

泾阳—渭南活动断裂带场地形变与地层应力特征数值分析

陈绰裕, 黄强兵, 解庆禹, 李 伦

Numerical analysis of site deformation and formation stress characteristics of Jingyang–Weinan active fault zone

CHEN Chuoyu, HUANG Qiangbing, XIE Qingyu, and LI Lun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202304056>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

中尼铁路佩枯措至吉隆段第四纪断裂活动性与工程选线设计

Quaternary fault activity and engineering effects along the Peikucuo–Gilong segment of the China–Nepal railway

刘道胜 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 65–78

青藏高原巴塘断裂带地震滑坡危险性预测研究

Predicting seismic landslide hazard in the Batang fault zone of the Qinghai–Tibet Plateau

杨志华, 郭长宝, 吴瑞安, 钟宁, 任三绍 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 91–101

基于离心机数值模拟的软硬互层反倾层状岩质边坡变形特征分析

An analysis of the deformation characteristics of soft–hard interbedded anti–tilting layered rock slope based on centrifuge and numerical simulation

李彦奇, 黄达, 孟秋杰 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 141–150

活动断层作用下地裂缝开裂机理研究

A study of the cracking mechanism of ground fissures under the action of active faults

邵长庆, 杨强, 李浩, 马学军, 王兵虎, 宋伟, 吕凤兰, 边文英 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 34–41

西藏波密冰川覆盖区大型河流与断裂带地下水转化关系

Transformation characteristics of the large–flow river and groundwater in the fault zone in the glacier–covered area of Bomi in Tibet

马剑飞, 李向全, 张春潮, 付昌昌, 白占学, 王振兴 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 23–33

地下水井水位及化学组分的同震差异响应特征分析

An analysis of the coseismic differential response characteristics of well water levels and chemical components : A case study triggered by the Qingbaijiang earthquake

顾鸿宇, 王东辉, 李胜伟, 郑万模, 刘港, 向元英, 李丹, 陈能德 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 44–53



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202304056

陈绰裕, 黄强兵, 解庆禹, 等. 泾阳—渭南活动断裂带场地形变与地层应力特征数值分析 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(5): 136-149.

CHEN Chuoyu, HUANG Qiangbing, XIE Qingyu, et al. Numerical analysis of site deformation and formation stress characteristics of Jingyang–Weinan active fault zone[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(5): 136-149.

泾阳—渭南活动断裂带场地形变与地层应力特征 数值分析

陈绰裕¹, 黄强兵^{1,2}, 解庆禹¹, 李 伦¹

(1. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054;

2. 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要: 西安地铁十号线穿越的泾阳—渭南断裂, 该断裂为全新世活动断裂, 黏滑发震与同震位错对地铁线路构成潜在安全威胁。为揭示泾阳—渭南断裂带黏滑发震和同震位错作用引起的场地形变与地层应力特征, 以西安地铁十号线穿越泾阳—渭南断裂带为工程背景, 建立断裂带场地同震位错与黏滑发震地质力学模型, 考虑不同位错量及发震强度, 开展断裂带场地形变及应力场特征的数值模拟分析。结果表明: 同震位错下场地在断裂带附近上、下盘分别出现应力降低区和增强区, 场地呈反“S”形差异沉降破坏, 差异位移在断裂带处达到峰值且塑性区集中, 上盘变形范围与塑性区分别为下盘的 1.67 倍和 2.50 倍; 黏滑发震作用下场地在断裂带附近位移量及差异形变均达到峰值, 大震时场地位移影响范围约为中震的 6.50 倍, 且具有典型的上盘放大效应, 远离断裂带时位移呈线性递减; 大震时地表峰值加速度放大系数受影响范围为中震时 1.14 倍, 场地呈“V”形剪切破坏, 上盘塑性区范围约为中震时 1.40 倍, 而下盘则为 1.00 倍。研究结果可为西安地铁线路穿越泾阳—渭南断裂带场地的抗震设防提供科学依据与参考借鉴。

关键词: 泾阳—渭南活动断裂; 同震位错作用; 黏滑发震; 场地形变; 地层应力; 数值模拟

中图分类号: P642.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)05-0136-14

Numerical analysis of site deformation and formation stress characteristics of Jingyang–Weinan active fault zone

CHEN Chuoyu¹, HUANG Qiangbing^{1,2}, XIE Qingyu¹, LI Lun¹

(1. School of Geological Engineering and Surveying, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

2. Key Laboratory of Western China's Mineral Resources and Geological Engineering,

Ministry of Education, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: The Jingyang–Weinan Fault that Xi'an Metro Line 10 crosses is a Holocene active fault, and its future stick-slip earthquakes and coseismic dislocations pose a potential threat to the metro line. To reveal the deformation and stratum stress characteristics of the site caused by the stick-slip seismic and coseismic dislocations of the Jingyang–Weinan Fault zone, based on the Jingyang–Weinan fault zone crossed by Xi'an

收稿日期: 2023-04-28; 修订日期: 2023-11-08

投稿网址: www.swdgcgz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41772274; 41372328); 陕西省科技创新团队项目 (2021TD-50; 2021TD-51)

第一作者: 陈绰裕 (2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事地质工程方面研究。E-mail: 2021126102@chd.edu.cn

通讯作者: 黄强兵 (1972—), 男, 博士, 教授, 主要从事地质工程、岩土及地下工程等方面的教学与研究。E-mail: hqb@chd.edu.cn

Metro Line 10, the geomechanical model of the fault zone site coseismic dislocations and stick-slip seismic was established, and the numerical simulation analysis of the stratum deformation and stress field characteristics of fault zone site was carried out considering different dislocation amounts and seismic intensity. The results show that under the coseismic dislocation, the stress reduction and strengthening zones appear in the hanging wall and footwall near the fault zone, and the site presents an inverse “S” shaped differential settlement failure. The differential displacement peaks at the fault zone, and the plastic zone is concentrated here. The deformation range and plastic zone of the hanging wall are 1.67 times and 2.50 times more than that of the footwall, respectively. The displacement and differential deformation of the site near the fault zone reach the peak value under the stick-slip earthquake. The influence range of the site displacement during the large earthquake is approximately 6.50 times more than that during the medium earthquake. It has a typical magnification effect on the hanging wall, and the displacement decreases linearly far away from the fault zone. The amplification factor of peak surface acceleration (PGA) in the large earthquake is 1.14 times more than that in the medium earthquake. The site shows “V” shear failure; the plastic zones of hanging wall and footwall in the large earthquake is about 1.40 times and 1.00 times larger than that in the medium earthquake, respectively. This study can provide a scientific basis for the seismic fortification of Xi’an Metro Line lines crossing the Jingyang–Weinan fault zone.

Keywords: Jingyang–Weinan active fault zone; coseismic dislocation; stick-slip earthquake; site deformation; stratum stress; numerical simulation

我国位于环太平洋地震带和欧亚地震带之间, 受太平洋板块、印度洋板块和菲律宾板块的挤压, 活断层广泛分布。已发现的活动断层超过 495 条, 在我国西部地区断层活动尤其频繁^[1-4]。活断层是晚第四纪以来发生活动的断层, 其活动机制包括蠕滑和黏滑。黏滑是活动断层以地震方式产生间歇性的突然滑动, 蠕滑则是无震状态下的持续蠕动^[5-8]。活动断裂带引起上下盘发生的不均匀位错往往导致场地稳定性降低, 进而对建设于断裂场地的各类工程产生极大的安全隐患^[6,8]。全球由断层活动造成工程破坏的案例比比皆是, 如: 四川盆地的北川映秀断裂带活动, 位于其下盘的都汶公路龙溪隧道出口处场地升高 1.13 m, 断层上盘的洞外场地升高 3.70 m, 隧道多处坍塌; 美国 Hayward 断层蠕滑位错 80 mm, 致圣保罗输水隧洞运营期出现大量裂缝, 在断裂带处变形显著^[9]; 日本丹那隧道由于断层同震黏滑, 上下盘场地相对错动 4.6 m, 导致隧道钢拱架折断^[5]等, 可见活动断层危害极大。由此, 国内外学者对活动断层或活动断裂带对工程的影响开展了大量研究, 为抗震减灾做出了重要贡献, 且断层活动研究一直为学术界关注的焦点。

蠕滑对场地的破坏主要来源于断层错距, 同震位错引起断裂带上下盘差异沉降, 直接造成场地破坏。Okada^[10]提出了半无限空间弹性体解析表达式, 以分析断裂错动导致的地表土体位移变形。Zakian 等^[11]

采用有限元方法模拟北德黑兰断裂段位错引起的地壳变形, 发现地层的非均质性对同震位移场产生影响。Liu 等^[12]对活动断层蠕滑位错作用下边坡的破坏机理进行研究, 发现随着断层上下盘的持续位错, 塑性区向土体内部延伸。Wang 等^[13]及 Bao 等^[14]分别通过大型模型试验及有限元分析, 探讨断层位错对隧道的影响及隧道变形破坏机理。

