

环境荷载参数对钢悬链线立管动力响应的影响

张伟, 覃振东

(天津大学 建筑工程学院, 天津 300072)

摘要: 海洋环境变化多端, 钢悬链线立管(SCR)在复杂的环境荷载作用下容易发生疲劳破坏而影响安全, 为研究立管在环境荷载作用下的动力响应, 本文利用 ABAQUS 有限元软件对 SCR 建模, 在立管上部悬挂点施加位移边界条件模拟浮体的运动, 在立管的触地段采用刚度基于 $P-y$ 曲线的非线性弹簧单元模拟立管与海床的相互作用, 并通过调节立管环境荷载参数, 研究了浮体运动、波浪振幅、周期和海流速度等参数对钢悬链线立管动力响应的影响。结果表明: 钢悬链线立管随着环境荷载参数的变化呈现出不同的动力响应, 立管对浮体的垂荡运动更敏感; 波浪的振幅越大、周期越小, 立管触地点与悬挂点的动力响应越大; 海流速度增大, 悬垂段长度会变大。

关键词: 钢悬链线立管; $P-y$ 曲线; 非线性弹簧; 环境荷载; 动力响应

中图分类号: TV314

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)03-0099-07

Effect of parameters of environmental load on dynamic response of steel catenary riser

ZHANG Wei, QIN Zhendong

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

Abstract: The marine environment is changeful. The steel catenary riser is prone to produce fatigue damage so as to affect the safety of production on effect of complex marine environmental load. In order to study the dynamic response of the riser under environmental load, the paper built SCR model by use finite element software ABAQUS. By applying displacement boundary condition on the upper suspension point of the riser to simulate the movement of floating body, using the nonlinear spring whose stiffness is based on $P-y$ curve to simulate the riser-soil interaction, adjusting the parameters of environmental load on the riser, it studied the influence of floating body motion, wave amplitude, wave period and current velocity on SCR dynamic response. The results show that the steel catenary riser presents different dynamic response with the change of environmental load, the riser is more sensitive to heaving motion of floating body; the larger the wave amplitude, the less is its period, the larger the dynamic response of the riser on suspension point and touchdown point; with the increase of current speed, the overhanging length gets bigger.

Key words: steel catenary riser; $P-y$ curve; nonlinear spring; environmental load; dynamic response

随着深海油气开发技术的不断发展, 钢悬链线立管(SCR)作为近年来发展起来的一种新型的立管型式, 由其适用深水、建造成本低、对大漂移浮体运动具有很强的适应性和耐高温高压条件等特点, 逐渐取代了传统的顶张力立管和柔性立管, 成为深水开发的首选立管型式^[1](图1)。钢悬链线立管是集生产与运输于一体的立管系统, 延长度方向大致分为悬垂段和流线段, 两段的连接点为触地点(TDP), 其悬垂段通过接头与平台相连, 在风浪流及平台的共同作用下, 承受较大的交变荷载, 而流线段一端连

接着海底井口, 同时又与海床土体相互作用, 因此, 整个立管系统在海洋环境下的受力十分复杂, 长期作用下甚至在极端海况下很容易发生疲劳破坏导致油气泄漏, 因此, 有必要对应用越来越广泛的钢悬链线立管的整体特性进行深入的研究, 以达到安全生产的目的, 避免安全事故的发生。

钢悬链线立管(SCR)的整体特性尤其是动力分析涉及到非线性与大变形问题, 存在着大量未知问题值得进行深入的探讨。而悬挂点与触地点区域的应力情况复杂, 是钢悬链线立管结构分析的特征点,

