

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.04-11

黄土高填方场地裂缝的发育特征及分布规律

于永堂^{1,2,3}, 郑建国^{1,2,3}, 张继文^{1,2,4}, 刘智¹

(1. 机械工业勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710043; 2. 陕西省特殊岩土性质与处理重点实验室, 陕西 西安 710043; 3. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 4. 西安交通大学人居环境与建筑工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 裂缝是高填方场地常见隐患, 对工程场地安全和稳定造成影响。基于陕北某黄土高填方场地的裂缝监测和探测资料, 分析裂缝的发育特征、分布规律和时间变化, 从场地地形条件、填土厚度、变形特征等方面, 对裂缝的成因机制进行探讨。研究表明, 裂缝主要在填方区发育, 分布于填方厚度小于 15 m 及距离挖填分界线 20 m 以内的区域内, 以挖填交界过渡带(挖填厚度 ≤ 5 m) 为主, 裂缝走向与挖填界线或原地基的等高线近似一致; 裂缝宽度增大速率逐渐降低, 从出现到趋于稳定约需 3 个月时间; 裂缝受降水侵蚀、潜蚀等作用, 常伴生发育落水洞, 并沿填土与谷坡接茬面延伸发展, 距地面最大垂直深度可达 7.5 m; 沟谷地形、填土厚度差异等引起的差异沉降和水平位移是导致黄土高填方发生裂缝的主要原因。

关键词: 黄土; 高填方; 裂缝; 发育特征; 分布规律

中图分类号: TU 433

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2021)04-0085-08

Development and distribution characteristics of ground fissures in high loess filled ground

YU Yongtang^{1,2,3}, ZHENG Jianguo^{1,2,3}, ZHANG Jiwen^{1,2,4}, LIU Zhi¹

(1. China JK Institute of Engineering Investigation and Design Co. Ltd., Xi'an, Shaanxi 710043, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Behavior and Treatment for Special Rocks and Soils, Xi'an, Shaanxi 710043, China; 3. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China; 4. School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China)

Abstract: Fissures are common in high filled ground, it is a potential risk for the safety and stability of engineering sites. Based on the monitoring and detection data of ground fissures in a high loess filled ground in Northern Shaanxi, the development characteristics, distribution regularity and time variation of ground fissures are analyzed, and the formation mechanism of fissures is also discussed according to terrain conditions, thickness of filling and deformation characteristics. The results show that the fissures are mainly developed in the filling ground, and they are distributed in the areas with the thickness less than 15 m and 20 m away from the excavation-filling boundary, the main area is the transition zone between excavation and fill (thickness of excavation and filling is less than or equal to 5 m). The trend of fissures is approximately consistent with the excavation-filling boundary or the contour line of original foundation, the increasing rate of the fissure width decreases gradually, and it takes about 3 months from its appearance to stabilization. The fissures often develop with a sinkhole and extends along the joint surface between the filling and valley slope due to the effect of precipitation erosion and subsurface

收稿日期: 2020-11-27; 修订日期: 2020-12-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(41790442); 陕西省“三秦学者”创新团队支持计划资助(2013KCT-13); 陕西省技术创新引导专项(基金)计划项目(2020CGHJ-002)

第一作者: 于永堂(1983-), 男, 满族, 辽宁鞍山人, 博士, 高级工程师, 主要从事岩土工程监测与检测技术、湿陷性土工程性质评价与地基处理技术的研究与应用。E-mail: yuyongtang@126.com

erosion, with a vertical depth of 7.5 m. The differential settlement and horizontal displacement caused by the difference of gully topography and thickness of filling are the main causes of fissures in high loess filled ground.

Keywords: loess; high filled ground; ground fissure; development characteristics; distribution regularity

0 引言

近年来,西部黄土丘陵沟壑区为增加城市、机场、工业等建设用地,开展了大量黄土高填方工程。黄土高填方场地由于跨越不同地质单元,原始地形变化大、地质条件复杂、岩土软硬不同,填方薄厚不均,土方填筑完成后,场地中常有裂缝发育。当地表水沿裂缝下渗时,会使裂缝带附近地基产生显著的潜蚀、湿陷和软化等复杂的物理和化学变化过程,进一步加剧裂缝发育,使地表产生不均匀沉降,若不加以处理,将成为工程的安全隐患,引发地面设施的差异变形和开裂破坏,这无疑为黄土高填方工程十分关心的问题。因此,认清黄土高填方场地内裂缝的发育特征和分布规律,是裂缝防治的基础。

地裂缝是一种由多种因素引起的地表岩层或土体开裂,并在地面形成一定长度和宽度裂缝的宏观破坏现象,严重时会成为一种地质灾害^[1]。各领域对地裂缝研究的侧重点不同,如工程地质领域对裂缝的研究工作主要集中在新构造活动引起的裂缝^[2]、采矿区塌陷引起的裂缝^[3]、平原区抽取地下水引起的裂缝^[4]等;岩土工程领域对裂缝的研究主要集中在边坡^[5-6]、土石坝^[7-10]和路基^[11-12]等工程。在黄土高填方工程中,近年来国内学者围绕高填方场地变形^[13]、挖填边坡稳定性^[14]、地下水环境变化^[15]等做了大量研究工作,但鲜有关于黄土高填方场地裂缝的实测资料和分析研究成果。本文基于陕北某黄土高填方场地裂缝的实测资料,分析了裂缝的发育特征、分布规律和时间变化,相关成果可为裂缝防治提供科学依据,为黄土高填方地基技术标准的制订提供参考。

