孙朴烁,邓亚虹,慕焕东,等.SCI效应对地裂缝场地动力响应特征的影响研究[J].地震工程学报,2026,48(5):1125-1135.DOI:10.20000/j.1000-0844.20241111002
SUN Pushuo,DENG Yahong,MU Huandong,et al.Influence of the SCI effect on dynamic response characteristics of ground fissure sites[J].China Earthquake Engineering Journal,2026,48(5):1125-1135.DOI:10.20000/j.1000-0844.20241111002

SCI效应对地裂缝场地动力响应特征的影响研究

孙朴烁[1],邓亚虹[1,2],慕焕东[3],门 欢[1],田 微[1]
(1.长安大学 地质工程与测绘学院,陕西 西安 710054;
2.自然资源部矿山地质灾害成灾机理与防控重点实验室,陕西 西安 710054;
3.西安理工大学 岩土工程研究所,陕西 西安 710048)

摘要:地震作用下,城市建筑群与所在场地将产生复杂的相互作用,即场地-城市(SCI)效应。目前,SCI效应如何影响地裂缝场地动力响应特征未知,故以西安地裂缝为研究背景,考虑基础类型、自振频率、建筑密度不同的框架结构建立一系列数值模型,模拟SCI效应对地裂缝场地动力响应的影响。结果表明:SCI效应不仅会减小地裂缝场地的响应,还会减少地裂缝的影响范围。当建筑结构与地裂缝场地频率一致时,SCI效应使得场地响应大幅降低;建筑自振频率与地震波卓越频率一致时,地裂缝场地部分测点响应将增大,但由于SCI效应,场地整体的平均响应仍会降低。因此,在城市建设中,可以适当减小对地裂缝的避让距离,同时应尽量避免共振现象的发生。

关键词:地裂缝场地;SCI效应;地震响应;数值模拟;抗震设防
中图分类号:TU435 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-0844(2026)05-1125-11
DOI:10.20000/j.1000-0844.20241111002

Influence of the SCI effect on dynamic response characteristics of ground fissure sites

SUN Pushuo[1], DENG Yahong[1,2], MU Huandong[3], MEN Huan[1], TIAN Wei[1]
(*1.College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;*
2.Key Laboratory of Mine Geological Hazards Mechanism and Control, Ministry of Natural Resources, Xi'an 710054, Shaanxi, China;
3.Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China)

Abstract: Under earthquake action, complex interactions occur between urban building groups and the underlying site, known as the site-city interaction (SCI) effect. How the SCI effect influences the dynamic response characteristics of ground fissure sites remains unclear. Therefore, taking the Xi'an ground fissure as the research background, a series of numerical models were established considering frame structures with different foundation types, natural frequencies, and building densities to investi-

收稿日期:2024-11-11
基金项目:国家自然科学基金(No.41772275)
第一作者简介:孙朴烁(1999-),男,博士研究生,主要从事地质灾害及地震工程方面的研究。E-mail:2021126111@chd.edu.cn。
通信作者:邓亚虹(1978-),男,博士,教授,主要从事土动力学及地震工程方面的研究。E-mail:dgdyh@chd.edu.cn。

gate the SCI effect on the dynamic response of ground fissure sites. The results indicate that the SCI effect reduces both the site response and the influence range of the ground fissure. When the natural frequency of the building structures matches that of the ground fissure site, the SCI effect markedly reduces the site response. When the natural frequency of the buildings matches the predominant frequency of the seismic waves, the response at some measurement points on the ground fissure site increases. However, owing to the SCI effect, the average response of the entire site still decreases. Therefore, in urban construction, the avoidance distance for ground fissures can be appropriately reduced, while resonance phenomena should be avoided as much as possible.

Keywords: ground fissure site; site-city interaction (SCI) effect; seismic response; numerical simulation; seismic fortification

0 引言

地裂缝作为一种典型的、灾害形式单一的地质灾害,对房屋、道路、桥梁等各类工程建筑造成了不同程度的破坏,因此在城市建设中需要对地裂缝进行一定距离的避让。许多城市位于地裂缝发育规模大,致灾严重的地区[1-3],为了全面了解城市在地震作用下的建设需求,必须研究地裂缝对场地的影响和建筑群对地裂缝场地动力响应特征的影响。然而,现有的研究大多集中在地裂缝或建筑结构上,对两者对场地响应的综合影响的研究十分有限。

通过振动台模型试验、地脉动测试以及数值模拟,发现地裂缝的存在显著地改变了地面运动,影响范围在20~60 m[4-5]。

地裂缝的存在会显著放大场地地面峰值加速度(Peak Ground Acceleration, PGA),裂缝带处PGA增幅最为显著;其中上盘峰值加速度明显大于下盘,同时会加剧地裂缝上盘沉降变形,诱发次级裂缝发育,呈现显著的上盘效应[6-9]。对地裂缝场地地震动力响应特征起主控作用的多为地震强度,其余场地参数影响微弱。近地裂缝区域场地动力响应整体有所放大,无论是傅里叶谱还是反应谱,上盘响应峰值放大效应均强于下盘,但地裂缝对上、下盘场地卓越频率的改变作用较小[10-13]。

除地裂缝外,土-结构相互作用同样会显著影响场地动力响应,并改变地表地震动特性。场地-城市(Site-City Interaction, SCI)效应由Guéguen等[14]提出,特指地震作用下城市建筑群与所处场地之间产生的耦合相互作用。城市建筑密度、土与建筑结构的刚度比、场地及建筑物特征频率等是构成SCI效应的主要影响因子[15-16]。随着研究不断深入,进一步发现,建筑体量、结构与土体相对刚度、地基特性以及地震入射波入射角等因素,同样会对SCI效应产生显著影响[17]。

SCI效应研究需纳入大量建筑群作为分析对象,由于研究系统维度大、工况可重复性低,数值模拟成为首选研究手段。现阶段应用较为成熟的大规模地震场地计算方法主要包括有限元法、谱元法与间断伽辽金法。开展城市场地地震响应分析时,需对城市建筑群模型进行合理简化,研究城市整体核心系统对地震自由场的动力响应规律[18]。

数值模拟中虽需对城市建筑模型进行简化处理,但不宜采用弹性块体等过度简化模型;此类简化无法体现结构非线性力学特性,易造成模拟结果失真。对建筑模型进行适度合理简化,既能提升建模与计算效率,又可保证数值结果的合理性与精度[19-20]。现有数值模拟结果[21-23]表明:SCI效应可显著削弱建筑周边地震动能量,降低地震动放大效应;当场地与建筑满足双共振条件时,SCI效应的影响尤为突出。总体而言,SCI效应多表现为抑制地表地震动,但在特定工况下也会产生地震动放大作用[24]。

