

基于 FLUENT 的海底结构冲刷启动评估法 在印尼海底管道工程中的应用

周子鹏, 钟文军, 周美珍, 孙国民, 王乐芹, 胡春红

(海洋石油工程股份有限公司, 天津 300451)

摘要 针对由于海底管道支撑结构底部被冲刷掏空而导致的海底管道失效等问题,研究了海底结构物冲刷原理,以冲刷理论分析为基础获得了海床冲刷启动流速。采用 FLUENT 有限元软件建立海管支撑结构及周围海域的二维紊流模型,真实地模拟了海床上增加支撑结构后的海流变化趋势,获得了增加海底结构物后的海床表面流速,通过与海床冲刷启动流速比来评估冲刷情况。该评估法在印尼爪哇海域海底管道工程成功应用,是一种实用可靠的冲刷启动评估方法,对国内外海域海底结构的冲刷启动评估工作有借鉴意义。

关键词 海底管道; FLUENT 软件; 海底支撑结构; 冲刷启动; 冲刷评估; 数值模拟

中图分类号 P742 **文献标志码** A **文章编号**: 2095-7297(2015)01-0045-05

Application of Subsea Structure Scouring Incipient Assessment Based on FLUENT in Indonesia Subsea Pipeline Project

ZHOU Zi-peng, ZHONG Wen-jun, ZHOU Mei-zhen, SUN Guo-min,
WANG Le-qin, HU Chun-hong

(Offshore Oil Engineering Co., Ltd., Tianjin 300451, China)

Abstract Many subsea pipelines have been failed during their service period caused by scouring of pipeline support structure. When a submarine pipeline or submarine structure is laid on a sediment bed, and is subject to a current, the pressure difference between the upstream and the downstream of the pipeline or the structure may induce a scour underneath the pipe and submarine structure. According to this problem, the subsea pipeline support structure scouring assessment is studied to forecast the scouring occurrence. Firstly, the sediment incipient velocity is calculated based on scouring theoretical analysis, and then a two-dimensional geometry model is built in FLUENT software, and the actual seabed current velocity is obtained based on numerical simulation by FLUENT software. Through the comparison between these two velocities, the scouring occurrence could be assessed. This method is validated in Indonesia subsea pipeline project.

Key words subsea pipeline; FLUENT software; subsea support structure; scouring incipience; scouring assessment; numerical simulation

0 引言

海底管道是海上油田生产系统中的一个重要组成部分。维护海底管道的安全是保证安全生产和保护海洋环境的重要环节。近年来,海底管道建设数量急剧增加,海底管道相互交叉跨越逐渐常态化,因此支撑结构成为了海底管道跨越工程设计的必要组成部分。但由于海底支撑结构的存在,改变了海底

临界区域的波流状况,可能造成支撑结构底部发生冲刷或者局部土壤掏空等问题,从而导致支撑失稳侧倾或下沉,引起海底管道突发性破坏,造成重大的经济损失和环境破坏^[1-3]。如果能够评估支撑结构附近是否发生冲刷,将对海底管线的建设和海管支撑结构的防护有相当大的工程经济价值和学术意义。

基于海底结构物冲刷评估研究现状,本文结合

收稿日期:2015-01-15

作者简介:周子鹏(1983—),男,硕士,工程师,主要从事海底管道工程设计方面的研究。

实际工程项目,采用理论分析与有限元数值模拟对比法,对海底结构物冲刷风险进行了评估。首先采用理论分析法对海底冲刷启动流速进行计算分析,然后使用 FLUENT 有限元软件在二维空间内研究了放置于海床上的海底结构物附近的海底流场,并与理论分析结果相对比,从而判定冲刷是否启动。该冲刷启动评估方法的应用,成功解决了海底支撑结构的冲刷预测难题,可为工程方案的确定和实施提供技术依据。

1 海底结构冲刷启动评估技术

海底冲刷现象是由于波浪和水流作用造成的海底结构物底部及其附近海床的泥沙运动。根据海洋冲刷动力学原理分析,海底冲刷的形成,主要是由于结构物安装在海底之后,打破了原有水下流场的平衡,引起局部水流速度加快,使正常流动的水流形成一定的压力梯度并构成对海底的剪切力,导致海床表面的沉积物被带走。因此,海底结构物周边的海底流速是决定冲刷启动与否的关键要素。

