

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2020.03.021

跨越地裂缝复杂连体结构动力响应分析

郭宏超, 李 涛, 王德法, 李晓蕾, 刘云贺

(西安理工大学 土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 为研究地震作用下跨地裂缝复杂连体结构的动力响应, 本文基于地裂缝的三维位移活动特征, 将地裂缝蠕变变形量以初始位移形式施加在分析模型上, 同时施加罕遇地震, 分析地裂缝活动对上部结构在地震作用下的影响, 重点考察了结构关键构件内力变化, 结构的层间位移角, 层间剪力等指标。分析表明: 地裂缝沉降量的增加对上部结构的不利作用也随之增大, 考虑罕遇地震下 50 年地裂缝活动发展, 结构关键杆件的内力变化在 10%~20% 左右, 个别杆件增幅较大, 建议增大截面。结构的层间位移角最大为 1/118, 整体侧移值较小, 满足规范限值要求, 说明选取的支座连接形式能有效减弱地裂缝沉降对结构的影响。

关键词: 地裂缝; 复杂连体结构; 动力响应; 层间位移角; 支座连接

中图分类号: TU375.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4710(2020)03-0424-08

Dynamic response analysis of complex connected structures crossing ground fissures

GUO Hongchao, LI Tao, WANG Defa, LI Xiaolei, LIU Yunhe

(School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: To study the dynamic response of complex connected structure crossing the ground fissures under the earthquake, the creep deformation of ground fissures is applied to the analysis model in the form of initial displacement in this paper, which is based on the three dimensional displacement characteristics of ground fissures. At the same time, to analyze the influence of ground fissure activity on the structure under the earthquake in detail, the rare earthquake effect is considered in the modeling process. Besides, the internal force change of the key components of the structure, the story drift angle of the structure, and the story shear force are mainly investigated. The analysis shows that the adverse effect on the structure develops rapidly with an increase in the subsidence of ground fissures. In addition, the development of the ground fissures activity in 50 years under the rare earthquake is considered, the internal force of the key members of the structure is changed by about 10%~20%, and the increase of individual members is large. Analysis indicates that the increase of the section is advisable. Moreover, the maximum story drift angle of the structure is 1/118, and the overall lateral displacement value is small, which meets the requirements of the code limit. Results demonstrate that the selection of bearing connection form in this work can effectively reduce the impact of subsidence of ground fissures on the structure.

Key words: ground fissure; complex connected structure; dynamic response; story drift angle; bearing connection

收稿日期: 2019-11-26; 网络出版日期: 2020-05-15

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.n.20200514.1053.006.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51978571, 51722907); 陕西省教育厅重点实验室科学研究计划资助项目(18JS072); 陕西省科技厅自然科学基金基础研究计划资助项目(2018JM5006); 铁一院科学研究计划资助项目(院科 16-59-01)

第一作者: 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

通信作者: 王德法, 男, 博士, 教授, 研究方向为建筑材料断裂损伤。E-mail: 854244066@qq.com

地裂缝是一种由内外力及人类活动等因素共同作用所形成的地面开裂现象,属于一种迫害性极强的地质灾害,严重影响人类生命、财产安全和社会稳定与发展。对于地裂缝的成因目前主流的观点分为三种:构造成因说、地下水超采成因说及综合成因说^[1-2]。在西安地区地裂缝成因的研究中,相关学者的观点从早期的过量开采地下承压水形成地面不均匀沉降,转向目前普遍认可的以构造为主,地下水开采为辅的观点^[3]。西安目前已经发现了14条地裂缝,出露总长度超过120 km,地裂缝造成的灾害影响相当严重。

为应对地裂缝沉降对建(构)筑物的影响,我国科研人员做了大量的研究。黄强兵等^[4]在对穿越西安地裂缝的城市地下综合管廊研究中利用有限元软件进行模拟分析,总结了分段管廊结构顶、底板的应力变化规律,提出了地下综合管廊穿越地裂缝在设计 and 施工时应该注意的问题。彭建兵等^[5]对西安地铁隧道正交穿越地裂缝带做了大量研究,结合相关参数建议分段设缝以适应地裂缝变形。熊田芳等^[6]通过开展地裂缝试验,地铁隧道骑缝正交穿越地裂缝的问题进行研究,探讨了地裂缝活动下衬砌结构与围岩相互作用的机制。石玉玲等^[7]通过对地裂缝影响下多种桥梁形式的破坏试验,指出桥面板选用简支形式,桥墩采用独立桥墩等措施能有效应对地裂缝作用。熊仲明等^[8]对西安地区跨地裂缝建筑做了大量的试验和有限元模拟研究,根据对某一跨地裂缝简单框架结构的内力分析中,得出通过设置沉降缝将跨越地裂缝建筑划分为两个独立部分设计可有效减弱地裂缝对上部框架结构的影响。