目前,针对SCI效应与地裂缝共同作用下场地动力响应的相关研究仍较为匮乏,现有地裂缝场地响应分析大多未纳入SCI效应的影响。一方面,SCI效应涉及控制参数繁多,研究体系具有大尺度、低可重复的特点;另一方面,地裂缝的存在进一步加剧了场地动力响应的复杂性。若城市建设中单纯采用大距离避让地裂缝的工程措施,易造成土地资源严重浪费。因此,亟需深入揭示地裂缝与SCI效应对场地响应的耦合作用机理,探明SCI效应作用下地裂缝场地的动力响应演化规律,为地裂缝发育区的建筑规划设计及工程建设提供理论依据。

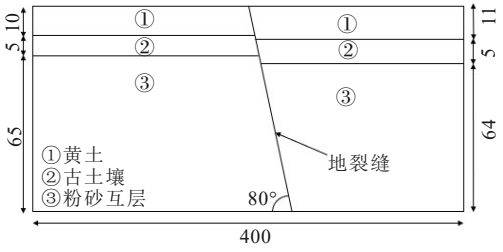
基于此，本文以西安地裂缝为工程背景，采用MIDAS GTS NX 岩土数值分析软件构建计算模型，开展相关数值模拟研究。

1　数值分析模型

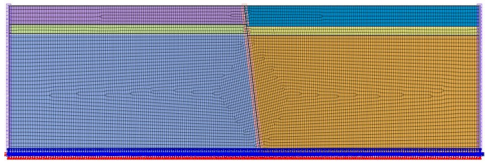
1.1　模型建立

1.1.1　几何与材料

据统计，西安地裂缝的平均倾角为80°，从上至下可分为黄土、古土壤、粉砂互层三层土，各土层有垂直错动[5]。根据《工程场地地震安全性评价（GB 17741—2005）》[25]要求，地震波入射界面最小剪切波速至少为500 m/s。西安地区剪切波速为500 m/s的场地埋深约为70 m，为Ⅱ类场地[26]。因此，数值模拟模型深度设计为80 m，宽度设计为400 m以布置足够多的建筑，地裂缝倾角设计为80°。场地土层分布图和有限元模型见图1。



(a) 地裂缝场地各土层分布



(b) 地裂缝场地有限元模型

图1　地裂缝场地示意图（单位：m）

Fig. 1　Diagram of the ground fissure site (unit: m)

土体选用理想弹塑性本构模型，采用二维平面应变单元模拟，各土层物理力学参数列于表1[26]。在地震作用下，地裂缝两侧会发生滑动和分离，因此可采用界面接触单元来模拟地裂缝。界面材料可用以下关系式定义：

$$K_n=\frac{E_{oed,I}}{t_v} \tag{1}$$

$$K_t=\frac{G_i}{t_v} \tag{2}$$

$$E_{oed,I}=\frac{2\times G_i(1-v_i)}{(1-2\times v_i)} \tag{3}$$

$$G_i=R\times G_{soil} \tag{4}$$

$$G_{soil}=\frac{E}{2\times(1+v_{soil})} \tag{5}$$

式中：K_n为法向刚度模量；K_t为切向刚度模量；$E_{oed,i}$为压缩模量；t_v为虚拟厚度系数；v_i为界面泊松比；G_i为剪切模量；G_{soil}为土体剪切模量；v_{soil}为土体泊松比；E为弹性模量；R为强度折减系数。

表1　土层物理力学参数

Table 1　Physical and mechanical parameters of soils

土层名称	密度γ/(kN/m^3)	弹性模量E/MPa	泊松比v	内摩擦角Φ/(°)	膨胀角θ/(°)	黏聚力C/kPa
黄土层	19.2	104	0.3	19	9	24
古土壤	19.6	185	0.32	23	11	35
粉砂互层	19.8	260	0.3	25	11.3	40

场地频率使用下式计算：

$$f_s=\frac{C_S}{4h_s} \tag{6}$$

式中：f_s为场地频率；C_S为剪切波速；h_s为场地厚度。经计算，场地频率为0.84 Hz。

本研究的重点是地裂缝场地的响应，因此场地上部建筑的建模在一定程度上可以简化。故设计三种建筑物，均为层高3 m、跨度5 m的两跨混凝土结构，高度分别为6 m，21 m，60 m。建筑的梁、柱以及基础均使用梁单元进行模拟，6 m建筑物基础类型采用筏板基础，21 m和60 m的建筑物则采用桩基础。建筑单元材料采用弹性本构的C30混凝土，密度2 500 kg/m^3，泊松比0.3，弹性模量3.0×10^4 MPa。建筑物的自振周期使用《建筑结构荷载规范（GB 50009—2012）》[27]里的公式计算：

$$T=0.25+0.000\,53\times H^2\div\sqrt[3]{B} \tag{7}$$

式中：T为建筑自振周期；H为建筑高度；B为建筑宽度。建筑物详细参数列于表2。

进行结构单元定义时，需预先输入截面几何参数，以便将材料属性精准赋值至各构件。软件可自动求解截面面积、扭转常数、扭转应力系数、截面惯性矩、有效剪切面积、剪切应力及剪切应力系数等力学参数。该模型既可充分考虑实际结构的空间受力效应，又能兼顾建筑群不同空间分布形式带来

表 2 建筑物结构单元参数

Table 2 Structural unit parameters of buildings

建筑高度/m	梁截面($b\times h$)/(m×m)	柱截面($b\times h$)/(m×m)	筏板基础截面($b\times h$)/(m×m)	桩截面(桩径D×桩长L)/(m×m)	建筑频率/Hz
6	0.4×0.6	0.6×0.6	1×1.2	-	3.86
21	0.4×0.6	0.6×0.6	1×1.2	1×5	2.79
60	0.4×0.6	0.6×0.6	1×1.2	1×10	0.88

