

文章编号:1002-3682(2015)01-0011-09

成层土体界面抗剪强度试验研究*

许国辉^{1,2}, 房虹汝^{1,2}, 张春艳^{1,2}, 胡光海³, 周勇华⁴

(1. 中国海洋大学 环境科学与工程学院, 山东 青岛 266100; 2. 海洋环境与生态教育部重点实验室, 山东 青岛 266100; 3. 国家海洋局 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 4. 青岛环海海洋工程勘察研究院, 山东 青岛 266033)

摘要:基于在自行设计的土体界面抗剪强度测定装置中进行的室内试验结果, 对不同含水率、不同黏粒质量分数、不同剪切速率下成层土体的界面抗剪强度及界面摩擦力进行了研究。结果表明: 在工况相同的条件下, 当黏粒质量分数较低时, 成层土体间的界面抗剪强度及界面摩擦力随着黏粒质量分数的增加而增大; 当黏粒质量分数较高时, 成层土体间的界面抗剪强度及界面摩擦力随着黏粒质量分数的增加而减小。成层土体间的界面抗剪强度及界面摩擦力随着含水率的增加而减小。当改变剪切速率时, 成层土体间的界面抗剪强度随着剪切速率的增加而增大, 但界面摩擦力几乎无变化, 保持在一个稳定状态。

关键词:黏粒质量分数; 含水率; 剪切速率; 抗剪强度; 摩擦力

中图分类号: TV221.2

文献标识码: A

海洋中海床不稳定现象比较普遍, 当经历强烈的外力作用时, 海床内产生的剪切应力、孔隙水压力足以使海床失稳, 进而发生海底滑坡或液化^[1-7]。大规模的海底滑坡不但会对深海油气钻探、输油管道、海底电缆等海底工程设施造成破坏, 而且还可能导致海啸, 极大地危害着人们生命和财产的安全^[8]。

海底松散沉积物滑坡后沿斜坡向下的运移过程中由于不断混入水体, 会演变成碎屑流^[9]; 强烈的波浪作用于海床上, 海床土体可以发生液化, 液化后的土体将发生波动^[10-11]; 海洋工程泥沙研究中, 强烈波浪海流作用会导致海底泥沙层移运动的发生^[12-14]。以上3种情况均形成了具有不同物理性质的两层土体, 并在运动过程中出现成层现象。海底碎屑流与斜坡底床间、液化波动土体与下部底床间、层移泥沙与下部底床间的运动关系, 可以看作流体与下部沉积土体间的摩擦关系。此类上部具有一定自由流动性土体与下部土体间的相互作用与运动, 可归为两个土层的问题, 解决此类问题的关键是解决其相互作用界面间的剪切力或摩擦力问题。而在以往的研究中, 学者们大多就滑坡模式、机理、滑坡

* 收稿日期: 2014-11-25

资助项目:国家自然科学基金——粉质土海底波致粉砂流及其运动特性研究——以黄河水下三角洲为例(41076021); 国家海洋局海洋公益性行业科研专项——近海海底地质灾害预测评价及防控关键技术研究(201005005-6)

作者简介:许国辉(1972-), 男, 教授, 博士, 主要从事海洋工程地质、海岸工程环境方面研究。E-mail: xuguohui@ouc.edu.cn

(王 燕 编辑)

体整体运移距离^[15-17]、海床液化的动力响应^[1,10-11,18]、泥沙层运动厚度^[12-14]和泥沙起动^[19]等方面进行了研究,或仅对实验现象进行了描述,但并未对上部流动性土体与下部土体间的作用力情况进行阐述。海底碎屑流或是液化波动土的运动与停积对海底管缆和海洋建筑物的安全有着很重要的影响,因此,如何描述两个土层相互作用界面间的剪切力或摩擦力对海洋工程建设具有重要的意义。