1 工程概况

某黄土高填方工程地处陕北黄土丘陵沟壑区,属于为增加城镇建设用地开展的大面积造地工程,一期规划面积 10.5 km²,南北向长度约 5.5 km,东西向宽度约 2.0 km,挖方体积约为 2.0×10⁸ m³,填方体积约为 1.6×10⁸ m³,最大挖方厚度约为 118 m,最大填方厚度约为 112 m。本工程自 2012 年 4 月 17 日起开工建设,2012 年 11 月 15 日—2013 年 3 月 15 日为冬歇停工期,至 2013 年 10 月底土方施工陆续完工,施工期历时约 1.5 年。

1.1 地质结构特征

典型的黄土高填方场地剖面示意图如图 1 所示。黄土高填方场地是由“三面”(原地基表面、填筑体表面和挖填边坡面)、“二体”(原地基体和填筑体)、“二水”(地下水和地表水)构成的特殊地质体,受原始沟谷地形影响,填土厚度差异较大,沟谷中部的填土厚度大,由沟谷底部向斜坡方向逐渐变薄。

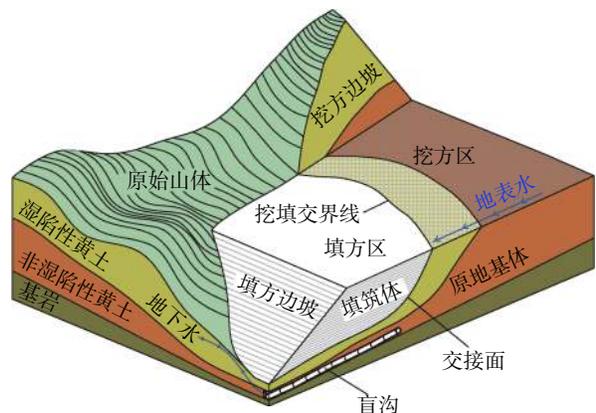


图 1 黄土高填方场地的剖面示意图

Fig. 1 Section diagram of high loess filled ground

1.2 地质条件概况

本工程原始场地受构造剥蚀作用,呈“U”形或“V”形,地貌单元属黄土梁、峁、沟壑地带。场地内主要出露地层为第四系、新近系和侏罗系,其中:第四系包括全新统洪积层粉土、上更新统马兰黄土、中更新统离石黄土;新近系岩性为棕红色、暗紫色黏土,含大量钙质结核,半胶结;侏罗系岩性为砂岩、泥岩互层。

1.3 工程措施概况

本工程沿原沟谷沟底设置了树枝状的地下盲沟排水系统,将地下水引出场外,控制地下水位稳定。原地基沟谷区的淤积土、湿陷性黄土、松散堆积物和沟谷斜坡接茬部位均采用强夯法处理。填筑体采用分层碾压法(冲击碾压、振动碾压)处理,填料主要来自于黄土梁峁区挖填线以上各土层,主要为上更新统黄土及古土壤、中更新统黄土及古土壤,压实质量采用重型击实试验控制,控制标准为压实系数不小于 0.93。

2 裂缝的监测与探测

本次对本工程试验场地内的裂缝进行监测与探测,

采取的方法及测点布置情况如下:

(1)裂缝表面特征测量:本工程试验场地土方填筑完成后,笔者自2013年11月中旬开始,对场地进行全区域巡视观察,并采用GPS-RTK、测尺对长度超过1 m、宽度超过5 mm的裂缝位置、长度和宽度进行了测量记录。

(2)裂缝内部特征探测:采用高密度电法探测典型裂缝发育区域地表下裂缝(含伴生落水洞)的发育情况,测试仪器为DUK-2A60,测试工作参照《水利水电工程物探规程》^[16],间隔系数为19,收敛系数设1,有效电极数为60个,采用温纳四极工作模式,测线上电极间距均为4 m。

(3)裂缝表面宽度监测:本次除在裂缝两侧设置固定标志点,采用钢尺测量标志点间的相对位移外,为了实现裂缝宽度变化的自动化监测,设计了一种电测式裂缝宽度监测装置,该装置由位移计、位移传递杆、套管、伸缩波纹管、扶正导向器、锚固板和数据自动采集传输系统等组成,其结构如图2所示,各组件说明如下:

