

波浪作用下海底管道在位稳定性分析*

高福平 顾小芸 吴应湘

(中国科学院力学研究所)

摘 要

基于 Gao et al. (2002; 2003) 得到的描述波浪作用下海底管道在位失稳的 $F_{rb} - G_b$ 关系, 本文提出一种改进的海底管道在位稳定性分析方法, 并给出算例。与 DnV 管道稳定性设计方法不同, 本分析方法考虑了“波浪-管道-砂质海床”之间的动力耦合作用。

关 键 词: 海底管道; 在位稳定性; 分析方法; 波浪载荷; 砂质海床

1 前 言

海底管道作为输送油气的有效工具, 其稳定性是保证海上油气田正常运营的关键。海底管道稳定性设计的主要目的是, 选择合适的海底线路、管道材料、管道尺寸, 以及管道加工安装和维护方法, 使管道在运营期间能够抵御可能遇到的波浪、海流等恶劣环境荷载, 并使投资费用最低。当海底管道铺设于较大波高的浅水海域时, 波浪力将视为影响海底管道稳定性的主要环境荷载。在波浪作用下, 海底管道稳定性与管道重量、环境荷载和海底土层阻力等多种因素相关。如果海床地基土所提供的阻力不能足以平衡波浪力, 管道会从原位滑出而发生在位失稳现象。为防止管道失稳, 必须提高管道的水下重量, 或者采取锚固、压块等固定措施, 或者在海床上开设沟槽进行埋设。以上措施均会增加投资量。管道水下重量的提高一般是通过增加管道的混凝土覆盖层的厚度实现的, 然而过大的管道重量又会对铺管设施和方法提出更高的要求。可见, 合理的海底管道在位稳定性分析, 对海底管道设计和铺设施工方法的选择具有重要意义。

目前国内外普遍采用的挪威船级社推荐的 DnV RPE305 管道稳定性设计规范^[1,2], 是以机械加载试验结果为基础的。在 DnV 规范中, 管道所受波浪力与所受土体阻力是分开计算的。土体对管道阻力的计算采用机械加载试验得到的‘管-土’相互作用模型^[3]。‘管-土’相互作用模型虽然较库仑摩擦理论有较大改进, 但由于该模型只注重了管道与土体之间的动力作用而忽略了波浪对海床的作用, 因此不能全面反映波浪、管道和海床三者之间的耦合作用。近期开展的 U 型水槽模型试验发现, 管道周围海床冲蚀是‘波浪-管道-海床’耦合作用的最直观体现^[4,5,6]。可见, 机械加载的潜在缺点使目前的规范仍需进一步改进。

基于 Gao et al (2002; 2003) 通过水动力加载实验得到的描述管道在位稳定性的“波-管-土”相互作用 $F_r - G$ 关系^[5,6], 本文将提出一种有别于传统 DnV 设计规范的管道稳定性分析方法。

* 中国科学院“十五”知识创新工程项目 (KJ CX2-SW-L03) 和教育部留学回国人员科研启动基金 (2004) 资助

2 描述波浪作用下管道在位失稳的 $Fr_b - G_b$ 关系

波浪作用下海底管道失稳是‘波浪-管道-海床’之间的动力耦合作用问题。在匀速增长的振荡流水动力载荷作用下,海底管道失稳一般经历四个阶段,即完全稳定、砂粒起动、管道轻微晃动和管道在位失稳。量纲分析理论和系统的试验研究表明,管道失稳时的临界 Froude 数 (Fr_b) 与管道重量无量纲参数 G_b 之间大致呈线性关系^[5,6],如图 1 所示。值得注意的是, KC 数变化范围为 0~20。在管道两端自由和防止滚动两种约束条件下, Fr_b 与 G_b 有不同的线性关系。 Fr_b 和 G_b 分别为

$$Fr_b = \frac{U_m}{\sqrt{gD}} \quad (1)$$

$$G_b = \frac{W_s}{\gamma' D^2} \quad (2)$$

其中, U_m 为波浪诱导水质点运动的最大速度, g 为重力加速度, D 为管道外径, W_s 为单位长度管道的水下重量, T 为波浪周期, γ' 为饱和砂的浮容重。海床特性对管道的稳定性也产生影响(见图 1)。另外,加载历史同样会影响管道的稳定性。与管土相互作用模型相比,以上 $Fr_b - G_b$ 经验关系反映了波浪、管道和砂质海床三者之间的耦合作用,在物理机制上更明晰。