国内相关研究主要侧重于地裂缝活动对规则建(构)筑物的影响,而针对跨越地裂缝且由不规则的多塔楼连接的复杂连体结构研究甚少。对此,本文利用有限元软件以西安地区某跨越地裂缝的复杂连体结构为研究对象,对该复杂连体结构进行不同工况作用下的罕遇地震非线性时程分析。通过比较不同工况下结构的关键杆件内力、层间位移角、层间剪力等参数,给出结构的破坏机理、薄弱区域,为实际工程设计提供相关建议。

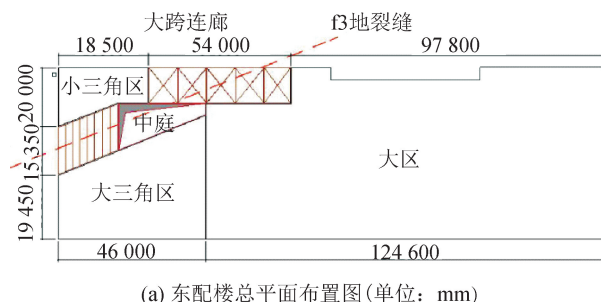
1 分析模型

1.1 工程概况

西安火车站改造工程东配楼项目总建筑高度35.5 m,地上8层(局部6层)、地下2层(局部1层),底部两层层高为5 m,楼上各层层高均为4 m,建筑面积约9.3万m²,采用钢筋混凝土框架-剪力

墙结构体系。

由于西安 f3 地裂缝斜向穿过该项目规划所在地(见图1),整体结构为对地裂缝进行合理避让被分割成三个形状不规则的单体,为确保建筑功能的连续性,通过大跨桁架和连廊将各单体连接在一起,从而形成了不规则的复杂连体结构形式。地裂缝的穿过不可避免地迫使结构基础、柱网、剪力墙等主要承重构件布置出现间断或不规则,致使结构形式更加复杂,随着西安 f3 地裂缝的后期活动和发展,将可能出现垂直位错运动、水平拉张运动和水平扭动运动相结合的三维空间运动特征,对跨越其上的东配楼极为不利,可能会直接影响到复杂连体结构和大跨悬挂结构的整体协同工作性能及各单元、部件之间连接的可靠性。在此工程背景下,研究地裂缝活动对其上部结构的影响就显得尤为重要。



(a) 东配楼总平面布置图(单位: mm)



(b) 东配楼建筑效果图

图1 东配楼总体布置图

Fig. 1 General layout of the East Distribution Building

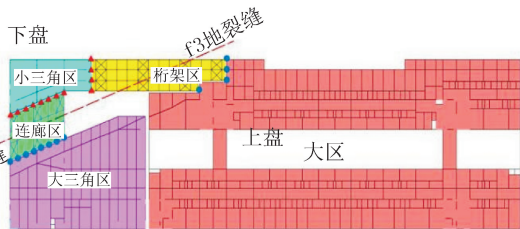
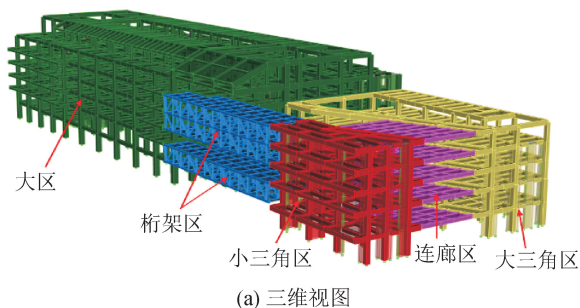
1.2 有限元模型

模型建立过程中,梁、柱和斜撑采用框架单元模拟,楼板采用膜单元模拟,剪力墙选用壳单元-非线性分层壳模拟,模型各个单体及连接体的主要梁、柱、板、剪力墙等截面信息见表1。参考GB50011-2010《建筑抗震设计规范》可以得出该模型的地震设防烈度为8级(0.2g),设计地震分组为第二组,场地类别为Ⅱ类,大区框架抗震等级为一级,三角区混凝土框架抗震等级为二级。地震影响系数最大值为0.16,结构阻尼比0.05,场地特征周期 $T_g=0.45$,周期折减系数为0.85。采用SAP2000有限元软件建立了有限元模型,有限元模型见图2。

表1 模型的主要截面信息

Tab.1 Main section information of the model

区域	梁截面/mm	柱截面/mm	剪力墙厚度/mm	板厚度/mm
小三角区	400×950	900×900	450	120
角区	C40	C50	C50	C50
大三角区	400×1000	1000×1000	300	110
角区	C35	C50	C50	C50
大区	450×1000	1200×1200	350	110
	C40	C50	C50	C50