为此,研究设计了一套简单的土体界面剪切力测定装置。该装置分为上、下两个剪切盒,可以盛装不同的土体,其中上剪切盒未被固定,可使土体沿相对自由滑面破坏,且高度较小,盛装土体重量轻,使得滑动界面不因应力较高而受到强烈约束,能够较好模拟实际上部为流态土体的情况。本文开展的试验,即利用此装置测定成层土体的破坏剪切力和运动摩擦力,以给出流动性土体与下部土体间相互作用的剪切力或摩擦力问题的解决办法。这对进一步研究流动性土体的运动或停积以及海岸工程基础稳定性具有一定的指导意义。

1 试验研究

1.1 试验设备

本试验在自行设计的土体界面剪切力测定装置中进行。装满土体的上剪切盒轻放于装满不同性质土体的下剪切盒上,使上、下剪切盒中的土层接触,如图1所示。步进机传送动力 F 给下剪切盒,使上、下剪切盒内土体产生相对运动,通过调节步进机速率,得到试验需要的剪切速率。该装置中,上剪切盒除了与压力传感器接触外,无其他外力束缚,这可使其内的土体处于相对自由状态,从而达到所研究问题对土体状态的要求;而下剪切盒的长度是上剪切盒长度的5倍,可使土体在剪切过程中接触面积保持不变;并且上、下剪切盒并未直接接触。综合以上3点可知,土体在剪切过程中可沿相对自由滑面破坏而非某一固定面破坏。试验装置的结构如图2所示。其中,上、下剪切盒规格分别为 $60\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 60\text{ mm}$ 、 $300\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 60\text{ mm}$,壁厚均为 8 mm 。

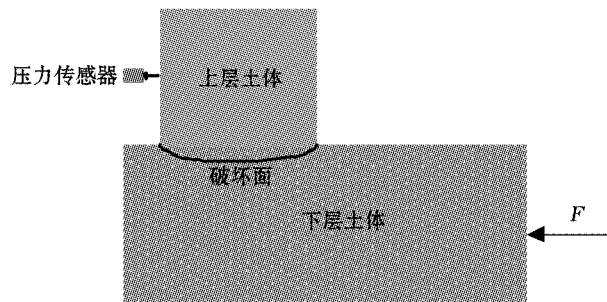
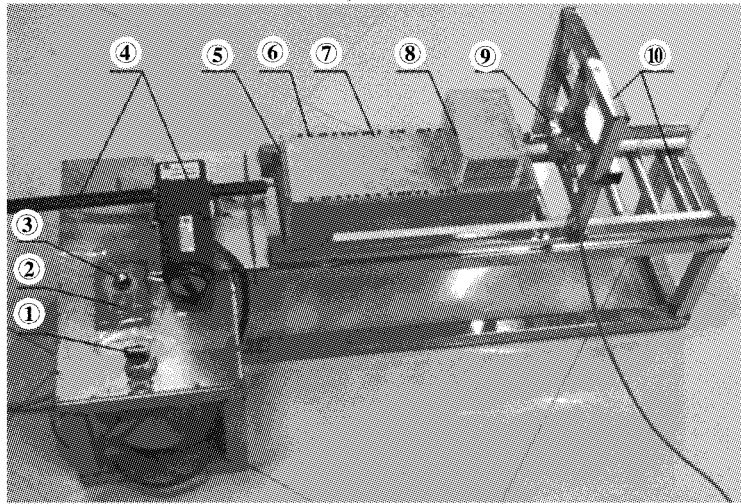


图1 模拟试验示意图

Fig. 1 A schematic diagram of simulation test



注: ①方向调节器; ②开关; ③速度调节器; ④步进机; ⑤下剪切盒;
⑥滑槽; ⑦滚珠; ⑧上剪切盒; ⑨压力传感器; ⑩固定支架

图 2 土体界面剪切力测定装置

Fig. 2 Device for measuring the soil interfacial shearing force

1.2 试验方案

1.2.1 试验土样制备

1) 将取自黄河三角洲的粉质土烘干,用密度计法(含筛析法)测定该粉土黏粒的质量分数。

2) 利用水洗或加不同量的高岭土的方式配成黏粒质量分数分别为 5%, 9%, 15%, 21% 和 30% 的土样,并密封保存。配好的土样颗粒分析试验结果见表 1。

