

青海省日月山断裂对公路工程的致灾机理研究

周 保, 彭建兵, 张 骏, 邓龙胜

(长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 通过对青海省内一条北北西向右旋走滑断裂对公路工程危害现象的野外实地调查和室内有限元分析, 对其蠕滑运动下的致灾机理进行了讨论。结果表明, 断层蠕滑作用下的灾害多分布在上盘, 且上盘公路南半侧多发张剪性破裂, 北半侧多发压扭性破裂, 交汇位置的先期破裂是由南侧路沿开始并向路内扩展的。

关键词: 断裂; 右旋走滑; 公路工程; 上盘

中图分类号: P642.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2010)01-0106-05

Hazard Mechanism of Riyueshan Fault on Highway Engineering in Qinghai Province

ZHOU Bao, PENG Jian-bing, ZHANG Jun, DENG Long-sheng

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

Abstract Based on the field investigations and the indoor finite element analysis to a NNW-trending right-lateral strike-slip active fault which caused the road engineering hazards in Qinghai Province. The road hazard mechanism which caused by the creep motion of the active fault was discussed. The result showed that road hazards were mainly distributed in the upper wall; shear cracks in these places were in the south; and compressor-shear cracks were in the north; the early crack in the intersection started from the south of the highway and then extended to the middle.

Key words: fault; right-lateral strike-slip; highway engineering; upper wall

0 引言

前人就活断层作用对线性工程的破坏已有很多研究^[1-7], 但对公路工程灾害的研究却不多见^[8-9], 青海地区活断层十分发育, 且绝大多数表现为走滑运动特性, 公路工程跨越活断层除黏滑引起的直接剪断破坏外, 蠕滑也会引起多种灾害效应。青海省日月山北北西向断裂自晚新生代以来的右旋走滑明显, 就造成了多种灾害效应, 如路基路面开裂变形、凹陷发育等。因此, 日月山地区公路工程面临着严重的活断层灾害威胁, 有必要研究断裂对该地区公路工程的致灾机理。

1 日月山断裂概况

日月山断裂位于青藏高原东北部, 是青藏高原

北部少数几个北北西向右旋走滑为主兼有挤压逆冲性质的断裂之一, 为一岩石圈断裂, 形成于加里东期, 属疏勒南山—拉脊山断裂带中段, 是中祁连和南祁连地块的分界线^[10]。该断裂带北起大通河盆地北侧, 往南经热水煤矿、海晏县西至日月山口与拉脊山断裂带相接, 终止于新街、则察寺以南, 总体呈北西向 $15^{\circ} \sim 35^{\circ}$ 展布, 全长约 300 km。探槽剖面揭示此段断裂倾向东, 伴有逆冲性质(图 1^[11]), 断裂带全新世以来的水平滑动速率为 3.16 mm/a , 垂直滑动速率为 0.83 mm/a ^[12]。

最新考察资料证实, 沿断裂带不仅 5 级左右地震活动频繁, 而且在大通河南—公共麻寺一带发育多期古地震遗迹, 尤其在热水煤矿—公共麻寺一段附近发生的 7 级以上地震, 至今还保留有长达 60 km 左右的地震形变带, 分布有鼓包、裂缝、凹槽、

收稿日期: 2009-05-08

基金项目: 交通部国家西部交通建设科技项目(200431881211)

作者简介: 周 保(1982-), 男, 青海海北人, 工学博士研究生, 从事工程地质和地质灾害等研究。E-mail: zhb820322@163.com

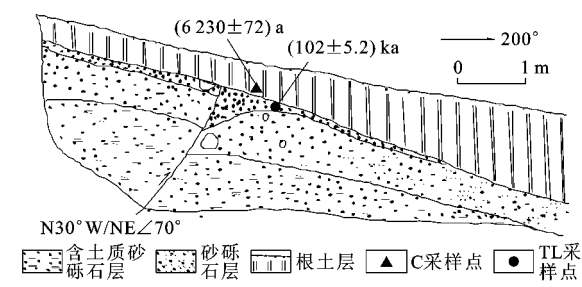


图 1 热水煤矿探槽剖面

Fig. 1 Trench Profile of Reshui Coal Mine

陡坎等。这些事实表明, 日月山断裂带的近代活动显著, 是一条全新世活动断裂带。

2 断裂活动引发公路工程灾害效应

活断层在地壳应力的持续缓慢作用下可出现缓慢的蠕动滑移位错。这种蠕滑活动可引起多种公路工程灾害效应: 公路下伏活断层的蠕滑位错可直接错断公路工程建(构)筑物, 还可造成地面不均匀沉降, 进而引发路基路面的不均匀沉降和开裂变形^[13]。

