刘书童,唐颂,李昊辰,等.考虑SSI效应的导管架式海洋平台地震易损性分析[J].地震工程学报,2026,48(6):1304-1311.DOI:10.20000/j.1000-0844.20250306001
Liu Shutong, Tang Song, Li Haochen, et al. Seismic vulnerability analysis of jacket offshore platforms considering SSI effects[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2026, 48(6): 1304-1311. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20250306001

考虑SSI效应的导管架式海洋平台地震易损性分析

刘书童[1], 唐 颂[1], 李昊辰[1], 杨树桐[1], 李培振[2]
(1. 中国海洋大学,山东 青岛 266100;
2. 同济大学 土木工程防灾减灾全国重点实验室,上海 200092)

摘要:基于易损性分析理论,以渤海地区典型导管架海洋平台为研究对象,系统探究地震、波浪荷载耦合作用下平台的地震易损性特征,并分析土-结构相互作用(SSI)对结构抗震性能的影响。基于OpenSees软件构建有限元模型,以层间位移角作为损伤评价指标,采用增量动力分析法,开展考虑SSI效应的导管架海洋平台在地震-波浪联合作用下的地震易损性分析。结果表明:对应同一损伤状态,随地震峰值加速度增大,结构破坏概率的增长速率呈先增后减的变化规律;近场地震动对导管架平台的致灾风险显著高于远场地震动。同时,相较于考虑SSI效应的数值模型,等效桩模型在耦合荷载作用下更易进入极限状态、安全裕度更低,说明场地土体可有效发挥减震耗能作用,提升平台抗震性能。

关键词:导管架式海洋平台;地震易损性;土-结构相互作用;增量动力分析;波浪荷载
中图分类号:TU375.4 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-0844(2026)06-1304-08
DOI:10.20000/j.1000-0844.20250306001

Seismic vulnerability analysis of jacket offshore platforms considering SSI effects

Liu Shutong[1], Tang Song[1], Li Haochen[1], Yang Shutong[1], Li Peizhen[2]
(*1.Ocean University of China, Qingdao 266100, Shandong, China;*
2.State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Taking a typical jacket offshore platform in the Bohai Sea region as an engineering case, this study uses vulnerability analysis methods to systematically investigate its seismic vulnerability under combined earthquake and wave loading, with particular attention to the influence of soil-structure interaction (SSI). A finite element model of the platform is established using OpenSees, and incremental dynamic analysis is performed with the inter-story drift ratio adopted as the damage indica-

收稿日期:2025-03-06
基金项目:国家自然科学基金青年项目(52208510);山东省自然科学基金青年项目(ZR2022QE260)
第一作者简介:刘书童(1994-),男,博士,讲师,主要研究方向为结构抗震。E-mail: liushutong@ouc.edu.cn。
通信作者:李培振(1975-),男,博士,教授,主要研究方向为结构抗震。E-mail: lipeizh@tongji.edu.cn。

tor to evaluate the seismic vulnerability of the jacket platform. The results show that, for vulnerability curves corresponding to a given limit state, the growth rate of structural damage probability first increases and then decreases with increasing peak ground acceleration, and that near-field ground motions pose a higher failure risk to the jacket platform than far-field ground motions. Furthermore, compared with the jacket platform model considering SSI, the equivalent pile model reaches the limit states more readily and exhibits lower safety margins under combined earthquake and wave loading, indicating that the soil provides a damping effect.

Keywords: jacket offshore platform; seismic vulnerability; soil-structure interaction; incremental dynamic analysis; wave load

0　引言

导管架式海洋平台受力性能优良、整体稳定可靠、海域适配性广，是近海工程中应用最为普遍的结构形式，广泛服务于海上油气开采、海上风电、海洋观测与海上观光等工程场景[1-3]。与陆上结构相比，海洋服役环境荷载条件更为复杂，平台除承受自重、甲板设备等静力荷载外，长期遭受风、波浪、海冰等循环动力荷载作用。地震虽属于低频、短时灾害荷载，但破坏烈度极高，对在役导管架平台的整体安全构成重大威胁。国内外学者已针对单一地震荷载下平台结构响应开展大量研究[4-5]；而地震与波浪耦合作用会显著改变海洋结构动力演化规律，使其非线性动力响应特征更为复杂[6]。在结构抗震评估领域，基于概率的性能化抗震设计已成为国内外主流研究思路[7-9]。地震易损性分析作为该理论的核心分析手段，能够定量刻画不同地震强度、多环境荷载耦合工况下结构的损伤超越概率，可为导管架平台抗震安全评价提供量化依据。现阶段，国内外学者已围绕导管架平台地震易损性开展系列研究：宋晓雯[10]采用增量动力分析（Incremental Dynamic Analysis，IDA）对老龄导管架平台开展易损性计算，明确不同损伤极限状态对应的结构失效概率；Amirhosein等[11]构建优化数字孪生分析框架，实现导管架平台多极限状态易损性曲线批量求解；Rahman等[12]引入CatBoost机器学习算法，综合考虑结构、土体、荷载参数不确定性，完成平台抗震可靠度评估。

