

④ 21-26

第18卷第4期
2000年11月海洋工程
OCEAN ENGINEERINGVol. 18 No. 4
Nov. 2000

文章编号:1005-9865(2000)04-0021-06

波浪作用下桩柱周围局部冲刷研究

陈国平, 左其华, 黄海龙

(南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

TV139.26

摘要:通过系统的物理模型试验,考虑波高、周期、水深、泥沙粒径、桩柱直径等影响因素,研究桩柱周围的局部冲刷形态、尺度等。分析了桩柱周围局部冲刷的三种基本类型,得出最大冲刷深度随波数的变化规律,提出了最大冲刷深度的计算方法。

关键词:波浪; 桩柱; 局部冲刷

中图分类号:TV139.2+6

文献标识码:A

最大冲刷深度, 波高, 水深

Local scour around cylinder under wave action

CHEN Guo-ping, ZUO Qi-hua, HUANG Hai-long

(Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: The model tests are performed with regular waves, and the effect of wave height, wave period, water depth, sediment size and cylinder diameter is evaluated. The shape and size of local scour around cylinders is studied in this paper. There are three typical scour patterns due to wave action. It is discovered that a relationship exists between scour depth and wave number. An empirical formula of the maximum local scour is thus derived.

Key words: wave; cylinder; local scour

圆柱结构物是海洋工程中应用非常广泛的结构,据其直径与波长之比,可分为大直径墩柱式结构和小直径桩柱式结构。关于小直径桩柱在波浪作用下发生局部冲刷的研究很多,绝大部分以海上作业平台的脚柱、线为对象,主要有王汝凯^[1],小林智尚^[2],水口优^[3],榎木^[4],河田惠昭^[5],Chow^[6],Bijker^[7],Noinomiya^[8],Machemehl^[9]等,其中水口优等用底质速度与泥沙起动速度之比 u_b/u_c 及直径与波长之比 D/L 将桩柱周围的冲刷型态分成四类,并提出了相应的最大冲刷深度计算方法。王汝凯进行了波与恒定流同时作用时小直径桩柱周围的局部冲刷试验,发现波流共同作用时的局部冲刷深度比单纯波或单纯流作用时的冲刷深度大,并给出了最大冲刷深度的计算公式。

1 试验方法

桩柱周围局部冲刷试验在宽 17.5m、长 52m、高 1.2m 的波浪池中进行,水池中部设置 2.5m × 2.0m × 0.2m 的沙床,沙床距推波板距离为 28m,侧壁采用网孔塑料消浪栅消除结构物的侧向反射波。砂床地形采用地形仪自动量测,测点间距 5cm,沿桩柱轴线方向(波浪推进方向)的沙面地形在造波后的 15、30、60min 时各测量一次,以后每隔一小时测量一次,在前后两次的地形测量值变化较小时,认为冲刷达到基本平衡。

桩柱周围局部冲刷深度 Z 可认为主要是桩柱直径 D ,泥沙中值粒径 d_{50} ,泥沙体积质量 ρ_s ,波高 H ,周期 T ,波长 L ,水深 h 等的函数,即:

收稿日期:2000-03-03

基金项目:交通部重点科技项目资助

作者简介:陈国平(1965—),男,高级工程师,主要从事海洋工程研究工作。

$$Z_c = f(D, d_{50}, H, T, L, h, \dots)$$

试验中取:柱径 $D=5, 15, 30\text{cm}$

泥沙中值粒径: $\left\{ \begin{array}{l} \text{天然沙: } \rho_s = 2.65, d_{50} = 0.1, 0.18, 0.32, 0.46, 0.58, 0.87\text{mm} \\ \text{煤粉: } d_{50} = 0.125\text{mm}, \rho_s = 1.35; d_{50} = 0.34\text{mm}, \rho_s = 1.53 \\ \text{波浪要素: 波高 } H = 5 \sim 15\text{cm}; \text{周期 } T = 0.7 \sim 3.0\text{s}; \text{水深 } h = 30, 40, 50\text{cm} \end{array} \right.$

