

波浪引起海床内部孔隙迁移试验研究*

崔锡钦¹, 董文彬², 臧文坤¹, 徐宙³, 徐晓飞⁴, 陶威^{4**}

(1. 青岛市勘察测绘研究院, 山东 青岛 266100; 2. 青岛启诚环境科技有限公司, 山东 青岛 266100;
3. 中交海洋建设开发有限公司, 天津 滨海新区 300457; 4. 青岛市崂山区农业农村局, 山东 青岛 266100)

摘要: 本文通过室内方形水槽开展了波浪荷载对孔隙迁移过程影响的试验研究。结果表明,对于松软土体,波浪荷载会导致土体发生剪切破坏形成滑动层,而孔隙水则会在累积孔压作用下沿着滑动层形成的孔隙发生迁移。波浪荷载导致土体内部孔隙迁移,其迁移过程受外界荷载以及土体性质影响显著。含气泡的孔隙会在波浪循环荷载过程中的负压作用和气体自身浮力作用的共同影响下发生迁移,循环荷载中的负压作用越强,含气泡的孔隙越容易发生迁移。孔隙向上迁移后会导致底部土体的密实度增加而上方土体的密实度下降。土体的松软程度会影响滑动面的形成,越松软的土体越容易形成滑动面。相比于密实土体,孔隙在滑动面中更容易发生迁移。

关键词: 海床土体; 气体; 水槽试验; 孔隙迁移

中图分类号: P754

文献标志码: A

文章编号: 1672-5174(2023)02-077-06

DOI: 10.16441/j.cnki.hdxh.20210445

引用格式: 崔锡钦, 董文彬, 臧文坤, 等. 波浪引起海床内部孔隙迁移试验研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2023, 53(2): 77-82.

Cui Xiqin, Dong Wenbin, Zang Wenkun, et al. Experimental study on wave induced pore migration in seabed[J]. Periodical of Ocean University of China, 2023, 53(2): 77-82.

海底土体中存在着大量的浅层气。中国黄河泥沙中平均有机质含量为0.79%,其中可生物降解部分占总有机质的1%~3%^[1],在有氧条件下降解产生二氧化碳,而厌氧条件下则产生甲烷、硫化氢等气体。海底浅层气的存在及迁移可能导致全球变暖、海洋工程风险以及海洋地质灾害。

Sills 和 Wheeler^[2]在1992年提出了海洋含气土体中气体的存在形式,即溶解气、孤立的气泡和气水化合物三种。其中溶解气孔隙流体具有高压缩性,对海床的工程特性的影像观测影响较大;孤立的气泡对土层的影响不显著,而气水化合物融化时才会对海床工程造成威胁。Dusseault^[3]通过提出描述含气土的变形特性的非线性弹性本构模型,研究了含气土的不排水体积应力变化特性;Groziec 等^[4]则在剑桥模型的基础上发展了一个考虑气相的本构模型,通过此模型来描述在不排水条件下含气粘土的变形特征。

海底浅层气的存在会显著影响土体的物理力学性质^[5-6]。Chaney^[7]和 Yoshimi 等^[8]指出,当土体内气体饱和度由100%降低至90%时,土体液化阻力将降低一

半。土体中气体存在将导致孔隙水弹性模量的显著降低^[9]并增加孔隙水压力梯度,进而引起海床瞬态液化^[10],但土体中饱和度减小将增加土的抗液化强度。Martin 等^[11]认为,砂土中饱和度降低1%将导致每循环中孔隙水压力增加量减少28%。Yang 等^[12]认为,饱和度1%的减少量将使超孔压比由0.6降低至0.15。气体的存在对海床土的不排水抗剪强度具有较大影响,其含量越大,土体剪切带的强度就越小^[13]。

海床土体中自由气体的存在对海床土体工程性质以及波浪在海床中的传播均有影响。在软土区的工程建设中常出现因海床中的自由气体引发的岩土工程问题,严重时甚至酿成重大灾害^[14-16]。气体存在将增加海床液化的可能性,进而导致海底滑坡的发生。在密西西比河的松软三角洲地区,气体是降低土体抗剪强度进而导致海床失稳的主要原因^[17]。而海床土体中自由气体的运移释放过程也会导致工程设施破坏、井喷甚至燃爆,造成严重工程事故^[18-19]。对于海洋地质过程,海床土体中自由气体的迁移释放可以形成麻坑、气烟囱、类泥火山构造等灾害性地质构造^[20-21],以致诱发

