

海底管道与海床相互作用研究综述

付长静^{1,2}, 李国英¹, 赵天龙¹

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 随着海上油气田的快速发展, 目前我国已建海底管道超过 6 000 km。近年来, 管道事故时有发生, 管道工程的安全性和管道的稳定性问题得到越来越多研究学者的重视。鉴于海底管道与海床的相互作用是研究管道稳定性问题的关键, 从而阐述了海底管道在波浪作用下与海床间相互作用的试验研究现状, 包括机械加载式试验、水槽模型试验、离心模型试验等; 以及理论研究现状, 包括解析方法和数值方法等。最后对波浪作用下海底管道和海床相互作用尚待研究的问题进行了展望, 研究分析认为正确建立管道与海床本构模型等问题是未来研究海底管道稳定性的重要方向。

关键词: 波浪作用; 海底管道; 海床; 管-土相互作用; 管道稳定性

中图分类号: P756.2; TV139.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2014)06-0100-07

从 1973 年我国首次在山东黄海铺设 3 条 500 m 长的海底输油管道开始, 迄今海底管道的建设已有 40 多年的历史。近年来, 随着海上石油开采的不断升温, 我国海底管道铺设长度已超过 6 000 km。我国海底管道数量和种类繁多, 分布范围遍布各个海域, 地理条件、海况环境复杂多变, 其中有部分海底管道使用年限已经临近乃至超过原设计寿命, 运行状况不佳。2013 年 11 月 22 日青岛发生海底管道泄漏爆炸事故, 引发社会各界对海底管道安全问题的质疑, 为我国海洋建设敲响警钟, 海底管道的安全稳定问题再次成为研究的热点。通常在极端海况作用下, 波浪荷载等会引发海床土体变形, 造成管道的支撑条件发生改变, 使管道产生变形, 甚至发生事故, 管道事故不仅会造成大面积海域污染, 还会危及国家和人民的生命财产安全。由于管道的铺设也会造成海床的附加沉降, 因此在分析海底管道安全稳定性时, 应重点考虑波浪荷载作用下海底管道与海床的相互作用问题。

1 海底管道与海床相互作用试验研究

最初针对海底管道与海床相互作用问题的研究大多采用模型试验, 根据试验现象探究其机理, 在试验的结论上建立理论模型, 为此需深入了解波浪作用下海底管道与海床相互作用的相关模型试验研究现状。

1.1 机械加载式模型试验研究

20 世纪 70 年代初, C. G. Lyons^[1] 首先利用机械加载的方法, 研究了管道与砂土及黏土间的相互阻力作用, 认为采用库伦摩擦理论分析管道的侧向滑动方法适用于砂土中的管道, 不适合黏土中的管道, 且摩擦系数的大小与土体的性质有密切关系。至 20 世纪 80 年代, 各国学者针对波浪作用下海底管道与海床相互作用问题, 开展了大量的机械加载式室内模型试验, 其中最具有代表性的研究课题分别是 SINTEF(挪威皇家科学院)、NHL(挪威水力实验室)、DHI(丹麦水工所) 和 AGA(美国天然气协会) 等机构完成的 PIPESTAB Project^[2]、DHI Research Program^[3] 和 AGA Project^[4](见表 1)。

