

走滑断层作用下上覆土层的变形破坏机理

裴鹏程, 黄 帅, 袁 静, 张智康

Deformation and failure mechanism of overlying soil layers under strike-slip fault action

PEI Pengcheng, HUANG Shuai, YUAN Jing, and ZHANG Zhikang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202306029>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

锚固的贯通节理岩体剪切破坏特性分析

Shear failure mode of anchored rock mass with through joints

宋洋, 张峰源, 李永启, 杜炎齐, 王伟颐 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 133-140

加锚贯通节理岩体宏观剪切破坏特性

Macroscopic and microscopic shear failure characteristics of anchored penetrating jointed rock mass

宋洋, 赵玉兵 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(1): 95-101

三峡库区典型顺斜向岩质滑坡变形破坏特征及失稳机制分析

Deformation characteristics and failure mechanism of large-scale obliquely dip rock landslide in the Three Gorges Reservoir Region

蒋先念, 张晨阳 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 36-42

滇中香炉山引水隧洞工程区地应力场特征及断裂影响模糊综合评价

Characteristics of in-situ stress field and fuzzy comprehensive evaluation of the influence of active faults on the water diversion engineering of Xianglushan Tunnel Area in central Yunnan

付平, 张新辉, 刘元坤, 尹健民, 徐春敏 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 123-132

三峡库区箭穿洞危岩体变形破坏模式与防治效果分析

Analyses on failure modes and effectiveness of the prevention measures of Jianchuandong dangerous rock mass in the Three Gorges Reservoir area

蒋文明, 王鲁琦, 赵鹏, 黄波林, 张枝华, 胡明军 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 105-112

三峡库区巫峡剪刀峰顺层岩质岸坡破坏模式分析

An analysis on the destruction mode of Wuxia scissors peak down the shore slope in the Three-Gorges Reservoir area

王平, 胡明军, 黄波林, 张枝华, 郑涛, 吴坤达, 毛博 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 52-61



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202306029

裴鹏程, 黄帅, 袁静, 等. 走滑断层作用下上覆土层的变形破坏机理[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(6): 115-127.

PEI Pengcheng, HUANG Shuai, YUAN Jing, et al. Deformation and failure mechanism of overlying soil layers under strike-slip fault action[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(6): 115-127.

走滑断层作用下上覆土层的变形破坏机理

裴鹏程¹, 黄 帅², 袁 静¹, 张智康¹

(1. 防灾科技学院土木工程学院, 河北 三河 065200;

2. 应急管理部国家自然灾害防治研究院, 北京 100085)

摘要:随着西部大开发的推进, 工程项目难免需要跨越断裂带。断裂带具有地震活动频繁、岩层错动等特点, 这给工程建设和资源开发带来了不小的挑战。为探明跨断层工程结构的敏感性影响因素, 文章研究了不同基岩位错量、不同基岩错动速率、跨越断层角度、不同场地土类型和不同场地土厚度对上覆土层的变形破坏和竖向应力的影响机制。结果表明: 基岩位错会导致覆土层产生应力集中、破裂、滑动等破坏现象, 这些破坏可能会引起土体位移, 从而引发山体滑坡、地滑和地面变形等地质灾害的问题, 将提高对地下管道、道路、桥梁等工程设施造成损伤破坏的风险。文章聚焦基岩位错造成地面沉降变形、塌陷等问题, 发现随着基岩位错量的增大, 不同场地土对覆土层的沉降位移、竖向应力都有不同幅度的增长, 例如坚硬土基岩位错量 2 m 时比 0.4 m 时沉降变形和竖向应力增长 5 倍左右。此外, 发现在跨越断层时选择以 90°跨越断层, 可以减小沉降变形和应力。相关研究旨在揭示上覆土层的变形破坏以期对不可避免的跨断层工程结构的变形以及抗剪切破坏加固提供技术支撑。

关键词:走滑断层; 基岩位错; 覆土层; 变形破坏; 剪切破坏

中图分类号: P642.21

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2024)06-0115-13

Deformation and failure mechanism of overlying soil layers under strike-slip fault action

PEI Pengcheng¹, HUANG Shuai², YUAN Jing¹, ZHANG Zhikang¹

(1. School of Civil Engineering, Institute of Disaster Prevention, Sanhe, Hebei 065200, China; 2. National Institute of Natural Hazards, Ministry of Emergency Management, Beijing 100085, China)

Abstract: With the advancement of the western development, engineering projects inevitably need to traverse fault zones. However, fault zones are typically characterized by frequent seismic activities and rock layer dislocations, which bring certain challenges to both construction and resource development. To explore the sensitivity factors affecting the sensitivity of cross-fault engineering structures, this study investigates the effects of different bedrock dislocation amounts, bedrock dislocation rates, fault-crossing angles, different types of soil at the site, and varying soil thicknesses on the deformation, failure, and vertical stress mechanisms of overlying soil layers. The results show that bedrock dislocation can lead to stress concentration, fractures,

收稿日期: 2023-06-21; 修订日期: 2023-10-10

投稿网址: <https://www.zgdzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3070103-01); 地震数值预测联合实验室开放基金(2021LNEF04); 博士后基金项目(2021M691391)

第一作者: 裴鹏程(1998—), 男, 重庆垫江人, 土木工程专业, 硕士研究生, 主要从事管土交互耦合作用研究。

E-mail: pengcheng-pei@foxmail.com

通讯作者: 黄 帅(1987—), 男, 山东肥城人, 土木工程专业, 博士, 研究员, 主要从事流域重大工程抗震分析与韧性提升研究。

E-mail: huangshuai3395@163.com

sliding, and other destructive phenomena in overlying soil layers. These damages may cause soil displacement, potentially triggering geological hazards such as landslides, ground slides, and ground deformations. This poses a high risk of damage and destruction of the underground pipelines, roads, bridges, and other engineering facilities. This paper focuses on issues such as ground settlement deformation and collapse caused by rock dislocation, revealing that with an increase in rock dislocation amount, different types of soil at the site exhibit varying degrees of increase in settlement displacement and vertical stress on the overlying soil layer. For example, with the bedrock dislocation amount of 2 m compared to 0.4 m in hard soil, settlement deformation and vertical stress increase by around five times. In addition, it was found that selecting a 90° angle for fault crossing can reduce settlement deformations and stresses. The study aims to reveal the deformation damage of the overlying soil layer, providing technical support for the inevitable deformation of cross-fault engineering structures as well as the reinforcement against shear damage.

Keywords: strike-slip fault; bedrock dislocation; overburden; deformation destruction; shear failure

0 引言

我国大部分地区地质构造活动频繁,自然地质作用发育,在西部地震频发,覆土层产生应力集中、破裂、滑动等破坏现象,这些破坏可能会引起土体发生位移,从而可能引发山体滑坡、地滑和地面变形等地质灾害,造成大量的人员伤亡、工期延误以及人工构筑物、设备的极大损失^[1-5]。虽然在工程上常采取避让措施,但在某些特殊地段,当不能避让或避让成本较高时,是否可以通过其他方法来解决? Bray^[6]和 Moosavi^[7]研究发现某些工程坐落在有地表主破裂的断层带上,仍能保证公众安全或震后工程仍能保证基本的使用功能。确定断层附近的沉降大变形、应力,以减少区域的地质灾害是首要工作。保证重大工程的建设安全,使西部大开发得以顺利地推进^[8]。

在跨越断层的重大工程中,覆土层的变形、应力会受到多种因素的影响,其中包括不同基岩位错量、不同基岩错动速率、跨越断层角度、不同场地土类型和不同场地土厚度等。针对这些问题,需要在设计和施工中采取相应措施以降低风险。近年来,鲜水河断裂带地震频发,例如 2008 年汶川 $M_s8.0$ 大地震,2013 年芦山 $M_s7.0$ 地震,2022 年的泸定 $M_s6.8$ 地震,发震时闭合蠕动所积蓄的能量在瞬间释放,滑动断层导致上覆土壤位移,使地表破裂并永久变形对人类活动区域的建筑物及管道造成巨大破坏。20 世纪 70 年代相关研究人员进行地震断层对地表破裂的研究。Bray 等^[9]和 Oettl 等^[9-10]研究不同的覆盖土层类型、断层倾角、场地土类型等,这些因素可能是覆土层破裂中的关键参数。研究地震时导致覆土层破裂的关键参数,可以减少地震时对国家、人民以及财产的巨大损失,例如 Lin 等^[11]研究 1999 年台湾集集地震发现:断层破裂引起的地面永久

位移,致该地区的建筑物等结构受损和大量的人员伤亡;地震还对基础设施造成了严重破坏,包括隧道、供水和污水处理设施、电线和管道系统等电力设施,基础设施的破坏严重影响灾区人民的日常生活。

