

基于能力谱法导管架平台抗震性能评估

刘红兵¹, 陈国明¹, 朱本瑞¹, 杨东平², 赵康¹, 吕涛¹

(1. 中国石油大学海洋油气装备与安全技术研究中心, 山东青岛 266580; 2. 胜利检测评价研究有限公司, 山东东营 257062)

摘要:针对现行海洋平台抗震规范无法考虑平台结构弹塑性抗震性能及地震失效机制问题, 提出基于能力谱法海洋平台抗震性能评估方法, 获得平台结构抗震性能及失效模式, 解决强震作用下海洋平台结构弹/塑性抗震评估技术难题。基于规范推荐地震弹性设计谱, 采用折减系数建立弹/塑性反应谱, 结合渤海某导管架平台, 采用能力谱法进行弹/塑性抗震性能评估。结果表明: 能力谱法计算简便, 对于以第1阶振型为主导地震响应的平台结构具有较好的精度; 采用能力谱法评估地震惯性载荷时须考虑其高度效应, 可采用倒三角或高度等效加载方式; 桩基失效是平台结构地震作用下主要失效模式, 平台抗震设计时应保证桩腿具有足够强度和入泥深度, 避免强震作用下桩基失效而导致平台结构整体倾覆。

关键词:能力谱法; 导管架平台; 抗震评估; 性能点; 失效模式

中图分类号: TE 52 **文献标志码:** A

引用格式: 刘红兵, 陈国明, 朱本瑞, 等. 基于能力谱法导管架平台抗震性能评估[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2015, 39(5): 124-129.

LIU Hongbing, CHEN Guoming, ZHU Benrui, et al. Seismic performance evaluation for jacket platform based on capacity spectrum method[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015, 39(5): 124-129.

Seismic performance evaluation for jacket platform based on capacity spectrum method

LIU Hongbing¹, CHEN Guoming¹, ZHU Benrui¹, YANG Dongping², ZHAO Kang¹, LÜ Tao¹

(1. Centre for Offshore Engineering and Safety Technology, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. Technology Inspection Center, China Petroleum & Chemical Corporation, Dongying 257062, China)

Abstract: As the current offshore platform seismic code cannot consider the inelastic seismic performance and the seismic failure mechanism, the seismic capacity evaluation method of offshore platform was proposed based on the capacity spectrum method. On this basis, the seismic performance and failure modes were obtained precisely, to solve the problem of evaluating the seismic behavior under strong earthquake. According to the design seismic spectrum, the inelastic reaction spectrum was established by reduction factor, and seismic evaluation of the jacket platform in Bohai sea of China was accomplished. The results show that the capacity spectrum method is suitable for offshore platform, because of easy calculation and creditable precision. The inverse triangle and high equivalence methods could be used to evaluate the earthquake force, so that the effects of altitude are considered. The pile foundation is one of the main causes leading to the platform to fail under seismic loads. When designing the seismic performance of a jacket platform, the strength and driving depth of the leg should be guaranteed, in order to avoid failure of pile foundation under strong earthquake which might lead to the platform to overturn.

Keywords: capacity spectrum method; jacket platform; seismic evaluation; performance point; failure mode

收稿日期: 2015-02-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(51079159, 51209218); 中央高校基本科研业务费专项(15CX06058A)

作者简介: 刘红兵(1988-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为海洋石油装备强度与可靠性等。E-mail: hb_liu1988@163.com。

通讯作者: 陈国明(1962-), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为海洋油气工程及装备、油气安全工程等。E-mail: offshore@126.com。

