

高烈度多维多点地震作用下某跨越地裂缝框剪结构的地震响应分析

熊仲明¹, 韦俊^{1,2}, 龚宇森¹, 于皓皓²

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 苏州科技学院机电工程系, 江苏 苏州 215009;

3. 上海联创建筑设计有限公司郑州分公司, 河南 郑州 450007)

摘要: 基于西安地区近二十年来多数地裂缝已趋于低速率的稳定活动状态和最近几年我国地震发生较为频繁的现象, 以西安地区某跨越活动性较弱的地裂缝的框架-剪力墙结构为研究对象, 从地裂缝的三维位移活动特征出发, 采用 SAP2000 有限元软件, 将地裂缝的垂直沉降量和水平张拉量以初始位移的形式施加到不同工况的结构有限元模型支座上, 对未采取防治措施和设置沉降缝的结构有限元模型分别进行高烈度多维多点地震作用和高烈度多维一致激励地震作用的非线性时程分析, 得到不同工况下的框架梁塑性铰发展趋势、剪力墙的混凝土和钢筋应力云图、结构弹塑性层间位移角包络曲线等一系列研究结果, 并对以上结果进行对比分析, 从而较为清晰地揭示出该类跨越地裂缝建筑物在多维多点地震作用和多维一致激励地震作用下的工作特性和性能, 为今后深入研究地裂缝作用对建筑物上部结构的损伤破坏机理和跨越地裂缝建筑物的防治措施提供重要参考。

关键词: 地裂缝; 三维位移; 多维多点地震; 多维一致激励地震; 非线性时程分析

中图分类号: TU398.2

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2015)03-0309-07

Seismic response analysis of a frame-shear wall structure across ground fissure in high-intensity and multidimensional multipoint seismic actions

XIONG Zhongming¹, WEI Jun^{1,2}, GONG Yusen¹, YU Haohao³

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering of Suzhou University of Science and Technology of Suzhou, 215009, China,

3. United Design Group Co. Ltd, Zhengzhou Branch 450007, China)

Abstract: Based on the phenomenon that most ground fissures have tended to be in the stability of the low rate state in the past two decades in Xi'an and the earthquakes occurred more frequently in our country in recent years, the thesis is aimed at using to use the finite element software SAP2000 to make a nonlinear time-history analysis with the three-dimensional displacement activity characteristic of ground fissures as a foundation. The research object is building of frame-shear wall striding ground fissure in Xi'an. In this thesis, the vertical settlement and horizontal tension of the ground fissure are applied to the bearing of the different SAP2000 finite element models in the form of initial displacement. By nonlinear time-history analysis of the finite element models without prevention measures under high-intensity multidimensional and multi-point seismic and high-intensity multidimensional and consistent excitation seismic as well as the nonlinear time-history analysis of the finite element models after setting settlement joint under high-intensity multidimensional and multi-point seismic and high-intensity multidimensional and consistent excitation seismic, it reveals a series of research results, such as the development trend of plastic-hinge, the stress nephogram of shear wall's concrete and rebar, the elastoplastic interlayer displacement angle curve. With contrastive analysis, it clearly shows the characteristic and performance of these buildings on the crossing ground fissure under multidimensional and multi-point seismic action and multidimensional and consistent excitation seismic action, which provide an important reference for the further study of the function of ground fissure on the building structure's damage mechanism and the prevention measures about the buildings on the crossing ground fissure.

Key words: ground fissure; three-dimensional displacement; multidimensional and multi-point seismic; multidimensional and consistent excitation seismic; nonlinear time-history analysis

地裂缝作为一种地质灾害在我国许多地区相继被发现, 其中以陕西、河北、山西、江苏、山东、安徽、河南七省的地裂缝灾害现象最为严重^[1]. 在二十世纪七、八十年代, 学术界普遍认为地裂缝活动主要受构造作用控制, 因此避让措施作为一种强制性的规定写入了规范, 并且一直沿用至今. 随着近二十年来学术界通过对地裂缝的深入研究, 已经逐渐形成了共识: 构造活动是地裂缝产生的内因, 它决定了地裂缝在地表的分布特征, 而过量抽取深层

承压水是导致地裂缝活动剧烈的直接原因.

在地裂缝环境下的高烈度地区, 按各地规定或规程所要求的最小避让距离避开地裂缝建设无疑是可行的. 但随着城市的发展, 城市可利用的空间不断缩减, 实行避让原则势必浪费城市有限的土地资源, 使城市的规划和建设受到很大限制. 因此, 研究在活动性较弱且趋于稳定的地裂缝(裂缝宽度 0.1~5mm, 垂直活动速率 ≤ 5 mm/a)上建设一般性建(构)筑物对城市用地规划具有重要的意义.

