



海底埋管的上浮风险

陈汉宝, 张亚敬

(交通运输部天津水运工程科学研究所, 天津 300456)

摘要: 海底输油输气、离岸深水排污和滨海电厂取排水等都经常建设海底管道, 波浪、潮流等水动力引起的海床变形和稳定性是海底管道工程设计中必须考虑的关键问题之一。大直径管道的综合密度往往小于天然淤泥的密度, 管道埋设采用原土覆盖回填时可能发生上浮。在波浪作用下, 覆盖层发生沙土液化, 管道也可能浮出床面, 发生事故。通过分析回填土的密度变化规律和范围, 以及波浪作用下的沙土液化规律, 分析特定工程海上埋管的上浮风险。

关键词: 管道; 上浮; 波浪; 液化

中图分类号: U 172

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)09-0023-05

Floating risk of submarine pipeline

CHEN Han-bao, ZHANG Ya-jing

(Tianjin Research Institute of Water Transport Engineering, Tianjin 300456, China)

Abstract: Submarine pipelines are often constructed for the submarine oil & gas transport, offshore deepwater blowdown and the water intake and outlet of coastal power plant, etc. The deformation and destabilization of seabed induced by the wave, tide and other hydrodynamic factors is one of the key problems in the design of submarine pipelines. The integrated density of large-diameter pipes is often less than the natural silt density, and the pipes buried by the original silt may occur floating. Under the action of the wave, liquefaction of the overburden soil and floating of pipelines may occur, which lead to accidents. By studying the changing law and scope of the backfill's density, and the liquefied law of sandy soil, we analyze the risk of pipeline's floating in the specific project.

Keywords: pipeline; floating; wave; liquefaction

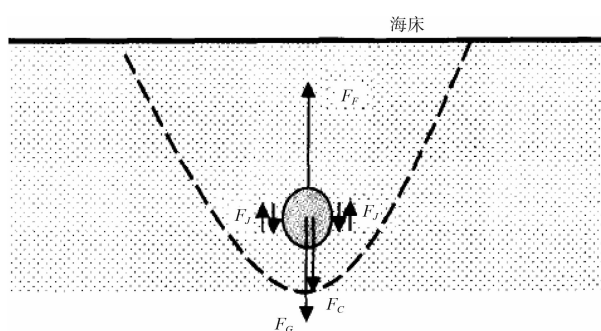
海底输油输气、深水排污和电厂取排水等都经常建设海底管道或管线, 李军等^[1]分析影响海底管道使用寿命和日常安全的因素主要来自两个方面: 环境因素和人为因素。环境因素主要包括腐蚀和有机物损坏, 波浪或潮流形成的冲刷和悬空, 波浪的水动力、沉积物液化产生的浮力、飓风等; 人为因素主要包括设计施工质量, 不法分子盗油、盗锚等重物的撞击和刮扯及海上勘测等。由于陆上设计的惯性思维, 环境因素尤其

是上浮力往往被忽视。在海底, 管道的稳定性取决于所受各种作用力的大小, 主要有: 管体自重和管内流体的重力、管道受到的浮力、覆盖土层的重力和剪切力等。在施工过程中和海底沙土液化时, 覆盖土层的重力往往起不到作用。在正常情况下, 管道覆盖土层的重力和其表面抗剪强度对管道埋地有锚固作用, 当覆盖层稳定时, 管道周围土壤未被液化, 浮力对管道影响不大; 当覆盖土层发生液化或尚未沉积固化时, 浮力会导致

收稿日期: 2014-02-15

作者简介: 陈汉宝 (1971—), 男, 博士, 研究员, 从事海洋波浪动力及防灾减灾技术研究工作。

管道浮出海床受到危害或断裂。通常,漂浮态出现在管道埋设在松软的土质内或使用原土回填管道时。在重复出现的周期性波浪力的冲击作用下,地基土在波浪作用下发生软化甚至液化,抗剪强度降低,故一旦管道的密度小于其浮力,管道就会从管沟浮出海床,裸露或呈漂浮态,在水动力的影响下受到损坏。同时管道频繁的外界扰动或振动也会使回填管沟周围土壤液化,发生漂浮。海底埋管受力情况见图 1。



