

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.06-07

肯尼亚裂谷区地裂缝特征及成因分析

谭 鹏¹, 刘 阳², 蒋富强³, 温欣岚¹, 王飞永², 贾智杰²

(1. 中国路桥工程有限责任公司, 北京 100011; 2. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 3. 中交铁道设计研究总院有限公司, 北京 100088)

摘要: 肯尼亚裂谷位于东非大裂谷东支中段, 现代构造运动以及火山活动强烈, 是当今地学研究的热点地区。裂谷区因其独特的地质构造背景、岩土体特性以及气象水文条件, 使得地裂缝灾害较为发育。文章以肯尼亚裂谷地裂缝为研究对象, 利用资料收集、野外调查、槽探、钻探和室内土工试验等研究手段, 对研究区的地质环境背景、地裂缝平剖面结构特征进行研究。裂谷拉张和火山活动等内动力地质作用是该区域地裂缝形成的控制因素, 浅表部松散易潜蚀的土体是地裂缝形成的物质基础, 强降雨为地裂缝的形成提供了水力条件, “软硬软”的地层结构为水力侵蚀物质提供了有利的堆积场所。将肯尼亚裂谷区地裂缝的形成演化过程分为 3 个阶段: 孕育阶段、扩展阶段和成灾阶段。

关键词: 肯尼亚裂谷; 地裂缝; 平剖面特征; 潜蚀; 成因机理

中图分类号: P642.23

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2021)06-0053-10

Analysis of the characteristics and causes of ground fissures in Kenya rift region

TAN Peng¹, LIU Yang², JIANG Fuqiang³, WEN Xinlan¹, WANG Feiyong², JIA Zhijie²

(1. China Road and Bridge Corporation, Beijing 100011, China;

2. College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

3. CCCC Railway Consultants Group Co. Ltd., Beijing 100088, China)

Abstract: The Kenya Rift valley is located in the middle section of the eastern branch of the Great Rift valley in East Africa. Modern tectonic movement and volcanic activity are intense, and it is a hotspot in current geological research. The rift zone has developed ground fissure disasters due to its unique geological structure background, rock and soil characteristics, and meteorological and hydrological conditions. In this paper, we have studied the geological environment background, plane characteristics and shallow section structure characteristics of ground fissures in rift valley area through data collection, detailed field geological survey, trenching, drilling and indoor geotechnical tests. Internal dynamic geological processes such as rift extension and volcanic activity are the controlling factors for the formation of ground fissures in this area; the loose and easily eroded soil on the shallow surface is the material basis for the formation of ground fissures; strong rainfall provides hydraulic power for the formation of ground fissure. Conditions: The "soft-hard-soft" stratum structure provides a favorable accumulation place for water-erosive substances. Finally, we divide the formation and evolution process of ground fissures in the Kenya Rift Valley into three stages, the incubation stage, the expansion stage and the disaster stage.

Keywords: Kenya Rift valley; ground fissures; flat profile characteristics; undercutting; genetic mechanism

收稿日期: 2021-01-10; 修订日期: 2021-04-16

基金项目: 内马铁路地裂缝形成机理与减灾对策研究(2019-ZJTDKJ-05); 东非裂谷区地裂缝灾害机理与防控(41920104010)

第一作者: 谭 鹏(1984-), 男, 博士研究生, 主要从事岩土方面的研究。E-mail: tanpeng339@126.com

通讯作者: 刘 阳(1993-), 男, 博士研究生, 主要从事地质灾害防治以及岩土工程方面的研究。E-mail: cadx_ly@163.com

0 引言

地裂缝是一种在内外地质营力作用下,地壳浅表部土层中发生的破裂以及错断现象^[1-7],表现形式多种多样,常见的有地表裂缝、连续陷坑、陡坎、缓坡、隐伏地裂缝形成的近地表破碎带等。地裂缝在国内外分布广泛,对其影响范围内的农田、房屋建筑、公路铁路、油气管道等线性工程以及地下工程可造成巨大破坏,严重影响了耕地以及建设用地的适宜性,给国民经济带来了巨大损失^[8-16]。

东非大裂谷是目前地球表面最大的断层陷落带,具有典型的大陆裂谷特征,谷底地势平缓,边缘为相互平行的阶梯状断层群。受地质构造影响,裂谷区历史上火山活动异常活跃,断裂极为发育,地形高低起伏,工程地质条件异常复杂^[17]。根据 GPS 观测数据,东支裂谷现今仍以 0.5 cm/a 的速率进行扩张,构造活动强烈^[18]。岩浆侵入-地震活动-裂谷开裂是目前认为东非裂谷的主要活动模式。肯尼亚裂谷位于东非大裂谷东支的中段,构造活动和火山活动强烈,裂谷区岩层产生大量隐伏破裂,为地裂缝的产生提供了优势构造条件。肯尼亚裂谷地裂缝常在一场大雨后出露地表,与降雨侵蚀存在密切的相关性。裂谷区属于东非高原区,降雨具有短时降雨量大、频率高且极端降雨天气频发的特点。强烈的降雨可为地裂缝的形成提供有利的水力条件。裂谷区浅表部覆盖层多为第四纪火山沉积物,厚度较小,土质疏松,耐水力侵蚀能力较差,为地裂缝的形成提供了良好的物质条件。这种特殊孕育条件,使得该区域地裂缝较为发育,对当地居民的生活以及工程建设造成了不可忽视的影响,然而针对裂谷区地裂缝的基本特征以及成因机制的研究仍然很薄弱。

目前对于地裂缝成因机理的研究已经形成了一套较为完整的理论,主要有以下三种观点,即构造成因、地下资源开采成因、构造和地下资源开采复合成因^[19-24]。彭建兵等^[25]通过对西安地裂缝的系统研究,将地裂缝的成因机制进一步细化为:深部构造孕育地裂缝、盆地伸展萌生地裂缝、黄土介质响应地裂缝、断层活动伴生地裂缝、应力作用群发地裂缝、抽水作用加剧地裂缝、表水渗透开启地裂缝。在形成地裂缝的众多影响因素中,构造因素往往是地裂缝形成的内因,其控制了地裂缝的活动方式,其次不容忽视的是水的作用,其加剧了地裂缝的活动速率,缩短了其出露地表的进程^[26]。地裂缝与表水入渗的关系非常密切,已有学者针对该问题进行了探索研究。LU 等^[27]对陕西三原县双槐树地裂缝的成因