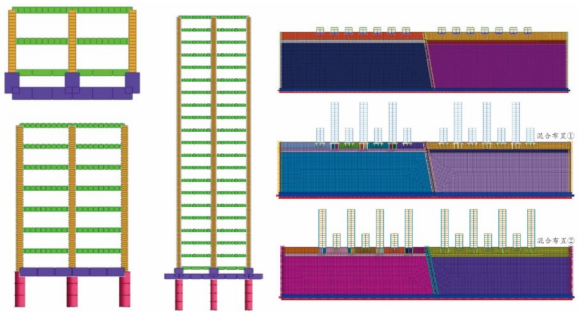
的影响。

1.1.2 边界条件

图 2 为三种建筑的有限元模型及部分数值计算模型。建筑物与土体之间采用析取单元保证单元耦合,模型底部双向固定,模型两侧施加自由边界来模拟无限的自由场,此边界条件可以考虑各种形式的物质波和表面波的影响,弥补了黏弹性边界条件的不足。为防止边界效应对结果产生较大的影响,场地左右两侧各保留 50 m 空白区间,不布置建筑物。

1.1.3 地震荷载选取

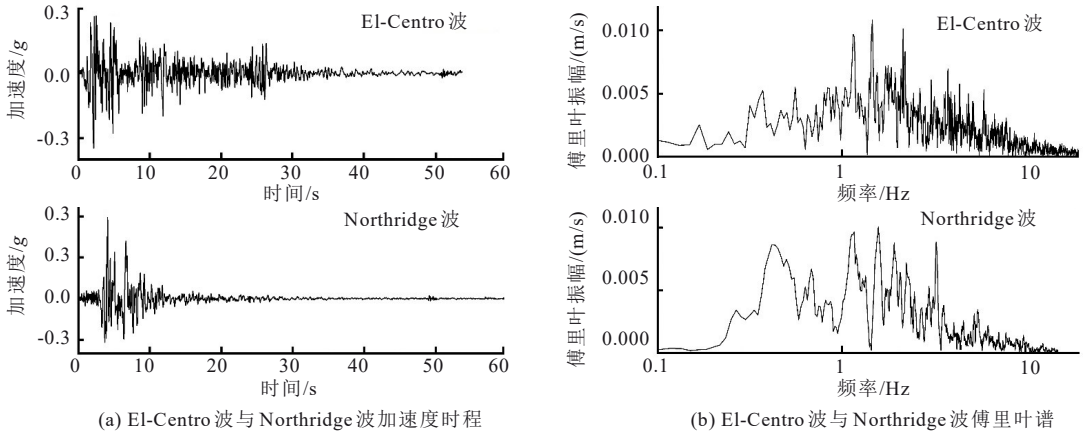
建筑结构竖向抗震性能要优于水平向,故地震荷载从模型底部垂直入射且仅考虑水平向震动。如果 SCI 效应可使建筑物抵抗设防地震甚至罕遇地震,则没有必要考虑加速度峰值较小的地震。因此,本次研究选取适用于Ⅱ类场地的 El-Centro 波以及震源在断层附近的 Northridge 波,并对两种地震波进行基线校正和低通 15 Hz 滤波。由于 Northridge 波 PGA 高达 0.6g,远超《建筑抗震设计规范(GB 50011—2010)》[28]西安地区罕遇地震的 PGA。因此,在计算时使用整体放缩法将 Northridge 波峰值加速度调整为 0.3g(图 3)。由图 3 可知,地震波加速度时程曲线的加速度峰值及大部分能量集中在前 10 s。为提高计算效率,截取前 10 s 的地震波数据,采样间隔为 0.02 s。



(a) 建筑物有限元模型 (b) 地裂缝场地有限元模型

图 2 数值计算模型(不同颜色仅代表网格组建立顺序不同)

Fig. 2 Numerical calculation models (Different colors only represent the order of mesh group generation)



(a) El-Centro 波与 Northridge 波加速度时程 (b) El-Centro 波与 Northridge 波傅里叶谱

图 3 地震波加速度时程与傅里叶谱

Fig. 3 Acceleration time-history and Fourier spectrum of seismic wave

1.2 模拟工况

本次动力分析共考虑建筑高度、基础类型、建筑密度、地震波类型、建筑排布方式 5 类影响因素。其中,建筑高度分别选取 6 m、21 m、60 m,对应采用的基础形式依次为筏板基础、桩筏基础、桩筏基础;建筑密度设置 25%、50%、75%、100% 四种工况。

建筑密度计算如下：

$$\rho=\frac{n\times l}{L} \tag{8}$$

式中：ρ为建筑密度；n为建筑数量；l为单个建筑物跨度；L为场地跨度（为防止产生边界效应的部分不计入）。

由于100%建筑密度与城市建筑实际布局不符，故该工况仅用于分析其对场地平均加速度的影响。本文选取两条地震波：峰值加速度0.35g的El-Centro波与峰值加速度0.3g的Northridge波。

在地裂缝场地内，于上、下盘分别布设距地裂缝0 m、2 m、4 m、6 m、8 m、22 m、34 m、74 m、99 m、138 m共19个监测测点。除100%密度工况外，其余工况的测点均布置于建筑间空地，最大程度规避建筑物对场地PGA响应结果的干扰。规定以地裂缝上盘为正向、下盘为负向，记录各测点场地PGA数值。各模拟计算工况汇总如表3所列。

表3　模拟工况

Table 3　Simulation cases

建筑类别	建筑高度/m	基础类型	建筑密度	地震波类型	测点距地裂缝距离/m
Ⅰ	6	筏板基础	25%、50%、75%、100%	El-Centro波 Northridge波	2、4、6、8、22、34、74、99、138
Ⅱ	21	桩筏基础			
Ⅲ	60	桩筏基础			

2　场地PGA响应分析

2.1　模型有效性验证

首先开展天然黄土场地与无建筑地裂缝场地的数值模拟，以此验证模型参数取值与边界设置的合理性。图4(a)为天然黄土场地数值模型，各项参数均按前文设定取值。在原生El-Centro地震波作用下，场地地表PGA响应结果如图4(b)黑色曲线所示，场地各处峰值加速度基本保持一致，表明所采用的边界条件可有效消除边界效应干扰。

图4(b)橙色、红色曲线及图4(c)分别为输入两种地震波后，无建筑工况下地裂缝场地的地表PGA变化曲线与加速度云图。由结果可知：地震作用下地裂缝位置处峰值加速度最大，El-Centro波作用下峰值放大至0.68g，Northridge波作用下峰值放大至0.61g，二者放大系数均约为2；地裂缝加速度放大影响范围在上盘约30 m，下盘约20 m。

由于Northridge波峰值加速度较El-Centro波低0.05g，因此Northridge波作用下场地各位置PGA整体偏小，且超出影响范围后的场地动力响应更为平缓。综上，本文所选取的模型参数合理可靠，数值模型的有效性得到验证。

