

浪作用下海洋底床动态响应的研究

林 緬

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘 要: 有关波浪作用下的底床动态响应越来越引起人们的重视. 本文从海洋土的特点出发, 针对各向同性底床和各向异性底床, 详细论述了在线性波加载下, 波浪衰减和底床动态响应这两方面的研究现状. 在分析和比较已有研究成果的基础上, 对今后的研究方向提出了自己的看法.

关键词: 海洋土; 动态响应; 孔隙水压力; 渗透系数

中图分类号: P733. 1 **文献标识码:** A

文章编号: 1004 - 2903 (1999) 03 - 0108 - 07

1 引 言

海上结构物, 如导管架平台、重力式平台、海底输油管道等, 受到的重要载荷即是波浪. 波浪将力通过结构物传到地基中去, 使土体受力、变形. 同时波浪还直接将力作用于海底土层, 使结构物周围一定范围的土体应力场和变形场发生改变, 从而对结构物的稳定性产生影响. 随着我们国家沿海经济建设步伐的加快, 在港口建设、海上油气资源的开发输运等等方面, 越来越多地遇到海上结构物的地基稳定, 以及港口地区泥沙淤积、航道的疏淤等等这样一些问题. 我们知道海底被各式各样的沉积物所覆盖, 在中深度或浅水海域海床就受到波浪运动的影响, 由于波浪和海床的相互作用, 发生了波浪变形、反射、以及底床摩擦、非刚性底床效应等等一系列事件. 从 40 年代末, 人们就开始了这方面的研究^[1,2], 有一些结果已经列入海岸防护手册, 在当时的科学和技术条件下, 似乎只要确定某一海域的相应参数后就可以应用到海岸工程了, 然而在实际工作中, 一些海上结构物的失稳事件不断发生, 从而引起人们对该问题的进一步关注^[3~5]. 由于海洋土和陆地土不同, 海洋土是由岩石分化后得到的颗粒及微粒组成的饱和矿物集合体, 颗粒和颗粒之间的结合比陆地土要密切的多, 其物理性质具有一定的特殊性, 使得许多问题至今仍未得到完全解决.

在该文中我们从海洋土的特点出发, 将波浪作用下底床的动态响应的研究现状做一概

收稿日期: 1999年3月9日

基金来源: 国家自然科学基金资助项目 (编号: 19602021)

述, 就不同类型底床进行讨论, 同时也将结合我们的一些最新研究结果, 提出今后的研究方向.

2 海洋底床的特点

在考虑波浪加载下的海洋土的动力响应时, 其物理特性以及微观结构扮演着非常重要的角色. 海洋土的工程性质主要依赖于沉积物的组成, 比如: 沉积矿物的类型、形状以及颗粒大小的分布, 和环境荷载, 也就是加载波的波高、频率等两方面的因素. 我们知道, 不同类型的沉积物和波浪的相互作用的结果也有很大的不同. 从大的方面概括, 我们把海洋沉积物分为两大类, 即, 粘性沉积物 (cohesive sediment) 和非粘性沉积物 (cohesionless sediment). 对粘性沉积物来说, 其特性主要取决于物质内部复杂的物理和化学相互作用, 分子间的化学键力相对于脆弱的土骨架来说起着决定性的作用; 而对非粘性沉积物来说, 其特性主要取决于矿物颗粒的大小、形状、表面结构及其大小分布和颗粒与颗粒之间的相互作用, 从而使得它的本构关系也完全不同与粘性沉积物^[6]. 大量的现场以及实验室实验数据表明, 颗粒之间的化学作用改变了土层的物理特性^[7,8]. Bennett (1990) 从他们现场实地测量和实验室数据研究中发现^[9], 细颗粒在整个沉积物中所占的百分比影响着土的特性. 如果在床面附近的土层中细颗粒仅占到 10% ~ 20% 时, 就会使得沉积物中的孔隙急剧增加, 从而完全改变海床对波浪的响应. 正是这两种不同类型的沉积物, 使得底床对加载波的响应也不同, 如底床的运动方式、底床的液化或流化的力学机制、波浪衰减的特点等等. 因此我们说海洋土的动力响应是一个非常复杂的问题.