综合现有文献可知，导管架平台地震易损性研究已取得一定成果，但仍存在明显不足与待完善之处。一方面，现有研究多单独讨论地震作用，对波浪-地震耦合荷载协同作用下结构非线性响应机理缺乏系统性剖析；另一方面，多数易损性数值模型采用简化基础约束，未充分还原实际海域服役条件，忽略土体-结构相互作用（Soil-Structure Interaction，SSI）效应对平台动力特性的影响。为此，本文以地震与波浪联合作用为荷载工况，开展考虑SSI效应的导管架海洋平台地震易损性分析，研究成果可为同类海洋平台抗震性能评估提供理论参考。

1　增量动力分析方法

IDA方法是一种广泛用于评估结构在不同地震强度水平下抗震性能的非线性分析方法[13-14]。该方法通过选取一系列历史记录地震波数据，分别调幅为多组不同强度地震波数据，并进行动力弹塑性时程分析，获得不同地震强度指标（Intensity Measure，IM）下结构损伤指标（Damage Measure，DM）。

常用的IM包括反应谱加速度（Spectral Acceleration，SA）和峰值地面加速度（Peak ground acceleration，PGA）。研究表明，以PGA作为IM时，由于其对高频成分的敏感性，可能导致结构地震响应的离散性较大；而以SA作为IM时，由于其与结构自振周期的相关性，相比其他IM能够显著减少结构响应预测的不确定性[15-17]。对于复杂结构体系，尤其是考虑SSI效应的情况下，SA作为IM可能会导致一定的偏差，主要原因在于SSI效应会显著改变结构的动力特性，从而影响SA与结构响应之间的相关性，因此在考虑SSI效应的相关研究中学者们多采用PGA作为地震强度指标[18-19]。鉴于本研究考虑了SSI效应，系统相对复杂，因此采用PGA作为地震强度指标。此外，通过增加地震波的数量，可以有效降低地震响应的离散性，从而提升结果的可靠性。

在地震作用下，过大的位移可能导致结构失效，因此，位移评估函数通常用于判断结构是否出现过大变形。常见的位移指标包括层间位移角、顶

层位移以及层间位移等。本研究选择最大层间位移角θ_{max}作为DM,用于评估结构在地震作用下的变形程度。

对原始地震记录进行幅值调幅、生成多强度水准地震波是IDA的核心环节,该操作可复现结构在各级地震作用下的动力响应,进而绘制表征结构抗震性能的地震易损性曲线。地震动调幅手段如式(1)所列,通过等比例缩放原始地震记录加速度幅值,实现地震动强度逐级覆盖各类工程设防水准。

$$S_i(t)=\lambda_i S_0(t) \tag{1}$$

式中:$S_i(t)$为第i次调幅后的记录;$S_0(t)$为原始地震记录;λ_i为第i次调幅系数。

通过DM判别准则界定结构极限工作状态,以结构损伤响应作为导管架海洋平台IDA的终止判据。基于计算结果绘制结构IDA曲线,可精准评价结构全过程抗震性能,实现对结构抗震行为的系统评估。本文IDA分析流程如图1所示。

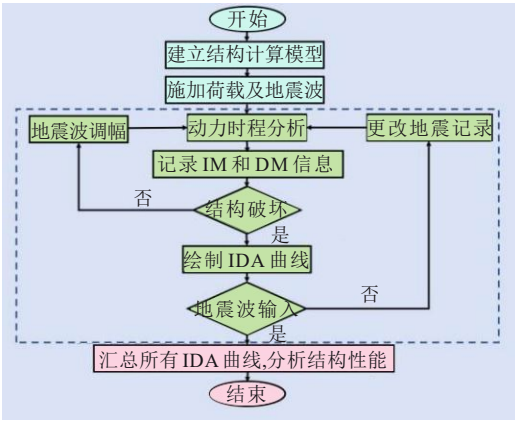


图1 IDA流程图

Fig. 1 Flowchart of IDA

2 数值模拟

2.1 有限元模型

本文以中国渤海海域CB32A储油罐四足导管架海洋平台为工程原型[20],基于OpenSees平台建立精细化导管架结构有限元模型,如图2所示。该平台工作标高为12.5 m,平面尺寸为21.7 m(长)×21 m(宽),上部结构采用Q345钢材。数值建模过程中,导管架杆件采用纤维梁单元dispBeamColumn,并通过section Aggregator命令模拟截面抗剪与抗扭本构关系,实现构件复杂受力特性的精准模拟。