随着研究的深入,研究以 3 个方面为主:(1)统计分析^[12-13],地震断层位移引起土层破坏的原因和特征,利用地震遗迹、地质勘探数据、地震记录和现场调查采样等多种数据,对历史地震进行统计分析。蒋海昆等^[14]根据 1970 年以来中国记录的 294 次 5.0 级及以上地震序列资料,发现走滑断层占 72%,倾滑断层占 28%,反映了中国地震的主要类型是走滑断层。铁瑞等^[15]根据 1900—2015 年 6 级及以上伴有地表破裂的地震数据,走滑断层所占的比例约占地震总数的一半。(2)试验模拟^[16-17],建立试验模型并进行模拟,目的是将试验结果与实际观测数据进行比较分析。例如郭恩栋等^[18]开展了正断层和走滑断层位移作用下土层模型的地震模拟振动台断裂位移响应试验。刘守华等^[19]利用土工离心机模拟技术研究了上覆土层在地下破裂过程中的行为响应并用 4 种不同的土壤类型,模拟了基岩位错造成的断裂。(3)数值模拟^[20],数值模拟结果与实际震害资料及试验结果的对比分析说明,有限元方法在分析地表破裂方面具有很强的可行性。Scott 等^[21]采用二维平面应变有限元方法分析计算了 800 m 厚的土层在基岩垂直错动下的反应。Taniyama 等^[22]采用有限元方法和 Drucker-Prager 本构模型对逆断层运动引发上覆土层破裂情况进行了模拟。郭恩栋等^[23]运用有限元方法和拟静力的基本原理计算了正、逆断层和走滑断层上覆土层的地震断裂状况。李红等^[24]运用有限元方法建立三维模型,计算了走滑断层上覆土层的地震破裂宽度。前人的研究,主要用的都是二维模型,三维地质模型研究较少,且在三种断层力学类型中正、逆断层的地表破裂

研究较多,走滑型断层相对较少,但据统计在地表破裂的断层地震中走滑断层占比最高,以往的研究重点集中在如何避让活断层、避让距离的确定和覆土层破裂宽度的影响参数等问题,很少有关关注覆土层的变形破坏和应力对工程结构敏感性的影响因素。研究走滑断层上覆土层的变形能让人们了解建筑物、构筑物及地下管道在地震中失效、破坏的机理与原因,为分析跨断层的工程结构抗剪切破坏和加固提供理论基础。

综上,本文重点研究不同基岩位错量、不同基岩错动速率、跨越断层角度、不同场地土类型和不同场地土厚度对上覆土层的变形破坏和应力的影响机制,对跨断层工程结构的变形以及抗剪切破坏加固提供技术支撑。

1 工程地质建模

炉霍断裂带是位于鲜水河断裂带上的一个区域,该断裂位于青藏高原的东部,北起甘孜东谷附近,向南经过炉霍、道孚、康定一线,至石棉县安顺场一带逐渐减弱消失,全长约 350 km。是中国地震频发的左旋走滑活动构造带(图 1)。鲜水河构造带上地震频发,其中以 1967 年炉霍朱倭 $M_s6.8$ 地震、1973 年炉霍 $M_s7.6$ 地震,

危害大,造成了严重的人员伤亡和经济损失。

1.1 有限元模型的建立

以炉霍断裂带的基本构造特征建立炉霍地区的断层模型,在建立过程中考虑了有限元分析软件的特点,对实际炉霍段的断裂做出适当的简化以满足 ABAQUS 软件的分析条件,依据炉霍段的几何特征以及所处的位置,将模型以炉霍断裂为分段点,将其分为南西盘,见图 2(a)中左盘,北东盘见图 2(a)中右盘,以 NE 方向 45°沿着断裂带的 Z 轴方向为长,垂直于断裂带的 X 轴方向设置为宽,深度方向为 Y 轴,其中长为 6 km、宽为 5 km,深 1 km,倾角根据以前的研究内容最终取 70°,采用 C3D8R 单元类型将模型进行划分,使模型发生扭曲变形时精度不受影响,并对覆土层进行网格加密,模型总单元数 466 488。图 1 表示在模拟区域鲜水河断裂带的位置,图 2(a)表示 ABAQUS 软件中模型示意图,图 2(b)中,红线表示沿着断裂走向,即交点 C 到 D 为 Z 轴正方向,黑线表示垂直于断裂带方向的迹线,即交点 A 到 B 为 X 轴正方向,位于断裂带正上方中心位置的交点记作原点 0,对于下图所有横坐标的 0 点均为此交点。图 2(c)表示覆土层厚度的局部放大图。

三维地质模型的数值模拟中,对模型的本构关系选

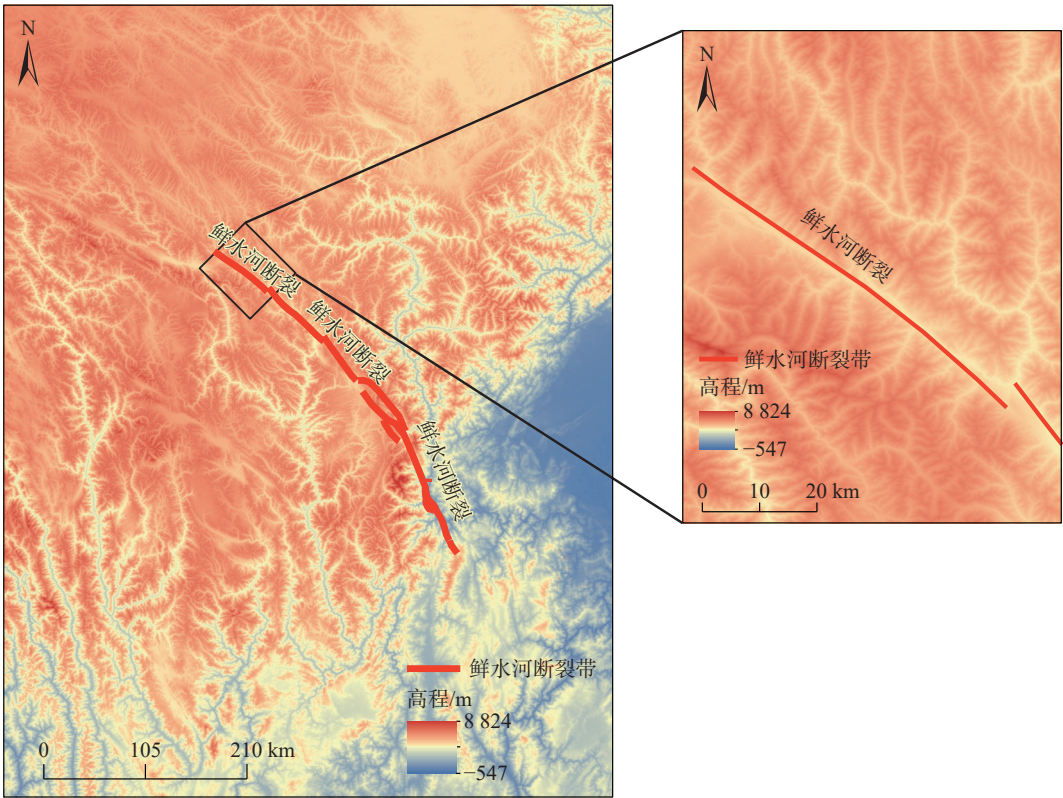


图 1 鲜水河断裂带位置图

Fig. 1 Location map of Xianshuihe fault zone

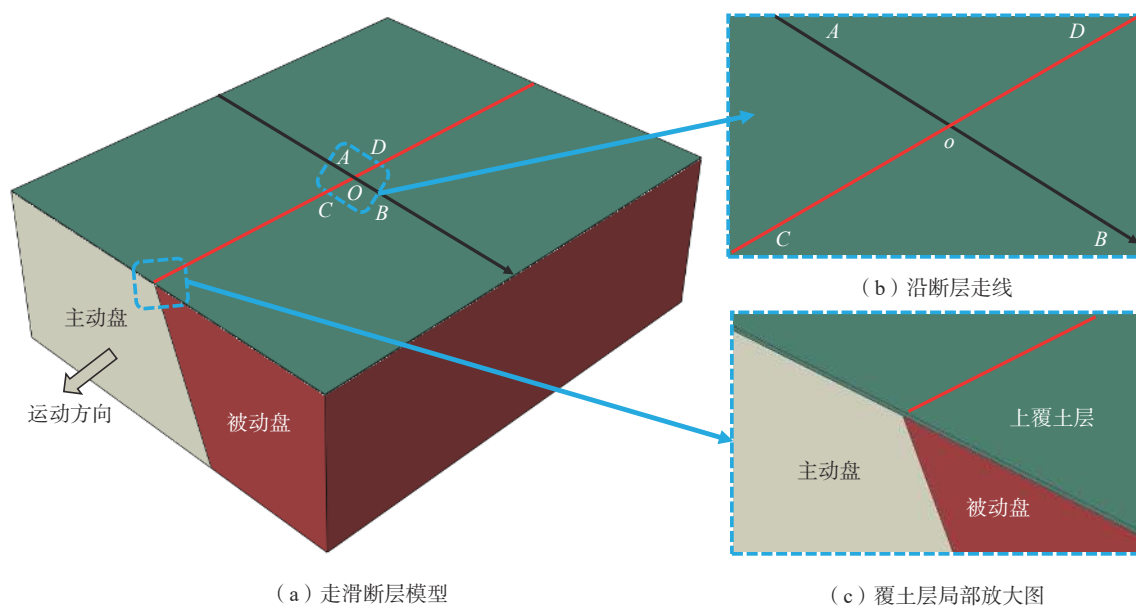


图 2 有限元模型

Fig. 2 Finite element model

取十分重要,一般比较准确的土层本构模型有 Drucker-Prager 本构模型和摩尔-库伦本构模型,经比较后选取摩尔-库伦本构模型。模型中的介质分为上覆土层和基岩,需要知道的介质力学参数包括弹性模量、泊松比、黏聚力和内摩擦角等。计算时参照《构造地质学》和《岩石力学与工程》的参数确定了密度、弹性模量、泊松比、黏聚力和内摩擦角等基本力学参数,具体模拟计算的土体参数如表 1 所示。

