

文章编号: 1005-9865(2007)04-0021-06

考虑海床变形的裸露悬跨海底管道静力分析

邢静忠¹, 柳春图²

(1. 天津工业大学 机械电子学院, 天津 300160; 2. 中国科学院 力学研究所, 北京 100080)

摘 要: 针对裸露悬跨海底管道, 考虑线弹性海床刚度, 利用梁的小挠度理论, 研究管道在自重作用下的变形和内力, 推导给出了未脱离海床的管道段和悬跨管道段的变形和内力公式。在跨度较大的悬跨情况下, 悬跨管道段较大的向下弯曲变形可能引起海床上管道脱离海床而翘起。建立管道翘起的判定准则, 对于翘起情况推导相应的计算公式, 通过算例给出翘起情况下管道的变形和内力。通过计算分析发现: 工程上多数悬跨是翘起情况, 没有翘起的计算公式只适应于跨度较小的悬跨管道。同时翘起情况下不同海床刚度对悬跨管道无量纲内力影响不大。

关键词: 海底管道; 弹性地基; 裸露悬跨; 小挠度理论; 海床变形

中图分类号: U175.5; TE832 **文献标识码:** A

Static analysis of unburied spanning submarine pipeline on linear elastic seabed

XING Jing-zhong¹, LIU Chun-tu²

(1. School of Mechanical and Electronic Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160, China; 2. Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100080, China)

Abstract: With small deflection beam theory, the deformation and internal forces of the unburied spanning submarine pipe on linear elastic seabed under self-weight load are studied, and deformation and internal forces formulae of the un-separated section and spanning section are reduced. The touched section on seabed may leave seabed and rise upward while the spanning section bends down for large spanning pipelines. Determination criterion and its corresponding formula for the rise-upward case are built, and examples are given to illustrate the deformation and internal forces calculation. Calculation examples show that most of the spanning in engineering is the rise upward one, and the formula for the touched case is only valid for small spanning pipelines. Meanwhile, different stiffness of seabed has little effects on non-dimensional internal forces of the spanning pipe in the rise upward case.

Key words: submarine pipeline; elastic foundation; unburied spanning pipe; small deflection theory; seabed deformation

海底油气管道经常会铺设在复杂的海床环境下, 当裸露管道铺设在不平坦的海底时, 将导致部分管道悬空, 这种悬跨管道在工程设计上要尽力避免, 或者严格控制悬跨管道的悬跨长度^[1]。在深海区域, 或者非常坚硬的海床环境, 或者由于海流淘蚀, 悬跨情况有时很难避免^[2]。管道悬跨不仅造成了海底管道的受力复杂化, 同时海流引起周期性涡旋释放会引发悬跨管道的涡激振动, 造成海底管道的强度破坏或疲劳破坏。无论是强度破坏分析, 还是疲劳破坏分析, 静力分析是必不可少的。对于埋设管道, 海流的淘蚀也会造成管道悬跨, 有时的悬跨长度可以达到几十米, 深度达到十几米^[3]。

这些悬跨情况在设计阶段都是通过最大悬跨长度来控制, 以避免结构频率与涡旋释放频率发生共振为设计准则^[4], 同时控制最大悬跨长度范围内的静力强度满足设计条件^[1]。

裸露悬跨管道更多出现在深海海域, 或者挖沟埋设有困难的海域。裸露悬跨管道大多为多点支承的多

收稿日期: 2006-11-08

基金项目: 天津工业大学科研开发基金资助项目 (029519)

作者简介: 邢静忠 (1966 -), 男, 甘肃平凉人, 博士, 教授, 主要从事海洋结构力学分析的研究。

跨情况,对于实际工程设计中的多跨悬跨,应该严格按照海况条件,准确分析管道中的应力分布,进行详细的静力设计和动力设计^[5]。文献[6,7]对管道的埋设悬跨管道情况给出了相应的应力分析和涡激振动算法。

针对裸露悬跨海底管道,考虑海床刚度,利用梁的小挠度理论,研究悬跨管道在自重作用下的变形和内力,并对比分析海床刚度对管道变形和内力的影响。提出判定裸露铺设在海床上的管道是否由于悬跨管道的弯曲变形而引起两端管道翘起的判定准则,本计算公式可用于裸露管道悬跨的变形分析和内力计算。