断层黏滑发震对场地破坏相比于同震位错更加严重, 不少学者对断层黏滑活动特征及影响因素进行了研究。吕征等^[15]通过双直剪试验模拟断层黏滑运动, 研究水对断层黏滑运动的影响及黏滑特征; 董鹏等^[16]研究了断层黏滑的力学特性, 对所加载断层试样的破裂过程进行观测, 结果表明加载速率与断层整体滑移量负相关; 邓志辉等^[17]利用较大尺度的标本, 观测断层滑动摩擦过程中应变、位移, 发现能量空间分布是导致黏滑发震的主要因素, 差异大时在弱源区也可能发生失稳。王爱国等^[18]通过有限元模型研究发震断层引起的场地形变, 并考虑场地安全距离; 杨承先^[19]研究断层发震下岩性与覆盖层对场地的影响规律。杨志华等^[20]和孟振江等^[21]则通过数值模拟对断裂场地状态进行预测及特征分析。

综上所述, 目前对活动断裂的研究主要是断层的活动特征、成因机理及对工程建筑物的破坏模拟, 对断层活动下场地破坏研究相对较少, 而场地失稳是工

程破坏的最直接的因素。因此,以西安地铁十号线穿越泾阳—渭南活动断裂带为工程背景,通过数值模型分析同震位错和黏滑发震作用下断裂带场地的应力及变形特征,揭示场地随断层错动距离及地震强度增加的失稳规律,并对同震位错与黏滑发震作用下场地变形破坏特征进行讨论,研究结果可为活动断裂带场地稳定性、地铁工程抗断抗震设计及防灾减灾提供科学依据。

1 区域构造与断裂带特征

泾阳—渭南断裂位于渭河盆地固市凹陷内,自泾阳北起,向东延伸经高陵南、零口、渭南至华县附近,断裂西段走向NW,东段走向EW,倾向N,倾角为 $65^{\circ} \sim 85^{\circ}$,在地下浅部与渭河断裂相连,属于全新世活动断裂,发生右旋压性运动。渭河盆地位于华北地块西部、陕西省中部,盆地呈近东西向分布,向东逐步转变成近北东向。北部与鄂尔多斯地块相邻,南部与秦岭

地块相接。在近现代地层构造应力场下,秦岭地块与鄂尔多斯地块不断隆升,渭河盆地则相对下降,在区域内部出现了差异沉降。受近南北向拉张构造应力场的影响,活动正断层控制盆地南侧及北侧。

渭河盆地断裂方向主要为近EW、NE、NNE和NW,如图1所示。渭河盆地内分布的主要断裂有渭河断裂、乾县—蒲城断裂、秦岭北缘断裂、临潼—长安断裂等,近NW、EW排列,从边缘到中心逐级下陷,形成了阶梯状断层斜坡。渭河盆地被断裂划分成凸起区与凹陷区,自西向东分布两个次级凹陷:西安凹陷和固市凹陷。固市凹陷面积约 $3\,500\text{ km}^2$,海拔 $317 \sim 709\text{ m}$,处于渭河盆地中东部,隶属于南部拗陷带,由西北至东南,地势由高陡转变为平缓。固市凹陷内新生代断裂发育,且在秦岭造山带的构造活动下其内部断裂交错切割,其中西安市高陵区的泾阳—渭南断裂则是固市凹陷内北西及东西走向断裂^[2]。

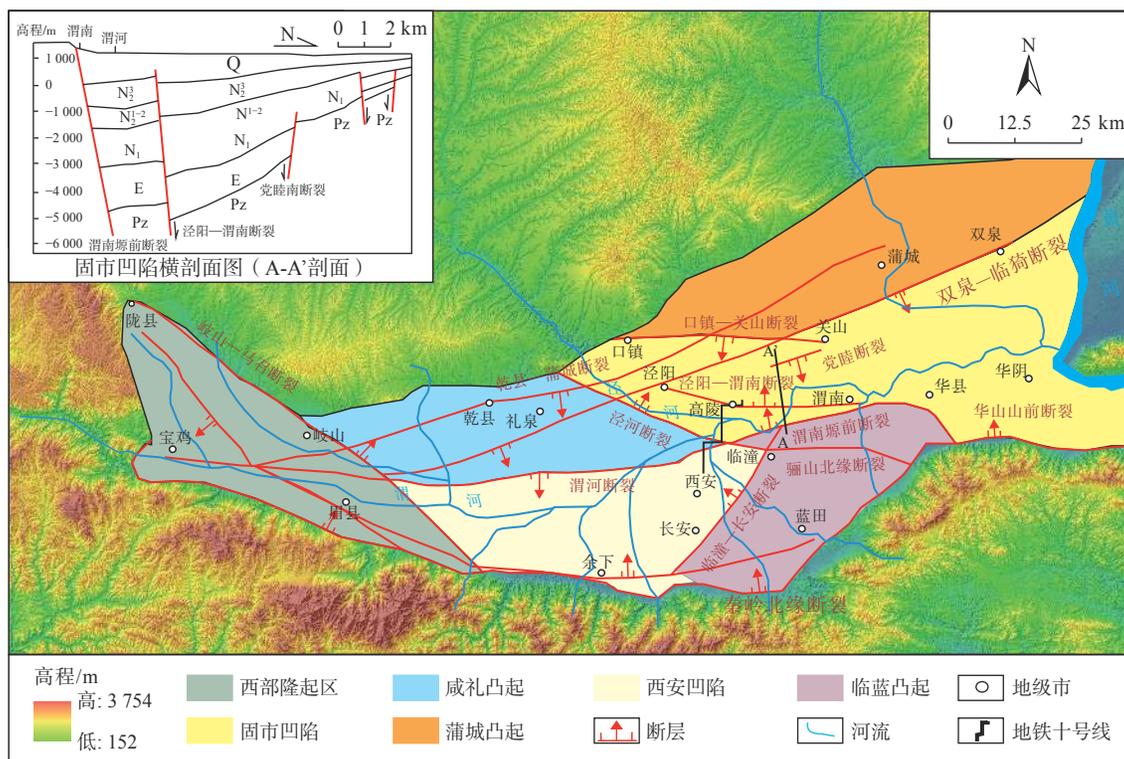


图 1 渭河盆地构造图

Fig. 1 Regional tectonic map of Weihe Basin

从第四纪开始,渭河盆地在西北部风尘物质的沉积作用下形成了巨厚的古土壤层及黄土层。据《西安市地铁十号线一期工程地裂缝及活动断裂勘察报告》^[2]资料,泾阳—渭南断裂带断裂在线路附近走向NW,倾

向NE,倾角 81° ,错断全新世黄土状土。该断裂带在渭南东段晚更新世以来有活动,西段推测断层位置处地面平坦,仍处于隐伏状态。区域内的村落沿断裂走向分布,地表可见由断层活动产生的明显起伏位错:

在沿马船路自西高路向北约 1.1 km 处, 道路呈下坡状, 路西可见明显陡坎, 高约 2.0 m; 沿仁马路向南约 0.9 km 处, 道路呈上坡状, 路东侧可见直立陡坎, 最大高差约 4.0 m。西高路剖面层古土壤底界高程错断

1.63 m(推测层黄土状土底界高程相差大于 1 m), 东盘(上盘)相对下降, 西盘(下盘)相对上升。该断裂带在地铁十号线一期穿越处地质剖面图如图 2 所示^[23-24]。

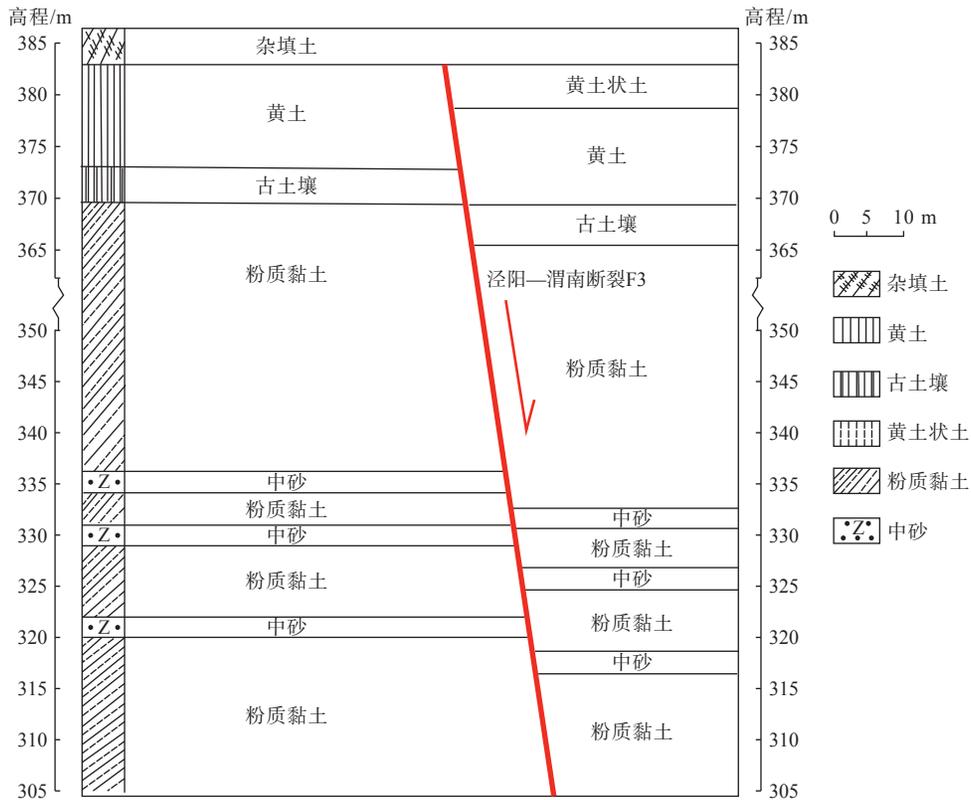


图 2 泾阳—渭南断裂工程地质简化剖面图

Fig. 2 Simplified engineering geological profile of Jingyang-Weinan fault

通过 GIS 对卫星影像的处理可以得到地质构造的地形地貌特征^[25-26], 并可进一步分析活动状态。基于 DEM 数据, 通过 Arcgis 软件得到了高陵区地貌特征图, 如图 3 所示。由图 3 可知, 高陵区总体上平均坡度和地形起伏度沿泾阳—渭南断裂显著增大, 并与地铁十号线斜交, 而高程高值主要分布在该断裂的西南侧, 即断层上盘, 如图 3(b) 所示。

