

DOI: 10.7511/jslx20221114003

基于弯矩修正法的浅水区海底直铺管道 允许悬跨长度计算

付长静^{1,2,3,4}, 王锦国⁴, 赵天龙^{*1,2}

(1. 重庆交通大学 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074;

2. 南京水利科学研究院 水利部水库大坝安全重点实验室, 南京 210029;

3. 南京水利科学研究院 港口航道泥沙工程交通行业重点实验室, 南京 210029;

4. 河海大学 地球科学与工程学院, 南京 210098)

摘要:海底管道悬空问题是管道工程建设中经常遇到的重要问题,当管道的悬跨长度达到一定值时,管道较容易失稳,而悬空油气管道失稳破坏导致的后果往往非常严重,因此需要对悬空的海底管道进行定期的维护和处理,但由于海上作业难度大,针对悬空管道的治理成本非常高,因此可考虑对处于悬空但在安全允许悬空范围内的管道暂时不进行加固,此时就需要计算管道的允许悬跨长度,为管道的治理提供依据。由于我国油田大多建设在近海地区,因此在考虑管道的悬空问题时需考虑浅水区波浪的特点。本文考虑浅水区波浪的非线性影响,推导出浅水区波浪场内任意一水质点的水平流速和竖向流速计算公式,并根据该公式和 Morison 方程,进一步建立了管道悬跨水动力载荷的表达式,最后基于弯矩修正法,提出浅水区平铺海底管道允许悬跨长度计算公式。根据工程实例,结合本文研究,计算得到该工程所在海区平铺管道允许悬跨长度。

关键词:浅水波浪理论;弯矩修正法;海底管道;悬跨长度

中图分类号:P756.2;TV139.2;O353.2

文献标志码:A

文章编号:1007-4708(2024)03-0588-05

1 引言

由于现场条件和施工要求的不同,海底管道的铺设方法略有不同,包括直接铺置和埋置。但由于海床表面的凹凸不平,随着使用年限的不断增加,管道在波流作用下覆盖层逐渐变薄,出现局部悬空失稳现象^[1],面临着管道爆裂和泄漏等风险。根据中国油气管道发生的事故情况统计,管道悬空失稳是引发中国油气管道爆裂泄漏事故的重要原因之一^[2],因此海底管道悬空问题倍受工程建设有关单位和研究人员的高度关注。

悬空管道在自身重量、内部流体以及外部环境荷载作用下将会出现静力及动力响应问题,而管道悬跨长度又是决定管道静动响应程度的关键因素^[3]。因此,在研究悬空管道的稳定性时,需要围绕管道悬跨长度的计算展开。美国 MMS 总结了

在工程设计中管道悬跨长度的计算方法。第一种称为弯矩修正法^[4,5],该方法从管道最大静弯曲总应力不超过材料许用应力的角度出发,直接计算静态情况下管道的临界跨长。第二种称为涡激振动法^[6,7],是从避免涡激共振的角度直接计算管道的临界跨长。该方法主要以 DNV 规范为指导,考虑了管道的安全等级、固有频率以及最大流速等不确定因素的影响。第三种方式又称线性累积损伤法^[8,9],该方法考虑了涡激振动对管道造成的疲劳效应,以有限元方法及 miner 线性累积损伤理论详细计算疲劳寿命,间接地对管道悬跨长度进行校核,目前采用最多的就是 DNV 提出的海底管道悬跨长度校核方法 DNV-RP-F105,但该方法计算结果较保守,当海底管道悬跨长度大于计算临界跨长时,常采用此种方法进行校核。上述三种方式中,

收稿日期:2022-11-14; 修改稿收到日期:2023-02-01.

基金项目:国家自然科学基金(52109149;52279095);重庆市自然科学基金面上项目(cstc2021jcyj-msxmX0155);水利部水库大坝安全重点实验室开放基金(YK321003);港口航道泥沙工程交通行业重点实验室开放基金(Yk220001-6)资助。

作者简介:赵天龙^{*}(1986-),男,博士,副教授(E-mail:ztl1986@163.com)。

引用本文:付长静,王锦国,赵天龙. 基于弯矩修正法的浅水区海底直铺管道允许悬跨长度计算[J]. 计算力学学报,2024,41(3):588-592.
FU Chang-jing, WANG Jin-guo, ZHAO Tian-long. Calculation of allowable suspension span length for direct laying pipeline in shallow water area based on bending moment correction method[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2024, 41(3): 588-592.