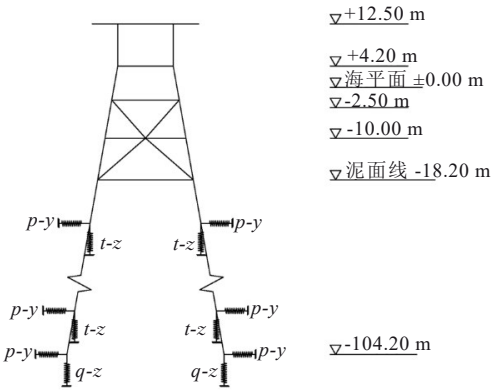


图2 导管架式海洋平台有限元模型

Fig. 2 Finite element model of the jacket offshore platform

桩与土的水平向相互作用、桩与土的竖向相互作用以及桩尖与土的竖向相互作用分别通过p-y、t-z和q-z弹簧单元模拟。采用不考虑液化效应的PySimple1、TzSimple1和QzSimple1作为零长度弹簧单元的材料。本研究选取某典型多层海洋土体作为研究对象[21],具体参数如表1所列。土体水平方向阻力与极限承载力的比值设置为0.3。将所有零长度弹簧单元的一端固定,将p-y弹簧单元另一端通过equalDOF命令与对应桩节点绑定水平方向的位移;将t-z和q-z弹簧单元的另一端同样通过equalDOF命令与对应桩节点绑定竖直方向的位移。此外,模型采用Rayleigh阻尼,阻尼比取0.02。

表1 土体参数

Table 1 Soil parameters

类型	密度/(kg/m³)	阻尼比	泊松比	剪切模量/MPa	厚度/m
黏土	1 760	0.05	0.37	35	24
细砂	1 850	0.05	0.35	80	12
中砂	1 880	0.05	0.33	120	12
粗砂	1 930	0.05	0.33	240	35
软岩	2 190	0.05	0.33	680	20
基岩	2 300	0.05	0.33	1 800	-

2.2 地震动选择

由于天然地震动记录在持续时间、频谱特性、振幅等方面存在差异,使用不同的地震记录进行增量动力分析时,结构的动力响应结果往往会有所不同。这种差异性是导致IDA曲线离散性较大的一个重要原因。因此,在应用IDA方法时,必须选择多条地震记录进行分析,并通过统计分析处理这些结果,从而提高评估的可靠性和准确性。由此可知,地震动记录的选择是IDA分析中的一个关键

步骤。

本研究基于设计反应谱法从太平洋地震工程研究中心(Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER)[22]选取地震记录，主要过程如下：

(1) 对结构进行模态分析，确定前三阶周期；

(2) 确定设计地震水平，如地震烈度区、场地类别和场地谱加速度等。本研究中，导管架式海洋平台所在场地阻尼比为5%时基岩震荡周期0.2 s和1.0 s对应的场地谱加速度 $SA_{\max}(0.2)=0.75g$，$SA_{\max}(1.0)=0.3g$[23]；

(3) 采用谱匹配方法将选定的地震记录与设计反应谱进行匹配，确保地震波在指定频率范围内的反应谱与设计反应谱尽量一致，不同记录序列号(Record Sequence Number, RSN)的地震波加速度反应谱如图3所示；

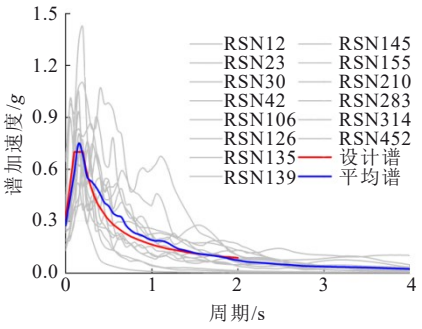


图3　地震波加速度反应谱

Fig. 3　Acceleration response spectra of ground motions

(4) 根据规范确定其他参数，如断层距、土层的等效剪切波速、地震事件数量等；

(5) 根据设计反应谱和其他参数，排除属性相同的地震记录，确定符合规范要求的所需地震记录。本文选取PEER地震波数据库中不同RSN对应的48条地震数据，地震波输入基本信息如表2所列。

2.3　波浪荷载

Morison方程是一种广泛用于估算海浪作用在导管架式海上结构上波浪荷载的方法，表明作用在柱体上的水平力由阻力 f_D 和惯性力 f_I 组成，这些力可以由式(2)和式(3)推导出[24]：

$$f_D=\frac{1}{2}C_D\rho Au|u| \tag{2}$$

$$f_I=C_M\rho V_0\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t} \tag{3}$$

