

河道与海岸地区床面变形理论研究综述

王玉海¹ 喻国华¹ 胡彦君²

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210024; 2. 河北科技大学材料科学与工程学院, 河北 石家庄 050054)

摘要 介绍现有河道与海岸地区床面变形理论研究的主要流派, 即势流模型研究流派、浅水理论模型研究流派和紊流模型研究流派。综述了各种模型在河道与河岸地区床面变形研究中的应用及进展, 针对水动力条件进行线性稳定性分析并结合先进的数值模拟手段是目前开展理论研究的主要技术途径, 且已取得了一系列重要成果。指出现有的理论模型还不能有效刻画复杂水动力条件下床面形态的非恒定演化过程。认为构建能有效刻画床面变形的偏微分方程组, 并通过水流要素的参数化或开展与水流模型的耦合计算是今后床面变形理论研究的一个发展方向。

关键词 床面变形 水动力模型 线性稳定性分析 数值模拟 河道 海岸

中图分类号: TV147 文献标识码: A 文章编号: 1006-7647(2006)S1-0160-04

在河道与海岸地区, 随着水动力条件的增强, 由松散泥沙颗粒组成的动床表面经常会发生一系列的变形, 如沙纹、沙丘(波)、冲刷沙丘、反沙丘、动平床、驻波以及冲槽和深潭等。这些床面形态的发生及其演化, 不仅影响到底沙的具体输运形式和数量, 也会通过动床阻力影响到水流的结构, 同时对各类水下工程措施(如水下管网、海底电缆等)的安全和航道通航问题等都有重要影响。因此, 研究不同动力条件下各种床面形态的发生及其转化规律一直是学术界和工程界关注的核心问题之一。

现有的水流泥沙数学模型一般都是由水流连续方程、水流动量方程、悬沙对流扩散方程、动床变形方程组成。对于底沙输运与床面高程变化之间的联系都是通过一个输沙连续方程(变形方程)来刻画的, 并且需要借助事先选定的经验或半经验的推移质输沙率公式等来封闭方程组。根据所选用的水流模型的不同, 可以将床面变形的理论研究大致分为势流模型研究^[1-2]、浅水理论模型研究^[3]以及紊流旋转流模型研究^[4-8]这 3 个流派。下面针对这些模型在河道与海岸地区床面变形理论研究中的应用及其进展做一介绍。

1 河流动力环境下的床面变形

1.1 经典的理论模型

床面变形的理论研究始于 Exner^[9]。他于 1925

年将一维明渠水流的浅水方程与输沙连续方程相结合, 研究了床面变形从对称形态向非对称形态演化的过程。Gradowczyk^[3]进一步利用一维浅水方程研究了浅水波传播与侵蚀性河床变形之间的关系。他从河床变化对水流运动造成的扰动出发, 利用线性稳定性分析, 通过过滤水流自身运动产生的表面重力波来研究床面扰动波的传播情况, 即通过研究水面波的传播演化来间接研究侵蚀性河床沙波等的演化情形。

基于 Anderson^[10]的工作, Kennedy^[1]于 1963 年提出了著名的河道沙丘与反沙丘演化的势流理论模型, 该模型的一个重要思想就是认为相位差(即推移质输沙率与局部水流速度的延迟效应)是造成水流-泥沙系统扰动的根源。随后 Reynolds^[11]进一步讨论和修正了 Kennedy 提出的关于沙丘、反沙丘发育的临界水流条件, 并将 Kennedy 的势流模型扩展到三维。Coleman 等^[2]则进一步建立了非恒定的势流模型, 在该模型中将水流条件和输沙率之间的相位差隐去, 认为水流表面波与床面沙波之间的共振是水流-泥沙系统不稳定性来源, 并且尝试解决势流模型的奇异性问题。

另一方面, Engelund^[4]于 1970 年应用紊流模型并引入流函数来刻画流场结构, 从而建立了床面变形的旋转流模型。其主要思想就是紊流的近底涡结构与床面变形密切相关, 并且认为输沙率与床面高