2 泥沙临界起动流速试验

从40年代以来,国内外许多科技工作者研究过波浪作用下的泥沙起动问题,并得到了不少泥沙起动流速的计算公式。将应用较多的十七个泥沙起动流速计算公式进行比较。由于泥沙起动判断标准不同,通过计算

分析可以知道各家公式的计算结果相差很大。如何准确计算泥沙起动流速是需解决的基本问题,为此在前述试验条件下,进行了不同粒径的泥沙的起动试验。试验结果及有关公式计算结果绘于图1。

由图1可知,泥沙发生普遍动时的波动流速试验结果与佐藤、田中的计算结果较为一致,本文的起动流速将以此公式计算,即:

$$u_c = 0.372 \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right)^{2/3} \cdot g^{2/3} \cdot d_{50}^{1/3} \cdot T^{1/3} \quad (1)$$

式中: u_c 是临界起动流速; ρ 是水的体积质量; g 是重力加速度。

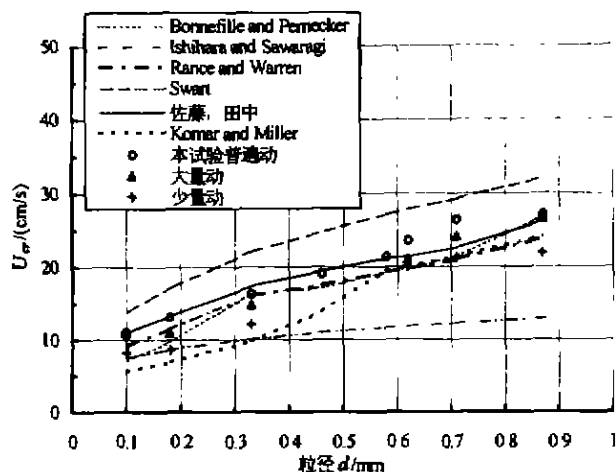


图1 二维波浪场泥沙起动流速比较

Fig. 1 The comparison of stability criteria of sand under wave action

3 桩柱式结构周围的局部冲刷

桩柱式结构,由于桩柱体相对较小, $K.C.$ 数 ($u_* T/D$) 大于1。水质点运动距离是桩柱直径的数倍以上,产生裂流,并向下游移动,形成涡漩。桩柱

周围的冲刷主要由上述的马蹄形涡漩及在水体中向下流动的涡漩造成。最大冲刷坑的位置分散,遍布桩柱四周。最大冲刷深度与桩柱直径密切相关。

3.1 局部冲刷类型

波浪作用下,桩柱周围的局部冲刷形态主要可分为以下三种类型:1)浑水冲刷:此时波浪底部水质速度较大, $u_b/u_* > 1.0$,床面泥沙全面起动,形成沙纹,桩柱周围的地形变化包含桩柱引起的局部地形变化和沙纹尺度两部分。2)对称的角状分布冲刷: $u_b/u_* < 1.0$,桩柱直径相对较大,局部冲刷发生在桩柱的斜前方和斜后方。3)环向冲刷: $u_b/u_* < 1.0$,桩柱直径相对较小,冲刷发生在桩柱壁的四周,呈倒圆锥状与恒定流作用下的冲刷形态相似,这类冲刷主要是由马蹄形涡漩引起的。试验中发现,当 $u_b/u_* < 1.0$ 时,桩柱周围的局部冲刷形态与桩柱相对直径有较大关系,冲刷形态随 $K.C.$ 的变化而改变,而底质粒径对其没有影响。桩柱周围局部冲刷是由剥离涡漩、马蹄形涡漩等涡漩系统的影响程度决定的。当桩柱直径相对较大, $K.C.$ 数相对较小时,桩柱周围局部冲刷主要受剥离涡漩影响,形成角状分布冲刷,当桩柱直径相对较小, $K.C.$ 数较大时,桩柱周围局部冲刷主要受柱前马蹄形涡漩的影响,形成倒圆锥形的环向冲刷。西尺^[10]等人的报告认为区分上述两种冲刷形态的 $K.C.$ 数约为7.4~7.7。本试验的结果也大致与其一致。

