

波浪在陡坡上的传播变形*

李炎保 孙晓彦

(天津大学水资源与港湾工程系 天津 300072)

摘要 利用数值方法和物理模型分析以反射为主的陡坡上波浪传播变形特性。数值方法采用标记单元法,为处理倾斜反射边界对斜坡前波浪运动的影响,提出了“台阶镜像法”。通过1:1.5光滑斜坡上物理模型试验,分析了不完全立波的运动特性,说明强反射光滑陡坡前波浪运动呈明显的立波状态,它与直墙反射的主要差别是坡前第一波节点和腹点位置向岸推移。本试验得到的波浪反射、爬高和回落特征值与港口工程规范给定结果接近。

关键词 陡坡 标记单元方法 台阶镜像法 波浪传播和变形

学科分类号 P731.22

陡坡上波浪运动特性的研究,以往的工作主要集中于对波浪在斜坡上运动特性的分析和特征指标的确定,以确定斜坡式防波堤消波和稳定特性(严恺,1992)。近年来数值模拟已经成为研究这一课题的重要手段。采用数值方法模拟斜坡坡面上波浪变形过程,跟踪描述流场特性的变化,对于确定特征指标、分析波浪破碎变形过程及其与岸滩和斜坡上结构物的作用、研究斜坡建筑物稳定性、确定斜坡接岸码头波浪力有着十分重要的意义。对于缓坡情况,已经发展了多种数学模型和计算技术,其中一些方法也应用于陡坡(李炎保,1989;邹光远等,1990;陈妙福等,1992)。将模拟缓坡上波浪变形破碎的模型应用于陡坡情况,需要处理的一个重要问题是坡面对波浪的反射。如何在模型中加入坡面反射的影响一直为研究者探索和关注。本文采用“台阶镜像法”处理这一问题,给出计算实例。同时通过1:1.5斜坡上波浪变形的物理模型试验,除对比反射、爬高和回落特征值外,着重讨论了波浪为斜坡反射所形成的腹点和节点位置与直立堤前反射时的不同。

1 运用标记单元(MAC)方法模拟陡坡上波浪传播变形

1.1 MAC方法简介

MAC方法(Maker and Cell technique)是求解不可压缩粘性流体不定常流动问题的一种有限差分方法,对具有自由面的流动问题十分有效。该法1965年由美国加利福尼亚大学LOSALAMOS研究室提出后,各国学者对其作了许多改进和发展。我国于80年代开始采用这一方法,处理波浪运动和其它水动力学问题(颜开,1987;陈妙福等,1992)。

MAC法采取网格交错技术,将压力定义于网格中心,速度定义于网格边线中点且垂直于网格中线。场变量的这种布置便于满足网格内速度散度为零的条件。差分格式为时

*国家自然科学基金资助项目,59779004号。李炎保,男,出生于1942年1月,硕士,教授,Fax:0086-022-23358329

收稿日期:1996-02-07,收修改稿日期:1997-09-28

间向前差分、空间中心差分。求解控制方程的差分方程组时,先以上一时步算得的速度场迭代求得本时步的压力场,再由这一已知压力场推求下一时步的速度场。得到此速度场后,可将时步推进到下一步求解压力...,如此反复循环,实现流动过程的跟踪描述。MAC法处理边界条件的方法是将计算区域拓宽,在流动区域外再设一层网格,适当地选择网格速度,以满足边界条件。关于MAC方法的控制方程、差分方程组、迭代求解格式和边界条件处理技术的细节和表达式可参阅高学平(1994)应用此法处理直立堤前波浪反射一文。

1.2 “台阶镜像法”处理陡坡坡面的反射

镜像法是处理波浪反射的有效方法。物理现象中直立墙前的立波是由墙面反射波和入射波迭加所形成的。数学模型中将计算域从墙面向岸延伸形成虚拟传播域,让人射波通过墙面继续向前传播,虚拟延伸域的波浪本质上就是墙面的反射波。然后以墙面作为镜面(即对称面),将沿延伸域传播的波浪改变方向与墙前真实水域对称位置的入射波迭加,得到的就是物理现象中的立波。这种数值计算的镜像法已经成功地应用于直立堤前为任意地形时立波运动的数值模拟(高学平,1994)。