也是钢悬链线立管数值模拟的难点。

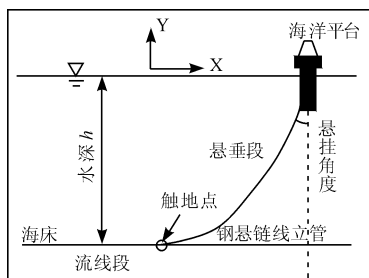


图1 钢悬链线立管系统示意图

Bai 和 Tang 等^[2]人研究了 SCR 在浮体平台运动作用下的疲劳特性。Xu 和 Jesudasan 等^[3]人研究了超深水环境中的波浪载荷对 SCR 的疲劳特性影响。Nakhaee 和 Zhang^[4]基于非线性管土相互作用模型研究了沟槽对 SCR 的动力特性的影响。Martins 和 Higashi 等^[5]用频域分析法对钢悬链线立管的参数进行分析,探讨了立管悬挂点附近的疲劳特性。董永强^[6]基于 ABAQUS 有限元软件对钢悬链线立管进行了静力分析和动力分析。傅俊杰^[7]考虑海洋环境荷载,用非线性弹簧模拟管土作用,分析了 SCR 的动力响应以及立管触地点区域的疲劳特性。何宁和王波等^[8]人利用 ABAQUS 有限元软件研究了深水钢悬链线立管系统在波浪、海流和浮体运动等载荷单独作用和共同作用下的动力响应。以上对钢悬链线立管的研究都没有对环境荷载参数进行深入的研究,而立管海洋环境是变化多端的,环境荷载对钢悬链线立管的影响也会随着环境参数的变化而变化。故本文采用 ABAQUS 有限元软件对钢悬链线立管进行建模分析,管土相互作用模型采用非线性弹簧单元模拟,并通过调节立管环境荷载参数,研究浮体运动、波浪振幅、周期和海流速度等参数对钢悬链线立管动力响应的影响。

1 基本理论

1.1 SCR 环境荷载

钢悬链线立管在海洋中主要受到波浪力、海流以及风浪流引起的平台运动、地震、冰荷载等作用,其中最重要的就是波浪和海流的作用。波浪是由风、大气压力变化、天体的引潮力和海底地震等诸多因素引起的水体周期性震荡运动^[9],在近海工程中,波浪力对海工结构物的作用很大,是主要外荷载。而钢悬链线立管属于小尺度海工结构,其管径与波长相比远小于 0.2,故波浪和海流对立管的作用主要是粘滞效应引起的拖曳力和附加质量效应引

起的惯性力组成,可以用莫里森 (Morison) 方程^[10]计算。在深海环境中,波高与水深相比很小,故采用 Airy 波理论计算水质点的速度和加速度,然后结合海流速度,通过莫里森方程计算得到立管所受的拖曳力和惯性力。

1.2 管土相互作用模型

钢悬链线立管与海床间的相互作用是由于上部浮体运动牵动引起的,而上部浮体受周期性的波浪作用,故浮体的运动也具有一定的周期性,这导致了立管与海床之间的相互作用是周期性的,主要表现在管土的接触状态上。接触状态主要可分为 4 种情况:未接触状态、初入土状态、上升状态、再入土状态。后 3 种状态随浮体的运动周期出现。所以管土间的相互作用有一定的规律可循,弄清这一规律就可以用数值计算的方法来表示管土相互作用模型。

Randolph^[11]等人提出了用基于双曲线的刚度计算公式来描述触地点的管土相互作用的非线性模型,模型中的土壤刚度由入土位移决定并在空间上沿触地点发生变化。该计算模型与管土相互作用的过程相对应,分为 4 个过程:未接触、初入土、上升和再入土。图 2 为该计算模型不同过程的土体阻力变化图。

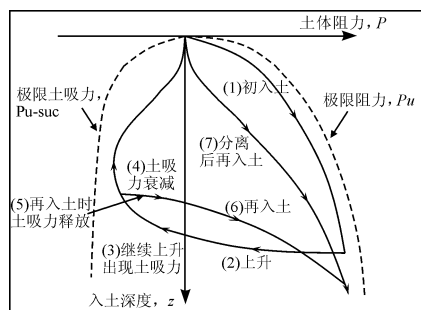


图2 不同过程的土体阻力变化特点

Randolph 等人提出的土体计算模型有两个主要特点:

(1) 每一个入土过程中的土体阻力是无量纲入土深度 z/D 的函数值,表达式如下:

$$P(z) = f\left(\frac{z}{D}\right) \quad (1)$$

式中: $P(z)$ 为每单位长度海床土体阻力; z 为入土深度; D 为立管直径。

(2) 每一个过程的土体阻力解析式中都用到双曲线表达式,不仅能使计算模型对微小的位移变化有较高的刚度变化响应(如上升过程),还保证了 $P(z)$ 随着入土过程中入土深度 z 的增加逐渐接近土体的极限阻力,或是随着上升过程中入土深度 z