(a) 三维视图

(b) 支座布置形式

图2 有限元计算模型

Fig.2 Finite calculation model

连接大区和小三角区的连接体采用大跨叠层桁架,跨度为45 m,支座位置分别在结构的第二层和第五层;连接大区和大三角区的为连廊,每层均有布置。大跨桁架和连廊在与主体结构连接时拟采取一端铰接一端滑动的柔性支座处理形式。滑动支座需要根据可能发生的相对位移方向约束自由度,故连廊处需释放Y方向自由度,桁架处需释放X方向自由度。结合拟建场地的实际地质情况,因建筑物跨越了西安f3地裂缝,地裂缝两边分为上盘和下盘,地裂缝上盘属于地裂缝活跃区,下盘基本趋于稳定。为减小地裂缝的蠕动变形对结构的影响,将铰接端放置于复杂连体结构的下盘从而释放结构变形,减小内力,故铰接端支座放置于处于下盘的小三角区对结构更为有利,支座的布置形式见图2。由于本文重点在于对上部结构内力变化的分析,故对结构下部与土体的接触简化为固定端支座进行分析。

2 地震动输入及分析工况

2.1 地震动输入

根据工程场地条件,选取522-225和El Centro^[9]这2条天然波和一条人工波,采用三向地震波的输入方式,按照抗震规范将波沿结构以水平主向:水平次向:竖向=1.00:0.85:0.65的比例输入,将每条地震波峰值调至0.4g,并用SeismoSignal软件对地震波进行基线校准。图3为各地震波调幅后反应谱与规范反应谱的对比,由图3可知结构主要振型的周期相差均低于20%,说明所选地震波的反应谱曲线基本符合规范要求。通过计算,前30 s的El Centro波对该结构的地震响应较为剧烈,因此后文的计算均基于El Centro波作用对结构的影响,调幅后的地震波见图4。

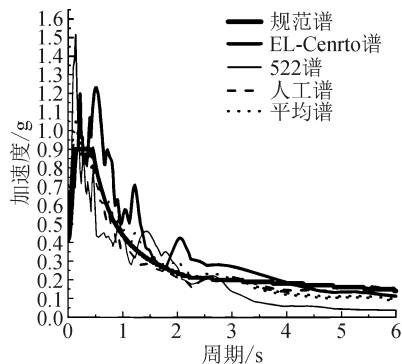


图3 各地震波反应谱与规范反应谱的对比

Fig.3 Comparison of seismic wave and normative response spectrum

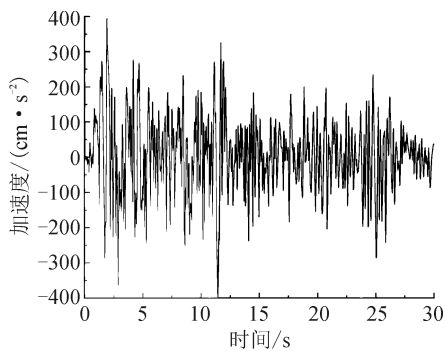


图4 调幅后El-Centro波(主向)

Fig.4 El-Center wave after AM (main direction)

2.2 地裂缝作用模拟及工况分类

文献[10]在勘察研究中发现东配楼附近f3地裂缝地表鲜有破坏呈隐伏状。根据钻探结果查阅相关规范得出该拟建场地为地裂缝二类场地,平均活动速率较低,特别是近年来f3地裂缝的活动呈减弱趋势且逐步稳定,活动速率自2005年后均小于5 mm/a。黄强兵等^[5]根据西安地铁2号线隧道穿越

地裂缝带的相关勘测结果,对 f3 地裂缝的最大沉降量进行预测,以 2002—2007 年的活动速率 2 mm/a 为基础,结合 f3 地裂缝的历史最大活动位移量,考虑 1.5 的安全系数,最终建议西安 f3 地裂缝按 50 年设计时垂直沉降量按 150 mm 来考虑。文献[11]对西安地裂缝南倾南降的垂直沉降、水平引张、水平扭动的三维空间运动特征进行研究,得出地裂缝以垂直位移量最大,三向运动的比值大致为 1 : 0.31 : 0.03。由于扭转量较垂直沉降量小一个数量级,故在对结构的影响分析中可以忽略。X 向和 Y 向的水平张拉分量则根据 f3 地裂缝穿越建筑物的倾斜度来确定,50 年地裂缝的活动量见表 2。

表 2 50 年地裂缝的活动量

Tab. 2 Ground fissure activity in the next 50 years

坐标	不同时间地裂缝活动量/mm				
	10 年	20 年	30 年	40 年	50 年
X	3.6	7.2	10.8	14.4	18
Y	-9.4	-18.8	-28.2	-37.6	-47
Z	-30	-60	-90	-120	-150

本文考虑地裂缝的施加方法为假设下盘不动,上盘相对下盘发生不均匀沉降,即给大区和大三角区施加初始位移并按照竖向沉降量和水平张拉量分配到模型的各个底部节点,同时在此基础上对不同地裂缝沉降模型施加罕遇地震作用,来研究地震作用下地裂缝不同沉降量对上部结构动力性能的影响,选取的非线性时程工况见表 3。

