

波流作用下输电线路海中立塔局部冲刷计算方法

李 磊,谷洪钦,于万春

(国核电力规划设计研究院,北京 100095)

摘要:由于受到波浪和潮流的共同作用,输电线路海中立塔局部冲刷问题较为复杂,比较分析了4种可用于海中立塔位局部冲刷计算的公式(韩海骞公式、王汝凯公式、Jones&Sheppard公式和65-1修正式及65-2式)。对于只考虑波浪作用的公式,将波浪水质点平均流速与潮流流速叠加;当考虑潮流往复流作用时,提出采用折减系数法对计算值进行修正。将4种方法分别应用于某输电线路工程海中立塔局部冲刷计算。结果表明,韩海骞公式的计算结果最符合实际。

关 键 词:局部冲刷;波浪;潮流;海中立塔

中图法分类号:TV734.3

文献标志码:A

DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.05.010

1 研究背景

沿海输电线路工程常遇到海中修建杆塔等构筑物的问题。为了确保构筑物基础安全,必须考虑因杆塔修建造成水流改变而导致的海床冲淤变化^[1]。与河中立塔受单向水流的冲刷影响不同,海中塔位冲刷受到潮汐往复流作用,同时还可能受到波浪、风暴潮等多重因素的共同影响,冲刷问题更为复杂^[2-3]。

输电线路工程塔位冲刷的分析方法主要分为两大类:基于物理模型的实验模拟方法和基于冲刷计算公式的数学分析方法^[3-5],其中,物理模型实验模拟方法在我国输电线路河道和海中立塔塔位冲刷问题中,已经得到了广泛应用,但应用冲刷计算公式进行塔位冲刷深度计算常见于处理河中立塔问题,应用于海中塔位的冲刷分析计算研究还不多见。目前,在波浪、潮流作用下局部冲刷实验研究的基础上,国内外已提出了多个海中局部冲刷计算公式,并在港口、桥墩、海上风电等工程中得到了应用^[2-3,6-8]。但总的来说,海中冲刷问题研究成果还较少,还没有成熟的冲刷计算公式可以推广使用。

本文拟以某输电线路工程海中立塔问题为实例,利用国内外应用较广的局部冲刷计算公式,进行海中

塔位局部冲刷分析计算,并探讨了计算方法中波浪、潮流的共同作用和潮流的往复作用等问题,比较分析了各种方法在海中冲刷计算中的适用性,以期对类似工程提供参考作用。

2 波流共同作用下局部冲刷计算方法

输电线路海中立塔塔基的桩径较小,在波浪作用下局部冲刷问题的分析中属于小直径情况,此时认为,波浪对墩桩和桩基的作用力不考虑柱体对流场的干扰^[3,7]。目前,国内外用于计算小直径情况波浪、潮流作用下局部冲刷的计算公式主要有韩海骞公式、王汝凯公式、Jones&Sheppard(简称J&S)公式等。其中,韩海骞公式和J&S公式仅考虑潮流的作用,王汝凯公式考虑波浪、潮流的共同作用。本文还选择了常用于河流动力(单向水流)作用下的桩柱局部冲刷65-1修正式和65-2式,与海洋局部冲刷的计算方法进行比较。

2.1 桥墩局部冲刷公式

2.1.1 韩海骞公式^[7]

2006年,浙江大学韩海骞通过物理模型试验,得到单一潮流作用下桥墩局部冲刷深度的计算公式

$$h_b/h = 17.4k_1k_2(B/h)^{0.326}(d_{50}/h)^{0.167}F_r^{0.628} \quad (1)$$

式中, h 为全潮最大水深, m; h_b 为潮流作用下桥墩最大局部冲刷深度, m; B 为最大水深条件下平均阻水宽度, m; d_{50} 为中值粒径, m; F_r 为 Froude 数, $F_r = u/(gh)^{0.5}$, u 为全潮最大流速, m/s, g 为重力加速度, m/s²; k_1 为基础桩平面布置系数, 条形取 1.0, 梅花形取 0.862; k_2 为基础桩垂直布置系数, 直桩取 1.0, 斜桩取 1.176。

2.1.2 王汝凯公式^[8]

1982 年, 王汝凯和 Herlich 基于粗砂实验模型, 进行了波与恒定流共同作用时小直径桩柱周围的局部冲刷试验, 给出了局部冲刷深度计算公式

$$\lg(S_{w1}/h) = -1.2935 + 0.1917 \lg \beta$$

$$\beta = N_f \frac{H}{L} U_r N_s N_{rp} = \frac{H^2 L V^3 D [V + (1/T - V/L) HL/2h]^2}{[(\rho_s - \rho)/\rho] v g^2 h^4 h_{50}} \quad (2)$$