* 基金项目:国家自然科学基金项目(42077237);山东省自然科学基金项目(ZR2020MD110)资助

Supported by the National Natural Science Foundation of China(42077237); the Natural Science Foundation of Shandong Province (ZR2020MD110)

收稿日期:2021-12-03; 修订日期:2022-01-13

作者简介:崔锡钦(1971—),男,硕士,高级工程师,研究方向为海洋工程勘察。E-mail:cxq2836@163.com

** 通讯作者:E-mail: 769752223@qq.com

海床塌陷、海底滑坡等地质灾害^[22]。

此外,海床土体中自由气体的存在及迁移可能导致全球变暖、海洋工程风险以及海洋地质灾害。 CH_4 作为仅次于 CO_2 的第二大温室气体,其吸热能力是 CO_2 的28~34倍,而每年从海底释放到大气中的 CH_4 占到全球 CH_4 排放量的1%~13%^[23],因此海床土体中自由气体的迁移释放很大程度上影响着全球变暖的趋势。因此,了解海床土体中自由气体的存在及运移机理并研究相应的原位监测手段具有重要意义。

近年来的研究发现,土体在动荷载作用过程中除孔隙水压力升高外还经常伴随着孔隙的重新分布。随着动力荷载引起的累积孔隙水向上流动,底部的土层越来越密实,强度增加而上部土层强度则减小。孔隙水的流动使得土层内的孔隙发生改变,由于海洋土的非饱和特性及波浪动力特性,波浪荷载引起的瞬态孔隙水压力和累积孔隙水压力以及剪切等同样能够引起海床内部气体的运移。毛细侵入和劈裂侵入是气体在海床土体中迁移的两种模式,其主要控制因素是土体颗粒的尺寸和有效应力^[24-26]。对于气体沿裂缝通道迁移,许多观测结果和实验研究表明,这种气体迁移模式具有周期性特征^[27-29]。目前的实验研究表明,土体的起裂压力受到诸多因素控制,如土体初始应力条件、强度、刚度、固结条件等,气体压力及土体局部非均质性等^[30]。

海床中存在的气体会使海床产生孔隙,在动荷载作用下,压力梯度发生改变,气体会发生迁移,会产生新的孔隙,而原先失去气体的孔隙便会被压实填充,进而消失,因此孔隙的迁移其实质就是孔隙内气体的迁移。为此,本文通过水槽试验以观察孔隙迁移的方式来研究气体在波浪作用下的运移规律。

1 实验材料与方法

1.1 波浪荷载

鉴于海床中累积孔隙水压力变化是由波致剪应力引起,且波节处剪应力最大,本文拟采用驻波荷载施加于海床上。实验装置为方形水槽,为在水槽中间部位获得最大剪应力,本文采用波长等于水槽长度一半的驻波。

为了能够让水槽内产生波浪,在水槽一侧利用直径为10 cm,长为40 cm的空心圆柱在水面上振动产生第一个水波(见图1(a))。当第一个水波传播到水槽另一侧形成反射向相反方向传播时,第二个波开始产生,这样两个波在水槽中间相遇并迭加(见图1(c)),然后两个波继续向各自的方向前进,并同时遇到水槽侧壁形成反射波。当第一个水波位于空心圆柱处时,以水波的频率振动圆柱以增加水波的振幅或补充水波在传播过程中损失的能量(见图1(e))。经过一段时间,第

二个水波经过水槽侧壁的反射后又与第一个水波在水槽的中间位置相遇,然后分离并在圆柱处获得能量的补充。这样不断循环就在水槽内形成了一个一定频率水波。当水槽的长度较小时,水波从一个侧壁传播到另一侧壁的时间也减小,这样两个水波在水槽内迭加在一起,形成驻波,因此试验中只能在水槽中看到图1(e)和图1(f)的波形。