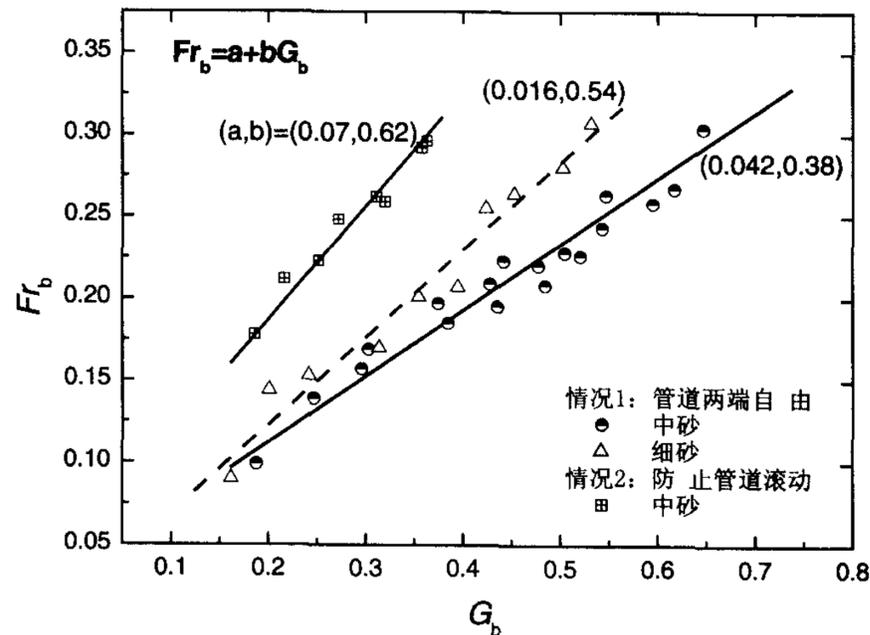


图 1 管道在不同端部约束条件和海床特性下的在位稳定性

对于长距离铺设的管道,其不同位置的安全度要求是不同的。在关键位置附近,如安装阀门连接件的位置、管道交叉处和管道与立管交叉处等,一般要求在管道安装就位后和运营期间不允许产生位移;而在管道的一般位置,可以允许管道有一定的横向位移^[1,2]。

在特殊位置处,水平铺设的管道在不受端部约束下须保证侧向稳定性,因此可以用水动力耦合试验中两端自由的管道失稳临界线来估算对稳定性要求高的特殊位置处管道的稳定性。防止管道滚动约束下得到的管道临界失稳线则可考虑用来估算管道一般位置的稳定性(见图 2)。图中给出的是中砂海床的试验结果。对不同海床而言,需结合土性参数对管道稳定性判别准则进行修正。

