

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20250430021

断层作用下地表破裂-基础-框架结构 相互作用数值模拟分析*

陈伯蔚¹, 徐龙军², 田浩³

(1. 中国地震局工程力学研究所 地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 江汉大学精细爆破
国家重点实验室, 湖北 武汉 430056; 3. 华中科技大学土木与水利工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 为探究断层错动引发的“地表破裂-基础-结构相互作用”特征及规律。利用有限元软件, 考虑结构与断层引发的地表破裂露头位置的不同方位关系的影响, 建立了土体及其上部建筑结构的模型。计算了正、逆断层作用下的土体的应变、基础弯矩以及二层框架结构上的和应力分布特征, 分析了断层上建筑物的存在对地表破裂形态的影响。结果表明: 断层上建筑物的存在会改变破裂在近地表土体中的发展趋势; 在重力作用下, 基础底部压应力的差异造成的土体破裂面与基础底面之间的摩阻力差异会使主动盘土体竖直方向上的变形受到抑制, 同时在被动盘上产生更大变形。相关结论可为断层区建筑结构的选址提供参考依据。

关键词: 断层错动; 土-结构相互作用; 数值模拟; 框架结构; 建筑选址

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)06-1503-12

Numerical Simulation Analysis of Surface Rupture-Foundation-Frame Structure Interaction under Fault Action

CHEN Bowei¹, XU Longjun², TIAN Hao³

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics,
China Earthquake Administration, Harbin 150080, China;

2. State Key Laboratory of Precision Blasting, Jiangnan University, Wuhan 430056, China;

3. School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: This study aims to explore the characteristics and patterns of surface rupture - foundation - structure interaction caused by fault dislocation. Using the finite element software, a model of the soil and its upper building structure was established, taking into account the influence of the different orientation relationships between the structure and the location of the fault-induced surface rupture outcrop. The strain of soil, the bending moment of the foundation, and the stress distribution of the two-storey frame structure under the action of normal and reverse faults were calculated, and the influence of the presence of buildings located on the fault on the surface rupture morphology was analyzed. The results showed that the presence of buildings on the fault changed the development trend of rupture in the near-surface soil. Under the action of gravity, differences in compressive stress at the foundation bot-

* 收稿日期: 2025-04-30; 修回日期: 2025-07-02

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(U2139207)、湖北省自然科学基金项目(2023AFA030)资助

作者简介: 陈伯蔚(1999—), 男, 硕士研究生。主要从事防灾减灾工程研究。E-mail: 1156110398@qq.com

通信作者: 徐龙军(1976—), 男, 教授, 博导, 博士。主要从事防灾减灾工程研究。E-mail: xulj@jhun.edu.cn

tom led to the variations in frictional resistance between the soil fracture surface and the foundation bottom surface, which restricted vertical deformation of the active side of the soil while inducing greater deformation on the passive side. These findings can provide references for the site selection of building structures in fault zones.

Keywords: fault dislocation; soil-structure interaction; numerical simulation; frame structure; building site selection

0 引言

地震断层两侧的相对位移会直接对跨断层建筑产生拉、压和剪等破坏作用^[1]。例如,汶川地震中位于断层带上的北川县委大楼完全倒塌^[2],玉树地震中穿越活动断层带的让娘寺中心藏教区多栋建筑受损严重^[3]。因此,断层引发的地表破裂区是危险区域,建筑难以靠设防措施避免破坏,在以往的研究中通常采用避让措施^[4-7]。但实际上断层破裂位置具有很大不确定性,即使探明断层位置,由于土体的非均质和各向异性的性质、断层的运动形式、地震动的组成成分等因素的存在,也不易确定破裂在土体表面露出的位置及尺度^[8-11]。因此,一些建筑物穿过断层引发的地表破裂带是不可避免的。

以往的相关研究多集中在实际案例的总结,数值模拟分析多采用二维模型。E. Faccioli 等^[11]、I. Anastasopoulos 等^[12]、R. Ulusay 等^[13]和 A. Pamuk 等^[14]总结了跨断层结构的破坏情况,发现断层错动虽然造成了大量建筑物的破坏,但是仍然有部分建筑物破坏程度较轻甚至免于破坏。M. F. Bransby 等^[15]、M. Loli 等^[16]、I. Anastasopoulos 等^[17-19]和 M. Fadaee 等^[20]总结了地震中断层错动下地表破裂上一些建筑未受严重破坏的原因,采用有限元方法分析了在基础位置、基础形式、基础刚度及基础上部结构自重影响下的断层破裂-土-基础-结构相互作用,并通过试验进行了验证。J. D. Bray 等^[21-22]、N. K. Oettle 等^[23]、M. Fadaee 等^[24-25]和 H. Rasouli 等^[26]根据对跨断层建筑实际案例、模拟和试验的总结,提出了多种减小跨断层建筑所受的破坏的措施,如地基采用松散的土体以吸收断层错动释放的能量,在基础与断层破裂间设置挡土墙以阻止破裂的发展。虽然上述研究对实际案例、模拟结果中基础位置和形式的影响进行了研究,但均集中在一种断层错动方式下,且多研究破裂、基础及结构在二维平面上的相互作用,未能系统得到正、逆断层引发的地表破裂、破裂上建筑基础响应和建筑上部结构响应之间的相互作用的规律。

本研究采用有限元分析软件建立土体及其上方的结构的三维模型,在结构相对于断层引发的地表破裂露头位置不同方位的工况下,计算分析了正断层、逆断层引发的地表破裂—基础—结构相互作用,具体为破裂在土体中的发展趋势、地表变形形态、断层上建筑物弯矩及应力分布情况。

1 模型建立及参数选取

1.1 模型参数

模型均采用实体单元。如图 1 所示,土体高

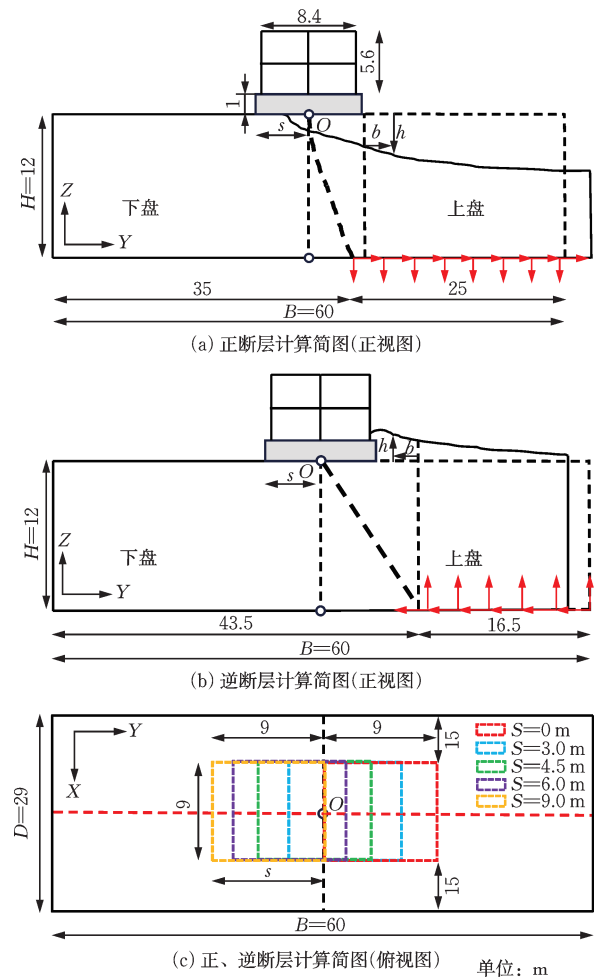


图 1 计算模型简图

Fig.1 Simplified diagram of calculation model

$H=12$ m, 长 $B=60$ m, 宽 $D=29$ m, 依据 J. D. Bray^[27] 的结论, 为了使土中等效塑性应变变化的区域大小达到合理水平, 令 $B=5H$ 。s 为基础端部距土体表面中部距离, 如图 1(c) 所示, 共设置 $s=0$ m、 $s=3.0$ m、 $s=4.5$ m、 $s=6.0$ m、 $s=9$ m 五个工况, $s=3.0$ m、 $s=4.5$ m、 $s=6.0$ m 三个工况中建筑跨越了断层。 b 、 h 为土体表面在 Y、Z 方向的土体表面位移, 本文只研究对比图 1(c) 中主动盘和被动盘 9 m 范围内的土体表面位移。依据 I. Anastasopoulos^[18] 和 M. Fadaee 等^[20] 对建筑的建模, 建立图 2