2.2　单建筑地裂缝场地动力响应规律

将与影响范围边界PGA相等的测点至影响范围边界的间距定义为影响范围衰减区间。图5为在地裂缝上盘30 m、下盘20 m位置分别布设单栋建

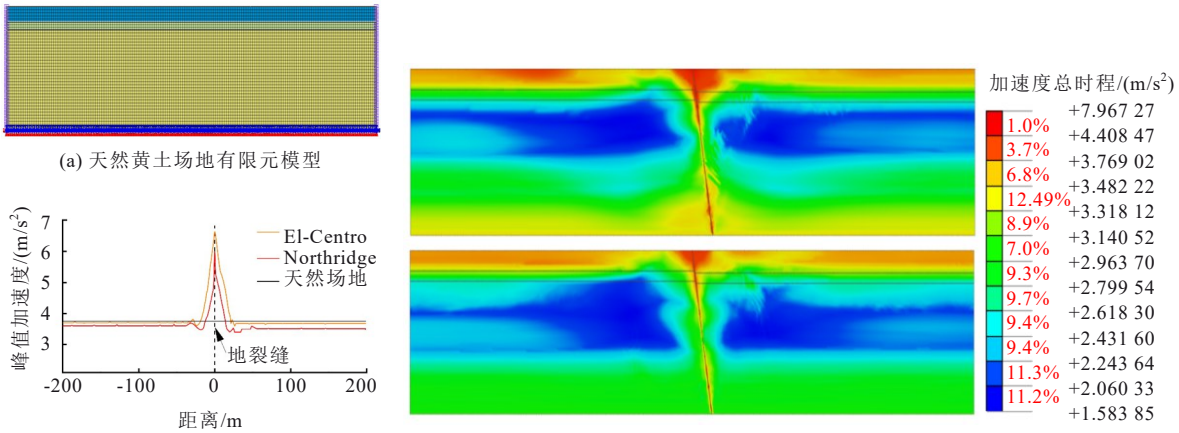


图4　模型合理性验证

Fig. 4　Model rationality verification

筑时，各监测测点的动力响应结果。可以看出，仅在上盘布设单栋建筑时，地裂缝近域两侧测点PGA基本相近，场地整体响应与无建筑工况基本一致，仅建筑本体及其邻近区域的场地PGA出现明显变化。当建筑物布设于下盘时，下盘场地PGA整体有所衰减，其中Ⅲ型建筑的弱化效应更为显著，但对上盘场地动力响应无明显影响；布设在上盘或下盘的建筑物，不会改变另一盘的地震响应规律，地裂缝处峰值加速度及其动力影响范围基本保持不变。

2.3 多建筑地裂缝场地动力响应规律

图6为同一类型建筑在不同密度工况下的地裂缝场地动力响应结果。布设建筑群后，除Ⅰ型建筑外，其余类型对应的地裂缝周边测点PGA数据整体向裂缝带集中，表明地震动放大效应的影响范围出现收缩。

对于Ⅰ型建筑，四种建筑密度下的场地PGA响应差异极小，密度变化几乎不改变场地动力响应特征。与之不同，在Ⅱ型建筑作用下，仅25%的建筑密度即可显著降低地裂缝处PGA数值，并大幅缩减放大效应影响范围；相较无建筑工况，地裂缝处PGA降幅约20%，影响范围缩减10 m以上。当建筑密度提升至50%时，地裂缝远场PGA有所降低，而裂缝带处PGA反而回升，逐渐接近无建筑天然场地水平。究其原因，建筑避让距离未发生缩减，城区建筑数量增多会制约地震能量释放，促使更多地

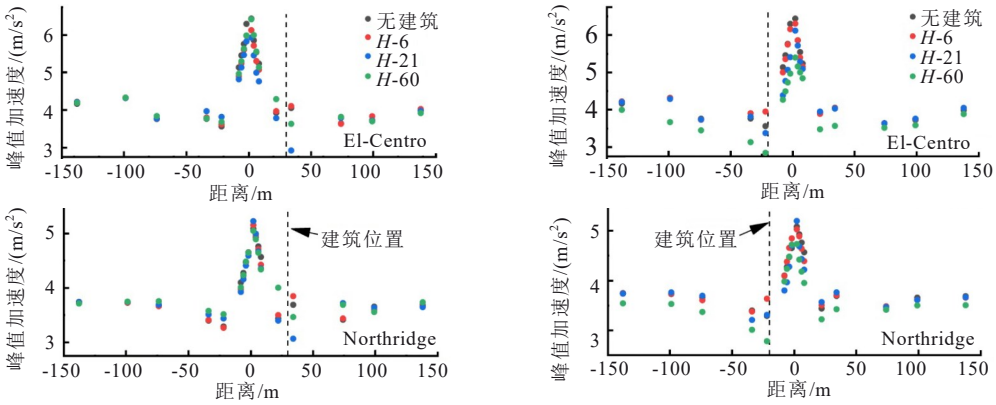
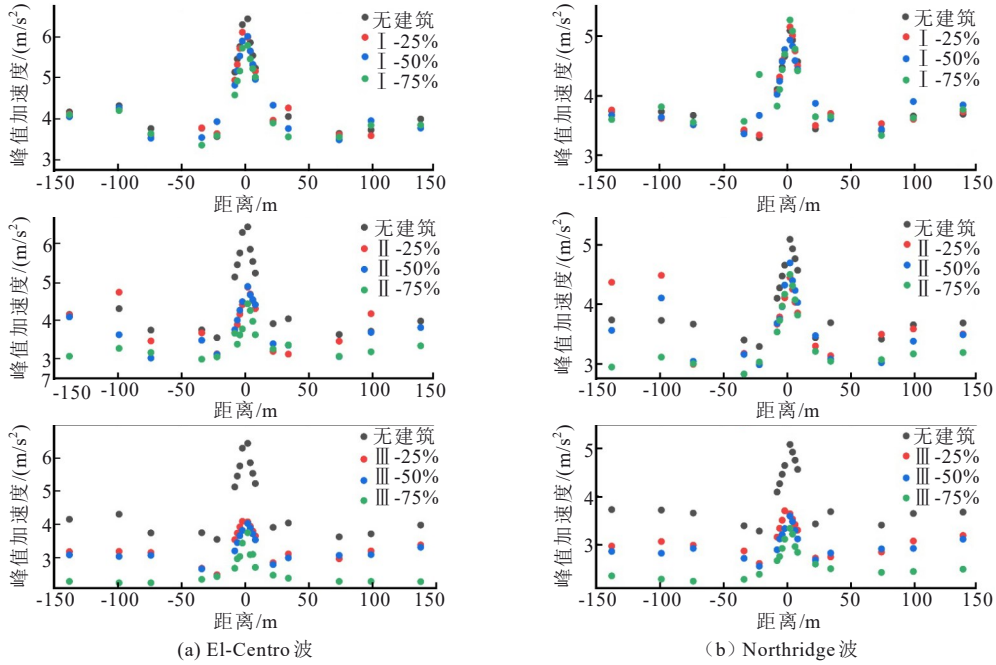