收稿日期: 2014-04-20

作者简介: 付长静(1987-), 女, 青海西宁人, 博士研究生, 主要从事岩土数值计算研究。

E-mail: nhri_fuchangjing@163.com

表1 管-土相互作用三大项目研究

Tab.1 Three researches on seabed soil pipeline interaction

研究项目	主要研究人员(年代)	管道状态	管道与土体相互作用关系
PIPESTAB Project	D. A. Wagner ^[5] (1987)	裸置管道	$F_H = F_F + F_R$; 其中: F_H 为土体总的侧向阻力, $F_F = \mu(W_S - F_L)$ 为摩擦力, F_R 为被动土压力, μ 为滑动摩擦系数, W_S 为管道水下重量, F_L 为管道所受升力。
DHI Research Program	A. C. Palmer 等 ^[3] (1988)	裸置管道	$(s/r)_{0.5} = 0.6 + 0.2r + 2z_0/D$; 其中: $s = S_h/\gamma'D^2$, $r = R_i/\gamma'D^2$, z_0 为初始沉降, S_h 为水平阻力, R_i 为管-土间垂向力。
AGA Project	D. W. Allen 等 ^[4] H. Brennodden 等 ^[6] (1989)	裸置管道	$F_{R,SOC}/F_{R,ST} = K_1(z_1/D)^{K_2} + 1$; 其中: $F_{R,SOC}$ 和 $F_{R,ST}$ 为振动作用和静力作用下的土体侧向阻力, K_1 为经验无量纲参数, z_1 为管道的沉降量, D 为管道外径, K_2 为经验系数。

管道建设初期,利用机械加载式试验研究的相关成果,可为管道的设计、施工和维护提供重要的理论依据,但这种试验方法仍存在一些不足:①试验人为设定了管道所受水平力及垂直力的大小和比值,不能准确反映管道的实际受力情况,且试验过程中完全忽略了波浪对海床的影响,对管道的失稳机理不清楚;②利用机械加载突然增加位移的试验方法与波浪的产生发展情况不相符,不能体现波浪的水动力效应。

1.2 水槽模型试验研究

针对机械加载式模型试验的不足,许多学者开始利用水槽模型试验研究管道和海床土体的相互作用,并取得了大量研究成果,主要研究内容包括:①管道水动力掩护效应研究;②液化土体中管道的力学行为研究;③波-管-土相互作用研究。

1.2.1 管道水动力掩护效应 裸置管道和部分埋置管道由于受波流的直接作用,影响管道的在位稳定性,在对裸置管道的研究中,主要进行管道的动水作用力分析计算,而部分裸置管道由于其部分面积暴露在外,其动水作用力较裸置管道有很大区别。文献[7]通过水槽试验,得出部分埋设管道的拖曳力系数、惯性系数和升力系数的大小与管道的暴露面积有关。文献[8]分别研究了在规则波和不规则波条件下部分埋置管道的水动力掩护效应。文献[4]对部分埋置管道进行了水槽试验,结果表明:部分埋置管道所受的侧向力比裸置的管道减小40%~60%,而升力系数变化较小。文献[9]同样证明管道所受拖曳力和惯性力大幅减小(减小27%~60%),升力极值也大幅减小(减小27%~60%)。上述研究中试验土样均采用砂样,对于黏性土中部分埋置管道的水动力掩护效应没有进行深入研究。文献[10]讨论了不同黏土、不同埋设情况下的管道在规则波或随机波作用下,其所受上浮力的大小。试验结果显示,埋入海床中的管道,所受上浮力将大幅度减小。上述研究成果均针对管道的受力情况,没有涉及其他响应问题,例如海床在波流作用下的变形对管道稳定性的影响问题。

1.2.2 液化土体中管道的力学行为 海床土体在极端海况条件下,受波浪的作用发生液化,而管道由于土体的破坏会产生变形甚至损坏,因此,为了判断管道在液化土体中的稳定性,需深入研究管道在液化土体中的性状,为此许多学者开展了相关模型试验研究,文献[11-12]利用水槽模型试验研究液化土体中管道的力学行为,认为管道的沉降或上升取决于累积孔压;在相同条件下,裸置管道的沉降量较埋置管道要大,土体对管道的拖曳系数取决于雷诺数。文献[13]通过水槽模型试验研究了在不同波浪形式和不同管重条件下,管道在液化土体中的力学行为,发现当管道的长度过长时,管道会在液化土中产生曲屈。上述研究成果对液化土体中管道的稳定性仅进行了定性分析,没有涉及管道的动力响应问题,例如管道的应力应变大小。同时海床土的性质对管道的稳定性有着重要的作用,现阶段大多研究砂土液化后管道的力学行为,很少涉及其他类型的土体在破坏后埋置管道的力学行为,以后有必要加强这方面的研究。