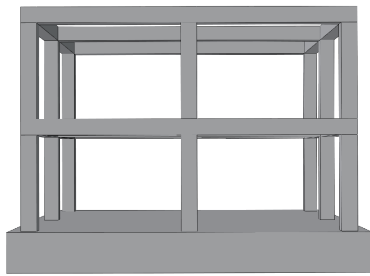


图 2 筏形及其上部框架建模

Fig.2 Modeling of raft foundation and its upper frame

中筏形、条形基础及其上部双层框架的模型, 基础高 1 m, 长宽均为 9 m, 条形基础梁宽 0.7 m, 两层框架结构高 5.6 m, 长宽均为 8.4 m。梁、柱横截面尺寸均为 0.4×0.4 m。框架与基础通过布尔操作合并为一个部件实体。为简化计算, 建筑直接置于土体上方, 土体建筑和土体的接触面采用摩擦接触面形式。

1.2 模型本构及网格划分

计算时土体选用 Mohr-Coulomb 本构模型, 建筑按完全弹性材料考虑, 使用强度等级为 C20 的混凝土。具体材料参数见表 1。土体左侧 21 m 区域使用 $1 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 网格划分, 右侧 39 m 区域使用 $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 网格划分, 土体网格高度与土体高度之比接近 2.5%^[28], 使塑性应变区宽度达到合理水平, 结构使用 $0.2 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$ 网格划分, 具体网格划分见图 3 所示。网格均采用八结点线性六面体单元。

表 1 材料物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of materials

模型	材料	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	E/MPa	泊松比/ μ	内摩擦角 $\phi/(^{\circ})$	黏聚力 c/kPa
土体	土	1.87	40	0.3	35	50
结构	C20	2.40	25 500	0.2		

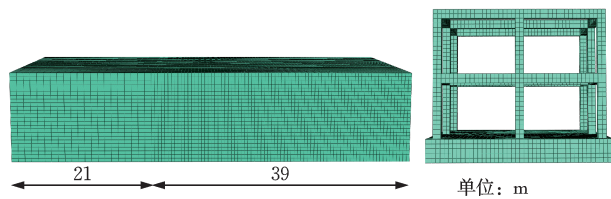


图 3 土体及建筑网格划分

Fig.3 Soil and building mesh division

1.3 边界条件设置

M_w 为 6~7 级的地震中断层错动速率一般为 1 m/s ^[29]。如图 1(a) 所示, 在上盘底面 25 m 区域内施加垂直错动位移 $z=-2$ m, 水平错动位移 $y=2$ m, 错动速率为 1 m/s , 在下盘底面 35 m 区域内施加固定约束, 以模拟正断层错动。如图 1(b) 所示, 在上盘底面 16.5 m 区域内施加垂直错动位移 $z=1$ m, 水平错动位移 $y=-1$ m, 错动速率 1 m/s , 在下

盘底面 43.5 m 区域内施加固定约束, 以模拟逆断层错动。等效塑性应 PEEQ 为加载过程中塑性应变绝对值之和, 大于 0 表明材料发生了屈服, 可用其表征断层错动引发的土体破裂情况^[30]。两种断层错动方式均在土体上无建筑的工况下使得等效塑性应变区沿图 1(a)、(b) 中的红色虚线在图 1(c) 所示的红色长虚线所划分的剖面上穿过土体至土体表面中部点 O 处, 如图 4(g)、图 5(g) 所示。

2 分析和结果

实际案例中, 建筑破坏形式和其下方土体变形受其与地表破裂露头位置相对方位的影响。为探究建筑在正断层、逆断层错动下的地表破裂—基础—结构相互作用规律, 研究对比了土体上无建筑的工况和土体上建筑相对于地表破裂露头位置处于不同方位的五个工况。

2.1 等效塑性应变区变化情况

正断层错动下,图4(a)~(f)为沿图1(c)中红色长虚线所划分的等效塑性应变剖面,红色虚线所包含范围为土体上无建筑的工况下等效塑性应变达到0.567~2.549的区域。图4(g)~(l)使用红色实线在等效塑性应变剖面的正视图上标注了六种工况下的等效塑性应变区的发展趋势,并将塑性应变区的发展趋势线一并绘制在图6中。图4(m)~(r)为六种工况下的等效塑性应变区在土体表面发展情况。与土体上无建筑的等效塑性应变剖面图相比, $s=0$ m时,在建筑重力与断层位错共同作用下,基础靠被动盘侧下方土体发生较大形变,等效塑性应变大于0.851的区域发展至土体表面,基础下方等效塑性应变区向被动盘侧有较小偏移。 $s=3.0$ m时,等效塑性应变大于0.851的区域发展至基

础下方,但并未与土体内部的区域贯通,且基础下方的塑性应变区向被动盘侧偏移2.0 m。 $s=4.5$ m时,基础下方等效塑性应变区域向被动盘侧偏移2.5 m。 $s=6.0$ m时,基础下方的塑性应变区发展趋势同 $s=4.5$ m时相似,但等效塑性应变大于0.662的区域由土体内部发展至土体表面。 $s=9.0$ m时,受建筑重力影响,基础下方等效塑性应变区向主动盘侧有较小偏移。由图6可见, $s=3.0$ m, $s=4.5$ m和 $s=6.0$ m三种工况下,受土体上建筑影响,等效塑性应变区在距土体中部3.0 m,土体表面8.5 m处向被动盘侧产生偏移,在距土体中部1.2 m,土体表面5.0 m处向主动盘侧产生新的发展趋势,并在距土体中部2.7 m,土体表面1.0 m处中止。图4(m)~(r)为六种工况下的等效塑性应变区在土体表面变化情况, $s=0$ 至 $s=6.0$ m六种工况中,等效塑性应变大于0.189的区域在增大。

