

不同泥沙输运公式在以潮流为主的浅海、陆架环境中的适用性探讨*

APPLICABILITY OF VARIOUS SEDIMENT TRANSPORT FORMULAE TO SHALLOW MARINE ENVIRONMENTS DOMINATED BY TIDAL CURRENTS

朱玉荣

(同济大学海洋地质与地球物理系 上海 200092)

(中国科学院海洋研究所 青岛 266071)

泥沙运动问题是个非常复杂的问题。随着经济的发展、科技的进步、环境与工程等的需要,泥沙运动越来越成为研究的热点,但它同时也是研究的难点。地质学家、沉积学家、海洋学家以及工程学家等经常需要了解浅海、陆架上的泥沙运动情况,即泥沙输运率,包括大小与方向。但由于自然条件的复杂性与受技术条件的限制,海洋环境中泥沙运动的研究比河流中的要困难得多。国际上,Gadd 等1978年在美国的纽约陆架,Heathershaw 1981年在欧洲北海地区对此研究得较早(约70年代末),研究较多,研究程度也较高;我国海洋环境中泥沙运动的研究程度很低。迄今,在海洋环境中用公式对输沙率进行计算时,对应该选用哪种泥沙输运公式才最为合适仍很不清楚。因为现有的计算泥沙输运率的公式,不论理论公式还是半经验公式,都是根据稳定流概念得出的,并且这些公式中的参数值多由单向流水槽实验结果确定,目前尚无根据海洋环境振荡流特点推导的公式。因此,在将这些公式应用于真实海洋时就遇到困难,最主要的困难是必须将各种参数值具体化,这包括床面剪切应力、临界剪切应力、深度平均流、海底糙度、泥沙密度以及海水密度等。大多数参数值的确定之所以要根据水槽单向流实验结果,是因为在野外很难控制出现在稳定流中的那些变量,例如,很难保证泥沙粒度均一,要想在不干扰泥沙运动的情况下取到运动着的最大泥沙颗粒的粒径是不可能的。由于无法控制这些因素,因此野外实验得到的数据很分散。为了取到野外资料前人作了很多尝试。Baker 和 Ritter 1975年对前人的野外实验作了总结,并用同一计算方法处理野外数据,以求降低它们的分散度,但结果令人失望。这也就是目

前在用公式计算河流与海洋中泥沙输运率时,公式中大多数参数值多借鉴单向水槽实验结果的原因所在。由于以上原因,在海洋环境中用公式计算输沙率时误差在所难免。鉴于我国具有宽广的潮流陆架海,本文旨在根据国际上已有的研究,对几种典型的泥沙输运公式在以潮流为主的海洋环境中的适用性进行考察,以求便于我国学者在探讨我国浅海、陆架上的泥沙运动时对计算公式的选取与对计算结果的分析。

1 几种典型的泥沙输运公式

比较典型的泥沙输运公式有:(1)Einstein 1950年的推移质输沙率公式。该公式以概率论与力学相结合而建立起来的推移质理论为其推导根据。该公式将泥沙输运率与流速脉动的概率联系起来,而不是将泥沙输运率与平均流参数联系起来,公式中不包括泥沙运动的临界流速判别标准。(2)Bagnold 1963年的推移质输沙率公式。该公式根据普通物理学的基本概念,通过一定的力学分析推导而来。Bagnold 公式除其原始形式外,后来的研究者曾在其原始形式的基础上做过不同的修正,关于其原始公式与其修正式后面再谈。(3)Yalin 1963年的推移质输沙率公式。该公式考虑施加在泥沙颗粒上的平均上举力。在 Yalin 理论中,假定泥沙颗粒以跃移的形式在床面上运动;假定输沙率的增加是由颗粒运动距离的增加引起,而没有必要为

* 国家自然科学基金(49476380和49876018)与国家教委博士学科点专项科研基金资助项目;中国科学院海洋研究所研究报告第3659号。

收稿日期:1998-08-06;修回日期:1998-09-26

颗粒数量的增加;也假定存在临界剪切应力。(4)Engelund 1976年的推移质输沙率公式。(5)Ackers 和 White 1973年的总输沙率公式。该公式是在 Bagnold 基本概念的指导下,写出某些无量纲参数之间的函数关系式,然后用计算机整理成果和进行回归分析,求出函数的具体表达形式。该公式是包括推移质与悬移质在内的总携沙能力公式。(6)Einstein 1946年的悬移质输沙率公式。(7)Bagnold 1966年的悬移质输沙率公式。Bagnold 按照他对推移质运动同样的处理方法,研究了悬移质输沙率问题。

钱宁1980年曾将上述 Bagnold 推移质输沙率公式、Yalin 推移质输沙率公式、Engelund 推移质输沙率公式、Ackers 和 White 的总输沙率公式统一转化为 Einstein 所采用的输沙强度与水流强度之间的函数关系,然后再将它们进行比较,得出:尽管这些公式具有各不相同的形式,但在本质上却有很多相类似之处。