3 海床对线性波的响应

我们知道, 海床对波浪的动力响应需要考虑两方面的因素, 第一, 环境荷载, 包括载荷的密度、过程及频率; 第二, 海洋土的性质, 包括砂粒的性质、相对密度、应力应变历史等. 当波浪在海床上传播时, 海床上各点的压力都不相同, 这一变化的压力场在海底土层中产生循环应力场以及变化的孔隙压力, 在许多情况下孔隙压力将会自然摆动, 而当海底是由饱和的或部分饱和的细砂或粉砂组成时, 这种无粘性的疏松沉积物在波浪循环载荷的作用下, 颗粒间空间减少, 有可能会引起土中孔隙水压的增加, 孔隙水压的积累最终可能使海底土层抗剪强度大幅度降低, 导致土层发生明显的变形甚至发生液化. 由于土的抗剪强度和一般固体材料不同, 它不但与土的类别有关而且与土的物理状态、剪切过程中的排水条件有关. 土体是否发生液化既取决于循环载荷下土层中的残余孔隙压力, 又和土体所呈现动态变化密切相关.

当波从深海传播到水深小于波长的一半时, 就应该考虑底床的影响了. 开始人们主要考虑波能量的耗散, 而实际上应该把它看成是波能量的传送. 能量的传送在土床中将被消耗掉. 消耗的程度在不同的底床上也不同. 另外, 传送的能量还能引起海床内部应变的增加, 有时会引起底床的瞬时液化、流动或坍塌等现象, 尤其是有大风暴的情况下. 下面

我们分别讨论各向同性底床和各向异性底床的动态响应特征.

3.1 各向同性底床

研究海床的动态响应始于 50 年代初. 一些学者把海洋土看成是单相物质, 认为这种软沉积物可以近似地看作是粘性流体^[10,11]. 还有一些人假设软沉积物是不可压的粘弹性泥层, 并且具有 Voigt 体的性质^[12,13]. 然而假设土体为单相体并不能恰当的代表土体内部的摩擦机制, 而是仅仅考虑了底部摩擦的影响. 对 Mississippi 海湾的研究表明, 基于海洋土单相物质假设得出的计算数据远远小于观测结果. 实际上, 海洋土可以看成是一个两相系统, 即固相和液相所组成, 其中固相的土颗粒构成了土骨架, 液相的海水几乎充满了土的孔隙. 在波浪的动态扰动下, 土中的土颗粒和孔隙水发生耦合作用, 这一耦合过程是受土的物理特性以及扰动特点影响的. 正是由于海洋土的这种两相性, 使得波浪和海床的相互作用问题变得非常复杂. 长期以来人们就海洋土的物理特性做了各种各样的假设, 总的概括起来有三类, 第一类是把土骨架看成是刚性体, 孔隙水不可压^[14]; 第二类考虑了孔隙水的可压缩性^[15]; 最成熟的要数第三类模型, 除了考虑孔隙水的可压缩性之外, 还考虑了土骨架的弹性、可压缩性^[16,17]. 从海洋土的内部结构来看, 土骨架的特性是由该矿物本身的物理特性所决定的. 当孔隙流和该矿物结构相互作用时, 就会改变土骨架结合点的强度, 影响土的可压缩性. 若把沉积物看成是刚性的多孔介质, 所得到的孔隙水压力只适应于可渗透性非常好的海床, 比方说砾石海床, 但这种方法不能给出有效应力的信息. 而当把土床看成是单相连续介质时, 比如: 不可压的粘性流体、弹性介质、粘弹性介质等等这些方法又不能提供孔隙水压力或有效应力的信息. 由此可见, 两相理论是比较合适的. 但这一方法的缺点在于, 它不能考虑土骨架的非线性和非完全弹性. 下面具体针对应用两相理论所展开的工作进行讨论.