针对理想边界条件的悬跨管道研究已经非常成熟。现有规范建议,可以按两端简支梁模型或者两端固支梁模型进行悬跨管道的受力计算^[4]。但实际的裸露悬跨管道在两端非常长,且自由放置在海床上。在悬跨段管道发生弯曲变形时,两端管道要对悬跨段管道产生影响。准确计算两端管道对悬跨段管道变形和内力的约束作用,以及海床刚度对悬跨段管道变形和内力的影响,对悬跨管道的静强度分析和振动分析,都是非常重要的。所以在管道的涡激振动分析和疲劳寿命计算中,有研究者考虑了海床刚度对管道变形和应力的影响^[8]。

1 控制方程及其求解

通常,管道的悬跨长度 $2a$ 远远大于管道直径,横向挠度和跨度相比较小,可以用梁的小挠度理论计算悬跨管道变形。设悬跨管道两端很长,水平放置在线刚度为 k_b 的弹性海床上,忽略轴向力影响。假定管道的弯曲刚度是 EI ,在均布自重 q 作用下发生小挠度弯曲。管道变形后关于跨中位置左右对称(图 1)

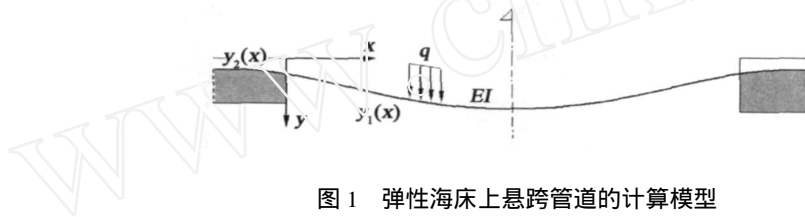


图 1 弹性海床上悬跨管道的计算模型

Fig. 1 Calculation model of spanning pipeline on elastic seabed

1.1 控制方程

根据细长梁小挠度弯曲微分方程

$$\frac{d^4 y_1}{dx^4} = -\frac{q}{EI} \quad (1)$$

对于放置在弹性海床上的管道,弯曲变形的微分方程

$$EI \frac{d^4 y_2}{dx^4} + k_b y_2 = -q \quad (2)$$

1.2 边界条件

定义无量纲变换 $\xi = x/a$ (a 是悬跨管道的一半跨度),引入无量纲挠度 $Y_1(\xi) = y_1(x)/a$,求解方程(1)得到无量纲挠度

$$Y_1(\xi) = -\frac{q_0}{24} \xi^4 + C_1 \xi^3 + C_2 \xi^2 + C_3 \xi + C_4 \quad (0 \leq \xi \leq 1) \quad (3)$$

式中: $q_0 = qa^3/(EI)$ 。

考虑到管道挠度 $y_2(x)$ 在负无穷处的位移边界条件

$$\left. \frac{dy_2}{dx} \right|_{-\infty} = 0, \quad \left. \frac{d^2 y_2}{dx^2} \right|_{-\infty} = 0 \quad (4)$$

则方程(2)的无量纲挠度 $Y_2(\xi) = y_2(x)/a$ 可简化为

$$Y_2(\xi) = -q_1 e^{-\theta \xi} (C_5 \cos \theta \xi + C_6 \sin \theta \xi) \quad (-\infty < \xi < 0) \quad (5)$$

式中: $\theta = a \sqrt{k_b/(4EI)}$, $q_1 = q/(ak_b)$ 。

在悬跨管道与海床上管道的连接位置 $\xi = 0$ 处,连续性条件

$$Y_1(0) = Y_2(0), \quad \left. \frac{dY_1}{d\xi} \right|_{\xi=0} = \left. \frac{dY_2}{d\xi} \right|_{\xi=0}, \quad \left. \frac{d^2 Y_1}{d\xi^2} \right|_{\xi=0} = \left. \frac{d^2 Y_2}{d\xi^2} \right|_{\xi=0}, \quad \left. \frac{d^3 Y_1}{d\xi^3} \right|_{\xi=0} = \left. \frac{d^3 Y_2}{d\xi^3} \right|_{\xi=0} \quad (6)$$