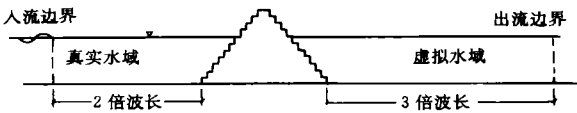


图1 计算区域示意图

Fig.1 Scheme of calculation area

合成波的运动特性。为此,本文采取了“台阶镜像法”来处理陡坡坡面的反射特性。在网格划分时采用从水底逐步外伸的台阶网格近似取代斜坡坡面(图1)。以过斜坡面波浪爬高顶点的铅垂线为对称轴设置与坡面网格对称的台阶形入流边界的虚拟传播域,每一时刻虚拟域边界上各点的流场特性参数按真实水域对称位置取值。这样,通过以斜坡面上各单元的台阶边界为镜面分段作类似直立堤前立波运动的镜像法数值计算,就可以实现波浪在斜坡面上传播变形的模拟。斜坡坡面由单元宽度的水平段和单元高度的竖直段来表示,在这个单元内斜坡面上波浪传播方向由水平段垂向分速和竖直段水平分速的合成效果来替代,反映了反射面与波浪传播方向斜交造成的反射强度变化。每一个虚拟台阶的反射波之间由波浪传播所需时间差,代表了从坡脚到坡顶不同高度上波浪开始反射时刻存在的相位差。

1.3 算例

采用上述方法,对水文物理模型试验的典型波况的波浪传播变形过程作了计算。斜坡坡度为1:1.5,坡脚水深为0.3m。计算区域入流边界位于坡脚以外2倍波长处,虚拟出流边界在虚拟坡脚以外3倍波长处。计算边界的选择以保证坡脚以

斜坡坡面与直立堤墙面对波浪的反射有所不同,它属于不完全反射。由于反射面与波浪传播方向交,造成反射强度减弱。此外,从坡脚到坡顶开始反射的时刻存在的相位差也要影响坡面上

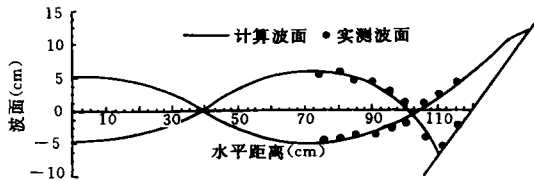


图2 陡坡上波浪传播变形算例(最大波面)

Fig.2 Calculation example of wave propagation and transformation on steep slope (extreme wave profile)

外 1 倍波长范围波况稳定为原则。网格的划分和时间步长的选取考虑了满足差分格式稳定性和减少数值耗散的要求同时尽量减少计算工作量。初始时刻计算区域内的水体是静止的,各点速度为零,压力按静水压力给出,然后以二阶 Stokes 波通过入流边界传入。图 2 为计算结果一例,给出了波浪在坡面上爬和回落达到最大时刻的波面形状与实测结果的比较,两者基本一致。

2 波浪在陡坡上传播变形的试验

2.1 试验条件

试验在长 30m、宽 1.0m、高 1.3m 的波浪水槽中进行,采用悬挂板式规则波造波机。为尽量减少二次反射的影响,试验段设在槽中所隔宽为 30cm 的狭槽中,斜坡坡面为光滑不透水的硬塑板制成。从坡脚到坡面与静水面交界处以 5cm 间隔布置 9 个波高传感器测定波浪在斜坡面上的变形。在坡脚以外设可移动的波高传感器 2 个,测定波腹点处的波高。水槽布置如图 3 所示。采用北京水利科学院研制的 SG60 水工试验测量系统进行数据采集分析。该系统的测量误差不超过 1%,除提供统计计算结果外,并可给出不同瞬时水面过程,保证试验结果的精度和成果分析的灵活方便。

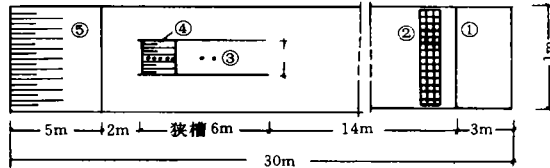


图 3 试验水槽布置示意图

Fig.3 Scheme of experimental wave flume

①造波板; ②消浪槽; ③波高测点; ④试验斜坡; ⑤消能坡

试验波浪周期包括 1.0s, 1.25s, 1.5s, 2.0s, 2.5s 共 5 种,每一周期各有 2—3 种波高,共 14 种组合(表 1)。坡脚水深固定为 30cm,其相对水深 d/L (水深/波长)变化范围为 0.07—0.22,波陡 H/L (波高/波长)变化范围为 0.012—0.057。试验条件下堤前波态均为陡坡情况以反射为主的不完全立波,与按照严恺(1992)计算的斜坡前波态相符。

2.2 斜坡前波面运动特征和腹点、节点位置

利用波高传感器和录相装置记录了斜坡前波面变化过程,通过这两种资料的分析注意到波面运动的以下两个特点。

(1) 对于强反射的光滑陡坡,其坡前波浪运动呈明显的立波状态。斜坡坡面的反射为部分反射,其反射系数 $K_r < 1$ 。如果将波高为 H_i 的入射波分解为 $K_r H_i$ 和 $(1 - K_r) H_i$ 两部分,则部分反射后合成波可看成为由波高 $2K_r H_i$ 的立波和波高 $(1 - K_r) H_i$ 的行进波两部分组成。当 K_r 较大时,迭加的行进波运动并不明显。斜坡前表观波浪运动以立波为主,腹点节点之间波面震荡过程中,不易观察到迭加在震荡水面波形向前推进的行进波。光滑陡坡的反射显示了这一特点。