1.2.3 波-管-土相互作用 文献[14-15]利用U型水槽模拟在位管道的失稳过程,得到波-管-土相互作用的经验关系。该研究仅针对裸置管道,对于波浪-埋置管道-海床的相互作用机理仍不明确,且没有考虑

海床的消能作用,不是真正意义的耦合。文献[16]利用波浪水槽模型试验的结果,讨论管道存在对于海床孔压场、应力场和位移场的影响,主要围绕管道周围土体的响应问题进行研究,并没有开展波浪场和海床的耦合作用分析,忽略了波浪场在海床上的衰减,因此无法得出波浪-管道-海床的全耦合关系,且没有明确指出波-土-管相互作用的关系式。在以后的研究中应需进一步研究流场-管道、波浪-海床、海床-管道及流场-管道-土体全耦合效应。

1.3 离心机模型试验研究

由于试验设备的限制,水槽试验很难产生足以引起土体破坏或液化的波浪条件,而利用土工离心机试验技术却可以实现,但由于试验费用高,目前针对波浪作用下管道动力响应研究的离心试验较少。文献[17]以裸置管道为研究对象,开展了一系列离心模型试验,给出了管道所受土体侧向阻力的关系式,但模型中假定管道为刚体,无法确定管道的结构性状,如应力分布和变形等。文献[18]将离心试验结果与数值计算结果相比较,结果显示,管道的上浮力及土体的超孔隙水压力计算结果在土体发生液化前,与试验值吻合较好,但液化后却有较大差距。文献[19]针对管道所受上浮力以及管道在液化土体中的荷载位移关系,进行了一系列离心机试验,探讨了荷载周期的长短对管道的影响。此外,还指出计算管道所受上浮力的简化模型,其计算结果与离心试验结果相吻合。

2 海底管道与海床相互作用理论研究

在理论研究的初期,相关学者主要提出了一些求解裸置管道动水作用力和埋置管道渗流力的解析解,但实际海床分层情况和波浪荷载条件十分复杂,例如随机波浪作用及成层海床情况等,这些问题是无法利用解析方法解决的,因此在研究的中后期越来越多的学者采用数值解法。数值方法也是目前研究海底管道与海床间相互作用问题的最主要研究手段。

2.1 海底管道与海床相互作用解析计算

2.1.1 管道的水动力作用 对于管道水动力作用的研究主要针对裸置管道,这是由于裸置管道是直接暴露于海水之中的,主要受海流、波浪等环境荷载的影响,因此在分析裸置管道在位稳定性时,需要定量分析波流作用下管道的动水作用力。目前计算管道上所受的动水作用力仍然沿用 Morison 方程来计算,其基本假定是管道的存在不影响波浪的运动,即不考虑尾流效应的影响,这显然不符合实际情况,同时该方法对于管土接触的处理采用了简单的库伦摩擦理论,使得管道受力计算结果偏保守。由于 Morison 方程的假定不合理,一些学者对 Morison 方程进行了完善,文献[20]基于 PFMP 项目,考虑管道对波流的影响,提出尾流模型—Wake I 模型。随后文献[21-22]在 Wake I 模型的基础上发展了 Wake II 模型,该模型对影响尾流修正速度的几个参数进行了修正。Wake I 和 Wake II 模型虽然考虑了管道对波流的影响,但仅单纯地计算管道的受力,并没有考虑海床变形对管道的影响,也没有考虑管道在波流作用下产生横向位移的问题,对于复杂的海床条件及水动力条件,采用 Wake I 和 Wake II 模型仍显不足,在后续的研究中应加以改进。