2.1 灾害现状

在青海日月山断裂带与 S204 省道交汇一线(图 2), 路基、路面破损严重, 经实地考察, 共发育 38 条主裂缝, 大小裂缝 94 条, 多数裂缝贯通发育, 路面凹凸不平, 路基、路面波状起伏, 路边道沿错裂等灾害现象严重。其中, 交汇位置附近公路被错裂, 表现为 2 条雁列式剪切裂缝贯通形成平行于断

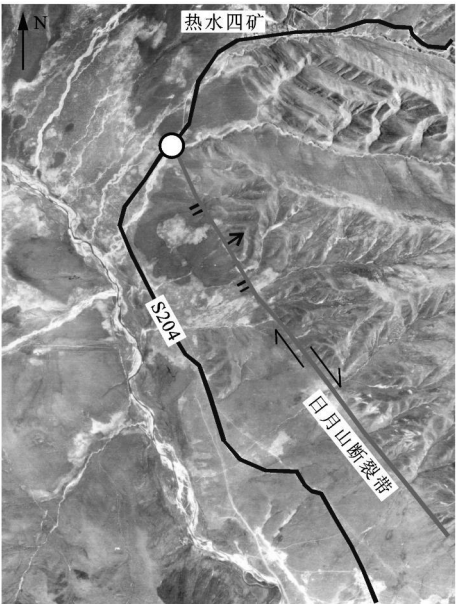


图 2 日月山断裂与 S204 省道交汇位置

Fig. 2 Intersection of Riyueshan Fault and Highway S204

裂的 Y 字形裂缝组(图 3)。在上盘离断裂带不远处, 发育近 100 m 长的大面积纵向开裂和长距离破裂带(图 4), 公路北半侧纵向裂缝密集分布, 南半侧长轴方向平行于公路的凹陷串珠状展布。继续向东, 路面发育 2 条平行展布的纵向裂缝(图 5), 间隔 2 m 左右, 单条裂缝最大宽度 10 cm, 路面凹陷, 长轴转为平行于断裂方向; 附近路面还发育有一处挤压褶皱变形(图 6), 裂缝与公路斜交; 离此处不远便可见长距离路基、路面波状起伏(图 7)。在断裂附近产生的这些路基、路面的破坏与断裂活动是分不开的。