断裂带处地形起伏度高值密集, 约 112 m, 平均坡度高值处于 30°~60° 间, 高程高值可达 475 m。该断裂带的上下盘落差在地形起伏度上有所体现, 同时下盘较上盘更大的高程反映了断层活动导致上下盘位错的现象。根据图 3(d) 坡度图可知, 高陵区地势整体平缓, 在与泾阳—渭南断裂平行或部分重合的地区, 坡度可达到 30°~60°。研究表明^[27] 当山体坡度大于 40° 时, 重力作用会在坡脚引起一定程度的非构造应力集中, 因此断裂还受到部分地形影响。

2 数值模拟

以西安地铁 10 号线穿越泾阳—渭南断裂带为工程背景, 分别采用 Midas GTS NX 和 FLAC^{3D} 大型数值模拟软件建立断裂带场地静力学、动力学模型, 模型尺寸为长 200 m、地层埋深 80 m 的模型, 模型底部计算基岩位置深度主要根据场地钻孔剪切波速大于 500 m/s 的地层深度确定。利用弹塑性模型模拟岩土材料、摩尔-库伦破坏准则来判定地层土体的破坏, 分析泾阳—渭南活动断裂带同震位错和黏滑发震作用下场地的形变与应力响应特征, 确定断裂带的场地影响范围。

2.1 断裂带场地同震位错模型建立

基于 Midas GTS NX 有限元数值分析软件, 建立同震位错下场地整体计算模型如图 4 所示。模型地层从上往下依次为杂填土、黄土状土、黄土、古土壤、粉质黏土及粉质黏土夹砂层, 由于地层 50~60 m 深度以

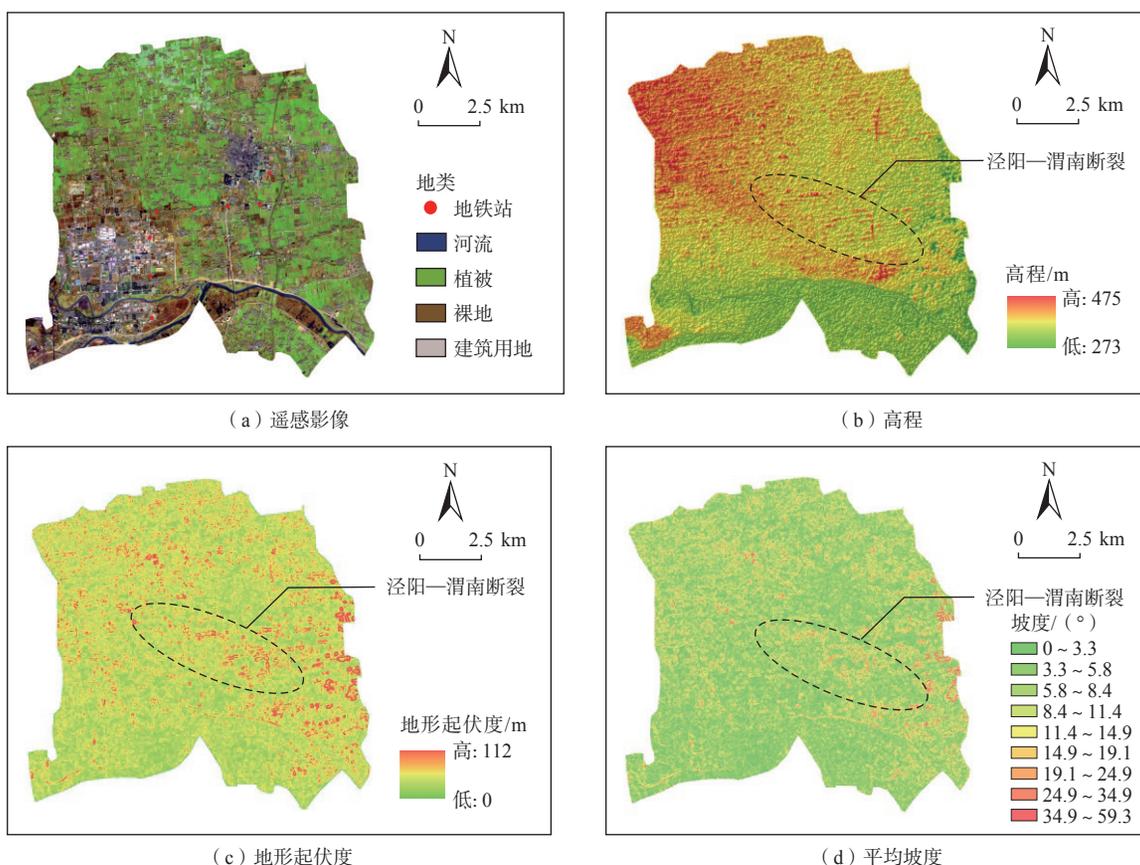


图 3 高陵区地貌特征图

Fig. 3 Geomorphic features of the hilly region

下粉质黏土多夹薄层中砂现象, 计算中作为粉质黏土夹砂层一层处理, 对断裂带上盘土体底部施加强制位移模拟断裂的错动。地层土体材料的重度(γ)、弹性模量(E)、泊松比(μ)、黏聚力(c)及内摩擦角(φ)等计算参数见表 1。

数如表 2 所示。

模拟计算时对模型左、右两侧施加固定边界, 上部设置为自由边界。在场地下盘底部施加地面支撑约束、在场地的上盘底施加向下强制位移以模拟断裂的错动过程。根据《西安市地铁十号线一期工程断裂及活动断裂勘察报告》^[23], 断裂未来最大同震垂直位移量不超过 0.5 m, 因此计算过程中分步施加强制位移 $S=10, 20, 30, 40, 50$ cm。

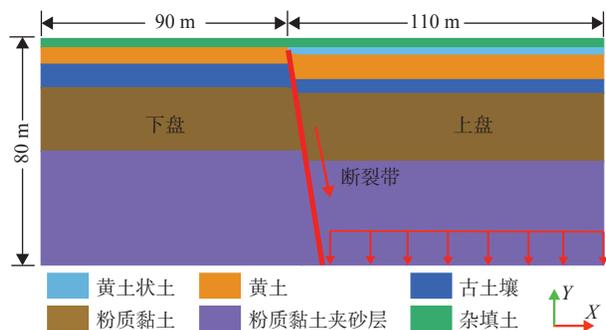


图 4 泾阳—渭南断裂场地同震位错计算模型

Fig. 4 Calculation model of Jingyang-Weinan fault site

断裂带界面接触的错动的过程利用 Interface 接触单元模拟, 该接触单元由法向刚度(K_n)、剪切刚度(K_s)、黏聚力(c)及内摩擦角(φ)等 4 个参数控制, 依据勘察资料及文献^[23-24], 确定断裂带接触面的计算参

表 1 地层土体材料参数表

Table 1 Material parameters of soils

材料类型	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	E/MPa	μ	c/kPa	$\varphi/(\text{°})$
杂填土	17.1	10	0.33	10	30
黄土状土	17.1	20	0.38	26	18
黄土	17.5	30	0.33	30	20
古土壤	18.6	40	0.30	31	23
粉质黏土	19.4	45	0.32	32	25
粉质黏土夹砂层	20.2	58	0.31	20	26

表 2 断裂带接触面计算参数

Table 2 Calculation parameters of fracture zone contact surface

接触面名称	c/kPa	$\varphi/(\text{°})$	K_n/kPa	K_s/kPa
断裂带	10	15	2 800	280

2.2 场地黏滑发震动力学模型建立

断裂带黏滑发震往往在场地上产生地震响应, 是一个动力学过程。泾阳—渭南断裂带黏滑过程动力学模型如图 5 所示。剖面地层结构从上往下依次为杂填土、黄土状土、黄土、古土壤、粉质黏土及粉质黏土夹砂层, 计算时在基岩面的底部输入地震波进行模拟计算。动力数值模拟结果受边界上地震波反射的影响很大, 因此场地黏滑发震动力响应分析采取 FLAC^{3D} 数值分析软件, 计算模型如图 6 所示。在模型四周设置自由场边界、模型底部设置静态(黏性)边界。采用实体单元模拟模型中的各类岩土体材料, 计算参数如表 3 所示。