3) 分别称取一定质量不同黏粒质量分数的土样,按照需要的目标含水率加水、调匀。配好后密封保存。

表 1 试验用土样颗分试验结果(%)

Table 1 Results of grain-size analysis of the soil samples used for the tests (%)

黏粒 质量分数/%	粒 径/mm						
	>0.250	0.250~0.075	0.075~0.032	0.032~0.016	0.016~0.008	0.008~0.005	<0.005
5	0.1	41.9	49.3	0.1	0.9	2.4	5.3
9	0.0	19.7	61.2	4.3	3.2	2.6	9.0
15	0.1	4.9	53.8	20.5	3.3	2.4	15.0
21	0.1	3.8	45.9	20.8	7.1	1.6	20.7
30	0.0	2.9	39.1	17.5	6.9	3.8	29.8

1.2.2 试验过程

1.2.2.1 黏粒质量分数对土体界面抗剪强度影响试验

分别将黏粒质量分数为9%,15%,21%和30%的干土加水调配成含水率为30%的土样进行试验。将步进机的速率调至0.95 mm/s保持不变。向下剪切盒加入黏粒质量分数分别为9%,15%,21%和30%的土样,上剪切盒内加入黏粒质量分数分别为5%,9%,15%,21%和30%的土样,以此来探讨黏粒质量分数对土体界面抗剪强度的影响。在试验过程中,保持下剪切盒内土样的黏粒质量分数、含水率和密度以及上剪切盒内土样的含水率和密度不变。

1.2.2.2 含水率对土体界面抗剪强度影响试验

分别取配好的黏粒质量分数为9%,15%的土制成含水率为32%,30%的均匀土样密封保存待用。向上剪切盒内加入黏粒质量分数为9%、含水率为32%的土样后,其上方用玻璃片密封,静置于吸水纸上12 h。静置结束后向下剪切盒中加入黏粒质量分数为15%、含水率为30%的土样,装样结束后,将滚珠置于滑槽内,然后将上剪切盒及静置后的土样放置于靠近压力传感器一侧,将步进机的速率调至0.95 mm/s进行剪切盒试验。试验结束后取上剪切盒界面处土样测含水率。

将上剪切盒内土样分别静置固结18,24,36,48 h后,重复上述步骤。

1.2.2.3 剪切速率对土体界面抗剪强度影响试验

取黏粒质量分数分别为5%,15%,21%和30%的土样配成含水率为30%土体,向下剪切盒加入黏粒质量分数为15%、含水率为30%的土样,并保持不变,改变上剪切盒内土样的黏粒质量分数,在剪切速率分别为0.95,8.30 mm/s时进行试验。

2 试验结果

以下剪切盒黏粒质量分数为15%的土样试验结果为例,分析黏粒质量分数对土体界面抗剪强度及摩擦力的影响情况。由图3、图4可以看出,在同一剪切速率的作用下,界面剪切力随着剪切位移的增加呈现先增加、后减小、最后趋于稳定的规律;不同黏粒质量分数的土样剪切力达到极值所对应的剪切位移不同,随着黏粒质量分数的增加,剪切力最大值与摩擦力先增加、后减小(图3);不同含水率土样的剪切力达到极值所对应的剪切位移不同,呈负相关关系,剪切力最大值与摩擦力随着含水率的增加而减小(图4)。由图5可见,在同一黏粒质量分数、含水率的情况下,剪切力随着剪切位移的增加亦呈现先增加、后减小、最后趋于稳定的规律;剪切力达到最大值所对应的剪切位移亦不同,随着剪切速率的增加,剪切力最大值呈现增加的趋势,但摩擦力的变化却不明显。