在悬跨管道的跨中位置,有对称条件

$$\left. \frac{dY_1}{d^3} \right|_{=1} = 0, \quad \left. \frac{dY_1}{d} \right|_{=1} = 0 \tag{7}$$

1.3 确定积分常数

将式(3)和式(5)代入式(6)和式(7),求解得到积分常数

$$\begin{cases} C_1 = 2q_1 \frac{q_0^4}{3}, & C_2 = -\frac{q_1(2\frac{q_0^2}{3} - 3)}{3(\frac{q_0}{3} + 1)} \\ C_3 = -\frac{2\frac{q_0^3}{3}q_1(2\frac{q_0^2}{3} + 3)}{3(\frac{q_0}{3} + 1)}, & C_4 = -\frac{q_1(2\frac{q_0^3}{3} + 6\frac{q_0^2}{3} + 6\frac{q_0}{3} + 3)}{3(\frac{q_0}{3} + 1)} \\ C_5 = \frac{q_0q_1(2\frac{q_0^2}{3} + 6\frac{q_0}{3} + 3)}{3(\frac{q_0}{3} + 1)}, & C_6 = \frac{q_1(2\frac{q_0^2}{3} - 3)}{3(\frac{q_0}{3} + 1)} \end{cases} \tag{8}$$

1.4 挠度函数

将积分常数式(8)代入式(3)和式(5),得到无量纲挠度函数

$$Y_1(\xi) = -\frac{q_0^4}{24} + \frac{2q_1q_0^4}{3}\xi^3 - \frac{q_1}{3(\frac{q_0}{3} + 1)} \cdot \{ \frac{q_0^3}{3} [(2\frac{q_0^2}{3} - 3) + 2(2\frac{q_0^2}{3} + 3)] + (2\frac{q_0^3}{3} + 6\frac{q_0^2}{3} + 6\frac{q_0}{3} + 3) \}, \quad (0 \leq \xi < 1) \tag{9a}$$

$$Y_2(\xi) = -q_1 - \frac{q_1}{3(\frac{q_0}{3} + 1)} e^{-\xi} [(2\frac{q_0^2}{3} + 6\frac{q_0}{3} + 3) \cos \xi + (2\frac{q_0^2}{3} - 3) \sin \xi], \quad (\xi > 1) \tag{9b}$$

1.5 弯矩方程

将式(9a)和式(9b)关于 \$\xi\$ 求导两次,得无量纲弯矩

$$M_1(\xi) = -\frac{d^2 Y_1(\xi)}{d\xi^2} = \frac{q_0^2}{2} - 4q_1 \frac{q_0^4}{3} + \frac{q_1}{3(\frac{q_0}{3} + 1)} 2\frac{q_0^3}{3} [(2\frac{q_0^2}{3} - 3)], \quad (0 \leq \xi < 1) \tag{10a}$$

$$M_2(\xi) = -\frac{d^2 Y_2(\xi)}{d\xi^2} = \frac{2\frac{q_0^3}{3}q_1}{3(\frac{q_0}{3} + 1)} e^{-\xi} \cdot [(2\frac{q_0^2}{3} - 3) \cos \xi - (2\frac{q_0^2}{3} + 6\frac{q_0}{3} + 3) \sin \xi], \quad (\xi > 1) \tag{10b}$$

跨中最大弯矩

$$M_{1max} = M_1(\xi) /_{=1} = \frac{q_0^2}{2} - 4q_1 \frac{q_0^4}{3} + \frac{2q_1\frac{q_0^3}{3}}{3(\frac{q_0}{3} + 1)} [(2\frac{q_0^2}{3} - 3)]$$

支承点弯矩

$$M_1(\xi) /_{=0} = \frac{2\frac{q_0^3}{3}q_1}{3(\frac{q_0}{3} + 1)} \cdot (2\frac{q_0^2}{3} - 3)$$

1.6 海床上管道的最大弯矩

对式(10b)关于 \$\xi\$ 求导,可得最大弯矩的位置处于

$$\xi_0 = -\frac{1}{\xi_0} \arctan \left[\frac{2\frac{q_0^2}{3} + 6\frac{q_0}{3} + 3}{2\frac{q_0^2}{3} - 3} \right] \tag{11}$$

