

波浪辐射应力理论的应用和研究进展*

郑金海 严以新

(河海大学港口航道及海岸工程学院 南京 210098)

0353.2

P731.2

摘要 回顾波浪辐射应力张量的概念,前人的研究成果表明微幅波的辐射应力理论是符合实际的。综述波浪辐射应力理论在海洋流体动力学中的应用,分析该理论在研究近岸流的形成、波浪增水和波浪减水、沿岸流流速的沿程分布、破波带内底部反向流的速度分布、河口海岸泥沙运动、海岸碎波拍和波流相互作用等问题中的应用。总结波浪辐射应力的研究进展,包括考虑有限振幅波和不规则波的辐射应力场以及微幅波辐射应力张量沿水深分布的研究,指出辐射应力张量沿水深分布的研究可以为探讨近岸水动力环境的垂直结构以及完善波流相互作用三维数学模型提供理论基础,为深入考察波浪辐射应力张量沿水深分布情况,提出进一步研究的思路。

关键词 海洋流体动力学;微幅波;波浪辐射应力;动量流;垂向分布

波浪在传播过程中,具有平行于传播方向的动量,其值与波浪振幅的平方成正比,如果遇到障碍物而反射,动量必然反向传递,从动量守恒的观点来看,波浪将对障碍物施加作用力,该力等于波浪动量的变化率,即动量流。Longuet-Higgins 和 Stewart 将作用于单位面积水柱体的总动量流的时均值减去没有波浪作用时的静水压力定义为波浪剩余动量流,又称辐射应力^[1]。辐射应力理论的研究对象是波浪水体中的力场,是解释近岸波浪流系、风暴潮引起的平均海平面变化等自然现象的理论。

1 微幅波中的辐射应力张量

在波浪水体中,存在着包含静水压力和净波浪压力的波动压力场。由于波浪的水质点运动,在波浪水体中还存在着类似于紊流雷诺应力的应力场,它是水质点动量输送产生的,所以又叫做动量流。波浪动量流是由波浪水质点速度产生的,具有确定性的性质,且随波浪水质点速度变化作周期性的变化,可以从波浪水质点速度方程式计算出来。

总的能够说明波浪对水体激起应力机制的概念是由 Longuet-Higgins 和 Stewart 在 60 年代提出的^[1],他们在牛顿流体力学定理和速度沿水深均匀分布的基础上,将辐射应力定义为由于波浪现象而产生的动量超通量。写成张量形式,则有

$$S = \begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xy} \\ S_{yx} & S_{yy} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: S_{xx} 表示作用在垂直于 x 轴平面的 x 方向的剩余动量流,称做辐射应力在 x 方向上的主分量; S_{yy} 表示作用在垂直于 y 轴平面上的 y 方向剩余动量流,称做辐射应力在 y 方向上的主分量; S_{xy} 表示用在垂直于 x 轴平面上的 y 方向动量流,称做辐射应力在垂直于 x 轴平面上的切向分量; S_{yx} 表示作用在垂直于 y 轴平面上的 x 方向的动量流,称做辐射应力在垂直于 y 轴平面上的切向分量。

以不同的波理论的水质点速度及波压力公式可以计算得到不同的辐射应力表达式。根据微幅波理论,波向角为 α 时辐射应力的张量形式表达式为

$$S = E \begin{bmatrix} n \cos^2 \alpha + \frac{1}{2}(2n-1) & \frac{n}{2} \sin 2\alpha \\ \frac{n}{2} \sin 2\alpha & n \sin^2 \alpha + \frac{1}{2}(2n-1) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right)$ 为波能传递率, k 为波数, h 为水深; $E = \frac{1}{8} \rho g H^2$, 为单位面积的水柱体内在一个波周期中所具有的平均波能。

在深水条件下,波能传递率 $n = 1/2$, 那么辐射应力张量

第一作者简介:郑金海,男,博士,从事河口海岸水动力数值模拟研究。

* 教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(98029402)。

$$S = E \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \cos^2 \alpha & \frac{1}{4} \sin 2\alpha \\ \frac{1}{4} \sin 2\alpha & \frac{1}{2} \sin^2 \alpha \end{bmatrix} \quad (3)$$

在浅水条件下,波能传递率 $n = 1$,那么辐射应力张量

$$S = E \begin{bmatrix} \cos^2 \alpha + \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \sin 2\alpha \\ \frac{1}{2} \sin 2\alpha & \sin^2 \alpha + \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Longuet-Higgins, Bowen, Van Dorn 等人分别应用基于微幅波理论的辐射应力公式计算波浪破碎前后的水面升降,并和观测结果相比较。总的来说,理论曲线和观测结果是吻合的^[1-3]。这说明,基于微幅波理论的辐射应力理论是符合实际的。