表 1 土体参数
Table 1 Soil parameters

介质类型	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	摩擦角/($^{\circ}$)
基岩	2 750	60 000	0.28	1 200	40
上覆土层	1 850	110	0.32	10	37

1.2 边界约束条件

本研究为探明跨断层工程结构的敏感性影响因素,根据鲜水河断裂北西段活动的实际情况,以南西盘作为主动盘,见图 2(a)中灰色部分,在断层断活动时起主动作用的盘,相对于北东盘作为被动盘,见图 2(a)中红色部分,主动盘运动的方向如图 2(a)所示,以左旋运动模拟地震。断层基岩两侧各宽 2.5 km,南西边界与北东边界均在垂直于该界面的水平方向上施加位移约束,平行于该界面的水平方向自由,北西边界与南东边界自由,底面施加垂向位移约束,上覆土层表面自由。

本研究中有限元模型没有考虑实际地形的高程差异,因研究目标为上覆土层的影响机制,故在进行地应

力平衡时针对上覆土层进行,充分考虑了上覆土体的地应力平衡。地应力平衡可以使土体中的应力基本保持不变,土的受力特性不受到扰动,在平衡地应力之后上覆层土体的竖向位移降低约在 10^{-10} 个数量级,大大增加了数值模拟和实际情况的真实度,为重大工程规划选址与优化设计提供可靠的数值分析。

2 分析和结果

本文重点研究不同工程参数对上覆土层的沉降大变形和应力的破坏机理,为探明断层附近的沉降大变形和应力的影响因素,研究了不同基岩位错量、不同基岩错动速率、跨越断层角度、不同场地土类型和不同场地土厚度对上覆土层的沉降位移和竖向应力的影响机制为相关研究提供参考。对炉霍断裂带的基岩设置不同的错动量分析应力的峰值,峰值位置处更容易出现破坏,其应力云图见图 3。但对于重大工程(西气东输管线,川藏铁路工程)我们还需要重点关注可能出现不均匀沉降和应力集中的位置,以减小对工程结构的破坏。分析炉霍断裂带的不均匀沉降和竖直应力的影响,为抗剪切破坏加固提供技术支撑。

2.1 不同基岩位错量的影响

图 4 表示炉霍段沿着断裂带走向的竖向应力,位于断裂带正上方中心位置的交点记作原点 0。图 4 中不同曲线代表不同基岩位错量。在远离 0 点两侧($-100 \sim -40 \text{ m}$ 、 $30 \sim 100 \text{ m}$ 处)竖向应力变化不明显,不同基岩位错量对应力影响较小,整体约为一条曲线。在 0 点两

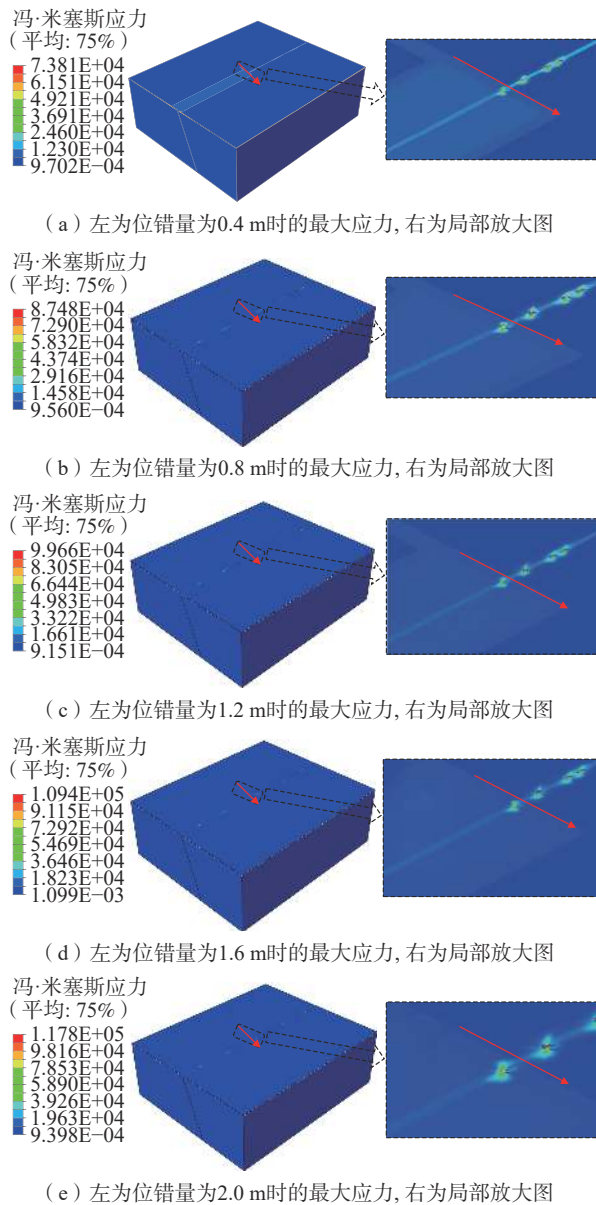


图3 最大应力云图

Fig. 3 Maximum stress contour map

侧(-40 ~ 30 m处)距离断层较近处, 应力变化较为明显, 呈现先上升再下降, 最后在位于断裂带正上方时竖向应力达到最大值。另外还可以发现随着基岩位错量的增加, 竖向应力逐渐增加, 例如基岩位错 2 m 时比 0.4 m 时的竖向应力增长约 10%。

图5表示炉霍段沿断裂带方向的剪切位移, 位于断裂带正上方中心位置的交点记作原点 0。图5中不同曲线代表不同基岩位错量。在远离中点方向两侧(-30 ~ -20 m、10 ~ 30 m处)的剪切位移呈现出平行的线性情况, 随着基岩位错量的增加, 剪切位移也呈线性增加, 在 -20 ~ 10 m 处, 整体曲线先后出现 2 个峰值聚集点, 且随着基岩位错量的增大, 其变化幅度也越大。

