

文章编号 : 1005-9865 (2005) 01-0006-07

考虑波 - 管 - 土耦合作用的海底管道在位稳定性分析方法

高福平, 顾小芸, 吴应湘

(中国科学院 力学研究所, 北京 100080)

摘 要:以水动力加载试验得到的描述管道在位稳定性的波浪环境参数、管道参数和海床土性参数之间的无量纲耦合关系为基础,提出了一种考虑波-管-土动力耦合作用的海底管道在位稳定性分析方法,并通过算例与挪威船级社推荐的 DnV 设计规范进行了比较分析。分析表明,考虑波-管-土耦合作用的管道稳定性分析方法与 DnV 管道设计规范有很好的可比性,而且物理机理更清晰,可为管道稳定性设计提供有益的参考。

关键词:海底管道;在位稳定性;波管土耦合作用;设计方法

中图分类号:TV139.2 **文献标识码:**A

A wave-pipeline-soil coupling analysis method for untrenched pipeline stability

GAO Fu-ping, GU Xiao-yun, WU Ying-xiang

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: Wave induced submarine pipeline on-bottom stability is a wave-pipeline-soil coupling problem. The DnV pipeline stability design standard is based on the pipe-soil interaction model, which was drawn from mechanical actuator loading experiments. Different from the method in the DnV design standard, a wave-pipe-soil coupling analysis method for untrenched pipeline stability is proposed in this paper. In the new analysis method, the non-dimensional wave-pipe-soil interaction relationships drawn from hydraulic loading experiments are accepted, which reflect the coupling effects of wave loading, soil and pipelines. A comparison between the wave-pipeline-soil coupling analysis method and DnV design method indicates that the proposed method being more explicit in physical mechanism aspect is comparable with the DnV design method and will provide a guide for engineering practice.

Key words: submarine pipeline; on-bottom stability; wave-pipeline-soil coupling effect; design method

海底管道是连接油井与平台及平台与陆上储运设施的输送油气工具。管道失稳引起的管道油气泄露不仅会造成经济损失,更会产生巨大的海洋环境污染。在波浪等恶劣环境荷载作用下,海底管道的稳定性是海洋油气工程中的一个关键问题。

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。海底管道铺设于较大波高的浅水海域时,波浪力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产生的阻力等多种因素相关。如果海底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,然而过大的管道设计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

收稿日期:2003-11-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(1977205);中国科学院“十五”知识创新工程资助项目(KCX2-SW-L03)

作者简介:高福平(1973-),男,山东淄博人,博士,副研究员,主要从事岩土力学和海洋工程研究。

要意义。

目前国际上广泛采用的管道稳定性设计规范——DnV 规范^[1,2],是以机械加载的试验结果为理论基础的。机械加载得到的管-土相互作用模型不能全面反映波浪、管道和海床三者之间的动力相互作用,所以目前的设计方法仍需进一步改进。

1 DnV 海底管道稳定性设计规范评述

1.1 DnV 管道设计规范简介

挪威船级社(DnV)1988年颁布了海底管线设计企业标准,即DnV RPE305《On-Bottom Stability Design of Submarine Pipeline》^[1]。该规范具有较强的完整性,它对管道设计、试验、验收和维护都有较详细的规定,实用性强,被广泛采用。鉴于我国在海底输油管道工程领域技术规范和标准尚不成熟,中国海洋石油总公司也采用该规范作为企业标准^[2]。

该设计规范适用于海底管道在使用寿命内或者在采取其它辅助稳定性措施之前的海底管道稳定性分析。根据对分析结果要求的详细程度,共有以下三种分析方法:

1) 动力分析:该分析方法是一种时域解法,主要模拟波谱及与之相应的实际时间序列、海底流速、管道的结构特性、水动力、土壤阻力和约束条件等。在该方法中,管道所受波浪荷载的计算采用尾迹效应修正的 Wake 模型;而土阻力的计算采用 Wagner 等人提出的管土相互作用模型^[3]。此方法在对具有潜在危险性的现有管道进行重新分析等情况下才采用。

2) 广义稳定性分析:该方法是一种建立在对动力分析结果进行总结归纳得到的一组无量纲参数关系图表基础上的分析方法。在该方法中,假定管道沉降对水动力不折减,但是考虑了循环载荷作用下管道的附加沉降导致的土体被动土压力的增加;不考虑加载历史对管道稳定性的影响;土层只限于中砂。管道完全稳定广义分析方法主要用于阀门连接件、管道交叉处等关键部位附近管道的稳定性分析。