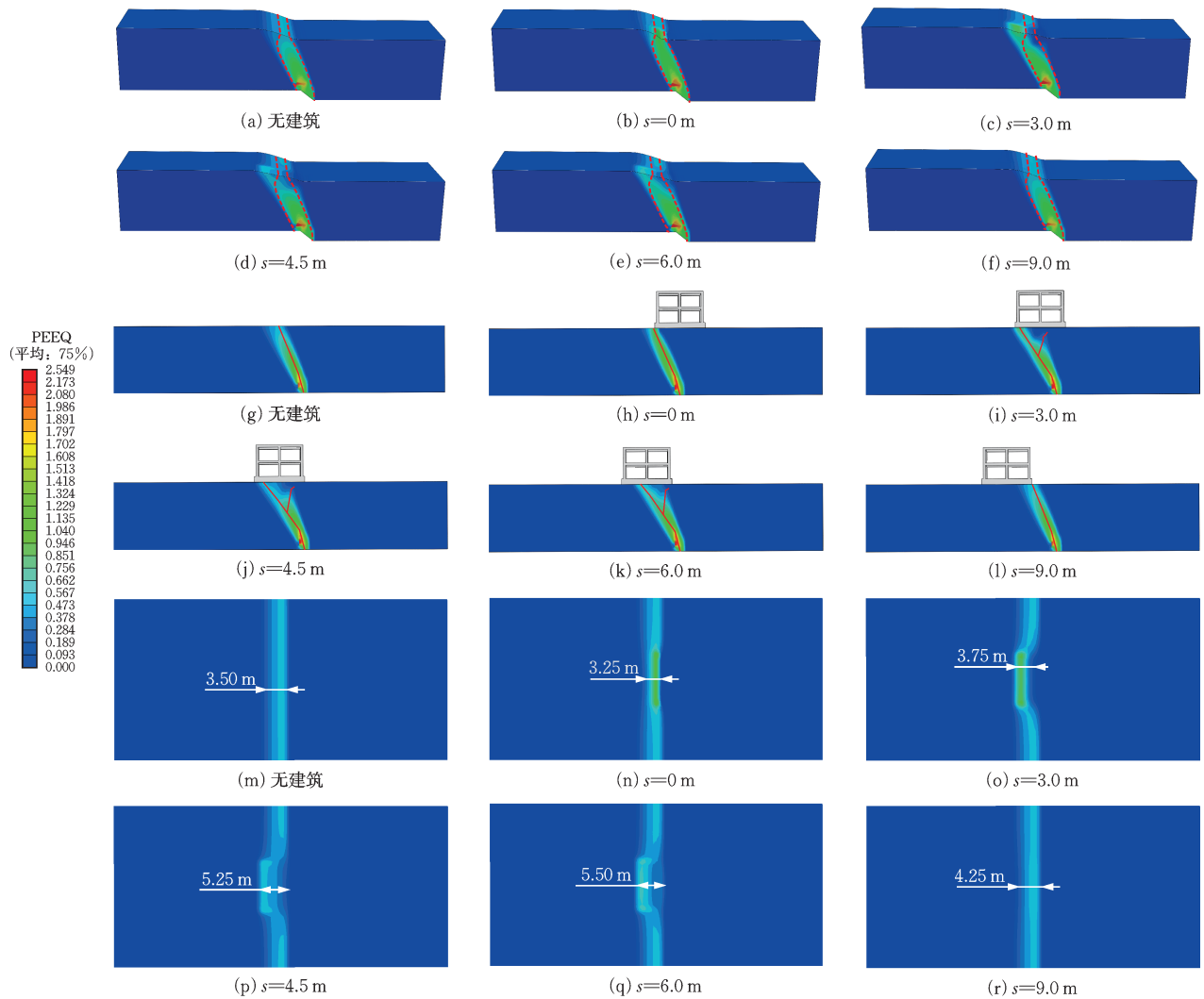


图4 等效塑性应变图(正断层错动)

Fig.4 Equivalent plastic strain maps (normal fault dislocation)

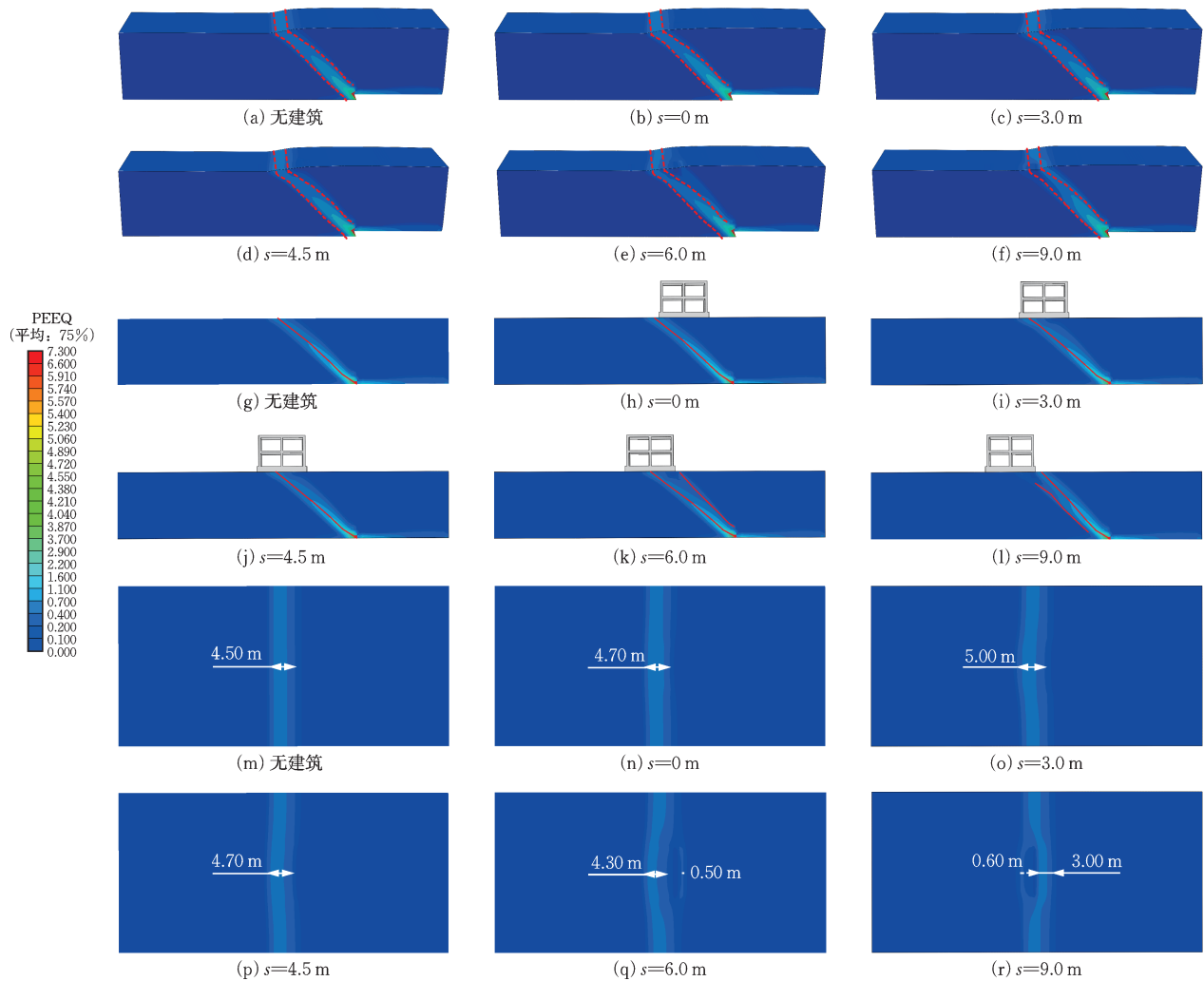


图5 等效塑性应变图(逆断层错动)

Fig.5 Equivalent plastic strain maps (reverse fault dislocation)

逆断层错动下,图5(a)~(f)中,等效塑性应变剖面图上红色虚线所包含范围为土体上无建筑的工况下等效塑性应变达到0.567~2.549的区域。图5(g)~(l)使用红色实线在等效塑性应变剖面的正视图上标注了六种工况下的等效塑性应变区的发展趋势,并将塑性应变区的发展趋势线一并绘制在图7中。与土体上无建筑的等效塑性应变剖面图相比,由图7可见, $s=0\text{ m}$, $s=3.0\text{ m}$, $s=4.5\text{ m}$ 和 $s=6.0\text{ m}$ 时三种工况下,建筑基础位于被动盘的部分越多,基础下方等效塑性应变区向被动盘侧偏移越明显,最大可至2.0 m。其中 $s=6.0\text{ m}$ 时,部分等效塑性应变大于0.2小于0.4的区域在基础下方土体中改变走向并在主动盘侧贯穿土体至表面,距土体中部3.5 m。 $s=9.0\text{ m}$ 时,受建筑重力影响,等效塑性应变区向主动盘侧偏移1.75 m,基础下方部分等效塑性应变大于0.2小于0.4的区域向被动盘侧发展,未贯穿土体至表面,在距土体中部1.0 m,土体