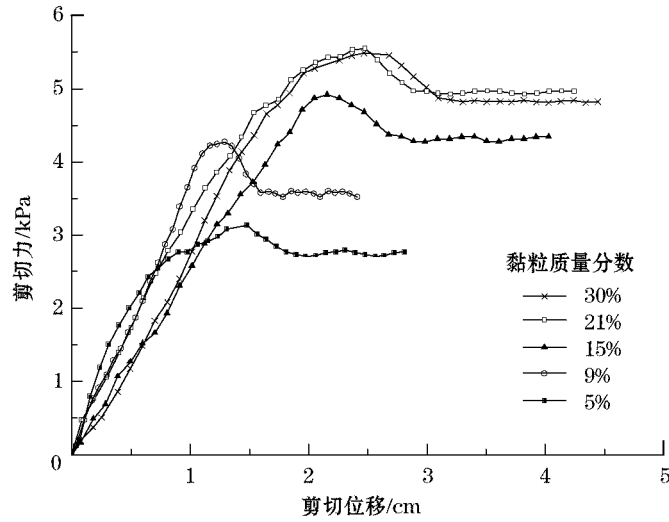


图 3 下剪切盒黏粒质量分数为 15% 时不同黏粒质量分数土样试验结果
 Fig. 3 The test results of interfacial shear strength among the soil samples with different clay content when the clay content is 15% in the lower shearing box

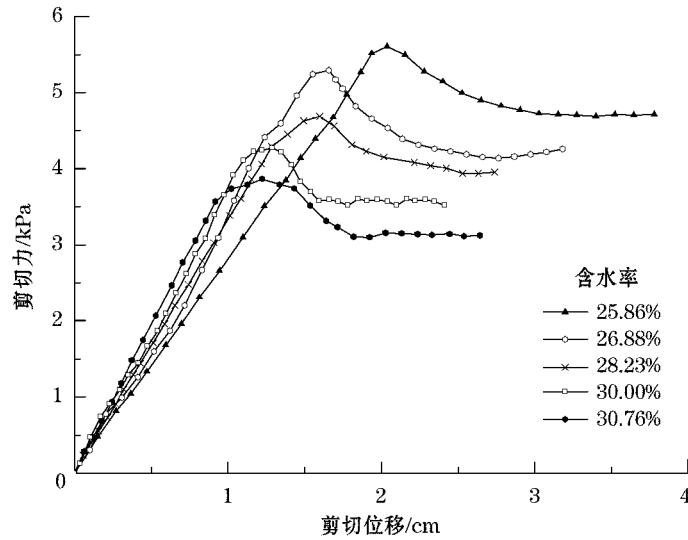


图 4 不同含水率土样试验结果
 Fig. 4 The test results of interfacial shear strength among the soil samples with different water content