收稿日期: 2014-11-17

修改稿日期: 2015-05-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(51278395); 陕西省教育厅专项基金项目(12JK0895)

作者简介: 熊仲明(1966-), 男, 博士后, 教授, 主要从事工程结构抗震、共同作用研究等. E-mail: xiong_zhongming@yahoo.com.cn

目前,对于地裂缝的活动特征及扩展机理的研究^[3]已很成熟,但对地震作用下跨越地裂缝建筑物破坏机理的研究涉及较少,且已有研究中施加的均为一致激励地震作用,而多维多点地震作用对建筑物上部结构的研究还未见资料。

西安位于新构造运动剧烈的汾-渭盆地地裂带,历史上曾有许多破坏性大地震发生于此,目前仍有一定的地震活动。该地区的地裂缝活动规模之大和危害之重,在国内外实属罕见。闻名古迹西安大雁塔向西北倾斜1 m多^[4]就是由于地裂缝活动造成的。对此,本文以西安地区某高校的跨越活动性较弱且趋于稳定的地裂缝的框架-剪力墙结构为研究对象,采用SAP2000有限元分析软件,对未采取防治措施和设置沉降缝的跨越地裂缝结构进行地裂缝环境下的多维多点罕遇地震作用和多维一致激励罕遇地震作用的非线性时程分析,并对分析结果进行对比研究,为深入研究地裂缝和地震共同作用对建筑物上部结构的损伤破坏机理和跨越地裂缝建筑物的防治措施提供有价值的参考。

1 西安地裂缝的基本特征

目前,在西安市内发现的地裂缝主要有14条,分布面积达到150 km²,这些地裂缝具有三维空间运动特征,即南倾南降的垂直沉降、水平引张、水

平扭动。其中以垂直位移量最大,三者比值大致为1:0.31:0.03。

已有的研究表明:由于西安地裂缝的三维移动活动特征,导致建筑物的破坏非常严重。此外,由于黄土湿陷产生的附加不均匀沉降也会加剧地裂缝上部建筑物的破坏程度^[5]。

自上世纪中后期开始西安地区由于过量开采地下承压水,导致地裂缝活动加剧,城市道路和建筑物破坏严重,并且总体上呈现东强西弱、南强北弱的特点^[6]。随着限制开采地下承压水政策的实施,西安地裂缝灾害已经得到了明显的减轻。

2 工况模拟与分析

2.1 工程概况

本文以实际工程西安建筑科技大学西大门为例,采用SAP2000有限元软件对该结构进行非线性时程分析。该建筑物采用钢筋混凝土框架-剪力墙结构形式,结构设计使用年限为50年,安全等级为二级,抗震设防烈度为8度,设计地震分组为一组。建筑高度为12.75 m,立面由4个门洞组成,长度为50.73 m,宽度为6.4 m。地裂缝 f_6 从该结构北侧②~③轴之间穿过,在西侧距离③轴3.91 m,东侧距离③轴3.51 m,结构平面布置图见图1所示。

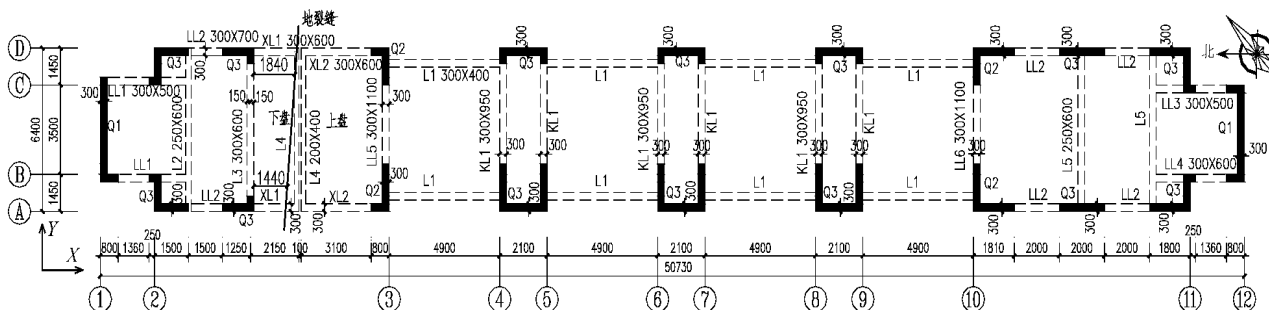


图1 结构平面布置图

Fig.1 Plan graph of structure

2.2 SAP2000 有限元模型建立

在SAP2000有限元模型中,结构有限元模型中的楼板选用壳单元里的薄壳单元,框架梁选用线单元,剪力墙和连梁的塑性行为通过分层壳单元来模拟,框架梁的塑性行为通过塑性铰来模拟。为保证足够的计算精度和模型分析的收敛速度,分层壳单元均选用3×3网格进行剖分,框架梁选用最大长度为1 m的单元进行剖分。剪力墙和连梁均采用C30混凝土和HRB335级钢筋,混凝土的本构模型选为Mander模型,对应的极限抗压应力为14.3 MPa,极限拉应力为2.35 MPa;钢筋的本构模型选为Park模型,对应的屈服应力为300 MPa,极限应力为413 MPa。

2.2.1 地震波选取

地震波选取要满足地震动三要素的要求,即频谱特性、有效峰值和持续时间要符合规定,即输入的地震加速度时程曲线。经过分析本文非线性时程工况选取El Centro波和天津波两种地震波进行分析。为满足《建筑抗震设计规范》中地震波有效持续时间一般为结构基本自振周期的5~10倍,且地震波加速度峰值需包含在地震波持续作用时间内,分别截取原El Centro波的0.5~12.5 s段和原天津波的5~17 s段,地震波持时均为12 s。南北向的地震波施加在结构短轴方向,东西向的地震波施加在结构长轴方向,竖向地震波施加在结构竖直方

向. 表 1 是调整后的 El Centro 波和天津波的加速度峰值出现时间.