①位移计:采用电感调频式位移传感器,量程为400 mm,精度为1‰FS。

②位移传递杆:采用外径26.9 mm无缝钢管加工,位移传递杆与锚固板连接。

③套管:采用外径53 mm的测斜管加工,内壁带有十字导槽。

④伸缩波纹管:采用内径为55 mm的金属波纹管,波纹管纵向能自由伸缩,外套于套管上,将套管与周围土体分开,防止泥土进入套管内。

⑤扶正导向器:由导向杆和导向轮组成,长度为50 cm,导向轮由扭簧撑开,导向轮位于导槽内,使位移传递杆位于套管轴线。

⑥锚固板:采用直径300 mm、厚度5 mm的钢板加工,由水泥砂浆浇筑到安装槽两端的坑槽中,使锚固板与裂缝两侧土体成为一体。

⑦数据自动采集传输系统:由数据采集控制模块、无线传输模块、太阳能供电系统、监控中心服务器等组成。

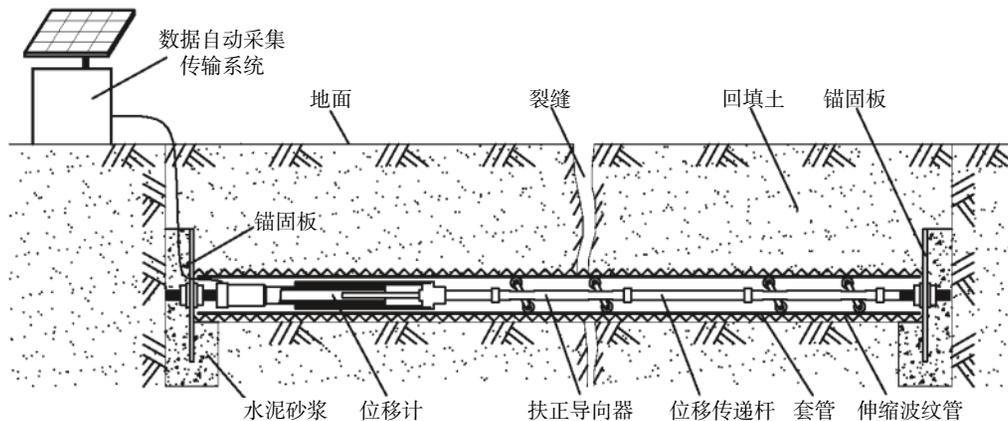


图2 电测式裂缝宽度监测装置结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of electronic measurement device for measuring width of ground fissures

本裂缝宽度监测装置的工作原理是:当裂缝宽度变化时,土层将带动锚固板同步变形,裂缝两侧锚固板之间发生相对位移,位移传递杆将相对位移传递给位移计进行测量,位移计前后两次测量值之差即为裂缝表面宽度的变化量。

试验场地于2013年11月15日起进入冬歇期停工,2013年12月14日在场地巡察时发现1B-LF1号裂缝,2013年12月17日在该裂缝处安装了裂缝表面宽度监测装置,裂缝宽度监测点布置情况如图3所示。

如图3所示,1B-LF1号裂缝上共设置了7组监测点,除监测位置LFJC-2采用电测式裂缝宽度监测装置外,其余监测位置均通过钢尺测量裂缝两侧固定标志点

间的相对位移变化,其中监测位置LFJC-0与LFJC-2用于对比两种监测方法的观测效果,二者之间水平相距0.4 m。裂缝表面宽度的监测工作,自2013年12月22日开始至2014年3月15日复工后结束。

3 裂缝发育特征与分布规律

3.1 裂缝的发育特征

试验场地中出现的裂缝有干缩裂缝、冻融裂缝、沉降裂缝等,其中干缩裂缝、冻融裂缝都发生浅表层,裂缝的长度较短和深度较浅,对工程影响很小,而沉降裂缝发育较多,且在地表下一定深度,对工程影响较大。试验场地内的典型沉降裂缝照片如图4所示。典型裂

缝形态与组合如图 5 所示。由图 5 可知,场地内裂缝的形态主要为直线状、弧线状、波纹状和分叉状等,平面组合方式主要有侧列式、侧现式和断续式等形式。

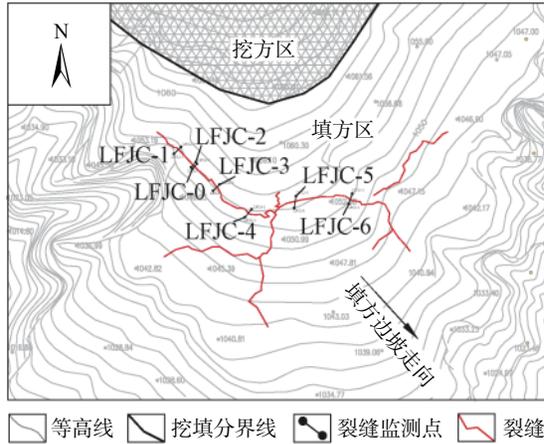


图 3 1B-LF1 号裂缝上裂缝宽度监测点的布置图
Fig. 3 Layout of monitoring positions



图 4 试验场地内的典型裂缝
Fig. 4 Typical fissures in the testing site

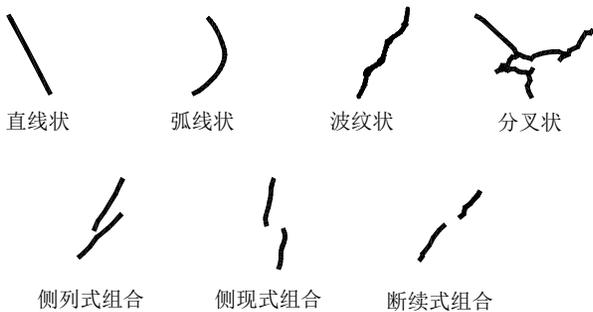


图 5 裂缝的典型形态与组合
Fig. 5 The typical forms and combinations of fissures

通过实地调查发现,裂缝的裂口呈上宽下窄的尖楔形,壁面粗糙不平,两壁无明显错动迹象,部分裂缝下部被上部风干或脱落的土颗粒填充,从地面肉眼可见部分出露深度一般不超过 2 m,但其向下部延伸可能更深。