2.1.2 管道的渗流力计算 针对海底管道所受的波浪渗流力,文献[23]提出无限深海床中作用在埋置管道上的波浪渗流力的解析解,文献[24]对同样的问题采用映像法求得解析解。文献[25]应用假想管法得出有限厚度海床中作用在埋置管道上的波浪渗流力解析解,认为作用在管道上的孔隙水压力取决于最大波浪荷载和管道埋置深度。以上研究均基于势流理论,忽略了孔隙水的压缩和土骨架的变形,将海床作为刚性体研究,这与实际海床情况存在较大差异,同时根据上述理论仅对管道所受渗流力进行计算,不包含管道的响应,无法得知管道的应力分布。以往对管道所受渗流力的研究中也多采用线性波浪理论,这是由于线性波浪理论较非线性波浪理论更容易求得解析解,且大量的研究结果表明对于深水区采用线性波浪理论的计算误差在允许范围内,但对于浅水区,用线性方程来描述管道的渗流力常引起较大的误差,因此需要考虑波浪的非线性。文献[26]根据椭圆余弦波理论,推导得到了浅水区非线性波浪作用下埋置管道上的渗流压力解析解,但对于管道周围其他的响应问题没有进行讨论。

2.2 海底管道与海床相互作用数值计算

近年来国内外学者大都利用数值方法对海底管道与海床的相互作用问题进行了大量计算研究。数值方法多采用有限元法、有限差分法及边界元法等。

文献[27]采用有限单元法和有限差分法,计算刚性可渗海床内管道所受的波浪力;文献[28]针对非均质海床,采用边界元法计算埋置管道所受的波浪力。上述研究多针对埋置管道,建立的模型忽略了孔隙水或土体的可压缩性,对海床土体的相关假设与实际海床情况相差较大,并且将管道作为刚性体进行考虑,没有涉及其他响应问题。

针对以往模型的不足之处,许多研究者在后续的数值计算中,考虑了孔隙流体和土体骨架的耦合作用,引入 Biot 理论,使结果更为合理。文献[29-31]讨论土体参数及波浪条件的影响,得到不同饱和度海床中埋置管道升力的数值解,并提出上浮力扰动比。上述研究均假定管道为刚体,且仅考虑了由波浪引起的管道周围的超静孔压分布及升力,没有讨论管道周围土体的位移和有效应力的响应问题,也没有考虑土的性质对管道的影响。为此,文献[32-35]采用有限元及有限差分法,系统地分析了波浪作用下,各向同性及各向异性、均质及非均质土体中埋置管道周围土体的孔压分布、土体的位移及有效应力分布,分析了土体特性参数及管道几何参数对管道的影响,但由于土体还是采用弹性模型,因此只能讨论管道在波浪作用下的瞬态响应。