式中：C_D 为阻力系数；D 为柱体的半径；I 为惯性矩；

表2　地震波输入基本信息

Table 2　Basic information of input ground motions

名称	RSN	名称	RSN	名称	RSN
Kern County	12	Irpinia	283	Kocael	1 147
SAn Francisco	23	Westmorland	314	Chi-Chi	1 180
Parkfield	30	Coalinga	392	Duzce	1 599
Borrego Mtn	37	Morgan Hill	452	Stone Canyon	1 622
Lytle Creek	42	Nahanni	495	Sitka	1 626
San Fernando	51	Hollister	498	Caldiran	1 627
Point Mugu	97	San Salvador	568	Upland	1 631
Oroville	106	Baja California	585	Manjil	1 634
Friuli	121	Loma Prieta	765	Sierra Madre	1 641
Gazli	126	Erzican	821	San Juan Bautista	1 758
Santa Barbara	135	Landers	832	Hector Mine	1 768
Tabas	139	Big Bear	901	Mohawk Val	1 911
Coyote Lake	145	Northridge	943	Anza	1 917
Norcia	155	Double Springs	1 099	Gulf of California	1 990
Livermore-01	210	Kobe	1 103	Gilroy	2 011
Victoria	265	Dinar	1 136	Nenana Mountain	2 060

M 为质量；ρ 为海水密度；A 为柱体单位长度的投影面积(垂直于流体流动)；u 为水流的水平速度；C_M 为惯性力系数；V_0 为柱体的排水体积。

作用在腿柱单位长度上的水平波浪力 f 为：

$$f=f_D+f_I=\frac{1}{2}C_D\rho D|u|u+\frac{1}{4}C_M\pi D^2\rho\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t} \tag{4}$$

在海洋环境中，波浪振幅通常远小于波长和水深，因此可以应用微振幅波浪理论[25]。水质点在任意高度 z 的水平速度 u 为：

$$u=\frac{\pi H}{T}\frac{\cosh\left[k(z+d)\right]}{\sinh(kd)}\cos(kx-\omega t) \tag{5}$$

式中：x 为水平位置；t 为时间；H 为波高；h 为平均静水深度；k 为波浪数；d 为水深；T 为波浪周期；ω 为波浪角频率。

作用在桩柱垂直微分截面上的波浪力 f 可以通过下式获得[26]：

$$\begin{aligned}f=&\frac{1}{2}C_D\rho\left(\frac{\pi H}{T\sinh(kd)}\right)^2D\times\\&\int_0^d\cosh^2(kx)|\cos(kx-\omega t)|\cos(kx-\omega t)\mathrm{d}s+\\&\frac{1}{2}C_M\rho\pi D^2\frac{\pi^2H}{T^2\sinh(kd)}\times\\&\int_0^d\cosh(kx)\sin(kx-\omega t)\mathrm{d}s\end{aligned} \tag{6}$$

式中：s 为沿桩柱竖直方向的深度坐标。

通过对上述方程积分，并应用微振幅波浪色散

方程 $\omega^2=gk\cdot\tanh(kd)$，可得出总的水平波浪力 F：

$$F=\rho gV\left(\frac{H}{2d}\right)\tan h(kd)\times\left[C_D\frac{H}{4\pi D}\frac{2kd+\sin h(2kd)}{\sin h^2(kd)}\times|\cos(kx-\omega t)|\cos(kx-\omega t)+C_M\sin(kx-\omega t)\right] \tag{7}$$

本研究中，水深设为 18.2 m，波长和波幅分别取为 10 m 和 1 m，设置波浪方向与地震方向一致，且波浪的无量纲数值取为 0.7。

3 导管架式海洋平台地震易损性分析

3.1 易损性曲线

地震易损性是指在地震作用下，结构发生不同程度损伤的概率或可能性。简言之，易损性反映了结构对地震荷载的“脆弱性”或“易损性”，即结构在遭受地震时的响应和损伤程度。地震易损性通常通过构建易损性曲线或易损性函数来表达，用来表达 DM 和 IM 之间的关系。

地震易损性函数是描述地震强度与结构损伤之间概率关系的数学模型，基本形式可以用式(8)表示：

$$F_i(im)=P\left(LS_i|IM=im\right)=P\left(DM_i\geqslant DC_i|IM=im\right) \tag{8}$$