表 3 跨越地裂缝结构的非线性时程工况

Tab. 3 Nonlinear time-history conditions of crossing ground fissure structures

工况	地震波	荷载类型	非线性工况
工况 1	El-Centro 波	三向地震	10 年地裂缝
工况 2	El-Centro 波	三向地震	20 年地裂缝
工况 3	El-Centro 波	三向地震	30 年地裂缝
工况 4	El-Centro 波	三向地震	40 年地裂缝
工况 5	El-Centro 波	三向地震	50 年地裂缝

3 有限元分析结果

3.1 关键杆件内力

各区单体结构通过连廊和大跨桁架连接在一起,连接区域结构刚度突变,强震作用下最容易发生破坏。本项目中在大区和小三角区 10 m(22 m)处

支撑大桁架的牛腿柱和悬挑梁作为塔楼与连接体的传力构件,在地震作用下,其受力最复杂,对整体结构的稳定性和安全性尤为重要,所以选取连接处的 8 根柱子和支撑大桁架的悬挑梁为研究对象,分析其不同工况下的地震响应。关键部位牛腿柱和梁的位置编号见图 5,括号内外分别表示顶层(标高 22 m)和 2 层(标高 10 m)的关键杆件。

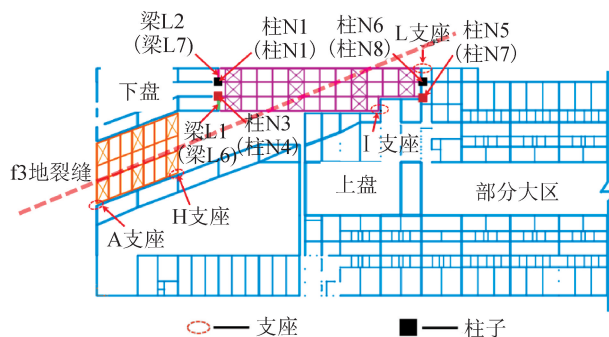


图 5 结构关键杆件及支座编号

Fig. 5 Number of key structural members

1) 柱内力时程曲线

分析表明 N1, N3, N5 和 N6 这 4 根柱子受力较大,仅选取这四根柱子进行分析。由图 6 可知,小三角区 N1, N3 两根柱子内力变化较明显,50 年地裂缝作用下增幅分别为 20.1%、16.5%,轴力增长幅度较大。大区 N5, N6 柱子随着地裂缝作用的增强其内力几乎未发生变化,50 年地裂缝作用下增幅低于 5%,增长幅度较小。大区整体较规则,并且刚度较大,受地裂缝活动影响较小,而小三角区极其不规则,且刚度较小,受到地裂缝活动影响较敏感,应重点加强小三角区关键部位柱子的设计。

2) 混凝土梁内力时程曲线

在地震作用下,小三角区支撑连接体铰接端的受力较为复杂,因此仅选取支撑大桁架铰接端的悬挑梁作为研究对象,杆件的具体位置见图 5。

图 7 为 EL-Centro 波作用下关键部位的梁在不同地裂缝下的弯矩时程曲线。从图 7 中可知,随着地裂缝作用的增强,结构关键部位的混凝土梁内力逐渐增大。同时可以发现同一层铰接处的两根关键梁,靠近内侧的梁 L1 和 L6 受力较小,而靠近外侧的梁 L2 和 L7 受力较大,分析原因为小三角区整体结构极其不规则,地震作用下,结构的扭转效应特别大,导致外侧框架梁出现应力集中,受力陡增,因此在设计时要重点加强小三角区放置铰接端支座的外侧梁,采取增大截面的方式对其进行加固。