表 1 地震波加速度峰值出现时间
Tab.1 Occurrence time of acceleration peak

| 地震波 | 加速度峰值/ $\text{cm}\cdot\text{s}^{-2}$ | 峰值出现时间/s |
|-----------------|--------------------------------------|----------|
| 南北向 El Centro 波 | 341.7 | 1.62 |
| 东西向 El Centro 波 | 210.1 | 10.94 |
| 竖向 El Centro 波 | 206.3 | 0.5 |
| 南北向天津波 | 145.8 | 2.66 |
| 东西向天津波 | 104.2 | 2.58 |
| 竖向天津波 | 73.1 | 4.06 |

2.2.2 地裂缝作用模拟

该实际工程位于Ⅲ级地裂区, 地裂缝活动较弱(垂直沉降量小于 5 mm/a), 水平张拉量约是沉降量 1/3, 扭转量则小一个数量级, 可以忽略掉扭转量对结构的影响, 只考虑垂直沉降量和水平张拉量. 由文献[7]可知该结构所处地区的黄土湿陷等级为Ⅰ级(轻微), 可以不考虑黄土湿陷对结构的影响. 因该工程所在的场地未对地裂缝活动量做长期观测, 所以对该工程场地通过的地裂缝 f_6 上盘沉降量的数值近似采用地裂缝 f_6 上已有的距离该工程建设时间最近和空间距离最近的观测值, 该观测值是西安地铁 2 号线穿越地裂缝 f_6 的活动速率值^[8], 其垂直活动量为 3.1 mm. 所以, 近似取该场地的地裂缝的垂直沉降量为 3.1 mm/a, 水平张拉量为 1 mm/a. 本文考虑 10 年的地裂缝作用, 即垂直差异沉降量和水平张拉量分别为 31 mm 和 10 mm.

地裂缝活动对结构的影响在 SAP2000 中的模拟方法: 对结构有限元模型中位于地裂缝南侧的所有支座施加 31 mm 的初始竖向位移和 10 mm 的 X 方向水平张拉位移, 同时对地裂缝北侧的所有支座施加 10 mm 的 X 方向水平张拉位移, 并将初始位移作为恒荷载来考虑.

2.2.3 多维一致激励罕遇地震作用模拟

对结构所有支座施加三向(两个水平方向和一个竖直方向)加速度时程地震波. 其中, 结构短轴方向(Y 方向)施加的地震波加速度峰值调整到建筑抗震设计规范中时程分析所用加速度最大值 400 cm/s^2 , 结构长轴方向和竖直方向施加的地震波加速度峰值按 1:0.85:0.65 的比例分别调整到 340 cm/s^2 和 260 cm/s^2 .

2.2.4 多维多点罕遇地震作用模拟

由于该工程所在的场地规模一般, 属于较均匀的场地类型, 相干效应和局部场地效应对跨越地裂缝结构的影响不大, 地裂缝主要影响的是地裂缝两侧输入地震波激励的初始时刻、强度不同. 因此,

本文只考虑行波效应对跨越地裂缝结构的影响, 忽略相干效应和局部场地效应的影响. 地震视波速分别取适合三类场地的 50, 100, 200 m/s.

多维多点地震作用在 SAP2000 中的模拟方法: 对地裂缝两侧的结构支座施加三个平动方向的位移时程地震波, 位移时程波由峰值调整为抗规中时程分析所用的最大值 400 cm/s^2 后的加速度时程波经过滤波和基线校正处理后得到.

2.2.5 非线性时程工况分类

表 2 是实际跨越地裂缝结构的各非线性时程工况. 其中, 工况 1 至工况 8 对应的是未采取防治措施的跨越地裂缝结构, 工况 9 至工况 16 对应的是设置沉降缝的跨越地裂缝结构. 所有非线性时程工况的初始工况均为 10 年地裂缝作用的静力非线性工况, 以此来考虑地裂缝和地震共同作用对跨越地裂缝结构的影响.

