

DOI:10.11918/202112016

近断层脉冲型地震动强度指标与高耸结构损伤关联性

邱意坤^{1,2}, 甄伟¹, 周长东²

(1. 北京市建筑设计研究院有限公司, 北京 100045; 2. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘要: 为了研究近断层脉冲型地震动作用下适用于评价高耸结构抗震性能的地震动强度参数, 基于加速度反应谱提出一种同时考虑结构周期延长和高阶振型效应的地震动强度指标。分别以 120 m 和 240 m 的钢筋混凝土烟囱结构为研究对象, 使用 OpenSEES 程序, 在近断层脉冲型地震动作用下, 揭示了高耸混凝土结构的损伤指标 (Park-Ang 损伤指标、最大层间位移角、最大曲率、最大楼层加速度以及最大顶点位移) 与 37 个地震动强度指标的关联性。研究结果表明: 提出的地震动强度指标最适合用于预测高耸混凝土结构在近断层脉冲型地震作用下发生的 Park-Ang 损伤; 与速度相关的地震动强度指标表现出与高耸结构损伤指标的较高的相关性; 随着结构周期的增大, 位移型的地震动强度指标与损伤的关联性有增长的趋势; 此外, 地面峰值加速度在表征高耸结构变形破坏方面存在局限性, 但是可以用来分析非结构构件的抗震性能。研究结论可为选择合适的地震动强度指标和损伤指标评价高耸混凝土结构在近断层脉冲型地震动作用下的抗震性能提供参考。

关键词: 高耸结构; 脉冲型地震动; 地震动强度指标; 结构损伤; 相关性

中图分类号: TU973.31 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2023)05-0139-12

Correlation between structural damage of high-rise structures and ground motion intensity measures under near-fault ground motions with pulse-like effect

QIU Yikun^{1,2}, ZHEN Wei¹, ZHOU Changdong²

(1. Beijing Institute of Architectural Design, Beijing 100045, China;

2. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: To investigate the ground motion intensity measures suitable for evaluating high-rise structures under near-fault ground motions with pulse-like effect, this paper proposes a new ground motion intensity measure considering period elongation effect and higher mode effect based on acceleration spectrum. Taking two high-rise reinforced chimney structures (120 m and 240 m) as research objects, the correlation between damage indices (Park-Ang damage index, maximum inter-story drift ratio, maximum structural curvature, maximum floor acceleration, and maximum roof displacement) of high-rise structures and 37 ground motion intensity measures was studied under near-fault ground motions using OpenSEES. Results show that the proposed intensity measure was the optimal index in predicting the Park-Ang damage of high-rise concrete structures under near-fault ground motions. High correlation between velocity-related intensity measures and structural damage index was observed. As the structural period increased, the correlation between damage indices and displacement-related intensity measures was improved. Besides, peak ground acceleration had limitations in characterizing the deformation and failure of high-rise structures, but it could be used to analyze the seismic performance of non-structural components. The research results can provide reference for selecting proper measures and structural damage indices to evaluate the seismic performance of high-rise structures under near-fault ground motions.

Keywords: high-rise structure; pulse-like ground motion; ground motion intensity measure; structural damage; correlation

地震动序列中包含的信息、特征以及对结构造成的震害可以用地震动强度指标来衡量。对于特定结构, 选择合适的地震动强度指标来评估结构的损伤以及结构的震后可恢复性可以有效地降低由于地

震动之间的差异带来的结果离散性。既有研究表明, 地震动强度指标与结构损伤具有关联性。在结构损伤分析时, 理想的情况是所选择的地震动强度指标能最大程度地反映结构在地震动作用下的损伤

情况。

近年来,国内外研究学者针对不同地震动强度参数与结构损伤之间的相关性开展了一系列研究。文献[1]研究了14种地震强度指标 S_{SI} 与一座钢筋混凝土框架结构整体损伤之间的相关性,并得出基本周期谱加速度与结构整体损伤的相关性最高的结论。文献[2]开展了隧道衬砌结构损伤与地震动强度指标的相关性研究。结果表明,对于无速度脉冲的地震动,地面峰值速度(V_{pg})和地面峰值位移(D_{pg})具备较高的相关性。文献[3]基于中国汶川地震动数据,研究了长周期单自由度体系最大响应与12种地震强度指标的相关性,结果显示不同地震动强度指标与长周期单自由度体系最大响应的相关性差别显著。

文献[4]研究了远场地震动作用下23种地震动强度指标与一座三层钢筋混凝土框架结构损伤指标之间的相关性,研究表明,地震反应谱强度SI指标(S_{SI})与结构的最大层间位移角、Park-Ang损伤指标具有最高的相关性。文献[5]基于中国汶川地震动的实际震害资料,开展了结构的破坏情况与地面峰值加速度(A_{pg})、 V_{pg} 和 S_{SI} 之间的相关性研究。结果表明, V_{pg} 与近断层脉冲地震动作用下的结构损伤有较好关联性。文献[6]开展了在不同方向的地震动作用下,结构损伤与地震动强度指标之间的关联性,结果表明地面峰值速度 V_{pg} 、Arias强度和地震反应谱强度 S_{SI} 与结构层间位移角和Park-Ang损伤指标关联性较高。

文献[7]开展了地震动强度指标与大跨度桥梁损伤的相关性研究,并建议使用 V_{pg} 进行大跨度钢桥的地震风险评估。文献[8]开展了地震动强度参数与地铁车站结构动力响应指标分析,结果表明加速度型地震动参数更适合用于预测单层双跨地铁车站结构在地震作用下的动力响应。文献[9]开展了地震动强度指标与框架结构响应的关联性研究。文献[10]研究了地震动多元强度参数主成分与结构损伤的相关性。文献[11]针对隔震结构,开展了地震动强度指标与结构损伤的相关性研究。文献[12]研究了钢框架结构最大层间位移角与地震动强度指标关联性情况,并建议使用地震动比能量密度(SED)作为分析钢框架结构抗震性能的强度指标。综上所述,目前地震动强度指标与损伤关联性的研究多针对于框架结构、高层结构、隧道和桥梁结构等,缺乏针对高耸结构的相关研究。

烟囱、电视塔等高耸结构在中国数量巨大、分布广泛,是基础设施的重要组成部分,与其他建筑物相比,由于不具备多道抗震防线,在强震作用下容易发

生破坏。特别地,在近断层脉冲型地震动作用下,结构将产生更大的位移、变形等结构动力响应^[13]。因此,有必要开展高耸结构损伤与近断层脉冲型地震动强度指标的相关性研究。

本文选择2座高度分别为120 m和240 m的烟囱结构,在近断层脉冲型地震动作用下,利用开源程序OpenSEES分析结构在近断层脉冲型地震动作用下的最大顶点位移、层间位移角、最大弯曲曲率、Park-Ang损伤、最大楼层加速度与地震动强度指标的相关性。为分析和评价高耸结构在脉冲型地震动作用下的抗震性能以及震后可恢复性时,结构损伤指标和地震动强度指标的选择提供参考。

1 一种新的复合型地震动强度指标

基本周期对应的谱加速度 $S_a(T_1)$ 由于同时包含了地震动的频谱特征以及单自由度结构体系在地震动作用下的最大响应,而得到广泛的应用。然而随着结构高度的逐渐增加,以及结构延性设计概念的普及, $S_a(T_1)$ 在评价长周期结构抗震性能上逐渐显示出局限性。一方面,仅仅考虑结构的基本周期的动力响应是不够的,对于高耸混凝土结构,高阶振型对于结构动力响应的贡献不容忽视;另一方面,延性设计概念允许结构材料进入塑性状态,结构损伤的积累宏观体现在结构刚度的退化,结构自振周期的延长。为了将结构高阶振型参与、周期延长效应以及频谱形状的特性从地震动强度指标的层面上加以反映,基于反应谱加速度改进的地震动强度指标得到了大量关注。

文献[14]提出一种考虑结构周期延长效应的双参数指数型地震动强度指标 $S^* = S_a(T_1)R_{S_a}^\alpha$,其中 $R_{S_a} = S_a(T_f)/S_a(T_1)$, T_f 是结构延长后的周期。文献[15]提出了2个指数型强度指标 I_{12} 和 I_{123} , I_{12} 指标考虑了结构周期延长效应,适用于中低层建筑结的抗震性能评价, τ_a 和 τ_b 可分别取结构基本周期以及延长后的周期。 I_{123} 考虑结构的前3阶振型的参与, $I_{12} = S_a(\tau_a, 5\%)^{1-\beta} S_a(\tau_b, 5\%)^\beta$ 和 $I_{123} = S_a \cdot (\tau_a, 5\%)^{1-\beta-\gamma} S_a(\tau_b, 5\%)^\beta S_a(\tau_c, 5\%)^\gamma$ 。文献[16-17]建议分别考虑结构周期延长效应的指标 $S_{N1} = S_a(T_1)^{0.5} S_a(CT_1)^{0.5}$ 和考虑结构前2阶振型的指标 $S_{N2} = S_a(T_1)^{0.75} S_a(T_2)^{0.25}$ 。

