

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2023.01.016

<https://xuebao.xaut.edu.cn>

引文格式:郭宏超,郭品彰,张博明,蔡玉军.考虑地裂缝影响的连体结构地震动力响应分析[J].西安理工大学学报,2023,39(1):141-150.

GUO Hongchao, GUO Pinzhang, ZHANG Boming, CAI Yujun. Seismic dynamic response analysis of conjoined structures considering the influence of ground fissures[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2023, 39(1): 141-150.

考虑地裂缝影响的连体结构地震动力响应分析

郭宏超¹, 郭品彰¹, 张博明¹, 蔡玉军²

(1. 西安理工大学 土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048;

2. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 陕西 西安 710043)

摘要: 西安火车站东配楼为不规则连体结构,其质量与刚度分布差异较大,地震作用下的平扭耦合效应显著,不利于结构抗震,为研究地震作用下 f_3 地裂缝对该连体结构动力响应的影响,本文采用ABAQUS有限元软件分别建立了 f_3 地裂缝场地与无地裂缝场地的土体-结构耦合模型,对比分析了地震作用下结构的位移、加速度及扭转等响应。结果表明:地裂缝增强了地震的激励作用和连体结构的动力响应,由于大区各柱脚距地裂缝距离均不相同,因此大区的扭转响应显著提升,增幅达到了191.61%;在弹性与弹塑性阶段,连体结构的最大层间位移角分别为1/580和1/51,满足相关规范要求;大、小三角区的位移及加速度大致相同,表现出较强的平动耦联效应;而大跨桁架连廊采用滑动支座能有效释放连体结构的相对位移,并降低强震作用下大区与小三角区的扭转耦联效应;连体结构的薄弱层为1、2层,应进一步提升结构刚度。

关键词: 地裂缝; 不规则连体结构; 动力响应; 层间位移角; 大跨桁架连廊

中图分类号: TU375.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4710(2023)01-0141-10

Seismic dynamic response analysis of conjoined structures considering the influence of ground fissures

GUO Hongchao¹, GUO Pinzhang¹, ZHANG Boming¹, CAI Yujun²

(1. Faculty of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. China Railway the First Survey and Design Institute Group Co. Ltd., Xi'an 710043, China)

Abstract: The east annex of Xi'an railway station is an irregular conjoined structure, its mass and stiffness distribution are quite different, and there is a significant horizontal-torsional coupling effect in the earthquake, which is not conducive to the structure's earthquake resistance. In order to study the influence of f_3 ground fissures on the dynamic response of the conjoined structure in the action of earthquake, this paper established the soil-structure coupling model for the f_3 ground fissure site and without ground fissure site by using the ABAQUS finite element software, compared and analyzed the displacement, acceleration and torsion response of the structure in the action of earthquake. The results show that ground fissures enhance the seismic excitation and the dynamic response of conjoined structures since the distance between each column base in the large

收稿日期: 2022-03-14; 网络首发日期: 2022-12-13

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail//61.1294.n.20221212.1757.003.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51978571); 陕西省杰出青年科学基金资助项目(2021JC-41); 陕西省重点研发计划项目(2022SF-199)

通信作者: 郭宏超,男,博士,教授,研究方向为钢结构及结构抗震。E-mail: ghc-1209@163.com

area and the ground crack is different, so the torsional response in the region is significantly improved, with an increase of 191.61%. The maximum inter story displacement angles of the connected structure in the elastic stage and the elastic-plastic stage are 1/580 and 1/51, which meet the requirements of the seismic code. The translational coupling effect of large triangle and small triangle is obvious, with their displacement and acceleration roughly the same. The sliding bearing of long-span truss corridor can effectively release the relative displacement of the connected structure and reduce the torsional coupling effect of large area and small triangle area under strong earthquake. The weak floors of the conjoined structure are 1 and 2, so it is suggested to taking some measures to improve the structural stiffness.

Key words: ground fissures; irregular conjoined structure; dynamic response; interlayer displacement angle; long-span truss corridor

地裂缝在我国分布广泛,有不少跨越地裂缝的建筑。受 f_3 地裂缝斜穿影响,西安火车站东配楼^[1]设计为三个单体框架结构,即大、小三角区与大区,三个单体结构之间用跨地裂缝的连廊连接,最终组成复杂的连体结构,如图 1 所示。各单体形状不规则,而且各单体的刚度无法匹配,同时柱网、剪力墙布置受限使质量中心和刚度中心无法重合,当发生地震时,易使结构在 X 向、Y 向相互耦合下发生强烈的扭转振动,对结构抗震极为不利。因此,有必要对该连体结构在跨越地裂缝场地的抗震性能进行研究分析。

近年来,人们对地裂缝灾害愈加重视,已有学者对地裂缝及跨地裂缝结构的动力特性展开了相关研究,如 LIU 等^[2]模拟了活动地裂缝场地的地震反应,分析了场地的动态特性,为上部跨越地裂缝结构的安全设计提供了指导依据。熊仲明等^[3]用 ABAQUS 有限元软件分析了地裂缝场地在不同地震作用下的动力响应,发现垂直地裂缝方向作用的地震波造成的场地破坏更为严重。张朝等^[4]对西安 f_4 地裂缝场地土体进行了振动台试验,结果显示在地震作用下,上盘土体的地震响应比下盘更大,破坏更严重,且随着地震强度的增大,上下盘土体的动力特性趋向一致;陈轩等^[5]对穿越地裂缝地铁车站结构进行振动台试验,总结了其在地震作用下的失效机理与破坏模式。白超宇等^[6]对跨地裂缝的城市三跨立交桥进行易损性分析,结果表明地裂缝对立交桥的非一致激励增大了桥墩的失效概率。陈轩等^[7]对跨地裂缝框架结构进行了振动台试验,研究表明构件损伤具有上下盘效应,位于地裂缝上盘的构件损伤和柱的钢筋应变幅值明显大于下盘。熊仲明等^[8]采用加权系数法对跨地裂缝框架结构进行了损伤分析,结果表明地裂缝的存在加剧了上部结构的损伤破坏,证明了用该方法评估跨地裂缝结构的