图5 上、下盘单个建筑各测点PGA

Fig. 5 PGA at each measuring point of individual building on the hanging wall and footwall



(a) El-Centro波 (b) Northridge波

图6 地裂缝场地布置建筑各测点PGA

Fig. 6 PGA at each measuring point of buildings arranged on the ground fissure site

震能量沿地裂缝带或城区外缘释放。

建筑密度增至75%时，随着建筑避让距离减小，SCI效应进一步弱化地裂缝处PGA，全场各地表位置峰值加速度均出现降低，地裂缝动力影响范围也进一步收缩。

布设Ⅲ型建筑时，25%建筑密度即可将地裂缝放大效应影响范围由约20 m压缩至10 m以内；随建筑密度继续增大，地裂缝处峰值加速度虽略有回升，但影响范围进一步减小至5 m左右，地裂缝远场场地PGA降幅超过30%。

综上可知，场地地震响应并不会因建筑自重增大产生显著变化，建筑自重并非决定SCI效应的主控因素。只有当建筑密度达到临界阈值后，建筑与土体间的耦合作用才会充分显现并形成明显SCI效应，该阈值与场地类别、土层特性、建筑型式等密切相关。

当建筑密度过高时，相当于在地裂缝场地软弱土层表面形成一层“硬壳层”，有效抑制了地裂缝的地震动放大效应。同时，建筑群密集排布会改变结构自振频率，产生差异化的惯性效应与运动学效应；城区辐射波场还会进一步加剧城市外围及边界区域的地表地震动。

由此可见，建筑密度是调控SCI效应的关键因子，可显著削弱场地地面运动幅值。若地裂缝场地在强震作用下未产生严重变形破坏，且建筑结构自身安全储备充足，工程设计中可适当缩减地裂缝安全避让距离。

图7为三类建筑在不同密度工况下，地裂缝场地地震动放大因子变化曲线。结合图6测点结果可以看出：同一建筑密度下，低层建筑对场地动力响应的影响最弱，中高层建筑则可显著削弱地表地震动幅值。地裂缝场地加速度响应随建筑高度增大整体呈衰减趋势，变化主要集中在地裂缝影响范围内。

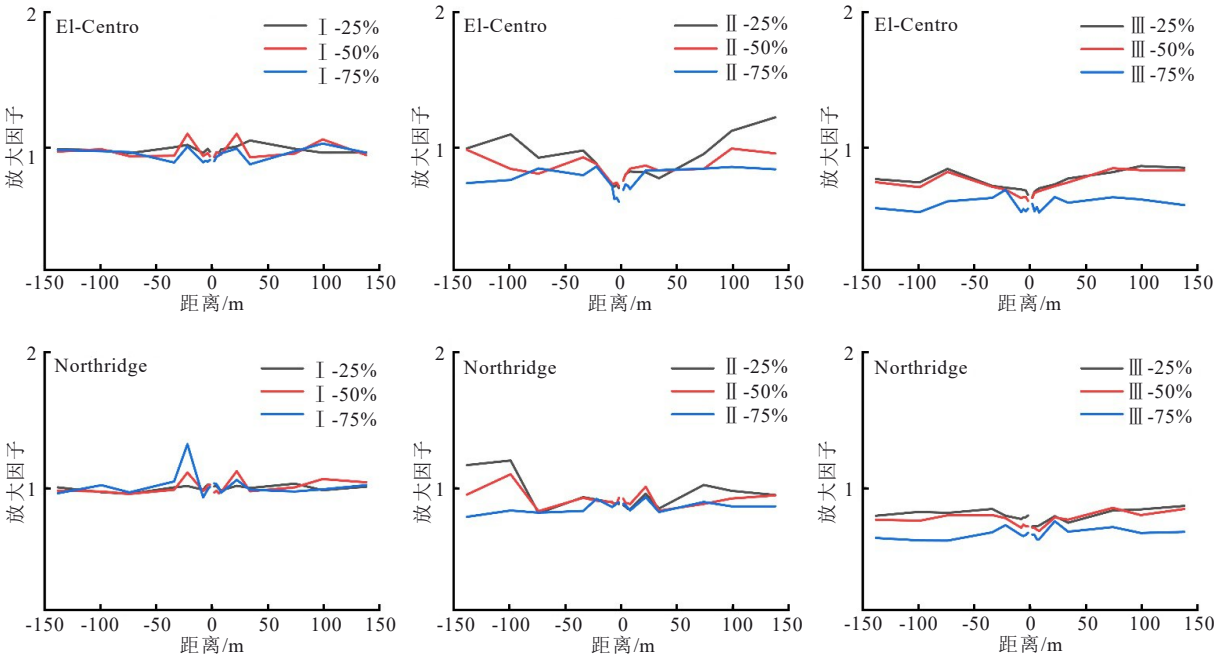


图7　放大因子

Fig. 7　Amplification factor

随建筑高度增加，场地加速度响应并非呈平稳变化态势；其中Ⅱ型建筑周边场地峰值加速度出现局部突增，在低密度工况下甚至超过无建筑场地的PGA水平。通过对比三类建筑自振频率、场地自振频率与地震波卓越频率可知：Ⅱ型建筑自振频率与地震波卓越频率较为接近，Ⅲ型建筑自振频率则与场地自振频率相近。

建筑自振频率与地震波卓越频率相近属于工程不利工况，但受SCI效应调控，地裂缝处峰值加速度及地震动放大影响范围均得到明显抑制；地裂缝远场部分空地测点PGA虽略高于天然场地水平，但仅局部零星分布且向两侧快速衰减，对建筑群整体受力影响有限。

综上，建筑高度会在一定程度上改变结构惯性

效应，进而增强SCI效应，建筑高度越大，结构与场地间的动力耦合作用越显著。不同建筑类型对应的运动学相互作用存在明显差异：当地基承受强地震动作用时，运动学效应会使地基振动偏离自由场运动特征；由于地基与周边土体存在显著刚度差异，地震波由地基向土体介质扩散过程中会产生辐射阻尼，并引发能量耗散。