式中：im 为地震动参数(本文为 PGA)；LS_i 是指结构第 i 个损伤指标 DM_i 达到或超过限值 DC_i，即某种极限状态。

为了拟合易损性曲线，首先需要选择一个合适的概率分布模型。在地震易损性分析中，通常采用对数正态分布来拟合损伤指标的分布，尤其是当结构的 DM 呈现大部分数据集中在较小值区间，但也存在少数较大值时。地震易损性函数就可以用式(9)表示[6]：

$$F_i(im)=\Phi\left(\frac{\ln(im)-\mu}{\sigma}\right)=\int_0^{im}\frac{1}{\sigma t\sqrt{2\pi}}\mathrm{e}^{\left(-\frac{(\ln(t)-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)}\mathrm{d}t \tag{9}$$

式中：μ 是 IM 对数的平均值；σ 是 IM 对数的标准差。两者都可以通过矩估计法估算出，如式(10)和(11)所列：

$$\hat{\mu}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\ln IM_i \tag{10}$$

$$\hat{\sigma}=\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left(\ln(IM_i)-\hat{\mu}\right)^2} \tag{11}$$

式中：n 代表地震记录数量。

参考文献[27]，本研究将导管架的极限状态(Limit State，LS)划分为完好(LS_0)、轻微损坏(LS_1)、中等损坏(LS_2)、严重破坏(LS_3)四种，其对应的层间位移角限值如表 3 所列。

表 3 导管架式海洋平台极限状态限值

Table 3 Threshold values of limit states for the jacket offshore platform

极限状态	层间位移角限值 θ_i
LS_0	1/300
LS_1	1/200
LS_2	1/100
LS_3	1/55

根据已有研究成果，假设地震动强度 IM 和结构响应 DM 取对数后存在线性关系，如下式所列：

$$DM=a(IM)^b \tag{12}$$

$$\ln E=B_1+B_2\ln I_1+B_3\ln I_2 \tag{13}$$

式中：E 和 I 分别代表结构响应 DM 和地震动强度 IM；a、b、B_1、B_2 和 B_3 为待定参数。本研究基于地震易损性曲线基本原理，模拟导管架式海洋平台在 48 条地震激励作用下的结构响应，对考虑 SSI 效应的结构响应进行增量动力分析，并按照式(13)对结构响应的 $\ln(\theta_{\max})$ 和 $\ln(PGA)$ 进行线性拟合，考虑 SSI 效应的对应拟合关系如式(14)所列：

$$\ln(\theta_{\max})=-4.406+0.989\ln(PGA) \tag{14}$$

根据上述内容介绍的有限元模型，可以进而绘制出四条对应不同破坏类型的地震易损性曲线。同理，依次将 LS_0、LS_1、LS_2 和 LS_3 四种性能状态时的失效概率曲线进行绘制，分别得到四条易损性曲线，使用 SF 代表多层海洋土体作为导管架式平台基础的对应工况，易损性曲线如图 4 所示(图中：SF 代表标准地震动工况)。

由图 4 可知，导管架海洋平台各损伤极限状态对应的易损性曲线存在显著差异。随着损伤等级由完好状态(LS_0)、轻微损伤(LS_1)、中等损伤(LS_2)过渡至严重损伤(LS_3)，易损性曲线整体斜率逐步增大，表明不同极限状态下结构失效概率的增长速率存在明显区别。极限状态判定标准越严苛，结构超越对应损伤状态的概率增长速度越快。

以 PGA 为 0.5g 的工况为例，各极限状态的超越

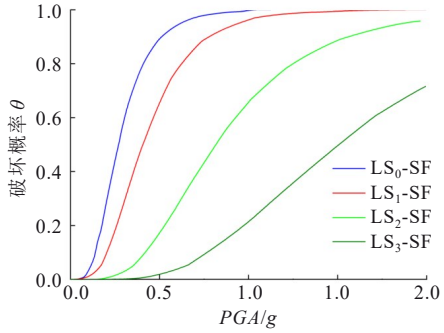


图 4　导管架式平台基于PGA的地震动易损性曲线

Fig. 4　Seismic vulnerability curves of the jacket offshore platform based on PGA

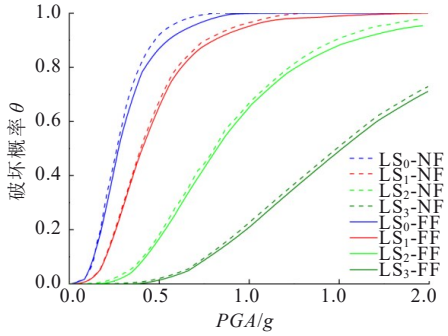


图 5　近场和远场地震作用下导管架式海洋平台易损性曲线

Fig. 5　Vulnerability curves of the jacket platform under near-field and far-field ground motions