将其代入式(10b)可得到海床上管道的最大负弯矩。

2 解答适用范围和管道翘起判断

解答式(9)只有在悬跨跨度不大,或海床比较软,整个管道和海床接触的情况下有效。当悬跨段管道发生向下弯曲变形时,海床上的管道将从海床上翘起的情况下,上述结果不适用。

在管道即将翘起的临界状态,海床上的管道向上的最高挠度正好等于 0。基于这个条件,给出管道翘起的判定准则。对式(9b)关于 \$\xi\$ 求导,令其等于 0 可确定最高挠度位置

$$-\frac{2\frac{q_0^3}{3}q_1e^{-\xi_0}}{3(\frac{q_0}{3} + 1)} [(2\frac{q_0^2}{3} + 6\frac{q_0}{3} + 3) \cos \xi_0 - (3 + 3\frac{q_0}{3}) \sin \xi_0] = 0 \tag{12}$$

很显然,这个方程有多个周期解 \$\xi_0\$,即

$$\tan \theta_0 = \frac{(2 - \theta_0 + 3)\theta_0}{(3 + 3\theta_0)} \tag{13}$$

这里有效解是负方向最靠近 0 点的解,即

$$\theta_0 = \frac{1}{\theta_0} \arctan \left[\frac{(2 - \theta_0 + 3)\theta_0}{3 + 3\theta_0} \right] - \theta_0 \tag{14}$$

是有效解。将其代入到挠度函数 (9b), 可得海床上管道的最高挠度

$$Y_{2\max}(\theta_0) = -q_1 + \frac{\theta_0 q_1}{3(\theta_0 + 1)} \exp \left[\arctan \frac{(2 - \theta_0 + 3)\theta_0}{3 + 3\theta_0} - \theta_0 \right] \sqrt{4\theta_0^4 + 12\theta_0^3 + 18\theta_0^2 + 18\theta_0 + 9} \tag{15}$$

这样,管道是否翘起的条件变为判定最高挠度 $Y_{2\max}(\theta_0)$ 是否大于 0。该方程中的参数 θ_0 是确定管道翘起的参数,对其数值求解,在大于零的范围内找到翘起的临界值

$$\theta_{cr} = 2.98486 \tag{16}$$

当 $\theta_0 > \theta_{cr}$ 时,悬跨段管道弯曲时弹性海床上的管道翘起。

3 翘起管道的变形和内力

当海床上的管道发生翘起后,整个管道分为 4 段来分析。第 1 段是向下弯曲的悬跨段,第 2 段是和弹性海床相接触直到负无穷远的管道,第 3 段是翘起段,第 4 段是和弹性海床一起向下变形的管道(图 2)。第 1 段和第 3 段满足弯曲微分方程(1),第 2 段和第 4 段满足方程(2)。

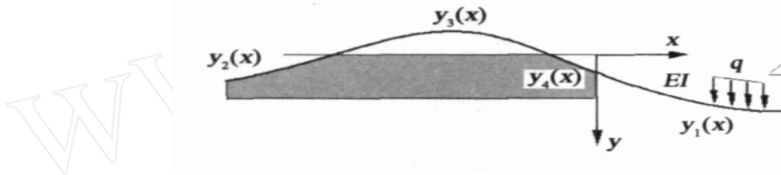


图 2 有翘起段的悬跨管道计算模型示意

Fig. 2 Sketch map of spanning pipeline with rise upward section

3.1 四段挠度函数

各段无量纲挠度函数 $Y_1(\xi)$, $Y_4(\xi)$, $Y_3(\xi)$ 和 $Y_2(\xi)$ 分别定义在 $[0, 1]$, $[-1, 0]$, $[2, 1]$ 和 $(-\infty, -2]$ 区间,则它们的函数形式分别是

$$Y_1(\xi) = -\frac{q_0}{24} \xi^4 + C_1 \xi^3 + C_2 \xi^2 + C_3 \xi + C_4, \quad (0 \leq \xi \leq 1) \tag{17}$$