3) 简化的稳定性分析:该方法是一种准静态方法。管道受力采用 Morison 方程求解,并假定管道与海床之间的阻力系数为常数。其计算结果给出的管道重量是由广义稳定性分析方法所得管重的保守包络线。此方法主要用于分析正常状态下的一般位置管道的稳定性。

1.2 DnV 规范存在的不足

DnV 管道稳定性设计规范给出的分析方法,是将海洋环境载荷下的管道受力和管土相互作用分析两者分开进行处理的。用于管道稳定性分析的管-土相互作用模型则是基于机械加载试验结果的。管-土相互作用模型考虑了被动土压力和加载历史等因素对管道稳定性的影响,与库仑滑动摩擦模型相比有了较大改进,但未能体现波-管-土三者之间的动力耦合作用。因此,对管道稳定性物理机制的分析仍不清晰,需进一步改进。

2 波-管-土耦合作用模型

2.1 波-管-土耦合作用试验与管-土相互作用试验的比较

由于波浪作用下海底直铺管道与海床的动力相互作用复杂性,国际上许多研究机构已经投入大量资金进行了研究,如美国天然气协会(AGA)、丹麦水工所(DHI)、挪威水力试验室(NHL)、SINTEF 和 Exxon Production Research Co. (挪威)等,并相继提出了管土相互作用模型和基于能量的管土相互作用模型^[3,4]。以上管土相互作用试验均是利用拖动装置直接对管道施加力的机械加载方法进行的,即对放置在砂床上的试验管道施加水平荷载以模拟波浪作用在管道上的水平拖曳力和惯性力,同时施加一定比例的垂直向上的荷载以模拟波浪作用在管道上的升力,见图 1(a)。机械加载试验中,施加力的周期与实际情况接近;为了使土样在试验过程中处于饱和状态,即防止干裂,土样上面有很薄的水层。

机械加载试验存在以下不足之处:1) 机械加载试验只注重了管道的受力,忽视了波浪对海床的作用。实际上,波浪同时对管道和海床产生作用。2) 机械加载试验中,研究加载历史的方法是,利用拖动装置首先对管道施加不同周次的小幅值简谐位移(或小幅值简谐力),然后突然增加位移(或力)使管道失稳。实际风暴引起的海浪波高的增长是个渐进过程,所以机械加载采用突然增加大位移或力的试验方法与实际情况相差较大。3) 管-土相互作用模型不能很好体现波浪参数变化的影响,也不能很好揭示海床特性对管道稳定性

的影响规律。

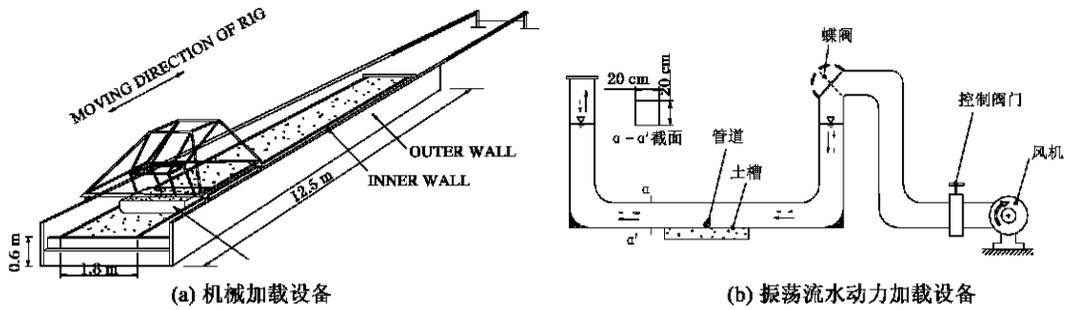


图 1 管道在位稳定性研究试验设备比较

Fig. 1 Comparison of experimental equipments for pipeline stability investigation