损伤性能具有可行性。Xiong 等^[9]对跨越地裂缝框架结构加固前后的抗震性能进行了对比分析,结果表明通过设置支撑杆加固结构,可有效减少地裂缝对上部结构的破坏。综上所述,现有研究成果已总结了地裂缝对其上部框架结构、立交桥等结构地震动力特性的影响规律,但对于跨地裂缝连体结构的地震动力特性还有待进一步研究。

基于此,本文以西安火车站东配楼不规则复杂连体结构为研究对象,考虑地裂缝场地的影响,采用 ABAQUS 有限元软件建立结构-土体耦合模型,研究地裂缝对上部连体结构地震动力响应的影响规律,以期为实际工程应用提供一定的参考。

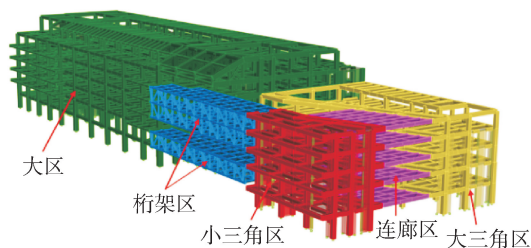


图 1 西安火车站东配楼

Fig. 1 East annex of Xi'an railway station

1 研究概况

1.1 工程背景

西安火车站东配楼地处 II 类场地,抗震设防烈度为 8 度,由三个不规则的单体结构组成,分别为大三角区、小三角区、大区,各区间通过连廊连接,最终组成不规则连体结构。其中大跨度桁架连廊与小三角区采用铰接连接,与大区采用滑动连接。小连廊与小三角区采用铰接连接,与大三角区采用滑动连接。本次数值分析选用东配楼的简化结构^[10],该简化结构共 5 层,一、二层层高为 5 m,其余各层为 4 m,平面图如图 2 所示,图 3 为支座详图。

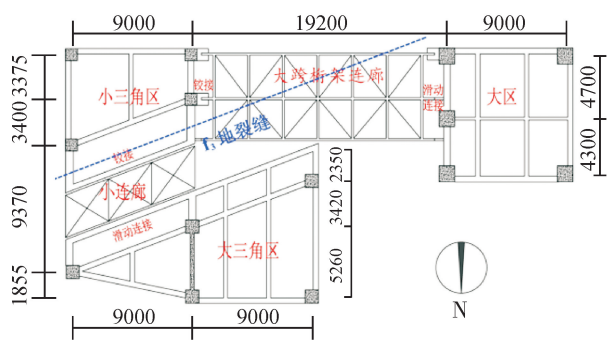


图2 结构平面图(单位:mm)
Fig.2 Plan of model(unit:mm)

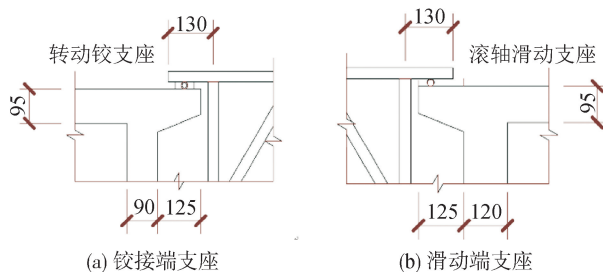


图3 支座详图(单位:mm)
Fig.3 Support details(unit:mm)

1.2 工程地质状况

西安火车站东配楼横跨 f_3 地裂缝。地裂缝上盘土体下降和小量的水平张拉作用以及地基不均匀沉降导致跨越地裂缝建筑物破损。地质勘查结果显示,工程场地附近 f_3 地裂缝地表鲜有破坏,呈隐伏状态。相较于其它地裂缝, f_3 地裂缝的平均活动速率较低,活动速率自2005年以后均小于 5 mm/a ,且逐年降低,现呈稳定状态。

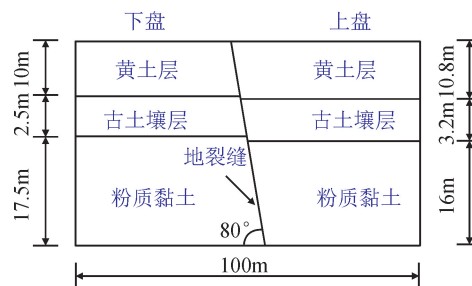
拟建工程附近地层结构稳定,表层为第四系全新统人工填土,下部为第四系上更新统黏质黄土、古土壤及中更新统黏质黄土。地下埋深 $5\sim 10\text{ m}$ 处可见地下水。地层结构自上而下土层表述为: Q_4^{ml} 人工填土、 Q_3^{eol3} 黏质黄土、 Q_3^{el3} 古土壤、 Q_2^{eol3} 黏质黄土、 Q_2^{al1} 粉质黏土。

2 有限元建模

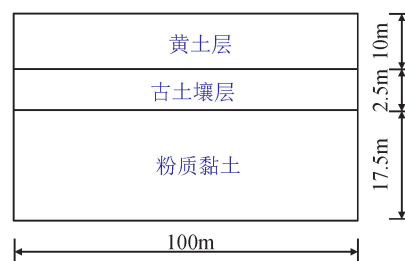
2.1 地裂缝剖面结构模型

考虑关键土层结构的影响,剔除地表杂填土层,黄土与古土壤层下面的地层等效为一层土考虑,将工程建设处的 f_3 地裂缝场地土层简化为3层,自上而下依次为黄土层、古土壤层和粉质黏土层,黄土层、古土壤层的上下盘土层错距分别为 0.8 m 、 1.5 m ,地裂缝倾角为 80° ^[11]。为减小场地土的边界效应,取土体长度、宽度约为结构长宽的3倍,厚度