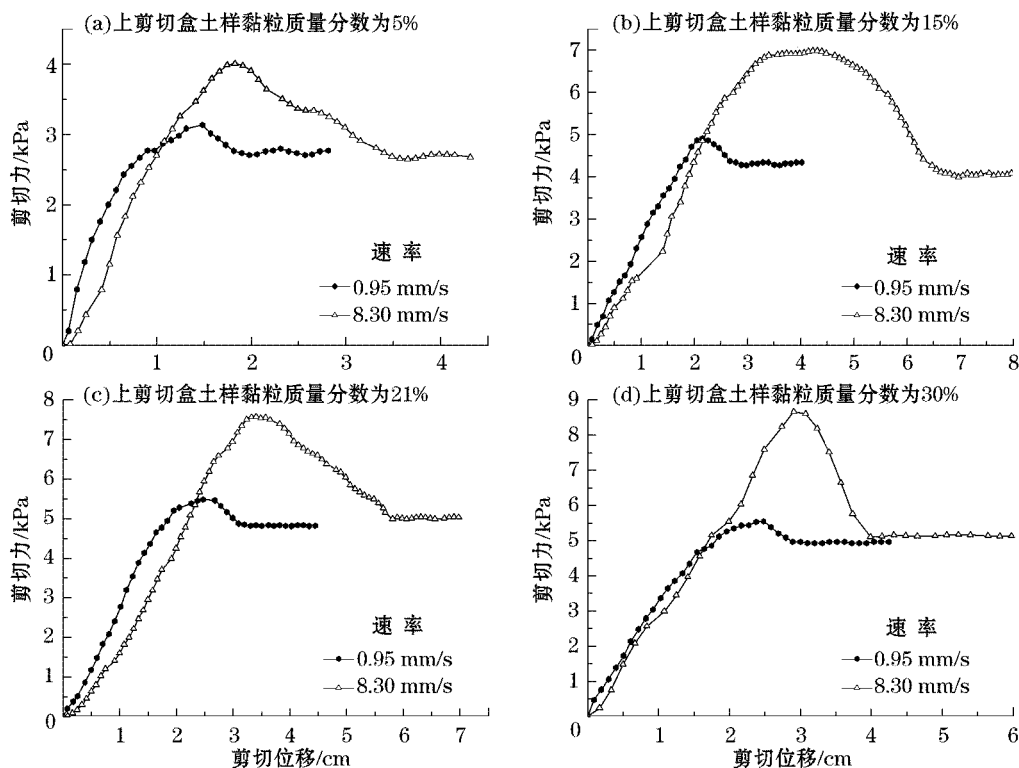


图5 不同剪切速率试验结果

Fig. 5 The test results of interfacial shear strength among the soil samples with different shear rate

3 分析与讨论

土体的抗剪强度即土体抵抗剪切破坏的能力;摩擦力即土体受剪切时,剪切面上下土颗粒相对移动或有相对移动趋势时,接触面相互摩擦产生的阻力。本文取试验得到的最大剪切力为抗剪强度;为控制摩擦力的相对稳定,取剪切力平稳值的平均值为摩擦力。为了反映界面抗剪强度及界面摩擦力与黏粒质量分数、含水率、剪切速率的关系,分别绘制了在相同工况下,不同黏粒质量分数、含水率和剪切速率时,剪切力的变化图,如图6、图7和图8所示。

从图6中可以看出,土体间的界面抗剪强度、界面摩擦力与上覆土体的黏粒质量分数密切相关,但并不是呈单调递增或单调递减关系,而是在某个黏粒质量分数时取得极大值。由图7可以看出,当下剪切盒内土体含水率不变,且上、下剪切盒内土体黏粒质量分数不变时,成层土体间的界面抗剪强度及界面摩擦力随着上剪切盒内土体含水率的增加而降低。从图8可以看出,对于相同的土体,剪切速率越大,得到的土体界面抗剪强度越大;但界面摩擦力随着剪切速率的变化不明显,一直保持在一个比较平稳的状态。

土体的抗剪强度包括内摩擦角和黏聚力两部分。内摩擦包括颗粒之间相互滑动时所产生的滑动摩擦和颗粒之间的咬合摩擦。黏聚力取决于土颗粒之间的各种物理化学作用

力,主要包括库伦力(静电力)、范德华力、胶结作用力等。在工况相同时,黏粒质量分数越高,土体的黏聚力、内摩擦角越大,从而使土体的抗剪强度和运动摩擦力随之增大;但当黏粒质量分数达到一定值后,其不再是影响抗剪强度与摩擦力的主要因素。当土的含水率增加时,水分被吸附于土颗粒周围,在土颗粒表面形成润滑剂,使内摩擦角变小,薄膜水变厚,从而使抗剪强度与摩擦力减小。当剪切速率增加时,外力对土体有冲击力作用,这会使土体间抗剪强度增大;而黏粒质量分数不同,其变化值也不同,黏粒质量分数越大,抗剪强度变化值越大,这是因为黏粒质量分数的增加使得土体间的黏聚力增加,在大的冲击力作用下,土体间抵抗破坏的力亦增加,表现为抗剪强度增加。

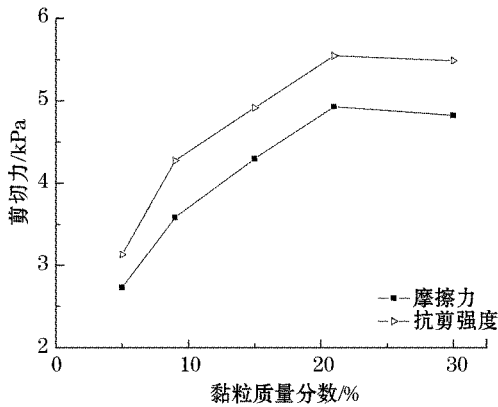


图 6 下剪切盒黏粒质量分数为 15% 时不同黏粒质量分数土样试验结果比较
Fig. 6 Comparison of the test results from the soil samples with different clay content when the clay content is 15% in the lower shearing box