文献[18]基于超高层结构,提出了一种考虑高阶振型的地震动指标 $\bar{S}_a$,并认为在地震动强度指标层面上,结构各阶振型对结构响应的贡献相同。值得注意的是,该研究表明,在地震动指标中考虑的振型数量并不是越多越好。文献[19]使用指数组合

形式提出了 2 种考虑高阶振型的地震动强度指标 $S_{12} = S_a(T_1)^\alpha S_a(T_2)^\beta$ 和 $S_{123} = S_a(T_1)^\alpha S_a(T_2)^\beta \cdot S_a(T_3)^\gamma$, α 、 β 和 γ 分别是结构振型质量与总质量的比值。

除了采用指数组合形式修正谱加速度外,也有学者使用线性组合的方式修正地震动强度指标,文献[20]采用结构前 2 阶和前 3 阶谱加速度值线性相加形式,提出了 2 个强度指标, $S_{a12}^* = 0.8S_a(T_1) +$

$0.2S_a(T_2)$ 和 $S_{a123}^* = 0.8S_a(T_1) + 0.15S_a(T_2) + 0.05S_a(T_3)$ 。在此基础上,文献[21]使用结构振型质量参与系数作为组合因子,提出了一种考虑结构高阶振型参与的地震动强度指标 $\bar{S}_a^* = \sum_{i=1}^n \alpha_i S_a(T_i)$ 。表 1 为总结的部分基于谱加速度的地震动强度指标,并根据内容和组合形式进行了分类。

表 1 基于加速度反应谱修正的地震动强度指标

Tab. 1 Ground motion intensity measures based on acceleration spectrum

类型	高阶振型效应	周期延长效应
指数组合型	$I_{123} = S_a(T_1)^{1/3} S_a(T_2)^{1/3} S_a(T_3)^{1/3}$	
	$S_{N2} = S_a(T_1)^{0.75} S_a(T_2)^{0.25}$	$S^* = S_a(T_1)^{1-\alpha} S_a(2T_1)^\alpha$
	$S_{12} = S_a(T_1)^{\frac{\alpha_1}{\alpha_1+\alpha_2}} S_a(T_2)^{\frac{\alpha_2}{\alpha_1+\alpha_2}}$	$I_{12} = S_a(T_1)^{0.5} S_a(2T_1)^{0.5}$
	$S_{123} = S_a(T_1)^{\frac{\alpha_1}{\alpha_1+\alpha_2+\alpha_3}} S_a(T_2)^{\frac{\alpha_2}{\alpha_1+\alpha_2+\alpha_3}} S_a(T_3)^{\frac{\alpha_3}{\alpha_1+\alpha_2+\alpha_3}}$	$S_{N1} = S_a(T_1)^{0.5} S_a(1.5T_1)^{0.5}$
线性组合型	$\bar{S}_a = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n S_a(T_i)}$	
	$S_{a12}^* = 0.8S_a(T_1) + 0.2S_a(T_2)$	
	$S_{a123}^* = 0.8S_a(T_1) + 0.15S_a(T_2) + 0.05S_a(T_3)$	—
	$\bar{S}_a^* = \sum_{i=1}^n \alpha_i S_a(T_i)$	

在强震作用下,结构由开始出现损伤到最终破坏可以看作是刚度不断退化的过程,宏观上出现结构周期延长现象。此外,对于多自由度结构体系,有必要考虑高阶振型对于结构响应的贡献,而现有的修正指标仅考虑了高阶振型或者周期延长效应,缺乏对这 2 种因素的综合体现。因此,本文基于加速度反应谱,在既有研究基础上提出了一种同时考虑周期延长效应和高阶振型贡献的地震动强度指标 S_c^* ,其表达式为

$$S_c^* = \alpha_1 S_a(T_1)^\beta S_a(CT_1)^{1-\beta} + \sum_{i=2}^n \alpha_i S_a(T_i) \quad (1)$$

式中: $S_a(T_i)$ 为第 i 阶的结构反应谱加速度; n 为参与计算的振型数量; α_i 为第 i 阶的振型组合系数; β 为周期延长效应权重系数; C 为结构的周期延长系数。从定义可以看出, S_c^* 从理论构成上参考了振型分解反应谱法的概念,在首项以指数组合形式考虑了周期延长效应,从第 2 项开始以线性叠加形式考虑了高阶振型的参与。复合型的组合方式保证了指标的多用性,具体来说如果不考虑高阶振型效应(即仅有第 1 项), S_c^* 具备了和 S_{N1} 、 S^* 、 I_{12} 等指数型强度指标相同的特征;而如果不考虑周期延长效应(周期延长系数 $C=1$), S_c^* 则会“退化”成为仅考虑高阶振型效应的线性组合指标 $\bar{S}_a^*$ 、 S_{a12}^* 和 S_{a123}^* 。从

内容上, S_c^* 完善了现有的基于反应谱加速度指标的研究,使得结构在强震作用下的高阶振型效应以及周期延长效应在同一个地震动强度指标中同时得到体现,其组合形式也同时反映了现有指数型与线性叠加型指标的特点。

2 地震动记录与强度指标的选择

2.1 地震动记录的选择

近断层地震动与远场地震动的特性有较大差异,近断层地震动作用下的结构相对于远场地震动作用破坏更为严重。近断层地震动中,有些地震动时程序列中具有明显的加速度脉冲或长周期速度脉冲,这种脉冲效应会引起结构更大的变形、位移和其他动力响应。为了研究脉冲型地震动作用下,高耸混凝土结构损伤指标与地震动强度指标相关性,本文选择 FEMA^[22] 推荐的 28 条近断层脉冲型地震动记录输入结构。其加速度反应谱信息见图 1。

2.2 其他地震动强度指标

合理的地震动强度指标是预测结构响应和评价结构地震功能可恢复能力的重要基础。理想的地震动强度指标需要综合反映地震动的 3 要素,即频谱、振幅和持时,这些特征与结构的响应有着密切的关系。一个合理的地震动强度指标理应准确反映结构

在地震作用下的响应程度。本文选择了包括 S_c^* 在内的 37 个地震动强度指标,并将其按照类别划分为:幅值型地震动强度指标(A_{pg} 、 V_{pg} 、 D_{pg} 、 V_{pg}/A_{pg} 、 D_{pg}/A_{pg});频谱型地震动强度指标(S_c^* 、 $S_a(T_1)$ 、 E_{EPA} 、 E_{EPV}),频谱积分型强度指标(A_{ASI} 、 V_{VSI})和 Housner 谱强度指标(S_{SI});持时型地震动强度指标(T_d)。复合型地震动强度指标(Arias 强度)、特征强度(I_c)、比能量密度(S_{SED})、累积绝对速度(C_{CAV})、累积绝对位移(C_{CAD})、Nau 指标(E_a 、 E_v 、 E_d)、地震功率指标(P_a 、 P_v 、 P_d)、Riddell 指标(I_a 、 I_d 、 I_v)、Fajfar 指标(I_f),以及部分指标对应的均方根类的指标(a_{rms} 、 v_{rms} 、 d_{rms} 、 A_{rs} 、 V_{rs} 、 D_{rs} 、 a_{RMS} 、 v_{RMS} 、 d_{RMS})。详细信息见表 2。