进行了研究,并对地裂缝带土的渗透特性进行了大型原位浸水试验。研究认为该地裂缝与隐伏断裂相连,其对地裂缝的形成具有控制作用,强降雨的渗透侵蚀作用使得地裂缝出露地表。乔建伟等^[28]将临汾盆地果场地裂缝的成因机理概化为构造孕缝、抽水诱缝和降雨扩缝。AYALEW 等^[29]对埃塞俄比亚裂谷的 Muleti 小镇降雨后出现的地裂缝进行了研究,作者认为该地裂缝与含水层的压缩和水平渗流应力没有确切的关系,地裂缝的产生与大雨期间的管涌和塌陷过程有关。NGECU^[30]研究了位于 Menengai 火山与 Nakuru 湖之间的小镇出现的带状地面塌陷。作者认为在水的渗透侵蚀作用下松散堆积层形成了连续的地下空洞,最终由于车辆或火车交通引起的振动或者暴雨的情况下,丧失稳定性从而导致地下坍塌,最终到达地表形成塌陷。

本文以肯尼亚裂谷段地裂缝为研究对象,通过资料收集、野外调查、槽探、钻探和室内土工试验等研究手段,对该区域地裂缝的基本特征以及成因机制进行了研究,研究成果可为该区域的工程建设提供科学依据,并为裂谷火山区地裂缝的研究提供借鉴。

1 自然地理以及地质背景

1.1 研究区概况

研究区位于东非大裂谷东支,肯尼亚裂谷的中部,属于东非高原区,地面高程 1 650 ~ 1 820m,地跨东经 36°17'30" ~ 36°35'45",南纬 0°56' ~ 1°09'(图 1)。谷底区为两侧隆起区相夹而形成的“地堑”地貌。裂谷底部地势平坦开阔,植被覆盖率高,零星散布着多个火山,其中规模较大的为研究区北侧的 Lognot 火山和南侧的 Suswa 火山。Longonot 火山为复式火山,火山口现已被茂密森林所覆盖,是一座休眠火山。Suswa 火山为一双层盾形火山,里层为一圈深堑,外层形成大大小小的三

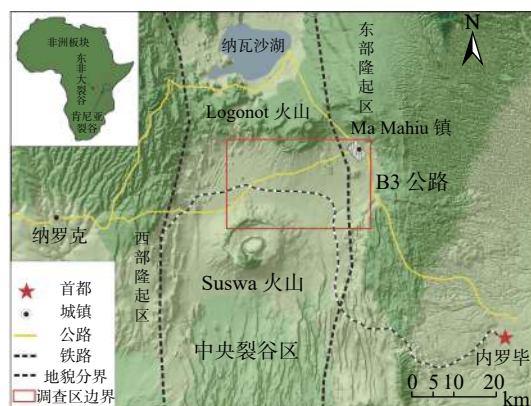


图 1 研究区地理位置

Fig. 1 Geographical location of the study area

十余个火山洞穴,属于休眠火山。研究区冲蚀作用强烈,分布有多条深切的冲沟,沟内无常年流水,在降雨后会形成短时汇流。在研究区发现多处地热气体逸出点,说明研究区地球内动力地质作用仍然很活跃。

1.2 活动断裂

调查区内活动断裂较少,主要分布于裂谷的肩部。区域上晚更新世-全新世断裂发育,沿东西隆起区和裂谷区分界线正断裂发育(图2)。在研究区南部裂谷区顺着裂谷延伸的方向也发育着众多全新世断裂。东部隆起区与裂谷中央区的边界发育一系列近于平行的正断层,台阶式断陷,整体断裂带影响宽度约15 km。北部断裂构造简单,为典型的地堑式正断层,走向NNW,由平行于裂谷方向的若干断裂组成,1928年1月6日曾发生里氏7.0级地震;西部隆起区断裂较少,走向基本和裂谷走向一致,主要由活动性较弱的晚更新世断裂组成,表现为断续延伸的线性。研究区内的活动断裂发育相对较少,因而地裂缝的形成与活动断裂相关性较小。

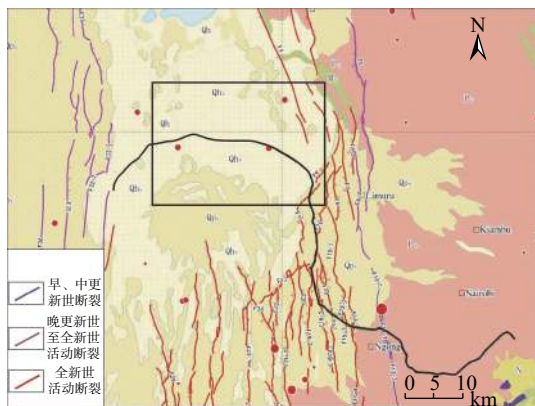


图2 研究区活动断裂分布图(据中国地震局修改)

Fig. 2 Distribution map of active faults in the study area (modified according to China Earthquake Administration)

1.3 地层结构以及岩土体特性

研究区内主要发育新生界地层,特别是第四纪以来的地层,以第四系火山碎屑沉积及冲、洪积层为主,第四系和新近系火山岩亦分布较广。第四系覆盖层厚度分布不均,具体表现为谷底区及两翼沟谷内分布较厚,其他地段则普遍较薄。新近系岩层则主要分布于裂谷及两翼火山熔岩流区。通过研究区布设多个勘探钻孔,揭露出研究区具有特殊的“软硬软”地层结构(图3)。图中①—④为上部软层,主要以粉砂为主,为岩层上部的覆盖层,厚度5—15 m。中部硬层为厚层凝灰岩,厚度约40 m,上部和下部风化程度较高,中部为弱风化,且该层