为从波 - 管 - 土三者之间的动力耦合角度探索管道失稳的物理机制,文献[5~7]采取 U 型振荡流水槽水动力加载研究方法对管道稳定性进行了系统研究。对于浅水重力波,接近海底处的水质点主要沿水平方向作周期振荡运动,铺设在浅水海底的管道在波浪作用下主要受水平振荡流的影响。因此,利用振荡水流可以模拟波浪作用下海底管道周围的流场。U 型振荡流水槽装置由 U 形管本体和驱动装置两部分组成:本体是高 1.50 m、宽 2.12 m、截面尺寸为 0.20 m × 0.20 m 的有机玻璃管道,内装约 150 kg 水;驱动装置包括蝶阀、抽气管道、风机、调节阀和阀门控制系统等,见图 1(b)。通过阀门控制系统,可实现水体的等幅振荡以及水体在 0~200mm 内振幅的连续变化。试验管道置于 U 型水槽底部中间部位的土槽内饱和砂床上,振荡水流的运动方向垂直于管道轴向,模拟二维平面应变状态。U 型水槽便于控制水质点运动幅值的优点,也使研究不同加载历史下的管道稳定性成为可能。可见,与机械加载相比,振荡流水动力加载在对管道产生作用的同时,也同时对土层产生影响,可模拟管道结构、海底土层和波浪环境载荷三者之间的动力相互作用。

2.2 描述管道在位稳定性的波 - 管 - 土耦合关系

量纲分析理论和系统的试验研究表明^[5~7],海底管道失稳过程中的波 - 管 - 土耦合作用十分明显。管道周围振荡流体涡流作用诱导的海床冲蚀是波 - 管 - 土耦合作用最直观的体现。在匀速增长的水动力载荷作用下,海底管道失稳一般经历四个阶段,即完全稳定、砂粒启动、管道轻微晃动和管道在位失稳。管道失稳时的临界 Froude 数 (Fr_b) 与管道重量无量纲参数 G_b 之间呈线性关系,如图 2 所示。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;对于两端自由的管道,海床特性的不同,如中砂和细砂,也对管道的稳定性产生影响。另外,加载历史同样会影响管道的稳定性。

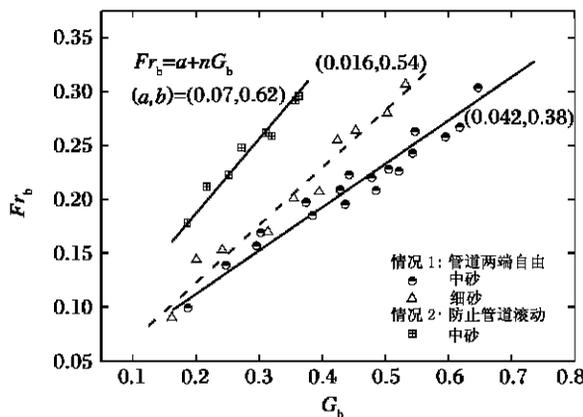


图 2 管道在不同端部约束条件和海床特性下的在位稳定性^[6]

Fig. 2 On-bottom stability of pipelines with different end constraints and various seabed properties^[6]

在图 2 中, Fr_b 和 G_b 的含义分别为:

$$Fr_b = \frac{U_m}{\sqrt{gD}} \tag{1}$$

$$G_b = \frac{W_s}{D^2} \tag{2}$$

其中, U_m 为水质点的最大运动速度, g 为重力加速度, D 为管道外径, W_s 为单位长度管道水下重量, γ_s 为饱和砂的浮容重。

与管土相互作用模型相比,以上波-管-土相互作用关系反映波浪、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。

3 考虑波-管-土耦合作用的管道在位稳定性分析方法

3.1 管道在位稳定性判据

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 3)。图中给出的是中砂的试验结果,对于不同海床必须进行粒径效应等土性参数修正。

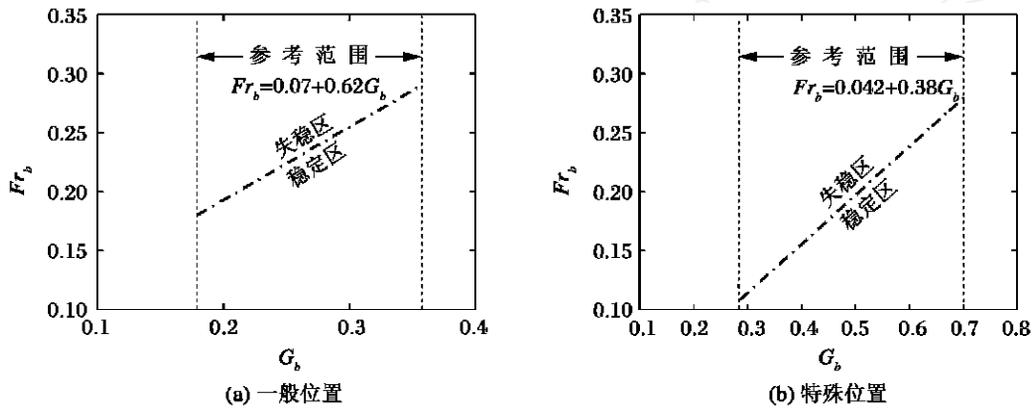


图 3 管道的在位稳定性判据(中砂海床)