由于黄土高填方场地中的裂缝带土体松散破碎,孔隙较大,当有地表水入渗时,裂缝带容易形成冲沟或低洼地带,而这些负地形又成为地表水的汇聚点和入渗的优势通道,为此,一些地势较低的区域,裂缝有时会伴生有塌陷落水洞。试验场地中某典型裂缝及伴生落水洞的现场照片如图 6 所示。为了查明该典型裂缝(含伴生落水洞)在地下的延伸情况,本次采用高密度电法对该裂缝的内部发育特征进行探测,探测线的布置情况如图 7 所示。



图 6 裂缝及伴生落水洞
Fig. 6 The fissures and associated sinkholes

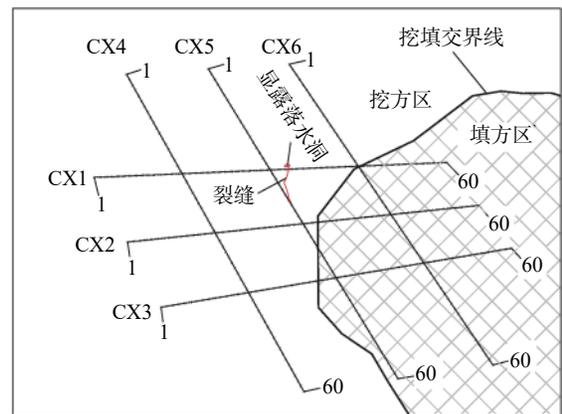


图 7 高密度电法探测线布置图
Fig. 7 Detection lines for high-density resistivity method

如图 7 所示,除测线 CX4 完全在挖方区外,其它测线 CX1、CX2、CX3、CX5、CX6 均跨越挖方区和填方区。图 8 为高密度电法反演电阻率剖面图。由 CX1 ~ CX6 测线的反演电阻率值范围统计可知,挖方区电阻率范围一般为 10 ~ 50 $\Omega \cdot m$,填方区电阻率变化范围一般为 40 ~ 90 $\Omega \cdot m$,填方区电阻率总体高于挖方区。CX4 测点无高阻异常区,表明该测线的地下无明显裂缝带或落水洞发育;CX1、CX3、CX5、CX6 在浅部地层(深度 5 m 范围内)有向上开口的密集、高阻半闭合圈;CX2 测线