存在较多的岩体裂隙。凝灰岩下部又是一层粉土、粉砂为主的软质岩层。

上部覆盖层土体主要为粉砂,其孔隙比较大,密度很小,容易受到水力侵蚀。通过颗粒分析实验发现,土中含有较多的火山浮石颗粒。浮石的容重小,是一种多孔、轻质的玻璃质酸性火山喷出岩,可在水中浮起,且本身强度不高,风化后可形成不同大小的浮石颗粒,吸水能力很强。浮石土在工程上是一种不良的土质材料,其具低密度、多孔隙、结构较松散、弱胶结、吸水率高、承载力较低、难以碾密、抗冲蚀能力差的特性,容易引起地基不均匀沉降,在雨水作用下容易诱发滑坡等不良地质灾害^[31]。

研究区浅表部覆盖层较薄且抗水力侵蚀能力较差,其下部岩层中存在较多的贯通裂隙,因而这种地层结构在长期的水力侵蚀作用下易于发生潜蚀破坏。

1.4 岩体破裂

研究区的岩层埋深较浅,存在多个天然岩体露头,其主要位于河道、采石场以及邻近裂谷肩部区域。通过岩体出露区节理的统计以及多个勘探钻孔的资料分析,获得研究区岩体破裂的基本发育特征。

研究区内岩体裂隙较为发育,主要表现为平行以及X型展布的特征。在多个河道中观测到的岩体裂隙大多呈平行展布,节理面近垂直,部分节理尾部出现分叉,形态上弯曲粗糙呈现树枝状,表现为张节理的特征。在地裂缝带内岩体裂隙尤为发育,其发育的优势方向约为320°,与裂谷展布方向一致(图4)。在邻近裂谷肩部区域的天然岩石露头处,观测到岩体裂隙表现为X型共轭剪节理的特征,节理平直且相互切割形成网状形态(图5),两组优势节理走向分别为110°和203°。

通过钻探揭露发现钻探岩芯中多次出现竖向、斜向的裂缝,多为张裂缝,部分裂缝断面含有铁锈,个别张裂缝中有泥质填充。在勘探孔Z-73-120钻进过程中,发现岩芯出现裂缝。该勘探孔深度62.2 m,裂缝出现在39~44.7 m段,呈不连续的竖向裂隙将岩芯剖分为两半,其中39~40.0 m裂缝宽度约10 mm,竖向长度约1 m,无充填(图6);40.8 m~44.7 m裂缝宽度约为25 mm,竖向长度3.9 m,裂缝为黏土充填,黏土手摸有细腻滑感。两处裂缝岩芯断面处均未发现擦痕,应为张裂缝。

研究区的岩体受张性和剪性岩体裂隙切割,岩体较为破碎。浅部岩体裂隙与地表分布的第四系覆盖层贯通性较好,是有利的地表水、地下水下渗、排泄通道。埋深较深的岩体裂隙与地表贯通性较好,特别是裂缝中含有黏土夹层的裂缝。浅表黏土颗粒,随地表水下渗至



图 3 地层柱状图
Fig. 3 Stratigraphic histogram

岩体裂缝处滞留,形成泥质夹层。此类裂缝与地表贯通性好,形成良好的地表水、地下水渗透、潜蚀、排泄通道,易于在上覆土层内形成自下而上的地裂缝。

1.5 降雨

研究区位于东非高原,以热带草原气候区为主,每

年的 3—6 月和 10—12 月是雨季,其余月份是旱季,其中 3—6 月是大雨季、10—12 月是小雨季。年平均降水量 600 ~ 1 400 mm,年均蒸发量为 1 450 ~ 2 200 mm^[32]。

研究区西北约 8.5 km 处的纳库鲁气象站是距研究区最近的一个气象站。对其 1980 年到 2019 年 40 年的

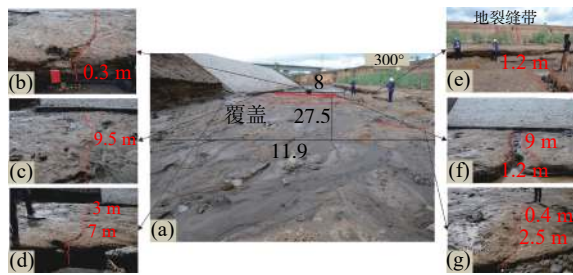


图 4 平行岩体裂隙

Fig. 4 Parallel rock stratum fissures



图 5 X 型岩体裂隙

Fig. 5 X-type rock stratum fissure

图 6 钻孔 Z-73-120 深度 40~45 m 岩芯
(岩芯被张裂缝一分为二, 泥质充填)

Fig. 6 Core of borehole z-73-120 with depth of 40~45 m (the core is divided into two parts by tensile fracture and filled with mud)

日降雨量进行统计分析, 在 1981 年 4 月 26 日出现了最大日降雨量 329.95 mm, 该数据为 40 年来最大日降雨量, 且在 2007 年到 2013 年, 极端降雨出现的频率有所增加(图 7)。

通过野外调查发现, 研究区地裂缝出露地表多发生于雨季, 地裂缝的产生与降雨的相关性较高。研究区降雨具有短时降雨量大、频率高且极端降雨天气频发的特点。强烈的降雨可为地裂缝的形成提供有利的水力条件。

2 地裂缝基本特征

研究区地裂缝研究基础较为薄弱, 没有地裂缝活动的历史记录, 多数地裂缝的形成历史已无从考证。通过对研究区多期 Google 卫星影像的解译以及地裂缝现场地质调查工作, 研究现阶段地裂缝的平面分布规律, 通

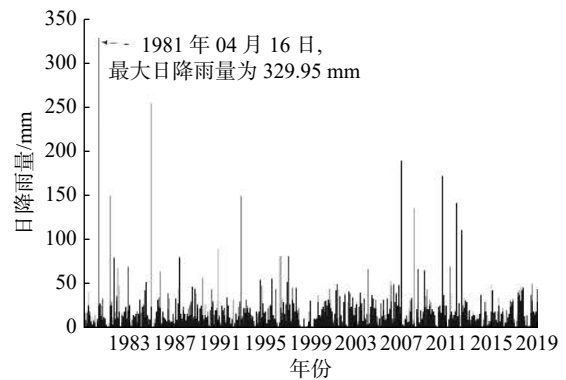


图 7 肯尼亚裂谷日均降雨量 (Nakuru 台站, 1980—2019 年)

