

文章编号:1001-4500(2008)04-023-04

基于 SACS 的海洋固定平台地震响应分析

艾志久¹, 王浚璞¹, 李旭志², 姜 巍², 关 键²
(1. 西南石油大学,成都 610500;2. 中油辽河工程公司,盘锦 124010)

摘 要: 主要针对地震载荷作用下的海洋平台结构动力响应问题进行研究。分析采用海事结构有限元分析程序 SACS,建立动力分析有限元模型,使用 Guyan 缩聚法对平台结构进行动力特性分析,在动力特性分析基础上,选用 API RP 2A-WSD 地震响应谱从 X、Y、Z 3 个方向对平台结构进行抗震分析,得到 3 个方向结构地震响应的最大值,最后对结构强度校核进行校核。结合工程应用,对辽东湾某钢制固定平台进行分析。分析结果表明,该平台在实际工程应用中是安全合理可行的。

关键词: 海洋平台;地震响应;SACS;有限元;响应谱

中图分类号: TE852 **文献标识码:** A

SEISMIC RESPONSE ANALYSIS OF OFFSHORE FIXED PLATFORM BASED ON SACS

AI Zhi-jiu¹, WANG Jun-pu¹, LI Xu-zhi², JIANG Wei², GUAN Jian²

(1. Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

2. Liaohe Petroleum Engineering Ltd., Panjin 124010, China)

Abstract: Based on using the finite element analysis program SACS, the model of structures is up build. Analysis using the theory of Gu Yan reduction on the jacket dynamic characteristics. Based on the dynamic analysis, the seismic analyses is done according to the Response Spectrum of API RP 2A-WSD at X, Y, Z direction the max earthquake response at three directions are gained. Finally, the strength of the structure is checked. Combine with the project application, the dynamic reliability of the Kuidong offshore platform subjected to seismic action was evaluated. The analysis results showed that the response was safe.

Key words: offshore platform; seismic response; SACS; finite element; response spectrum

0 引 言

辽东湾近海海域是我国主要的地震活动带之一,具有地震强烈,构造复杂等地质特点。浅海固定平台建造与检验规范规定:平台处于地震活动区,当地面加速度大于或等于 0.05g(g 为重力加速度)时,需要进行地震响应分析。“小震不坏,中震可修,大震不倒”是公认的抗震设计原则。在强烈地震作用下,允许结构进入塑性状态,产生一定程度的破坏,但不能倒塌^[3~5]。可见,设计有足够抗震能力的工程结构十分关键,研究抗震结构的动力可靠性具有十分重大的意义。

SACS 软件是由美国 Engineering Dynamics 公司研发的海事结构有限元分析设计软件。分析使用 SACS 软件并结合响应谱法,响应谱法不要求出地震的全部时间历程,而能有效简单的计算出平台结构所受的地震力和响应。

收稿日期:2008-02-29

基金项目:中石油集团公司重点科技项目“辽河滩海海工工程技术研究”(05B70104)

作者简介:艾志久(1954-),男,教授,主要从事石油天然气装备与技术的研究。

1 分析理论及方法

响应谱可以通过单质点振子的地震响应来阐明。单自由度振子的地震振动方程为：

$$m(\ddot{u}_g + \ddot{u}) + c\dot{u} + ku = 0 \quad (1)$$

其中 m, k, c 分别表示质量刚度和阻尼系数, \ddot{u}_g 为地面运动加速度。上式进一步可表示成如下形式：

$$\ddot{u}(t) + 2\zeta\omega_d\dot{u}(t) + \omega_d^2 u(t) = -\ddot{u}_g(t) \quad (2)$$