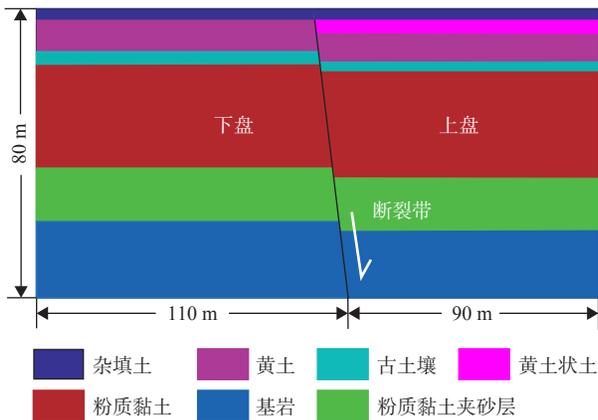


图 5 断裂带场地黏滑动力学计算模型
Fig. 5 Calculation model of fault zone site

根据西安市城市轨道交通十号线一期工程场地地震安全性评价报告^[24], 从基岩输入地铁线路跨断裂的地震动峰值加速度为 0.38 g(100 年超越概率为 2%)、0.24 g(100 年超越概率为 10%), 如图 7(a)、图 8(a)所示。由于跨越泾阳—渭南断裂的工程为地铁, 设计寿

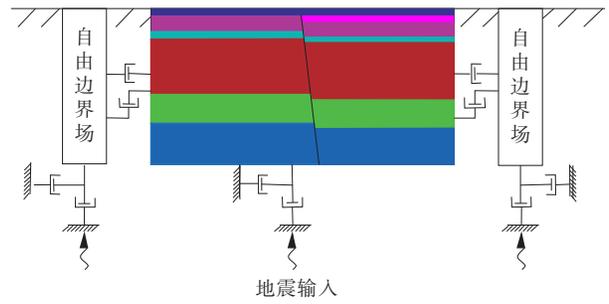


图 6 自由场边界示意图

Fig. 6 Schematic diagram of free field boundary

表 3 岩土体材料计算参数

Table 3 Calculation parameters of rock and soil mass materials

岩土材料	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	E_d/MPa	μ_d	c_d/kPa	$\varphi_d/(\text{°})$
杂填土	17.1	49.9	0.34	12	32
黄土状土	17.1	110.4	0.34	28	20
黄土	17.5	238.9	0.34	30	21
古土壤	18.6	269.6	0.34	35	22
粉质黏土	19.4	300.1	0.34	40	24
粉质黏土夹砂层	20.2	319.0	0.35	22	28

命为 100 年, 因此在数值模拟中输入 100 年超越概率分别为 10% 和 2% 的西安人工地震波进行计算, 得到断裂带场地在地震作用下的动力响应特征。采用 SeismoSignal 软件过滤掉地震波中大于 10 Hz 的高频部分, 保留集中了主要能量的低频部分, 以在满足计算要求的同时缩短计算时间。

为保证模拟计算结果的准确性, 对为 100 年超越概率 10% 和 2% 的西安人工地震波进行基线校正和滤波(滤掉大于 10 Hz 的波形), 加速时程、速度时程如图 7、图 8 所示, 2 条地震波均满足西安市八度地震烈度的要求。

Kuhlemeyer 等^[28] 认为数值模拟分析中模型的网

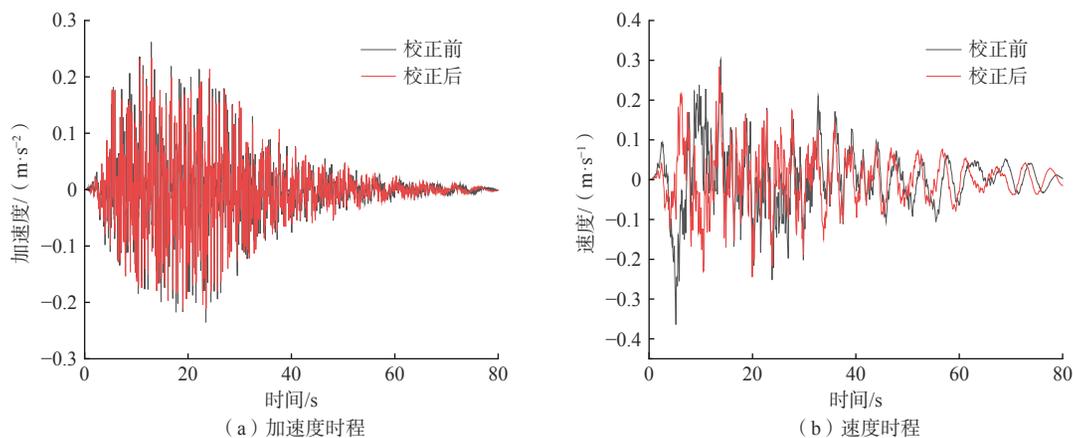


图 7 100 年超越概率 10% 的西安人工地震波

Fig. 7 Artificial seismic waves exceeding 10% probability in Xi'an during the 100 years

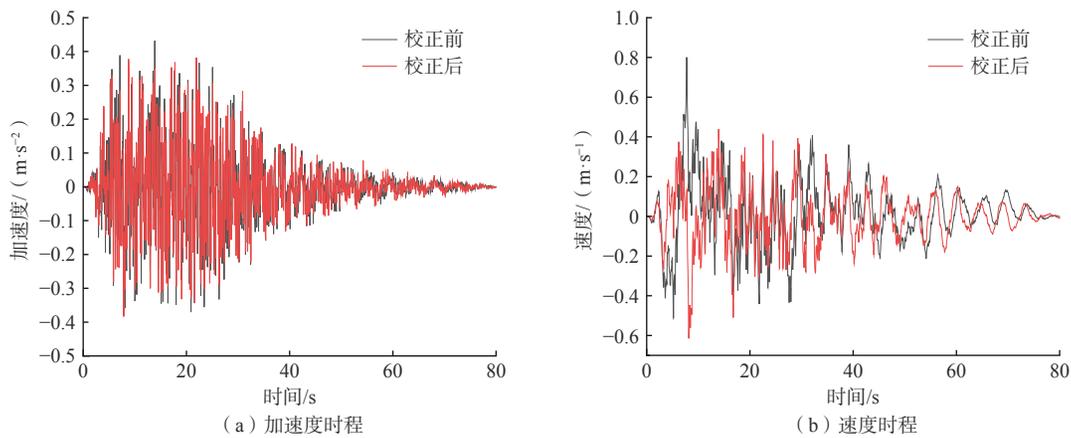


图 8 100 年超越概率 2% 的西安人工地震波

Fig. 8 Artificial seismic waves in Xi'an exceeding 2% probability in during the 100 years

格尺寸 Δl 必须满足关系式(1):

$$\Delta l \leq (1/8 \sim 1/10)\lambda \quad (1)$$

式中: λ ——最高频率所对应波长。

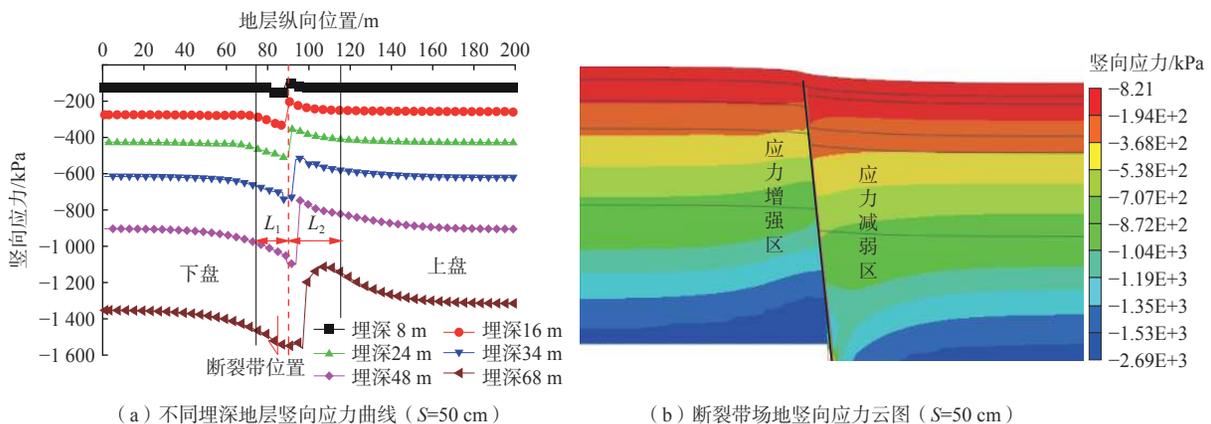
3 断裂带场地形变与地层应力响应分析

3.1 断裂场地同震位错响应分析

3.1.1 场地应力变化特征

根据断层同震位错 $S=50\text{ cm}$ 时场地竖向应力变化(图 9)来看,在断裂附近地应力被错断或不连续,其上、下盘应力的方向及大小差异显著,表现为靠近断裂处应力大小发生波动,远离断裂带应力趋于平稳;

上盘靠近断裂区(90~115 m)域呈现出应力减弱现象,下盘靠近断裂处区域(75~90 m)呈现出应力增强现象,这种规律与黄强兵等^[29]开展的地裂缝错动模型试验结果相似(图 10),说明断裂带和构造型地裂缝的活动特征相似。此外断裂带在同震位错作用下场地地表受拉伸作用产生变形,应力随深度而增加,上盘每个应力区的竖向区域范围均大于下盘。应力区的竖向影响范围随着埋深而增加,断裂带活动时下盘影响范围 $L_1=15\text{ m}$,上盘影响范围 $L_2=25\text{ m}$,上盘影响范围约为下盘的 1.67 倍,且应力区的竖向影响范围随埋深而增加。