Fig. 7 Daily average rainfall in the Rift Valley of Kenya (Nakuru Station, 1980—2019)

过对典型地裂缝探槽揭露, 研究该区域地裂缝的剖面结构特征。

2.1 平面分布特征

研究区共发育有 21 条地裂缝, 大多分布在地势平坦开阔的裂谷中心区两个火山之间, 靠近谷肩区域的地裂缝较少(图 8)。

研究区地裂缝大多呈平行分布且直线延伸, 地表可见延伸长度 174 ~ 5000 m(表 1)。对地裂缝的走向进行统计, 绘制地裂缝走向玫瑰图(图 9)。该区域地裂缝的走向集中于 34° ~ 360° 和 20° ~ 30° 这两个区间, 具有明显的定向性。肯尼亚裂谷在该段的走向约为 353°, Logonot 火山与 Suswa 火山连线走向约为 25°, 分别与地裂缝的优势走向重合。由此可见, 该区域地裂缝的形成与裂谷水平拉张以及火山活动密切相关, 且裂谷拉张作用为主导因素。

地裂缝平面形态为直线型, 多表现为带状地面塌陷, 部分为串珠状落水洞。平面组合形式为雁列状、平行状分布。直线型地裂缝的形成多受隐伏断裂所控制, 而该区域现代构造活动强烈, 岩层埋深较浅。根据野外岩体露头观测以及工程钻探资料, 该区域岩体破裂较为发育, 因此隐伏岩体破裂对该区域地裂缝的形成具有控制作用。地裂缝的平面组合特征, 反映了区域地应力的特征。平行分布的地裂缝常为拉张应力环境的产物^[25]。肯尼亚裂谷为主动性裂谷, 地下热点的岩浆上涌, 到岩石圈后被阻挡, 向四周水平流动, 牵引岩石圈水平拉张破裂, 断陷而形成裂谷^[33]。因此, 该区域水平拉张应力为该区域的主应力状态。雁列式分布的地裂缝常形成于剪切应力状态。该区域分布有多处火山, 因火山活动的影响, 在某一时期, 该区域存在局部剪切应力, 从而形成雁列式的岩体破裂形态, 进而可形成雁列式的地裂缝。