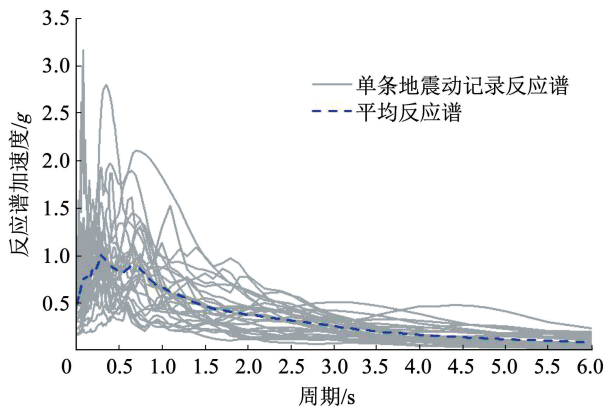


图 1 近断层脉冲效应地震动加速度反应谱

Fig. 1 Ground motion acceleration response spectrum with pulse-like effect

表 2 本文选择的地震动强度指标

Tab. 2 Ground motion intensity measures selected in this paper

序号	地震动强度指标	定义	单位
1	基本周期对应的反应谱加速度	$S_a(T_1, \xi=0.05)$	g
2	地面峰值加速度 A_{pg}	$\max a(t) $	g
3	地面峰值速度 V_{pg}	$\max v(t) $	cm/s
4	地面峰值位移 D_{pg}	$\max d(t) $	cm
5	V_{pg}/A_{pg}	$\frac{\max v(t) }{\max a(t) }$	s
6	D_{pg}/V_{pg}	$\frac{\max d(t) }{\max v(t) }$	s
7	Housner 谱强度	$S_{SI} = \int_{0.1}^{2.5} PS_v(T, \xi = 0.05) dT$	cm
8	加速度均方根	$a_{rms} = \sqrt{\left(\frac{1}{t_f} \int_0^{t_{tot}} a(t)^2 dt\right)}$	g
9	速度均方根	$v_{rms} = \sqrt{\left(\frac{1}{t_f} \int_0^{t_{tot}} v(t)^2 dt\right)}$	cm/s
10	位移均方根	$d_{rms} = \sqrt{\left(\frac{1}{t_f} \int_0^{t_{tot}} d(t)^2 dt\right)}$	cm
11	重要持时 T_d	$T_d = t_{95} - t_5$	s

序号	地震动强度指标	定义	单位
12	Arias 强度 I_a	$I_a = \frac{\pi}{2g} \int_0^{t_{tot}} a(t)^2 dt$	cm/s
13	特征强度 I_c	$I_c = a_{rms}^{1.5} \sqrt{t_d}$	
14	比能量密度 S_{SED}	$S_{SED} = \int_{t_i}^{t_f} v(t)^2 dt$	
15	累积绝对速度 C_{CAV}	$C_{CAV} = \int_0^{t_{tot}} a(t) dt$	cm/s
16	累积绝对位移 C_{CAD}	$C_{CAD} = \int_0^{t_{tot}} v(t) dt$	
17	Nau 指标 E_a	$E_a = \int_0^{t_{tot}} a(t)^2 dt$	
18	E_a 平方根 A_{rs}	$A_{rs} = \sqrt{E_a}$	
19	Nau 指标 E_v	$E_v = \int_0^{t_{tot}} v(t)^2 dt$	
20	E_v 平方根 V_{rs}	$V_{rs} = \sqrt{E_v}$	
21	Nau 指标 E_d	$E_d = \int_0^{t_{tot}} d(t)^2 dt$	
22	E_d 平方根 D_{rs}	$D_{rs} = \sqrt{E_d}$	
23	地震功率指标 P_a	$P_a = \frac{1}{t_{95} - t_5} \int_{t_5}^{t_{95}} a(t)^2 dt$	g^2
24	P_a 平方根 a_{RMS}	$a_{RMS} = \sqrt{P_a}$	g
25	地震功率指标 P_v	$P_v = \frac{1}{t_{95} - t_5} \int_{t_5}^{t_{95}} v(t)^2 dt$	cm^2/s^2
26	P_v 平方根 v_{RMS}	$v_{RMS} = \sqrt{P_v}$	cm/s
27	地震功率指标 P_d	$P_d = \frac{1}{t_{95} - t_5} \int_{t_5}^{t_{95}} d(t)^2 dt$	cm^2
28	P_d 平方根 d_{RMS}	$d_{RMS} = \sqrt{P_d}$	cm
29	加速度谱强度 A_{ASI}	$A_{ASI} = \int_{0.1}^{0.5} S_a(T, \xi = 0.05) dT$	cm/s
30	速度谱强度 V_{VSI}	$V_{VSI} = \int_{0.1}^{2.5} S_v(T, \xi = 0.05) dT$	cm
31	有效峰值加速度 E_{EPA}	$E_{EPA} = \frac{\text{mean}(s_a^{0.1-0.5}(\xi=0.05))}{2.5}$	g
32	有效峰值速度 E_{EPV}	$E_{EPV} = \frac{\text{mean}(s_v^{0.1-0.5}(\xi=0.05))}{2.5}$	cm/s
33	Riddell 指标 I_a	$I_a = A_{pg} \cdot \sqrt[3]{t_{tot}}$	
34	Riddell 指标 I_d	$I_d = D_{pg} \cdot \sqrt[5]{t_{tot}}$	
35	Riddell 指标 I_v	$I_v = \sqrt[3]{D_{pg}^2} \cdot \sqrt[3]{t_{tot}}$	
36	Fajfar 指标 I_f	$I_f = V_{pg} \cdot \sqrt[4]{t_{tot}}$	

注: ξ 为结构阻尼比, t_{tot} 为地震动总的持续时间, t_{95} 和 t_5 分别为地震动 Arias 强度达到 95% 和 5% 的时间点。

3 结构损伤指标的选择

结构的损伤指标是定量评估结构破坏程度的工具。常见的结构损伤指标有反映构件损伤的 Park-Ang 指标、结构最大层间位移角、最大楼层加速度、最大顶点位移等。

在高耸结构损伤指标的选择方面,文献[23-24]以混凝土受压应变为损伤参数对冷却塔和烟囱

进行了地震易损性分析;文献[25]用层间位移角作为结构损伤指标对德黑兰电视塔进行了增量动力分析;文献[26]使用曲率延性系数作为损伤指标,分析了高耸烟囱的地震易损性和抗倒塌性能。

本文在研究高耸结构损伤指标与地震动强度指标关联性时,选择了 5 种损伤指标,分别是结构最大弯曲曲率、结构最大层间位移角、结构最大顶点位移、结构最大楼层加速度以及 Park-Ang 损伤指标。Park-Ang 损伤指标是文献[27]在试验基础上提出的同时考虑钢筋混凝土构件变形和滞回耗能的双参数模型。该模型已经成为评价钢筋混凝土构件损伤时使用最为广泛的模型之一,其计算式如下:

$$D = \frac{\delta_m}{\delta_u} + \beta \frac{\int dE}{F_y \delta_u} \tag{2}$$

式中: δ_m 为截至计算点处构件的最大变形; δ_u 为构件在荷载作用下的极限变形; β 为耗能因子; $\int dE$ 为计算点处的滞回耗能; F_y 为构件的屈服力。

4 结构数值模型

4.1 结构概况

本文选择高度分别为 120 m 和 240 m 的实际钢筋混凝土烟囱作为研究对象,这 2 座烟囱均建于 20 世纪 90 年代。主体结构由钢筋混凝土壳体、隔热层和内衬组成,其中 120 m 烟囱底部半径为 5.86 m,混凝土材料标号为 C30,钢筋采用 HRB335,隔热层和内衬的密度分别为 450 kg/m³ 和 1 200 kg/m³;240 m 烟囱底部半径为 12.07 m,隔热层和内衬的密度分别为 350 kg/m³ 和 1 900 kg/m³。表 3 和表 4 分别为 2 座烟囱结构的截面尺寸,详细的结构配筋情况可参考文献[28],在此不再具体说明。

表 3 120 m 烟囱结构截面尺寸

Tab. 3 Cross-sectional dimensions of the 120 m chimney

标高/m	外半径/cm	筒壁厚度/cm	隔热层/cm	内衬/cm
120	286	18	5	12
110	306	18	5	12
100	326	18	5	12
90	346	20	5	12
80	366	20	5	12
70	386	22	5	12
60	406	22	5	12
50	426	25	5	12
40	446	25	5	12
30	466	30	5	12
20	506	30	5	12
10	546	35	5	12
0	1 207	60	0	0

表 4 240 m 烟囱结构截面尺寸

Tab. 4 Cross-sectional dimensions of the 240 m chimney

标高/m	外半径/cm	筒壁厚度/cm	隔热层/cm	内衬/cm
240	387	20	5	12
225	402	20	5	12
210	417	20	5	12
195	432	22	5	12
180	447	24	5	12
165	492	26	5	12
150	537	28	5	12
135	582	30	5	12
120	627	32	5	12
105	672	34	8	12
90	717	36	8	12
75	792	38	8	12
60	867	42	8	12
45	942	46	8	12
30	1 017	50	8	12
20	1 067	50	8	12
6.4	1 162	60	8	23
0	1 207	60	0	0