此外，当建筑自振频率与场地特征频率相近时易形成双共振条件，该工况下SCI效应表现突出，即便在较低建筑密度下仍能有效削减地表地震动幅值。

图8统计了11种建筑布置工况下的场地平均峰值加速度，以及建筑密度50%时距地裂缝最近建筑的各层峰值加速度响应。随着Ⅰ型与Ⅲ型建筑密度增大，场地平均PGA整体呈衰减趋势；在双共振条件下，25%建筑密度可使全场平均峰值加速度降低28%。Ⅱ型建筑虽出现显著结构共振效应，但受SCI效应的抑制作用，25%建筑密度工况的场地平均峰值加速度仍较无建筑工况降低15%。当Ⅱ型建筑密度提升至75%时，地裂缝场地平均峰值加速度进一步降低，甚至低于“双共振”条件下25%密度工况的加速度水平。而当Ⅱ型建筑密度增至100%时，场地平均PGA有所回升。究其原因，高密度紧凑排布改变了建筑群整体结构特性，使建筑自振频率发生偏移，惯性效应与运动学效应也随之改变，进一步说明建筑自重并非主导SCI效应的核心因素。现有研究普遍认为，建筑结构峰值加速度随楼层高度增加而增大[29]，但未考虑双共振机制的影响。由图8可知，地震作用下Ⅰ型、Ⅱ型建筑的楼层PGA随高程升高持续增大；而Ⅲ型建筑自振频率与场地自振频率相近，在10层以下楼层，PGA随层高增加逐步衰减，10层以上楼层PGA才随层高逐渐增大。由此可知，双共振条件不仅能够显著降低场地PGA幅值，还可促进建筑地震能量波向场地辐射耗散，使建筑低层与中层加速度得到抑制，楼层加速度整体呈现先减小、后增大的分布规律。同时，结构各层相对地面的加速度幅值整体偏低，该响应特征既与建筑惯性效应相关，也显著受场地－结构双共振耦合作用影响。

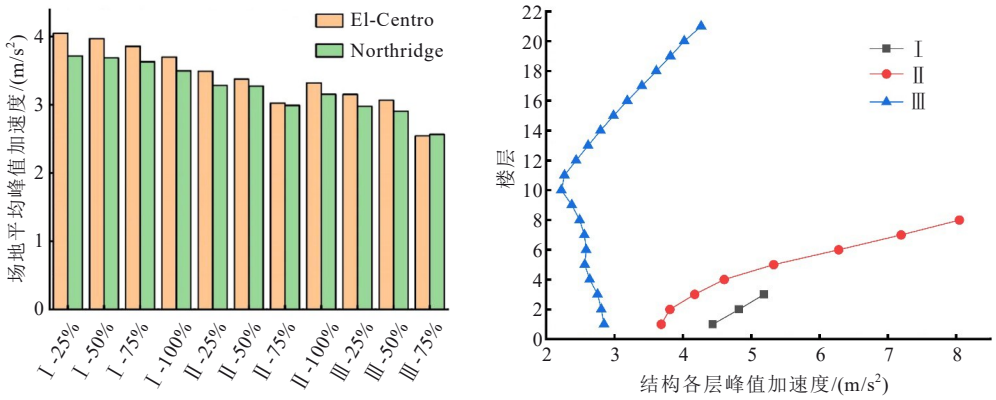


图8 场地平均峰值加速度与建筑各层峰值加速度

Fig. 8 Average peak acceleration of the site and peak acceleration of each building story

地裂缝场地布置Ⅱ型建筑时，PGA曲线为非平滑的“波浪形”；而布置Ⅲ型建筑时，PGA曲线非常平稳。故令两类建筑交叉布置（图2），场地PGA响应曲线如图9所示。两组混合布置方案的差异主要体现在建筑配比与近裂缝建筑类型上：两种方案建筑密度均为50%，其中混合布置①紧邻地裂缝布设Ⅱ型建筑，混合布置②紧邻地裂缝布设Ⅲ型建筑。数值结果表明，两种布置形式下城区内部的PGA响应基本一致，场地两侧空地的PGA幅值较原状降低约15%。由于Ⅲ型建筑与场地具备优异的动力耦合作用，近地裂缝区域及城市边界处的场地PGA响应显著弱化，且随距离变化呈现单调变化规律。与单一50%密度的Ⅱ型建筑布置工况相比，混合布置工况的城区内PGA未出现明显衰减，但Ⅲ型建筑的介入有效改变了场地响应形态，使建筑间隙处原本的“双峰”响应特征转化为“单峰”特征，峰值幅值显著减小，且峰值位置向建筑间空地偏移。由图9可知，混合布置②中Ⅲ型建筑数量占比更高，其绝大部分测点的PGA响应均低于混合布置①。同时，两组混合布置工况的全场测点PGA数值均小于无建筑场地工况，证实双共振条件可在一定程度上弱化结构共振效应，改善地裂缝场地的地震动力响应。

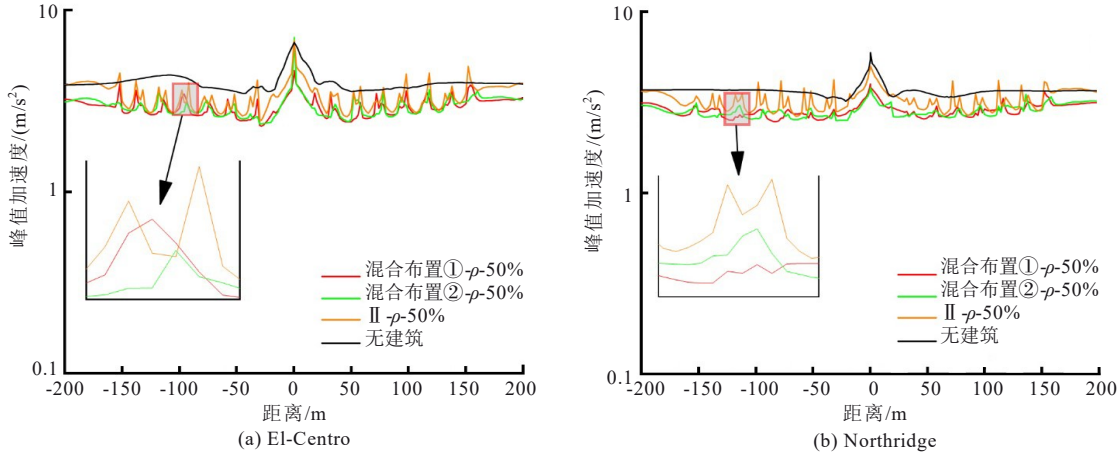


图 9　Ⅱ、Ⅲ型建筑混合布置地裂缝场地峰值加速度响应曲线

Fig. 9　Peak acceleration response curve of the ground fissure site with mixed layout of type Ⅱ and Ⅲ buildings