(a) 不同埋深地层竖向应力曲线 ($S=50\text{ cm}$)

(b) 断裂带场地竖向应力云图 ($S=50\text{ cm}$)

图 9 断裂场地竖向应力特征

Fig. 9 Vertical stress characteristics of fracture site

3.1.2 地层位移变化特征

位移云图可直观反映地层土体的位移变化特征,图 11(a)为上盘施加强制位移 $S=50\text{ cm}$ (断裂错动 50 cm) 时断裂带场地竖向位移,图 11(b)为纵向位移云图及地表竖向位移曲线。从竖向位移云图中可以看出断

裂带附近地层土体的位移变化较大,上盘地层土体的竖向位移量级大于下盘,且差异变形区及影响范围更大,影响范围上盘为 50 m、下盘为 30 m,呈现出明显的上盘效应。

同时地表竖向位移曲线也表明,断裂不同位错作

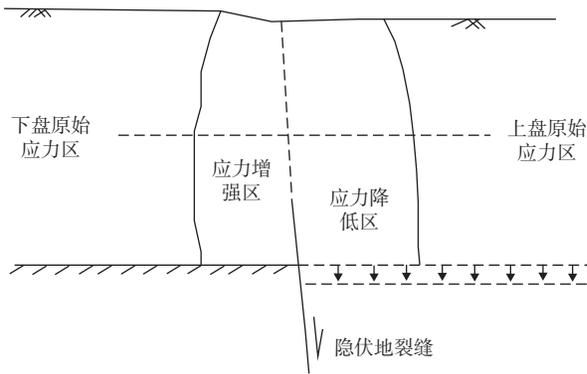


图 10 西安地裂缝错动引起地层应力分布模式^[29]
 Fig. 10 Formation stress distribution induced by active ground fracture^[29]

用下地表位移曲线呈反“S”型,且随错动量的增加,地表土体的竖向位移不断增大,地表纵轴 80~110 m (邻近断裂带下盘 10 m 上盘 20 m) 范围内竖向位移曲线最陡,表明在该范围内地层土体差异变形量较大,容易发生拉张或剪切破坏。

此外,断裂带场地地层土体的纵向位移随与距断

裂带的距离呈负相关(图 12),地表土体的纵向位移在断裂带处最大,相同埋深土体纵向位移上盘区大于下盘区,且随埋深增加纵向位移减小。

断裂带上盘地层土体埋深(H)越大竖向位移越大,受断裂错动的影响越大,而下盘土体则相反,即越靠近地表竖向位移越大,如图 13(a)所示。地层竖向位移曲线斜率越大也表明此处地层土体的差异变形越大,土体容易发生破坏,如图 13(b)所示;根据地层竖向位移曲线斜率可得出断裂错动作用对场地的影响范围,下盘影响范围 $L_1=12$ m,上盘影响范围 $L_2=20$ m,上盘影响范围约为下盘影响范围的 1.67 倍,与前面的应力判定结果基本一致。

3.1.3 地层塑性区分布

采用摩尔-库伦破坏准则模拟地层土体的破坏模式,图 14 为地层土体的塑性区,图中红色部分为地层的塑性破坏范围。由图可知,在断裂错动作用下,场地地层土体的塑性破坏主要发生在断裂带上部,且上盘塑性破坏范围较下盘更大。据此得出断裂错动作

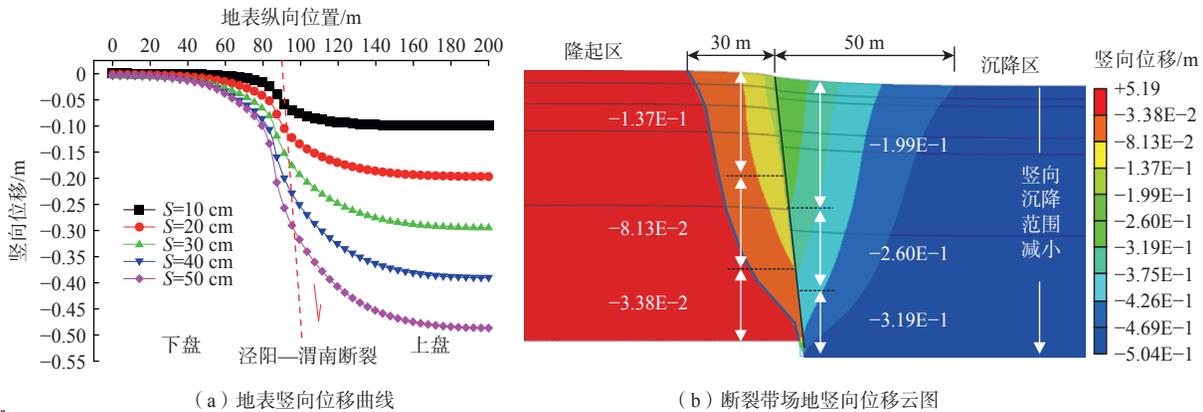


图 11 断裂场地竖向位移特征

Fig. 11 Vertical displacement characteristics of fracture site

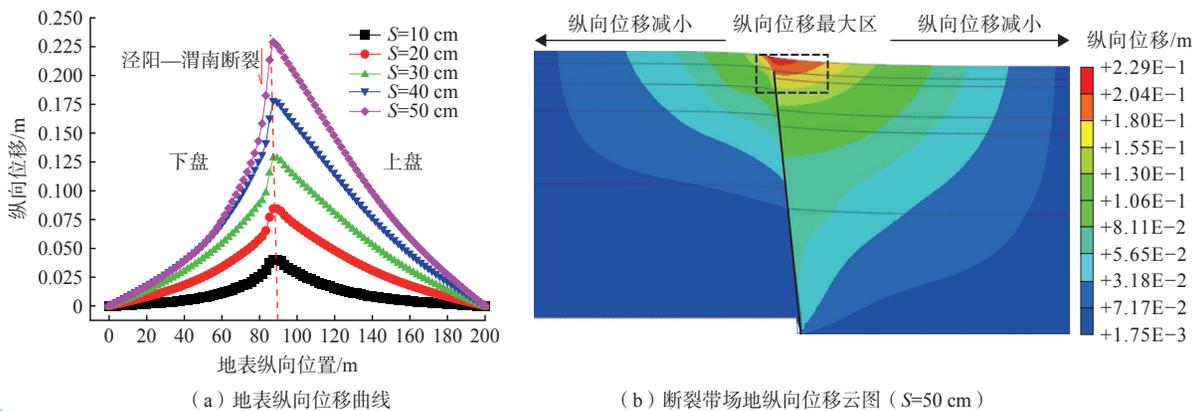


图 12 断裂场地纵向位移特征

Fig. 12 Longitudinal displacement characteristics of fracture site

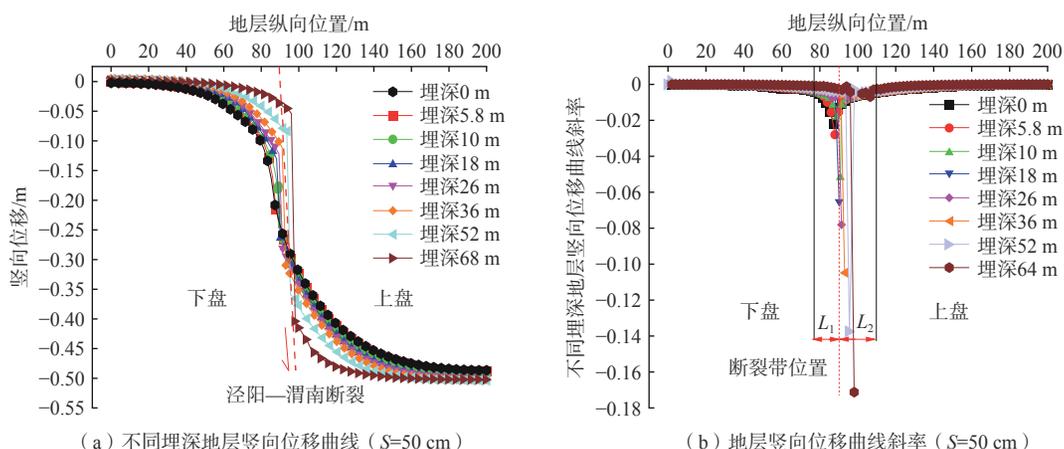


图 13 场地竖向位移特征规律曲线

Fig. 13 Vertical displacement characteristic curves of the site

用对场地的影响范围,下盘影响范围 $L_1=10\text{ m}$,上盘影响范围 $L_2=25\text{ m}$,上盘影响范围为下盘影响范围的 2.5 倍,倍数关系大于前面应力、位移变化判定的结果,但趋势是一致的,即地表变形破坏表现出典型的“上盘效应”即上盘破坏明显大于下盘。

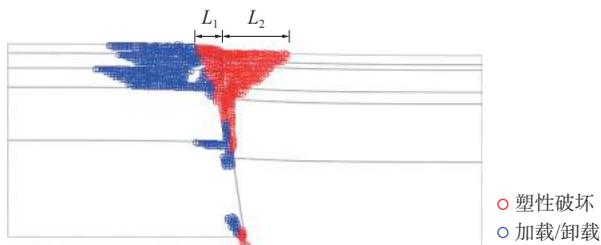


图 14 断裂带场地地层塑性区 ($S=50\text{ cm}$)