在低强度输沙时,Einstein, Bagnold, Engelund 的推移质输沙率公式的计算结果比较接近,与实验结果也比较一致;Ackers 和 White 的计算结果比实验值显著偏高;Yalin 公式给出的输沙率偏小。在高强度输沙时,这些公式给出的计算结果差别较大,Ackers 和 White 公式的计算结果与实验结果较接近。笔者认为在高强度输沙时,之所以 Ackers 和 White 公式的计算结果与实验结果较接近,是因为该公式计算的是包括推移质与悬移质在内的总输沙率,而在高强度输沙时会有大量泥沙作悬移运动,在实验技术上又很难把推移质与悬移质截然分开,亦即,实验得到的结果是包括悬移质在内的总输沙率,因此该公式的计算值与实验值吻合良好。进而认为在低强度输沙时,Ackers 和 White 公式的计算值较其他公式的计算值之所以显著偏高,与该公式计算的是包括悬移质在内的总输沙率有关,而其他公式计算的均为推移质输沙率,而在低强度输沙时,泥沙基本上以推移运动为主,故用推移质公式计算的结果与实测值最接近。

2 上述公式在以潮流为主的海洋环境中的适用性考察

上述公式,尤其是推移质输沙率公式,常应用于河流。这些公式在以潮流为主的海洋环境中的适用性如何还需检验。本世纪70年代以来,许多学者,如 Gadd 等,1978年;Heathershaw, 1981年;Lees, 1983年;Yang, 1986年在纽约湾和北海陆架做过该方面的研究,现将其研究成果简述如下。

1999年第2期

Gadd 等1978年曾用上述 Bagnold, Yalin 以及 Einstein 的推移质输沙率公式计算 New York 湾中的推移质输沙率,结果表明,这3种公式计算的输沙率量值最多相差一个量级,输运方向之差不超过10°,基本一致。

Heathershaw 1981年在北海陆架的南 Wales Swansea 海湾进行了示踪沙扩散实验;利用 Einstein 1950年、Bagnold 1963年、Yalin 1963年的推移质输沙率公式及 Engelund 和 Hansen 1967年、Ackers 和 White 1973年的总输沙率公式计算了离岸较远的一深水测点与离岸较近的一浅水测点的泥沙输运率,并将各家公式的计算结果与示踪沙实验结果进行了比较。综合考虑深、浅水测点,只有 Gadd 等1978年对 Bagnold 原始公式修正式的计算结果与示踪沙实验结果最接近。尽管不同公式计算的输沙率量值互不相同,但这些公式预测的泥沙输运方向基本一致,与示踪沙实验结果也较一致。

Lees 1983年在英国的 Anglian 海岸进行了与 Heathershaw 1981年类似的工作,即用 Heathershaw 1981年所用的5种泥沙输运公式计算了泥沙输运率,并将计算结果与示踪沙扩散实验结果进行了比较。研究表明,该海域的泥沙以悬移运动为主,Yalin 公式的计算结果与示踪沙实验结果比较接近。

笔者认为,在 Lees 1983年的研究中,Yalin 公式计算结果与示踪沙实验结果较接近可作如下解释:既然该海域泥沙的运动方式以悬移为主,则说明水流能量较大,应属高强度输沙。根据钱宁1980年的分析,Yalin 公式在高强度输沙时能给出与实验较吻合的计算结果,因为该公式为包括悬移质在内的总输沙率公式;又考虑到示踪沙实验结果不只是推移质的,也包括了悬移质,即为总输沙率。因此,Yalin 公式计算的与实测结果最为接近。据 Lees 1983年的研究,在 Swansea 海湾中的 Sizewell Dunwich 沙脊地区推移质向南输运,而沙脊的倾向却为北向,并且沙脊向北延伸,Lees 认为这一矛盾的现象是该区泥沙以悬移方式运动为主,悬移质输运占优势的结果。从他的分析中可看出悬移质对造床的作用。

Yang 1986年曾将4个不同潮流环境的海底底形的实测迁移率与 Bagnold 公式的计算结果进行比较,其比较结果表明,根据底形迁移所测得的泥沙输运率比 Bagnold 1963年推移质输沙率公式的计算结果高,但实测输沙率与 Bagnold 1963年总输沙率公式的计算结果吻合良好。他从底形物质组成不仅包括较粗的推移质,也有较细的悬移质认为,不仅推移质参与造

床,悬移质中的床沙质,即用公式计算的悬移质也参与造床,因此实测的底形迁移率应该与总输沙率相比,而不应只与推移质输沙率相比。

笔者认为需要特别注意的是,用公式计算的悬移质输沙率,实际上为悬移质中的床沙质输沙率,不包括悬移质中的冲泻质。即用公式计算的悬移质与推移质都参与造床,不只是推移质参与造床,这一点必须十分清楚,有些研究者,如 Heathershaw 1981年在此方面疏忽了,误认为只有推移质才参与造床,这样,在将公式计算结果与实测结果进行比较出现偏差时,却不能找出有该方面原因导致的偏差。笔者认为示踪沙扩散实验结果同根据底形迁移所测得的泥沙输运率一样也为总输沙率,理应与计算的总输沙率相比。用公式计算的悬移质同推移质一样参与造床;示踪沙实验所得输沙率与底形迁移率均为总输沙率,这些问题必须重新认识,并予以重视,否则将影响正确答案的得出。