3.2 局部冲刷的发展过程

图2为最大冲刷坑的冲刷深度与最终冲刷深度之比随波数的变化,由图2可看出,在波浪作用初期,局部冲刷快速发展,随后发展速度逐渐趋缓,且最大冲刷深度逐渐趋于一定值。其变化规律可用双曲函数来表示:

$$Z/Z_{\infty} = \text{th}(3.05 \times 10^{-4} N) \quad (2)$$

图3~图4分别为波浪作用时间 $t=120\text{min}$ 和 $t=360\text{min}$ 时的局部冲刷地形。随着波浪作用时间的变化,局部冲刷地形不仅其冲刷形状保持相似,而且最大冲刷深度产生的位置也基本一致,只是最大冲刷深度的绝对

值发生了改变。

3.3 局部冲刷的最大冲刷深度

3.3.1 最大冲刷深度的发生位置

以桩柱中心为原点,正对入射波向的 θ 为零,取极坐标系 (r, θ) ,图5为最大冲刷坑发生的位置与相对柱径 D/L 的关系。可看出,点据较散乱,但主要集中在 $25^\circ \sim 135^\circ$ 之间,而且随 D/L 增大,夹角 θ 有变小的趋势,这与桩柱冲刷形态是相对应的。图6为最大冲刷点距桩柱中心的距离与 D/L 的关系, $2r/D$ 随着 D/L 增大而趋于减小,且 $2r/D \approx 2$,而当 D/L 较小时,点散乱, $2r/D \approx 2 \sim 5$ 。

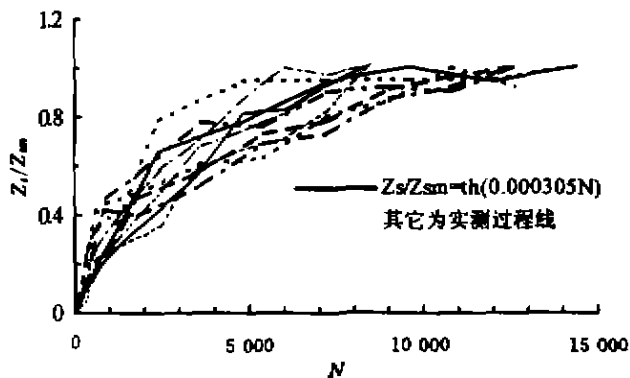
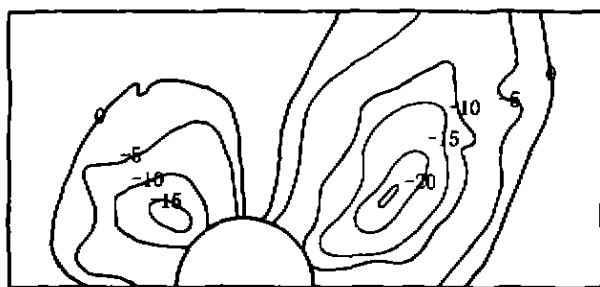
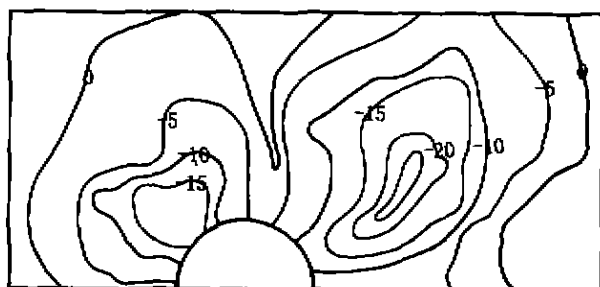


图2 桩柱周围最大冲刷坑深度随波数的变化
Fig. 2 Development of local scour with the wave number



$D=15\text{cm}$ $d=0.87\text{mm}$ $H=11.16\text{cm}$ $T=1.5\text{s}$ $h=30\text{cm}$
图3 不同时刻桩柱周围地形变化情况($t=120\text{min}$)