渤海海域是中国强震频发区之一,具有地震活动强度大,频度高等特点^[1]。海洋石油平台作为一种轻质海洋结构物,抗侧移刚度较小,在强震作用下一旦发生倒塌破坏,将造成巨大的经济损失和严重的次生灾害^[2],因而十分有必要对其进行强震作用下抗震性能评估。目前,中国导管架海洋平台抗震设防还没有制定专业的规范,而是参考陆地上的建筑结构抗震规范,即要求结构满足“小震不坏,中震可修,大震不倒”准则^[3];美国石油学会(API)对海洋平台抗震设防标准及相应概率水准进行了相应规定,即设计地震下满足强度要求,结构与基础无破坏,罕遇地震下满足韧性要求,允许结构与基础有一些损坏,但不能倒塌^[4]。施炜等^[5]指出现行抗震规范设计对结构抗震设计具有较好的指导作用,但难以有效控制结构在地震作用下塑性破坏程度以及失效传递路径。能力谱法作为实现基于性能设计的一个重要方法,既能对结构在多遇地震下弹/塑性抗震性能进行校核,也能确定结构在罕遇地震下潜在的破坏机制,从而找到最先破坏的薄弱部位,为结构抗震设计提供重要依据,已在建筑行业得到广泛的认可,并被 ATC40、FEMA273、FEMA274、日本和韩国等规范纳入^[6-8],但在导管架平台抗震方面应用较少。笔者针对导管架平台的结构特点,给出其能力谱法抗震评估基本原理与步骤,探讨基于规范推荐弹性设计谱构建弹性需求谱、弹塑性需求谱及能力谱的方法,以渤海某导管架平台为例,基于能力谱法进行抗震性能评估及失效模式识别。

1 海洋平台能力谱法基本原理

能力谱法是通过结构进行非线性静力推覆分析,确定结构在预定地震目标下安全性能的一种抗震性能评估方法^[3]。海洋导管架平台结构不同于陆地建筑结构,其工作环境恶劣,地震作用下除了受到地面运动对平台结构产生的载荷外,还受到地震作用下海水运动对平台结构产生的载荷作用。研究表明,海洋导管架平台上部结构质量集中,地震载荷作用下以第一阶振型反应为主^[4],因而进行能力谱抗震分析时,可将平台结构等效为各层具有集中质量的多自由度体系,其地震作用下动力平衡方程可表示为

$$[M+M_w]\{\ddot{X}\}+[C+C_w]\{\dot{X}\}+[K]\{X\}=-[M+M_w]\{\ddot{X}_g\}-[C_w]\{\dot{X}_g\}. \quad (1)$$

式中, $[M]$ 为平台结构质量矩阵; $[M_w]$ 为海水附加质量矩阵; $[C]$ 为平台结构阻尼矩阵; $[C_w]$ 为海水

附加阻尼矩阵; $[K]$ 为刚度矩阵; $\{X\}$ 、 $\{\dot{X}\}$ 、 $\{\ddot{X}\}$ 分别为平台相对侧向位移、速度及加速度向量; $\{\ddot{X}_g\}$ 为地面加速度向量。

$$a_{aC} = \frac{\tau_{base}}{\alpha_1 G}, \quad (2)$$

$$S_{dC} = \frac{\tau_{roof}}{\gamma_1 A_{1,roof}}, \quad (3)$$

$$a_{aI} = a_{aE}/R, \quad (4)$$

$$S_{dI} = \mu \frac{T^2}{4\pi^2} a_{aI}. \quad (5)$$

其中

$$a_1 = \frac{[\sum_{i=1}^N m_i \varphi_{i1}]^2}{[\sum_{i=1}^N m_i][\sum_{i=1}^N (m_i \varphi_{i1}^2)]}, \quad \gamma_1 = \frac{\sum_{i=1}^N (m_i \varphi_{i1})}{\sum_{i=1}^N (m_i \varphi_{i1}^2)}$$

式中, a_{aC} 为能力谱加速度, m/s^2 ; S_{dC} 为能力谱位移, m ; a_{aI} 为弹塑性需求谱加速度, m/s^2 ; S_{dI} 为弹塑性需求谱位移, m ; a_{aE} 为弹性需求谱加速度, m/s^2 ; τ_{base} 为基底剪力, N ; α_1 为第一振型质量参与系数; γ_1 为第一振型参与系数; m_i 为质点 i 质量, kg ; φ_{i1} 为质点 i 处第一阶振型幅值, m ; $A_{1,roof}$ 为第一振型顶点振幅, m ; τ_{roof} 为顶点位移, m ; G 为平台结构重力, N ; μ 为延性系数; T 为结构振动周期, s ; R 为折减系数,其值与延性系数 μ 、结构周期、阻尼比、滞回模型、地震特性等因素有关,常用的模型有 Vindic 模型、Newmark 模型、Borzi 模型及 Miranda 模型^[10-11],本文采用 Vindic 模型^[10]进行折减。