4.2 结构有限元模型

本文采用开源程序 OpenSEES (Open System for Earthquake Engineering Simulation),基于分布塑性的纤维梁柱单元建立了 2 座烟囱结构的模型,见图 2。烟囱结构模型使用集中质量的长悬臂模型模拟,集中质量点之间使用非线性梁柱单元 (nonlinear beam column,NBC) 连接。由于烟囱隔热层和内衬在建造时分段堆砌在筒壁内侧环形梁上,在建模时将隔热层和内衬的质量以集中质量形式作用在单元节点处,可不考虑隔热层和内衬对结构侧向刚度的贡献。结构圆筒截面被离散为若干个纤维层,从外到内依次为外侧混凝土保护层、外排钢筋层、核心混凝土层、内排钢筋层以及内测混凝土保护层,各个纤维层被赋予对应的材料力学特性,结构的阻尼矩阵为瑞利阻尼模型,阻尼比取 0.05。圆形筒身截面剪切、扭转效应的使用 Section Aggregator 命令进行模拟。

混凝土材料采用 Concrete02 模型模拟,其应力应变关系见图 3(a)。Concrete02 模型可以考虑混凝土受拉软化的线性加、卸载规则,并且可以考虑混凝土的初始开裂等性能。钢筋材料使用 OpenSEES 中的 Steel02 模型模拟,其应力应变关系见图 3(b)。Steel02 模型能较好地钢筋应变硬化现象,并考虑了 Bauschinger 效应。

本文烟囱结构模型的动力特征见表 5。2 座烟囱结构总质量分别为 12 590 t 和 3 650 t,240 m 烟囱结构前 3 阶自振周期分别为 3.33 s、0.98 s 和 0.45 s;120 m 烟囱前 3 阶自振周期分别为 1.92 s、0.36 s 和 0.14 s。文献[26]对本文的 240 m 烟囱进行了实际频率测量,以验证本文 OpenSEES 建立烟囱模型的准确性。结果显示,周期与实测周期在 5% 以内,这表明本文模型能够有效模拟烟囱结构的动力特征。

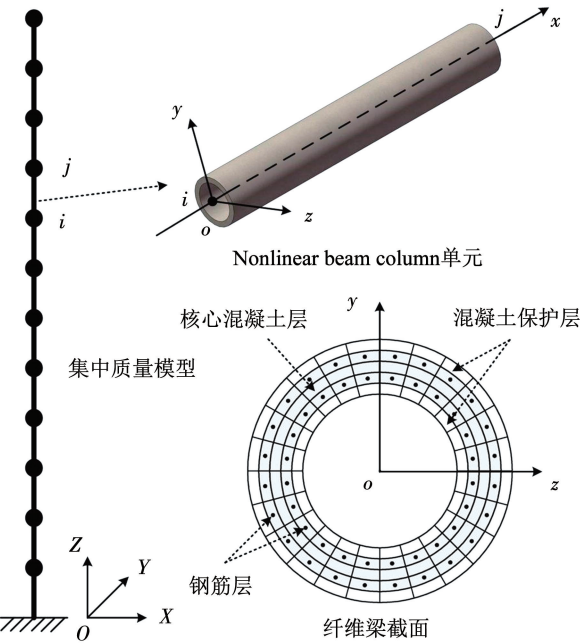


图 2 烟囱结构有限元模型

Fig.2 Finite element model of the chimney in OpenSEES

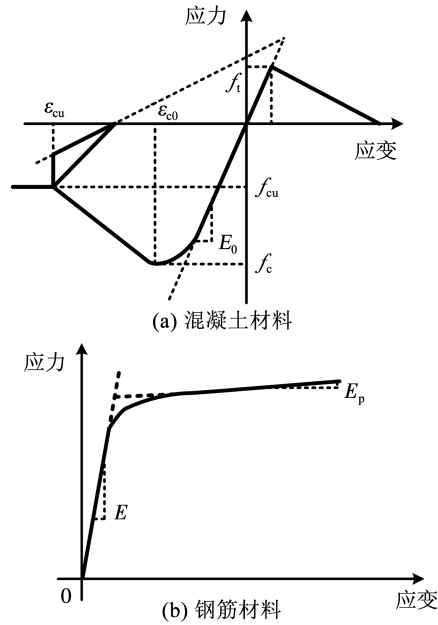


图 3 材料应力应变模型

Fig.3 Strain-stress model of materials

表 5 烟囱结构动力特征

Tab.5 Dynamic properties of the chimneys

模型/ m	振 型	模型周期/ s	实测周期/ s	误差/ %	振型质量 参与系数	质量/ t
240	1	3.33	3.413	2.5	0.29	12 590
240	2	0.98	1.025	1.0	0.20	12 590
240	3	0.45	0.502	0.5	0.12	12 590
120	1	1.92	—	—	0.51	3 650
120	2	0.36	—	—	0.27	3 650
120	3	0.14	—	—	0.14	3 650

5 地震动强度指标与结构损伤关联性

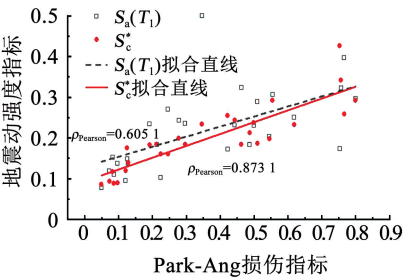
5.1 地震动强度指标与结构损伤关联性评价指标

本文在研究地震动强度指标和结构损伤指标相关性时,采用皮尔逊相关性系数 ρ_{Pearson} 评价相关程度,其计算方法见式(3)。

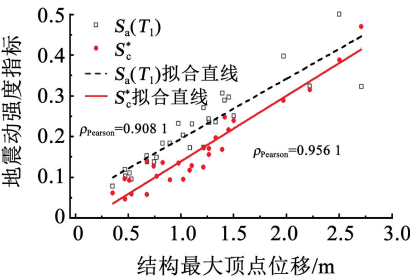
$$\rho_{\text{Pearson}} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (3)$$

式中: X_i 为结构响应值或者损伤指标样本值; Y_i 为地震动强度指标样本值; $\bar{X}$ 和 $\bar{Y}$ 分别为样本点均值。当 ρ_{Pearson} 越接近 1 时,表示评价的指标之间相关性越高。

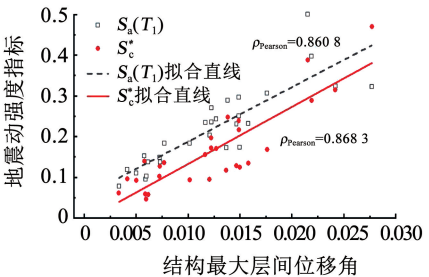
图 4 为 240 m 烟囱结构 5 种损伤指标与地震动强度指标 S_c^* 、 $S_a(T_1)$ 散点图和线性相关系数情况。文献[29]详细介绍并讨论了在计算 S_c^* 时,周期延长系数 C 以及振型参与数量 n 的取值,在此不再赘述。通过对比发现,不管选择何种结构损伤指标, S_c^* 和损伤指标相关性系数较 $S_a(T_1)$ 均得到了提高。这表明在高耸烟囱的地震动强度指标理论中,有必要在基本周期谱加速度的基础上,同时考虑更多模态的参与以及周期延长效应。



(a) S_c^* 指标与 Park-Ang 指标散点图



(b) S_c^* 指标与结构最大顶点位移散点图



(c) S_c^* 指标与结构最大层间角散点图

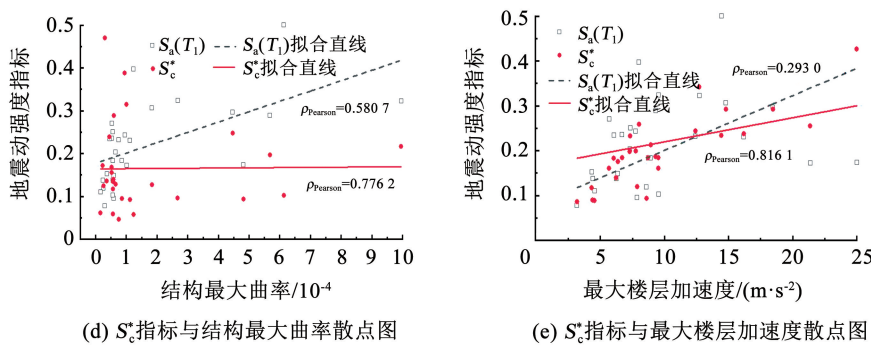


图 4 240 m 烟囱损伤指标与 S_c^* 指标关联性散点图

Fig.4 Scatter plots of correlation between damage indices of 240 m chimney and S_c^*