Fig. 14 Formation plastic zone of fault zone site ($S=50\text{ cm}$)

3.2 断裂黏滑发震场地地震响应分析

3.2.1 断裂场地竖向位移变化特征

图 15 为断裂带黏滑发震时不同超越概率地震作用下断裂带场地竖向位移云图。从图中可以看出,当输入地震波后,上盘、下盘均产生沉降变形,岩土体的竖向位移变形集中在断裂带附近;超越概率 2% 下断裂带场地的竖向位移整体大于超越概率 10%,且影响地层沉降的深度更大,表明随峰值加速度加大,场地位移变形增大。

从不同超越概率地震作用下地表最大竖向位移曲线(图 16),可以看出断裂带场地地表最大竖向位移变化趋势呈“V”字型台阶状,断裂带场地上下盘地表最大竖向位移量均随着距断裂带的距离的增大而减小,且减小速率逐渐趋于平缓。断裂带附近地表最大竖向位移量最大,在两侧边界趋于 0。上盘范围内,在离地层浅部断裂带位置 10~25 m 处为沉降最严重部

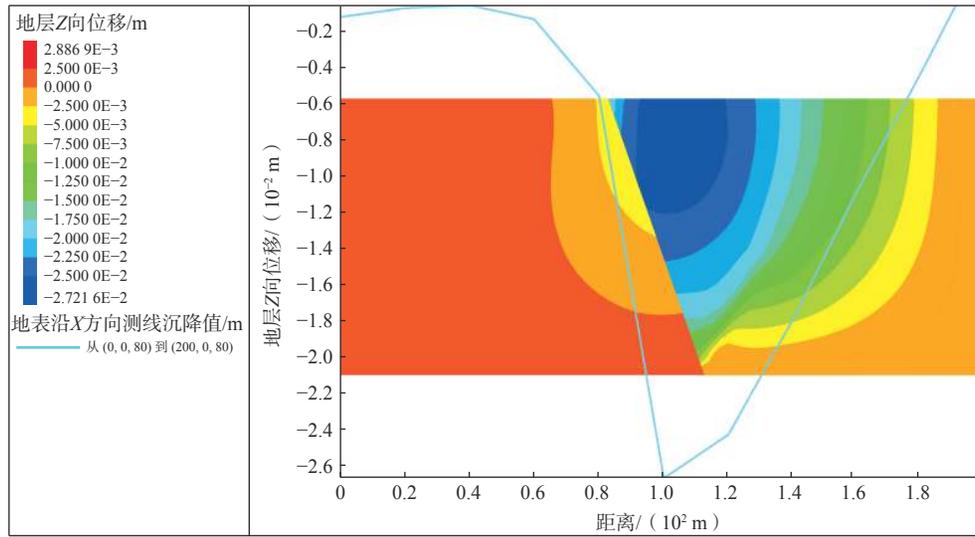
分,且对地层的纵向影响范围约 10 m 左右。

超越概率 10% 地震作用时,上盘地表在断裂处最大沉降约 -0.026 m ,而超越概率 2% 地震作用下上盘地表在断裂带附近最大沉降约 -0.176 m ,对比发现超越概率 2% 地震作用下地表最大竖向位移量约为超越概率 10% 地震作用下的 6.5 倍,表明断裂带场地地震响应随着地震峰值加速度增大而成倍增大。超越概率 10% 地震作用下竖向位移上盘沉降差异约为 0.24 m ,下盘约为 0.25 m ,下盘沉降值范围约为上盘的 1.04 倍。超越概率 2% 地震作用下竖向位移上盘地表差异沉降约为 0.033 m ,下盘约为 0.079 m ,上盘平均沉降较下盘多 0.05 m ,下盘地表差异沉降的值约为上盘的 2.6 倍。表明断裂带场地上下盘的沉降差异随着地震峰值加速度增大而增加,且上盘沉降差异大于下盘。主要因为:在下盘,断裂带处场地不仅受地震的破坏作用,还须承受上盘自重带来的部分压力,随地震强度大幅度增加,上盘在地震作用下对下盘断裂带附近场地的作用力也成倍增加,而远离断裂带的场地受到的影响相对较小,因此场地水平向变形的不均一性十分明显;而上盘在断裂带处受到下盘向上的支撑力,因此最大沉降变形并未出现在断裂带处,而出现在距断裂带一定距离的上盘场地。

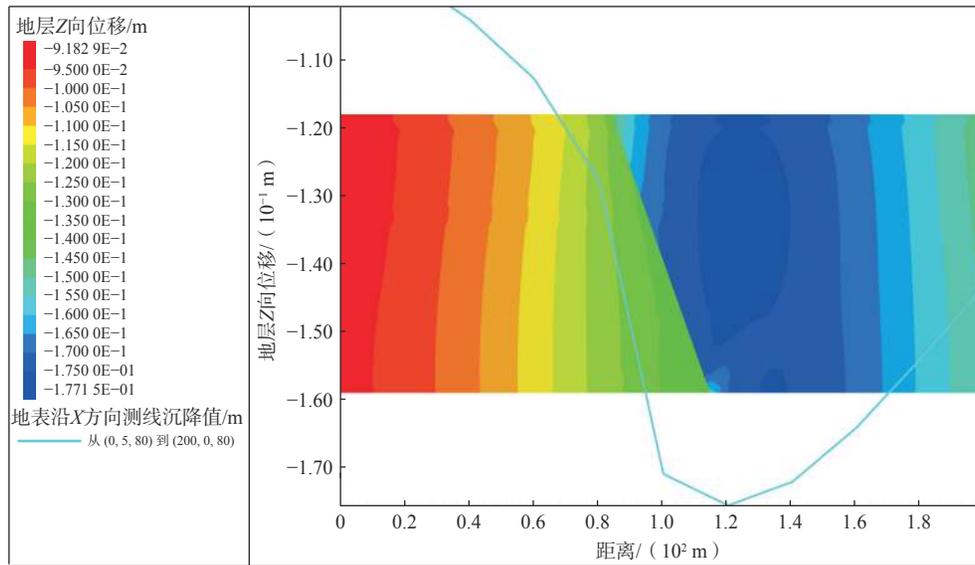
3.2.2 地层塑性区分布

图 17 为不同超越概率地震作用下断裂带场地塑性区分布。由图可知场地浅表层主要受拉张、拉剪作用,场地深部则主要受剪切作用。断裂带场地主要受剪切力的作用,且上盘塑性区范围大于或等于下盘,表明在地震动作用下,上盘受地震作用影响较下盘大。

在超越概率 10% 地震(中震)作用下,上、下盘塑性区影响深度约 12.5 m ,上盘影响范围与下盘相近;当



(a) 超越概率10%



(b) 超越概率2%

图 15 不同超越概率地震作用断裂带场地竖向位移云图

Fig. 15 Vertical displacements of fault zone site with different transcendental probability seismic

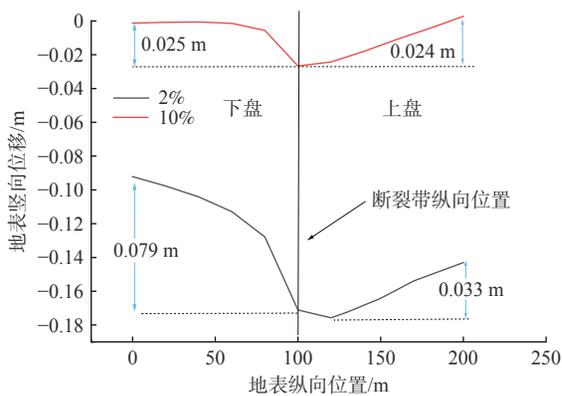


图 16 地表最大竖向位移与纵轴位置关系曲线图

Fig. 16 Maximum vertical displacements of the surface and the position of the vertical axis

输入超越概率 2% 地震(大震)时, 断裂带场地塑性区分布范围有所增加, 下盘塑性区影响深度约 12.5 m, 上盘约 17.5 m, 上盘影响深度约为下盘影响深度的 1.4 倍。由此可知场地的塑性区范围随地震强度而增加, 且大震相对于中震会造成上下盘更大的差异。

3.2.3 场地地表峰值加速度响应特征

为研究断裂带场地地表加速度的响应特征, 提取地表各点的水平加速度峰值, 将其与输入地震波加速度峰值的比值作为地表峰值加速度 (peak surface acceleration, PGA) 放大系数来进行分析, 图 18 为地震作用下地表 PGA 放大系数曲线。由图可知地表 PGA 放大系数在断裂带处显著增大, 远离断裂带的 PGA 放大系