表面2.0 m处中止。图5(m)~(r)为六种工况下的等效塑性应变区在土体表面变化情况,等效塑性应变大于0.200的区域未有显著变化。

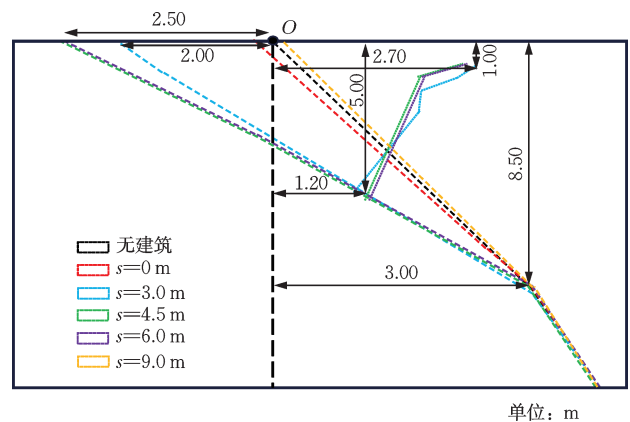


图6 塑性应变区发展趋势线(正断层错动)

Fig.6 Development trend lines of plastic strain zone (normal fault dislocation)

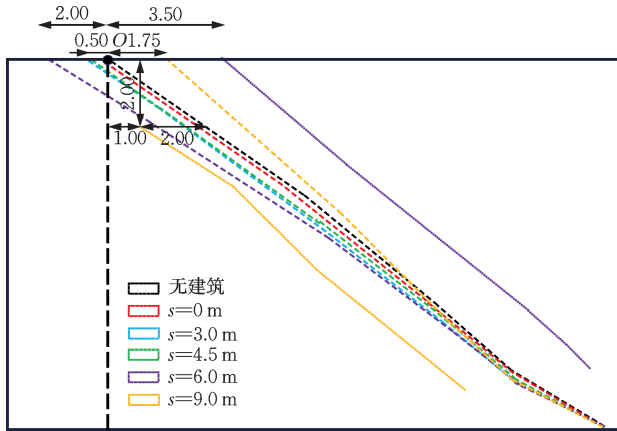


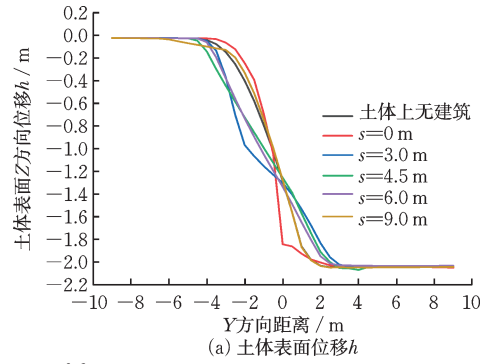
图7 塑性应变区发展趋势线(逆断层错动)

Fig.7 Development trend lines of plastic strain zone (reverse fault dislocation)

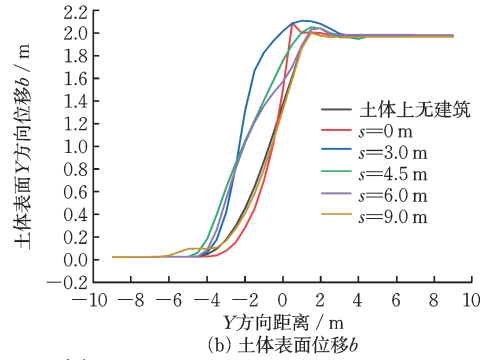
2.2 土体表面位移变化情况

图8为正断层错动后基础下方土体表面位移随Y方向距离变化图。相对位移 Δh 和相对位移 Δb 为土体上有建筑下的土体表面位移与土体上无建筑下的之差, Δh 大于0表明相对于土体上无建筑的工况,土体上有建筑的工况下的土体表面位移减小, Δb 大于0表明相对于土体上无建筑的工况,土体上有建筑的工况下的土体表面位移增大。由图8(a)、(c)可见,同土体上无建筑的工况相比, $s=0$ m时,由于建筑完全位于主动盘上,受其重力与断层位错共同作用,基础靠被动盘侧下方土体表面位移 h 显著增大,峰值达到0.56 m,同时被动盘上 h 有所减小,峰值达到0.19 m,该结果符合图4(b)中土体变形情况。在 $s=3.0$ m至 $s=6.0$ m的三种工况中,随着建筑基础位于被动盘的部分越多,基础下方的主动盘上 h 显著减小,峰值由0.33 m减小至0.29 m,再至0.21 m,基础下方的被动盘上 h 显著增大,峰值由0.57 m减小至0.33 m。 $s=9.0$ m时,由于建筑完全位于被动盘上, h 未见明显变化。由图8(b)、(d)可见,与土体上无建筑的工况相比,土体上有建筑的土体表面位移 b 总体上明显增大, $s=3.0$ m时 b 增大的峰值达到1.0 m, $s=0$ m时 b 减小的峰值达到0.2 m。

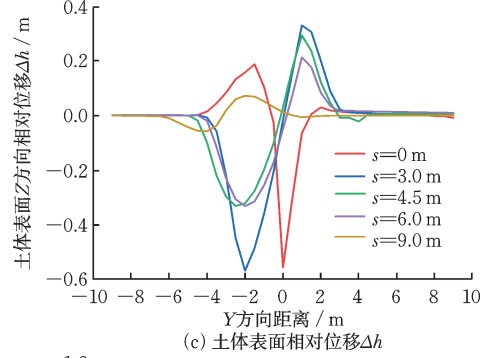
图9为逆断层错动后基础下方土体表面位移随Y方向变化图。 Δh 小于零表明相对于土体上无建筑的工况,土体上有建筑的工况下的土体表面位移减小, Δb 小于零表明相对于土体上无建筑的工况,土体上有建筑的工况下的土体表面位移增大。由图9(a)、(c)可见,与土体上无建筑的工况相比,在 $s=0$ m至 $s=9.0$ m的五种工况中,建筑基础位于被



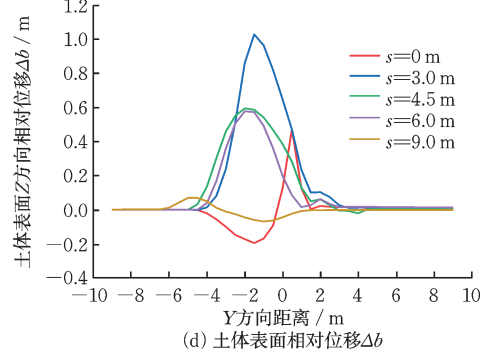
(a) 土体表面位移 h



(b) 土体表面位移 b



(c) 土体表面相对位移 Δh



(d) 土体表面相对位移 Δb

图8 土体表面位移(正断层错动)

Fig.8 Soil surface displacement (normal fault dislocation)

动盘的部分越多,基础下方的主动盘上 h 显著减小,其减小的峰值逐渐增大,峰值所在位置逐渐向被动盘侧移动, $s=9.0$ m时减小的峰值在0处达到最大值0.3 m,基础下方的被动盘上 h 有所增大,其增大的峰值在 $s=3.0$ m时达到最大值0.09 m。由图9(b)、(d)可见,与土体上无建筑的工况相比,在 $s=0$ m至 $s=9.0$ m的五种工况中,土体上有建筑的

