

DOI: 10.11779/CJGE201511021

冲击荷载作用下有碎石保护结构的海底管线 DEM-FEM 联合分析研究

邱长林, 王 菁, 闫澍旺

(天津大学建筑工程学院岩土所, 300072 天津)

摘 要: 海上平台落物或抛锚对海底的撞击会对海底管线造成一定的损害。通常的防护措施是在管线的上部铺设碎石层形成碎石保护结构, 从而耗散部分冲击能量。为了分析该保护结构的防护性能, 运用离散元-有限元联合分析的方法, 建立冲击荷载作用下有碎石保护结构的海底管线反应分析方法。在该方法中, 离散元用于模拟碎石结构, 有限元用于模拟其它的连续体。离散元单元和有限元单元通过在它们之间设置接触面的方式进行相互作用。计算得到的碎石保护结构对冲击能量的吸收结果与挪威海洋工程规范中建议的公式一致, 且计算得到的海底管线变形规律与模型试验的结果相符。这些结果验证了该方法在评价碎石保护结构下海底管线安全性能方面的适用性。

关键词: 碎石保护结构; 冲击荷载; 离散元-有限元联合分析; 海底管线

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)11-2088-06

作者简介: 邱长林 (1973 -), 男, 博士, 副教授, 研究方向为结构物与土相互作用。E-mail: qiu_cl@tju.edu.cn。

Coupled DEM-FEM analysis of submarine pipelines with rock armor berm under impact load

QIU Chang-lin, WANG Jing, YAN Shu-wang

(Geotechnical Institute, School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Submarine pipelines will possibly be damaged by dropped weights from ocean platforms or anchors from ships. The rock armor berm is the method commonly adopted to protect these pipelines by covering them with a layer of gravels, which can dissipate part of the energy of falling objects. In order to estimate the energy dissipating capacity of the rock armor berm, a coupled discrete element method (DEM) and finite element method (FEM) approach is proposed to analyze the dynamic response of pipelines under impact load. In this approach, DEM is used to model discrete gravels and FEM is used to model other continuous objects. The two kinds of elements interact on each other through the contact interface between them. The calculated results of energy absorptions by gravels coincide well with those recommended by the current code of DNV-RP-F107, and the calculated deformation rules of the pipeline are in good agreement with those given by model tests. These results prove the feasibility of using the proposed approach to evaluate the safety of submarine pipelines with rock armor berm.

Key words: rock armor berm; impact load; coupled DEM-FEM analysis; submarine pipeline

0 引 言

许多近海油田的登陆管线都穿越或邻近港口和码头。在这些区域, 船舶定位下锚及集装箱掉落等事件对海底产生的撞击作用会对埋置在海底的管线造成一定的损害, 从而影响管线的正常运营^[1]。为了保护这些管线, 使它们受到上部下落物体的冲击荷载后不损坏, 通常的做法是在埋设管线的沟槽中用碎石等材料填埋覆盖在管线上, 形成碎石保护结构。由于海底管线是海洋油气资源开发、运输的生命线, 其事故将对国民经济产生不可估量的经济损失和对海洋环境

产生巨大的污染。因此, 如何定量评价海底管线上覆碎石层的保护效果成为保护海底管线免受侵害的一个重要问题。

为了评价海底管线在冲击荷载作用下的安全性, Wierzbicki等^[2]给出了管线的凹痕和吸收能量之间的关系, Zeinoddini等^[3]给出了侧向点荷载作用下管线的变形和破坏模式, 杨秀娟等^[4]采用三维非线性有限元

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50309009); 国家自然科学基金优秀青年科学基金项目 (51322904)

收稿日期: 2014-09-08

法模拟海底管道受到船锚或其他坠落物体的冲击碰撞过程, 黄小光等^[5]基于动力有限元分析方法, 对海底悬空管道受抛锚撞击过程进行了数值仿真, 但是这些分析都没有考虑上覆材料对海底管线的保护作用。为了考虑上覆保护结构的作用, DNV-RP-F107^[6]规范基于现场模型试验提出了关于碎石和砂土材料层对冲击荷载产生的能量的消散公式, 为工程提供了设计方法和依据。为了能更全面分析上覆保护层的工作性能, 闫澍旺等^[7]通过三维动力有限元分析了不同上部材料对下落物体冲击荷载能量的消散效果, 杨秀娟等^[8]考虑坠物及海床对撞击能量的吸收作用, 采用非线性动态有限元法模拟了坠物撞击海底管道的过程, 这些有限元分析进一步明确了上覆保护层的工作性能。