图 3 公路路面横向开裂

Fig. 3 Cross Dehiscence of the Highway Surface



图 4 公路路面大面积破坏

Fig. 4 Widespread Destruction of the Highway Surface

2.2 成因分析

破坏现象集中出现在上盘, 下盘未见到明显破坏, 可能与后期公路检修有关。这些裂缝发育具有



图 5 公路路面张剪性裂缝发育

Fig 5 Shear and Extension Cracks of the Highway Surface



图 6 上盘公路路面压扭性破坏

Fig 6 Compresso-shear Damage in the Upper Wall of the Highway Surface



图 7 公路路基和路面波状起伏

Fig. 7 Undulation of the Highway Formation and Surface

两组不同力学成因的优势构造裂缝及其方向(图 8)。张性破裂多起始于公路南半侧路沿, 压性破裂多分布在公路北半侧。

2.2.1 张剪性破裂

断层蠕滑在其上盘引起路基、路面变形和开

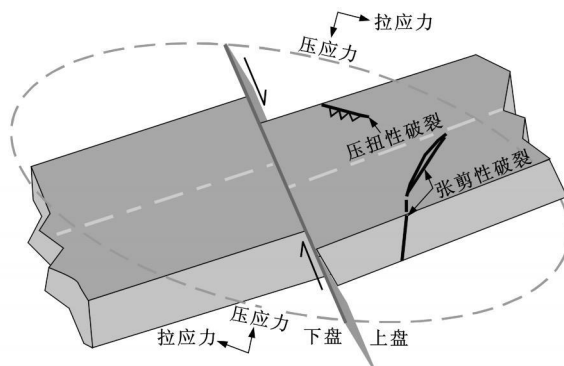


图 8 公路路面裂缝成因

Fig. 8 Cause of the Fissure of the Highway Surface

裂, 随着断层距离的增大, 应力开始衰减, 导致上盘不同路段的应变速率各异, 这种差异首先易在路沿位置应力集中, 产生近乎平行于断层走向的张剪性破裂, 随后向路内扩展, 在走滑断层拉应力分量的作用下逐渐转变为纵向张剪性质, 最终导致路面纵向拉裂(图 5)。

2.2.2 压扭性破裂

路基、路面在下伏断层剪切作用下, 交汇位置起初产生两组雁裂式挤压剪切破裂, 随后分支破裂在持续剪切作用下开始构造贯通, 最终表现为横向挤压剪切裂缝发育贯通的 Y 字形裂缝组(图 3)。由于挤压应力大, 近断层位置表现为大面积、长距离的纵向开裂和长轴方向垂直于挤压应力的凹陷(图 4)。由于断层走滑效应传递过程中的衰减, 远离断层位置只表现为压应力分量作用下的路面褶曲变形(图 7)。

3 致灾机理数值分析

3.1 有限元模型的建立

活断层对公路工程的破坏可以认为是断层两侧土体的不连续变形引起的, 因此, 可以在连续体中设置一构造面, 通过控制构造面两侧土体的活动来模拟活断层的活动情况。采用 MSC/MARC 大型通用有限元软件, 以日月山断裂带的活动情况为背景, 建立三维有限元模型, 研究日月山活断层对跨越该断层公路工程的致灾机理和影响效应。

根据文献[14-15], 对于一级公路, 断面尺寸为梯形, 取顶宽 21 m, 底宽 30 m, 高 3 m, 公路为 2 层, 从上向下分别为路面和路床, 其中路面厚度为 1 m, 路床厚度为 2 m。根据该断层的实际情况, 断层倾角为 70°, 走向与公路 60°角斜交。计算模型的长度按 360

m 选取, 其中从公路轴线与地表断层交点处向两端各取 180 m, 计算模型土体厚度为 60 m, 计算宽度从路床底部向两侧各取 50 m, 则计算模型土体尺寸为 360 m×130 m×50 m, 模型单元形态选用六面体单元, 其路面、路床及上下盘土体的单元分别划分为 360、720、15 000 个, 计算模型见图 9。

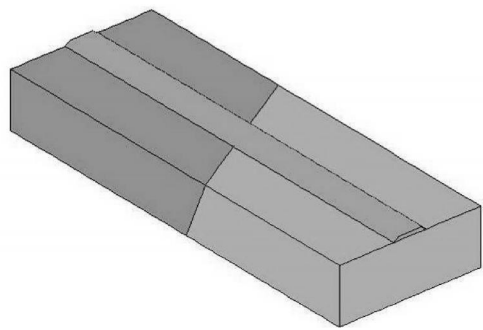


图 9 公路的三维有限元模型

Fig. 9 Three-dimensional Finite Element Model of Highway
上盘和下盘的土体设置为均质土, 路面为沥青混凝土, 路床为压实的粉质黏土, 根据文献[14-16], 各层材料参数按表 1 选取。

表 1 公路路基及土体参数

Tab. 1 Parameters of Highway Formation and Soil Body						
路别	密度/ (kg·m ⁻³)	弹性模量/ kPa	泊松 比	内聚力/ kPa	内摩擦 角/(°)	劈裂强度/ MPa
路面	2 400	2 200	0.25			1.4
路床	2 050	46	0.27	60	30	
土体	1 750	11	0.32	30	22	

