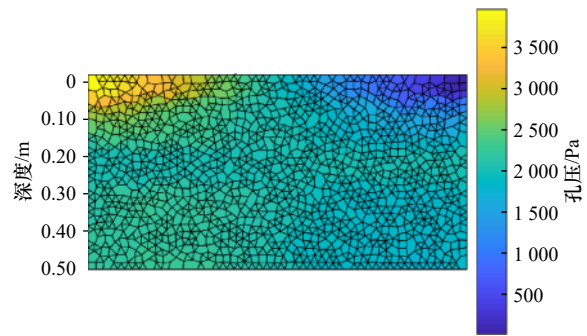


图 8 孔压分布

Fig. 8 Distribution of pore pressure

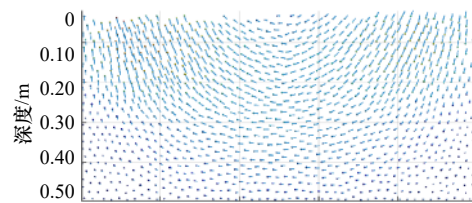


图 9 模拟 10 s 位移场

Fig. 9 Simulation of 10 s displacement field

波浪剪切力的作用下, 土颗粒悬浮, 浅层土体由于直接受到波浪剪切作用, 位移量更大, 随着土体深度增大, 位移量逐渐减小。

观察整个模型箱内土体颗粒位移情况, 发现海床整体呈现圆弧形移动(图 10)。土体液化后土体颗粒间的黏聚力丧失, 进而造成海床抗剪性降低, 在波浪荷载作用下海床发生圆弧形振荡剪切。由于波浪荷载是循环荷载, 呈周期性变化, 波峰和波谷交替出现, 在海床内引起的循环应力呈现相反的方向变化, 为振荡剪切破坏创造了条件。随着波浪周期性荷载的持续作用, 土体液化深度增大, 振荡面向更深层延展, 最终破坏稳定在一定深度^[15]。

7 结论

本文采用离散元数值模拟的方法, 提出离散元孔

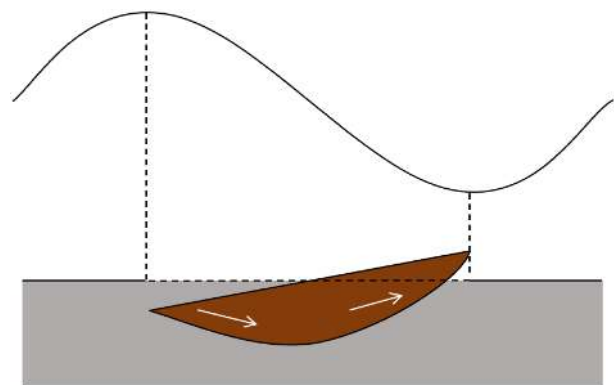


图 10 圆弧形移动示意图

Fig. 10 Schematic diagram of circular arc movement

隙密度流方法,实现渗流和流固耦合模拟。基于现场试验装置和数据,通过自主研发的离散元模拟软件 MatDEM,探究了波浪荷载作用下海床沉积物的孔压累积规律和机理,并分析了颗粒液化悬浮过程,取得了以下结论:

(1)提出了离散元孔隙密度流方法,并基于非连续的离散元法和多孔介质孔隙网络模型,实现了海床沉积物孔压的累积过程模拟,模拟结果与现场试验吻合较好。

(2)对海床沉积物施加波浪荷载后,表层土体中产生较高孔压,并逐渐向深层传递;在循环波浪荷载作用下,土体颗粒间孔压累积范围逐渐增加。

(3)当孔压累积时间足够长时,土层中孔压收敛于所施加最大荷载与最小荷载的平均值,此时若孔压达到初始有效应力,土体将发生液化,内部土体颗粒成为再悬浮沉积物。

(4)土体颗粒液化悬浮后发生移动,浅层颗粒位移量大,随着土体深度增大,位移量逐渐减小,土体整体表现为圆弧形移动。

本研究中模拟了土体颗粒间孔压的累积变化情况,在此基础上,初步分析了土体液化悬浮过程,验证了基于孔隙密度流法的流固耦合模拟的有效性,关于土体再悬浮过程以及振荡剪切破坏的精细分析和机理研究有待后续开展。

参考文献:

- [1] 常方强,贾永刚. 黄河口粉质土海床液化过程的现场试验研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(1): 121-126.
Chang Fangqiang, Jia Yonggang. *In-situ* test to study silt liquefaction at the subaqueous delta of Yellow River[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2012, 45(1): 121-126.
- [2] Anderson D, Cox D, Mieras R, et al. Observations of wave-induced pore pressure gradients and bed level response on a surf zone sandbar[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2017, 122(6): 5169-5193.
- [3] Niu Jianwei, Xu Jishang, Dong Ping, et al. Pore water pressure responses in silty sediment bed under random wave action[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 11685.
- [4] 刘晓磊,贾永刚,郑杰文. 波浪导致黄河口海床沉积物超孔压响应现场试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(11): 3055-3062.
Liu Xiaolei, Jia Yonggang, Zheng Jiewen. *In situ* experiment of wave-induced excess pore pressure in the seabed sediment in Yellow River Estuary[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(11): 3055-3062.
- [5] 张少同,贾永刚,刘晓磊,等. 现代黄河三角洲沉积物动态变化过程的特征与机理[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2016, 36(6): 33-44.
Zhang Shaotong, Jia Yonggang, Liu Xiaolei, et al. Feature and mechanism of sediment dynamic changing processes in the Modern Yellow River Delta[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2016, 36(6): 33-44.
- [6] 吕豪杰,周香莲,王建华. 波浪荷载作用下桩周土体孔隙水压力试验研究[J]. 上海交通大学学报, 2018, 52(7): 757-763.
Lü Haojie, Zhou Xianglian, Wang Jianhua. Laboratory study of wave-induced pore pressures around the pile[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2018, 52(7): 757-763.
- [7] 宋玉鹏,孙永福,杜星,等. 波浪作用下海底粉土孔隙水压力响应过程监测研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2018, 38(2): 208-214.
Song Yupeng, Sun Yongfu, Du Xing, et al. Monitoring of silt pore pressure responding process to wave action[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2018, 38(2): 208-214.
- [8] 吴雷晔,朱斌,陈仁朋,等. 波浪-海床-结构物相互作用离心模型试验及数值模拟[J]. 土木工程学报, 2019, 52(S2): 186-192.
Wu Leiye, Zhu Bin, Cheng Rengpeng, et al. Centrifuge test and numerical simulation of wave-seabed-structure interaction[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2019, 52(S2): 186-192.
- [9] 潘冬子,王立忠,潘存鸿. 粉质海床波浪响应的数值模拟及试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(10): 2697-2700, 2707.
Pan Dongzi, Wang Lizhong, Pan Cunhong. Numerical simulation and experimental investigation of wave-induced response in silty seabed[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(10): 2697-2700, 2707.
- [10] 刘涛,冯秀丽,林霖. 海底孔压对波浪响应试验研究及数值模拟[J]. 海洋学报, 2006, 28(3): 173-176.
Liu Tao, Feng Xiuli, Lin Lin. Study of seabed pore water pressure based on in-situ test and numerical simulation[J]. *Haiyang Xuebao*, 2006, 28(3): 173-176.
- [11] 周援衡,卢海斌,陈智杰. 波浪作用下弹性海床孔隙水应力响应的数值模拟[J]. 水道港口, 2005, 26(2): 67-70.
Zhou Yuanheng, Lu Haibin, Chen Zhijie. Numerical simulation of pore water pressure response of elastic seabed under wave loading[J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2005, 26(2): 67-70.
- [12] Liu Chun, Xu Qiang, Shi Bin, et al. Mechanical properties and energy conversion of 3D close-packed lattice model for brittle rocks[J]. *Computers & Geosciences*, 2017, 103: 12-20.
- [13] 雷健,潘保芝,张丽华. 基于数字岩心和孔隙网络模型的微观渗流模拟研究进展[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(2): 653-660.
Lei Jian, Pan Baozhi, Zhang Lihua. Advance of microscopic flow simulation based on digital cores and pore network[J]. *Progress in Geophysics*, 2018, 33(2): 653-660.
- [14] 刘春,乐天呈,施斌,等. 颗粒离散元法工程应用的三大问题探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(6): 1142-1152.

- Liu Chun, Le Tiancheng, Shi Bin, et al. Discussion on three major problems of engineering application of the particle discrete element method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(6): 1142–1152.
- [15] 常方强, 贾永刚. 黄河口水下斜坡波致圆弧振荡剪切破坏分析[J]. 海洋学报, 2010, 32(5): 175–179.
Chang Fangqiang, Jia Yonggang. The analysis on the arc oscillatory shear failure induced by wave on the seabed in the Huanghe Estuary[J]. Haiyang Xuebao, 2010, 32(5): 175–179.
- [16] 刘春, 范宣梅, 朱晨光, 等. 三维大规模滑坡离散元建模与模拟研究——以茂县新磨村滑坡为例[J]. 工程地质学报, 2019, 27(6): 1362–1370.
Liu Chun, Fan Xuanmei, Zhu Chenguang, et al. Discrete element modeling and simulation of 3-dimensional large-scale landslide-taking Xinmocun landslide as an example[J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(6): 1362–1370.
- [17] Zhang Jisheng, Tong Linlong, Zheng Jinhai, et al. Effects of soil-resistance damping on wave-induced pore pressure accumulation around a composite breakwater[J]. Journal of Coastal Research, 2018, 34(3): 573–585.
- [18] Liu Xiaoli, Cui Haonan, Jeng D S, et al. A coupled mathematical model for accumulation of wave-induced pore water pressure and its application[J]. Coastal Engineering, 2019, 154: 103577.

Discrete element numerical simulation of the accumulation process of wave-induced pore water pressure in the seabed

Wang Yue¹, Liu Chun¹, Liu Xiaolei², Liu Hui¹, Li Yasha²

(1. School of Earth Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: The seabed soil layer will gradually accumulate pore pressure under the action of wave cyclic load, reduce the stability of the soil layer, and threaten offshore engineering. In order to study the accumulation mechanism of pore water pressure, the discrete element pore density flow method was proposed, and the discrete element analysis software MatDEM was improved to realize the simulation of the accumulation process of seabed sediment pore pressure. Based on the field test device and the mechanical parameters of the soil body, a discrete element model was established. By comparing field test and numerical simulation results, it was found that after applying the wave load to the seabed sediment, a higher pore pressure was generated in the surface soil body and gradually transferred to the deep layer. Under the action of cyclic wave load, the cumulative range of pore pressure between soil particles gradually increased. When the pore pressure accumulation time was long enough, the pore pressure in the soil layer converged to the average of the maximum and minimum loads applied. As the number of load cycles increased, the pore pressure at all depths increased cumulatively until the soil body liquefied and the internal soil particles became resuspended sediments. Under the action of periodic wave loads, the soil particles moved after being liquefied and suspended, and the shallow particles had a large displacement, and the overall performance of the soil was circular arc movement.

Key words: discrete element; numerical simulation; wave action; pore water pressure; MatDEM