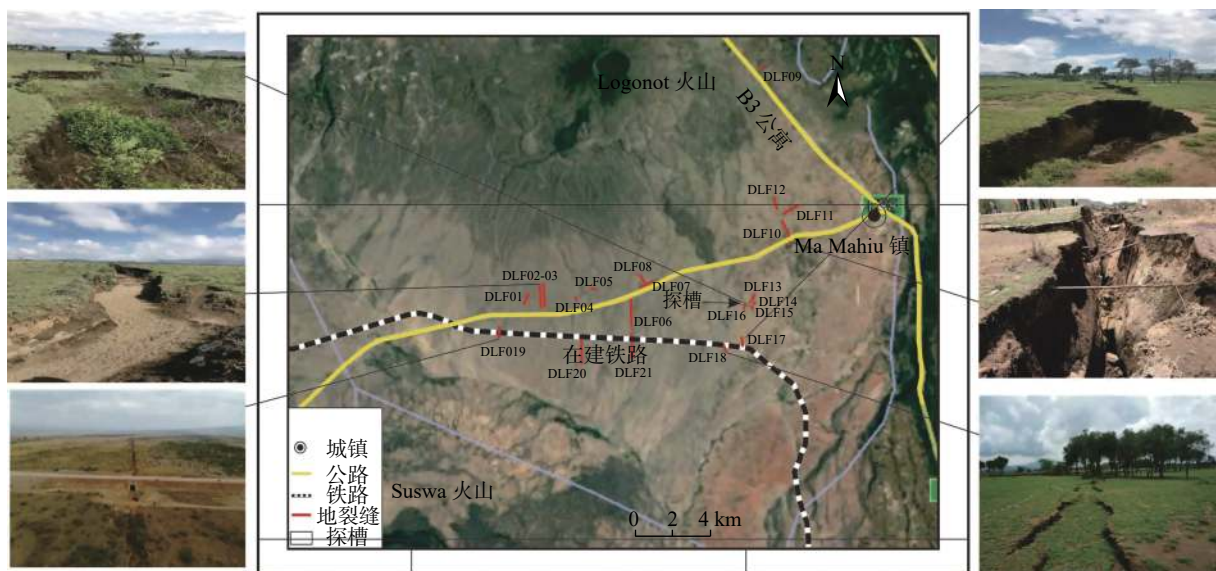


图 8 地裂缝平面分布图

Fig. 8 Plane distribution map of ground fissures

表 1 地裂缝分布状况

Table 1 Distribution of ground fissures

地裂缝编号	走向/(°)	长度/m	主要特征
DL01	22	758	宽8 m, 深4.5 ~ 5 m, 平面呈直线状, 底部可见明显水流冲刷痕迹, 地层水平, 未见明显位错
DL02	355	2000	宽5 m, 深6.6 m, 地表为直线状出露
DL03	357	1900	宽6 m, 深4.8 m, 地表为直线状出露
DL04	175	306	宽1.6 ~ 5 m, 深2.7 m, 地表为直线状出露
DL05	288	393	最宽处达12 m, 深1.2 m, 地表为直线状出露
DL06	181	1 200	宽8.4 m, 深6.8 m, 与B3公路相交, 地表为直线状出露
DL07	63	950	宽10 ~ 15 m, 深5.4 m, 线性延伸较好, 侧壁垂直, 冲刷强烈
DL08	327	665	直线延伸, 在平面上与DL007在平面垂直相交
DL09	35	375	宽4 ~ 6 m, 平面形态为直线状出露。
DL10	340	5 000	出现时间为2018年3月13日傍晚, 最大深度可达15 m, 宽度约2 ~ 5 m
DL11	255	947	宽2 ~ 4 m, 侧壁垂直, 地表为直线状出露
DL12	340	420	宽10 ~ 20 m, 底部植被覆盖茂盛, 地裂缝北端可观测到岩层出露
DL13	239	457	裂缝最北端存在一近圆形陷坑, 宽3.7 m, 深0.3 ~ 0.6 cm
DL14	30	190	宽6 m, 底部植被覆盖茂盛, 地表为直线状出露
DL15	238	174	沿南东方向延伸, 最终消失在田地里, 两侧发育有落水洞, 最深处1.5 m, 植被发育茂盛
DL16	20	1 400	雁列状展布, 南段宽2 ~ 4 m, 北段宽2 ~ 3 m, 最深处1.5 m
DL17	340	500	直线延伸, 最深处1.5 m
DL18	330	459	直线延伸, 深度0.2 m左右, 裂缝侧面发育一排小落水洞
DL19	343	1 256	冲沟侧壁直立, 现状宽2 ~ 5 m, 深2 ~ 4 m
DL20	340	1 000	冲沟侧壁直立, 现状宽4 ~ 5 m, 深3 ~ 4 m
DL21	350	1 594	现状沟宽3 ~ 10 m, 深2 ~ 3 m, 直线延伸

该区域地裂缝平面形态主要为直线型, 表现为构造地裂缝的特征, 受隐伏岩体破裂控制。该区域地裂缝走向的定向性以及平面组合形式显示裂谷的水平拉张作用和火山活动与地裂缝的形成密切相关。

2.2 剖面结构特征

为研究该区域地裂缝的剖面结构特征, 对铁路北侧

约 2.2 km 的地裂缝进行了探槽揭露。通过 Google Earth 时间轴观测, 该地裂缝形成于 2010 年至 2013 年期间, 该时间段也为该区域极端降雨天气频发的阶段 (图 7)。该地裂缝现状表现为地表陷坑及冲沟, 沟宽 2 ~ 7 m, 深 1 ~ 2 m, 从北向南逐渐变浅, 沟两侧侵蚀减弱。全长 398 m, 走向为 197°, 中部断开, 呈断续出露。

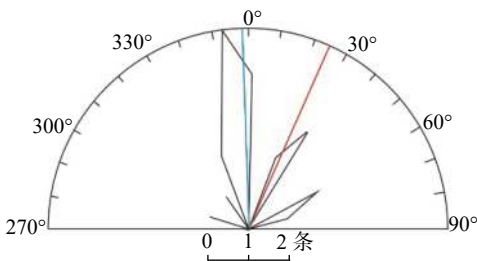


图 9 地裂缝走向玫瑰图 (蓝线为裂谷走向, 红线为火山连线方向)
Fig. 9 Rose flower diagram of ground fissure strike (blue line is rift strike, red line is the direction of volcano connection)

探槽开挖位置位于该地裂缝的北端(图 10 a 和图 10 b)。

探槽长约 22 m, 宽 12 m, 深 6.5 m, 垂直地裂缝走向开挖。探槽底部为弱风化的火山角砾岩 (图 10 f), 施工机械开挖至该层后已很难向下挖掘, 该层上部为砂土和浮石的互层。火山角砾岩存在两条岩层裂缝, 裂缝向上延伸直至地表形成两条地裂缝, 主裂缝 f1 和次级裂缝 f2。裂缝两侧地层连续性较好, 地层水平, 无垂直位错, 两条裂缝近似呈平行分布。

f1 裂缝剖面形态呈上大下小的楔形体, 岩层面以上部分以及岩体裂缝均已被粉砂填充 (图 10 e)。裂缝顶部最宽处约 2.8 m, 底部最窄处 0.7 m, 对应于地表冲沟的位置。裂缝长期受表水入渗的影响, 裂缝处土呈黑棕色, 有机质含量较高。f2 裂缝宽度较小约 5 ~ 10 cm, 走向 215°, 岩层面以上部分已被填充, 岩体裂缝仍处于张

开状态, 未被填充, 且在开挖后有凉气逸出, 持续半天后, 气体逐渐消失 (图 10 g 和图 10 h)。裂缝在剖面呈近直立形态, 在地表未形成明显的地表裂缝, 表现为串珠状落水洞。

探槽揭露出的两条地裂缝, 下部均与岩体裂缝相连接, 地层无垂直位错, 裂缝处土体水力侵蚀现象明显, 剖面形态上呈现上大下小的楔形体。岩体裂缝的存在是地裂缝形成的前提条件, 强烈的水力侵蚀以及松散易侵蚀的土体是裂缝出露地表的决定性因素。

3 机理分析

研究区地裂缝的形成与区域构造应力、降雨、浅表部土体性质以及地层结构均密切关系。

研究区位于主动型裂谷的谷底区, 区域构造应力主要为拉张应力。该区域散布有多个大大小小的火山, 在火山活动作用的影响下, 存在局部的剪应力区域。在水平拉张以及火山活动作用下, 岩体形成不同宽度以及延伸长度的岩体裂缝, 在平面上表现为直线型平行和雁列状分布的地裂缝。根据研究区地裂缝走向统计分析, 研究区地裂缝的走向与裂谷走向以及两个主要火山的走向具有明显的相关性, 且与裂谷走向的相关性更高。