随着研究的深入,许多学者在前人研究基础上,开始关注非线性及随机波浪荷载对管道的作用,考虑管土间的接触效应、土体的弹塑性以及孔压的累积等因素,使得模拟结果更加真实可信。文献[37]研究非线性波浪荷载作用下埋置管道周围超静孔隙水压力分布,但只讨论了几种推进波,得到的计算结果不全面。文献[37-38]在线性和非线性波浪条件下,考虑了管、土的接触效应、管道的柔性及土体和管道的加速度对海床土的惯性影响,采用有限元方法建立管-土相互作用的计算模型,讨论了管道几何尺寸及土体特性参数对管道周围海床孔隙水压力及管道内应力的影响。文献[39]考虑了管、土间的接触效应,采用有限元方法,计算分析了随机波浪作用下埕岛油田海底埋置管道及其周围土体的动力响应问题。上述研究均忽略了波浪传播过程中波浪场的衰减,在今后的研究中有必要考虑波浪场和海床土体的耦合作用,并且管-土间采用了简单的摩擦理论,降低了计算精度。随着计算机技术的发展,越来越多的学者开始利用大型商业软件进行管-土的相互作用研究,文献[40-41]考虑管、土的接触效应,利用 ABAQUS 软件,分析了裸置管道与弹塑性海床相互作用,讨论了管重和环境荷载对管道沉降及其稳定性的影响,但没有涉及海床的动力响应问题。文献[42]也利用 ABAQUS 软件,同时考虑管、土的接触效应,模拟了近海埋置管道与海床之间的相互作用,分别计算了管道在自重及简谐波荷载作用下管道的受力与变形,研究没有考虑管道的加速度对海床的影响,并且在近海地区,波浪的非线性作用明显,利用线性波浪荷载计算有较大误差,同时海床的本构模型采用塑性模型,这与实际情况不符。文献[43]考虑了浅水区非线性波对管道的影响,利用有限元分析了管道在波浪作用下的稳定性。文献[44]考虑了平行管情况下,利用数值方法计算管道所受的波浪力,对管道不同情况下受力的研究越来越细,文献[45]利用 ADINA 软件,建立海底输气管道的有限元模型,考虑海啸对管道的影响,分析了深水区及浅水区管道的稳定性,认为深水区域海啸不会对管道造成破坏性的影响,而浅水区的管道会造成破坏,应及时加固,研究仅对管道进行受力分析,没有考虑海床土的变形或破坏对管道的影响。

3 结 语

海底管道与海床相互作用研究主要包括以下几个方向:①波流作用下管-土间侧向阻力的研究;②波流作用下裸置管道的水动力作用研究;③波浪作用下埋置管道的渗流力、波浪力计算;④波浪作用下液化土体中管道的力学行为研究。

对于海底管道与海床的相互作用问题,由于需要综合考虑海床土体的特性、复杂的外界环境、管道的几何形状,很难完全真实地模拟管道和海床的相互作用。最初各国学者进行了大量的试验研究,虽也进行相关理论研究,但大多建立在试验研究的基础上,随着研究的深入,建立了大量的理论模型,但模型引入了不同的假设,造成问题分析的不够全面。因此,还需要进一步深入研究:

(1)海底管道弹塑性本构模型的建立。在进行管-土相互作用的理论研究中,最初由于假定管道是刚性材料,不能了解管道的变形、运动情况以及管道的应力、应变分布,慢慢发展为假设管道为线弹性材料。在以后的研究中应针对管道发生不可恢复的变形情况,建立合适的弹塑性本构模型模拟管道的变形性状。

(2)不同波浪荷载对海床和管道的作用。近几年研究已逐步考虑非线性波和随机波的影响,但对破碎波和畸形波的作用研究较少,由于海洋环境的复杂性,不同性质的波对海床和管道会造成不同的影响,在以后的研究中应根据实际情况,考虑不同波浪荷载对管道和海床的影响。

(3)浅水区管道与海床的相互作用研究。目前对管-土的相互作用研究,大多考虑线性波浪荷载的影响,近几年才逐步考虑非线性波和随机波的影响,且波浪的非线性影响大多考虑深水波,对孤立波和椭圆余弦波研究较少,由于浅水区波浪的非线性影响显著,应关注浅水区海底管道与海床的相互作用,建立基于孤立波或椭圆余弦波理论的管-土相互作用模型,系统全面地研究浅水区海底管道等海洋构筑物受非线性波的影响,为实际工程的管道设计提供有力的依据,同时指出海床在浅水非线性波情况下发生液化的条件,为管道的安全稳定运行提供技术参考。

参 考 文 献:

- [1] LYONS C G. Soil resistance to lateral sliding of marine pipelines [C] // Proceedings of 5th Annual Offshore Technology Conference. 1973: 479-484.
- [2] WOLFRAM JR W R, GETZ J R, VERLEY R L P. PIPESTAB Project: Improved design basis for submarine pipeline stability [C] // Proceedings of Nineteenth Annual Offshore Technology Conference, 1987.
- [3] PALMER A C, STEENFELT J S, STEENSEN-BACH J O, et al. Lateral resistance of marine pipelines on sand [C] // Proceedings of 20th Annual Offshore Technology Conference, 1988.
- [4] ALLEN D W, LAMMERT W F, HALE J R, et al. Submarine pipeline on-bottom stability: Recent AGA research [C] // Proceedings of 21st Annual Offshore Technology Conference, 1989.
- [5] WAGNER D A, MURFF J D, BRENNODDEN H A, et al. Pipe-soil interaction model [C] // Proceedings of Nineteenth Annual Offshore Technology Conference, 1987: 181-190.
- [6] BRENNODDEN H, LIENG J T, SOTBERG T, et al. An energy-based pipe-soil interaction model [C] // Proceedings of 21st Annual Offshore Technology Conference, 1989: 147-158.
- [7] ISMAIL N M, WALLACE N R, NIELSEN R. Wave force on partially buried submarine pipelines [C] // Proceedings of Eighteenth Annual Offshore Technology Conference, 1986.
- [8] JACOBSEN V. OTC5851 Forces on sheltered pipelines [C] // Proceedings of the 20th Offshore Technology Conference, 1988.
- [9] 张日向, 马良. 海底沟槽内管道在波流作用下水动力效应的实验研究 [J]. 中国海上油气: 工程, 2000, 12(4): 23-27. (ZHANG Ri-xiang, MA Liang. Experimental study of hydrodynamic effects of submarine groove pipelines under the action of waves and current [J]. China Offshore Oil and Gas (Engineering), 2000, 12(4): 23-27. (in Chinese))
- [10] VIJAYA KURNAR A, NEELAMANI S, NARASIMHA RAO S. Wave pressures and up forces and scour around submarine pipeline in clayey soil [J]. Ocean Engineering, 2003, 30(2): 271-295.
- [11] SUMER B M, FREDSE J, CHRISTENSEN S, et al. Sinking/floatation of pipelines and other objects in liquefied soil under waves [J]. Coastal Engineering, 1999, 38(2): 53-90.
- [12] SUMER B M, FREDSE J. Self-burial of pipelines at span shoulders [C] // Proceedings of the 3rd International Offshore and Polar Engineering Conference, 1993: 74-81.
- [13] TEH T C, PALMER A C, DAMGAARD J S. Experimental study of marine pipelines on unstable and liquefied seabed [J]. Coastal Engineering, 2003, 50(1/2): 1-17.
- [14] 高福平. 波浪作用下海底管道稳定性的试验研究 [D]. 北京: 中国科学院, 2001. (GAO Fu-ping. Experimental study on submarine pipeline stability under wave loading [D]. Beijing: China Academy of Science, 2001. (in Chinese))
- [15] 高福平, 顾小芸, 浦群. 海底管道失稳过程的模型试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2000, 22(3): 304-308. (GAO Fu-ping, GU Xiao-yun, PU Qun. Experimental research on the instability process of submarine pipelines [J]. Chinese Journal of