$$Y_4(\xi) = -q_1 - e^{\theta_0 \xi} (C_7 \cos \theta_0 \xi + C_8 \sin \theta_0 \xi) + e^{-\theta_0 \xi} (C_9 \cos \theta_0 \xi + C_{10} \sin \theta_0 \xi), \quad (-1 \leq \xi \leq 0) \tag{18}$$

$$Y_3(\xi) = -\frac{q_0}{24} \xi^4 + C_{11} \xi^3 + C_{12} \xi^2 + C_{13} \xi + C_{14}, \quad (2 \leq \xi \leq 1) \tag{19}$$

$$Y_2(\xi) = -q_1 - e^{\theta_0 \xi} (C_5 \cos \theta_0 \xi + C_6 \sin \theta_0 \xi), \quad (-\infty < \xi \leq -2) \tag{20}$$

3.2 边界条件和连续性条件

在离地点 $\xi = 2, -1$ 和 $\xi = 0$ 位置,有 12 个连续性条件,在跨中有 2 个对称条件。所以总共有 14 个条件来确定 14 个积分常数。跨中位置的对称条件

$$\left. \frac{dY_3}{d\xi} \right|_{\xi=1} = 0, \quad \left. \frac{dY_1}{d\xi} \right|_{\xi=1} = 0 \tag{21}$$

连续性条件

$$Y_1(0) = Y_4(0), \quad \left. \frac{dY_1}{d\xi} \right|_{\xi=0} = \left. \frac{dY_4}{d\xi} \right|_{\xi=0}, \quad \left. \frac{d^2 Y_1}{d\xi^2} \right|_{\xi=0} = \left. \frac{d^2 Y_4}{d\xi^2} \right|_{\xi=0}, \quad \left. \frac{d^3 Y_1}{d\xi^3} \right|_{\xi=0} = \left. \frac{d^3 Y_4}{d\xi^3} \right|_{\xi=0} \tag{22a}$$

$$Y_3(-1) = Y_4(-1), \quad \left. \frac{dY_3}{d\xi} \right|_{\xi=-1} = \left. \frac{dY_4}{d\xi} \right|_{\xi=-1}, \quad \left. \frac{d^2 Y_3}{d\xi^2} \right|_{\xi=-1} = \left. \frac{d^2 Y_4}{d\xi^2} \right|_{\xi=-1}, \quad \left. \frac{d^3 Y_3}{d\xi^3} \right|_{\xi=-1} = \left. \frac{d^3 Y_4}{d\xi^3} \right|_{\xi=-1} \tag{22b}$$

$$Y_2(-2) = Y_3(-2), \quad \left. \frac{dY_2}{d\xi} \right|_{\xi=-2} = \left. \frac{dY_3}{d\xi} \right|_{\xi=-2}, \quad \left. \frac{d^2 Y_2}{d\xi^2} \right|_{\xi=-2} = \left. \frac{d^2 Y_3}{d\xi^2} \right|_{\xi=-2}, \quad \left. \frac{d^3 Y_2}{d\xi^3} \right|_{\xi=-2} = \left. \frac{d^3 Y_3}{d\xi^3} \right|_{\xi=-2} \tag{22c}$$

根据对称条件(21),解答(17)可简化为

$$Y_1(\xi) = -\frac{q_0(\xi-1)^4}{24} + C_2(\xi-1)^2 + C_4, \quad (0 \leq \xi \leq 1) \quad (23)$$

3.3 确定积分常数

经过简化,积分常数减少为 12 个,需要满足连续性条件式(22)中的 12 个条件。将解答式(18)、(19)、(20)和(23)代入连续性条件(22),化简后得到包含 12 个积分常数的线性代数方程组。通过求解可以确定出积分常数。

4 数值求解变形和内力

要从前面建立的 12 个联立方程组中解析地解出所有积分常数,是非常困难的。同时还必须使挠度函数在接触点 ξ_1 和 ξ_2 处满足接触点的接触条件

$$Y_2(\xi_1) = 0, \quad Y_4(\xi_2) = 0 \quad (24)$$

将接触位置 ξ_1, ξ_2 和 12 个积分常数解析地表示几乎没有可能。注意到由积分常数组成的方程组是线性代数方程组,而其中的接触位置 ξ_1 和 ξ_2 是非线性的,所以分别确定。