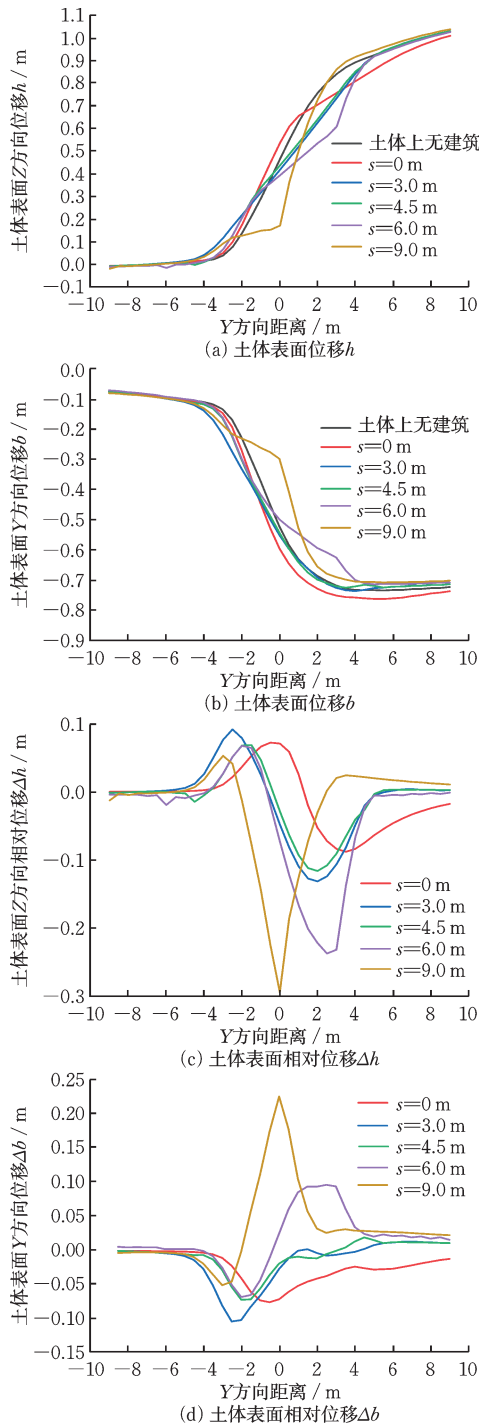


图9 土体表面位移(逆断层错动)

Fig.9 Soil surface displacement (reverse fault dislocation)

土体表面位移 b 在被动盘上增大, $s=3.0$ m 时增大的峰值在 -2.5 m 处达到最大值 0.1 m, 在 $s=3.0$ m 至 $s=9.0$ m 的四种工况中, b 在主动盘上减小, $s=9.0$ m 时减小的峰值在 0 m 处达到最大值 0.22 m。

对于跨断层建筑, 正断层错动下, 由图 10(a) 可见其基础底面与土体表面之间的压力在被动盘侧增大, 在主动盘侧减小, 被动盘侧压力的增大造成

摩阻力增大导致了被动盘侧土体表面竖直方向上的变形增大, 而主动盘侧压力的减小造成摩阻力减小, 两侧摩阻力差异抑制了主动盘侧土体表面竖直方向上的变形, 最大可减小 16% ; 逆断层错动下, 由图 13(a) 可见其基础底面与土体表面之间的压力在被动盘侧减小, 在主动盘侧增大, 随之两侧的摩阻力差抑制了主动盘侧土体表面竖直方向上的变形, 最大可减小 36% 。可见正、逆断层作用下, 跨断层建筑下方主动盘土体竖直方向上的变形减小, 被动盘上的增大。

2.3 基础弯矩及其下土体表面压力与结构应力变化情况

图 10(a) 为正断层错动后基础下方土体表面压力 P 与加载前 p 比值图。 $s=0$ m 时, 在基础下方约 $1\sim 8$ m 区域内, P/p 的值为零, 则基础与土体表面分离, 基础两侧与土体表面接触且其右侧下方压力 P 显著增大; $s=3.0$ m 时, 在基础下方约 $3.5\sim 8$ m 区域内, 基础与土体表面分离, 基础与土体接触区域内土体表面压力 P 显著增大; $s=4.5$ m 时, 基础与土体表面分离区域缩小至约 $5.5\sim 7.5$ m 范围内, 基础与土体接触区域内土体表面压力 P 较上述两种工况有所减小; $s=6.0$ m 时, 在基础下方约 $0\sim 2$ m 区域内,

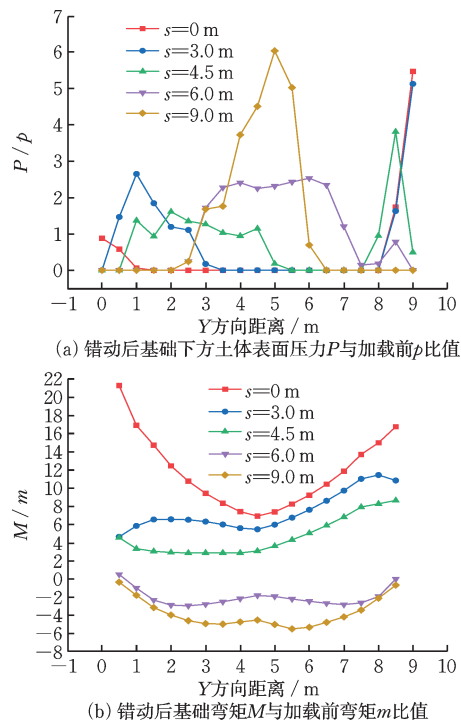


图 10 基础下方土体表面压力和基础弯矩(正断层错动)

Fig.10 Soil surface pressure under foundation and bending moment of foundation (normal fault dislocation)

基础与土体表面分离,基础与土体接触区域内土体表面压力 P 较加载前压力 P 最多增大至两倍; $s=9.0$ m时,在基础下方约0~2 m和6.5~9 m区域内,基础与土体表面分离,基础中部与土体接触区域内土体表面压力 P 达到峰值。

图10(b)为正断层错动后基础弯矩 M 与加载前弯矩 m 比值图。在 $s=0$ m至 $s=4.5$ m的三种工况中,随着基础位于被动盘的部分越多,基础与土体表面分离区域逐渐缩小,错动后基础弯矩 M 与错动前弯矩 m 比值也逐渐减小。随着基础与土体表面接触区域逐渐增大,基础两端所受弯矩显著减小。由于基础中部与土体分离,两端与土体接触,基础

形成类似于“简支梁”的受力形式的结构。图11(a)中对梁端和柱端进行了标注。由图11(b)、(c)、(d)可见,基础底部均受拉且拉应力逐渐较小,基础上部受压。由图12可见,基础上方框架中,梁上部4处、下部7处和柱下部E处均受到较大拉应力,在 $s=3.0$ m时达到最大值。在 $s=6.0$ m至 $s=9.0$ m的两种工况中,由于基础在其与土体表面分离区域内形成类似于“悬臂梁”的受力形式的结构, M/m 的值均小于零,且基础弯矩 M 逐渐增大。由图11(e)、(f)可见,基础底部均受压,基础上部受拉。基础上方框架中,梁上部2处、下部5处和柱下部A、C处均受到较大拉应力,在 $s=6.0$ m时最大。

