

在高烈度地震作用下跨越地裂缝 框架结构的动力响应模拟研究

熊仲明¹, 陈 轩¹, 高鹏翔², 韦 俊^{1,3}, 黄汉英¹

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 大同大学煤炭工程学院, 山西 大同 0370008;
3. 苏州科技大学机电工程系, 江苏 苏州 215009)

摘要: 地裂缝对工程结构的安全性影响巨大. 在高烈度地裂缝地区, 若采用空间避让原则, 势必浪费有限的土地资源, 制约城市建设与发展. 借助 ABAQUS 有限元软件建立了地裂缝场地和上部结构共同作用模型, 并在土体底部输入不同的地震波, 实现了跨地裂缝结构多点加载的模拟. 通过比较不同工况下的弹塑性层间位移、层间剪力变化情况, 较为清晰地揭示出跨越地裂缝的建筑物在地震作用下的工作特性, 探讨了在不同的工况下跨地裂缝结构动力反应的变化规律, 找出了结构跨越地裂缝最不利位置, 为更深入研究地裂缝和地震共同作用对上部结构的损伤机理和灾害防治措施提供参考.

关键词: 跨越地裂缝结构; 动力响应; 共同作用

中图分类号: TU312

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2016)06-0783-07

Study on simulation of dynamic response of the structure crossing ground fissure in high-intensity of earthquake

XIONG Zhongming¹, CHEN Xuan¹, GAO Pengxiang², WEI Jun^{1,3}, HUANG Hanying¹

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China; 2. School of Coal Engineering, Datong University, Datong 0370008, China; 3. Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009)

Abstract: Ground fissures have a huge impact on the safety of engineering structures. If principle of space avoidance is carried out in Ground fissures site with high intensity, it will waste limited land resources and make urban planning and construction restricted. The modes of ground fissures site soil and the superstructure have been established by the finite element software ABAQUS in this paper. The simulation of multi-point loading of the structure crossing the ground fissure is realized by inputting different seismic waves at the bottom of the soil. Different locations about superstructure crossing the ground fissure have been set up which is based on different conditions. Elastic-plastic time-history analysis on the superstructure which is in the earthquake could be made while different seismic waves would be input from bottom of the soil. The elastic and elastic-plastic inter story drifts, the acceleration of the top, floor shear, and internal forces from the superstructure in different cases would be figured out. The performance of superstructure crossing the ground fissure under the uneven settlement and the earthquake would be shown clearly. The variation of dynamic response of the structure crossing the ground fissure under different working conditions is discussed. Then, the most unfavorable position about superstructure crossing the ground fissure would be found. Finally, in-depth study on damage mechanism from superstructure crossing the ground fissure under the earthquake and the ground fissure would be researched, and a reference to measures on disaster prevention would be provided.

Key words: superstructure crossing the ground fissure; dynamic response; collective effect

地裂缝是一种常见的地质现象. 它对工程结构的安全性影响巨大. 20 世纪以来, 世界上许多国家的学者不同程度地对地裂缝进行了研究^[1-9]. 美国学者 Achens RC 等^[3]通过对亚利桑纳州中南部构造盆地地面沉降、断层形变和裂缝表面位移的长期观测, 提出了构造与地下水开采复合成因观点. 王景明^[7]通过大量科学实践和深入理论研究总结, 阐述了我国地裂缝的分布特征, 并提出相应对策. 后来, 一些学者对非发震断层场地的地震效应进行了有限元分析的研究^[10-14]. 刘向峰等^[10]对非发震断层场地的地震响应进行了二维动力有限元分析, 得到了

断层对场地的地震动有显著影响, 距断层越近的场地其地震动放大效果越明显; 垂直断层场地的地震动放大效应呈对称分布, 而倾斜断层场地的下盘地震动响应小于其上盘场地的地震动影响等结论. 陈立伟^[11]采用二维动力有限元法对地裂缝的地震效应进行了计算分析, 提出较缓的地裂缝倾角及较宽的地裂缝带宽度均会给上部结构抗震带来不利影响, 并指出西安地区常遇烈度地震作用下即能引起隐伏地裂缝的破裂扩展现象. 对跨地裂缝结构的研究大多针对地裂缝场地不均匀沉降的分析, 郭西锐等^[12]以四层内廊式横向框架结构模型为研究对象,

通过有限元软件 SAP2000, 对地裂缝上的建筑结构进行内力变化和结构变形的分析和对比, 为建筑设计提供一定的理论参考. 石玉玲^[13]从地裂缝对建筑物结构破坏的力学模式入手, 分析了地裂缝在建筑结构上产生的内力变化, 提出了建筑物产生裂缝破坏的原因. 但这些研究对于跨地裂缝结构动力反应分析的定量研究还较少, 特别是如何对跨地裂缝结构的多点加载进行数值模拟, 还缺乏资料.