注: F_G 为管道和内部物质重力; F_C 为覆盖土重力;
 F_F 为管道上浮力; F_J 为管道表面剪切力。

图 1 海底埋管的受力

为对管道的上浮可能性进行分析,通常在施工设计中应考虑以下问题: 1) 设计前,为保证管道有足够的稳定性必须取得详细土样和分析数据; 2) 施工时要及时按要求回填管沟,提高管沟回填质量; 3) 设计时做好管道密度的计算工作; 4) 尽量保证管道内介质的稳定性,减少管道液化因素。

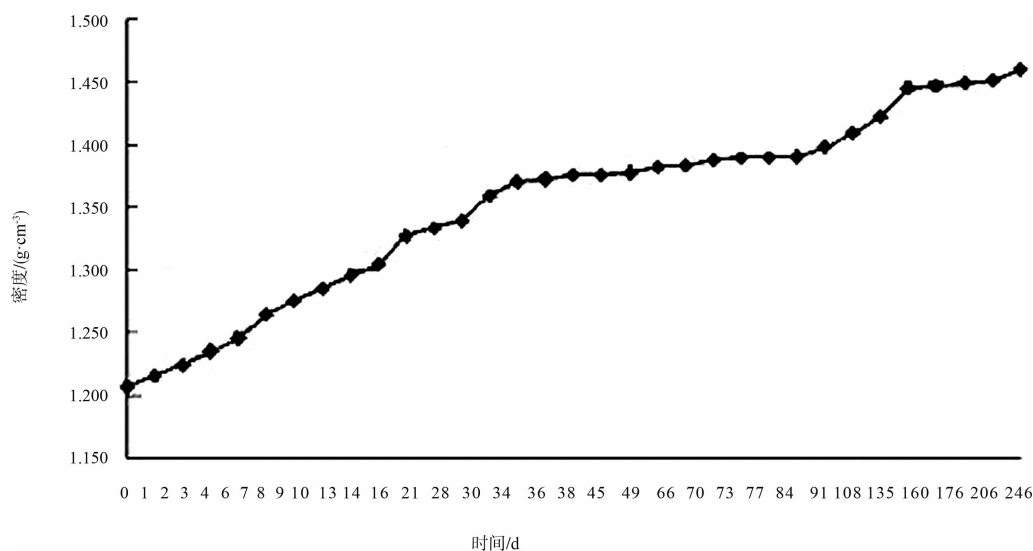


图 2 泥浆密度与时间的关系曲线

波浪引起的海床液化和滑移是海底管线灾变的主要原因之一,已有不少例证。Christian 等^[2]报道了埋深 7 ft (2.135 m)、直径为 10 ft (3.05 m) 的钢制管线在风暴作用下由于底床的液化而浮出床面的事故; Herbieh 等^[3]报道了海床中直径为 10 ft (3.05 m) 的在建管线由于飓风的作用而上浮的情况; Damgard 等^[4]提供了海床由于波浪和潮汐的作用发生液化而引起的管线上浮事故的航空照片; Arnold 对美国密西西比河三角洲 1958—1965 年间海底管线失效事故进行了统计,发现海床运动和波流冲刷引起的海底管线失效占总数的 36.2%^[5]。

因此分析海底埋管的上浮可能性主要应了解 3 个方面的因素: 一是天然淤泥覆盖时淤泥的密度范围与变化规律; 二是覆盖层在波浪作用下的液化可能性; 三是管道的密度。

1 回填淤泥的密度变化规律与范围

张梅静等^[6]通过在室内对吹填淤泥进行模拟试验,测定了吹填淤泥沉降后的密度、孔隙比及含水量等物理指标的变化过程,证明吹填泥浆在静水中的沉降过程可以划分为 2 个阶段,即细颗粒絮凝下沉为主的沉积阶段和泥浆自重固结阶段(图 2)。

从试验结果看, 在 66 d 之后, 泥浆的密度、沉降量持续增大, 含水率、孔隙比持续减小, 而沉降速率较为平缓, 表明上一阶段沉积已基本完成, 固结开始。但由于仍浸泡在水中, 受到水的浮力的作用, 变形虽然仍在进行, 但沉降速率变化很小, 该阶段持续时间很长。此时土的固体颗粒之间已开始相互接触, 形成初始连结, 初步形成骨架, 并产生超静孔隙水压力。随着孔隙水压力的消散, 有效应力相应增长, 孔隙中一部分水向下排出土体, 此时固体颗粒之间的相互位置将发生调整, 结构连结不断增大, 进而形成比较稳定的结构, 沉降量很小, 但延续时间却很长, 沉降量与时间基本上呈线性关系。