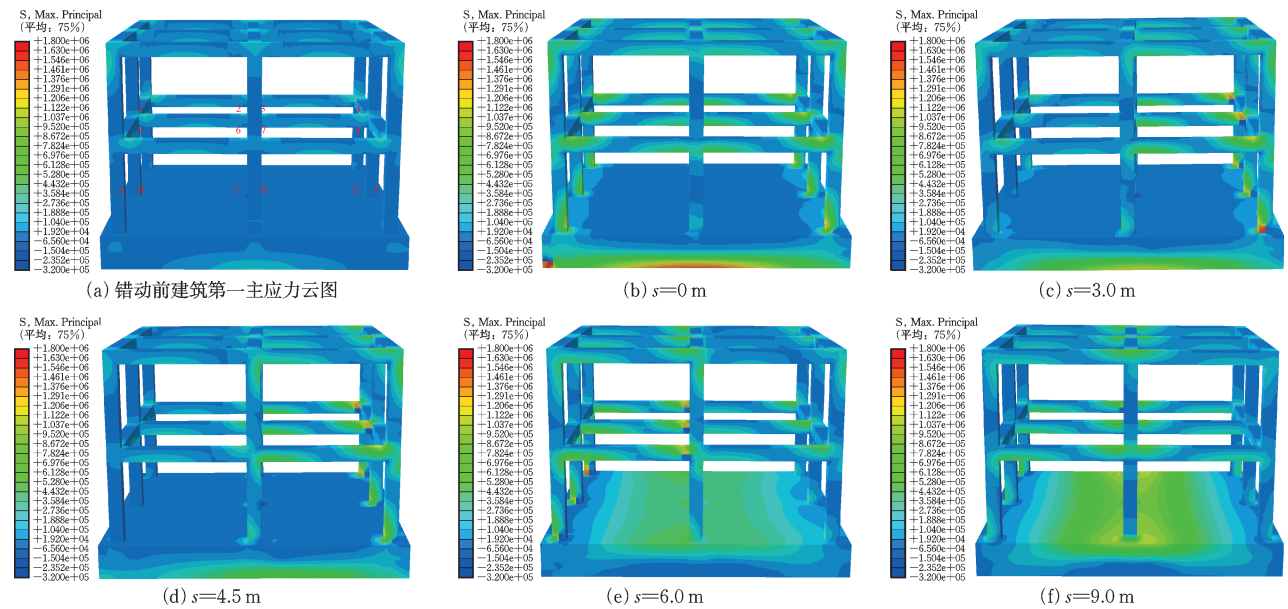


图11 建筑第一主应力云图(正断层错动)

Fig.11 Contour maps of first principal stress of building (normal fault dislocation)

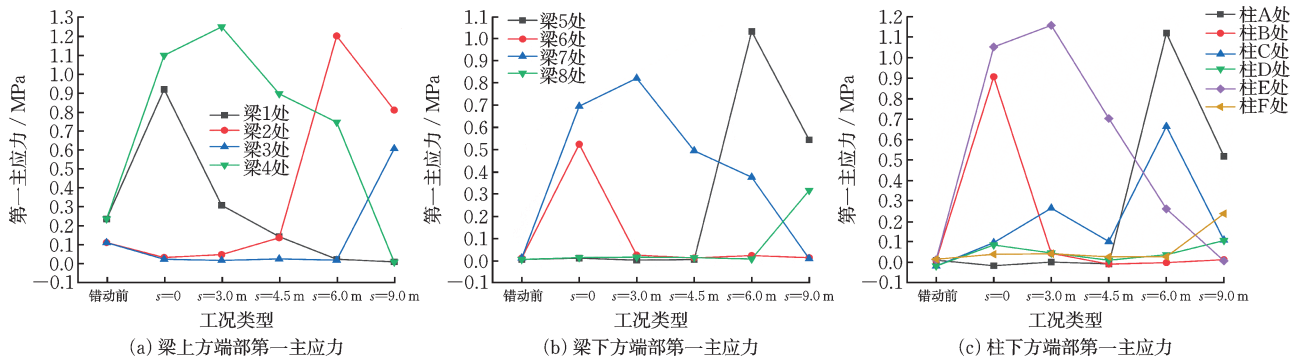


图12 框架上梁和柱端第一主应力(正断层错动)

Fig.12 First principal stress of beam and column ends in frame (normal fault dislocation)

图13(a)为逆断层错动后基础下方土体表面压力 P 与加载前 p 比值图。 $s=0$ m时,在基础下方0~2 m和6~9 m区域内, P/p 的值为0,基础与土体表面

分离,基础与土体接触区域内,压力在4.5 m处达到峰值; $s=3.0$ m时,基础与土体在7.5~9 m区域内和0处分离,基础与土体接触区域内,压力在5.0~

5.5 m 范围内达到峰值; $s=4.5$ m 时, 基础与土体在 1~2.5 m 和 8.5~9 m 区域内分离, 基础与土体接触区域内, 压力在 5.5 m 范围内达到峰值; $s=6.0$ m 时, 基础与土体在 1~4 m 区域内分离; $s=9.0$ m 时, 基础与土体在 1~5.5 m 区域内分离。后两种工况中基础两端与土体接触区域内压力显著增大。

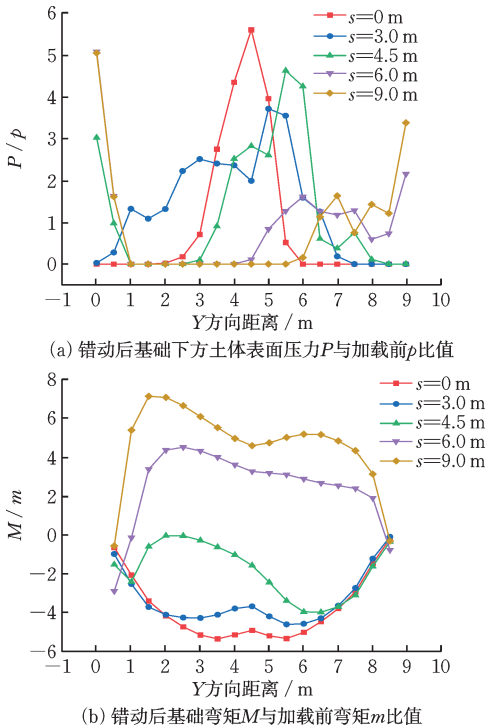


图 13 基础下方土体表面压力和基础弯矩(逆断层错动)

Fig.13 Soil surface pressure under foundation and bending moment of foundation (reverse fault dislocation)

图 13(b) 为逆断层错动后基础弯矩 M 与加载前弯矩 m 比值图。在 $s=0$ m 至 $s=3.0$ m 的两种工况中, 随着基础位于被动盘的部分越多, 基础与土体表面分离区域缩小, 在 2.0~6.5 m 范围内, M/m 的值减小, 2.0~6.5 m 范围外, 比值仅有微小变化。基础在其与土体表面分离区域内形成类似于“悬臂梁”的受力形式的结构, 由于基础两端与土体分离, 基础中部与土体接触, 基础上弯矩均小于零, 由图 14(b)、(c) 可见, 基础上部受拉应力且拉应力减小, 下部受压应力。由图 15 可见, 基础上方框架中, 梁上部 3 处和下部 8 处和柱下部 F 处受到较大拉应力。 $s=4.5$ m 时, 基础右端形成类似于“悬臂梁”的受力形式的结构, 基础左侧形成类似于“简支梁”的受力形式的结构, 所以其右段弯矩为负, 左端弯矩为正, 由图 14(d) 所示, 基础右侧上部受拉应力, 基础左侧上部出现压应力区。基础上方框架中, 梁上部 3 处和下部 8 处和柱下部 F 处受到的拉应力小于前两种工况。在 $s=6.0$ m、 $s=9.0$ m 的两种工况中, 基础位于被动盘的部分逐渐增大, 基础与土体表面分离区域增大, M/m 的值增大。基础形成类似于“简支梁”的受力结构, 基础上弯矩大于零, 由图 14(e)、(f) 可见, 基础上部受压应力, 下部受拉应力且拉应力增大。基础上方框架中, 梁上部 1 处和下部 6 处和柱下部 B 处受到较大拉应力。