式中, N_f 为 Froude 数的平方, $N_f = V^2/gh$, V 为行近流速, m/s; H/L 为波陡, H 为波高, m, L 为波长, m; T 为周期, s; U_r 为 Ursell 数, $U_r = HL^2/h^2$; N_s 为颗粒泥沙数, $N_s = V^2/[(\rho_s - \rho)/\rho] g d_{50}$, 其中 ρ_s 为泥沙密度, kg/m³, ρ 为水密度, kg/m³, d_{50} 为泥沙中值粒径, mm; N_{rp} 为桩的雷诺数, $N_{rp} = VD/v$, D 为桩径, m, v 为运动黏滞系数, m²/s。

2.1.3 J&S 公式^[6]

2000 年, Jones 和 Sheppard 在研究了美国和西欧各国局部冲刷公式的基础上, 提出了沿海和内陆大型桥墩局部冲刷计算公式 (J&S 公式)

$$\frac{D_s}{d_p} = c_2 \left(\frac{V_{uspb} - V}{V_{cr}} \right) + c_3$$

$$c_2 = (k - c_3) \left(\frac{V_{uspb}}{V_{cr}} - 1 \right)^{-1}$$

$$c_3 = 2.4 \tanh[2.18 \left(\frac{D}{d_p} \right)^{2/3}]$$

$$k = \tanh[2.18 \left(\frac{D}{d_p} \right)^{2/3}] [-0.279 + 0.049 \exp(\lg \frac{d_p}{d_{50}}) + 0.78 (\lg \frac{d_p}{d_{50}})^{-1}]^{-1} \quad (3)$$

式中, D_s 为桩基极限冲刷深度, m; d_p 为桩径, m; D 为水深, m; V 为底部最大平均流速, m/s; V_{cr} 为泥沙临界起动流速, m/s; V_{uspb} 为垂线平均流速, m/s; d_{50} 为泥沙颗粒中值粒径, m。

2.1.4 65-1 修正式和 65-2 式

在我国, 进行输电线路工程河道立塔杆塔基础局部冲刷深度计算时, 一直沿用铁路、公路部门基于河道

洪水建立的桥墩局部冲刷计算方法, 包括非黏性土和黏性土局部冲刷公式。其中, 对于非黏性土河槽, 使用 65-1 修正式、65-2 式^[1,3]。两者往往同时使用, 取合理值。

无论是潮汐冲刷或是河流冲刷, 水流引起泥沙运动、导致桥墩冲刷的机理是相同的, 两者不同的是水流条件^[3]; 用河道单向流冲刷公式计算的结果, 数值偏于安全。

2.2 波浪对冲刷的影响

国内外大量研究表明, 在波浪、潮流共同作用下, 桩墩等孤立建筑物周围的冲刷比在单纯潮流或单纯波浪作用下要严重的多。上述 4 种方法中, 韩海骞公式和 J&S 公式仅考虑波浪的影响, 王汝凯公式考虑了波浪和潮流的共同作用, 65-1 修正式和 65-2 式仅考虑洪水的影响。因此, 采用韩海骞公式、J&S 公式、65-1 修正式和 65-2 式来进行海中塔位局部冲刷计算时, 必须考虑波浪对于局部冲刷的作用, 否则计算结果偏小。

文献[2]建议采用《海港水文规范》中波浪水质点的平均流速公式, 将其与纯潮流下的流速进行叠加, 得到合理的波流混合流速, 进行桩柱局部冲刷深度计算。波浪水质点的平均流速计算公式^[9]

$$V_2 = 0.2H/dC \quad (4)$$

式中, V_2 为波浪水质点的平均流速, m/s; H 为波高, m; d 为当地水深, m; C 为波速, $C = (gT/2\pi) \tanh(kd)$, k 为波数, $k = 2\pi/L$, L 为波长, m; $L = (gT^2/2\pi) \tanh(2\pi d/L)$; T 为波周期, s。

2.3 往复流作用

与河中立塔相比, 海中立塔冲刷的另一个特点是水流条件为往复流, 且波浪要素也不会长时间不变。试验结果表明, 由于往复流的作用, 潮流形成的最大冲刷深度要小于单向恒定流情况^[3,8]。而上述局部冲刷公式, 是基于单向水流和波浪长时间作用下的最大局部冲刷深度计算, 结果可能会比实际冲刷深度偏大。根据以往的研究经验, 将计算结果乘折减系数 0.8 ~ 0.9, 与往复流实测值基本一致^[2-3]。