马良等^[1,4]总结了无粘性土不冲刷允许流速,一旦超过相应流速,海床成为动床,置于海床表面的结构物底部可能由于海床冲刷而掏空。因此,本文将使用支撑结构物周边的海底流速作为冲刷启动的判据,首先对支撑结构物周围的流速进行理论计算分析,获得海床的启动流速。然后使用 FLUENT 二维有限元软件进行海管支撑结构的数值模拟并通过模拟分析获得结构物周围的流速,最后将二者进行比较,从而判断支撑结构物周围是否将发生冲刷,对整体的情况进行评估。

1.1 冲刷启动流速理论

Bai 等^[4]依据扩展的 Shields 曲线建立了冲刷启动流速计算模型。在二维支撑结构物底部的二维启动流速计算方程为

$$u_c = 5.75 \sqrt{\frac{\tau_c}{\rho_w}} \lg \left(\frac{h_c}{2.38 \times 11.6 \nu_w} \cdot \sqrt{\frac{\tau_c}{\rho_w}} \right), \quad (1)$$

式中: u_c 为启动流速, m/s; h_c 为海流距海床高度, m; τ_c 为泥沙起动拖曳力, N; ρ_w 为海水密度, kg/m³; ν_w 为海流粘性系数, cm²/s。

泥沙起动拖曳力^[5]可以通过下式获得:

$$\tau_c = 1000 \times 0.062 \times 10^{8\Delta\epsilon} (\gamma_s - \gamma_w) d_{50}, \quad (2)$$

式中: γ_s 为海床土壤特征比重; γ_w 为海水特征比重; $\Delta\epsilon$ 为海床土壤孔隙度, 表达式为

$$\Delta\epsilon = 0.245 - 0.222 \lg d_{50} - \frac{e_0}{1+e_0}, \quad (3)$$

式中: e_0 为海床土壤空隙比; d_{50} 为海床土壤中粒径, mm。

1.2 FLUENT 软件的有限元模型原理

FLUENT 软件是目前市场上最流行的计算流体动力学软件。可以选择稳态计算器和非稳态计算器求解。非稳态计算器可以用于分析包含时间轴的动态模拟计算, 稳态计算器可用于计算稳态的流速或者是基于时间统计的平均流速。

在数值模拟中, 选用 FLUENT 中的 $k-\epsilon$ 紊流模型来模拟海底支撑结构周围的冲刷情况。 $k-\epsilon$ 紊流模型被广泛用于模拟分析天然气和液体等流体。为了更好地模拟海底冲刷状况, 模型建立时需要使用一些经验参数, 如动涡流黏滞度等^[6]。

在紊流模型中, 动涡流黏滞度可以使用下式计算获得:

$$\mu_t = c_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon}, \quad (4)$$

式中: k 为紊流动能; ϵ 为紊流动能折减值; c_μ 为标准 $k-\epsilon$ 紊流模型系数。

紊流动能可以通过下式计算获得:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \nabla \cdot (vk) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \cdot \nabla k \right) + G_k - \rho \epsilon, \quad (5)$$

$$\rho \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \rho \nabla \cdot (v\epsilon) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \cdot \nabla \epsilon \right) + c_1 G_k \frac{\epsilon}{k} - \rho c_2 \frac{\epsilon^2}{k}, \quad (6)$$

式中: G_k 是名义流速梯度引起的紊流动能增量, 可以通过 Boussinesq 近似法得出^[7]。

2 冲刷启动评估法在印尼海底管道工程项目中的应用

A 海管是印尼爪哇海域海上气田开发工程的核心海底管道, 该气田初步处理后的天然气通过 A 海底管道输送至陆地终端。在 A 海管设计建设过程中, 需要跨越另一条已存在的海底管道。在海管跨越工程方案中采用了 6 个混凝土支撑和 2 个水泥垫块对 A 海管进行支撑, 所有支撑结构采用对称布置方式安放在已建管道两边。图 1 为海底管道跨越支撑方案布置图。