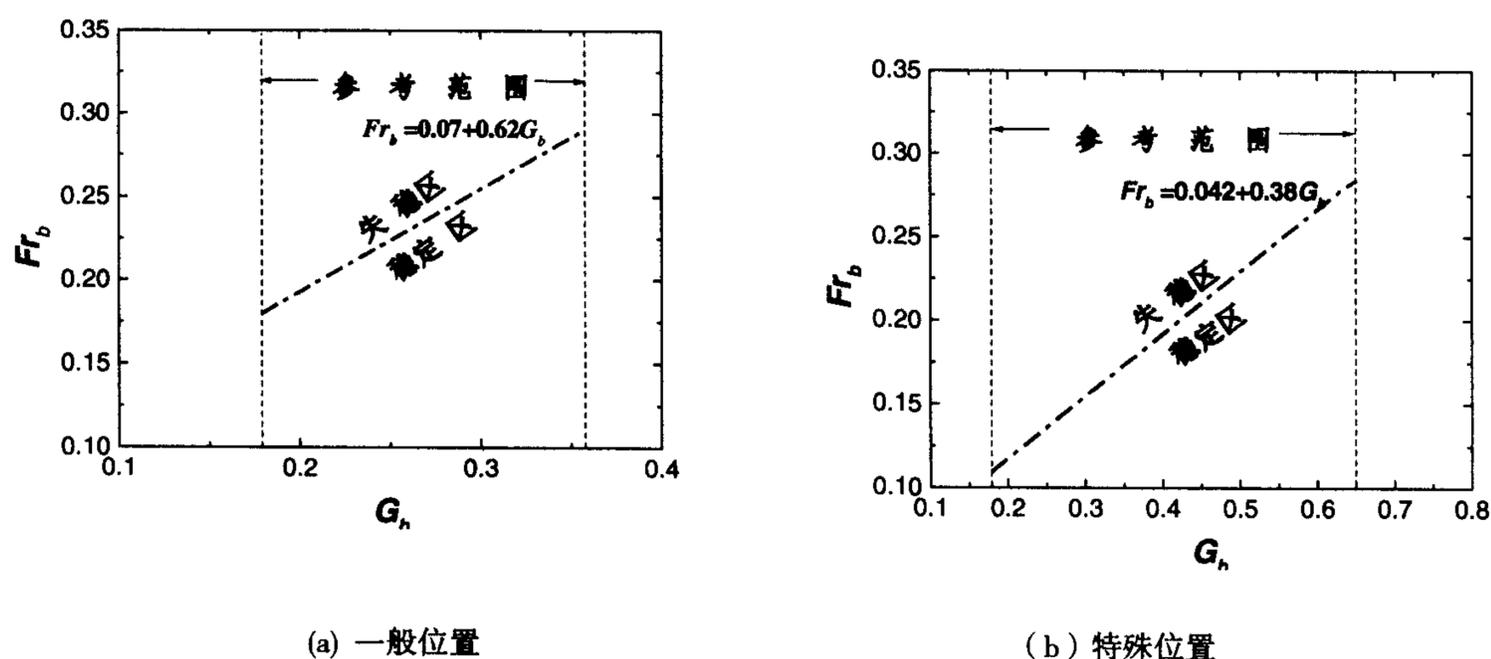


图 2 管道的在位稳定性判据 (中砂海床)

3 基于 $Fr_b - G_b$ 经验关系的管道在位稳定性分析方法

上述分析表明,海底管道的在位稳定性与管道水下重量、环境荷载和海床特性等因素有着直接关系。海底管道在位稳定性设计的主要目的是使管道水下重量满足稳定性要求。也就是说,如果给定管道的内径(与油气产量等因素有关)、钢管的壁厚(与管道设计强度等有关)和钢管外敷防腐涂层厚度,则需要确定外层混凝土厚度,使管道满足在位稳定性要求。