弯矩修正法是海底悬空管道稳定性分析中最早出现的方法,也是最简便的方法。

由于中国海上石油开采起步较晚,目前大多数油田都建在近海处,因此在管道的建设及运行阶段需考虑浅水区的波浪等环境影响。大量的研究结果表明,在水深大于 500 m 的深水区采用线性波浪理论($H/L \rightarrow 0$),计算误差一般在允许范围内,但对于浅水区($L/d > 8$),会引起较大的误差^[10]。因此研究浅水区海底直铺管道的悬跨问题时,需要充分考虑波浪在浅水区的运动特性。

2 浅水区非线性波理论推导

对于有势的推移波运动(二维问题),可以用一个满足拉普拉斯方程的速度势函数 ϕ 表达^[11],其坐标如图 1 所示,此时波浪运动的基本方程为

$$\nabla^2 \phi = \partial^2 \phi / \partial x^2 + \partial^2 \phi / \partial z^2 = 0 \quad (1)$$

$$\frac{p}{\rho_w} + g(z-d) + \frac{1}{2}(v_x^2 + v_z^2) + \frac{\partial \phi}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

式中 p 为流体中各点的压力(单位:Pa), ρ_w 为流体的密度(单位:kg/m³), g 为重力加速度(单位:m/s²), d 为静水深度(单位:m), $v_x = \partial \phi / \partial x$, $v_z = \partial \phi / \partial z$ 分别为流场内任一水质点的水平流速和竖向流速(单位:m/s)。

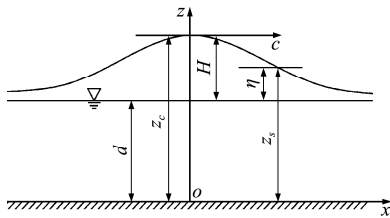


图 1 孤立波坐标
Fig. 1 Isolated wave coordinate diagram

在研究浅水区的波浪时,通常认为水质点的竖向分速远小于水平分速,若假定在 x 方向的无穷远处不存在波动,则 $z = \eta + d$ 处的边界条件为

$$\begin{cases} \frac{\partial \phi}{\partial t} + g\eta + \frac{1}{2} \frac{g}{d} \eta^2 = 0 \\ \frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\partial \eta}{\partial t} + \sqrt{\frac{g}{d}} \eta \frac{\partial \phi}{\partial x} \end{cases} \quad (3)$$

式中 η 为波面在静水以上的高度(单位:m)。

推求得到浅水波波面方程

$$\eta = \frac{3H}{2} \operatorname{sech}^2 \left[\frac{\sqrt{3H}}{2d^2} (x - t \sqrt{g(d+H)}) \right] \quad (4)$$

式中 H 为波高(单位:m)。

由于 $v_x = \partial \phi / \partial x = \eta \sqrt{g/d}$, 将式(4)代入该式,可求得波浪场内任意一水质点的水平分速 v_x 为

$$v_x = \eta \sqrt{\frac{g}{d}} = \frac{3H}{2} \sqrt{\frac{g}{d}} \operatorname{sech}^2 \left[\frac{\sqrt{3H}}{2d^2} (x - t \sqrt{g(d+H)}) \right]$$

(5)

根据式(4),可得

$$\frac{\partial \eta}{\partial x} = -\frac{3H}{2d^2} \sqrt{3H} \operatorname{sech}^2 \left[\frac{\sqrt{3H}}{2d^2} (x - t \sqrt{g(d+H)}) \right] \times \tanh \left[\frac{\sqrt{3H}}{2d^2} (x - t \sqrt{g(d+H)}) \right] \quad (6)$$

由于 $v_z = \frac{\partial \phi}{\partial z} = -z \sqrt{\frac{g}{d}} \frac{\partial \eta}{\partial x}$, 将式(6)代入该式,

可求得波浪场内任意一水质点的竖向分速 v_z 为

$$v_z = -z \sqrt{\frac{g}{d}} \frac{\partial \eta}{\partial x} = z \frac{3H}{2d^2} \sqrt{\frac{3gH}{d}} \times \operatorname{sech}^2 \left[\frac{\sqrt{3H}}{2d^2} (x - t \sqrt{g(d+H)}) \right] \tanh \left[\frac{\sqrt{3H}}{2d^2} (x - t \sqrt{g(d+H)}) \right] \quad (7)$$