利用迭代法,首先假定初始接触位置 ξ_1 和 ξ_2 ,通过求解包含 12 个积分常数的线性代数方程组,确定挠度函数后确定新的接触位置,以此作为 ξ_1 和 ξ_2 的新值,继续下一轮迭代。当两次循环解出的接触位置变化很小时,停止迭代。此时的接触位置和挠度曲线就是实际的接触位置和挠度曲线。

4.1 坚硬海床上的悬跨管道

半跨 $a = 30 \text{ m}$ 的悬跨管道,海床刚度 $k_b = 10^7 \text{ N/m}^2$,管道单位长度重量 $q = 2000 \text{ N/m}$,弯曲刚度 $EI = 10^7 \text{ N}\cdot\text{m}^2$,则 $q_0 = qa^3/EI = 5.4, q_1 = q/a/k_b = 2/3 \times 10^{-5}, \xi_0 = a \sqrt[4]{k_b/4/EI} = 21.213$ 。

从式(16)的临界值判断出 $\xi_0 > \xi_{cr}$,管道翘起。由式(14)确定最高挠度位置 $\xi_0 = -0.0773$ 。假定翘起管道的离地点初始位置 $\xi_2 = 5\xi_0, \xi_1 = \xi_0/2$ 。从式(24)解出积分常数。

再将积分常数代入式(18),式(19),式(20)和式(23)可得挠度函数,将挠度函数代入到非线性方程(24),求解获得新的接触点位置 ξ_2 和 ξ_1 。将新接触位置再代入方程(24),继续循环,直到接触位置变化很小为止。

此时的接触位置和挠度函数就是实际的接触位置和挠度曲线。将无量纲挠度分别关于 ξ 求一阶导数、二阶导数和三阶导数,可得转角、无量纲弯矩和无量纲剪力。图 3 给出的是挠度曲线,弹性海床上管道变形曲线是负半轴部分,从 0 到 1 范围是悬跨段管道左一半。跨中的最大挠度大约是 -0.37 。

图 4 是无量纲弯矩图,零点以左是海床上管道的弯矩分布,零点右侧是悬跨段管道的无量纲弯矩分布。跨中的无量纲最大弯矩约为 1.17 ,支承点附近的无量纲负弯矩值约为 -1.52 。

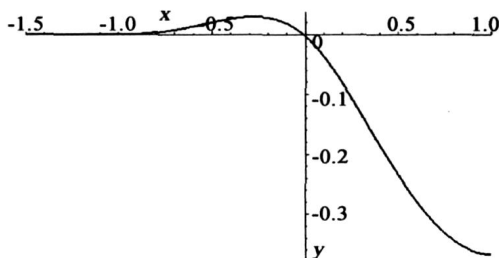


图 3 刚度较大海床上的悬跨管道挠度
Fig. 3 Deflection of pipe on stiff seabed

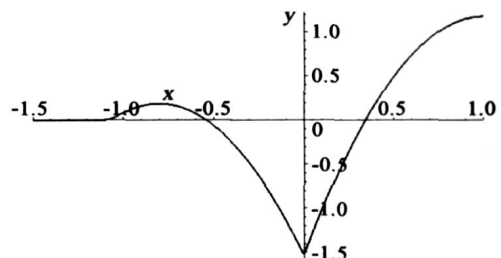


图 4 刚度较大海床上的悬跨管道弯矩
Fig. 4 Moment of pipe on stiff seabed

4.2 刚度较小海床上的悬跨管道

为了比较海床刚度对管道变形和内力的影响,取海床刚度 $k_b = 10^5 \text{ N/m}^2$ 。按照与前面相同的计算过程,确定出 $q_0 = qa^3/EI = 5.4, q_1 = q/a/k_b = 2/3 \times 10^{-3}, \xi_0 = a \sqrt[4]{k_b/4/EI} = 6.708$ 。