5.2 地震动强度指标与损伤指标关联性对比

图 5 为 37 个地震动强度指标与脉冲型地震动作用下烟囱结构的 Park-Ang 损伤之间的线性相关系数情况。其中,横坐标为地震动强度指标,纵坐标

为该指标与结构 Park-Ang 损伤指标的皮尔逊相关系数(ρ_{Pearson})情况, ρ_{Pearson} 值越接近 1,表明 2 种指标的相关性越强。

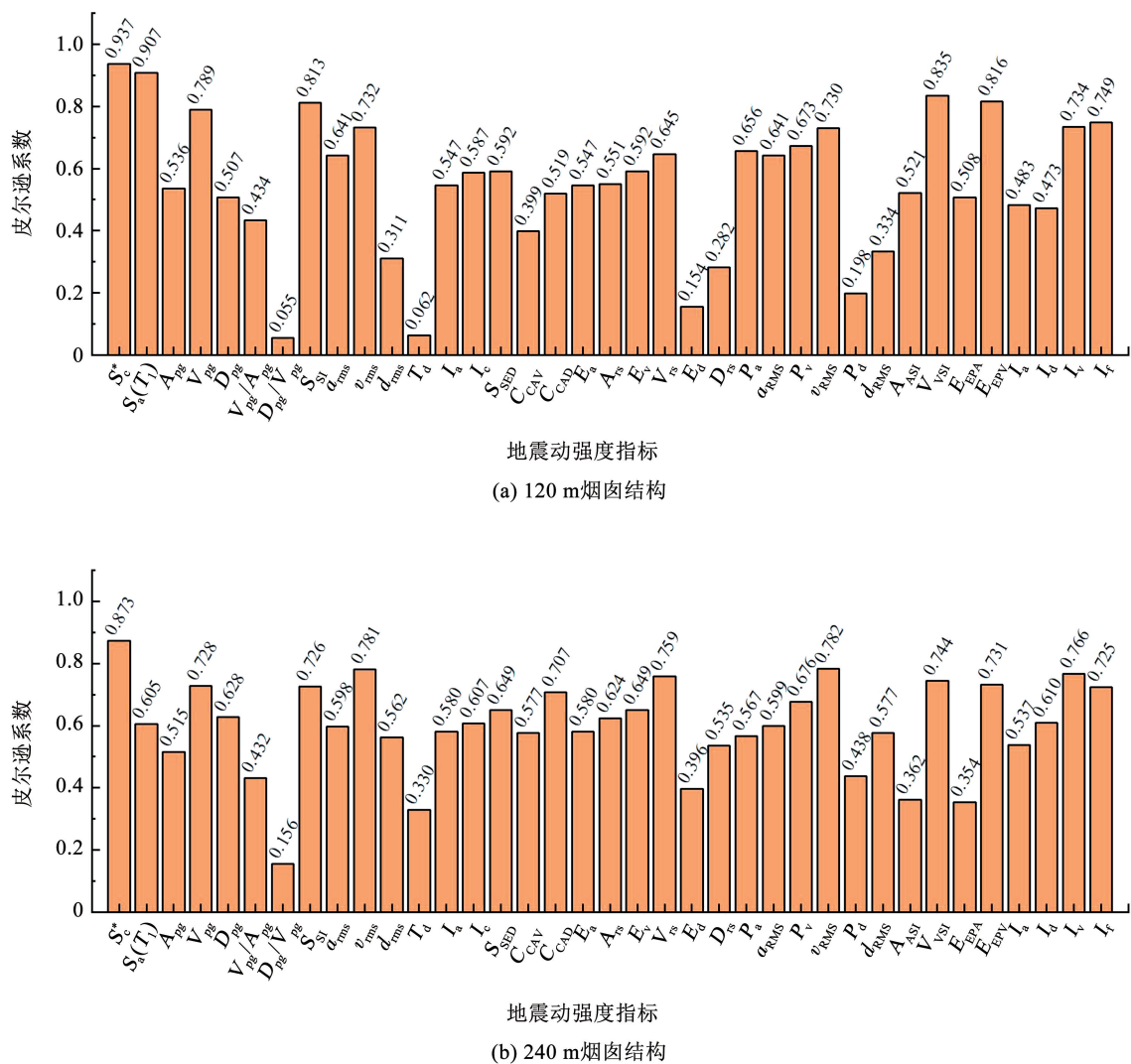


图 5 Park-Ang 损伤指标与地震动强度指标关联性

Fig.5 Correlation between ground motion intensity measures and Park-Ang damage index

如图 5(a)所示,对于 120 m 烟囱,在所有的地震动强度指标中,本文提出的同时考虑周期延长效

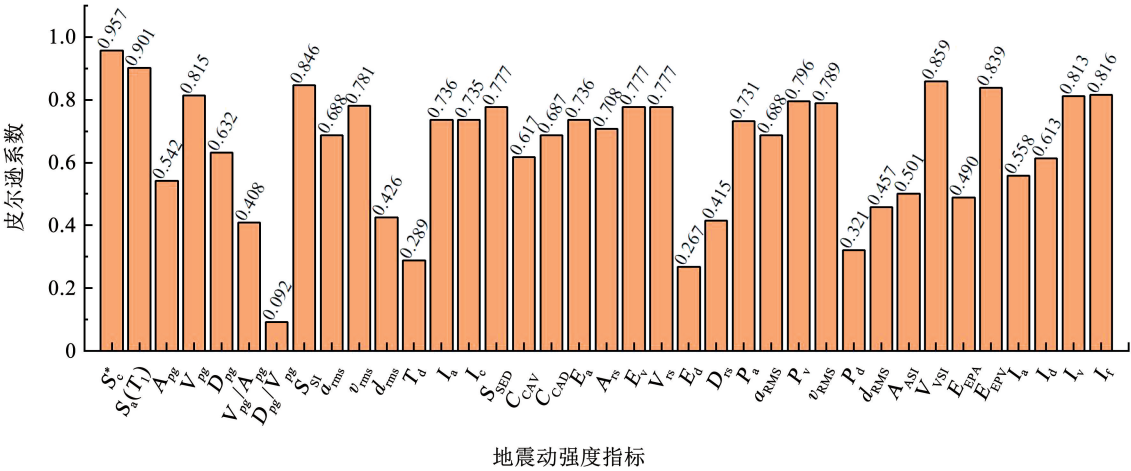
应和高阶振型效应的 S_c^* 指标与 Park-Ang 损伤指标的相关性最高,基本周期对应的谱加速度 $S_a(T_1)$ 、

有效峰值速度(E_{EPV})和 Housner 谱强度(S_{SI})紧随其后。在 240 m 烟囱中,本文提出的 S_c^* 指标与 Park-Ang 损伤指数仍然具备最高的相关性, v_{RMS} 、速度均方根 v_{rms} 和 V_{VSI} 分别位于相关性第 2 至 4 位。总体上,与速度相关的地震动强度指标(S_{SI} 、 V_{VSI} 、 E_{EPV} 、 V_{pg} 、 v_{rms})显示出与烟囱 Park-Ang 损伤指数有较强的相关性。对于烟囱结构,表示地震动持时的指标 T_d 与结构 Park-Ang 损伤相关性较低。此外,虽然 V_{pg}/A_{pg} 和 D_{pg}/V_{pg} 都在一定程度上反映了地震动的频谱特性,但这 2 个指标与结构 Park-Ang 损伤的相关性却大不相同。在复合强度指标(I_a 、 I_d 、 I_v 、 I_f)中, I_f 和 I_v 具备相对较高的相关性。

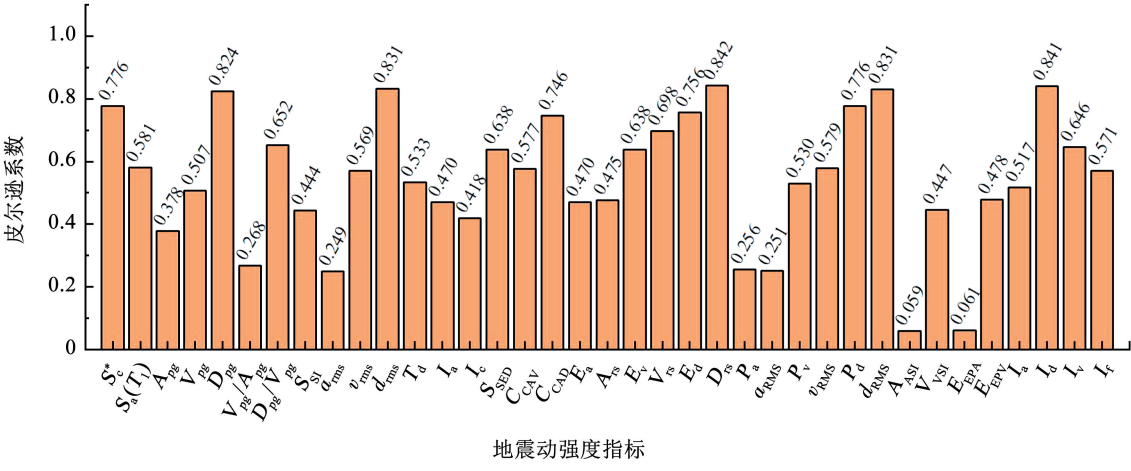
对于烟囱结构, V_{VSI} 或 S_{SI} 的较高相关性可以通过其定义来解释。一方面,速度型的地震动强度指标大多通过加速度时程曲线积分得到或者由位移时程曲线微分得到,因此速度型地震动强度指标与结构惯性力(加速度)和变形(位移)均有内在关联,而 Park-Ang 损伤指标本身即为考虑构件变形(位移)