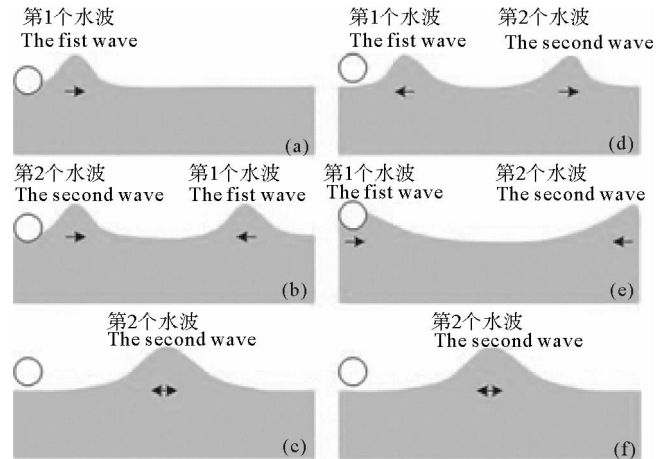


图1 水槽中波浪生成过程示意图

Fig.1 Schematic diagram of wave generation process in flume

1.2 试验流程

试验土样取自于黄河三角洲埕岛地区,制备方法如下:取粉土样,加水用搅拌机充分搅拌至含水率接近40%,然后将土样转移到玻璃水槽中直到厚度达到45 cm,同时,将孔压探头分别放在波峰作用点下(水槽中部),深度分别为0、20、35和40 cm,然后慢慢向水槽中注水,当清水层厚30 cm时停止加水。如此制备的土样中含有一定量的气体,但考虑到本实验主要用于观察试样中孔隙运移,因此无需对土样进行真空饱和。当土样制备完静止一段时间,我们发现海床表面分布着不断喷发的类泥火山构造(见图2)。

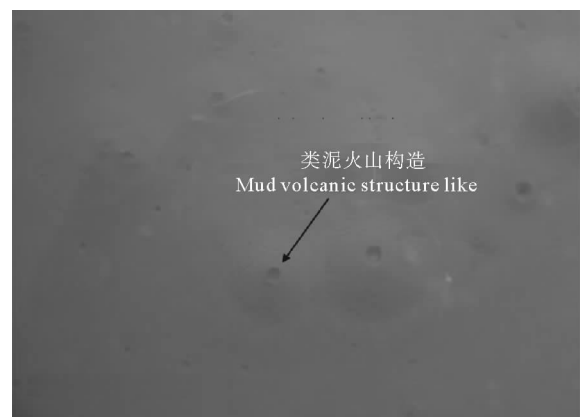


图2 试样制备完成后土床表层的类泥火山构造

Fig.2 Mud volcano on the surface of soil bed after sample preparation

随后进行试验(见图 3)。控制造波器使之保持产生周期 0.9 s、高度为 15~20 cm 左右的波浪,每天持续作用 60~80 min,连续作用 5 天后,将上层清水取出,取出土样观察其内部孔隙变化。

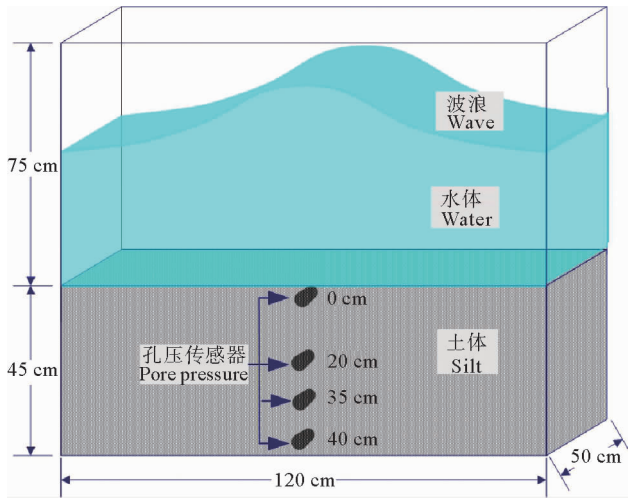


图 3 水槽试验模型示意图

Fig.3 Schematic diagram of wave flume

2 试验结果

2.1 水夹层与悬浮层的形成

水夹层的形成是通过水槽外侧的玻璃观测,在波浪的作用下,实验初期土体变形较小,土体的变形几乎表现为弹性体;20 min 后,上层 15 cm 厚的土层呈现波形振荡,其频率和相位与水波的频率及相位一致。同时在水槽的中间位置出现了裂隙(见图 4(a)),该裂隙长度达到 20 cm,厚度最大为 3 cm,内部被水所填充,该裂隙为水夹层的典型特征。在第二次实验过程中(见图 4(b)、(c)),水夹层内的水逐渐被土颗粒所取代,形成悬浮层。从颜色上可以看出夹层内土颗粒的颜色几乎与土床表层粘粒土的颜色一致,因此可以判断该夹层内的填充物具有很高的粘粒含量。