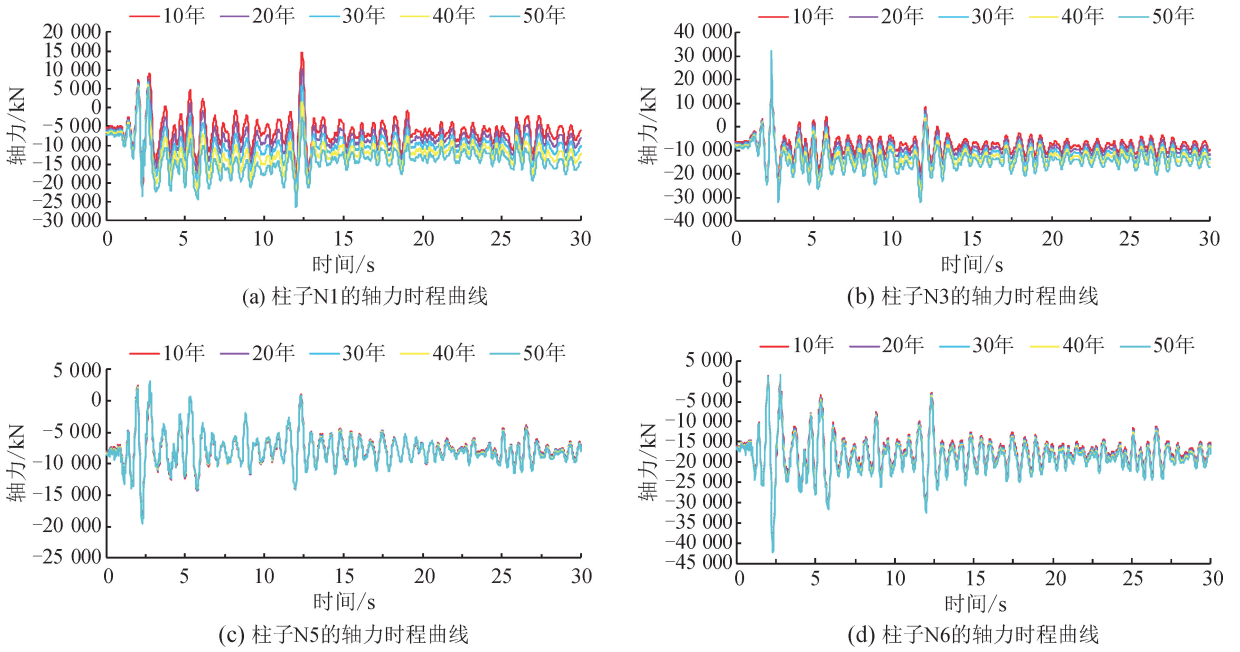


图6 EL-Centro波作用时柱子轴力时程曲线

Fig. 6 Axial force time history curve of column under EL-Centro wave action

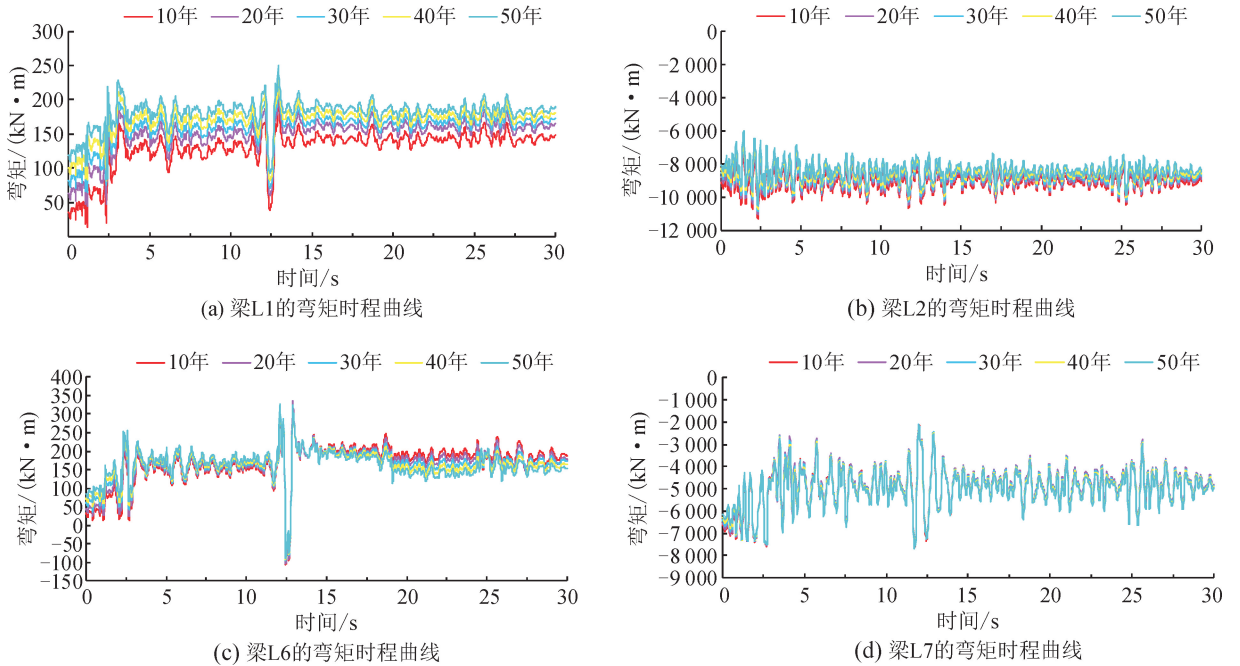


图7 EL-Centro波作用时梁的弯矩时程曲线

Fig. 7 El-Centro wave bending moment-time curves of beams

3.2 连廊及桁架变形最大处的支座滑移曲线

由于结构顶层的变形最大,因此选取连廊左右边跨位置的两个支座 A、H 和叠层桁架顶层端部的两个滑动支座 I、L 作为研究对象,支座具体位置见图 5。提取 4 个支座的相对位移时程曲线,确定支座的最大滑移量,为后面的支座设计提供依据。EL-Centro 波作用时桁架和连廊处的支座在不同地