和滞回耗能的损伤指标;另一方面, V_{VSI} 或 S_{SI} 采用反应谱和周期轴围成的面积定义速度谱强度,考虑了较为广泛的频谱特性,因此与结构的响应具有较高的关联性。

图 6 为脉冲型地震动作用下地震动强度指标结构最大曲率之间的线性相关系数情况。对于 120 m 烟囱结构,本文提出的 S_c^* 指标具备最高的相关性,相关系数高达 0.957。采用频谱积分定义的速度型指标 S_{SI} 、 V_{VSI} 、 E_{EPV} 具有相对较高的关联性。如图 5(b)所示,位移型的地震动强度指标与 240 m 烟囱最大曲率的相关性有较大增长,如 D_{pg} 、位移均方根 d_{rms} 、 D_{rs} 、 d_{RMS} 、 P_d 以及 I_d 。此外,本文提出的 S_c^* 指标是在 $S_a(T_1)$ 基础上,同时考虑了高阶振型效应和周期延长效应,通过对比 S_c^* 和 $S_a(T_1)$ 的相关性系数,可以发现在表征结构最大曲率方面,在地震动强度指标包含的信息中考虑高阶振型和周期延长效应是非常有效和必要的。



(a) 120 m 烟囱结构



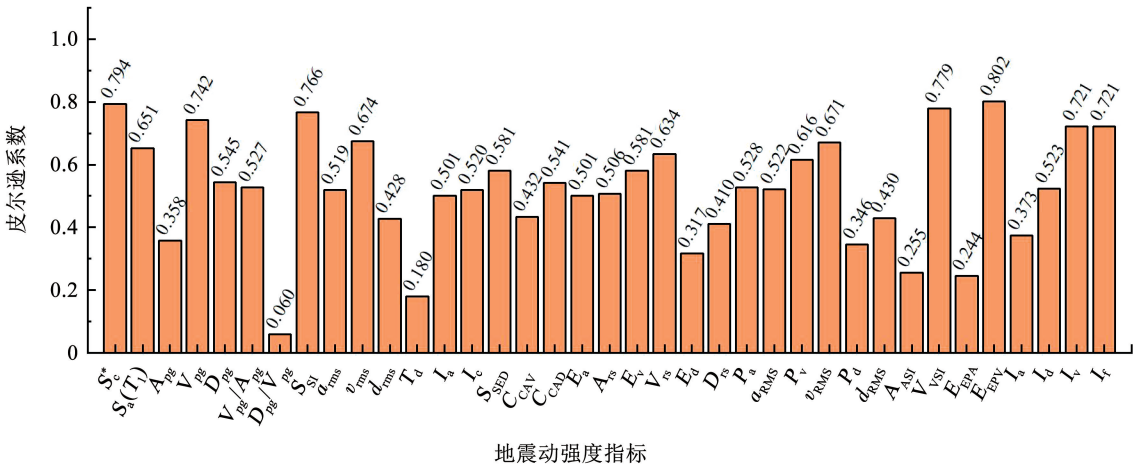
(b) 240 m 烟囱结构

图 6 结构最大曲率与地震动强度指标关联性

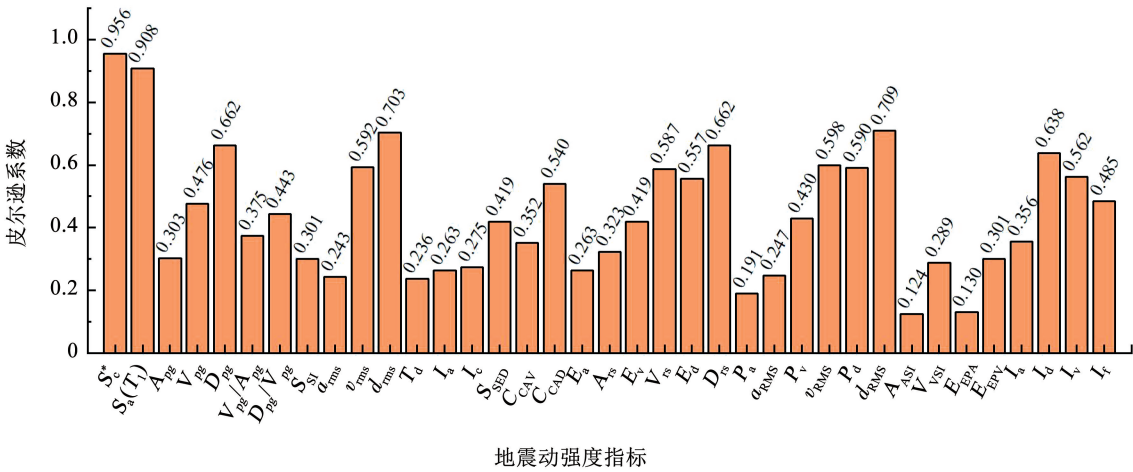
Fig. 6 Correlation between ground motion intensity measures and maximum structural curvature

图7和图8分别为37个地震动强度指标结构最大顶点位移、最大层间位移角之间的线性相关系数情况。值得指出的是,本文提出的指标 S_c^* 与240 m烟囱的层间位移角和最大顶点位移均具备最高的相关性。而对于120 m烟囱, E_{EPV} 与结构最大层间位移角、结构最大顶点位移之间具备最高的相关性。此外,对于速度相关的地面运动强度指标,特别是 V_{VSI} 和 S_{SI} ,其与结构最大层间位移角和结构最大顶点位移的相关性较强。此外,对比120 m烟囱,位移型的地震动强度指标与240 m烟囱损伤的相关

性有较大增长,特别是 D_{pg} 、位移均方根 d_{rms} 、 D_{rs} 和 d_{RMS} 。位移型地震动指标一般认为与地震动的低频分量密切相关,由于结构周期的增长,结构的最大层间位移角和结构最大顶点位移对于位移型的地震动强度指标更加敏感。此外,图6~8结果显示 A_{pg} 的皮尔逊相关系数较低,这表明中国规范使用的 A_{pg} 在表征近断层脉冲型地震动对于高耸烟囱的Park-Ang损伤、曲率、层间位移角以及顶点位移响应方面有一定局限性。