从该研究结果看, 在管沟回填的初期约 2 个月的时间, 其上部的粘结力不足, 泥浆的密度在 $1.20 \sim 1.35 \text{ g/cm}^3$ 的范围。

钱平生^[7]在天津港适航水深下界面淤泥密度值确定与适航水深测量中指出适航水深是指能确保安全航行的最大深度, 即船舶在这一深度内航行, 船体不受损害, 对航行不产生不利影响。虽然对航行可产生的影响因素很多, 但对水道测量而言, 应选择较易测量的物理量作为确定适航深度的依据; 可以选用淤泥密度作为这样的物理量。针对现场淤泥情况, 得到了刚度、黏性与密度的关系 (图 3, 4)。从中可以看出, 密度 1.30 g/cm^3 是一个转折点。

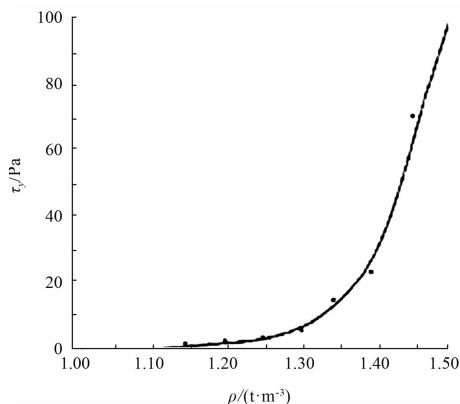


图3 初始刚度 τ_y 与密度 ρ 之间关系

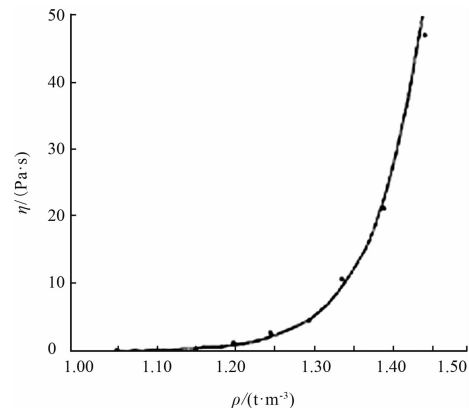


图4 动力黏度 η 与密度 ρ 之间关系

洪鹏云等^[8]通过室内的量筒沉积试验和大筒沉积试验, 模拟现场高含水量吹填淤泥的自重沉积情况, 测定吹填淤泥在不同初始含水量、不同大小的试验容器的条件下沉积后的密度、孔隙比等物理性质指标, 对高含水量吹填淤泥在静水条件下的沉积规律及固结特性做了初步的分析和研究, 得出高含水量吹填淤泥在静水中的沉积可以细分为 3 个阶段: 土颗粒絮凝下沉阶段、泥浆自重大变形固结阶段和次固结阶段。在吹填淤泥的土颗粒絮凝下沉阶段, 吹填淤泥的沉降速率主要是由吹填淤泥的初始含水量起作用。吹填淤泥的初始含水量越高, 其沉降量越大, 孔隙比变化也越快。在一定范围内, 吹填淤泥已经具备初步形成土的骨架, 吹填淤泥的含水量对沉积过程的影响也不大。所做的 5 组试验中初始含水量为 $369.1\% \sim 950.0\%$, 初始密度为 $1.153 \sim 1.063 \text{ g/cm}^3$, 第一阶段后密度为 $1.235 \sim 1.215 \text{ g/cm}^3$ 。

通过以上文献的分析, 可以将海底埋管淤泥覆盖的密度分为 3 个阶段, 一是淤泥刚覆盖上为 $\rho_0 = 1.10 \text{ t/m}^3$; 二是逐步沉积密实达到 $\rho_1 = 1.25 \text{ t/m}^3$, 此时黏性力仍较小, 覆盖土层重力还不具备约束力; 三是进一步密实达到 $\rho_2 = 1.35 \text{ t/m}^3$ 。

2 波浪作用下的表层沙土液化

潘冬子^[9]对波浪引起的海床表层液化进行研究, 提出了分析表层液化的启动和发展深度的判据, 在此基础上从信号分析的角度入手, 采用多尺度分析法对波浪荷载引起的海床累积液化进行

