

天然气水合物分解 对地层和管道稳定性影响的数值模拟*

王淑云¹ 王丽¹ 鲁晓兵¹ 李清平²

(1. 中国科学院力学研究所; 2. 中海石油研究中心)

摘要 利用 ABAQUS 有限元程序,对海底管道及其附近地层的应力和位移场随着水合物分解范围逐渐扩大的变化情况进行了数值模拟计算。结果表明,水合物分解对管道、地层的变形和应力分布的影响显著,随着水合物分解范围的扩大,管道和地层的变形显著扩大,管道由小变形逐渐变化为整体倾覆变形,即失稳。在工程设计中,为保证地层中管道的安全,应严格控制管道附近水合物的分解范围。

关键词 天然气水合物分解 沉积物层 上覆土层 管道稳定性 数值模拟

海洋中天然气水合物的开采面临着严峻的安全问题,因为天然气水合物的分解会很大程度地扰动蕴含天然气和水的沉积物的结构,使沉积物强度大大降低,从而极有可能引发海底大面积滑坡和海洋结构物的严重失稳和破坏。这种基础的失稳虽然较为缓慢,但却常常是灾害性的。据分析,历史上著名的挪威 Storegga 第二次海底滑坡,美国东海岸 Carolina 岸外的 Cape Fear 滑坡,西地中海的 Balearic 巨型浊流层和西非大陆架的海底滑坡体等等都是由天然气水合物的分解造成的^[1,2]。目前国内外关于大型滑坡与天然气水合物分解相关的计算分析很少见,典型的例子只有对 Norwegian-Barents 大陆边缘和对 Storegga 滑坡等的分析和模拟计算^[3-6],尚未见到天然气水合物分解影响海上建筑物和基础稳定性方面的计算和分析。

如果在蕴含天然气水合物的海床中铺设输气管道,那么天然气水合物分解对管道的变形和应力将产生什么样的影响?将分解范围控制在什么范围内可以保证管道的安全?这些对水合物层中管道的稳定性评价是至关重要的,关系到管道的设计、选址和天然气水合物开发的可行性评价。

笔者利用 ABAQUS 有限元程序,根据典型水合物地区沉积层的厚度、物性、强度、应力应变等参

数,并结合实际的油管数据,模拟在天然气水合物沉积层中布设输气管道时水合物分解所引起的管道和地层的变形与应力分布,重点考察管道和地层的稳定性与水合物分解范围的关系,以期为天然气水合物开发中海底管道稳定性评估提供参考。

1 计算假设条件和本构模型及其参数

假设天然气水合物沉积层厚度为 50 m,其上有覆盖层或无覆盖层。有覆盖层时,覆盖层为厚度 50 m 的不含天然气水合物的均匀粉细砂层;海底输气管道(钢管)竖向置于海床中,其直径(d)为 40 cm,壁厚(t)为 2 cm,长度(l)为 100 m;海床面坡角(β)为 3°。有覆盖层时管道在海床中的布置和沉积物的分层如图 1 所示。

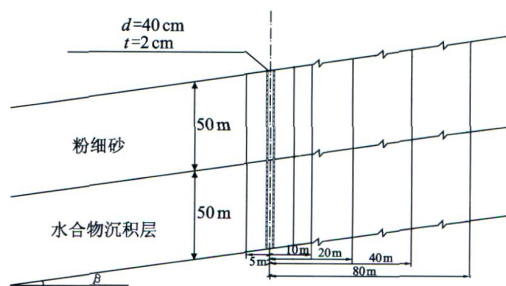


图 1 管道布置和沉积物分层示意图

* 国家高技术发展研究计划(863)专项、中国科学院三期创新方向性项目(编号: KJ CX2- YW-L02)和国家自然科学基金项目(编号: 10772182)资助研究成果。

第一作者简介:王淑云,女,高级工程师,1986年毕业于天津大学海洋工程系,现在主要从事岩土工程和天然气水合物方面的研究工作。
E-mail: sywang@imech. ac. cn.