利用能力谱法对平台结构进行抗震能力分析时,首先须构建平台结构抗震能力谱曲线,即对平台结构进行各个方向地震载荷作用下推覆分析,获得平台结构抗震最不利方向基底剪力-顶点位移曲线(pushover curve),并根据式(2)和(3)转化为谱加速度-谱位移曲线(capacity spectrum curve)。然后,构建平台结构抗震弹/塑性需求谱,基于文献[9]给出的4类场地下平台结构抗震弹性需求谱曲线(elastic demand spectrum curve),考虑等效阻尼比作用,通过式(4)和(5)利用折减系数 R 对弹性需求谱进行折减,获得平台结构抗震弹塑性需求谱曲线(inelastic demand spectrum curve)。

将能力谱曲线与弹/塑性需求谱曲线绘制在同一坐标系中,两曲线的交点称为性能点。通过性能点可评估平台结构在该地震作用下的抗震性能:若不存在性能点,说明结构抗震能力不足;若存在性能点,则平台结构抗震性能良好。性能点处的加速度

和位移分别为平台结构谱加速度和谱位移,根据式(2)和(3)转化为平台结构顶点位移和基底剪力,通过顶点位移和基底剪力在基底剪力-位移曲线中的位置可查看平台结构在地震作用下受力情况,确定平台结构塑性铰分布特性,识别平台结构失效模式和路径,综合评估平台结构抗震能力,具体流程如图1所示。

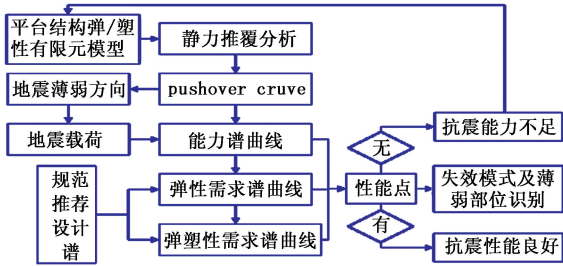


图1 海洋平台能力谱法抗震评估基本流程图

Fig.1 Flow diagram of capacity spectrum method for seismic performance evaluation on offshore platform

2 海洋平台地震载荷推覆分析

2.1 地震载荷及施加方式

地震作用下平台结构受到的地震载荷主要包括地震惯性和动水压力,其中地震惯性力 F_{Gij} 可通过 API 规范推荐公式^[4] 进行计算:

$$F_{Gij} = CK_H r_j \varphi_{ij} \beta_j m_i g. \quad (6)$$

式中, C 为综合影响系数,取 0.35 ~ 0.5; K_H 为水平地震系数; r_j 为结构 j 振型参与系数; φ_{ij} 为 j 振型下质点 i 相对水平位移; β_j 为 j 振型动力放大系数; m_i 为集中在质点 i 的质量, kg; g 为重力加速度, m/s^2 。

地震动水压力主要包括流体附加质量惯性力和流体阻尼力,忽略平台对海水运动的影响,即认为地震动水压力为地震作用下海水速度场和加速度场作用于平台上的惯性力和阻尼力,采用简化 Morison 方程表示地震引起平台结构动水压力为

$$P_{wi} = \rho V_i \ddot{u} + (C_M - 1) \rho V_i (\ddot{u} - \ddot{X} - \ddot{X}_g) + \frac{1}{2} C_D \rho A_i [(\dot{u} - \dot{X} - \dot{X}_g) | (\dot{u} - \dot{X} - \dot{X}_g) |]. \quad (7)$$

式中, ρ 为海水密度, kg/m^3 ; V_i 为水下平台构件体积, m^3 ; A_i 为构件截面面积, m^2 ; C_M 为动水惯性力系数; C_D 为动水黏性阻尼系数; \ddot{u} 为海水绝对加速度, m/s^2 ; \dot{u} 为海水绝对速度, m/s 。

对平台结构进行地震推覆分析时,应使推覆侧向载荷分布模式与地震过程平台结构实际受力分布情况尽量一致,借助弹性体系振型分解反应谱法^[6] 分别将地震惯性力和动水压力作为侧向静载荷施加