3 浅水区海底直铺管道上波浪力计算

为了计算浅水区海底直铺管道的允许长度,首先需要管道进行受力分析。分析波浪作用下直铺管道所受的波浪力。根据 Morison 方程,不考虑尾流效应的影响,直铺管道所受的水平力 F_H 和垂直力 F_V 分别为^[12]

$$F_H = F_{H1} + F_D \quad (8)$$

式中 $F_{H1} = \rho_w (\pi R^2 / 4) C_M (\partial v_x / \partial t)$ 为水平惯性力, C_M 为惯性力系数, R 为管道直径, ρ_w 为海水密度, $v_x = \partial \phi / \partial x$ 为波浪运动的水平分速, $F_D = \rho_w (R/2) \times C_D v_x^2$ 为阻力, C_D 为速度力系数。

$$F_V = F_{V1} + F_L \quad (9)$$

式中 $F_{V1} = \rho_w \frac{\pi R^2}{4} C_M \frac{\partial v_z}{\partial t}$ 为水平惯性力, $v_z = \frac{\partial \phi}{\partial z}$ 为波浪运动的竖向分速, $F_L = \rho_w (R/2) C_L v_x^2$ 为阻力, C_L 为速度力系数。

根据式(5,7~9),推导得出浅水区管道悬空段所受波浪力为

$$F_H = \frac{3gH\rho_w C_M \pi R^2}{2d^2} \sqrt{\frac{3H(d+H)}{d}} \times \operatorname{sech}^2 \left[\frac{\sqrt{3H}}{2d^2} (x - ct) \right] \tanh \left[\frac{\sqrt{3H}}{2d^2} (x - ct) \right] + \frac{9\rho_w R C_D g H^2}{4d} \operatorname{sech}^4 \left[\frac{\sqrt{3H}}{2d^2} (x - ct) \right] \quad (10)$$

$$F_V = z \frac{9\rho_w g C_M \pi R^2 H^2}{4d^4} \sqrt{\frac{d+H}{d}} \operatorname{sech}^2 \left[\frac{\sqrt{3H}}{2d^2} (x - ct) \right] \times \left\{ 2 \tanh^2 \left[\frac{\sqrt{3H}}{2d^2} (x - ct) \right] - \operatorname{sech}^2 \left[\frac{\sqrt{3H}}{2d^2} (x - ct) \right] \right\} + \frac{9\rho_w R C_L g H^2}{4d} \operatorname{sech}^4 \left[\frac{\sqrt{3H}}{2d^2} (x - ct) \right] \quad (11)$$

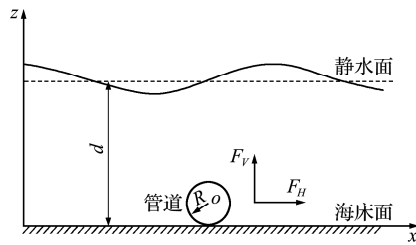


图2 海底管道上波浪力
Fig.2 Wave force on submarine pipeline

4 基于弯矩修正法的浅水区海底直铺管道允许悬跨长度计算

采用弯矩修正法计算管道的允许悬跨长度时,往往从管道最大静弯曲应力不超过材料许用应力的角度出发。将计算得到的弯曲应力与材料的许用应力进行比较,得到管道的允许悬跨长度^[5]。实际上悬空管段受冲刷引起局部裸露,但其两端仍延伸到海床中,海底管道实际悬空状态如图3所示,点B和点C的约束状态既不是固定支撑也不是铰支撑,而是介于两者之间,因此根据管道悬空状态分析管道的受力如图4所示。