由图 12、15 可见, 正、逆断层作用下, 对于采用筏形基础的跨断层建筑, 在 $s=4.5$ m、 $s=6.0$ m 的

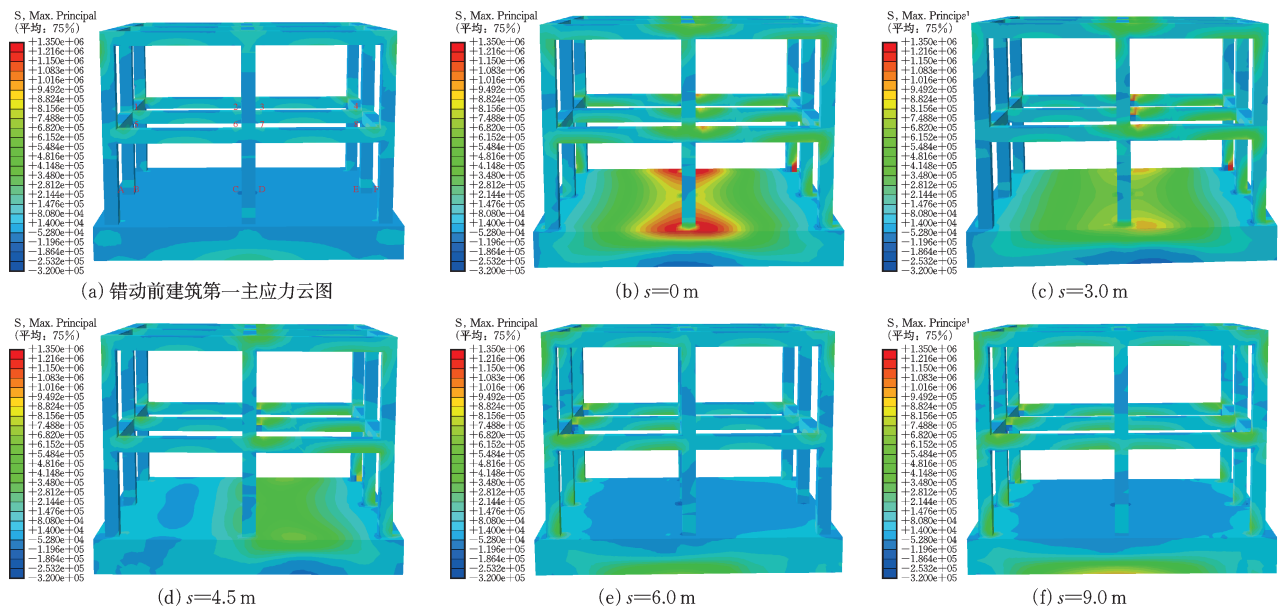


图 14 建筑第一主应力云图(逆断层错动)

Fig.14 Contour maps of first principal stress of building (reverse fault dislocation)

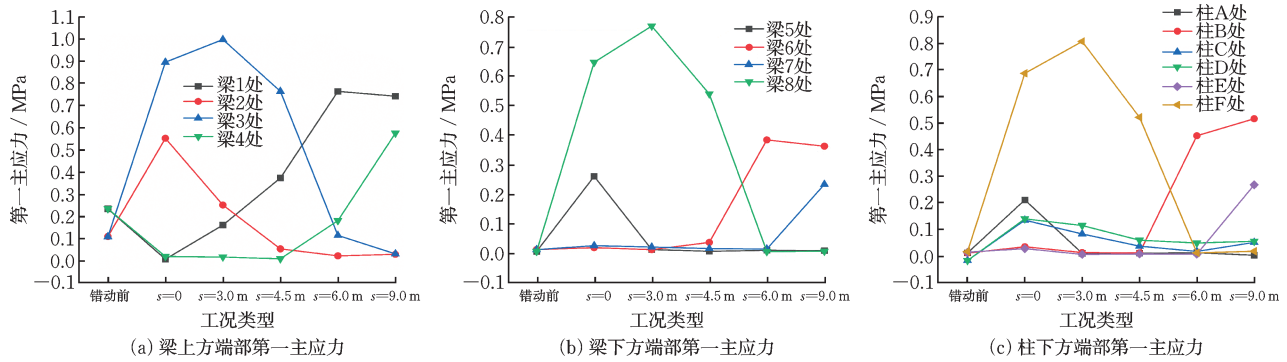


图15 框架上梁和柱端第一主应力(逆断层错动)

Fig.15 First principal stress of beam and column ends in frame (reverse fault dislocation)

种工况间,框架上大部分梁柱端应力较其他工况较小,但超过 $s=6.0\text{ m}$ 的工况下部分梁柱端应力仍会增大。这是由于被动盘侧错动较小,但当建筑基础位于被动盘的部分超过 $2/3$ 时,筏形基础对该位错的缓冲作用较小。可见,建筑基础位于被动盘的部分超过 $1/2$ 且小于 $2/3$ 时,框架上应力情况较理想。

3 结 论

本文通过数值模拟,在结构相对于断层引发的地表破裂露头位置不同方位的工况下,计算了正断层、逆断层引发的地表破裂—基础—结构相互作用,主要结论如下:

(1)当筏形基础及框架组成的建筑位于断层上方时,断层错动时,地表上建筑物的存在会改变破裂在近地表土体中的发展趋势。正断层错动时,跨断层建筑的重力会使其下方 $2/3$ 深度内的土体破裂从主动盘向被动盘显著偏移,并在约 $1/2$ 深度内的土体中产生向主动盘发展的次要破裂。逆断层错动时,除建筑完全位于被动盘外,基础位于被动盘的部分越多,破裂越明显地从主动盘向被动盘偏移。

(2)正断层错动时,跨断层建筑基础下方位于被动盘部分压力增大,主动盘部分压力减小,压力差造成的摩阻力差导致土体表面竖向变形在被动盘侧增大、主动盘侧减小,最大减小 16% 。同时建筑重力会增加土体受到的张拉作用,使土体表面水平变形增大;逆断层错动时,基础下方位于被动盘部分压力减小,主动盘部分压力增大,摩阻力差异、导致土体竖向变形在被动盘侧增大、主动盘侧减小,最大减小 36% 。基础位于被动盘部分越多,土体水平变形越小。

(3)随着建筑基础在被动盘部分增大,正断层错动下基础受拉区逐渐从基础下方转移到上方,逆断层错动下逐渐从上方转移到下方。两种情况下,框架梁端的拉应力普遍增大,受拉区多出现在边柱和角柱下端。较其他工况,被动盘侧错动较小且位错被跨断层基础所缓冲,筏形基础位于被动盘的部分在 $1/2$ 到 $2/3$ 之间时,框架梁柱端拉应力较小。因此,建筑处于该区域时,加强结构梁柱端部和基础上部的抗拉能力,有利于建筑抵抗断层错动的破坏。

参考文献:

[1] 胡聿贤.地震工程学[M].北京:地震出版社,2006:59-60.

[2] 郭婷婷,于贵华,徐锡伟.汶川地震灾害特征与建筑物震害原因讨论[J].工程抗震与加固改造,2010,32(4):125-133.

Guo T T, Yu G H, Xu X W. Characteristics of Wenchuan earthquake disasters and discussion on causes of buildings damage [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2010, 32(4): 125-133. (in Chinese)

[3] 张建毅,薄景山,李平,等.玉树地震地表破裂对建筑物影响的分析[J].地震工程与工程振动,2010,30(6):24-31.

Zhang J Y, Bo J S, Li P, et al. Influence of surface ruptures on buildings during $M_{7.1}$ Yushu Earthquake [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2010, 30(6): 24-31. (in Chinese)

[4] 赵纪生,吴景发,师黎静,等.汶川地震地表破裂周围建筑物重建的避让距离[J].地震工程与工程振动,2009,29(6):96-101.