Fig. 3 Scour pattern (120 minutes after test commencement)



$D=15\text{cm}$ $d=0.87\text{mm}$ $H=11.16\text{cm}$ $T=1.5\text{s}$ $h=30\text{cm}$
图4 不同时刻桩柱周围地形变化情况($t=360\text{min}$)

Fig. 4 Scour pattern (360 minutes after test commencement)

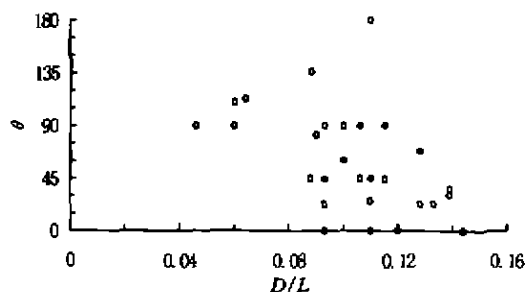


图5 桩柱周围最大冲刷深坑位置
Fig. 5 The site of maximum scour depth

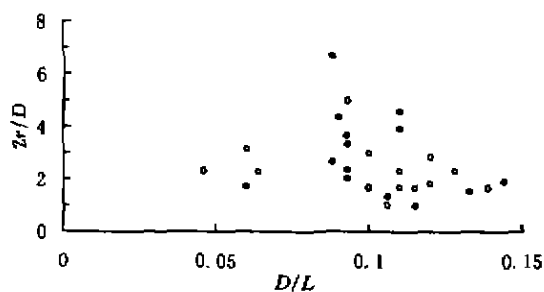


图6 桩柱周围最大冲刷深度距柱心的距离
Fig. 6 The distance between maximum scour depth and the center of cylinder

3.3.2 最大冲刷深度的影响因素

如前所述,墩柱周围局部冲刷的最大冲刷深度与入射波高 H ,波长 L ,泥沙粒径 d ,柱径 D ,水深 h 等因素有关,桩柱结构也应有类似的关系存在。

1) 波高的影响

图7为最大冲刷深度与入射波高的关系,随着波高的增大,波浪的能量加大,底面水质速度也加大,泥沙运动更趋剧烈,因此桩柱周围最大冲刷深度也显著增大,冲刷范围也随之加大。

2) 波长的影响

图8为最大冲刷深度与入射波长的关系,波长的增大与波高的增大相似,主要增大了底面水质速度,加剧了泥沙的输移,从而加剧了桩柱周围的地形变化,最大冲刷深度也明显增大。

3) 泥沙粒径的影响

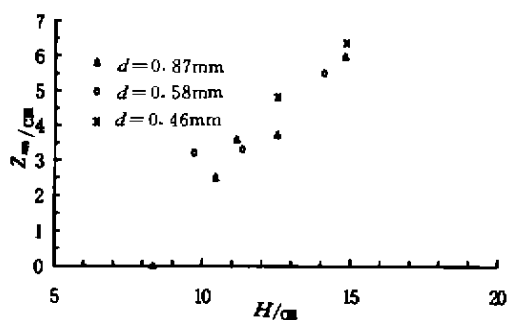


图7 桩柱周围最大冲刷深度随波高的变化

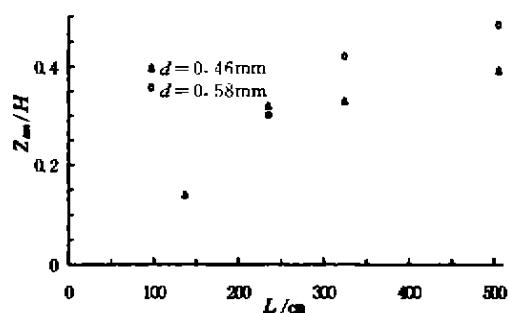
Fig. 7 Maximum local scour depth Z_m versus wave height for various sediment sizes