混凝土支撑采用底板加垂向支撑形式, 主要是考虑底板可以增加支撑与海床的接触面积, 从而达

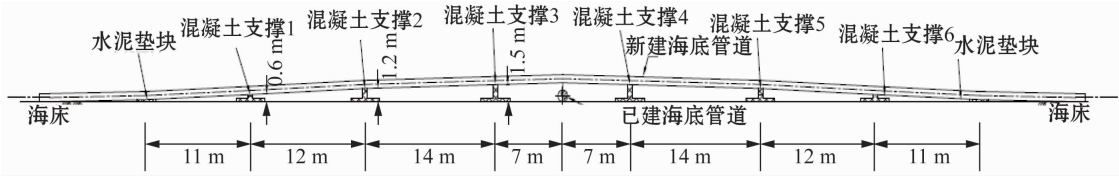


图 1 海底管道跨越支撑方案布置图

Fig. 1 Schematic of subsea pipeline crossing support scheme

到增强支撑稳定性和减少海床面紊流的效果。图 2 为混凝土支撑三维典型图。表 1 为海底管道支撑结构的详细尺寸。

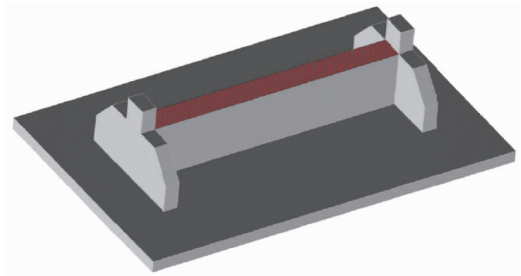


图 2 混凝土支撑三维典型图

Fig. 2 Typical three-dimensional graph of the concrete support

表 1 海底管道支撑结构详细尺寸

Table 1 Dimensions of subsea pipeline crossing support

海底管道 支撑结构	支撑结构 底板尺寸	支撑结构 高度
混凝土支撑(3 和 4)	3×14	1.5
混凝土支撑(2 和 5)	3×9	1.2
混凝土支撑(1 和 6)	3×6	0.6
水泥垫块	5.2×2.05	0.18

2.1 冲刷启动流速理论计算

通过对印尼爪哇海域的工程地质调查,可以获得海床地质详细数据(见表 2)。地质资料表明,印尼爪哇海域土壤较为松软,需要对海底结构周边是否会发生冲刷进行评估以保证工程方案的可行性、可靠性和经济性。

根据 1.1 节的冲刷启动流速理论,计算获得该海域海底冲刷启动流速为 1.26 m/s,即放置海管支撑后的海底海流速度一旦超过 1.26 m/s,冲刷将会发生。

表 2 海床地质详细数据

Table 2 Geotechnical data of crossing point

海床地质信息	参数值
水深/m	30
中粒径值/mm	0.001
海床土壤空隙比	4.23
海流粘性系数/(cm ² ·s ⁻¹)	0.01
海床土壤特征比重	2.39
海水密度/(g·cm ⁻³)	1.033

2.2 FLUENT 软件有限元数值模拟分析

依据工程方案中的海管支撑布置和支撑尺寸,使用 FLUENT 软件来进行二维有限元数值模拟分析。为了更好地分辨海底管道支撑附近的流场,采用了非均分网格划分形式。整个海管跨越支撑周围海域的计算网格如图 3 所示。