模型材料为理想弹塑性材料, 采用 DP 屈服条件和相关流动法则。在断层上盘与下盘之间以及土体与公路路基之间均设置接触面, 采用库仑摩擦模型, 各接触体之间的摩擦系数按 $\tan \varphi$ 值选取。根据日月山断裂的观测数据, 其平行于断层走向的水平滑动速率为 3.16 mm/a, 垂直于断层走向的逆冲速率为 0.81 mm/a, 因此, 在进行计算时, 在上盘的两侧面施加沿断层走向的走滑位移和在下盘底部施加竖直位移来模拟日月山活断层的活动情况, 走滑位移和竖直位移之比为 3.16 : 0.81, 并约束模型其他侧面法向位移和上盘底部的竖向位移。

3.2 有限元结果分析

为了便于比较, 选取日月山断层年活动量的整数倍位移对日月山活断层环境下公路的受力、破坏机理进行模拟, 并与现场调查的公路变形和破坏情况进行对比研究。

图 10 中从上到下给出了地表走滑位移分别为 0.316、0.948、1.58 m, 竖向位移则分别为 0.081、0.243、0.405 m 时, 公路的纵向应力分布云图(图 10 中斜线表示断层位置和走向, 斜线左为上盘, 走滑方向为上盘沿 x 轴的正向), 较为明显的比较断层作用下公路内应力应变的变化趋势。由图 10 可见, 在日月山断层模拟环境下, 公路在纵向上处于拉、压的受力状态。在上盘范围内, 公路的压应力主要分布在断层附近的迎走滑位移一侧, 拉应力则主要分布在断层附近的远离走滑位移一侧, 下盘范围内公路的受力状态与上盘呈反对称分布。随着断层活动位移量的增加, 公路拉、压的受力范围及拉应力的基本大小不变, 而受压区的压应力增长明显。由于公路主要是由沥青混凝土组成, 其抗拉、抗压强度较低, 因此容易在受拉区及受压区的边缘产生拉、压破坏。

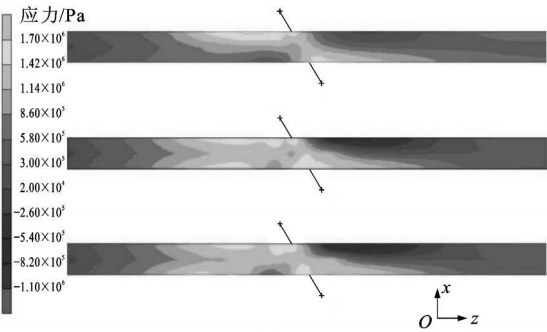


图 10 不同位移模拟环境下公路的纵向应力
Fig. 10 Longitudinal Direction of Stress Under Different Displacements in Simulation

地表走滑位移分别为 0.316、0.948、1.58 m, 竖向位移分别为 0.081、0.243、0.405 m 时, 公路的剪应力分布云图和塑性应变分布云图(图 11、12, 上为走滑位移 0.316 m, 竖直位移 0.081 m, 左为上

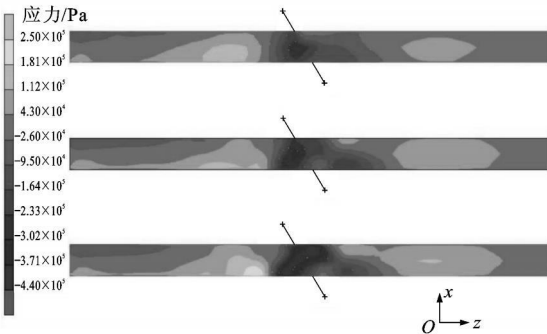


图 11 不同位移模拟环境下公路的剪应力
Fig. 11 Shear Stress Under Different Displacements in Simulation

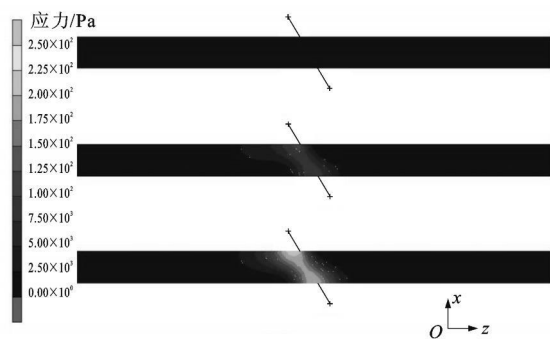


图 12 不同位移模拟环境下公路的塑性应变

Fig. 12 Plastic Strain Under Different Displacements in Simulation

盘)。由此可见,公路的剪应力基本沿断层位置呈反对称分布,且最大剪应力起初主要集中在断层上盘处,剪应力随断层活动位移量的增加而增大。公路的塑性应变主要沿断层上盘近断层位置分布,随着断层活动量的增大,塑性应变在增大,塑性应变的分布形状基本不变。