概率差异显著：LS_1轻微损伤超越概率为65%，LS_2中等损伤超越概率降至16%，LS_3严重损伤超越概率仅为1%。由上述可知，在相同地震强度作用下，平台结构超越LS_0、LS_1、LS_2、LS_3的损伤概率依次递减，说明触发更高等级损伤极限状态所需的地震动强度更大。对比单一易损性曲线变化规律可知：随着PGA增大，结构损伤超越概率的增长速率整体呈现先增大、后减小的变化特征。

3.2　近远场地震动

近场与远场地震是结构地震易损性分析的重要工况指标，对导管架海洋平台的抗震性能评估具有重要研究意义。相较于远场地震，近场地震通常具备能量集中、脉冲效应显著、周期特征突出的特点。参照已有研究成果[27-29]，本文将断层距≤10 km的地震记录定义为近场地震，断层距＞10 km的地震记录定义为远场地震。通过对比波浪与不同类型地震耦合作用下的结构易损性曲线，系统分析近、远场地震动对导管架平台抗震性能的影响规律。近、远场地震作用下平台的易损性分析结果如图5所示（图中：FF代表远场地震动工况；NF代表近场地震动工况）。

由图5可以看出，在近场与远场地震动作用下，结构四种不同破坏水准的易损性曲线趋势相似。然而，相较于远场地震动，近场地震动导致结构达到极限状态的概率更高。在地震动PGA为1.0g时，本研究中的导管架式海洋平台在近场地震和远场地震作用下达到轻微损坏的概率分别为0.97和0.95；达到严重损坏的概率分别为0.23和0.21。这种现象说明相较于远场地震动来说，导管架式海洋平台在近场地震动的作用下更加容易发生破坏，留有的安全裕度更低。此外，结构在近场和远场地震动作用下发生破坏的概率均与总体易损性近似，这说明在样本数量较大的情况下，总体易损性曲线具有较好的代表性。

3.3　SSI效应

为了探讨土-结构相互作用对平台地震易损性的具体影响，本研究使用等效桩模型，与地震激励下考虑SSI效应的导管架式海洋平台响应进行对比，并使用RF代表等效桩模型的对应工况，SF代表标准地震动工况，易损性曲线对比如图6所示。采用等效桩的导管架式海洋平台易损性曲线对应拟合关系如下式所列：

$$\ln(\theta_{\max}) = -4.335 + 0.993\ln(PGA) \quad (15)$$

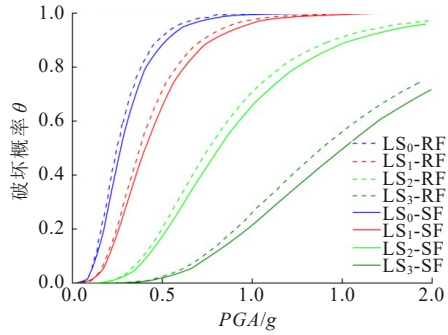


图 6　考虑/不考虑SSI效应时导管架式海洋平台地震易损性曲线

Fig. 6　Seismic vulnerability curves of the jacket platform with and without considering SSI effects

由图6可知，忽略SSI效应时导管架式海洋平台在地震与波浪联合作用下的易损性更高。在地震动PGA为0.5g时，本研究中的导管架式海洋平台在考虑SSI效应和采用等效桩模型保持完好的概率分别为0.12和0.10；达到中等损坏的概率分别为

0.16和0.20。相比于考虑SSI效应时导管架式平台的地震响应,采用等效桩的导管架式海洋平台在地震与波浪作用下进入下一个极限状态的概率更大,结构留有的安全裕度更低。在考虑SSI效应时达到20%严重破坏概率对应的地震动PGA为0.98g,而等效桩模型对应的地震动PGA为0.91g。这是因为土体在地震激励过程中能够吸收和耗散地震波的能量,降低结构的地震响应。此外,土体作为一种非线性介质,在地震激励下会表现出如刚度退化和滞后特性等非线性行为,进一步耗散地震波传输到土-导管架式海洋平台系统中的能量。

4 结论

本研究针对地震-波浪耦合作用下导管架海洋平台的动力特性,采用增量动力分析方法开展结构地震易损性研究,主要结论如下:

(1) 当地震动PGA为0.5g时,平台轻微损伤、中等损伤、严重损伤的超越概率分别为65%、16%和1%。在固定地震强度下,结构从LS_0至LS_3高等级极限状态对应的地震阈值逐步增大。对于单一损伤状态,随地震峰值加速度增大,结构损伤超越概率的增长速率整体呈现先增大、后减小的变化规律。

(2) 当地震动PGA达到1.0g时,近场地震作用下平台轻微损伤概率(97%)与严重损伤概率(23%)均高于远场地震工况(轻微损伤概率95%、严重损伤概率21%)。表明近场地震动对导管架平台的致灾风险更高,结构安全储备更低。同时,在充足地震样本支撑下,整体易损性曲线能够较好反映结构在近、远场地震作用下的真实损伤规律。