Fig. 3 Criteria for pipeline on-bottom stability (for medium sand seabed)

3.2 考虑波-管-土耦合作用的管道在位稳定性分析方法

在管道稳定性设计中,需要首先提供以下管道参数、海床土性参数和波浪环境参数等。

3.2.1 管道参数

管道初始数据包括管道内径 D_i 、钢管壁厚 t_{st} 、钢材密度 ρ_{st} 、防腐涂层厚度 t 、防腐涂层密度 ρ_{cc} 、混凝土密度 ρ_c 、内部介质密度 ρ_i 、海水密度 ρ_w 等(见图 4)。待定参数为混凝土厚度 t_c 。混凝土厚度直接关系到管道水下重量的大小,影响管道的在位稳定性。当 t_c 确定后,即可求得保证管道在位稳定的管道外径 D :

$$D = D_i + 2(t_{st} + t_{cc} + t_c) \tag{3}$$

3.2.2 海床土性参数

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,因此必须对不同海域分别取土进行分析。取土样时,应对铺管场址进行现场调查,间隔一定距离进行取样分析,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 γ_s ; 2) 绘出粒径级配曲线以确定中径 d_{50} 和有效粒径 d_{30} ; 3) 相对密度 Dr 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。

3.2.3 波浪环境参数

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的随机变化过程。描述某一特定海域的波浪特性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,工程中广泛采用的仍是特征波法。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合适的波浪理论加以描述,见图 5^[8]。目前常用的波浪理论有 Airy 波浪理论(线性波浪理论)、Stokes 二阶、三阶波浪理论、椭圆余弦波理论和孤立波理论等。

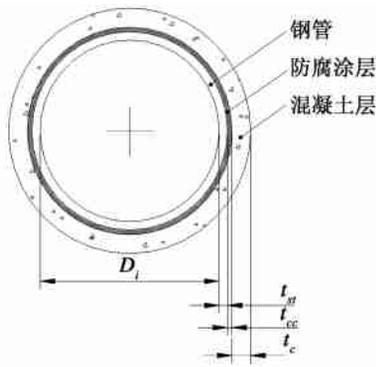


图 4 海底管道管壁结构示意图

Fig. 4 The sketch of submarine pipeline wall

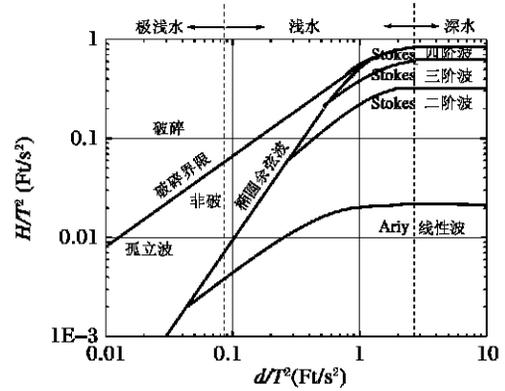


图 5 波浪理论适用范围

Fig. 5 Ranges of suitability for various wave theories

在管道稳定性设计中,需要计算波浪引起的海底管道附近水质点运动速度 U_m 。为此,需要给出设计水深 d 、波浪周期 T 和波高 H 。按照 H/T^2 和 d/T^2 的数值,查图 5 选择合适的波浪理论来计算 U_m 。