表 2 跨越地裂缝结构的非线性时程工况
Tab.2 Across ground fissure structure under nonlinear time-history analysis

| 工况 | 地震波 | 荷载类型 |
|----|--------------------------|----------|
| 1 | 视波速为 50m/s 的 ElCentro 波 | 多维多点地震 |
| 2 | 视波速为 100m/s 的 ElCentro 波 | 多维多点地震 |
| 3 | 视波速为 200m/s 的 ElCentro 波 | 多维多点地震 |
| 4 | 视波速为 50m/s 的天津波 | 多维多点地震 |
| 5 | 视波速为 100m/s 的天津波 | 多维多点地震 |
| 6 | 视波速为 200m/s 的天津波 | 多维多点地震 |
| 7 | ElCentro 波 | 多维一致激励地震 |
| 8 | 天津波 | 多维一致激励地震 |
| 9 | 视波速为 50m/s 的 ElCentro 波 | 多维多点地震 |
| 10 | 视波速为 100m/s 的 ElCentro 波 | 多维多点地震 |
| 11 | 视波速为 200m/s 的 ElCentro 波 | 多维多点地震 |
| 12 | 视波速为 50m/s 的天津波 | 多维多点地震 |
| 13 | 视波速为 100m/s 的天津波 | 多维多点地震 |
| 14 | 视波速为 200m/s 的天津波 | 多维多点地震 |
| 15 | ElCentro 波 | 多维一致激励地震 |
| 16 | 天津波 | 多维一致激励地震 |

2.3 不同工况作用下的分析对比

2.3.1 不同工况下的框架梁塑性铰分析

图 2 是未采取防治措施的跨越地裂缝结构的塑性铰分布示意图. 通过对设置沉降缝的跨越地裂缝结构分析对比可知: (1) 未采取防治措施的跨越地裂缝结构在多维多点罕遇地震下的危险部位集中在地裂缝处的框架梁和地裂缝上盘二层外侧的少

数框架梁, 在多维一致激励罕遇地震下的危险部位仅集中在地裂缝处的顶层和二层框架梁. 设置沉降缝的跨越地裂缝结构在多维多点罕遇地震下的危险部位只存在于地裂缝上盘二层外侧的少数框架梁. (2) 未采取防治措施和设置沉降缝的跨越地裂缝结构在 50 m/s、100 m/s 和 200 m/s 三种视波速的多维多点罕遇地震下出现的各种颜色塑性铰数量明显多于多维一致激励罕遇地震下出现的相应颜色塑性铰数量, 这表明多维多点地震对跨越地裂缝结构的不利影响更严重. (3) 未采取防治措施和设置沉降缝的跨越地裂缝结构在 50 m/s、100 m/s 和 200 m/s 三种视波速的多维多点地震下出现的各种颜色塑性铰数量均呈现逐渐减小的趋势, 这表明低

视波速的多维多点地震对跨越地裂缝结构更为不利. (4) 计算结果表明, 天津波作用产生的各种颜色塑性铰数量多于 El Centro 波作用产生的相应颜色塑性铰数量, 尤其是在 50 m/s 低视波速的多维多点罕遇地震下最为明显, 其原因主要是天津波的频谱峰值对应的频率和跨越地裂缝结构的基本自振频率很接近. 但随着地震视波速的提高, 这种现象逐渐变得不明显. (5) 计算结果表明, 设置沉降缝的跨越地裂缝结构在多维多点罕遇地震和多维一致激励罕遇地震下产生的各种颜色塑性铰数量均明显少于前者. 这表明设置沉降缝可以明显减轻跨越地裂缝结构在多维多点地震和多维一致激励地震下的内力.

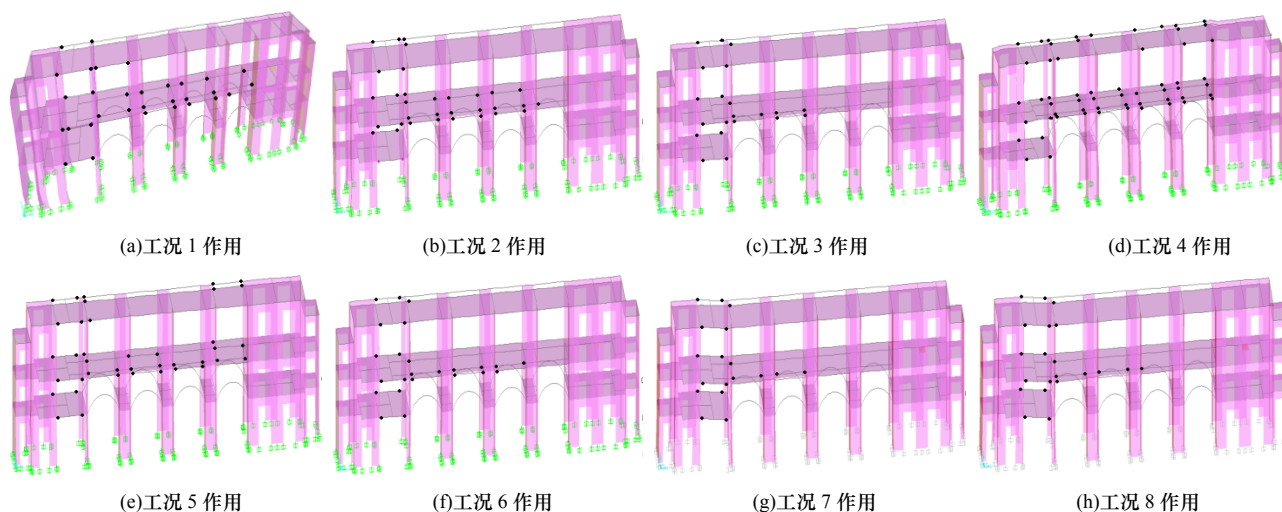


图2 未采取防治措施的跨越地裂缝结构的塑性铰分布示意图

Fig.2 The distribution of plastic-hinge without prevention measure

2.3.2 不同工况下的分层壳混凝土的最大主压应力对比

表3是不同非线性时程工况下的分层壳混凝土的压碎区域和最大主压应力最大值.