图8 桩柱周围最大冲刷深度随波长的变化

Fig. 8 Relative maximum local scour depth Z_m/H versus wave length for various sediment sizes

图9为最大冲刷深度与泥沙粒径的关系,当波高、波长、柱径、水深等条件相同时,泥沙粒径的大小对最大冲刷深度有一定的影响,尤其当泥沙粒径相对较大时,粒径大小对最大冲刷深度影响相对较大,而当泥沙粒径相对较小时,其对最大冲刷深度的影响相对较小。Roper、Schneider 和 Shen^[11]根据试验研究认为,当泥沙粒径大于0.52mm时,粒径大小对冲刷深度有影响,当泥沙粒径小于0.52mm时,冲刷深度与粒径无关。本试验结果似乎无此规律性。

图10为最大冲刷深度与水深的关系。随着水深的加大,最大冲刷深度迅速减小。因为桩柱周围的泥沙运动主要是由底面水质点速度与泥沙起动速度决定的,由于水深的加大,底面水质点速度迅速减小,泥沙运动相对变弱,因此最大冲刷深度也迅速减小,可以预见,当水深增大到一定程度时,桩柱周围将不发生泥沙运动,最大冲刷深度趋于零。

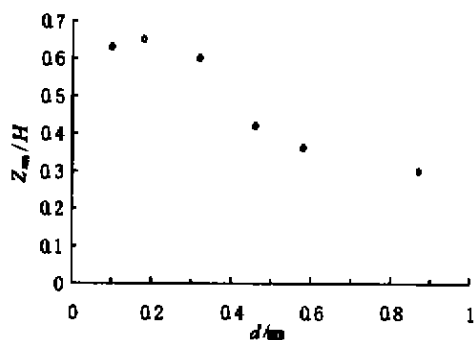


图9 桩柱周围最大冲刷深度随泥沙粒径的变化

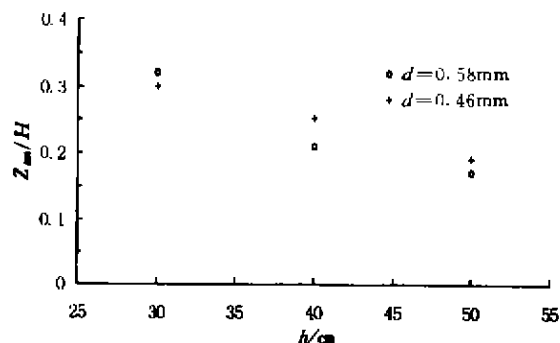
Fig. 9 Relative maximum local scour depth Z_m/H versus sediment sizes

图10 桩柱周围最大冲刷深度随水深的变化

Fig. 10 Relative maximum local scour depth versus water depth for various sediment sizes

5) 柱径的影响

桩柱直径的大小对最大冲刷深度也有一定的影响,柱径越大,最大冲刷深度也越大。

由此可见,桩柱周围最大冲刷深度与波高、波长、柱径成正比,与泥沙粒径、水深等因素成反比关系。从几个反映上述影响因子的主要特征参数来寻求一些关系,主要特征参数有:K.C.数($u_b T/D$);Uerll数(HL^2/h^3);泥沙沉积数 $N_s(u_b^2/gd_{50} \cdot \frac{\rho_s - \rho}{\rho})$; u_b/u_{*c} ; 桩柱雷诺数($u_b D/\nu$)等,将这些参数分别与无因次化最大冲刷深度 Z_m/D 的关系绘于图11~图14。由图11可以看出相对最大冲刷深度 Z_m/D 随着K.C.数增大也趋于增大。

图12为相对最大冲刷深度随 u_b/u_{*c} 的变化,当 $u_b/u_{*c} < 1.0$ 时,最大冲刷深度增长速度较快,点据相对较集中,但当 $u_b/u_{*c} > 1.0$ 时,点据较离散,无明显的规律性。