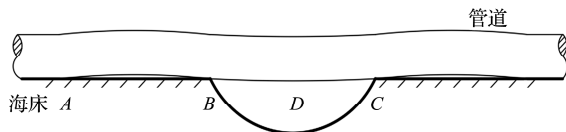


图3 海底管道悬空状态
Fig.3 Diagram of underwater pipeline suspended state

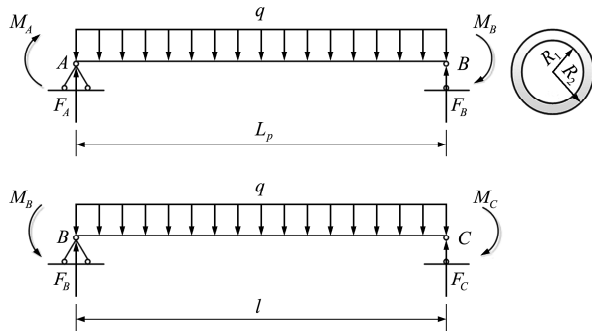


图4 海底管道受力分析
Fig.4 Force analysis diagram of submarine pipeline

根据受力分析可知

$$M_A + M_B + \frac{qL_p^2}{2} - F_B L_p = 0 \quad (12)$$

式中 M_A 为点A的弯矩, M_B 为点B的弯矩, $q = \sqrt{F_H^2 + (F_V + F_P)^2}$, 其中 F_H 和 F_V 分别根据式(10,11)进行计算, F_P 为水下管道单位长度的重量(包括相关配件及输送介质的重量), L_p 为悬跨管道在海床的投影长度, F_B 为支点B的反力。

由于 $F_B = ql/2$, 其中 l 为管跨长度, 则

$$M_A + M_B + [qL_p(L_p - l)]/2 = 0 \quad (13)$$

由于点A的旋转角度为 0° , 则

$$-\frac{M_B}{6} + \frac{M_A}{3} + \frac{qL_p^2}{24} = 0 \quad (14)$$

此外,考虑点B在管道AB段上的旋转角度等于点B在BC段上的旋转角度,即

$$\frac{ql^3}{24EI} - \frac{M_B l}{3EI} - \frac{M_C l}{6EI} = \frac{M_B L_p}{3EI} - \frac{qL_p^3}{24EI} - \frac{M_A L_p}{6EI} \quad (15)$$

由于 $M_B = M_C$, 则式(15)为

$$ql^3 - 12M_B l = 8M_B L_p - qL_p^3 - 4M_A L_p \quad (16)$$

根据式(13,14,16)得

$$\begin{cases} M_A = -\frac{ql^2}{12} \\ M_B = \frac{ql^2}{12} \\ L_p = l \end{cases} \quad \text{或} \quad \begin{cases} M_A = \frac{203}{7500}ql^2 \\ M_B = \frac{553}{7500}ql^2 \\ L_p = \frac{7}{25}l \end{cases} \quad (17)$$

由于管道发生悬跨时,管道悬空段中点位置(即点D)最易发生破坏,因此应计算该处的弯曲应力,该位置点D截面的受力情况如图5所示。

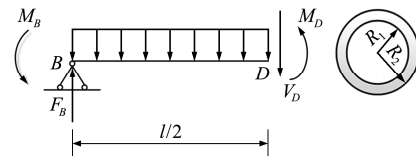


图5 管道D截面受力分析
Fig.5 Force analysis diagram of D section of pipeline

根据平衡方程 $\sum Y = 0$

$$F_B - ql/2 - V_D = 0 \quad (18)$$

$$\text{则} \quad V_D = 0 \quad (19)$$

式中 V_D 为点D的剪切力。

根据平衡方程 $\sum M_D = 0$

$$F_B \frac{l}{2} - \frac{ql}{2} \times \frac{l}{4} - M_B - M_D = 0 \quad (20)$$

$$\text{因此} \quad M_D = \frac{ql^2}{24} \quad \text{或} \quad M_D = \frac{769ql^2}{15000} \quad (21)$$

根据材料力学理论,管道点D截面上的最大应力为

$$\sigma_{\max D} = M_{D \max} / W_z \quad (22)$$

式中 $\sigma_{\max D}$ 为点D最大弯曲应力, W_z 为抗弯截面系数,对于圆管 $W_z = 4\pi R_2^3 (R_2^4 - R_1^4)$, R_1 为管道内半径, R_2 为管道外半径。

根据式(21,22)得

$$\sigma_{\max D} = 769ql^2 / [60000\pi R_2^3 (R_2^4 - R_1^4)] \quad (23)$$

根据弯矩修正法,管道最大弯曲应力 $\sigma_{\max D}$ 应小于材料的许用应力 $[\sigma]$, 即

$$\sigma_{\max D} \leq [\sigma] \quad (24)$$

根据式(23,24)得到海底管道允许悬跨长度计算公式为

$$l_{\max} = \sqrt{60000\pi[\sigma]R_2^3(R_2^4 - R_1^4)/(769q)} \quad (25)$$

5 工程实例

该油田位于渤海湾,工程所在的海区部分油气管道已出现了裸露和悬空现象,管道的悬空状况列入表1。

表1 管道悬空状况^[13](单位:m)