通过对表3的数据进行分析对比, 可以得到:

(1) 未采取防治措施的跨越地裂缝结构在多维多点地震下的危险部位主要集中在底层的剪力墙和连梁部位, 尤其在 50 m/s 低视波速的多维多点罕遇地震下底层剪力墙的许多部位和多数连梁的混凝土都会压碎破坏. 设置沉降缝的跨越地裂缝结构在多维多点地震下的危险部位主要集中在底层的一小部分剪力墙, 与未采取防治措施的跨越地裂缝结构相比, 混凝土压碎面积要少很多. 未采取防治措施和设置沉降缝的跨越地裂缝结构在多维一致激励罕遇地震下, 剪力墙和连梁的混凝土均不会压碎破坏. (2) 未采取防治措施和设置沉降缝的跨越地裂

缝结构在 50m/s、100m/s 和 200m/s 三种视波速的多维多点罕遇地震下的分层壳混凝土最大主压应力均明显大于多维一致罕遇地震下的混凝土最大主压应力, 且三种视波速的多维多点罕遇地震下的混凝土最大主压应力均超出其极限压应力值, 这表明多维多点地震对未采取防治措施和设置沉降缝的跨越地裂缝结构的不利影响均明显比多维一致激励地震对其的不利影响要严重. (3) 未采取防治措施和设置沉降缝的跨越地裂缝结构在 50、100 和 200 m/s 三种视波速的多维多点罕遇地震下的分层壳混凝土最大主压应力呈逐渐减小的趋势, 这表明低视波速的多维多点地震对跨越地裂缝结构更为不利. (4) 相同视波速的多维多点罕遇地震下, 天津波对未采取防治措施和设置沉降缝的跨越地裂缝结构的不利影响比 El Centro 波对其的不利影响更显著, 这是因为天津波的频谱峰值对应的频率和跨

越地裂缝结构的基本自振频率很接近. 但随着视波速的提高, 这种现象逐渐变得不明显. (5) 与未采取防治措施的跨越地裂缝结构相比, 设置沉降缝的跨越地裂缝结构在多维多点罕遇地震和多维一致激励罕遇地震下的混凝土压碎面积和最大主压应力明显偏小. 这表明设置沉降缝可以明显地减轻跨越地裂缝结构在多维多点地震和多维一致激励地震下的内力.

表 3 不同工况下的分层壳混凝土的最大主压应力
Tab.3 Maximum principal stress of concrete under different cases

| 工 况 | 混凝土最大主压应力大于 14.3 MPa 的区域 (压碎区域) | 混凝土最大主压 应力最大值/MPa |
|--------|---|----------------------|
| 1 | 地裂缝上盘⑥~⑦轴的二层 YZ 立面剪力墙, 地裂缝上盘⑩~⑪轴的底层 XZ 立面剪力墙角部 | 21.6 |
| 2 | 地裂缝下盘②轴的底层 XZ 立面剪力墙右下角, 地裂缝下盘①轴和②轴的底层、二层连梁, 地裂缝上盘⑩轴处的连梁 | 19.3 |
| 3 | 地裂缝下盘①轴和②轴的底层 XZ 立面剪力墙右下角, 地裂缝下盘①轴、②轴的底层连梁 | 18.5 |
| 4 | 地裂缝上盘④~⑨轴的二层 YZ 立面剪力墙, 地裂缝上盘⑫轴的底层 YZ 立面剪力墙, 地裂缝下盘①轴处的底层 XZ 立面剪力墙, 地裂缝下盘①轴、②轴和地裂缝上盘⑩轴、⑫轴处的连梁 | 28.5 |
| 5 | 地裂缝下盘②轴的底层 XZ 面剪力墙顶部, 地裂缝下盘①轴、②轴和地裂缝上盘⑫轴处的底层连梁 | 22.1 |
| 6 | 地裂缝下盘②轴的底层 XZ 立面剪力墙右上角, 地裂缝下盘①轴、②轴和地裂缝上盘⑩轴处的底层连梁 | 19.5 |
| 7 | 无 | 9.8 |
| 8 | 无 | 12.2 |
| 9 | 地裂缝上盘⑩轴的底层内侧 XZ 面剪力墙, 地裂缝上盘⑪轴的底层外侧 XZ 面剪力墙角部 | 18.7 |
| 10 | 地裂缝上盘⑪轴的底层外侧 XZ 立面剪力墙角部 | 17.6 |
| 11 | 地裂缝上盘⑪轴的底层外侧 XZ 立面剪力墙角部 | 16.8 |
| 12 | 地裂缝上盘⑩轴处的底层外侧 XZ 面剪力墙顶部, 地裂缝上盘⑩轴和⑫轴处的底层外侧 XZ 面剪力墙底部 | 19.8 |
| 13 | 地裂缝上盘⑩轴处的底层外侧 YZ 面剪力墙, 地裂缝上盘⑫轴处的底层外侧 XZ 面剪力墙 | 18.9 |
| 14 | 地裂缝上盘⑫轴处的底层外侧 XZ 立面剪力墙 | 17 |
| 15 | 无 | 8.4 |
| 16 | 无 | 9.7 |