- Geotechnical Engineering, 2000, 22(3): 304-308. (in Chinese))
- [16] 潘冬子. 波浪荷载作用下海床及管线的动力响应研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007. (PAN Dong-zi. Dynamic response of seabed and pipeline due to wave loading[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007. (in Chinese))
- [17] ZHANG J, RANDOLPH M F, STEWART D P, et al. An elastic-plastic model for pipe-soil interaction of unburied pipelines [C]//Proceedings of 9th International Offshore and Polar Engineering Conference, 1999: 185-192.
- [18] SUN Li-xun. Centrifuge modeling and finite element analysis of pipeline buried in liquefiable soil[D]. New York: Columbia University, 2001.
- [19] BRANSBY M F, NEWSON T A, BRUNNING P. Centrifuge modelling of the upheaval capacity of pipelines in liquefied clay [C] //Proceedings of The Twelfth (2002) International Offshore and Polar Engineering Conference, Kitakyushu, Japan, May 26-31, 2002.
- [20] LAMBRAKOS K F, CHAO J C, BECKMANN H, et al. A wake model of hydrodynamic forces on pipelines [J]. Ocean Engineering, 1987, 14(2): 117-136.
- [21] SOEDIGDO I R, LAMBRAKOS K F, EDGE B L. Prediction of hydrodynamic forces on submarine pipelines using an improved wake II model [J]. Ocean Engineering, 1999, 26(5): 431-462.
- [22] SOEDIGDO I R. A wake II model for hydrodynamic forces on marine pipelines [D]. Texas: Texas A & M University, 1997.
- [23] MACPHERSON H. Wave forces on pipeline buried in permeable seabed [J]. Journal of Waterways Port, Coastal and Ocean Devison, 1978, 104(4): 407-419.
- [24] MCDUGAL W G, DAVIDSON S H, MONKMEYER P L, et al. Wave-induced forces on buried pipelines [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 1979, 114(2): 220-236.
- [25] SPIEREBURG S E J. Wave-induced pore pressure around submarine pipelines [J]. Coastal Engineering, 1986, 10(1): 33-48.
- [26] 孙昭晨, 邱大洪. 浅水区海底埋设管线上非线性波浪力 [J]. 大连理工大学学报, 2000(增1): 95-98. (SUN Zhao-chen, QIU Da-hong. Nonlinear wave force on a buried pipeline in shallow water [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2000 (Suppl1): 95-98. (in Chinese))
- [27] LAI N W, DOMINGUEZ R F, DUNLAP W A. Numerical solution for determining wave-induced pressure distribution around buried pipelines [R]. Texas: Texas A & M University, 1974.
- [28] LIU P L F, O'DONNELL T P. Wave-induced forces on buried pipelines in permeable seabed [C] //Proceedings of the Civil Engineering in the Oceans IV Conference, 1979: 111-121.
- [29] MAGDA W. Wave-induced cyclic pore-pressure perturbation effects in hydrodynamic uplift force acting on submarine pipeline buried in seabed sediments [J]. Coastal Engineering, 2000, 39(2): 243-272.
- [30] MAGDA W. Wave-induced uplift force acting on a submarine buried pipeline in a compressible seabed [J]. Ocean Engineering, 1997, 24(6): 551-576.
- [31] MAGDA W. Wave-induced uplift force acting on a submarine buried pipeline: Finite element formulation and verification of computations [J]. Computers and Geotechnics, 1996, 19(1): 47-73.
- [32] JENG D S. Numerical modeling for wave-seabed-pipe interaction in a non-homogeneous porous seabed [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2001, 21(8): 699-712.
- [33] JENG D S, LIN Y S. Response of inhomogeneous seabed around buried pipeline under ocean waves [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2000, 126(4): 321-332.
- [34] JENG D S, CHENG L. Wave-induced seabed instability around a buffed pipeline in a pro-elastic seabed [J]. Ocean Engineering, 2000, 27: 127-146.
- [35] JENG D S. Numerical modeling of wave-seabed-buried pipe interaction in an anisotropic seabed [C] //Proceedings of ETCE/ OMAE2000 Joint Conference Energy for the New Milleniu, New Orleans, Louisiana, USA, 2000: 1-7.
- [36] GAO F P, JENG D S, SEKIGUCHI H. Numerical study on the interaction between non-linear wave, buried pipeline and non-homogenous porous seabed [J]. Computers and Geotechnics, 2003, 30(6): 535-547.
- [37] 栾茂田, 曲鹏, 杨庆, 等. 波浪引起的海底管线周围海床动力响应分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008(4): 789-795. (LUAN Mao-tian, QU Peng, YANG Qing, et al. Wave-induced dynamic response of seabed around submarine pipeline [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008(4): 789-795. (in Chinese))