程变化之间的相位差是水流-泥沙系统不稳定性的来源。此后,Fredsoe^[5]通过考虑底床坡度对推移质输沙率的影响而扩展了Engelund的工作。Richards^[6]则引入了有效糙度来刻画紊流的近底结构及其与床面形态发育的关系。

上述经典的床面变形模型提出之后理论研究的进展一直比较缓慢,但仍有不少学者尝试构建新的理论模型或是对经典的模型进行修正和完善。

1.2 新的理论模型

不同于经典的水动力学线性稳定性分析,Huang等^[12]从土力学出发,用多孔塑性理论来刻画底床,用无旋势流模型来刻画水流运动,通过利用线性动量积分方法来处理复杂的土壤块体的应力-应变本构方程,得到了非耦合的由势函数和波数刻画的Helmholtz方程组,然后再结合水流自由面、床面以及无限深处的底床的边界条件,构成一个完整的边界值问题,由此求解得到相应的床面沙波和水流表面波的色散关系式。他们不仅得到了与Kennedy势流模型相同的结果,而且讨论了阻尼波的发生条件,这是Kennedy模型没有做到的,同时还进一步揭示了Kennedy所提出的相差长度的实质。

Colombini等^[13]则进一步强调了不稳定性是床面变形的基本机理,床面变形是由泥沙输运与床面形态演化之间的相位差引起的。不过,他们指出Kennedy建立的势流理论体现了非耦合的水流动力与床面演化的思想,即床面演化的时间尺度要比水流变化的时间尺度长得多,因而可以单独研究受到床面扰动后的水流流场的响应,然后再来决定变化后的流场对床面变形的影响。他们认为这种非耦合的处理导致了对水流扰动传播与床面变形之间共振作用的不真实的刻画,特别是这种处理消除了其他形式的不稳定性,即在高弗劳德数下与水流表面滚波发育密切相关的床面沙波的演化。鉴于此,Colombini等^[13]应用二维紊流模型,采用Boussinesq涡黏性假定来封闭方程组,并采用Meyer-Peter & Muller公式来刻画推移质的输运,然后利用扰动分析,获得耦合情况下的特征值问题并求解。他们认为,在弗劳德数小于2的情况下,非耦合处理与耦合处理并不影响沙丘和反沙丘在参数空间上的稳定区域,但在高弗劳德数下,只有耦合分析才能揭示出与水流表面滚波有关的高速运动的床面沙波的发育。

1.3 其他学科的理论研究

出于对物料在气流或水流作用下输运规律了解的需要,在化学、力学工程等领域也广泛开展了床面变形的理论研究。研究人员主要是根据颗粒的黏性再悬浮理论和水流的边界层理论进行的。该理论将

颗粒悬浮层处理为牛顿流体,其中的黏性和密度取决于局部的颗粒浓度,由此认为床面变形的发生是水流与黏性悬浮层的界面失去稳定而发育的一种界面波,而不稳定性来源于密度的分层或是黏性的差异。但是,相关理论忽略了颗粒的惯性作用,只适用于非常小的颗粒雷诺数的情形,并且为了保证从数学上推导出稳定性方程,通常不得不假定悬浮颗粒层的厚度只有1个或几个颗粒粒径的尺度^[13]。因此,相关理论结果与试验观察结果存在着较大误差。

另外,Liu^[14]早在1957年也提出将底沙活动层处理为黏性流体,而沙纹是水流与活动层两种不同密度的剪切流体界面之间的“Kelvin-Helmholtz不稳定性”造成的。但是由此得到的理论结果与试验观察结果也不相符合^[15]。

从剪切流体界面失稳的角度研究床面波的发生和演化需要假定输移过程中的颗粒体为连续介质流体。这对于由细颗粒组成的悬浮层是成立的,但对于较粗的底沙活动层而言,在较低的动力条件下,这一假定可能根本不成立。另外,有关的理论研究也无法反映剪切界面的破碎问题,即底沙颗粒的跃移过程。这些不足都可能导致理论结果与实际情况有较大误差。