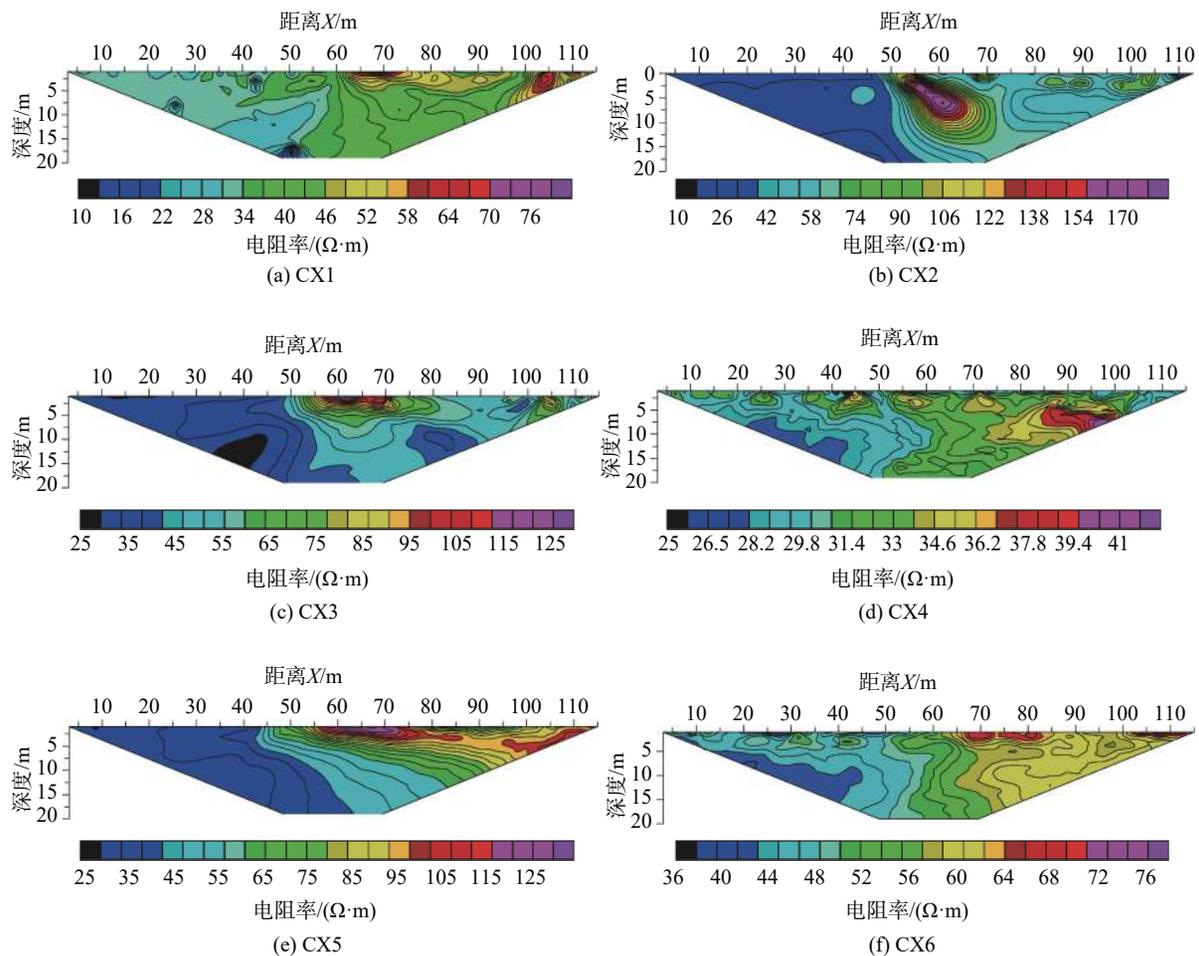


图8 测线的电阻率剖面图

Fig. 8 Resistivity profile of each detection line

横穿裂缝延伸线,当向地下供电探测时,电流线在距起点 50~70 m,深度 0~10 m 范围内,产生强烈的排斥作用,存在明显的高阻异常区,其电阻率达到 90~186 $\Omega\cdot\text{m}$,反映在地电剖面上电阻率等值线为闭合高阻圈。根据类似工程场地的探测经验,可初步判定该区域地面下可能存在隐伏落水洞,后经人工洛阳铲探测证实,6.5~7.5 m 处土层明显松散,洛阳铲头易于贯入。

综合各测线的电阻率测试结果可知,裂缝及伴生的隐伏落水洞(或松散填充体)主要沿原沟谷与填筑体接茬面顺谷坡发育,发育区域主要集中在测线 CX1、CX3 之间与测线 CX4、CX6 之间的各测线交汇形成四边形范围内,作为未来裂缝及其伴生落水洞采用强夯法处理的重点区域,强夯影响深度应不小于 8.0 m。

3.2 裂缝的分布规律

截止 2014 年 8 月 13 日,试验场地内共发现沉降裂缝 84 条,其中最长的裂缝延伸达 283 m,最大缝宽达 52 mm。裂缝的统计分析结果显示,分布在填方区的裂

缝占总数的 94%,而分布在挖方区的裂缝仅占总数的 6%。裂缝数量在不同填土厚度区间的分布情况如图 9 所示。填方厚度为 0~5 m、5~10 m、10~15 m、15~20 m 和 >20 m 区间内的裂缝数量分别占裂缝总数的 63.3%、25.3%、6.3%、0% 和 5.1%。通过统计填方区裂缝与挖填交界线距离,得到裂缝数量在不同距离区间的分布情况如图 10 所示。裂缝与挖填分界线距离为 0~5 m、5~10 m、10~15 m、15~20 m 和 >20 m 区间内的裂缝数量分别占裂缝总数的 19.0%、25.3%、15.2%、12.7% 和 27.9%。裂缝延伸长度的统计情况如图 11 所示。裂缝延展长度主要集中在 0~60 m,以 20~40 m 为最多(占裂缝总数的 40%),其余裂缝以 20 m 为差值区间,发育数量大致相当,裂缝的平均长度约 49 m。各裂缝最大张开宽度的统计结果如图 12 所示。由图可知,裂缝宽度普遍较小,其中宽度在 5~15 mm 的裂缝,超过总数的一半,裂缝的最大宽度约为 52 mm,平均约为 21 mm。