与水夹层同时出现的还有“W”形的滑动面(见图 4(a)),该滑动面在水槽中间和两边位置较高,而在水槽两边各 1/4 处则较低。从玻璃表面可以看到这条滑动面的颜色较深,有明显的滑动迹象,水夹层就位于滑动面内。在第二次的试验中在原先滑动面的上方生成新的滑动面(见图 4(b)、(c)),新滑动面上部土体依然发生振动,老滑动面不再滑动。

2.2 孔隙水压力变化

海床中波浪产生的循环剪应力能引起海床内超孔隙水压力累积,这是富含气泡的海床土中气泡运移及重新分布的动力,因此孔隙水压力观测是掌握海床气体运移的重要手段。试验中水槽内埋设的孔隙水压力传感器很好地记录了土体中孔隙水压力的变化。

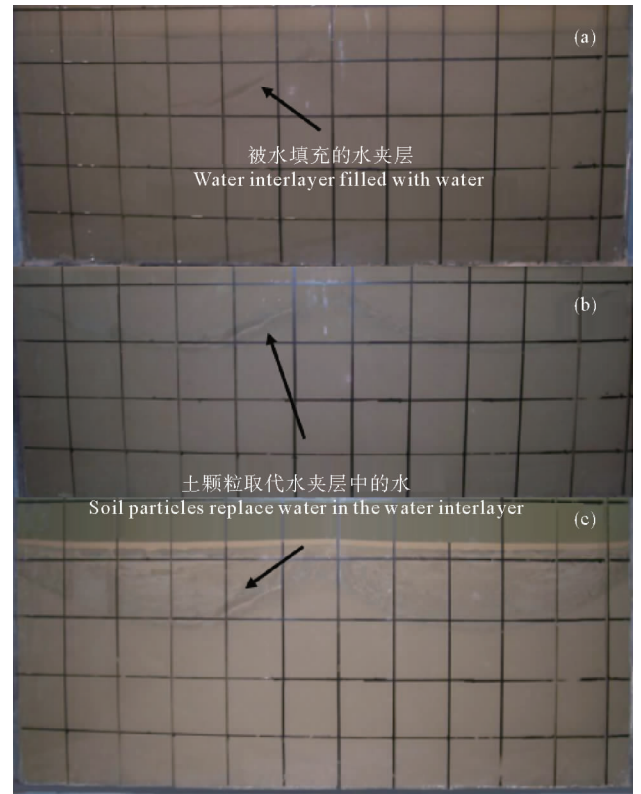


图 4 水夹层发展过程

Fig.4 Development process of water inter-layer

图 5 为连续 5 天内荷载作用时间内波浪作用下土床内超孔隙水压力变化规律。土床表层的孔隙水压力探头记录了海床表面的波动现象,表现为孔隙水压力在 0 点上下波动。可以看出,5 天内作用的波压力幅值随着时间而逐渐增加,表明土床的刚度越来越大。

在第 1 天的荷载作用过程中,孔隙水压力随着荷载作用时间而缓慢增加,但作用到 10 min 后,40 cm 处的孔隙水压力出现震荡性的波动,并在此过程中缓慢降低至 0,说明土层底部与表层形成了贯通。从第 2 天开始,施加荷载作用过程中孔隙水压力迅速升高,并达到稳定值,且孔隙水压力探头埋置越浅,则孔隙水压力发展速率越快。第 5 天时土床内的孔隙水压力由第 2 天的 1.5 kPa 降低至 0.3 kPa。从连续 5 天内孔隙水压力的累积现象可以看出,第 1 天加载时土床内的土较为松软,强度较低容易产生渗流破坏,因此能够轻易形成水夹层现象。通过第 1 天的振动作用后土床内土的密实度逐渐增加,导致孔隙水压力虽然产生累积但土层内部相对稳定。