2 海岸动力环境下的床面变形

由于海岸及近海工程的需要,针对海岸(包括近海)动力环境下各类海床变形的成因、活动性等的研究在最近二三十年得到了快速发展。不同于较为单一的河流动力环境,海岸地区存在着潮流、波浪、风吹流、浪生流等多种动力因素,它们之间存在着复杂的相互作用,这使得分析海底各种不同尺度的床面变形,如潮流形成的海底沙波、沙坝、沙洲及浪成沙纹等变得复杂起来。研究人员通过借鉴河床变形的研究方法和手段,借助于各种先进的数值计算手段,以水动力模型为主,再结合具体的问题考虑诸如波浪相互作用、涡动、二次流、推移质和悬移质共同造床等的影响,取得了丰富的成果。一般而言,理论分析基本上有3种途径:①线性稳定性分析,即分析平整床面受到一微小振幅的周期性扰动后的增长问题,之所以假定微小振幅,是便于将问题线性化处理。②有限振幅效应,即弱非线性稳定性分析。③数值求解,这是考虑强非线性问题常用的手段^[16]。这些理论分析的途径适用于潮流或者波浪动力条件,或者二者共同作用下的情形。

对于以波浪动力为主的海床变形研究,研究人员基本上是基于“波浪掀沙,水流输沙”的思想,利用二维浅水方程并将波浪的辐射应力结合进水流的动

量方程中(例如 Caballeria 等^[17])或者利用 N-S 方程并考虑波浪对水流边界层结构的影响(例如 Yu 等^[18])来刻画床面形态的发育演化。鉴于此,下面仅以潮流作用下的海床变形的理论研究为例做一较详细的介绍。

Huthnance^[19]首次利用深度积分的二维浅水方程研究了潮流作用下形成的沙岸(sand banks)。模型随后得到了进一步扩展^[20-22]。这些模型的主要缺点是只能刻画沙岸的形成,而不能刻画潮流作用下沙波的演化。因此,Hulscher^[23]进一步利用三维浅水方程研究了海岸沙波的发育演化,她认为该模型能够明确计算底部剪切应力和研究垂直向上的流动效果。但是,Komarova 等^[24]认为 Hulscher 的模型不能够解释超长沙波的阻尼机理,因而在他们的二维 N-S 方程中放弃了恒定紊流边界层的假定,而代之以涡黏性是水流深度和速度的函数的假定。

另一方面,Gerkema^[25]进一步扩展了 Hulscher 的模型。Gerkema 采用了二维 N-S 方程,但假定垂向涡黏性是一个常量,采用了底部部分滑移的条件,并利用复杂的近似方法、三角展式和调和截断等方法来转换方程组,以期获得系统对优势波长选择的影响参数。不同于 Hulscher 认为优势波长与摩阻流速和涡黏性的独立作用有关,Gerkema 认为优势波长取决于摩阻流速与垂向涡黏性的比值。

Komarova 等^[26]则进一步研究了潮流沙波与沙岸的非线性作用。他们认为这种非线性是产生复合型床面形态即沙波叠加在沙岸上(类似于河床变形中的沙纹叠加在沙丘上)的重要机理。

上述研究工作的主要特点是:首先在水流模型中确定一个“基态”(单向层流+平床)的解,然后根据线性稳定性理论,将一个“波形”床面扰动结合进水流方程中,再将该水流方程无量纲化,求解受到扰动后的无量纲水流方程(有的引入流函数,有的将控制方程转换成涡量方程等),最后再将扰动解反馈到床面变形方程中。其基本结论是:如果潮流的余流从波谷指向波峰,床面扰动就增强,反之被削弱。这些研究工作都是在努力刻画影响涡黏性的因素,并通过涡黏性的变化对近床面紊流相干结构的影响来解释床面扰动的稳定与否等问题。

3 存在的问题

势流模型和浅水模型可以很方便地讨论水流表面波与床面形态的耦合演化关系,但是由此却暗示水流表面波是床面产生变形的必要条件。利用管道输沙时水流表面波动受到抑制,但床面上依旧会产生一系列的变形,用上述理论模型就无法解释。同