和一般的均质土体不同, 碎石保护结构颗粒松散, 具有强烈的离散特性。颗粒系统虽然由无序的松散颗粒构成, 但其内部存有大量复杂的力链结构, 力链的存在使其在冲击荷载作用下能将局部荷载快速转换为分布荷载, 将瞬时冲击在时间上进行延迟, 进而达到降低冲击强度的缓冲作用^[9]。这些响应是颗粒间摩擦、变形和运动等作用的综合结果, 连续介质力学不能反应其本质特点, 而采用离散元方法分析碎石保护结构在撞击问题中的工作性能更加符合其工作机理; 同时, 由于组成海底黏性土的颗粒细小, 海底基床和海底管线及撞击物一样都是连续体, 有限元法可以很好地模拟它们的力学特性。为此, 本文采取离散元-有限元结合的方法对重物冲击作用下碎石保护结构的工作性能进行分析, 其中, 海底基床、海底管线以及撞击物采用有限元法进行模拟, 而碎石保护结构采用离散元方法模拟。这种方法不仅可以模拟碎石的工作机理, 还可以充分利用有限元法在连续介质力学分析中的便利性, 具有单独使用有限元法或离散元法所无法比拟的优点。通过将计算结果与规范以及试验结果进行对比, 验证了该方法的可行性。

1 DEM-FEM 联合分析模型

1.1 DEM 模型

DEM 模型主要是为了模拟碎石保护结构。为了简化起见, 本模型用一个圆球代表一块砾石, 且每一个 DEM 单元尺寸相同; 同时假定 DEM 单元为刚体, 即其本身不可变形, 颗粒和颗粒之间的接触变形是通过设定颗粒间的重叠量与压力之间关系的方式确定; 不考虑颗粒旋转对撞击动力行为的影响。

将碰撞过程中颗粒间的接触考虑成黏弹性的, 则两个颗粒间的接触模型如图 1 所示, 其中连接接触面间法向方向的弹簧代表颗粒间法向接触刚度, 黏壶代表法向阻尼; 切线方向的弹簧和圣维南刚塑性体表示

颗粒间的切向摩擦, 黏壶代表切向阻尼。

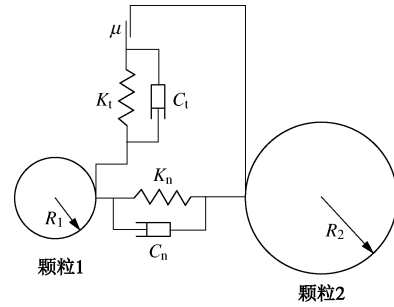


图 1 颗粒接触模型

Fig. 1 Contact model between particles

定义 $\delta_{n,21}$ 为颗粒 1 和颗粒 2 之间的重叠量, 即

$$\delta_{n,21} = R_1 + R_2 - d_{12}, \quad (1)$$

式中, R_1 和 R_2 分别为两个颗粒的半径, d_{12} 为两个颗粒中心点的距离。当颗粒处于压缩状态时, $\delta_{n,21}$ 大于 0, 由图 1 可以得到

$$\vec{F}_{n,21} = -K_n \delta_{n,21} \vec{n}_{21} - C_n \vec{V}_{n,21}, \quad (2)$$

式中, $\vec{F}_{n,21}$ 为颗粒 2 对颗粒 1 的法向力, K_n 为法向刚度系数, \vec{n}_{21} 为两个颗粒圆心方向矢量, C_n 为法向黏滞系数, $\vec{V}_{n,21}$ 为两个颗粒的法向相对速度矢量。

法向刚度系数的确定采用 Hertz 接触模型^[10]。弹性球体接触时法向荷载与位移之间的关系为

$$F'_s = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R} \sqrt{\delta_{n,21}^3}, \quad (3)$$

式中, F'_s 为法向挤压接触力,

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}, \quad (4)$$

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2}, \quad (5)$$

E_1 和 E_2 分别为两个颗粒的弹性模量, ν_1 , ν_2 分别为两个颗粒的泊松比。式 (3) 适用于两个颗粒接触或相互挤压的情况。由式 (3) 可以得到法向刚度系数为

$$K_n = \frac{dF'_s}{d\delta} = 2E^* \sqrt{R} \sqrt{\delta_{n,21}}. \quad (6)$$

对于法向阻尼系数, 根据 Haaf 等^[11]的分析, 有

$$C_n = \sqrt{\frac{4K_n m^* (\ln \varepsilon)^2}{\pi^2 + (\ln \varepsilon)^2}}, \quad (7)$$