的减小而逐渐接近土体的极限土吸力。

这一计算模型给管土相互作用模型的数值模拟提供了很大的帮助,在海洋立管响应分析中得到了广泛的应用。由于模型研究的是土体阻力-入土位移曲线关系,故也称为 $P-y$ 曲线模型,其中 y 代表入土深度 z ,取向向下为正。目前,国内外常用基于 $P-y$ 曲线的、与地面相连接的非线性弹簧单元来模拟管土之间的相互作用(图 3),弹簧的刚度大小为 $P-y$ 曲线上对应入土深度的割线斜率大小,图 4 为简化后 $P-y$ 曲线,这一方法经过大量的研究和应用收到了良好的计算效果,有一定的可行性。故本文将结合给定的土壤参数,根据 Randolph 等人提出的 $P-y$ 曲线计算公式,得到相应的 $P-y$ 曲线,确定非线性弹簧刚度的大小,建立管土相互作用模型。

2 钢悬链线立管模型

2.1 建立模型

钢悬链线立管是由许多具有一定长度的钢管焊接而成的,沿长度方向的尺度远大于其横截面的尺寸,属于极细长的结构,故本文用管形梁单元来模拟整个立管,在立管触地段的梁单元节点上设置与地面相连接的非线性弹簧单元(SPRING1 单元),立管参数参考国内外常用的 SCR 系统基本参数及工程应用实例取如表 1 所示,海洋环境参数与 ABAQUS/AQUA 模块中的水动力参数见表 2,为了方便研究,假设波浪方向与海流方向相同,入射角均为 180° ,沿 x 轴正向传播,研究 SCR 平面内的运动响应,模型设为 2D 平面(图 1),触地段也只设置垂向上的弹簧单元。计算 $P-y$ 曲线的海床土体参数见表 3。

由于本文研究的是立管在环境荷载作用下稳定的动态响应,故不考虑海床土体刚度的衰减,将弹簧

刚度近似取为 $P-y$ 曲线中初入土的三段折线斜率,如图 5 所示。由图 5 得对应弹簧刚度为:入土深度为 $0 \sim 0.04\text{ m}$ 时, $K_1 = 9\,3000\text{ N/m}^2$;入土深度为 $0.04 \sim 0.18\text{ m}$ 时, $K_2 = 18\,700\text{ N/m}^2$;入土深度大于 0.18 m 时, $K_3 = 6\,800\text{ N/m}^2$ 。

表 1 立管参数				m, Pa, kg/m ³ , N/m, m/s ² , (°)	
参数	数值	参数	数值		
长度 L	2500	立管密度 $\rho_{\text{管}}$	7850		
外径 D	0.3556	管内流体密度 $\rho_{\text{内}}$	988		
壁厚 t	0.017	水下浮重 W	1200		
弹性模量 E	2.07×10^{11}	重力加速度 g	9.8		
泊松比 λ	0.3	初始悬挂角 a	12		

表 2 环境参数				m, s, m/s, kg/m ³	
参数	数值	参数	数值		
水深 h	1500	海水密度	1025		
波高 H	6	拖曳力系数 CD	1.2		
波周期 T	8	惯性力系数 CM	2.0		
表面海流速度	1.07	附加质量系数 CA	1.0		
海床海流速度	0				

表 3 海床土体参数		kPa, kPa/m	
海床土体参数	数值		
初始土体剪切模量 S_{u0}	3.0		
土体剪切模量梯度 S_{ug}	1.3		
幂律系数 a	6.73($y/d < 0.5$), 6.15($y/d > 0.5$)		
幂律系数 b	0.29($y/d < 0.5$), 0.15($y/d > 0.5$)		
标准化刚度 K_{max}	200		
土吸力率 f_{suc}	0.5		
土吸力衰减距离参数 λ_{suc}	0.6		
再入土抵消参数 λ_{rep}	0.5		

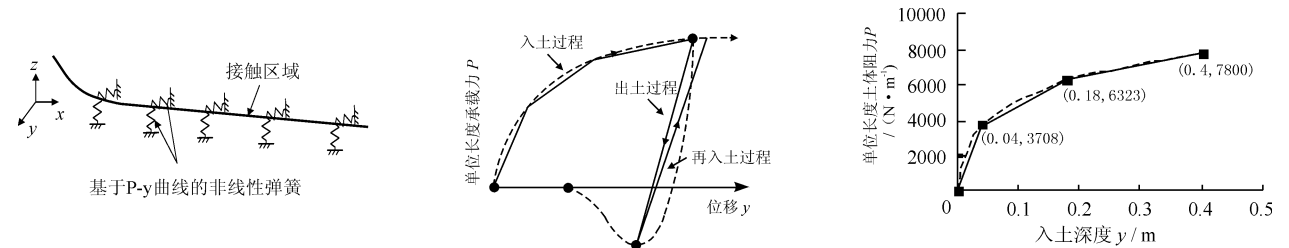


图 3 管土相互作用模型

研究表明,远离触地点的触地段立管受到立管垂向运动的影响可以忽略不计,故立管下端流线段的端点采用铰支边界条件;而 SCR 上部悬挂点通常是用柔性接头或者应力接头连接到浮体上,为了方