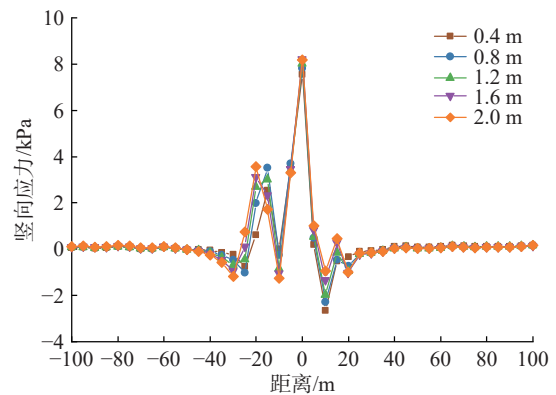


图4 炉霍段沿迹线(X轴)的竖向应力

Fig. 4 Vertical stress along the fault zone in the Luhuo section

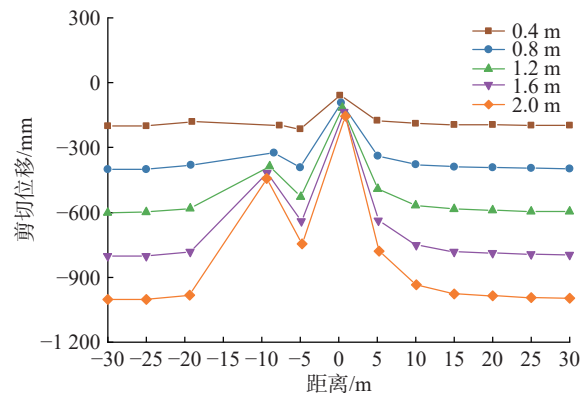


图5 炉霍段沿断裂带方向(Z轴)的剪切位移

Fig. 5 Shear stress along the fracture zone in the Luhuo section

图6(a)表示垂直于断裂带方向的迹线的沉降位移, 图6(b)表示垂直于断裂带方向的迹线的拉张位移, 位于断裂带正上方中心位置的交点记作原点 0。图6中不同曲线代表不同基岩位错量。图6(a)在远离断裂带的左侧(-100 ~ -10 m处)沉降位移变化不明显, 沉降位移呈平行的线性情况, 且随基岩位错量的增大, 沉降位移也呈线性增长, 位错量每增加 0.4 m 其相应的沉降位移峰值就增长约 6 mm。在断裂带左右两侧(-10 ~ 10 m处)距离断层较近处, 在断裂带正上方时沉降位移达到峰值。还可以发现随着基岩位错量的增加, 沉降位移逐渐增加, 但增长幅度逐渐减缓。例如基岩位错 2 m 时比 0.4 m 时的沉降位移增长 2 倍左右。图6(b)在远离 0 点两侧(-100 ~ -20 m、10 ~ 100 m处)拉张位移变化不明显, 拉张位移呈平行的线性情况, 且对于不同基岩位错量拉张位移变化较小。在 0 点两侧(-20 ~ 10 m处)距离断层较近处, 位于 0 点左侧 5 m 处拉张位移达到峰值, 随即减小在断裂带正上方时达到第二个峰值, 随即快速下降。还可以发现随着基岩位错量的增加, 拉张位移在峰值处逐渐增加, 但增长幅度逐渐

减缓。由此可知对于这种跨断层的重大工程(西气东输管线,川藏铁路工程),基岩的位错量会对覆土层的破裂

产生影响,随着基岩位错量的增大,走滑断层引起的位错变形,应力均有着不同幅度的增长。

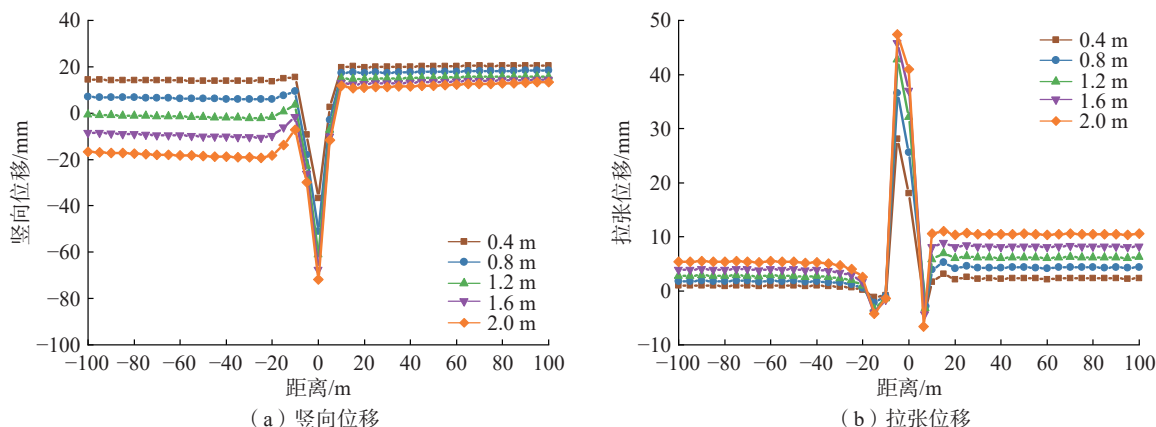


图 6 炉霍段沿迹线(X轴)的位移

Fig. 6 Settlement displacement of the Luhuo section along the fault zone

2.2 不同错动速率的影响

图 7 表示垂直于断裂带方向的迹线上基岩不同错动速率时的竖向应力,位于断裂带正上方中心位置的交点记作原点 0。图 7 中不同曲线代表不同基岩位错量。通过比较可以发现,随着基岩错动速率的增加,竖向应力的最大值逐渐向右偏移 3 m 左右。

图 7 (b)(c)在远离断裂带的左右两侧竖向应力变化不明显,即-100~-30 m 处和 30~100 m 处不同基岩位错量对应力影响较小,整体约为一条曲线。在断裂带左右两侧距离断层较近处,即-30~30 m 处,在断裂带的右 3 m 左右竖向应力达到最大值。

图 8 为基岩不同错动速率时的沉降位移图,其中 0 点为断裂带正上方,图 8 中不同曲线代表不同基岩位错量。通过比较可以发现随着基岩错动速率的增大,沉降位移峰值也随之增大,以基岩错动量 2 m 时为例,位错速率 0.001 m/s 时比 0.003 m/s 时,沉降位移峰值减小约 25%。

图 8(b)(c)在远离断裂带的左右两侧(-100~-10 m 和 10~100 m 处)沉降位移变化不明显,沉降位移呈现平行的线性情况,且随基岩位错的增大,沉降位移也增大。在断裂带左右两侧(-10~10 m 处)距离断层较近处,在位于断裂带正上方时沉降位移达到峰值。随着基岩位错的增加,沉降位移也逐渐增大。例如基岩位错 2 m 时比 0.4 m 时的沉降位移增长约 2 倍。综上所述,对于西气东输管线和川藏铁路等跨断层的重大工程项目,必须特别关注断层附近的区域。在这些区域中,如果发生较大的基岩错动,则会对工程造成更为严重的破坏。

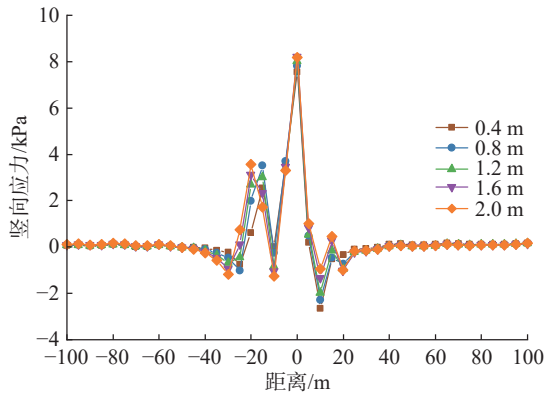
2.3 跨越断层角度的影响

图 9 为跨越断层时不同角度的竖向应力。其中 0 点为断裂带正上方,图 9 中不同曲线代表不同基岩位错量。可以明显地发现跨越断层角度为 90°时,见图 9(c),其竖向应力的峰值比 30°和 60°的竖向应力的峰值小 30% 左右,见图 9(a)(b)。

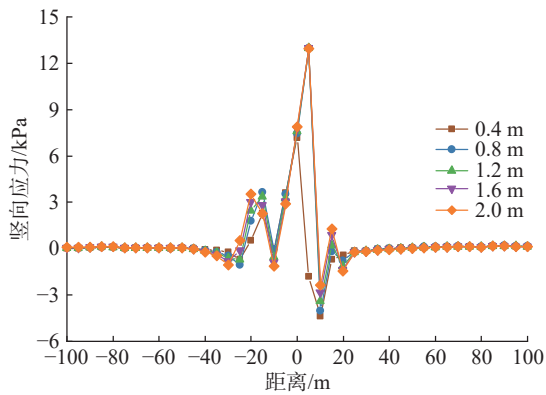
图 9(b)(c)在远离断裂带的左右两侧(-100~-30 m 处和 30~100 m 处)竖向应力变化不明显,不同基岩错动量的竖向应力约为一条曲线。在断裂带左右两侧(-30~30 m 处)距离断层较近处,应力呈现先上升后下降,最后再上升,在位于断裂带正上方时竖向应力达到峰值。随基岩位错的增大,其竖向应力变化幅度逐渐减小。但是可以明显地发现覆土层选线与断层角度为 90°时,见图 9(c),其竖向应力的峰值比 30°和 60°的竖向应力的峰值小 30% 左右,见图 9(a)(b)。

图 10 为跨越断层时不同角度的沉降位移。其中 0 点为断裂带正上方,图 10 中不同曲线代表不同基岩位错量。例如以基岩位错量为 2 m 时为例,可以发现跨越断层角度为 90°时,见图 10(c),其沉降位移的峰值只有跨越断层角度为 30°和跨越断层角度为 60°的沉降位移的 1/6 左右,见图 10(a)(b)。

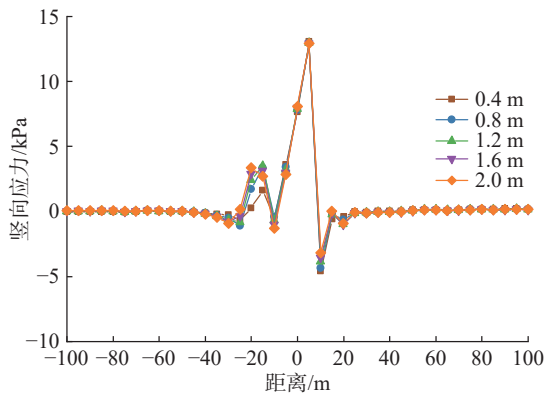
图 10(a)(b)在远离断裂带的左右两侧(-100~-15 m 处和 15~100 m 处)沉降位移变化不明显,沉降位移呈现平行的线性情况,且对于不同基岩位错量沉降位移变化不明显。在断裂带左右两侧(-15~15 m 处)距离断层较近处,在位于断裂带正上方时沉降位移达到峰值。随基岩位错量的增大,沉降位移也呈现线性增长。