针对二维情况用 ABAQUS 有限元程序进行计算,有覆盖层时计算区域设为高度 100 m,横向跨度 200 m;无覆盖层时管道长度为 50 m,计算区域设为高度 50 m,横向跨度 200 m。

计算中根据水合物分解范围采用如下几种工况:有覆盖层时水平方向以钢管中心线为中心的分解区域半径(R)为 5、10、20、40、80 m;无覆盖层时分解区域半径为 4、20、40、80 m。本文重点分析有覆盖层的计算结果,并与无覆盖层的计算结果进行对照。设每种工况下在水合物沉积层垂直方向 50 m、分解区域半径内的天然气水合物全部分解。

土体地基是半无限空间体,底部边界采用垂直方向位移约束,两侧边界采用水平方向位移约束。边界条件为:土层底部对三向自由度全部约束,即 $U_1 = U_2 = U_3 = 0$;土层侧面采用侧限条件,径向和切向自由度约束,垂向自由度自由,即 $U_1 = U_2 = 0$;土层对称轴面上采用法向自由度约束,即 $U_1 = 0$;管道结构对称轴面的约束条件与土层对称轴面的约束条件相同,即 $U_1 = 0$ 。钢管外表面与沉积物之间设置接触,接触采用切向无摩擦及法向硬接触。

在 ABAQUS 有限元程序中,管道与土层接触的表面定义为接触对(contact pair),然后应用主控-从属(master-slave)接触算法。考虑到管道与土层之间的接触面时,将可能形成从属表面的土体模型部分采用一阶单元,通过计算比较得到满足需要的网格划分,土体模型部分的单元网格划分为 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$,其中钢管采用梁单元进行模拟。

在计算中,钢质的管道结构采用弹性模型,天然气水合物沉积层和上覆不含天然气水合物砂层采用 Mohr-Columb 本构模型。假定海床面下 0~50 m 的细砂层参数为:密度(ρ)为 1.99 g/cm^3 ,粘聚力(C)为 0,有效内摩擦角(ϕ)为 38° ,泊松比(ν)为 0.2,弹性模量(E)为 18.9 MPa 。海床面下 50~100 m (无覆盖层时为 0~50 m)范围的沉积物在水合物分解前的参数为: $\rho = 1.98\text{ g/cm}^3$, $C = 0$, $\phi = 39.4^\circ$, $\nu = 0.2$, $E = 186\text{ MPa}$;在水合物分解后的参数(参照文献[7]实验结果)为: $\rho = 1.92\text{ g/cm}^3$, $C = 0$, $\phi = 34^\circ$, $\nu = 0.2$, $E = 26.8\text{ MPa}$ 。管道的参数为: $E = 2.09 \times 10^{11}\text{ Pa}$, $\nu = 0.3$, $\rho = 7800\text{ kg/m}^3$ 。无覆盖层的水合物层计算参数和管道的参数与有覆盖层时的参数相同。

2 计算结果及其分析

2.1 钢管的水平位移和最大应力

图 2、3 分别给出了水合物分解前后钢管的水平位移和最大应力分布。从图 2a 和图 3a 可以看到:在有覆盖层的情况下,当水合物未分解时,钢管的最大水平位移只有约 3.5 cm 且发生在钢管顶部,而钢管的最大应力为 2500 kPa 且发生在沿钢管长度方向 50 m 处(即土层分界处),这是由于管道放入土层后管道周围局部出现地应力释放而产生挤压变形,但是管道直径小,受影响的土体范围只是局部,所以引起的变形和应力也非常小。当水合物分解后,钢管的水平位移随着周围水合物分解范围的增大而增大,最大水平位移均发生在钢管顶端,当分解半径为 80 m 时,最大水平位移可达 17 cm。当水合物水平分解范围为 5、10、20 m 时,最大水平位移均发生在钢管顶端,而在 50 m 土层分界处的位移由于弹性模量参数的明显变化而呈现明显的拐点。在无覆盖层的情况下,最大水平位移量均比有覆盖层时的小,水平位移沿垂向的分布没有拐点(图 2b),这是因为无覆盖层时土层参数沿垂向没有间断,而且没有覆盖层产生的下滑力作用在管道上。