对此, 在前人对地裂缝研究现状总结的基础上, 根据不同工况设置结构跨越地裂缝的不同位置, 运用 ABAQUS 有限元软件建立了考虑土体作用的跨地裂缝结构模型, 提供了地震作用下跨地裂缝结构的多点加载的激励工况. 通过比较不同工况下的弹塑性层间位移、楼层剪力变化状况, 探讨了在不同工况下跨地裂缝结构动力反应的变化规律,

以便为在实际工程设计中提供参考.

1 跨越地裂缝工程结构概况

1.1 结构概况

为研究地震作用下跨地裂缝框架结构多点加载的动力反应规律, 以中煤西安设计工程公司原办公楼东侧新建的南楼为例进行模拟建模. 该楼是一个跨越西安地裂缝 f_4 (简称西北大学-西北工业大学地裂缝) 的框架结构. 考虑到该模型后续将进行振动台试验, 选用平面规则, 刚度、质量分布皆均匀的 2×3 跨的三层框架结构. 该结构总高为 10.8 m, 每层层高均为 3.6 m, 柱网尺寸为 $6 \text{ m} \times 6 \text{ m}$, 建筑场地类别为 II 类, 设计地震分组为第一组, 框架结构抗震等级为二级. 梁柱筋均采用 HRB400 级热轧钢筋, 板厚度为 120 mm, 结构基本信息如图 1 所示.

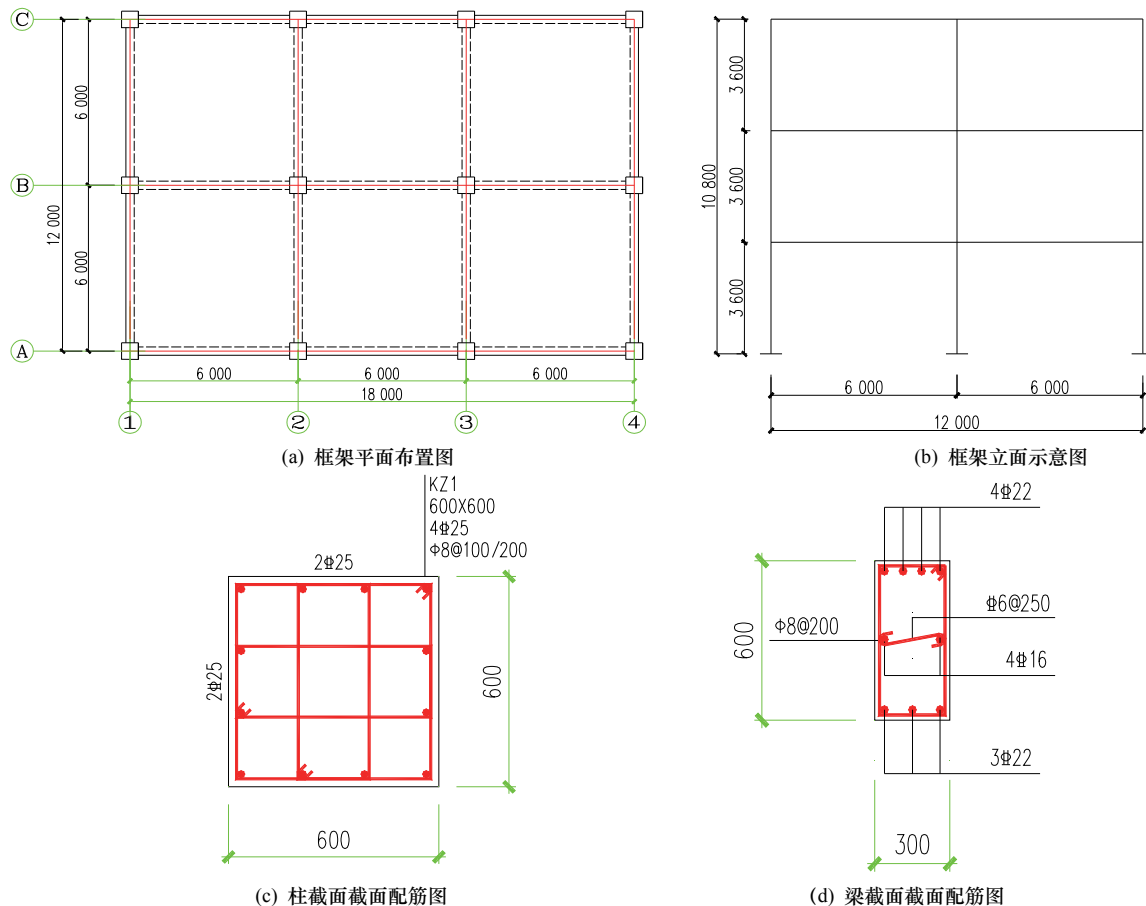


图1 跨越地裂缝结构信息图

Fig.1 Information of the structure crossing ground fissure

1.2 场地土的基本概况

采用的地裂缝场地土各土层的各项指标参照《唐延路地下人防工程岩土工程地勘报告》, 该报告是对西安地裂缝 f_4 进行了详细勘察后得出的, 该地层剖面各土层的物理力学性质指标如表1所示.