变形曲线和无量纲弯矩如图 5 和图 6 所示。从图 5 看出,海床变形比图 3 大。特别是邻近悬跨管道的支承点区域,变形非常明显。

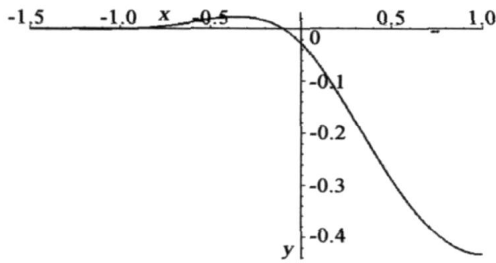


图 5 刚度较小海床上的悬跨管道变形
Fig. 5 Deflection of pipe on soft seabed

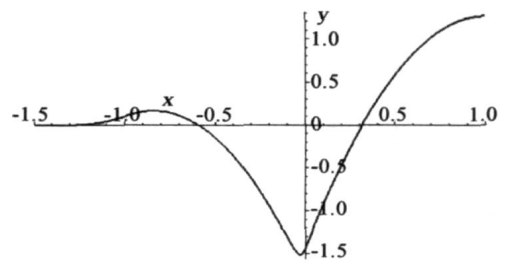


图 6 刚度较小海床上的悬跨管道弯矩
Fig. 6 Moment of pipe on soft seabed

同时跨中的挠度值也比图 3 中的跨中挠度大,跨中的最大挠度大约是 -0.43。但是最大无量纲弯矩值的变化没有变形图的变化明显。跨中的最大无量纲弯矩约为 1.24,支承点附近的无量纲负弯矩约为 -1.52。在支承点附近,无量纲弯矩的分布形式变化较大。

4.3 较短悬跨管道的弯曲

前面的悬跨管道,因跨度较大使自重引起了很大的弯曲变形。现在在相同刚度的海床上,计算跨度较小的情况。取半跨 $a = 10 \text{ m}$,为便于变形和内力的结果比较,增大荷载集度为 $q = 54 \ 600 \text{ N/m}$ 。则基本参数 $q_0 = qa^3/EI = 5.4$, $q_1 = q/a/k_b = 0.054$, $\beta_0 = a \sqrt[4]{k_b/4EI} = 2.236$ 。

可以看出, $\beta_0 = 2.236 < \beta_{cr}$,海床上的管道不翘起,可以用两段变形曲线计算。由挠度函数(9)和弯矩方程(10)得到无量纲挠度图(图 7),无量纲弯矩图(图 8)。从挠度图看出,支承点的变形很大。但弯矩图中最大无量纲负弯矩 -1.42 和最大无量纲正弯矩 1.84 也比前面大很多。

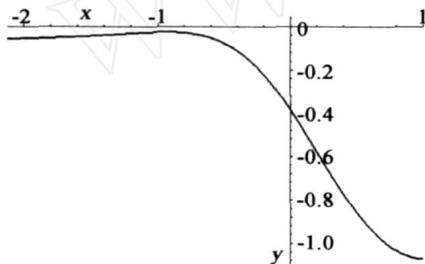


图 7 跨度较短的悬跨管道挠度曲线
Fig. 7 Deflection of pipe with short spanning

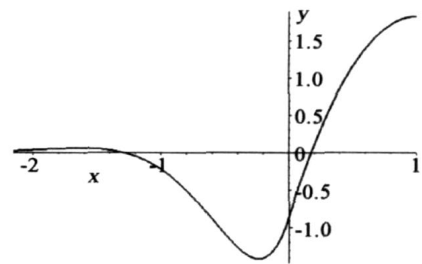


图 8 跨度较短的悬跨管道弯矩图
Fig. 8 Moment of pipe with short spanning

5 结 语

从这几种海床刚度和跨度的计算结果可以看出,常见的悬跨管道多数是有翘起段的情况,同时海床刚度和悬跨长度对位移结果有明显影响,对无量纲弯矩影响不大。特别是对于翘起管道,海床刚度和悬跨长度对无量纲弯矩影响较小。按照一般弹性地基参数选择了海床线刚度 10^5 N/m^2 至 10^7 N/m^2 范围,对比计算了海床线刚度对悬跨管道变形和内力的影响。实际上海底管道计算中的管-土相互作用是一个非常复杂的非线性接触问题,它与土壤性质和接触特性有很大关系^[9]。此处仅仅是从理论上探讨如何处理悬跨管道的边界条件,使悬跨管道的计算模型能够跳出简支梁和固支梁这两种模型。因为规范推荐的简支模型和固支模型有很大差异,如何恰当选用,希望能给出一些提示。