解此方程可得：相对位移, 相对速度, 绝对加速度

$$u(t) = \frac{1}{\omega_d} \int_0^t \ddot{u}_g(\tau) e^{-\zeta\omega_d(t-\tau)} \sin[\omega_d(t-\tau)] d\tau \quad (3)$$

$$\dot{u}(t) = -\frac{1}{\omega_d} \int_0^t \ddot{u}_g(\tau) e^{-\zeta\omega_d(t-\tau)} \cos[\omega_d(t-\tau)] d\tau + \dot{u}_g(t) \quad (4)$$

$$\ddot{u}(t) + \ddot{u}_g(t) = -\frac{1}{\omega_d} \int_0^t \ddot{u}_g(\tau) e^{-\zeta\omega_d(t-\tau)} \sin[\omega_d(t-\tau)] d\tau + 2\zeta\omega_d \dot{u}(t) \quad (5)$$

其中： $\omega_d = \omega \sqrt{1 - \zeta^2}$ $\tan \theta = \zeta / \sqrt{1 - \zeta^2}$

通过数值积分, 由式 (2), (3), (4), (5) 可以得到 $u(t)$, $\dot{u}(t)$ 和 $\ddot{u}(t) + \ddot{u}_g(t)$ 的时间过程, 并从中找到他们各自的最大值, 分别表示为：

$$SD(\zeta, \omega) = |u(t)|_{\max}, SV(\zeta, \omega) = |\dot{u}(t)|_{\max}, SA(\zeta, \omega) = |\ddot{u}(t) + \ddot{u}_g(t)|_{\max}$$

SD、SV、SA 分别称为与阻尼比 ζ , 自振频率 ω 相对应的相对位移, 相对速度和绝对加速度响应谱值。对于不同阻尼 ζ , 不同单自由度体系的自振频率 ω , 可绘出 3 条 SD, SV, SA 曲线, 这 3 条响应谱曲线合起来简称为响应谱。

工程抗震设计中使用的反应谱常表示为动力放大系数的形式, 常称为标准化响应谱。动力放大系数的定义为：

$$PSA(\zeta, \omega) = \frac{SA(\zeta, \omega)}{\ddot{u}_{g\max}} = \frac{|\ddot{u} + \ddot{u}_g|_{\max}}{\ddot{u}_{g\max}} \quad (6)$$

式中： $PSA = \omega^2 SA$ 。由于诸多随机因素影响, 使得由不同记录得到的加速度响应谱具有很大的随机性。只有在大量地震加速度记录输入后绘制得到众多响应谱曲线的基础上, 再经过平均与光滑之后, 才能得到供设计使用的规范响应谱曲线^[1] (如图 1 所示)。

对于多质点体系的地震力计算, 采用有限元法, 可得到与单质点类似的多质点体系的地震振动方程：

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = -[M]\{\ddot{I}\}U_g(t) \quad (7)$$

式中, M, C 和 K 分别为 n 个质点体系的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵, U 为质点对地面的相对位移矢量, 是时间 t 的函数, I 为自由度矩阵。上述联立微分方程组通常可用振型叠加法求解, 即利用振型的正交特性, 将联立微分方程组一个个地分解为相互独立的振动方程, 从而可以采用单质点体系的响应谱理论来计算各振型的最大响应。最后, 将各个振型的最大响应按适当的方法相组合, 即可得到多质点体系的各项响应值^[2]。

振型组合有多种方案, 包括 SRSS—平方和求根, PEAK—绝对值求和, PRMS—绝对值求和加平方和求根, CQC—完全二次型组合法等。其中应用最广泛的是基于随机振动理论的 CQC 法。CQC 法表达式为：

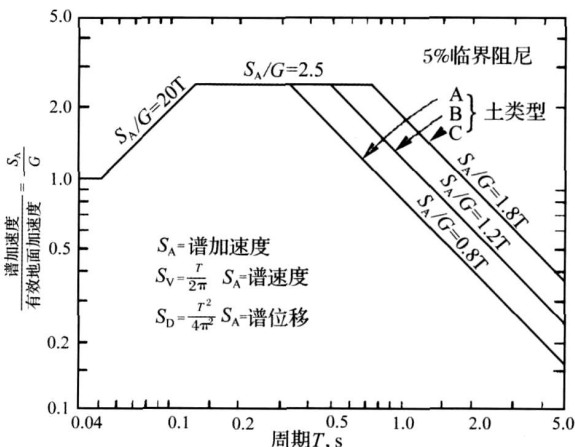


图 1 A PIRP 2A 标准响应谱曲线

$$R_{\max} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \rho_{ij} R_{i,\max} R_{j,\max}}$$