式中, C_n 为法向阻尼系数, ε 为恢复系数,

$$\frac{1}{m^*} = \frac{1}{m_1^*} + \frac{1}{m_2^*}, \quad (8)$$

m_1^* 和 m_2^* 分别为两个颗粒的质量。

由图 1 可以得到切向力为

$$\vec{F}_{t,21} = \begin{cases} -K_t \delta_{t,21} \vec{\tau}_{21} - C_t \vec{V}_{t,21} & (|\vec{F}_{t,21}| < |\vec{F}_{tf,21}|) \\ -\mu |\vec{F}_{n,21}| \vec{\tau}_{21} & (|\vec{F}_{t,21}| \geq |\vec{F}_{tf,21}|) \end{cases}, \quad (9)$$

式中, $\bar{F}_{t,21}$ 为切向力, K_t 为切向刚度系数, $\bar{\tau}_{21}$ 为两个球体接触面的切线方向矢量, $\delta_{t,21}$ 为切向位移, C_t 为切向阻尼系数, $\bar{v}_{t,21}$ 为切向相对速度矢量, μ 为摩擦系数, $\bar{F}_{uf,21}$ 为极限切向力,

$$|\bar{F}_{uf,21}| = \mu |\bar{F}_{n,21}| \quad (10)$$

实际计算中, 切向刚度系数一般取为和法向刚度系数相同, 而切向阻尼系数一般取为切向弹簧振子的临界阻尼系数^[11], 即

$$C_t = 2\sqrt{K_t m^*} \quad (11)$$

1.2 有限元模型

撞击物、海底管线和海底基床采用有限元模型模拟。管道为三维壳单元, 海底基床为三维实体单元, 撞击物为刚体。

海底基床土体模型采用有阻尼的弹塑性模型。其弹塑性理论部分采用线性 Drucker-Prager 理想弹塑性模型, 该模型的屈服函数 F 为

$$F = t - p \tan \beta - d = 0 \quad (12)$$

$$t = \frac{q}{2} \left[1 + \frac{1}{k} - \frac{27J_3}{2q^3} \left(1 - \frac{1}{k} \right) \right] \quad (13)$$

式中, p 为平均应力, q 为广义剪应力, k 是三轴拉伸强度与三轴压缩强度之比, β , d 分别为屈服曲线在 $t-p$ 空间上的斜率和截距, J_3 为第三偏应力不变量。塑性势面函数 G 为

$$G = t - p \tan \psi \quad (14)$$

式中, ψ 为 $t-p$ 空间的剪胀角。考虑到撞击作用的时间非常短, 基床土体的孔隙水压力来不及排出, 土体的强度采用不排水强度。

土体的阻尼采用 Rayleigh 阻尼, 即

$$[C] = \alpha_0 [M] + \alpha_1 [K] \quad (15)$$

式中, $[C]$, $[M]$, $[K]$ 分别为阻尼矩阵、质量矩阵和刚度矩阵, α_0 和 α_1 为 Rayleigh 阻尼系数, 其和阻尼比之间的关系为^[12]

$$\alpha_0 = \frac{2\lambda\omega_1\omega_2}{\omega_1 + \omega_2} \quad (16)$$

$$\alpha_1 = \frac{2\lambda}{\omega_1 + \omega_2} \quad (17)$$

式中, λ 为土体的阻尼比, ω_1 , ω_2 分别为地基第一阶和第二阶固有圆频率。

1.3 DEM 和 FEM 的相互作用

DEM 的颗粒单元和 FEM 单元通过在它们之间设置接触面的方式进行相互作用。DEM 颗粒和有限元单元之间的接触面特性与 DEM 模型中颗粒间的接触特性相似, 差别在于 FEM 单元不再是颗粒, 而是要近似为墙。因此, 接触面间的本构关系和 DEM 相同, 但是式 (4) 中的 R 取为颗粒的半径, 式 (5) 中的 E^*