3 计算实例

3.1 研究区域概况

拟建的 500 kV 输电线路工程位于山东省海阳市, 线路经电厂出线后需在近海海域立塔 4 基。经现场勘测, 该海域的海洋特征参数如表 1 所示。

3.2 潮流作用下局部冲刷计算

分别采用上述 4 种方法计算, 得到潮流作用下不

同桩径条件对应的局部冲刷深度值,如表 2 所示。

表 1 海域特征参数

水深/m	中值粒径/mm	流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	波高/m	周期/h
4.36	0.206	0.69	3.5	9.9

表 2 潮流作用下局部冲刷深度值 m

桩径	韩海骞	王汝凯	J&S	65-1 修正式和 65-2 式	
	公式	公式	公式	方形	圆形
0.6	1.83	5.59	1.14	1.15	
0.8	2.02	5.91	1.50	1.38	1.11
1	2.17	6.17	1.95	1.58	1.28
1.2	2.30	6.39	2.22	1.77	1.43

比较各种方法的计算结果可以发现:① 河道冲刷计算公式考虑了墩形系数,而其它 3 种方法均基于圆形基础、没有考虑墩形差别;② 韩海骞公式、J&S 公式、65-1 修正式和 65-2 式的计算结果差别较小,但王汝凯公式的计算结果明显偏大。这是因为,一方面,王汝凯公式是基于粗砂模型实验得到的结果,而此次塔位区域海床地质条件以粉细沙为主;另一方面,王汝凯公式考虑了波浪和潮流的共同作用,而其它公式忽略了波浪的作用。

3.3 波流共同作用下局部冲刷计算

根据《海港水文规范》计算可得波浪水质点平均流速为 1.02 m/s。将其与潮流流速进行叠加,再计算桩柱局部冲刷,计算得波流共同作用下不同桩径条件对应的局部冲刷深度值如表 3 所示。

表 3 波流作用下局部冲刷深度值 m

桩径	韩海骞	王汝凯	J&S	65-1 修正式和 65-2 式	
	公式	公式	公式	方形	圆形
0.6	3.24	5.59	1.43	2.36	
0.8	3.56	5.91	1.91	2.82	2.27
1	3.83	6.17	2.38	3.23	2.61
1.2	4.06	6.39	2.86	3.62	2.92

注:未对王汝凯公式进行流速叠加。

比较计算结果可以发现:① 王汝凯公式的计算结果明显偏大,对于粉细沙为主的海床地质条件,其应用效果不佳;② J&S 公式的计算结果随流速增加变化较小,这是由于该方法本身对流速的变化不敏感;③ 韩海骞公式、65-1 修正式和 65-2 式的计算结果较符合实际,考虑到往复流和波浪的实际作用情况,计算结果较实际值可能偏大,需进行折减。

分别对韩海骞公式、65-1 修正式和 65-2 式的计算结果进行折减,折减系数取 0.8,折减后局部冲刷深度结果见表 4。

比较表 4 中两种方法的分析结果可知,韩海骞公式考虑潮流作用下小直径圆柱周围的局部冲刷,经过

了大量海洋工程的验证,效果较好。同时,考虑到工程应用的偏安全性,最终采用韩海骞公式的计算结果。

表 4 考虑折减后波流作用下局部冲刷深度值 m

桩径	韩海骞公式	65-1 修正式和 65-2 式	
		方形	圆形
0.6	2.59	1.89	
0.8	2.85	2.26	1.82
1	3.06	2.58	2.09
1.2	3.25	2.90	2.34

4 结 论

本文将 4 种常用的局部冲刷计算方法引入输电线路海中塔位局部冲刷计算中,考虑了潮流和波浪对塔位的共同作用,以及往复流的影响。研究结果表明:

(1) 海中塔位局部冲刷计算需要考虑波浪和潮流的共同作用,否则结果偏小。

(2) 海中塔位冲刷受到的是往复流的作用,而河流塔位冲刷受到的是单向水流的作用,在采用现有经验公式进行局部冲刷计算时,需要对塔位局部冲刷深度进行折减。

(3) 采用韩海骞公式、65-1 修正式和 65-2 式,计算输电线路海中塔位局部冲刷深度是可行的。计算时可综合比较几种方法,选用合理的计算结果。

参考文献:

[1] 中国电力规划设计协会. 电力工程水文气象计算手册[M]. 武汉:湖北科学技术出版社,2011.

[2] 张玮,濮勋,廖迎娣. 淤泥质海岸近海风电塔基局部冲刷计算研究[J]. 海洋工程,2010,28(2):105-109.

[3] 高冬光. 跨海桥梁和滨海公路水文与防腐[M]. 北京:人民交通出版社,2012.

[4] Palmer H D. Wave Induced Scour on the Sea Floor[M]. New York: Proc. Civ. Eng. in the Oc., ASCE,1969.