本文基于“波-管-土”相互作用 $Fr_b - G_b$ 经验关系,提出一种管道在位稳定性分析方法。其具体分析框图如图 3 所示。

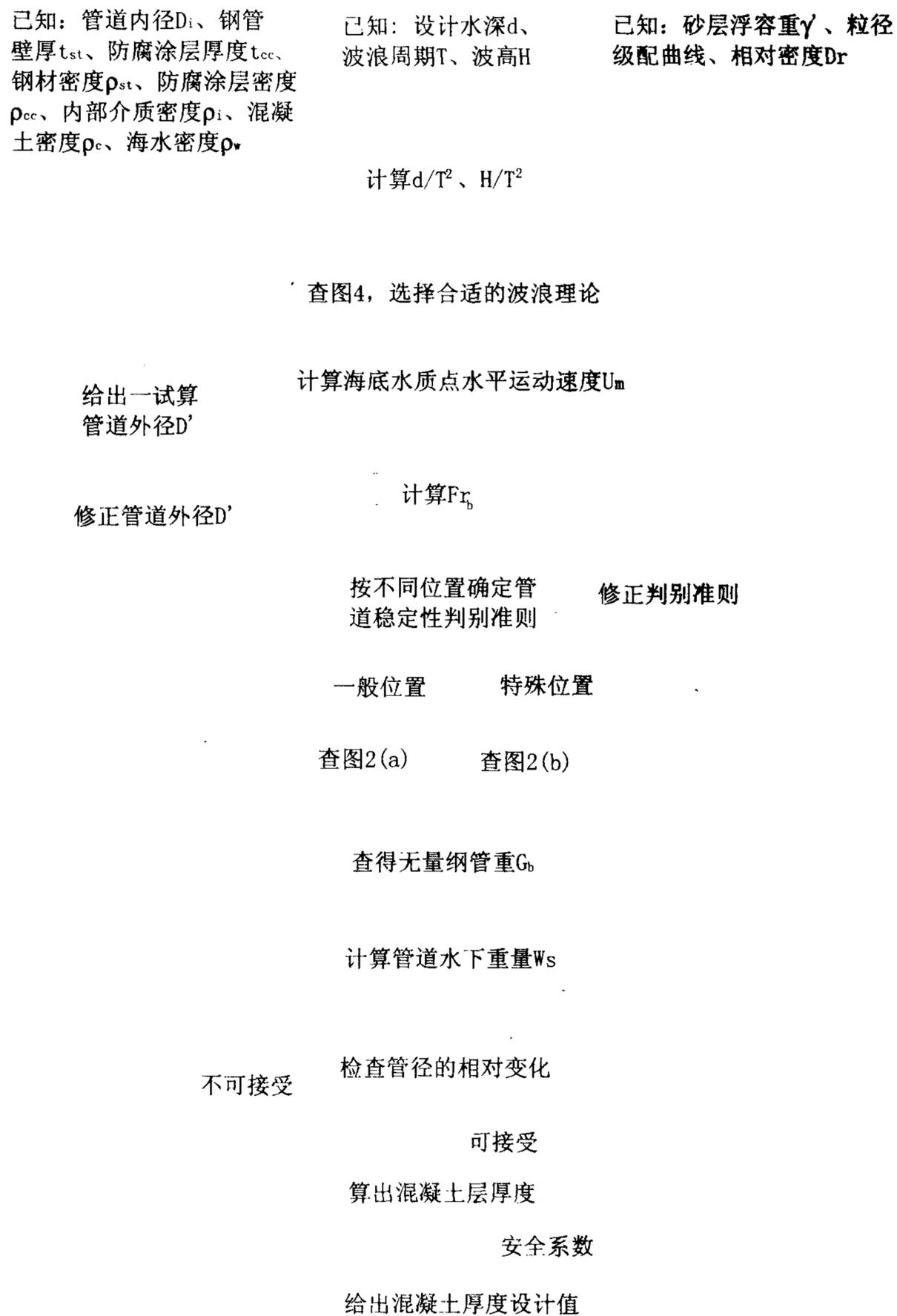


图3 基于 $Fr_b - G_b$ 经验关系的管道在位稳定性分析框图

3.1 波浪环境条件

如果给定海域的环境荷载以波浪力为主，则以接近海底处垂直于管道的波浪引起的水质点水平运动速度为设计条件。给定水深 d 、波浪周期 T 和设计波高 H ，利用合适的波浪理论可求出海底水质点运动速度 U_m 。一般选取距离海底 0.5 倍管径位置的水质点速度作为设计值。