Tab.1 Pipeline suspension condition (unit:m)

实测悬跨长度	实测悬空高度	水深范围
44	0.65	3.7~4.2
49	0.9	3.9~5.1
18	0.78	3.5
20	0.6	3.9~5.0
14	0.56	4.4

该油田油气管道为双管结构,外管规格为直径660 mm,内管规格为直径508 mm,管道材料为X65Q,许用弯曲应力为 327×10^3 kPa,密度为 7850 kg/m^3 ,弹性模量为207 GPa。分别采用50年一遇、5年一遇和2年一遇的波浪要素计算海底管道允许悬跨长度。计算得到管道允许悬跨长度结果列入表3。由表3可知,管道悬跨长度均在允许的范围之内,但考虑到复杂的海洋环境,应持续关注该油田海底管道的悬空情况。

表2 波浪参数计算取值^[14]

Tab.2 Wave parameter calculation value

工况	海水密度	水流流速	波长	周期	波高
	$\rho_w/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$v_{\text{水流}}/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	L/m	T/s	H/m
50年重现期		1.29	80	8.8	4.69
5年重现期	1030	0.93	70.3	8.3	3.94
2年重现期		0.87	65.2	7.8	3.67

表3 管道允许悬跨长度计算结果

Tab.3 Calculation result of allowable span length of pipeline

悬空段的位置/m	实测悬跨长度/m	50年一遇非线性波	5年一遇非线性波	2年一遇非线性波
1779~1823	44	59.03	61.78	67.30
3410~3459	49	109.57	297.27	387.34
3471~3489	18	45.05	56.16	58.41
3512~3532	20	32.31	45.64	45.80
2590~3604	14	42.40	73.18	66.71

6 结论

考虑浅水区波浪的非线性影响,推导得到浅水区波浪场内任意一水质点的水平流速和竖向流速计算公式,并根据该公式和Morison方程,进一步建立了管道悬跨水动力载荷的表达式,最后基于弯矩修正法,提出浅水区海底管道允许悬跨长度计算

公式。根据本文研究内容结合渤海湾某油田海底管道工程,计算出该海区管道允许悬跨长度,结果表明该海区有部分管道尚未超过计算的允许悬跨长度,但考虑到复杂的海洋环境,应持续关注该油田海底管道的悬空情况。需要特别说明的是,本文在分析管道受力时,忽略了平行于管道方向的外力,即水流在管道侧壁产生的摩阻力,因此,本文所阐述的方法适用于该力对管道的影响远小于另外两个方向受力的情况。

参考文献(References):

- [1] 谢英,麻秀芬,宁海峰.海底悬跨管道形成及破坏机理[J].油气储运,2017,36(12):1436-1442. (XIE Ying, MA Xiu-fen, NING Hai-feng. Formation and damage mechanism of free spanning submarine pipeline[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2017, 36(12): 1436-1442. (in Chinese))
- [2] 方娜,陈国明,朱红卫,等.海底管道泄漏事故统计分析[J].油气储运,2014,33(1):99-103. (FANG Na, CHEN Guo-ming, ZHU Hong-wei, et al. Statistical analysis of leakage accidents of submarine pipeline[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2014, 33(1): 99-103. (in Chinese))
- [3] 董丽丽,徐慧,郭振邦.海底管道悬跨长度的计算[J].中国海上油气(工程),2003,15(6):16-18. (DONG Li-li, XU Hui, GUO Zhen-bang. The analysis research on free spans of submarine pipeline[J]. *China Offshore Oil and Gas(Engineering)*, 2003, 15(6): 16-18. (in Chinese))
- [4] Fu C J, Wang P Y, Zhao T L, et al. Allowable span length of submarine pipeline in shallow water[J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2018, 36(5): 532-539.
- [5] 付长静,李国英,赵天龙.孤立波作用下海底管道允许悬跨长度简化计算[J].水利水运工程学报,2017(4): 83-88. (FU Chang-jing, LI Guo-ying, ZHAO Tian-long. Simplified calculation of allowable free span length of submarine pipeline under action of solitary waves[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2017(4): 83-88. (in Chinese))
- [6] Zhang B, Xing Z Y, Wang T, et al. The vibration characteristics and allowable span length of free span submarine pipeline[A]. Proceedings of the 3rd Annual International Conference on Mechanics and Mechanical Engineering[C]. 2016.
- [7] 安振武,穆顷,张洪才.海底管道悬跨段振动特性及允许悬空长度研究[J].船海工程,2016,45(1):137-141. (AN Zhen-wu, MU Qing, ZHANG Hong-cai. The vibration characteristics and allowable span length of free span submarine pipeline[J]. *Ship & Ocean Engineering*, 2016, 45(1): 137-141. (in Chinese))
- [8] Dong J, Chen X D, Wang B, et al. The research on the effect of the height of free span on fatigue life of sub-