(a) 错动速率为0.001 m/s时



(b) 错动速率为0.002 m/s时



(c) 错动速率为0.003 m/s时

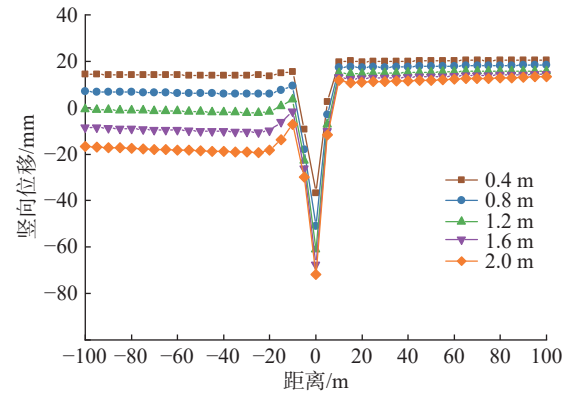
图7 不同错动速率时的竖向应力

Fig. 7 Vertical stress at different dislocation rates

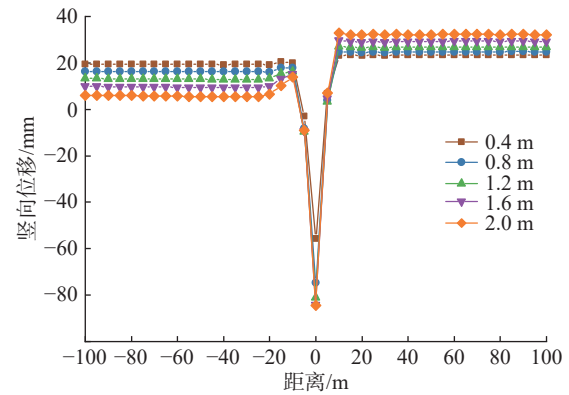
综上,对于这种跨断层的重大工程(西气东输管线,川藏铁路工程)在管道跨越断层时角度以 90° 为最佳,这一结论和朱秀星等^[25]给出的管道跨越断层角度结论一致。

2.4 不同场地土的影响

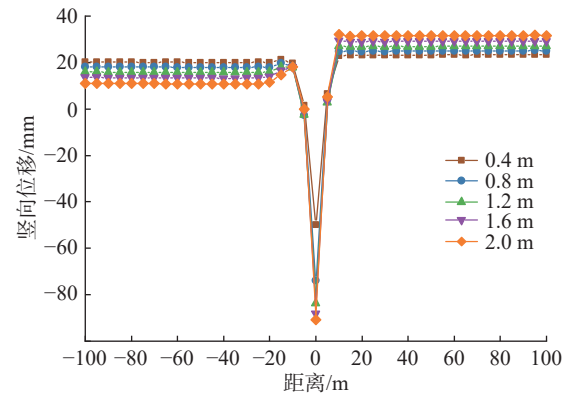
场地土主要表示处于场地范围中的地基土。土是整个岩石在地球表面经过大气长期风化而形成的,覆盖在地表的破碎、松散或极弱的颗粒堆积。单层土指地表只是存在一种性质的土层,土的类型即为场地土类



(a) 错动速率为0.001 m/s时



(b) 错动速率为0.002 m/s时



(c) 错动速率为0.003 m/s时

图8 不同错动速率时的竖向位移

Fig. 8 Settlement displacement at different dislocation rates

型。场地类型的分类主要与土体的等效剪切波速有关^[26-27]。剪切波波速:

$$v_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad (1)$$

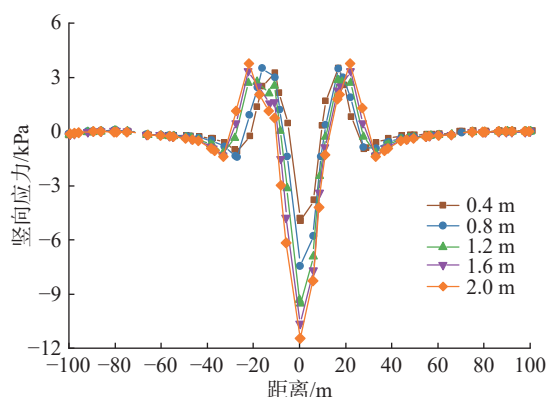
式中: v_s ——剪切波波速;

E ——介质的弹性模量;

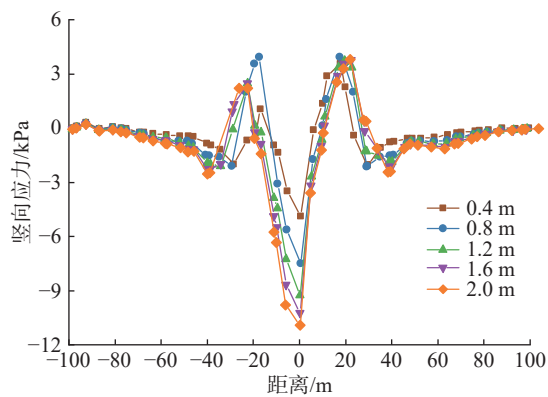
ρ ——密度;

ν ——泊松比。

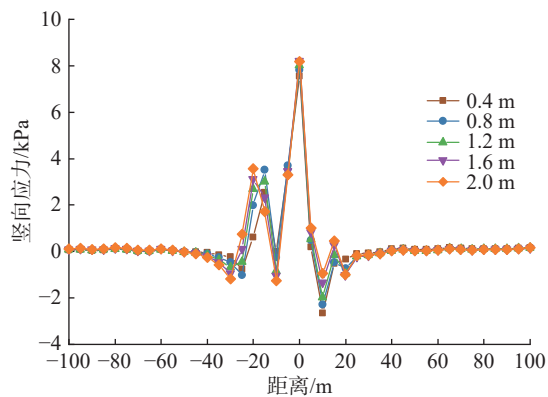
本文通过简化方法来对场地土类型进行划分,根据



(a) 30°



(b) 60°



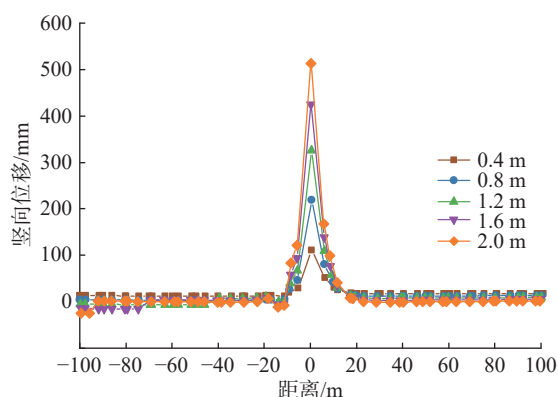
(c) 90°

图 9 不同角度跨越断层时的竖向应力

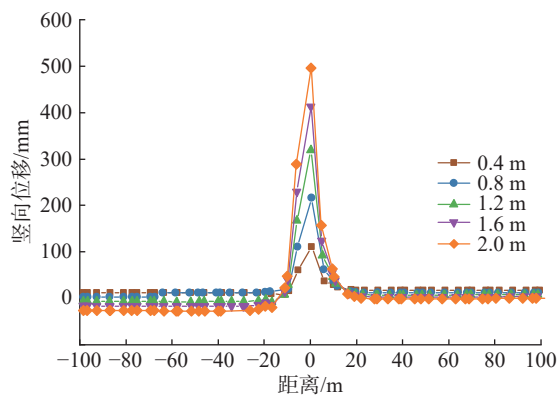
Fig. 9 Vertical stress at different angles of fault crossing

土层等效剪切波速一般可以划分为表 2 所示的类型。

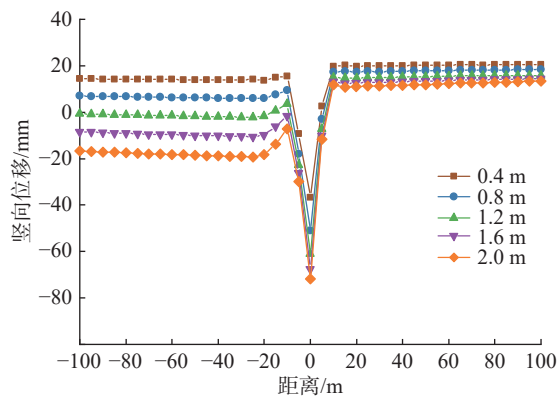
图 11 表示垂直于断裂带方向的迹线在不同场地土条件下的竖向应力,位于断裂带正上方中心位置的交点记作原点 0。图 11 中不同曲线代表不同基岩位错量。土体从软弱土过渡到中软土的时候,在断裂带附近的竖向应力有一定的减小。以基岩位错 2 m 时为例,中软土的竖向应力峰值比软弱土的竖向应力峰值减小了 15% 左右。随后因土体逐渐变硬,在断裂带正上方的竖向应力峰值也随之增大^[28-31]。