由于工程场地的土层分布较为复杂, 在原地勘

报告的基础上对土层的分布进行了简化和小幅度的修改, 使土层的分布既具有代表性且较为直观. 土体被分为五层, 各土层的物理力学性质指标如表 1. 地裂缝场地的上、下盘不同土层间有明显的错层, 而无地裂缝场地的土层则无错层. 场地土分布如图 2 所示.

表 1 地裂缝场地各土层物理力学性质指标
Tab.1 Physical and mechanical properties of the soil in ground fissure area

层号	岩土名称	含水率 $w/\%$	比重 G_s	重度 $R/\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	孔隙比 e_0	饱和度 $S_r/\%$	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	塑性指数 IP	内聚力 C/kPa	内摩擦角 $\Phi/^\circ$	压缩模量 E_{S1-2}/MPa	动弹性模量 E/MPa
①	素填土	18.8	2.71	16.0	0.982	53	33.1	19.6	13.6	35	28.0	4.72	167.82
②	黄土状土	21.8	2.71	17.2	0.871	67	32.1	19.1	13.0	39	27.1	6.14	271.07
③	黄土	23.5	2.71	16.8	0.961	67	31.5	18.8	12.7	48	27.6	8.01	304.83
④	古土壤	22.9	2.71	17.8	0.841	75	31.8	18.9	12.8	49	27.3	6.72	371.60
⑤	粉质粘土	25.2	2.71	19.0	0.755	91	31.7	18.9	12.8	45	26.6	7.07	441.03

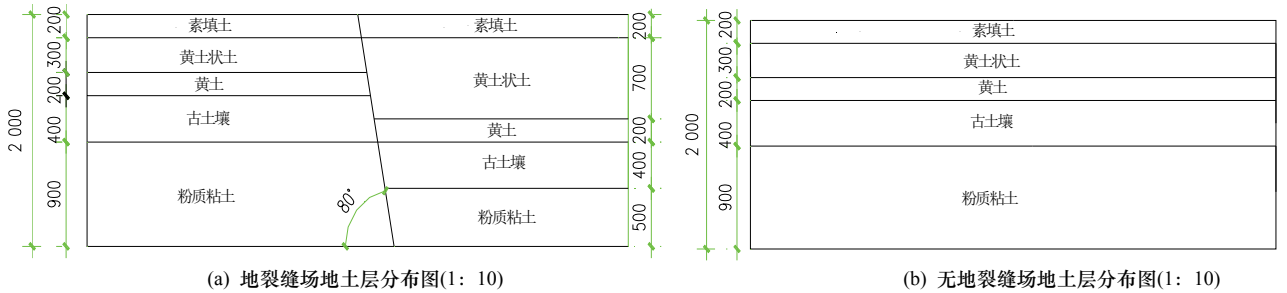


图2 场地土层分布图
Fig.2 Distribution of soil layer

2 有限元模型的建立

2.1 单元选择

在 ABAQUS 中, 为了节约计算时间, 获得较精确的计算结果, 本文上部结构的梁柱选用梁单元 B31 来模拟, 柱中的钢筋作用是通过 rebar 来实现的, 未考虑钢筋和混凝土分离的组合式模型, 并通过钢筋层命令直接定义. 上部结构的楼板采用壳单元来模拟, 配筋采用双层双向 $\Phi 8@200$ 钢筋. 土体在地震作用下会出现变形和力学性能的变化, 选用三维实体单元 C3D8 来模拟土体, 单元中的各个节点有三个方向的自由度, 而且都属于平动类型, 这使得它可以用来模拟材料在三个方向上的弹性和塑性变形.

2.2 本构定义

ABAQUS中混凝土在进行动力分析时常用的本构模型是混凝土累积损伤模型, 但由于混凝土塑性损伤模型不适用于梁单元, 因此, 本文中梁柱的混凝土本构采用清华大学开发的PQFiber子程序的UConcrete02, UConcrete02为考虑抗拉强度及损伤退化的混凝土模型. 如图3所示, 其受压骨架线上升段采用Hognested曲线, 下降段为直线; 受压卸载刚度随历史最大压应变的增大而减小, 混凝土达到极限应变后保持不变. 图4是钢筋应力应变关系图, 其中纵筋(HRB400)弹性模量 $E_s=2.0\times 10^5$ MPa, 屈服强度取400 MPa.

岩土材料具有非均匀性、各向异性、剪胀性、

拉压异性等特性, 目前的数学模型均不能精确地表达岩土材料的这些特性. 本文假设土体为理想弹塑性材料, 采用理想弹塑性模型摩尔库伦准则. 摩尔库伦模型参数设置如表 2 所示.