在结构上,其中地震惯性侧向载荷可采用 3 种加载模式。

模式一:均布加载模式,结构各层侧向力与该层质量成正比,结构在第 i 层侧向力的增量 ΔF_i 为

$$\Delta F_i = (W_i / \sum_{j=1}^N W_j) \Delta \tau_{base}. \quad (8)$$

模式二:倒三角加载模式,假定结构各层加速度沿高度呈线性分布,结构在第 i 层侧向力的增量 ΔF_i 为

$$\Delta F_i = (W_i h_i / \sum_{j=1}^N (W_j h_j)) \Delta \tau_{base}. \quad (9)$$

模式三:高度等效加载模式,假定结构各层加速度沿高度呈指数分布,结构在第 i 层侧向力的增量 ΔF_i 为

$$\Delta F_i = (W_i h_i^k / \sum_{j=1}^N (W_j h_j^k)) \Delta \tau_{base}. \quad (10)$$

式中, N 为平台结构划分层数; h_i, h_j 分别为结构第 i 层和 j 层距离地面高度, m ; k 为高度指数; $\Delta \tau_{base}$ 为地震惯性载荷引起的基底剪力变化量, N ; W_i, W_j 分别为结构第 i 和 j 层重力载荷, N 。

2.2 地震极限承载能力

以渤海某四腿导管架平台为例,该平台主要由导管架、桩腿和上部组块组成,其底部标高为 -13.4 m,顶部标高为 5.0 m。建模时充分考虑模拟单元的力学特性及结构几何和材料非线性,分别选用 3D 弹塑性单元 PIPE288 和 PIPE20 建立平台导管架与桩腿部分,上部组块采用线弹性单元 PIPE16 和 BEAM188 单元建立,甲板和设备房采用 SHELL63 建立,设备质量采用 MASS21 单元模拟,桩-土非线性相互作用根据土壤 $p-y$ 和 $p-z$ 曲线采用非线性弹簧单元 COMBIN39 模拟。根据地震载荷施加方式,对该平台结构施加烈度 8 度的地震载荷(场地类型取为 III 类场地),由于平台结构对称,取地震载荷方向为 $0 \sim 135^\circ$ (间隔 45°)。通过对各方向地震载荷进行逐级放大,进行静力推覆分析,获得平台结构在各方向地震载荷下极限承载能力曲线,如图 2 所示。

由图 2(a)可知,平台结构在不同角度地震载荷作用下均表现为延性失效,说明平台结构具有一定的冗余性。平台结构在 4 种地震载荷方向下极限承载能力略有差别,其中 0° 方向极限承载能力最小(即该方向为平台结构抗震最不利主轴方向),值约为 3540.3 kN, 135° 方向极限承载能力最大,值约为 3585.4 kN。

图 2(b)为 0°方向地震惯性载荷分别采用不同加载方式获得的平台结构极限承载力曲线。由图 2(b)可知,惯性载荷加载方式对于平台结构失效模式(延性失效)影响不大,但影响结构极限承载力。倒三角和高度等效加载方式下平台结构极限承载力

较接近,而均布加载极限承载能力偏大,这主要是由于均布加载没有考虑地震惯性载荷的高度效应,从而结果偏保守。对比倒三角和高度等效加载方式可知,高度指数 k 对于平台结构极限承载力影响较小,随着 k 值增大,极限承载能力略有减小。

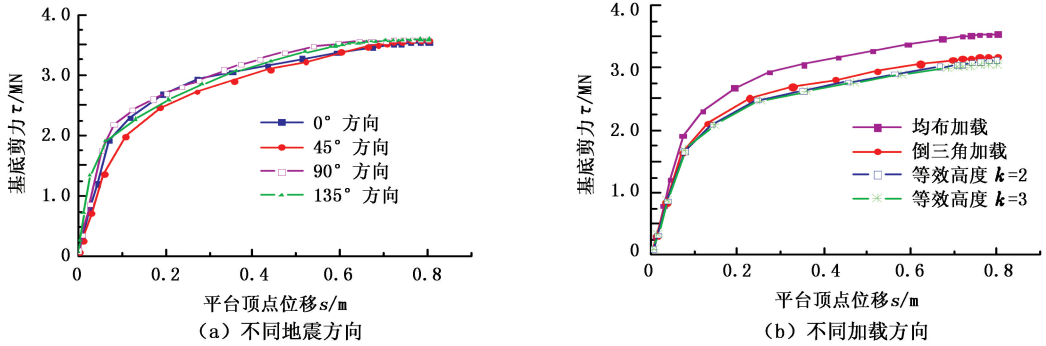


图 2 不同地震方向、不同加载方式下平台结构极限承载力曲线

Fig. 2 Ultimate bearing capacity curve in different directions and different loading modes