[5] Douglass L, Krolak Joe. Highways in the coastal environment[M]. [s. l.]: U. S. Department of Transportation, Federal Highway Administration,2008.

[6] Jones J S, Sheppard D M. Scour at wide bridge piers[C]//Proceedings of Joint Conference on Water Resource Engineering and Water Resources Planning and Management. Minneapolis:[s. n.],2000.

[7] 韩海骞. 潮流作用下桥墩局部冲刷研究[D]. 杭州:浙江大学,2006.

[8] Wang R K, Herbach J B. Combined Current and Wave Produced Scour Around a Single Pile[R]. [s. l.]: Texas Engineering Experiment Station, 1983.

[9] 中华人民共和国交通运输部. JTS 145-2-2013 海港水文规范[S]. 北京:人民交通出版社,2013.

(编辑:李 慧)

含有冷却水管的大体积混凝土温度场是可行的。

6 结 论

(1) CPINTF 方法与 CP 方法本质上是一致的,即都通过耦合来模拟冷却水与混凝土之间的对流换热。相对于 CP 方法,CPINTF 方法耦合过程简单,只需要将模型建好后,执行 CPINTF, TEMP 命令即可耦合所有的混凝土在水管处的节点与同一位置的流体单元附加节点。

(2) NUMMRG 方法的计算结果与 CP 方法的计算结果相差很小,表明该方法计算结果可信。在模拟混凝土浇筑过程方面,相对于 CP 和 CPINTF 方法,NUMMRG 方法建模更简单。因此,NUMMRG 方法对于模拟冷却水与混凝土之间的对流换热最具优势。

参考文献:

[1] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京:中国水利水电出版社,2012:23-24.

[2] 刘宁,刘光廷. 水管冷却效应的有限元结构模拟技术[J]. 水利学报,1997,(12):43-49.

[3] 朱岳明,徐之青,贺金仁,等. 混凝土水管冷却温度场的计算方法[J]. 长江科学院院报,2003,20(2):19-22.

[4] 朱伯芳. 混凝土坝水管冷却仿真计算的复合算法[J]. 水利水电技术,2003,34(11):47-50.

[5] 闫慧玉. 大体积混凝土温度场水管冷却热流耦合仿真方法研究[D]. 武汉:武汉大学,2005.

[6] 王泽鹏. ANSYS 12.0 热力学有限元分析从入门到精通[M]. 北京:机械工业出版社,2010:53-60.

[7] 段寅,向正林,常晓林,等. 大体积混凝土水管冷却热流耦合算法与等效算法对比分析[J]. 武汉大学学报:工学版,2010,43(6):703-707.

(编辑:郑 毅)

Simulation study of convective heat transfer effect between cooling water and concrete in ANSYS

YAN Qiao, ZHANG Shengli

(College of Hydraulic and Environment Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: The key of the thermal - fluid coupling algorithm in temperature - control calculation of mass concrete is to simulate the convective heat transfer between the cooling water and concrete accurately. Previous simulation of convective heat transfer was realized by coupling fluid element additional nodes with the concrete nodes in the same place of pipe, namely the CP - Method. This method needs coupling nodes one by one, which was inconvenient in large - scaled simulation analysis. On this basis, we point out that the essence of CP - Method is to make the temperature at fluid element additional nodes equal to the concrete nodes in the same place and utilize the characteristic of convective heat transfer between fluid element master nodes and additional nodes. Therefore, we propose other two methods of simulating the convective heat transfer, the CPINTF - Method and NUMMRG - Method, and the rationality of the two methods is verified by a practical example. Further analysis shows that the NUMMRG - Method is the optimal one.

Key words: thermal - fluid coupling method; simulation; convective heat transfer; CPINTF; NUMMRG



(上接第 49 页)

Local scour calculation method of power transmission line tower in sea influenced by jointed affect of wave and tide

LI Lei, GU Hongqin, YU Wanchun

(State Nuclear Electric Power Planning Design & Research Institute, Beijing 100095, China)

Abstract: Influenced by the jointed affect of wave and tide, the local scour problem of power transmission tower in the sea is complicated. 4 local scour calculation formulas (Han Haiqian's Formula, Wang Rukai's Formula, J&S Formula, 65 - 1 modified formula and 65 - 2 formula) applied in the local scour calculation are compared and analyzed. For the formula only considering the wave effect, the velocity of wave particle and the velocity of tidal current are superposed together. For the formula considering the reciprocating flow effect of tide, the reduction coefficient is used to correct the calculated value. The 4 calculation formulas are applied to a tower of power transmission line in sea, and the results show that the Han Haiqian's Formula is the most consistent with the practical condition.

Key words: local scour; wave; tide; tower in sea