方向取 30 m ,最终确定土体的尺寸为 $100\text{ m}\times 80\text{ m}\times 30\text{ m}$ (长 \times 宽 \times 高)。地裂缝场地剖面结构如图4(a)所示,对应的无地裂缝普通场地剖面结构如图4(b)所示,各土层物理参数如表1所示。



(a) f_3 地裂缝场地



(b) 无地裂缝场地

图4 场地剖面结构模型

Fig.4 Model of site sectional structural

表1 土体物理参数

Tab.1 Physical properties of soil

参数	黄土	古土壤	粉质黏土
含水率/%	24.6	24.8	23.2
密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1 845	1 998	2 049
孔隙比 e	0.7	0.7	0.7
剪切模量 G/MPa	305.81	330.03	498.75
弹性模量 E/GPa	42.64	44.28	54.12
黏聚力 c/kPa	28	30	28
内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	22	23	22

2.2 模型建立

采用ABAQUS有限元软件分别建立 f_3 地裂缝场地和无地裂缝场地的结构-土体耦合模型,地裂缝场地结构-土体耦合的有限元模型如图5所示。其中,钢筋混凝土框架与钢结构杆件采用B31梁单元,楼板与剪力墙采用S4R壳单元,模型土采用C3D8R单元。钢材及钢筋的本构选用理想弹塑性模型,壳单元混凝土选用塑性损伤模型,梁单元混凝土采用UCConcrete02模型^[12]。场地土本构选择符合摩尔-库伦强度准则的弹塑性模型。结构阻尼采用瑞利阻尼。

楼板与剪力墙、框架梁柱间均采用 Tie 约束连接。连廊与单体结构之间采用耦合约束连接,铰接连接通过释放 X、Y、Z 方向的转角来模拟,桁架连廊与大区的滑动支座通过限制 Y、Z 方向位移来模拟,小连廊与大三角区的滑动支座通过限制 X、Z 方向位移来模拟。土体与上部结构柱脚间采用耦合约束连接。上下盘土体间的法向接触采用硬接触,切向接触采用摩擦接触,摩擦系数取 0.3。

为避免地震波在有限区域土体内传播时发生反射和折射,场地土侧向边界采用粘弹性人工边界,对土体侧面设置法向弹簧与阻尼,弹簧刚度 K_{BN} 与阻尼系数 C_{BN} 按式(1)和(2)取值。

$$K_{BN} = \alpha_N \frac{G}{R} \quad (1)$$

$$C_{BN} = \rho C_P \quad (2)$$

式中: G 为土体的剪切模量; R 为波源至人工边界的距离; ρ 为土体密度; α_N 为粘弹性人工边界法向修正系数,取 4/3; C_P 为土体的压缩波速。

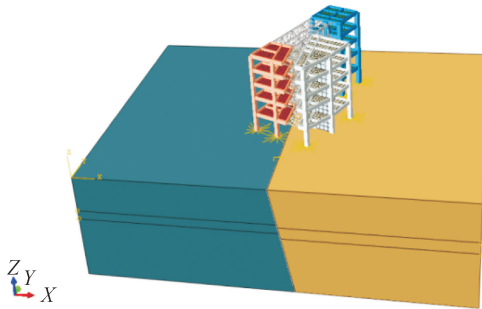


图 5 f_3 地裂缝场地的有限元模型

Fig. 5 Finite element model of f_3 ground fissure site

2.3 地震波的施加

根据西安火车站东配楼的场地类别,依照 JGJ/T 101—2015《建筑抗震试验规程》^[13] 选取两条天然波(EI Centro 波、基岩波)与一条人工波作为数值模拟时的地震动分别输入,并且包含地震动峰值在内的 15s 地震激励。鉴于土体滤波作用对模拟结果的影响,选用 SeismoSignal 软件对地震波进行基线校准,除去频率为 15Hz 以上的地震波之后,最终得到调幅后的三种地震加速度时程曲线,如图 6 所示。

本文将地震加速度时程作为地震激励,施加于土体底部。其中,施加的加速度时程曲线参照式(3)进行调整。

$$a'(t) = \frac{A'_{\max}}{A_{\max}} a(t) \quad (3)$$

式中: $a'(t)$ 、 A'_{\max} 为所要模拟地震波的加速度时程曲线与峰值加速度; $a(t)$ 、 A_{\max} 为地震波调幅后的加速度时程曲线与峰值加速度。

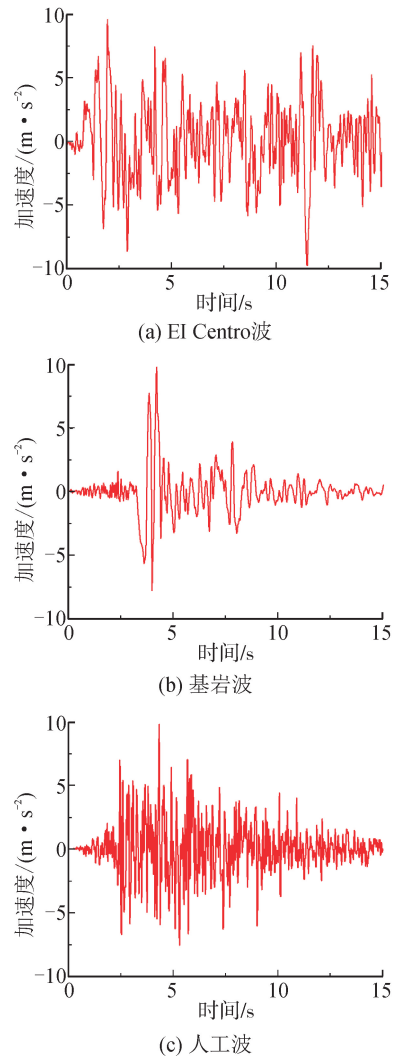


图 6 调幅后的地震加速度时程曲线

Fig. 6 Time history curve of seismic acceleration after amplitude modulation

2.4 工况设置

为研究地震波类型、地震强度和地裂缝对上部复杂连体结构的影响,本文将三种地震波(EI Centro 波、基岩波、人工波)的三个地震强度(小震 70gal、中震 200gal、大震 400gal),分别施加于无地裂缝场地模型和有地裂缝场地模型的底部。共 18 组工况。