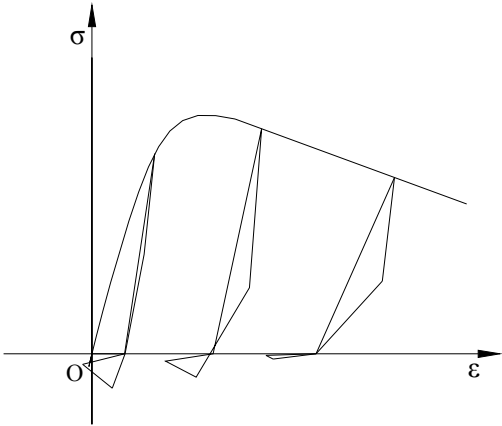


图3 混凝土的本构关系
Fig.3 The constitutive relation of concrete

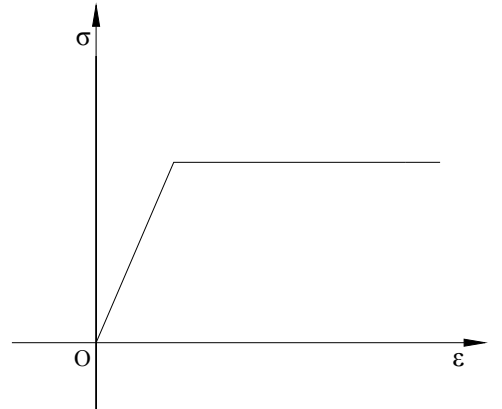


图4 钢筋的应力应变关系
Fig.4 The relationship of stress and strain of rebar

表2 摩尔库伦模型参数表
Tab.2 Mohr-Coulomb model parameter table

层号	岩土名称	粘聚力/Pa	内摩擦角/°	膨胀角/°
1	素填土	35 000	28	9.333 333
2	黄土状土	39 000	27.1	9.033 333
3	黄土	48 000	27.6	9.2
4	古土壤	49 000	27.3	9.1
5	粉质粘土	45 000	26.6	8.866 667

2.3 边界条件设置与地震波输入

地裂缝场地进行动力分析时,上下盘土体的横向边界通过粘弹性人工边界来设置,具体做法是在相应节点上的法线方向输入弹簧刚度和阻尼系数,两个切线方向则为位移全约束;纵向边界和土体底部纵向位移自由,而另外两个方向的位移全约束;上下盘的顶面位移自由.无地裂缝场地的边界条件设置与地裂缝场地相似.场地土建立粘弹性人工边界后的场地土有限元模型如图5所示.

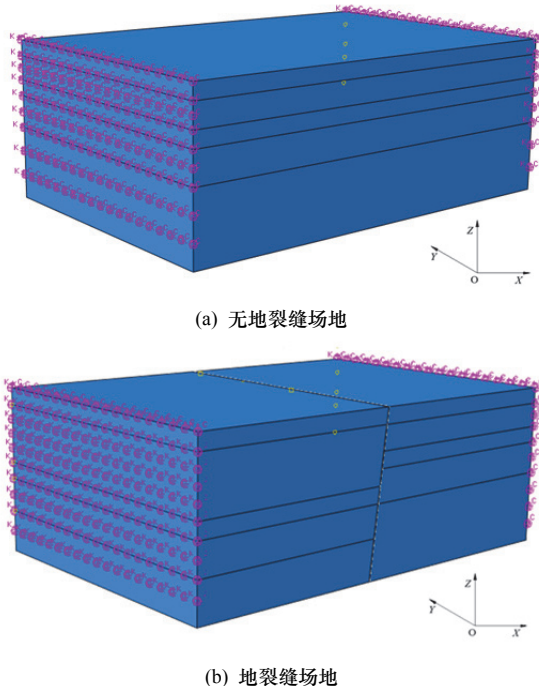


图5 场地土有限元模型

Fig.5 Finite element model of site soil

由于地震波经过场地土的反射和折射,使得场地土地表的加速度响应沿地震波输入方向上差异明显,上下盘差异尤其突出.因此,本文将地震波通过土体底部沿纵向输入,即可实现上部结构的多点加载.

3 场地土的加速度响应分析

场地土的动力反应分析考虑两种场地,即地裂缝场地和无地裂缝场地.调整加速度峰值至0.1 g、0.2 g和0.4 g,分别对应抗震设防烈度为Ⅶ、Ⅷ、

Ⅸ度的地震.选取 El-Centro 波和 Lanzhou 波,输入20 s地震波时程.

图6是地裂缝场地地表编号示意图(S 代表着上盘, X 代表着下盘).地裂缝场地地表编号的设置方法是根据监测点距地裂缝距离来确定的.地裂缝处位置为1,每隔3 m设置一个编号,编号数随距地裂缝距离增大而增大;对无地裂缝场地地表加速度检测取 $X1(S1)$ 对应位置的测点值.