研究区降雨具有短时降雨量大, 频率高、极端降雨天气频发的特点, 从而使得研究区水力侵蚀特别强烈。

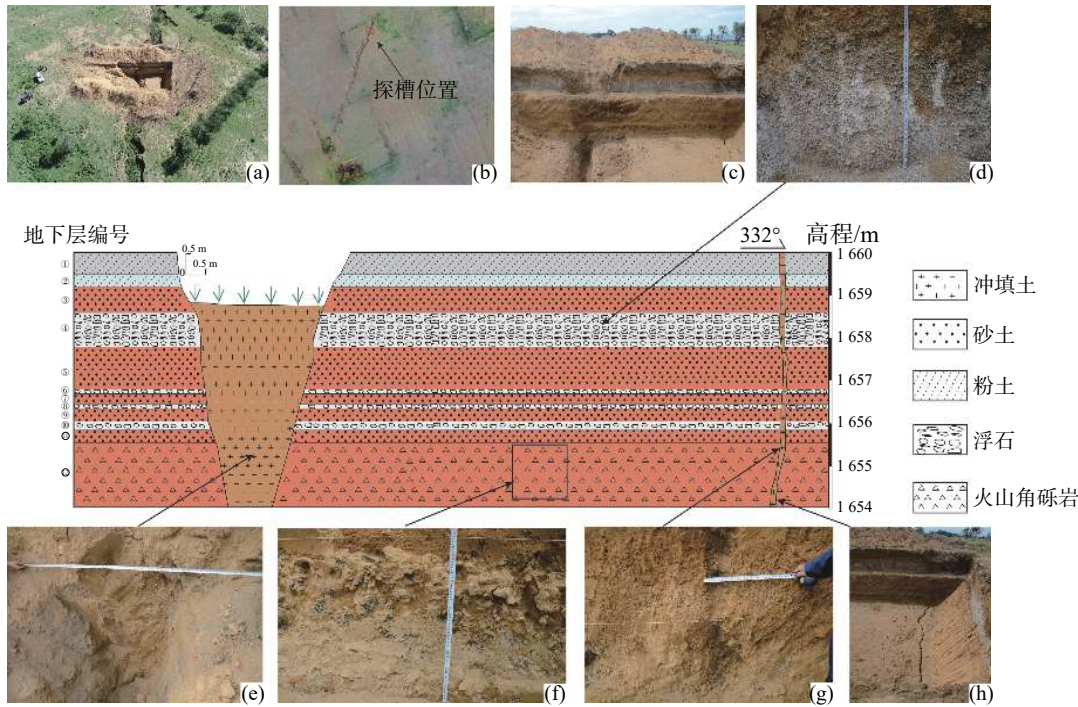


图 10 探槽剖面图

Fig. 10 Sectional view of the trench

研究区多条地裂缝均是在一场大雨后出露地表的,与降雨存在较高相关性。从多期谷歌影像解译出的地裂缝,其出现时间也多位于 2007 年到 2013 年极端降雨频发的时间段。因而该区地裂缝的形成与降雨入渗存在密切关系。当出现强降雨并导致地面大量积水时,由于岩体裂缝形成的过程中破坏了土层结构,加强了上、下土层之间的连通,增强了土体的渗透性,使得雨水较容易沿地裂缝带下渗到土层深部,导致裂缝带土体强度降低并发生渗透或侵蚀变形,同时地表积水还会增大裂缝带土体的上部荷载^[24]。在表水下渗的影响下,可能会触发地裂缝重新开裂和活动。

该区域浅表部土体主要为粉砂以及浮石的互层,土质疏松,孔隙比较大,密度较小,且其在浸水饱和后,抗剪强度衰减幅度很大,因而其抗水力侵蚀能力较差。土体中含有较多的浮石颗粒,具有较强的吸水能力,从而使得土体浸水饱和后,其饱和重度相对于天然重度变化较大,在重力作用下更容易发生坍塌。在岩体裂缝形成的过程中,浅表部土体也被一定程度的扰动,在裂缝上部可形成一个破碎带。表水沿着该破碎带优势入渗,岩体裂缝上部逐渐在渗流的作用下由下而上发生垮塌,最终出露地表形成地裂缝。

该区域典型的隐伏岩体破裂以及“软硬软”地层结构为水流裹挟上部软层物质提供了堆积场所。岩体的构造裂缝是上部松散沉积物在水力侵蚀作用下的堆积场所,裂缝的宽度、破裂岩层的厚度以及裂缝的连通性,决定了其储存物质的能力的大小。裂缝越宽,破裂岩层越厚,连通性越好,其储存物质的能力也就越强。当充填物质填满岩体裂缝时,浅表部地裂缝的发展也就结束了。该区域钻孔揭露的岩层厚度为 40~50 m 左右,上部软层厚度较小 5~15 m 左右。岩层裂缝处具有足够的储存空间可以容纳上部软层的水力侵蚀物质。软硬岩交界处也是水力侵蚀最强的位置,因而与中部硬层相接的下部软层的水力侵蚀也会比较强烈,可形成潜蚀空腔,扩大了容纳物质的能力。这种地层结构的形成与火山多期次喷发有关,在深部可能存在多套这种结构地层,从而使得上部土体在渗流作用可下进入深部地层。

综上,裂谷拉张和火山活动等内动力地质作用是该区域地裂缝形成的控制因素;浅表部松散易潜蚀的土体是地裂缝形成的物质基础;强降雨为地裂缝的形成提供了水力条件,是地裂缝出露地表的动力源;具有岩体裂缝的“软硬软”的特殊地层结构为水力侵蚀物质提供了有利的堆积场所。构造作用产生了早期的岩体破裂,其

控制了该区域地裂缝的基本格局,是该区域地裂缝形成的主控因素。强降雨是后期地裂缝出露地表的一个重要诱发因素和动力源。

可将裂谷区地裂缝的形成过程分为以下 3 个阶段,如图 11 所示。

孕育阶段:在东非大裂谷区域拉张应力、深部热运动以及火山的周期性活动的顶托作用下导致松散层下部岩层产生拉裂破坏,形成隐伏岩体破裂。岩体破裂形成的过程中,对裂缝上部一定范围土体产生扰动,使得其土体强度降低,孔隙度增大,易于被水流冲刷。在自重下作用下,土体产生一定程度塌落,最终形成初始状态的塌落空腔,空腔顶部形成塌落拱。

扩展阶段:降雨入渗作用下,在土体内部形成渗流。塌落空腔顶部与侧面土体发生潜蚀作用,水裹挟土体颗粒通过隐伏岩体裂缝进入岩层下部土体。随着潜蚀作用的持续进行,塌落拱逐渐向上延伸,上覆土层厚度逐渐减小,而其跨度逐渐增大,当跨度刚好等于极限跨度时,则上覆土体处于极限平衡状态。这一阶段是其漫长的过程,地表并没有明显的破坏迹象。