- Zhao J S, Wu J F, Shi L J, et al. Setback distance determination in reconstruction along the trace of surface rupture caused by $M_s 8.0$ Wenchuan Earthquake [J]. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2009, 29(6): 96-101. (in Chinese)
- [5] 何仲太, 马保起, 李玉森, 等. 汶川地震地表破裂带宽度与断层面上盘效应[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2012, 48(6): 886-894.
- He Z T, Ma B Q, Li Y S, et al. Width and hanging wall effect of surface rupture caused by Wenchuan earthquake [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2012, 48(6): 886-894. (in Chinese)
- [6] 建筑抗震设计规范(2016年版): GB 50011—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [7] 李秀菊, 李鸿晶. 断层错动引起的上覆土体破裂演化规律研究[J]. *地震学报*, 2012, 34(6): 858-864, 880.
- Li X J, Li H J. Analysis of rupture propagation in overlying soil due to fault movement [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2012, 34(6): 858-864, 880. (in Chinese)
- [8] 齐剑峰, 赵心怡, 王成真, 等. 隐伏正断层错动引发上覆土体破裂过程的三维数值模拟[J]. *地震学报*, 2019, 41(1): 124-137.
- Qi J F, Zhao X Y, Wang C Z, et al. Three-dimensional numerical simulation of rupture process of overlying soil caused by buried normal fault movement [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2019, 41(1): 124-137. (in Chinese)
- [9] 肖莹, 卢建旗, 李山有, 等. 实时断层破裂尺度估计方法: 以2016年 M_w 7.0熊本地震为例[J]. *防灾减灾工程学报*, 2024, 44(6): 1457-1464.
- Xiao Y, Lu J Q, Li S Y, et al. Real-time fault rupture scale estimation method: A case study of the 2016 M_w 7.0 Kumamoto earthquake [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2024, 44(6): 1457-1464. (in Chinese)
- [10] 赵雷. 断层错动引发基岩上覆土层破裂及其对埋地管线的影响研究[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2004.
- Zhao L. Study on fracture of overlying soil layer on bedrock caused by fault dislocation and its influence on buried pipeline [D]. Beijing: Institute of Geophysics China Earthquake Administration, 2004. (in Chinese)
- [11] Faccioli E, Anastasopoulos I, Gazetas G, et al. Fault rupture - foundation interaction: Selected case histories [J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2008, 6(4): 557-583.
- [12] Anastasopoulos I, Gazetas G. Foundation-structure systems over a rupturing normal fault: Part I. Observations after the Kocaeli 1999 earthquake [J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2007, 5(3): 253-275.
- [13] Ulusay R, Aydan Ö, Hamada M. The behaviour of structures built on active fault zones: Examples from the recent earthquakes of Turkey [J]. *Structural Engineering*, 2002, 19(2): 149-167.
- [14] Pamuk A, Kalkan E, Ling H I. Structural and geotechnical impacts of surface rupture on highway structures during recent earthquakes in Turkey [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2005, 25(7/8/9/10): 581-589.
- [15] Bransby M F, Davies M C R, El Nahas A, et al. Centrifuge modelling of reverse fault - foundation interaction [J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2008, 6(4): 607-628.
- [16] Loli M, Anastasopoulos I, Bransby M F, et al. Caisson foundations subjected to reverse fault rupture: Centrifuge testing and numerical analysis [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2011, 137(10): 914-925.
- [17] Anastasopoulos I, Gazetas G. Foundation - structure systems over a rupturing normal fault: Part II. Analysis of the Kocaeli case histories [J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2007, 5(3): 277-301.
- [18] Anastasopoulos I, Gazetas G, Bransby M F, et al. Normal fault rupture interaction with strip foundations [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2009, 135(3): 359-370.
- [19] Anastasopoulos I, Antonakos G, Gazetas G. Slab foundation subjected to thrust faulting in dry sand: Parametric analysis and simplified design method [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2010, 30(10): 912-924.
- [20] Fadaee M, Hashemi K, Farzaneganpour F, et al. 3-storey building subjected to reverse faulting: Analysis and experiments [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2020, 138: 106297.
- [21] Bray J D. Developing mitigation measures for the hazards associated with earthquake surface fault rupture [C]//Workshop on seismic fault-induced failures—possible remedies for damage to urban facilities. [S.l.]: University of Tokyo Press, 2001: 55-79.
- [22] Bray J D. Designing buildings to accommodate earthquake surface fault rupture [C]//Improving the seismic performance of existing buildings and other structures. American Society of Civil Engineers, 2009: 1269-1280.
- [23] Oettle N K, Bray J D. Geotechnical mitigation strategies for earthquake surface fault rupture [J]. *Journal of*

- Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, 139(11): 1864-1874.
- [24] Fadaee M, Anastasopoulos I, Gazetas G, et al. Soil bentonite wall protects foundation from thrust faulting: Analyses and experiment [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, 12(3): 473-486.
- [25] Fadaee M, Ezzatyazdi P, Anastasopoulos I, et al. Mitigation of reverse faulting deformation using a soil bentonite wall: Dimensional analysis, parametric study, design implications [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016, 89: 248-261.
- [26] Rasouli H, Fatahi B. A novel cushioned piled raft foundation to protect buildings subjected to normal fault rupture [J]. Computers and Geotechnics, 2019, 106: 228-248.
- [27] Bray J D. The effects of tectonic movements on stresses and deformations in earth embankments [M]. California: University of California, Berkeley, Earthquake Engineering Research Center, 1989: 271.
- [28] 张炳焜. 断层错动数值模拟中的几个关键影响因素 [J]. 四川建筑, 2014, 34(2): 124-125, 128.
Zhang B K. Several key influencing factors in numerical simulation of fault dislocation [J]. Sichuan Architecture, 2014, 34(2): 124-125, 128. (in Chinese)
- [29] Trifunac M D, Novikova E I. Duration of earthquake fault motion in California [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1995, 24(6): 781-799.
- [30] 汪振, 钟紫蓝, 赵密, 等. 正断型断裂模拟及其对山岭隧道影响研究 [J]. 岩土工程学报, 2020, 42(10): 1876-1884.
Wang Z, Zhong Z L, Zhao M, et al. Simulation of normal fault rupture and its impact on mountain tunnels [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(10): 1876-1884. (in Chinese)

(本文编辑:周小潭)



(上接第 1463 页)

- [16] Sun C, Nagarajaiah S. Study on semi-active tuned mass damper with variable damping and stiffness under seismic excitations: Semi-active tuned mass damper with variable damping and stiffness [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2014, 21(6): 890-906.
- [17] 王梁坤, 周颖, 施卫星. 半主动变刚度变质量变阻尼 TMD 偏心结构双向减震控制研究 [J]. 建筑结构学报, 2023, 44(增 1): 138-148.
Wang L K, Zhou Y, Shi W X. Study on bidirectional damping control of TMD eccentric structure with semi-active variable stiffness and variable damping [J]. Journal of Building Structures, 2023, 44(Sup1): 138-148. (in Chinese)
- [18] 王梁坤, 周颖, 施卫星. 半主动调谐质量阻尼器对随机人群荷载振动控制 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2024, 52(10): 1483-1491.
Wang L K, Zhou Y, Shi W X. Semi-active tuned mass dampers for vibration control of random crowd load [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2024, 52(10): 1483-1491. (in Chinese)
- [19] Yuan M, Sadhu A, Liu K. Condition assessment of structure with tuned mass damper using empirical wavelet transform [J]. Journal of Vibration and Control, 2018, 24(20): 4850-4867.
- [20] Lu Z, Chen X Y, Zhou Y. An equivalent method for optimization of particle tuned mass damper based on experimental parametric study [J]. Journal of Sound and Vibration, 2018, 419: 571-584.
- [21] Den Hartog J P. Mechanical vibrations [M]. Manhattan: John Siley and Sons, Inc, 1957.
- [22] Marian L, Giaralis A. Optimal design of a novel tuned mass-damper-inerter (TMDI) passive vibration control configuration for stochastically support-excited structural systems [J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2014, 38: 156-164.