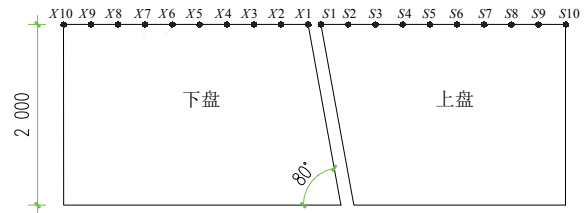


图6 地裂缝场地土监测点设置示意图

Fig.6 Diagram of fracture site monitoring setting

通过对地裂缝场地和无地裂缝场地设置监测点,得到场地土地表距地裂缝不同位置处的节点加速度曲线,找出了地表峰值加速度的变化规律.

3.1 基本假设

基本假定如下:

(1) 土体为各向同性的弹塑性材料,场地土横向边界选用粘弹性人工边界.

(2) 模拟地裂缝场地时,上盘土体与下盘土体之间的接触通过设置间隙接触属性来模拟,法向设置为硬接触,切向作用采用罚摩擦公式,摩擦系数取为0.3.

(3) 框架结构与土体连接方式简化为耦合约束,框架梁柱的连接方式简化为刚接,梁板用公共节点绑定的方式来连接.

(4) 分析时采用瑞雷阻尼体系,混凝土的阻尼比取为0.05,钢筋的阻尼比取为0.02,土的阻尼比取为0.02.由此可得 α 和 β 的取值.

3.2 地裂缝场地土地表加速度峰值变化规律

图7是不同测点处随地震动强度变化下的地表峰值加速度曲线.由图7可知,地表峰值加速度在地裂缝处最大(图中红色虚线代表地裂缝所处位置,下同),并向裂缝两侧递减,在远离地裂缝的区域加速度峰值会减小至地震动对应的峰值.从图7还可以看出,在不同地震波的同一地震动强度作用下,上下盘的加速度峰值的放大效应表现出不同的规律,即在 El-Centro 波 0.4 g 的地震动作用下,下盘的放大效应比上盘要明显;而在 Lanzhou 波 0.4 g 的地震动作用下,上盘放大效应要比下盘明显.产生这种现象的主要原因在于 El-Centro 波与 Lanzhou 波的频谱特性存在较大的差异.

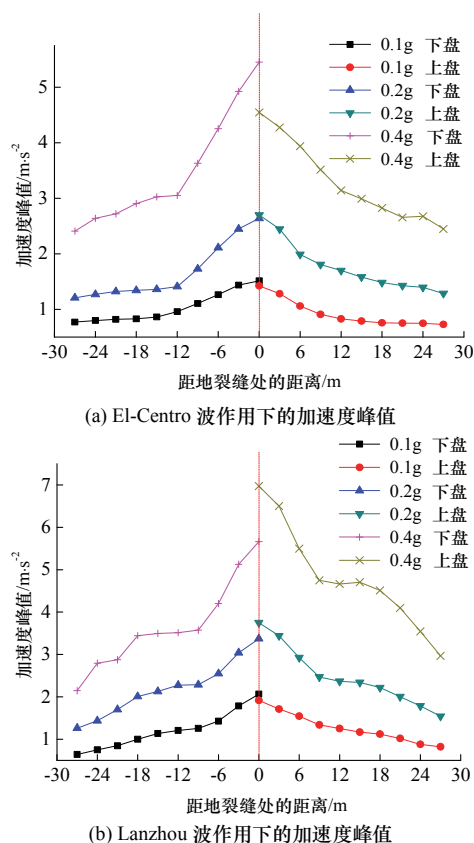


图7 地裂缝场地土地表不同测点峰值加速度峰值变化图
Fig.7 Different peak accelerations of variation points in ground fissure area

另外,从图 7(b)分析可知,当输入的 Lanzhou 地震波从 0.1 g 增大至 0.2 g 时,上盘的场地地表加速度峰值放大系数从 1.28 减小至 1.06;当输入的 Lanzhou 地震波从 0.2 g 增大至 0.4 g 时,加速度峰值放大系数却从 1.06 减小至 0.98. 同样下盘的加速度峰值的放大系数计算结果也表现出了小幅度的减小过程,但基本维持在 1.18 左右. 因此可以说明,随着地震动强度的增大,地表峰值加速度逐渐增大,而放大系数却呈减小的趋势.

3.3 地裂缝场地土地表加速度时程曲线

图 8 分别为地裂缝场地在 El-Centro 波和 Lanzhou 波作用下的加速度时程变化曲线. 由图 8 可知,在 0.2 g 的 El-Centro 波作用下,上下盘和普通土体的加速度峰值出现在 3.5 s 左右;在 6.5 s 左右,三者的加速度同时迅速减小,并保持在一定幅度内变化;在 8.8 s 左右时三者加速度值又急剧增大,随后又经历了几次增大和减小的过程,最终在 14.7 s 左右时减小至一定范围内. 普通土体的加速度曲线在整个时程内几乎都包络于上下盘的加速度时程曲线,说明在 El-Centro 波作用下,地裂缝场地的加速度值在整个时程内均大于无地裂缝场地. 而在 Lanzhou 波作用下,上下盘和普通土体的加速度均在时间为 13.8 s 左右达到最大值. 三者的加速度值

在 16 s 左右时迅速减小,并保持在比较小的幅度内变化. 普通土体的加速度曲线在整个时程内几乎都包络于上下盘的加速度时程曲线,说明在 Lanzhou 波作用下,地裂缝场地的加速度值在整个时程内均大于无地裂缝场地.