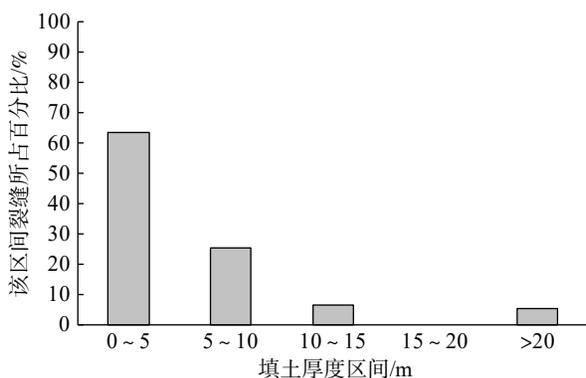


图 9 裂缝数量在不同填土厚度区间的分布

Fig. 9 The number of fissures in different intervals of filling thickness

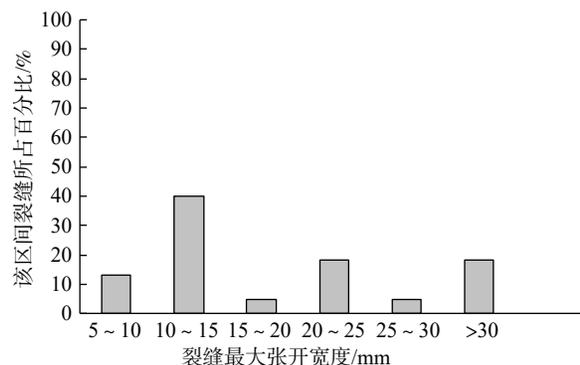


图 12 裂缝最大张开宽度情况统计

Fig. 12 Statistics of the maximum opening width of fissures

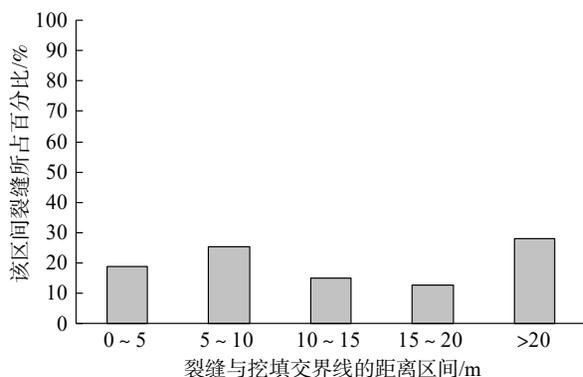


图 10 裂缝数量在不同距离区间的分布

Fig. 10 Number of fissures in different distance intervals from excavation-filling boundary

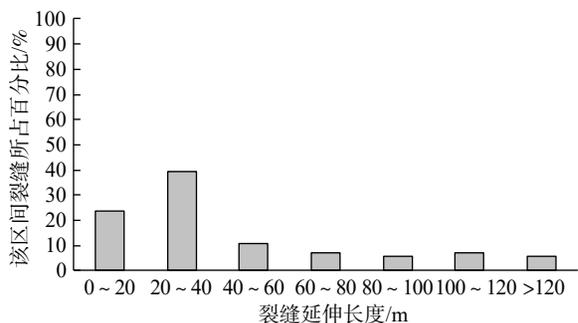


图 11 裂缝数量在不同长度区间的分布

Fig. 11 Number of fissures in different intervals of length

基于上述统计结果可知,裂缝主要发生在挖填分界线填方区一侧,填方厚度小于 15 m 以及距离挖填分界线 20 m 以内的条带状区域内,且以挖填交界面过渡带(挖填厚度 ≤ 5 m)范围为主。从裂缝分布及地形资料分析发现,裂缝的空间分布、发育时间和发育产状具有如下特点:

(1) 成带性:裂缝在空间分布上集中分布在挖填交界过渡带,在原地地形变化较大的地段一般会出现主干裂缝和伴生裂缝组成的裂缝带。

(2) 时效性:根据现场调查发现,填方竣工或阶段性停工初期(一般是 1 个月后才开始出现)是裂缝高发期,这时填方区会有较大的差异沉降,裂缝多在该时段集中出现,且有持续开裂、相互贯通的趋势。随着地基变形逐步稳定,因差异沉降引起的裂缝,出现的数量逐步减少。此外,由于填筑区域范围大,工段多,工作面分散,各工作面起始填筑标高不一,不可避免的存在工作面搭接,工作面搭接部位因填筑时序不同,产生差异沉降,形成的裂缝仅在施工停歇期出现,竣工后尚未发现。

(3) 方向性:裂缝发育产状与原地基地形有明显的对应关系,裂缝倾向大致与原沟谷坡体倾向近乎垂直,裂缝走向几乎与挖填界线或原地基等高线基本一致,并随原沟谷斜坡地形曲折变化。

3.3 裂缝表面宽度的变化规律

典型裂缝表面宽度的历时曲线如图 13 所示。由图可知,监测位置 LFJC-0 与 LFJC-2 的监测结果基本一致,表明设计的裂缝宽度监测新装置的测试结果可靠。裂缝表面宽度在停工初期变化较快,约 1 个月后裂缝表面宽度增大速率明显降低,并逐步趋于稳定。监测区域的裂缝表面宽度变化规律表明,裂缝从出现到趋于缓慢

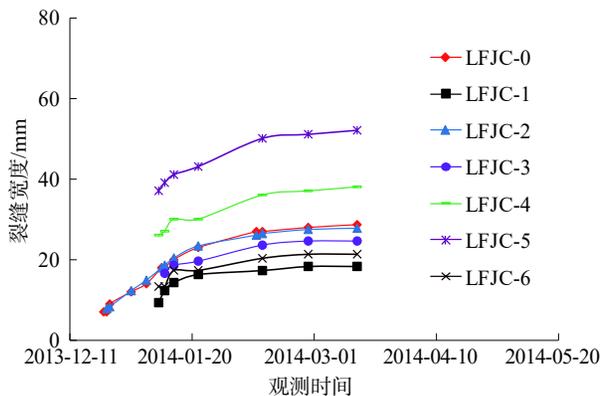


图 13 裂缝宽度随时间变化曲线

Fig. 13 Curves of fissures width with time

需要约 3 个月时间, 在此期间, 裂缝两侧的差异沉降增大较快, 对应裂缝宽度也将持续增大, 若过早的对裂缝进行处理, 则反而会因该区域的沉降尚未稳定, 显露裂缝大概率会再次出现。因此, 在裂缝处理前应防止地表水沿缝汇集下渗, 宜待裂缝宽度基本稳定后, 再对裂缝发育区域采取强夯处理。