Biot (1941) 系统地研究了充液多孔介质的动力学行为^[18], 他在研究土的固结与声波传播方程时, 假设海洋土的土骨架是各向同性的弹性体, 符合 Hook 定律, 也就是说在小变形下它具有可逆、线性和各向同性的力学性质, 孔隙流体的运动满足 Darcy 定律. Yamamoto (1978) 首先根据 Biot 理论给出了有效应力所满足的方程^[19], 后来通过现场观测和室内实验分析发现, 由于沉积物不是完全的弹性体, 海洋土内部的摩擦过程会造成一些能量的耗散, 而且这种能量耗散与加载频率无关. 后来, Yamamoto (1983) 进一步提出考虑海洋土颗粒之间的库仑摩擦的本构关系, 它的特点就在于反映了海洋土的应力变化不仅与土应变有关, 而且与孔隙水的可压缩性有关, 两者是相互耦合的^[20]. Mei 和 Foda (1981) 也给出了相似的分析结果^[21]. 他们的边界层模式把海床分作两部分, 一部分是孔隙水和弹性土骨架有相对运动的边界层, 在边界层之外的另一部分土体看成是单相弹性运动. 他们的结果从另一个角度提示了波浪作用下细沙床面附近土层中的物理图象.

波浪和底床的相互作用, 同时伴随着两个事件: 波浪衰减和海床土层中应力场变化. 导致波浪衰减的因素有三个: 湍流摩擦、渗流、土颗粒之间的库仑摩擦. 对质地比较软的海床, 比方说, 淤泥质海床或粉砂质海床, 库仑摩擦是导致波衰减的最重要的力学机制.

它对波衰减的影响比渗透系数、平底情况下的湍流摩擦的影响都要大,有时库仑摩擦对波衰减的影响要比渗流所带来的影响大 6 个量级。由于土的动力学软化现象而使得这一过程具有很强的非线性。这样一来大波的衰减就比小波要快的多。对正常固结的淤泥质海床来说,当剪切波速接近于水波波速时,海床的运动幅度加大,由于库仑摩擦带来的波衰减加大;在非固结淤泥质海床中,剪切波速比水波波速要小的多,海洋土的行为象粘性流体一样,波长增加,波能量由于库仑衰减和强迫内部渗流以很高的速率耗散了。一般对砂质海床来说,砂质海床对波浪的影响比淤泥质底床有小 1~2 个量级。库仑摩擦和渗流对波衰减影响相当。

与此同时,在土层中有三种弹性波传播,底床对加载波的响应受控于这三种波。第一种弹性波是由于土骨架和孔隙水同时运动所带来的快压缩波;第二种是孔隙流体相对于土骨架运动而造成的慢压缩波;第三种也是最重要弹性波是剪切波。在淤泥质海床中,快压缩波的传播速度要比水波波速大 2 个量级,慢压缩波的传播速度又比水波波速慢将近 3 个量级,而剪切波波速和水波波速同量级,并且在某一频率下达到最大。如果海床内部阻尼不是足够大的话,此时海床将出现不稳定。Foda (1994) 从实验中也证明了这一现象^[22]。从理论计算结果看,土骨架的水平位移在某一深度有一个反向,这一现象和固体中的瑞利表面波相似。在砂质底床中,与粘性底床的性质相似,快压缩波、慢压缩波和水波波速有量级之差,而剪切波传播速度比在粘性底床中要快将近 5~6 倍,波长和底床压力几乎不受砂床运动的影响。底床的孔隙水压力、有效应力和不考虑库仑摩擦的结果没有什么大的差别。

考虑波浪引起的底床运动。结果发现,当海洋土剪切模量减少时,海床的垂向位移增加,在到达某一临界剪切模量之后,海床的垂向位移开始减少。也就是说海床的运动也改变了波长,对一给定的加载波频率,都有一个临界床硬度,在这一硬度下床的运动幅度最大,波衰减也是如此。若不考虑海床表面垂向位移,海床对波浪的响应依赖与土的渗透系数、硬度比 G/K_f (这里 G 是多孔介质的剪切模量, K_f 是孔隙流体体积模量)。对比较软的饱和土来说,海床响应不依赖于渗透系数,而且和加载波没有位相差;而对部分饱和的密砂来说,孔隙水压力很快降低,位相差随着深度线性增加,此时应力减少缓慢。另外在土床里,孔隙水的渗流运动受海床运动及孔隙水的可压缩性的影响。