海洋波浪的变化形式极其复杂。对天然海面的观测可知，海面上各点的水面变化呈现着随时间

和地点而变化的一个随机过程。但在平稳海区,海面的波动可看作是由无限多个具有不同振幅、频率、相位和传播方向的简单余弦波叠加而成。描述某一特定海域的随机波浪荷载主要有特征波法和波浪谱法。但当前针对我国各海区建立的波浪谱还为数极少,工程中仍广泛采用特征波法。在不同水深传播的具有不同波高、周期和波长的波浪应采用相应的波浪理论加以描述。目前所采用的波浪理论有 Airy 波浪理论(线形波浪理论)、Stokes 二阶波浪理论、Stokes 三阶波浪理论、椭圆余弦波理论和孤立波理论等。图 4 为不同波浪理论的应用范围,图中 1 Ft (英尺)=0.3048 m。

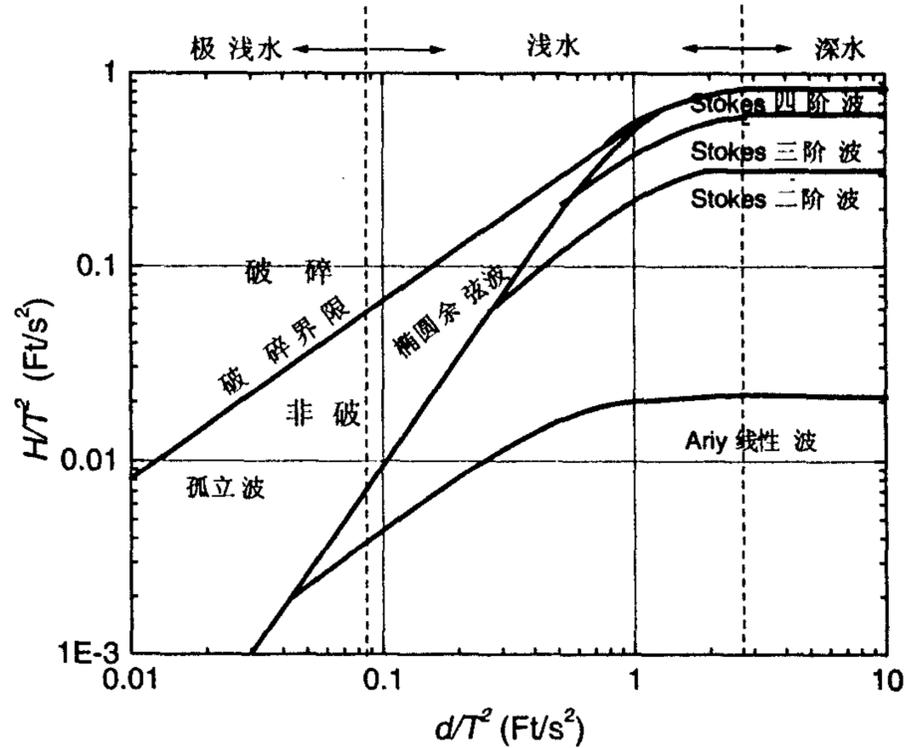


图 4 各种波浪理论适用范围

根据给出的设计水深 d 、周期 T 和波高 H , 可求出 H/T^2 和 d/T^2 , 查图 4 选择合适的波浪理论以计算水质点运动速度。其中, Stokes 波浪理论是 Stokes 在 1847 年提出来的, 其一阶波理论就是 Airy 线性波浪理论。Stokes 高阶波理论考虑了自由水面引起的非线性影响, 即自由表面的运动条件和动力条件是非线性的。按照 Stokes 二阶波浪理论, 波浪引起的距离水表面 z 位置的水质点运动水平速度 U_x 为

$$U_x = \frac{\pi H}{T} \frac{ch[K(z+d)]}{sh(Kd)} \cos(Kx - \omega t) + \frac{3}{4} \left(\frac{\pi H}{T} \right) \left(\frac{\pi H}{L} \right) \frac{ch[2K(z+d)]}{sh^4(Kd)} \cos[2(Kx - \omega t)] \quad (3)$$