从图 2a 和图 3a、b 可以看到:钢管的最大应力在 50 m 土层分界处出现拐点,但拐点处的最大应力值随着水合物分解范围的增大而减少,而在钢管底端固支点处的最大应力值则随着水合物分解范围的增大而逐渐增大。当水合物分解范围增大到 40 m 和 80 m 时,钢管的顶端水平位移明显增大至 14~17 cm,钢管的最大应力在底部固支处增大至 7~16 MPa,在 50 m 土层分界处的水平位移和最大应力已无明显拐点,此时钢管表现为总体倾斜失稳。这是因为土体强度在水合物分解后显著降低,引起分解区域外地层的地应力释放,覆盖层和管道上方的地层产生向下方的滑动,从而对分解区域中的土体和管道产生挤压,而分解区域内的土体由于其强度降低而对管道的支撑作用减弱,结果就使得分解区域内的土体和管道产生向坡下方的变形。随着水合物分解范围的扩大,分解区域内的土体和管道受到的挤压作用越大,变形也就越大。但是在一定的分解范围内,由于管道下方未分解地层对分解区域内土体和管道有部分支撑作用,在覆盖层和水合物层力学性质差异的作用下,变形和应力均出现拐点。

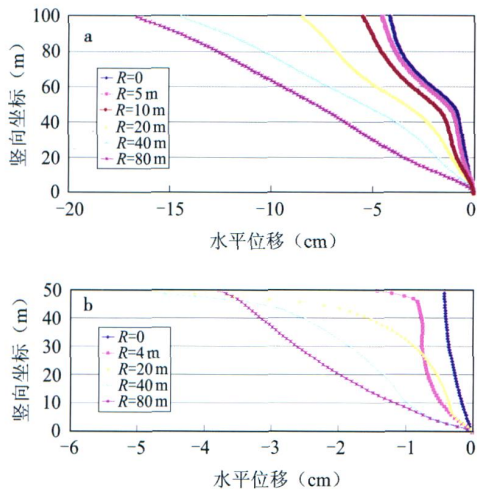


图 2 天然气水合物分解前后钢管的水平位移
(a—有覆盖层情况,b—无覆盖层情况;竖向坐标为 0 时,表明为钢管的顶端,即海床泥面处)

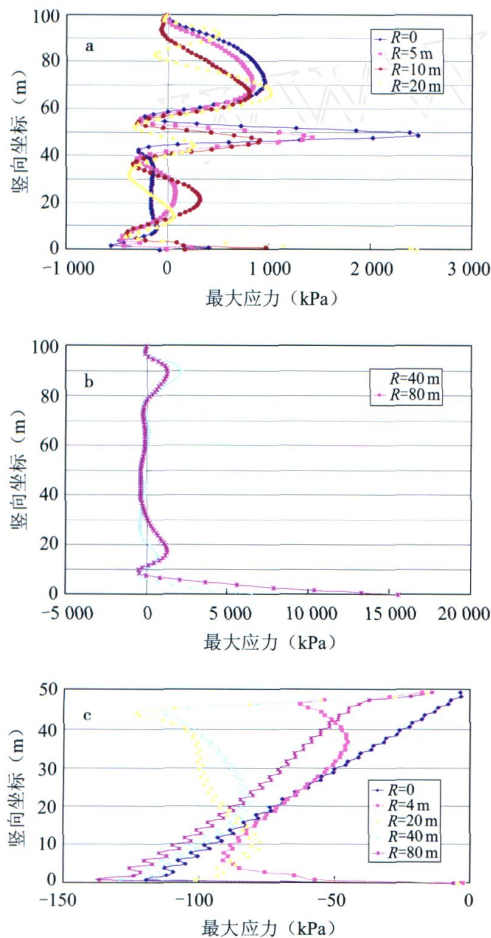


图 3 天然气水合物分解前后钢管的最大应力分布
(a、b—有覆盖层情况,c—无覆盖层情况;竖向坐标为 0 时,表明为钢管的顶端,即海床泥面处)