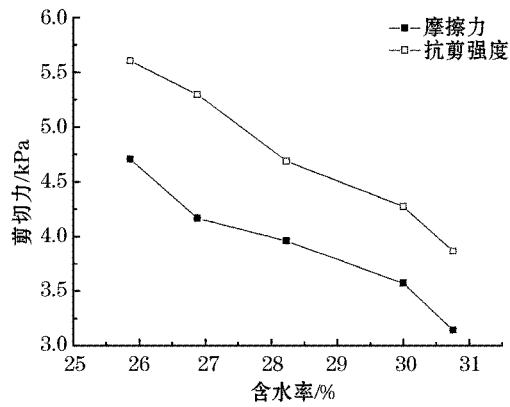
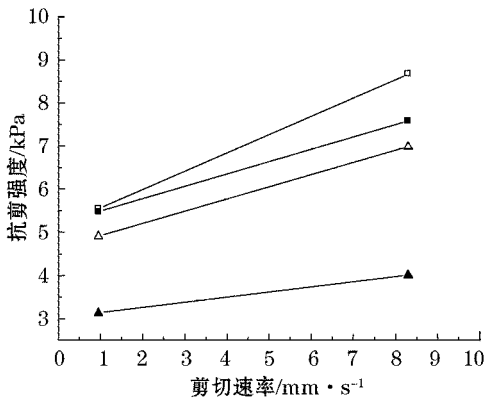
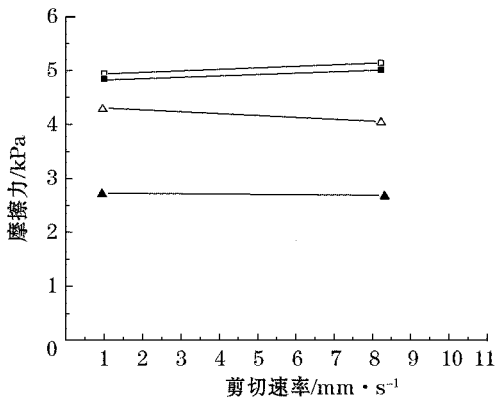


图 7 不同含水率土样试验结果比较
Fig. 7 Comparison of the test results from the soil samples with different water content



(a) 抗剪强度与剪切速率之间的关系



(b) 摩擦力与剪切速率之间的关系

上剪切盒黏粒质量分数 □— 30% ■— 21% △— 15% ▲— 5%

图 8 不同剪切速率试验结果比较

Fig. 8 Comparison of the test results from the soil samples with different shear rate

4 结 论

本文利用自行设计的土体界面抗剪强度测定装置中进行的室内试验,以黄河三角洲粉质土为研究对象,通过压力传感器记录不同含水率、不同黏粒质量分数、不同剪切速率下成层土体的剪切力,对成层土体间的界面抗剪强度及界面摩擦力进行了研究,得出以下结论:

1)成层土体间的界面抗剪强度与土体的黏粒质量分数、含水率、剪切速率都密切相关。成层土体间的界面抗剪强度在黏粒质量分数方面的差异性表现为随着黏粒质量分数的增加出现一个极大值,之后开始减小;在含水率方面表现为单调递减的特性,而在剪切速率方面表现为单调递增的特性。

2)成层土体间的界面摩擦力与土体的黏粒质量分数、含水率都密切相关,但与剪切速率无关。成层土体间的界面摩擦力在黏粒质量分数方面的差异性表现为随着黏粒质量分数的增加出现一个极大值,之后开始减小;在含水率方面表现为单调递减的特性;但随着剪切速率的变化,其值大小几乎不变。

参考文献:

- [1] JENG D S. Mechanism of the wave-induced seabed instability in the vicinity of a breakwater: a review[J]. *Ocean Engineering*, 2001, 28(5): 537-570.
- [2] BÜNZ S, MIENERT J, BERNDT C. Geological controls on the Storegga gas-hydrate system of the mid-Norwegian continental margin[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 209(3-4): 291-307.
- [3] CANALS M, LASTRAS G, URGELES R, et al. Slope failure dynamics and impacts from seafloor and shallow sub-seafloor geophysical data: case studies from the COSTA project[J]. *Marine Geology*, 2004, 213(1): 9-72.
- [4] WILSON C K, LONG D, BULAT J. The morphology, setting and processes of the Afen Slide [J]. *Marine Geology*, 2004, 213(1): 149-167.
- [5] URGELES R, LEYNAUD D, LASTRAS G, et al. Back-analysis and failure mechanisms of a large submarine slide on the Ebro slope, NW Mediterranean[J]. *Marine Geology*, 2006, 226(3): 185-206.
- [6] SULTAN N, VOISSER M, MARSSET B, et al. Potential role of compressional structures in generating submarine slope failures in the Niger Delta[J]. *Marine Geology*, 2007, 237(3-4): 169-190.
- [7] 张亮, 栾锡武. 对海底滑坡稳定性影响因素的定量分析[C]//中国地震学会第十三次学术大会论文集. 北京:中国地震学会, 2010.
- [8] 房臣, 张卫东. 天然气水合物的分解导致海底沉积层滑坡的力学机理及相关分析[J]. *海洋科学集刊*, 2010, 50: 149-155.
- [9] LOCAT J, LEE H J. Submarine landslides: Advances and challenges[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2002, 39: 193-212
- [10] 王欣. 波浪作用下粉质土底床液化后运动特征的试验研究[D]. 青岛:中国海洋大学, 2010.
- [11] 王欣, 许国辉, 孙永福, 等. 黄河水下三角洲液化海底的重新层化及其试验求证[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2013, 33(6): 29-40.

- [12] NNADI F N, WILSON K C. Bed-load motion at high shear stress: dune washout and plane-bed flow[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1995, 121(3): 267-273.
- [13] PUGH F J, WILSON K C. Velocity and concentration distributions in sheet flow above plane beds[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1999, 125(2): 117-125.
- [14] 魏龙, 王义刚, 黄惠明. 推移层厚度研究综述[J]. *泥沙研究*, 2014, (2): 72-80.
- [15] 杨作升, 陈卫民, 陈彰榕, 等. 黄河口水下滑坡体系[J]. *海洋与湖沼*, 1994, (6): 573-581.
- [16] 杨林青. 海底斜坡稳定性及滑移影响因素分析[D]. 大连:大连理工大学, 2012.
- [17] 常方强. 波浪作用下黄河口海底滑坡研究[D]. 青岛:中国海洋大学, 2009.
- [18] JENG D S, LEE T L. Dynamic response of porous seabed to ocean waves[J]. *Computers and Geotechnics*, 2001, 28(2): 99-128.
- [19] 董胜, 郑天立. 海岸防灾工程[M]. 青岛:中国海洋大学出版社, 2011: 213-221.

Experimental Study on Interfacial Shear Strength of Stratified Soils

XU Guo-hui^{1,2}, FANG Hong-ru^{1,2}, ZHANG Chun-yan^{1,2},
HU Guang-hai³, ZHOU Yong-hua⁴

(1. *College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China*; 2. *Key Laboratory of Marine Environment and Ecology, Ministry of Education, Qingdao 266100, China*; 3. *The First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China*; 4. *Qingdao Huanhai Marine Engineering Prospecting Institute, Qingdao 266033, China*)

Abstract: Based on the laboratory tests carried out with a self-designed device for measuring soil interfacial shear strength, the interfacial shear strength and the interfacial friction of the stratified soils with different clay content, water content and shear rate are studied. The results show that when it comes to the same conditions, between the stratified soils with a lower clay content the interfacial shear strength and the interfacial friction increase with the clay content, whereas between those with a higher clay content the interfacial shear strength and the interfacial friction decrease with the clay content. The interfacial shear strength and the interfacial friction between the stratified soils decrease with the increase of water content. When the shear rate of the stratified soils changes the interfacial shear strength increases with the shear rate, but the interfacial friction varies little.

Key words: clay content; water content; shear rate; shear strength; friction