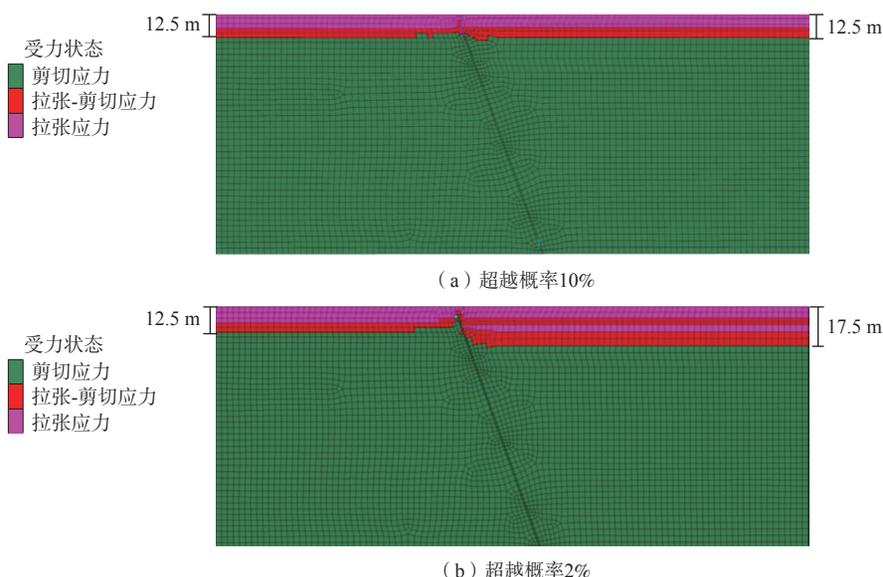


图 17 不同超越概率地震作用下断裂带场地塑性区

Fig. 17 Plastic zones of fault zone site under different transcendental probability earthquakes

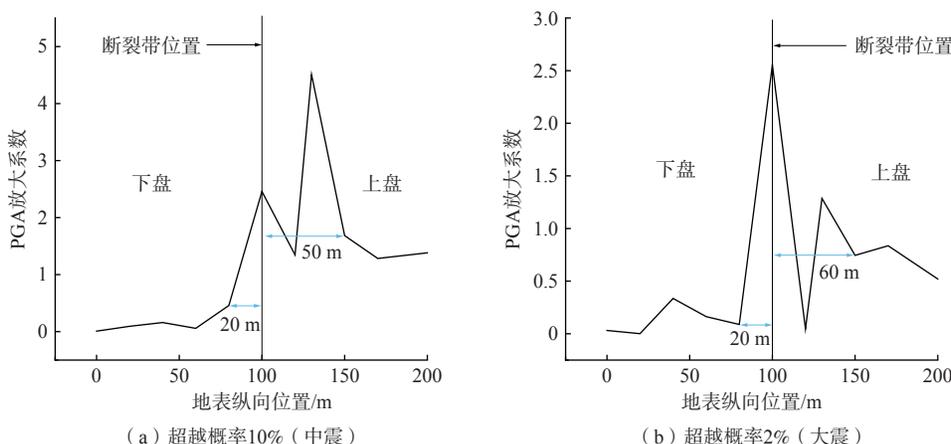


图 18 不同超越概率地震作用下 PGA 放大系数曲线图

Fig. 18 PGA amplification coefficients under earthquakes with different exceedance probabilities

数呈现水平波动现象,但上盘均值更大,说明地震作用下断裂带上盘动力响应显著大于下盘,且在断裂处响应最为强烈。

同时,当输入超越概率 10%(中震)的地震波时,如图 18(a)所示,地表 PGA 放大系数最大值位于上盘,其值为 4.7;下盘地震影响宽度 $L_1=20\text{ m}$,上盘地震影响宽度 $L_2=50\text{ m}$,上盘影响范围约为下盘的 2.5 倍,地表受地震影响的总宽度为 $L=L_1+L_2=70\text{ m}$;当输入超越概率 2% 的地震波时(图 18b),地表 PGA 最大值位于断裂带,其值为 2.6,下盘地震影响宽度 $L_1=20\text{ m}$,上盘地震影响宽度 $L_2=60\text{ m}$,上盘影响宽度为下盘的 3.0 倍,总体影响宽度 $L=L_1+L_2=80\text{ m}$ 。这也说明断裂带黏滑发震震级越大,地表影响宽度越大,但上下盘受

影响的大致规律基本一致,也表现出明显的上盘效应。由 PGA 值可看出随地震强度增加,上盘对地震响应逐渐减小,而断裂带的动力响应逐渐增加,也是由于上下盘位移差异不断增加导致断裂带更易被拉张及剪切,使得对地震破坏的抵抗能力削弱。

3.3 断裂场地变形与应力状态对比分析

活动断裂带的活动往往导致场地变形破坏、地基失效,甚至波及更广、危害巨大的地震灾害,其活动方式造成的场地近地表现形与应力场的变化也存在差异。表 4 列出了活动断裂带同震位错和黏滑发震对场地的影响对比分析表。总体来讲,同震位错场地断裂带处上盘出现应力减弱区、下盘出现应力增强区,远离断裂带上盘沉降加剧、下盘出现隆起变形,同时

表 4 泾阳—渭南活动断裂带不同活动方式场地变形与应力状态对比
Table 4 Comparison of deformation and stress state of Jinyang–Weinan active fault zone

活动方式	相同点	差异性
同震位错	①上盘沉降变形,且上盘变形量大于下盘	①场地失稳形式为上盘沉降,下盘由沉降过渡至隆起; ②离断裂越远上盘沉降越大、下盘沉降越小并出现隆起变形; ③在断裂处,上盘地层沉降量随深度而增加,下盘地层沉降量随深度而减小; ④塑性区集中于地层浅部断裂附近,沿断裂向深处少量分布; ⑤同震位错作用下地应力及竖向位移的上盘影响范围约为下盘的1.67倍,塑性区上盘影响宽度约为下盘的2.50倍; ⑥随着深度增加,竖向位移变化率增大,竖向地层影响范围减小,上盘差异变化大于下盘
黏滑发震	②塑性区主要分布在场地浅部,影响范围呈现出上盘效应	①场地失稳形式以上下盘沉降为主,中震下下盘可出现微弱隆起; ②竖向位移在断裂处及上盘靠近断裂处有最大值,远离断裂竖向位移逐渐趋于0; ③塑性区均匀分布,集中于场地浅部,以剪切破坏为主; ④中震与大震作用下,竖向位移上盘沉降差值分别约为下盘的1.04倍及2.60倍、塑性区分别为1.00倍及1.40倍,PGA上盘影响范围分别为下盘的2.50倍和3.00倍; ⑤大震时场地最大竖向位移量、PGA影响范围分别为中震的6.50倍及1.14倍

水平位移量也随之减小,且场地塑性区集中于断裂带附近,场地破坏主要表现为断裂带附近的差异沉降,主要是由于同震位错时岩石圈表层内部断裂带两侧摩擦控制引起的^[30],即在断裂带处上下盘受到的摩擦力相互作用最为显著,远离断裂带上盘保持沉降趋势、下盘与区域应力状态基本保持一致,由此导致上盘端部沉降最大,下盘场地在断裂带处随上盘沉降而沉降。黏滑发震时场地在断裂带处出现明显的位移及地表峰值加速度放大系数的极值,塑性区在场地浅部分布较为均匀,地表出现拉张、拉剪破坏,随埋深增加场地位移量减小,场地整体以剪切破坏为主;在地震下,场地埋深越浅则受到上覆地层“压稳”作用越弱,地表更易受震破坏。与此类似,断裂带作为界面导致其附近地层受到周边场地的加固作用极大减弱。因此在地震作用下,沉降主要出现于断裂带附近,由于断裂带处上、下盘力的相互作用,导致下盘差异沉降显著、最大沉降变形出现于断裂带上盘而非断裂带等现象。随发震强度增加,竖向位移量及PGA场地影响范围成倍增加。当地震波从底部输入导致场地发生震动时,场地深部由于受到上覆压力而被“加稳”,地表则表现出高程效应而响应强烈,因此场地深部相对于地表竖向位移量更小。

4 结论

(1)断裂带同震位错下场地失稳破坏模式主要表现为在场地上盘出现沉降、下盘出现隆起的现象,竖向位移差异变化随埋深而加快;黏滑发震下场地上、下盘均出现沉降变形,且在上盘靠近断裂处有最大沉降值。塑性区主要分布于场地浅部,上盘效应显著。

(2)断裂带同震位错与黏滑发震导致的场地位移变形特征存在一定差异,主要表现为同震位错下场地

竖向位移呈反“S”形分布,黏滑发震下竖向位移呈“V”形分布,场地差异沉降最大值均出现在断裂带位置附近,远离断裂带呈线性减小趋势。

(3)断裂带附近及地表场地地形变及地层应力响应明显,同震位错下断裂带上盘出现应力降低区,下盘出现应力增强区,且在同一埋深下水平位移量与断裂带距离呈负相关;黏滑发震下地表峰值加速度放大系数在上盘受影响范围约为下盘的2.50~3.00倍,大震下PGA受影响范围约为中震的1.14倍。

(4)同震位错以场地差异沉降破坏为主,在断裂带附近塑性区集中分布,且上盘破坏范围约为下盘的2.5倍,而黏滑发震时场地以浅部的水平剪切破坏为主,在地表出现拉张及拉剪破坏区,且中震、大震作用下上盘破坏范围约为下盘的1.0倍和1.4倍。

参考文献 (References) :