- [38] 栾茂田, 曲鹏, 杨庆, 等. 非线性波浪作用下海底管线-海床动力响应分析[J]. 岩土力学, 2007(增1): 709-714. (LUAN Mao-tian, QU Peng, YANG Qing, et al. Nonlinear wave-induced transient response of pipeline-seabed interaction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007(Suppl1): 709-714. (in Chinese))
- [39] 远航, 贾永刚, 刘涛. 随机波浪作用下黄河口海床与管线相互作用数值模拟[C]//2010年城市地质环境与可持续发展, 上海, 2010:674-679. (YUAN Hang, JIA Yong-gang, LIU Tao. Numerical study on seabed soil/pipeline interaction under random wave loading in Yellow River estuary [C]. 2010 Forum on Urban Geoenvironment & Sustainable Development, Shanghai, 2010: 674-679. (in Chinese))
- [40] 任艳荣, 刘玉标, 顾小芸. 弹塑性海床上的管土相互作用分析[J]. 工程力学, 2004(2): 84-87. (REN Yan-rong, LIU Yu-biao, GU Xiao-yun. Analysis of pipe/soil interaction on elastic-plastic seabed[J]. Engineering Mechanics, 2004(2): 84-87. (in Chinese))
- [41] 任艳荣, 刘玉标. 弹塑性海床上的海底管道沉降特性分析[J]. 中国海洋平台, 2010(3): 17-20. (REN Yan-rong, LIU Yu-biao. Dynamic reliability analysis of human exposure to ice-induced vibration on offshore platforms [J]. China Offshore Platform, 2010(3): 17-20. (in Chinese))
- [42] 白玉川, 杨细根, 冀自青, 等. 波浪条件下海底管线与沙质海床间的相互作用[J]. 天津大学学报, 2011, 44(1): 64-68. (BAI YU-chuan, YANG Xi-gen, JI Zi-qing, et al. Interaction between submarine pipelines and sand seabed under the effect of wave[J]. Journal of Tianjin University. 2011, 44(1): 64-68. (in Chinese))
- [43] MAHMOOD H, MEHRZAD T R. A study of the effects of surface transverse waves on buried steel pipelines considering the nonlinear behavior of soil and pipes[C]//Proceedings of the ASCE Pipeline Conference, Keystone, Colorado, 2010: 1078-1087.
- [44] CHENG X F, WANG Y X, WANG G Y. Hydrodynamic forces on a large pipeline and a small pipeline in piggyback configuration under wave action[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 2012, 138(5): 394-405.
- [45] 余非, 王志国, 张钊. 海底输气管道海啸荷载作用分析[J]. 科学技术与工程, 2013(26): 7819-7825. (YU Fei, WANG Zhi-guo, ZHANG Zhao. Analysis of submarine pipeline under tsunami loading[J]. Science Technology and Engineering, 2013(26): 7819-7825. (in Chinese))

On interaction between submarine pipelines and seabed under action of waves

FU Chang-jing^{1,2}, LI Guo-ying¹, ZHAO Tian-long¹

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: With the rapid development of offshore oil and gas fields, the length of submarine pipelines in China is over 6 000 km. In recent years, the stability and security of the submarine pipeline works have been attracting more and more attention of experts and scholars because the accidents take place frequently. The interaction between the submarine pipelines and seabed is the main part in pipeline stability research. On the basis of literature reading, the current status of the experimental research on the interaction between the seabed and the submarine pipelines has been analyzed, including the types of mechanical loading tests, flume model tests, and centrifuge model tests, as well as the status of theoretical studies, including analysis methods and numerical methods. Finally, the problems concerning the interaction between the submarine pipeline and seabed that need to be further studied are expounded. The analysis results show that the establishment of a constitutive model is an important approach to the study of the interaction among wave, seabed, and pipelines and the stability of the pipelines in the future.

Key words: wave action; subsea pipeline; seabed; interaction of pipe and soil; pipeline stability