裂缝下的位移时程曲线见图 8。由图 8 中的变化趋势可知,地裂缝的活动虽对支座的相对滑移有影响,但影响并不大,不同活动量的地裂缝作用下支座位移时程曲线基本重合。但不论是桁架还是连廊处,支座的滑移曲线均随地裂缝作用的增强而增大,最终在 50 年达到最大值。桁架滑动端的支座最大滑移量为 146 mm,出现在 5-L 处,位于桁架顶层靠近

最外侧的支座处。连廊处滑动端的支座最大滑移量为 152 mm,出现在 5-A 处,位于连廊顶层最左边。桁架同一标高处的几个滑动支座的位移时程曲线位移值从上到下依次递减,靠近最内侧的 I 支座滑移值最小,

连廊同一标高处的几个滑移支座的位移时程曲线从左到右逐渐减小,靠近最右边的支座滑移值最小,可见靠近外侧的支座滑移量最大,对靠近外侧的滑动支座要采取一定的限位措施,防止连接体坠落。

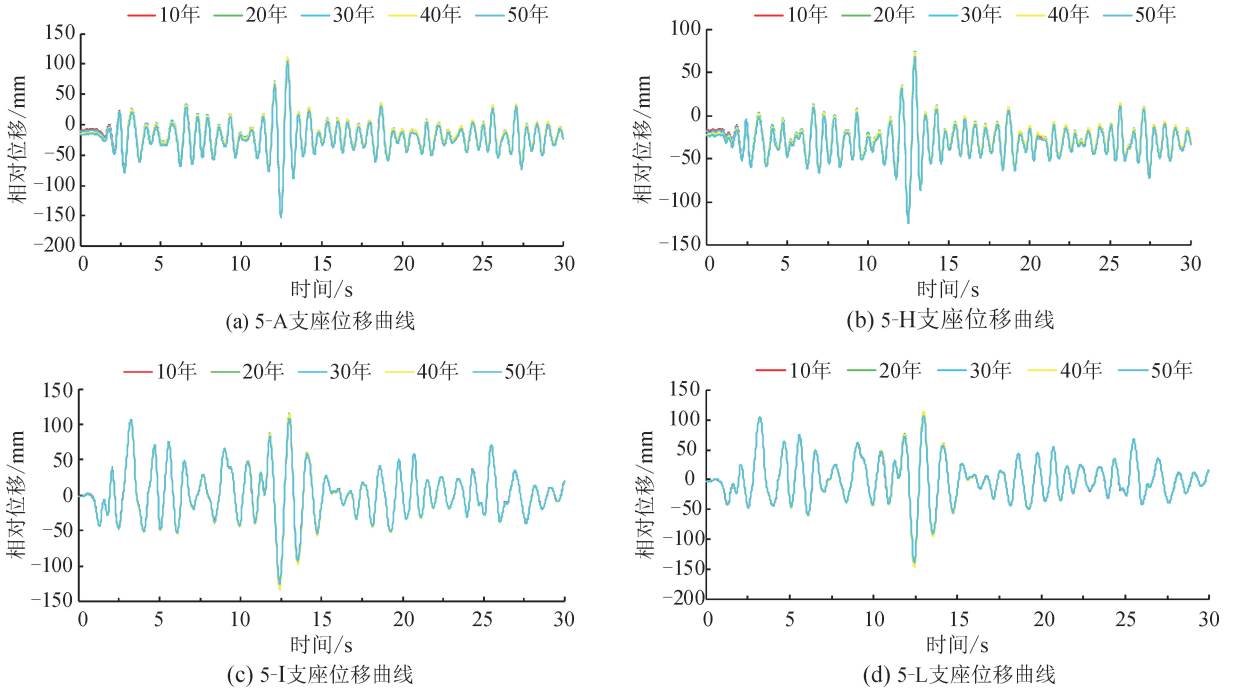


图 8 EL-Centro 波作用下桁架处支座位移时程曲线

Fig. 8 Displacement-time-history curves of supports at trusses under EL-Centro waves

3.3 层间位移角

由图 9 可知,在 EL-Centro 波作用时,三个建筑单体的大部分楼层均超出了弹性层间位移角 1/800 限值的要求,结构最大层间位移角为 1/118,整体侧