取为颗粒的弹性模量。

1.4 DEM 和 FEM 联合分析步骤

采用商业软件 Abaqus 进行分析, 主要步骤为: ①生成初始的 DEM 单元。为此, 先利用常规网格技术生成设定直径、但是各颗粒之间有空隙的颗粒群, 然后这些颗粒群在重力的作用下下落, 进入设定的空间中, 从而形成比较密实的 DEM 单元。②对算基床进行线性摄动分析, 获取基床的自振频率, 并根据式 (16)、(17) 计算基床的 Rayleigh 阻尼系数。③施加自重荷载, 计算在自重荷载作用下地基的应力。④给定撞击物一定初始速度, 采用动力学方法进行撞击分析。

2 模型分析

计算模型尺寸为 $9 \text{ m} \times 3 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ (长×宽×高), 其中碎石保护结构尺寸为 $3 \text{ m} \times 3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ (长×宽×高), 管线直径为 0.8 m , 埋深为 2 m 。碎石颗粒半径为 0.049 m , 其计算参数 E 为 40000 MPa , ν 为 0.3 , ε 为 0.8 , μ 为 0.8 。基床黏性土的力学参数 γ 为 9 kN/m^3 , E 为 15 MPa , ν 为 0.45 , ϕ 为 0 , 黏聚力为 20 kPa , λ 为 0.2 。撞击物为一圆柱体, 其直径为 0.2 m , 高度为 1.5 m , 质量取为 4 t 。由于完整模拟实际重物在水中下落过程的计算时间非常长, 为了简化起见, 将撞击物底部初始位置设于碎石保护层顶部, 通过设定其不同的初始速度来代表不同的冲击能量, 本计算的初始速度为 5 m/s , 相当于 50 kJ 的撞击能。具体模型见图2。

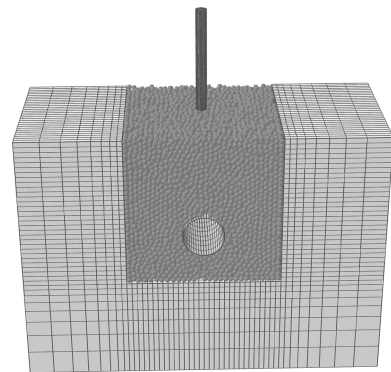


图2 离散元-有限元模型

Fig. 2 DEM-FEM model

边界条件中, 基床的底部固定, 四周的面法向固定。海底管道的两侧对称。碎石保护层颗粒在管线轴线方向的两侧不能挤出。

3 碎石保护结构能量耗散研究

撞击物在贯入过程中会受到碎石的阻力作用, 其贯入速度不断减小, 即动能在不断减小。减少的能量一部分被碎石保护层吸收, 另一部分转换为管道的内

能和动能。由于管道的动能非常小, 可以忽略不计, 因此, 碎石保护结构吸收的能量可以认为等于撞击物的动能差减去管道的内能。根据该方法计算得到的碎石保护结构吸收的能量与贯入深度的关系如图3所示。从图3可以看出, 在初始贯入阶段, 由于撞击物的冲击速度非常大, 在颗粒阻尼的作用下, 撞击物受到的阻尼阻力比较大, 速度减小快, 能量消散也非常快。随着贯入深度的增加, 贯入速度减小, 阻尼作用逐渐降低, 能量消散的速度变慢; 贯入一定深度后, 碎石颗粒的密实程度增加, 贯入单位深度所需要的能量也增加, 单位深度能量消耗的速度又加快。

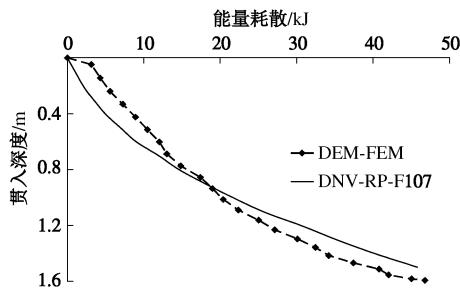


图 3 碎石保护结构吸收的能量和贯入深度关系

Fig. 3 Relation between energy absorptions by rock armor berm and penetration depth

基于现场模型试验, DNV-RP-F107规范提出了关于碎石层对冲击荷载产生的能量的消散公式为^[6]

$$E_p = 0.5\gamma' DN_\gamma A_p z + \gamma' z^2 N_q A_p \quad (18)$$

式中, γ' 为回填材料的有效重度, D 为落物尺度, A_p 为落物刺入面积, z 为刺入深度, N_q , N_γ 为承载力系数。该方程通过试验获得了验证, 具有较高的可靠性。本模型的计算结果和该公式计算结果对比如图 3 所示。从图 3 中可以看出, 这两个结果非常接近。该结果验证了 DEM-FEM 联合分析方法在分析碎石材料能量耗散作用方面有较好的精度。