(a) 30°



(b) 60°



(c) 90°

图 10 不同角度跨越断层时的竖向位移

Fig. 10 Settlement displacement at different angles of fault crossing

图 11(a)(c)在远离断裂带的左右两侧(-100 ~ -30 m 和 20 ~ 100 m 处)竖向应力变化不明显,不同基岩位错量对应力影响较小,整体约为一条曲线。在断裂带左右两侧(-30 ~ 20 m 处)距离断层较远处,应力变化较为明显,图 11(a)经历 2 次先上升后下降,图 11(c)经历 2 次先下降后上升,但都在位于断裂带正上方时竖向应力达到最大值。另外还可以发现随着位错量的增加,竖向应力逐渐增加。当基岩位错量从 0.4 m 增至 2 m 时,竖向应力增长了 25% 左右。图 11(d)在远离断裂带的左右

表 2 土体参数
Table 2 Summary of soil parameters

土的类型	岩土名称和性状	密度 /(kg·m ⁻³)	弹性模量 /MPa	泊松比	黏聚力 /kPa	摩擦角 /(°)	实际剪切 波速/(m·s ⁻¹)	土层剪切 波速/(m·s ⁻¹)
坚硬土(岩石)	稳定的岩石, 密实的碎石子	2 250	1 465	0.30	200	30	500	$V_s \geq 500$
中硬土	中密、稍密的碎石子, 密实、中密的砾、粗、中砂, $f_{ak} > 200$ 的黏性土和粉土, 坚硬黄土	2 050	650	0.31	100	20	350	$500 \geq V_s > 250$
中软土	稍密的砾、粗、中砂, 除松散外的细、粉砂, $f_{ak} < 200$ 的黏性土和粉土, $f_{ak} \geq 130$ 的填土, 可塑黄土	1 850	110	0.32	10	37	150	$250 \geq V_s > 140$
软弱土	淤泥和淤泥质土, 松散的砂, 新近沉积的黏性土和 粉土, $f_{ak} < 130$ 的填土, 新近堆积黄土和流塑黄土	1 700	45	0.35	10	25	100	$V_s \leq 140$

注: f_{ak} 为地基承载力特征值。

两侧(−100 ~ −20 m 和 20 ~ 100 m 处)竖向应力变化不明显, 不同基岩位错量对应力影响较小, 整体约为一条曲线。在断裂带左右两侧(−20 ~ 20 m 处)距离断层较近处, 在位于断裂带正上方时竖向应力达到峰值。随基岩位错的增大, 竖直方向应力也呈现线性增长, 位错量每增加 0.4 m 时其相应的最大应力就增长 4 MPa 左右^[30-31]。

图 12 表示垂直于断裂带方向的迹线在不同场地土条件下的沉降位移, 位于断裂带正上方中心位置的交点记作原点 0。图 12 中不同曲线代表不同基岩位错量。当土体从软弱土过渡到中软土的时候, 在断裂带附近的最大沉降位移降低。以基岩位错 2 m 为例, 中软土比软弱土最大沉降位移降低了 4 倍左右。土体从中软土过渡到中硬土时, 在断裂带附近的最大沉降位移又有所上升, 最后随着土体的变硬, 其沉降位移再次逐渐下降。

图 12(a)(b)(c)在远离断裂带的左右两侧(−100 ~ −10 m 和 10 ~ 100 m 处)沉降位移变化不明显, 沉降位移呈平行的线性情况, 且对某一土体的不同基岩位错量的沉降位移变化幅度较小。在断裂带左右两侧(−10 ~ 10 m 处)距离断层较近处, 沉降位移在断裂带正上方时达到峰值。同时随着基岩位错量的增加沉降位移峰值逐渐增长, 但增长幅度逐渐减缓。图 12(d)在远离断裂带的左右两侧(−100 ~ −10 m 处和 10 ~ 100 m 处)对不同基岩位错量的沉降位移变化不明显, 沉降位移都呈平行的线性情况。在断裂带左右两侧(−10 ~ 10 m 处)距离断层较近处, 沉降位移在断裂带正上方时达到峰值。同时随着基岩位错量的增加, 沉降位移峰值也呈线性增加, 位错量每增加 0.4 m 时其相应的沉降位移峰值就增长约 65 mm。

综上, 对于这种跨断层的重大工程(西气东输管线, 川藏铁路工程)在跨越不同场地土时, 我们需要重点关注软弱的土层, 因为软弱土容易出现沉降, 且在断层附

近应力较大, 容易对该位置的工程结构造成破坏。

2.5 场地土厚度的影响

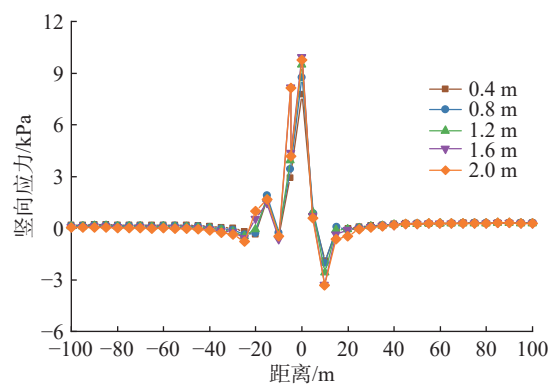
图 13 表示垂直于断裂带方向的迹线在不同场地土厚度下的竖向应力, 位于断裂带正上方中心位置的交点记作原点 0。图 13 中不同曲线代表不同基岩位错量。通过与图 11 中 10 m 覆土层厚度相比, 可以发现随着覆土层厚度的增加, 其最大应力的峰值均有不同程度的下降, 其中以坚硬土(岩石)的下降程度最大, 下降了约 7 倍左右, 其余场地土下降约 2 倍左右。

图 13(a)(b)在远离断裂带的左右两侧(−100 ~ −40 m 和 40 ~ 100 m 处)竖向应力变化不明显, 不同基岩位错量对应力影响较小, 整体约为一条曲线。在断裂带左右两侧(−40 ~ 40 m 处)距离断层较近处, 应力变化较为明显, 呈现上下波动, 在位于断裂带右方 5 m 左右竖向应力达到最大值。另外还可以发现随着位错量的增加, 竖向应力逐渐增加。

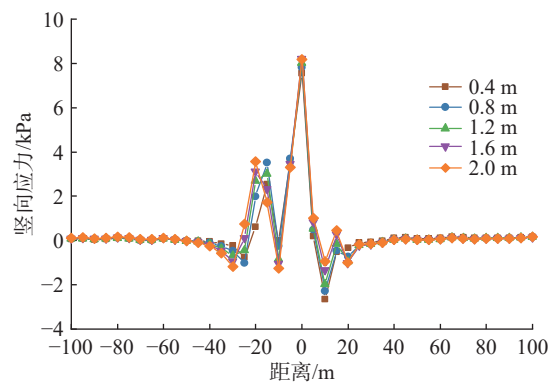
图 13(c)在远离断裂带的左右两侧(−100 ~ −40 m 和 30 ~ 100 m 处)对不同基岩位错量的竖向应力变化不明显, 竖向应力都呈较为平行的情况。在断裂带左右两侧距离断层较近处(−40 ~ 30 m 处), 竖向应力变化较为明显, 呈现出一种上下波动的形式, 但在位于断裂带正上方时竖向应力达到峰值。

图 13(d)在远离断裂带的左右两侧(−100 ~ −30 m 和 40 ~ 100 m 处)对不同基岩位错量的竖向应力变化不明显, 竖向应力都呈平行的线性情况。在断裂带左右两侧(−30 ~ 40 m 处)距离断层较近处, 竖向应力先下降, 在断层左右(−17 和 17 m 处)降到最低点, 随即在位于断裂带正上方时竖向应力达到峰值。同时随基岩位错量的增大, 其竖向应力变化幅度也增大。

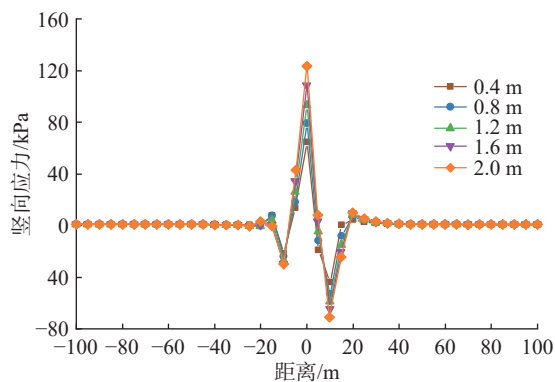
综上, 对于这种跨断层的重大工程(西气东输管线, 川藏铁路工程)在覆土层较厚时, 结构的应力有减少的趋势。