移值较小,满足 1/100 框剪结构塑性层间位移角的要求,表明在罕遇地震作用下结构部分楼层已进入塑性屈服状态,满足“防治倒塌”的性能目标。

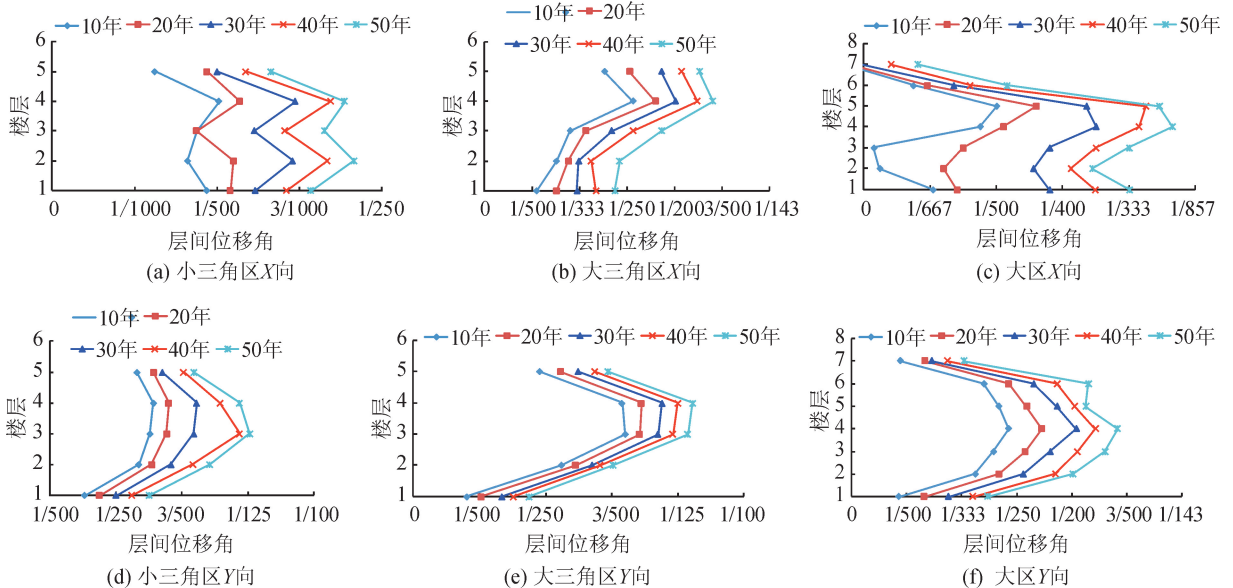


图 9 EL-Centro 波作用时结构层间位移角

Fig. 9 Interlayer displacement angle of structure under EL-Centro wave action

3.4 层间剪力

层间剪力是结构抗震分析的一个重要衡量指标。图10为EL-Centro波作用时复杂连体结构在不同地裂缝活动量下的层间剪力。

由图10可知,越靠近底部结构受地裂缝的影响越大,地裂缝活动引起了上部结构的内力重分布,造成底部更易受地裂缝活动的影响。各区层间剪力随

着楼层的增大而减小,小三角区的层间剪力变化最大,EL-Centro波作用下底层X向的层间剪力最大增幅为27.54%,大三角区在地裂缝作用下增大了10.42%,其他楼层增幅均小于5%。小三角区和大三角区结构布置极其不规则,刚度较小,且分布不均,地裂缝沉降对其影响更为敏感。