3. 2 非均匀底床

由于土的应力应变关系表现出很强的非线性,而且土的动力学模量随着应变幅度减少而减小,所以真正的海床是随着深度有着动力学的不均匀性。现在多数人从土的渗透系数入手,研究其随深度变化的情况。土的渗透系数是描述通过颗粒间孔隙流体的速度的一个物理参数。由于海洋土在自身重量、海水重量以及波运动的动力学压力作用下固结,从而使得孔隙率的减少,也就是渗透系数降低。然而许多以前的研究不论是理论分析^[16,17,21,23],还是数值分析^[24],到目前为止,还都是考虑波在一维均匀介质上传播,其

理论是基于对土骨架和孔隙水的可压缩性、土的物理特性(如渗透系数、各向异性、饱和度等等)的各种假设,忽略了土的物理特性在垂直方向上的不均匀性。另外也有一些更实际的方法是把底床看成是多层均匀介质^[25],然而这些理论仅仅在每一均匀层上是恰当的,而在层与层之间的交接面上水平应力和应力分量梯度是不连续的。在实际情况下海床沿深度的响应应该是连续的,所以这种不连续性可能会对估计波浪引起的土响应带来不正确,从而导致地基稳定性估计的严重失误。

最近人们开始考虑海洋土的各向异性对波浪引起的海床响应^[26~28]。从已有的一些数值分析结果来看,饱和度、土的类型以及渗透系数随深度的变化对底床的动态响应起着决定性的作用。渗透系数的变化对粗砂质底床的孔隙压力和有效应力的影响是非常明显的,而对细砂质底床没有什么影响。对饱和细砂或粗砂质海床,土渗透系数随深度的变化对这种土质的底床影响比较小,但是对非饱和细砂或粗砂质海床来说,渗透系数的变化对床内孔隙水压力和垂向有效应力有很大影响,而且孔隙水压力和垂向有效应力在均匀和非均匀底床的差异是随着饱和度的减少而增加的。对砾石质海床,不论是饱和还是未饱和,渗透系数随速度变化所带来的影响是非常之大的。

4 结论

现在无论是从理论分析还是从数值计算对波浪作用下海床的动态响应都已经取得了一定的进展,但尚有许多不足之处。主要表现在以下两个方面。首先,海洋土的本构关系尚不太完善,有一些理论只能是半经验半理论,很多结果的准确与否还取决于海洋土物理参数的实验精度。其次,有关海床对非线性波的动态响应。现有的结果大多仅考虑线性加载波情况,而实际上更应该考虑的是浅水波和底床的相互作用。近几年有一些针对刚性土骨架的工作,但这对实际海洋土来说显得过于粗糙。关于这方面的工作我们将在下一篇文章中详细介绍。

参 考 文 献

- [1] Putnam, J. A., Loss of wave Energy due to Percolation in a Permeable Bottom, Transactions, 30 (3): 349 - 356, 1949.
- [2] Reid, A and Kajiure, F., On the Damping of Gravity Waves over Permeable Seabed, Transactions, AGU, 1957.
- [3] Smith, A. W. and Gordon, A. D., Large Breakwater Toe Failures, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, 109 (2): 253 - 255, 1983.
- [4] Silvesyer, R & Hsu, J. R., Since Revisted, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, 115 (3): 327 - 334, 1987.
- [5] Zen, K. et al., A Case of the Wave - Induced Liquefaction of Sand Layers under the Damaged Breakwater, Proc. 3rd Canada Conf. Marine Geotech. Engineering, 505 - 520, 1986.
- [6] Mitchell, J. K., Fundamentals of Soil Behavior, 2nd ed. John Wiler & Sons, New York. 1991.