参考文献:

- [1] 王维. 确定海底埋设输油管线允许冲刷长度的一种实用方法[J]. 西南石油学院学报, 1996, 18(3): 94 - 97.
- [2] Park H I, Kim C H. Analytical methods for the determination of allowable free span lengths[A]. Proceedings of the 7th International Offshore and Polar Engineering Conference[C]. Honolulu, USA, 1997. 377 - 342.
- [3] 唐友刚,李长升,项忠权. 加固前后输油管道固有频率计算[J]. 石油学报, 1997, 18(2): 128 - 133.

(下转第 38 页)

3) 研究表明,浮泥均位于航道深槽或港池内,表明水动力条件相对较弱是浮泥形成的必要条件之一,相反滩地由于水动力条件相对较强,不易存在浮泥或层厚很薄;洪季浮泥层厚度与范围明显比枯季大,表明浮泥形成的另一个重要条件为具有来源较为丰富的细颗粒泥沙;航道、港池疏浚与抛泥也是影响该地区浮泥形成的一个重要因素。

4) 由于具有易流动性和可塑性等特性,浮泥的形成发育受潮动力影响明显,浮泥层的形成位置、厚度与带长与潮汐过程一样具有周期性变化。

5) 近期观测到伶仃洋出海航道浮泥范围有所缩小,可能与珠江流域来沙减少和航槽普遍浚深等因素有关,但伶仃洋动力条件复杂,浮泥形成机理及发展趋势有待进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 钱宁,万兆惠.泥沙运动力学[M].北京:科学出版社,1983.
- [2] 邓绍云.浮泥运动研究综述[J].人民黄河,2005,(9):21-23.
- [3] 曹祖德.浮泥特性研究进展[J].天津大学学报,2002,(3).
- [4] 徐建益,袁建忠.长江口深水航道建设中的浮泥研究及述评[J].泥沙研究,2001,(1):74-76.
- [5] 李樟芬,吴永进.密度仪测定杭州湾浮泥和淤泥重度简介[J].水运工程,1995,(5):11-20.
- [6] 吴永进,辛文杰.用测沙仪观测黄埔出海航道浮泥层分布及初步分析[R].南京水利科学研究院,1991.
- [7] 辛文杰,应强,李春初.广州港出海航道一期工程实施后伶仃航段的回淤分析及模拟验证[R].南京水利科学研究院,2003.
- [8] 程和森,丁元国,魏明成.用 γ -射线密度仪观测珠江口伶仃洋航道地区浮泥容重及分布[R].南京水利科学研究院,2006.
- [9] 莫如筠.伶仃洋的水文特性[A].珠江口海岸带和海涂资源综合调查研究文集(四)[C].广州:广东省科技出版社,1986.
- [10] 徐君亮.伶仃洋的水文特性[A].珠江口海岸带和海涂资源综合调查研究文集(四)[C].广州:广东省科技出版社,1986.

(上接第 26 页)

- [4] Det Norske Veritas(DNV). Submarine pipeline systems[M]. Offshore Standard (OS-F101), 2000.
- [5] Angus R, Grytten T, Nystrom P R. Case studies in pipeline free span fatigue[A]. Proceedings of the 10th(2000) International Offshore and Polar Engineering Conference[C]. Seattle, USA, 2000. 275-284.
- [6] 曾晓辉,邢静忠,柳春图,等.多作业状态下近海油气管道的力学分析及软件[J].中国造船,2002,43(4):45-54.
- [7] 曾晓辉,邢静忠,柳春图,等.海底管道强度评估中的两个问题[J].中国造船,2002,43(增刊):180-186.
- [8] Kapuria S, Salpekar V Y, Sengupta S. Fatigue due to vortex-induced oscillations in free spanning pipelines supported on elastic soil bed [A]. Proceedings of the 9th(1999) International Offshore and Polar Engineering Conference[C]. Brest, France, 1999. 197-203.
- [9] Det Norske Veritas(DNV). Free spanning pipelines[M]. Recommended Practice (DNV-RP-F105), 2002.