但是在分解范围超过一定值时,则管道下方地层的支撑作用完全失去,管道发生整体倾斜,只是在覆盖层内从上到下有微小差异。另外,底部管道的应力集中是由于该处采用固支条件的缘故。

对比图 3c 与图 3a、b 可以看到:有覆盖层时,随着水合物水平分解范围的增大,钢管的最大应力也依次增大,当水平分解半径为 4、20、40 m 时,最大应力发生在钢管顶部约 1.5 m 附近,但在钢管底部约 5 m 处钢管应力又出现反弹,这是由于钢管在不同水平分解半径条件下的位移变化太大,钢管严重弯曲从而使钢管内部应力在顶部以下约 1.5 ~ 15 m 范围减小后又出现一个应力反弹和增大区,进而应力又减小直至钢管底部位移受到固定约束为止;当水合物水平分解范围增大为 80 m 时,钢管内应力增大,分布较为均匀,虽然此时钢管顶端最大水平位移不到 4 cm,但钢管总体位移量最大,钢管总体倾斜失稳最严重。

2.2 管道附近土层的应力和变形

管道附近土层的应力和变形与管道和土体相互作用密切相关,其变化大小直接由沉积物的强度参数的变化程度决定。由于水合物分解造成沉积物强度的降低,而且随着水合物在水平方向分解范围的增大,作为支撑管道结构物的海床发生大面积强度弱化,在管道位移和应力增大的同时,钢管附近土层所受的剪应力和变形也随之增大。

图 4a ~ c 给出了有覆盖层情况下水合物未分解时管道附近土层的位移和剪应力分布,可以看到管道附近土体的水平位移只有 4 cm,位移分别在两个土层中呈均匀和渐进地分布;管道附近土体的竖向位移(即沉降)比较大,为 75 cm,该沉降为固结沉降,即施加重力后引起的初始沉降,土层沉降均匀,无明显滑塌;土体中的最大剪应力分布也相对于钢管的垂向中心线呈现对称分布,管道左侧土体受到管道和坡体上方土体的挤压而产生压应力,右侧土体由于受到下方土体和管道的牵引而产生拉应力,剪应力最大值为 6 kPa,发生在土体底部两边角处,这是由于底部采用固支条件的缘故;应力集中主要分布在土层交界与钢管相交处或与水合物分解边界线相交处。为了进行对照,图 4d 给出了无覆盖层情况下地层中的剪应力等值线分布。对比发现,由于覆盖层的存在,有覆盖层时水合物层中的剪应力更大,即更容易产生破坏。