2.3.3 不同工况下的分层壳钢筋 Mises 应力对比

表 4 是不同非线性时程工况下的分层壳钢筋的屈服区域、断裂区域和 Mises 应力最大值.

通过对表 4 的数据进行分析对比, 可以得到:

(1) 未采取防治措施的跨越地裂缝结构在多维多点罕遇地震下的危险部位主要集中在底层、二层剪力墙和连梁部位, 尤其在 50 m/s 低视波速的罕遇地震下, 结构很有可能会倒塌. 设置沉降缝的跨越地裂缝结构在多维多点罕遇地震下的危险部位主要集中在底层和二层剪力墙的一小部分区域, 在 50 m/s 低视波速的罕遇地震下, 剪力墙的钢筋屈服的面积明显减少, 也不会倒塌. 而未采取防治措施和设置沉降缝的跨越地裂缝结构在多维一致激励罕遇地震作用下, 剪力墙和连梁的钢筋均不会屈服. (2) 未采取防治措施和设置沉降缝的跨越地裂缝结构在 50、100 和 200 m/s 三种视波速的多维多点罕遇地震下的分层壳钢筋 Mises 应力最大值明显大于多维一致激励罕遇地震下的分层壳钢筋 Mises 应力最大值, 且三种视波速的多维多点罕遇地震下的分层壳

钢筋 Mises 应力最大值均超出其极限应力, 这表明多维多点地震对跨越地裂缝结构的不利影响明显比多维一致激励地震对其的不利影响要严重. (3) 未采取防治措施和设置沉降缝的跨越地裂缝结构在 50、100 和 200 m/s 三种视波速的多维多点罕遇地震下的分层壳钢筋 Mises 应力最大值呈逐渐减小的趋势, 这表明低视波速的多维多点地震对跨越地裂缝结构更为不利. (4) 相同视波速的多维多点罕遇地震下, 天津波对未采取防治措施和设置沉降缝的跨越地裂缝结构的不利影响比 El Centro 波的不利影响更显著. 但随着地震视波速的提高, 这种现象逐渐变得不明显. (5) 与未采取防治措施的跨越地裂缝结构相比, 设置沉降缝的跨越地裂缝结构在多维多点罕遇地震和多维一致激励罕遇地震下的分层壳钢筋屈服面积和钢筋 Mises 应力最大值均明显小于前者. 这表明设置沉降缝可以明显减轻跨越地裂缝结构在多维多点地震和多维一致激励地震下的内力.

表 4 不同工况下的分层壳钢筋的 Mises 应力
Tab.4 Mises stress of rebar under different cases

| 工 况 | 钢筋 Mises 应力大于 300 MPa 的区域 (屈服区域) | 钢筋 Mises 应力大于 413 MPa 的区域 (断裂区域) | 钢筋 Mises 应 力最大值/MPa |
|--------|--|---|------------------------|
| 1 | 地裂缝上盘③~⑨轴的底层 YZ 面剪力墙, 地裂缝上盘④~⑨轴的二层 YZ 面剪力墙 | 地裂缝下盘②轴的底层 YZ 面剪力墙 | 435 |
| 2 | 地裂缝上盘③~⑩轴的底层 YZ 面剪力墙, 地裂缝上盘⑩~⑪轴的底层 XZ 面剪力墙 | 地裂缝下盘②轴的底层外侧 XZ 面剪力墙右上角 | 424 |
| 3 | 地裂缝下盘①轴、②轴处的底层连梁 | 地裂缝上盘⑪轴处的底层 YZ 面剪力墙 | 418 |
| 4 | 结构底层剪力墙的钢筋基本都屈服 | 地裂缝上盘④~⑨轴的二层 YZ 面剪力墙底部, 地裂缝下盘①轴处的底层和二层剪力墙局部位置 | 523 |
| 5 | 地裂缝上盘④~⑩轴的底层 YZ 面剪力墙, 地裂缝上盘⑩~⑪轴的底层 XZ 面剪力墙, 地裂缝下盘①~②轴的底层 YZ 面剪力墙, 地裂缝上盘③轴二层 YZ 面剪力墙和底层连梁 | 地裂缝上盘⑩轴的底层内侧 XZ 面剪力墙顶部 | 453 |
| 6 | 地裂缝下盘①轴、②轴处的底层 YZ 面剪力墙和该位置处的底层、二层连梁 | 地裂缝上盘⑪轴的底层内侧 XZ 面剪力墙顶部 | 431 |
| 7 | 无 | 无 | 219 |
| 8 | 无 | 无 | 255 |
| 9 | 地裂缝上盘④~⑨轴的二层 YZ 立面剪力墙底部 | 无 | 408 |
| 10 | 地裂缝上盘③轴和④轴的底层 YZ 面剪力墙角部 | 无 | 389 |
| 11 | 地裂缝上盘⑩轴的底层 YZ 面剪力墙角部 | 无 | 367 |
| 12 | 地裂缝上盘④~⑨轴的二层 YZ 面剪力墙底部 | 地裂缝上盘④轴处的二层 YZ 面剪力墙底部 | 433 |
| 13 | 地裂缝上盘④轴、⑥轴和⑧轴的二层内侧 YZ 面剪力墙底部 | 无 | 413 |
| 14 | 地裂缝上盘④轴的二层内侧 YZ 面剪力墙底部 | 无 | 385 |
| 15 | 无 | 无 | 193 |
| 16 | 无 | 无 | 207 |