(3) PGA为0.5g的工况下,考虑SSI效应的平台完好概率为12%,高于等效桩模型;中等损伤概率为16%,显著低于等效桩模型的20%。相较于考虑SSI效应的精细化模型,等效桩模型在地震与波浪联合作用下更易进入高阶损伤状态。场地土体可通过耗能、刚度退化及滞后效应有效削弱平台动力响应,显著提升结构整体抗震性能。

参考文献(References)

[1] 张君博, 张纪刚, 孙佳, 等. 自复位钢组合导管架海洋平台抗冰减振及自复位性能分析[J]. 地震工程与工程振动, 2020, 40(4): 128-139.
Zhang Junbo, Zhang Jigang, Sun Jia, et al. Analysis of anti-ice vibration reduction and self-centering performance of self-centering steel composite jacket offshore platform [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2020, 40(4): 128-139.

[2] 柳春光, 金书成. 损伤和缺陷对海洋平台抗冰抗震性能的影响[J]. 世界地震工程, 2009, 25(4): 70-74.
Liu Chunguang, Jin Shucheng. Effect of damage and flaw on ice resistance and seismic resistance of offshore platforms [J]. World Earthquake Engineering, 2009, 25(4): 70-74.

[3] 邵卫东, 侯金林, 王丽勤, 等. 基于结构非线性的导管架平台地震韧性分析[J]. 中国海上油气, 2016, 28(4): 125-131.
Shao Weidong, Hou Jinlin, Wang Liqin, et al. Analysis of ductitity-earthquake resistance for jacket platforms taking account of the nonlinearity [J]. China Offshore Oil and Gas, 2016, 28(4): 125-131.

[4] 荣棉水, 彭艳菊, 吕悦军. 导管架式海洋平台的地震动时程分析[J]. 世界地震工程, 2009, 25(1): 25-30.
Rong Mianshui, Peng Yanju, Lü Yuejun. Seismic time-history analysis of a jacket offshore platform [J]. World Earthquake Engineering, 2009, 25(1): 25-30.

[5] Huang S N, Yu D D, Bai W, et al. Experimental and numerical analysis of seismic performance of jacket platforms subjected to onshore and offshore earthquakes [J]. Engineering Structures, 2024, 311: 118177.

[6] 赵秋红, 许梦凡, 董硕. 地震-波浪耦合作用下考虑相位差影响的深水桥墩动力响应分析[J]. 中国公路学报, 2021, 34(5): 86-98.
Zhao Qiuhong, Xu Mengfan, Dong Shuo. Dynamic response analysis of deep-water piers under coupled earthquake-wave action considering phase difference [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(5): 86-98.

[7] 吴浩, 吕西林, 周颖, 等. 基于IDA的自复位预制剪力墙抗倒塌能力分析[J]. 工程科学与技术, 2018, 50(6): 100-107.
Wu Hao, Lü Xilin, Zhou Ying, et al. Collapse capacity analysis of self-centering precast shear walls based on IDA [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2018, 50(6): 100-107.

[8] 李进, 张娇磊, 李书锋, 等. 某新型梁柱节点的装配式钢筋混凝土框架结构基于性能的抗震设计研究[J]. 地震工程学报, 2020, 42(6): 1377-1385.
Li Jin, Zhang Jiaolei, Li Shufeng, et al. Performance-based seismic design of fabricated reinforced-concrete-frame structures with new beam-column joints [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(6): 1377-1385.

[9] 韩鹏飞, 隋孝民. 高烈度区重力式挡墙基于性能的抗震设计方法研究[J]. 地震工程学报, 2015, 37(2): 585-593, 611.
Han Pengfei, Sui Xiaomin. Performance-based seismic design of gravity retaining walls in high intensity regions [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(2): 585-593, 611.

[10] 宋晓雯. 基于IDA方法的老龄导管架平台的地震易损性分析[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2022.
Song Xiaowen. Seismic fragility analysis of aged jacket platforms based on IDA method [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2022.

[11] Amirhosein S, Mahdi K. Seismic assessment and strengthening of a historical masonry bridge considering soil-structure interaction[J]. Engineering Structures, 293: a116589.

[12] Rahman Shokrgozar H, Rashid A. Assessing seismic reliability & feature importance of steel jacket type offshore platforms using CatBoost algorithm[J]. Ships and Offshore Structures, 2025, 20(11): 1697-1709.

[13] 郑山锁，左英，张晓辉，等. 基于IDA的多龄期钢排架结构地震易损性分析[J]. 地震工程学报，2018，40(4)：698-704.
Zheng Shansuo, Zuo Ying, Zhang Xiaohui, et al. Seismic vulnerability analysis of multi-age steel bent frame structures based on IDA method[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(4): 698-704.