2 波浪辐射应力理论的应用

辐射应力理论在海洋流体动力学中有着广泛的应用。从 60 年代至今,应用辐射应力理论,根据力的平衡原理,建立相应的基本方程式,在研究下列课题中取得一些突破。

a. 近岸流的形成机理分析和数值模拟^[4,5]。研究认为,当波浪场中波高发生变化时,辐射应力也将变化,导致单位面积的水柱上的应力不平衡,从而驱动水体运动,生成近岸流。

b. 波浪增水和波浪减水的研究^[6-8]。波浪破碎前,由于水深变浅,波高逐渐增大,辐射应力也随之增大,从而使波动水面降低,产生波浪减水;波浪破碎后,由于波能急剧消耗,波高减小,辐射应力相应减小,因而引起平均水面抬高,产生波浪增水。

c. 沿岸流流速的沿程分布研究^[9,10]。当波浪斜向行近海岸时,或是沿岸波高不等时,辐射应力场的变化提供驱动沿岸流的动力,根据动量守恒,建立沿岸流流速分布的计算公式。

d. 破波带内底部反向流的速度分布研究^[11,12]。辐射应力与波浪增水压力梯度的局部差异是形成底部反向流的原因,从质量守恒出发,导出底部反向流的速度分布计算表达式。

e. 河口海岸泥沙问题^[13,14]。在河口海岸地区,潮流、波浪对泥沙具有同等重要的作用,将概化波浪过程的辐射应力迭加到潮流运动方程和泥沙扩散方程中,建立包含潮流、波浪综合作用的泥沙数学模型,采用数值模拟的手段研究河口海岸泥沙运动。

f. 海岸碎波拍问题^[15,16]。将波浪增水和波浪减水视为约束在波群中的长波,它在海岸处的反射是

产生海岸碎波拍的一个重要原因,辐射应力场的变化是海岸碎波拍形成与变化的关键。

g. 波流相互作用问题^[17,18]。引入辐射应力理论,不仅可以形象地描述波浪与水流相互作用时的能量交换,而且可以建立以波能守恒、波作用量守恒为具体形式的波流相互作用模型,为波流相互作用数值模拟提供理论基础。

3 波浪辐射应力理论的研究进展

由于利用有限均匀水深二维线性波动解得到的辐射应力表达式形式简单,计算方便,概念清楚,所以在近岸波生流、波流相互作用问题及河口海岸泥沙问题、岸滩演变的研究中得到广泛的应用并取得良好的效果。然而,随着科学技术的不断进步和人类对海岸带开发需求的日益迫切,需要也可能对上述问题作出更加精确的模拟,便于人们更加深入了解这些现象。许多专家学者正从不同的角度,进行着不同程度的探索和改进。

为了考虑有限振幅波的影响,James^[19]假设波浪运动是缓变的,且在破波带内波浪运动仅与水深有关,采用非线性方法,结合三阶 Stokes 波和椭圆余弦波理论,计算辐射应力向岸方向的变化,该方法适用于平底地形。

Thornton 等利用不规则波产生的辐射应力为沿岸流的驱动力,预报不规则波致沿岸流^[20]。其后, Larson, Yoo 及孔亚珍等人都分别对不规则波辐射应力场进行研究^[21-23]。研究认为,采用不规则波理论计算的辐射应力场较规则波理论计算的辐射应力场更趋均匀,尤其对切向分量更为明显,并且采用不规则波理论计算波生流能克服规则波计算结果偏大的缺点,改善计算精度。

值得一提的是上述研究仍是基于平面二维波动状况。

曹祖德等人^①曾提出分层模式的三维潮流泥沙数学模型,其中波浪辐射应力的垂向分布形式仍采用 Longuet-Higgins 的成果,仅以水体某一层高度代替总水深,该模型应用于天津新港地区抛泥的数值计算。Borekci^[24]则提出辐射应力向岸方向主分量的沿水深分布公式,并用于求解破波带内平均剪应力和欧拉速度分布,尽管未经实验验证,但从计算成果可以得出定性解释,可是未能进一步探讨辐射应力张量沿水深变化情况。文献[25]在前人研究的基础上,将垂向考察区域分为波谷以下部分、波谷至平均水面部分以及平均水面以上部分,应用微幅波理

①曹祖德等,天津港抛泥地弃土运移的数值模拟,天津水运工程科学研究所,1989。

论,分段推求波浪辐射应力沿水深分布函数,建立任意波向角时波浪辐射应力各分量的计算表达式,给出深水及浅水条件下的渐近表达式,探研辐射应力张量沿水深分布情况.结果表明,波浪辐射应力各分量沿水深并非均匀分布,而且各分量分布情况不尽相同;从波面到海底,存在反向变化的现象;浅水条件下,波谷以下部分所占份量相当可观.波浪辐射应力的垂向分布研究表明,仔细研究辐射应力场的垂向分布是必要的,这不仅对于理论研究,而且对于工程实践均有相当重要的指导意义.需要指出的是,在浅水地区,微幅波理论受到较大的限制,因此应当考虑使用合适的波浪理论;同时,应当着重研究破波区内波浪辐射应力各分量沿水深分布情况.