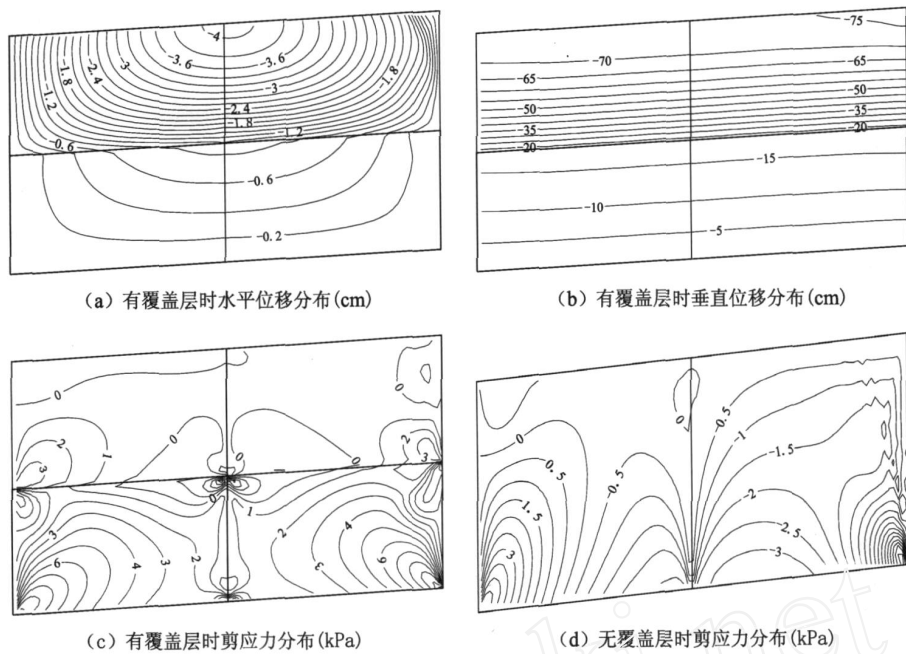


图 4 水合物未分解时管道附近土层的位移和剪应力分布

在水合物分解后,管道附近土层的水平和垂直位移及剪应力均加大。图 5 给出了水合物水平分解半径为 20 m 时管道附近土层的水平位移和剪应力分布,可以看出有覆盖层时,土体水平位移和最大剪应力主要发生在钢管周围半径为 30 m 的范围内,其中土体最大水平位移为 13 cm,钢管右侧土体受拉范围大于左侧土体受压范围;最大剪应力为 160

kPa,发生在垂直方向的两土层交界处和水平方向距钢管 20 m 附近。由于距离钢管中心线 20 m 处的竖向界面是水合物分解与否和沉积物强度参数的变化界面,即在 20 m 界面内是钢管和强度较弱的沉积物,在 20 m 界面处是强度较高的沉积物,因此 2 个界面附近的水平位移和最大剪应力分布必然会出现较明显的突变和集中现象。同样,在土层交界

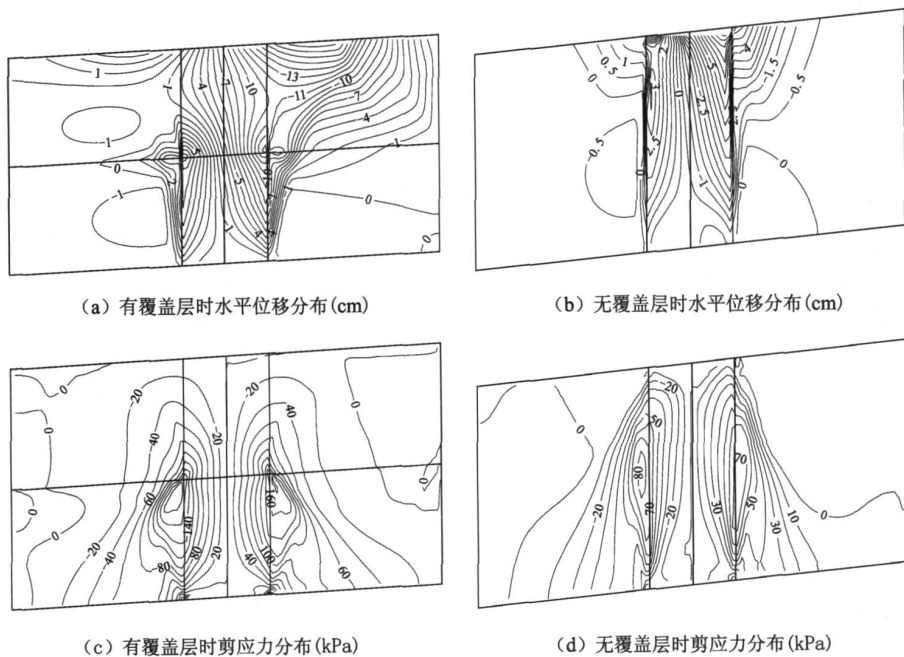


图 5 水合物分解半径为 20 m 时管道附近土层的水平位移和剪应力分布

面也会出现较明显的水平位移和剪应力集中现象。在无覆盖层的情况下,管道附近土层的应力和变形约为有覆盖层情况的 1/2 (因为没有了覆盖层的重力和下滑力的作用)。

图 6 给出了水合物水平分解半径为 80 m 时管道附近土层的水平位移和剪应力分布,可以看出,在有覆盖层的情况下,当水合物水平分解半径为 80 m 时,土体的最大水平位移增至 45 cm,发生在右侧水平方向距钢管 80 m 的界面和海床附近;土体在半