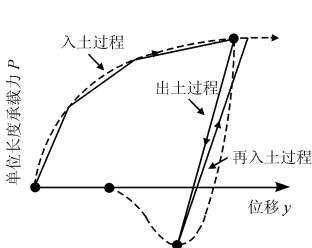


图 4 简化 $P-y$ 曲线

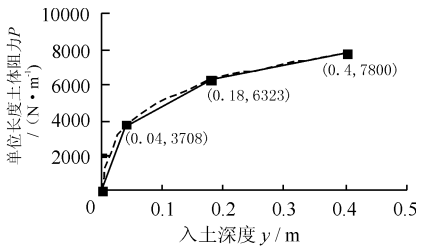


图 5 SCR 的 $P-y$ 曲线

便动力分析时加载浮体位移荷载模拟浮体在波浪作用下的运动,因此悬挂点也采用铰支边界条件,在静态分析步中起到约束立管上端自由度的作用,而在加载环境荷载的动态分析步中,悬挂点改为运动边

界条件,以模拟浮体的运动,计算立管的响应。

分析过程主要包括两个分析步(step):第一个为静态分析步,主要用来调整钢悬链线立管在重力和浮力作用下的姿态,使立管上部悬挂角度满足初始悬挂角度值(12°);第二个为动态分析步,用于研究钢悬链线立管在浮体运动、波浪和海流等参数的作用下的动力响应,分析时间以达到稳态动力响应的标准取值,经过实际建模调整,动态分析步取为 10 个波浪周期即满足标准。

2.2 模型验证

建立好钢悬链线立管有限元模型后,由于缺乏相似的对比模型和数据,需要通过分析计算结果判断模型的正确性,在此基础上才能使用该模型进行后续的动力分析。

图 6 为本模型计算得到的静态分析步结束时立管沿长度方向的 Mises 应力分布图,由图可知,钢悬

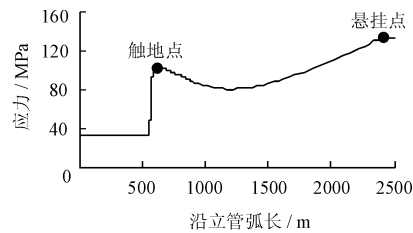


图 6 静态分析步结束时的应力分布

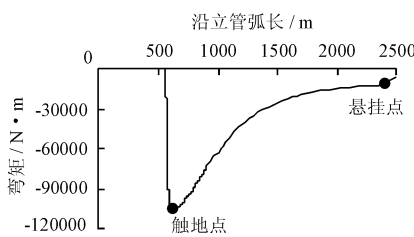


图 7 静态分析步结束时的弯矩分布

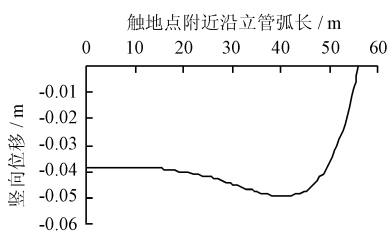


图 8 触地点附近沟槽形状

3 SCR 环境荷载影响参数分析

为了研究比较环境荷载对 SCR 的影响,对立管在浮体运动形式、波浪振幅、波浪周期和海流速度等参数影响下的系统响应分别做了模拟分析。

3.1 浮体运动的影响

钢悬链线立管在海洋环境中所受的作用主要是由波浪和海流引起的作用,而与立管直接相连的上部浮体对波浪的作用很敏感,在波浪作用的带动下会发生各个方向上的随机运动,而浮体的运动又会带动水面下立管的运动响应,立管响应程度的大小

链线立管的悬挂段至触地点附近的应力曲线呈现出“两边高,中间低”的 U 字形,即钢悬链线立管的 Mises 应力局部极大值出现在两个位置:上部悬挂点和底部触地点附近。这一结果与文献[12]和[13]中得出的结论一致,证明了本文构建模型的正确性。