下文中用 ELW、NRW、RGW 来表示无地裂缝普通场地下的 EI Centro 波、基岩波和人工波工况;用 ELD、NRD、RGD 来表示 f_3 地裂缝场地下的 EI Centro 波、基岩波和人工波工况。

3 结果分析

3.1 模态分析

通过模态分析得到各单体结构 X、Y 向的自振频率,如表 2 所示。对比本文所建模型与振动台试验^[8]和 SAP2000^[14]模型的自振频率,差幅均在 10%之内,表

明本文建立的 ABAQUS 模型具有较好的精度。

表 2 各单体结构自振频率
Tab. 2 Natural frequency of each single structure

区域	方向	自振频率/Hz			相对误差/%	
		试验	SAP2000 模型	ABAQUS 模型	对比 试验	对比 SAP2000
大三角区	X 向	7.221	7.566	7.453	3.21	-1.49
	Y 向	9.531	10.254	10.034	5.28	-2.14
小三角区	X 向	5.475	5.556	5.627	2.78	1.28
	Y 向	5.243	5.813	5.685	8.43	2.20
大区	X 向	8.234	8.594	8.702	5.68	1.26
	Y 向	9.539	10.254	10.106	5.94	-1.44

注: 误差 = $\frac{\text{ABAQUS 频率} - \text{试验(或 SAP2000) 频率}}{\text{试验(或 SAP2000) 频率}} \times 100\%$ 。

3.2 地表加速度响应分析

地震峰值加速度为 70gal 时,距地裂缝 20m 内的地表各点加速度峰值如图 7 所示。由图可知,在地震作用下,无地裂缝场地各测点加速度峰值基本相同,而地裂缝的存在显著放大了地表加速度。上、下盘地表加速度峰值均出现在靠近地裂缝处,距地裂缝距离相同时,上盘响应大于下盘。随着与地裂缝距离的增加,地表加速度峰值逐渐减小,最终上、下盘分别在距离地裂缝 15 m、10 m 处与普通场地的加速度峰值近似一致。说明地裂缝对地表加速度的响应具有

上、下盘效应,上盘的放大效应与放大范围均大于下盘。上、下盘地表加速度响应的差异对跨越地裂缝结构造成了非一致激励,在设计中应采取合理的措施以降低地裂缝对上部结构动力响应的放大作用。

不同地震作用下,地表加速度放大系数 k 如表 3 所示。其中放大系数 k 为地表各点加速度峰值与输入加速度峰值之比。由表可知,地表加速度与场地、地震波类型、地震强度等有关。无地裂缝场地地表加速度放大系数约为 1.55~1.8,地裂缝场地约为 2.06~2.5,较相同工况下的无地裂缝场地提升了约 30%~42%。随着地震峰值加速度的增大,土体非线性不断增强,传递地震能量的能力逐步减弱,地表加速度的增幅不断减小。

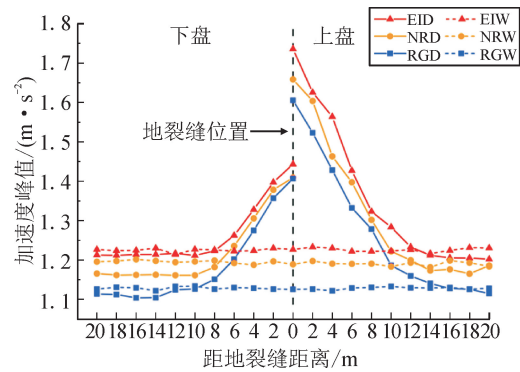


图 7 70gal 地震作用时地表的加速度峰值
Fig. 7 Peak of surface acceleration when the seismic peak acceleration is 70gal

表 3 地表加速度放大系数

Tab. 3 Amplification factor of surface acceleration

输入地震 动峰值/ gal	地表加速度放大系数								
	EI Centro 波			基岩波			人工波		
	普通 场地	地裂缝 场地	增幅/%	普通 场地	地裂缝 场地	增幅/%	普通 场地	地裂缝 场地	增幅/%
70	1.76	2.49	41.46	1.71	2.37	38.33	1.61	2.30	42.48
200	1.78	2.41	35.77	1.63	2.20	35.38	1.58	2.20	38.92
400	1.62	2.15	32.20	1.60	2.07	29.73	1.55	2.06	32.79

注: 增幅 = (地裂缝场地地表加速度 - 普通场地地表加速度) / 普通场地地表加速度 $\times 100\%$ 。

3.3 结构加速度响应分析

在 400gal 的 EI Centro 波作用下,连体结构各区域顶层的加速度时程曲线如图 8 所示。由图可知,结构顶层加速度时程曲线的发展规律在两种场地上基本相同,但地裂缝场地的曲线从第 3s 开始略微滞后于无地裂缝场地。由于结构各区刚度退化不均,小三角区在地裂缝场地的顶层加速度峰值略微

小于无地裂缝场地。在同一工况下,大、小三角区顶层加速度时程曲线变化规律一致,表现出较强的动力耦合现象。

定义各层加速度放大系数 k 为各层加速度峰值与输入加速度峰值之比,连体结构各层的加速度放大系数如图 9~11 所示。由图可知,连体结构的加速度响应与地震类型及强度有关。地震强度相同时,