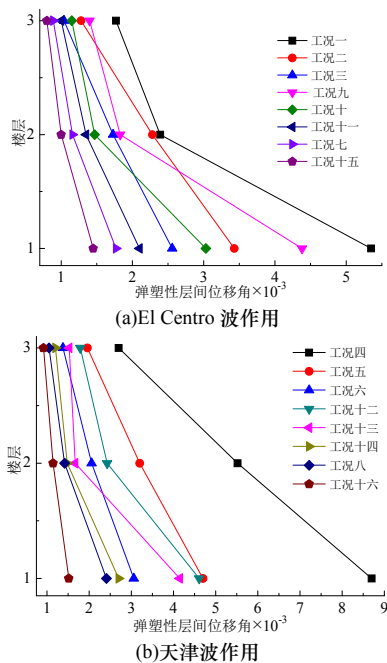


图 3 不同非线性时程工况下的结构弹塑性层间位移角
Fig.3 Elastoplastic interlayer displacement angle under different nonlinear time-history analysis

2.3.4 不同工况下的弹塑性层间位移角曲线比较

图 3 是跨越地裂缝结构在 El Centro 波和天津波的不同非线性时程工况下的弹塑性层间位移角包络曲线。通过对图 3(a)和图 3(b)进行对比分析,可以得到:

- (1) 未采取防治措施和设置沉降缝的跨越地裂缝结构在多维多点地震作用和多维一致激励地震作用下的最大弹塑性层间位移角均在底层位置,这说明结构的薄弱位置在底层。
- (2) 未采取防治措施和设置沉降缝的跨越地裂缝结构在 50、100 和 200 m/s 三种视波速的多维多点罕遇地震下的最大弹塑性层间位移角均明显大于多维一致激励罕遇地震下的最大弹塑性层间位移角,这表明多维多点地震对跨越地裂缝结构的不利影响明显比多维一致激励地震的不利影响要严重。
- (3) 未采取防治措施和设置沉降缝的跨越地裂缝结构在 50、100 和 200 m/s 三种视波速的多维多点罕遇地震下的最大弹塑性层间位移角呈逐渐减小的趋势,这表明低视波速的多维多点地震对跨越地裂缝结构更为不利。
- (4) 相同视波速的多维多点罕遇地震下,天津波作用的最大弹塑性层间位移角比 El Centro 波作用的最大弹塑性层间位移角要大,这表明天津波对跨越地裂缝结构的不利影响比 El Centro 波的不利影响更显著。但随着地震视波速的提高,这种现象逐渐变得不明显。
- (5) 与未采取防治措施的跨越地裂缝结构相比,设置沉降缝的跨越地裂缝结构在多维多点罕遇

地震和多维一致激励罕遇地震下的最大弹塑性层间位移角均明显偏小. 这表明设置沉降缝可以明显减轻跨越地裂缝结构在多维多点地震和多维一致激励地震对结构的影响.

(6) 相同视波速的 El Centro 波和天津波的多维多点地震作用对跨越地裂缝结构的层间位移影响相比, 天津波的影响更加严重, 这是因为天津波的频谱峰值对应的频率和跨越地裂缝结构的基本自振频率很接近.

3 结构跨越地裂缝的对策建议

为减轻地裂缝活动对实际工程结构的影响, 该工程采取的措施是在结构地裂缝处设置宽度为 100 mm 的沉降缝(与有限元模型中设置沉降缝的工况对应), 使结构在地裂缝两侧成为完全独立的两部分. 地裂缝只会使两侧的结构产生错台, 并不影响地裂缝两侧的结构, 通过干挂石材的装饰处理可以消除错台对建筑外观的影响. 该结构自 2006 年 9 月投入使用以来, 地裂缝两侧沉降差在四川汶川、雅安地震和青海玉树三次地震后的实测值只有约 8 mm, 震后该实际结构并没有任何损坏迹象. 结合本文对该跨越地裂缝结构的有限元分析, 可以认为: 对跨越活动性较弱或趋于稳定的地裂缝的结构, 通过设置沉降缝的措施可以明显地减轻多维多点地震作用对结构造成的破坏.