图 7 为 SCR 弯矩分布情况,由钢悬链线立管的结构特点可知,触地点(TDP)作为立管悬挂段和流线的交点,它附近的弯曲程度是整个立管中最大的部分,因此弯矩也是最大的,悬挂点和立管低端点附近的弯曲程度很小,与触地点相比弯矩很小,本结构模型可行。

在非线性软粘土海床上,钢悬链线立管会在初始触地段挖出一个有弯曲垂直剖面的沟槽形状,与刚性海床相比能减小立管与土的接触力。图 8 为本模型触地点附近的沟槽形状,由图可知本文采用的非线性弹簧单元可行。

将直接影响其疲劳寿命进而影响安全生产,尤其是悬挂点和触地点的响应,更应该引起注意。

为了研究哪一种运动形式对钢悬链线立管的动力响应影响最严重,本文针对钢悬链线立管的结构特点,考虑浮体运动的方向相对于悬挂点与触地点的不同有可能产生不同的影响,以立管上部悬挂点近似代表浮体中心建立 3 种直角坐标系,如图 9 ~ 11 所示,研究浮体 3 组典型的振荡运动进行比较,而浮体绕轴线的摇动相对于振荡运动幅度比较小,不予以考虑。

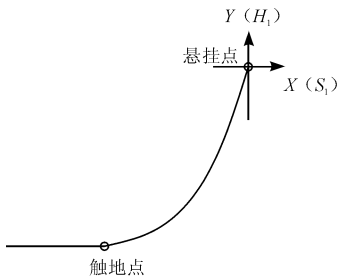


图 9 全局坐标系

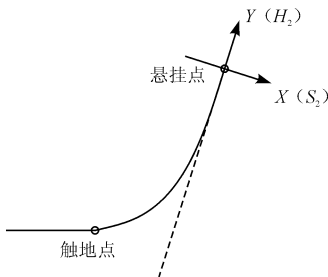


图 10 与悬挂点立管轴线相切的局部坐标系

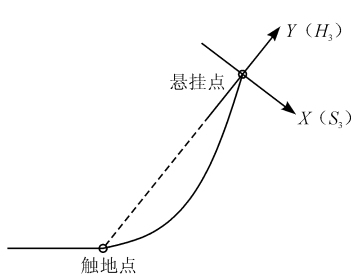


图 11 悬挂点与触地点连线上的局部坐标系

在 SCR 模型上部悬挂点处的各个方向上分别施加振幅均为 2 m、周期与波浪相同($T = 8\text{ s}$)的正弦运动边界条件,分析时间为 10 个周期,即 80 s,其运动响应表达式如下:

$$U = 2 \sin\left(\frac{2\pi}{8}t\right)$$

(2)

然后通过 ABAQUS 数值计算,得到各个方向上的浮体运动作用下的立管触地点和悬挂点的动力响应,如表 4 所示。

表 4 立管悬挂点与触地点应力变化幅值			MPa		
浮体运动	悬挂点	触地点	浮体运动	悬挂点	触地点
S_1	16.3	29.3	$S_2 + H_2$	63.1	96.7
H_1	61.9	95.0	S_3	25.1	45.5
$S_1 + H_1$	80.4	119.8	H_3	58.1	89.9
S_2	12.5	2.9	$S_3 + H_3$	34.9	53.9
H_2	63.1	99.3			

由表 4 可知, $H_1 + S_1$ 的运动组合对立管的影响最大,单向运动中与上部悬挂点处的立管轴线垂直的浮体运动 S_2 对立管的影响最小,尤其是触地点处的应力几乎没有变化;而与上部悬挂点处的立管轴线相切的浮体运动 H_2 对立管的影响作用最大,悬挂点与触地点的应力变化幅值均是所有单向运动中的最大值(图 12 ~ 13),而组合运动具有较大的随机性,其真正的运动方向不好把握,故针对单向运动进行研究更有意义;在所有单向运动中 H_2 最接近组合运动对立管产生的影响,因此,可以认为沿悬挂点处立管的轴线方向的浮体垂荡运动 H_2 对立管影响的