式中, $\omega = \frac{2\pi}{T}$, K 为波数 ($K = \frac{2\pi}{L}$), 波长 L 与周期 T 在有限水深条件下具有如下色散关系:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} th\left(\frac{2\pi}{L}d\right) \quad (4)$$

最大水质点水平运动速度 U_m 发生在相位 $\theta = kx - \omega t = 0$ 的时刻, 即

$$U_m = \frac{\pi H}{T} \frac{ch[K(z+d)]}{sh(Kd)} + \frac{3}{4} \left(\frac{\pi H}{T} \right) \left(\frac{\pi H}{L} \right) \frac{ch[2K(z+d)]}{sh^4(Kd)} \quad (5)$$

利用 Stokes 三阶波浪理论、椭圆余弦波理论和孤立波理论等波浪理论计算水质点运动速度的方法可参考文献^[7]。

3.2 海床地质条件

海洋沉积土的性质受其来源、地理条件和沉积过程的影响显著,必须对不同海域取土分别进行研究,即应在铺管场址进行现场调查,间隔一定距离取样进行分析,确定海床种类。如果是砂质海床,至少需要测定以下参数(1)浮容重;(2)绘出粒径级配曲线以确定中径 d_{50} 和有效粒径 d_{10} ;(3)相对密度等。值得注意的是,海洋砂土富含有机物和盐分,测定土样比重时,必须考虑盐分的影响,因为比重值的精确度直接影响到孔隙比和相对密度的计算。

3.3 管道初始数据

在管道稳定性设计中,需要首先提供管道的以下数据(见图5), (1)管道内径 D_i 、(2)钢管壁厚 t_{st} 、(3)钢材密度 ρ_{st} 、(4)防腐涂层厚度 t_{cc} 、(5)防腐涂层密度 ρ_{cc} 、(6)混凝土密度 ρ_c 、(7)内部介质密度 ρ_i 、(8)海水密度 ρ_w 等。待定参数为混凝土厚度 t_c :

$$t_c = (D - D_i - 2t_{st} - 2t_{cc})/2 \quad (6)$$

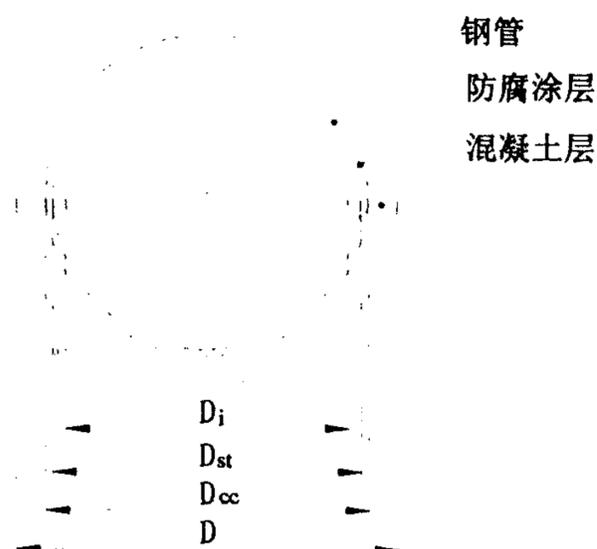


图5 海底管道管壁结构示意图

在图3给出的分析框图中, F_{rb} 可利用式(1)计算,并将试算管径 D 代替式中的 D ;利用图2(a)或图2(b)查出管道无量纲管道水下重量 G_b 后,利用式(2)计算 W_s ;在检查管径的相对变化时,首先在已知 W_s 、 ρ_c 、 ρ_{cc} 、 ρ_{st} 、 ρ_i 、 D_i 、 t_{st} 和 t_{cc} 的情况下,利用下式求出管道的计算管径 D :

$$D^2 = \frac{1}{\rho_c - \rho_w} \left[\frac{W_s}{0.25\pi g} + D_i^2(\rho_{st} - \rho_i) + D_{st}^2(\rho_{cc} - \rho_{st}) + D_{cc}^2(\rho_c - \rho_{cc}) \right] \quad (7)$$