因此,地裂缝场地加速度在加载时程内的变化与普通场地相比更为剧烈,地裂缝场地与普通场地在地震作用下的动力反应的差异不容忽视.

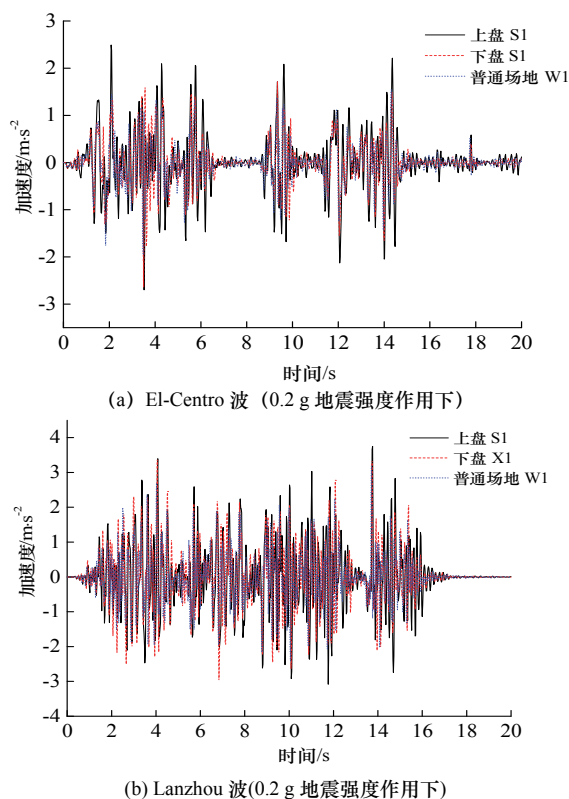


图8 场地土在不同地震强度下的加速度时程曲线
Fig.8 Acceleration time-history curve of site soil under different intensities earthquake

4 跨地裂缝结构的弹塑性时程分析

由于地裂缝场地中上盘和下盘物理性质的差异,因此地裂缝跨越上部结构的位置对上部结构的内力变化也有影响. 设置三种跨越方式: 结构的中跨跨越地裂缝(ZK); 当结构大部分处于上盘时,边跨跨越地裂缝(SK); 当结构大部分处于下盘时,边跨跨越地裂缝(XK); 结构跨越地裂缝位置如图 9 所示. 将 El-Centro 波和 Lanzhou 波的地震动幅值调整至设防烈度对应的峰值 0.2 g,在场地土的底部输入 10 s 的地震波时程,采用 ABAQUS 隐式分析模块进行上部结构的弹塑性时程分析,得出框架结构在跨越地裂缝不同工况下的地震时程响应. 同时为与未处于地裂缝场地的框架结构的时程响应作对比,在计算层间相对位移时加入未处于地裂缝场地工

况(WK 工况).

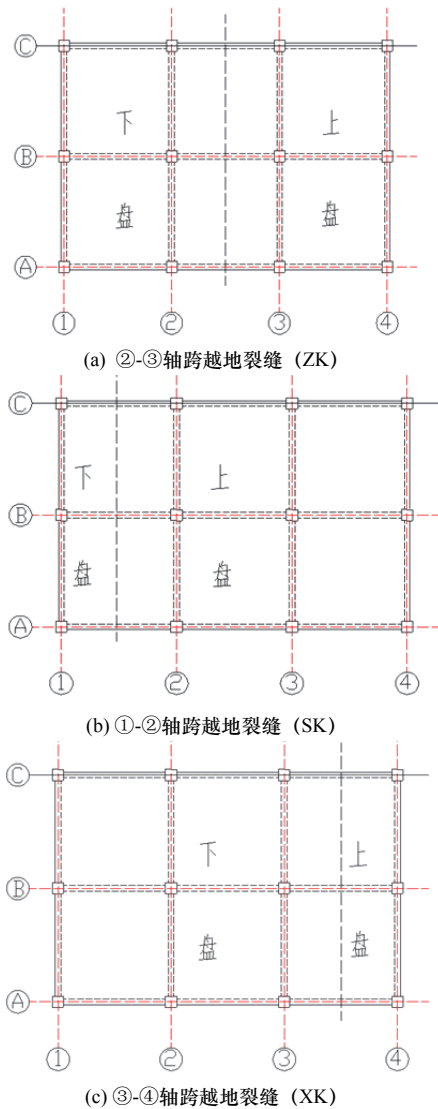


图 9 上部结构跨越地裂缝的位置示意图
Fig.9 Diagram of the superstructure crossing the ground fissure