成灾阶段:地表则逐渐出现微弱沉降变形或是细小裂缝,一般不容易被观测到。当遇到一场大雨时,上覆土体容重增大的同时强度降低,且作用有渗流的拖曳力,当达到土体极限破坏强度时,上覆土体发生坍塌或开裂,使得地裂缝出露地表。破坏过程一般较快且具有突发性的特点,很难提前监测到。

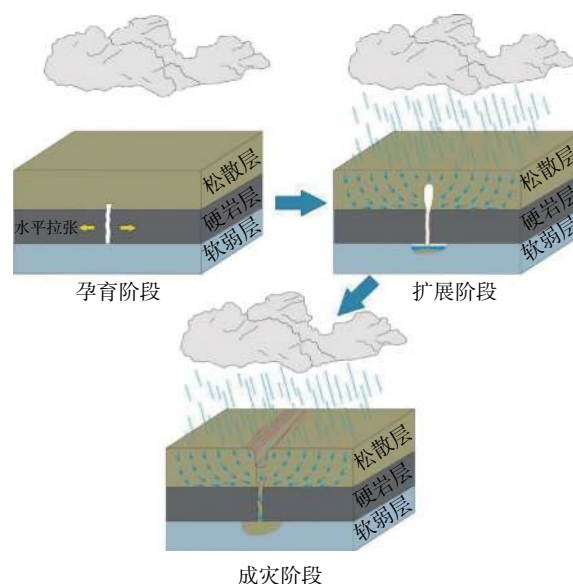


图 11 肯尼亚裂谷地裂缝成因机理

Fig. 11 The genetic mechanism of ground fissures in the Kenya Rift Valley

4 结论

(1) 肯尼亚裂谷区地裂缝是典型的构造型地裂缝, 地裂缝裂面陡直, 以水平拉裂和垂直塌陷为主;

(2) 裂谷区地裂缝的走向与裂谷走向以及区域内两个主要火山的连线方向具有明显的相关性, 在剖面上表现为上大下小的楔形体, 填充物水力侵蚀现象明显, 裂缝两侧无垂直位错;

(3) 裂谷拉张和火山活动等内动力地质作用是该区域地裂缝形成的控制因素; 浅表部松散易潜蚀的土体是地裂缝形成的物质基础; 强降雨为地裂缝的形成提供了水力条件, 是地裂缝出露地表的动力源; “软硬软”的地层结构为水力侵蚀物质提供了有利的堆积场所;

(4) 裂谷区地裂缝的形成可分为 3 个阶段: 孕育阶段、扩展阶段和成灾阶段。

参考文献 (References):

- [1] PENG J B, FAN Z J, WU D, et al. Heavy rainfall triggered loess-mudstone landslide and subsequent debris flow in Tianshui, China [J]. *Engineering Geology*, 2015, 186: 79–90.
- [2] 彭建兵, 陈立伟, 黄强兵, 等. 地裂缝破裂扩展的大型物理模拟试验研究 [J]. *地球物理学报*, 2008, 51(6): 1826–1834. [PENG Jianbing, CHEN Liwei, HUANG Qiangbing, et al. Large-scale physical simulative experiment on ground-fissure expansion mechanism [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2008, 51(6): 1826–1834. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 徐继山, 彭建兵, 马学军, 等. 邢台市隆尧地裂缝发育特征及成因分析 [J]. *工程地质学报*, 2012, 20(2): 160–169. [XU Jishan, PENG Jianbing, MA Xuejun, et al. Characteristic and mechanism analysis of ground fissures in Longyao, Xingtai [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2012, 20(2): 160–169. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 李志明, 杨旭东, 兰剑梅, 等. 河北邢台柏乡地裂缝成因分析 [J]. *水文地质工程地质*, 2010, 37(2): 135–138. [LI Zhiming, YANG Xudong, LAN Jianmei, et al. An analysis of earth fissure at Baixiang County, Xingtai City [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2010, 37(2): 135–138. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 王庆良, 刘玉海, 陈志新, 等. 抽水引起的含水层水平应变: 地裂缝活动新机理 [J]. *工程地质学报*, 2002, 10(1): 46–50. [WANG Qingliang, LIU Yuhai, CHEN Zhixin, et al. Horizontal strain of aquifer induced by groundwater pumping—a new mechanism for ground fissure movement [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2002, 10(1): 46–50. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 李世雄, 李守定, 郜洪强. 河北平原地裂缝分布特征及成因机制研究 [J]. *工程地质学报*, 2006, 14(2): 178–183. [LI Shixiong, LI Shouding, GAO Hongqiang. The distribution characters and origin mechanics of ground fissures hazard in Hebei plain [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2006, 14(2): 178–183. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 卢全中, 赵富坤, 彭建兵, 等. 隐伏地裂缝破裂扩展研究综述 [J]. *工程地质学报*, 2013, 21(6): 898–907. [LU Quanzhong, ZHAO Fukun, PENG Jianbing, et al. Overview on rupture propagation studies of buried ground-fissures [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2013, 21(6): 898–907. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 王景明, 王春梅, 刘科. 地裂缝及其灾害研究的新进展 [J]. *地球科学进展*, 2001, 16(3): 303–313. [WANG Jingming, WANG Chunmei, LIU Ke. Progress in ground fissures and its hazard research [J]. *Advance in Earth Sciences*, 2001, 16(3): 303–313. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 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)]
- [10] PENG J B, SUN P, IGWE O, et al. Loess caves, a special kind of geo-hazard on loess plateau, northwestern China [J]. *Engineering Geology*, 2018, 236: 79–88.
- [11] PENG J B, QU W, REN J, et al. Geological factors for the formation of xi'an ground fractures [J]. *Journal of Earth Science*, 2018, 29(2): 468–478.
- [12] XU J S, PENG J B, DENG Y H, et al. Development characteristics and formation analysis of Baixiang earth fissure on North China plain [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, 78(5): 3085–3094.
- [13] ZHUANG J Q, PENG J B, WANG G H, et al. Prediction of rainfall-induced shallow landslides in the Loess Plateau, Yan'an, China, using the TRIGRS model [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2017, 42(6): 915–927.
- [14] 郭宇, 周心经, 郑小战, 等. 广州夏茅村岩溶地面塌陷成因机理与塌陷过程分析 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2020, 31(5): 54–59. [GUO Yu, ZHOU Xinjing, ZHENG Xiaozhan, et al. Analysis on formation mechanism and process of Karst collapse in Xiamao Village, Guangzhou City of Guangdong Province [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2020, 31(5): 54–59. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 冯亚伟, 李志峰, 仝路, 等. 山东荆泉断块区覆盖型岩溶塌陷控制因素和影响因素分析 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2020, 31(3): 73–82. [FENG Yawei, LI Zhifeng,