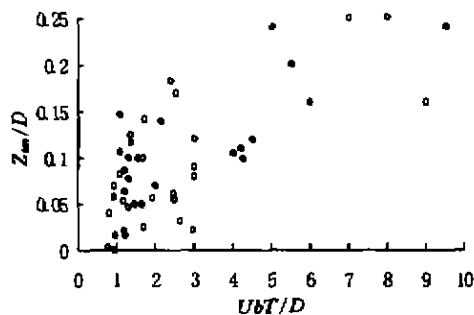
图 11 桩柱周围最大冲刷深度 Z_m/D 与 K.C. 数的关系

Fig. 11 Relative maximum local scour depth Z_m/D versus K.C. number

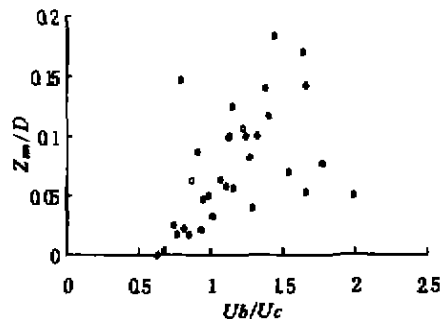
图 12 桩柱周围最大冲刷深度 Z_m/D 与 u_b/u_c 的关系

Fig. 12 Relative maximum local scour depth Z_m/D versus u_b/u_c

总结前人的研究成果发现,最大冲刷深度的表达形式千差万别,如榎本认为最大冲刷深度是由 K.C. 数决定的,水口优根据试验资料分析整理后,提出了不同冲刷形态的最大冲刷深度随 u_b/u_c 及 K.C. 数的关系式。但从中可以看出,他们的试验点据也较离散,只是隐含了一种变化趋势。综合图 11~图 15 可以认为,桩柱周围的最大冲刷深度的点据较离散,很难用个别参数来表征其变化规律。选用综合参数 P 来反映波浪要素、泥沙特性及结构等因素对桩柱周围局部冲刷深度的影响。

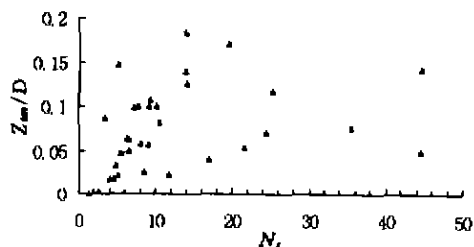
图 13 桩柱周围最大冲刷深度 Z_m/D 与沉积数 N_s 的关系

Fig. 13 Relative maximum local scour depth Z_m/D versus N_s

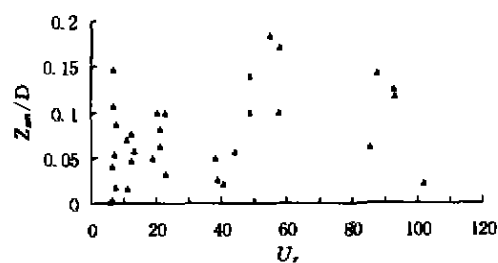


图 14 桩柱周围最大冲刷深度与 Ursell 数的关系

Fig. 14 Relative maximum local scour depth Z_m/D versus Ursell number

$$P = N_{FW} \cdot \frac{H}{L} \cdot U_r \cdot N_s \cdot N_{RP} = \frac{u_b^2 H^2 \cdot L \cdot D}{\frac{\rho_s - \rho}{\rho} g^2 d_{50} h^4 v} \quad (3)$$

式中:波流 Froude 数: $N_{FW} = \frac{u_b^2}{gh}$;

Ursell 数: $U_r = HL^2/h^3$;

波陡: H/L ;

泥沙沉积数: $N_s = \frac{u_b^2}{\frac{\rho_s - \rho}{\rho} g d_{50}}$;