(a) 120 m烟囱结构



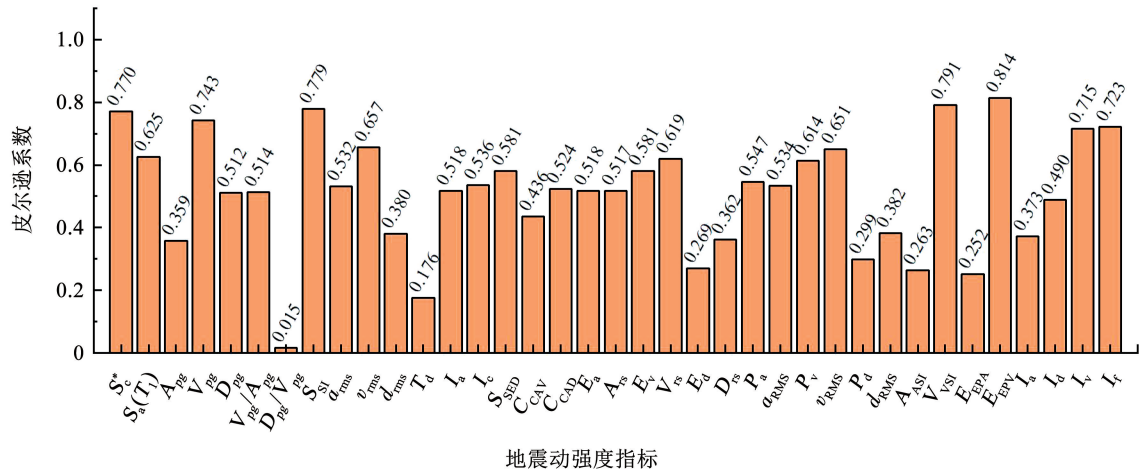
(b) 240 m烟囱结构

图7 结构最大顶点位移与地震动强度指标关联性

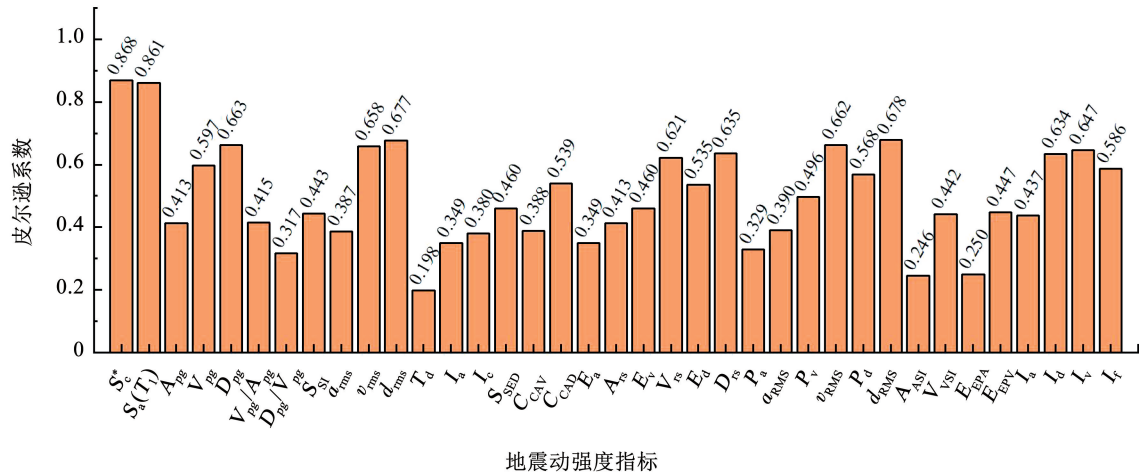
Fig. 7 Correlation between ground motion intensity measures and maximum roof displacement

图9为脉冲地震动作用下地震动强度指标和结构最大楼层加速度之间的线性相关情况。对于240 m烟囱,本文提出的指标 S_c^* 在37个指标中具备最高的相关性。而对于120 m烟囱, S_c^* 有效性仅次于 V_{VSI} 、 S_{SI} 、 E_{EPV} 、 V_{pg} 等速度型指标。此外,与图5~7相比,图8较显著的变化是与加速度有关的地震动强度指标(A_{pg} 、 a_{rms} 、 E_a 、 A_{rs} 、 P_a 、 a_{RMS} 、 A_{ASI} 、 I_a)

的相关系数有了一定提升。事实上,结构最大楼层加速度值可以看作对地面加速度的直接放大。因此,结构最大楼层加速度对加速度相关的地面运动参数很敏感,从而导致这类指标相关性的增长。此外, V_{pg} 、 V_{VSI} 、 S_{SI} 和 E_{EPV} 与结构最大楼层加速度依然保持较高的相关性。



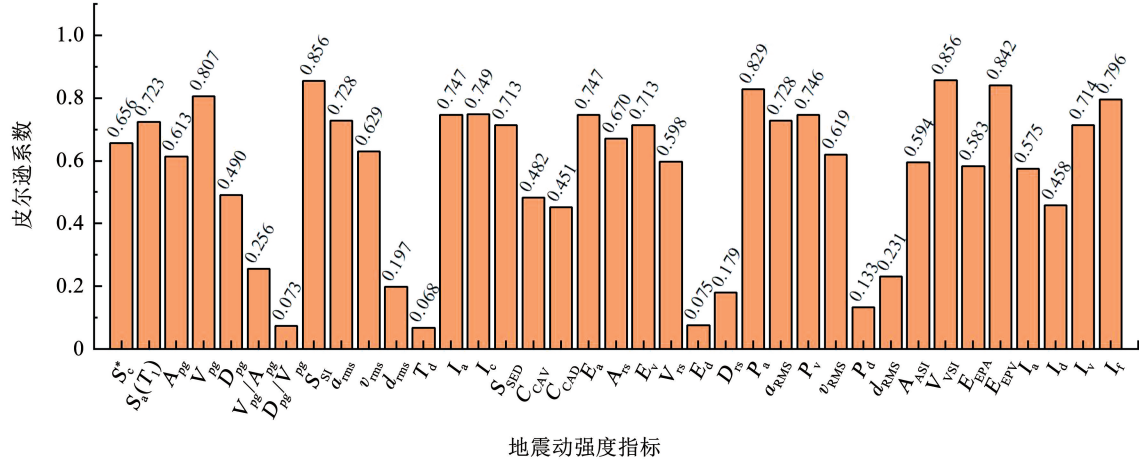
(a) 120 m 烟囱结构



(b) 240 m 烟囱结构

图 8 结构最大层间位移角与地震动强度指标关联性

Fig. 8 Correlation between ground motion intensity measures and maximum inter-story drift ratio



(a) 120 m 烟囱结构

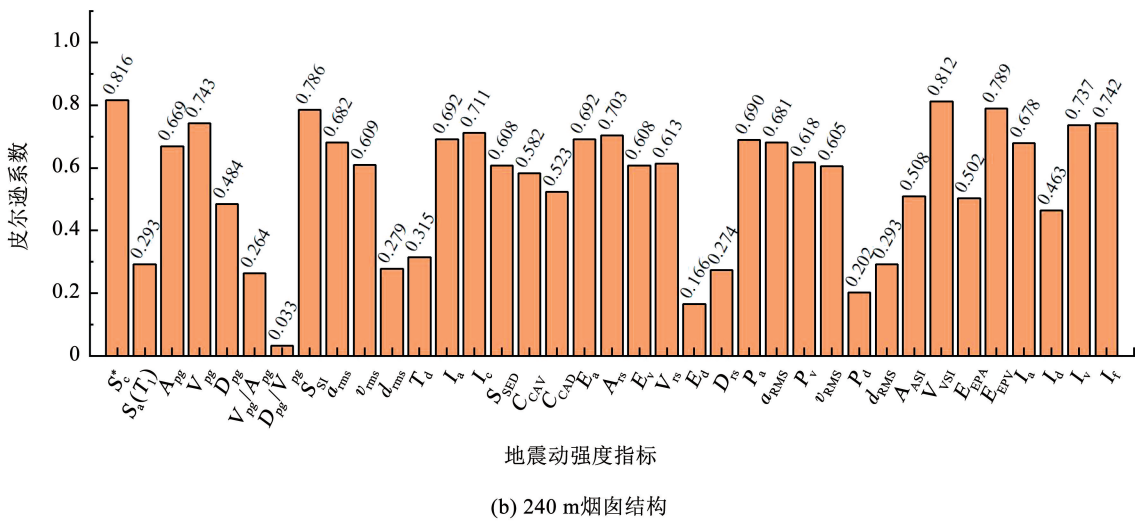


图 9 结构最大楼层加速度与地震动强度指标关联性

Fig. 9 Correlation between ground motion intensity measures and maximum floor acceleration

复合型地震动指标 I_a 、 I_d 、 I_v 同时包含了地面峰值和地震动持时的信息, I_r 同时考虑了地面峰值速度 V_{pg} 和地震动持时的信息。然而, 由于高耸烟囱结构的地震响应对于地震动特征和部分幅值特征并不敏感(参考 D_{pg} 、 A_{pg} 和 T_d 的相关性系数), 从相关性的角度上看, 这些复合型地震动指标并未表现出明显的优势。

因此, 在设计新的地震动强度指标时, 并不是包含的信息越多越好。一方面, 要结合结构动力响应特点, 合理地反映地震动对于结构的震害; 另一方面, 在表征这些地震动特征时, 也需要选择合理的组合形式。从本文的研究结果上看, 选择加速度反应谱积分形式以及谱加速度幂乘积形式具有较好的效果。

6 结 论

基于加速度反应谱提出了一种同时考虑高阶振型和周期延长的地震动强度指标, 以 2 座高耸烟囱为研究对象, 使用 OpenSEES 分析了近断层脉冲型地震动作用下 37 种地震动指标与烟囱结构损伤指标的关联性。通过本文的研究, 可以得出以下结论:

- 1) 对于 2 座烟囱结构, 本文提出的 S_a^* 在所有的 37 种指标中展示出与结构 Park-Ang 损伤最高的关联性, S_a^* 和其他损伤指标也具备相对较高的关联性。使用 S_a^* 指标表征脉冲型地震动对于结构损伤的影响能有效减少地震动差异导致的离散性。
- 2) 整体上, 速度型相关的地震动强度指标表现出与结构损伤指标的较高的相关性。随着结构周期的增大, 位移型的地震动强度指标与损伤的关联性有增长的趋势。
- 3) 作为中国抗震规范规定的地震动强度指标, A_{pg} 与高耸烟囱结构的最大层间位移角、最大顶点偏

移率、曲率以及 Park-Ang 损伤指标关联度较差。相比之下, A_{pg} 与结构的最大楼层加速度关联性较高。这表明 A_{pg} 在表征高耸结构变形破坏方便存在局限性, 但是可以用来分析非结构构件的抗震性能。

参考文献

[1] ELENAS A. Correlation between seismic acceleration parameters and overall structural damage indices of buildings[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2000, 20 (1/2/3/4): 93. DOI: 10.1016/S0267-7261(00)00041-5

[2] CHEN Zhiyi, WEI Jianshu. Correlation between ground motion parameters and lining damage indices for mountain tunnels [J]. Natural Hazards, 2013, 65 (3): 1683. DOI: 10.1007/s11069-012-0437-5

[3] 韩建平, 周伟, 李慧. 基于汶川地震数据的地震动强度指标与中长周期 SDOF 体系最大响应相关性[J]. 工程力学, 2011, 28 (10): 185

HAN Jianping, ZHOU Wei, LI Hui. Correlation between ground motion intensity indices and SDOF system responses with medium-to-long period based on the Wenchuan earthquake data [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28 (10): 185

[4] CAO V V, RONAGH H R. Correlation between seismic parameters of far-fault motions and damage indices of low-rise reinforced concrete frames[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2014, 66 (1): 2. DOI: 10.1016/j.soildyn.2014.06.020

[5] WANG Z J, ZHAO B M. Correlations between structural damage and ground motion parameters during the Ms8.0 Wenchuan Earthquake [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2015, 72 (1): 29. DOI: 10.1016/j.soildyn.2014.11.005

[6] KOSTINAKIS K, ATHANATOPOULOU A, MORFIDIS K. Correlation between ground motion intensity measures and seismic damage of 3D R/C buildings[J]. Engineering Structures, 2015, 82 (1): 51. DOI: 10.1016/j.engstruct.2014.10.035

[7] 蒋崇文, 易伟建, 庞于涛. 地震动强度指标与大跨度刚构桥梁损伤的相关性[J]. 中国公路学报, 2016, 29 (9): 97

JIANG Chongwen, YI Weijian, PANG Yutao, et al. Correlation between seismic intensity indices and damages of large span rigid

- frame bridges[J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(9): 97. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2016.09.012
- [8] 钟紫蓝, 申铁尧, 甄立斌, 等. 地震动强度参数与地铁车站结构动力响应指标分析[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(3): 486
ZHONG Zilan, SHEN Yiyao, ZHEN Libin, et al. Ground motion intensity measures and dynamic response indexes of metro station structures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(3): 486. DOI:10.11779/CJGE202003010
- [9] 陈健云, 李静, 韩进财, 等. 地震动强度指标与框架结构响应的相关性研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(3): 105
CHEN Jianyun, LI Jing, HAN Jincai, et al. Correlation between ground motion intensity indexes and seismic responses of frame structures[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(3): 105. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2017.03.017
- [10] 刘亭亭, 于晓辉, 吕大刚. 地震动多元强度参数主成分与结构损伤的相关性分析[J]. 工程力学, 2018, 35(8): 122
LIU Tingting, YU Xiaohui, LÜ Dagang. Analysis of correlation between principal components of multivariate earthquake intensity measures and structural damage[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(8): 122. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2017.04.0289
- [11] 杨参天, 解琳琳, 李爱群, 等. 适用于高层隔震结构的地震动强度指标研究[J]. 工程力学, 2018, 35(8): 21
YANG Cantian, XIE Linlin, LI Aiqun, et al. Intensity measures for seismically isolated tall buildings[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(8): 21. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2017.07.0531
- [12] PINZON L A, VARGAS-ALZATE Y F, PUJADES L G, et al. A drift-correlated ground motion intensity measure: application to steel frame buildings[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, 132. DOI: 10.1016/j.soildyn.2020.106096
- [13] MACRAE G A, MORROW D V, ROEDER C W. Near-fault ground motion effects on simple structures[J]. Journal of Structural Engineering, 2001, 127(9): 996. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2001)127:9(996)
- [14] CORDOVA P P, DEIERLEIN G G, MEHANNY S S F, et al. Development of a two-parameter seismic intensity measure and probabilistic assessment procedure[C]//Proceedings of the Second U. S.-Japan Workshop on Performance-Based Earthquake Engineering Methodology for Reinforced Concrete Building Structures. Sapporo:[s. n.], 2001
- [15] VAMVATSIKOS D, CORNELL C A. Developing efficient scalar and vector intensity measures for IDA capacity estimation by incorporating elastic spectral shape information[J]. Earthquake Engineering Structural Dynamics, 2005, 34(13): 1573. DOI: 10.1002/eqe.496
- [16] LIN Lan, NAUMOSKI N, SAATCIOGLU M, et al. Improved intensity measures for probabilistic seismic demand analysis. Part 1: development of improved intensity measures[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2010, 38(1): 79. DOI: 10.1139/L10-110
- [17] LIN Lan, NAUMOSKI N, SAATCIOGLU M, et al. Improved intensity measures for probabilistic seismic demand analysis. Part 2: application of the improved intensity measures[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2010, 38(1): 89. DOI: 10.1139/L10-111
- [18] LU Xiao, YE Lieping, LU Xinzhen, et al. An improved ground motion intensity measure for super high-rise buildings[J]. Science China Technological Sciences, 2013, 56(6): 1525. DOI: 10.1007/s11431-013-5234-1
- [19] 周颖, 苏宁粉, 吕西林. 高层建筑结构增量动力分析的地震动强度参数研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(2): 53
ZHOU Ying, SU Ningfen, LÜ Xilin. Study on intensity measure of incremental dynamic analysis for high-rise structures[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(2): 53. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2013.02.011
- [20] SHOME N. Probabilistic seismic demand analysis of nonlinear structures[D]. Stanford: Stanford University, 1999
- [21] ZHANG Yantai, HE Zheng, LU Wengao, et al. A spectral-acceleration-based linear combination-type earthquake intensity measure for high-rise buildings[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2018, 22(8): 1479. DOI: 10.1080/13632469.2017.1286624
- [22] FEMA. FEMA P695: Quantification of building seismic performance factors[S]. Redwood City: Applied Technology Council, 2009
- [23] 周长东, 田苗旺, 王朋国, 等. 考虑地震方向性的高耸 RC 烟囱结构易损性分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44(11): 11
ZHOU Changdong, TIAN Miaowang, WANG Pengguo, et al. Analysis on structural fragility of a high-rise RC chimney considering ground motion directionality[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2017, 44(11): 11. DOI: 10.16339/j.cnki.hdxzbk.2017.11.002
- [24] 周长东, 王朋国, 田苗旺, 等. 双曲线冷却塔在多维地震下的区域易损性评价[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(6): 156
ZHOU Changdong, WANG Pengguo, TIAN Miaowang, et al. Partitioned seismic vulnerability assessment of hyperbolic cooling tower under multi-dimensional earthquakes[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(6): 156. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201604006
- [25] ASGARIAN B, MIRTAHERI M Y M, SAMANI H R, et al. Incremental dynamic analysis of high-rise towers[J]. Structural Design of Tall and Special Buildings, 2010, 19(8): 922. DOI: 10.1002/tal.518
- [26] 曾绪朗. 高耸钢筋混凝土烟囱结构抗震性能研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014
ZENG Xulang. Study on seismic performance of high-rise reinforced concrete chimney structure[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014
- [27] PARK Y J, ANG A H S, WEN Y K. Seismic damage analysis of reinforced-concrete buildings[J]. Journal of Structural Engineering, 1985, 111(4): 740. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1985)111:4(740)
- [28] 邱意坤. 高耸混凝土结构地震动强度指标和整体损伤研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020
QIU Yikun. Study of ground motion intensity measures and global damage for high-rise stack-like concrete structures[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020
- [29] QIU Yikun, ZHOU Changdong, SIHA A, et al. A spectral-acceleration-based combination-type earthquake intensity measure for high-rise stack-like structures[J]. Advances in Structural Engineering, 2019, 23(7): 1350. DOI: 10.1177/1369433219894237