- TONG Lu, et al. Analysis on factors controlling and influencing overburden Karst collapse in Jingquan fault block, Shandong Province [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2020, 31(3): 73–82. (in Chinese with English abstract)
- [16] 石鹏远, 余洁, 朱琳, 等. 应用地理探测器改进地面沉降危险性评估模型的研究 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2019, 30(3): 101–112. [SHI Pengyuan, YU Jie, ZHU Lin, et al. Hazard assessment model of land subsidence based on geographical detector [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2019, 30(3): 101–112. (in Chinese with English abstract)]
- [17] STAMPS D S, FLESCHE L M, CALAIS E, et al. Current kinematics and dynamics of Africa and the east African rift system [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2014, 119(6): 5161–5186.
- [18] JEAN C. The East African rift system [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2005, 43(1/2/3): 379–410.
- [19] HERNANDEZ-MARIN M, BURBEY T J. Controls on initiation and propagation of pumping-induced earth fissures: insights from numerical simulations [J]. *Hydrogeology Journal*, 2010, 18(8): 1773–1785.
- [20] WILLIAMS F M, WILLIAMS M A J, AUMENTO F. Tensional fissures and crustal extension rates in the northern part of the Main Ethiopian Rift [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2004, 38(2): 183–197.
- [21] BUDHU M. Earth fissure formation from the mechanics of groundwater pumping [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2011, 11(1): 1–11.
- [22] 伍洲云, 余勤, 张云. 苏锡常地区地裂缝形成过程 [J]. *水文地质工程地质*, 2003, 30(1): 67–72. [WU Zhouyun, YU Qin, ZHANG Yun. Forming process of earth fissure hazard in the Suzhou-Wuxi-Changzhou area [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2003, 30(1): 67–72. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 彭建兵, 马润勇, 邵铁全. 构造地质与工程地质的基本关系 [J]. *地学前缘*, 2004, 11(4): 535–549. [PENG Jianbing, MA Runyong, SHAO Tiequan. Basic relation between structural geology and engineering geology [J]. *Earth Science Frontiers*, 2004, 11(4): 535–549. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 乔建伟, 薛守中, 彭建兵, 等. 临汾盆地果场地裂缝成因机理分析 [J]. *工程地质学报*, 2015, 23(4): 769–777. [QIAO Jianwei, XUE Shouzhong, PENG Jianbing, et al. Analysis for mechanism of Guochang earth fissures in Linfen basin [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2015, 23(4): 769–777. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 彭建兵, 张勤, 黄强兵, 等. 西安地裂缝灾害 [M]. 北京: 科学出版社, 2012. [PENG Jianbing, ZHANG Qin, HUANG Qiangbing, et al. Ground fissure disaster in Xi'an [M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese)]
- [26] 蒋臻蔚, 彭建兵, 王启耀. 抽水作用下先期断裂对地裂缝的影响研究 [J]. *工程地质学报*, 2010, 18(5): 651–656. [JIANG Zhenwei, PENG Jianbing, WANG Qiyao. Influence of pre-existing fault on ground fissures during pumping action [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2010, 18(5): 651–656. (in Chinese with English abstract)]
- [27] LU Q Z, LIU Y, PENG J B, et al. Immersion test of loess in ground fissures in Shuanghuaishu, Shaanxi Province, China [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2020, 79(5): 2299–2312.
- [28] 乔建伟, 彭建兵, 邓亚虹, 等. 临汾盆地地裂缝基本特征研究 [J]. *工程地质学报*, 2015, 23(5): 856–865. [QIAO Jianwei, PENG Jianbing, DENG Yahong, et al. The study on basic characteristic of earth fissure in Linfen basin [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2015, 23(5): 856–865. (in Chinese with English abstract)]
- [29] AYALEW L, YAMAGISHI H, REIK G. Ground cracks in Ethiopian Rift Valley: facts and uncertainties [J]. *Engineering Geology*, 2004, 75(3/4): 309–324.
- [30] NGECE W M, NYAMBOK I O. Ground subsidence and its socio-economic implications on the population: a case study of the Nakuru area in Central Rift Valley, Kenya [J]. *Environmental Geology*, 2000, 39(6): 567–574.
- [31] 唐林, 徐正宣, 赵平. 埃塞铁路的火山系列工程地质问题及对策探讨 [J]. *四川建筑*, 2015, 35(1): 91–94. [TANG Lin, XU Zhengxuan, ZHAO Ping. Discussion on volcanic engineering geological problems and countermeasures of Ethiopian Railway [J]. *Sichuan Architecture*, 2015, 35(1): 91–94. (in Chinese)]
- [32] 王金星, 谭鹏, 李广明, 等. 肯尼亚日均降雨量推求 [J]. *工程建设与设计*, 2019(22): 120–122. [WANG Jinxing, TAN Peng, LI Guangming, et al. Daily average rainfall calculation of Kenya [J]. *Construction & Design for Engineering*, 2019(22): 120–122. (in Chinese with English abstract)]
- [33] BAKER B H, WOHLBERG J. Structure and evolution of the Kenya rift valley [J]. *Nature*, 1971, 229(5286): 538–542.