基于 3.1 节给出的管道稳定性判据及以上分析,提出一种考虑波 - 管 - 土耦合作用的管道在位稳定性分析方法,如图 6 所示。

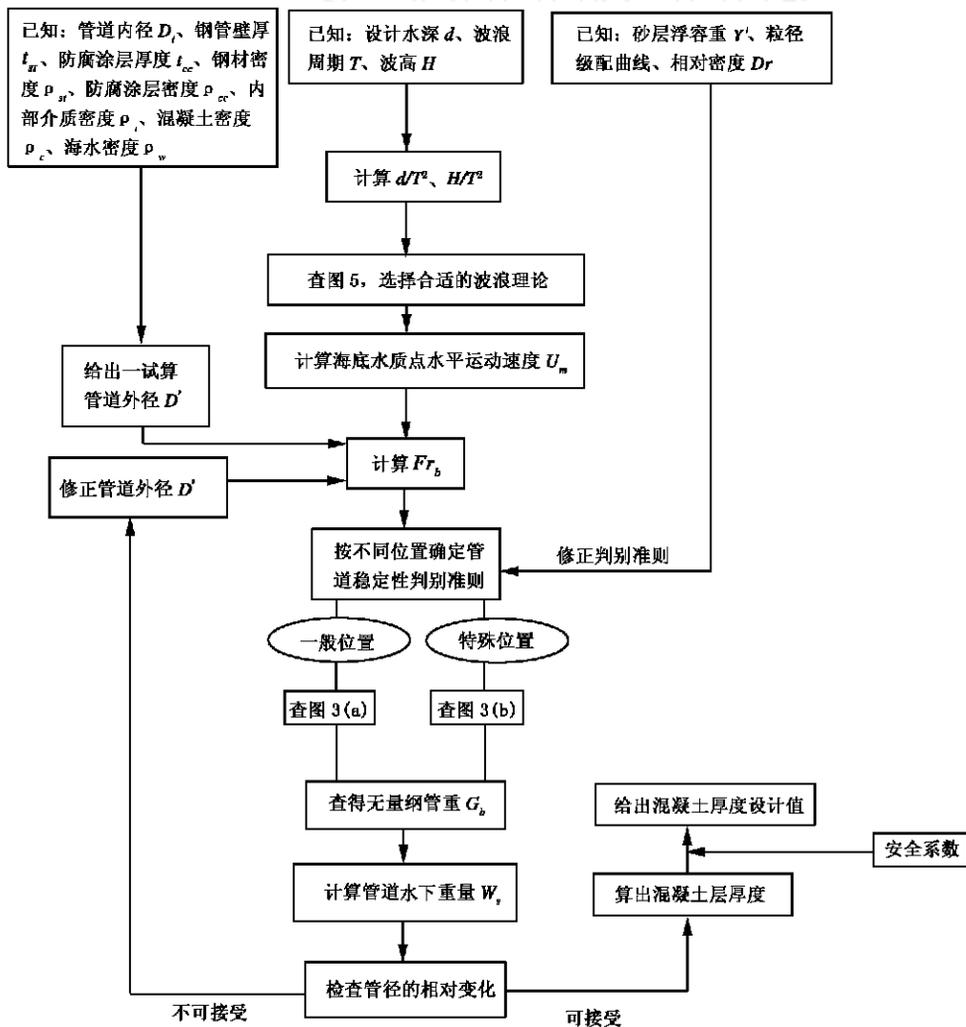


图 6 基于波 - 管 - 土耦合模型的管道在位稳定性分析框图

Fig. 6 Analysis process of untrenched pipeline stability based on wave-pipeline-soil coupling relationships

在框图中, Fr_b 利用式 (1) 计算, 将试算管径 D 代替式中的 D ; 利用图 3(a) 或 3(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 、 c 、 cc 、 st 、 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 :

$$D^2 = \frac{1}{c - w} \left[\frac{W_s}{g} + D_i^2 (st - i) + D_{st}^2 (cc - st) + D_{cc}^2 (c - cc) \right] \quad (4)$$

式中: D_{st} 为钢管外径, $D_{st} = D_i + 2t_{st}$; D_{cc} 为防腐涂层外径, $D_{cc} = D_{st} + 2t_{cc}$ 。

如果 $|D - D| / D$ 大于允许值(可取允许值为 1%),再对试算管径 D 进行修正。然后利用式(3)求出使管道侧向稳定所需的混凝土层厚度。最后的设计值 t_{CD} 还需乘以一安全系数 f_t ,即 $t_{CD} = f_t \times t_c$ 。

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。

4 与 DnV 管道稳定性设计规范比较

以外径为 0.356 m 的管道为例,利用 DnV 规范进行管道水下重量的设计。波浪设计周期为 9 s,海床特性选用中砂 $d_{50} = 0.30 \text{ mm}$, $\rho = 9.0 \times 10^3 \text{ N/m}^3$ 。对于不同的水质点运动速度,管道的水下无量纲管重的设计值见表 1。其中,广义算法为管道完全稳定的广义算法,适用于特殊位置的管道设计;而简化算法适用于一般位置的管道设计。

表 1 不同环境参数下的管重设计值(按 DnV 规范)

Tab. 1 Design values of submerged weight of pipelines with various environmental parameters (according to DnV standard)

水质点速度幅值/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	Fr_b	G_b (简化分析法)	G_b (完全稳定广义分析法)
0.25	0.134	0.096	0.240
0.30	0.161	0.124	0.312
0.35	0.190	0.156	0.409
0.40	0.214	0.191	0.514
0.45	0.241	0.231	0.624
0.50	0.268	0.273	0.705
0.55	0.294	0.321	0.837