3.4 裂缝形成机制的探讨

黄土高填方场地的沉降变形由原地基沉降和填筑体沉降两部分组成。原地基沟谷中存在人工填土层、湿陷性黄土层和淤积土层等, 虽然经过夯实处理, 但在上覆大厚度填土荷载作用下, 仍会产生较大的固结压缩沉降。填筑体为非饱和土, 采取分层填筑施工, 在自重压力的作用下会产生压密沉降, 虽然施工工期已完成大部分沉降变形, 但工后期仍会有工后沉降。

试验场地内某典型沟谷横断面的工后沉降曲线如图 14 所示。图中沟谷横断面方向的回填土厚度由沟谷中心向斜坡方向逐步减小, 对应沟谷横剖面方向的沉降变形从沟中线向沟谷两侧逐步减小, 呈现出中间大、两边小的盆腔形态, 在挖方区甚至有回弹变形。沟谷形的黄土高填方场地, 虽然沿原沟谷中心向沟谷两侧原地基土层厚度逐步增大, 但填土厚度逐步减小, 中部沉降仍大于两侧, 表明高填方沉降量主要受填土厚度控制。前人以沟谷地形中黄土高填方场地为原型, 开展的大型离心模型试验结果显示^[17]: 填筑体浅层变形较深层变形更为明显, 填筑体顶面沉降基本呈现下“凹”弯沉盆形式; 远离沟谷斜坡处的填土厚度相对均匀, 填土变形以竖直方向沉降为主, 而靠近沟谷斜坡位置, 土体还会发生指向沟谷中心方向的水平位移。上述变形特征, 会使挖填交界带附近产生较大的拉张应力, 当拉张应力超过土体的抗拉强度后, 最终导致挖填交界带附近形成裂缝(图 15)。

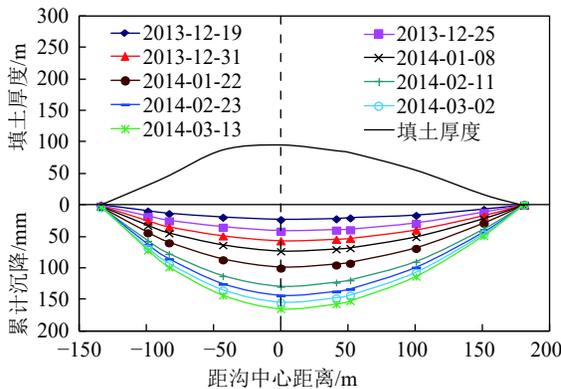


图 14 典型横断面的工后沉降曲线

Fig. 14 Curves of post-construction settlement of typical cross section

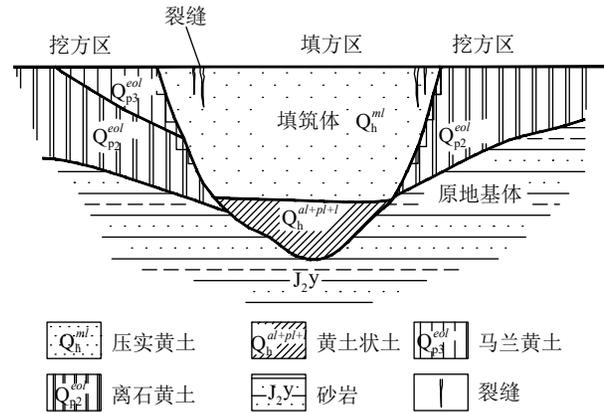


图 15 挖填交接带的裂缝示意图

Fig. 15 Schematic diagram of fissures in the transition zone between excavation and filling ground

4 结论

(1) 沟谷地形中的黄土高填方场地裂缝在平面形态上可分为直线状、弧线状、波纹状、交叉状等, 裂缝的空间分布具有成带性, 发育时间具有时效性, 发育产状具有方向性等特点。

(2) 裂缝主要分布于填方厚度小于 15 m 及距离挖填分界线 20 m 以内的区域内, 以挖填交界过渡带(挖填厚度 ≤ 5 m)为主, 裂缝走向与挖填界线或原地基的等高线近似一致。

(3) 典型裂缝的高密度电法探测结果显示, 试验场地裂缝及伴生的隐伏型落水洞主要沿原谷坡与填筑体接茬面发育, 对其进行强夯处理时, 强夯影响深度不应少于 8 m。

(4) 试验场地的裂缝出现在土方填筑施工停止 1 个月, 裂缝宽度增大速率逐渐降低, 从出现到趋于稳定约需 3 个月时间, 因此建议处理时机选择在裂缝宽度变化趋于稳定后实施。

(5) 沟谷地形、填土厚度变化引起的差异沉降和沟谷两侧填土发生朝向沟谷中心的水平位移, 导致挖填交界带土体内产生的拉张力超过土体抗拉强度, 是裂缝产生的主要原因。

参考文献 (References) :

[1] 王景明. 地裂缝及其灾害的理论与应用[M]. 西安: 陕西省科学技术出版社, 2000. [WANG Jingming. Theory of ground fissures hazards and its application[M]. Xi'an: Shaanxi Science & Technology Press, 2000.(in chinese)]