径 100 m 内的受拉区域大于受压区域,钢管右侧土体受拉变形最严重;而土体在半径 20 m 内的水平位移分布均匀且量值较小。土体中的最大剪应力突变和集中现象分布在距钢管 80 m 的界面附近,最大剪应力达到 160 kPa;土体在半径 40 m 内的最大剪应力分布均匀,且其量值和变化幅度均较小;土体沉陷虽然较大(为 160 cm),但整体沉陷均匀。在无覆盖层情况下,管道附近土层的应力和变形约为有覆盖层情况的 1/3。

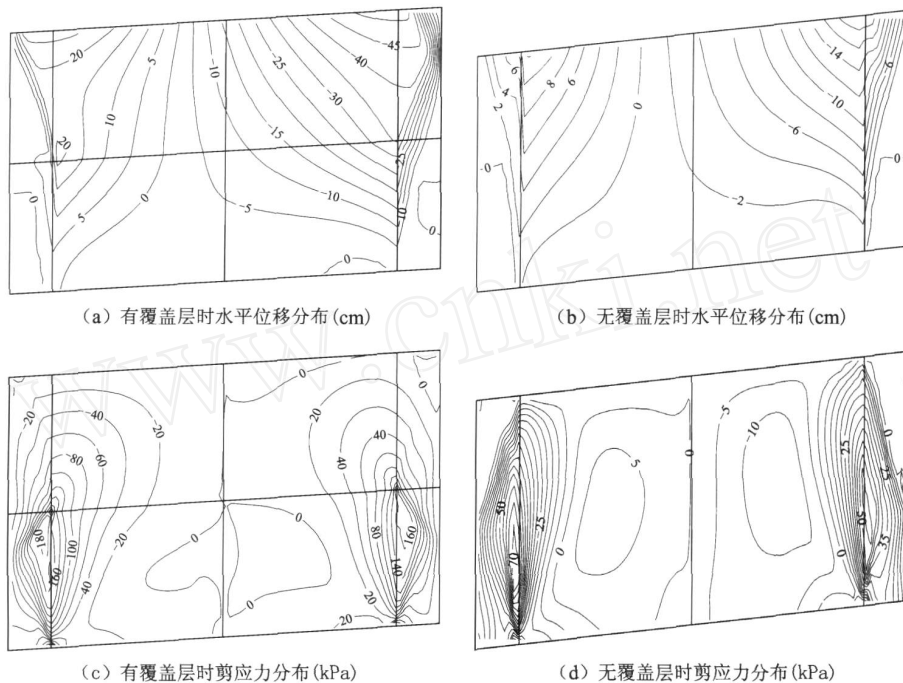


图 6 水合物分解半径为 80 m 时管道附近土层的水平位移和剪应力分布

3 结论

(1) 地层中管道的水平位移和最大应力会随着水合物分解范围的增大而增大。在有覆盖层的情况下,随着水合物分解范围的扩大,管道由弹性变形逐渐发展为整体倾倒;钢管最大应力的分布在水合物水平分解范围为 20 m 和 40 m 时最不均匀,这时钢管会发生严重弯曲。

(2) 在有覆盖层的情况下,管道附近土层的水平位移和最大剪应力会随着水合物分解范围的增大而增大,其最大值与分解范围密切相关。土体的水平位移和最大剪应力的最大值以及分布集中与突变现象均发生在水合物已分解与未分解的水平范围的界面附近。当水平分解范围为 80 m 时,土体的最大水平位移为 45 cm,垂直沉陷为 160 cm,最大剪应

力为 160 kPa,土体会发生严重的失稳和破坏。

(3) 由于覆盖层的重力和下滑力的作用,有覆盖层时的管道应力、地层应力和变形均较无覆盖层时要大。

(4) 防止水合物分解对管道破坏的最主要措施就是加强管道外层的隔热(如加隔热套管),将传热区域控制在有限的不会造成危害的范围;同时,在水合物层与其他层交接处,由于管道会产生较大的剪应力和弯矩,需要增大管道的强度和刚度,如加厚管壁。

参 考 文 献

- [1] LOCAT J, LEE H J. Submarine landslide, advances and challenges[J]. Canada Geotechnical Journal, 2002, 39:193-212.