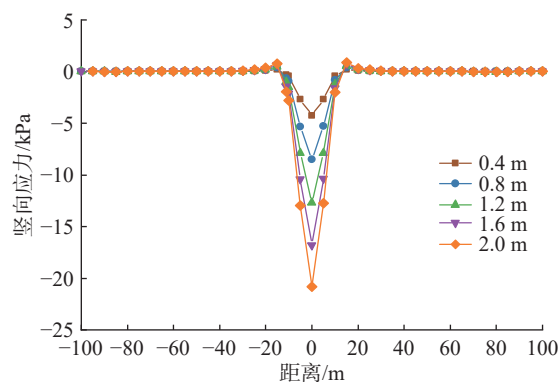
(a) 软弱土



(b) 中软土



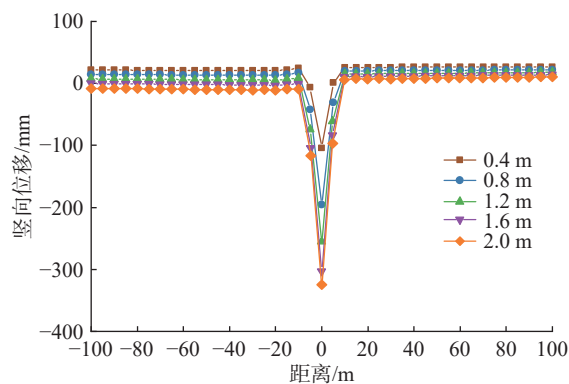
(c) 中硬土



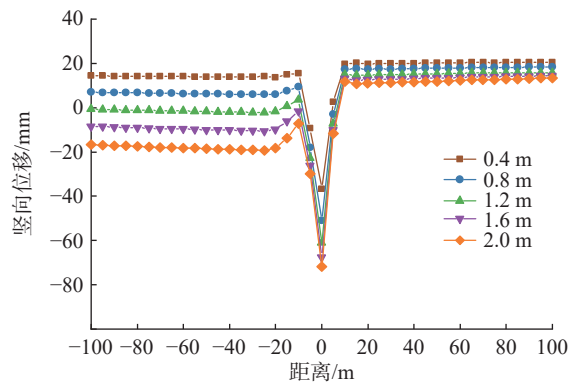
(d) 坚硬土 (岩石)

图 11 不同场地土的竖向应力

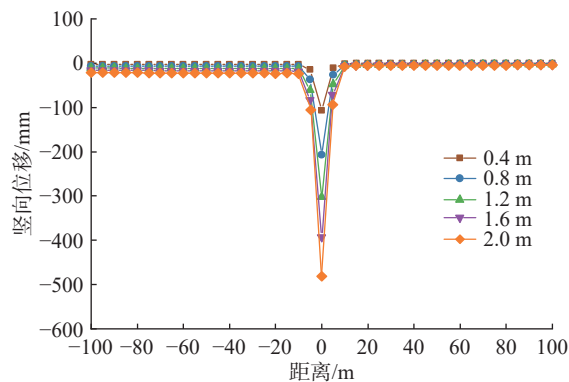
Fig. 11 Vertical stress of soil in different sites



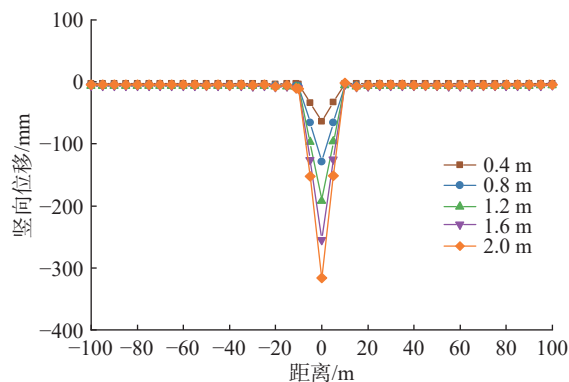
(a) 软弱土



(b) 中软土



(c) 中硬土



(d) 坚硬土 (岩石)

图 12 不同场地土的竖向位移

Fig. 12 Settlement displacement of soil in different sites

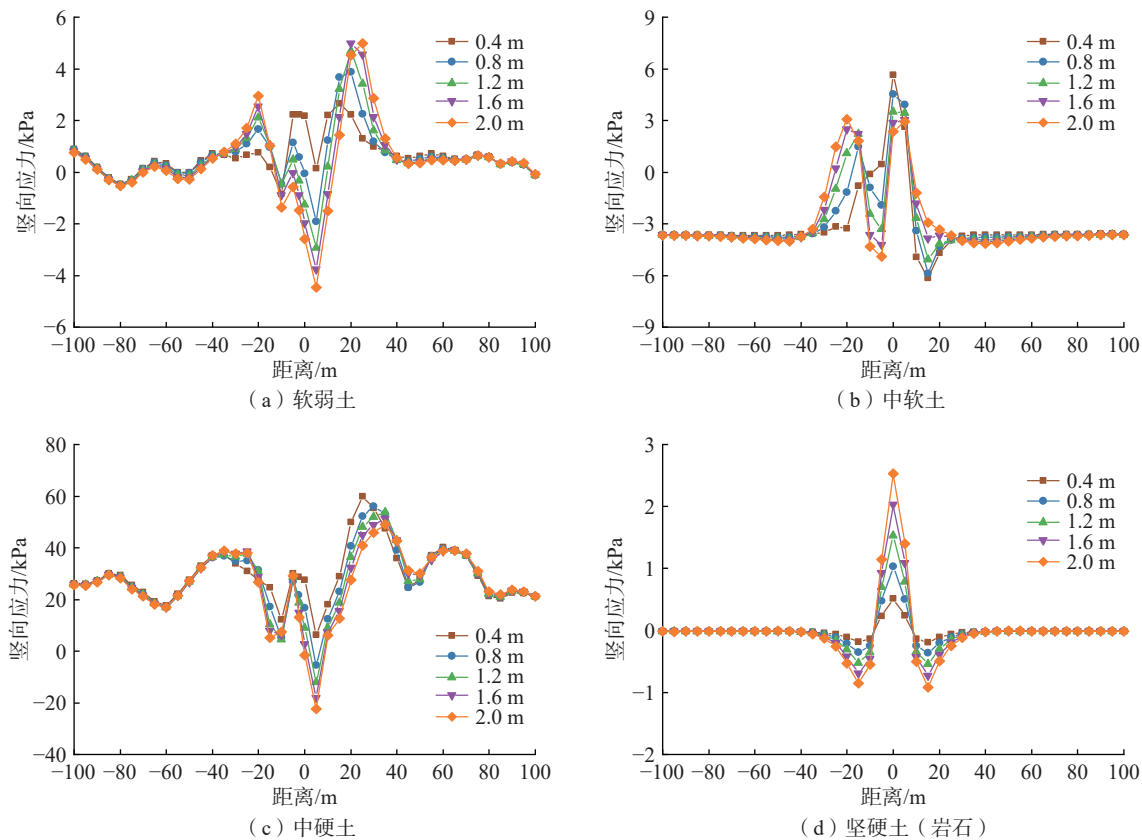


图 13 覆土层 30 m 时不同场地土的竖向应力

Fig. 13 Vertical stress of different site soils at a depth of 30 m

3 结论

(1)不同场地土条件直接影响走滑断层上覆土层的应力和变形。走滑断层发震错动时,不同场地的覆土层沉降变形和应力的差异较大,以基岩位错量 0.4 m 时为例,此时中硬土和坚硬土(岩石)相比时,其坚硬土(岩石)的应力更大,但位移却小于中硬土,因为坚硬土(岩石)强度更大,抗剪切破坏能力更强;软弱土比中软土的沉降变形和应力都更大,所以软弱土质更容易出现不均匀沉降并在断层附近形成较大应力,所以跨断层场地类型为软弱土时需进行抗剪切破坏加固。

(2)走滑断层基岩的位错量是影响上覆土层的应力和变形的重要参数。随着基岩位错的增加,地表沉降变形差值逐渐增大,即随基岩位错量的增加该位置的沉降大变形以及剪切破坏更严重;且在基岩位错一定时,随着基岩滑动速率的增大沉降变形和应力略微有所增长。

(3)上覆土层厚度和跨越管道的角度是影响走滑断层上覆土层的应力和变形的关键参数。在同一基岩位错量下,土层厚度与应力成反比;在管道沿断层跨越时,应尽量选择断层呈 90°通过,以减少沉降变形和应力的影响。

参考文献(References):