EI Centro 波作用下的结构加速度响应最大,人工波次之,基岩波最小;地震波类型相同时,随地震强度

的提高,结构的刚度退化增大,累积损伤更大,结构的加速度放大系数不断减小。

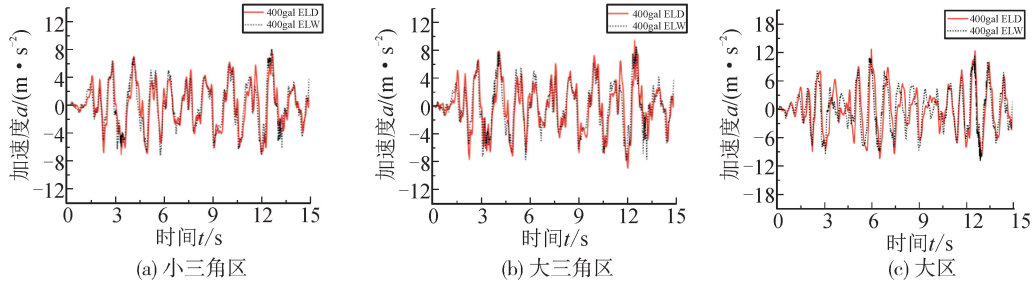


图 8 400gal EI Centro 波作用下结构顶层的加速度时程曲线

Fig. 8 Acceleration time history curve of the top layer of the structure in the action of 400gal EI Centro wave

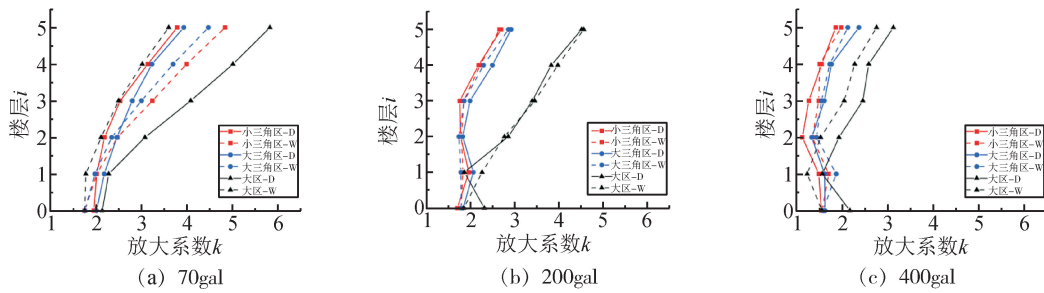


图 9 EI Centro 波作用下结构的加速度放大系数

Fig. 9 Acceleration amplification factor of structure under EI Centro wave

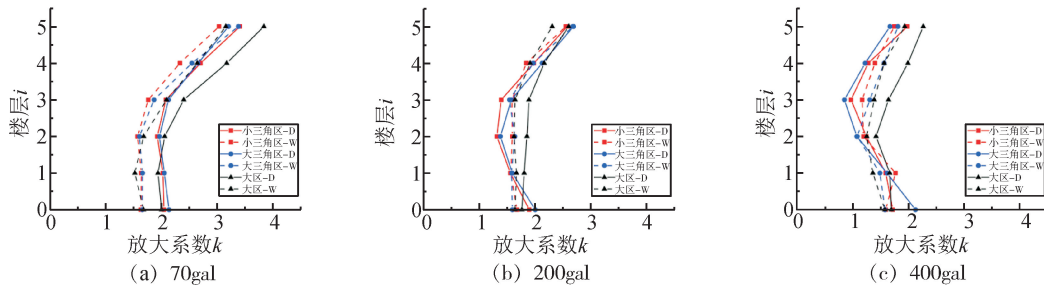


图 10 基岩波作用下结构的加速度放大系数

Fig. 10 Acceleration amplification factor of structure under bedrock wave

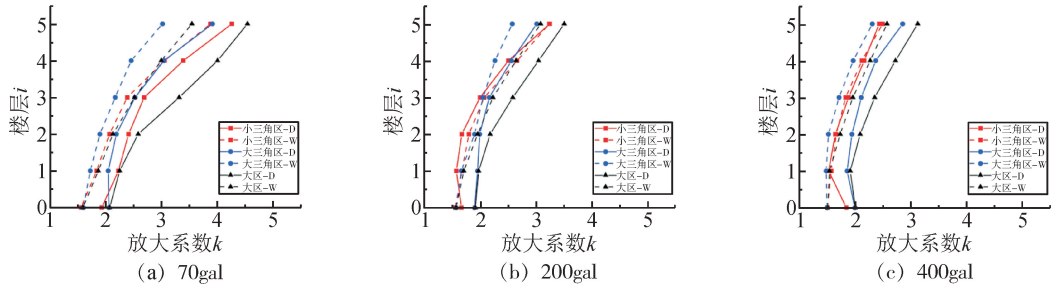


图 11 人工波作用下结构的加速度放大系数

Fig. 11 Acceleration amplification factor of structure under artificial wave

3.4 结构位移响应分析

图 12~14 为三个单体结构各层的层间位移。由图可知,地裂缝对连体结构的位移响应有显著的

放大作用,结构的侧向位移与地震波的频谱特性及峰值加速度有关。结构的层间位移在 EI Centro 波作用下最大,基岩波次之,人工波最小,并随输入地

震峰值加速度的增大而不断增大。

地震作用下,大、小三角区的层间位移较为接近,表明这两个区域在地震作用下有较强的平动耦联作用,大区由于自身抗弯刚度较大,抗侧移能力较强,故其层间位移明显小于大、小三角区,同时说明桁架连廊的滑动支座能够有效释放连体结构的相对位移。

表4为各单体结构的最大层间位移角。根据《建筑抗震设计规范》GB 50011—2010^[15]的规定,钢筋混凝土框架结构在弹性和弹塑性状态下的层间位

移角限值分别是1/550、1/50。由表可知,峰值加速度为70gal的地震作用下,结构各区的最大层间位移角为1/580,此时各区均处于弹性阶段。峰值加速度为400gal的地震作用下,小三角区、大三角区、大区的最大层间位移角分别为1/59、1/51、1/57,均满足规范要求,达到了“小震不坏、中震可修、大震不倒”的抗震设防目标。结构各区层间位移角最大处位于第一层或第二层,表明这两层为结构的薄弱层,应采取相应措施(如增加构件截面、设置支撑等)增加结构底部的侧向刚度,以确保结构具有良好的抗震性能。