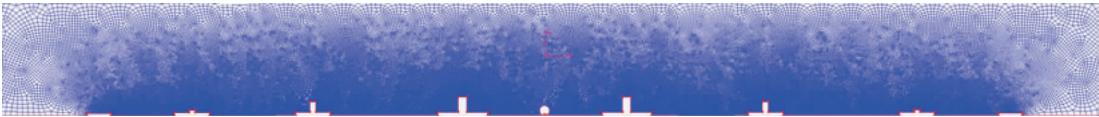


图 3 海管跨越支撑周围海域网格示意图

Fig. 3 Meshing of the sea area surrounding subsea pipeline crossing support

将在 Gambit 中画好的海管跨越支撑海域网格导入 FLUENT 软件中,选择二维 $k-\epsilon$ 紊流模型非稳

态求解器来模拟海底支撑结构周围的冲刷情况。模型主要参数设置见表 3。

表 3 FLUENT 模型主要参数设置

Table 3 Main parameters in the FLUENT model

模型 定义	左边界 类型	右边界 类型	顶界面 类型	其他边界 类型	材料 定义	重力 定义
$k-\epsilon$	Velocity inlet	Outflow	Symmetry	Wall	Water-liquid	Gravitational acceleration

通过有限元计算模拟,获得了海管支撑附近海流状态的二维海流分布图,如图 4 所示。从图 4 可以看出,海管支墩放置在海床上之后,海床表面一定

高度范围内的海流速度出现了增加,支撑高度越高,其周围海流速度越大。随着支撑高度的降低,左右两边最矮的海管支撑周围海流速度逐渐减小。

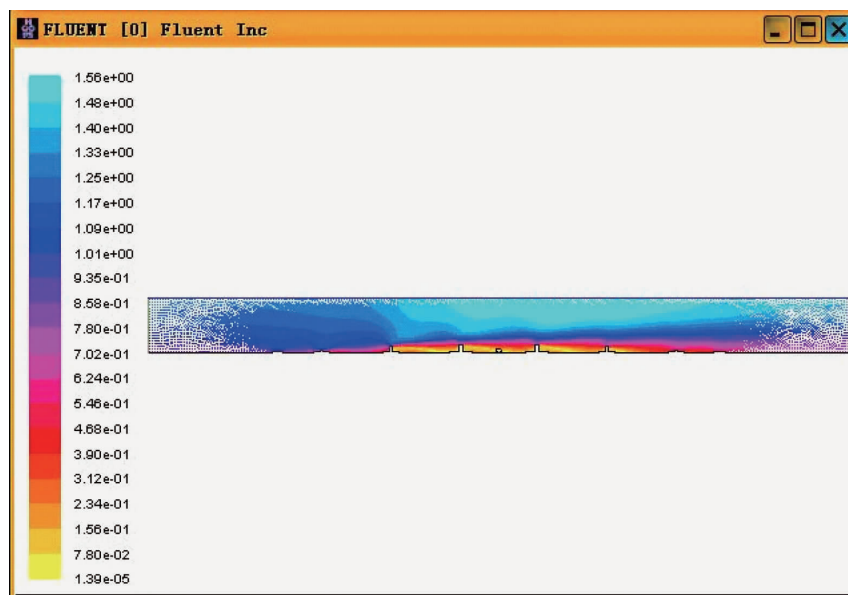


图 4 海管支撑周围海域二维海流速度分布图

Fig. 4 Two-dimensional distribution of current velocity of the sea area surrounding subsea pipeline crossing support

为了更直观地观察海管支撑周围海域海床表面的流速,在 FLUENT 软件中生成了距离海床高度为 0.1 m、0.15 m 和 0.2 m 处的最大流速,可以得出距离海床高度为 0.2 m 以下的海底最大海流流速为 0.852 m/s。详细的流速情况如图 5 所示。

2.3 海底支撑结构冲刷启动评估结果

基于前面的理论计算和数值模拟,分别获得了该项目海域海底冲刷启动流速(1.26 m/s)和放置海管支撑后的海底最大海流速度(0.852 m/s)。通过比较可知,该跨越支撑放置于海底后不会引起底部冲刷。目前该工程方案已获得挪威船级社(新加坡)的认证,是可行可靠的工程方案。