4 管道的变形分析

4.1 DEM-FEM 联合分析结果

计算得到管道受到冲击荷载时的竖向沉降如图 4 所示。从图 4 中可以看出, 相对于底部, 管道顶部产生了较大的沉降量, 导致了其形状为扁平状。图中结果表明, 中部撞击发生的位置处会有一个下凹的变形, 这种现象与 DNV-RP-F107 规范中所谓的被撞凹坑的现象一致, 可以作为管道损坏严重程度的判断标准。

计算得到受到冲击荷载时管道外圈沿环向的应变值如图 5 所示。从图 5 中可以看出, 顶部和底部的变形方向一致, 都是受压。由于顶部受到撞击作用, 其中间位置 (撞击位置) 的环向变形数值最大, 达到

0.67%。管道两侧边的环向变形为拉变形, 基本对称, 但是其数值小于顶部变形的数值。

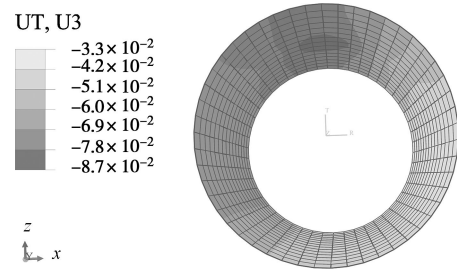


图 4 海底管线竖向位移

Fig. 4 Settlement of pipe

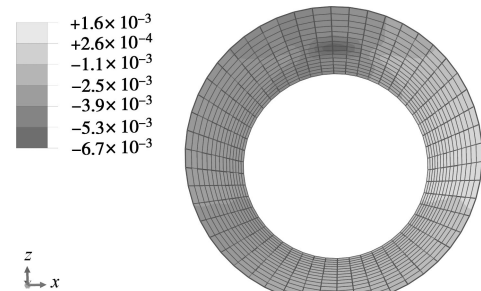


图 5 撞击时海底管线环向应变

Fig. 5 Circumferential strain of pipe under impact

计算得到受到冲击荷载时管道外圈沿轴向的应变值如图 6 所示。从图 6 中可以看出, 管道的轴向变形基本上比较小, 在撞击位置处的轴向变形为压应变, 其值为 0.14%, 远小于环向应变。

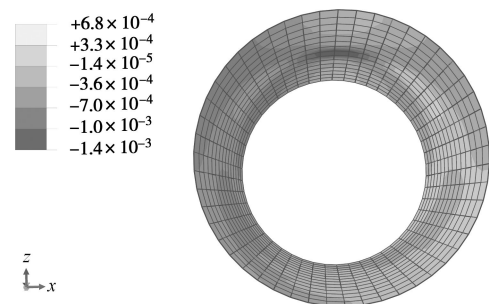


图 6 撞击时海底管线轴向应变

Fig. 6 Axial strain of pipe under impact

4.2 模型试验及试验结果

为了研究碎石保护结构对管道的保护作用, 在模型槽中进行了一系列的落锚撞击试验。试验前, 在管道上安装变形传感器, 然后将管道埋设于碎石层中一定深度, 如图 7 所示。模型锚从一定的高度处下落后撞击管道, 通过传感器测定该过程中管道的变形情况。

试验用锚的质量为 1.3 kg。当管道埋深为 12 cm, 落锚高度为 130 cm 时, 试验得到管道中央位置处的环向变形和轴向变形最大值如图 8 所示。DEM-FEM 联

合模型计算得到相应位置的变形最大值如图 9 所示。由于这两种情况在冲击荷载、保护层厚度不同而无法从数值上进行比较,但从图中可以看出,它们之间的分布规律是基本相同的。这个结果表明,采用 DEM-FEM 联合模型计算有碎石保护结构时海底管线受到冲击荷载作用的力学反应是可行的。