[14] 宋颜培，陈锦晶. 基于增量动力地震易损性分析的高层结构抗震加固研究[J]. 地震工程学报，2024，46(2)：309-317.
Song Yanpei, Chen Jinjing. Seismic strengthening of high-rise buildings based on the seismic vulnerability from incremental dynamic analysis[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2024, 46(2): 309-317.

[15] 李子昂. 重力-抗侧力可分高层组合结构体系层间位移角限值研究[D]. 北京：清华大学，2022.
Li Ziang. Research on IDR limit value of high-rise composite structural systems with separated gravity and lateral resisting systems[D]. Beijing: Tsinghua University, 2022.

[16] 张海，王程西，王岱，等. 近断层地震动作用下浅埋综合管廊地震易损性研究[J]. 工程力学，2024，41(2)：213-221.
Zhang Hai, Wang Chengxi, Wang Dai, et al. Study on seismic fragility of shallow buried utility tunnel under near-fault ground motion[J]. Engineering Mechanics, 2024, 41(2): 213-221.

[17] 高永武，王东明，陈敬一. 考虑场地效应地震动确定方法对结构地震易损性的影响研究[J]. 工程力学，2025，42(4)：139-149.
Gao Yongwu, Wang Dongming, Chen Jingyi. Influence of probabilistic seismic vulnerability analysis on ground motion determination method with considering site effect[J]. Engineering Mechanics, 2025, 42(4): 139-149.

[18] 赵锦一，宋雷，周志光. 考虑SSI效应的核电厂SSC耦合体系模型主余震易损性分析[J]. 核动力工程，2023，44(5)：85-94.
Zhao Jinyi, Song Lei, Zhou Zhiguang. Fragility analysis of main aftershock by nuclear power plant SSC coupling system model considering SSI effect[J]. Nuclear Power Engineering, 2023, 44(5): 85-94.

[19] 王月，芦燕. 地震和风耦合作用下大跨度单层球面网壳结构动力响应特征及易损性分析[J]. 空间结构，2023，29(3)：21-30，58.
Wang Yue, Lu Yan. Dynamic response and vulnerability analysis of large-span single-layer reticulated shell structures subjected to coupled earthquake and wind[J]. Spatial Structures, 2023, 29(3): 21-30, 58.

[20] Jin Q, Li X, Sun N, et al. Experimental and numerical study on tuned liquid dampers for controlling earthquake response of jacket offshore platform[J]. Marine Structures, 2007, 20(4): 238-254.

[21] Li C, Diao Y C, Li H N, et al. Seismic performance assessment of a sea-crossing cable-stayed bridge system considering soil spatial variability[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2023, 235: 109210.

[22] Ancheta T D, Darragh R B, Stewart J P, et al. PEER NGA-West2 database: PEER report No. 2013/03[R]. Berkeley: Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, 2013.

[23] ISO 19901—2: 2022 Petroleum and natural gas industries—Specific requirements for offshore structures—part 2: seismic design procedures and criteria[S].

[24] Shang D Y, Li X P, Yin M, et al. Dynamic modeling and rotation control for flexible single-link underwater manipulator considering flowing water environment based on modified Morison equation [J]. Ocean Engineering, 2024, 291: 116427.

[25] Hrytsyna O, Sladek J, Sladek V, et al. Rayleigh wave propagation in centrosymmetric materials with micro-stiffness, flexoelectric and micro-inertia effects[J]. Ultrasonics, 2024, 141: 107317.

[26] Zan X X, Lin Z H. On the applicability of Morison equation to force estimation induced by internal solitary wave on circular cylinder[J]. Ocean Engineering, 2020, 198: 106966.

[27] GB 50011—2001 建筑抗震设计规范[S].
GB 50011—2001 Code for seismic design of buildings[S].

[28] 沈一鹏，孙勇，陈鑫，等. 地震动特性对加固后单跨框架抗倒塌性能影响分析[J]. 建筑结构，2025，55(1)：66-72，138.
Shen Yipeng, Sun Yong, Chen Xin, et al. Analysis on influence of ground motion characteristics on anti-collapse performance of reinforced single-span school buildings[J]. Building Structure, 2025, 55(1): 66-72, 138.

[29] 王晓磊，杨煜，阎卫东，等. 近远场地震作用下超高层结构多元联合易损性分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版)，2024，40(4)：668-677.
Wang Xiaolei, Yang Yu, Yan Weidong, et al. Multivariate joint fragility analysis for super high-rise structure under near-fault and far-field earthquakes[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science Edition), 2024, 40(4): 668-677.

（本文编辑：任　栋）