2.3 土体内气泡分布

实验后取出滑动层的土样,并进行了观察。土样内存在大量的气泡,但分布极不均匀。图 6 为水槽一端附近的取样剖面照片。从图中可以看出,气泡在沿深度分布极为不均匀,滑动面处气泡密度较高,而非滑动面处气泡数量明显减少。

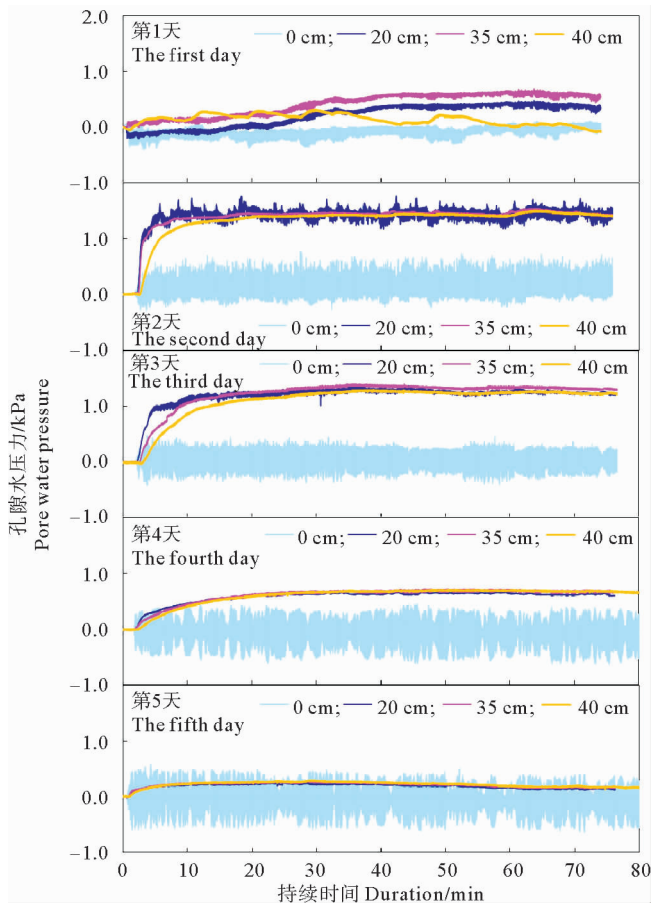


图5 孔隙水压力发展历时曲线

Fig.5 Development duration curve of pore water pressure

到30个。在距离左边壁100~110 cm处土样内的气泡则呈多层倾斜带状分布,这些气泡带与水平面夹角在 $30^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 内,并且越接近土样表层,倾角越小,这正与滑动面的分布完全一致。滑动面的部分气泡内壁因为饱水比较光滑,而另外一部分内壁则相对比较粗糙,并且有颗粒物散落在孔洞内,这可能是由于土体的振动导致孔洞内壁上的颗粒物质脱落堆积于孔洞内。