4.1 层间相对位移(角)

表 3 为不同位置工况下跨地裂缝框架的层间间最大位移角对比. 由表 3 可知, 在 El-Centro 波作用下, 当框架的①-②轴的边跨跨越地裂缝时(SK 工况, 下同), 二层层间位移角最大为 1/201, 当框架的③-④轴的边跨跨越地裂缝时(XK 工况, 下同)的最大层间位移角为 1/535; 当框架的②-③轴的中跨跨越地裂缝时(ZK 工况, 下同)的最大层间位移角为 1/422; 当框架并未处于地裂缝场地处时(WK 工况)的最大层间位移角为 1/841. 因此, 当上部结构跨越地裂缝时, 其层间位移角明显大于其未处于地裂缝场地时的情况. SK 工况下的最大层间位移角明显大于另两种跨越地裂缝工况, 分别比 XK 和 ZK 工况下增大了 1.7 倍和 1.1 倍.

Lanzhou 波作用时, SK 工况时的二层层间位移角最大为 1/228, XK 工况下的最大层间位移角为 1/485; ZK 工况下的最大层间位移角为 1/237; WK 工况下的最大层间位移角为 1/580. 当上部结构跨越地裂缝时, 其层间位移角除 XK 工况外, 均明显大于其未处于地裂缝场地时的情况; SK 工况下的最大层间位移角明显大于另两种跨越地裂缝工况, 分别是 XK 和 ZK 工况下的 2.1 倍和 1.04 倍.

综上所述, 当结构大部分构件处于上盘时, 层间位移角最大. El-Centro 波作用下的最大层间位移略大于 Lanzhou 波作用时的层间位移, 这是由于两种地震波的频谱特性的差异造成的. 以上工况下计算的层间位移角限值均未超过《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)所规定的框架的弹塑性层间位移角限值 1/50.

表 3 强震作用下跨地裂缝框架最大层间位移角对比

Tab.3 Comparison of maximum layered displacement angle under high-intensity earthquake

楼层	El-Centro				Lanzhou			
	XK	ZK	SK	WK	XK	ZK	SK	WK
一层	1/1 905	1/935	1/234	1/1 538	1/992	1/455	1/306	1/878
二层	1/535	1/422	1/201	1/841	1/485	1/237	1/228	1/580
三层	1/656	1/506	1/234	1/1 233	1/620	1/315	1/295	1/841

4.2 楼层剪力分析

强震作用下跨地裂缝结构基底剪力时程曲线如图10所示. 由此可见, 在El-Centro波作用下, 上部结构在SK工况下的基底剪力明显大于ZK和XK位置下的基底剪力. 在SK、ZK和XK三种位置下的基底剪力峰值分别为1 728.75 kN、1 289.68 kN和1 163.87 kN. SK工况下的剪力峰值最大, ZK次之, XK最小. 在Lanzhou波作用下, SK、ZK和XK三种位置下的基底剪力峰值分别为2 666.56 kN、2

577.89 kN和1 970.79 kN. ZK工况下的剪力峰值最大, SK次之, XK最小, 但其中SK与ZK的剪力差值并不大.

图11为强震作用下跨地裂缝框架楼层剪力对比. 从图11可知, 底层的楼层剪力最大, 随着楼层高度的增加, 楼层剪力不断减小, 并且楼层剪力的变化呈增大的趋势. 在El-Centro波作用下, SK工况下的楼层剪力明显大于ZK和XK两种工况下的剪力, 其中底层剪力最为明显. 在Lanzhou波作用下,

ZK工况下的楼层剪力与SK工况较为接近,但均显然大于XK工况下的剪力.这是由于地震波从柱底传至上部结构经过了地裂缝场地土的反射和折射,而上盘场地的加速度放大响应较下盘相比更加明显,

当结构大部分构件处于上盘时,从柱底传来的地震激励就更加激烈.因此,当结构大部分构件处于下盘时,楼层剪力峰值较小,SK、ZK工况下的剪力都明显大于XK工况下的剪力峰值.