[2] 孟令超, 彭建兵, 卢全中, 等. 山西太原盆地地裂缝群发机制与深部构造关系 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(1): 76 - 85. [MENG Lingchao, PENG Jianbing, LU

- Quanzhong, et al. Relationship between mechanism of ground fissure group and deep tectonic structures in Taiyuan basin, Shanxi Province [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2019, 30(1): 76–85. (in Chinese with English abstract)
- [3] 王云广, 郭文兵. 采空塌陷区地表裂缝发育规律分析 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2017, 28(1): 89–95. [WANG Yunguang, GUO Wenbing. Analysis of ground fissure laws of mining subsidence [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2017, 28(1): 89–95. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 龚绪龙, 杨蕴, 朱锦旗, 等. 苏南平原区地裂缝现状及其需要解决的几个问题 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2015, 26(2): 103–109. [GONG Xulong, YANG Yun, ZHU Jinqi, et al. Ground fissures in south plain of Jiangsu province and related issues [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2015, 26(2): 103–109. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 黄涛, 罗喜元, 邬强, 等. 地表水入渗环境下边坡稳定性的模型试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(16): 2671–2675. [HUANG Tao, LUO Xiyuan, WU Qiang, et al. Model testing study on slope stability under environment of surface water permeation [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(16): 2671–2675. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 谭桔红, 晏鄂川. 水与裂隙对边坡稳定性的影响分析及工程应用 [J]. *山地学报*, 2004, 22(3): 373–377. [TAN Juhong, YAN Echuan. Influence and implication of water and fissure on slope stability [J]. *Journal of Mountain Science*, 2004, 22(3): 373–377. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 顾淦臣. 土石坝的裂缝和压实质量 [J]. *岩土工程学报*, 1982, 4(4): 56–67. [GU Ganchen. The fissures of earth-rock dams and density of compacted dam zone [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1982, 4(4): 56–67. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 张丙印, 张美聪, 孙逊. 土石坝横向裂缝的土工离心机模型试验研究 [J]. *岩土力学*, 2008, 29(5): 1254–1258. [ZHANG Bingyin, ZHANG Meicong, SUN Xun. Centrifugal modeling of transverse fissureing in earth core dams [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(5): 1254–1258. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 朱维新. 用离心模型研究土石坝心墙裂缝 [J]. *岩土工程学报*, 1994, 16(6): 82–95. [ZHU Weixin. Application of centrifuge to model fissureing of earth-rockfill dam core [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1994, 16(6): 82–95. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 张琰. 高土石坝拉张裂缝开展机理研究与数值模拟[D]. 北京: 清华大学, 2009. [ZHANG Yan. Mechanism study and numerical simulation of tensile fissure propagation in high earth and rockfill dam[D]. Beijing: Tsinghua University, 2009. (in chinese)]
- [11] 闫芙蓉, 范文, 邓龙胜, 等. 地表水沿裂缝带入渗对路基路面的影响 [J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2010, 30(2): 34–38. [YAN Furong, FAN Wen, DENG Longsheng. Influence of water seeping fracture and fissure on subgrade and pavement [J]. *Journal of Chang'an University(Natural Science Edition)*, 2010, 30(2): 34–38. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 俞清荣. 高填方路基纵向裂缝的预防及处理措施 [J]. *路基工程*, 2011, 155(2): 166–168. [YU Qingrong. Prevention and treatment measures of longitudinal fissures in high fill subgrade [J]. *Subgrade Engineering*, 2011, 155(2): 166–168. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 朱才辉, 李宁, 刘明振, 等. 吕梁机场黄土高填方地基工后沉降时空规律分析 [J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(2): 293–301. [ZHU Caihui, LI Ning, LIU Mingzhen, et al. Spatiotemporal laws of post-construction settlement of loess-filled foundation of LYULiang airport [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(2): 293–301. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 张硕, 裴向军, 黄润秋, 等. 降雨诱发黄土高填方支挡边坡失稳机理研究 [J]. *工程地质学报*, 2017, 25(4): 1094–1104. [ZHANG Shuo, PEI Xiangjun, HUANG Runqiu, et al. Rainfall induced instability mechanism of high embankment retaining loess slope [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2017, 25(4): 1094–1104. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 张继文, 于永堂, 李攀, 等. 黄土削崩填沟高填方地下水监测与分析 [J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2016, 48(4): 477–483. [ZHANG Jiwen, YU Yongtang, LI Pan, et al. Groundwater monitoring and analysis of high fill foundation in loess hilly-gully region [J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology(Natural Science Edition)*, 2016, 48(4): 477–483. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 中华人民共和国行业标准编写委员会. 水电水利工程物探规程: DL/T 5010-2005[S]. 北京: 中国电力出版社, 2005. [The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. Code for engineering geophysical exploration of hydropower and water resources: DL/T 5010-2005[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2005. (in chinese)]
- [17] 郑建国, 曹杰, 张继文, 等. 基于离心模型试验的黄土高填方沉降影响因素分析 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(3): 560–571. [ZHENG Jianguo, CAO Jie, ZHANG Jiwen, et al. Analysis of influencing factors of high loess-filled foundation based on centrifugal model tests [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(3): 560–571. (in Chinese with English abstract)]