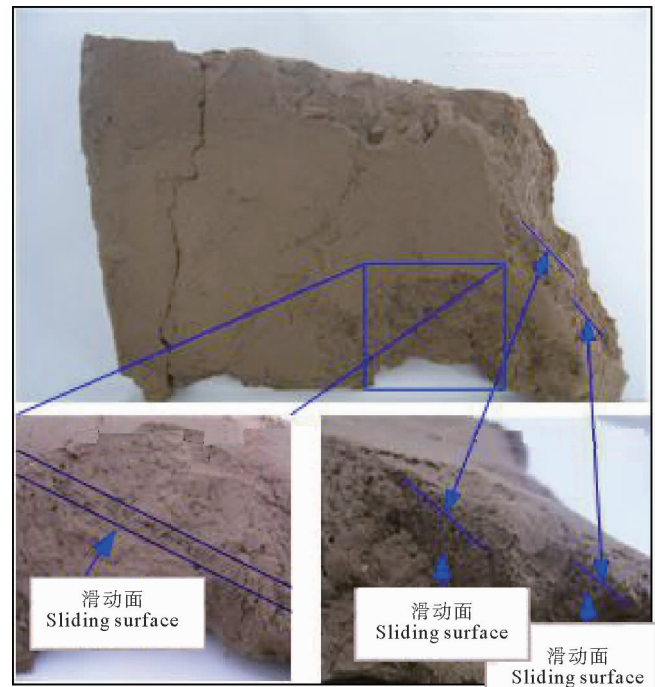


图7 滑动面气泡分布情况

Fig.7 Bubble distribution in sliding profile



图6 海床剖面气泡分布情况

Fig.6 Bubble distribution on sliding surface

3 讨论

气体不仅能够改变土体性质而且可以在其内部迁移。近年来的研究发现,土体在动荷载作用过程中除孔隙水压力升高外还经常伴随着孔隙的重新分布^[31-33]。这种孔隙分布由孔隙水压力梯度引起,随着动力荷载引起的孔隙水向上流动,底部的土层密实强度增加而上部土层密实强度减小。孔隙水的流动使得土层内的孔隙发生改变,土体的独立气泡的运移过程受控于外界荷载与土体的状态,其动力主要是孔隙水的压力梯度^[24-26]。当土体较为松软时,在由外界动力荷载作用导致的土体内部孔隙水压力梯度增加和孔隙内部的气泡提供上浮力的共同作用下,气体突破土体的瞬时强度,产生一定量的运移。在滑动面上气体受到的阻力显著降低,因此更容易产生运移。这也是本试验能够在滑动面附近看到水夹层以及大量气泡的原因。

与海底麻坑形成机理是气体压力突破土体强度相似^[34-35],波浪荷载作用产生的孔隙迁移过程也涉及到土体的强度问题^[25-26,29],但由于低含量气体靠自身的浮力

水槽总长120 cm,在距离左边壁115 cm处深度3~4 cm和8~10 cm两个土体滑动面所在深度上,孔隙的数量在100个以上,而其它深度范围内的孔洞数量不

无法突破土体自身强度,需借助于波浪荷载产生的累积孔隙水压力以及剪切应力来降低并克服土体强度,从而使孔隙能够产生缓慢迁移。因此除外界荷载外,土体密实度也是影响孔隙迁移的重要因素。松软土体相比于密实土体,更容易累积孔隙水压力并产生破坏。

孔隙运移的结果将导致两方面的影响。首先孔隙运移将导致土体力学性质发生重要改变,与固结导致的土体均匀变形不同,含气泡的孔隙运移导致部分土体更加密实,而另外一部分土体则更加松软。当大量含气孔隙运移并集中时可能会在土体中形成一个气囊,对工程建设产生不利影响。

4 结论

为研究波浪荷载作用下土体内部孔隙运移过程,本文通过室内方形水槽开展了波浪荷载对孔隙迁移过程影响试验研究,并取得以下结论。

(1)对于松软土体,波浪荷载会导致土体发生剪切破坏形成滑动层,而孔隙水则会在累积孔压作用下沿着滑动层形成的孔隙发生迁移。

(2)波浪荷载导致土体内部孔隙迁移,其迁移过程受外界荷载以及土体性质影响显著。

(3)含气泡的孔隙会在波浪循环荷载过程中的负压作用和气体自身浮力作用的共同影响下发生迁移,循环荷载中的负压作用越强,含气泡的孔隙越容易发生迁移。

(4)孔隙向上迁移后会导致底部土体的密实度增加,上方土体的密实度下降。

(5)土体的松软程度会影响滑动面的形成,越松软的土体越容易形成滑动面。相比于密实土体,孔隙在滑动面中更容易发生迁移。

参考文献:

- [1] 陈静生, 张宇, 于涛, 等. 对黄河泥沙有机质的溶解特性和降解特性的研究——再论黄河水的 COD 值不能真实反映其污染状况[J]. 环境科学学报, 2004(1): 1-5.
Chen Jingsheng, Zhang Yu, Yu Tao, et al. Research on the dissolution and degradation characteristics of the organic matter of the Yellow River sediments: Rediscussion that the COD value of the Yellow River water cannot truly reflect its pollution status[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2004(1): 1-5.
- [2] Sills G C, Wheeler S J. The significance of gas for offshore operations[J]. Continental Shelf Research, 1992, 12(10): 1239-1250.
- [3] Dusseault. Undrained volume and stress change behaviour of unsaturated very dense sands[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1979, 16(4): 627-640.
- [4] Grozic J, Nadim F, Kvalstad T J. On the undrained shear strength of gassy clays[J]. Computers and Geotechnics, 2005, 32(7): 483-490.
- [5] Hong Y, Wang L, Yang B, et al. Stress-dilatancy behaviour of bubbled fine-grained sediments[J]. Engineering Geology, 2019, 260: 105196.
- [6] Mabrouk A, Rowe R K. Effect of gassy sand lenses on a deep excavation in a clayey soil[J]. Engineering Geology, 2011, 122(3-4): 292-302.
- [7] Chaney R C. Saturation effects on the cyclic strength of sands[J]. Earthquake Engrg and Soil Dynamics, 1978, 6: 342-358.
- [8] Yoshimi Y, Tanaka K, Tokimatsu K. Liquefaction resistance of partially saturated sand[J]. Soilsand Foundations, 1989, 29(3): 157-162.
- [9] Bishop A W. The influence of an undrained change in stress on the pore pressure in porous media of low compressibility[J]. Géotechnique, 1973, 3(3): 435-442.
- [10] Fredsoe Jorgen, Sumer B Mutlu. Mechanics of Scour in the Marine Environment[M]. Singapore: World Scientific Publishing Company, 2002.
- [11] Martin G R, Finn W, Seed H B. Fundamentals of liquefaction under cyclic loading[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1975, 101(5): 423-438.
- [12] Yang Y, Muraleetharan K K. The middle surface concept and its application to the elasto-plastic behaviour of saturated sands[J]. Geotechnique, 2003, 53(4): 421-432.
- [13] Rad N S, Vianna A, Berre T. Effect of gas on undrained static and cyclic strength of sand[J]. Journal of the Geotechnical Engineering, 1994, 120(4): 716-736.
- [14] 唐益群, 叶为民. 长江口软土中沼气与隧道安全施工技术研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 1996, 24(4): 465-470.
Tang Yiqun, Ye Weimin. Marsh gas in soft stratum at the estuary of the Yangtse River and safety measures of construction of the tunnel[J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 1996, 24(4): 465-470.
- [15] 唐益群, 周念清, 王建秀, 等. 软土环境工程地质学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007: 192-214.
Tang Yiqun, Zhou Nianqing, Wang Jianxiu, et al. Soft Soil Environmental Engineering Geology [M]. Beijing: China Communication Press, 2007: 192-214.
- [16] 李越. 沼气对盾构隧道的影响及施工控制措施[J]. 城市轨道交通研究, 2013(2): 24-29.
Li Yue. The influence of biogas on shield tunnel and the construction control measures[J]. Urban Mass Transit, 2013(2): 24-29.
- [17] Esrig M I, Kirby. Soil capacity for supporting deep foundation members in clay[J]. Astm Special Technical Publication, 1979(4): 27-63.
- [18] Ruppel C, Boswell R, Jones E. Scientific results from Gulf of Mexico gas hydrates joint industry project leg1 drilling: Introduction and overview[J]. Marine and Petroleum Geology, 2008, 25(9): 819-829.
- [19] Xu Y S, Wu H N, Shen J S, et al. Risk and impacts on the environment of free-phase biogas in quaternary deposits along the Coastal Region of Shanghai[J]. Ocean Engineering, 2017, 137(1): 129-137.
- [20] Cathles L M, Zheng S, Chen D. The physics of gas chimney and pockmark formation, with implications for assessment of seafloor hazards and gas sequestration[J]. Marine and Petroleum Geology, 2010, 27(1): 82-91.