在本试验以外,笔者还进行了与本试验相同坡度、水深和波要素条件的工字块体护面斜坡前波浪运动试验。由于工字块体护面斜坡反射系数仅为光滑斜坡的 38%,堤前波浪运动主要显示为行进波向坡面推进,腹点节点之间波面震荡已不明显,其位置主要从波高大小才能判断。以两种坡面各自的最小反射系数波况来比较,光滑坡面时部分反射后合成波中,立波和行进波波高比为 1.44:0.28,而工字块护面时比值为 0.4:0.8。其差别十分明显,造成了斜坡前波面运动特征的不同。

(2) 波浪在斜坡前反射所形成的腹点和节点位置与直立堤前完全立波情况下的不同,主要是坡前第一个波节点和波腹点向岸靠近。由于波浪到达坡脚到坡面以上各个高度时刻不同,同时波浪在坡面上爬延迟了反射过程,使斜坡前反射波浪的波腹点和波节点位置发生变化。试验结果说明,其主要影响表现在斜坡前第一个波节点和波腹点到坡面与静水面交点的距离,比直立堤前立波波腹点距墙面的距离要有所缩短。在第一个波腹点以外,腹点、节点之间距离并不发生改变。曾有假设波浪在斜坡面以波速上爬,根据上

表1 实测坡前第一个波腹点和波节点位置

Tab.1 Measured results for the position of the first antinode and node

入射波条件		第一波腹点位置			第一波节点位置			节点腹点间距	
周期(s)	波高(cm)	实测	直墙时	岸移距	实测	直墙时	岸移距	实测	直墙时
1.0	6.3	50	69	19	18	34	16	32	34
1.0	7.8	45	69	24	18	34	16	27	34
1.25	5.6	75	94	19	30	47	17	45	47
1.25	9.6	70	94	24	30	47	17	40	47
1.25	11.4	65	94	29	30	47	17	35	47
1.5	5.4	105	117	12	45	59	14	60	59
1.5	9.2	100	117	17	45	59	14	55	59
1.5	13.5	95	117	22	45	59	14	50	59
2.0	4.7	160	163	3	72	82	10	88	82
2.0	9.4	155	163	8	72	82	10	83	82
2.0	13.5	150	163	13	72	82	10	78	82
2.5	5.1	200	208	8	95	104	9	105	104
2.5	8.9	195	208	13	95	104	9	100	104
2.5	11.8	190	208	18	95	104	9	95	104

注:腹点、节点位置以其到坡面与静水面交点的距离给出,表列距离单位为cm

表2 实测波浪反射、爬高和回落深度

Tab.2 Measured results for wave reflection, runup and rundown

入射波条件		反射系数		相对爬高		相对回落	
周期(s)	波高(cm)	实测	规范计算	实测	规范计算	实测	规范计算
1.0	6.3	0.87	0.76	1.89	2.34	1.09	1.19
1.0	7.8	0.81	0.72	1.90	2.38	0.98	1.13
1.25	5.6	0.91	0.84	1.52	1.94	1.28	1.25
1.25	9.6	0.73	0.77	1.92	2.25	1.11	1.16
1.25	11.4	0.64	0.74	1.65	2.29	0.97	1.10
1.5	5.4	0.86	0.89	1.98	2.61	1.28	1.21
1.5	9.2	0.88	0.85	1.73	1.97	0.99	1.18
1.5	13.5	0.66	0.79	1.61	2.14	1.10	1.11
2.0	4.7	0.88	0.94	1.31	1.30	1.19	1.02
2.0	9.4	0.86	0.93	1.76	1.52	0.99	1.09
2.0	13.5	0.88	0.90	1.57	1.71	0.80	1.07
2.5	5.1	0.84	0.95	1.64	1.26	1.27	0.89
2.5	8.9	0.94	0.98	1.51	1.31	1.08	0.94
2.5	11.8	0.70	0.96	1.49	1.38	0.96	0.77

注:表列反射系数、相对爬高和回落深度均为相对于入射波高的比值

爬延时计算入、反射波交会时刻确定其位置。这种方法未考虑坡面各点反射时间差,且上爬速度不够准确,与实测结果有较大差距。

本试验实测结果见表 1,腹点、节点位置是通过相邻波高传感器的实测波高确定的。试验注意到,对于同一种周期的人射波,波高的改变并不引起第一个波节点位置发生变化。而第一个波腹点及其后的第二个波腹点位置则有随入射波高增加向岸靠拢的趋势。表 1 数据说明,节点和腹点向岸移动距离都有随波周期加长而减少的趋势。对于每一种周期中较小的波高,节点、腹点之间的距离接近于直墙前完全立波的情况。