时,势流理论仅是一种微幅波理论,并不能有效地刻画充分发育的床面形态的演化。另外,势流模型也是一种微观模型,无法有效反映水深和颗粒性质对床面变形的影响。一维浅水模型虽然能够有效反映水深以及床面阻力的影响(间接反映床面性质的影响),但是它无法刻画紊流边界层的相干结构,无法反映流体运动的有旋性,因而这类模型在刻画床面形态的形成演化时 also 存在着不足。

另一方面,紊流旋转流模型假定紊流边界层的相干结构对床面形态的演化起着控制主导作用。但是,对于没有明显的紊流边界层发育情形下的床面变形过程,这一模型就显得无能为力。另外,紊流模型也是一种微观模型,它无法考虑水深、颗粒粒径等参数,因而无法准确预测在特定水流和泥沙条件下,紊流边界层相干结构的尺度,以及该相干结构发生的频率等要素,这使得在确定床面变形的优势波长和增长率等问题时存在着较大的主观性。特别是由于紊流模型要借助输沙连续方程来刻画床面扰动的演化,而该方程是一种长波方程,因而紊流模型对于短(沙)波的预测就似是而非了。

除了利用一维浅水方程进行有关床面变形的研究^[3]以外,利用其他复杂的水动力模型(如三维浅水方程、雷诺应力方程、二维 N-S 方程或势流模型)结合输沙连续方程来讨论河床和海床表面形态发育、演化工作,都没有也无法在水动力模型中直接反映底床阻力(包括形状阻力)对流场的影响,而只是单纯地讨论正弦形式的床面扰动对流场的影响,然后再将扰动后的水流强度参数(如剪切应力)反映在输沙连续方程中来讨论扰动波的传播和演化问题。

此外,现有的理论研究还只能刻画均衡态的床面变形,而不能有效刻画各种床面波动的非恒定演化过程,如不同波长的波的聚合过程等。同时,现有的各种理论模型更多的是在研究水流流速、剪切应力等要素在受到一个事先假定的无穷小的“波形”扰动之后是如何增长或消亡的,都不得不假定床面变形是从一个“初始平床”(有的认为是静止的,有的认为是运动的)受到扰动后开始演化的。但是研究者并不能回答为什么初始平床是必须的,扰动又是怎样从初始平床上产生的,二者关系如何,特别是造成水流-泥沙系统失稳的真正物理机理是什么等问题。

近年来,虽然在床面变形的理论分析中广泛应用了数值模拟技术,但不管是用何种水动力模型都需要进行冗长的计算,并且每计算一步都不得不求解整个水流方程组,但结果是只有少量的水流信息需要反馈到输沙连续方程中去。因此,如果能够避免求解 N-S 方程或其他类型的水流方程,而代之以

求解 1 个刻画床面演化的方程(组),同时将水动力条件处理为该床面演化方程(组)的 1 个或多个参数,这样就可以大大节省计算工作量。当然,该床面演化方程(组)应能反映床面的线性稳定性、系统的长时间演化特征以及长、短波的演化和消亡等^[24]。

4 结 语

本文介绍了现有的河道与海岸地区床面变形研究的主要理论流派及其特点和存在的不足。由于各种动力条件下床面形态发生演化的复杂性,使得理论研究的难度巨大,有必要开辟新的研究途径。本文认为,构建能够刻画床面演化的偏微分方程组(连续方程+动量方程)通过水流要素的参数化或是与水流模型进行耦合求解,将有可能更好地揭示在各种动力环境下的床面变形的内在规律,而这将是一项充满挑战性的工作。

参考文献:

- [1] KENNEDY J F. The mechanism of dunes and anti-dunes in erodible-bed channels[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1963, 16: 521-544.
- [2] COLEMAN S E, FENTON J D. Potential-flow instability theory and alluvial stream bed forms[J]. *Journal of fluid Mechanics*, 2000, 418: 101-117.
- [3] GRADOWCZYK M H. Wave propagation and boundary instability in erodible-bed channels[J]. *Journal of fluid Mechanics*, 1968, 33: 93-112.
- [4] ENGELUND F. Instability of erodible beds[J]. *Journal of fluid Mechanics*, 1970, 42: 225-244.
- [5] FREDSOE J. On the development of dunes in erodible channels[J]. *Journal of fluid Mechanics*, 1974, 64: 1-16.
- [6] RICHARDS K J. The formation of ripples and dunes on an erodible bed[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1980, 99: 597-618.
- [7] SUMER B M, BAKIOGLU M. On the formation of ripples on an erodible bed[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1984, 144: 177-190.
- [8] COLOMBINI M. Revisiting the linear theory of sand dune formation[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2004, 502: 1-16.
- [9] EXNER F M. Ber die wechselwirkung zwischen wasser und geschiebe inflssen, Sitzungber[J]. *Acad Wissenschaften Wien Math Naturwiss Abt 2a*, 1925, 134: 165-180.
- [10] ANDERSON A G. The characteristics of sediment waves formed by flow in open channels[C]//*Proceedings of the Third Mid-Western Conference on Fluid Mechanics*. Twins Cities: University of Minnesota, 1953: 379-395.
- [11] REYNOLDS A J. Waves on the erodible bed of an open chan-

- nel[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1965, 22: 113-133.
- [12] HUANG L H, CHIANG Y L. The formation of dunes, antidunes, and rapidly damping waves in alluvial channels[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2001, 25: 675-690.
- [13] COLOMBINI M, STOCCHINO A. Coupling or decoupling bed and flow dynamics: fast and slow sediment waves at high Froude numbers[J]. *Physics of Fluids*, 2005, 17: 1-9.
- [14] LIU H K. Mechanics of sediment ripple formation[J]. *Journal of Hydraulics Division, ASCE*, 1957, 83 (HY2): 1197.
- [15] KURU W C, LEIGHTON D T, MCCREADY M J. Formation of waves on a horizontal erodible bed of particles[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1995, 21: 1123-1140.
- [16] BLONDEAUX P. Mechanics of coastal forms[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2001, 33: 339-370.
- [17] CABALLERIA M, COCO G, FALQUES A, et al. Self-organization mechanisms for the formation of nearshore crescentic sand bars[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2002, 465: 379-410.
- [18] YU J, MEI C C. Formation of sand bars under surface waves[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2000, 416: 315-348.
- [19] HUTHNANCE J. On one mechanism forming linear sand banks[J]. *Estuarine Coastal Shelf Science*, 1982, 4: 79-99.
- [20] De VRIEND H J. Morphological processes in shallow tidal seas[C]//CHENG R T. *Residual Currents and Long Term Transport: Coastal Estuarine Studies*. Washington D C: American Geophysical Union, 1990, 38: 276-301.
- [21] De SWART H E, HULSCHER S J M H. Dynamics of large-scale bed forms in coastal seas[C]//DOELMAN A, VAN HARTEN A. *Nonlinear Dynamics and Pattern Formation in the Natural Environment*. White Plains N Y: Longman, 1995: 315-331.
- [22] HULSCHER S J M H, De SWART H E, De VRIEND H J. The generation of offshore tidal sand banks and sand waves[J]. *Continental Shelf Research*, 1993, 13: 1183-1204.
- [23] HULSCHER S J M H. Tidal-induced large-scale regular bed form patterns in a three-dimensional shallow water model[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1996, 101: 20727-20744.
- [24] KOMAROVA N L, HULSCHER S J M H. Linear instability mechanisms for sand wave formation[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2000, 413: 219-246.
- [25] GERKEMA T. A linear stability analysis of tidally generated sand waves[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2000, 417: 303-322.
- [26] KOMAROVA N, NEWELL A C. Nonlinear dynamics of sand banks and sand waves[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2000, 415: 285-321.

(收稿日期: 2005-11-09 编辑: 骆超)