- [21] Yunbao B, Sun A. Gas hydrates associated with gas chimneys in fine-grained sediments of the northern South China Sea[J]. *Marine Geology*, 2012(311-314): 32-40.
- [22] Mienert J. Methane Hydrate and Submarine Slides[M]. [s.l.]: Encyclopedia of Ocean Sciences, 2009: 790-798.
- [23] Saunois M, Bousquet P, Poulter B, et al. The global methane budget 2000—2012[J]. *Earth System Science Data Discussions*, 2016, 8(2): 1-79.
- [24] Choi J H. X-ray computed-tomography imaging of gas migration in water-saturated sediments: From capillary invasion to conduit opening[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38: L17310.
- [25] Fauria K E, Rempel A W. Gas invasion into water-saturated, unconsolidated porous media: Implications for gas hydrate reservoirs[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2011, 312(1-2): 188-193.
- [26] Ye W M, Xu L, Ye B, et al. Experimental investigation on gas migration in saturated Shanghai soft clay[J]. *Engineering Geology*, 2017, 222: 20-28.
- [27] Stefano Rocco. An experimental model of episodic gas release through fracture of fluid confined within a pressurized elastic reservoir[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(2): 751-759.
- [28] Stranne C, Regan M, Jakobsson M. Modeling fracture propagation and seafloor gas release during seafloor warming-induced hydrate dissociation[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(16): 8510-8519.
- [29] Sun Zhonghao, Carlos J Santamarina. Grain-displacive gas migration in fine-grained sediments[J]. *Journal of Geophysical Research; Solid Earth*, 2019, 124(3): 2274-2285.
- [30] Andersen K H, Rawlings C G, Lunne T A, et al. Estimation of hydraulic fracture pressure in clay[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1994, 31(6): 817-828.
- [31] Algar C K, Boudreau B P, Barry M A, et al. Initial rise of bubble in cohesive sediments by a process of viscoelastic fracture[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2011, 116(B4): B04207.
- [32] Katsman R, Ostrovsky I, Makovsky Y. Methane bubble growth in fine-grained muddy aquatic sediment: Insight from modeling[J]. *Earth and Planetary Sciences Letters*, 2013(377-378): 336-346.
- [33] Sirhan S T, Katsman R, Lazar M. Methane bubble ascent within fine-grained cohesive aquatic sediments: Dynamics and controlling factors[J]. *Environmental Science and Technology*, 2019, 53(11): 6320-6329.
- [34] Solheim A, Elverh I A. A pockmark field in the Central Barents Sea: Gas from a petrogenic source? [J]. *Polar Research*, 1985, 3(1): 11-19.
- [35] Karisiddaiah S M, Veerayya M. Occurrence of pockmarks and gas seepages along the central western continental margin of India[J]. *Currentence*, 2002, 82(1): 152-160.

Experimental Study on Wave Induced Pore Migration in Seabed

Cui Xiqin¹, Dong Wenbin², Zang Wenkun¹, Xu Zhou³, Xu Xiaofei⁴, Tao Wei⁴

(1. Qingdao Institute of Surveying and Mapping, Qingdao 266100, China; 2. Qingdao Qicheng Environmental Technology Co. Ltd., Qingdao 266100, China; 3. China Communications Ocean Construction Development Co. Ltd, Binhai New District, Tianjin 300457, China; 4. Qingdao Laoshan Bureau of Agriculture and Rural Affairs, Qingdao 266100, China)

Abstract: This paper carried out an experimental study on the influence of wave loads on the pore water migration process through an indoor square tank. The results show that for soft sediments, wave loads would cause the sediments to undergo shear failure and therefore forming the flow slide, while the accumulated pore-space will follow along the flow slide to migrate. For the formation of the drainage channel, sediments compaction has a significant impact on the accumulation process of wave induced pore water pressure. The denser the sediments, the smaller amplitude of cumulative pore pressure will be. Wave load causes the internal pores of sediments to migrate. In general, the migration process is affected by the external load as well as the nature of sediments. The pore of bubbles will migrate under the combined influence of the negative air pressure in the process of wave cyclic loading and the buoyancy of the gas itself. The stronger the negative air pressure in the cyclic loading, the easier the pore of bubbles will migrate. The upward sediments migration of pore spaces results in an increase in the compactness of the sediments at the bottom and a decrease in the compactness of the sediments above. The sediments compaction will affect the formation of the gliding surface. The softer the sediments, the easier it is to form the gliding surface. Compared with the compact sediments, the pore spaces are more likely to migrate on the gliding surface.

Key words: seabed sediments; free gas; water tank test; pore migration