式中, D_{st} 为钢管外径(见图5),

$$D_{st} = D_i + 2t_{st} \quad (8)$$

D_{cc} 为防腐涂层外径,

$$D_{cc} = D_{st} + 2t_{cc} \quad (9)$$

如果 $|D - D'|/D$ 大于允许值 (可取允许值为 1‰), 须对试算管径 D' 进行修正。然后利用式(6)求出使管道侧向稳定的需要的混凝土层厚度, 则混凝土层厚度的设计值 t_{cD} 为:

$$t_{cD} = f_t \times t_c \quad (10)$$

式中, f_t 为安全系数。

从以上管道稳定性分析方法中可以看出, 以 $Fr_b - G_b$ 耦合关系为纽带, 建立了描述管道在位稳定性的环境荷载、海床土性参数和管道参数之间的相互关系。从工程分析角度看, $Fr_b - G_b$ 耦合关系对波浪、管道和海床的主要特征参数均有所体现, 形式上也比较简练, 便于应用。从工程应用的角度, 利用水动力模型试验研究管道的失稳规律, 对完善管道设计规范是有益的。

4 算例

4.1 已知条件

(1) 波浪环境参数

水深	$d = 50.0 (m)$
波高	$H = 10.0 (m)$
周期	$T = 10.0 (m)$

(2) 砂质海床参数

浮容重	$\gamma' = 9.0 \times 10^3 (N/m^3)$
砂粒中径	$d_{50} = 0.38 (mm)$
有效粒径	$d_{10} = 0.30 (mm)$
相对密度	$Dr = 0.37$

(3) 管道数据

管道内径	$D_i = 0.900 (m)$
钢管壁厚	$t_{st} = 0.010 (m)$
防腐涂层厚度	$t_{cc} = 0.005 (m)$
钢材密度	$\rho_{st} = 7850 (kg/m^3)$
防腐涂层密度	$\rho_{cc} = 1300 (kg/m^3)$
内部介质密度(取为海水密度)	$\rho_i = 1025 (kg/m^3)$
海水密度	$\rho_w = 1025 (kg/m^3)$
混凝土密度	$\rho_c = 2400 (kg/m^3)$

4.2 设计过程

上节给出了海底管道设计步骤, 参照图 3, 管道的设计过程如下:

(1) 选择波浪理论, 计算水质点水平运动最大速度

$$d/T^2 = 0.5 (m/s^2) \approx 1.7 (Ft/s^2)$$

$$H/T^2 = 0.1 (m/s^2) \approx 0.3 (Ft/s^2)$$

查图 4, 可利用 Stokes 二阶波浪理论计算水质点运动速度。将 d 、 T 的数值代入式(4), 采用试算法可求出波长 $L=151$ (m), 波数 $K=0.042$ 。将 H 、 K 、 d 、 T 代入式(5), 可得到 $z = -(d - 0.5)$ 米处 (约管道中心高度处) 的水质点的最大水平运动速度 $U_m = 0.791 (m/s)$ 。

(2) 稳定性判据的选择、管道水下重量和混凝土厚度的确定

参考管道内径 D_i 、钢管壁厚 t_{st} 和防腐涂层厚度 t_{cc} 的数据, 可先给出管道试算外径 D' , 然后将 D' 和 U_m 代入式(1)求出 Fr_b 。对于一般位置的管道的稳定性分析可查图 (2), 确定管道的无量纲管重 G_b , 再利用式(2)求出单位长度管道水下重量 W_s 。将 W_s 、 ρ_c 、 ρ_{cc} 、 ρ_{st} 、 ρ_i 、 D_i 、 t_{st} 和 t_{cc} 代入式(7)可得到管道的计算管径 D 。如果 $|D - D'|/D > 1\%$, 则修改管道的试算管径 D' 的大小, 直到符合要求。按照以上方法, 当 $D' = 0.958 m$ 时, $Fr = 0.258$, 查图(2)得到 $G_b = 0.305$; 将 γ' 和 D' 代入式(2), 得 $W_s = G \times \gamma' D'^2 = 2.522 \times 10^3 N/m$ 。此时计算管径 $D = 0.959 m$, $|D - D'|/D \approx 6.0 \times 10^{-4} < 0.001$, 符合要求。这样, 混凝土层厚度为 $t_c = (D - D_i - 2t_{st} - 2t_{cc})/2 = (0.959 - 0.900 - 2 \times 0.010 - 2 \times 0.005)/2 \approx 0.014 m$ 。如果取安全系数 $f_t = 1.1$, 则混凝土厚度的设计值为 $t_{cd} = f_t \times t_c \approx 0.016 m$ 。