(8)

式中： ρ_{ij} 为模态组合系数。对于所考虑的结构，若地震振动看成宽带随机过程（通常的结构可以近似满足这一要求），则白噪声下的 ρ_{ij} 值是实际情况下的一个良好近似，此时：

$$\rho_{ij} = \frac{8 \sqrt{\omega_i \omega_j (\omega_i + \omega_j)}}{(\omega_i^2 + \omega_j^2)^2 + 4 \omega_i \omega_j (\omega_i^2 + \omega_j^2) + 4 (\omega_i + \omega_j)^2 \omega_i \omega_j}$$

(9)

其中，体系的自振频率相隔越远，则 ρ_{ij} 值越小，当 ρ_{ij} 值为 0 时 CQC 法等价于 SRSS 法。

2 计算实例

根据上述理论，结合 SACS 软件，对某导管架生产平台（模型如图 2、3）进行地震响应分析和强度校核。该平台简化为 165 个节点，300 个杆元素，72 个板元素，结构材料密度 7.85kg/m³，设计水深 15.39m。平台上部荷载包括设备重量和栈桥力，平台甲板活荷载按 4.0kN/m² 计算。

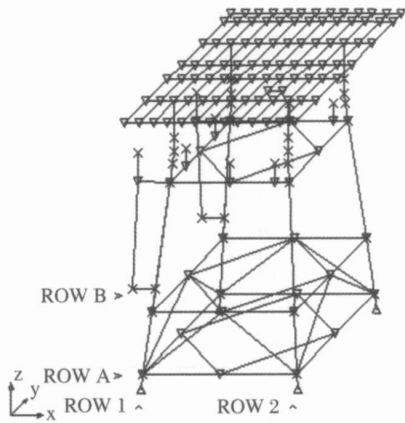


图 2 导管架生产平台分析模型

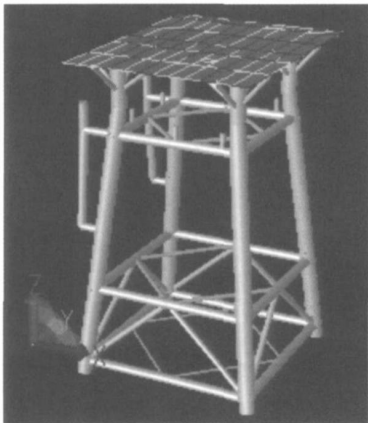


图 3 导管架生产平台实体模型

固定平台动力分析的任务之一是计算平台自振特性。平台自振频率是平台动力特性的重要参数，它取决于平台结构的质量、刚度和阻尼。模态分析也是动态响应分析的基础。在上述井架计算模型的基础上，采用 Guyan 缩聚法计算了井架结构动力特性^[6]。计算的前 10 阶模态结果见表 1。

表 1 固有频率和广义质量

模态	频率 (Hz)	广义质量 (kg)	特征值	周期 (s)
1	1.714061	1.5616002E+02	8.6215990E-03	0.5834099
2	1.760724	2.4209515E+02	8.1706688E-03	0.5679481
3	2.063759	1.1168062E+02	5.9473313E-03	0.4845526
4	5.264294	8.6837758E+00	9.1402889E-04	0.1899590
5	5.583651	8.7760816E+00	8.1246322E-04	0.1790943
6	7.780479	5.9739221E+01	4.1843456E-04	0.1285268
7	7.833262	1.7718398E+02	4.1281445E-04	0.1276607
8	7.871530	5.1837561E+01	4.0881042E-04	0.1270401
9	8.564424	1.1025876E+02	3.4533762E-04	0.1167621
10	9.049728	7.8437034E+00	3.0929235E-04	0.1105006