表 5 是该实际结构完工后的所在场地的地裂缝两侧结构差异沉降量实测值. 将 2000—2005 年该处场地的地裂缝活动速率 3.1 mm/a 和表 7 中的数据进行对比分析, 可以发现该场地处的地裂缝活动量自 2000 年后基本呈现逐年减缓并趋于稳定的趋势. 因此, 有限元模型中施加的地裂缝活动速率是偏保守的.

表 5 地裂缝两侧结构差异沉降量实测值/mm

Tab.5 The measured relative settlement of both sides of structures with ground fissure

| 2006 年 | 2007 年 | 2008 年 | 2009 年 | 2010 年 | 2011 年 | 2012 年 | 2013 年 |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1.0 | 2.1 | 1.7 | 0.6 | 0.6 | 0.7 | 0.6 | 0.6 |

4 结论

本文以全国地裂缝灾害最为严重的西安地区某跨越活动性较弱的地裂缝的框架剪力墙结构为研究对象, 应用 SAP2000 有限元软件, 并结合实际跨越地裂缝结构在震后的沉降观测值, 得到以下结论:

(1) 由于在地震作用下, 地裂缝两侧输入地震波激励的初始时刻和强度不同, 导致多维多点地震明显比多维一致激励地震的不利影响严重. 因此对跨越地裂缝建筑物进行地震响应分析时, 应该考虑地震波的多维多点效应.

(2) 与未采取防治措施的跨越地裂缝结构相比, 设置沉降缝的跨越地裂缝结构在多维多点地震下的危险部位的数量和面积明显减少. 剪力墙的混

凝土压碎面积和钢筋屈服区域面积也明显减少, 结构的正常使用会受到一定影响, 但不会倒塌. 这表明设置沉降缝可以明显地降低地裂缝和地震共同作用对该类跨越地裂缝结构(垂直沉降量小于 5 mm/a)的不利影响.

(3) 在 f_0 地裂缝趋于低速率(0.6 mm/a)的稳定活动状态下, 设置沉降缝的实际跨越地裂缝结构在 50 年设计使用年限的地裂缝累计作用下, 当遭受相当于 8 度罕遇多维多点地震作用力时, 位于地裂缝上盘的许多框架梁和底层剪力墙会进入塑性工作状态, 结构的正常使用会受到很大影响, 但是不会倒塌.

参考文献 References

- [1] 王军良. 西安地区跨地裂缝建筑物破坏机理与防治对策研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2009.
WANG Junliang. Research on Failure Mechanism and Prevention Countermeasures of Spanning Ground Fissure Building in Xi'an[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2009.
- [2] 冷崑, 孙强. 地震作用下结构失稳诱发的塌陷和地裂缝机理分析[J]. 灾害学, 2007, 22(1): 24-26.
LENG Wei, SUN Qiang. Analysis on Mechanism of Collapse and Ground Fissure Caused by Structure Instability under Seismic Action[J]. Catastrophology, 2007, 22(1): 24-26.
- [3] 陈立伟. 地裂缝扩展机理研究[D]. 西安: 长安大学, 2007.
CHEN Liwei. Study on the Propagation Mechanism of Ground Fissures[D]. Xi'an: Chang'an University, 2007.
- [4] 黄强兵, 彭建兵, 樊红卫, 等. 西安地裂缝对地铁隧道的危害及防治措施研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(5): 782-788.
HUANG Qiangbing, PENG Jianbing, FAN Hongwei, et al. Metro tunnel hazards induced by active ground fissures in Xi'an and relevant control measures[J]. Geotechnical Engineering, 2009, 31(5): 782-788.
- [5] 李宝田. 黄土湿陷对西安地裂缝影响的研究[D]. 西安: 长安大学, 2005.
LI Baotian. Collapsibility of loess affect to the Xi'an ground fissures[D]. Xi'an: Chang'an University, 2005.
- [6] 万通. 地裂缝活动对建筑结构影响的模拟分析[D]. 西安: 长安大学, 2011.
WANG tong. The simulation of the impact of Ground Fissures for building structure[D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.
- [7] 西安建筑科技大学西大门岩土工程勘察报告[R]. 西安: 西北综合勘察设计院, 2005.
The Geotechnical Investigation Report of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. west gate[R]. Xi'an: Northwest Research Institute Of Engineering Investigations And Design, 2005.
- [8] 李新生, 王静, 王万平, 等. 西安地铁二号线沿线地裂缝特征、危害及对策[J]. 工程地质学报, 2007, 15(4): 463-468.
LI Xinsheng, WANG Jing, WANG Wanping, et al. Ground Fissures Along Xi'an Subway Line 2: Characteristics, Harms And Measures[J]. Engineering Geology, 2007, 15(4): 463-468.
- [9] GB50011-2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
GB50011-2010 Code for seismic design of buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.

(编辑 桂智刚)