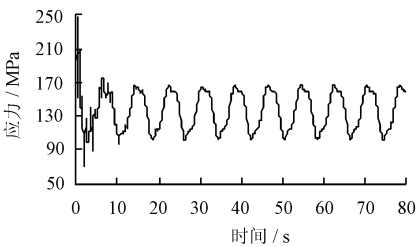


图 12 H_2 作用下立管悬挂点应力历程

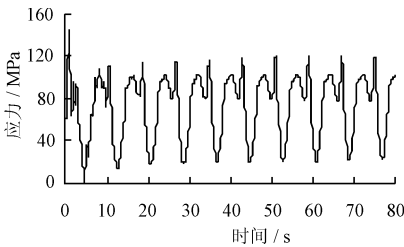


图 13 H_2 作用下立管触地点应力历程

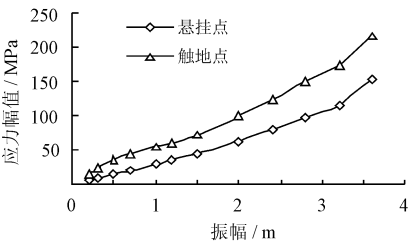


图 14 周期为 8 s 的应力幅值 - 振幅曲线

由图可知,波浪振幅越大,立管的悬挂点和触地点的应力变化越大,悬挂点的应力变化与振幅变化基本上呈线性的关系,而在触地点处,由图中曲线可知,当振幅比较小时(小于 1m),应力变化幅值与振幅变化是近似线性相关的,也就意味着土壤阻力的非线性不影响立管的响应,所以当波浪振幅较小时,可以用线性土体模拟管土的相互作用,而随着振幅的增大,若继续沿用小振幅的线性土体计算,得到的

贡献是最大的,对其重点研究和控制,可以有效的降低立管关键位置的疲劳损伤程度,保证安全生产。

3.2 波浪振幅的影响

波浪作用主要通过影响浮体的运动对立管产生影响,浮体在波浪振幅的直接作用下在静平衡位置做周期性受迫振动,因此,浮体的振幅变化与波浪振幅的变化是一致的,而浮体在立管悬挂点轴线方向的垂荡运动 H_2 对立管的影响最大,故本节通过改变浮体的垂荡运动 H_2 的振幅来模拟波浪振幅的变化对立管的动力响应的影响。

对 SCR 模型的悬挂点分别施加相同周期、不同振幅的浮体垂荡运动 H_2 运动边界条件,同时,考虑到振幅变化影响结果有可能随周期的改变而改变,本节研究两组不同周期下的振幅变化进行对比,如表 5 所示。

图 14 与图 15 分别为两种周期下的立管应力变化幅值 - 振幅曲线。

表 5 H_2 运动振幅取值			m		
编号	振幅		编号	振幅	
	$T = 8\text{s}$	$T = 12\text{s}$		$T = 8\text{s}$	$T = 12\text{s}$
a_1	0.2	0.2	a_7	1.5	1.6
a_2	0.3	0.4	a_8	2.0	2.0
a_3	0.5	0.6	a_9	2.4	2.5
a_4	0.7	0.8	a_{10}	2.8	3
a_5	1.0	1.0	a_{11}	3.2	3.6
a_6	1.2	1.2	a_{12}	3.6	4.2

应力变化幅值将比真实值大,因此,用线性土体模型进行疲劳设计偏于保守,会造成立管材料强度的浪费以及经济的浪费,当波浪振幅较大时,用非线性土体模型对立管进行研究更准确。