- [7] Raju, L. V. S. and Ramana, Y. V. , Physical and elastic Properties of Marine Sediments of Bombay , India , *Marine Geotechnology* , 6: 359 - 375 , 1986.
- [8] Seed, H. B. and Idriss, I. M. , Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analysis , Report EERC70 - 10 , University of California , Berkeley , 1974.
- [9] Bennett, R. H. et al. , In Situ Porosity and Permeability of Selected carbonate Sediment : Great Bahama Bank - Part 2 , *Marine Geotechnology* , 9: 29 - 42 , 1990.
- [10] Gade, H. , Effects of A Non - Rigid Impermeable Bottom on Plane Surface Waves in Shallow Water , *Journal of Marine Research* , 16: 61 - 82 , 1958.
- [11] Dalrymple, R. A. and Liu, P. L. F. , Wave over Soft Muds: A Two - Layer Fluid Model , *Journal of Physical Oceanography* , 8: 1121 - 1130 , 1978.
- [12] Hsiao, S. V. & Shemdin, O. H. , Interaction of Ocean Waves soil Bottom , *Journal of Physical Oceanography* , 10: 605 - 610 , 1980.
- [13] Macpherson, H. J. , *Journal of Fluid Mechanics* , 97: 721 - 730 , 1980.
- [14] Massel, S. R. , Gravity Waves Propagated over Permeable Bottom , *Journal of Waterways Harbour Coastal Engineering Division, ASCE* , 102: 111 - 121 , 1976.
- [15] Moshagen, H. et al. , Wave Induced Pressures in Permeable Seabed , *Journal of Waterways Harbour Coastal Engineering Division, ASCE* , 101: 49 - 58 , 1975.
- [16] Yamamoto, T. et al. , On the Response of a Poro - elastic Bed to Water Wave , *Journal of Fluid Mechanics* , 87: 193 - 206 , 1978.
- [17] Okusa, S. , Wave - Induced Stresses in Unsaturated Submarine Sediments , *Geotechnique* , 35: 517 - 532 , 1985.
- [18] Biot, M. A. , General Theory of Three - Dimensional Consolidation , *Journal of Applied Physics* , 12: 155 - 164 , 1941.
- [19] Yamamoto, T. et al. , On the Response of A Poro - Elastic Bed to Water Waves , *Journal of Fluid Mechanics* , 1: 193 - 206 , 1978.
- [20] Yamamoto, T. et al. , Wave Damping by Soil Motion , *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering* , 111: 62 - 77 , 1985.
- [21] Mei, C. C. , and Foda, M. A. , Wave - Induced Response in a Fluid - filled Porous Elastic Soil with a Free Surface: A Boundary Layer Theory , *Geophys. J. R. astr. Soc.* , 66: 597 - 631 , 1981.
- [22] Foda, M. A. et al. , Resonant fluidization of Silty soil by Water Waves , *Journal of Geophysical Research* , 99: 20463 - 20475 , 1994.
- [23] Hsu, J. R. C. et al. , Wave Induced soil Response in An Unsaturated Anisotropic Seabed of Finite Thickness , *International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* , 18: 785 - 807 , 1994.
- [24] Zen, K. & Yamazaki, H. , Wave - induced Liquefaction in a Permeable Seabed , Report of the Port and Harbours Research Institution , Japan , 31: 155 - 192 , 1993.
- [25] Hsu, J. R. C. et al. , Oscillatory Soil Response and Liquefaction in An Unsaturated Layered Seabed , *International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* , 19: 825 - 849 , 1995.

- [26] Seymour, B. R. et al., Transient Soil Response in a Porous Seabed with Variable Permeability, *Ocean Engineering*, 23 (1): 27 - 46, 1996.
- [27] Lin, Y. S. and Jeng, D. S., Response of Poro - Elastic Seabed to a 3 - D Wave System: a Finite Element Analysis, *Coastal Engineering in Japan*, 39 (2): 165 - 183, 1996.
- [28] Lin, Y. S. and Jeng, D. S., The Effects of Variable permeability on The Wave - Induced Seabed Response, *Ocean Engineering*, 24 (7): 623 - 643, 1997.

ON THE DYNAMIC RESPONSE OF SEABED TO WATER WAVE

Lin Mian

(Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100080)

Abstract

The topic of wave - induced dynamic response on seabed is more important for civil engineers. This paper presents a review of wave damping and soil response with linear waves loading. In particular, the isotropic and anisotropic seabed are reviewed. Furthermore, we discuss some selected issues and give our point of view in the near future.

Key words: Marine sediment; Dynamic response; Poro - pressure;
Permeability

Manuscript received by editor August 29, 1997

Project 9602021 supported by NSFC