总之,在以潮流为主的海洋环境中,尽管不同泥沙输运公式计算的输沙率量值相互之间有差别,有时甚至相差很大,但这些公式计算的输沙方向基本一致,并且,一般情况下,计算方向与示踪沙实验或底形迁移方向一致。另外,相比而言,在一般情况下,Bagnold公式使用起来较方便,计算结果也较接近真实情况。

3 对 Bagnold 推移质单宽输沙率公式的两种修正式的简要评价

Bagnold 1963年的原始推移质单宽输沙率公式为:

$$q_b = K\omega \quad (1)$$

式中 K 为一系数, ω 为水流消耗在单位床面上的功率。该公式适用于无粘性泥沙。

Gadd 等1978年曾用近底流速 U_{100} 与临界起动流速 U_{TH} 将(1)式表示为:

$$q_b = \beta(U_{100} - U_{TH})^3 \quad (2)$$

式中 β 为比例系数,可从水槽实验数据得到。

Hardisty 1983年认为 Gadd 等1978年对 Bagnold 原始公式(1)的修正过程不严密,得出的修正式(2)无明确的物理含义。他将 Bagnold 原始公式(1)修正为:

$$q_b = k_1(U_{100}^2 - U_{100cr}^2)U_{100} \quad (3)$$

式中 k_1 为一系数,它可根据水槽实验得出。式中, U_{100} 为床面以上100 cm 处的流速, U_{100cr} 为用床面以上100 cm 处的流速表示的临界起动流速。

Hardisty 在给出(3)式后,用水槽实验数据验证了它的正确性,也分析了(2)式与(3)式在实际应用中表现出的差别:对同一组实验数据, Gadd 等1978年的修正式(2)给出的计算结果比实测值高,而 Hardisty 1985年的修正式(3)给出的计算结果与实测值吻合良好。Collins 等^[1]曾分别用 Gadd 等的修正式(2)与 Hardisty 的修正式(3)计算了北海 Norfolk 沙脊所在海域推移质单宽输沙率的大小与方向,结果为:这两种修正式所计算的泥沙输运方向基本一致,但 Gadd 等的修正式给出的输沙率量值一般比 Hardisty 的修正式给出的明显偏高。作者也曾用 Gadd 等的修正式(2)与 Hardisty 的修正式(3)计算冰后期最大海侵时古长江河口湾及其周围海区的泥沙输运场^①,得出这两种修正式所计算的泥沙输运方向一致,但 Gadd 等的修正式给出的输沙率量值一般比 Hardisty 的修正式给出的明显偏高。这些与 Hardisty 1983年根据水槽实验结果得出的比较结论一致。

作者认为对同一个原始公式(1)之所以会出现两种修正形式,是因为 Gadd 等1978年与 Hardisty 1983年对 Bagnold 原始公式中 ω 含义的理解不同所致。前者将 ω 理解为水流消耗在单位床面上的总功率;后者将 ω 理解为水流用来搬运泥沙消耗掉的功率,即认为只有有效应力才做功。作者认为 Hardisty 1983年的修正式比 Gadd 等1978年的更合理。

4 对 Bagnold 悬移质单宽输沙率公式的微小修正

Bagnold 1966年给出的无粘性底床质的悬移质单宽输沙率计算公式为:

$$q_s = 0.01\tau \frac{U^2}{\omega_s} \quad (4)$$

式中 τ 为水流作用在床面上的剪切力, U 为垂线平均流速, ω_s 为沉速。作者受 Hardisty 1983年有效应力做功概念的启发,认为

$$\tau = \tau_0 - \tau_{cr} \quad (5)$$

式中 τ_0 为水流作用在床面上的总剪切应力, τ_{cr} 为临界剪切应力,二者之差为有效剪切应力。根据定义有:

$$\tau_0 = \rho U^2, \tau_{cr} = \rho U_{cr}^2 \quad (6)$$

对(6)式运用二次律关系,得:

$$\tau_0 = \rho k U^2, \tau_{cr} = \rho k U_{cr}^2 \quad (7)$$

① 朱玉荣,南黄海辐射状沙脊成因的沉积动力学研究。同济大学博士学位论文,1998。

将(7)式代入(5)式,且取海水的密度 $\rho=1.00$,得:

$$\tau = k(U^2 - U_{cr}^2) \quad (8)$$

式中 k 为底摩擦系数, U_{cr} 为用垂线平均流速表示的临界起动流速。将(8)式代入(4)式,得:

$$q_s = 0.01k(U^2 - U_{cr}^2) \frac{U^2}{\omega_s} \quad (9)$$

以上为作者对 Bagnold 1966年悬移质单宽输沙

率原始公式(4)的微小修正。

总之,由于问题的复杂性,对以潮流为主的浅海、陆架环境中泥沙运动问题的探讨尚比较少,有待于进一步广泛、深入的研究。

主要参考文献

- 1 Collins, M. B., Shimwell, S. J., Gao S. *et al.*. *Marine Geology*, 1995, 123: 125~142