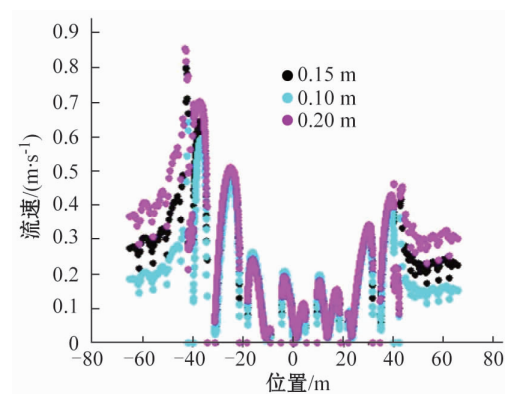


图 5 距离海床高度为 0.1 m、0.15 m 和 0.2 m 处的最大流速图

Fig. 5 Maximum current velocities at the heights from the seabed of 0.1 m, 0.15 m, and 0.2 m

3 结 语

海床冲刷是海底管道支撑结构失效中最为复杂也最为常见的方式。对海床冲刷发生与否进行合理的评估可以为工程开发和施工提进行风险预警,保证海底管道运行期内的安全稳定。本文提出的“理论计算结合二维有限元数值模拟”海底流速比对评估法,首先采用国际先进且相对较为保守的理论计算分析获得冲刷启动流速,然后再利用有限元数值模拟法较为准确地还原了海底流场的运行状态并获得了实际海底流速,同时具备了理论分析的保守性和数值模拟的真实性。在印尼海底管道工程项目中的应用效果表明,该方法解决了海底支撑结构的冲刷启动预测难题,而且简单实用、结果可靠,对具有类似工程方案或海底地质条件的海上油气田开发项目具有一定的借鉴意义。目前阶段,结合印尼本地海域工程开发经验,该冲刷启动评估法采用二维有限元数值模拟已能够满足工程开发需求。在未来的

工程或者科研项目中,可以尝试使用三维有限元数值模拟来进一步完善本方法。同时需要注意的是三维有限元数值模拟工作量较大,也将需要更多的资源和基础数据用于完善模拟分析。

参 考 文 献

- [1] 马良. 海底油气管道工程[M]. 北京:海洋出版社,1987.
- [2] 吴钰骅,金伟良,毛根海,等. 海底输油管道底砂床冲刷机理研究[J]. 海洋工程,2006, 24(4):43.
- [3] 孙宁松,孙永福,宋玉鹏. 海洋平台桩基冲刷及影响因素分析[J]. 海岸工程,2004, 23(4):38.
- [4] Bai Y, Ng C, Shen H, et al. Rheological properties and incipient motion of cohesive sediment in the Haihe Estuary of China[J]. China Ocean Engineering, 2002, 16(4):483-498
- [5] 钱宁,万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京:科学出版社,2003.
- [6] 孙建伟,耿红,孙昭晨. 海底管道周围局部冲刷数值模拟分析[J]. 海洋技术,2010, 29(1):51.
- [7] 黄莹,余昌莲,严仁军. 海洋平台桩基的冲刷机理[J]. 船海工程,2006 (5):85.

• 编辑部声明 •

关于作者投稿的声明

近日有作者反映,某些不法机构和个人假借《海洋工程装备与技术》的名义,以代征稿或接收投稿为幌子,欺诈投稿人,严重影响了我刊的声誉,严重侵害了广大作者的权益。对此,本刊编辑部严正声明:

一、《海洋工程装备与技术》是由上海交通大学出版社主办、上海交通大学主管的专业学术期刊,实行严格的审稿程序。

二、《海洋工程装备与技术》编辑部设立在上海交通大学出版社(上海市番禺路951号)。与此地址不符的“《海洋工程装备与技术》采编中心”之类机构均属假冒。

三、《海洋工程装备与技术》目前唯一使用的在线投稿系统网址为 <http://hyzb.cbpt.cnki.net>。与此网址不符的投稿系统均与本刊无关。

四、《海洋工程装备与技术》接收电子邮件投稿的信箱为 oeet-sjtu@outlook.com 和 journalsjtup@hotmail.com。要求投递到其他信箱的“征稿”均与本刊无关。

《海洋工程装备与技术》编辑部的联系电话为 021-61675249,61675260,60823078。

望广大作者提高警惕,谨防上当受骗。如发现类似情况请及时与编辑部联系,以便维护我们共同的利益。

《海洋工程装备与技术》编辑部
2015年2月25日