图 7 试验中的管道及碎石保护结构
Fig. 7 Pipe and rock armor berm in tests

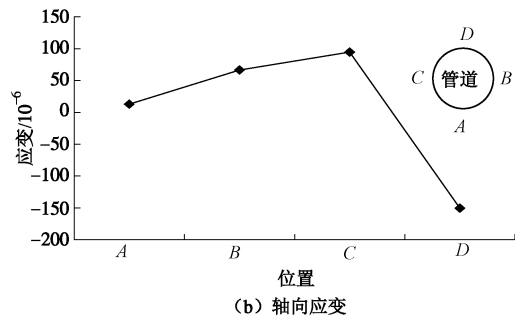
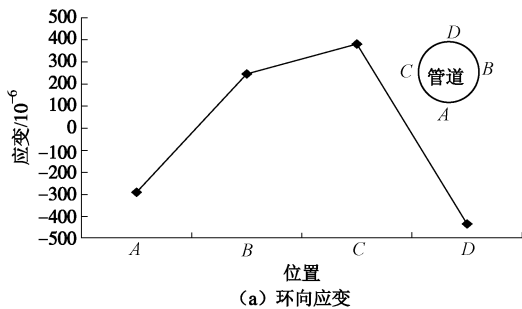


图 8 试验的应变分布
Fig. 8 Strains of test

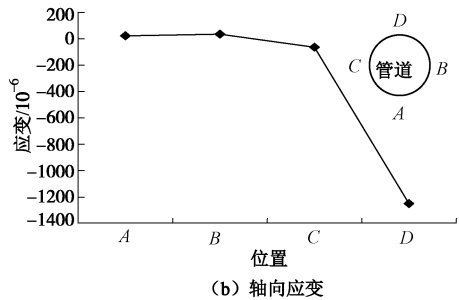
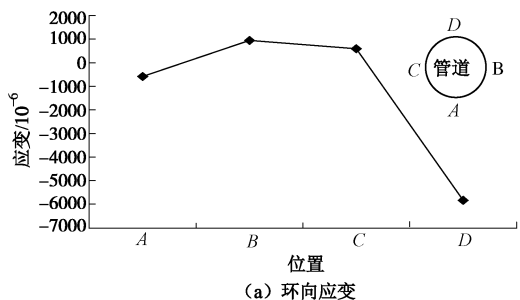


图 9 模型计算的应变
Fig. 9 Calculated strains

5 结 论

本文针对碎石的离散性和海底基床的连续性特点,建立了分析有碎石保护结构时海底管线在冲击荷载作用下动态反应的 DEM-FEM 联合分析方法,并将分析结果与 DNV 规范中提供的公式以及模型试验结果进行对比,得到如下 3 点结论。

(1) 通过将 DEM-FEM 联合分析模型中碎石保护层的能量耗散计算结果和 DNV 规范中提供的公式进行对比分析可知,DEM-FEM 联合分析方法和该规范建议的公式具有相当好的一致性。

(2) 通过将 DEM-FEM 联合分析模型中管道的变形规律结果和落锚试验的结果进行对比分析表明,DEM-FEM 联合方法计算得到的碎石保护结构下海底管线在冲击荷载作用下的变形和试验结果在规律性上具有相当好的一致性。

(3) 计算结果和模型试验结果表明,碎石保护结构下的海底管线在受到撞击作用时,其环向变形远大于轴向变形。

参考文献:

- [1] MACDONALD K A, COSHAM A, ALEXANDER C R, et al. Assessing mechanical damage in offshore pipelines-two case studies[J]. Engineering Failure Analysis, 2007, 14(8): 1667 - 1679.
- [2] WIERZBICKI T, SUH M S. Indentation of tubes under combined loading[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1988, 30(3/4): 229 - 248.
- [3] ZEINODDINI M, HARDING J E, PARKE G A R. Effect of impact damage on the capacity of tubular steel members of offshore structures[J]. Marine Structures, 1998, 11(4/5): 141 - 157.
- [4] 杨秀娟, 修宗祥, 闫相祯, 等. 海底管道受坠物撞击的三维仿真研究[J]. 振动与冲击, 2009, 28(11): 47 - 50. (YANG Xiu-juan, XIU Zong-xiang, YAN Xiang-zhen, et al. 3D