2.3 波浪的反射、爬高和回落深度

波浪的反射、爬高和回落深度代表了波浪在斜坡上传播变形主要特征,已经积累了较多的研究成果。表 2 列出 14 种入射波况下本文试验结果与按交通部港口工程规范(1987)计算值的比较。多数情况下两者数值接近,实测值与计算值差别较大的情况主要出现在入射波高较大时。这时波浪反射后斜坡前波面开始出现不稳定迹象,虽未形成破碎,但腹点波面已不完全光滑连续。

3 结语

3.1 本文运用 MAC 方法进行陡坡上波浪传播变形的数值计算,采用“台阶镜像法”处理坡面对波浪的反射。以台阶网格近似取代斜坡坡面,并设置与坡面网格对称的台阶形人流边界的虚拟传播域,将沿虚拟域传播的波浪改变方向与坡前真实水域对称位置的人射波迭加,可得到包含坡面反射的波浪传播变形过程。1:1.5 斜坡上典型波况波浪变形数值计算和物理模型试验结果接近。

3.2 斜坡前部分反射的合成波可看成为由波高 $2K_r H_i$ 的立波和波高 $(1 - K_r)H_i$ 的行进波两部分组成。强反射的光滑陡坡,其坡前波浪运动呈明显的立波状态。

3.3 波浪在斜坡前反射所形成的腹点和节点位置与直立堤前完全立波情况下的主要差别是斜坡前第一个波节点和波腹点向岸靠近。两者的移动量随着入射波周期加大而减少,腹点位置向岸移动量还随着波高加大而加大。

3.4 波浪的反射、爬高和回落深度代表了波浪在斜坡上传播变形主要特征,本文就 1:1.5 斜坡上波浪变形进行了数值计算和水槽试验。所得到的结果与交通部港口工程规范(1987)计算值基本一致。

致谢 本文工作得到赵耀南、曹祖德、宋祁教授的帮助,廖建新同志参加试验,谨志谢忱。

参 考 文 献

- 交通部港口工程规范. 1987. 北京:人民交通出版社. 368—376
- 邹光远 樊社军,1990. 孤立波与连续波列爬坡的数值计算. 水动力学研究与进展, A 辑, 5 (1): 30—36
- 陈妙福 赵耀南,1992. 倾斜底坡上波浪传播与破碎. 水动力学研究与进展, A 辑, 7 (2): 192—200
- 严恺主编,1992. 中国海岸工程. 南京:海河大学出版社. 161—170
- 李炎保,1989. 破碎波对桩柱的作用力及其流场的研究进展. 水动力学研究与进展, A 辑, 4 (2): 103—110
- 高学平,1994. 直立堤前为任意地形时立波运动的数值模拟. 海洋学报, 17 (1): 111—118
- 颜开,1987. MAC 方法的思想、发展和应用. 水动力学研究与进展, A 辑, 2 (3): 133—142

WAVE PROPAGATION AND TRANSFORMATION ON STEEP SLOPE

LI Yan-bao, SUN Xiao-yan

(*Department of Water Resources and Port Engineering, Tianjin University, Tianjin, 300072*)

Abstract Wave propagation and transformation characteristics on a steep slope where the reflection is dominant are analysed by a numerical and a physical model. For the numerical method the Marker and Cell technique is used and the Stage Mirror Image skill is proposed for dealing with the influence of the incline reflection boundary on the wave motion in front of the slope. The slope boundary is replaced approximately by a stage net. An invented propagation area is set up whose stage incident boundary is symmetrical about the slope net. Return the wave propagation direction along the invented area and add them to the incident wave propagating in the real area in the front of the slope, the wave propagation and transformation process consisting of the influence of the slope can be modelled. The kinematic characteristics of the partial standing wave are analysed by the physical model on the 1:1.5 smooth slope. The partial standing wave can be decomposed into a standing wave formed by the reflecting component of the incident wave and a propagating wave formed by its non-reflecting component. The characteristics of wave propagation and transformation on the slope are determined by the proportion of these two components. For the smooth steep slope with strong reflection, the wave motion in front of the slope is in obvious standing wave state. The difference between the wave reflection by a slope and that by a vertical wall is that in the first case the positions of the first node and antinode move toward the bank. The measured results for the reflection coefficient, runup and rundown on the 1:1.5 smooth slope are close to calculated values obtained by using the technical code of port engineering of the Ministry of Communication.

Key words Steep slope Marker and Cell technique Mirror image Wave propagation and transformation

Subject classification number P731.22