3 海洋平台抗震性能评估

3.1 抗震性能

文献[12]中指出,对海洋平台结构进行地震响应分析时,地震惯性力须考虑 3 个方向,即对平台结构最不利主轴方向取惯性载荷 100%,对与此主轴相垂直水平方向取惯性载荷 100%,对与水平面垂直方向取惯性载荷 50%。平台结构 0°方向为最不

利主轴方向,因而对平台结构施加动水压力载荷及 0°方向 100%地震惯性载荷,90°方向 100%地震惯性载荷和垂直方向 50%地震惯性载荷。分别考虑桩土耦合和固支条件下,采用倒三角加载方式对平台结构进行抗震推覆分析,获得平台结构在 3 个方向地震载荷联合作用下极限承载力曲线,并转换为能力谱曲线,同弹/塑性需求谱绘于同一坐标中,如图 3 所示。

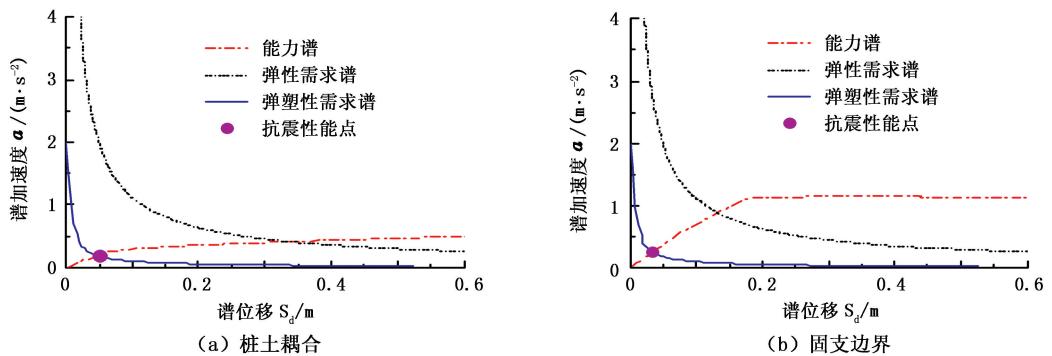


图 3 桩土耦合和固支边界下地震响应性能点

Fig. 3 Performance point under soil-pile interaction and clamped boundary

由图 3 可知,桩土耦合和固支条件下,平台结构均存在性能点,且性能点均位于能力谱曲线弹性区域,即该地震作用下平台结构仍处于弹性变形阶段,平台结构安全,抗震性能良好。对比桩土耦合和固支条件可知,固支条件下平台结构能力谱曲线幅值远大于桩土耦合条件下能力谱曲线幅值,这一方面是由于两种条件下平台结构失效模式不同从而导致极限承载能力不同,另一方面是由于固支条件下平台结构刚度较大,从而导致极限承载能力较大。

分别提取两种边界条件下平台结构性能点处谱位移和谱加速度,并转化为平台结构地震作用下顶点位移和基底剪力,并同 API 地震规范计算结果进行比较分析,见表 1。

由表 1 可知,固支条件下性能点所对应的基底剪力和顶点位移同 API 地震规范计算结果吻合较好,基底剪力和顶点位移误差分别为 8.47% 和 -7.98%,从而说明能力谱法具有较好的适用性。桩土耦合边界下,平台基底剪力和顶点位移相对于

API 固支分别减小 24.5% 及增大 43.6%, 这主要是由于桩土耦合作用下, 桩基部分刚度小, 易发生塑性变形, 从而导致平台结构基底剪力减小, 顶点位移增

大, 与实际情况较为符合, 因而对平台进行抗震性能评估时, 可采用能力谱法评估并需考虑桩土之间的非线性耦合作用。

表 1 两种边界条件性能点

Table 1 Performance point under two different boundaries

| 条件 | 谱位移 S_d/m | 谱加速度 $a_a/(m \cdot s^{-1})$ | 基底剪力 τ_{base}/MN | 顶点位移 s/m | 剪力误差/% | 位移误差/% |
|---------|-------------|-----------------------------|-----------------------|------------|--------|--------|
| API 固支 | — | — | 1.451 | 0.0411 | — | — |
| 能力谱固支 | 0.03262 | 0.2648 | 1.580 | 0.0369 | 8.47 | -7.98 |
| 能力谱桩土耦合 | 0.05096 | 0.1838 | 1.097 | 0.0576 | -24.5 | 43.6 |