桩柱雷诺数: $N_{RP} = u_b \cdot D/v$

最大冲刷深度 Z_m 与水深 h 之比随综合参数 P 的变化如图 15 所示,采用线性回归方法得:

$$Z_m/h = 0.0013 P^{0.406} \quad (4)$$

相关系数 $r = 0.85$ 。

由图 15 可以看出,综合参数 P 能较好地反映波浪要素、泥沙特性及结构等因素对桩柱周围局部冲刷深

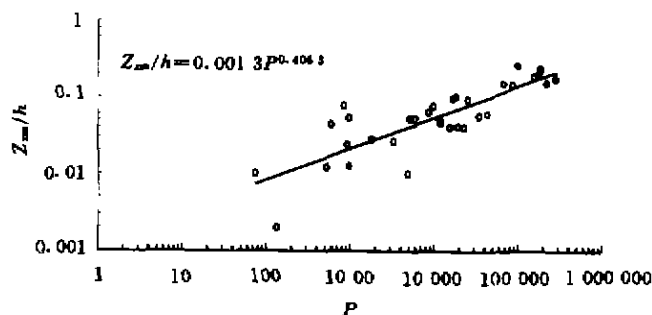


图 15 桩柱周围最大冲刷深度与综合参数的关系

Fig. 15 Relative maximum local scour depth Z_m/h versus a multiple parameter

度的影响。

4 结 论

(1) 桩柱周围冲刷形态可分为全面形成沙纹的浑水冲刷, 对称的角状分布冲刷和倒圆锥形的环向冲刷三类。

(2) 桩柱周围最大冲刷坑的冲刷深度随波数变化规律, 可按式计算。

$$Z_c/Z_m = \text{th}(3.05 \times 10^{-4}N)$$

(3) 桩柱周围最大冲刷深度的发生位置随相对柱径变化, 分布桩柱四周。

(4) 桩柱周围最大冲刷深度主要受波流 Froude 数、Ursell 数、波陡、泥沙沉积数、桩柱雷诺数等因素影响, 可按式计算:

$$Z_m/h = 0.0013P^{0.406}$$

式中:

$$P = N_{FW} \cdot \frac{H}{L} \cdot U_r \cdot N_c \cdot N_{kp} = \frac{U_b^3 H^2 \cdot L \cdot D}{\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \cdot g^2 \cdot d_{50} h^4 \tau}$$

参考文献:

- [1] Wang Ru-kai, John B Herbich. Combined current and wave-produced scour around a single pile [R]. Texas A & M University, COE Report No. 269, 1983, 3.
- [2] 小林智尚. 波动场における直立圆柱まわりの底面近傍の流況に関する実験的研究[A]. 海岸工学论文集[C], 1990.
- [3] 水口优, 小島匡人. 波动いする小口径圆柱すかちりの局所洗掘関する実験的研究[A]. 第 32 回海岸工学講演会论文集[C], 1985.
- [4] 榎木享, 出口一朗. 波动いする圆柱周边局所洗掘い関する実験[A]. 第 31 土木学会年次学术講演会论文集 I [C], 1976.
- [5] 土尾义人, 河田惠昭. 波流すの共存場いおける局所洗掘[A]. 第 34 海岸工学講演会论文集[C], 1987.
- [6] Chow W Y, J B Herbich. Scour around a group of piles [A]. Proc. Offshore Technology Conference [C], Houston, OCT No3308, 1987.
- [7] E W Blyker, C A de Bruyn. Erosion around a pile due to current and breaking waves [A]. Proc. 21th International Conf [C]. Coastal Eng. 1988, 1368-1381.
- [8] K Ninomiya, K Tagaya, Y Murase. A study on suction and scouring of siton-bottom type offshore structure[C]. OTC 1605, 1972.
- [9] J L Machemehl, G Abad. Scour around marine foundation[C]. OTC 2313, 1975.
- [10] 西尺胜, 南诚信, 尺本正树. 波动場いかけろ为圆柱の後流渦ベターソヒ局所洗掘ヒの关系[A]. 土木学会第 43 回年次学术講演会概要集 II [C], 1988.
- [11] A T Roper, U R Schneider, H W Shen. Analytical approach to local scour [A]. Proc. Twelfth Congress, International Association for Hydraulic Research [C]. Vol. 3. section C18, 1967.