3　“双共振”减少地面运动分析

当连续介质系统在底部承受水平加速度时，响应由以下偏微分方程给出[30]：

$$M_x\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2}+C_x\frac{\partial u(x,t)}{\partial t}+\frac{1}{H^4}\frac{\partial^2}{\partial x^2}\left[EI_x\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2}\right]-\frac{1}{H^2}\frac{\partial}{\partial x}\left[GA_x\frac{\partial u(x,t)}{\partial x}\right]=-M_x\frac{\partial^2 u_g(t)}{\partial t^2}\tag{9}$$

式中：M_x为模型中单位长度的质量；$u(x,t)$为t时刻，高度x的横向位移；H为建筑物总高度；C_x为x处的阻尼系数；EI_x为梁在x处的弯曲刚度；GA_x为梁在x处的剪切刚度；$u_g(t)$为t时刻的地面位移。

定义沿建筑高度的刚度变化的无量纲函数S_x，并作出以下假设：(1)质量和阻尼系数沿建筑高度一致；(2)梁的剪切刚度变化与抗弯刚度变化相同。

梁的弯曲刚度变化可以表示为结构底部弯曲刚度的函数：

$$EI_x=EI_0S_x\tag{10}$$

梁的剪切刚度沿高度的变化可以表示为：

$$GA_x=GA_0S_x\tag{11}$$

将式(10)、(11)代入式(9)得：

$$M_x\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2}+C_x\frac{\partial u(x,t)}{\partial t}+\frac{EI_0}{H^4}\frac{\partial^2}{\partial x^2}\left[S_x\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2}\right]-\frac{GA_0}{H^2}\frac{\partial}{\partial x}\left[S_x\frac{\partial u(x,t)}{\partial x}\right]=-M_x\frac{\partial^2 u_g(t)}{\partial t^2}\tag{12}$$

式(12)两端同除以EI_0，得：

$$\frac{M_x}{EI_0}\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2}+\frac{C_x}{EI_0}\frac{\partial u(x,t)}{\partial t}+\frac{1}{H^4}\frac{\partial^2}{\partial x^2}\left[S_x\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2}\right]-\frac{\alpha_0}{H^2}\frac{\partial}{\partial x}\left[S_x\frac{\partial u(x,t)}{\partial x}\right]=-\frac{M_x}{EI_0}\frac{\partial^2 u_g(t)}{\partial t^2}\tag{13}$$

$$\alpha_0=H\sqrt{\frac{GA_0}{EI_0}}\tag{14}$$

无量纲参数α_0可控制建筑模型中整体弯曲变形和整体剪切变形的参与程度，进而控制建筑的横向偏转形状。由前述方程可知，随着建筑物高度的增高，t时刻的地面位移将减小。由式(7)得知，建筑的高度越高，自振频率越低，当自振频率降低到与场地频率一致时，便实现了“双共振”条件。理论上建筑物的高度越高，地面位移越小。但控制建筑频率的不仅有建筑高度H，还有建筑宽度B，这使得在实际工程建设中，出于安全性考虑，建筑物的频率始终位于一定范围内，因此站在频率的角度讨论建筑类型与地面运动的关系具有一定的合理性。

4　结论

本文以西安地裂缝为原型，研究了SCI效应对地裂缝场地动力响应特征的影响规律，综合考虑建筑高度、建筑密度、建筑排布方式等关键影响因素，主要研究结论如下：

(1) 建筑密度是对地裂缝场地响应造成影响的重要因素，虽然低层建筑与地裂缝场地所产生的SCI效应并不明显，但随着建筑密度的增加，地裂缝

场地地表平均峰值加速度仍会降低。

（2）建筑密度达到一定程度之前，SCI效应对地裂缝放大效应的影响范围的减小是有限的。

（3）建筑物自振频率与地震波卓越频率一致或接近时，场地PGA将变得不再平稳，但由于SCI效应，绝大部分地面PGA仍处在较为安全的水平。仅部分地方风险较高，但都出现在空地，并未对建筑物产生较大影响。当实现双共振条件时，SCI效应非常明显，整个地裂缝场地的PGA明显降低。同时，建筑物振动的能量更容易传递到地面，各楼层的加速度也处在一个较低的水平。

（4）不同高度建筑混合布置时，Ⅱ型建筑周围特有的“双峰”特征会受Ⅲ型建筑的影响而变为“单峰”。此外，由于双共振条件有利于改善共振现象，建筑物的布置方式也将影响着地裂缝场地的响应。

针对大尺度、低可重复性的工程研究对象，数值模拟方法具有计算效率高、模拟精度优等优势。后续研究可进一步优化数值计算方法与研究维度，深化相关作用机理研究，完善和丰富现有地裂缝场地SCI效应研究成果。

参考文献（References）

[1] 李永善. 西安地裂缝[M]. 北京：地震出版社，1986.
LI Yongshan. Xi′an ground fissure[M]. Beijing：Seismological Press，1986.

[2] 耿大玉，李忠生. 中美两国的地裂缝灾害[J]. 地震学报，2000，22(4)：433-441.
GENG Dayu，LI Zhongsheng. Ground fissure hazards in the United States and China[J]. Acta Seismologica Sinica，2000，22(4)：433-441.

[3] 谢广林. 地裂缝［M］. 北京：地震出版社. 1988.
XIE Guanglin. Ground fissure［M］. Beijing：Seismological Press，1988.

[4] 范文，聂忠权，陈党民，等. 地裂缝地震影响效应研究：以陕西咸阳为例[J]. 灾害学，2014，29(4)：82-88.
FAN Wen，NIE Zhongquan，CHEN Dangmin，et al. Study on seismic effect of ground fissure：a case study on a ground fissure in Xianyang，Shaanxi[J]. Journal of Catastrophology，2014，29(4)：82-88.

[5] 慕焕东. 地裂缝场地地震放大效应研究[D]. 西安：长安大学，2014.
MU Huandong. Study on the seismic amplification effect on site with ground fissure[D]. Xi'an：Chang′an University，2014.