分析,并通过基于贴体坐标的有限差分法实现波浪—海床—管线的液化评估。周期 T 越大,相对水深 d/L 越小,因而长波作用或水深较浅时海床波浪响应的孔压更容易累积。

曹静等^[10]认为沙土地基在地震或波浪等往复荷载作用下,可能发生土壤液化,地基土液化后,在一段时间内可能变成流体,对于地震荷载,这个过程可能只有几秒,而对于波浪荷载,这个过程可能持续几个小时。土壤液化后,埋设管道可能会发生上浮或下沉运动,运动结果将改变管道的支撑和约束条件,使管道的内力发生变化,产生弯曲和拉伸应力,管道也可能浮出水面,暴露于海床之上,发生横向运动或受到机械损害,造成管道断裂或破裂。为防患于未然,在工程具体实施之前,对动荷载作用下砂土中浅埋地管道的稳定性进行专题研究是非常必要的。就浅埋于砂土地基中的管道稳定性进行如下几项研究:1) 砂土地基在地震或波浪等往复荷载作用下,是否会发生土壤液化;2) 地基土发生液化后,对埋设管道会产生什么样的影响;3) 根据研究结果,建议管道的埋设深度。

在海底管线设计时,有些标准和文献^[11-13]提出要考虑海床的液化。BS8010: Part3 (BSI 1993) 在 4.5.4 和附录 B 中提到:1) 当评价海底管线竖向稳定性时需要考虑海床的液化;2) 海床液化的原因包括波浪作用、地震作用和潮汐作用等;3) 液化准则参考 Gravesen 等的文献。Dvv. RPE305: On-bottom stability of submarine pipeline (DNV 1988) 3.4 中提出:1) 埋置管线需要进行上浮或下沉核算;2) 对于可能液化的土层,输油或输气管线的材质密度需要大于或等于土体的密度。API RP 1111 (API 1998) 4.4.2 中提出:1) 没有考虑波浪引起的液化;2) 考虑地震引起的液化。

3 上浮计算分析

陶文祥^[14]研究天然气长输管道在沼泽、湿地经过时,地下水浮力会对埋地管道的正常运行造

成威胁,传统的抗浮处理是为管道增加配重块。该文介绍了混凝土夹克管抗浮在天然气长输管道上的应用,主要是增加管道的自重。

这里以位于越南沿海的一个电厂排水管设计对比方案为例进行分析。该管道用于电厂冷却水的离岸排放,共 4 条管道,每条长 600 m,采用钢管,内管径 2.85 m,管壁厚 15 mm,设计埋深至 -4 m,原海床为 -1 ~ -4 m,原海床为粉沙质覆盖层下黏土,现场采沙陆地回填后为不均匀的淤泥混沙。工程区平均海平面为 2.3 m,设计高水位 3.5 m。海区近岸 10 a 一遇波浪为 2.5 m,对应周期为 8 s;50 a 一遇波浪为 3.2 m,对应周期 9 s。

由于取用海水冷却,取管道内水体密度 $\rho_w = 1.025 \text{ t/m}^3$,钢管密度 $\rho_p = 7.80 \text{ t/m}^3$,则综合密度为:

$$\rho_c = \rho_w \pi r^2 + \rho_p \pi (2rB + B^2) / \pi (r + B)^2 \quad (1)$$

其中:内径 $r = 2.85 \text{ m}$,壁厚 $B = 0.015 \text{ m}$,故 $\rho_c = 1.124 \text{ t/m}^3$ 。

可见, $\rho_0 < \rho_c < \rho_1 < \rho_2$ 。铺管时,钢管综合密度大于海水以及表层悬浮物,管道能自然下沉,当淤泥覆盖层开始沉积密实却不能形成骨架时,钢管自重不足会发生上浮。对应到形成骨架的 ρ_1 ,每米上浮力为 32.4 kN。

结合文中所列文献的计算方法,由波浪动力和海床底质分层情况知,10 a 一遇波浪作用液化面为 -3 ~ -6 m,50 a 一遇波浪作用液化面为 -5 ~ -9 m,可见设计管道均处在液化范围内,液化后每米上浮力至少为 58.2 kN。