4 结 语

关于辐射应力的研究和应用,经过几十年来的积累,取得一系列的成果,并且在解释一些海岸动力现象方面取得满意的结论,然而仍有许多问题值得探讨.30多年来一直沿用与水深无关的辐射应力表达式,没有能够真实地反映近岸水动力环境的垂直结构以及对泥沙环境的影响,也严重制约波流相互作用三维数学模型的开发和应用.因此,对不同波浪理论的波浪辐射应力的垂向分布以及近海海域水下复杂地形、结构多样底床对波浪辐射应力的垂向分布的影响应进行深入的研究,这对进一步研究破波带内底部反向流、离岸水下沙坝的成因以及波浪对水流垂向结构和传热传质过程的影响等都有重要意义.

参考文献

- Longuet-Higgins M S, Stewart R W. Radiation stresses in water waves: a physical discussion with application. *Deep Sea Res*, 1964, 11(5): 529 ~ 562
- Bowen A J, Inman D L, Simmons V P. Wave set-down and set-up. *J Geophys Res*, 1968, 73(3): 2569 ~ 2577
- Van Dorn W G. Set-up and run-up in shoaling breakers. In: *Proc 15th ICCE, Honolulu, Hawaii*. N Y: ASCE, 1976: 738 ~ 751
- Basco D R. Surf zone currents. *Coastal Engineering*, 1983, 7(4): 331 ~ 353
- 史峰岩, 丁平兴. 近岸波生流的数值模拟. 见: 第八届全国海洋工程学术讨论会暨 1997 海峡两岸港口及海岸开发研讨会论文集. 北京: 海洋出版社, 1997: 779 ~ 785
- Longuet-Higgins M S, Stewart R W. A note on wave set-up. *J Mar Res*, 1963, 21(1): 1 ~ 14
- Yanagishima S, Katon K. Field observation on wave setup near the shoreline. In: *Edge B L ed. Proc 22nd ICCE, Delft, the Netherlands*. N Y: ASCE, 1990: 95 ~ 108
- 李孟国, 张大错. 浪致近岸水位变化及流场的数值计算. *海洋学报*, 1996, 18(4): 96 ~ 113
- Bowen A J. The generation of longshore currents on a plane beach. *J Mar Res*, 1969, 27(2): 206 ~ 214
- Longuet-Higgins M S, Stewart R W. Longshore currents generated by obliquely incident wave. *J Geophys Res*, 1970, 75(3): 6778 ~ 6801
- Svendsen I A. Mass flux and undertow in surf zone. *Coastal Engineering*, 1984, 8(4): 347 ~ 365
- Okayashi A, Shibayama T. Vertical variation of undertow in the surf zone. In: *Edge B L ed. Proc 21st ICCE, Costa del Sol-Malaga, Spain*. N Y: ASCE, 1988: 478 ~ 491
- Bijker E W. Longshore transport computation. *J Waterway Harbor and Coastal Eng*, 1971, 97(4): 687 ~ 701
- 辛文杰. 潮流波浪综合作用下河口二维悬沙数学模型. *海洋工程*, 1997, 15(1): 30 ~ 47
- Guza R T, Thornton E B. Observation of surf beat. *J Geophys Res*, 1985, 90(2): 3161 ~ 3171
- 董国海, 邹志利, 李玉成. 海岸碎波拍的计算. 见: 第八届全国海洋工程学术讨论会暨 1997 海峡两岸港口及海岸开发研讨会论文集. 北京: 海洋出版社, 1997: 660 ~ 667
- Phillips O M. *Dynamics of upper ocean*. London: Cam Univ Press, 1966
- 白辅中, 黄惠. 辐射应力理论在波流相互作用中的应用. *河海大学学报*, 1997, 25(6): 116 ~ 118
- James I D. Nonlinear waves in the nearshore region: shoaling and setup. *Estuarine Coastal Mar Sci*, 1974(2): 207 ~ 334
- Thornton E B, Guza R T. Surf zone longshore currents and random waves: model and field data. *J Phys Oc*, 1986, (16): 1165 ~ 1179
- Larson M, Kraus N C. Numerical model of longshore current for bar and trough beaches. *J Waterway, Port, Coastal and Oc Eng*, 1991, 117(4): 326 ~ 347
- Yoo D. Wave-induced longshore current in the surf zone. *J Waterway, Port, Coastal and Oc Eng*, 1994, 120(6): 557 ~ 575
- 孔亚珍, 史峰岩, 丁平兴. 随机波辐射应力场的数值计算. 见: 第八届全国海洋工程学术讨论会暨 1997 海峡两岸港口及海岸开发研讨会论文集. 北京: 海洋出版社, 1997: 747 ~ 751
- Borekci O S. Distribution of wave-induced momentum fluxes over depth and application within the surf zone: [dissertation]. Newark: Univ of Delaware, 1982
- 郑金海. 波浪剩余动量流的垂向分布及其在波流相互作用三维数值模拟中的应用: [学位论文]. 南京: 河海大学, 1998

(收稿日期: 1998-12-01 编辑: 张志琴)