[6] 刘妮娜，黄强兵，门玉明，等. 地震荷载作用下地裂缝场地动力响应试验研究[J]. 岩石力学与工程学报，2014，33(5)：1024-1031.
LIU Nina，HUANG Qiangbing，MEN Yuming，et al. Model test on dynamic response of ground with fissures under seismic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2014，33(5)：1024-1031.

[7] 慕焕东，邓亚虹，李荣建，等. 西安地裂缝场地动力响应规律及影响因素分析[J]. 地震工程学报，2019，41(2)：418-427.
MU Huandong，DENG Yahong，LI Rongjian，et al. Dynamic response and influencing factors of ground fissure sites in Xi'an[J]. China Earthquake Engineering Journal，2019，41(2)：418-427.

[8] 熊仲明，张朝，霍晓鹏，等. 地裂缝场地加速度响应振动台试验研究[J]. 岩土工程学报，2018，40(3)：520-526.
XIONG Zhongming，ZHANG Chao，HUO Xiaopeng，et al. Shaking table tests on acceleration response of ground fissure site[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2018，40(3)：520-526.

[9] 张朝，聂绪致，熊仲明，等. 地震动参数对地裂缝场地动力响应的影响规律研究[J]. 地震工程与工程振动，2022，42(5)：110-118.
ZHANG Chao，NIE Xuzhi，XIONG Zhongming，et al. Study on the effects of ground motion parameters on the dynamic response of the ground fissures site[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics，2022，42(5)：110-118.

[10] 张磊刚，邓亚虹，薛捷，等. 地裂缝场地地脉动响应特征初探：以西安F6地裂缝为例[J]. 工程地质学报，2017，25(3)：784-793.
ZHANG Leigang，DENG Yahong，XUE Jie，et al. Preliminary research on dynamic response characteristics of microtremor at ground fissure sites：illustrated with F6 ground fissure in Xi'an[J]. Journal of Engineering Geology，2017，25(3)：784-793.

[11] 王晗，邓亚虹，慕焕东，等. 西安典型地裂缝场地地脉动测试及地震响应特征分析[J]. 中国地质灾害与防治学报，2022，33(4)：55-64.
WANG Han，DENG Yahong，MU Huandong，et al. Ground pulsation tests and analysis on seismic response of typical ground fissure sites in Xi'an[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control，2022，33(4)：55-64.

[12] CHANG J，DENG Y H，XUAN Y，et al. The dynamic response of sites with earth fissures as revealed by microtremor analysis：a case study in the Linfen Basin，China[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering，2020，132(8)：106076.

[13] XUAN Y，DENG Y H，HE J，et al. Microtremor-based analysis of the dynamic response characteristics of earth-fissured sites in the Datong basin，China[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration，2021，20(3)：567-582.

[14] GUÉGUEN P，BARD P Y，SEMBLAT J F. From soil-structure to site-city interaction[C]//New Zealand Society for Earthquake Engineering. Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering. Auckland：New Zealand Society for Earthquake Engineering Publisher，2000：105-116.

[15] GUEGUEN P. Site-city seismic interaction in Mexico city-

like environments: an analytical study[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2002, 92(2): 794-811.

[16] KHAM M, SEMBLAT J F, BARD P Y, et al. Seismic site-city interaction: main governing phenomena through simplified numerical models[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2006, 96(5): 1934-1951.

[17] ISBILIROGLU Y, TABORDA R, BIELAK J. Coupled soil-structure interaction effects of building clusters during earthquakes[J]. Earthquake Spectra, 2015, 31(1): 463-500.

[18] TADDEI F, MÜLLER G, LU X. Towards a nonlinear discrete model for site-city interaction through a Sino-European synergy[C]//16th European Conference on Earthquake Engineering (16ECEE). Thessaloniki: Aristotle University of Thessaloniki, 2018:96-102.

[19] LU X Z, TIAN Y, WANG G, et al. A numerical coupling scheme for nonlinear time history analysis of buildings on a regional scale considering site-city interaction effects [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2018, 47(13): 2708-2725.

[20] CHEN S P, LIU Q F, ZHAI C H, et al. Influence of building-site resonance and building properties on site-city interaction: a numerical investigation[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2022, 158: 107307.

[21] SAHAR D, NARAYAN J P, KUMAR N. Study of role of basin shape in the site-city interaction effects on the ground motion characteristics[J]. Natural Hazards, 2015, 75(2): 1167-1186.

[22] VARONE C, LENTI L, MARTINO S, et al. Spatial variability of the urban ground motion in a highly heterogeneous site-city configurations[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2021, 19(1): 27-45.

[23] NOROUZI A H, GERAMI M, VAHDANI R, et al. Influence of site-city interaction on the response of structures considering soil stiffness, height, and number of buildings[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2021, 50(5): 1290-1314.

[24] KATO B, WANG G. Regional seismic responses of shallow basins incorporating site-city interaction analyses on high-rise building clusters[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2021, 50(1): 214-236.

[25] 国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会. 工程场地地震安全性评价：GB 17741—2005[S]. 北京：中国标准出版社，2006.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Evaluation of seismic safety for engineering sites: GB 17741—2005[S]. Beijing: Standards Press of China, 2006.

[26] 薛锋，王庆良，胡亚轩，等. 西安市岩土体剪切波速与土层深度关系的研究[J]. 地震工程学报，2014, 36(2): 249-255, 280.
XUE Feng, WANG Qingliang, HU Yaxuan, et al. Study on the relationship between soil depth and shear wave velocity of rock and soil mass in Xi'an City[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(2): 249-255, 280.

[27] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构荷载规范：GB 50009—2012[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2012.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Load code for the design of building structures: GB 50009—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.

[28] 中华人民共和国住房和城乡建设部，中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 建筑抗震设计规范：GB 50011—2010[S]. 2016 年版. 北京：中国建筑工业出版社，2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010[S]. 2016 ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.

[29] 杨兴凯，邓亚虹，常江，等. 地裂缝场地建筑结构动力响应特征及抗震设防研究[J]. 地震工程学报，2022, 44(5): 1100-1109.
YANG Xingkai, DENG Yahong, CHANG Jiang, et al. Dynamic response characteristics and seismic fortification of structures in ground fissure site[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2022, 44(5): 1100-1109.

[30] MIRANDA E, TAGHAVI S. Approximate floor acceleration demands in multistory buildings. I: formulation[J]. Journal of Structural Engineering, 2005, 131(2): 203-211.

（本文编辑：任　栋）