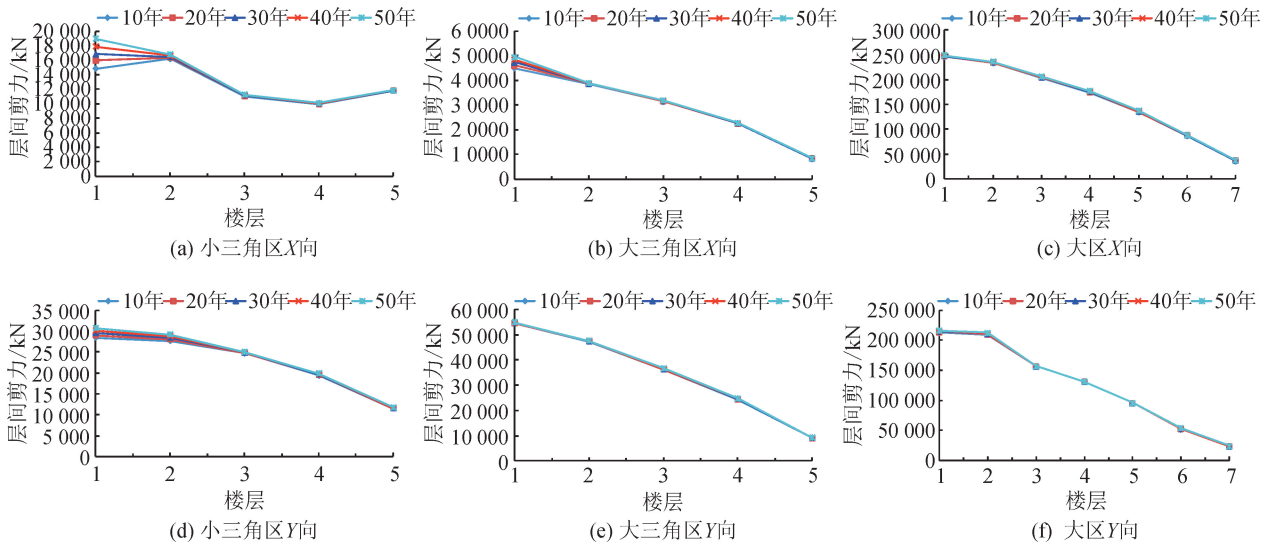


图10 EL-Centro波作用时结构的层间剪力

Fig. 10 Interlayershear force of structure under EL-Centro wave action

4 结论及建议

本文以西安火车站改扩建项目东配楼为背景,对该跨越地裂缝的复杂连体结构进行了非线性时程分析,根据罕遇地震下不同地裂缝沉降量的结果,得到如下结论和建议。

1) 地裂缝随沉降量的增大,对上部框架结构的不利作用也越大,考虑50年地裂缝活动发展,结构关键杆件的内力变化在10%~20%左右。

2) 地裂缝对小三角区影响较大,建议对小三角区支撑连接体铰接支座处的梁柱杆件及大小三角区的角柱采取加固措施,避免该连体结构薄弱区域局部失效。

3) 在8度罕遇地震作用下,结构的层间位移角、层间剪力均随着地裂缝作用的增强而增大,结构最大层间位移角为1/118,整体侧移值较小,满足规范的限值要求,超过弹性状态的层间位移角限值,说明框架结构部分区域已进入塑性,在罕遇地震作用下满足“防治倒塌”的性能目标。

4) 在罕遇地震动激励下50年地裂缝作用下的结构最大滑移量为152 mm,建议设置可调节滑动支座,通过调节支座水平向和竖向的位移以适应地

裂缝的蠕动变形,减弱地裂缝活动对结构的不利影响,保障结构的安全。

参考文献:

- [1] LEONARD R J. An earth fissure in Southern Arizona [J]. The Journal of Geology, 1929, 37(8): 765-774.
- [2] SHENG Zhuping, HELM D C, LI Jiang. Mechanisms of earth fissuring caused by groundwater withdrawal [J]. Environmental and Engineering Geoscience, 2003, 9(4): 351-362.
- [3] 门玉明,石玉玲. 西安地裂缝研究中的若干重要科学问题[J]. 地球科学与环境学报,2008,30(2):172-176. MEN Yuming, SHI Yuling. Some important scientific questions in the research on Xi'an ground fissures[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2008, 30(2): 172-176.
- [4] 闫钰丰,黄强兵,杨学军,等. 地下综合管廊穿越地裂缝变形与受力特征研究[J]. 工程地质学报,2018,26(5): 1203-1210. YAN Yufeng, HUANG Qiangbing, YANG Xuejun, et al. Research on deformation and force characteristics underground comprehensive pipe corridor crossing ground fissures[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(5): 1203-1210.
- [5] 黄强兵,彭建兵,邓亚虹,等. 西安地铁2号线隧道穿越

- 地裂缝带的设防参数[J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2882-2888.
- HUANG Qiangbing, PENG Jianbing, DENG Yahong, et al. Design parameters of Xi'an metro line 2 tunnel passing through active ground fissure zones[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(9): 2882-2888.
- [6] 熊田芳, 邵生俊, 王天明, 等. 西安地铁正交地裂缝隧道的模型试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 179-186.
- XIONG Tianfang, SHAO Shengjun, WANG Tianming, et al. Research on physical model experiment of Xi'an metro tunnel orthogonally crossing ground fissure [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 179-186.
- [7] 石玉玲, 门玉明, 彭建兵, 等. 地裂缝对不同结构形式桥梁桥面的破坏试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(10): 2917-2922.
- SHI Yuling, MEN Yuming, PENG Jianbing, et al. Damage test study of different types structures of bridge decks by ground-fissure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(10): 2917-2922.
- [8] 熊仲明, 王军良. 西安地区某跨地裂缝建筑物的计算和分析[J]. 建筑结构, 2011, 41(10): 79-83.
- XIONG Zhongming, WANG Junliang. Calculation and analysis on a building striding over ground fissure in Xi'an[J]. Building Structure, 2011, 41(10): 79-83.
- [9] 陶磊, 张俊发. 远场大震对深厚覆盖土层地基上超高层建筑物的影响分析[J]. 西安理工大学学报, 2014, 30(1): 79-84.
- TAO Lei, ZHANG Junfa. Influence and analysis of super-rise building on soil layer with deep deposit subjected to strong far field ground motion[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2014, 30(1): 79-84.
- [10] 王旭. 西安火车站北站房及高架候车室地裂缝的勘察、评价及对策[J]. 铁道标准设计, 2015, 59(4): 102-105, 124.
- WANG Xu. Investigation, evaluation and countermeasures of ground fissures in north station building and overhead waiting room of Xi'an Railway Station [J]. Railway Standard Design, 2015, 59(4): 102-105, 124.
- [11] 李忠生, 高虎艳, 宋彦辉, 等. 西安地铁四号线沿线长安地裂缝研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(8): 98-104.
- LI Zhongsheng, GAO Huyan, SONG Yanhui, et al. Investigation and research on Chang'an ground fissure along the fourth metro line of Xi'an city [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(8): 98-104.

(责任编辑 王绪迪)