根据实际的地震与地质资料，设计地震水平加速度为 0.15G，X、Y 方向系数为 1.0，Z 方向系数为 0.5，根据 API 标准，X、Y 方向土类型为 B 型，Z 方向土类型为 C 型。地震响应谱选用 API 标准谱。各阶模态响

应组合用 CQC 法计算。地震响应分析结果如下表 2。

表 2 X、Y、Z 3 个方向的最大响应

方向	模态	频率 Hz	加速度 g	速度 cm/sec	位移 cm	基础剪力 kN	倾覆力矩 kN·M
X 向	2	1.8655	0.361390	30.22817	2.578856	887.828	16170.590
Y 向	1	1.8216	0.408392	34.98406	3.056624	755.173	13891.023
Z 向	4	5.7064	0.293375	8.02235	0.223748	5.597	336.186

将地震响应结果与固定荷载和活荷载组合进行强度校核计算。根据中国船级社浅海固定平台建造与检验规范,地震条件下构件许用应力提高 1/3。校核结果如表 3 所示。

表 3 强度校核结果

杆件标识	杆件节点号	荷载	最大应力比	杆件标识	杆件节点号	荷载	最大应力比
B10	1005 - 1004	1	0.01	L G5	499L - 599L	2	0.18
B20	1000 - 1003	2	0.03	L G6	599L - 699L	2	0.25
B30	1008 - 1021	2	0.10	L G7	699L - 701L	2	0.40
HB1	199L - 1004	1	0.04	L G8	201L - 8003	1	0.15
HB2	201L - 1003	1	0.17	L G9	8003 - 301L	2	0.23
HB3	301L - 1008	1	0.36	MB1	701L - 1086	2	0.64
HX	8002 - 1115	1	0.00	MB2	8025 - 8026	2	0.53
HX1	1116 - 8004	1	0.07	PL1	099P - 199P	2	0.24
IB1	181L - 1001	2	0.15	PL2	199P - 299P	2	0.26
L G2	101L - 201L	1	0.17	PL3	299P - 399P	2	0.27
L G3	299L - 399L	2	0.53	PL4	399P - 499P	2	0.17
L G4	399L - 499L	2	0.18	SB1	1028 - 1041	2	0.31

计算结果表明:此平台自振周期短,不会与长周期的环境荷载发生共振,地震响应位移、基底剪力、倾覆力矩都不大,最大位移响应发生在 Y 方向模态 1 时,最大位移为 3.056624cm,对地震响应做强度校核,所有结构杆件均达到规范要求,平台在此地震条件下是安全的。

3 结 论

本文使用 SACS 软件以辽河滩海某导管架平台为研究对象进行了地震响应分析,由分析结果得出以下结论:

(1) 导管架平台自振周期较短,很难与长周期自然载荷,如风、波浪等发生共振,在地震作用下平台结构响应较小,具有较好的抗震性能。经强度校核,该平台在地震作用下强度满足设计要求。

(2) 地震响应谱代表了大量地震波输入计算的平均结果,其概念简单、计算方便,可采用较少的计算量获得结构最大反应值。

参考文献

- [1] 范立础. 桥梁抗震[M]. 上海:同济大学出版社,1997.
- [2] 王秀勇,肖熙,张世联. 海洋平台地震响应分析[J]. 中国海洋平台,1997,12(4):150—152.
- [3] 国家经济贸易委员会. 海上固定平台规划,设计和建造推荐做法[S]. 北京:石油工业出版社,2004.
- [4] 中国船级社. 浅海固定平台建造与检验规范[S]. 北京:人民交通出版社,2004.
- [5] 中国石油天然气总公司. 滩海环境条件与荷载技术规范[S]. 北京:石油工业出版社,1995.
- [6] Dynamic Response release6 user's manual[R]. Engineering Dynamics,INC. 2004.