5 结 语

(1) 目前国际上广泛采用的 DnV 管道稳定性设计规范是以机械加载试验结果为依据的, 而机械加载潜在的缺点使目前的规范仍需要进一步改进。以 U 型水槽试验得到的描述管道失稳的 $Fr_b - G_b$ 关系为基础, 本文提出了一种有别于 DnV 规范的管道在位稳定性分析方法, 并给出了具体分析步骤和算例。

(2) 在传统设计方法中, 土阻力的计算参数选取的经验性很强, 这就增加了设计的盲目性。而本文提出的方法避开了土阻力和管道受力的具体计算, 利用 Fr_b 与 G_b 之间的经验关系, 使得设计过程更简单, 物理机制更明晰。

(3) 本文提出的管道稳定性分析方法只涉及到波浪为主的环境载荷作用下铺设于水平砂质海床上的海底管道设计。而实际的海洋环境荷载一般为波流联合作用。既有砂波等海床地质因素也会对海底管道稳定性产生影响。另外, 通过模型试验得到的“波-管-土”相互作用关系还需现场数据的验证。

参 考 文 献

- 1 Det norske Veritas. On-bottom stability design of submarine pipeline, Recommended Practice E305, 1988
- 2 中国海洋石油总公司,中国海洋石油总公司企业标准 Q/HS 7016-93—海底管道稳定性设计, 1993
- 3 Wagner D A, Murff J D, Brennodden H and Sveggen O. Pipe-soil interaction model. Proceedings of Nineteenth Annual Offshore Technology Conference, 1987, OTC 5504: 181-190
- 4 高福平, 顾小芸, 浦群. 海底管道失稳过程的模型试验研究. 岩土工程学报, 2000, 22 (3): 304-308
- 5 Gao F P, Gu X Y., Jeng D S and Teo H T. An Experimental Study for Wave-Induced Instability of Pipelines: The Breakout of Pipelines. Applied Ocean Research, 2002, 24(2): 83-90
- 6 Gao F P, Gu X Y and Jeng D S. Physical modeling of untrenched submarine pipeline instability. Ocean Engineering, 2003, 30 (10): 1283-1304
- 7 Sarpkaya T and Isaacson M. Mechanics of Wave Forces of Offshore Structures. London: Van Nostrand Reinhold Company, 1981

An Analysis Method for On-bottom Stability of Untrenched Pipeline under Wave Loading

GAO Fu-ping GU Xiao-yun WU Ying-xiang
(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences)

Abstract

Different from DnV pipeline on-bottom stability design method, an improved analysis method for pipeline on-bottom stability is proposed, based on the non-dimensional wave-pipe-soil interaction relationships, i.e. $F r_b - G_b$ relationships, which were drawn from hydraulic loading experiments by Gao et al (2002, 2003). In the new analysis method, the coupling effects of wave loading, soil and pipelines are taken into account.

Key words: Submarine pipeline; On-bottom stability; Analysis method; Sandy seabed

作 者 简 介

高福平 男, 1973年出生, 博士, 副研究员。2001年在中国科学院力学研究所获工程力学专业博士学位, 2001年至2002年在西澳大利亚大学近海结构地基基础研究中心和格里菲斯大学工程学院做博士后, 目前在中国科学院力学研究所从事土力学和海洋工程力学研究。