3.2 失效模式

进一步考虑平台结构在地震载荷作用下失效模式, 识别平台结构地震作用下薄弱部位, 将地震载荷逐级放大至平台结构发生塑性变形, 提取平台结构塑性应变分布, 如图 4 所示。两种边界条件下, 平台结构失效模式略有不同。桩土耦合边界条件下, 平台结构失效模式主要表现为: 地震载荷作用下, 导管架顶层斜撑管节点首先发生塑性变形失效如图 4 (a) 红圈所示, 随着地震载荷的增大, 导管架桩腿在

入泥处附近因承受弯压载荷过大而发生屈服破坏, 如图 4 (b) 蓝圈所示; 固支条件下, 平台结构失效模式主要表现为: 导管架顶层斜撑管节点出现塑性变形而失去承载能力, 斜撑管节点失效后, 斜/横撑和导管架共同承担失效构件引起的载荷增量, 随着载荷逐级增大, 底部水平横撑和斜撑逐渐发生塑性变形, 进一步引起结构内力重分布, 最后导致平台结构底部固定端附近发生屈服破坏失效。

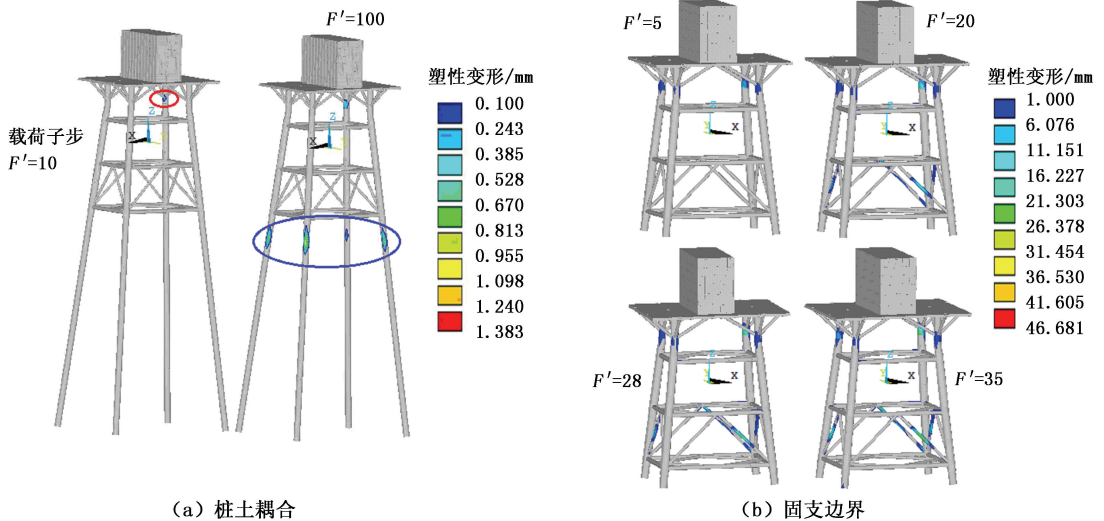


图 4 桩土耦合和固支边界下平台结构失效模式

Fig. 4 Failure modes of platform under soil-pile interaction and clamped boundary

由图 4 可知, 考虑桩土耦合非线性作用, 桩基失效是平台结构主要的失效模式, 平台结构达到极限状态时, 桩腿发生屈服形成塑性铰, 导致平台变形增大, 极限承载能力降低, 因而平台在抗震设计时应保证平台结构桩腿具有足够的强度和入泥深度, 从而避免强震作用下桩基失效而导致平台结构整体倾覆。

4 结论

(1) 性能点处顶点位移和基底剪力结果同 API 抗震规范计算结果吻合较好, 可以满足工程抗震需要; 能力谱法可较好地识别地震作用下平台结构地

震响应、失效模式及失效传递路径; 边界条件对平台结构抗震性能影响较大, 进行能力谱抗震分析时须考虑桩土耦合非线性作用。

(2) 桩基失效是平台结构抗震性能的重要影响因素。在地震载荷作用下平台结构达到极限状态, 桩基易发生屈服形成塑性铰, 导致平台变形增大, 极限承载能力减小, 抗震性能降低, 因而在抗震设计时平台结构应保证桩腿具有足够的强度和入泥深度, 从而避免强震作用下桩基失效而导致平台结构整体倾覆。