与波-管-土耦合作用模型比较可以看出,在相同的 Fr 下,按照 DnV 规范给出的管道一般部位的设计管重与防滚管道的临界失稳线接近(见图 7)。值得注意的是,本文给出的管道失稳的临界线是在匀速加载条件下得出的,体现了加载历史对管道稳定性的影响。对于不同的加载历史,还需要对管道的在位失稳曲线进行修正。在 DnV 规范的简化算法中,没有具体给出加载历史对管道稳定性的影响。对 DnV 规范完全稳定管道的设计值与本文两端自由的管道失稳临界线进行比较发现,当 Fr 数较小时($Fr < 0.18$),两者几乎重合,但当 Fr 数较大时($Fr > 0.18$),DnV 管重设计值渐渐偏离两端自由管道的失稳临界线。可见,本文提出的考虑波-管-土耦合作用的管道稳定性分析方法与 DnV 管道设计规范有很好的可比性,而且物理机理更清晰,可为管道稳定性设计提供有益的参考。

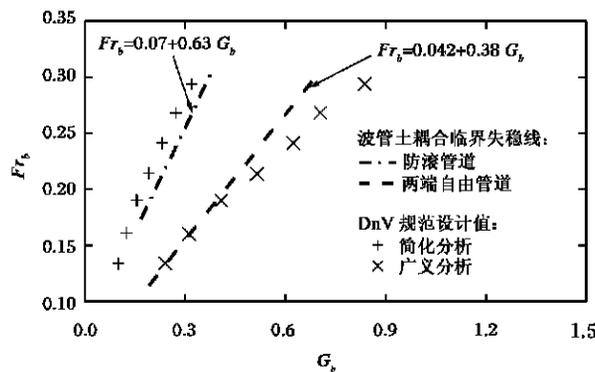


图 7 波-管-土耦合分析方法与 DnV 规范的设计结果比较

Fig. 7 Comparison between wave-pipe-soil coupling analysis method and DnV standard

5 结 语

1) 目前国际上广泛采用的 DnV 规范是以机械加载试验结果为理论依据的,机械加载试验方法的潜在缺点使目前的规范仍需要进一步改进。以水动力加载试验所得到的波-管-土耦合作用关系为基础,本文提出了一种有别于传统设计规范的管道稳定性分析方法,并给出了分析框图。但模型试验得到的波-管-土耦合关系还需试验和现场数据的验证。

2) 在传统设计方法中,土阻力计算参数选取的经验性很强,这就降低了设计精度。而本方法克服了土阻力和管道受力分开计算的不足,利用 F_{r_b} 和 G_b 之间的耦合关系式,物理机理清晰,分析过程简捷。

3) 本文提出的考虑波-管-土耦合作用的分析方法只涉及到波浪为主的环境载荷作用下水平砂质海床上管道的在位稳定性。实际上,海洋水动力环境的波、流联合作用,以及崎岖海床和沙脊、沙波等地质因素均会对海底管道的稳定性产生影响,因此管道稳定性设计还需进一步综合考虑各种因素的影响。

参考文献:

- [1] Det norske Veritas. On-bottom stability design of submarine pipeline[J]. 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[S]. 1993.
- [3] Wagner D A, Muff J D, Brennodden H, *et al.* Pipe-soil interaction model[A]. Proceedings of Nineteenth Annual Offshore Technology Conference[C]. OTC 5504, 1987, 181 - 190.
- [4] Brennodden H, Lieng J T, Sotberg T, *et al.* An energy-based pipe-soil interaction model[A]. Proceedings of 21st Annual Offshore Technology Conference[C]. OTC 6057, 1989, 147 - 158.
- [5] 高福平, 顾小芸, 浦群. 水动力作用下管道稳定性的试验研究[J]. 海洋工程, 2001, 19(2): 61 - 65.
- [6] Gao F P, Gu X Y, Jeng D S, *et al.* An experimental study for wave-induced instability of pipelines: The breakout of pipelines[J]. Applied Ocean Research, 2002, 24(2): 83 - 90.
- [7] Gao F P, Gu X Y, Jeng D S. Physical modeling of untrenched submarine pipeline instability[J]. Ocean Engineering, 2003, 30(10): 1283 - 1304.
- [8] Sarpkaya T, Isaacson M. Mechanics of wave forces of offshore structures[M]. London: Van Nostrand Reinhold Company, 1981.