对于像日月山断层这样的走滑逆断层,上盘土体将对公路产生较大的沿走滑方向的摩擦力,而下盘土体对公路产生反方向的摩擦力,在断层处将产生剪切作用,造成公路的剪切破坏。由公路的塑性应变云图(图 10~12)可见,这是走滑环境下公路的主要破坏模式。这和图 3 现场调查的公路沿断层处直接剪切开裂的结果一致。

4 结语

(1)日月山断裂带晚新生代以来的走滑活动速率大,对公路工程产生了较大破坏,成为公路安全运行的较大隐患,制约了当地经济的发展。

(2)断裂带对公路的破坏模式表现为交汇点位置发育“Y”字形裂缝组,上盘公路南半侧多发张剪性破裂,北半侧多发压扭性破裂。

(3)从数值模拟结果看,公路的剪应力基本沿

断层位置呈反对称分布,最大剪应力起初集中在走滑断层和公路交汇位置的上盘近断层附近,随着断层位移量的增大,最大剪应力向上盘南侧路沿扩展,最大塑性应变由南侧路沿向路内扩展,表现为先期破裂是由南侧路沿开始并向路内扩展。

参考文献:

- [1] 吴珍汉, 胡道功, 吴中海, 等. 青藏铁路沿线的地裂缝及工程影响[J]. 现代地质, 2005, 19(2): 165-175.
- [2] 吴珍汉, 叶培盛, 吴中海, 等. 青藏铁路沿线断裂活动的灾害效应[J]. 现代地质, 2003, 17(1): 1-7.
- [3] 吴珍汉, 吴中海, 胡道功, 等. 青藏高原北部风火山活动断裂系及工程危害性研究[J]. 地质科技情报, 2003, 22(1): 1-6.
- [4] 胡道功, 欧阳永龙, 叶培盛, 等. 东昆仑断裂粘滑错动对青藏铁路变形效应的数值模拟[J]. 现代地质, 2005, 19(2): 176-180.
- [5] 欧阳永龙, 胡道功, 王连捷, 等. 地震断层粘滑错动对青藏铁路变形效应的有限元分析——以东昆仑活动断裂为例[J]. 地质力学学报, 2005, 11(4): 377-385.
- [6] 赵永国. 宝天公路选线工程地质环境遥感解译法的应用[J]. 中国公路学报, 1992, 5(4): 44-49.
- [7] 蔡厚维. 青藏高原的现今地壳活动性[J]. 西北地质, 2009, 42(1): 34-42.
- [8] 王治华. 青藏公路及铁路沿线的活动构造与其次生灾害[J]. 现代地质, 2003, 17(3): 227-236.
- [9] 王启耀, 蒋臻蔚, 彭建兵. 全新世活动断裂和地裂缝对公路工程的影响及对策[J]. 公路, 2006(2): 104-108.
- [10] 张雪亭, 杨生德. 青海省板块构造研究——1:1 000 000 青海省大地构造图说明书[M]. 北京: 地质出版社, 2007.
- [11] 袁道阳, 刘小龙, 刘百箴, 等. 青海热水—日月山断裂带古地震的初步研究[J]. 西北地震学报, 2003, 25(2): 136-142.
- [12] 袁道阳, 刘小龙, 张培震, 等. 青海热水—日月山断裂带的新活动特征[J]. 地震地质, 2003, 25(1): 155-165.
- [13] 彭建兵. 西部交通建设科技项目可行性研究报告[R]. 西安: 长安大学, 2004.
- [14] JTG B01—2003, 公路工程技术标准[S].
- [15] JTG D50—2006, 公路沥青路面设计规范[S].
- [16] 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册[M]. 第三版. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994.