3.3 波浪周期的影响

浮体在波浪的作用下做受迫振动,因此当浮体运动达到稳定状态时,其振动的频率与驱动力(波浪)频率相同,即浮体的运动周期与波浪的周期相

同,故本文通过改变浮体的运动周期来模拟波浪周期对立管动力响应的影响。

对 SCR 模型的悬挂点分别施加相同振幅、不同周期的浮体垂荡运动 H_2 运动边界条件,同时,考虑到周期变化影响结果有可能随振幅的改变而改变,

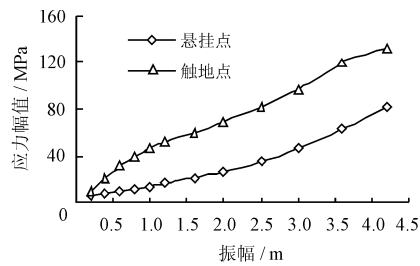


图 15 周期为 12s 的应力幅值 - 振幅曲线

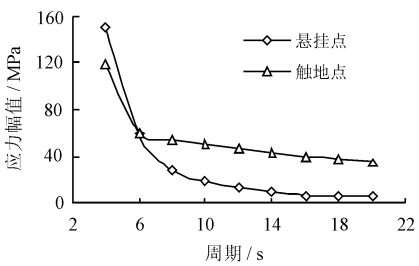


图 16 振幅为 1 m 的应力幅值 - 周期曲线

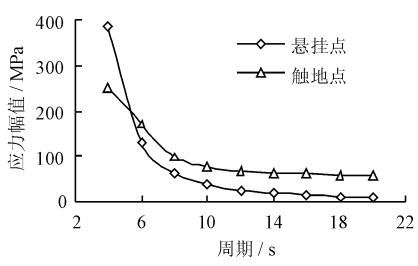


图 17 振幅为 2 m 的应力幅值 - 周期曲线

由图可知,波浪的周期较小时,立管悬挂点和触地点的应力变化幅值较大,可能是由于低周期的波浪容易引起立管系统的共振而使立管产生不稳定的动态响应,使应力变化幅值变大,其中悬挂点的应力变化幅值比触地点的幅值还要大,故在低周期的波浪环境中应注意悬挂点的疲劳状态,避免事故的发生;而随着波浪周期的增大,立管悬挂点和触地点的应力变化幅值逐渐减小,立管系统的响应也逐渐趋于稳定,周期的变化对立管的影响会越来越小。

3.4 海流速度的影响

取表面海流速度分别为 0.4、0.6、0.8、1.07、1.2、1.4、1.7 m/s 等 7 组参数,海剖面近似按海流表面至海床线性递减取值,其他环境参数不变,完成环境荷载加载后,调节立管模型上部悬挂点的水平位移,使初始悬挂角度均为 12° ,然后在悬挂点施加振幅为 2m、周期为 8s 的 H_2 运动边界条件,计算分析不同海流速度参数对立管触地点与悬挂点的影响。

表 6 为不同海流速度参数影响下立管悬挂段的长度变化,可知随着海流速度的增大,立管初始触地点向远离悬挂点的方向移动,立管触地段长度变短,悬垂段长度增加,这可能是由于立管悬垂段所受海流荷载的作用增大而呈绷紧状态引起的。

表 6 不同海流速度对应的悬挂段长度			
m/s, m			
海流速度	悬挂段长度	海流速度	悬挂段长度
0.4	1859	1.2	1949
0.6	1872	1.4	1985
0.8	1890	1.7	2036
1.07	1927		

故本文研究两组不同振幅下的周期变化进行对比,振幅取为 1 和 2 m,周期为 4 ~ 20 s 等 9 组不同的周期。图 16 与图 17 分别为两种振幅下的立管应力变化幅值 - 周期曲线。

图 18 为浮体 H_2 运动下不同海流速度对应的立管悬挂点和触地点的应力变化幅值 - 海流速度曲线。由图可知,在浮体运动的作用下,随着海流速度的增大,立管悬挂点的应力变化幅值也相应的增大,而立管触地点的应力变化幅值却相应的减小趋于稳定,海流速度较小时,浮体的运动作用更容易引起触地点的疲劳破坏,而当海流速度较大时,浮体的运动对立管悬挂点的疲劳损伤影响最大,这一差别可能是由于海流荷载较大时,立管处于紧绷状态,减缓了触地点由于浮体运动产生的振动幅度,从而使应力变化幅值降低,而悬挂点的运动振幅不受立管紧绷状态的影响,反而随海流对悬挂点以下的立管的作用增大而增大。

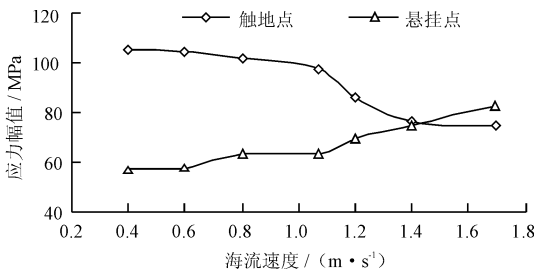


图 18 立管应力变化幅值 - 海流速度曲线

4 结 语

本文利用 ABAQUS 有限元软件对 SCR 进行建模,通过调节立管环境荷载参数,研究了浮体运动、波浪振幅、周期和海流速度等参数对钢悬链线立管动力响应的影响,得到了如下结论与展望:

(1) 立管对浮体的垂荡运动更敏感,与上部悬挂点立管轴线垂直的浮体纵荡运动 S_2 对立管动力

响应的影响最小,与上部悬挂点处的立管轴线相切的浮体垂荡运动 H_2 对立管动力响应的影响最大,尤其是悬挂点和触地点,较大的应力变化容易引起这两个特征点疲劳破坏进而影响安全生产,因此,在实际工程中应对浮体垂荡运动 H_2 重点研究和控制,提高立管的使用寿命。

(2) 波浪的振幅越大,立管触地点与悬挂点的动力响应越大,当波浪振幅比较小时,海床土体的非线性不影响管土的相互作用,可以用线弹性土体模拟海床,而当波浪振幅比较大时,用线性土模拟海床计算得到的应力变化幅值偏大,采用非线性土体模拟结果更真实。

(3) 随着波浪的周期增大,立管的动力响应变小并趋于稳定,周期越小,立管的响应越大,尤其是悬挂点,对于低周期的波浪环境,应重点关注悬挂点的疲劳状态,防止安全事故的发生。

(4) 随着海流速度的增大,立管触地点向左移动,远离悬挂点,悬垂段长度变大,在稳定的浮体运动作用下,触地点的应力变化幅值减小趋于稳定,而悬挂点的应力变化幅值则逐渐增大,可能引起较大的疲劳损伤,应对此采取一定的措施,避免安全事故的发生。

(5) 本文基于简化后的 $P-y$ 曲线的折线斜率来建立非线性弹簧的管土相互作用模型,并且没有考虑土吸力的作用,而实际的管土相互作用是高度复杂的、非线性的,在循环荷载作用下土体刚度会发生衰减,因此对 SCR 在复杂环境荷载作用下的动力研究需要更贴近实际的、更完善的管土相互作用模型。

(6) 本文建立的是二维模型,研究立管平面内的响应,而实际的立管是在三维空间内的运动,会发生立管平面外的响应,今后的工作可以将环境参数的研究应用到三维模型上,得到更多有意义的结论。同时,由于技术的限制,本文用悬挂点代替浮体中心,调节浮体的运动振幅和周期来模拟波浪要素对立管的影响,与实际的波浪要素的影响可能会有误差存在,今后的工作应致力于通过调节波浪要素作用在浮体上实现对立管的动力响应研究。

参考文献:

- [1] 黄维平,白兰兴,李华军. 国外深水钢悬链线立管研究发展现状[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版),2009,39(2):290-294.
- [2] Bai Y, Tang A, O'sullivan E, et al. Steel catenary riser fatigue due to vortex induced spar motions[C]//. Proceedings of the Offshore Technology Conference, 2004.
- [3] Xu J, Jesudasan A S, Fang J, et al. Wave loading fatigue performance of Steel Catenary Risers (SCRs) in ultradeep-water applications [C]//. Proceedings of the Offshore Technology Conference, 2006.
- [4] Nakhaee A, Zhang J. Trenching effects on dynamic behavior of a Steel Catenary Riser [J]. Ocean Engineering, 2010,37(2):277-288.
- [5] Martins C A, Higashi E, Silva R M C. A parametric analysis of steel catenary risers: Fatigue behavior near the top [C]//. The Tenth International Offshore and Polar Engineering Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2000.
- [6] 董永强. 深海钢悬链线立管的分析与设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2008.
- [7] 傅俊杰. 深海钢悬链立管动力分析及触地点疲劳特性评估[D]. 上海:上海交通大学,2010.
- [8] 何宁,王波,王辉,等. 深水钢悬链线立管三维动力分析[J]. 中国海上油气,2010,22(2):129-133.
- [9] 娄敏,董文乙,郭海燕. 波浪作用下海洋立管试验研究及 ANSYS 数值模拟[J]. 中国造船,2010,51(1):73-77.
- [10] 竺艳蓉. 海洋工程波浪力学[M]. 天津:天津大学出版社,1991.
- [11] Randolph M, Quiggin P. Non-linear hysteretic seabed model for catenary pipeline contact[C]//. Proceedings of the ASME 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 2009.
- [12] Karunakaran D, Lund K M, Nordsven N T. Steel catenary riser configurations for North Sea field developments [C]//. Proceedings of the Offshore Technology Conference, 1999.
- [13] Manour G. The impact of the second order vessel motion on the fatigue life of steel catenary risers[C]//. Proceedings of the ASME 23th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2004.