- [1] HUANG Shuai, LYU Yuejun, SHA Haijun, et al. Seismic performance assessment of unsaturated soil slope in different groundwater levels [J]. *Landslides*, 2021, 18(8): 2813 – 2833.
- [2] HUANG Shuai, LYU Yuejun, PENG Yanju, et al. Analysis of factors influencing rockfall runout distance and prediction model based on an improved KNN algorithm [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 66739 – 66752.
- [3] 韩征, 方振雄, 傅邦杰, 等. 同震崩塌滑坡的光学遥感影像多特征融合解译方法 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2022, 33(6): 103 – 113. [HAN Zheng, FANG Zhenxiong, FU Bangjie, et al. Multi-feature fusion interpretation method of optical remote sensing image for coseismic collapse and landslide [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, 33(6): 103 – 113. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 黄帅, 吕悦军, 彭艳菊. 基于永久位移的边坡地震稳定性安全评价方法研究 [J]. *土木工程学报*, 2016, 49(增刊 2): 120 – 125. [HUANG Shuai, LYU Yuejun, PENG Yanju. Study on safety evaluation method of seismic stability of slope based on permanent displacement [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2016, 49(Sup 2): 120 – 125. (in Chinese with English abstract)]

- abstract)]
- [5] 张鹏, 王晓宇, 唐雪梅, 等. 横穿滑坡下 X80 管道极限滑坡位移分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(2): 21 – 29. [ZHANG Peng, WANG Xiaoyu, TANG Xuemei, et al. Limit displacement of a landslide for an X80 buried pipeline crossing it [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(2): 21 – 29. (in Chinese with English abstract)]
- [6] BRAY J D. Developing mitigation measures for the hazards associated with earthquake surface fault rupture. In: Proceedings of Workshop on Seismic Fault Induced Failures-Possible Remedies for Damage to Urban Facilities[D]. University of Tokyo, Japan, 2001: 55–79.
- [7] MOOSAVI S M, JAFARI M, KAMALIAN M, et al. Experimental investigation of reverse fault rupture-rigid shallow foundation interaction [J]. International Journal of Civil Engineering, 2010, 8: 85 – 98.
- [8] 白光顺, 杨雪梅, 朱杰勇, 等. 基于证据权法的昆明五华区地质灾害易发性评价 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(5): 128 – 138. [BAI Guangshun, YANG Xuemei, ZHU Jieyong, et al. Susceptibility assessment of geological hazards in Wuhua District of Kuming, China using the weight evidence method [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(5): 128 – 138. (in Chinese with English abstract)]
- [9] BRAY J D, SEED R B, CLUFF L S, et al. Earthquake fault rupture propagation through soil [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 120(3): 543 – 561.
- [10] OETTL N K, BRAY J D. Fault rupture propagation through previously ruptured soil [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, 139(10): 1637 – 1647.
- [11] LIN Minglang, CHUNG C F, JENG F S, et al. The deformation of overburden soil induced by thrust faulting and its impact on underground tunnels [J]. Engineering Geology, 2007, 92(3/4): 110 – 132.
- [12] FACCIOLI E, ANASTASOPOULOS I, CALLERIO A, et al. Case histories of fault–foundation interaction [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2008, 6(4): 557 – 583.
- [13] LAZARTE C A, BRAY J D, JOHNSON A M, et al. Surface breakage of the 1992 Landers earthquake and its effects on structures [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1994, 84(3): 547 – 561.
- [14] 蒋海昆, 曲延军, 李永莉, 等. 中国大陆中强地震余震序列的部分统计特征 [J]. 地球物理学报, 2006, 49(4): 1110 – 1117. [JIANG Haikun, QU Yanjun, LI Yongli, et al. Some statistic features of aftershock sequences in Chinese mainland [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(4): 1110 – 1117. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 铁瑞, 王俊, 贾连军, 等. 强震地震数据统计及其地表破裂特性研究 [J]. 世界地震工程, 2016, 32(1): 112 – 116. [TIE Rui, WANG Jun, JIA Lianjun, et al. Data statistics of strong-moderate earthquake and characteristics research of ground rupture [J]. World Earthquake Engineering, 2016, 32(1): 112 – 116. (in Chinese with English abstract)]
- [16] STONE K J L, WOOD D M. Effects of dilatancy and particle size observed in model tests on sand [J]. Soils and Foundations, 1992, 32(4): 43 – 57.
- [17] 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.
- [18] 郭恩栋, 冯启民, 薄景山, 等. 覆盖土层场地地震断裂实验 [J]. 地震工程与工程振动, 2001, 21(3): 145 – 149. [GUO Endong, FENG Qimin, BO Jingshan, et al. Seismic test of soil site rupture under fault displacements [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2001, 21(3): 145 – 149. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 刘守华, 董津城, 徐光明, 等. 地下断裂对不同土质上覆土层的工程影响 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(11): 1868 – 1874. [LIU Shouhua, DONG Jincheng, XU Guangming, et al. Influence on different overburden soils due to bedrock fracture [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(11): 1868 – 1874. (in Chinese with English abstract)]
- [20] BRAY J D, SEED R B, SEED H B. Analysis of earthquake fault rupture propagation through cohesive soil [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 120(3): 562 – 580.
- [21] SCOTT R F, SCHOUSTRAL J J. Nuclear power plant siting on deep alluvium [J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1974, 100(4): 449 – 459.
- [22] H TANIYAMA, H WATANABE. Deformation of sandy deposits by fault movement[A]. Proc. 12th WCEE. 2000.
- [23] 郭恩栋, 邵广彪, 薄景山, 等. 覆盖土层场地地震断裂反应分析方法 [J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(5): 122 – 126. [GUO Endong, SHAO Guangbiao, BO Jingshan, et al. A method for earthquake rupture analysis of overlying soil site [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002, 22(5): 122 – 126. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 李红, 邓志辉, 陈连旺, 等. 走滑断层地震地表破裂带分布影响因素数值模拟研究——以 1973 年炉霍 $M_s7.6$ 地震为例 [J]. 地球物理学报, 2019, 62(8): 2871 – 2884. [LI Hong, DENG Zhihui, CHEN Lianwang, et al. Simulation study on the influencing factors of surface rupture zone distribution of strike-slip fault: Take Luhuo $M_s7.6$ earthquake in 1973 for example [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019,

- 62(8): 2871–2884. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 朱秀星, 全兴华, 薛世峰. 跨越断层的埋地管道抗震设计 [J]. 油气储运, 2009, 28(10): 30–33. [ZHU Xiuxing, TONG Xinghua, XUE Shifeng. Aseismic design for buried pipeline crossing fault [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2009, 28(10): 30–33. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 屈宏录, 刘德仁, 孙英萍, 等. 深厚黄土地基浸水湿陷变形及竖向土压力作用分析 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(4): 157–164. [QU Honglu, LIU Deren, SUN Yingping, et al. Analysis of collapsible deformation and vertical soil pressure action of thick loess foundation [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(4): 157–164. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 边加敏. 多级荷载下弱膨胀土的膨胀变形特性试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(5): 125–133. [BIAN Jiamin. An experimental study of expansion deformation characteristics of weak expansive soil under multi-stage load [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(5): 125–133. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 王伟, 王兴, 周勋, 等. 砂卵石地层盾构区间地表沉降影响因素聚类分析 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2024, 54(1): 219–230. [WANG Wei, WANG Xing, ZHOU Xun, et al. Cluster analysis of influencing factors of surface subsidence in shield interval of sandy gravel stratum [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(1): 219–230. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 沈杰, 徐浩, 邓虎成, 等. 复杂断裂区地应力场分布特征及扰动机制研究——以鄂尔多斯盆地定北地区上古生界为例 [J/OL]. 中国地质, 2023: 1–19. (2023-10-10) [2023-11-24]. [SHEN Jie, XU Hao, DENG Hucheng, et al. Distribution characteristics and disturbance mechanism of geostress field in complex fault zone: a case study of Upper Paleozoic in Dingbei area of Ordos Basin [J/OL]. Geology in China, 2023: 1–19. (2023-10-10) [2023-11-24]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20231009.1405.008.html>. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 吕国森, 章旭, 张云辉, 等. 川西鲜水河、安宁河和龙门山断裂带地热水的水文地球化学特征及成因模式的讨论 [J]. 中国地质, 2024, 51(1): 341–359. [LYU Guosen, ZHANG Xu, ZHANG Yunhui, et al. Discussion on hydrogeochemical characteristics and genetic model of geothermal waters in Xianshuihe, Anninghe and Longmenshan fault zones in western Sichuan, China [J]. Geology in China, 2024, 51(1): 341–359. (in Chinese with English abstract)]
- [31] 王清, 吕作俊, 姚萌, 等. 崇明东滩吹填区黏性土层抗剪强度随时间变化特征及机理 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2023, 53(4): 1163–1174. [WANG Qing, LYU Zuojun, YAO Meng, et al. Characteristics and mechanism of shear strength variation with time of cohesive soil layers in Chongming Dongtan reclamation area [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53(4): 1163–1174. (in Chinese with English abstract)]