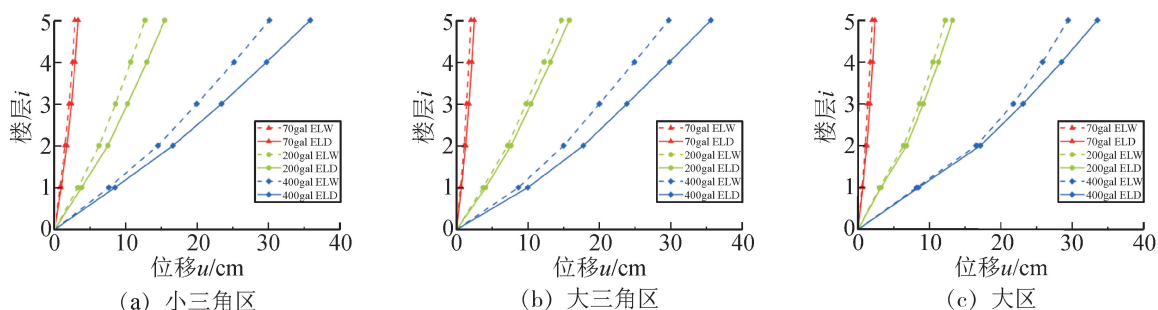


图12 EI Centro波作用下各区域楼层最大位移

Fig. 12 Maximum floor displacement of each area under EI Centro wave

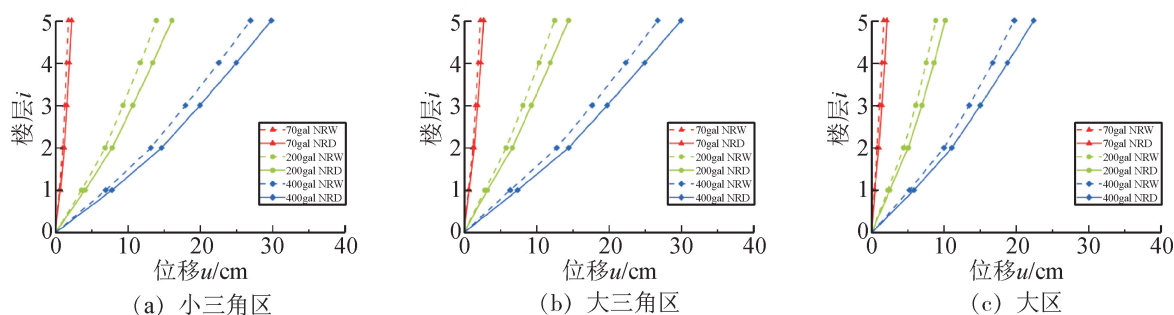


图13 基岩波作用下各区域楼层最大位移

Fig. 13 Maximum floor displacement of each area under bedrock wave

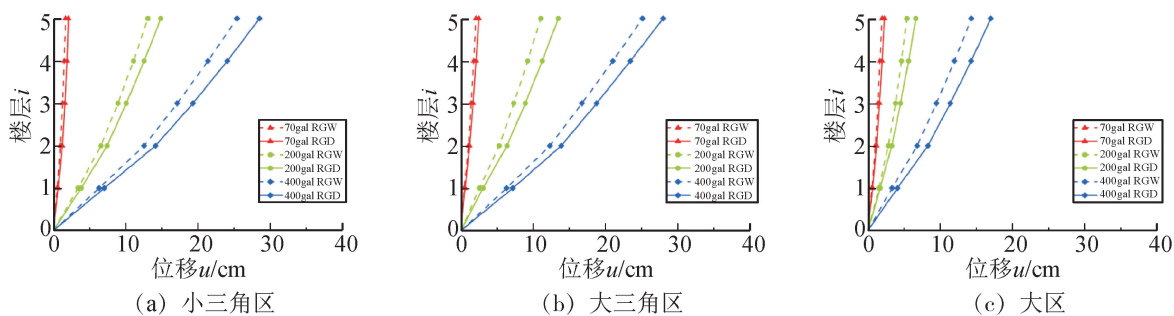


图14 人工波作用下各区域楼层最大位移

Fig. 14 Maximum floor displacement of each area under artificial wave

表 4 最大层间位移角
Tab. 4 Maximum interlayer displacement angle

地震波	区域	最大层间位移角					
		70gal		200gal		400gal	
		无地裂缝	有地裂缝	无地裂缝	有地裂缝	无地裂缝	有地裂缝
EI Centro 波	小三角区	1/689(a)	1/580(a)	1/154(a)	1/132(a)	1/66(a)	1/59(a)
	大三角区	1/950(a)	1/816(a)	1/137(a)	1/127(a)	1/58(a)	1/51(a)
	大区	1/994(b)	1/824(b)	1/147(b)	1/139(b)	1/60(b)	1/57(b)
基岩波	小三角区	1/904(a)	1/762(a)	1/137(a)	1/121(a)	1/72(a)	1/64(a)
	大三角区	1/828(a)	1/709(a)	1/168(a)	1/145(a)	1/77(b)	1/68(a)
	大区	1/1180(a)	1/925(a)	1/223(b)	1/196(b)	1/96(a)	1/86(a)
人工波	小三角区	1/957(a)	1/771(a)	1/146(a)	1/130(a)	1/79(a)	1/70(b)
	大三角区	1/875(b)	1/769(b)	1/181(b)	1/151(b)	1/80(a)	1/70(a)
	大区	1/1310(b)	1/1151(b)	1/228(b)	1/197(b)	1/104(b)	1/93(b)