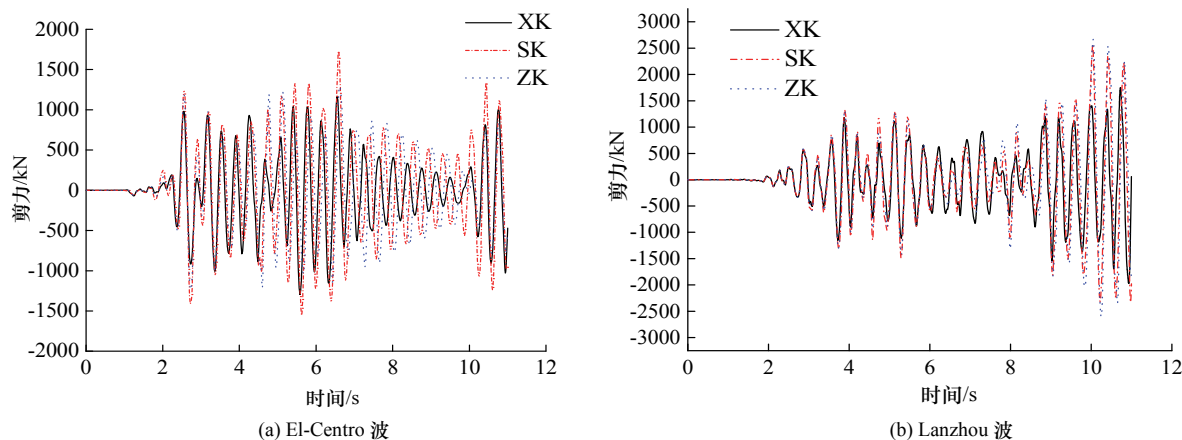


图10 强震作用下跨地裂缝结构基底剪力时程曲线

Fig.10 Base shear time-history curve of the frame structure under high-intensity earthquake

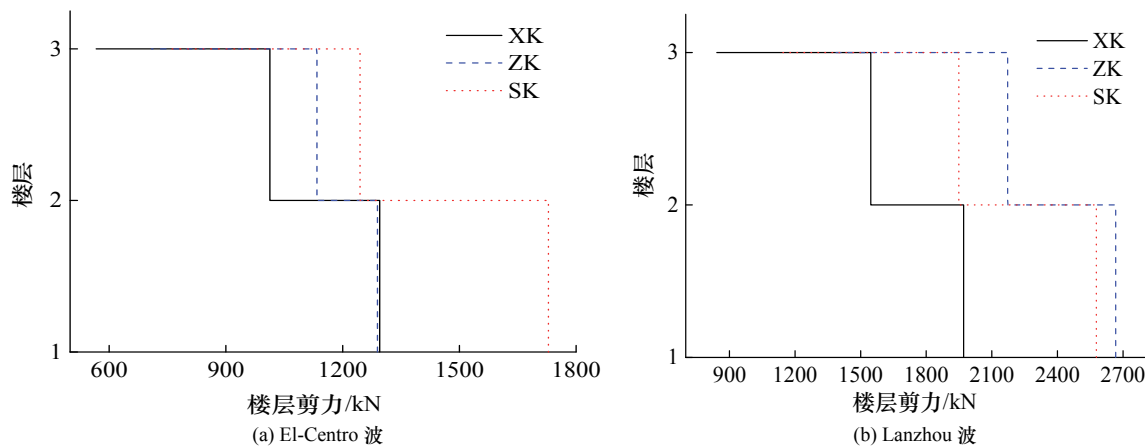


图11 强震作用下跨地裂缝框架楼层剪力对比

Fig.11 Floor shear comparison of the frame structure under high-intensity earthquake

5 结语

以跨越西安 f_4 地裂缝的框架结构为研究对象,运用 ABAQUS 有限元软件建立了地裂缝场地模型和上部结构共同作用模型,探讨了地裂缝场地的动力反应规律,主要结论如下:

(1) 计算结果表明,地裂缝场地地表加速度与普通场地相比更为剧烈.在不同的地震动和不同的地震强度作用下,地裂缝场地的上盘和下盘地表加速度峰值均明显大于普通场地的加速度峰值.随着地震动强度的增大,地表峰值加速度逐渐增大,而放大系数却呈减小的趋势.

(2) 将地震波通过土体底部沿纵向输入,较好地实现了跨地裂缝框架结构多点加载的模拟,分析结果表明,地震波的频谱特性的差异对上盘与下盘地震的动力响应影响显著.

(3) 分析结果表明,结构大部分构件处于上盘是跨越地裂缝结构地震作用下的最不利位置,这将为下一步深入研究地裂缝和地震共同作用对上部结构的损伤机理和灾害防治措施提供参考.

参考文献 References

- [1] WILLIAMS F M, WILLIAMS M A, AUMNTO F. Tensional fissures and crustal extension rates in the northern part of the main ethiopian rift[J]. Journal of African Earth Science, 2004,38: 183-197.
- [2] JIA X Y, WEN R Z, ZHOU Z H. Influence of vertical fault fissure on site ground motion[J]. Journal of Natural Disasters, 2005, 14(5):166-180.
- [3] JACHENS R C, HOLZER T L. Differential compaction mechanism for earth fissures near casa grande Arizona[J]. Geological Society of American Bulletin, 1982, 93(10): 998-1012.
- [4] HOLZER T L. Ground failure induced by ground-water withdrawal from unconsolidated sediment [J]. Reviews in Engineering Geology, 1984(6): 67-106.

(下转第 825 页)