- simulation of submarine pipeline impacted by dropped objects[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, **28**(11): 47 - 50. (in Chinese))
- [5] 黄小光, 孙 峰. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的海底管道受抛锚撞击动力学仿真[J]. 中国海洋平台, 2012, **27**(5): 41 - 44. (HUANG Xiao-guang, SUN Feng. Application of ANSYS/LS-DYNA in dynamic simulation of submarine pipeline in impacted by an anchor[J]. China Offshore Platform, 2012, **27**(5): 41 - 44. (in Chinese))
- [6] DET NORSKE V. Recommended practice DNV-RP-F107 risk assessment of pipeline protection[M]. Norske: Det Norske Veritas, 2010.
- [7] 闫澍旺, 嵯瑞花, 王武刚, 等. 冲击荷载作用下岩土材料能量耗散的有限元分析[J]. 工程力学, 2013, **30**(5): 160 - 164. (YAN Shu-wang, ZHUO Rui-hua, WANG Wu-gang, et al. Finite element analysis on energy dissipation of geo-materials incurred by impacting load[J]. Engineering Mechanics, 2013, **30**(5): 160 - 164. (in Chinese))
- [8] 杨秀娟, 闫 涛, 修宗祥, 等. 海底管道受坠物撞击时的弹塑性有限元分析[J]. 工程力学, 2011, **28**(6): 189 - 194. (YANG Xiu-juan, YAN Tao, XIU Zong-xiang, et al. Elastic-plastic finite element analysis of submarine pipeline impacted by dropped objects[J]. Engineering Mechanics, 2011, **28**(6): 189 - 194. (in Chinese))
- [9] 李鹏飞, 严 颖, 季顺迎. 颗粒物质缓冲性能的离散元模拟[M]// 颗粒材料计算力学研究进展. 大连: 大连理工大学出版社, 2012: 189 - 195. (LI Peng-fei, YAN Ying, JI Shun-ying. Discrete element simulation of impact-absorbing capacity of granular materials[M]// Advances in Computational Mechanics of Granular Materials. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2012: 189 - 195. (in Chinese))
- [10] TIMOSHENKO S P, GOODIER J N. Theory of elasticity[M]. 2nd ed. New York: McGraw-Hill Book Company Inc., 1951.
- [11] HAFF P K, ANDERSON R S. Grain scale simulations of loose sedimentary beds: the example of grain-bed impact in Aeolian saltation[J]. Sedimentology, 1993, **40**: 175 - 198.
- [12] 陈国兴. 岩土地震工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2007. (CHEN Guo-xing. Geotechnical earthquake engineering[M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese))

河海大学岩土工程研究所施建勇教授课题组招聘博士后

项目背景: 依托国家自然科学基金面上和重点项目等课题, 河海大学岩土工程研究所、堤坝与岩土力学教育部重点实验室施建勇教授课题组现公开招聘博士后 1~2 名。拟从事的课题研究包括但不限于:

(1) 垃圾土变形与强度变化理论

开展不同恒定温度下垃圾土的应力路径三轴试验, 建立温度影响垃圾土变形和强度特性模型。根据不同恒定温度下垃圾土应力路径三轴试验成果, 研究垃圾土在复杂应力路径下的屈服特性和破坏特性, 建立考虑温度影响的垃圾土弹塑性本构模型和强度理论。

(2) 衬里界面特性试验与力学模型

由可控恒温大型叠环式界面剪切仪, 开展垃圾填埋场土工膜界面细观变化规律和含有多种土工合成材料多层复合衬里在加载过程中剪切特性研究, 建立考虑温度分布影响的垃圾填埋场多层复合衬里界面剪切变形和强度模型。

岗位要求: ①具有岩土工程、工程力学或与上述学科密切

相关的博士学位; 有垃圾填埋、非饱和土力学相关研究经历的更佳。②具有独立开展科学研究工作的能力, 在所属研究领域至少发表过 1 篇 SCI 检索论文; ③具有弹塑性力学、非饱和土力学理论基础, 较强的材料本构模型相关试验与计算分析能力; ④具有优秀的职业道德和素养, 诚实可信、责任心强、具有团队合作意识; ⑤具有良好的写作和交流能力, 身体健康。

其他需符合河海大学博士后工作管理办法的基本要求。

岗位待遇: 基本工资及福利待遇依据河海大学博士后工作管理办法执行; 其他待遇与岗位奖励面议。

截止日期: 此招聘长期有效, 招满为止。

应聘方式: 联系人徐冉老师, E-mail: tenderlily@163.com, 电话: 025-83787606。

应聘者请将个人简历以及相关科研能力证明材料(如学历证书、论文、科研经历证明等材料复印件)发送至联系人, 邮件主题请注明博士后应聘。我们会在收到材料的 2 周之内与应聘者联系后续事宜。