注:(a)、(b)分别代表最大层间位移角发生在第一层和第二层。

3.5 结构扭转响应分析

扭转效应为结构地震破坏的主要因素,因此采用层间扭转角来定量分析连体结构在地震激励时的扭转效应。图 15 为结构平面扭转示意图,结构第 i 层扭转角 θ_i 与结构第 i 层端框架的附加位移 $\Delta\delta_i$ 可分别由式(4)、(5)计算:

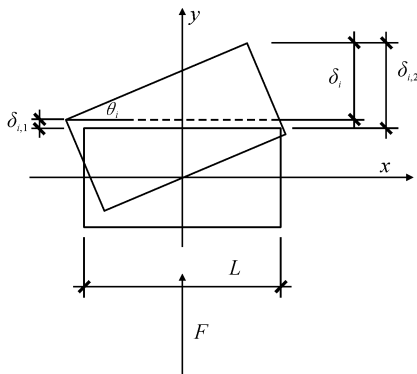


图 15 结构扭转示意图

Fig. 15 Schematic diagram of structural torsion

$$\delta_i = \delta_{i,2} - \delta_{i,1} \tag{4}$$

$$\theta_i = \frac{\delta_i}{L} \tag{5}$$

则结构第 i 层层间扭转角 $\Delta\theta_i$ 为:

$$\Delta\theta_i = \theta_i - \theta_{i-1} \tag{6}$$

各单体结构的最大层间扭转角如表 5 所示。由表可知,无地裂缝场地上,各单体结构的最大层间扭转角从大到小依次为小三角区、大区、大三角区,表明大三角区的抗扭刚度最大,小三角区的最小,各单体结构的层间扭转角随地震强度增大而不断增大。地裂缝场地对结构的扭转响应主要起放大作用,尤其在小震作用时放大效果更为显著,这主要是因为地表加速度在小震作用下的增幅最大。

对比两种场地上结构各区的最大层间扭转角可以发现,地裂缝的存在增大了各单体结构的平扭耦合效应,且在基岩波地震作用时影响效果最为显著,小三角区、大三角区、大区的最大层间扭转角较无地裂缝场地分别增大了 22.25%、35.89%、191.61%。可见,地裂缝对大区扭转响应的影响最为突出,这是由于大区各柱脚距地裂缝距离不同,导致各柱的内力均不相同,损伤大小亦有较大差别,从而导致层间扭转角大幅提升。这也表明大跨桁架连廊能有效降低强震作用下大区与小三角区的扭转耦联效果。

表5 最大层间扭转角
Tab.5 Maximum interlayer torsion angle

地震波	区域	最大层间扭转角						增大幅度/%		
		普通场地			地裂缝场地			70gal	200gal	400gal
		70gal	200gal	400gal	70gal	200gal	400gal			
EI Centro 波	小三角区	5.32	10.00	23.37	5.62	10.22	23.10	5.57	2.17	-1.14
	大三角区	2.22	6.26	10.75	2.47	6.59	11.77	11.23	5.21	9.52
	大区	3.96	8.10	11.77	4.31	10.18	12.54	8.83	25.70	6.52
基岩波	小三角区	3.10	7.84	14.90	3.97	7.92	16.33	22.25	1.05	9.61
	大三角区	0.78	4.62	8.34	1.06	4.64	8.92	35.89	0.30	6.96
	大区	2.74	7.55	12.97	7.99	15.52	29.88	191.61	105.62	130.36
人工波	小三角区	3.22	4.52	6.80	3.48	4.67	7.04	8.06	3.23	3.50
	大三角区	1.36	1.63	4.49	0.90	1.58	4.52	-33.78	-3.21	0.69
	大区	3.00	3.96	6.25	8.15	9.10	10.05	171.74	129.91	60.85

注:增大幅度=(地裂缝场地最大层间扭转角-普通场地最大层间扭转角)/普通场地最大层间扭转角 $\times 100\%$ 。

4 结论

本文通过数值模拟对比分析了西安站东配楼连体结构分别在地裂缝场地与无地裂缝场地上的动力特性,得出以下结论。

1) 地裂缝场地的地表加速度峰值较普通场地提升约 $30\% \sim 42\%$ 。上、下盘地表加速度差异较大,对跨越地裂缝结构造成非一致激励,使结构损伤严重,刚度退化增大。

2) 地震作用下,大、小三角区的动力特性一致,表现出较强的动力耦合。跨地裂缝场地上布置桁架连廊,能有效释放连体结构的相对位移与平扭耦合效应。

3) 在相同地震激励下,由于地裂缝的存在,连体结构位移响应提高了 $10\% \sim 20\%$,大、小三角区扭转响应提高了 35% 。由于大区各柱脚距地裂缝距离不等,各柱内力不同,损伤存在较大差异,导致大区扭转响应显著提高,增幅约为 $60\% \sim 190\%$ 。

4) 连体结构在弹性与弹塑性阶段的最大层间位移角分别为 $1/580$ 与 $1/51$,满足规范要求。但在地裂缝的影响下,结构一、二层构件的刚度退化较大,应采取相应措施增加其侧向刚度。

参考文献:

[1] 郭宏超,柴恒远,蔡玉军,等. 西安站改东配楼碰撞效应及影响因素研究[J]. 地震工程与工程振动, 2019, 39(2):183-193.
GUO Hongchao, CHAI Hengyuan, CAI Yujun, et al. Study on impact and influencing factors of Xi'an railway station[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2019, 39(2): 183-193.

[2] LIU Nina, FENG Xiaoyang, HUANG Qiangbing, et al. Dynamic characteristics of a ground fissure site[J]. Engineering Geology, 2018, 248: 220-229.

[3] 熊仲明,王靖东,张朝,等. 地震作用下地裂缝场地地表动力响应特性研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(1):60-68, 134.
XIONG Zhongming, WANG Jingdong, ZHANG Chao, et al. Dynamic response and characteristics of the ground fissure site under earthquake[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(1):60-68, 134.