- marine pipeline due to vortex-induced vibration[A]. ASME 2016 Pressure Vessels and Piping Conference [C], 2016.
- [9] 高喜峰, 廖宏运, 徐万海. 非对称边界悬跨管道的涡激振动疲劳特性分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2019, **40**(5):960-966. (GAO Xi-feng, LIAO Hong-yun, XU Wan-hai. Analysis of VIV-induced fatigue characteristic of spanning pipelines with asymmetric boundary [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2019, **40**(5):960-966. (in Chinese))
- [10] 张 军, 周香莲, 王建华. 椭圆余弦波作用下海床动态响应及液化分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2016, **37**(1):53-58. (ZHANG Jun, ZHOU Xiang-lian, WANG Jian-hua. Numerical study of the cnoidal wave-induced dynamic response of the seabed and liquefaction analysis [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2016, **37**(1):53-58. (in Chinese))
- [11] 邱大洪. 波浪渗流力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006. (QIU Da-hong. *Wave Seepage Mechanics* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006. (in Chinese))
- [12] Zhang Y M, Ariffin M Z, Xiao Z M, et al. Nonlinear elastic-plastic stress investigation for two interacting 3D cracks in offshore pipelines [J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2015, **38**(5):540-550.
- [13] 李春雨. 南堡油田人工岛海底管线悬空分析及治理 [J]. 内江科技, 2012, **33**(1):113-119. (LI Chun-yu. Analysis and treatment of submarine pipeline suspension in artificial island of Nanpu oilfield [J]. *Neijiang Science & Technology*, 2012, **33**(1):113-119. (in Chinese))
- [14] 河流海岸研究所. 冀东南堡油田 1[#] 构造水域波浪数值推算报告[R]. 南京水利科学研究所, 2014. (The River and Coastal Research Institute. Report on Numerical Wave Modeling in the Structural Water Area of Jidong Nanpu Oilfield Well 1[#] [R]. Nanjing Hydraulic Research Institute, 2014. (in Chinese))

Calculation of allowable suspension span length for direct laying pipeline in shallow water area based on bending moment correction method

FU Chang-jing^{1,2,3,4}, WANG Jin-guo⁴, ZHAO Tian-long^{*1,2}

(1. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of the Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Key Laboratory of Reservoir and Dam Safety Ministry of Water Resources, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

3. Key Laboratory of Port, Waterway & Sedimentation Engineering Ministry of Communications, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

4. School of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Suspended submarine pipelines are a common type of configuration in pipeline engineering construction. When the suspended span length of such a pipeline reaches a certain value, the pipeline is more prone to instability, and the consequences of the instability such as damage of suspended oil and gas pipelines are often very serious. Therefore, it is necessary to carry out regular maintenance and treatment of suspended submarine pipelines. However, due to the high cost and difficulty of offshore construction operations, it is necessary to temporarily not reinforce the suspended pipelines within the scope of safe suspension, which can greatly save construction costs. Therefore, it is necessary to calculate the allowable span length of the pipeline to provide a basis for the management of the pipeline. Since most of China's oilfields are located in offshore areas, the characteristics of waves in shallow water areas should be considered when considering the problem of pipeline suspension. In this paper, considering the nonlinear effect of waves in shallow water, the calculation formulas of horizontal and vertical flow velocity at any water point in the wave field in shallow water are derived, and according to these formulas and Morison equation, the expression of the hydrodynamic load of the overhang of the pipeline is further established. Finally, based on the bending moment correction method, the calculation formula of the allowable span length of the submarine pipeline in shallow water area is proposed. According to the research results of this paper and the subsea pipeline engineering of an oilfield in Bohai Bay, the allowable span length of the pipeline is calculated.

Key words: shallow-water wave theory; bending moment correction method; unburied pipeline; suspended length