参考文献:

- [1] 王健. 渤海海域历史地震和海啸[J]. 地震学报, 2007, 29(5):549-557.
WANG Jian. Historical earthquakes and a tsunami in Bohai Sea[J]. Acta Seismologica Sinica, 2007, 29(5):549-557.
- [2] 朱本瑞, 陈国明, 林红, 等. 极端波浪载荷下导管架平台抗倒塌性能评估[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2014, 38(3):135-141.
ZHU Benrui, CHEN Guoming, LIN Hong, et al. Anticollapse performance assessment of jacket offshore platforms in extreme storm waves[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014, 38(3):135-141.
- [3] 施伟, 叶列平, 陆新征. 抗地震倒塌能力谱研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(10):1-7.
SHI Wei, YE Lieping, LU Xinzhen. Study of collapse resistant capacity spectrum [J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(10):1-7.
- [4] American Petroleum Institute. RP2A-WSD Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms-working stress design [S]. Houston, 2007.
- [5] 施伟, 叶列平, 陆新征, 等. 不同抗震设防 RC 框架结构抗倒塌能力的研究[J]. 工程力学, 2011, 28(3):41-48, 68.
SHI Wei, YE Lieping, LU Xinzhen, et al. Study on the collapse-resistant capacity of RC frames with different seismic fortification levels [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(3):41-48, 68.
- [6] 林世斌, 谢礼立. 基于能力谱的建筑物抗震能力研究:以汶川地震两栋钢筋混凝土框架结构抗震能力分析为例[J]. 土木工程学报, 2012, 45(5):31-40.
LIN Shibin, XIE Lili. A study of seismic capacity of buildings based on capacity spectrum: case studies on seismic capacity analysis of two RC frame structures in the Wenchuan earthquake [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(5):31-40.
- [7] 卢明奇, 杨庆山. 地震作用下相邻结构的防震缝宽度确定方法[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2012, 36(1):145-149.
LU Mingqi, YANG Qingshan. Method for determining seismic gaps width of adjacent structures subjected to earthquakes [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2012, 36(1):145-149.
- [8] 何浩祥, 李宏男. 基于规范弹性反应谱建立需求谱的方法[J]. 世界地震工程, 2002, 18(3):57-63.
HE Haoxiang, LI Hongnan. A method for establishing demand spectra based on elastic spectra of seismic design code for buildings [J]. World Earthquake Engineering, 2002, 18(3):57-63.
- [9] 中国国家能源局. SY/T4084 滩海环境条件与载荷技术规范[S]. 北京: 国家能源局, 2010.
- [10] VIDIC T, FAJFAR P. Consistent inelastic design spectra: strength and displacement [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1994, 24(5):507-521.
- [11] BORIZ B, ELNASHAI A S. Refined force reduction factors for seismic design [J]. Engineering Structures, 2000, 22(9):1244-1260.
- [12] CCS. 浅海固定平台建造与检验规范[S]. 北京: 中国船级社, 2004.
- [13] Federal Emergency Management Agency. FEMA P695 Quantification of building seismic performance factors [S]. Washington D C: Federal Emergency Management Agency, 2009.
- [14] 朱本瑞, 陈国明, 刘康, 等. 深水导管架平台抗台风极限承载能力[J]. 石油学报, 2014, 35(1):152-158.
ZHU Benrui, CHEN Guoming, LIU Kang, et al. Typhoon-resistant ultimate bearing capacity of deep-water jacket platforms [J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(1):152-158.
- [15] CHOPRA A K. Dynamic of structures: theory and applications to earthquake engineering [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005:288-295.
- [16] ZAREIAN F, KRAWINKLER H. Assessment of probability of collapse and design for collapse safety [J]. Earthquake Engineering and Structure dynamics, 2007, 36(13):1901-1914.
- [17] LIN Shibin, XIE Lili, GONG Maosheng, et al. Performance-based methodology for assessing seismic vulnerability and capacity of buildings [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2010, 9(2):157-165.

(编辑 沈玉英)