(下转第 138 页)

4 结束语

2003年至今,采用本文所提出的方法进行了海洋结构用钢价格的跟踪和预测,做到了及时、简捷地反映市场钢材价格变化对海洋结构用钢价格的影响,同时将所求得的钢材综合单价指标运用到海洋结构前期研究中各个阶段钢材费用估算中,不但解决了钢材综合价格指标的测算难题,同时也大大提高了海洋结构钢材费用估算的可靠度和估算水平,取得了良好的应用效果。

收稿日期:2007-10-11 改回日期:2007-11-20

(编辑:张金棣)

Calculation of weighted average price for the steel applied to offshore structure

Yang Yongbin

(CNOOC Research Center, Beijing, 100027)

Abstract: In the procedure of earlier research for offshore oil-gas field development project, the gross of the steel applied to a platform structure is refined to the general tonnage, therefore, it is very difficult to determine the weighted average price. In this paper, the statistical analysis has been applied, then a calculation model and a correction method for the weighted average price have been put forward according to the characteristics of offshore platform structure. Therefore, the reliability of investment evaluation on the steel applied to the platform structure is ensured in the earlier research.

Key words: steel applied to offshore structure; weighted average price; calculation model; correction method

(上接第 131 页)

- [2] SUL TAN N, COCHONAT P, FOUCHER J P, et al. Effect of gas hydrates melting on seafloor slope instability [J]. *Marine Geology*, 2004, 213: 379-401.
- [3] KAYER R E, LEE H. Pleistocene slope instability of gas hydrate-laden sediment on the Beaufort Sea margin [J]. *Marine Geotechnology*, 1991, 10: 125-141.
- [4] 甘华阳,王家生,胡高韦. 海洋沉积物中的天然气水合物与海底滑坡[J]. *防灾减灾工程学报*, 2004, 24(2): 177-181.
- [5] MORTEN J, JOHN A H, TIM A M, et al. Elastic properties of hydrate-bearing sediments using effective medium theory [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105(B1): 561-577.
- [6] GILLES G, DAVID G, ALEKSANDR M. Characterization of in situ elastic properties of gas hydrate-bearing sediments on the Blake Ridge [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104(B8): 17781-17795.
- [7] WILLIAM J W, INGO A P, WILLIAM F W, et al. Physical properties and rock physics models of sediment containing natural and laboratory-formed methane gas hydrate [J]. *American Mineralogist*, 2004, 89: 1221-1227.

收稿日期:2007-11-09 改回日期:2008-01-07

(编辑:崔护社)

Numerical analysis of the effects of gas hydrate dissociation on the stability of deposits and pipes

Wang Shuyun¹ Wang Li¹ Lu Xiaobing¹
Li Qingping²

(1. *Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190; 2. CNOOC Research Centre, Beijing, 100027*)

Abstract: By use of the finite element software ABAQUS, the stress and displacement distributions of the subsea pipe and deposits surrounding the pipe along with the development of the gas hydrate dissociation area are simulated numerically. The results show that the gas hydrate dissociation has obvious effects on the distributions of stress and displacement of the pipe and deposits. With the development of gas hydrate dissociation area, the displacements of pipe and deposits increase obviously, the deformation of the pipe is from small to large and finally wholly tilt, i. e. instability. In order to ensure the safety of pipe embedded in the gas hydrate deposits, the gas hydrate dissociation area surrounding the pipe should be controlled strictly in the design.

Key words: gas hydrate dissociation; deposits; layered soil; pipe stability; numerical analysis