4 结论

1) 海底埋管的上浮可能性主要考虑天然淤泥覆盖时淤泥的密度范围与变化规律、覆盖层在波浪作用下的液化可能性和管道的密度。

2) 海底埋管淤泥覆盖的密度分为 3 个阶段:一是淤泥刚覆盖上为 $\rho_0 = 1.10 \text{ t/m}^3$;二是逐步沉积密实达到 $\rho_1 = 1.25 \text{ t/m}^3$,此时黏性力仍较小,覆盖土层重力还不具备约束力;三是进一步密实达到 $\rho_2 = 1.35 \text{ t/m}^3$ 。

3) 在波浪较强的海区进行浅水海底管线设计时需要考虑波浪引起的海床液化。

4) 案例中, 设计对比方案埋管覆盖时, 管道密度低于初步沉积的淤泥, 覆盖形成后在 10 a 一遇和 50 a 一遇波浪作用下都会发生沙土液化, 因此上浮风险很大, 应采取工程措施或改变设计方案。

参考文献:

- [1] 李军, 王洪彬, 李燕. 影响海底管道寿命的主要因素及防范建议[J]. 石油工程建设, 2007, 33(2): 35-38.
- [2] Zen K, Yamazaki H. Mechanism of wave-induced liquefaction and densification in seabed[J]. Soils and Foundations, 1990, 30(4): 90-104.
- [3] Jeng D S. Wave-induced seabed instability in front of a breakwater [J]. Ocean Engineering, 1997, 24 (10): 887-917.
- [4] Hsu J R C, Jeng D S. Wave-induced soil response in an unsaturated anisotropic seabed of finite thickness [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1994, 18(11): 785-807.
- [5] Horikawa K. Coastal Engineering[R]. Tokyo: University of Tokyo Press, 1978.
- [6] 张梅静, 姚平. 浙江沿海吹填淤泥模拟试验研究[J]. 城市建设理论研究, 2013(7): 232-235.
- [7] 钱平生. 天津港适航水深下界面淤泥容重值确定与适航水深测量[J]. 海洋测绘, 2002, 22(3): 35-39.
- [8] 洪鹏云, 吉锋. 高含水量吹填淤泥自重沉积的室内试验研究[C]//龚晓楠, 刘松玉. 地基处理理论与技术进展. 南京: 东南大学出版社, 2008: 541-544.
- [9] 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: 196-233.
- [10] 曹静, 潘晓东. 秦皇岛 32-6 油田动荷载作用下砂土中浅埋地管道的稳定性研究[C]//石油天然气管道建设与技术论坛, 2002: 257-258.
- [11] Ishibashi I, Sherif M A, Tsuchiya C. Pore-pressure rise mechanism and soil liquefaction[J]. Soil and Foundations, 1977, 17(2): 17-27.
- [12] Dagaad J S, Sumer B M, The T C, et al. Guidelines for pipeline on-bottom stability on liquefied noncohesive seabeds[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 2006, 132(4): 300-309.
- [13] Gravesen H, Fredsoe J. Modeling of liquefaction scour and natural backfilling process in relation to marine pipeline[C]// Copenhagen: Proceedings of Seminar of Offshore Oil and Gas Pipeline Technology, 1983.
- [14] 陶文祥. 混凝土夹克管在巴西天然气长输管道中的应用[J]. 中国科技纵横, 2010, 17: 209.

(本文编辑 郭雪珍)

· 消 息 ·

振华重工获新加坡饱和潜水支持船订单

8月28日, 振华重工与新加坡 UDS 公司签订“1+1”艘饱和潜水支持船供货合同, 由客户根据合同规定选择是否建造第二艘, 每艘船合同额近 2 亿美元。

饱和潜水支持船是海工支持船舶中的高端装备, 能够为潜水人员创造适宜的工作环境, 使其在高压强条件下完成水下安装、检查、维修等作业。该船广泛应用于海底施工作业、水下资源勘探、搜救作业等领域, 具有广阔的市场前景。振华重工为新加坡客户承建的第一艘船全长 142.9 m, 型宽 27 m, 型深 11 m, 饱和潜水深度 300 m, 最大作业水深可达 4 000 m, 入籍挪威船级社, 计划于 2017 年交付。该船将配备全自动化双钟饱和潜水系统, 其安全性和舒适性居世界领先水平。

今年以来, 振华重工连续获得饱和潜水支持船订单, 表明其高端海工船舶建造水平已获得国际市场的广泛认可, 对其进一步开拓相关领域市场具有积极意义。

(摘编自《中国交通建设网》)