[4] 张朝,熊仲明,原晓露,等. 地裂缝场地地震破坏特征及力学响应研究[J]. 土木工程学报, 2022, 55(7):90-97, 107.
ZHANG Chao, XIONG Zhongming, YUAN Xiaolu, et al. Seismic damage characteristics and mechanical response of the site with ground fissures[J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(7): 90-97, 107.

[5] 陈轩,熊仲明,陈帆. 地裂缝场地地铁车站动力响应振动台试验研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(2):384-391.
CHEN Xuan, XIONG Zhongming, CHEN Zhi. Shaking table tests on seismic response of a subway station structure in ground fissure site[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(2): 384-391.

[6] 白超宇,刘聪,徐强,等. 地裂缝活动作用下城市立交桥地震易损性分析[J]. 地震工程学报, 2022, 44(1):79-85.
BAI Chaoyu, LIU Cong, XU Qiang, et al. Seismic vulnerability of urban overpasses under active ground fissures[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2022, 44(1): 79-85.

[7] 陈轩,熊仲明,张朝,等. 跨地裂缝框架结构地震响应振动台试验研究[J]. 土木工程学报, 2021, 54(4):26-35.
CHEN Xuan, XIONG Zhongming, ZHANG Chao, et al. Shaking table test on seismic response of frame structures across the ground fissure[J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(4): 26-35.

[8] 熊仲明,陈轩,钟雅琼,等. 跨地裂缝结构地震作用下的损伤分析与评估研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(8):

- 40-49.
- XIONG Zhongming, CHEN Xuan, ZHONG Yaqiong, et al. Damage analysis and evaluation of frame structure spanning over ground fissure under seismic load[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(8): 40-49.
- [9] XIONG Zhongming, YANG Shuai, ZHANG Chao, et al. Shaking table test and numerical analysis of a new method for disaster control and reinforcement of frame structure crossing ground fissures[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 560(1): 012096.
- [10] 郭宏超,张博明,李晓蕾,等. 西安火车站东配楼复杂连体结构振动台试验研究[J]. 建筑结构学报,2022, 43(6):155-164.
- GUO Hongchao, ZHANG Boming, LI Xiaolei, et al. Shaking table test on complex connected structure of east annex building of Xi'an Railway Station[J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(6):155-164.
- [11] 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 theseismic amplification effect on site with ground fissure[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.
- [12] 曹海韵,潘鹏,叶列平. 基于推覆分析混凝土框架摇摆墙结构抗震性能研究[J]. 振动与冲击,2011,30(11): 240-244.
- CAO Haiyun, PAN Peng, YE Lieping. Pushover analysis of RC frame rocking wall structure[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(11): 240-244.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震试验规程: JGJ/T 101—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社,2015.
- [14] 郭宏超,雷天奇,蔡玉军,等. 西安火车站东配楼复杂连体结构振动台试验及数值模拟[J]. 振动与冲击, 2021,40 (17):76-84, 105.
- GUO Hongchao, LEI Tianqi, CAI Yujun, et al. Shaking table tests and numerical simulation for complex conjoined structure of east building of Xi'an Railway Station[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40 (17): 76-84, 105.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社,2016.

(责任编辑 周 蓓)

(上接第 104 页)

- [17] 买尔燕古丽·阿不都热合曼,艾里西尔·库尔班,阿迪力·阿不来提,等. 塔里木河下游胡杨物候特征观测[J]. 干旱区研究, 2008, 25(4):525-530.
- MARYAMGUL Abdurahman, ALISHIR Kurban, ADIL Ablat, et al. Study on phenological characters of populus euphratica oliv in the lower reaches of the Tarim River [J]. Arid Zone Research, 2008, 25 (4): 525-530.
- [18] 叶茂,徐海量,任铭. 塔里木河下游生态输水的合理时间初探[J]. 干旱区研究, 2012, 29(5): 907-912.
- YE Mao, XU Hailiang, REN Ming. Primary study on the rational time of ecological water conveyance to lower reaches of the Tarim River[J]. Arid Zone Research, 2012, 29(5): 907-912.
- [19] 白涛,阚艳彬,畅建霞,等. 水库群水沙调控的单-多目标调度模型及其应用[J]. 水科学进展, 2016, 27(1): 116-127.
- BAI Tao, KAN Yanbin, CHANG Jianxia, et al. Single-multi-objective operation models and its application on the regulation of water and sediment by cascade reservoirs[J]. Advances in Water Science, 2016, 27(1): 116-127.
- [20] BAI T, CHANG J X, HUANG F J, et al. Synergistic gains from the multi-objective optimal operation of cascade reservoirs in the upper Yellow River basin[J]. Journal of Hydrology, 2015, 523:758-767.
- [21] MOHAMMAD A A, MOHAMMAD E B, AMIN S C, et al. Evolving artificial neural network and imperialist competitive algorithm for prediction oil flow rate of the reservoir[J]. Applied Soft Computing, 2013, 13 (2):1085-1098.
- [22] SAATY T L. Decision making with the analytic hierarchy process[J]. International Journal of Services Sciences, 2008, 1(1): 83-98.
- [23] SINHA A, KORHONEN P, WALLENIUS J, et al. An interactive evolutionary multi-objective optimization algorithm with a limited number of decision maker calls [J]. European Journal of Operational Research, 2014, 233(3):674-688.
- [24] DEB K, KUMAR A. Interactive evolutionary multi-objective optimization and decision-making using reference direction method[J]. ACM, 2007: 781-788.
- [25] 邓铭江,黄强,畅建霞,等. 大尺度生态调度研究与实践[J]. 水利学报, 2020, 51(7):757-773.
- DENG Mingjiang, HUANG Qiang, CHANG Jianxia, et al. Large-scale ecological operation research and practice[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(7):757-773.

(责任编辑 周 蓓)