- [1] 丁祖德,王顺国,陈誉升,等.跨活断层隧道组合支护结构断层错动响应模型试验研究[J].铁道科学与工程学报,2023,20(6):2173-2187. [DING Zude, WANG Shunguo, CHEN Yusheng, et al. Model test study on fault dislocation response of tunnel composite support structure across active faults[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(6): 2173-2187. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 黄强兵,彭建兵,王飞永,等.特殊地质城市地下空间开发利用面临的问题与挑战[J].地学前缘,2019,26(3):85-94. [HUANG Qiangbing, PENG Jianbing, WANG Feiyong, et al. Issues and challenges in the development of urban underground space in adverse geological environment[J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(3): 85-94. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 张培震,邓起东,张竹琪,等.中国大陆的活动断裂、地震灾害及其动力过程[J].中国科学:地球科学,2013,

- 43(10): 1607 - 1620. [ZHANG Peizhen, DENG Qidong, ZHANG Zhuqi, et al. Active faults, earthquake disasters and their dynamic processes in Chinese mainland[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2013, 43(10): 1607 - 1620. (in Chinese)]
- [4] 徐德玺, 陈佑斌, 房军. 都汶公路龙溪隧道变形破坏原因分析 [J]. 资源环境与工程, 2009, 23(增刊 1): 76 - 84. [XU Dexi, CHEN Youbin, FANG Jun. Cause analysis of deformation and failure of Longxi Tunnel on Duwen Highway[J]. *Resources Environment & Engineering*, 2009, 23(Sup 1): 76 - 84. (in Chinese)]
- [5] 闫茜, 王连俊, 毛忠良, 等. 活断层蠕滑与震动对高速铁路基变形影响分析 [J]. 铁道工程学报, 2020, 37(12): 38 - 43. [YAN Qian, WANG Lianjun, MAO Zhongliang, et al. Analysis of high-speed railway subgrade deformation under the action of active fault creep and vibration[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2020, 37(12): 38 - 43. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 何川, 耿萍. 强震活动断裂带铁路隧道建设面临的挑战与对策 [J]. 中国铁路, 2020(12): 61 - 68. [HE Chuan, GENG Ping. Challenges and countermeasures of railway tunnel construction in macroseismic active fault zone[J]. *China Railway*, 2020(12): 61 - 68. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 朱勇, 周辉, 张传庆, 等. 跨活断层隧道断错灾变与防控技术研究现状和展望 [J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(增刊 1): 2711 - 2724. [ZHU Yong, ZHOU Hui, ZHANG Chuanqing, et al. Present situation and prospect of research on fault catastrophe and prevention and control technology of tunnel crossing active fault[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(Sup 1): 2711 - 2724. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 崔臻, 盛谦, 李建贺, 等. 蠕滑错断-强震时序作用下跨活断裂隧道变形破坏机制初步研究 [J]. 岩土力学, 2022, 43(5): 1364 - 1373. [CUI Zhen, SHENG Qian, LI Jianhe, et al. Deformation and failure of a tunnel subjected to the coupling effect of a quasi-static faulting and seismic impact[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(5): 1364 - 1373. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 张永双, 任三绍, 郭长宝, 等. 活动断裂带工程地质研究 [J]. 地质学报, 2019, 93(4): 763 - 775. [ZHANG Yongshuang, REN Sanshao, GUO Changbao, et al. Research on engineering geology related with active fault zone[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93(4): 763 - 775. (in Chinese with English abstract)]
- [10] OKADA Y. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space[J]. *The Bulletin of the Seismological Society of America*, 1992, 82(2): 1018 - 1040.
- [11] ZAKIAN P, ASADI HAYEH H. Finite element simulation for elastic dislocation of the North-Tehran fault: the effects of geologic layering and slip distribution for the segment located in Karaj[J]. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 2022, 16(4): 533 - 549.
- [12] LIU Yang, ZHANG Kaiwen, TIAN Denghang, et al. Research on deep-site failure mechanism of high-steep slope under active fault creeping dislocation[J]. *Shock and Vibration*, 2021, 2021: 4482523.
- [13] Wang Tianqiang, Geng Ping, Li Peisong, et al. Deformation and failure of overburden soil subjected to normal fault dislocation and its impact on tunnel[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2022, 142: 106747.
- [14] BAO Liangliang, WEI Feng. Study on the response of tunnel lining under fault dislocation[J]. *Sustainability*, 2023, 15(6): 5150.
- [15] 吕征, 杨强, 王守光. 颗粒断层黏滑运动特征及水对其影响的试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(增刊 1): 2636 - 2645. [LV Zheng, YANG Qiang, WANG Shouguang. Experimental study on the characteristics of stick-slip motion of particle fault and the influence of water on it[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(Sup 1): 2636 - 2645. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 董鹏, 夏开文, 郭彦双. 平直断层黏滑及动态破裂扩展的实验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(增刊 2): 3990 - 3997. [DONG Peng, XIA Kaiwen, GUO Yanshuang. Experimental study on viscous slip and dynamic fracture propagation of flat faults[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(Sup 2): 3990 - 3997. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 邓志辉, 马胜利, 马瑾, 等. 粘滑失稳及其物理场时空分布的实验研究 [J]. 地震地质, 1995, 17(4): 305 - 310. [DENG Zhihui, MA Shengli, MA Jin, et al. Experimental study on stick-slip instability and its spatial and temporal distribution of physical field[J]. *Seismology and Geology*, 1995, 17(4): 305 - 310. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 王爱国, 马巍, 石玉成. 活动断裂地震变形与重大工程场地安全距离研究 [J]. 地震研究, 2005, 28(4): 359 -

364. [WANG Aiguo, MA Wei, SHI Yucheng. Study on the potential earthquake deformation of active fault and the safe distance of important project site to active fault[J]. *Journal of Seismological Research*, 2005, 28(4): 359 – 364. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 杨承先. 活动断层的地震灾害效应 [J]. 地质灾害与防治, 1991, 2(2): 27 – 32. [Yang Chengxian. The hazard effect on earthquake of active faults[J]. *Journal of Geological Hazard and Control*, 1991, 2(2): 27 – 32. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 杨志华, 郭长宝, 吴瑞安, 等. 青藏高原巴塘断裂带地震滑坡危险性预测研究 [J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(5): 91 – 101. [YANG Zhihua, GUO Changbao, WU Ruian, et al. Predicting seismic landslide hazard in the Batang fault zone of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(5): 91 – 101. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 孟振江, 彭建兵, 李超, 等. 耦合型地裂缝活动特征与成因机制模拟研究——以北京宋庄地裂缝为例 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(3): 138 – 148. [MENG Zhenjiang, PENG Jianbing, LI Chao, et al. A simulation study of the activity characteristics and genetic mechanism of coupled ground fissures: Exemplified by the Songzhuang ground fissure in Beijing[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2023, 50(3): 138 – 148. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 彭建兵. 西安地裂缝灾害 [M]. 北京: 科学出版社, 2012. [PENG Jianbing. Ground fracture disaster in Xi'an[M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 陕西工程勘察研究院. 西安市地铁十号线一期工程断裂及活动断裂勘察报告 [R]. 2017. [Shaanxi Engineering Survey and Research Institute. Investigation report of faults and active faults in the first phase of Xi'an Metro Line 10 Project[R]. 2017.(in Chinese)]
- [24] 西安市城市轨道交通十号线一期工程场地地震安全性评价报告 [R]. 2018. [Seismic safety evaluation report of Xi'an Urban Rail Transit Line 10 phase I project site[R]. 2017.(in Chinese)]
- [25] 李光辉, 铁永波, 白永建, 等. 则木河断裂带(普格段)地质灾害发育规律及易发性评价 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(3): 123 – 133. [LI Guanghui, TIE Yongbo, BAI Yongjian, et al. Distribution and susceptibility assessment of geological hazards in Zemuhe fault zone(Puge section)[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, 33(3): 123 – 133. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 毕鸿基, 聂磊, 曾超, 等. 基于三种多变量不安定指数分析模型的汶川县地质灾害易发性评价 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(1): 123 – 131. [BI Hongji, NIE Lei, ZENG Chao, et al. Geological hazard susceptibility evaluation in Wenchuan Area based on three models of multivariate instability index analysis[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, 33(1): 123 – 131. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 谭成轩, 孙炜锋, 孙叶, 等. 地应力测量及其地下工程应用的思考 [J]. *地质学报*, 2006, 80(10): 1627 – 1632. [TAN Chengxuan, SUN Weifeng, SUN Ye, et al. A consideration on In-situ crustal stress measuring and its underground engineering application[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(10): 1627 – 1632. (in Chinese with English abstract)]
- [28] KUHLEMEYER R L, LYSMER J. Finite element method accuracy for wave propagation problems[J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1973, 99(5): 421 – 427.
- [29] 黄强兵, 彭建兵, 闫金凯, 等. 地裂缝活动对土体应力与变形影响的试验研究 [J]. *岩土力学*, 2009, 30(4): 903 – 908. [HUANG Qiangbing, PENG Jianbing, YAN Jinkai, et al. Model test study of influence of ground fissure movement on stress and deformation of soil mass[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(4): 903 – 908. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 黄祖智, 唐荣昌. 四川地区强震发生条件的综合分析 [J]. *地震研究*, 1997, 20(2): 185 – 192. [HUANG Zuzhi, TANG Rongchang. Comprehensive analyses of strong earthquake occurrence condition in sichuan area[J]. *Journal of Seismological Research*, 1997, 20(2): 185 – 192. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 王支农